

基于雷达资料快速更新同化的一次浙西雷暴大风过程数值研究

孙杭媛¹ 刘亚楠² 李京原² 平凡^{2,3} 毛程燕¹ 王健疆¹ 李吉⁴

1. 浙江省衢州市气象局, 衢州 324000
2. 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室 (LACS), 北京 100029
3. 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 南京 210044
4. 吉林省气象台, 长春 130062

摘要 基于雷达资料同化的中尺度动力及水物质场的云分辨尺度探测与分析,是雷暴大风形成演变过程的模拟预报以及机制研究的关键。本文基于 S 波段天气雷达资料的快速更新同化技术,模拟了浙西山区一次飑线引发雷暴大风的过程,探讨了中尺度动力及水物质场影响雷暴大风的可能机制。深入的研究表明:1)快速更新同化的雷达径向风场是模拟预报雷暴大风对流系统组织化发展的关键,中尺度动力场的演变及调整决定了雷暴大风形成与发展过程;2)云分辨尺度的雷达径向风同化,增强了对流层低层多单体间的出流辐合以及中层后向入流,促进了对流系统向飑线转化的组织化过程;3)快速更新同化雷达径向风和反射率,可显著改变雷暴大风过程的水物质场,增强层状云区 0°C 层高度以下的霰粒子融化及低层雨水蒸发冷却作用,进而影响到后向入流进入层状云区转为向对流带前沿的倾斜下沉过程,这是中高层动量下传的关键;4)快速更新的中尺度动力及水物质场,可准确描述后向入流下沉产生的绝热增温作用,有利低层雨水蒸发和低空冷池的加强,中层高水平动量下传和近地面强水平气压梯度力的共同作用极大促进了地面大风的形成。

关键词 雷达资料同化, 飑线雷暴大风, 中尺度动力场, 云微物理过程

文章编号

中图分类号

文献标识码

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2505.24087

Numerical Study of a Severe Wind-producing Thunderstorm in South Zhejiang Province Based on Assimilation of Radar Data

收稿日期 2024-08-20; 网络预出版日期

作者简介 孙杭媛, 女, 1990 年出生, 硕士研究生, 工程师, 主要从事灾害性天气预报及气候预测研究。

E-mail: shy901210@163.com

通讯作者 李京原, E-mail: lijy@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发项目 2023YFC3007700、国家自然科学基金青年基金项目 42305012、浙江省自然科学基金重大项目(ZJMD24D050002)、中国气象局东北冷涡重点开放实验室联合开放基金(2024SYIAEKFMS02)
Funded by The National Key Research and Development Program of China (Grants 2023YFC3007700)、The National Natural Science Foundation of China (Grants 42305012)、Major project of Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (ZJMD24D050002)、Open Project Fund of Key Laboratory of Northeast Cold Vortex Research China Meteorological Administration (2024SYIAEKFMS02)

SUN Hangyuan¹, LIU Yanan², LI Jingyuan², PING Fan^{2, 3}, MAO
Chengyan¹, WANG Jianjiang¹, LI Ji⁴

1. Quzhou Meteorological Bureau of Zhejiang, Quzhou 324000
2. Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms(LACS), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
3. School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044
4. Jilin Provincial Meteorological Observatory, Changchun 130062

Abstract The cloud-resolving scale detection and analysis of mesoscale dynamics and hydrometeors based on the assimilation of radar data is the key to the simulation and prediction of the severe thunderstorms, as well as to the analysis of their formation and evolution mechanisms. In this paper, based on the rapid updating and assimilation of S-band weather radar data, we reproduced a squall line accompanied with severe convective winds over mountain areas of southern Zhejiang Province, and discussed its mechanisms of mesoscale dynamical and microphysical processes. The in-depth study shows that: 1) rapid updating and assimilation of radar radial winds was the key to reproducing the organization progress of the squall line. The evolution and adjustment of mesoscale dynamics determined the development of the severe wind-producing convection system. 2) Cloud-resolved radar radial wind assimilation strengthened the mid-layer rear inflow and convection outflows and its convergence in the lower tropospheric, which facilitated the organization of squall line. 3) Assimilation of radar radial winds and reflectivity could significantly change the characteristics of hydrometeors and enhanced the cooling processes of graupel melting below the 0°C layer height in the stratiform and the evaporation of low-level raindrops. Consequently, the rear inflow declined aslope toward the front of the convection as invading into the stratiform behind. This phenomenon played a key role on momentum transmission from mid- and high-level to the ground. 4) The rapid development of mesoscale dynamics and hydrometeors emerged adiabatic warming process generated by the downdrafts of rear inflow, which was favorable to the evaporation of the low-level raindrops and the strengthening of the cold pool. The contributions of high-level large momentum transmission downwards and strong horizontal pressure gradient force near the surface greatly promoted the formation of the severe winds.

Keywords Radar assimilation, Squall line, Severe convective winds, Mesoscale dynamics, Microphysical process

1 引言

在全球变暖背景下, 极端天气呈增加趋势(周波涛等, 2021)。雷暴大风是发生在局地区的强对流过程, 其不仅受特定的天气系统形成及演变的影响, 同时也与特定的地形强迫有关, 具有突发性强、发展迅速、时空分布不均匀、破坏力大等特点, 往往会造成不可估量的灾害, 对人民财产生命安全造成严重威胁。同时, 雷暴的形成发展复杂多变, 在低槽、冷涡等天气环流背景下, 其对流的触

发、组织化发展与大中尺度环境的动热力过程、及其云微物理过程的作用及反馈有关（任星露等，2020）。目前夏季雷暴的业务预报预警能力十分有限，特别是雷暴组织化发展过程中伴随产生的冰雹、大风等致灾天气的业务预报面临极大的困难。如何利用基于雷达同化的数值模拟方法及技术，探究雷暴形成的细致过程及物理机制，提升雷暴的业务预报能力？这是广大气象科技人员和业务预报人员面临的重大挑战。

本世纪以来，数值模式已成为雷暴等灾害性天气精细化预报的主要工具，目前，数值模式对雷暴天气中对流活动的触发及组织化发展的精细化预报存在很大困难，一个关键的原因是在模式的初始场中缺乏反映对流活动的热动力及云微物理信息，如中尺度辐合辐散场、水物质场等。随着云分辨尺度观测手段的快速发展，精细化的数值预报能力不断提高，利用云分辨的多源观测资料，进行雷暴等致灾天气的精细化预报已成为学术前沿的重要趋势（张小玲等，2018）。多普勒天气雷达具有时空分辨率高、中尺度风场及水物质场探测精准的特点，已广泛地应用在雷暴等灾害性天气的监测预警及数值模拟中，是监测和精细化预报雷暴等灾害性天气的有力工具。

自 Lilly(1990)的研究工作开始，多普勒天气雷达资料开始同化到数值模式中，国际上展开了大量天气雷达资料同化的研究（Sun et al., 1991; Xiao et al., 2005; Weygandt et al., 2008; Tong and Xue, 2008; Wang et al., 2013; 杨雨轩等，2018）。目前，同化方法主要包括三维变分（Three Dimensional Variational Data Assimilation, 简称3DVar）、四维变分（Four-Dimensional Variational, 简称4DVAR）、集合卡尔曼滤波（Ensemble Kalman Filter, 简称EnKF）、混合同化等多种方法。其中3DVar因计算量小、计算快速，分析结果稳定而被广泛地业务应用，是目前区域业务模式中主要的同化系统（孙娟珍等，2016）。

近年来，3DVar同化技术取得长足的进展，如顾建峰(2006)发现利用WRFDA三维变分同化系统同化多普勒天气雷达径向风和反射率，改善了降水预报；Xiao and Sun（2007）研究发现，同化雷达径向风和反射率，能够为飚线预报提供精细初始场，进而提高定量降水的预报；Zhang（2009）和 Dong and Xue（2013）的研究表明，同化雷达资料后，初始场会出现明显的中小尺度特征，可改善降水

的预报。闵锦忠等（2015）基于 WRF-3DVAR 系统的试验表明，选取合适的尺度化因子能有效改进初始风场和温度场的分布。许多研究表明，同化频率越高，短时降水预报越准确（邹玮等，2022；汪卫国等，2024）。

随着探测技术和数值模式的发展，为研究雷暴大风中尺度系统的时空演变和三维结构提供有力支撑（Taszarek et al., 2019；Campbell et al., 2017；French and Parker, 2014；Atkins and Laurent, 2009a, b；Markowski, 2002）。大量研究表明，飊线及弓形回波是华东区域产生大面积雷暴大风事件的主要对流风暴（Zheng et al., 2013；Zhang et al., 2020；Ma et al., 2021；陈晓欣等，2022），地面大风主要出现在弓形回波顶点处或内嵌的超级单体中，飊线结构的断裂位置也易引起地面大风（Fujita, 1978；王秀明等，2012；俞小鼎等，2012，2020）。深入探究雷暴大风精细的三维热动力结构和云微物理过程，揭示地面大风的形成发展物理机制，是有效提升此类灾害天气预报能力的必要途径。刘香娥和郭学良（2012）通过模拟一次飊线过程，发现降水粒子的蒸发和融化冷却能够有效地降低地面温度，产生地面大风。张琳娜等（2018）的研究表明中层动量下传叠加近地面水平动能输送是导致地面大风的重要因素。20 世纪 80 年代开始，中国新一代多普勒天气雷达网开始部署，包括 S 波段和 C 波段共 7 种型号 200 多部雷达，极大地推动了雷暴大风三维回波结构和径向风场的认识与研究，不仅为解析雷暴大风发展演变过程的细致动力结构提供观测依据，揭示出强回波中心下移、中气旋、中层径向辐合、后侧入流急流、阵风锋等大量雷暴大风特征的观测事实（Meng et al., 2013；Zheng et al., 2013；Zhao et al., 2019；俞小鼎等，2011，2020）。同时，风廓线激光雷达、测风塔等观测手段还能够对雷达反演风场进行订正，为雷暴大风的精细化观测以及数据同化、数值模拟研究奠定良好基础（刘黎平等，2016；Wurman et al., 2021，Weber et al., 2021）。薛谔彬等（2017）发现同时同化雷达径向速度和反射率因子后，初始场中快速调整出了中小尺度风场水平辐合、垂直运动以及合理的温、湿分布。汪卫国等（2024）发现循环同化方案对雷暴大风的雷达反射率和地面风场模拟结果有显著调整，同时对热力结构改善较明显。目前，基于中尺度地面测站、雷达网等多源观测资料的数据同化和数值模拟方法，是研究雷暴大风形成演变机制的主要手段。然而，模拟结果对同化数据源及不同同化

方案策略具有极大敏感性，比如反射率同化易引起降水场的剧烈调整，通常需更短的同化周期（如 15 分钟）以捕捉对流初生，而径向风适合在风暴成熟阶段进行高频同化，以匹配快速发展的水物质场，因此针对雷达数据同化方案的对比研究，不仅能够为业务预报提供参考，还能够为研究雷达观测影响飑线的物理过程提供理论依据。本文针对华东地区频发的一次飑线个例，较为全面地探究了不同雷达数据同化方案、不同同化频次对模拟此次风暴发生发展过程效果的影响，并进一步揭示了导致地面大风的热动力和云微物理机制。

浙西山区地形复杂，雷暴大风等强对流天气集中发生在华南前汛期和长江梅雨期的过渡带上，其发生不仅受天气系统（飑线等）发展演变过程的影响，同时也与浙西山区的复杂地形强迫（如动力抬升、局地辐合）有关。此类雷暴天气常伴有冰雹、大风等致灾过程，对人民生命和经济财产安全带来重大损失。本文主要针对浙西山区 2021 年 5 月 10 日发生的一次雷暴大风天气，进行精细化的数值研究，利用 S 波段多普勒天气雷达资料，循环同化模拟再现雷暴大风的细致演变过程，评估雷达资料同化后的模拟效果，探究其改进雷暴大风形成及演变过程模拟的可能机制，为雷暴大风的精细化业务预报提供技术支撑。

2 个例与试验设计

2.1 个例介绍

2021 年 5 月 10 日 04 时至 11 日 04 时（UTC，下同），浙西出现三轮强对流天气，并伴有强雷电、短时强降水、大风、局部冰雹等灾害性天气。此次强对流过程范围广、强度强、类型复杂、持续时间长，共分为 3 个阶段，分别为 10 日 05 时到 10 时、12 时到 21 时、22 时至 11 日 04 时。由于第 2 阶段强度最强，并形成明显飑线结构，同时浙西大部分地区出现强雷电、短时强降水以及 7-10 级大风，局地还出现 11 级以上大风和冰雹等恶劣天气，因此本文选择这一阶段进行模拟研究。根据国家地面站观测，常山、江山国家气象站最大阵风为 10 级，常山破历史极值，江山位列历史第二位，乡镇区域站点最大阵风达 11 级。以衢州站为例(图 1b、c)，在飑线过境时，出现典型气压涌升、气温骤降、风向突变、风速和降水明显增大的特点：13:35-13:45 气压先一步影响衢州站，10 分钟上升

3.7 hPa, 13:40-13:45 风速迅速增大到 8 级, 东南风转西南风, 47 分达到最大 10 级风 (25.6 m s^{-1}), 13:45-13:50 气温迅速下降, 5 分钟降温达 $3.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 且降水明显增大, 最大 5 分钟雨量 7.1 mm , 14:10-14:20 飑线后部雷暴高压影响, 气压快速上升, 风速再次增大。受大风影响, 绿化苗木倒伏、农业设施(大棚)损毁严重, 造成一定人员伤亡和财产损失。

2.2 天气背景分析

从 2021 年 5 月 10 日 12 时 (UTC, 下同) 环流形势 (图 2) 来看, 浙西位于 500 hPa 冷槽前, 高空盛行西南偏西气流; 700 hPa 大风速核中心极其前缘, 西南急流达 20 m s^{-1} , 有强风速辐合, 具有较强的辐合和充沛的水汽供应, 同时伴有明显的暖平流; 850 hPa 切变东移南压, 浙赣处于西南气流辐合且有暖脊; 地面倒槽影响, 伴有辐合线, 有利于辐合抬升。中低层西南急流辐合配合低层切变有利于对流组织化, 为飑线过程提供了有力条件。飑线出现前, 10 日 12 时衢州站探空图 (图 1a) 可见, 对流有效位能 (Cape) 达到 1770 J kg^{-1} , 垂直层结热力不稳定, 湿层深厚, 600 hPa 以下不稳定层, Td 可达 24, K 指数达 39、沙氏指数达 -4.98、下沉速度 14.81 m s^{-1} , 0-6km 垂直风切达 24, $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层和 $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层分别为 4.3 km 和 7.9 km, 高度适合形成冰雹。且风速从低层偏东风转为中层南偏西风, 中低层沿顺时针旋转有暖平流, 有利于不稳定能量增强, 探空站层结条件有明显的强对流潜势, 有利于形成大风、短时强降水和冰雹的强对流天气。

此次过程发生在低层 700 hPa 以下强烈发展的暖湿西南急流中, 并伴有明显的风速辐合和低压倒槽配合, 有利于对流组织化的形成, 中低层切变线和地面低压倒槽辐合线有利于触发强对流天气, 是一次典型低层暖平流强迫类强对流天气过程 (许爱华等, 2014)。

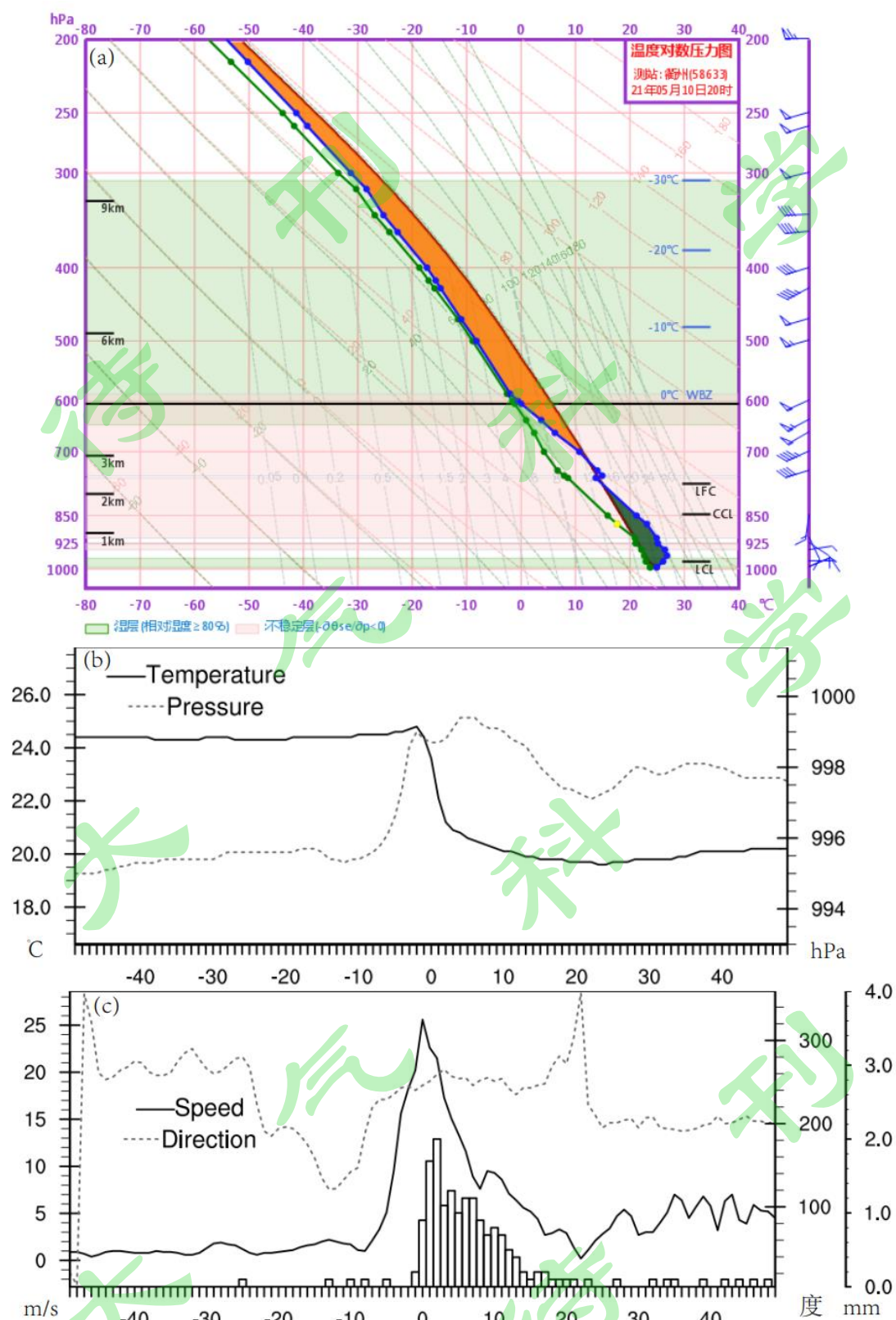


图 1. 衢州站 (a) 5 月 10 日 12 时 (UTC, 下同) T-lgp 图、(b) 13:00-14:40 逐分钟气温 (°C) 和气压 (hPa)、(c) 13:00-14:40 瞬时风向 (度) 风速 (m s^{-1}) 及降水 (mm) (横坐标为时间, 13:47 为风速最大时刻, 坐标为 0)

Fig. 1 Quzhou station (a) T-lg p image at 12:00 on May 10 (UTC, the same below)、(b) 13:00-14:40 minute-by-minute air temperature ($^{\circ}\text{C}$) and barometric pressure (hPa)、(c) 13:00-14:40 instantaneous wind direction, wind speed (m s^{-1}) and precipitation(mm)(The abscissa is the time, 13:47 is the time when the wind speed is maximum, and the coordinate is 0)

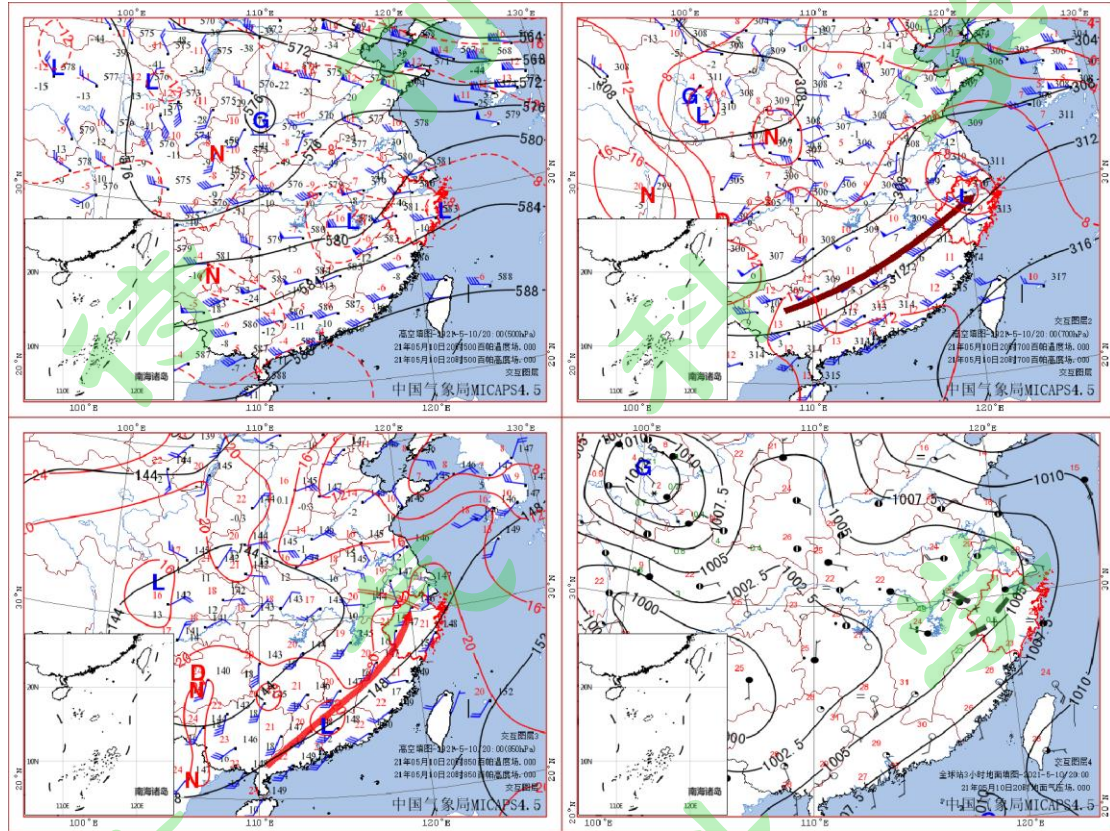


图 2. 2021 年 5 月 10 日 12 时 (UTC, 下同) 天气形势: (a) 500 hPa 位势高度 (黑色等值线, 单位: gpm)、温度场 (红色等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和风场 (风杆, 单位: m s^{-1}); (b) 700 hPa 位势高度 (黑色等值线, 单位: gpm)、温度场 (红色等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和风场 (风杆, 单位: m s^{-1}); (c) 850 hPa 位势高度 (黑色等值线, 单位: gpm)、温度场 (红色等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和风场 (风杆, 单位: m s^{-1}); (d) 地面气压场

Fig. 2 data at 12:00 on May 10, 2021 (UTC, the same below): (a) geopotential height (black contour, unit: gpm), Temperature (red contour, unit: $^{\circ}\text{C}$), and wind (wind arrow, unit: m s^{-1}) at 500 hPa; (b) geopotential height (black contour, unit: gpm), Temperature (red contour, unit: $^{\circ}\text{C}$), and wind (wind arrow, unit: m s^{-1}) at 700 hPa; (c) geopotential height (black contour, unit: gpm), Temperature (red contour, unit: $^{\circ}\text{C}$), and wind (wind arrow, unit: m s^{-1}) at 850 hPa; (d) Ground barometric pressure field

2.3 回波演变特征

飊线过程中浙江西部衢州受灾较为严重,衢州市在 10 日 13 时到 15 时 (UTC, 下同) 风暴过境, 图 3 为该系统移入、加强、强盛及减弱、移出断裂 8 个时刻的雷达观测组合反射率和极大风情况, 图中看出, 10 日 12 时 50 分系统移入衢州

阶段（图 3a1）表现为多个强回波单体合并呈带状分布，以南北向分布为主，中心最大反射率达到 55 dBZ，由于雷达径向速度在此处有速度模糊（图略），预测最大负径向速度超过 30 m s^{-1} ，即系统从西到东进入衢州，实况极大风（图 3b1）显示此刻衢州西部受地面大风影响。在系统加强阶段（13 时 22 分，图 3a2），飑线继续向东移动，出现明显弓形回波结构特征，长度约 150 km，宽度约 10 km~40 km，组合反射率最大达到 65 dBZ，同时弓形回波后侧存在 45 dBZ 强回波的后侧入流缺口，同样出现速度模糊，即径向风超过 30 m s^{-1} 。速度大值区与强回波重合，位于弓形回波顶点附近后侧，实况上（图 3b2）地面极大风较移入阶段有加强趋势。在系统强盛阶段，即 13 时 32 分（图 3a3）飑线继续东移加强，宽度约 20 km~40 km，65 dBZ 反射率范围增大且偏北，弓形回波后侧仍然存在 45 dBZ 的后侧入流缺口，径向风超过 30 m s^{-1} ，极大风范围和强度均加强；飑线系统在 13 时 48 分（图 3a4）东移靠近衢州站，回波强度略有减弱，最大为 60 dBZ，回波顶点出现明显缺口，然而此时地面极大风范围和强度进一步增强；随后，飑线于 13 时 59 分（图 3c1）东移穿过衢州站，回波顶点的 V 型缺口有断裂趋势，径向风最大达到 36 m s^{-1} ，地面极大风（图 3d1）范围和强度达到最大；直至 14 时 31 分（图 3c3），飑线东移断裂，北侧回波强度增强，南侧减弱消亡（图 3c4），在此过程中北部飑线始终伴随地面极大风（图 3d3-4）。

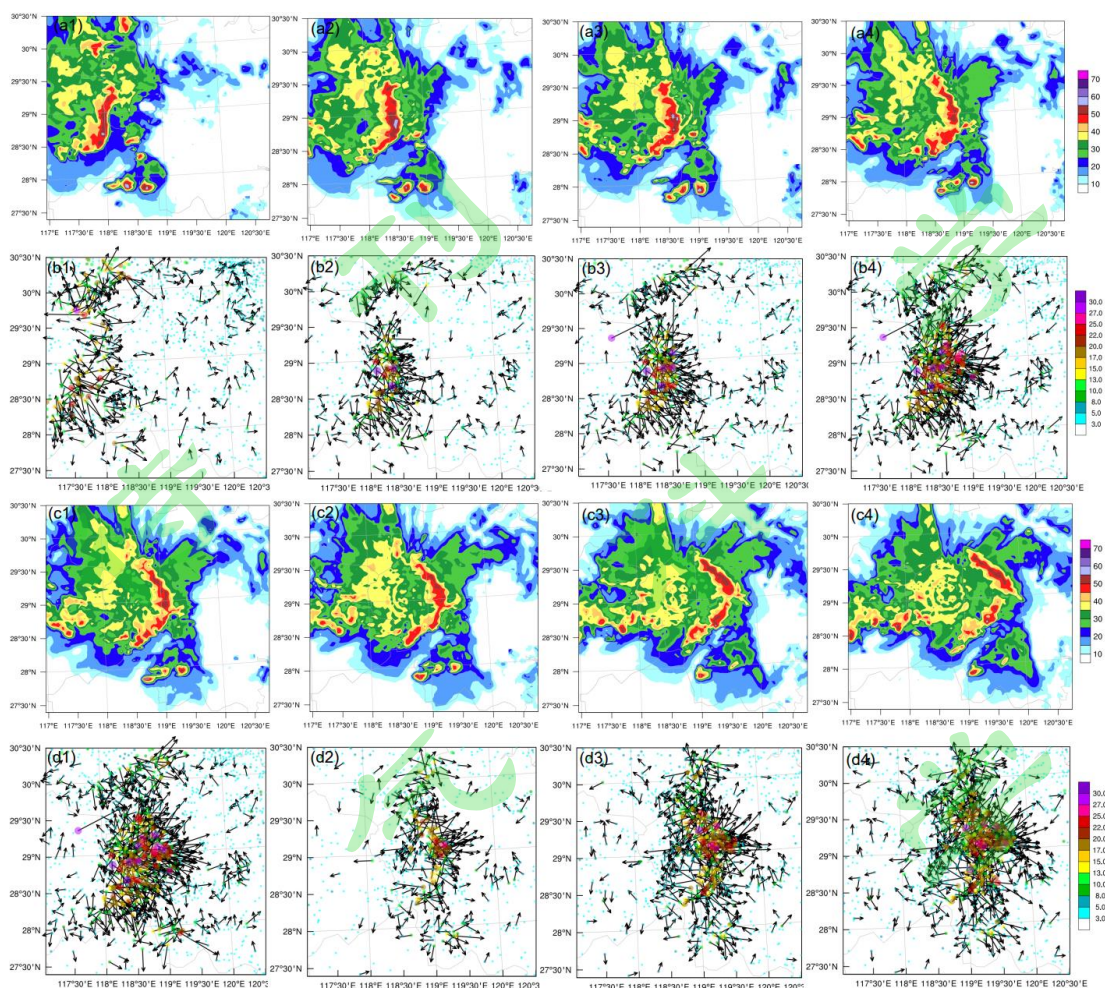


图 3. 2021 年 5 月 10 日观测的组合反射率（填色，单位：dBZ）和地面风场（箭矢，单位： m s^{-1} ）：(a1、b1)12:50（UTC，下同）、(a2、b2)13:22、(a3、b3)13:32、(a4、b4)13:48、(c1、d1)13:59、(c2、d2)14:09、(c3、d3)14:31、(c4、d4)14:41，(a、c) 观测、(b、d) 区域站极大风速 ($>5 \text{ m s}^{-1}$)

Fig. 3 combined reflectivity from observation (shaded, unit: dBZ) and Ground Wind (Arrows, Unit: m s^{-1}) on May 10, 2021: (a1、b1)12:50 (UTC, the same below)、(a2、b2)13:22、(a3、b3)13:32、(a4、b4)13:48、(c1、d1)13:59、(c2、d2)14:09、(c3、d3)14:31、(c4、d4)14:41，(a、c) observation、(b、d) Maximum wind speed at regional station ($>5 \text{ m s}^{-1}$)

2.4 模拟试验及数据同化设置

2.4.1 模式及试验配置

WRF (Weather Research and Forecasting) 数值模式是由美国大气研究中心、美国环境预测中心等科研机构共同参与开发的中尺度天气预报模式，在业务数值预报、大气数值模拟和数据同化等领域具有广泛的应用。本文基于 WRF4.4 版本，以 ERA5 (ECMWF Reanalysis v5) 逐小时再分析资料为背景场进行驱动，水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。模式采用双层、双向嵌套方案，水平分辨率分别为 3km

和 1km，外层格点数为 284×284，内层格点数 349×349，垂直层数为 38 层，时间积分步长为 5s，输出频率为 10 分钟，文中分析均基于内层网格结果。模式内外层参数化方案一致，其中行星边界层方案采用 MYNN2.5 level TKE scheme，其在模拟边界层结构和复杂地形下的湍流混合过程中表现优异（Olson and Brown,2009; Olson et al.,2019），针对浙西山地能够更准确地模拟出地表和大气能量和动量交换；长短波辐射方案为 RRTMG scheme(Iacono et al.,2008; Cavallo et al., 2011)，陆面过程和地表方案采用 Unified Noah land-surface model 和 Revised MM5 Monin-Obukhov scheme，能够显著改进地表能量和水分通量的模拟，提高复杂地形模拟精度(Chen and Dudhia,2001; Tewari et al.,2004, Jiménez et al.,2012)；云微物理过程是反应对流云中水凝物相变潜热的重要参数化方案，采用的 Morrison 二阶方案(Morrison et al.,2008)，增加了对凝结、蒸发、碰撞、破碎等过程的详细描述，并采用云滴、雨滴等粒子的实际粒子谱分布，能够同时预测水物质质量混合比和数浓度，显著提高了对云和降水过程的描述精度。该模式配置方案适用于云可分辨尺度数值模拟，具有较高模拟精度和可靠性，适用于多种天气和气候模拟场景，包括区域气候模拟、强对流系统模拟和复杂地形模拟（Skamarock et al., 2019）。具体模式配置见表 1。

表 1. 模式网格和参数化方案设计

Table. 1 Resolution and parameterization scheme setting

	Domain 1	Domain 2
水平分辨率	3km	1km
水平格点数	284*284	349*349
垂直层数	38	
积云参数化方案	no cumulus	
行星边界层方案	MYNN 2.5 level TKE scheme	
路面过程方案	Unified Noah land-surface model	
地面层方案	Revised MM5 Monin-Obukhov scheme (Jimenez, renamed in v3.6)	
长波辐射方案	RRTMG scheme	
短波辐射方案	RRTMG scheme	
云微物理方案	Morrison (2 moments)	

2.4.2 GSI 同化系统

GSI (Gridpoint Statistical Interpolation) 是美国环境预报中心 NCEP (National

Centers for Environmental Prediction) 开发的全球及区域统一的三维变分同化系统,其主要原理是利用常规观测、雷达和卫星等多种资料迭代求解目标函数的极小值,对背景场与观测场之间的权重比例进行调整,从而获取分析时刻大气真实状态的最优估计,其目标函数公式(1)如下:

$$J(X) = (X - X_b)^T B^{-1} (X - X_b) / 2 + [H(X) - y_0]^T R^{-1} [H(X) - y_0] / 2 + J_c \quad (1)$$

其中, X 是分析场, X_b 是背景场, y_0 是观测值, B 是背景协方差, R 是观测误差, H 是观测算子, J_c 是约束项。本文首先利用 ARPS (The Advanced Regional Prediction) 模式 (Xue et al., 2000, Xue et al. 2001, Xue et al. 2003) 对衢州雷达观测资料进行数据质控及格式转换, 其中用到的天气雷达资料插值及坐标转换模块 88D2ARPS 设置了包括自动质量控制、噪声过滤、地物杂波去除、速度退模糊、反射率校正和数据一致性检查等处理。这些步骤确保了输入 ARPS 模式的雷达数据具有高精度和可靠性, 从而提高了数值模拟的准确性 (张晗昀等, 2018)。再利用 GSI 三维变分同化方法进行循环同化, 得到的新分析场作为驱动 WRF 模拟的初始场进行预报。

2.4.3 试验方案设计

本文采用 WRF4.4 中尺度数值模式与 GSI 数据同化系统模拟再现此次飑线过程, 模拟区域如图 4, 模拟起报时间为 2021 年 5 月 9 日 12 时 (UTC, 下同), 积分 24 小时至 10 日 12 时, 期间, 每间隔 10 分钟循环同化至 10 日 12 时 30 分, 内外层区域均进行雷达资料同化后进行控制试验, 模拟方案与上述方案相同, 其中, d01 模拟时间从 2021 年 5 月 9 日 09: 00~10 日 20: 00, d02 模拟时间均从 2021 年 5 月 09 日 12: 00~10 日 20: 00。具体试验方案见表 2。

表 2. 试验方案设计

Table. 2 Experimental Schemes

方案名称	雷达反射率因子	雷达径向风	方案描述
Ctl_exp	无	无	9 日 12 时为背景场, WRF 预报 30 小时
Exp30_RF	有	无	10 日 12 时为初始场, 间隔 10 分钟循环同化雷达数据至 12 时 30 分, 预报 6 小时
Exp30_RV	无	有	10 日 12 时为初始场, 间隔 10 分钟循环同化雷达数据至 12 时 30 分, 预报 6 小时

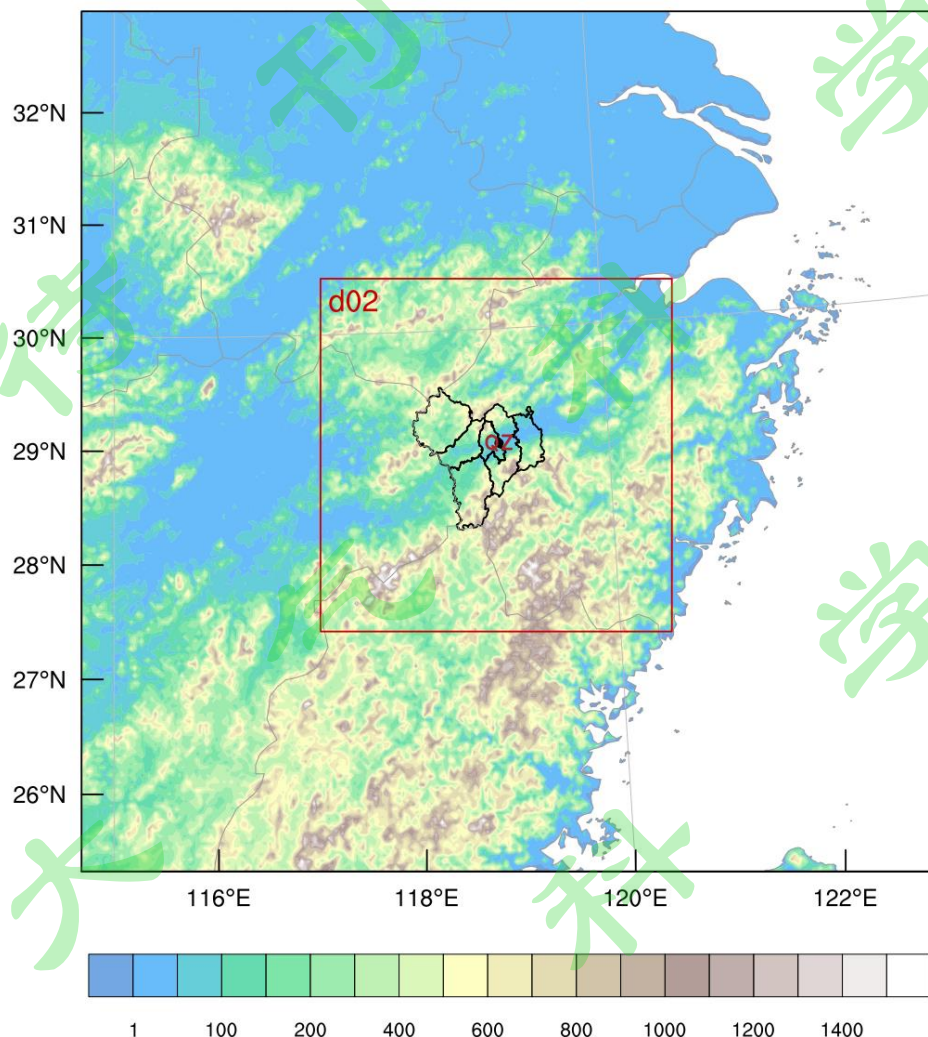


图 4 模拟区域范围及地形（填色，单位：m，QZ:衢州）

Fig.4 Model domain and terrain of numerical simulation (shaded, unit: m, QZ: Quzhou)

3 数值模拟结果分析

3.1 回波系统比较

图 5 为飑线移入、加强、成熟及断裂四个阶段的观测与模拟组合反射率对比。图中看出，不同试验方案模拟的组合反射率结果和大风位置存在差异：不同同化雷达资料的方案 Ctl_exp（图 5b1-4），在系统移入、加强、成熟及断裂四个阶段，未模拟出单体组织化发展呈线状并形成弓状回波的结构特征，强回波区松散且位

置偏南，地面未出现明显大风；仅同化雷达反射率的方案 Exp30_RF（图 5c1-4）与控制试验相比，回波和地面风速的模拟结果接近；只同化雷达径向风的方案 Exp30_RV（图 5d1-4），模拟出了中尺度对流系统的组织化发展过程，风暴前沿强回波梯度结构紧凑并在系统强盛阶段出现弓形回波，线状对流带后侧模拟出了超过 17 m s^{-1} 的地面大风，但回波位置较实况仍偏南；当同时同化雷达反射率和径向风时（方案 Exp30_ALL，图 5e1-4），模拟结果与 Exp30_RV 接近，但在强盛阶段弓形结构更明显，风暴后侧大风范围也更集中。总体来看，模拟的此次飚线过程整体偏南，雷达径向风的同化效果较仅同化反射率更显著；同时，在试验设计过程中，发现采用更频繁的径向风同化方法（时间窗 1 小时、逐 10 分钟同化），会显著增强环境风场导致系统移动和发展过快，且强度偏强（图略）。

沿回波移动方向，对雷达观测和 4 种模拟方案结果进行垂直剖面分析（剖面位置为图 5 中白色实线 AB 所示）。观测结果显示，在对流发展阶段（图 6a1），回波单体向高层不断伸展，45 dBZ 以上回波顶高达到 8 km，强回波中心达到 50 dBZ 以上，结合 10 日 12 时探空观测显示中低层存在强的垂直风切变（图 1a）；对流增强阶段（图 6a2），回波单体发展呈明显前倾垂直结构，移动方向前侧出现组织化发展的相连低回波区；对流成熟阶段（图 6a3），回波单体维持前倾结构并出现 55 dBZ 以上强回波中心，回波顶高位于 7 km 以下，较发展阶段有所降低；当进入消亡阶段（图 6a4），对流单体强度减弱，并逐渐向后倾垂直结构发展。整个阶段 55 dBZ 雷达回波集中在 7 km 以下，暖云高度较低，降水效率较高。

Ctl_exp 方案（图 6b1-4）与 Exp30_RF 方案（图 6c1-4）的模拟结果呈多单体回波的垂直结构，伴随 55 dBZ 以上强回波中心和较高的回波顶高，与观测结果差异较大。反之，尽管 Exp30_RV 方案（图 6d1-4）与 Exp30_ALL 方案（图 6e1-4）模拟的结果相比观测回波强度更强，但强回波单体的组织化发展结构显著，在对流增强和成熟阶段出现与观测一致的弱前倾结构，尤其 Exp30_ALL 方案在减弱阶段还模拟出了强回波质心的下移过程。

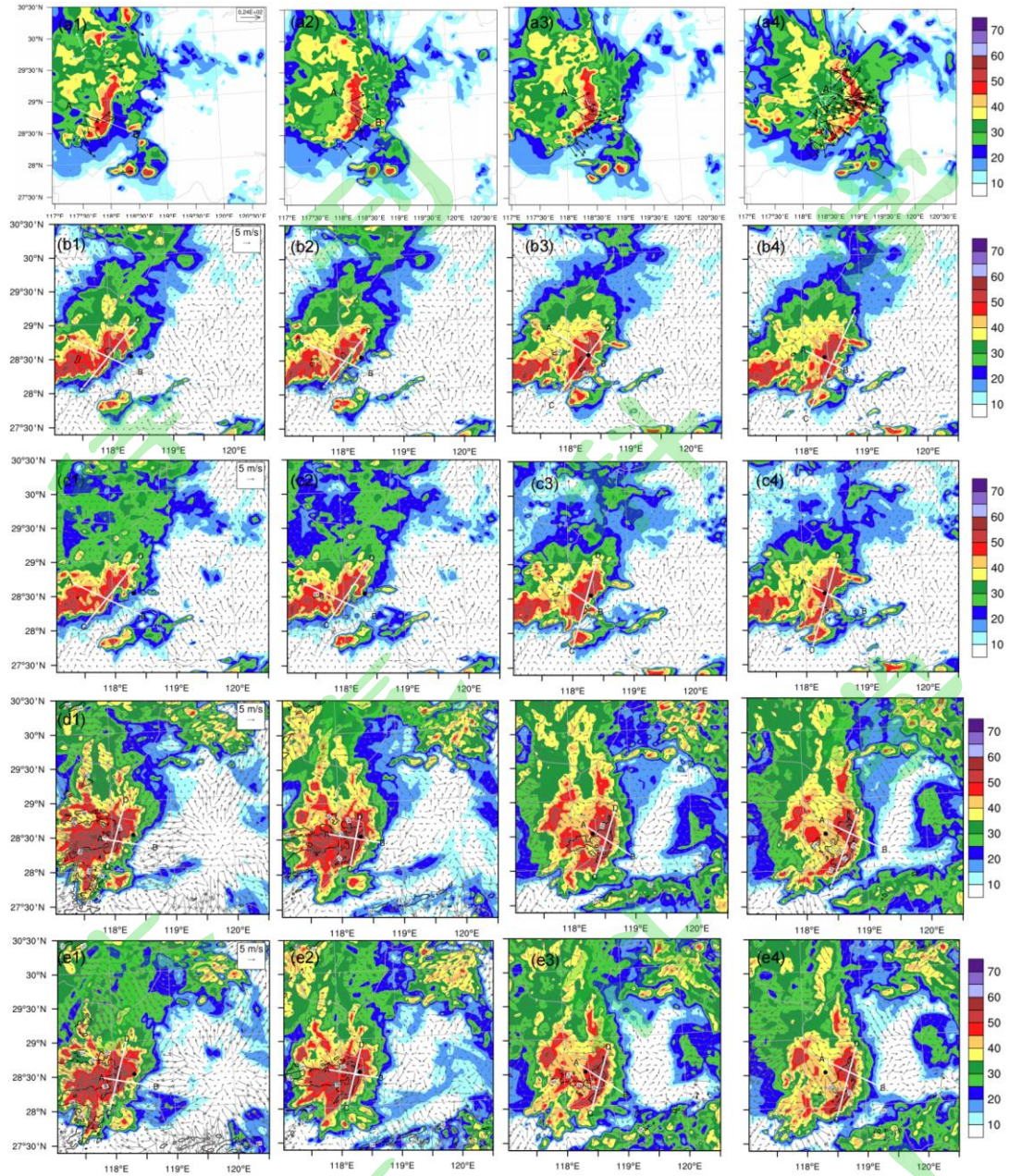


图 5 2021 年 5 月 10 日观测与模拟的组合反射率演变（填色，单位：dBZ）、10 米风场（风矢量，单位： m s^{-1} ）和阵风（黑色等值线，单位： 17 m s^{-1} ，其中白色实线 AB 及 CD 为后续剖面位置）：(a1)12:50 (UTC,下同)、(a2)13:11、(a3)13:22、(a4)13:59、(b1-e1)12:40、(b2-e2) 12:50、(b3-e3) 13:10 和 (b4-e4) 13:19，其中 (a) 观测、(b) Ctl_exp 方案、(c) Exp30_RF 方案、(d) Exp30_RV 方案、(e) Exp30_ALL 方案

Fig. 5 Evolution of combined reflectivity from observation and simulation on May 10, 2021 (shaded, unit: dBZ)、10m wind field(vector, unit: m s^{-1}) and wind gusts (black contours, unit: 17 m s^{-1} , where the white solid lines AB and CD are the subsequent profile positions): (a1)12:50

(UTC, the same below)、(a2)13:11、(a3)13:22、(a4)13:59、(b1-e1)12:40、(b2-e2)12:50、
(b3-e3)13:10 and (b4-e4)13:19, (a)observation、(b)Ctl_exp scheme、(c)Exp30_RF scheme、
(d)Exp30_RV scheme、(e)Exp30_ALL scheme

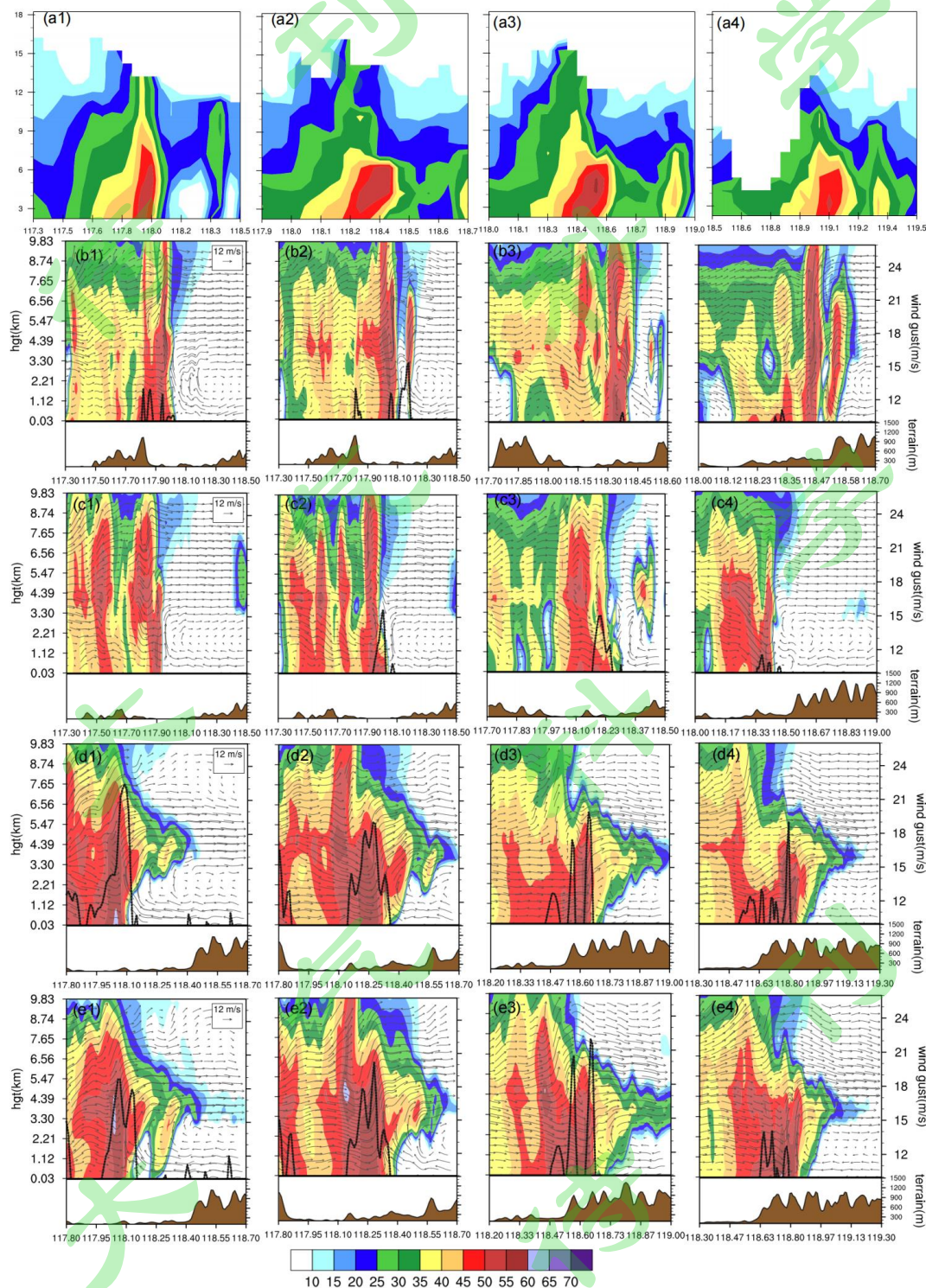


图 6 模拟的反射率（填色，单位 dBZ）、风矢量（单位： m s^{-1} ）及阵风（黑色虚线，单位 m s^{-1} ）垂直剖面：(a1)12:50 (UTC, 下同)、(a2)13:11、(a3)13:22、(a4)13:59、(b1-e1)12:40、

(b2-e2) 12:50、(b3-e3) 13:10、(b4-e4)13:19, (a) 观测、(b) Ctl_exp 方案、(c) Exp30_RF 方案、(d) Exp30_RV 方案、(e) Exp30_ALL 方案

Fig. 6 Vertical profiles of combined reflectivity from simulation on May 10, 2021 (shaded, unit: dBZ)、wind (vector, unit: m s^{-1}) and wind gusts (black dotted line, unit: m s^{-1}): (a1)12:50 (UTC, the same below)、(a2)13:11、(a3)13:22、(a4)13:59, and(b1-e1)12:40, (b2-e2)12:50,(b3-e3)13:10, and(b4-e4) 13:19, (a)observation、(b)Ctl_exp scheme、(c)Exp30_RF scheme、(d)Exp30_RV scheme、(e)Exp30_ALL scheme

针对模拟的组合反射率和地面 10 米风场结果，通过计算风暴演变过程中回波和风场分布的均方根误差 (RMSE)，来定量验证不同方案的模拟效果。表 3 为组合反射率的 RMSE，通过将对应时刻的观测组合反射率与模拟最大反射率插值到统一网格，再将二者无效值进行掩码，并计算整个回波场的均方根误差得到。相比控制试验，仅同化雷达回波显著改善了组合回波强度的模拟效果，尤其在风暴移入和加强阶段；仅同化径向风导致更强的环境风场，模拟的组合反射率显著偏强，导致 RMSE 反而偏大；同时同化方案一定程度上削弱了径向风同化方案的回波强度，尤其在回波断裂阶段，RMSE 为所有方案最小值达到 17.1。地面 10 米风速 RMSE 的计算，是通过将对应时刻的模拟阵风结果插值到观测站点，并与观测站极大风速进行对比得到。结果显示，同化雷达径向风之后能够显著提升近地层风场的模拟效果，比仅同化雷达反射率的 RMSE 有所降低。

表 3. 组合回波与地面 10 米风速 RMSE

Table. 3 RMSE of compress reflectivities and 10m wind speed

方案名称	移入阶段	加强阶段	成熟阶段	断裂阶段
组合反射率				
Ctl_exp	13.7	12.4	16.6	17.5
Exp30_RF	10.7	11.5	15.9	18.9
Exp30_RV	21.2	23.5	20.9	20.6
Exp30_ALL	21.1	22.6	20.7	17.1
地面 10 米风速				
Ctl_exp	5.3	4.4	4.4	5.4
Exp30_RF	5.2	4.2	4.4	5.2
Exp30_RV	3.8	3.3	3.7	4.8
Exp30_ALL	3.8	3.2	3.7	4.8

3.2 环境场分析

对比分析探空观测(图 1a)及不同模拟方案结果可知(图 7),在 12:30 (UTC, 下同)飊线系统形成前夕,仅 Exp30_RF(图 7b)试验模拟的 $Cape$ 小于 1000 J kg^{-1} , 其余三个方案模拟的 $Cape$ 值均超过 1500 J kg^{-1} , 尤其 Exp30_ALL 模拟的 $Cape$ 达到 2568 J kg^{-1} , 与实况(图 1a)相似。同时, Exp30_ALL 方案具有强 0-6 km 垂直风切变, 风速从低层偏东风转为中层西南风, 中低层沿顺时针旋转有暖平流, 与实况接近, 有利于不稳定能量增强及对流组织化发展(陈明轩和王迎春, 2012)。

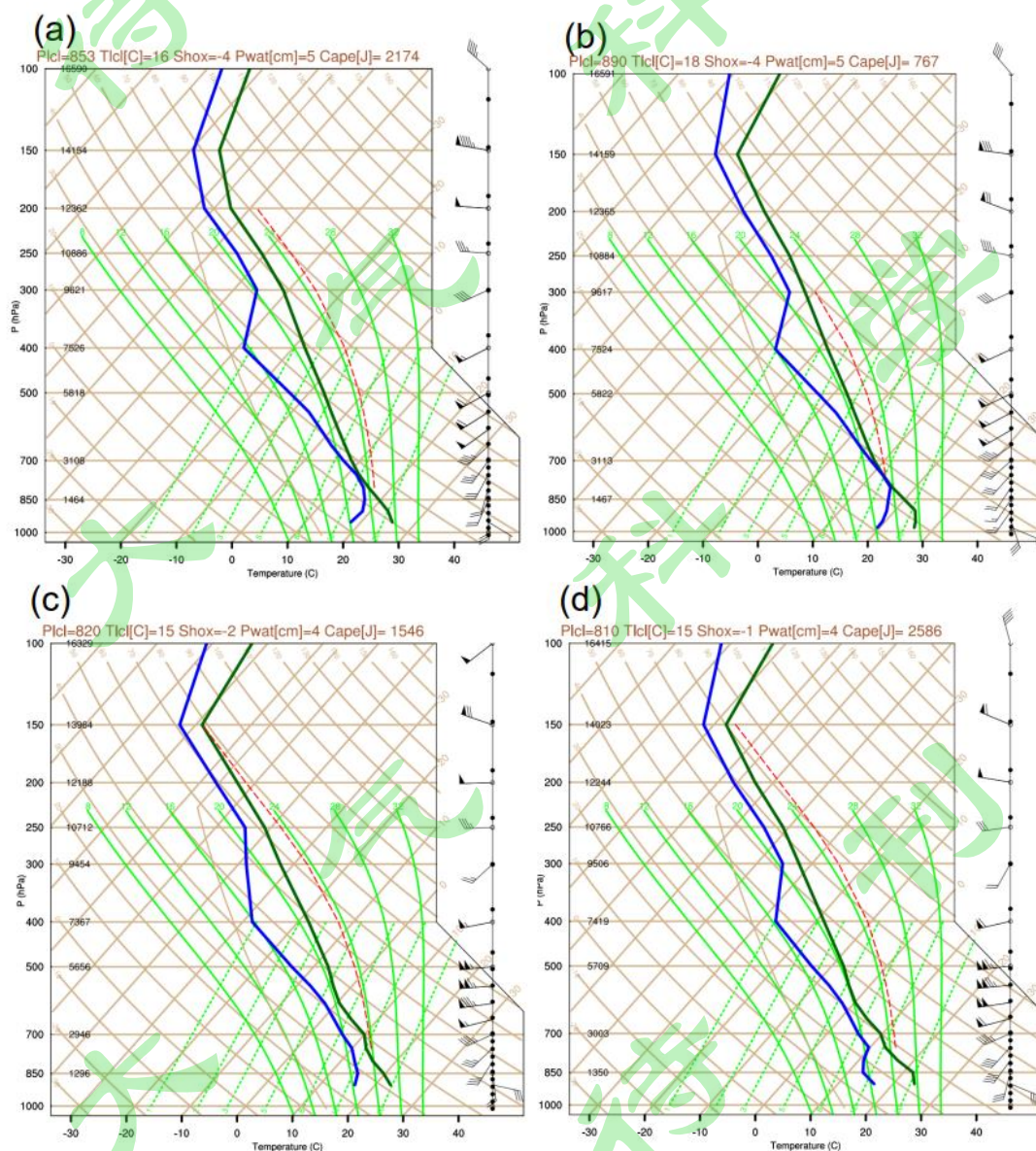


图 7 10 日 12 时 30 分 (UTC, 下同) 模拟探空 (a) Ctl_exp 方案、(b) Exp30_RF 方案、(c) Exp30_RV 方案、(d) Exp30_ALL 方案 (图 5 黑色圆点位置)

Fig. 7 T-lg p image of Fig.5 Position of the black dots from simulation at 12:30 on May 10

(UTC,the same below) (a)Ctl_exp scheme、(b)Exp30_RF scheme、(c)Exp30_RV scheme、
(d)Exp30_ALL scheme

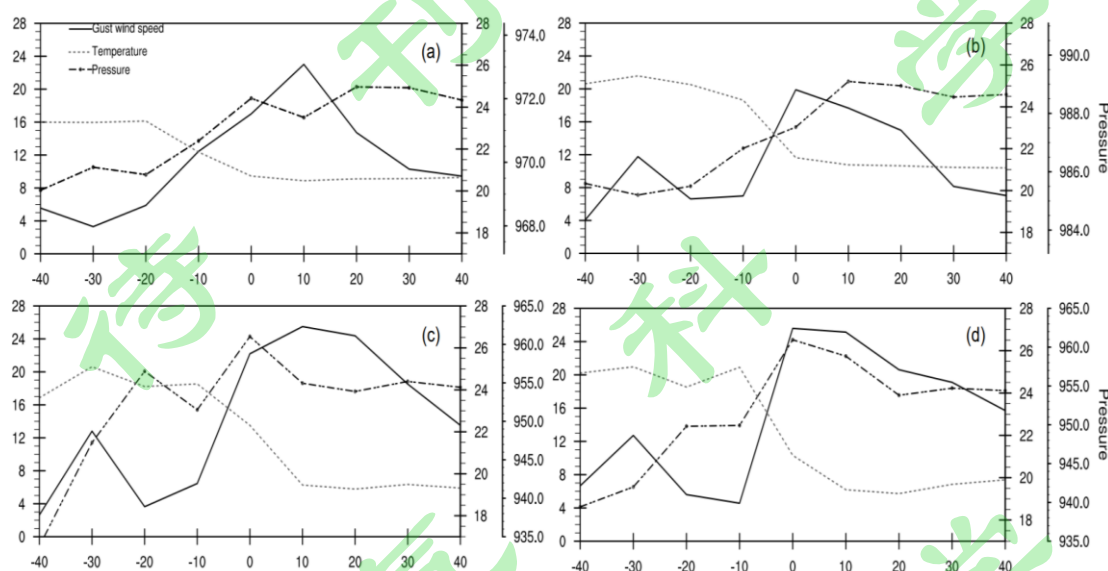


图 8 模拟的气温 (°C)、气压 (hPa) 和极大风速 (m s^{-1}) 时间序列 (a) Ctl_exp 方案、(b) Exp30_RF 方案、(c) Exp30_RV 方案、(d) Exp30_ALL 方案 (选取图 5 黑色圆点位置, 横坐标时间为 12:30-13:50, 其中 13:10 时刻坐标为 0)

Fig. 8 Time series of air temperature ($^{\circ}\text{C}$)、barometric pressure (hPa) and Maximum wind speed (m s^{-1}) from simulation at 12:30-13:50 on May 10 (UTC) (a)Ctl_exp scheme、(b)Exp30_RF scheme、(c)Exp30_RV scheme、(d)Exp30_ALL scheme(Fig. 5 the position of the black dot, and the abscissa time range is 12:30-13:50, where the coordinate is 0 at 13:10)

图 8 分析了飊线系统过境时模拟的地面单点气温、气压和极大风速的时间演变趋势, 四组试验均出现了气压涌升、气温骤降及风速陡增等强对流系统过境时的典型天气特征。通过与实况 (图 1b、c) 对比发现, Exp30_RV (图 8c) 和 Exp30_ALL 方案 (图 8d) 相较于 Ctl_exp (图 8a) 和 Exp30_RF (图 8b) 方案, 前二者模拟的极大风速更接近实况, 可达到 25 m s^{-1} , 且风速演变趋势与观测也更为接近, 风速在 10 分钟内迅速增大, 这说明就本次飊线产生雷暴大风过程的模拟来说, 径向风的同化对地面风速的影响相比反射率更显著, 当同时同化雷达径向风和反射率时 (Exp30_ALL 方案), 地面极大风速的时间演变趋势及峰值与观测更接近。

针对单站观测的风速、温度和气压，进一步通过计算 RMSE 来定量诊断不同方案的模拟效果，如表 4 所示。由于单站观测时间频率和模拟输出时间频率不同，因此分别计算过境前、过境时和过境后三个时间段内，观测和模拟气象要素的最大、最小和均值的 RMSE，并进行平均得到表 4。模拟风速的 RMSE 表明，全同化方案显著提升了风暴过境时的最大风速，和观测极大风速仅差 0.01 m s^{-1} ，同时相比仅同化径向风方案显著降低了风暴过境前过强的环境动量，但强风环境持续时间偏长，这可能与风暴后侧具有不断新生对流的演变过程有关。温度 RMSE 更显著地体现了全同化方案的优势，其模拟结果稳定提升；但气压则表现为仅同化雷达反射率方案更好，说明反射率同化通过调整微物理环境产生温湿变化，使气压的模拟结果更接近实况。风场的变化对气压影响更明显，因此径向风的同化反而降低了气压的模拟结果，即便全同化方案对气压的纠偏也极为有限。

表 4. 风速、温度和气压 RMSE
Table. 4 RMSE of wind speed、air temperature and barometric pressure

	风速				温度				气压			
RMSE	Ctl	Rf	UV	All	Ctl	Rf	UV	All	Ctl	Rf	UV	All
过境前	6.4	4.92	7.11	4.95	1.91	0.59	0.51	0.52	25.44	9.91	45.69	50.4
过境后	5.05	5.6	12.45	13.79	0.52	1.07	0.72	0.51	25.86	9.27	43.58	42.64
过境时	2.59	5.7	0.11	0.01	3.11	2.03	4.14	2.54	27.29	11.17	43.75	37.75

4 机制分析

4.1 对流系统时空演变及组织化发展特征分析

图 9 分析了 4 种方案模拟的雨水和霰粒子垂直结构的时空分布特征。分析表明，Ctl_exp 方案（图 9a1-4）与 Exp30_RF 方案（图 9b1-4）模拟的高层强霰粒子和中低层雨水大值区对应，呈多单体分布结构，与模拟的强回波垂直结构一致。同时，在对流发展和加强阶段，Exp30_RF 方案相比 Ctl_exp 方案，高层霰粒子显著增加，而在成熟和消亡阶段，未同化方案出现的偏强霰粒子和雨水含量亦有所降低。通过对比风暴垂直运动可以发现，Exp30_ALL 方案模拟的风暴前沿垂直上升运动明显比 Exp30_RF 和 Ctl_exp 方案更强且范围更大。强对流系统中越强的垂直运动，能够将低层湿环境中大量水汽带入越高层次大气，并对大滴粒子具有更强的承托力，有利水凝物粒子发生凝结、冻结和凝华，促进高层冰相粒子

的形成发展。同时，对流层高层在非绝热过程中出现的大量潜热释放，也对风暴垂直运动有促进作用，出现正反馈影响。根据垂直速度的演变可以看到（图 10），在全同化方案中（图 10b1-4），风暴前沿的垂直上升运动明显比仅同化反射率方案（图 10a1-4）更强且范围更大。强对流系统中越强的垂直运动，能够将低层湿环境中大量水汽带入越高层次大气，越有利通过凝结、冻结和凝华作用促进高层冰相粒子的形成发展。对比图 9c2 与 b2、图 9c3 与 b3 可以发现，全同化方案中对流系统存在更多水凝物，与全同化方案显著增强的风暴垂直运动有关。即由于 Exp30_ALL 方案显著改变了风暴中尺度动力场结构，导致对流区上升运动增强，有利高层霰粒子增长和对流组织化发展，中低层雨水混合比含量和范围也明显增大，显著改善了 Exp30_RF 方案的模拟效果。

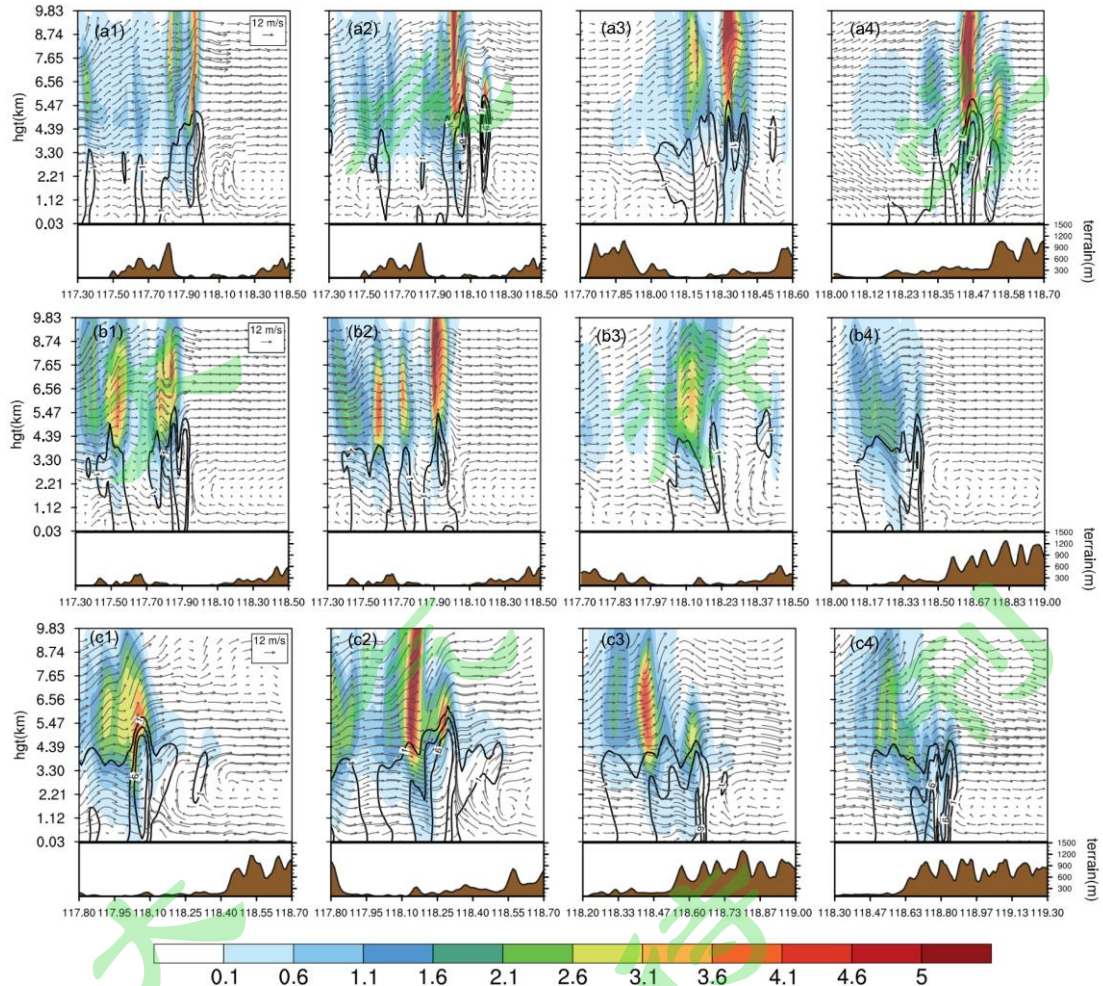


图 9 霰粒子混合比（填色，单位： g kg^{-1} ）、雨水混合比（黑色实线，单位： g kg^{-1} ）及风矢量（单位： m s^{-1} ）沿图 5 线段 A-B 白色实线的垂直剖面：(a1、b1、c1)12:40 (UTC，下同)、

(a2、b2、c2) 12:50、(a3、b3、c3) 13:10、(a4、b4、c4)13:19, 其中 (a) Ctl_exp 方案、
(b) Exp30_RF 方案 (c) Exp30_ALL 方案

Fig. 9 Vertical profile of graupel mixing ratio (shaded, unit: g kg^{-1}), rainwater mixing ratio (black solid line, unit: g kg^{-1}), and wind vector (unit: m s^{-1}) along the white solid line of line segments A-B in Fig. 5: (a1、b1、c1)12:40(UTC, the same below)、(a2、b2、c2)12:50、(a3、b3、c3)13:10、(a4、b4、c4)13:19, (a)Ctl_exp scheme、(b)Exp30_RF scheme、(c)Exp30_ALL scheme

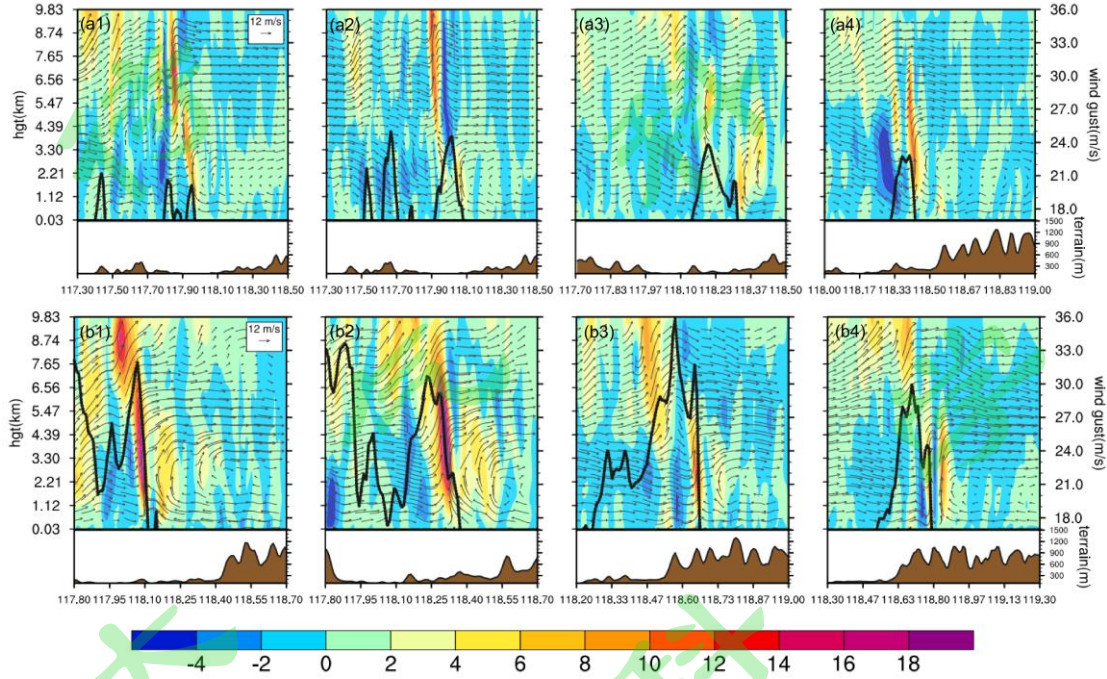


图 10 垂直速度剖面（填色，单位： m s^{-1} ）及地面阵风强度（黑色实线，单位： m s^{-1} ）沿图 5 线段 A-B 白色实线的垂直剖面：(a1, b1) 12:40、(a2, b2) 12:50、(a3, b3) 13:10、(a4, b4) 13:19, 其中(a) Exp30_RF 方案, (b)Exp30_ALL 方案

Fig. 10 Vertical profile of vertical velocity (shaded, unit: m s^{-1}), and wind vector (black solid line, unit: m s^{-1}) along the white solid line of line segments A-B in Fig. 5: (a1、b1)12:40、(a2、b2)12:50、(a3、b3)13:10、(a4、b4)13:19, (a) Exp30_RF scheme、(b)Exp30_ALL scheme

为了探究霰粒子和雨水粒子的形成过程，图 11 为不同方案云水凝结和水汽通量散度垂直剖面。结果显示，未同化方案 Ctl_exp（图 11a1-4）在对流上升区的云水凝结过程，随对流的演变不断增强，这与其持续增强的回波垂直剖面一致；仅同化雷达回波的 Exp30_RF（图 11b1-4）方案，显著减弱了对流上升区的云水凝结，并同时削弱了该区域的水汽通量散度，这说明雷达反射率的同化，有可能

通过改变对流区的水汽分布从而影响云水物质和对流系统的形成与发展。Exp30_ALL 方案（图 11c1-4）的模拟结果最接近实况，可以看到无论是对流上升区的云水凝结亦或水汽通量散度，其演变过程均与对流系统的发展具有较好一致性：对流层中高层的云水凝结过程和低层的水汽通量辐合，在对流单体发展和增强阶段最为强盛，尤其增强阶段，中低层后向入流气流更为显著；在对流成熟阶段（图 11c3），中层 4 km 高度附近有显著的后向入流下沉，这与典型的线状对流系统剖面结构一致（Zhou et al., 2020, Liu et al., 2022），地面大风集中出现在对流带前沿（图 6e3）。结果表明，雷达反射率和径向风的同化方案能够同时改变云水物质的分布及对流系统的中尺度动力场结构特征，进而显著影响对流系统的时空演变及组织化发展过程。

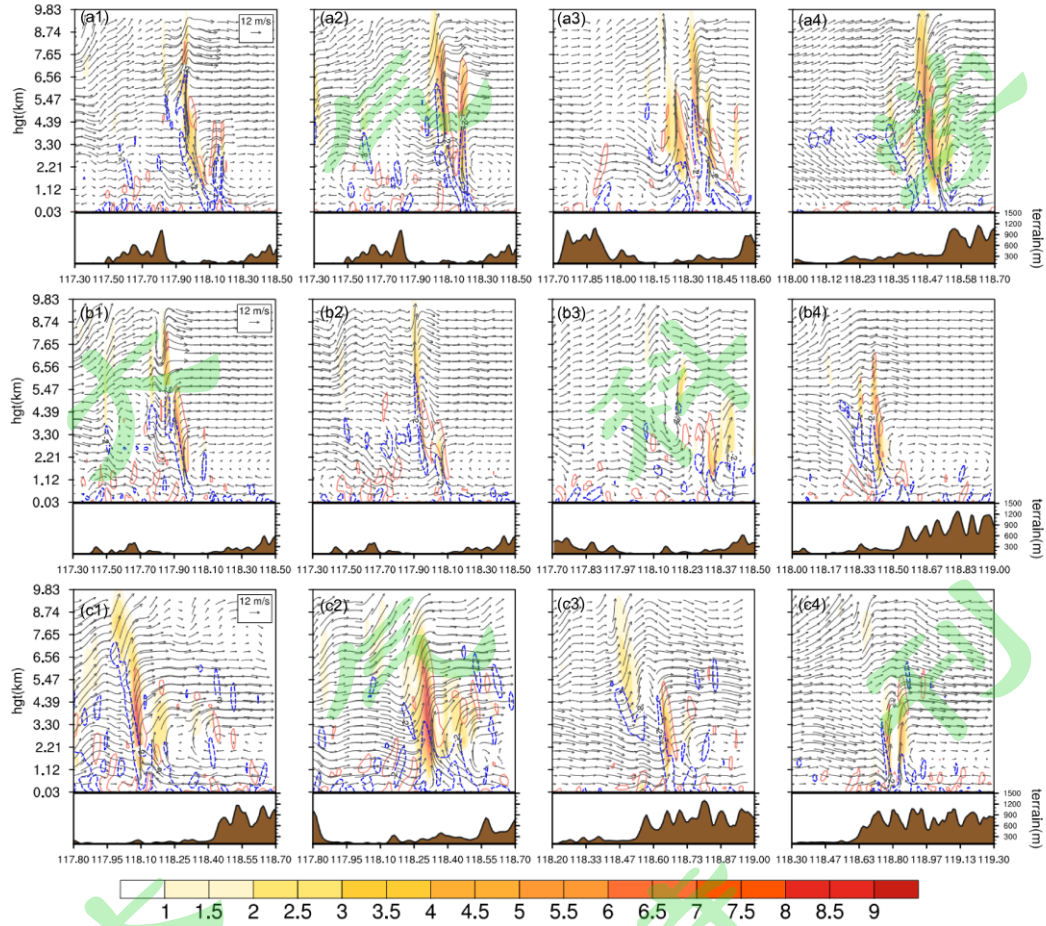


图 11 模拟的云水凝结（填色，单位： k s^{-1} ）、水汽通量辐合（蓝色虚线，单位： $10 \text{ e}^{-05} \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ）和水汽通量辐散（黄色实线，单位： $10 \text{ e}^{-05} \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ）垂直剖面：(a1、b1、c1)12:40、(a2、b2、c2) 12:50、(a3、b3、c3) 13:10、(a4、b4、c4)13:19，(a) Ctl_exp 方案、(b) Exp30_RF

方案 (c) Exp30_ALL 方案

Fig. 11 Simulated vertical profiles of cloud-water condensation (shaded, unit: k s^{-1}), water vapor flux convergence (blue dotted line, unit: $10 \text{ e}^{-05} \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), and water vapor flux divergence (yellow solid line, unit: $10 \text{ e}^{-05} \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$): (a1、b1、c1)12:40、(a2、b2、c2)12:50、(a3、b3、c3)13:10、(a4、b4、c4)13:19, (a)Ctl_exp scheme、(b)Exp30_RF scheme、(c)Exp30_ALL scheme

为了进一步对比分析不同同化方案对对流组织化发展的影响, 图 12 描绘了沿对流系统方向回波的垂直剖面(图 5 中由 C 至 D 点白色实线)。可以看到, 从发展阶段到消亡阶段, Ctl_exp 方案(图 12a1-4)和 Exp30_RF 方案(图 12b1-4)模拟的强对流系统均呈显著的多单体结构, 对流核零星分布且没有明显的组织化合并过程。与之不同的是, Exp30_ALL 方案(图 12c1-4)模拟的强对流系统在发展和增强阶段, 对流核合并为大面积强回波中心, 伴随强烈的上升气流, 并在成熟和消亡阶段分裂为多单体结构, 中低层对流单体间的出流辐合气流也更明显。结果表明, 同化径向风之后显著改善中尺度动力场, 对流单体间的下沉出流及低层辐合作用增强, 由图 12c2 可以看到, 回波中心南侧(C 点)的垂直环流加强, 明显的下沉气流导致地面大风风速显著增加。

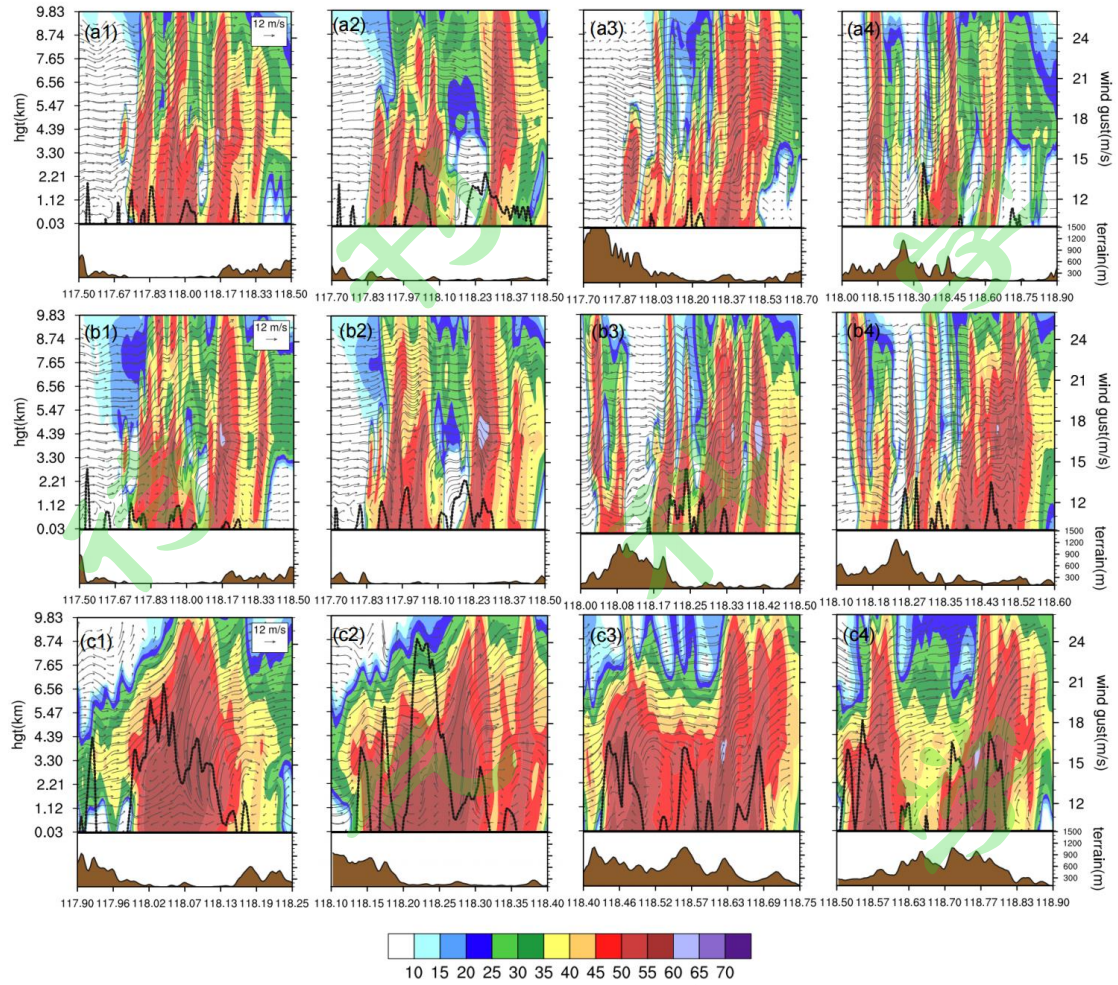


图 12 模拟的雷达反射率（填色，单位：dBZ）、风矢量（单位： m s^{-1} ）及地面阵风（黑色虚线，单位： m s^{-1} ）沿图 5 从 C 至 D 点白色实线的垂直剖面：(a1、b1、c1)12:40、(a2、b2、c2) 12:50、(a3、b3、c3) 13:10、(a4、b4、c4)13:19, (a) Ctl_exp 方案、(b) Exp30_RF 方案 (c) Exp30_ALL 方案

Fig. 12 Simulated vertical profile of radar reflectivity (shaded, unit: dBZ), wind vector (unit: m s^{-1}), and ground gusts (black dotted line, unit: m s^{-1}) along the solid white line from points C to D in Fig.5: (a1、b1、c1)12:40、(a2、b2、c2)12:50、(a3、b3、c3)13:10、(a4、b4、c4)13:19, (a) Ctl_exp scheme、(b) Exp30_RF scheme、(c) Exp30_ALL scheme

4.2 地面大风形成机制分析

大量研究表明，线状对流系统产生雷暴大风主要与对流下沉出流、后向入流下沉及雨水蒸发和大粒子拖曳等作用有关（Schmidt and Cotton, 1989; 王秀明等，2012; 刘香娥和郭学良，2012; 张琳娜等，2018）。为了探究不同方案模拟的热

动力作用机制，图 13 描绘了相当位温与温度的垂直剖面。可以看到，Exp30_ALL 方案（图 13c1-4）模拟的相当位温在对流带前沿中低层具有相对浅薄的暖湿层，同时在对流带后侧中高层，相当位温大值区较其他方案更深厚，低层冷中心也更强，这体现出 Exp30_ALL 方案模拟的对流带后侧层状云区具有更稳定的层结分布，有利下沉气流及中层动量下传产生大风。同时，Exp30_ALL 方案模拟的中低层强冷中心集中分布在对流带后侧并在垂直方向上延伸，尤其当对流系统发展成熟（图 13c3），冷中心与下沉的后向入流对应，呈前倾结构并在对流带前沿大面积触地，此时地面大风显著增强。等温线受地形作用影响明显，山脉起伏引起气流局地垂直扰动伴随产生下沉增温和上升降温的等温线分布。在对流发展阶段（图 13c1），后侧强冷中心与前侧暖湿入流形成强温度梯度，产生的负浮力有利后侧动量下传；在对流成熟阶段（图 13c3），冷中心位于山前爬坡处，动力抬升冷却叠加相当位温冷中心，可能是导致大面积冷中心及后向入流下沉的主要原因。整体来看，同时同化雷达径向风和反射率的 Exp30_ALL 方案，其模拟的热动力场也更有利于对流系统的组织化发展，与典型线状对流系统产生雷暴大风的风暴结构更接近。

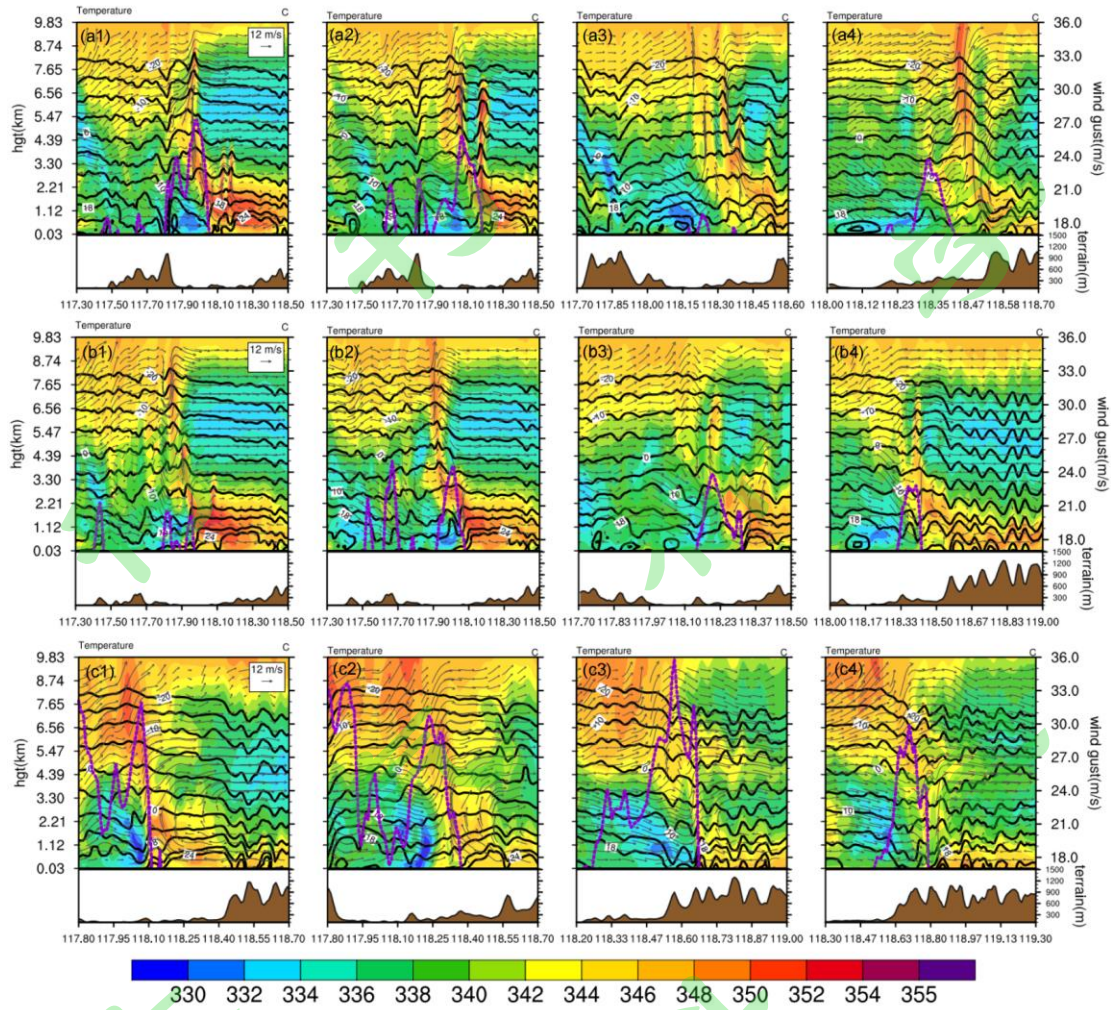


图 13 模拟的相当位温（填色，单位：k）、风矢量（单位： m s^{-1} ）、温度（黑色实线，单位： $^{\circ}\text{C}$ ）及阵风（紫色虚线，单位： m s^{-1} ）沿图 5 中 A-B 白色实线的垂直剖面：（a1、b1、c1）12:40（UTC，下同）、（a2、b2、c2）12:50、（a3、b3、c3）13:10、（a4、b4、c4）13:19，（a）Ctl_exp 方案、（b）Exp30_RF 方案（c）Exp30_ALL 方案

Fig. 13 Simulated vertical profile of the equivalent potential temperature (shaded, unit: k), wind vector (unit: m s^{-1}), temperature (solid black line, unit: $^{\circ}\text{C}$), and wind gust (purple dotted line, unit: m s^{-1}) along the solid white lines A-B in Fig.5: (a1、b1、c1)12:40(UTC, the same below)、(a2、b2、c2)12:50、(a3、b3、c3)13:10、(a4、b4、c4)13:19, (a)Ctl_exp scheme、(b)Exp30_RF scheme、(c)Exp30_ALL scheme

上述分析表明，Exp30_ALL 方案更好地模拟出了对流带后侧有利下沉运动的热动力作用，图 14 进一步探究霰粒子融化、雨水蒸发等关键云微物理过程对地面大风形成的影响。可以看到，只有 Exp30_ALL 方案（图 14c1-4）很好地模

拟出了对流带后侧前倾的层状云区结构，同时霰粒子融化集中分布在层状云区 0℃层附近，中低层雨水蒸发主要位于对流带附近。未同化 Ctl_exp 方案（图 14a1-4）的云水分布结构松散，具有很弱的霰粒子融化和雨水蒸发过程；同化反射率 Exp30_RF 方案（图 14b1-4）的霰粒子融化过程显著增强，但云水含量和雨水蒸发过程变化不明显。同时同化反射率和径向风 Exp30_ALL 方案（图 14c1-4），不仅显著增强了霰粒子融化和雨水蒸发过程，还增加了云水混比，并模拟出了对流带后侧的层状云区。对比分析表明，对流带后侧的层状云区具有显著的霰粒子融化，是促进中层后向入流下沉产生地面大风的重要影响机制。

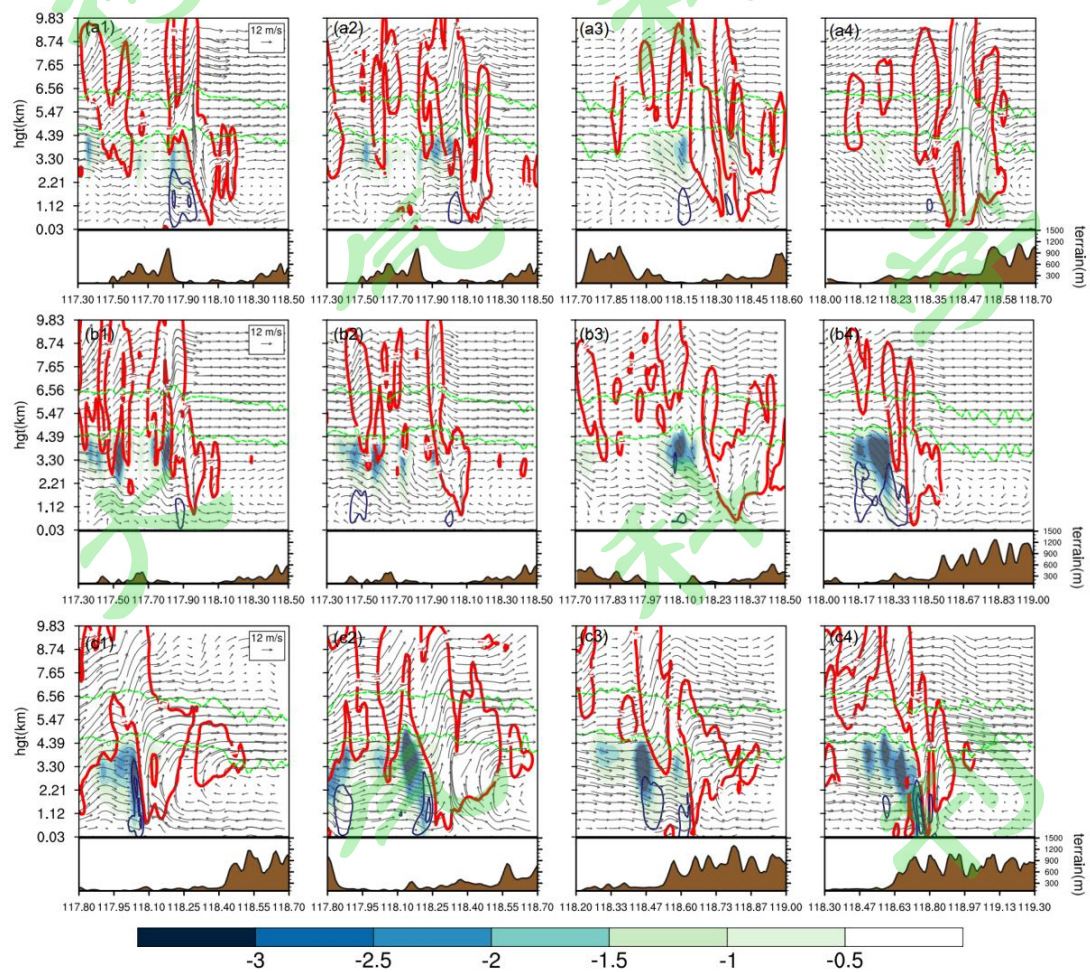


图 14 模拟的霰粒子融化（填色，单位： k s^{-1} ）、雨水蒸发（深蓝色实线，单位： k s^{-1} ）及云水混比（红色实线，单位： g kg^{-1} ）的垂直剖面（绿色虚线为 0℃、-10℃等温线，沿图 5A-B 白色实线）：（a1、b1、c1）12:40、（a2、b2、c2）12:50、（a3、b3、c3）13:10、（a4、b4、c4）13:19，

（a）Ctl_exp 方案、（b）Exp30_RF 方案（c）Exp30_ALL 方案

Fig. 14 Simulated vertical profiles of graupel melt (shaded, unit: k s^{-1}), rainwater evaporation

(dark blue solid line, unit: k s^{-1}), and cloud-water mixing ratio (red solid line, unit: g kg^{-1}) along the solid white lines A-B in Fig. 5 (green dotted line is 0°C , -10°C isotherm line): (a1、b1、c1)12:40、(a2、b2、c2)12:50、(a3、b3、c3)13:10、(a4、b4、c4)13:19, (a)Ctl_exp scheme、(b)Exp30_RF scheme、(c)Exp30_ALL scheme

上述研究表明，后向入流下沉是引起此次飊线雷暴大风的重要原因，其受热动力作用和云微物理过程的共同影响，因此我们采用浮力公式(2)对下沉机制进行定量诊断，其公式为：

$$B = g(\theta' / \bar{\theta} + 0.61r_v' - r_h) \quad (2)$$

其中 B 为浮力， g 为地球表面重力加速度， r_v' 和 θ' 分别为相对于初始模拟时刻的扰动水汽混合比和扰动相当位温， $\bar{\theta}$ 为初始模拟时刻相当位温 ($\approx 300\text{K}$)， r_h 为云水、雨水、霰粒子、雪粒子和冰粒子混合比之和，体现了云水粒子重力拖曳对浮力的贡献。由图 15c1-4 可以看到，同时同化雷达径向风和反射率模拟出的低层负浮力强度更强，尤其在对流成熟和消亡阶段，具有显著的高层正浮力和低层负浮力垂直分布结构。未同化方案（图 15a1-4）低层负浮力分布浅薄，主要以正浮力为主；同化反射率方案（图 15b1-4）显著削弱了中高层正浮力，负浮力分布范围有所增加。通过对比水汽扰动项和粒子重力拖曳项的贡献发现，除未同化方案的中层大气水汽含量较高，有利形成正浮力外，同化雷达观测的方案均表现出相对水汽项更显著的云水物质重力拖曳作用，尤其 Exp30_ALL 方案模拟的粒子拖曳分布，与前倾的层状云区和低层负浮力中心均有较好地一致性，这说明只同化雷达反射率，可能仅对云水物质含量具有一定影响，但无法有效调整其分布结构。然而，同时同化雷达径向风和反射率，能够通过调整中尺度动力场改变云内水物质的分布结构，其显著影响对流系统的形成和演变。

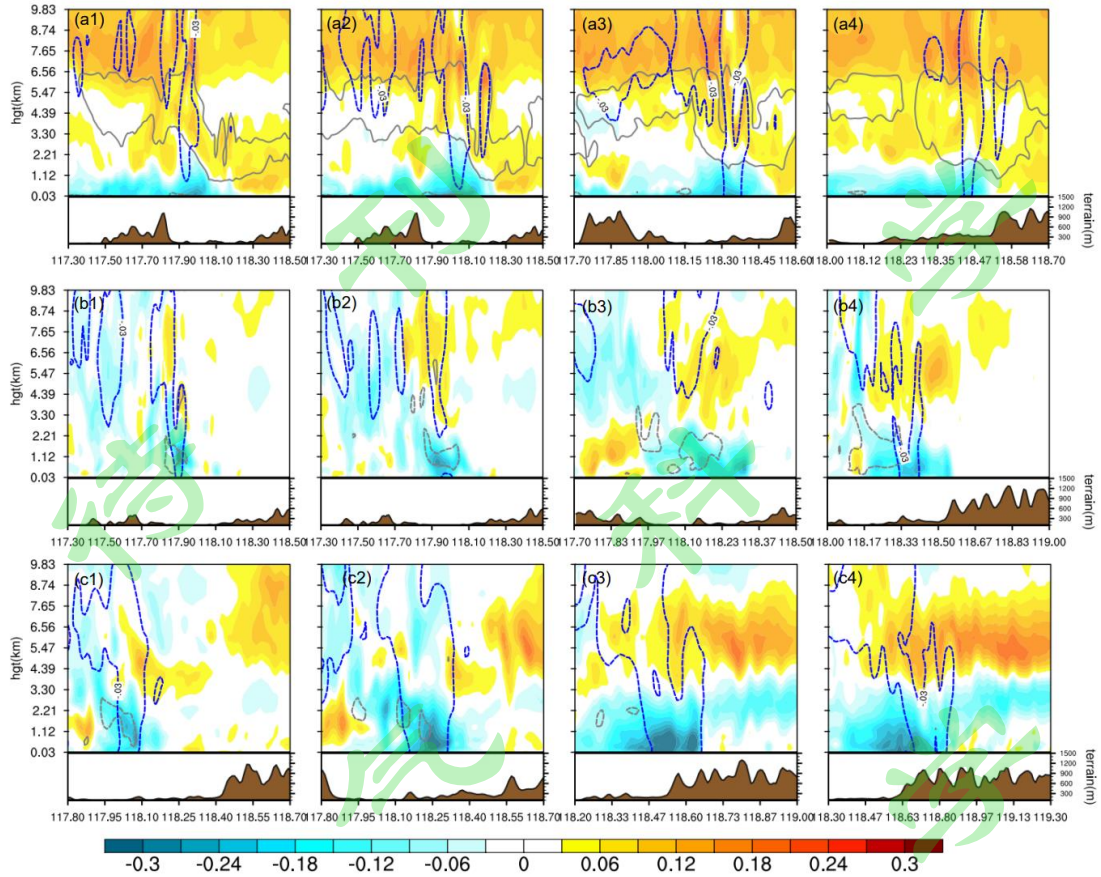


图 15 模拟的浮力（填色，单位： m s^{-2} ）、扰动水汽混合比项（灰色虚线，单位： m s^{-2} ）及云水物质重力拖曳项（蓝色虚线，单位： m s^{-2} ，沿图 5A-B 白色实线）的垂直剖面：（a1、b1、c1）12:40、（a2、b2、c2）12:50、（a3、b3、c3）13:10、（a4、b4、c4）13:19，（a）Ctl_exp 方案、（b）Exp30_RF 方案、（c）Exp30_ALL 方案

Fig. 15 Simulated vertical profiles of buoyancy (colored, unit: m s^{-2}), perturbed water-vapor mixing term (gray dotted line, unit: m s^{-2}), and cloud-water mass gravity drag term (blue dotted line, unit: m s^{-2}) along the solid white lines A-B in Fig. 5: (a1、b1、c1)12:40、(a2、b2、c2)12:50、(a3、b3、c3)13:10、(a4、b4、c4)13:19, (a)Ctl_exp scheme、(b)Exp30_RF scheme、(c)Exp30_ALL scheme

4.3 飊线雷暴大风形成的概念模型

对比 Ctl_exp 未同化试验与 Exp30_ALL 同化试验的强对流风暴发展物理概念模型（图 16a、b）可以发现，由于同时同化雷达径向风和反射率，Exp30_ALL 方案模拟出了飊线的组织化演变过程，尤其模拟出了对流带后侧的层状云区。伴随飊线系统出现的后向入流，在层状云区强负浮力作用下下沉，叠加近地面冷池

共同产生地面大风。一方面，层状云区具有显著的霰粒子融化和雨水蒸发，伴随大粒子拖曳共同产生负浮力，导致中层后向入流在层状云区不断下沉，并向后输送中层高水平动量到对流区前沿，形成近地面大风；另一方面，下沉运动产生的绝热增温作用，有利雨水蒸发形成低空冷池，在冷池不断下沉过程中到达地面形成雷暴高压，通过加强水平动量促进地面大风形成。正是由于同时同化雷达径向风和反射率，不仅改变了云内水物质含量，还通过及时调整相应的中尺度动力场辐合辐散结构，随之显著改变云内水物质的分布特征，从而促进飚线组织化发展、形成有利雷暴大风的中尺度对流系统。

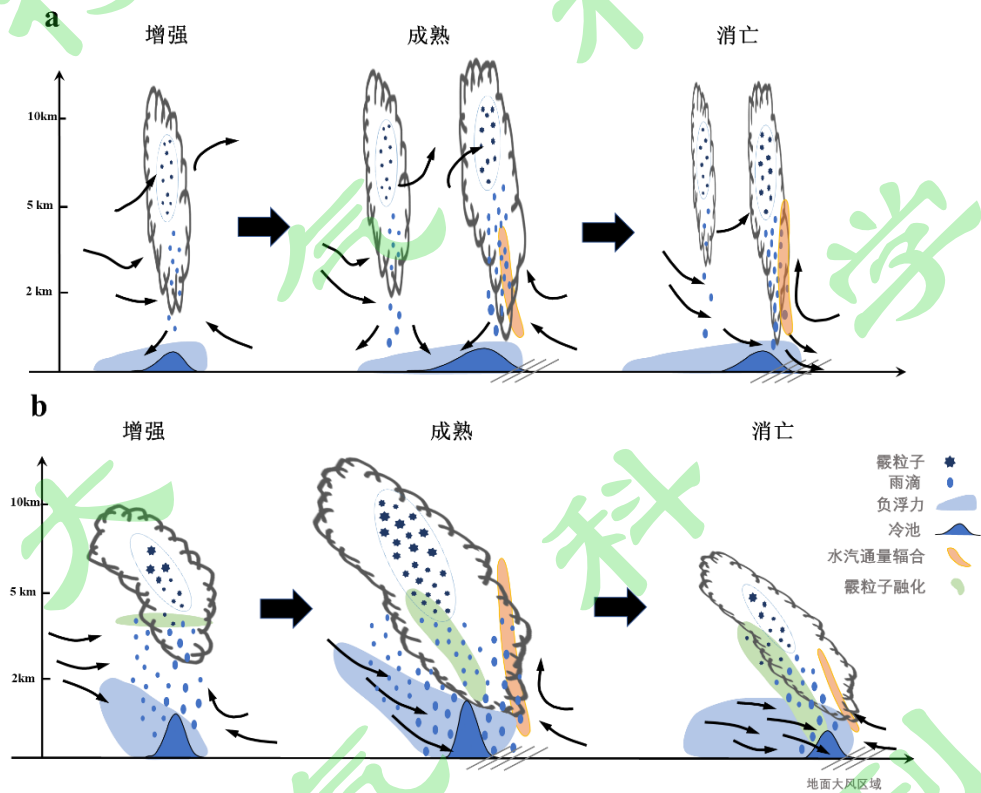


图 16 (a) Ctl_exp 未同化试验与 (b) Exp30_ALL 同化试验的强对流风暴发展物理概念模型

Fig. 16 Physical conceptual model of severe convective storm development (a)Ctl_exp non-assimilation test and (b) Exp30_ALL assimilation test

5 结论和讨论

针对 2021 年 5 月 10 日发生在我国浙西的一次飚线过程，利用 WRF 中尺度模式及 GSI 循环同化雷达反射率和经向风设计多种试验方案，分析模拟结果并探讨循环同化雷达资料反射率和径向风对此次过程模拟的改善作用。得出以下结

论:

(1) Ctl_exp 方案和 Exp30_RF 方案仅能模拟出多单体对流系统,不足以组织化发展为线状对流系统,只有 Exp30_ALL 方案模拟出线状对流结构,具有明显的对流带前沿和后侧的层状云区,风暴前沿垂直运动也显著增强。

(2) Exp30_RV 方案的模拟结果与 Exp30_ALL 方案模拟结果相似,说明雷达径向风的同化效果相比反射率,对此次线状对流系统的模拟影响更为显著。径向风的同化显著增强了风暴内垂直运动,有利高层冰相粒子的形成,同时,更强的凝结加热非绝热作用,对风暴垂直运动形成正反馈。

(3) 雷暴大风的形成主要由对流带后侧层状云区产生的强负浮力有关,后向入流在层状云区不断下沉,在霰粒子融化、雨水蒸发和大滴粒子拖曳的共同作用下产生近地面大风。因此,雷达径向风的同化模拟出了线状对流结构,能够产生更强的地面大风。

目前,本文的同化模拟效果分析,仅针对雷达径向风和反射率。结果表明,雷达资料循环同化方法,特别是同时同化反射率和径向风,能够有效提升此次飑线过程的模拟效果。但在试验设计过程中,我们针对同化频率和同化窗也进行了大量测试分析,发现当采用 6 分钟一次的径向风同化,且时间窗超过 30 分钟时,会显著增强对流系统的中尺度风场,导致风暴快速移动并提前进入消亡期,同样无法组织化发展为线状对流系统。因此,针对雷达资料的数据同化效果验证,还需进行更多大量的试验研究。同时,由于不同天气背景下强对流发生发展的物理机制不同,针对不同类型强天气的数据同化影响也有明显差异。因此,后续工作还需针对雷达资料开展不同天气个例的更多大量试验研究,以明晰不同同化策略、不同数据源对不同天气类型的同化效果影响。

参考文献(References)

- 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, (3):371-386. Chen Mingxuan, Wang Yingchun. 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 Meteorologica Sinica, (3): 371-386.doi: 10.11676/qxxb2012.033
- 陈晓欣,俞小鼎,王秀明. 2022. 中国大范围雷暴大风事件(Derechos)研究:时空分布、环境背景和对流系

- 统形态特征[J]. 气象学报, 80(01): 67-81. Chen Xiaoxin, Yu Xiaoding, Wang Xiuming. 2022. Investigation of Derechos in China: Spatiotemporal distribution, environmental characteristics, and morphology of Derechos producing convective systems[J]. Acta Meteorologica Sinica, 80(01): 67-81.doi: 10.11676/qxxb2021.067
- 顾建峰. 2006. 多普勒雷达资料三维变分直接同化方法研究[D]. 中国气象科学研究院博士学位论文. Gu Jianfeng. 2006. Research on direct assimilation of Doppler radar observation using 3DVar[D]. Ph. D. dissertation(in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- 刘黎平, 胡志群, 吴翀. 2016. 双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和应[J]. 气象科技进展, 6(3): 28-33. Liu Liping, Hu Zhiqun, Wu Chong. 2016. Development and Application of Dual Linear Polarization Radar and Phased-array Radar[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 6(3): 28-33. doi: 10.3969/j.issn. 2095-1973.2016.03.003
- 刘香娥, 郭学良. 2012. 灾害性大风发生机理与飑线结构特征的个例分析模拟研究[J]. 大气科学, 36(6):1150-1164. Liu Xiang'e, Guo Xueliang. 2012. Analysis and Numerical Simulation on Research on Severe Surface Wind Formation Mechanism and Structural Characteristics of a Squall Line Case[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 36(6):1150-1164. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11212
- 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 Jinzhong, Wang Xiuying, Shen Feifei, et al. 2015. Numerical simulation of Doppler radar data assimilation on a squall line event in Jiangsu Province[J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese),35(3):248-257.
- 任星露. 2020. 弱天气尺度强迫下江淮流域一次飑线的数值模拟及资料同化[D]. 兰州大学硕士学位论文, P445. Ren Xinglu. 2020. Numerical simulation and data assimilation of a squall line in the Yangtze-Huaihe River Valley under weak synoptic-scale forcing[D]. M.S. thesis(in Chinese) , Lanzhou University, P445.
- 孙娟珍, 陈明轩, 范水勇. 2016. 雷达资料同化方法: 回顾与前瞻[J].气象科技进展, 6(3): 17-27. Sun Juanzhen, Chen Mingxuan, Fan Shuiyong. 2016. Radar data assimilation methods: Review and future perspective [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 6(3): 17-27. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.002
- 汪卫国, 平凡, 周括, 等. 2024. 雷达资料循环同化对 2021 年“4·30”南通雷暴大风模拟的影响研究[J]. 大气科学, 48(4): 1593-1607. Wang Weiguo, Ping Fan, Zhou Kuo, et al. 2024. Influence of Radar Data Cycling

- Assimilation on Thunderstorm Gale Simulation in Nantong on April 30, 2021 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 48(4): 1593-1607. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2302.22108
- 王秀明, 俞小鼎, 周小刚, 等. 2012.“6.3”区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析[J].高原气象,31 (2):504-514.
- Wang Xiuming, Yu Xiaoding, Zhou Xiaogang, et al. 2012. Study on the formation and evolution of “6.3” damage wind[J]. Plateau Meteorology (in Chinese),31 (2): 504-514.
- 薛湛彬, 陈娴, 吴俞, 等. 2017. 雷达资料同化在局地强对流预报中的应用 [J]. 大气科学, 41 (4): 673-690. Xue Chenbin, Chen Xian, Wu Yu, et al. 2017. Application of radar data assimilation in local severe convective weather forecast [J]. Chines Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (4): 673-690. doi:10. 3878/j.issn.1006-9895.1608.15228
- 许爱华, 孙继松, 许东蓓, 等. 2014. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 40(4): 400-411. Xu Aihua, Sun Jisong, Xu Dongbei, et al. 2014. Basic Synoptic Situation Classification and Element Character of Severe Convection in China[J]. Meteorological Monthly, 40(4):400-411. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.04.002
- 杨雨轩, 张立凤, 张斌, 李逍. 2018. 多普勒天气雷达资料同化对冬季暴雨模拟的影响研究[J]. 大气科学, 42(5): 1096-1108. Yang Yuxuan, Zhang Lifeng, Zhang Bin, Li Xiao. 2018. Impact of Doppler Radar Data Assimilation on the Simulation of a Heavy Winter Rainfall[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 42(5): 1096-1108. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1708.17187
- 俞小鼎. 2011. 强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警[J]. 气象科技进展, 1(3): 31-41. Yu Xiaoding. 2011. Detection and Warnings of Severe Convection with Doppler Weather Radar[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 1(3): 31-41.
- 俞小鼎 周小刚, 王秀明. 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 70(3): 311-337. Yu Xiaoding, Zhou Xiaogang, Wang Xiuming. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteorologica Sinica, 70(3): 311-337. doi: 10.11676/qxxb2012.030
- 俞小鼎, 郑永光. 2020. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报, 78(3): 391-418. Yu Xiaoding, Zheng Yongguang. 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 78(3): 391-418. doi: 10.11676/qxxb2020.035
- 张哈昀, 王振会, 楚志刚, 等. 2018. 天气雷达反射率资料订正前后在 ARPS 模式中的同化试验对比[J]. 气象

- 科学, 038(001): 57-65. Zhang Hanyun, Wang Zhenhui, Chu Zhigang, et al. 2018. Corrected and original weather radar reflectivity data assimilation in numerical model ARPS[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 038(001): 57-65.
- 张琳娜, 冉令坤, 李娜, 等. 2018. 雷暴大风过程中对流层中低层动量通量和动能通量输送特征研究[J]. 大气科学, 42(1): 178-191. Zhang Linna, Ran Lingkun, Li Na, et al. 2018. Analysis of momentum flux and kinetic energy flux transport in the middle and lower troposphere during a thunderstorm event [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (1): 178-191, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1707.16238
- 张小玲, 杨波, 盛杰, 等. 2018. 中国强对流天气预报业务发展[J]. 气象科技进展, 8(3): 8-18. Zhang Xiaoling, Yang Bo, Sheng Jie, et al. 2018. Development of operations on forecasting severe convective weather in China[J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 8(3): 8-18. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2018.03.001
- 周波涛, 钱进. 2021. IPCC AR6 报告解读:极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 17(6): 713-718 Zhou Bo-Tao, Qian Jin. 2021. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. Advances in Climate Change Research, 17(6): 713-718. doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2021.167
- 邹玮, 沈晗, 袁慧玲. 2022. 雷达资料同化对一次飑线过程的模拟影响[J]. 大气科学, 46(6): 1281-1299. Zou Wei, Shen Han, Yuan Huiling. 2022. Simulation Impact of Radar Data Assimilation on a Squall Line Process[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(6): 1281-1299. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2105.20191
- Atkins N T and Laurent M S. 2009. Bow echo mesovortices. Part I: processes that influence their damaging potential[J]. Monthly Weather Review, 137(5): 1497-1513.
- Atkins N T and Laurent M S. 2009. Bow echo mesovortices. Part II: their genesis[J]. Monthly Weather Review, 137(5): 1514-1532.
- Campbell M A, Cohen A E, Coniglio M C, et al. 2017. Structure and motion of severe-wind-producing mesoscale convective systems and derechos in relation to the mean wind[J]. Weather and Forecasting, 32(2): 423-439.
- Cavallo S M, Dudhia J, and Snyder C. 2011. A multi-layer upper boundary condition for longwave radiative flux to correct temperature biases in a mesoscale model[J]. Mon. Wea. Rev., 139, 1952-1959.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation[J]. Mon. Wea. Rev., 129, 569-585.

- Dong J L, Xue M. 2013. Assimilation of radial velocity and reflectivity data from coastal WSR-88D radars using an ensemble Kalman filter for the analysis and forecast of landfalling hurricane Ike (2008) [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 139 (671): 467-487, doi:10.1002/qj.1970
- French A J, Parker M D. 2014. Numerical simulations of bow echo formation following a squall line-supercell merger[J]. Monthly Weather Review, 142(12): 4791-4822.
- Fujita T T. 1978. Manual of downburst identification for Project NIMROD[J]. Chicago, Satellite and Mesometeorology Research Project.
- 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, D13103.
- Jiménez P A, Dudhia J, Gonzalez-Ruoco J, et al. 2012. A revised scheme for the WRF surface layer formulation[J]. Mon. Wea. Rev., 140(3), 898-918. doi: 10.1175/MWR-D-11-00056.1
- Lilly D K. 1990. Numerical prediction of thunderstorms-has its time come[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 116: 779-798.
- Liu Y N, Ping F, et al. 2022. Comparative study of the simulation and mechanism of two different severe thunderstorms embedded in a squall line in North China[J]. Atmospheric Research, 270: 106074.
- Markowski P M. 2002. Hook echoes and rear-flank downdrafts: a review[J]. Monthly Weather Review, 130: 852-876.
- Ma R, Sun J, Yang X. 2021. A 7-Yr Climatology of the Initiation, Decay, and Morphology of Severe Convective Storms during the Warm Season over North China[J]. Monthly Weather Review, 149(8): 2599-2612. doi: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-20-0087.1>
- Meng Z, Yan D, Zhang Y. 2013. General Features of Squall Lines in East China[J]. Monthly Weather Review, 141(5): 1629-1647. doi:10.1175/MWR-D-12-00208.1
- Morrison H, and Gettelman A. 2008. A New Two-Moment Bulk Stratiform Cloud Micro-physics Scheme in the Community Atmosphere Model, Version 3 (CAM3). Part I: Description and Numerical Tests[J]. J. Clim., 21, 3642-3659.
- Olson J B, and Brown J M. 2009. A Comparison of two Mellor-Yamada-based PBL schemes in Simulating a Hybrid Barrier Jet[C]. 23rd Conference on Weather Analysis and Forecasting/19th Conference on Numerical Weather Prediction, Omaha, Vol. 13.

- Olson J B, Kenyon J S, Angevine W A, et al. 2019. A Description of the MYNN-EDMF Scheme and the Coupling to Other Components in WRF-ARW[R]. NOAA Technical Memorandum OAR GSD-61.doi: 10.25923/n9wm-be49.
- Schmidt J M, Cotton W R.1989. A high plains squall line associated with severe surface winds [J]. J. Atmos. Sci., 46 (3): 281-302, doi:10.1175/ 1520-0469(1989)0462.0.CO;2.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2019. A description of the Advanced Research WRF Model version 4[R]. NCAR Technical Note, NCAR/TN-556+STR, 145 pp. doi:10.5065/1dfh-6p97
- Sun J, Flicker D W, Lilly D K. 1991. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from single-Doppler radar data[J]. J. Atmos Sci, 48: 876-890.
- Tewari M, Chen F, Wang W, et al. 2004. Implementation and Verification of the Unified Noah Land Surface Model in the WRF Model[C]. In 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction, Seattle
- Taszarek M, Pilgus N, Orlikowski J, et al. 2019. Derecho evolving from a mesocyclone-a study of 11 August 2017 severe weather outbreak in Poland: event analysis and high-resolution simulation[J]. Monthly Weather Review, 147(6): 2283-2306.
- Tong M, Xue M. 2008. Simultaneous estimation of microphysical parameters and atmospheric state with radar data and ensemble square-root Kalman filter. Part II: Parameter estimation experiments[J]. Mon. Wea. Rev., 136: 1649-1668.
- Wang H, Sun J, Zhang X, et al.2013. Radar data assimilation with WRF4DVAR: Part I. system development and preliminary testing[J]. Mon. Wea. Rev., 141: 2224-2244.
- Weber M, Hondl K, Yussouf N, et al. 2021. Towards the next generation operational meteorological radar[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 102(7): E1357-E1383.
- Weygandt S S, Benjamin S G, Smirnova T G, et al. 2008. Assimilation of radar reflectivity data using a diabatic digital filter within the rapid update cycle[J]. Preprint, 12th Conf on IOAS-AOLS, Amer. Meteor. Soc.
- Wurman J, Kosiba K, Pereira B, et al. 2021. The flexible array of radars and mesonets (FARM)[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 102(8): E1499-E1525.
- 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, doi:10.1175/ MWR3

471.1.

- Xiao Q, Kuo Y H, Sun J, et al. 2005. Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3D-Var system: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case[J]. *J Appl Meteor*, 44: 768-788.
- Xue M, Droegemeier K K, and Wong V. 2000. The Advanced Regional Prediction System (ARPS)-A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part I: Model dynamics and verification[J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 75:161-193.
- Xue M, Droegemeier K K, Wong V, et al. 2001. The Advanced Regional Prediction System (ARPS)-A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part II: Model physics and applications[J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 76:143-165.
- Xue M, Wang D, Gao J, et al. 2003. The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation[J], *Meteor. Atmos. Phys.*, 82:139–170. doi:10.1007/s00703-001-0595-6
- 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, doi:10.1175/2009MWR2645.1.
- Zhang X, Sun J, Zheng Y, et al. 2020. Progress in severe convective weather forecasting in China since the 1950s[J]. *Journal of Meteorological Research*, 34(4): 699-719.
- Zhao K, Huang H, Wang M, et al. 2019. Recent Progress in Dual-Polarization Radar Research and Applications in China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 36(9): 961-974.
- Zheng L, Sun J, Zhang X, Liu C. 2013. Organizational modes of mesoscale convective systems over central East China[J]. *Weather and Forecasting*, 28(5): 1081-1098.
- Zhou A, Zhao K, Lee W C, et al., 2020. VDRAS and polarimetric radar investigation of a bow echo formation after a squall line merged with a preline convective cell[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(7): e2019JD031719.