



“格美”台风残涡对湖南溆浦极端强降水影响分析

陈红专 叶成志 曾志明 张坤 欧小锋

Analysis of the impact of extreme heavy precipitation in Xupu under the influence of “Gaemi” typhoon residual vortex

CHEN Hongzhuan, YE Chengzhi, ZENG Zhiming, ZHANG Kun, OU Xiaofeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-147>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

四川盆地秋季一次层状云弱降水过程的微物理特征观测分析

Analysis on the microphysical characteristics of weak precipitation process observation of a stratiform cloud in Sichuan Basin in autumn

暴雨灾害. 2022, 41(4): 445–457 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.009>

沁河流域暖季极端小时降水时空特征分析

Analysis of temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation during the warm season in the Qinhe River Basin

暴雨灾害. 2025, 44(3): 352–360 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-088>

江苏梅雨期极端小时降水时空变化特征

The spatiotemporal variation characteristics of extreme hourly precipitation during the Meiyu period in Jiangsu Province

暴雨灾害. 2025, 44(4): 473–482 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-033>

“海葵”台风(1211号)暴雨雨滴谱特征分析

Analysis of raindrop spectrum characteristics for a heavy rain event caused by typhoon Haikui (No.1211) in Anhui

暴雨灾害. 2020, 39(2): 167–175 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.02.007>

2024年2月湖北省一次大范围冻雨过程的宏微观特征及形成机制初探

Study on the macro and micro characteristics of a large-scale freezing rain weather event in Hubei Province

暴雨灾害. 2024, 43(4): 458–468 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-131>

河南省暖季小时极端降水时空分布特征

Spatial and temporal distribution characteristics of hourly extreme rainfall in warm season in Henan

暴雨灾害. 2021, 40(2): 153–159 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.006>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

陈红专,叶成志,曾志明,等.2026.“格美”台风残涡对湖南溆浦极端强降水影响分析[J].暴雨灾害,45(3):384–394. CHEN Hongzhuan, YE Chengzhi, ZENG Zhiming, et al. 2026. Analysis of the impact of extreme heavy precipitation in Xupu under the influence of “Gaemi” typhoon residual vortex [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 45(3):384–394 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025–147

“格美”台风残涡对湖南溆浦极端强降水影响分析

陈红专^{1, 2}, 叶成志^{1, 3}, 曾志明^{1, 2}, 张坤^{1, 2}, 欧小锋^{1, 3}

(1. 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 长沙 410118; 2. 湖南省怀化市气象局, 怀化 418000;
3. 湖南省气象科学研究所, 长沙 410118)

摘 要: 受 2024 年第 3 号台风“格美”残涡影响, 当年 7 月 28 日湖南溆浦出现一次极端强降水过程, 小时雨量达 120.1 mm, 突破当地历史记录。为了深入认识此次极端强降水的发生发展机制, 提高极端强降水的预警水平, 综合利用多源观测资料和 ERA5 再分析资料, 对极端强降水的成因和微物理特征开展了研究。结果表明: 在有利的层结、能量和水汽条件下, 台风残涡南侧的西南气流水汽输送和西侧的偏北风水汽输送在暴雨区汇合, 为极端强降水的发生提供有利的环流背景和环境条件。极端强降水由一个准静止 β 尺度中尺度对流系统 (MCS) 造成, 在雷达回波图上该 MCS 表现为镶嵌在混合云回波中的两个强风暴单体及其合并过程, 属于低质心、高效率的暖云降水回波, 低层辐合、中高层辐散的垂直结构特征有利于上升运动的维持。中尺度涡旋 (MV) 与次级环流的配合加强了风暴内的垂直上升运动, 有利于将低层的暖湿空气输送到上升气流中, 产生和维持极端降雨率, 导致极端强降水的形成。极端小时降雨时段雨滴直径增大、浓度增加, 以暖雨碰并增长为主, 极端降雨主要与直径 >1 mm 的雨滴贡献有关, 其中直径在 (1, 3] mm 区间的雨滴降雨贡献率约占 80%。最后, 给出了导致本次极端强降水的概念模型, 作为此类天气分析和预报的参考。

关键词: 极端小时降雨; 微物理特征; 中尺度涡旋; 次级环流

中图法分类号: P458.2

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025–147

Analysis of the impact of extreme heavy precipitation in Xupu under the influence of “Gaemi” typhoon residual vortex

CHEN Hongzhuan^{1, 2}, YE Chengzhi^{1, 3}, ZENG Zhiming^{1, 2}, ZHANG Kun^{1, 2}, OU Xiaofeng^{1, 3}

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction in Hunan, Changsha 410118; 2. Huaihua Meteorological Bureau of Hunan Province, Huaihua 418000; 3. Hunan Institute of Meteorological Sciences, Changsha 410118)

Abstract: Affected by the residual vortex of Typhoon “Gaemi” on July 28 2024, an extreme heavy precipitation event occurred in Xupu, Hunan Province, with an hourly rainfall of $120.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, breaking the local historical record. To get a deep understanding of the development mechanism of HER and improve the analysis and forecasting ability of EHR, multi-source observations and ERA5 reanalysis data are comprehensively used to analyze the causes and microphysical characteristics of EHR. The results show that under the favorable environmental conditions of stratification, energy, and water vapor, the convergence between the southwest moisture transport from the south side of the typhoon residual vortex and the northerly moisture transport from the west side of the residual vortex triggered the occurrence of extreme heavy precipitation. The EHR is caused by a quasi-stationary β -scale Mesoscale Convective System (MCS). On the radar echo map, this MCS shows as the merging process of two strong storm cells embedded in the mixed cloud echo, which belongs to the low-centroid, high-efficiency warm cloud precipitation echo. The vertical structure characterized by low-level convergence and mid-high-level divergence is conducive to the maintenance of ascending motion. The maintenance of the coupling situation between mesoscale vortex (MV) and secondary circulation strengthens the vertical upward movement within the storms, facilitating the transport of low-level warm and humid air to the updrafts, consequently generating and maintaining extreme rainfall rates, and leading to the occurrence of EHR.

收稿日期: 2025–08–06; 定稿日期: 2025–12–01

资助项目: 湖南省自然科学基金重大项目 (2021JC0009); 湖南省重大研发专项 (2024AQ2016); 湖南省气象局创新发展专项 (CXFZ2025-ZDZX01, CXFZ2026-ZDXM11)

第一作者: 陈红专, 主要从事短时、短期天气预报技术研究。E-mail: 306676963@qq.com

通信作者: 叶成志, 主要从事中尺度数值预报、灾害性天气机理研究。E-mail: yechengzhi_hunan@hotmail.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY–NC–ND 4.0

During EHR, the diameter and concentration of raindrops increase, mainly due to the collision and growth of warm rain. The rainfall is primarily contributed by raindrops with diameters greater than 1 mm, among which the contribution rate of rainfall in the range of (1, 3] mm accounts for about 80%. Finally, a conceptual model of the EHR was summarized, which provides a reference for future weather analysis and forecasting research.

Key words: extreme hourly precipitation; microphysical characteristics; mesoscale vortex (MV); secondary circulation

引言

极端强降水包括日和短时尺度的强降水,极端短时强降水是指1 h雨量 ≥ 50 mm或3 h雨量 ≥ 100 mm的降水事件(俞小鼎, 2013),极易造成突发性洪涝,对生命和财产构成重大威胁(Terti et al., 2017; Zhang and Zhou, 2020)。中国位于典型季风气候区,加上复杂的地形,使得中国经常出现极端短时强降水,刷新小时雨量历史纪录,如“75.8”河南特大暴雨最大1 h雨量189.5 mm(丁一汇, 2015),2017年广州“5.7”极端降水最大1 h雨量184.4 mm(沈晓琳等, 2018; 徐珺等, 2018),“21.7”河南特大暴雨最大1 h雨量201.9 mm(冉令坤等, 2021; 闵爱荣等, 2024),桂林“5.22”极端强降水最大1 h雨量160.6 mm(翟丽萍等, 2024)等。

决定极端短时强降水降雨率的因素包括持续时间、上升气流强度、微物理过程(Sui et al., 2007; 王俊等, 2023)和上升气流的水汽混合比(骆凯等, 2010; Nielsen and Schumacher, 2020a)等。持续时间通常与准静止中尺度对流系统(Mesoscale Convective System, MCS)有关(Schumacher and Johnson, 2005; 罗菊英等, 2023),此类MCS由于移动缓慢或者具有后向传播特征,影响时间长,造成较大累计雨量。超级单体风暴和其他 γ 中尺度涡旋可以产生和维持极端降雨率,俞小鼎等(2008)研究一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴表明,该风暴包裹着一个深厚强烈的中气旋,造成了极端短时强降水。这种伴随龙卷的强降水超级单体风暴在美国发生频繁,常造成极端的累计雨量,而且近50%的极端小时降水与低层中尺度涡旋(mesoscale vortex, MV)有关(Nielsen and Schumacher, 2020a)。Wang等(2023)针对2021年7月河南郑州极端降水的研究也表明,小时雨强 > 50 mm的降水主要由伴有MV的风暴引起。风暴中的低层旋转可以通过增强低层垂直速度增强降水,并可能增加暖雨过程,进而提高对流降雨率(Nielsen and Schumacher, 2020b; Li et al., 2021)。上述研究表明持续时间、上升气流强度和微物理特征等在极端累计雨量方面起重要作用。

尽管前人对极端短时强降水的环境条件(持续时间、上升气流强度、微物理过程和上升气流的水汽混合比等)已开展了大量研究(Schumacher, 2017; 吴

梦雯和罗亚丽, 2019),但是由于中小尺度对流系统具有时间空间尺度小、发展迅速的特点,使得精细预测极端降雨小时尺度雨量和降雨率仍然面临较大挑战(Schumacher, 2017; James et al., 2018),因此对于极端强降水过程的演变规律研究具有十分重要的科学和现实意义。2024年7月26日到28日,受第3号台风“格美”及其减弱后的低涡影响,湖南出现了一次极端强降水过程,造成山洪、泥石流、山体滑坡等次生灾害和严重人员伤亡。“格美”减弱后的残涡在西移过程中,在湖南西部的溆浦产生了破记录的极端小时降雨。本文利用多源观测资料和ERA5再分析资料,试图通过降雨的天气尺度/中尺度特征和微物理过程分析和提炼概念模型,剖析台风残涡背景下极端小时降雨成因,为极端降雨预报预警服务提供一定的参考。

1 资料和过程概述

1.1 资料说明

本文所用资料包括:(1)来源于湖南省气象信息中心的常规地面、高空观测资料和欧洲中期天气预报中心空间分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的ERA5再分析资料,用于环境场分析。(2)来源于湖南省气象信息中心的国家级气象站、区域气象站降雨数据、FY4B卫星云图资料和怀化双偏振多普勒雷达资料,分别用于降水特征及其成因分析。(3)来源于湖南省气象信息中心的溆浦雨滴谱仪资料,用于降雨粒子特征分析,该资料包括32个尺度通道和32个速度通道,降雨粒子尺度测量范围为0.1—22.4 mm,速度测量范围为0.125—26.0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,该资料处理采用的方法与王青霞等(2025)的相同。(4)来源于中国气象局上海台风研究所的台风最优路径资料(Lu et al., 2021),用于台风路径分析。

1.2 极端强降水过程概况

2024年第3号台风“格美”于7月19日在菲律宾以东洋面生成,24日02时(北京时,下同)加强为超强台风,25日20时在福建莆田登陆后向西北方向移动,27日减弱为热带低压,28日台风残涡分裂成南北两个中心,北侧中心向东北方向移动,南侧残涡转向偏西方向移动进入湖北南部,于28日8时在湖北咸宁境内减弱消失,停止编号(图1a)。受“格美”及其减弱后的热带低压影响,湖南省出现大范围强降雨,

全省平均雨量 122.2 mm (图 1b)。

按照台风演变过程,此次降水大致可分为两个阶段,第一阶段 7 月 25 日至 28 日白天,强降水由“格美”台风造成,主要出现在湖南东部地区,该区域普降大暴雨和特大暴雨,日雨量达 250~400 mm,最大日雨量 602.4 mm。第二阶段在 28 日晚上到 29 日白天,强降水由“格美”台风残涡造成,雨区移到湘西地区,以大暴雨为主,溆浦国家站 24 h 累计雨量 224.4 mm,强降水时段集中在 28 日夜间 (图 1c),

20—23 时 3 h 累计雨量达 177.3 mm,其中 21 时 1 h 雨量达 120.1 mm,刷新溆浦站有记录以来小时降雨记录。溆浦虽然不是此次台风过程的最强降雨区 (图 1b),但其最大小时雨强在湖南 97 个国家站中最大,在所有站点中仅次于郴州资兴秋木气象站 ($132.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)。从溆浦分钟降雨时序图 (图 1d) 可见,逐分钟降雨连续性较好,无明显骤增和骤减现象,最大分钟降雨量 3 mm,并未超过翻斗式雨量计的分钟降雨阈值,因此其分钟降雨量真实可信。

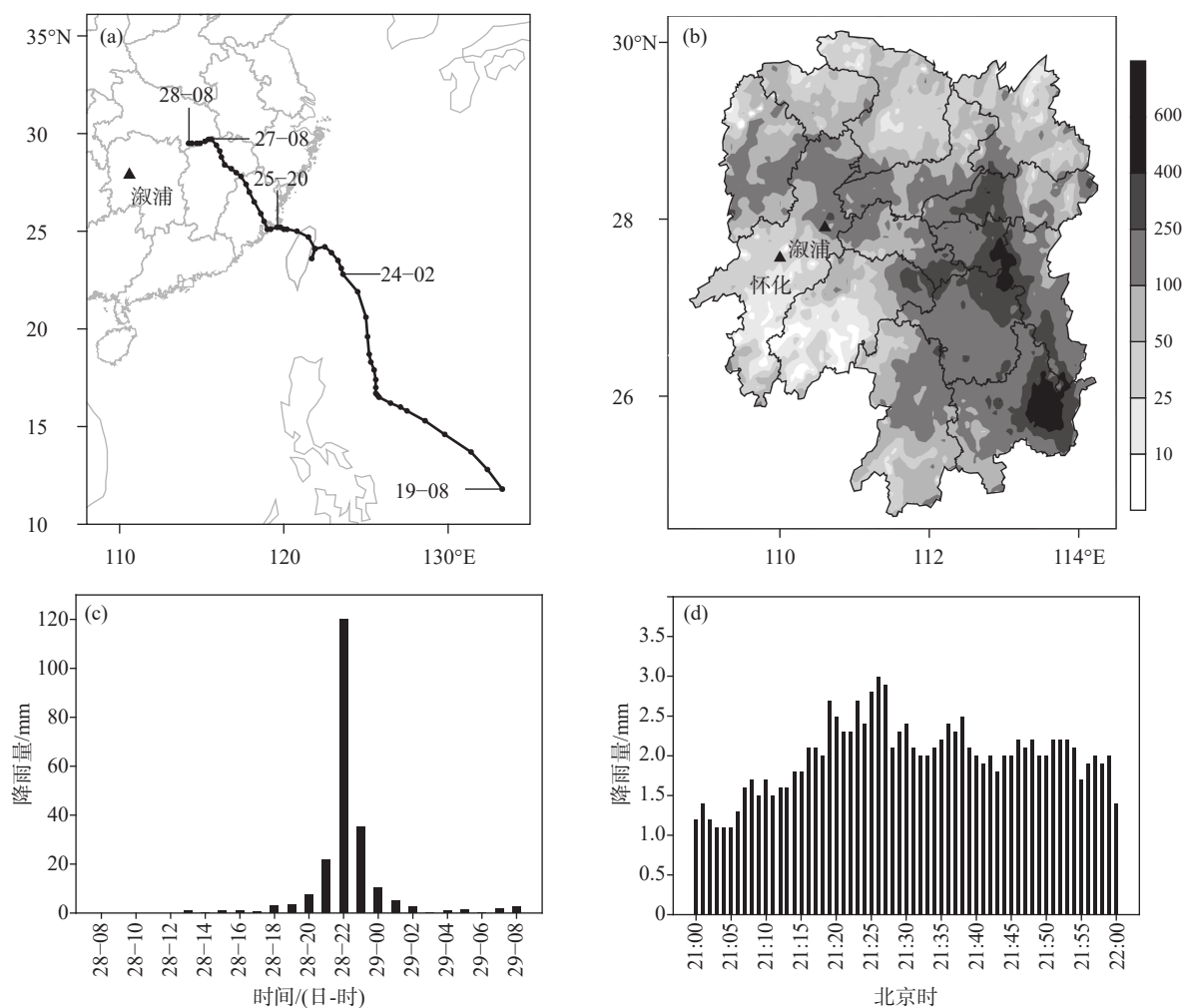


图 1 “格美”台风移动路径 (a, 图中数字表示日-时, 圆点表示逐时次), 2024 年 7 月 26 日 08 时—29 日 08 时累计雨量 (阴影, 单位: mm) 空间分布 (b, 三角分别表示怀化和溆浦站) 和溆浦站逐小时雨量 (c), 溆浦站 7 月 28 日 21—22 时逐分钟雨量 (d)

Fig. 1 The (a) track of typhoon Gaemi (the format of time in the figure is day-hour), (b) accumulated precipitation from 08:00 BT on July 26 to 08:00 BT on July 29, 2024 (triangles represent Huaihua and Xupu station), (c) hourly rainfall of Xupu station from 08:00 BT on July 28 to 08:00 BT on July 29, 2024 and (d) minutely rainfall of Xupu station from 21:00 BT to 22:00 BT on July 28, 2024

2 影响系统和环境条件

2.1 影响系统

影响此次过程的天气系统主要是台风、西北太平洋副热带高压 (以下简称副高) 和欧亚大陆高压。“格美”台风在福建莆田登陆后, 受 500 hPa 副高西南侧东南气流的引导, 以北偏西路径向内陆缓慢移动,

27 日 08 时移至江西北部 (图略), 副高西伸, 与华北地区大陆高压打通, 形成带状高压坝。28 日 08 时高压坝进一步向西发展, 此时“格美”减弱为热带低压, 但其气旋性环流仍较完整, 低压环流受高压坝的阻挡转向西行。28 日 20 时 (图 2a), 台风残涡移至湘鄂边境, 副高稳定强大, 脊线位于 35°N 附近。台风残

涡东南侧低空急流较为强盛,从低压中心向西南方向伸展的低层切变线经过溆浦(图2b),台风低压西南侧的西南气流与自台风低压东侧北上后经台风涡旋转后的偏北风在暴雨区辐合。

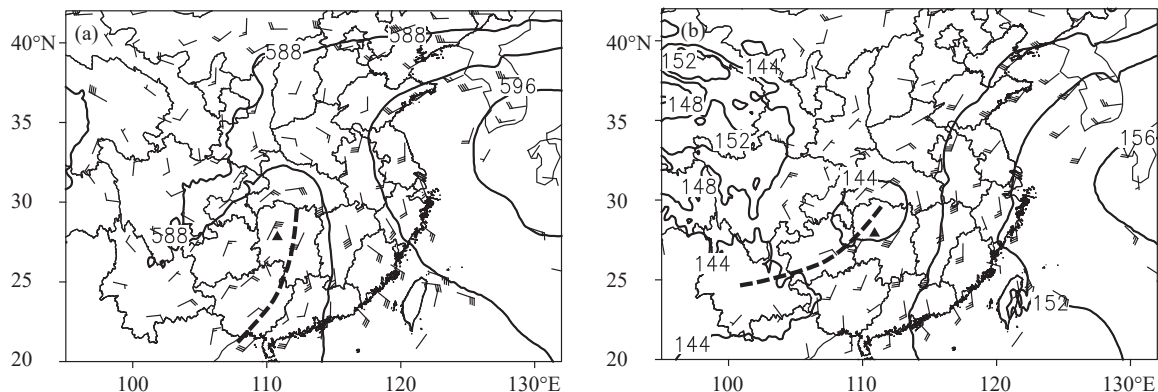


图2 2024年7月28日20时500 hPa(a)和850 hPa(b)高度场(等值线,单位: dagpm)和风场(风羽,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)(粗虚线表示高空槽或切变线,黑色三角形为溆浦站位置,下同)

Fig. 2 The (a) 500 hPa and (b) 850 hPa geopotential height (contours, unit: dagpm) and wind field (barb, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 20:00 BT on July 28, 2024 (the bold dashed line is the trough or shear line, the black triangle is Xupu station, the same hereinafter)

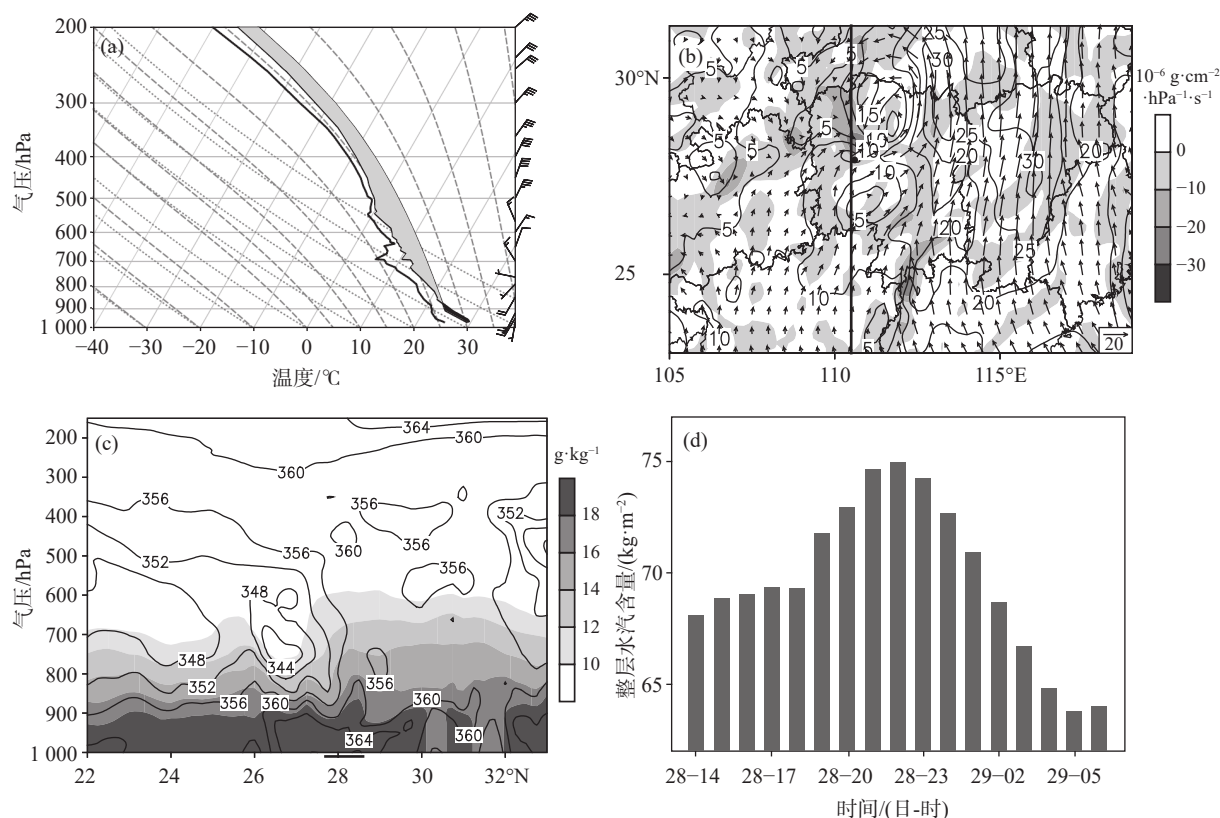


图3 2024年7月28日20:00怀化站探空图(a),850 hPa水汽通量散度(阴影)和水汽通量(等值线,单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,箭头为水汽通量矢量)空间分布(b),过暴雨中心沿110.5°E(图3b粗实线)的比湿(阴影)和假相当位温(等值线,单位: K)经向剖面图(c,粗实线表示暴雨区),28日14时—29日06时溆浦站整层水汽含量的时间演变(d)

Fig. 3 (a) $T\text{-ln}p$ diagram of Huaihua station at 20:00 BT on July 28, 2024, (b) 850 hPa water vapor flux divergence (shaded) and water vapor flux (contours, unit: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, arrows are water vapor flux vector) at 20:00 BT on July 28, 2024, (c) cross-section of specific humidity (shaded) and pseudo-equivalent potential temperature (contours, unit: K) along 110.5°E (the bold solid line in fig. 3b) at 20:00 BT on July 28, 2024 (the bold solid line below the abscissa axis represents the rainstorm area), and (d) time variation of total column water vapor at Xupu station from 14:00 BT on July 28 to 06:00 BT on July 29, 2024

不稳定能量 (CAPE) 大于 $1\,300\text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$, 对流抑制能量 (CIN) 小于 $30\text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$, 抬升凝结高度仅为 911 hPa , $0\sim6\text{ km}$ 风矢量差 $17.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 属于中等偏强的深层风垂直切变。垂直剖面显示暴雨区 700 hPa 以下为不稳定层结, 底层比湿大于 $18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 3c)。过程期间整层水汽含量有一个明显的跃增过程, 与降水开始和加强时段对应, 极端小时降水时段整层水汽含量大于 $70\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 3d)。两支水汽输送在溆浦附近辐合, 形成一个较强的水汽辐合中心, 其中偏北风水汽输送大于偏南风水汽输送, 说明“格美”台风残涡气旋式环流对溆浦极端小时强降水的水汽输送有重要作用 (图 3b)。综上, 有利的层结、能量和水汽为溆浦极端强降水提供环境基础。

3 极端强降水成因分析

3.1 准静止 MCS 造成极端小时降水维持

FY-4B 卫星红外云图 (图 4a、b) 显示, 台风残涡在湖南附近活动期间, 溆浦极端小时降雨是由一个准静止 β 尺度 MCS 造成的, 该 MCS 于 28 日 20:30

生成于两个 α 尺度 MCS 之间, 之后稳定在溆浦附近且快速发展增强, 云顶亮温持续下降, 21:45 云顶亮温降至 $-61\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。22:30 后缓慢向西南方向移出溆浦, 29 日 01:30 后减弱消散, 生命史 5 h , 影响溆浦的时间约为 2 h , 对应溆浦的强降雨时段。该 MCS 在雷达回波图上表现为镶嵌在积云层状云混合回波中的两个强风暴单体及其合并过程。回波从 17:00 开始加强, 以混合云回波为主, 19:34 溆浦北部的混合云回波中开始出现多个孤立的 $40\sim45\text{ dBz}$ 强回波单体, 这些孤立单体在缓慢向西南方向移动过程中逐渐合并形成第一个风暴单体, 20:49 在该风暴单体北侧生成第二个风暴单体 (图略), 单体基本呈准静止状态, 但范围不断扩大, 中心强度大于 55 dBz 。21:10 这两个风暴开始合并 (图 4c), 出现了风暴单体合并的重要特征云桥 (图 5a), 云桥出现在 1.5° 仰角 (约 2.8 km), 合并后的风暴移动缓慢, 持续影响溆浦 (图 4d), 22:30 后强风暴逐渐向西移, 溆浦降水开始减弱。准静止 MCS 的维持有利于极端降水的维持, 实况显示, 20:57—22:13, 溆浦站分钟降雨持续大于 1 mm , 持续时间长

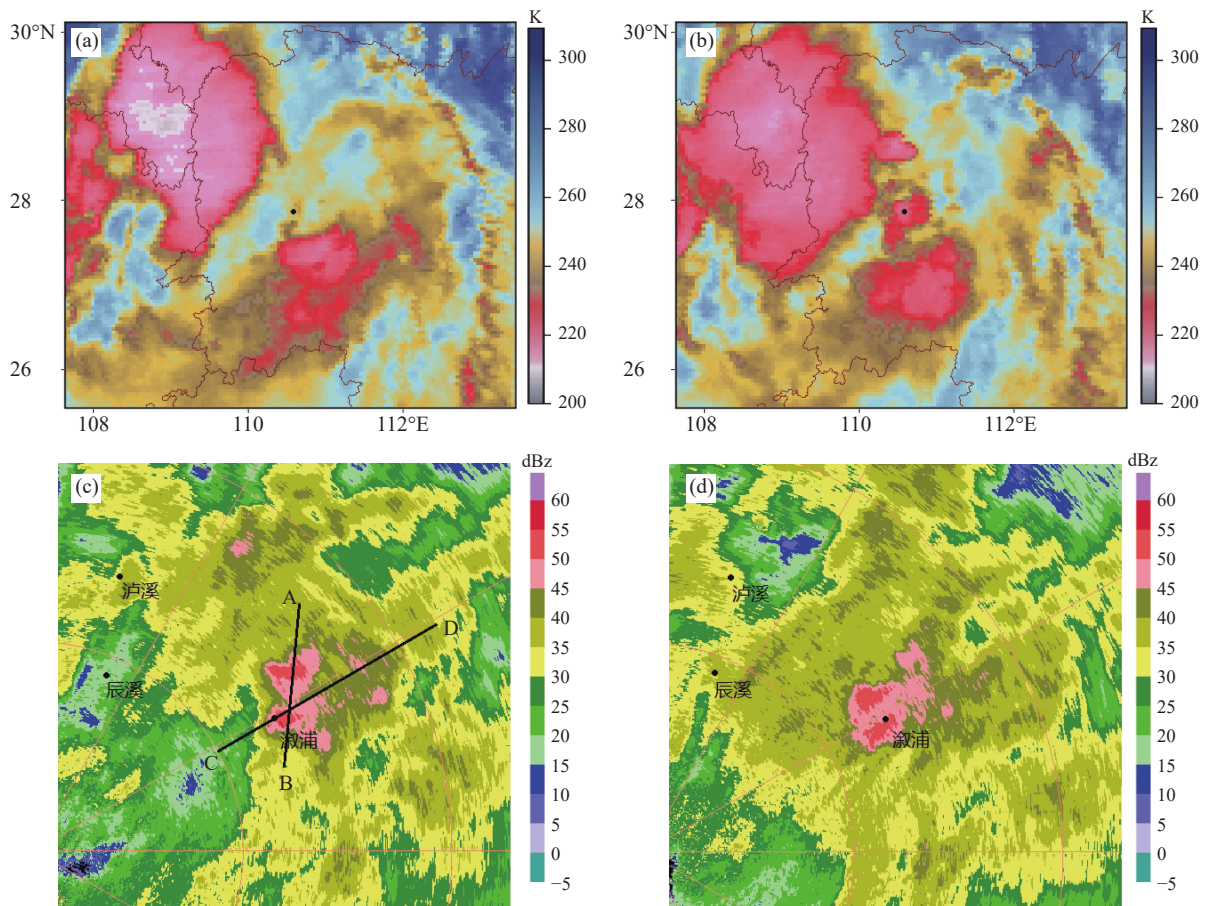


图 4 2024 年 7 月 28 日 20:30 (a)、21:45 (b) FY-4B 红外云图和 21:10 (c)、21:42 (d) 怀化雷达组合反射率因子 (黑线 AB 和 CD 为图 5 剖面位置)

Fig. 4 FY-4B infrared cloud images at (a) 20:30 BT and (b) 21:45 BT, huaihua radar combined reflectivity factor at (c) 20:10 BT and (d) 21:42 BT on 28 Jul 2024 (the black lines AB and CD indicate the cross-sectional positions in Fig. 5)

达 76 min, 其中 21:15—21:40 的分钟降雨量持续大于 2 mm。

沿图 4c 中黑色实线 AB 的基本反射率因子垂直剖面 (图 5a) 显示, 回波顶高基本维持在 10 km 以下, 强回波大都在 5 km 以下, 最强回波高度显示的对流质心更低 (2~4 km), 具有单体回波顶高低、云底高度低、强回波质心低等低质心暖云降水回波的特征, 探空图显示怀化站 0 °C 层高度为 5 409 m (图 3a), 说明降水主体和强回波中心主要由 0 °C 层高度以下的液态雨滴构成, 低质心暖云降水回波具有较高的降水效率, 有利于极端降水的形成 (蒋亚平等, 2025)。时序图 (图 5c) 也显示, 强降水时段溆浦上空反射率因子大于 35 dBz, 回波高度超过 6 km, 尤其是 20:33 以后反射率因子快速加强, 回波高度明显升高, 最大反射率因子 54 dBz, 说明此时段对流发展较为旺盛, 与极端小时强降水有较好的对应关系。但强回波始终维持 5 km 以下, 低质心暖云降水特征明显。

从沿图 4c 中黑色实线 CD 的径向速度垂直剖面 (图 5b) 看出, 低层西南气流与台风残涡西侧南下的

东北气流汇合于溆浦北部, 溆浦附近低层存在风速辐合, 中层 5 km 左右为辐散, 上层则是一致的东北风。从溆浦站不同仰角径向速度时序图 (图 5d) 可看出低层西南气流在水平和垂直方向加强的过程, 强降雨开始前, 溆浦低层西南风较弱和较浅薄, 20 时后低层西南风开始加强, 低空急流建立, 低空急流的湿度输送可以加强环境的不稳定度, 急流末端的水平辐合产生大尺度抬升, 为夜间 MCS 的触发提供有利的对流初生环境。与此同时, 西南气流也向上发展, 加强低层的水汽输送, 西南气流之上则为东北气流, 在溆浦上空始终维持一个辐散中心, 该辐散中心随着西南气流的加强和向上发展而加强和向上抬升, 这种低层辐合中高层辐散的结构有利于垂直上升运动的维持和发展。

3.2 MV 加强风暴内上升运动

分析怀化雷达风场演变发现, 对流层中层在溆浦附近有一个 γ 尺度 MV 长时间维持。MV 于 19:29 最先出现在溆浦北侧 1.5° 仰角 (大约 2.5 km), 旋转速度 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 顶部位于 2.4° 仰角, 伸展高度约为 1 km。此

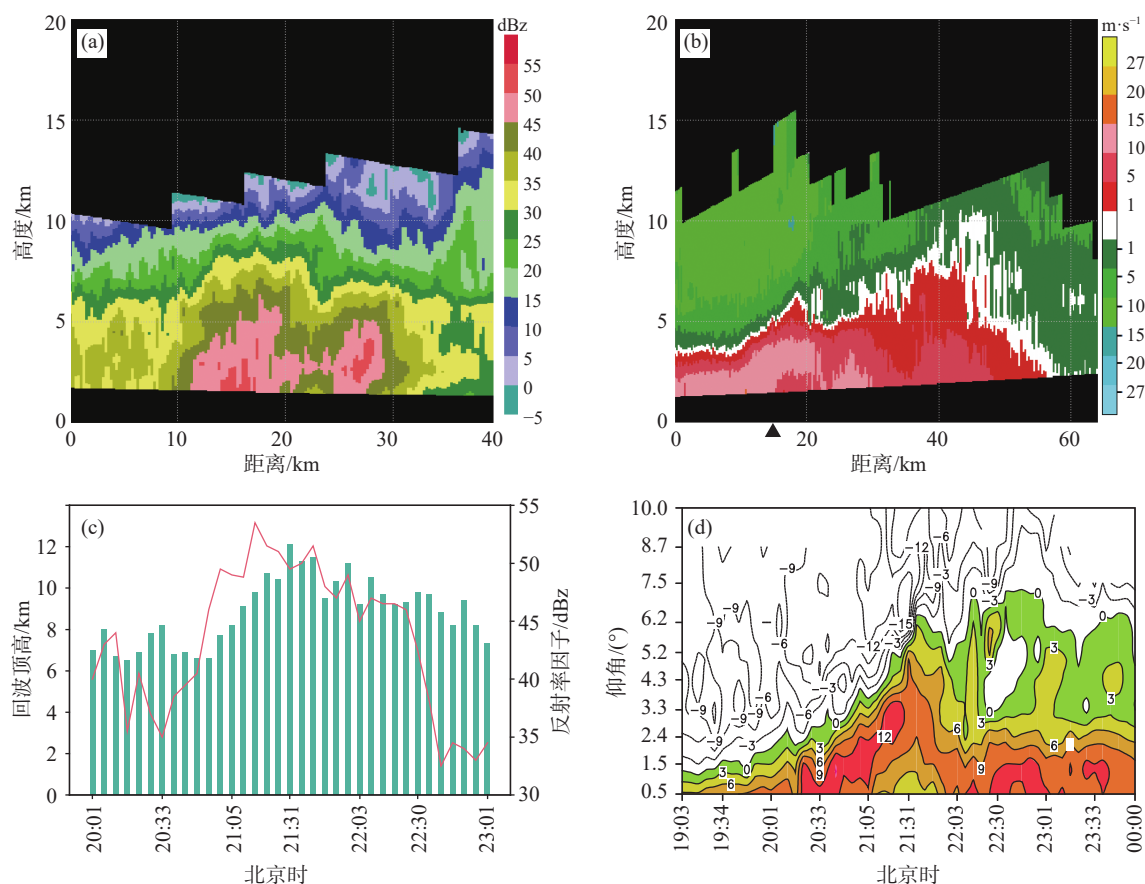


图 5 2024 年 7 月 28 日怀化雷达沿图 4c 黑线 AB 反射率因子 (a) 和黑线 CD 的径向速度 (b, 三角形表示溆浦位置) 剖面, 溆浦站组合反射率因子 (红线) 和回波顶高 (柱状) 的时序图 (c) 以及不同仰角径向风速的时序图 (d, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 填色区风速 $\geq 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 5 Vertical cross-section of (a) reflectivity along the blackline AB in Fig. 4c, (b) radial velocity along the black line CD in Fig. 4c (the triangle represents the location of Xupu), the time evolution of (c) radar combined reflectivity and radar echo top (bar) and (d) radial velocity at different elevations (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, the radial velocity in the shaded area $\geq 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) at Xupu station on 28 July 2024

后该 MV 缓慢移到溆浦附近, MV 的底部随着低层西南气流的加强和向上发展而不断抬高, 20:59 (图 6a), MV 的底部抬升到 2.4° 仰角, 旋转速度 $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 顶部位于 4.3° 仰角, 伸展高度 1.3 km。21:26 该 MV 达到最强 (图 6b), 底部位于 3.3° 仰角, 伸展高度超过 5 km, 垂直方向略向南倾斜 (图 6d), 旋转速度 $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 垂直涡度 $5.8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。21:52 (图 6c), 该 MV 已处于消亡阶段, MV 进一步抬升到 4.3° 仰角, 旋转速度下降为 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。MV 有利于增强风暴内的垂直上升运动,

将低层的暖湿空气输送到上升气流中, 产生更大雨强。研究表明, 风暴内的中小尺度涡旋会通过非线性动力作用造成负的气压扰动, 进而有助于近地面形成向上的气压梯度力, 加强上升运动 (Weisman and Klemp, 1984; Klemp, 1987; Nielsen and Schumacher, 2020b)。此次过程的 MV 虽未达到中气旋的旋转速度标准, 但维持时间长 ($>2 \text{ h}$), 其垂直涡度也远大于一般暴雨的涡度阈值, 有利于维持极端降雨率。

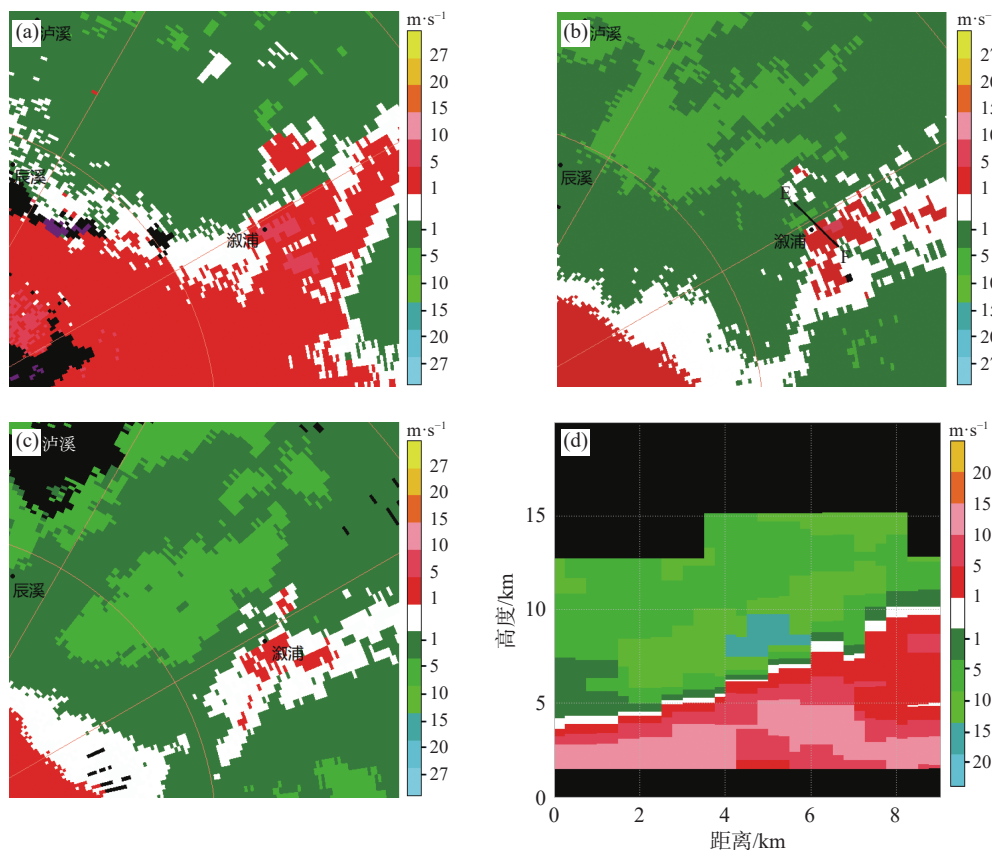


图 6 2024 年 7 月 28 日怀化雷达 20:59 2.4° 仰角 (a), 21:26 4.3° 仰角 (b), 21:52 5.2° 仰角 (c) 的径向速度, 以及 21:26 沿图 b 黑线 EF 径向速度的垂直剖面 (d)

Fig. 6 Huaihua radar radial velocity at (a) 20:59 BT, 2.4° elevation, (b) 21:26 BT, 4.3° elevation, (c) 21:52 BT, 5.2° elevation, and (d) vertical cross section of radial velocity along the black line AB in panel (b)

3.3 次级环流促进高层出流和低层入流

进一步分析南北风和垂直速度合成的流场剖面图可以发现, 极端小时降水与次级环流的发展和维持有关。28 日 21:00 (图 7a), 暴雨区有一支略向南倾斜的深厚上升气流直达 500 hPa 以上, 对应溆浦暴雨区, 上升支的南侧低层 700 hPa 以下出现补偿下沉气流, 汇入低纬的暖湿气流中, 形成一个垂直反环流。该次级环流在 19:00 就已形成, 位于 800 hPa 附近, 随着西南气流向上发展, 次级环流逐渐抬升, 21 时抬升至 850 hPa 附近, 22 时抬升至 600 hPa 附近 (图 7b)。次级环流与强降水和强对流天气的产生和维持关系

密切, 其上升支在中高层形成辐散, 对流层中高层 400 hPa 以上为一致的东北风, 散度场上该层维持一个强辐散中心, 强度达 $20\sim30 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 有利于维持上升气流的发展以及降水的发生和维持 (裴坤宁等, 2019), 而外侧的下沉支则加强降水中心低层的入流, 导致对流进一步发展。

4 极端小时降水微物理特征

下面分别分析怀化多普勒雷达双偏振参量和溆浦站雨滴谱的演变特征, 以加深对本次极端小时降雨微物理过程的认识, 更好地理解极端小时降雨的成因。

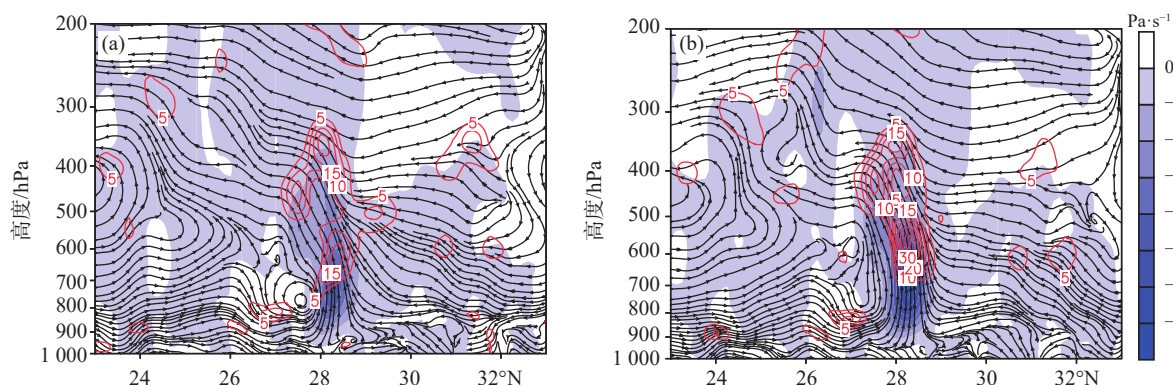


图7 2024年7月28日21时(a)和22时(b)沿110.5°E的垂直速度(填色)、散度(红色等值线,单位: 10^{-5} s^{-1})、经向风(v)与垂直速度(ω 放大10倍)合成流场(流线)经向垂直剖面

Fig. 7 Longitudinal vertical sections of vertical velocity (shaded), divergence (red contours, unit: 10^{-5} s^{-1}), and meridional streamlines of v and ω (amplified 10 times) along 110.5°E at (a) 21:00 BT on July 28 and (b) 22:00 BT on July 28, 2024

4.1 雷达双偏振参量特征

溆浦站的降雨从28日下午开始,但强降雨主要出现在28日20—22时的3 h之内,从怀化双偏振多普勒雷达沿溆浦站所在经纬度的雷达参量的时间-高度演变可看出,反射率因子廓线出现3个大值区,其中20—22时回波最强,极端小时降雨时段(21:00)表

现出明显的积云对流回波特征(图8a):强度大于15 dBZ的回波顶超过12 km;大于35 dBZ的回波分布在8 km以下,大于45 dBZ的强回波主要位于0℃层以下,对流云团的质心低,降水主体和强回波中心主要由0℃层高度以下的液态雨滴构成,属于低质心、高效率的暖云降水回波。

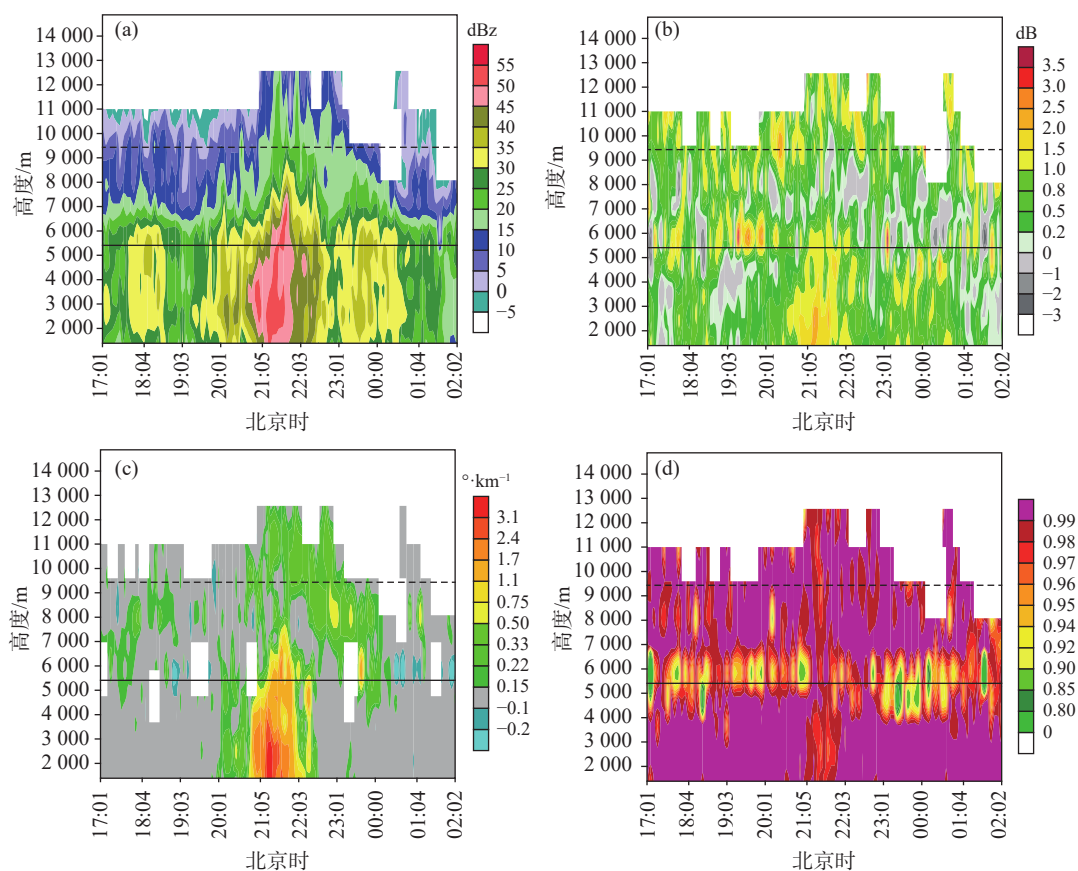


图8 2024年7月28日17时—29日02时怀化雷达反射率因子 Z_H (a),差分反射率因子 Z_{DR} (b),差分相移率 K_{DP} (c),相关系数 C_C (d)的时间变化(图中实线和虚线分别表示怀化探空站0℃和-20℃层高度)

Fig. 8 Time variation of of (a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) K_{DP} , and (d) C_C of doppler radar at Xupu station from 17:00 BT on July 28 to 02:00 BT on July 29, 2024 (the solid line and dashed line represent the 0℃ and -20℃ level altitudes of Huaihua high station, respectively)

差分反射率因子 (Z_{DR}) 廓线 (图 8b) 显示, 在极端小时降雨时段, Z_{DR} 明显增强, 部分时间大于 2 dB, 大于 1 dB 的 Z_{DR} 柱伸展到融化层以上, 说明此时段造成强降雨的降水粒子较大, 直径大约在 1~2 mm 左右, 甚至更大, Z_{DR} 越大, 表明降水粒子越大。另外大 Z_{DR} 区主要位于 0 °C 层高度以下, 说明这些降水粒子可能来源于暖云降水的碰撞与合并过程 (Ryzhkov et al, 1994)。过程期间 0 °C 层以下差分相移率 (K_{DP}) 一般在 0 °·km⁻¹ 附近, 相关系数 (C_C) 大于 0.99, 说明以小雨为主, 雨滴谱以小雨滴为主, 但在极端小时降雨时段 K_{DP} 迅速增强, 对应反射率因子大值区, 21:21 达到最大值 (3.7°·km⁻¹), 实况显示此时段溱浦站的分钟降雨量大于 2 mm (图 1d), 即强 K_{DP} 与强回波区、强降雨时段对应, 这是因为 K_{DP} 与液态水含量成正比, 与降雨量几乎呈线性关系 (Kumjian, 2013a, 2013b), 说明此时段雨滴直径大且数浓度高, 是造成极端小时降水的主要原因 (图 8c)。 C_C 则下降到 0.97 以下, 这是由于该时段大雨滴明显增加, 同时夹杂小雨滴, 造成水平和垂直偏振波后向散射的相关性降低 (图 8d), 双偏振雷达粒子分类产品也显示在溱浦以大雨、冰雹和大雨滴为主。

4.2 雨滴谱特征

雨滴谱仪观测到的溱浦站雨滴谱的时间序列如图 9 所示, 从中看到, 降雨开始时, 溱浦站雨滴谱浓度低 (图 9a), 以小雨滴 (直径 ≤ 1 mm) 为主, 分钟降雨量较小 (图 9b), 随着降雨的发展, 雨滴谱的浓度增加, 雨滴直径增大, 雨滴谱数量和浓度在极端小雨降雨时段达到峰值, 尤其是大雨滴的数量和浓度明显增大, 大于 3 mm 的雨滴主要出现在该时段, 这种分布反映出该阶段降水更多地表现出强对流特征, 说明云中上升气流较强, 可以托住较大的雨滴, 导致此时段降水强度变大, 分钟降雨量均大于 1 mm, 小时累计降雨量达到 120.1 mm。

从大小雨滴与分钟降水量的时间演变来看, 整个降水过程小雨滴数明显多于大雨滴数, 但大小雨滴数与分钟降水三条曲线走向吻合, 峰值相对应 (图 9b), 为此分析了三者之间的皮尔逊相关系数关系。发现大雨滴和小雨滴两序列的相关系数为 0.962 2, P (显著性水平) 值小于 0.006 5; 大小雨滴数时间序列较分钟降水量时间序列略有滞后, 大雨滴数时间序列与分钟降水量序列的相关系数为 0.938 6, P 值小于 0.008 0, 小雨滴数时间序列与分钟降水量序列的相关系数为 0.925 0, P 值小于 0.008 7, 大雨滴数与分钟降水量的相关性优于小雨滴数与分钟降水量的相关性, 说明大雨滴数曲线可以更精细地表述分钟降水量的变化。

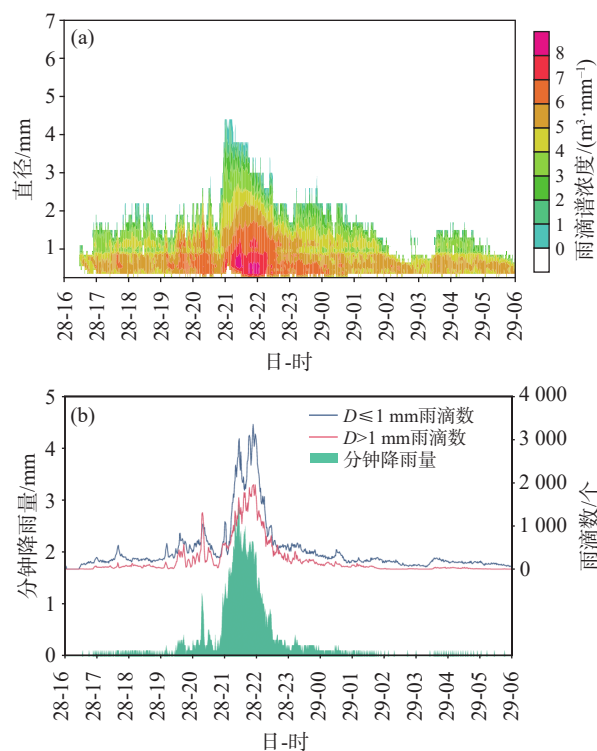


图 9 2024 年 7 月 28 日 16 时—29 日 06 时溱浦站雨滴谱浓度及直径分布 (a), 分钟降雨量、大雨滴 ($D>1$ mm) 和小雨滴 ($D\leq 1$ mm) 数量 (b) 的时间变化

Fig. 9 Time variations of (a) raindrop concentration and diameter distribution, (b) minute precipitation and number of large raindrop ($D>1$ mm) and small raindrop ($D\leq 1$ mm) at Xupu station from 16:00 BT on July 28 to 06:00 BT on July 29, 2024

进一步统计 28 日 21 时不同直径雨滴的占比和降雨贡献率的情况, 从表 1 可看出, 该时段直径 ≤ 1 mm 的雨滴占比大于 62%, 平均滴谱浓度也远大于大雨滴的浓度, 但对降雨的总贡献率却仅为 8.7%。而 >1 mm 的雨滴虽然占比小, 平均滴谱浓度也低, 对降雨的总贡献率却远大于小雨滴, 其中 1~2 mm 区间和 2~3 mm 区间的雨滴降雨贡献率分别占 40% 左右, 是造成溱浦极端小时降雨的最主要雨滴, 这与王青霞等 (2025) 的研究结果较为相似, 即强降雨主要

表 1 溱浦站 2024 年 7 月 28 日 21 时不同直径雨滴的粒子数占比、滴谱浓度和降雨贡献率

Table 1 Proportion of particle numbers, droplet spectral concentration, and rainfall contribution rate of raindrops with different diameters at Xupu station at 21 BT on July 28, 2024

粒子直径/ mm	粒子数占比/ %	平均滴谱浓度/ mm ⁻¹ ·m ⁻³	降雨贡献率/ %
≤1	62.2	259.7	8.7
(1, 2]	31.0	81.5	39.7
(2, 3]	6.3	13.9	39.3
(3, 4]	0.4	2.3	7.4
>4	0.1	0.6	4.9

与直径 $>1\text{ mm}$ 的雨滴贡献有关。

通过上述分析,本文总结了此次极端强降水过程的概念模型(图10)。

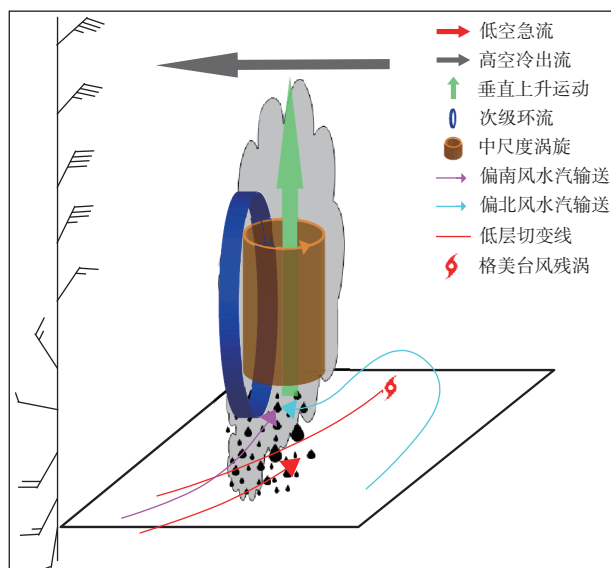


图10 2024年7月28日溆浦极端强降水概念模型

Fig. 10 Conceptual model of extreme heavy rainfall of Xupu on July 28, 2024

5 结论和讨论

本文针对2024年7月28日“格美”台风残涡背景下湖南溆浦极端强降水过程,通过分析强降水的天气尺度/中尺度特征和微物理过程,得到以下主要结论:

(1) 此次过程发生在“格美”台风残涡向西移动过程中,台风残涡南侧的西南气流水汽输送以及西侧的偏北风水汽输送在溆浦附近辐合,导致极端小时降雨的发生。较高的对流不稳定能量、较低的抬升凝结高度、逐渐增强的水汽条件和中等偏强的垂直风切变为极端小时降雨的发生提供了有利的环境条件。

(2) 极端小时降雨由一个准静止 β 尺度MCS造成,该MCS在溆浦生成后快速发展增强,持续影响时间为2 h,在雷达回波图上该MCS表现为镶嵌在混合云回波中的两个强风暴单体及其合并过程,具有云底高度低、强回波质心低等低质心、高效率暖云降水回波的特征,低层辐合、中高层辐散的垂直结构特征有利于上升运动的维持。

(3) 极端小时降雨期间对流层中层长时间维持的MV加强了风暴内的垂直上升运动,而暴雨区南侧长时间维持的次级环流促进了高层出流和低层入流,二者的配合有利于将低层的暖湿空气输送到上升气流中,导致极端小时降雨的形成。

(4) 极端小时降雨时段 Z_{DR} 、 K_{DP} 随反射率因子的

增大而增大, C_C 则降低,雨滴的直径和浓度增大,极端小时降雨主要与直径 $>1\text{ mm}$ 的雨滴贡献有关,其中 $(1, 2]\text{ mm}$ 和 $(2, 3]\text{ mm}$ 区间的雨滴降雨贡献率分别占40%左右,是造成溆浦极端小时降雨的最主要雨滴。

对于超级单体中气旋的形成,一致的观点是环境垂直风切变产生的水平涡度随着低层入流转变为上升气流过程中被逐步扭曲为垂直涡度,随后在上升运动的垂直拉伸下进一步加强为中气旋(Davies-Jones, 1984; Rotunno and Klemp, 1985)。此次过程的MV虽未达到中气旋的标准,却在溆浦造成了极端小时降雨,以往的研究(Li et al., 2021; Wang et al., 2023)也表明MV在提高降雨率、产生极端累积降雨量方面有重要作用。追踪雷达回波的演变可发现,此次过程的MV并非由台风残涡分裂而来,而是在溆浦境内原地生成,其形成原因及其与其他系统的相互作用仍需要进一步研究。另外本文提出的概念模型仅是针对此次过程总结的,是否具有普适性还需要通过更多典型事件加以检验。

参考文献 (References):

- 丁一汇. 2015. 论河南“75.8”特大暴雨的研究: 回顾与评述[J]. 气象学报, 73(3): 411–424. Ding Y H. 2015. On the study of the unprecedented heavy rainfall in Henan Province during 4–8 August 1975: Review and assessment [J]. *Journal of Meteorology*, 73(3): 411–424 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2015.067
- 蒋亚平, 覃皓, 黄妮, 等. 2025. 广西西南部一次极端暴雨过程成因分析[J]. 高原山地气象研究, 45(1): 113–121. Jiang Y P, Qin H, Huang N, et al. 2025. Cause analysis of an extreme rainstorm in southwest Guangxi [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2025, 45(1): 113–121 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2025.01.013
- 罗菊英, 张家国, 许冠宇, 等. 2023. 2020年夏季鄂西南一次极端暴雨过程成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 17(2): 26–35. Luo J Y, Zhang J G, Xu G Y, et al. 2023. Analysis of the causes of an extreme rainstorm in western Hubei in the summer of 2020 [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 17(2): 26–35 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.02.004
- 骆凯, 李耀东, 秦丽. 2010. 一次华北暴雨过程的数值模拟及水汽过程分析[J]. 暴雨灾害, 29(4): 307–314. Luo K, Li Y D, Qin L. 2010. Numerical simulation and process analysis of moisture flux on the rainstorm process in North China [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 29(4): 307–314 (in Chinese).
- 闵爱荣, 廖移山, 张文. 2024. 2021年4—10月我国主要暴雨天气过程简述[J]. 暴雨灾害, 43(5): 617–626. Min A R, Liao Y S, Zhang W. 2024. Major heavy rainfall events in China from April to October in 2021 [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 43(5): 617–626 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024-048
- 裴坤宁, 王磊, 李谢辉, 等. 2019. 一次变形场背景下的暴雨位涡诊断研究[J]. 高原气象, 38(6): 1221–1228. Pei K N, Wang L, Li X H, et al. 2019. Potential vorticity diagnose on a heavy rainstorm under deformation field [J]. *Plateau Meteorology*, 38(6): 1221–1228 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00021
- 冉令坤, 李舒文, 周玉淑, 等. 2021. 2021年河南“7·20”极端暴雨动、热力和水汽特征观测分析[J]. 大气科学, 45(6): 1366–1383. Ran L K, Li S

- W, Zhou Y S, et al. 2021. Observational analysis of the dynamic, thermal, and water vapor characteristics of the "7·20" extreme rain-storm event in Henan Province, 2021 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 45(6):1366–1383 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21160
- 沈晓琳,陶亦为,张芳华,等. 2018. 2017 年 4—10 月我国主要暴雨天气过程简述[J]. *暴雨灾害*, 37(2):187–196. Shen X L, Tao Y W, Zhang F H, et al. 2018. Important heavy rain events in China from April to October in 2017 [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 37(2):187–196 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.02.011
- 王俊,陈宝君,周淑玲,等. 2023. 郑州“7·20”特大暴雨雨滴谱特征分析[J]. *高原气象*, 42(5):1247–1259. Wang J, Chen B J, Zhou S L, et al. 2023. Analyzing the characteristics of raindrop size distributions of the “7·20” torrential rain in Zhengzhou on 20 July 2021 [J]. *Plateau Meteorology*, 42(5):1247–1259 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2022.00089
- 王青霞,唐明晖,吴亚昊,等. 2025. 基于多源观测资料的长沙“4·29”强对流天气过程分析[J]. *暴雨灾害*, 44(3):309–321. Wang Q X, Tang M H, Wu Y H, et al. 2025. Analysis of “4·29” severe convective weather event in Changsha based on multi-source observation data [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 44(3):309–321 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024-112
- 吴梦雯,罗亚丽. 2019. 中国极端小时降水 2010—2019 年研究进展[J]. *暴雨灾害*, 38(5):502–514. Wu M W, Luo Y L. 2019. Extreme hourly precipitation over China: research progress from 2010 to 2019 [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 38(5):502–514 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.012
- 徐珏,毕宝贵,湛芸,等. 2018. “5.7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J]. *气象学报*, 76(4):511–524. Xu J, Bi B G, Chen Y, et al. 2018. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017 [J]. *Journal of Meteorology*, 76(4):511–524 (in Chinese). doi:10.11676/qxb2018.016
- 俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等. 2008. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究[J]. *大气科学*, 32(3):508–522. Yu X D, Zheng Y Y, Liao Y F, et al. 2008. Observational investigation of a tornadic heavy precipitation supercell storm [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 32(3):508–522 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.08
- 俞小鼎. 2013. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. *暴雨灾害*, 32(3):202–209. Yu X D. 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 32(3):202–209 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2013.03.002
- 翟丽萍,梁依玲,周云霞,等. 2024. 桂林“5.22”极端强降雨过程的观测分析[J]. *暴雨灾害*, 43(3):313–321. Zhai L P, Liang Y L, Zhou Y X, et al. 2024. Observation analysis of “5.22” extreme rainfall event in Guilin [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 43(3):313–321 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-141
- Davies-Jones R. 1984. Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41(20):2991–3006. doi:10.1175/1520-0469(1984)041<2991:SVTOOU>2.0.CO;2
- James P M, Reichert B K, Heizenreder D. 2018. NowCastMIX: Automatic integrated warnings for severe convection on nowcasting time scales at the German weather service [J]. *Weather and Forecasting*, 33(5):1413–1433. doi:10.1175/WAF-D-18-0038.1
- Klemp J B. 1987. Dynamics of tornadic thunderstorms [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 19:369–402. doi:10.1146/annurev.fl.19.010187.002101
- Kumjian M R. 2013a. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part I: Description of the polarimetric radar variables [J]. *Journal of Operational Meteorology*, 1(19):226–242. doi:10.15191/nwajom.2013.0119
- Kumjian M R. 2013b. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part II: Warm- and cold-season applications [J]. *Journal of Operational Meteorology*, 1(20):242–264. doi:10.15191/nwajom.2013.0120
- Li M X, Luo Y L, Zhang D L, et al. 2021. Analysis of a record-breaking rainfall event associated with a monsoon coastal megacity of south China using multisource data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(8):6404–6414. doi:10.1109/TGRS.2020.3029831
- Lu X Q, Yu H, Ying M, et al. 2021. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(4):690–699. doi:10.1007/s00376-020-0211-7
- Nielsen E R, Schumacher R S. 2020a. Observations of extreme short-term precipitation associated with supercells and mesovortices [J]. *Monthly Weather Review*, 148(1):159–182. doi:10.1175/MWR-D-19-0146.1
- Nielsen E R, Schumacher R S. 2020b. Dynamical Mechanisms Supporting Extreme Rainfall Accumulations in the Houston “Tax Day” 2016 Flood [J]. *Monthly Weather Review*, 148(1):83–109. doi:10.1175/MWR-D-19-0206.1
- Rotunno R, Klemp J B. 1985. On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 42(3):271–292. doi:10.1175/1520-0469(1985)042<0271:OTRAPO>2.0.CO;2
- Ryzhkov A V, Zhuravlyov V B, Rybakova N A, 1994. Preliminary results of X-band polarization radar studies of clouds and precipitation [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 11(1): 132–139. doi:10.1175/1520-0426(1994)011<0132:PROXPB>2.0.CO;2
- Schumacher R S, Johnson R H. 2005. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems [J]. *Monthly Weather Review*, 133(4):961–976. doi:10.1175/MWR2899.1
- Schumacher R S. 2017. Heavy Rainfall and Flash Flooding[M]. *Natural Hazard Science: Oxford Research Encyclopedias*, 40 pp. doi:10.1093/acrefore/9780199389407.013.132
- Sui C H, Li X, Yang M J. 2007. On the definition of precipitation efficiency [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64(12):4506–4513. doi:10.1175/2007JAS2332.1
- Terti G, Ruin I, Anquetin S, et al. 2017. A situation-based analysis of flash flood fatalities in the United States [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(2):333–345. doi:10.1175/BAMS-D-15-00276.1
- Wang X M, Zheng Y G, Fan L M, et al. 2023. The key mesoscale systems and mesoscale vortices of the Henan extreme precipitation in 2021 [J]. *Sustainability*, 15(6):4875. doi:10.3390/su15064875
- Weisman M L, Klemp J B. 1984. The Structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears [J]. *Monthly Weather Review*, 112(12):2479–2498. doi:10.1175/1520-0493(1984)112<2479:TSACON>2.0.CO;2
- Zhang W X, Zhou T J. 2020. Increasing impacts from extreme precipitation on population over China with global warming [J]. *Science Bulletin*, 65(3):243–252. doi:10.1016/j.scib.2019.12.002