

陈锋,董美莹,苏涛,等,2020. 雷达资料同化对一次浙江初春罕见飑线过程数值模拟的影响分析[J]. 气象,46(4):462-477.
Chen F,Dong M Y,Su T,et al,2020. Influence of radar data assimilation on the numerical simulation of a rare squall line in Zhejiang Province in early spring[J]. Meteor Mon,46(4):462-477(in Chinese).

雷达资料同化对一次浙江初春罕见飑线过程 数值模拟的影响分析^{*}

陈 锋 董美莹 苏 涛 冀春晓

浙江省气象科学研究所,杭州 310008

提 要:以 2018 年 3 月 4 日影响浙江的初春罕见飑线过程为例,利用 WRF 模式与 GSI-3DVar 同化系统开展了雷达资料同化对重大强对流天气的影响研究,分析了雷达资料同化对此次飑线过程的模拟改进作用和可能影响过程,对比了雷达反射率因子和雷达径向速度的同化效果,探讨了不同数量和位置的雷达资料同化对模拟效果的影响。结果表明:雷达资料(尤其是反射率因子)同化有效改善了飑线边界层特征的模拟,从而改进了模式对飑线过程中组合反射率因子、降水、大风等发展演变的模拟效果。雷达反射率因子同化通过直接调整水凝物质含量,修正风暴中降水模拟及由此引起的蒸发冷却,形成更接近实际的强冷池,进而产生了比雷达径向速度同化更大的正贡献。相对于同化非关键区域的雷达资料,同化飑线过程上游关键区域的雷达观测所包含的重要中小尺度信息,对飑线过程模拟效果提升更为重要。

关键词: 雷达资料同化,飑线,数值模拟

中图分类号: P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.04.002

Influence of Radar Data Assimilation on the Numerical Simulation of a Rare Squall Line in Zhejiang Province in Early Spring

CHEN Feng DONG Meiyang SU Tao JI Chunxiao

Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310008

Abstract: The impact of radar data assimilation on the numerical simulation of a rare squall line in Zhejiang Province on 4 March 2018 was studied in this paper. The weather research and forecasting (WRF) model and the gridpoint statistical interpolation three-dimensional variational (GSI-3DVar) data assimilation system were used. In this study, multiple-Doppler radar data assimilation was applied to initialize a squall-line convective system, and its impact on the simulation was evaluated and discussed. The results showed as follows. Radar data (especially the radar reflectivity) effectively improve the simulation of the boundary layer characteristics of the squall line, which further improves the simulation effect of the composite reflectivity, precipitation and wind process of the squall line. Radar reflectivity assimilation, which directly adjusts the hydrometeors, improves the precipitation simulation in the storm and its induced evaporative cooling and forms a more intense cold pool close to reality, thus improving the simulation of the squall line. The radar reflectivity assimilation has a greater contribution than the radial velocity assimilation. Relative to assimilating radar data in non-critical areas, assimilating the small and medium-scale information carried by radar

^{*} 中国气象局气象预报业务关键技术研发专项[YBGJXM(2018)02-13]、浙江省气象科技计划项目(2018ZD01、2017ZD04)、浙江省科技计划项目(2017C03035)和浙江省基础公益研究计划项目(LGF20D050001)共同资助

2019 年 1 月 8 日收稿; 2019 年 9 月 9 日收修定稿

第一作者:陈锋,主要从事数值模式及资料同化研究. Email:fchen_zj@163.com

observations in key areas is more important for improving the simulation of the squall line.

Key words: radar data assimilation, squall line, numerical simulation

引 言

飊线是指带状雷暴群所构成的风向、风速突变的中小尺度强对流天气(Maddox, 1980)。飊线来临时会出现风向突变、风力急增、气压猛升、气温骤降等强天气现象,常伴有雷电、暴雨、大风、冰雹和龙卷风等剧烈的灾害性天气过程(寿绍文等, 2003)。因此,国内外研究者对飊线的生成、发展、消亡、内部结构、雷达回波特征等开展了很多深入研究(Newton, 1950; 1966; Fujita, 1955; Ludlam, 1963; Hane, 1973; Bradberry, 1981; Seitter and Kuo, 1983; Physick et al, 1985; Houze et al, 1989; 张群等, 2001; 冯晋勤等, 2006; 杨晓霞等, 2007; Zhang and Fritsch, 1986; Pandya et al, 2010; 于庚康等, 2013; French and Parker, 2014; 闵锦忠等, 2015; 盛杰等, 2019; 罗琪等, 2019)。Thorpe et al(1982)、Wakimoto(1982)、Bluestein and Jain(1985)、Bluestein et al(1987)和 Mueller and Carbone(1987)研究表明垂直于飊线的环境垂直风切变和飊线后方的冷池是飊线发展演变的关键因子。在这些观测事实和理论模型的基础上, Rotunno et al(1988)和 Weisman et al(1988)提出了描述飊线发展传播的“RKW 理论”,指出冷池与低层垂直风切变的相互作用直接与飊线前沿气流垂直抬升的高度和垂直速度的大小相关,是飊线前方不断触发新对流单体最为重要的影响因子,从而决定了整个飊线系统的发展强度和生命史。这一理论亦被多项研究所验证(Weisman and Rotunno, 2005; Bryan et al, 2006; 陈明轩和王迎春, 2012)。

随着大气数值模式和资料同化技术的进步,数值模拟试验已成为研究飊线的重要手段。近年来,国外学者 Redelsperger and Lafore(1988)、Zhang et al(1989)、Zhang and Gao(1989)、Cram et al(1992)、Belair and Mailhot(2001)和 Bryan and Morrison(2012)利用数值模拟对飊线开展了许多深入的研究,国内学者慕熙昱等(2007)、陈业国等(2009)、王晓芳等(2010)、沈杭锋等(2010)、陈明轩和王迎春(2012)、李娜等(2013)、袁招洪(2015)、张哲等(2016; 2018)、周围等(2018)和张弛等(2019)也

在这方面做了一些有益探索。这些研究多集中于利用高分辨率观测资料或数值模拟资料来研究飊线的发生发展、内部结构、移动和组织形式等机理,而对如何利用资料同化改进飊线模拟涉及不多。Xiao and Sun(2007)利用 WRF-3DVar 循环同化多部雷达,改进了 IHOP_2002 计划中一次飊线过程的短时降水模拟。张入财等(2009)利用 WRF-3DVar 系统开展同化对比试验,结果表明同化地面观测资料可以有效地提高模式对飊线系统模拟效果。盛春岩等(2009)基于 ADAS 系统开展对比试验,指出雷达资料同化,尤其是反射率因子同化,对飊线地面中尺度系统的模拟有明显改进作用。高士博等(2016)采用 EnSRF(ensemble square root filter)方法同化多普勒天气雷达资料,并将分析得到的集合成员作为初始场进行集合预报,结果显示大部分集合成员的分析场能够较准确地再现飊线的热力场、动力场和微物理的细致特征,并且模拟出飊线后部的层云结构。郑淋淋等(2019)在利用集合卡尔曼滤波方法(EnKF)同化雷达径向风、雷达反演风和 GPS 水汽资料的基础上,采用雷达反射率资料对一次飊线过程的初始水汽场进行调整,有效改进了飊线强度和位置的模拟效果。

鉴于飊线过程的重大致灾性、当前研究现状中雷达资料同化对飊线过程影响研究工作的缺乏和实际业务预报中的困难,本文以 2018 年初春浙江罕见飊线过程为例,采用 GSI-3DVar 同化系统和 WRF 模式开展资料同化和数值模拟,并根据模式输出的高分辨率资料分析雷达资料同化对此次飊线过程模拟的影响,对比雷达反射率因子和雷达径向速度的同化效果,探讨不同数量和位置的雷达资料同化对模拟效果的影响。

1 飊线个例概况

此次飊线过程于 2018 年 3 月 4 日 14 时(北京时,下同)发生于江西省西部,然后逐步发展和快速向东北方向移动,大约于 17:30 开始影响浙江省,继续维持到 20 时后,逐渐减弱向东偏北方向移入东海(图 1,黑色虚线为对应时刻飊线的大致位置,其确定方法为:采用距离整点时刻最近的 6 min 雷达基

数据进行组网拼图,以雷达组合反射率最强位置确定飑线的大致位置)。根据 Leary and Houze (1979)对飑线生命史的分类,飑线大约在 15 时发展成熟,影响浙江时已处于成熟阶段,并逐渐消亡。据观测资料诊断分析表明,此次过程是在高空急流辐散区、低空西南急流轴前端、低涡南侧的暖区之中发展起来的(沈杭锋等, 2018)。充沛的水汽输送和能量为强对流的发生提供了有利条件;强的垂直风切变使得飑线移动前方对流层低层有强的动力不稳定;强的地面冷池与飑线前暖空气之间构成了强的水平温度梯度,推动系统快速移动。飑线经过时气压涌升,带来了雷暴、短时暴雨、冰雹和地面极端大风等灾害性天气。

这次过程具有发生时间早(当年杭州气象意义上的入春日期是 3 月 11 日)、移速快(以逐小时雷达组合反射率估算,平均移动速度约为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)、范围广(从湖南、江西边界一直到上海)、致灾强(以大风、短时暴雨、冰雹为主)等特点。图 1 中强天气分布显示,随着飑线向东北方向移动,飑线主体周围出现了大范围的短时强降水(雨强 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)和极端大风(小时极大风速 $\geq 24.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。此次

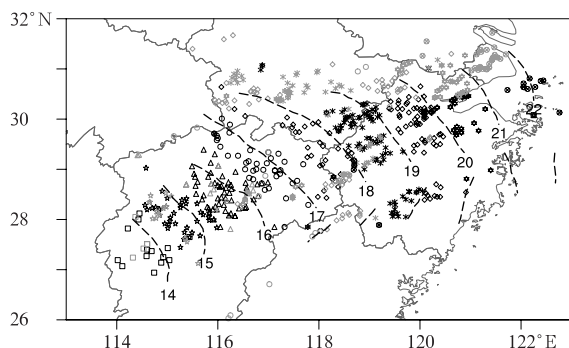


图 1 2018 年 3 月 4 日 14—22 时

强天气实况分布示意图

(虚线为根据雷达组合反射率定位的飑线位置,下同;黑色符号表示小时极大风速 $\geq 24.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的站点,灰色符号表示雨强 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的站点,不同形状对应不同的时刻)

Fig. 1 Observed severe weather from 14:00 BT to 22:00 BT on 4 March 2018

(Dashed line represents the squall line obtained from the radar composite reflectivity, the same as below; black symbols represent the stations with hourly maximum wind velocity $\geq 24.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; grey symbols represent the stations with hourly precipitation $\geq 20 \text{ mm}$; different shapes correspond different times)

过程虽有短时强降水出现,但主要致灾因子为大风,在江西、浙江境内均有 14 级以上大风出现,在江西鄱阳湖甚至出现了 17 级($63.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的极端大风,造成两省共有 13 人死亡和严重的经济损失。

2 数值试验方案设计

2.1 模式配置

选用美国国家大气研究中心(NCAR)等机构开发的 WRF-ARW V3. 7. 1 (<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users>; Skamarock et al, 2008)和美国国家环境预报中心(NCEP)开发的 GSI-3DVAR V3.4(Hu et al, 2015)作为预报模式和资料同化系统,研究区域与浙江省快速更新同化业务系统(邱金晶等, 2015)一致,采用两层嵌套网格,大区域以(32°N , 117°E)为中心,格点数为 265×265 ,水平分辨率为 9 km ,小区域格点数为 205×187 ,水平分辨率为 3 km ,垂直层数为 35 层,模式顶高为 50 hPa (图 2)。使用的主要物理参数化方案有 BMJ 积云对流方案(仅大区域;Janjić, 1994),Thompson 云微物理方案(Thompson et al, 2008),RRTMG 短波和

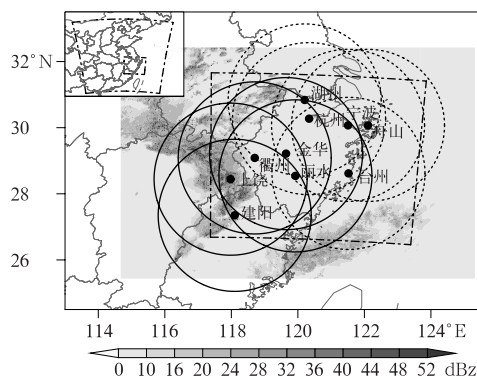


图 2 模拟区域、雷达站位置及 2018 年 3 月 4 日 17 时的组合反射率(填色)

(圆点为雷达站位置;圆圈表示雷达最大覆盖范围;实线为 A 组雷达,虚线为 B 组雷达)

Fig. 2 Model domain, positions of Doppler radars, and radar composite reflectivity at 17:00 BT 4 March 2018

(black dots: radar stations, circles: maximum coverage of radar, solid line: Group A, dotted line: Group B)

长波辐射方案 (Iacono et al, 2008),修正的 Monin-Obukhov 表层方案(Jiménez et al, 2012),YSU 边界层方案(Hong et al, 2006),以及 Noah 陆面方案(Chen and Dudhia, 2001)。初始背景场资料(包括初始条件和边界条件)由 NCEP/NCAR 提供的 Final Operational Global Analysis (FNL)再分析资料每 6 小时一次的 $1.0^{\circ}\times 1.0^{\circ}$ 再分析资料(National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U. S. Department of Commerce, 2018)通过 WPS 初始化模块插值获取。

2.2 观测资料

本研究用于同化的观测资料包括常规资料和多普勒雷达资料。常规资料主要来自于 NCEP 提供的 Global Data Assimilation System (GDAS, www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/gdas)观测数据,包括地面天气站点报(SYNOP)、机场地面报(METAR)、船舶和浮标观测(SHIP+BUOY)、全球 GTS 探空观测数据(Rawinsonde)、飞机报文观测(AMDAR)、卫星云导风(SATWND)等常规观测资料。雷达资料主要来自于浙江省气象信息中心提供的浙江省及其周边地区的 10 部多普勒 SA/SB 波段雷达的观测数据,包括上饶、建阳、衢州、丽水、金华、杭州、湖州、宁波、台州、舟山(分布位置见图 2),其观测要素为雷达反射率因子和径向速度。另外,浙江省及其周边区域约 4000 多个地面自动站的小时降水、小时整点气温和小时极大/最大风速将用于验证模拟效果,其站点平均空间分辨率为 6~7 km。已有研究表明,在较高空间密度情况下,不同插值方法对结果影响有限(Ikeda et al, 2010; 许

变等, 2017)。因此,在定量评估降水时,本研究采用简单易行的反距离权重方法将站点数据插值到模式格点上。

2.3 试验设计

为探讨雷达资料同化对本次飊线过程预报的影响,本研究设计了 3 组共 6 个数值试验(表 1)。

(1) 第一组试验:包括一个控制试验(CTL)和一个同化试验(RFRV),用于对比分析有无雷达资料同化对模拟结果的影响。

1) 控制试验(CTL):使用 WPS 从 FNL 再分析资料插值处理得到 2018 年 3 月 4 日 14 时的插值场作为初始背景场,并在 14 时由 GSI-3DVar 同化 GDAS 常规资料,然后以 14 时分析场作为初始场,向前积分预报 8 h 至 22 时。

2) 同化试验(RFRV):同 CTL 试验,但从 14 时开始积分 3 h(即 17 时)后,采用云分析方法(Hu et al, 2006a;2006b)同化 10 部雷达的反射率因子,同时采用 IVAP 方法(Liang, 2007; Chen et al, 2017)同化 10 部雷达的径向速度资料,然后以 17 时同化后的分析场作为初始场,向前积分预报 5 h 至 22 时。

(2) 第二组试验:包括两个同化试验(RF 和 RV),用于对比分析仅同化雷达反射率因子或仅同化雷达径向速度对模拟结果的影响。

1) 同化试验(RF):同 RFRV 试验,但在 17 时仅同化反射率因子。

2) 同化试验(RV):同 RFRV 试验,但在 17 时仅同化径向速度。

(3) 第三组试验:包括两个同化试验(Group A

表 1 数值试验配置方案
Table 1 Numerical test configuration scheme

试验组	试验名称	是否同化反 射率因子	是否同化 径向速度	同化雷达数目	试验目的
第一组	CTL	否	否	无	对比两个方案,分析雷达资料同化对模拟结果的影响
	RFRV	是	是	所有 10 部雷达	
第二组	RF	是	否	所有 10 部雷达	结合 CTL 和 RFRV 试验,对比分析仅同化雷达反射率因子或仅同化雷达径向速度对模拟结果的影响
	RV	否	是	所有 10 部雷达	
第三组	Group A	是	是	上饶、建阳、衢州、丽水、 金华共 5 部雷达	结合 CTL 和 RFRV 试验,对比分析关键区域雷达与非关键区域雷达资料同化对模拟结果的影响
	Group B	是	是	杭州、湖州、宁波、台州、 舟山共 5 部雷达	

和 Group B), 用于对比分析关键区域(该时刻包含天气过程观测信息的飑线前后 230 km 内的区域)雷达与非关键区域雷达(关键区域外的区域)资料同化对模拟结果的影响。

1) 同化试验(Group A): 同 RFRV 试验, 但在 17 时仅同化上饶、建阳、衢州、丽水、金华这 5 部覆盖关键区域的雷达反射率因子和径向速度。

2) 同化试验(Group B): 同 RFRV 试验, 但在 17 时仅同化杭州、湖州、宁波、台州、舟山这 5 部覆盖非关键区域的雷达反射率因子和径向速度。

3 模拟结果分析

本文目的为探讨雷达资料对此次飑线过程模拟的影响, 因此主要从雷达资料同化与否对模拟结果的影响、同化不同观测要素(雷达反射率因子和雷达径向速度)对模拟结果的影响、同化不同数量和位置的雷达资料对模拟结果的影响这 3 个方面开展对比研究。

3.1 雷达资料同化对模拟结果的影响

图 3 给出了实况和模式模拟的飑线回波演变过程。实况显示, 此次飑线从 3 月 4 日 17 时开始影响浙江省后, 以约 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度向东偏北方向移动, 经历了继续发展维持(图 3a₁, 3b₁)和逐渐减弱消亡(图 3c₁~3e₁)两个阶段。在 18 时和 19 时, 雷达组合反射率依然呈现飑线典型的弓形回波形态(图 3a₁, 3b₁), 之后回波开始分裂成南北两段(图 3c₁), 北段逐渐与冷空气结合, 强度基本维持, 南段由东北—西南走向逐渐转为南北走向, 并逐渐减弱出海。CTL 试验模拟的雷达组合反射率偏低, 回波形态呈东北—西南走向, 对于弓形南段的回波模拟完全缺失, 并没有很好地模拟出暖区飑线, 而是过早地估计了苏南、皖南一带冷空气南下所形成的锋面对流过程(图 3a₂~3e₂)。相比之下, 同时同化雷达反射率因子和径向速度后的 RFRV 试验, 模拟的雷达组合反射率虽然在强度上仍略比实况偏低、模拟的南段飑线消亡时间偏早, 但基本模拟出了飑线的弓形回波形态、由西南向东北快速移动, 以及先维持发展后逐渐消亡的演变过程(图 3a₃~3e₃)。

此次飑线过程为浙江省带来了较大的风雨影

响。降水主要出现在飑线经过之处, 小时累计降水量有规律地分布于时段末飑线位置的后方(图 4a₁~4e₁)。CTL 试验模拟的降水主要集中在组合反射率大值区, 由于过早地估计了苏南、皖南一带冷空气南下, 所形成的锋面对流雨带主要呈东北—西南走向, 与实况差异较大(图 4a₂~4e₂)。而 RFRV 试验在同化雷达资料后, 模拟的降水强度和雨带空间分布更符合实况(图 4a₃~4e₃)。雷达资料同化对飑线大风模拟也有较为明显的改进(图 5)。实况观测到的小时最大风速主要出现在飑线经过的区域, 即小时极大风速区域位于时段末飑线位置的后方, 风速在 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上(图 5a₁~5e₁)。CTL 试验模拟的大风位置与反射率和降水类似, 由于模拟的锋面位置和走向偏差, 大风的落区也呈东北—西南走向, 与实况差异较大(图 5a₂~5e₂)。而 RFRV 试验能较好地模拟出飑线大风的落区和移动方向, 虽然在量级上与实况观测到的极大风速值还有一定的差距, 但对预报来说已经有较好的指示作用(图 5a₃~5e₃)。

对整点雷达组合反射率、小时累计降水量和小时极大风速的定量评估显示, 雷达资料同化对模拟结果的改进明显(图 6)。RFRV 试验模拟的 3 个要素与实况的空间相关系数几乎在所有时刻都比 CTL 试验结果有明显提高: CTL 试验模拟的 3 个要素在 18—22 时平均的空间相关系数分别为 0.25, 0.16 和 0.44, 而 RFRV 试验的相关系数分别为 0.39, 0.30 和 0.51。这说明同化雷达资料后, 模式对飑线的整体空间分布有了明显改进。另外, 雷达资料同化对强回波、强降水和大风的 TS 评分(雷达组合反射率的评分量级为 $\geq 40 \text{ dBz}$, 小时降水量的评分量级为 $\geq 10 \text{ mm}$, 小时最大风速的评分量级 $\geq 13.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)也有明显提升: CTL 试验模拟的三个要素在 18—22 时平均的 TS 评分分别为 0.02, 0.03 和 0.02, 而 RFRV 试验的 TS 评分分别为 0.04, 0.06 和 0.05。这说明雷达资料较好地改进了飑线强度的模拟, 包括反射率、降水量和风速。

3.2 雷达资料同化对飑线边界层特征模拟的影响

低层环境水平风的垂直风切变是强对流天气发生的重要环境条件之一, 也是影响飑线维持发展的必要特征(Newton, 1950; 1966; Fujita, 1955;

Ludlam, 1963; Thorpe et al, 1982; Bluestein and Jain, 1985; Bluestein et al, 1987)。图 7 给出了 CTL 试验和 RFRV 试验模拟的逐小时 0~3 km 垂

直风切变和 3 km 高度上的水平辐合。CTL 试验模拟的垂直风切变相对于实际飑线位置分布没有规律,而RFRV试验模拟的垂直风切变在飑线前方约

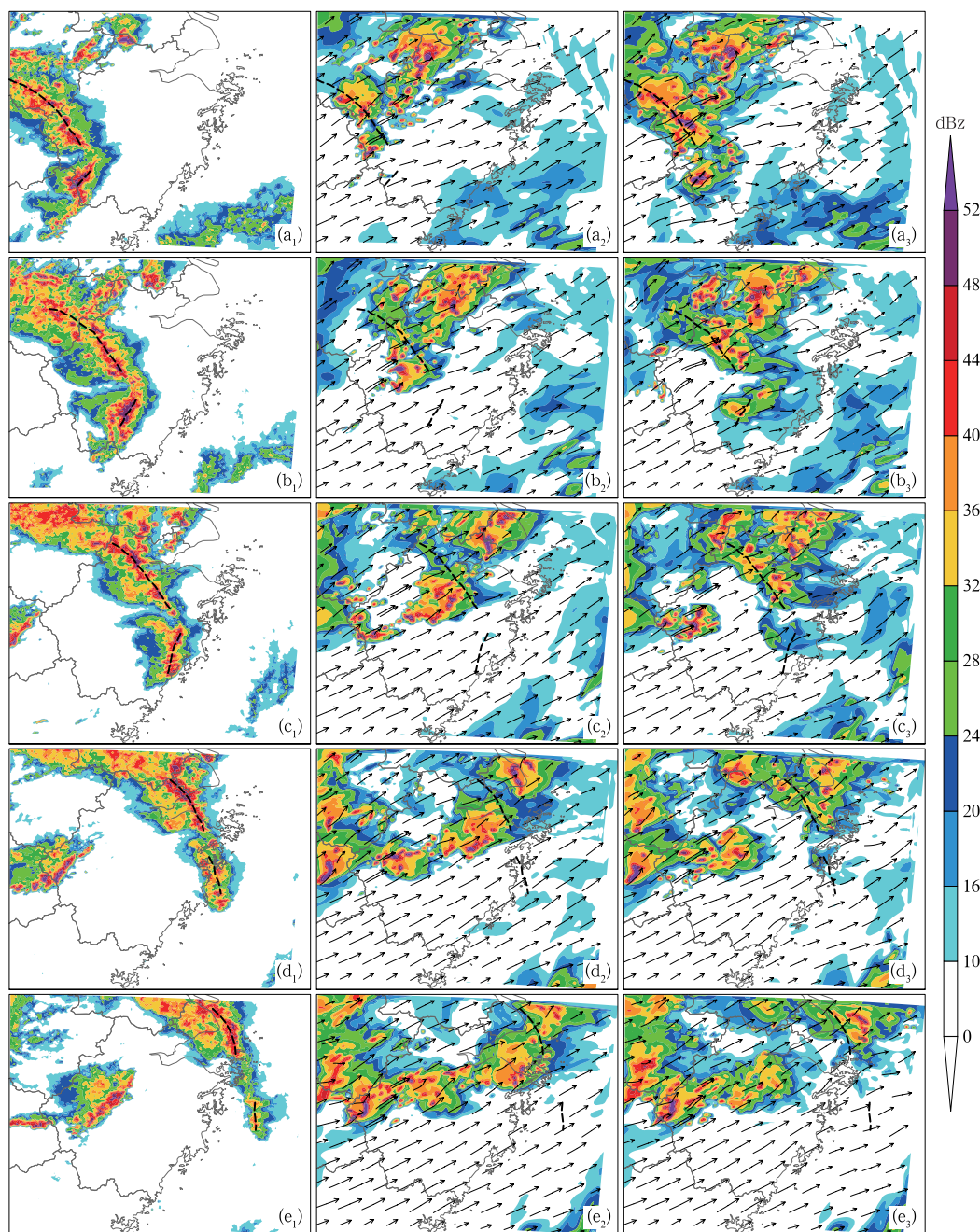


图 3 观测和模式模拟的 2018 年 3 月 4 日(a)18 时,(b)19 时,(c)20 时,(d)21 时,(e)22 时的逐小时雷达组合反射率(填色)和 3 km 高度上的风场(矢量,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

($a_1 \sim e_1$) 观测, ($a_2 \sim e_2$) CTL 试验, ($a_3 \sim e_3$) RFRV 试验

Fig. 3 Observed and simulated hourly radar composite reflectivity (shaded area) and wind fields (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 3 km height at (a) 18:00 BT, (b) 19:00 BT, (c) 20:00 BT, (d) 21:00 BT, (e) 22:00 BT 4 March 2018

($a_1 \sim e_1$) OBS, ($a_2 \sim e_2$) CTL, ($a_3 \sim e_3$) RFRV

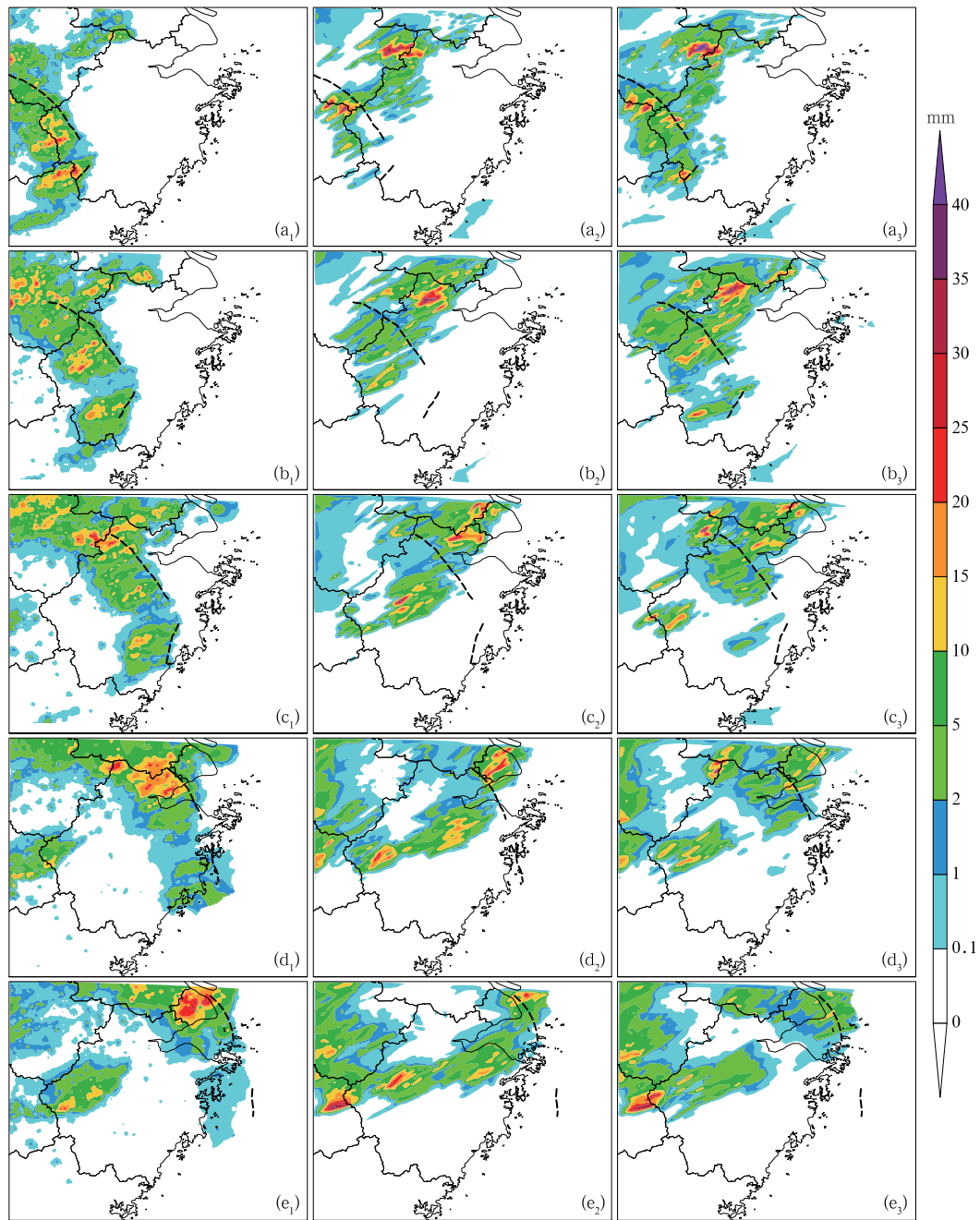


图 4 同图 3, 但为逐小时累计降水量

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for hourly accumulated precipitation

50~100 km 处有 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的大值区, 这与已有的飊线研究的结论一致 (Thorpe et al, 1982; 陈明轩和王迎春, 2012)。需要解释的是 RFRV 试验在飊线的后方也出现了较大的垂直风切变, 这是因为此次飊线处于强盛的低空西南急流区, 飊线冷池所产生的后向出流减弱了近地面低层的西南风, 导致垂直风切变增大。Thorpe et al (1982) 和 Weisman et al (1988) 的研究表明, 影响飊线发展的主要

因素是飊线前 0~3 km 的垂直风切变。雷达资料同化 (主要是径向速度) 改进了 RFRV 试验对飊线前的垂直风切变的模拟, 有利于更为准确地模拟飊线的结构和发展移动过程。同时, CTL 试验模拟的 3 km 高度上的水平辐合大值区分布与雷达组合反射率大值区较为一致 (图 3a₂~3e₂), 呈东北—西南向分布; 而 RFRV 试验在实况飊线附近模拟了较强的辐合区。这说明了雷达资料同化从动力场的垂直

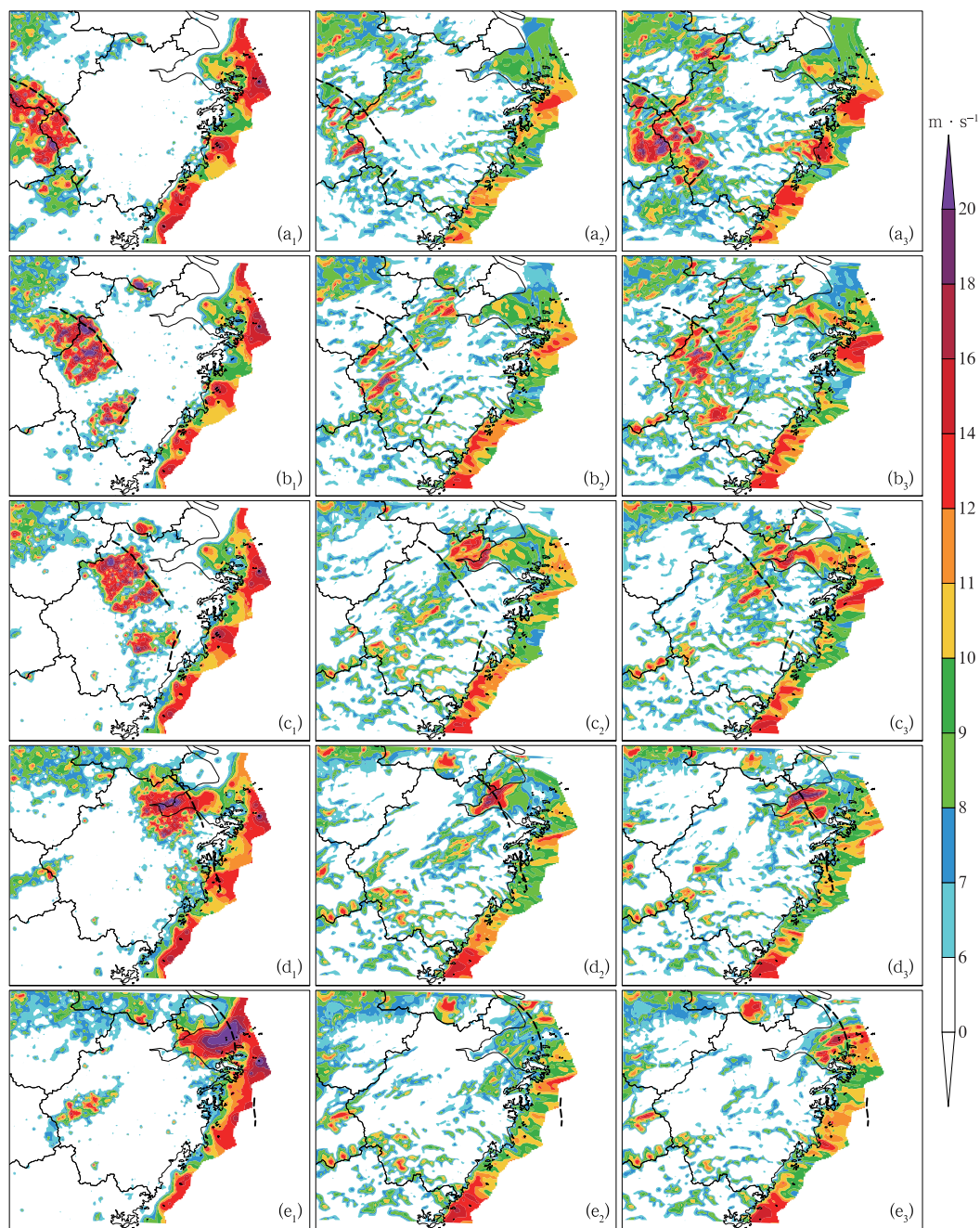


图5 同图3,但为小时最大风速

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for hourly maximum wind speed

结构和水平分布上均对飑线过程有了一定的改进。

近地面冷池是飑线风暴另一个重要的边界层特征。从地面实况分析可以看到(图 8a₁~8e₁),飑线后侧有明显的冷池存在,尤其是 18 时和 19 时,中心最大值达 -12°C 。伴随着冷池的出现,飑线后方低层出现冷高压,产生两侧出流,流向飑线前方一侧的出流在飑线前垂直上升产生负的涡度,有利于触发

新的风暴单体。CTL 试验模拟的冷池位置偏差较大,产生的气压差位置偏差也大,导致了模拟的较大误差(图 8a₂~8e₂)。RFRV 试验在同化雷达资料后,对冷池模拟虽然与实况还有一定差距,但相比 CTL 试验有了较为明显的改进(冷池模拟的改进主要是雷达反射率因子同化改进了降水及由此引起的蒸发冷却,导致冷空气不断下沉扩展并在近地面堆

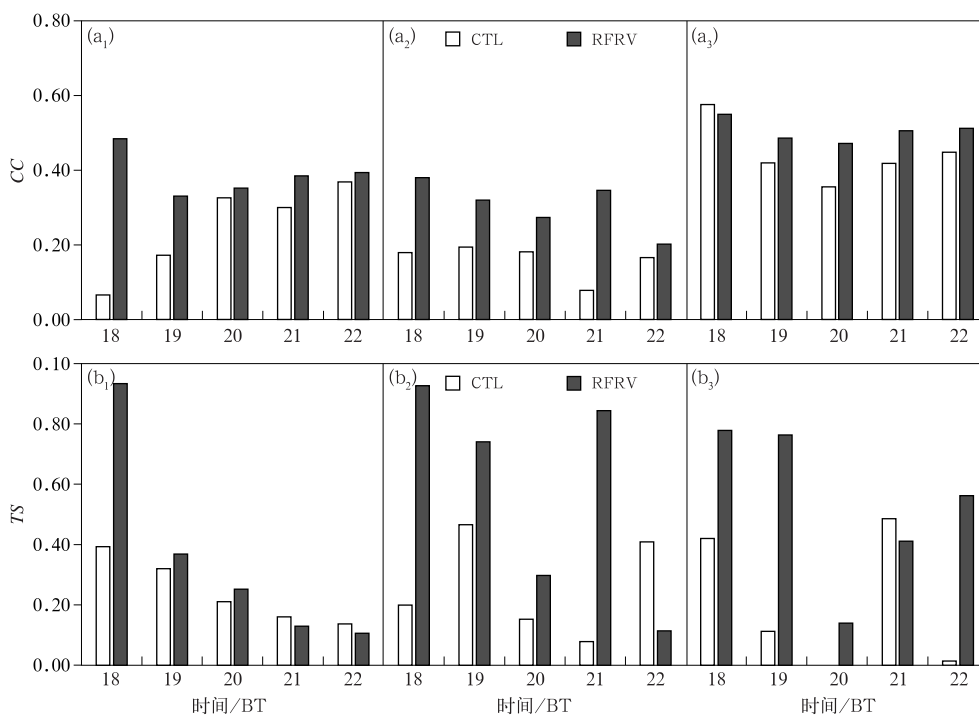


图 6 2018 年 3 月 4 日 18—22 时各试验模拟的 (a_1, b_1) 雷达组合反射率、 (a_2, b_2) 小时降水量和 (a_3, b_3) 小时最大风速与实况观测的(a)空间相关系数和(b)TS 评分

Fig. 6 (a) Spatial correlation coefficient and (b) TS score of simulated (a_1, b_1) radar composite reflectivity, (a_2, b_2) hourly accumulated precipitation, and (a_3, b_3) hourly maximum wind speed from 18:00 BT to 22:00 BT 4 March 2018

积,具体分析见 3.3 节),这是模拟结果改进的一个重要原因(图 8a₃~8e₃)。

图 9b 和 9c 为沿图 7b₁ 中蓝色直线的模拟雷达反射率、变温和垂直于飑线的风场。对比雷达观测到的反射率剖面(图 9a)可以看到,CTL 试验(图 9b)模拟的反射率偏小且偏离距离实际飑线位置,相应的冷池位置处于强回波的后方且强度较弱。相比而言,RFRV 试验(图 9c)在实际飑线位置附近模拟了更强的雷达反射率,同时也模拟了更为强盛的冷池,深厚的冷池伴随着飑线前方低层较强的垂直风切变,触发其前沿空气产生较强的垂直上升运动,从而产生了激烈的对流运动。这一现象与 Rotunno et al (1988)和 Weisman et al (1988)提出的经典 RKW 理论模型较为相似。陈明轩和王迎春(2012)也用数值模拟证实了中国飑线系统可以用这种理论解释其发展传播。这从一个侧面说明,雷达资料对上述边界层特征模拟的修正,是 RFRV 试验取得较大改进效果的重要原因。

3.3 同化雷达反射率和径向速度对模拟结果的影响

多项研究表明,雷达反射率因子与径向速度同化对数值模拟的改进有不同的效果(Hu et al, 2006a; 2006b; 薛湛彬等, 2017; 陈锋等, 2019)。表 2 统计了 CTL、RF、RV 和 RFRV 四个试验模拟的整点组合反射率、小时累计降水量和小时极大风速在 18—22 时平均的空间相关系数和 TS 评分。从定量统计来看,同时同化雷达反射率因子和径向速度的 RFRV 试验取得了最好的模拟效果,其次是仅同化雷达反射率因子的 RF 试验,再次是仅同化雷达径向速度的 RV 试验,得分最低的是未同化雷达资料的 CTL 试验。图 10a, 10b 分别给出了 RF 和 RV 试验模拟的垂直飑线方向(图 7b₁ 中蓝线)的剖面,对比 CTL 试验(图 9b)可以看到,同化雷达反射率因子和径向速度均能在一定程度上纠正 CTL 试验中飑线位置模拟的偏差,对实际飑线位置附近

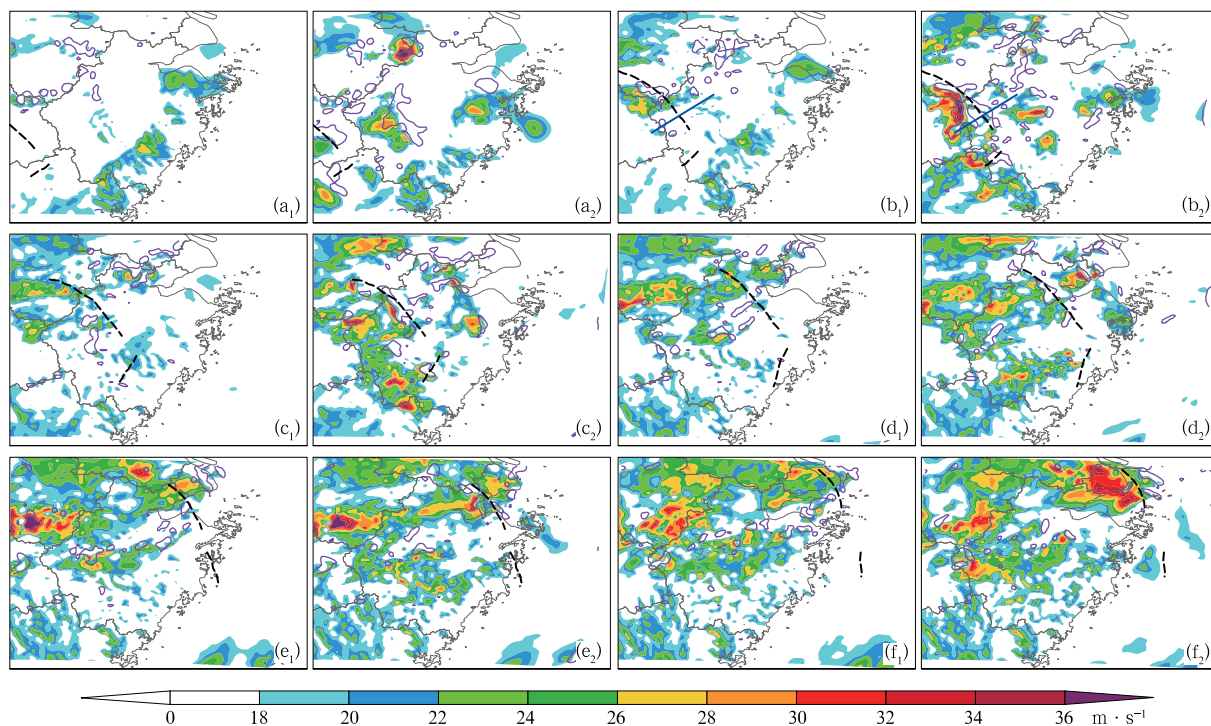


图7 模式模拟的2018年3月4日(a)17时,(b)18时,(c)19时,(d)20时,(e)21时,

(f)22时的逐小时0~3 km垂直风切变(填色)

(a₁~f₁)CTL试验,(a₂~f₂)RFRV试验

(紫色等值线内为3 km高度上大于 $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的辐合区域)

Fig. 7 Simulated hourly 0-3 km vertical wind shear (shaded area) at (a) 17:00 BT, (b) 18:00 BT,

(c) 19:00 BT, (d) 20:00 BT, (e) 21:00 BT, (f) 22:00 BT 4 March 2018

(a₁-f₁) CTL, (a₂-f₂) RFRV

(Purple contours indicate convergence areas $\geq 3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ at 3 km height)

的强烈垂直上升运动模拟更强,对飊线后方的冷池模拟也更深厚。尤其是同化雷达反射率因子后的RF试验,模拟的飊线位置更为准确,其飊线后方冷池强度超过了一 8°C ,而同化径向速度后的RV试验,虽然对冷池模拟较CTL试验也略有改进,但对垂直速度的影响更为显著。这主要是因为通过复杂云分析引入的雷达反射率因子能直接调整水凝物质含量,改进风暴中降水模拟及由此引起的蒸发冷却,导致冷空气不断下沉扩展并在近地面堆积,进而形成更为明显的冷池;而径向速度主要通过三维变分技术直接调整风场,在飊线前部位置产生明显的垂直上升运动。这一解释与Hu et al (2006a;2006b)、薛湛彬等(2017)、陈锋等(2019)的研究结论一致。但值得指出的是,在陈锋等(2019)的研究中,起更大改进作用的是径向速度同化,而在本研究中,反射率因子同化的贡献率更大,这与盛春岩等(2009)的研

究结论一致。这可能是因为天气个例不同所造成的,陈锋等(2019)的研究中的个例为龙卷,控制试验对龙卷模拟的不足之处主要是动力过程方面;而本研究的个例为飊线,控制试验(CTL)对个例的模拟问题主要是对飊线后方冷池的估计不足,而雷达反射率同化较好地修正了这一不足。正如Wakimoto (1982)以及Mueller and Carbone (1987)的研究所,风暴产生的冷池对触发新的风暴单体非常有利,控制了飊线的移动速度。因此雷达反射率同化对冷池模拟的较大改进,更大程度上促进了对整个飊线过程模拟的修正。

3.4 同化不同数量和位置的雷达资料对模拟结果的影响

为探讨同化不同数量和位置的雷达资料对模拟结果的影响,图10c,10d给出了Group A和Group B

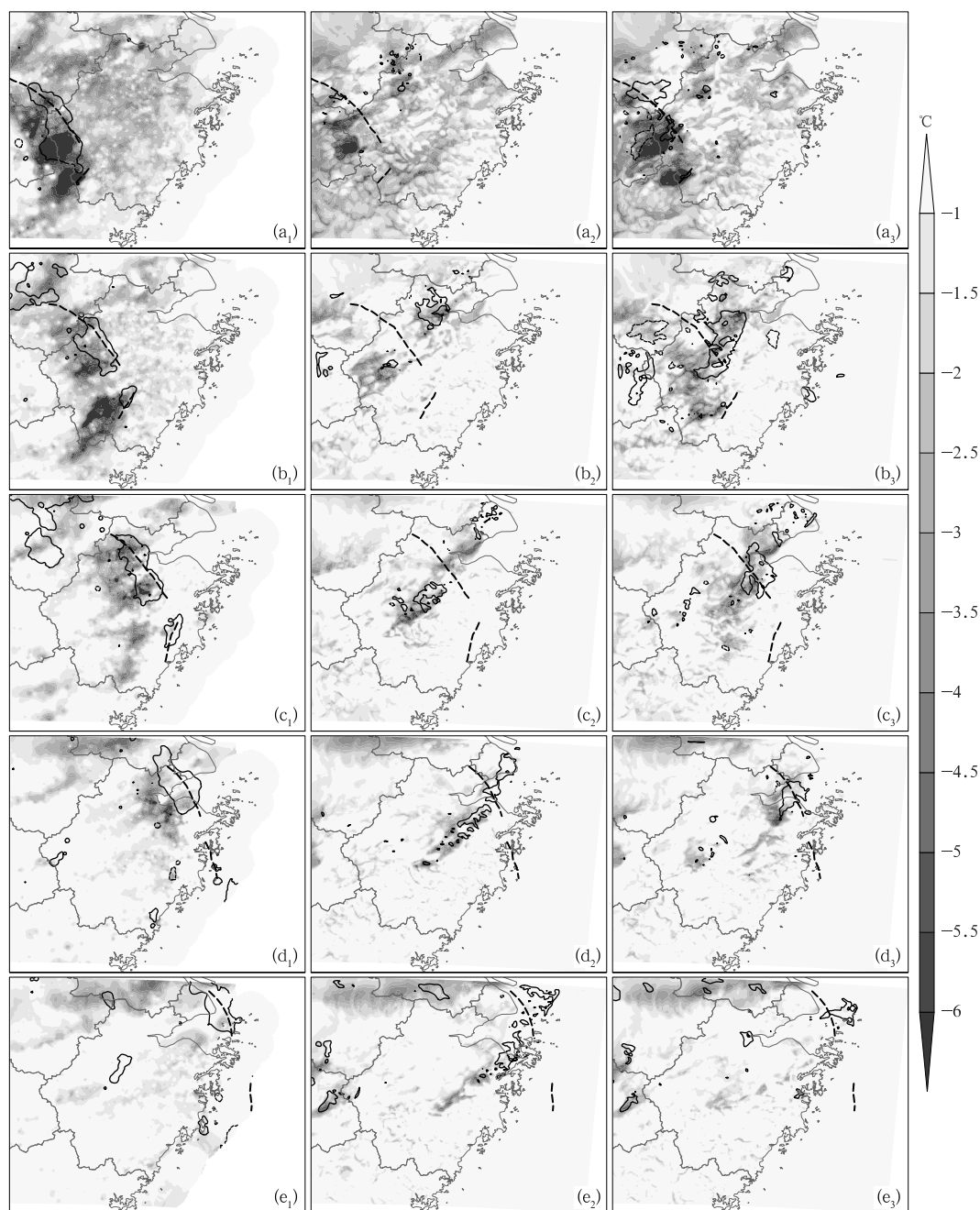


图 8 同图 3, 但为小时变温(阴影)和小时变压(等值线, 单位: hPa)

Fig. 8 Same as Fig. 3, but for hourly variable temperature (shaded area) and surface pressure (contour, unit: hPa)

试验模拟的垂直于飑线方向(图 7b₁ 中蓝线)的剖面。对比 CTL 试验(图 9b)和 RFRV 试验(图 9c)看到, Group A 试验给出的模拟结果与 RFRV 试验较为接近, 且比 CTL 试验有了明显改进, 飑线的位置和移动过程也与实况接近(图 11f); 而 Group B 试验的模拟结果则与 CTL 试验更为接近, 对飑线的位置和移动过程模拟较差(图 11g)。图 2 显示

Group A 中同化的上饶、建阳、衢州、丽水、金华这 5 部雷达主要覆盖在浙西南——本次飑线过程的上游关键区域, 包含了 17 时飑线中重要的中小尺度动力和热力场观测信息; 而 Group B 中的杭州、湖州、宁波、台州、舟山这 5 部雷达在 17 时覆盖的是非关键区域。这说明同化关键区域的雷达观测所携带的中小尺度信息, 对改进强天气的模拟预报更为重要。

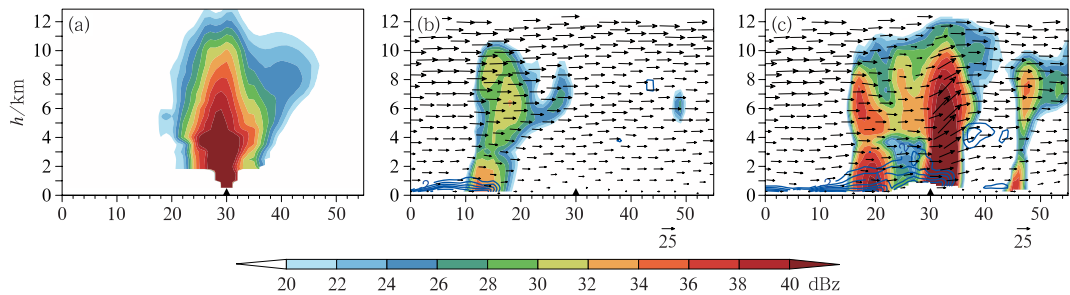


图 9 2018 年 3 月 4 日 18 时(a)观测及试验(b)CTL 和(c)RFRV 模拟的垂直于飑线方向(图 7b 中蓝线)的剖面 [彩色阴影为雷达三维反射率;蓝线为变温,单位: $^{\circ}\text{C}$;矢量为垂直于飑线的风场水平风(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和垂直风(单位: $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$);横坐标上黑色三角形表示当前时刻飑线的位置]

Fig. 9 Cross-sections of simulated three-dimensional reflectivity (shaded area), hourly variable temperature (contour, unit: $^{\circ}\text{C}$), and horizontal wind perpendicular to squall line (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and vertical velocity (vector, unit: $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) from observed (a) OBS and simulated experiments (b) CTL and (c) RFRV at 18:00 BT 4 March 2018 (Black triangle represents the location of squall line)

表 2 雷达同化试验模拟结果的空间相关系数和 TS 评分对比

Table 2 Comparison of spatial correlation coefficient and TS score of simulation results of radar assimilation test

要素	空间相关系数				TS 评分*			
	CTL	RF	RV	RFRV	CTL	RF	RV	RFRV
整点组合反射率	0.25	0.36	0.27	0.39	0.02	0.04	0.03	0.04
小时累计降水量	0.16	0.25	0.17	0.30	0.03	0.03	0.03	0.06
小时极大风速	0.44	0.49	0.46	0.51	0.02	0.03	0.03	0.05

注: *: 雷达组合反射率的评分量级为 $\geq 40 \text{ dBz}$, 小时降水量的评分量级为 $\geq 10 \text{ mm}$, 小时最大风速的评分量级 $\geq 13.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。
Note: *: Radar composite reflectivity score $\geq 40 \text{ dBz}$, hourly precipitation $\geq 10 \text{ mm}$, hourly maximum wind speed $\geq 13.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

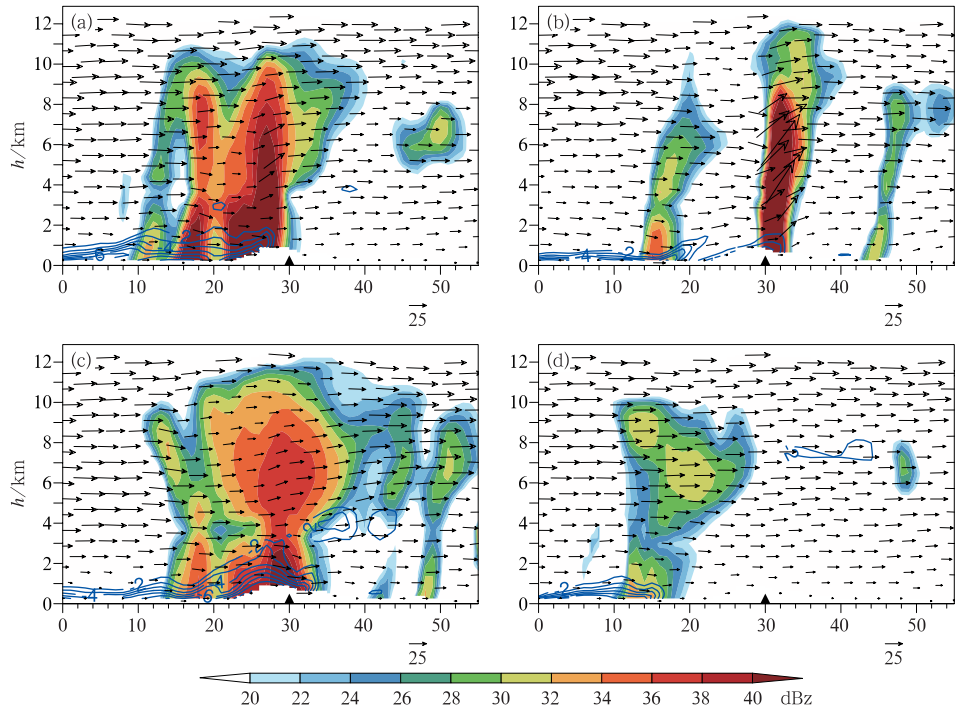


图 10 2018 年 3 月 4 日 18 时各试验模拟的垂直于飑线方向(图 7b 中蓝线)的剖面 (a)RF,(b)RV,(c)Group A,(d)Group B (说明同图 9)

Fig. 10 Cross-sections along blue line in Fig. 7b from simulated experiments at 18:00 BT 4 March 2018 (a) RF, (b) RV, (c) Group A, (d) Group B (Illustration is same as Fig. 9)

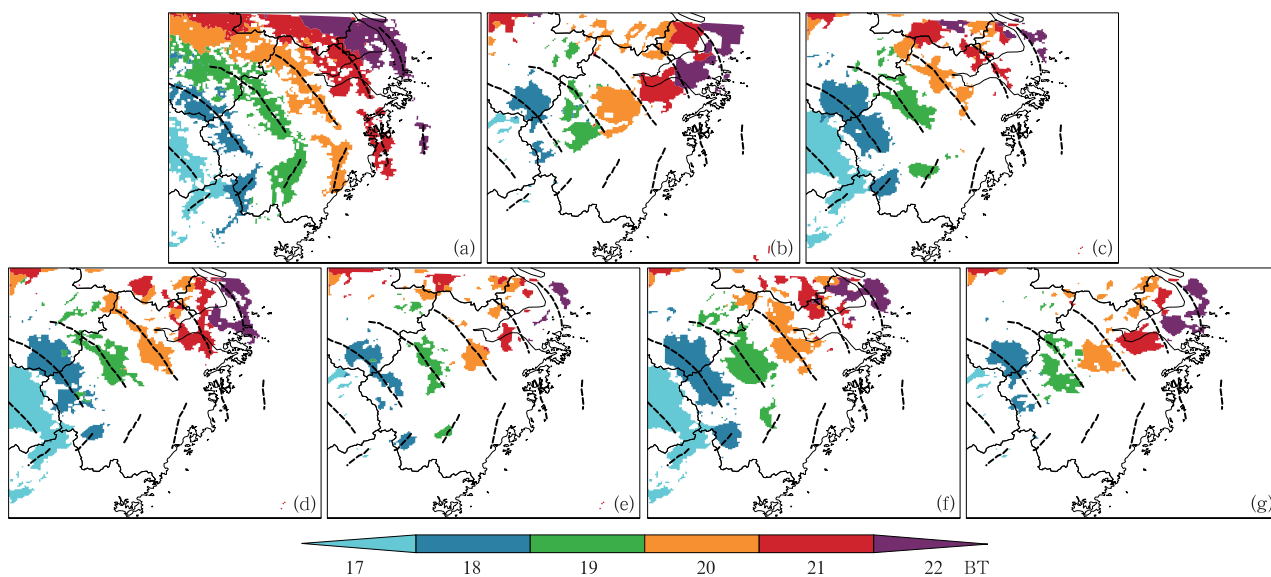


图 11 各试验模拟及观测的飑线移动过程

(a) 观测, (b) CTL, (c) RFRV, (d) RF, (e) RV, (f) Group A, (g) Group B

(填色表示不同时刻雷达组合反射率大于 30 dBZ 的区域)

Fig. 11 Observed and simulated moving process of squall line

(a) observation, (b) CTL, (c) RFRV, (d) RF, (e) RV, (f) Group A, (g) Group B

(Color shaded areas indicate areas with radar composite reflectivity ≥ 30 dBZ at different times)

这一结论与 Zhao et al (2012) 对台风莫兰蒂的同化模拟结论一致: 同化部分关键雷达能取得与同化所有雷达相当的同化效果。因此, 在计算资源紧张的情况下, 采取仅同化包含天气过程观测信息的飑线上游关键区域的雷达资料是可供短时业务预报系统参考的一个选择。

4 结论与讨论

本文利用 WRF 中尺度模式和 GSI-3DVar 同化系统及其复杂云分析系统, 通过多组数值试验的对比, 探讨了雷达资料同化对 2018 年 3 月 4 日浙江一次初春罕见飑线强天气过程的模拟改进作用和影响过程, 对比了雷达反射率因子和雷达径向速度的同化效果, 探讨了不同数量和位置的雷达资料同化对模拟效果的影响。主要结论如下:

(1) CTL 试验对飑线强度和飑线后冷池模拟偏弱, 且过早模拟了苏南、皖南一带冷空气南下所形成的锋面对流过程, 导致暖区中飑线的位置和移动过程模拟失败; 同化雷达资料的 RFRV 试验较为成功地改进了此次飑线过程的降水、大风及发展移动

过程模拟;

(2) 飑线边界层特征的对比分析表明, RFRV 试验通过同化雷达反射率因子和径向速度, 改进了飑线前部低层垂直风切变、飑线后部冷池和飑线前部垂直上升运动的模拟, 进而改进了整个飑线过程的模拟;

(3) 对比仅同化雷达反射率因子和仅同化雷达径向速度可见, 雷达反射率因子同化对此次飑线过程的冷池强度和位置的模拟改进幅度更大, 因此对此次飑线过程模拟改进的贡献程度更大;

(4) 相对于同化非关键区域的资料, 同化飑线过程上游关键区域的雷达观测所携带的中小尺度信息, 对提升强对流天气的短时预报更为重要。

综上所述, 雷达资料同化对本次飑线过程的模拟有较为明显的改进作用。但需要指出的是, 与经典的锋面飑线不同, 本文飑线个例是在高空急流辐散区、低空西南急流轴前端、低涡南侧的暖区之中发展起来的, 且进入浙江时已处于成熟阶段, 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, 本文所得结论是否具有一定普适性, 有待今后更多个例研究。

参考文献

- 陈锋,董美莹,冀春晓,等,2019. 雷达资料同化对2016年6月23日阜宁龙卷模拟的改进[J]. 气象学报,77(3):405-426. Chen F, Dong M Y, Ji C X, et al, 2019. Improving the simulation of the tornado occurring in Funing on 23 June 2016 by using radar data assimilation[J]. Acta Meteor Sin, 77(3):405-426(in Chinese).
- 陈明轩,王迎春,2012. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飑线过程发展维持的数值模拟[J]. 气象学报,70(3):371-386. Chen M X, Wang Y C, 2012. Numerical simulation study of interactional effects of the low-level vertical wind shear with the cold pool on a squall line evolution in North China[J]. Acta Meteor Sin, 70(3):371-386(in Chinese).
- 陈业国,农孟松,黄海洪,等,2009. 一次华南强飑线过程的数值模拟分析[J]. 气象,35(9):29-37. Chen Y G, Nong M S, Huang H H, et al, 2009. Numerical simulation and analysis on a strong squall line in South China[J]. Meteor Mon, 35(9):29-37(in Chinese).
- 冯晋勤,童以长,林河富,等,2006. 一次强飑线过程的中小尺度特征分析[J]. 气象,32(12):72-75. Feng J Q, Tong Y C, Lin H F, et al, 2006. Analysis of mesoscale and microscale structures of a strong squall line[J]. Meteor Mon, 32(12):72-75(in Chinese).
- 高士博,闵锦忠,黄丹莲,2016. EnSRF 雷达资料同化在一次飑线过程中的应用研究[J]. 大气科学,40(6):1127-1142. Gao S B, Min J Z, Huang D L, 2016. The simulation of a squall line with Doppler radar data assimilation using the EnSRF method[J]. Chin J Atmos Sci, 40(6):1127-1142(in Chinese).
- 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 N, Ran L K, Gao S T, 2013. Numerical simulation and diagnosis study of a squall line in eastern China[J]. Chin J Atmos Sci, 37(3):595-608(in Chinese).
- 罗琪,郑永光,陈敏,2019. 2017年北京北部一次罕见强弓状飑线过程演变和机理[J]. 气象学报,77(3):371-386. Luo Q, Zheng Y G, Chen M, 2019. Evolution and development mechanisms of a rare strong arc-shaped squall line that occurred in northern Beijing in 2017[J]. Acta Meteor Sin, 77(3):371-386(in Chinese).
- 闵锦忠,王修莹,沈菲菲,等,2015. 多普勒雷达资料同化对江苏一次飑线过程的数值模拟[J]. 气象科学,35(3):248-257. Min J Z, Wang X Y, Shen F F, et al, 2015. Numerical simulation of Doppler radar data assimilation on a squall line event in Jiangsu Province[J]. J Meteor Sci, 35(3):248-257(in Chinese).
- 慕熙显,党人庆,陈秋萍,等,2007. 一次飑线过程的雷达回波分析与数值模拟[J]. 应用气象学报,18(1):42-49. Mu X Y, Dang R Q, Chen Q P, et al, 2007. Radar data analysis and numerical simulation of a squall line[J]. J Appl Meteor Sci, 18(1):42-49(in Chinese).
- 邱金晶,陈锋,董美莹,等,2015. 浙江省快速更新同化系统的建立与检验评估[J]. 气象科技进展,5(6):6-12. Qiu J J, Chen F, Dong M Y, et al, 2015. Establishment and evaluation of Zhejiang WRF-ADAS Rapid Refresh System[J]. Adv Meteor Sci Technol, 5(6):6-12(in Chinese).
- 沈杭锋,方桃妮,蓝俊倩,等,2018. 2018年3月4日强飑线过程的中尺度分析[C]//第35届中国气象学会年会 S1 灾害天气监测、分析与预报. 合肥:中国气象学会:23-26. Shen H F, Fang T N, Lan J Q, et al, 2018. Mesoscale analysis of a squall line on 4 March 2018[C]//The 35th Annual Meeting of Chinese Meteorological Society, Section S1 Disaster Weather Monitor, Analysis and Forecast. Hefei: Chinese Meteorological Society: 23-26 (in Chinese).
- 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 H F, Zhai G Q, Zhu B Q, et al, 2010. A model study of impact of coastal mesoscale convergence line on development of squall line over Zhejiang Province[J]. Chin J Atmos Sci, 34(6):1127-1140 (in Chinese).
- 盛春岩,房岩松,黄磊,等,2009. 多普勒雷达资料同化对山东“4·28”飑线过程的数值模拟[J]. 安徽农业科学,37(26):12641-12649. Sheng C Y, Fang Y S, Huang L, et al, 2009. Numerical simulation of “4. 28” squall line process in Shandong Province by assimilating Doppler reflectivity data[J]. J Anhui Agric Sci, 37(26):12641-12649(in Chinese).
- 盛杰,郑永光,沈新勇,等,2019. 2018年一次罕见早春飑线大风过程演变和机理分析[J]. 气象,45(2):141-154. Sheng J, Zheng Y G, Shen X Y, et al, 2019. Evolution and mechanism of a rare squall line in early spring of 2018[J]. Meteor Mon, 45(2):141-154(in Chinese).
- 寿绍文,励申申,姚秀萍,2003. 中尺度气象学[M]. 北京:气象出版社:195-203. Shou S W, Li S S, Yao X P, 2003. Mesoscale Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press: 195-203(in Chinese).
- 王晓芳,胡伯威,李灿,2010. 湖北一次飑线过程的观测分析及数值模拟[J]. 高原气象,29(2):471-485. Wang X F, Hu B W, Li C, 2010. Observation study and numerical simulation of the structure for a squall line case in Hubei[J]. Plateau Meteor, 29(2):471-485(in Chinese).
- 许雯,董美莹,陈锋,2017. 基于逐时降水站点资料空间插值方法对比研究[J]. 气象与环境学报,33(1):34-43. Xu L, Dong M Y, Chen F, 2017. Comparison study of spatial interpolation methods based on hourly precipitation data from automatic weather stations[J]. J Meteor Environ, 33(1):34-43(in Chinese).
- 薛谨彬,陈炯,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 C B, Chen X, Wu Y, et al, 2017. Application of radar data assimilation in local severe convective weather forecast[J]. Chin J Atmos Sci, 41(4):673-690(in Chinese).
- 杨晓霞,李春虎,杨成芳,等,2007. 山东省2006年4月28日飑线天气过程分析[J]. 气象,33(1):74-80. Yang X X, Li C H, Yang C

- F, et al, 2007. Analysis of a squall line event on 28 April 2006 in Shandong Province[J]. Meteor Mon, 33(1): 74-80 (in Chinese).
- 于庚康, 吴海英, 曾明剑, 等, 2013. 江苏地区两次强飑线天气过程的特征分析[J]. 大气科学学报, 36(1): 47-59. Yu G K, Wu H Y, Zeng M J, et al, 2013. Characteristic analysis of two severe squall line processes in Jiangsu Area[J]. Trans Atmos Sci, 36(1): 47-59 (in Chinese).
- 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 Z H, 2015. Study of the influence of the different horizontal resolutions and microphysical setups on the idealized simulation of a squall line[J]. Acta Meteor Sin, 73(4): 648-666 (in Chinese).
- 张弛, 王咏青, 沈新勇, 等, 2019. 东北冷涡背景下飑线发展机制的理论分析和数值研究[J]. 大气科学, 43(2): 361-371. Zhang C, Wang Y Q, Shen X Y, et al, 2019. Theoretical analysis and numerical study on the development mechanism of squall line in the northeast cold vortex[J]. Chin J Atmos Sci, 43(2): 361-371 (in Chinese).
- 张群, 张维桓, 姜勇强, 2001. 边界层辐合线发展成飑线的数值试验[J]. 气象科学, 21(3): 308-315. Zhang Q, Zhang W H, Jiang Y Q, 2001. Numerical trial of PBL convergence line developing to squall line[J]. Sci Meteor Sin, 21(3): 308-315 (in Chinese).
- 张入财, 陆汉城, 付伟基, 等, 2009. 地面资料同化的飑线数值模拟及中尺度特征分析[J]. 气象科学, 29(1): 39-45. Zhang R C, Lu H C, Fu W J, et al, 2009. Assimilation of surface observation data in numerical simulation of a squall line and mesoscale characteristics analysis[J]. Sci Meteor Sin, 29(1): 39-45 (in Chinese).
- 张哲, 周玉淑, 邓国, 2016. 2013年7月31日京津冀飑线过程的数值模拟与结构分析[J]. 大气科学, 40(3): 528-540. Zhang Z, Zhou Y S, Deng G, 2016. Numerical simulation and structural analysis of a squall line that occurred over the Beijing-Tianjin-Hebei Region of China on 31 July 2013[J]. Chin J Atmos Sci, 40(3): 528-540 (in Chinese).
- 张哲, 周玉淑, 高守亭, 2018. 一次辽东湾飑线过程的观测与数值模拟分析[J]. 大气科学, 42(5): 1157-1174. Zhang Z, Zhou Y S, Gao S T, 2018. Observational and numerical analyses of a squall line occurring over Liaodong Gulf of China[J]. Chin J Atmos Sci, 42(5): 1157-1174 (in Chinese).
- 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).
- 周围, 包云轩, 冉令坤, 等, 2018. 一次飑线过程对流稳定度演变的诊断分析[J]. 大气科学, 42(2): 339-356. Zhou W, Bao Y X, Ran L K, et al, 2018. Diagnostic analysis of convective stability evolution during a squall line process[J]. Chin J Atmos Sci, 42(2): 339-356 (in Chinese).
- Belair S, Mailhot J, 2001. Impact of horizontal resolution on the numerical simulation of a midlatitude squall line: implicit versus explicit condensation[J]. Mon Wea Rev, 129(9): 2362-2376.
- Bluestein H B, Jain M H, 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation: severe squall lines in Oklahoma during the spring[J]. J Atmos Sci, 42(16): 1711-1732.
- Bluestein H B, Marx G T, Jain M H, 1987. Formation of mesoscale lines of precipitation: nonsevere squall lines in Oklahoma during the spring[J]. Mon Wea Rev, 115(11): 2719-2727.
- Bradberry J S, 1981. Mesoscale structure of an Oklahoma squall line[J]. Mon Wea Rev, 109(5): 1110-1117.
- Bryan G H, Kniviel J C, Parker M D, 2006. A multimodel assessment of RKW theory's relevance to squall-line characteristics[J]. Mon Wea Rev, 134(10): 2772-2792.
- Bryan G H, Morrison H, 2012. Sensitivity of a simulated squall line to horizontal resolution and parameterization of microphysics[J]. Mon Wea Rev, 140(1): 202-225.
- Chen F, Dudhia J, 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity[J]. Mon Wea Rev, 129(4): 569-585.
- Chen F, Liang X D, Ma H, 2017. Application of IVAP-based observation operator in radar radial velocity assimilation: the case of typhoon Fitow[J]. Mon Wea Rev, 145(10): 4187-4203.
- Cram J M, Pielke R A, Cotton W R, 1992. Numerical simulation and analysis of a prefrontal squall line. Part I: observations and basic simulation results[J]. J Atmos Sci, 49(3): 189-208.
- French A J, Parker M D, 2014. Numerical simulations of bow echo formation following a squall line-supercell merger[J]. Mon Wea Rev, 142(12): 4791-4822.
- Fujita T, 1955. Results of detailed synoptic studies of squall lines[J]. Tellus, 7(4): 405-436.
- Hane C E, 1973. The squall line thunderstorm: numerical experimentation[J]. J Atmos Sci, 30(8): 1672-1690.
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J, 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. Mon Wea Rev, 134(9): 2318-2341.
- Houze R A Jr, Rutledge S A, Biggerstaff M I, et al, 1989. Interpretation of Doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale convective systems[J]. Bull Amer Meteor Soc, 70(6): 608-619.
- Hu M, Xue M, Brewster K, 2006a. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth, Texas, tornadic thunderstorms. Part I: cloud analysis and its impact[J]. Mon Wea Rev, 134(2): 675-698.
- Hu M, Xue M, Gao J D, 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.
- Hu M, Shao H, Stark D, et al, 2015. Gridpoint statistical interpolation advanced user's guide version 3. 4. 0 [EB/OL]. Developmental

- Testbed Center. http://www.dtcenter.org/com-GSI/users/docs/users_guide/AdvancedGSIUserGuide_v3.4.0.0.pdf.
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al, 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models[J]. *J Geophys Res*, 113 (D13): D13103. DOI:10.1029/2008JD009944.
- Ikeda K, Rasmussen R, Liu C H, et al, 2010. Simulation of seasonal snowfall over Colorado[J]. *Atmos Res*, 97(4): 462-477.
- Janjić Z I, 1994. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes[J]. *Mon Wea Rev*, 122(5): 927-945.
- Jiménez P A, Dudhia J, González-Rouco J F, et al, 2012. A revised scheme for the WRF surface layer formulation[J]. *Mon Wea Rev*, 140(3): 898-918.
- Leary C A, Houze R A Jr, 1979. The structure and evolution of convection in a tropical cloud cluster[J]. *J Atmos Sci*, 36(3): 437-457.
- Liang X D, 2007. An integrating velocity-azimuth process single-Doppler radar wind retrieval method[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 24(4): 658-665.
- Ludlam F H, 1963. Severe local storms: a review[C]//Atlas D, Booker R, Byers H, et al. Severe Local Storms. Boston: American Meteorological Society: 1-30.
- Maddox R A, 1980. Mesoscale convective complexes[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 61(11): 1374-1387.
- Mueller C K, Carbone R E, 1987. Dynamics of a thunderstorm outflow[J]. *J Atmos Sci*, 44(15): 1879-1898.
- National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U. S. Department of Commerce, [2018-08-09]. NCEP FNL operational model global tropospheric analyses, continuing from July 1999[EB/OL]. rad.ucar.edu/datasets/ds083. 2.
- Newton C W, 1950. Structure and mechanism of the prefrontal squall line[J]. *J Meteor*, 7(3): 210-222.
- Newton C W, 1966. Circulations in large sheared cumulonimbus[J]. *Tellus*, 18(4): 699-713.
- Pandya R E, Durran D R, Weisman M L, 2010. The influence of convective thermal forcing on the three-dimensional circulation around squall Lines[J]. *J Atmos Sci*, 57(1): 29-45.
- Physick W L, Downey W K, Troup A J, et al, 1985. Mesoscale observations of a prefrontal squall line[J]. *Mon Wea Rev*, 113(11): 1958-1969.
- Redelsperger J L, Lafore J P, 1988. A three-dimensional simulation of a tropical squall line: convective organization and thermodynamic vertical transport[J]. *J Atmos Sci*, 45(8): 1334-1356.
- Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L, 1988. A theory for strong, long-lived squall lines[J]. *J Atmos Sci*, 45(3): 463-485.
- Seitter K L, Kuo H L, 1983. The dynamical structure of squall-line type thunderstorms[J]. *J Atmos Sci*, 40(12): 2831-2854.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al, 2008. A description of the advanced research WRF version 3[R]. Boulder: NCAR.
- Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al, 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: implementation of a new snow parameterization[J]. *Mon Wea Rev*, 136(12): 5095-5115.
- 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.
- Wakimoto R M, 1982. The life cycle of thunderstorm gust fronts as viewed with Doppler radar and rawinsonde data[J]. *Mon Wea Rev*, 110(8): 1060-1082.
- Weisman M L, Klemp J B, Rotunno R, 1988. Structure and evolution of numerically simulated squall lines[J]. *J Atmos Sci*, 45(14): 1990-2013.
- Weisman M L, Rotunno R, 2005. Reply[J]. *J Atmos Sci*, 62(8): 2997-3002.
- Xiao Q N, Sun J Z, 2007. Multiple-radar data assimilation and short-range quantitative precipitation forecasting of a squall line observed during IHOP_2002[J]. *Mon Wea Rev*, 135(10): 3381-3404.
- Zhang D L, Fritsch J M, 1986. A case study of the sensitivity of numerical simulation of mesoscale convective systems to varying initial conditions[J]. *Mon Wea Rev*, 114(12): 2418-2431.
- Zhang D L, Gao K, 1989. Numerical simulation of an intense squall line during 10-11 June 1985 PRE-STORM. Part II: rear inflow, surface pressure perturbations and stratiform precipitation[J]. *Mon Wea Rev*, 117(9): 2067-2094.
- Zhang D L, Gao K, Parsons D B, 1989. Numerical simulation of an intense squall line during 10-11 June 1985 PRE-STORM. Part I: model verification[J]. *Mon Wea Rev*, 117(5): 960-994.
- Zhao K, Li X F, Xue M, et al, 2012. Short-term forecasting through intermittent assimilation of data from Taiwan and mainland China coastal radars for Typhoon Meranti (2010) at landfall[J]. *J Geophys Res*, 117(D6): D06108. DOI:10.1029/2011JD017109.