

1 2025-05-30T11:00

2 投稿信：研究意义和创新点

3 超级单体是强对流天气中极具破坏力且特征鲜明的中尺度天气系统，其内部热动力、微
4 物理过程以及与地形的相互作用，决定了超级单体的发生、发展与消散。[研究意义] 深入
5 理解超级单体中这些复杂过程的相互作用机制，是提升强对流天气预报精度、完善数值模式
6 中对流参数化方案、增强气象灾害预警与防御能力的关键基石。

7 以往对超级单体的研究多依赖单一数据源或简单分析手段。传统气象站数据虽能提供地
8 面基本气象要素，但难以捕捉超级单体内部的中尺度结构和动态变化；单一的天气雷达观测
9 可获取反射率等部分信息，却无法全面反映超级单体的热动力和微物理特征。并且，这些手
10 段在分析地形对超级单体的影响时，也存在局限性。

11 贵州地处云贵高原，地形复杂，山峦起伏。该地区受多种天气系统影响，冷季有北方冷
12 空气南下，暖季有西南暖湿气流、低涡切变线等。[问题切入] 在如此复杂的地形和多变的
13 天气系统共同作用下，超级单体内部热动力、微物理过程如何相互影响？地形又怎样具体作
14 用于超级单体的演变？目前这些方面的研究还不够深入全面。[本文研究内容] 基于此，本
15 文综合运用多普勒雷达观测数据、ERA-5 再分析资料、高分辨率地形数据以及 WRF 中尺
16 度模式，对贵州地区的超级单体进行深入研究，剖析热动力、微物理过程与地形的相互作用，
17 揭示不同阶段和不同环境下的特征差异。[研究目的] 本文旨在深化对超级单体复杂物理机
18 制的认识，为贵州地区乃至类似地形区域的强对流天气预报和防灾减灾提供科学依据。

19 [创新点] 与以往研究不同，过往研究多采用单一数据或简单模型，难以全面呈现超级
20 单体的复杂过程。而本文采用多源数据融合与先进模式模拟相结合的方式，极大提升了研究
21 的精度和全面性。此外，针对贵州复杂地形下超级单体的研究相对较少，本文聚焦这一特殊
22 区域，填补了相关研究空白，为深入理解复杂山地地形与超级单体雹暴相互作用提供了独特
23 视角。

24 此致

25 敬礼！

26 投稿人：张昕宇

贵州山地一次超级单体雹暴的观测和数值模拟研究

张昕宇¹，周筠珺^{*1,2}，曾勇³，徐潇逸¹

1 成都信息工程大学大气科学学院，成都 610225；

2 中国气象局云降水物理与人工影响天气重点开放实验室，北京 100081；

3 贵州省冰雹防控技术工程中心，贵阳 550081

摘要：为探究贵州山区超级单体雹暴多尺度热动力特征与地形环境相互作用，结合 WRF 模拟对“穴道-零域”成雹理论进一步验证说明，利用雷达观测资料、ERA5 再分析资料和 WRF 模拟进行综合研究。环流背景分析 2012 年 4 月 4 日贵阳超级单体雹暴由 500hPa 高空槽、700hPa 切变线和 850hPa 气旋配合“上干下湿”层结及地形抬升共同触发。雷达观测到超级单体雹暴过程持续约 3 小时，组合反射率达到 65dBZ，回波顶高 11km 并有中气旋和弓形回波作为判据。超级单体雹暴最大反射率中心高度在-10℃至 0℃层过冷水区与中低层中气旋共同维持系统稳定，速度“零域”通道促进水汽能量输送。热动力物理量诊断表明 24m/s 的垂直风切变诱发中气旋，900-200hPa 强上升气流提供动力，中低层高湿度环境形成不稳定层结驱动对流。位涡“上正下负”结构反映热动力涡旋特征。发生发展阶段垂直交换弱时，位涡与热力螺旋度对超级单体发展有指示作用；成熟阶段强上升气流加强不稳定，水汽螺旋度与热力螺旋度有明显的指示作用；降雹消散阶段垂直速度衰减伴随位涡减弱，水汽和热力螺旋度指标指示系统崩溃。WRF 云微物理模拟在发展阶段 0℃层云滴碰并成雨，-40℃生成冰晶经贝吉龙过程转化为霰、雪粒子。成熟阶段霰粒子干增长形成冰雹，降雹阶段在“穴道-零域”前中端经历多次沉降上升的湿增长，最终成为大质量冰雹在雹云后端降雹。

关键词 超级单体雹暴；热动力物理量诊断；云微物理量；冰雹生长机制；WRF 数值模拟

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

收稿日期

作者简介 张昕宇，男，1998 年出生，硕士研究生，主要从事大气物理学与大气环境研究。E-mail: zhang98072022@163.com

通讯作者 周筠珺，教授，主要从事大气物理学与大气环境研究。E-mail: zhouyj@cuit.edu.cn

资助项目 西南区域人工影响天气能力建设项目“云贵高原火箭防雹试验方案设计和效果评估”与“西南涡积层混合云催化实验与效果检验”；贵州省科技计划项目（黔科合支撑[2023]193）；贵州省人工影响天气办公室项目（SRYB-20231120-064）

Observation and numerical simulation of a supercell hailstorm in mountainous Guizhou Province

Xinyu Zhang¹, Yunjun Zhou^{*1,2}, Yong Zeng³, Xiaoyi Xu¹

1 College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

2 Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Artificial Weather Modification, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

3 Guizhou Engineering Center for Hail Control and Prevention, Guiyang 550081, China

Abstract: To investigate the multi-scale thermodynamic-dynamic characteristics of supercell hailstorms and their interactions with topographic environments in Guizhou mountainous regions, this study combines WRF simulations to further validate the "channel-zero domain" hail formation theory, integrating radar observations, ERA5 reanalysis, and model outputs. The synoptic analysis reveals that the Guiyang supercell hailstorm on April 4, 2012, was triggered by the combination of a 500 hPa upper-level trough, a 700 hPa shear line, an 850 hPa cyclone, an "upper-dry-lower-moist" stratification, and orographic lifting. Radar observations show the storm persisted for 3 hours, with composite reflectivity reaching 65 dBZ, an echo top height of 11 km, and mesocyclone/bow echo signatures. The maximum reflectivity core, located in the -10 °C to 0 °C supercooled water layer, interacted with mid-low-level mesocyclones to maintain system stability, while the velocity "zero domain" channel facilitated water vapor and energy transport. Thermodynamic-dynamic diagnostics indicate a 24 m/s vertical wind shear induced mesocyclogenesis, with strong updrafts (900 – 200 hPa) providing dynamic support and mid-low-level high humidity establishing unstable stratification for convection. The "positive upper-negative lower" potential vorticity (PV) structure reflects thermo-dynamic vortex characteristics: PV and thermal helicity indicate supercell development during the weak vertical exchange stage; strong updrafts intensify instability, with moisture and thermal helicity serving as key indicators in the mature stage; vertical velocity decay and PV weakening, accompanied by moisture/thermal helicity decline, mark system collapse in the dissipation stage. WRF cloud microphysics simulations show that at the development stage, cloud droplets at the 0 °C level coalesce into rain, while ice crystals form at -40 °C and transform into graupel/snow via the Bergeron process. During maturity, dry growth of graupel forms hailstones, which undergo multiple wet growth cycles in the front-middle section of the "channel-zero domain", accumulating mass before falling as large hailstones at the rear of the hail cloud. These results validate the "channel-zero domain" theory by linking microphysical processes with dynamic

structures, highlighting the critical role of topographic-lifting and thermal-dynamic coupling in sustaining supercell hailstorms in complex terrains.

Key words supercell hailstorm; Thermal and dynamic physical quantity diagnosis; Cloud microphysical quantity; Hail growth mechanism; WRF numerical simulation

1 引言

超级单体雹暴作为局地对流风暴的典型代表,具有突发性强、致灾性重和动力机制复杂的特点,其降雹特征受大气层结、地形强迫和季节环流的综合调控(图 1a)。在贵州独特的山地地形背景下(程东亚等, 2019; 程晓龙等, 2021),此类风暴常伴随雷电、强风和短时强降水,其生成多与中高层冷涡/槽后系统与低层暖湿气流的叠置有关,而冷锋越山触发、中层干侵入等过程进一步加剧对流不稳定性(竹利等, 2024)。其维持机制依赖于暖湿气流上升释放潜热的正反馈过程,以及高低空急流耦合提供的动力条件(李嘉琪等, 2023; 尉英华等, 2024)。

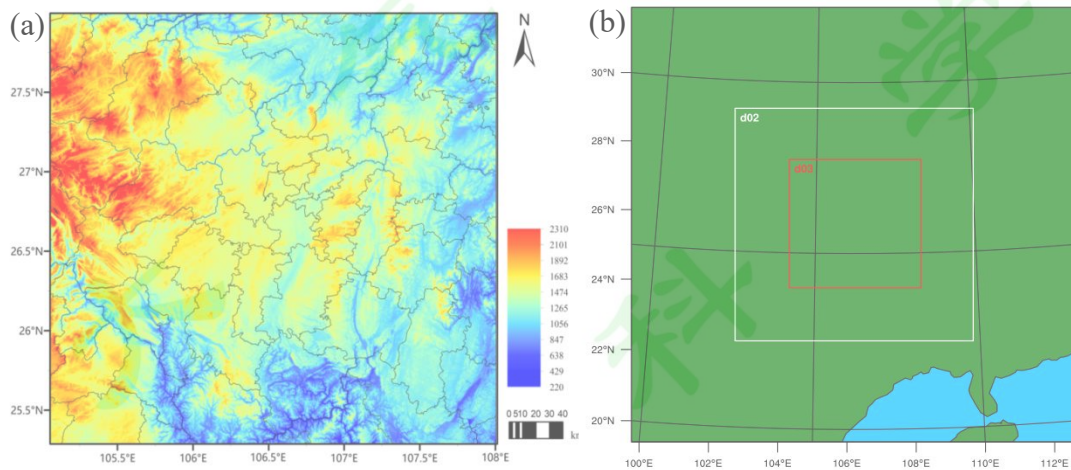


图 1 (a) 贵州地区地形图; (b) 模拟区域范围

Fig 1. (a)Topographic map of Guizhou region; (b)Range of simulated areas

97

多普勒雷达观测为剖析超级单体三维结构提供了关键手段。在成熟阶段的雹暴常表现为垂直液态水含量 (Vertical Integrated Liquid, VIL) 超过 60 kg/m^2 (黄俊杰等, 2018), 反射率因子呈现低层强梯度 ($>60 \text{ dBZ}$)、中层悬垂回波 (强裕君等, 2024) 及有界弱回波区 (Bounded Weak Echo Region, BWER) 等特征 (王福侠等, 2024)。BWER 的形成源于强烈上升气流对降水粒子的抬升作用, 其外围环绕的强回波穹隆指示雹胚的累积带 (王兴丽等, 2023), 而 -20°C 等温线以上的高反射率核则标志着冰雹生长区 (陈磊等, 2024)。这些宏观特征的耦合作用, 构成了雹暴发展的动力-微物理基础。

冰雹生成理论的发展从早期“累积带” (Browning et al., 1976) 和“胚胎帘” (Cheng and

English, 1983) 理论, 到“饲养单体”(Smith et al., 2001; Farley, 2010) 概念的提出, 逐步揭示了水汽输送与粒子分选的协同机制。我国学者提出的“穴道-零域”理论(许焕斌等, 2008; 刘瑾等, 2022) 进一步从动力-热力耦合角度阐释了 BWER 的形成机理, 指出径向速度零线与冰雹“穴道”的空间对应关系, 为雹胚筛选提供了新的动力学解释。这些理论通过雷达反演、数值模拟和微物理参数化方案的迭代优化, 逐步构建起冰雹生长的多尺度过程认知体系。

在热动力物理量诊断方面, 湿位涡、水汽螺旋度(王颖等, 2007) 和潜热释放(Toker et al., 2020) 等参数可有效表征贵州山区的对流触发条件。研究表明, 西南涡与冷涡系统通过调制垂直风切变(姚静等, 2024; 罗斐然等, 2024), 增强地形强迫下的水汽辐合(姬雪帅等, 2023), 而冷池与暖湿输送的相互作用则主导能量收支平衡(刘霭薇等, 2022)。数值模拟方面, WRF 模式结合雷达资料同化(王瑾, 2008; 黄兴友等, 2022) 显著提升了贵州山区降雹过程的模拟精度, 三维分档云模式(蔡丹等, 2002; 崔雅琴, 2006) 进一步揭示了云贵高原雹/霰胚形成的微物理差异: 云南地区以过冷雨滴冻结为主(刘春文等, 2021), 而贵州地形起伏通过改变上升气流配置, 导致降雹空间分异(殷蕾等, 2024)。

虽有研究取得一定进展, 但其多尺度非线性特征与复杂地形相互作用, 导致热动力过程呈现显著非平衡性, 所以本研究讨论两个问题: 贵州特殊地形下超级单体热动力结构的时空演变规律; 水汽输送路径与垂直风切变的协同效应对雹暴维持机制的影响。通过融合高分辨率数值模拟与多源观测数据, 重点解析“穴道-零域”系统的微物理-动力耦合过程, 为山地强对流预报提供理论支撑。

2 数据和方法

2.1 观测数据和方法

使用位于贵州省贵阳市气象局地面雷达观测站 CD 波段多普勒雷达(106.72° E, 25.59° N, 海拔高度 1255m) 的雷达基数据包括反射率因子(Z)和径向速度(V), 以及组合反射率(CR) 平扫(PPI) 即融合各仰角数据, 显示整个垂直柱体中的最强回波。CR 图中出现大面积 ≥ 60 dBZ 区域, 可能为降雹区域, 并结合垂直剖面进行分析。对贵阳多普勒雷达进行质量控制, 包括插值和滤波等预处理。使用最佳邻域和双线性插值法填补缺失区域, 使数据空间更平滑、提高雷达图像分辨率。

使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF) $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的 ERA-5 再分析数据, 美国气候预测中心(CPC) CMORPH 算法整合多种微波和红外卫星数据的全球 $8\text{km} \times 8\text{km}$ 的 30min 卫星反演降水数据作为本次个例的观测资料, 对超级单体雹暴过程进行热动力物理量诊断, 包括宏观物理量: 对流有效位能(CAPE)、垂直风切变、垂直速度、假相当位温、水汽通量散度、位涡、水汽螺旋度、热力螺旋度。以及台站人工观测降雹资料于 UTC2012 年 4 月 4 日 11:24-11:26 在航龙炮站 10mm 降雹记录。

3.2WRF 模式方案设置

参考类似山地和复杂地形的 WRF 中尺度模式参数化方案（周峰等，2023），并应用于本研究区域（模拟区域和模式方案见图 1（b）和表 1）。对 2012 年 4 月 4 日贵州贵阳地区一次超级单体雹暴天气进行模拟，使用雷达观测数据和 ERA5 再分析数据对比验证模拟效果。重点分析宏微观热动力特征，包括雷达反射率、降水、中尺度热动力特征。NSSL2 微物理方案模拟输出 6 种水成物粒子（云滴、水滴、冰晶、雪、霰、雹）在雹云内的时空分布，分析宏微观热动力的高低空配置之间的联系以及和地形的相互作用。在 3km 及以下分辨率不使用积云对流参数化方案，以免对于后续微物理量混合比模拟的影响，为探究“穴道”-“零域”的成雹机制。

模拟方案	模拟区域 1	模拟区域 2	模拟区域 3
分辨率/km	9	3	1
格点数	160x160	256x265	424x424
微物理方案	NSSL2	NSSL2	NSSL2
长波辐射方案	RRTM	RRTM	RRTM
短波辐射方案	Dudhia	Dudhia	Dudhia
积云对流参数化方案	KFeta		
近地面层方案	MM5	MM5	MM5
陆面方案	Noah	Noah	Noah
行星边界层方案	YSU	YSU	YSU
垂直层数（eta）	50	50	50

表 1 WRF 中尺度模式模拟参数设置

Table. 1 Simulation parameters of WRF mesoscale mode

3 超级单体雹暴个例过程综合分析

3.1 过程简介及热动力物理量诊断

2012 年 4 月 4 日一次多单体合并型超级单体雹暴过程，从天气环流背景分析来看，如图 2（a）-2（d）UTC08 时（下文均采用世界时）200hPa 天气图呈现出高空-60℃冷中心，这一冷中心的存在为高层大气带来强烈的冷空气。在 500hPa 高空槽南下引导冷空气进一步向南侵袭。低空 700hPa 切变线和 850hPa 低压气旋促使空气产生辐合与上升运动，水汽在此汇聚并容易形成云层和降水。由比湿填色图可知，贵州地区处于“上干下湿”的不稳定层结。如图 2（e），08 时有一条贯穿贵州的地面辐合线，气流相互汇聚，上升运动将低空的水汽和热量带到高空，进一步加剧了大气的不稳定状态。在这些不同高度天气系统的相互作用下，为强对流天气等复杂天气现象的产生创造了有利条件。

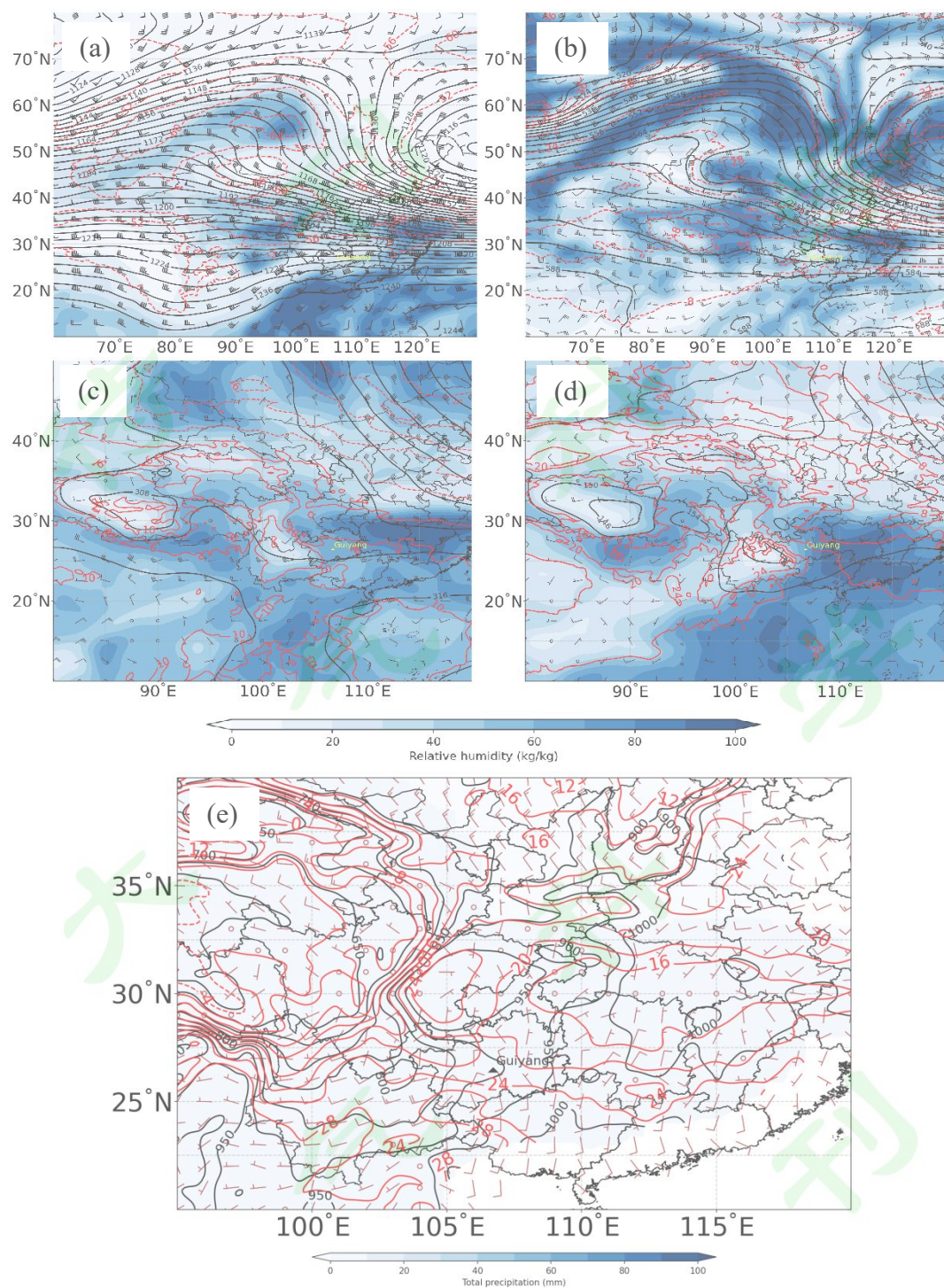


图2 UTC 2012年4月4日08时ERA5再分析资料各层背景场, 水平风场(黑色、棕色风标), 温度场(红色线), 气压场(黑色线), 贵阳站点, 相对湿度、小时降水量(蓝色填色); 地面辐合线(黑色曲线); (a)200hPa环流背景场; (b)500hPa环流背景场; (c)700hPa环流背景场; (d)850hPa环流背景场; (e)地面背景场

Fig. 2 At 08:00 UTC April 4, 2012, ERA5 re-analyzed the background fields of each layer of the data, horizontal wind field (black and brown weather markers), temperature field (red line), pressure field (black line), Guiyang station, relative humidity, hourly precipitation (blue filling); Ground convergence line (black curve); (a)200hPa circulation background field; (b)500hPa circulation background field;

(c)700hPa circulation background field; (d)850hPa circulation background field; (e) Ground background field

159 如图 3 (a) -3 (c), 虽然此次天气形势下有较低的 CAPE (对流不稳定能量) 值约为
 160 1200J/kg。但如图 3 (d) -3 (f), 在超级单体雹暴过程经过的地区 0-6km 垂直风切变达到
 161 25m/s 左右, 极强的垂直风切变有利于对流的发展, 为强对流天气的形成提供重要的动力条
 162 件。如图 3 底层 700hPa、850hPa 相对湿度达到 90%, 强风切变促使上升气流倾斜, 提供充
 163 足水汽维持云体发展并触发和维持强对流天气。
 164

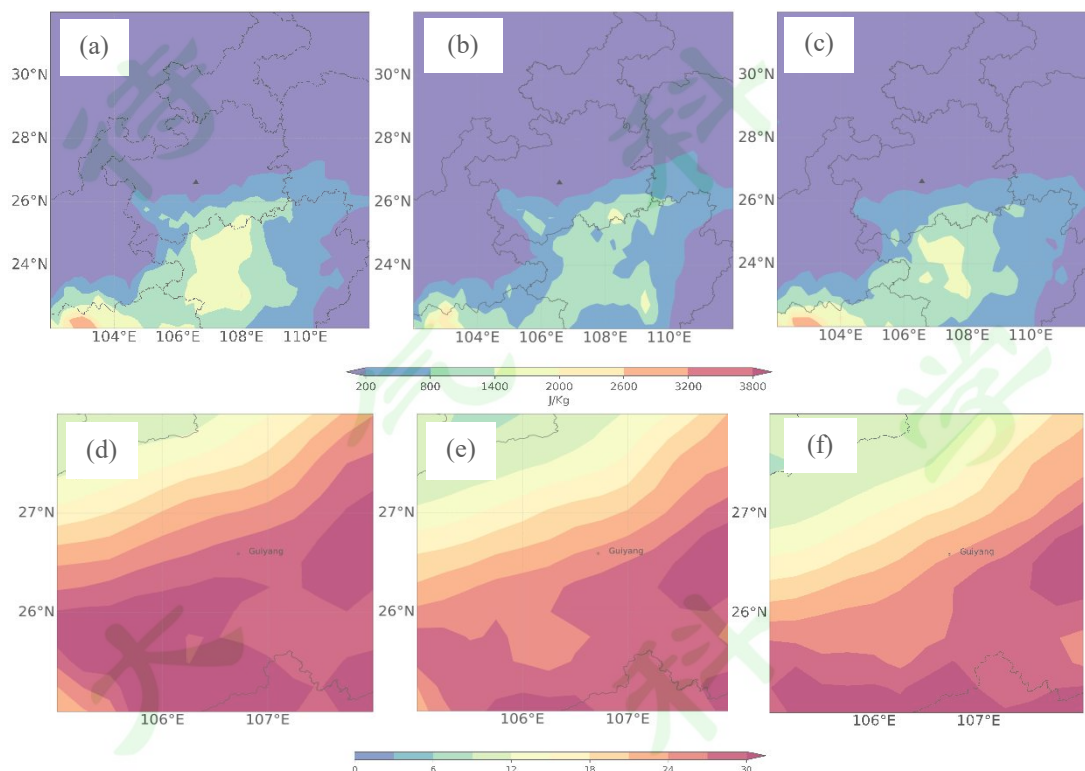


图 3 2012 年 4 月 4 日对流不稳定能量 (cape) (J/kg)和 0-6km 垂直风切变 (m/s) 填色图, (a)9:00 cape; (b)10:00 cape; (c)11:00 cape; (d)9:00 VWS; (e)10:00 VWS; (f)11:00 VWS

Fig. 3 Color plots of convective instability energy (cape) (J/kg) and 0-6km vertical wind shear (m/s) on April 4, 2012, (a)9:00 cape; (b)10:00 cape; (c)11:00 cape; (d)9:00 VWS; (e)10:00 VWS; (f)11:00 VWS

165

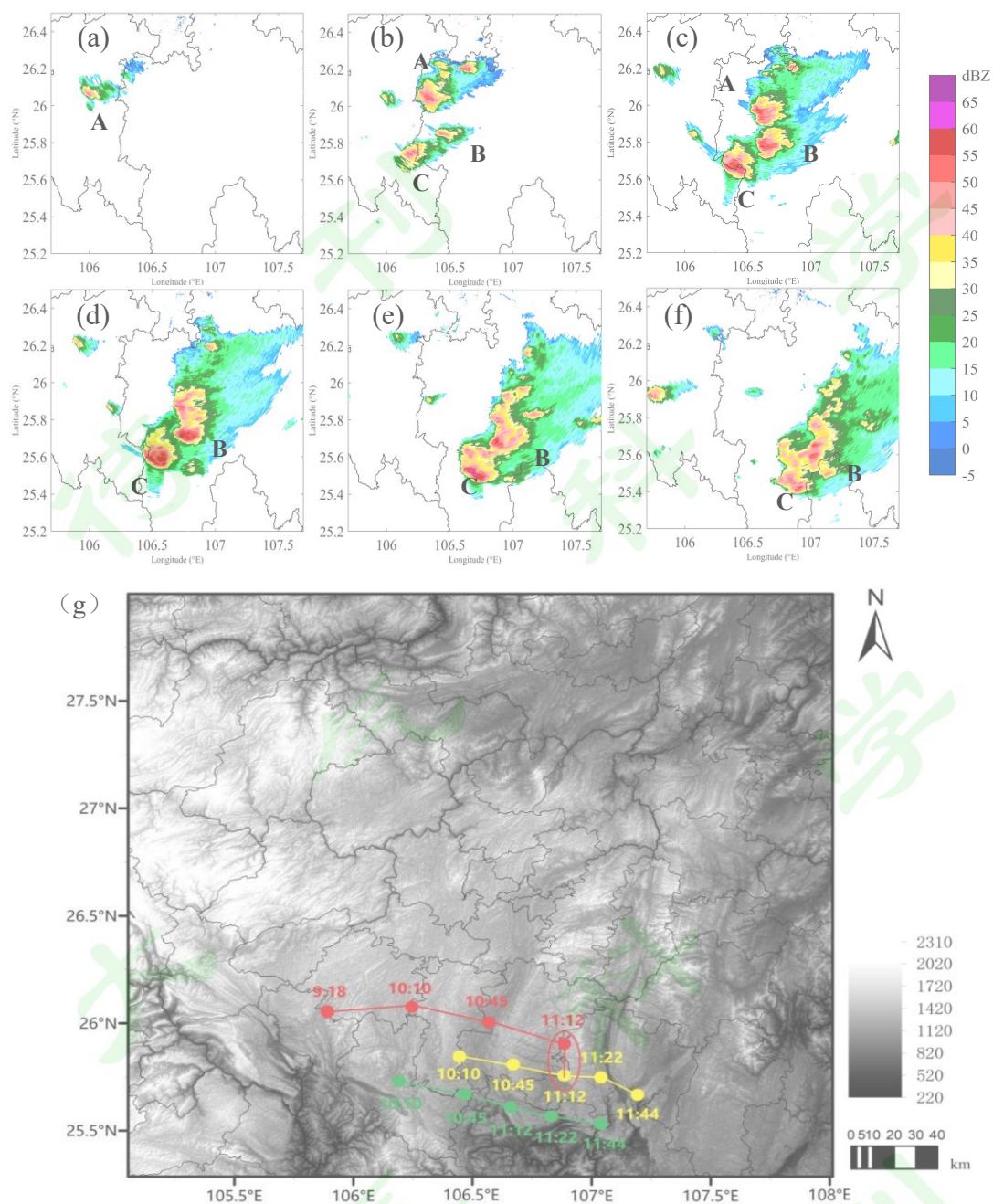


图4 组合反射率(a)9:18; (b)10:10; (c)10:45; (d)11:12; (e)11:22; (f)11:44 (UTC); (g)超级单体雹暴移动路径; 单体 A (红色); 单体 B (黄色); 单体 C (绿色); 红色圆圈为合并的单体及对应时刻

Fig. 4 Combined reflectance (a)9:18; (b)10:10; (c)10:45; (d)11:12; (e)11:22; (f)11:44 (UTC); (g)Supercell hail storm movement path; Monomer A (red); Monomer B (yellow); Monomer C (green); The red circle is the merged unit and its corresponding time

166

167 本次超级单体雹暴过程自 9: 01 起至 11: 50 结束（超级单体特征在之后个例过程分析
168 说明），结合组合反射率图图 4（a）-4（f）和移动路径图如图 4（g）呈现多单体合并超级
169 单体的移动轨迹。图 4（a）单体 A 于 9 点 18 分在地势较低的山谷区域生成（以红色标识）。

单体 A 开始经历一小段上坡过程，地形抬升促使空气作上升运动。图 4 (b) 至 10 点 10 分垂直上升运动进一步增强，促使单体 A 开始快速爬升发展。随后单体 A 经历下山运动，气块下沉释放能量，于 10 点 45 分在山谷地势较低处发展成熟，此时其最大反射率强度如图 4 (c) 达到 60dBZ 左右。11 点 12 分单体 A 与单体 B (黄色) 在红色圆圈处发生合并形成新的超级单体雹云。

单体 B 在 10 点 10 分于山谷位置开始发展，山谷中相对稳定的热力条件和水汽环境为其提供了初始发展条件。10 点 45 分单体 B 由地形图可以看出经历爬坡运动，空气受地形的强迫抬升。11 点 12 分如图 4 (d)，在与单体 A 相同的山谷处，二者合并，进一步增强上升气流和水汽供应，并于如图 4 (e) 和图 4 (f) 11 点 22 分至 11 点 44 分下山运动释放能量发生降雹 (由航龙炮台站在 11:24-11:26 分由人工记录的 10mm 的降雹记录)，之后超级单体结构逐渐消散。

单体 C (绿色) 10 点 10 分在山谷处生成，随后 10 点 45 分经历爬坡，发展成熟由图 4 (c)、图 4 (d) 可以观察到旁瓣回波和三体散射。11 时 12 分到 11 时 44 分超级单体下山过程中，气块下沉获得动能后逐渐消散。

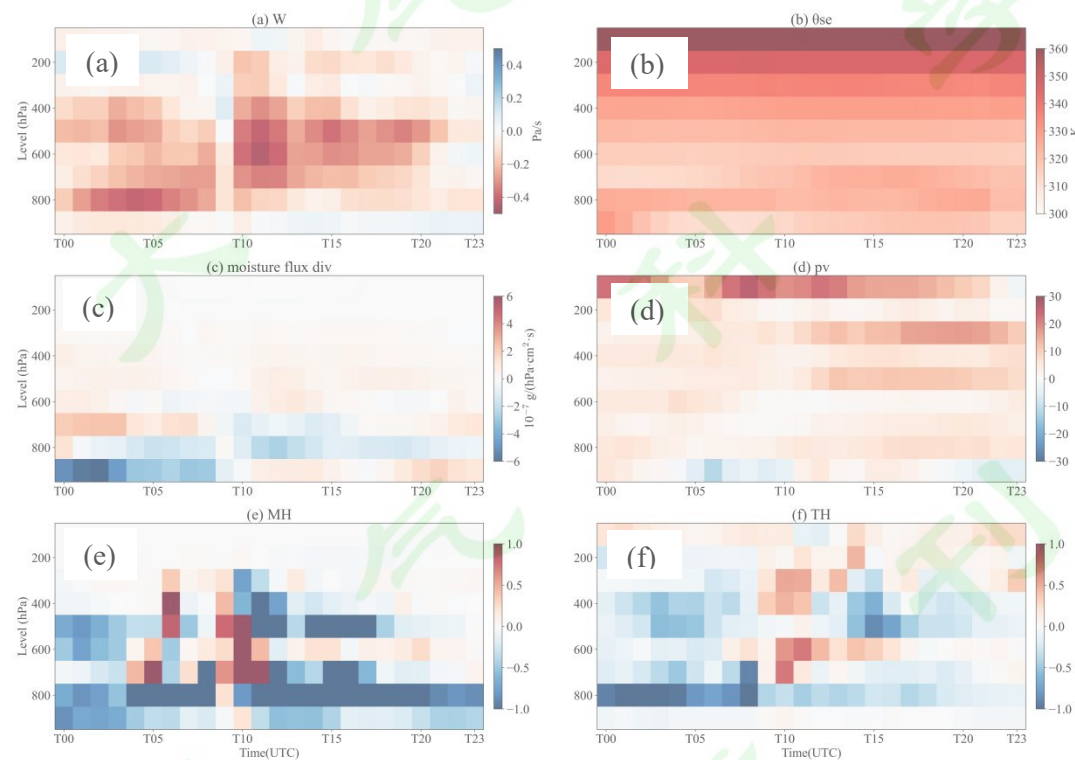


图 5 超级单体雹暴过程质心经过经纬度(25.5°N--27°N, 105.5°E--107.5°E) 热动力物理量气压层剖面的时间序列, (a)垂直速度; (b)假相当位温; (c)水汽通量散度; (d)位涡; (e)水汽螺旋度; (f)热力螺旋度

fig. 5 The time series of the barometric profile of the supercell hailstorm process as the center of mass passes through latitude and longitude (25.5° N--27° N, 105.5° E--107.5° E), and (a) vertical velocity; (b) pseudo-equivalent potential temperature; (c) Divergence of water vapor flux; (d) potential vorticity; (e) Water vapour helicity; (f) Thermal helicity

如图 5 为超级单体雹暴过程质心经过经纬度的气压层热动力参量剖面的时序图(时间分辨率为 1 小时,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 为 ERA5 资料),超级单体雹暴过程 9 时到 11 时左右,如图 5(a)-5(c)在 9-11 时 900hPa-200hPa 高度层垂直速度明显增大,表明存在强上升气流。这为雹暴发展提供动力,利于水汽抬升、凝结,促使云内粒子增长和雹块形成。800hPa-600hPa 假相当位温存在逆差,在低层有大量潜热释放和不稳定能量汇聚。900hPa-600hPa 中低层水汽通量散度为负值,给超级单体雹暴底层为水汽汇,有充足水汽供应,并且 900hPa-500hPa 水汽汇集凝结释放潜热,进一步推动对流运动发展。

图 5(d)-5(f)在 9-11 时位涡体现“上正下负”的形势,揭示大气热动力涡旋结构利于对流发展。水汽螺旋度表征水汽输送和垂直涡度,400hPa-800hPa 中层水汽上升,低层、高层下沉,很好的体现了超级单体雹暴中内部对流结构。热力螺旋度反映了热动力的耦合作用,从侧面体现了在超级单体雹暴成熟、降雹阶段宏微观物理量的变化趋势。

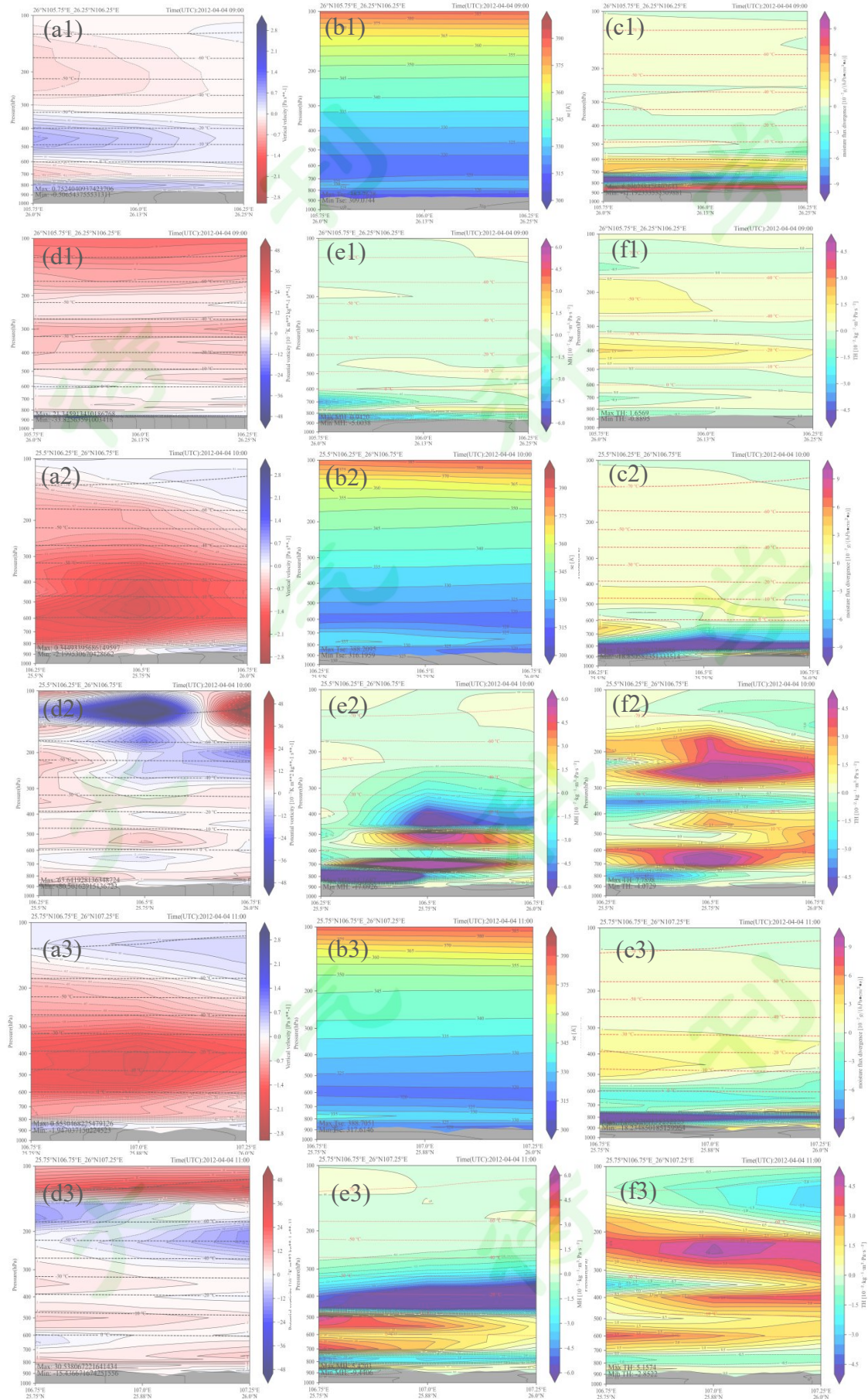


图6 UTC 9:00 (字母+1)、UTC 10:00 (字母+2)、UTC 11:00 (字母+3) 风暴质心经过经纬度 (26-26.5° N, 105.75-106.25° E) 的热动力物理量剖面, (a)垂直速度; (b)假相当位温; (c)水汽通量散度; (d)位涡; (e)水汽螺旋度; (f)热力螺旋度

fig. 6 Thermal and dynamic profiles of the storm's center of mass passing through latitude and longitude (26-26.5° N, 105.75-106.25° E) at 9:00 UTC (letter +1), 10:00 UTC (letter +2), 11:00 UTC (letter +3), (a) vertical velocity; (b) pseudo-equivalent potential temperature; (c) Divergence of water vapor flux; (d) potential vorticity; (e) Water vapour helicity; (f) Thermal helicity

如图6(a1-e1), 9-10时, 垂直风场表明此次雹暴在垂直方向物理量交换少, 对流活动弱, 600hPa以下垂直上升运动小。750hPa附近存在20K左右的假相当位温的逆差值, 以及低层水汽辐合。位涡剖面显示中层和高层涡度正向发展, 增加大气不稳定性。水汽螺旋度剖面显示600hPa以下水汽向上输送, 因贵州山区地形抬升; 热力螺旋度剖面表明热对流向中层高度发展。在超级单体雹暴发生发展初期, 位涡和热力螺旋度, 有很好的指示作用。

如图6(a2-e2), 10-11时, 对超级单体强反射率中心剖面热动力物理量诊断垂直风场显示整个气层有极强上升气流, 引发大量水汽与热力交换, 显著改变气层热力结构, 加剧不稳定; 800hPa到700hPa存在20K左右的假相当位温的逆温差, 在涡度作用下利于水汽在低层大范围并辐合上升凝结, 为降水创造条件; 位涡剖面显示中低层涡旋正向发展, 强化气旋运动, 支持雹暴发展; 水汽通量散度剖面显示水汽垂直活动活跃, 低层有水汽汇, 为雹暴成熟提供水汽, 水汽螺旋度剖面体现低层和中层大气动力环境复杂, 对流不稳定; 热力螺旋度剖面表明热力驱动的对流旺盛, 大气强烈不稳定。在成熟阶段位涡、水汽螺旋度和热力螺旋度对超级单体雹暴的发展有很好的指示作用。

如图6(a3-e3), 11-12时, 热动力物理量剖面的观测分析, 从垂直速度场中层上升气流虽仍维持, 但低层垂直速度减小、大值范围缩小, 因低层假相当位温逆温差减少及范围缩小, 水汽通量散度量级减少, 水汽正在逐渐消散。位涡剖面200hPa以下涡度正向增强, 水汽螺旋度剖面显示水汽在500hPa附近、-10℃到0℃过冷水区汇聚, 低层正水汽螺旋度利于降水; 热力螺旋度剖面显示整层热力涡旋上升但对流层量级小, 系统趋于稳定; 水汽通量散度剖面表明近低层水汽逐渐辐散, 将要或已经发生降水。从位涡量级的减少, 以及水汽螺旋度和热力螺旋度的指示作用, 说明超级单体雹暴发生降水并趋于崩溃。

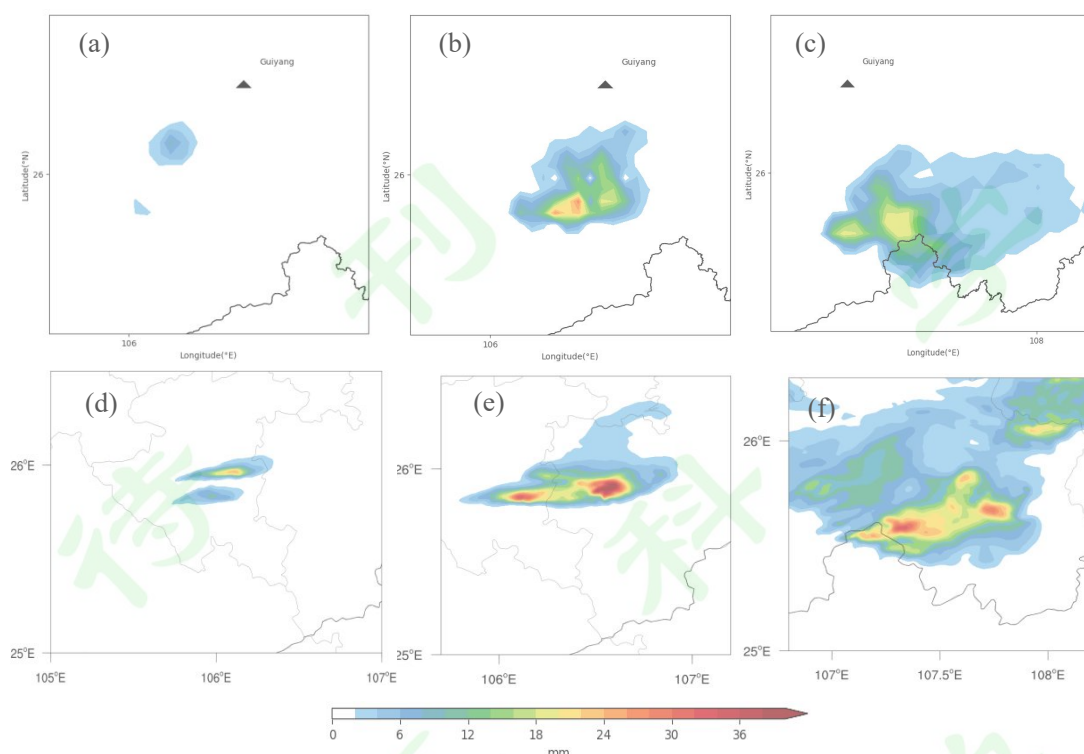


图 7 CMORPH 算法卫星反演降水和 WRF 模拟小时降水对比图, (a)9:00 卫星反演降水; (b)10:00 卫星反演降水; (c)11:00 卫星反演降水; (d)9:00 模拟降水; (e)10:00 模拟降水; (f)11:00 模拟降水

fig. 7 Comparison of precipitation retrieved by CMORPH algorithm and simulated hourly precipitation by WRF. (a) Precipitation retrieved by satellite at 9:00; (b) Satellite retrieval of precipitation at 10:00; (c) Satellite retrieval of precipitation at 11:00; (d) Simulated precipitation at 9:00; (e) Simulated precipitation at 10:00; (f)11:00 simulated precipitation

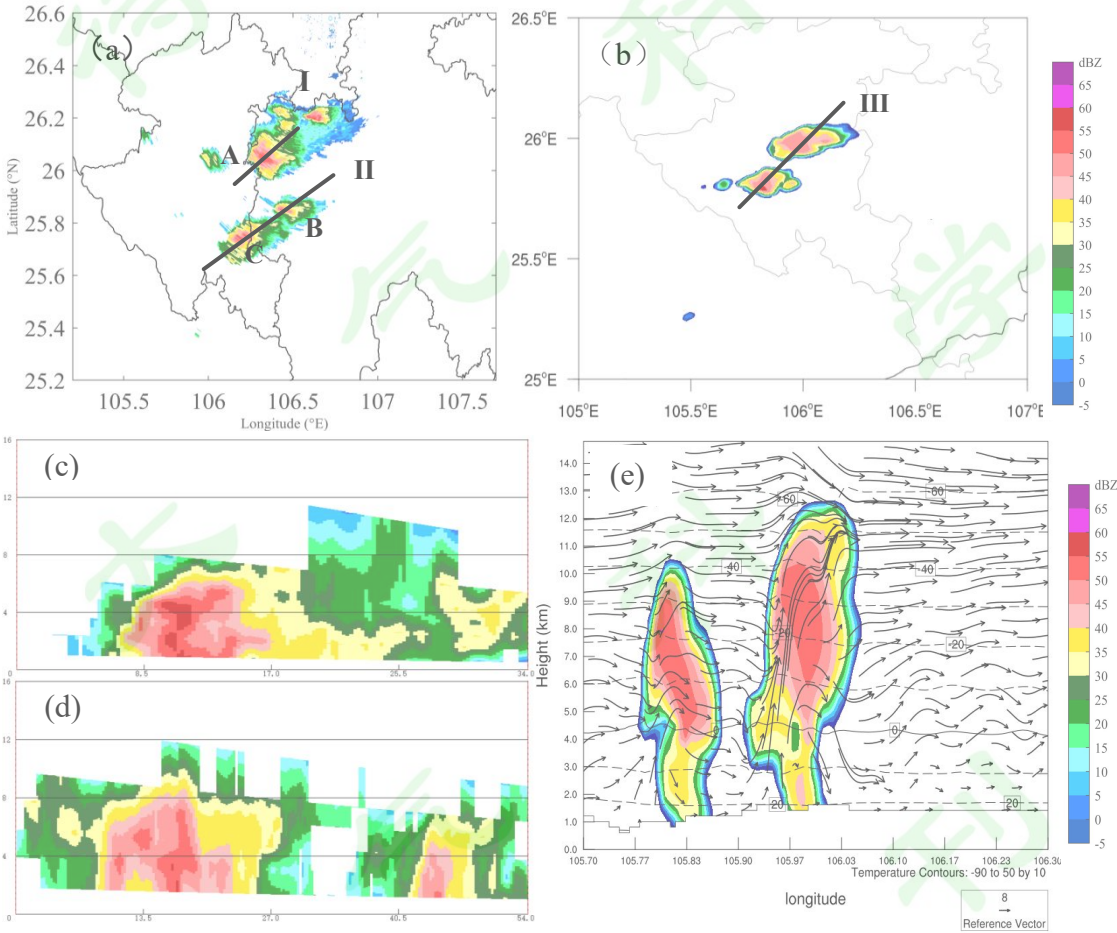
如图 7 (a) -7 (f) , 9-11 时观测和模拟小时降水的对比, 随着时间的推移, 观测小时降水量和降水范围都有所扩大, 且最大值约为 30mm/h 左右位于贵州东南部。对应于 WRF 模拟小时降水有相同的发展趋势, 但最大小时降水量大于卫星反演降水约为 35mm/h, 可能由于模拟下垫面差异和微物理方案的敏感性导致。

3.2 发生发展阶段观测模拟对比分析

10: 10 观测组合反射率图 8 (a) , 单体 A 强反射率中心反射率强度达到 50dBZ, 单体 B 和单体 C 在山谷生成并开始发展, 山谷地形导致的气流辐合提供了有利条件。并且模拟的组合反射率图 8 (b) , 位置和强度与观测大致相同模拟效果较好。对图 8 (c) 观测组合反射率剖面分析, 单体 A 的回波顶高达到 9km, 同时出现穹隆结构以及弱回波区, 这体现出单体 A 在垂直方向上的发展规模, 对流活动较为强烈, 能够将水汽和能量输送到较高的高度。图 8 (d) 单体 B 和单体 C 的回波顶高达到 8km, 且最大反射率高度位于 4km 即 0℃ 层高度过冷水区。

图 8(e) 如剖面 III 的反射率剖面模拟结果, 超级单体雹暴形成初期单体 B 和单体 C 的回波顶高在模拟中可达 12km、最大回波强度高度达 7km, 模拟回波顶高与观测差异主要源于初始气象要素观测误差导致模拟起始状态偏差、低分辨率地形数据难以模拟复杂地形对气流的抬升辐合作用, 以及物理参数化方案对云微物理和边界层过程的差异。尽管存在一定偏差, 模拟仍能反映超级单体雹暴演变趋势与结构特征。

如图 8(f) - (i), 径向速度图及其剖面的分析在单体 B 和单体 C 中, 观察到单体 C 在雹云底层有弱中气旋生成, 表明雹云内部存在有组织的气流旋转运动, 对于水汽、粒子的分布和输送有着重要影响。然而, 在观测中并未发现“穴道”-“零域”的明确区域。



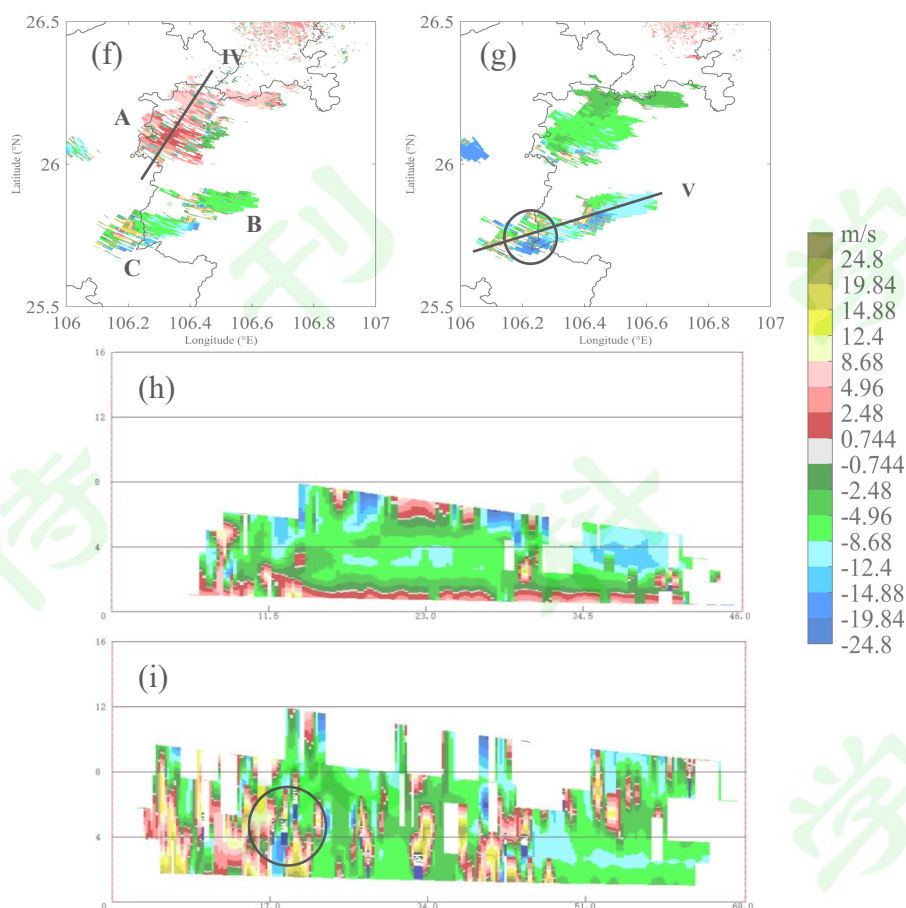


图 8 UTC:10:10 组合反射率图(a)观测; (b)模拟, 黑色直线为剖面; 黑色剖面线对应反射率图剖面; (c)剖面I反射率剖面; (d)剖面 II 反射率剖面; (e)剖面III反射率剖面; 径向速度图, 单位(m/s), 仰角分别为(f)0.5° 和(g)1.5° ; (h)剖面IV径向速度剖面; (i)剖面V径向速度剖面; 黑色圆圈处为中气旋

UTC:10:10 Combined reflectance map (a) observation; (b) Simulation, where the black line is the profile line; The black profile corresponds to the reflectance map profile, (c) profile I reflectance profile; (d) Profile II reflectance profile; (e) Profile III reflectance profile; Radial velocity diagram, unit (m/s), elevation angles of (f)0.5° and (g)1.5° ; (h) Profile IV radial velocity profile; (i) Profile v radial velocity profile; The black circle is mesocyclone

240

241 从模拟水成物粒子混合比分析, 0℃至-20℃温度区间存在显著的云滴生成过程如图 9(a),
242 其云滴混合比峰值达 5 g/kg, 为后续降水粒子形成提供初始物质基础。在 0℃层以下, 云滴
243 通过碰并增长过程转化为雨滴如图 9(d); 而在-40℃层, 如图 9(b)成冰核通过凝华核化
244 生成冰晶(冰晶混合比 0.7 g/kg), 并通过贝吉隆过程进一步凝华为冰雪晶。如图 9(c)在
245 -10℃至-40℃区域, 冰雪晶与云滴的碰冻作用促使霰粒子形成(霰混合比 5 g/kg), 如图 9
246 (e)同时部分冰晶通过粘连碰冻生成少量雪粒子。如图 9(f)霰粒子的持续增长与碰冻过
247 程致微量雹粒子生成(雹混合比 1g/kg)。

248

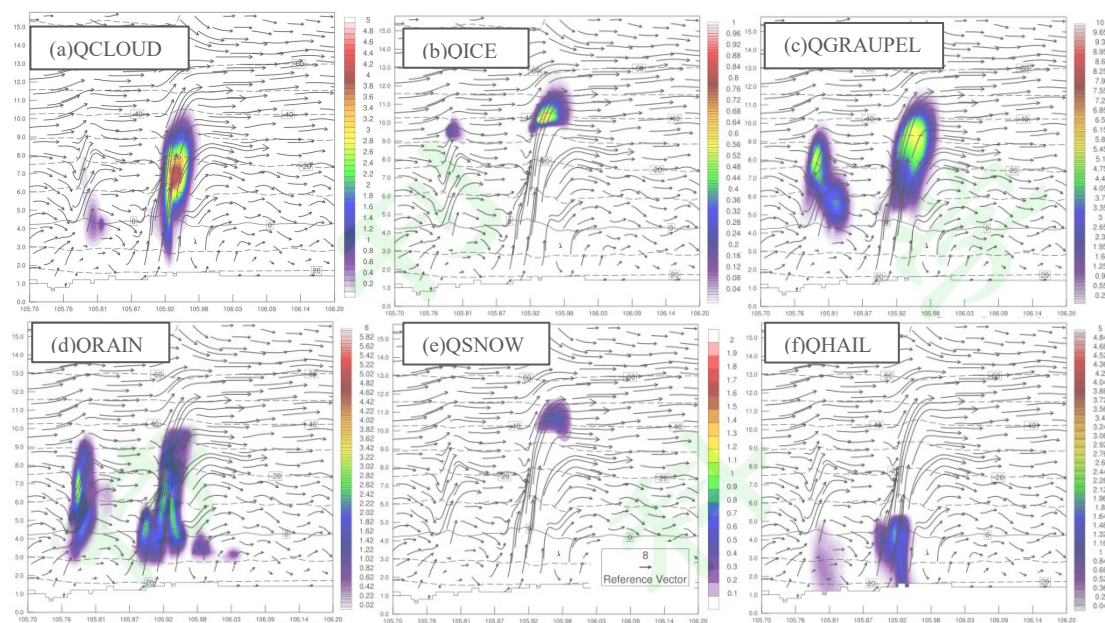


图9 UTC10: 10WRF 模式模拟各水成物粒子混合比剖面, (a)云滴混合比; (b)冰晶混合比; (c)霰混合比; (d)雨滴混合比; (e)雪混合比; (f)雹混合比

fig. 9 UTC10:10WRF model simulated particle mixing ratio profile of each water component, (a) cloud droplet mixing ratio; (b) ice crystal mixing ratio; (c) graupel mixing ratio; (d) raindrop mixing ratio; (e) Snow mix ratio; (f) Hail mix ratio

3.3 成熟阶段观测模拟对比分析

如图 10 (a)、10 (b)，在组合反射率图出现了强度高达 65dBZ 的强回波中心，同时伴有旁瓣回波和三体散射现象，模拟结果能大致模拟出两个单体的合并过程和强回波中心。

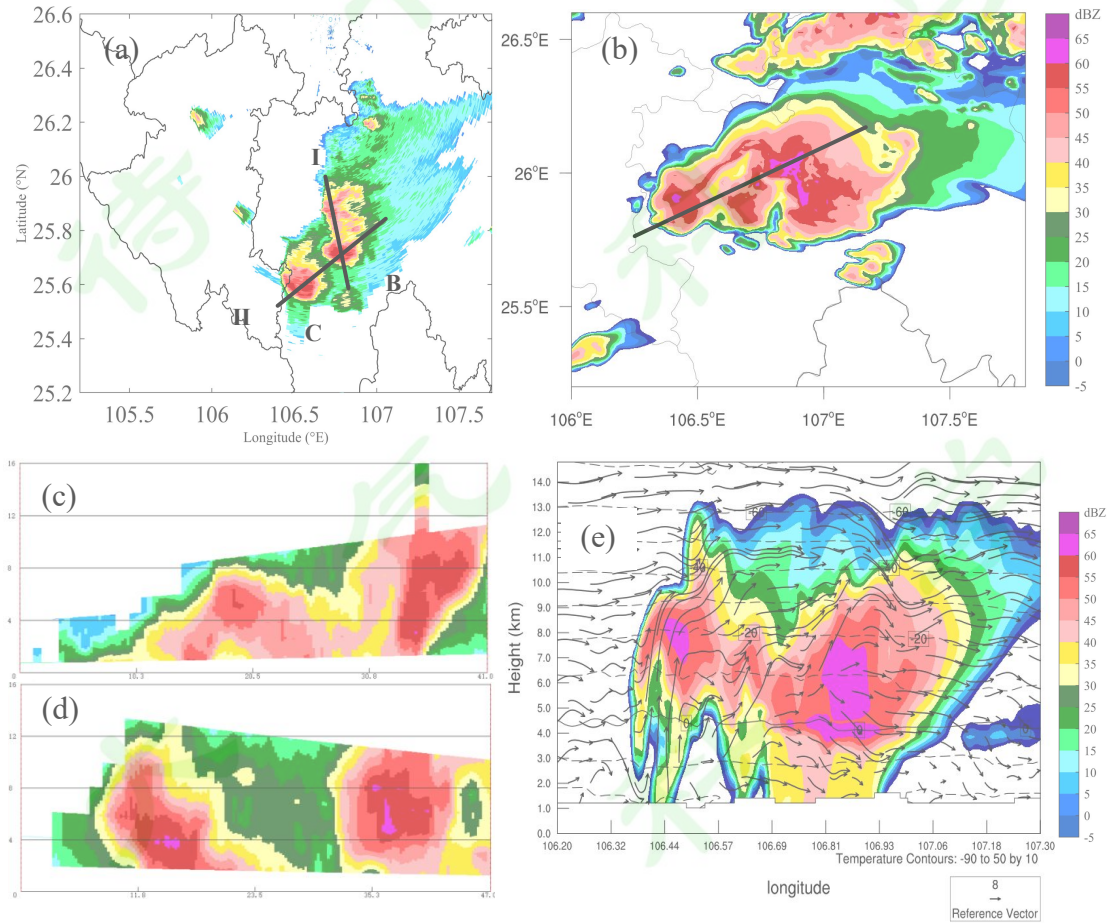
如图 10 (c)、10 (d)、10 (e) 成熟阶段的 C 单体回波顶高可达 9km，在单体合并后的 B 单体回波顶高达到 10km。穹隆和弱回波区等结构，从图 10 (c) 可以看到单体 A 反射率中心消散并向将向单体 B 合并的过程在两单体中间形成云桥。模拟将超级单体雹暴的结构较好的模拟了出来,但最大反射率大于观测达到 65dBZ，雹暴强反射率中心高度在-10℃到 0℃过冷水区，水分在这个区域容易发生凝结、冻结等相变过程，为冰雹的形成和增长提供了充足的物质基础，进一步推动了对流的发展，同时在模拟剖面单体后端有下沉气流约为 8m/s。

如图 10 (f)、10 (g)、10 (h)，通过对径向速度图和分析可以发现，在低层和雹云中层有强中气旋生成，促使空气产生辐合上升，为水汽的凝结和雹暴的进一步发展提供动力支持。同时在雹云内部可以清晰地观察到速度“零域”通道为水汽的输送和能量的传递创造了有利条件，使得水汽能够源源不断地供应到雹暴系统内，维持雹暴的持续发展。

与图 10 (c)、10 (d) 反射率剖面进行对比后可知，“穴道-零域”刚好在 4km 左右经过中心反射率大值区。在这个特定高度的反射率大值区与“穴道”存在紧密的联系，使得水汽和能量能够输送反射率大值区，进一步促进了水成物粒子的生成。雹云内中气旋围绕“穴道-

266 “零域”分布，为气流和能量交换提供了条件，有助于更高效地将周围的水汽吸入其中，同时
267 也能使能量在更广泛的范围内进行交换和重新分配。模拟剖面雹云后端的下沉气流也对应了
268 “穴道-零域”的位置，这种协同作用增强了雹暴系统的稳定性和发展能力，故中气旋是超级
269 单体雹暴能够持续维持并产生强烈天气现象的重要原因之一。

270



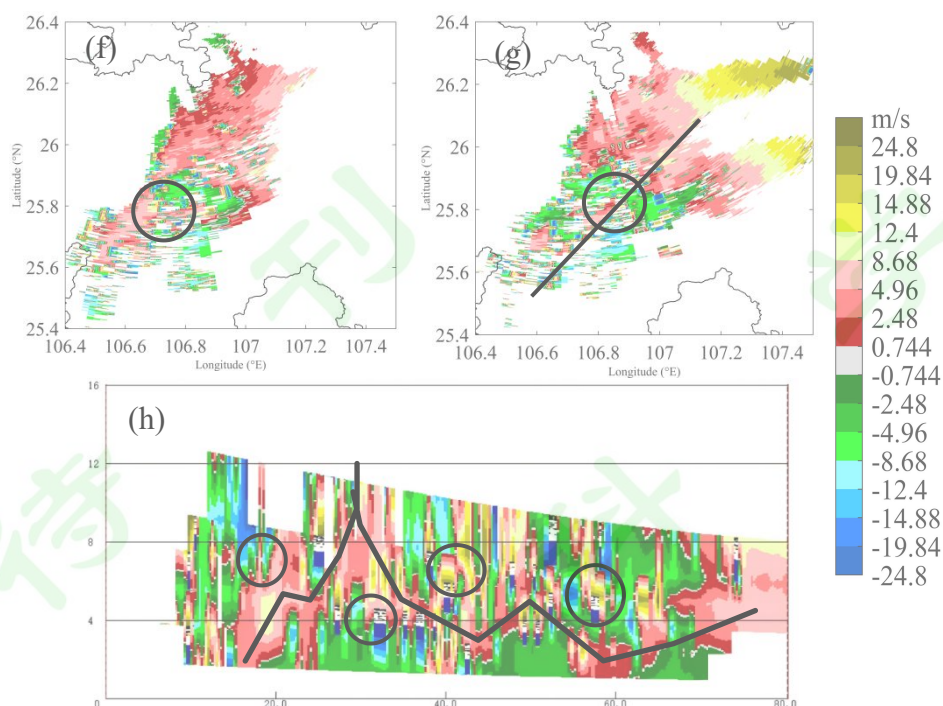


图 10 UTC11:12 组合反射率图(a)观测; (b)模拟, 黑色直线为剖面; 黑色剖面线对应反射率图剖面, (c)剖面 I 反射率剖面; (d)剖面 II 反射率剖面; (e)模拟剖面反射率剖面; 径向速度图, 单位(m/s), 仰角分别为(f)2.4° 和(g)3.4° ; (h)剖面线对应的径向速度剖面黑色圆圈为中气旋; 黑色线段表示速度“零线”

fig. 10 UTC11:12 Combined reflectance map (a) observation; (b) Simulation, where the black line is the profile line; The black profile corresponds to the reflectance map profile, (c) profile I reflectance profile; (d) Profile II reflectance profile; (e) Simulated sectional reflectance profiles; Radial velocity diagram (m/s) with elevation angles of (f)2.4° and (g)3.4° , respectively; (h) The black circle of radial velocity profile corresponding to the profile line is mesocyclone; The black line segment represents the speed "zero line"

271

272 在雹云发展至成熟阶段时, 后端云滴逐渐被消耗如图 11 (a), 云滴通过碰并作用在 0°C
273 层下生成雨滴形成降雨如图 11 (d)。一部分云滴在 -40°C 左右的低温环境下冻结形成冰晶
274 粒子。如图 11 (b) 冰晶粒子在 -30°C 到 -40°C 层生成由于水汽增加使得冰晶核数量增多提供
275 了充足的凝结核。随着过程的推进, 如图 11 (e) 冰晶通过粘连丛集的方式生成雪粒子。在
276 低温且水汽充足的环境中, 冰雪晶之间相互碰撞并粘连在一起形成雪粒子。之后如图 11 (c)
277 雪粒子和冰晶在强烈的上升气流作用下, 由 0°C 到 -30°C 层通过碰冻作用生成霰粒子并且霰
278 混合比达到 7 g/kg。在这个温度区间内, 雪粒子和冰晶之间的碰撞较为频繁, 且碰撞后在低
279 温条件下迅速冻结, 从而形成霰粒子。部分霰粒子在 0°C 层通过淞附过冷水以及在 -10°C 到
280 融化层之间的碰冻作用, 在雹云前端生成雹粒子。在 0°C 层附近, 如图 11 (f) 霰粒子与过
281 冷水滴接触时, 过冷水滴会迅速在霰粒子表面冻结, 增加霰粒子的质量。在 -10°C 到融化层
282 之间, 霰粒子与其他水成物粒子的淞附和碰冻作用进一步促使其质量和体积增大, 最终形成
283 雹粒子 (雹混合比 2.5 g/kg)。

284

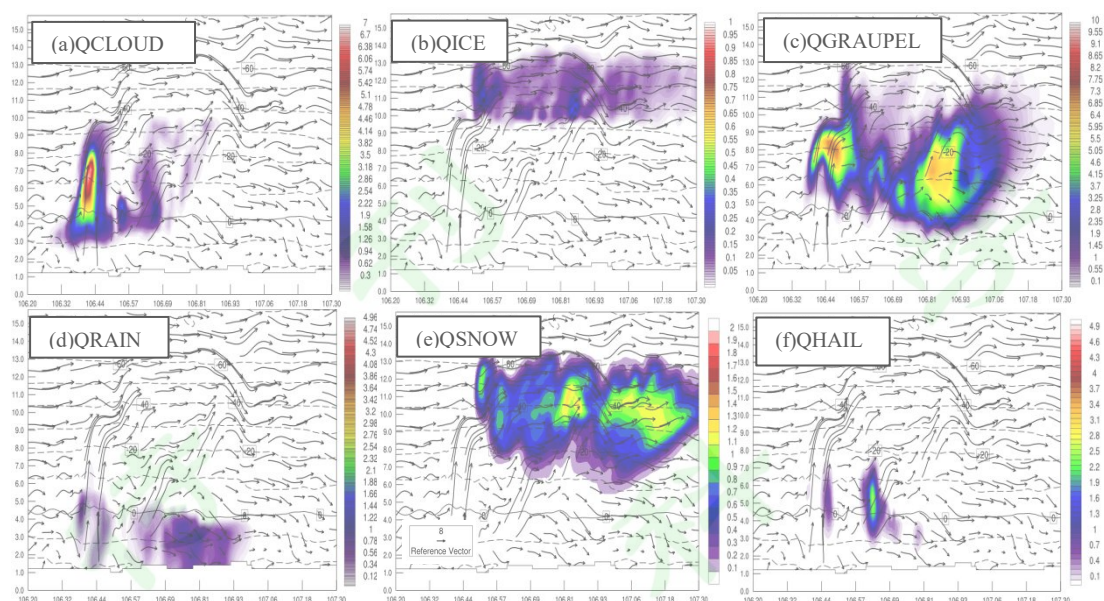


图 11 UTC11:12WRF 模式模拟各水成物混合比剖面, (a)云滴混合比; (b)冰晶混合比; (c)霰混合比; (d)雨滴混合比; (e)雪混合比; (f)雹混合比

Fig. 11. UTC11:12WRF model simulated mixing ratio profile of each water component, (a) cloud droplet mixing ratio; (b) ice crystal mixing ratio; (c) graupel mixing ratio; (d) raindrop mixing ratio; (e) Snow mix ratio; (f) Hail mix ratio

3.4 降雹消散阶段观测模拟对比分析

如图 12 (a)、12 (b)，通过对观测组合反射率图和模拟组合反射率图的对比分析发现，超级单体雹暴强反射率中心呈现出相似的变化趋势。在观测图中，中心反射率强度下降至 50dBZ，而在模拟的组合反射率图上，其中心强度也逐渐降低至 50-55dBZ，强中心减弱。

如图 12 (c)、12 (d)，雷达观测到雹云垂直结构已经崩溃，强回波中心高度大幅下降至 4km 以下，原本存在的穹隆结构消失不见，这一系列现象表明雹云内的上升气流在逐渐减弱。从模拟结果来看，后方超级单体垂直结构的崩溃引发了下击暴流约为 24m/s 导致降雹现象，之后该单体逐渐消散。这种观测与模拟结果在雹云垂直结构变化和降雹过程方面的相互印证。

如图 12 (e)、12 (f)、12 (g)，可以看出剖面前段单体 C“穴道”结构已经消散。然而，合并单体的“穴道”结构依然存在，并且依旧维持着上升运动。同时，有少量中气旋维持着“穴道”结构，这种特殊的结构和运动状态为降雹持续提供了有利条件。这表明在超级单体雹暴的发展后期，不同单体之间的结构和运动差异对降雹过程有着不同的影响。

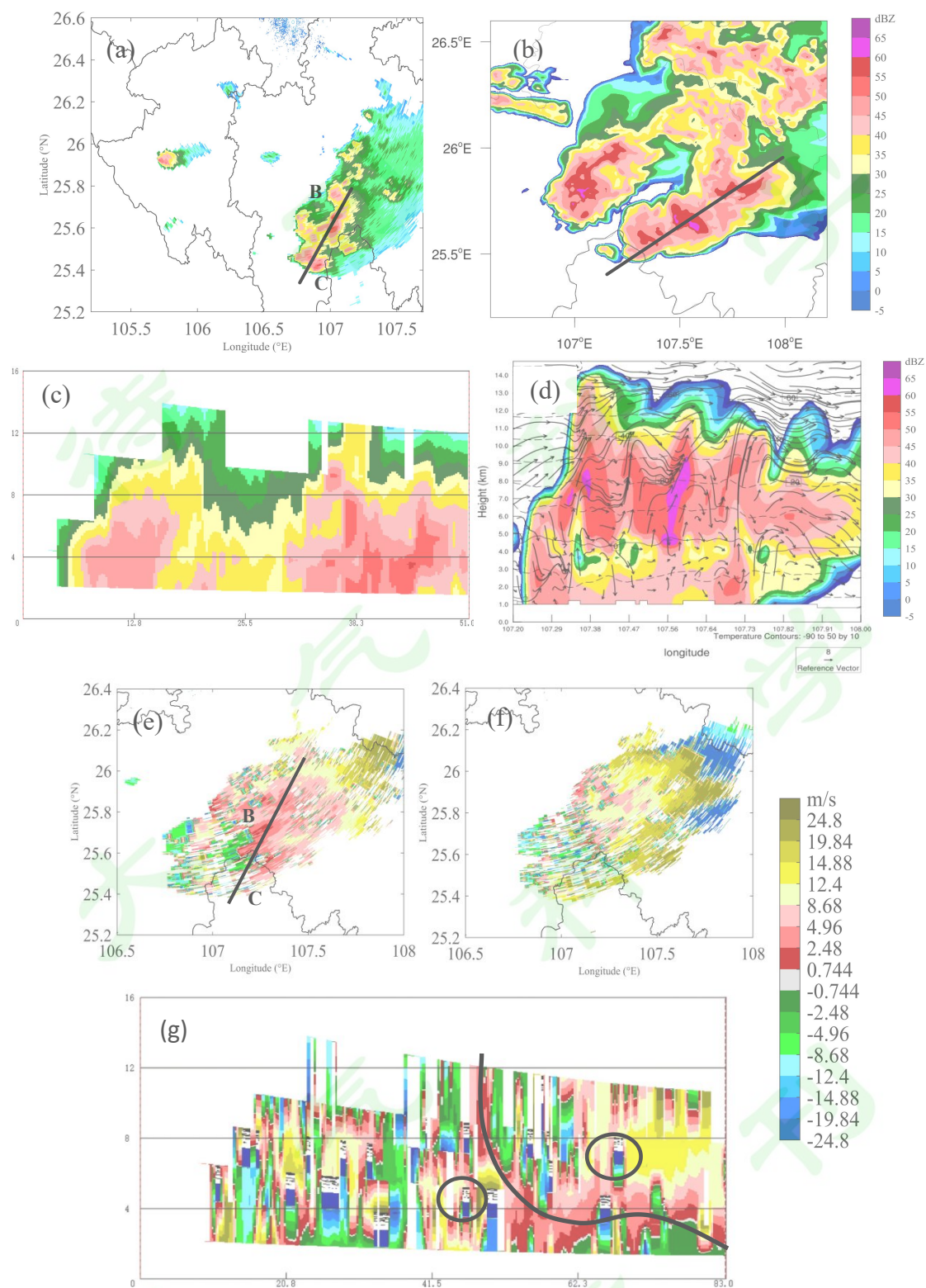


图 12 UTC11:44 组合反射率图(a)模拟; (b)观测, 黑色直线为剖面; (c)观测剖面对应反射率剖面; (d)模拟剖面对应反射率剖面; 径向速度图, 仰角分别为(e)2.4° 和(f)3.4° ; (g)剖面对应的径向速度剖面;黑色圆圈为中气旋; 黑色线段表示速度“零线”

fig. 12 UTC11:44 combined reflectance map (a) simulation; (b) Observation, where the black line is the profile line; (c) Observe the reflectance profile corresponding to the profile of the profile; (d) The simulated profile corresponds to the reflectance profile; Radial velocity diagrams with elevation angles of (c)2.4° and (f)3.4° ; (g) Radial velocity profile corresponding to the profile line; The black

circle is a mesocyclone; The black line segment represents the speed "zero line"

如图 13 (a) -13 (f) 所示，在雹云前段云滴生成后端云滴被消耗，部分云滴于 -40℃ 环境下通过碰冻作用生成冰晶粒子，另一部分在 0℃ 层以下通过碰并作用形成雨滴。冰晶粒子在 -40℃ 至 0℃ 高度范围内通过碰冻生成霰粒子，同时在 -20℃ 至 -40℃ 层内通过粘连从集作用形成雪粒子。霰粒子进入 -10℃ 至 0℃ 层的过冷水区时，通过淞附过冷水实现质量增长并形成冰雹。雹云前端的冰雹粒子在过冷水累积区受组织化垂直气流作用，其最大混合比可达 5 g/kg，湿增长机制促使冰雹质量持续增加。当冰雹质量超过上升气流托举阈值时，产生降雹现象。模拟结果与“穴道-零域”理论及水成物粒子转化过程高度一致，为雹暴形成机制研究提供了重要理论支撑。

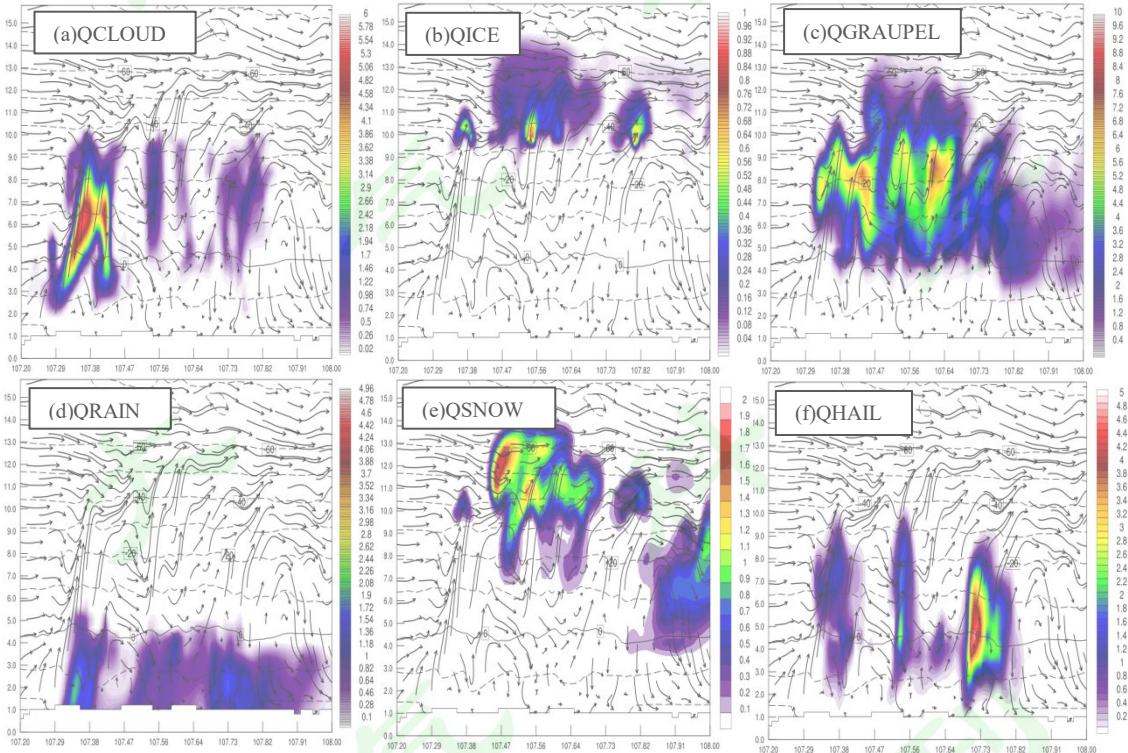


图 13 UTC 11: 44 WRF 模式模拟各水成物混合比剖面, (a)云滴混合比; (b)冰晶混合比; (c)霰混合比; (d)雨滴混合比; (e)雪混合比; (f)雹混合比

fig. 13 UTC11:44 , WRF model simulated mixing ratio profile of each water component, (a) cloud droplet mixing ratio; (b) ice crystal mixing ratio; (c) graupel mixing ratio; (d) raindrop mixing ratio; (e) Snow mix ratio; (f) Hail mix ratio

4 结论和讨论

本研究基于多源数据与 WRF 数值模拟，系统分析了贵州复杂地形背景下超级单体雹暴的形成机制与演变特征，揭示了宏微观热动力物理量观测与模拟过程的相互协同作用，对“穴道-零域”成雹理论进一步验证和说明，主要结论如下：

(1) 天气系统与地形的耦合触发机制, 高低空环流系统, 200 hPa 冷中心、500 hPa 高空槽、700 hPa 切变线及 850 hPa 气旋, 与贵州特殊地形如, 封闭山谷、坡地抬升的耦合作用构成了雹暴触发的关键条件。地形通过增强水汽辐合、抬升强迫效应及下山气流绝热增温, 影响雹暴单体的生成位置、垂直运动强度及能量释放过程。尤其在单体合并阶段, 地形引导的气流调整通过增强上升气流与水汽供应, 促进了超级单体的形成与降雹。

(2) 超级单体雹暴各阶段物理量的阶段指示意义, 位涡 “上正下负” 结构、水汽螺旋度与热力螺旋度的时空演变对雹暴发展阶段具有明确指示作用。在发生发展阶段位涡异常与热力螺旋度的显著增大反映初始对流触发; 在成熟阶段垂直风切变主导的螺旋度增强与位涡柱的垂直扩展, 标志系统进入强盛阶段。在降雹消散阶段螺旋度衰减与正位涡趋势指示系统能量耗散与结构崩溃。这些参数可作为雹暴预警的潜在指标, 为强对流天气预报提供理论依据。

(3) 热动力条件与云微物理过程的相互作用, 中低层高湿环境 (相对湿度 > 80%) 与 25 m/s 的强垂直风切变配置为雹暴发展提供了充足水汽与动力不稳定环境。垂直速度极值区 (900hPa - 600 hPa) 与假相当位温逆温区的高度耦合, 通过正反馈机制推动对流系统向高层发展。云微物理过程分析表明, -10℃到 0℃层附近的过冷水累积区与 “穴道-零域” 的协同作用, 通过淞附增长与碰冻机制促进冰雹粒子的快速生成与增长, 最终形成大冰雹。

(4) WRF 模式较好复现了超级单体的反射率结构: 65 dBZ 强中心、大于 10 km 回波顶高、弱回波区 (BWER) 及中气旋特征, 但对 0℃层附近的过冷水分布及粒子碰并效率存在模拟偏差。未来需优化微物理参数化方案, 如提高霰与雹的转化阈值, 并结合新雷达相控阵、双偏振雷达数据同化技术, 提升对雹暴微物理过程的精细化模拟能力。本研究基于单一案例的多尺度分析, 其结论的普适性受限于特定地形气候条件, 且模式分辨率限制了地形细节的刻画能力。未来需通过多区域个例对比与大数据统计揭示不同背景下的共性机制, 并采用高分辨率模式优化地形参数设置, 结合敏感性试验提升复杂地形下雷暴模拟精度。

参考文献 (reference)

337

- 338 Antonio Ricchi,Richard Rotunno.et al. 2023. Analysis of the development mechanisms of a
339 large-hail storm event on the Adriatic Sea [J].Atmospheric Research,296:1-15.
340 doi:10.1016/j.atmosres.2023.107079
- 341 Browning K A, Frankhauser J C, Chalon J P,et al. 1976. Structure of an Evolving Hailstorm Part V:
342 Synthesis and implications for Hail Growth and Hail Suppression [J].Mon.wea.rev,104
343 (5):603-610. doi:10.1175/1520-0493(1976)104<2.0.CO;2
- 344 Peters J M , Coffey B E , Parker M D ,et al.Disentangling the Influences of Storm-Relative Flow
345 and Horizontal Streamwise Vorticity on Low-Level Mesocyclones in Supercells[J].Journal of the
346 Atmospheric Sciences, 2023, 80(1). doi:10.1175/JAS-D-22-0114.1.
- 347 Cheng L, English M.A. 1983. Relationship Between Hailstone Concentration and Size [J].Journal
348 of the Atmospheric Sciences, 40 (1):204-213. doi:10.1175/1520-0469(1983)040<2.0.CO;2
- 349 程晓龙, 李跃清, 衡志炜. 2021. 川贵渝复杂地形下横槽诱发双涡贵州暴雨过程的数值模拟
350 [J]. 气象学报, 79 (04):626-645. Cheng X L, Li Y Q, Heng Z W.2021. Numerical simulation of
351 double-vortex rainstorm process induced by transverse trough in Guizhou Province under complex
352 Sichuan-Gui-Chongqing terrain [J]. Acta Meteorologica Sinica, 79 (04):626-645.
353 doi:10.11676/qxxb2021.039
- 354 程东亚, 李旭东 .2019. 贵州高原地形空间分布格局及其利用分析[J]. 高原科学研究, 3
355 (03):61-74. Cheng Y Y, Li X D.2019. Spatial distribution pattern and its utilization in Guizhou
356 Plateau[J]. Plateau Scientific Research, 3 (03):61-74. doi:CNKI:SUN:PTSR.0.2019-03-010
- 357 蔡丹, 孙立潭, 徐涛. 2002. 山地对流云的数值模拟 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学
358 版),(04):92-96. CAI D, Sun L T, Xu T.2002. Numerical simulation of convective cloud in
359 mountains [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science
360 Edition),(04):92-96. doi:10.7666/j.issn.1009-3443.20020422
- 361 崔雅琴. 2006. 三维对流云数值模式的改进与应用 [D]. 南京信息工程大学. Cui Y Q.2006.
362 Improvement and application of three-dimensional numerical model for cloud [D]. Nanjing
363 University of Information Science and Technology. Doi:10.7666/d.y868435
- 364 Farley R D . 2010 .Numerical Modeling of Hailstorms and Hailstone Growth. Part III: Simulation
365 of an Alberta Hailstorm—Natural and Seeded Cases [J].Journal of Applied Meteorology,26
366 (7):789-812.doi:10.1175/1520-0450(1987)026<2.0.CO;2
- 367 龚佃利, 朱君鉴, 林曲凤等. 2024. 一次超级单体引发的秋季特大冰雹和龙卷雷达探测分析
368 [J]. 气象, 50 (05):561-576. Gong D L, Zhu J J, Lin Q F, et al. 2024. Radar detection and analysis
369 of a super-monomer induced heavy hail and tornado in autumn [J]. Meteorological Journal, 50

370 (05):561-576. doi:
 371 黄兴友, 陈晓颖, 沈菲菲等. 2022. 利用 WRF 和多普勒雷达资料同化对一次江淮地区梅雨
 372 降水过程的模拟研究 [J]. 大气科学学报, 45 (02):225-238. Huang X Y, Chen X Y, Shen F, et al.
 373 2022. Simulation of a Meiyu precipitation process in Jianghuai Region using WRF and Doppler
 374 radar data assimilation [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 45 (02):225-238.
 375 doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200430001
 376 黄俊杰, 苟阿宁. 2018. 鄂西北一次超级单体风暴过程的观测分析 [J]. 暴雨灾害, 37
 377 (5):462-469. Huang J J, Gou A N. 2018. Observation and analysis of a supercell storm process in
 378 northwest Hubei [J]. Storm hazards(in Chinese), 37 (5):462-469.
 379 doi:CNKI:SUN:HBQX.0.2018-05-009
 380 Heymsfield A J. 2010. Case Study of a Halistorm in Colorado. Part IV: Graupel and Hail Growth
 381 Mechanisms Deduced through Particle Trajectory Calculations [J]. Journal of the Atmospheric
 382 Sciences, 40 (6):1482-1509. doi: 10.1175/1520-0469(1983)0402.0.CO;2
 383 姬雪帅, 杜晖, 张曦丹等. 2023. 基于 VDRAS 资料探究河北中南部一次弓状强飚线的演变
 384 和机理 [J]. 沙漠与绿洲气象, 17 (03):44-51. Ji X S, Du H, Zhang X D, et al. 2023. Evolution
 385 and mechanism of a heavy bow-shaped squall line in central and southern Hebei based on
 386 VDRAS data [J]. Journal of Desert and Oasis Meteorology, 17 (03):44-51. doi:
 387 10.12057/j.issn.1002-0799.2023.03.006
 388 Istrate V .CHARACTERISTICS AND IMPACTS OF THE SEVERE HAILSTORMS ON 18
 389 JUNE 2016 IN NORTHERN MOLDAVIA, ROMANIA[C]//19th SGEM International
 390 Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings.2019.
 391 doi:10.5593/sgem2019/4.1/S19.114.
 392 刘春文, 郭学良, 段玮等. 2021. 云南一次典型降雹过程的冰雹微物理形成机理数值模拟研
 393 究[J]. 大气科学, 45 (5): 965–980. Liu C W, Guo X L, Duan W, et al. 2021. Numerical simulation
 394 of microphysical formation mechanism of hail during a typical hail fall process in Yunnan [J].
 395 Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 45 (5): 965 – 980.
 396 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2104.20152
 397 刘霭薇, 周筠珺, 曾勇等. 2022. 孤立单体爆发性增长过程中的宏微观物理特征研究[J]. 成
 398 都信息工程大学学报, 37 (05):574-583. Liu H W, Zhou Y J, Zeng Y, et al. 2022. Macro and
 399 micro physical characteristics of isolated monomer during explosive growth [J]. Journal of
 400 Chengdu University of Information Technology, 37 (05):574-583.
 401 刘涛, 王瑾. 2022. 一次冰雹天气的数值模拟及地形敏感性试验研究 [J]. 中低纬山地气象,
 402 46 (01):10-18. Liu T, Wang J. 2022. Numerical simulation of a hail weather and experimental
 403 study on terrain sensitivity [J]. Mountain Meteorology of middle and low latitude, 46 (01):10-18.

doi:10.3969/j.issn.1003-6598.2022.01.002

刘瑾,王丛梅,胡志群,等.华北地区一次长生命史超级单体雹暴特征观测[J].气象科技,2022,50(03):390-402.Liu Jin, Wang Congmei, Hu Zhiquan, et al. Observation on characteristics of a long life history supercell hailstorm in North China [J]. Meteorological Science and Technology,2022,50(03):390-402. (in Chinese)DOI:10.19517/j.1671-6345.20210362.

罗斐然, 闵锦忠. 2024. 台风“烟花”路径突然北折的热动力因子诊断与分析 [J]. 大气科学学报, 47 (05):767-777. Luo F R, Min J Z. 2024. Diagnosis and analysis of thermal dynamic factors of sudden northward bend of Typhoon "Firework" [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 47 (05):767-777.

王福侠, 薛学武, 杨吕玉慈等. 2024. 一次长生命史超级单体风暴双偏振参量结构及演变特征 [J]. 气象, 50 (10):1216-1230. Wang F X, Xue X W, Yang L Y C, et al. 2024. Structure and evolution characteristics of dual-polarization parameters of a long-life supercell storm [J]. Meteorological Journal, 50 (10):1216-1230. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2024.031801

王瑾. 2008. 基于强对流数值模拟的贵州冰雹识别及临近预报方法研究 [D]. 中国气象科学研究院. Wang J.2008. Research on hail identification and prediction method based on strong convection numerical simulation in Guizhou [D]. Chinese Academy of Meteorological Sciences.

王兴丽, 汪治桂, 张翼飞等. 2023. 甘南高原一次超级单体强冰雹天气过程分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 17 (03):52-58.Wang X L, Wang Z G, Zhang Y F, et al. 2023. Analysis of a supercell strong hail weather process in Gannan Plateau[J]. Journal of Desert and Oasis Meteorology, 17 (03):52-58.

王颖, 寿绍文, 周军. 2007. 水汽螺旋度及其在一次江淮暴雨分析中的应用 [J]. 南京气象学院学报, 30 (1):101-106. Wang Y, Shou S W, Zhou J.2007. Water vapor helicity and its application in analysis of a rainstorm in Jianghuai River [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 30 (1):101-106. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2007.01.014

王一童, 王秀明, 俞小鼎. 2022. 产生致灾大风的超级单体回波特征 [J]. 应用气象学报, 33 (2):180-191. Wang Yitong, WANG Xiuming, YU Xiaoding. 2022. Characteristics of supercell echoes generating gust [J]. Journal of Applied Meteorology, 33 (2):180-191.

尉英华, 陈宏, 王艳春等. 2024. 弱天气背景下天津三次局地突发暴雨中尺度特征及触发机制 [J]. 气象, 50 (09):1093-1104. Wei Y H, Chen H, Wang Y C, et al. 2024. Mesoscale characteristics and triggering mechanism of three local sudden rainstorms in Tianjin under weak weather background [J]. Meteorological Journal, 50 (09):1093-1104.

许焕斌,田利庆.强对流云中“穴道”的物理含义和应用[J].应用气象学报,2008,(03):372-379.Xu Huanbin, Tian Liqing. Physical meaning and application of "acupoint" in strong convective cloud [J]. Journal of Applied Meteorology,2008,(03):372-379.

Smith J A, Baeck M L, Zhang Y, et al. 2001. Extreme Rainfall and Flooding from Supercell
Thunderstorms [J]. Journal of Hydrometeorology, 2 (5):469.
doi:10.1175/1525-7541(2001)0022.0.CO;2

石涛. 2023. 超大城市地闪活动及雷暴热动力结构的观测分析和模拟研究 [D]. 中国科学技术大学. Shi T. 2023. Observation, analysis and simulation of ground flash activity and thermal and
dynamic structure of thunderstorms in megacities [D]. University of Science and Technology of
China.

Toker E, Ezber Y, Sen O L. 2020. Numerical simulation and sensitivity study of a severe hailstorm
over Istanbul [J]. Atmospheric Research, 105373. doi:10.1016/j.atmosres.2020.105373

竹利, 蒋兴文, 卢萍等. 2024. 雅安地区一次暖区暴雨过程的对流触发机制分析 [J]. 大气科学, 48 (05):1693-1710. Zhu L, Jiang X W, Lu P, et al. 2024. Convective triggering mechanism of a
warm rainstorm process in Ya 'an region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 48
(05):1693-1710. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2311.23074

殷蕾, 王瑾, 唐细坝等. 2024. 一次贵阳冰雹过程数值模拟及冰雹形成微物理机制研究 [J].
大气科学, 48 (04):1674-1692. Yin L, Wang J, Tang X Ba, et al. 2024. Numerical simulation of
hailstone process and microphysical mechanism of hailstone formation in Guiyang [J]. Chinese
Journal of Atmospheric Sciences, 48 (04):1674-1692.

杨帅, 陈斌, 高守亭. 2013. 水汽螺旋度和热力螺旋度在华北强“桑拿天”过程中的分析及
应用 [J]. 地球物理学报, 56 (7):2185-2194. Yang S, Chen B, Gao S T. 2013. Analysis and
application of water vapor helicity and thermal helicity in the process of strong "sauna weather" in
North China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 56 (7):2185-2194. doi:10.6038/cjg20130706

姚静, 李培荣, 肖贻青等. 2024. 陕南西南涡暴雨的热动力特征分析 [J]. 高原气象, 43
(03):655-666. Yao J, Li P R, Xiao Y Q, et al. 2024. Thermal and dynamic characteristics of
rainstorm in southwest Shaanxi [J]. Plateau Meteorology, 43 (03):655-666.
doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2023.00074

周峰, 周筠珺, 邹书平等. 2023. 贵州威宁雹暴微物理特征的观测及数值模拟研究 [J]. 热带
气象学报, 39 (4):551-566. Zhou F, Zhou J J, Zou S P, et al. 2023. Observation and numerical
simulation of microphysical characteristics of hail surges in Weining, Guizhou [J]. Journal of
Tropical Meteorology, 39 (4):551-566.