

章翠红,黄小彦,2025. 鄂西地区一次低层锋生背景下的极端强降水 MCS 组织化观测分析[J]. 气象,51(6):686-699. Zhang C H, Huang X Y, 2025. Analysis of the organization of extreme severe rainfall MCS under a low-level frontogenesis background in western Hubei Province[J]. Meteor Mon, 51(6):686-699(in Chinese).

鄂西地区一次低层锋生背景下的极端强降水 MCS 组织化观测分析 *

章翠红 黄小彦

武汉中心气象台, 武汉 430074

提 要: 2018 年 4 月 22 日宜昌出现特大暴雨过程, 高度组织化的强降水中尺度对流系统(MCS)是特大暴雨的直接制造者。利用常规观测资料、地面区域站观测资料, 结合雷达和 ERA5 再分析资料等, 分析了极端强降水 MCS 的组织化特征及其形成机制。结果表明: 此次极端暴雨过程是在高空弱强迫, 低空由弱强迫转为强强迫并伴有强烈锋生的背景下发生的, 高温、高湿、极不稳定的大气环境有利于强降水的发生。低层暖湿偏东气流受宜昌东部“C”字形地形强迫抬升触发宜昌东部山区平原过渡带的强降水回波, 边界层暖倒槽顶部暖湿东南风或偏东风在宜都至公安的平原地区激发出分散性絮状对流。极端强降水 MCS 组织化经历合并阶段和涡旋阶段: 山区平原过渡带的 MCS 受天气系统弱强迫影响, 沿低洼地形向东南方向传播, 与平原地区北上的暖区絮状回波沿三条路径合并; 在中低层偏东急流的引导下, 由低层东西向锋生带和地面辐合线共同组织下形成的东西向 MCS 向西移动, 与山区平原过渡带的南北向 MCS 持续合并, 为最强降水阶段; MCS 冷出流与环境气流组成的近地中层中尺度气旋性环流和强降水潜热对中层大气加热, 有利于涡旋 MCS 的组织发展加强, 低层暖湿偏东急流的水汽能量输送有利于涡旋 MCS 长时间维持。极端强降水主要发生在 MCS 合并阶段和长历时的涡旋阶段, 天气尺度系统强迫、低层强烈锋生、中尺度地形和中尺度天气系统的正反馈作用是此次极端强降水形成的重要成因。

关键词: 极端暴雨, 强降水 MCS, 组织化, 弱强迫, 锋生

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2025. 012301

Analysis of the Organization of Extreme Severe Rainfall MCS Under a Low-Level Frontogenesis Background in Western Hubei Province

ZHANG Cuihong HUANG Xiaoyan

Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

Abstract: An extreme torrential rain event caused by highly organized severe rainfall mesoscale convection system (MCS) occurred in Yichang on 22 April 2018. Based on conventional observation data, observation data from regional automatic weather stations, radar data and ERA5 reanalysis data, we analyze the organizational characteristics and formation mechanism of extreme severe rainfall MCS. The results are as follows. This extreme torrential rain event occurred under the background of weak forcing at high level and weak forcing turning into strong forcing at low level, accompanied by strong frontogenesis. High temperature, high humidity and extremely unstable atmospheric environment were conducive to the occurrence of the extreme severe rainfall. The warm and wet easterly air at low level was forced to lift by the C-pattern

* 湖北省自然科学基金项目(2022CFD121)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2025J028)和湖北省气象局科技发展基金项目(2022Z01)共同资助

2024 年 4 月 19 日收稿; 2025 年 2 月 27 日收修定稿

第一作者: 章翠红, 主要从事强对流天气临近预报预警技术研究. E-mail: 24366587@qq.com

通讯作者: 黄小彦, 主要从事强对流天气预报预警技术研究. E-mail: 623337001@qq.com

terrain in the east of Yichang, triggering the severe rainfall echoes in the transition area from mountain to plain. The warm and wet southeasterly or easterly wind at top of the boundary-layer reverted warm trough caused the dispersed flocculent convection in the plain area from Yidu to Gongan. The organization of extreme severe rainfall MCS experienced merging stage and vortex stage. Under the influence of weak synoptic-scale forcing, MCS in the mountain-to-plain transition area spread to southeast along the low-lying terrain, and merged along three paths with the warm area flocculent echoes from the plain to north. The east-west MCS formed by the low-level east-west frontal zone and the surface convergence line moved toward west under the guidance of the middle and low level easterly jet, and continuously merged with the south-north MCS in the mountain-to-plain transition area persistently, resulting in the heaviest precipitation stage. The mesoscale cyclonic circulation, composed of MCS cold outflow and ambient airflow, and the latent heat of severe rainfall that heated the middle atmosphere favored the organization, development and strengthening of vortex MCS. The water vapor energy transport of the low-level warm and wet easterly jet was beneficial to the long-time maintenance of the vortex MCS. The extreme severe rainfall mainly occurred in the merging stage and the long-time vortex stage of MCS. Synoptic-scale system forcing, low-level strong frontogenesis, mesoscale topography and positive feedback of mesoscale weather system were the important causes of the formation for this extreme severe rainfall.

Key words: extreme torrential rain, severe rainfall MCS, organization, weak forcing, frontogenesis

引 言

近年来,我国极端天气气候事件频发,极端强降水作为主要气象灾害之一,给我国经济社会发展、人民生命财产安全带来了严重威胁。研究表明,极端强降水的产生是多尺度系统相互影响的结果,既受大尺度环流系统配置的影响(梁必骥,1991;Ding and Liu,2001;Chen et al,2005;雷蕾等,2017;齐道日娜等,2023;布和朝鲁等,2022;王东海等,2022),又受中尺度系统热力和动力作用的制约(Zhong et al,2015;章翠红等,2018;韦惠红等,2022;张元春等,2023)。

上述研究中的天气形势均十分有利于强降水的发生,而有些降水过程则发生于弱天气背景下,一般具有明显的局地性(陈双等,2011;杨晓亮等,2022)。徐珺等(2018)和田付友等(2018)分析了广州一次局地极端强降水,发现弱天气尺度强迫下复杂地形和中尺度对流系统(MCS)的缓慢移动是长时间强降水的主要原因。李明娟等(2023)研究了陕西一次被多个模式漏报的突发性大暴雨过程,指出在弱天气系统强迫下,地面弱冷空气和冷出流造成的地面辐合线和地形共同作用触发对流单体,弱引导气流使得 MCS 后向传播,形成列车效应,造成大暴雨天气。低层超低空急流脉动也与弱天气背景下局地暖

区暴雨的形成有密切关系(胡雅君等,2020;张东方等,2023;沈晓玲等,2024)。

锋生与暴雨的关系也密不可分。金小霞等(2023)研究了 2020 年江淮梅雨期典型对流性降水和稳定性降水过程,发现强降水与中低层锋生有很好的对应关系,对流性降水锋生范围偏大、发展层次高、锋生中心偏强,稳定性降水的锋生特征则反之。徐珺等(2023)研究了一次大范围春季暴雨过程,认为暴雨由与锋面有关的 MCS 造成,MCS 的形成和维持发生于后门冷锋附近且伴随锋生过程。郭英莲等(2014)分析 2011 年湖北 3 次暴雨过程指出,中层锋生主要由垂直锋生造成,有利于对流不稳定的发生,低层由水平锋生造成,有利于水汽输送和辐合抬升。

极端强降水的形成都与中小尺度对流系统有关(Wang et al,2014;徐姝等,2019;范元月等,2020;张兰等,2023)。而中小尺度对流系统的演变受天气尺度系统和地面中尺度系统共同影响。李琴和邓承之(2021)指出,重庆一次极端短时强降水过程中,地形导致中尺度对流发生发展,近地面中尺度风场辐合线的组织作用使得 MCS 合并增强,其在地形阻挡和高空弱引导气流作用下长时间维持形成局地极端强降水。稳定维持的地面冷池出流边界与环境风形成地面辐合线,能不断激发新生对流,使对流云团呈准静止,从而产生极端强降水(蒲义良等,2023;杨

晓亮等,2023)。中小尺度对流系统的组织化过程则与地面辐合线、锋面等中尺度扰动等因素相关(万夫敬等,2021),强下沉气流的形成能使中低层风速增加,垂直风切变增强,有利于对流单体组织化发展成线状对流(蔡雪薇等,2018)。

综上所述,弱天气尺度强迫背景下,研究多尺度天气系统是如何影响 MCS 组织化从而造成极端强降水有重要意义。2018 年 4 月 22 日,湖北宜昌东部山区平原过渡带出现了一次特大暴雨过程,宜昌有 6 个站日降雨量排名历史前三位,其中长阳站、宜都站、枝江站、远安站排名历史第一,具有极端性。本文利用常规观测资料及天气雷达产品、地面区域自动站资料和 ERA5 再分析资料等,综合分析此次极端强降水的 MCS 组织化特征及多尺度天气系统对其发生发展的影响,以期揭示多尺度天气系统作用下极端强降水发生的原因,为提升极端强降水预报预警能力提供有益参考。

1 极端强降水特征与强降水 MCS 的组织化特征

1.1 极端强降水实况

2018 年 4 月 22 日,宜昌特大暴雨过程总雨量大、极端性强,24 h 雨量超过 250 mm 的有 7 个地面自动气象观测站(含区域站),主要位于宜都北部和枝江西部,超过 100 mm 的有 64 个站,其中宜都高坝洲站 24 h 累计雨量为最大(342 mm,图 1a),多站突破其有气象记录以来日降雨量极值。降雨强度大,共有 86 个站小时降雨量超过 30 mm,32 个站超过 50 mm,1 个站超过 80 mm。

1.2 极端强降水 MCS 的组织化特征

通常情况下,局地极端强降水是由高度组织化的 MCS 造成的(符娇兰等,2023;王孝慈等,2022)。根据 MCS 的组织化和结构特征,此次强降水 MCS 演变可分为强降水回波触发阶段(10:00—11:30)(北京时,下同)、MCS 发展合并阶段(11:30—15:30)和涡旋 MCS 阶段(15:30—22:30)。

1.2.1 强降水回波的触发

此次极端强降水回波是暖湿偏东风和“C”字形地形共同作用触发的。11:00(图 2a),西南地区暖低压(详见下文 2.1 节)顶部偏东暖湿气流受宜昌“C”

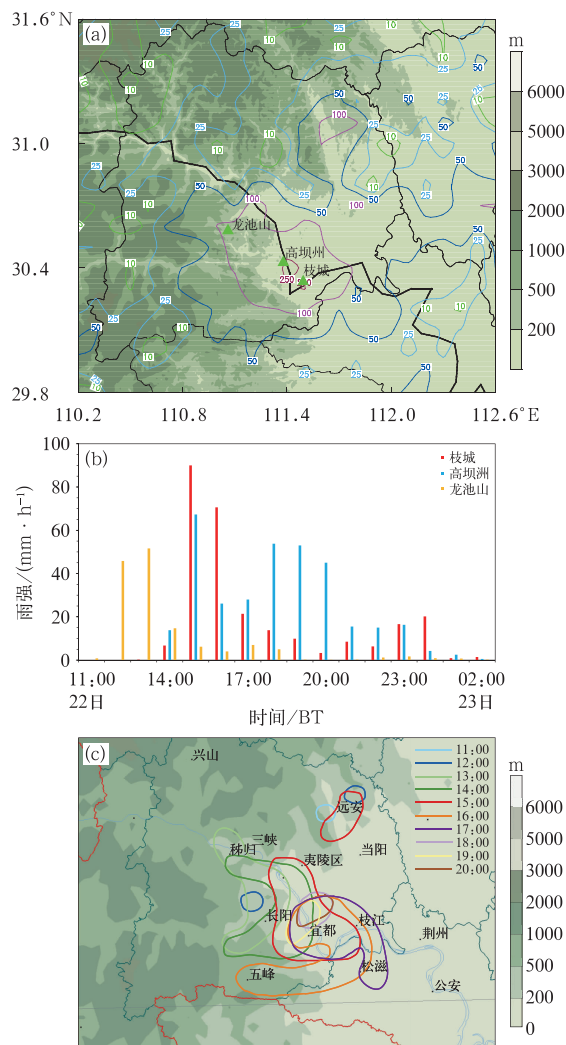
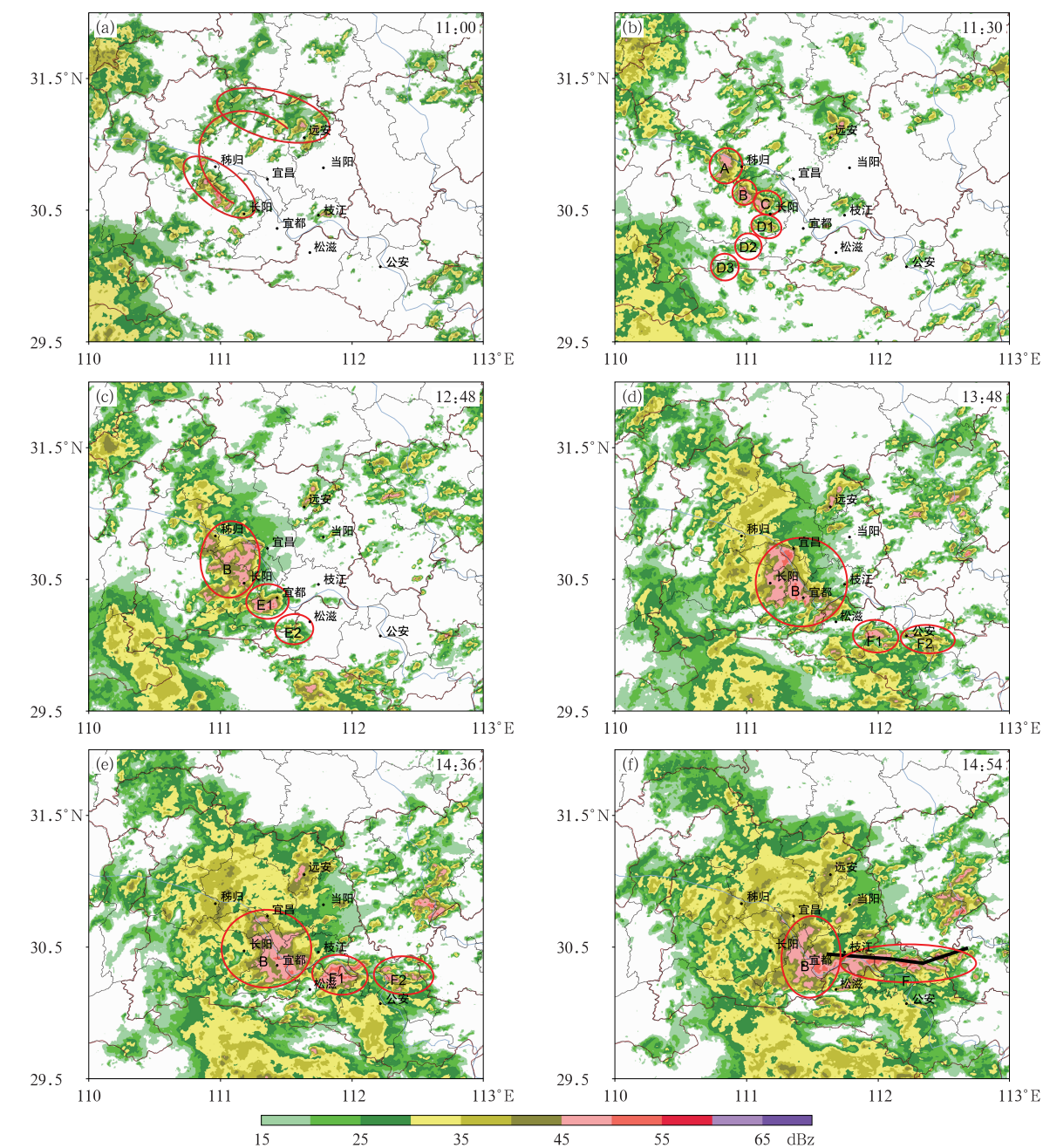


图 1 2018 年 4 月 22 日 08:00 至 23 日 08:00 宜昌地区(a)24 h 累计雨量(等值线,单位:mm)叠加地形(填色),(b)代表站小时雨强,(c)小时雨强超过 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的雨团移动路径叠加地形(填色)

Fig. 1 (a) The 24 h accumulated precipitation (contour, unit: mm) overlaid with terrain (colored), (b) hourly rainfall intensity at the typical stations and (c) the moving path of rain masses with hourly rainfall intensity beyond $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ overlaid with terrain (colored) in Yichang Area from 08:00 BT 22 to 08:00 BT 23 April 2018

字地形(图 1c)强迫抬升,形成“C”字型回波带,其北段位于夷陵、远安山前(图 2a 上部椭圆),局地回波强度达到 45 dBz 以上,远安山谷迎风坡最大小时雨量为 40.1 mm;南段位于长阳东部山区平原过渡带



注:红圈表示各回波和 MCS,字母标记其编号;图 a 中红色弧线示意回波的“C”字型形态;图 f 中黑色折线为图 3 剖面。

图 2 2018 年 4 月 22 日(a)强降水回波触发和(b~f)MCS 发展合并阶段雷达组合反射率因子
Fig. 2 Radar composite reflectivity factor for (a) initiation stage of severe rainfall echo, and (b—f) development and combination stage of severe rainfall MCS on 22 April 2018

处(图 2a 下部椭圆),组织结构松散,最大反射率因子达 55 dBz。至 11:30(图 2b),南段回波带上单体发展增强,形成 3 个紧密团状结构,分别位于秭归东部(回波 A)、长阳东部山区平原过渡带(回波 B、C),回波带上 ≥ 50 dBz 强回波范围增大,小时雨强增至 $50.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

1.2.2 强降水 MCS 的发展合并阶段

由于强降水回波承载层风较小,“C”字型回波南段几乎停滞。受秭归“布袋”地形(图 1c)影响,回波 A 能量释放后减弱;回波 B、C 合并,40 dBz 以上回波范围增大,合并后的强回波 B 沿山谷、长江河谷向东南方向缓慢传播,与多组南方北上回波(D、

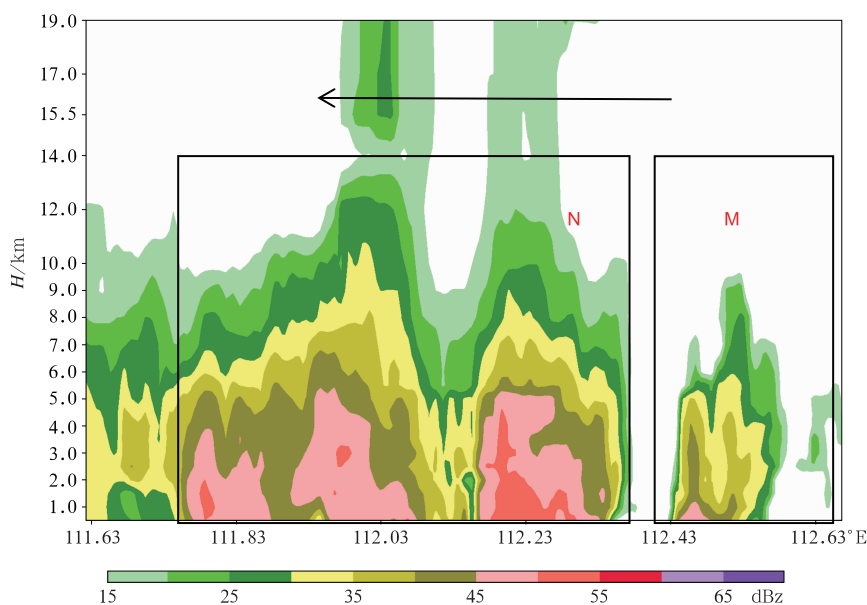
E、F)合并。

强降水 MCS 合并路径有三条。第一条路径位于山区迎风坡:11:30 长阳东部、五峰东部山前偏东、东南风受到地形强迫抬升,触发回波单体 D1、D2、D3(图 2b),在承载层东南风引导下向北移动,强度增强,逐渐并入回波主体 B,出现较大范围小时雨量超过 40 mm 的降水,最大达 66.1 mm,此刻强降水回波水平尺度超过 100 km,形成强降水 MCS;第二条路径位于山区平原过渡带:边界层暖倒槽顶部暖湿东南气流或偏东气流中激发的回波单体 E1、E2(图 2c),在承载层东南风的引导下向西北方向移动,与向东南方向传播的 MCS-B(指由回波 B 发展而来,余同)合并,回波强度达 55 dBz,14:00 小时最大雨量达 70.9 mm;第三条路径位于平原地区西部:新生对流单体 F1、F2(图 2d)位于暖倒槽顶部,受东南风引导向西北方向移动至枝江—荆州一带(图 2e),在锋生组织(详见下文 2.2 节)作用下,形成东西向 MCS-F(图 2f),并在低层加强的偏东气流(图 8e)的引导下向西平移,与南北向 MCS-B 长时间持续合并,回波强度明显增强,降水效率增高,小时雨强达到最大($90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)。

沿准东西向对 MCS-F 做垂直剖面(图 3,沿图 2f 中黑色折线),MCS-F 中不断有单体在东边新生(方框 M)并向西移动发展成熟(方框 N),成熟单体 $\geq 45 \text{ dBz}$,强回波高度在 5 km 以下,以暖云为主,降水效率高。成熟回波单体向西移动与准南北向 MCS-B 持续合并,形成列车效应和合并效应,产生极端强降水。

1.2.3 强降水 MCS 的涡旋阶段

16:00(图 4a),新生对流单体发展增强形成近东西向 MCS-G,与 MCS-B、MCS-F 共同构成逗点状涡带 MCS,旋转特征明显,其降水中心位于头部 MCS-B 处,最大小时雨量达到 70.6 mm。在中尺度冷空气影响下,涡带 MCS 尾部逐渐被切断,至 18:06(图 4b)完全切断后,涡带 MCS 由逗点状转为团状,回波中心强度减弱至 45~50 dBz,但强中心位置稳定维持,过程降雨量最大站点高坝洲 18:00—20:00 累计 3 h 降雨量高达 151.8 mm,最大小时雨强为 $53.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 1b)。20:00 后(图 4c),涡旋 MCS 位置维持不变,但其强度减弱至 45 dBz 以下,小时雨强降到 $20 \sim 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,直至 22:30(图 4d),涡旋中心开始缓慢南压。

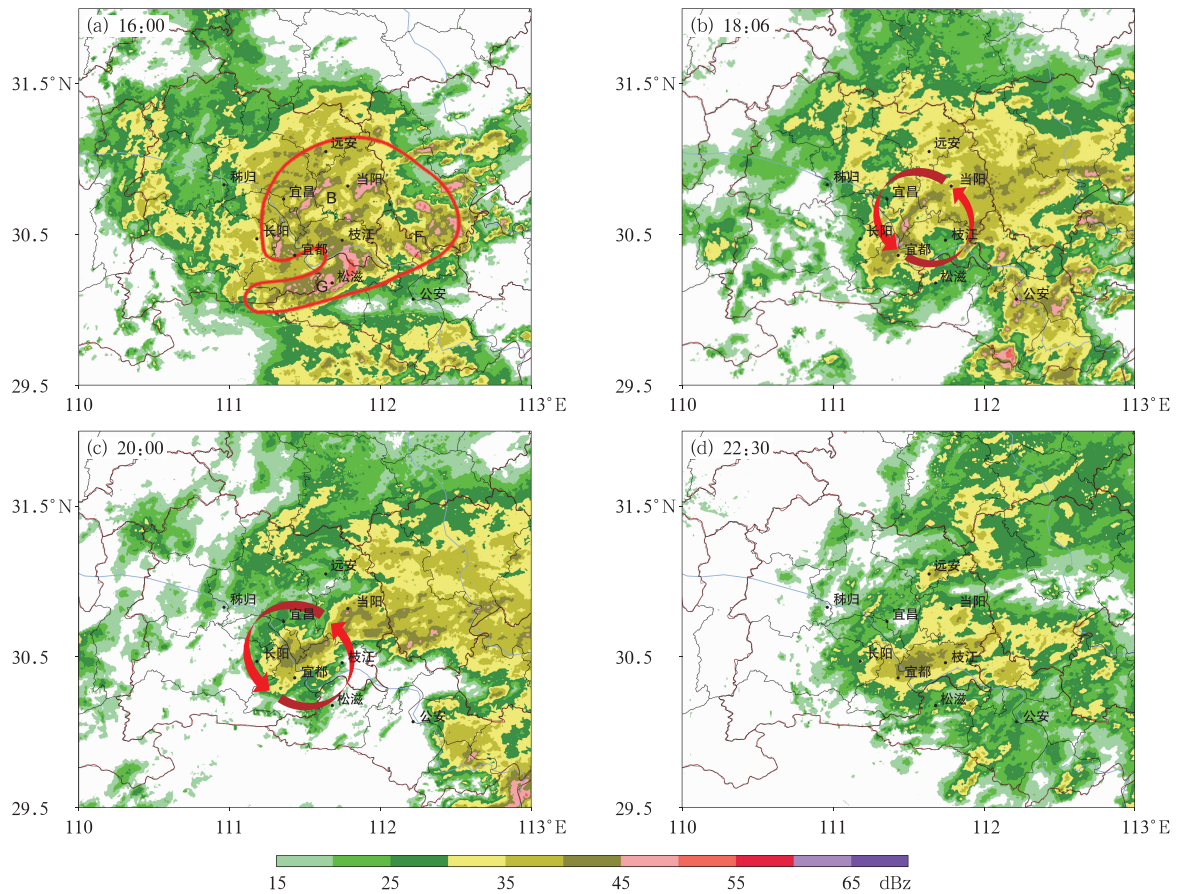


注:方框 M 为新生的 MCS,方框 N 为发展成熟的 MCS,黑色箭头为 MCS 的移动方向。

图 3 2018 年 4 月 22 日 14:54 雷达反射率因子沿

图 2f 中黑色折线的垂直剖面

Fig. 3 Cross-section of radar reflectivity factor along the black broken line in Fig. 2f at 14:54 BT 22 April 2018



注:红圈表示逗点状涡带 MCS,字母表示 MCS 标记编号,箭头表示涡旋回波。

图4 2018年4月22日强降水 MCS 涡旋阶段雷达组合反射率因子

Fig. 4 Radar composite reflectivity factor for the vortex stage of severe rainfall MCS on 22 April 2018

1.3 极端强降水特征与 MCS 演变的对应关系

极端强降水是强降水 MCS 演变的结果(张文龙等,2019;曹艳察等,2020),此次极端强降水中尺度特征反映了强降水 MCS 演变特征。

从代表站的小时雨强分布来看(图 1b),位于强降水中心的高坝洲和枝城站降水呈双峰型分布。第一峰为 15:00—16:00,此时小时雨强最大($90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$),是由南北向 MCS-B 与东西向 MCS-F 持续合并造成的;第二峰为 18:00—22:00,最大小时雨强为 $53.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,维持时间长达 6 h,是强降水涡旋 MCS 长时间维持造成。而位于长阳半山腰的龙池山站呈单峰型,最大小时雨强为 $51.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,是 MCS-B 多次合并造成的。

在宜昌特殊中尺度地形背景下,降水强度超过 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的雨团演变(图 1c)与强降水 MCS 演

变及形态密切相关。宜昌位于鄂西山区与江汉平原的过渡带地区,主要由山区、丘陵和平原三个部分组成,西高东低,海拔相差悬殊,西部山区为半包围式,呈“C”字型分布,海拔高度大多在 1000 m 左右,部分超过 2000 m(图 1a)。11:00—12:00,在宜昌“C”字地形迎风坡触发分散性回波,雨团分布较分散;13:00—14:00,MCS-B 与南来回波形成第一、二条路径合并,强降雨团沿地形扩大,强度增强,合并路径形态致使雨团呈弓状;15:00,南北向 MCS-B 与东西向 MCS-F 持续合并,强回波形态呈“L”状,强降雨团面积继续扩展至最大,合并造成此时雨强达最大,雨团呈“L”状分布;16:00—17:00,强降水 MCS 演变成涡旋状,呈逗点状,雨团也由“L”状转为逗点状,最强降水位于逗点头部;18:00—20:00,涡旋 MCS 缓慢减弱呈团状,雨团分布变为团状,面积逐渐缩小,但其位置基本保持不动,高坝洲位于团状雨

团中心;21:00 之后,随着团状 MCS 减弱,中心降水区强度降到 $20 \sim 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,位置仍少动。

2 天气尺度系统与强降水 MCS 的组织化

2.1 天气尺度系统特征

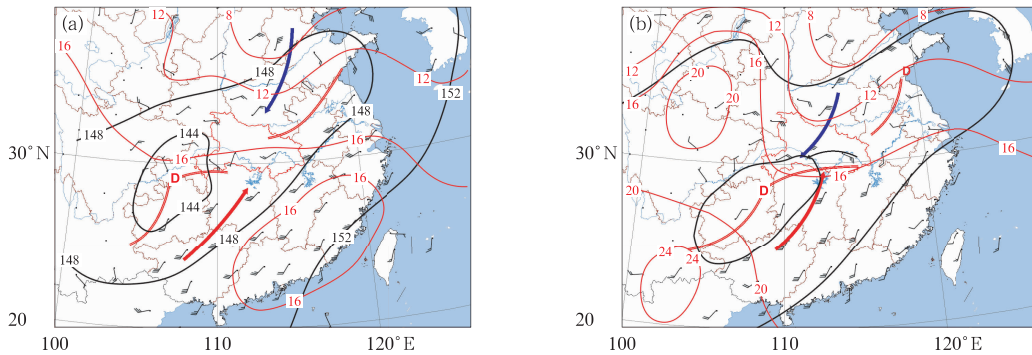
本次极端强降水过程是在高空弱强迫、低层弱强迫转为强强迫并伴有强烈锋生的背景下发生的。

2018 年 4 月 22 日 08:00—20:00,500 hPa 中纬度地区多浅槽弱脊活动,宜昌—武汉一线风速始终维持在 $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略),天气尺度系统强迫较弱。低层(图 5a)北方气旋东移发展,带动低层干冷东北风南压至宜昌地区;西南涡发展东移,涡前暖湿西南急流或东南风增强北抬至宜昌地区。700 hPa 至地面均为风速小于 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏东气流(图 6),

低层为弱强迫;至 20:00(图 5b),850 hPa 湖南中北部西南急流北抬增强,急流轴上风速为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,宜昌站东北风达 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,转为强强迫。

08:00,地面(图 7a)西南暖低压倒槽伸至鄂西南,华北气旋冷锋抵鄂豫交界处。受低层华北低涡东移发展影响,天气尺度冷空气南下,地面冷锋沿江汉平原缓慢南下,17:00 到达此次降水中心附近区域,随后北方冷空气继续南压,至 20:00(图 7b),地面冷锋南压至洞庭湖区域。

由 08:00 宜昌探空站观测资料(图 6)可知,650 hPa 以下为湿层,近乎饱和,850 hPa 露点温度为 16°C ,有利于强降水的形成。对流有效位能(CAPE)为 $1800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,对流抑制能量(CIN)接近 $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,抬升凝结高度和自由对流高度极低,接近地面,大气环境层结状态极不稳定,对流极易被触发且强烈发展。暖云厚度达到 4.3 km , 0°C 层以下 CAPE 占比较高,有利于暖云内形成强上升运动,提



注:黑色等值线为位势高度(单位:dagpm),红色等值线为等温线(单位: $^\circ\text{C}$),红色双实线为切变线,红色箭头为暖湿气流,蓝色箭头为干冷气流,黑色箭头为暖干气流,D为低值中心。

图 5 2018 年 4 月 22 日(a)08:00,(b)20:00 的 850 hPa 环流形势

Fig. 5 Distribution of circulation field at 850 hPa at (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT 22 April 2018

高降水效率(俞小鼎,2013;黄小彦等,2020)。中层干空气的卷入,有利于形成较强冷池(高彦青,2020),有利于 MCS 传播。 $0 \sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,有利于 MCS 维持,而 MCS 承载层平均风近乎为 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,使得 MCS 平移速度缓慢,其移动主要取决于传播。

由 850 hPa 锋生函数(图 8a, 8c, 8e)可知,12:00—13:00,暖湿偏东气流使宜昌“C”字形地形附近锋生函数值明显增大形成高值区,呈近南北向,最大达 $7.96 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;14:00—16:00,南方暖湿偏东气流发展北抬,锋生带向东扩展,由南北

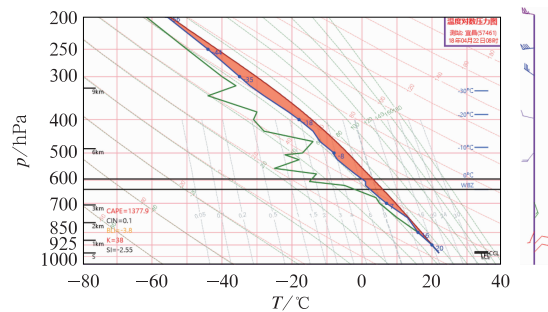


图 6 2018 年 4 月 22 日 08:00 宜昌探空图

Fig. 6 $T\text{-}\ln p$ chart at Yichang Sounding Station at 08:00 BT 22 April 2018

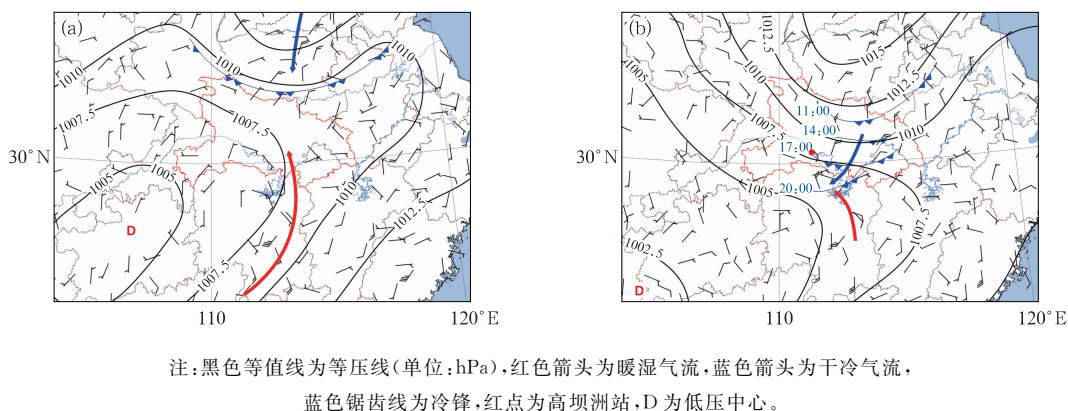


图 7 2018 年 4 月 22 日(a)08:00,(b)20:00 地面环流形势

Fig. 7 Distribution of surface circulation field at (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT 22 April 2018

向转为近东西向,位于宜昌东部与荆州北部一线,偏东气流明显增强,最大锋生函数值达 $6.49 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

分析锋生函数的剖面(图 8b,8d,8f)可知,宜昌“C”字形地形附近有三处锋生。锋生一位于 $110.50^\circ \sim 110.75^\circ \text{E}$,与此次降水关联不大。锋生二约位于 $111.25^\circ \sim 111.75^\circ \text{E}$,高度在 $850 \sim 700 \text{ hPa}$,呈准水平分布,11:00 此锋生开始发展,强度为 $2.95 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略),至 16:00 发展最强,达 $15.77 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,随后开始减弱,至 22:00 为 $4.85 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,此锋生主要由暖湿偏东风在天气尺度抬升作用下造成。锋生三的经度与锋生二基本一致,但高度位于 $900 \sim 850 \text{ hPa}$,呈准水平分布,此锋生始于 16:00,强度约 $8.92 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,22:00 发展最强,达 $20.13 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,随后开始减弱,此锋生是由于低层干冷空气南侵增厚,强迫抬升暖湿偏东风造成的。

2.2 天气尺度系统在极端强降水 MCS 组织化中的作用

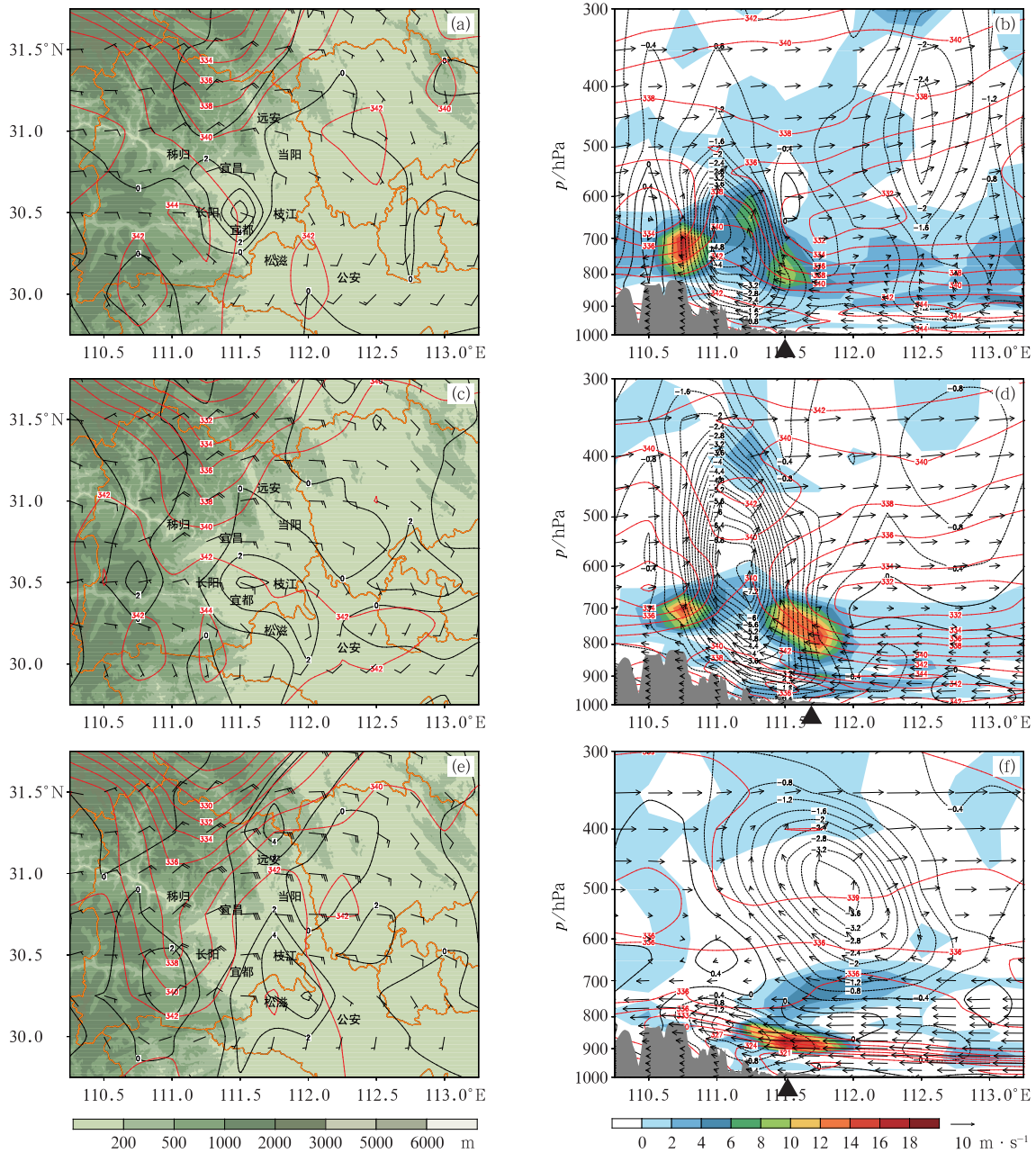
11:00—13:00,在天气尺度系统的弱强迫作用下,宜昌地区低层盛行偏东气流和东南气流,环境温度和湿度条件较好,大气不稳定性较强。抬升凝结高度和自由对流高度极低,CAPE 值高,十分有利于对流触发。偏东、东南暖湿气流在宜昌山前强迫抬升,触发与地形相契合的“C”字型强降水回波。0~6 km 垂直风切变达中等强度,有利于“C”字形地形附近强降水回波维持和发展;回波主体位于 500 hPa 以下(图略),承载层平均风速较小,使其平移速度小。中层干层促使冷出流产生,有利于强降水回波

传播。因此,在“C”字形地形背景下,特殊的弱天气尺度系统不仅提供了强降水回波触发和维持机制,且致使其移动以传播为主,平移不明显。

11:00—13:00,湖南中北部低层受较强西南气流影响(图 8a),850 hPa 风速达 $8 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,为中等强度强迫,500 hPa 为弱强迫,使 MCS 承载层平均风为较小的西南风,而在宜昌南部偏东分量加大,风向转为东南风或偏东风,风速进一步减小;中高层高能高湿,湿层厚(芷江 08:00 探空湿层高度超过 400 hPa,图略),冷出流较弱,MCS 传播较弱,以平移为主。因此,在高能高湿的大气和复杂山区地形共同作用下,湖南北部激发的絮状 MCS 以平移为主,传播速度较小,在承载层平均风的引导下,缓慢向宜昌南部移动,进入宜昌后,受东南气流引导而转向西北方向移动发展,与向南传播的 MCS-B 合并。

14:00 后,高空强迫弱,但低层强迫逐渐加强(图 8c,8e)。MCS 承载层的平均风转为偏东风,引导 MCS-F 向西移动与 MCS-B 形成持续合并。低层偏东急流与南方东南气流共同组成的气旋式辐合场(图 8e),以及地面天气尺度冷空气对该辐合场的强迫抬升(图 7b),为涡旋 MCS 发展维持提供了有利的天气尺度环流背景场。

此次极端降水过程始终伴随着中低层强烈锋生。“C”字型强降水回波触发阶段,锋生函数值较弱,近南北向的锋生区位于“C”字形地形附近(图略);MCS 合并阶段,锋生区由南向北转为近东西向(图 8a,8c),与之对应的东西向 MCS-F 发展增强;锋生三的发展加强与涡旋 MCS 的生成、发展、维持相对应。后两个阶段的最大小时雨强与锋生函数的最大值位置有较好的对应关系(图 8b,8d,8f)。



注:▲为未来 1 h 最大雨强发生的经度。

图 8 2018 年 4 月 22 日(a,c,e)850 hPa 锋生函数(黑色等值线,单位: $10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、假相当位温(红色等值线,单位:K)、水平风场(风羽)及地形(填色),(b,d,f)锋生函数(填色,单位: $10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、假相当位温(红色等值线,单位:K)、垂直速度(黑色等值线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)、纬向-垂直速度风矢量(箭头)及地形(灰色阴影)沿 30.5°N 的垂直剖面
(a)13:00,(b,c)14:00,(d,e)16:00,(f)22:00

Fig. 8 (a, c, e) The 850 hPa frontogenesis function (black contour, unit: $10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), θ_{se} (red contour, unit: K), horizontal wind (barb) overlaid with terrain (colored) and (b, d, f) cross-section of frontogenesis function (colored, unit: $10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), θ_{se} (red contour, unit: K), vertical velocity (black contour, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), zonal-vertical wind (arrow) overlaid with terrain (gray shaded) along 30.5°N at (a) 13:00 BT, (b, c) 14:00 BT, (d, e) 16:00 BT and (f) 22:00 BT 22 April 2018

整个锋生过程尺度小($\leq 100 \text{ km}$),强度强(最强达 $20.13 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),较天气尺度锋生

值大近十倍。中低层强烈锋生对 MCS 的组织化起到重要作用:低层锋生使得斜压性增强,锋面暖区一

侧温湿增大,热力不稳定增强,有利于 MCS 发展增强(贺哲等,2022);准东西向锋生区产生东西向锋区,有利于 MCS 沿东西向组织化,形成东西向 MCS-F,在承载层偏东风的配合下,MCS 的列车效应明显。锋生二导致水平位温梯度增大,热成风平衡破坏,进而垂直风切增大(朱乾根等,2007),即低层偏东气流增强,高层西风增强,有利于强 MCS 的长时间维持和较小的平移速度,从而使降水增强;由地面冷空气强迫抬升暖湿偏东急流形成的锋生三为涡旋 MCS 持续(长达 7 h)提供充沛的能量与水汽,是其 MCS 长时间维持的重要原因。

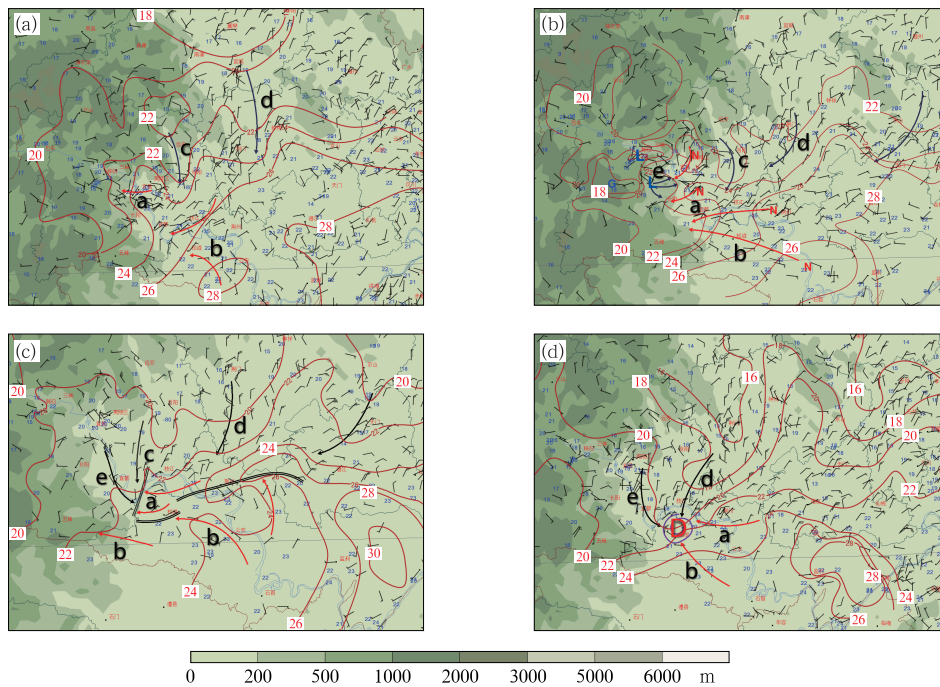
3 地面中尺度天气系统演变与强降水 MCS 的组织化

地面中尺度系统是 MCS 组织化的重要影响因素(廖移山等,2010;杨晓亮等,2021),是 MCS 的触发与传播的重要参与者。宜昌特殊的地形也是此次

极端强降水形成的重要因素。

3.1 强降水回波触发阶段

在强降水回波触发阶段,地面存在两支暖湿中尺度气流、两支干冷中尺度气流和一个中尺度锋面。11:00,地面暖低压中心位于重庆至贵州一带,暖低压向北强烈发展,地面能量聚集,低压环流增强,风速增大,宜昌山区平原过渡带位于暖低压顶部暖湿的偏东(气流 a)和东南(气流 b)气流中(图 9a)。鄂北东西向 MCS(图略)产生的冷出流沿江汉河谷南下,形成干冷的东北风(气流 d)。“C”字型回波带北段减弱(图 2a),形成地面冷池,中心温度降至 18℃,冷出流沿山谷南下形成气流 c。地面荆门—孝感一带存在一条明显的东西向中尺度锋面,其西段是由冷气流 d 与暖低压外围的暖湿东南气流 b 辐合形成,南北温差超 6℃。由于“C”字地形内环境抬升凝结高度和自由对流高度很低(图 6),大气极不稳定,暖湿气流 a 在长阳、秭归迎风坡上,受到地形强迫抬



注:黑色箭头为冷出流或冷空气;红色箭头为暖湿气流;字母 a~e 为气流编号;G 为高压中心, D 为低压中心;N 为暖中心,L 为冷中心;黑色双实线为地面辐合线;紫色等值线为气旋式辐合区。

图 9 2018 年 4 月 22 日(a)11:00,(b)13:00,(c)15:00,(d)16:00 宜昌地区地面 2 min 平均风场(风羽)、温度场(红色等值线,单位:℃)、露点温度(蓝色数值,单位:℃)叠加地形(填色)

Fig. 9 Surface average wind at 2 min (barb), temperature (red contour, unit: °C) and dew point temperature (blue values, unit: °C) overlaid with terrain (colored) in Yichang Area at

(a) 11:00 BT, (b) 13:00 BT, (c) 15:00 BT and (d) 16:00 BT 22 April 2018

升,触发对流新生,形成对流单体(图 2b 中的回波 A、B、C)。因此,强降水回波触发是暖湿偏东风和地形共同作用的结果。

3.2 强降水 MCS 合并阶段

13:00,暖低压顶部东南气流 b 中温度进一步升高,蕴含充足能量的暖湿气流在山前受地形抬升,触发回波单体 D1、D2、D3 新生(图 2b)并向西北移动,与 MCS-B 合并。合并后 MCS-B 在长阳东部形成强降雨,并形成明显冷中心(图 9b),地面温度降至 19℃ 以下,其冷出流 e 沿山谷、河谷等低洼处向东、东南方向流动,与暖湿东风 a 相遇形成辐合线,辐合线向山前低洼处缓慢移动,致使 MCS 向东南发展传播。

13:00—15:00,经两次合并的 MCS-B(图 2c)在山前及沿江一带产生强降水,其对应的冷池范围增大,冷出流 e(图 9c)沿长江河谷南下,同时远安雷暴冷出流 c 南下,两支冷出流与环境偏东暖湿气流 a 形成南北向辐合带,在南北向辐合线的组织和 MCS 合并的共同影响下,宜都 MCS 逐渐转为南北向并维持于宜都河谷地区(图 2e)。

15:00,冷气流 d 前锋已抵达荆门南部,与暖湿的偏东气流 a、b 在枝江—荆州北部一带相遇,形成移动缓慢的地面中尺度锋面(辐合线)(图 9c)。在东西向的中尺度锋面的组织作用下,对流单体 F1、F2(图 2e)向西北方向移动,在中尺度锋面南侧“停滞”,形成准静止的东西向 MCS-F。MCS-F 与南北向 MCS-B 持续合并,形成最强降水阶段,MCS 演变成“L”状。

3.3 涡旋 MCS 阶段

持续降水致使宜都北部附近温度进一步降低,20℃ 低温区范围增大,冷池堆积增强,冷出流 e 持续沿长江河谷流向下游地区;北边弱冷空气(气流 d)前锋继续南下,抵达枝江南部。两支冷气流与偏东暖湿气流 a、东南暖湿气流 b,共同交汇于枝江南部(图 9d),形成地面中尺度涡旋,降水回波也逐渐发展为涡旋 MCS(图 4a)。同时,涡旋 MCS 南侧地面温度仍超过 24℃,近地层东南气流 b(图 9c)在五峰东部、宜都南部山前沿地形抬升触发对流 G(图 4a),与涡旋 MCS 共同构成逗点状涡带 MCS。山前雷暴冷出流 e 从中尺度涡旋后部楔入,造成涡带回波逗点尾部切断,使回波发展为涡旋状。涡旋

MCS 在低层锋生(图 8d、8e)、低层暖湿偏东气流和降水潜热释放(参见第 4 节)共同作用下,稳定维持在宜都北部。

综上所述,在特殊的“C”字形地形背景下,地面暖湿气流触发“C”字型回波,地面冷出流引导 MCS 向南传播形成多次持续性合并;地面移动缓慢的中尺度锋面与边界层锋生共同作用,强迫形成东西向 MCS-F,为与南北向 MCS-B 的持续合并形成最强降水阶段提供必要条件;地面中尺度涡旋的形成也是涡旋 MCS 组织化的重要影响因素。

4 中尺度系统正反馈作用

极端强降水产生了强烈的潜热释放,凝结潜热的释放对中尺度气旋性涡旋的生成与维持起到重要作用(雷蕾等,2017;齐道日娜等,2023;孔期等,2022)。采用孔期等(2022)的方法计算凝结潜热加热 Q :

$$Q = -L \left(\frac{\partial q}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla q + \omega \frac{\partial q}{\partial p} \right)$$

式中: L 为凝结潜热,值为 $2.5 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, q 为比湿, $\mathbf{V}$ 为水平风矢量, ω 为垂直速度。

从 16:00 凝结潜热加热分布来看,800 hPa 凝结潜热加热(图 10a)的增强与地面降水分布几乎完全一致,随着降水增强凝结潜热增强,中心最高达 $4854.2 \times 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,中心值区域与涡旋 MCS 的中心重合;从垂直分布可知,凝结潜热垂直分布基本上为“V”型,从大气低层向上,凝结潜热加热增大,至 800 hPa 附近达最大($1311.9 \times 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),再向上迅速减小,最大加热层在 800 hPa 附近(图 10b)。中低层凝结潜热释放随高度递增时,有正的位涡异常产生,最大加热层之下会产生正的位涡倾向,有利于对流层中下层气旋性环流的发展增强(孔期等,2022)。因此宜昌附近强降水产生的凝结潜热释放有利于中尺度低涡发展加强,低涡的增强又进一步促进降水的显著增强,造成了宜昌极端强降水。

此次极端暴雨过程中强烈的潜热释放对大气的正反馈作用为 MCS 的组织化起到重要作用:大量凝结潜热释放加热中低层大气,温度升高,不稳定性增强,上升运动维持发展,有利于 MCS 的维持和发展;潜热释放增强了对流层中低层气旋性环流发展加强,在近地层气旋性环流共同作用下,有利于涡旋

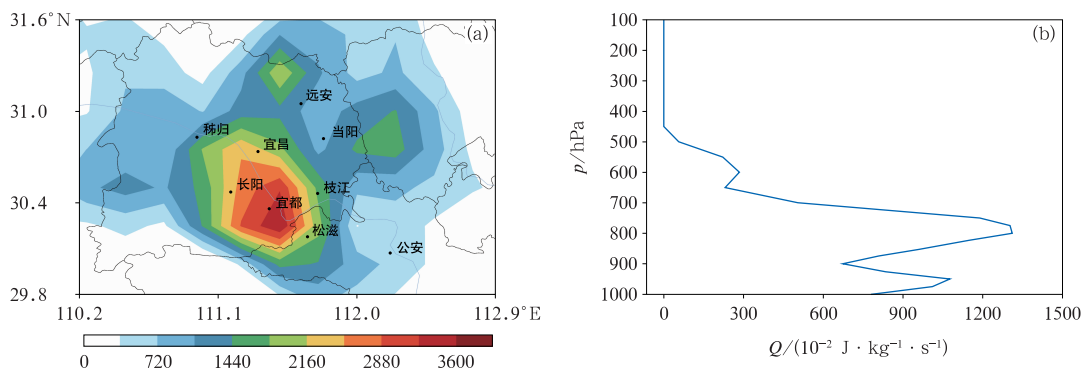


图 10 2018 年 4 月 22 日 16:00(a)800 hPa 凝结潜热加热(单位: $10^{-2} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), (b)强降水区域 ($30^{\circ} \sim 31^{\circ} \text{N}$, $110.75^{\circ} \sim 112.25^{\circ} \text{E}$) 平均凝结潜热加热垂直分布

Fig. 10 (a) The 800 hPa latent heating (unit: $10^{-2} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and (b) vertical profile of mean latent heating in severe rainfall area ($30^{\circ} \sim 31^{\circ} \text{N}$, $110.75^{\circ} \sim 112.25^{\circ} \text{E}$) at 16:00 BT 22 April 2018

MCS 的发展、加强和维持。

5 结论与讨论

本文利用常规观测资料和 ERA5 再分析资料,对 2018 年 4 月 22 日宜昌东部极端强降水过程强降水 MCS 的中尺度特征及其组织化成因进行分析,发现极端强降水 MCS 组织化是在特殊的中尺度地形背景下多尺度天气系统共同作用的结果。主要结论如下:

(1)此次极端暴雨过程是在高层弱强迫,低层强烈锋生的背景下发生的,高温、高湿、极不稳定的大气环境有利于强降水的发生。

(2)强降水回波是边界层暖湿偏东气流在“C”字地形下强迫抬升触发,受天气系统弱强迫影响,沿低洼地形向东南方向传播,与北上的暖区 MCS 沿三条路径合并,形成强降水,其中第三条合并路径产生的降水强度最大。

(3)暖倒槽顶部暖湿气流在宜都—公安平原地区触发的絮状回波在天气尺度系统中强度强迫下向北偏西方向平移;在中低层(800~700 hPa)东西向锋生带和地面东西向辐合线的共同作用下发展加强同时被组织成东西向回波带,MCS 东端新生单体,新单体向西移动发展加强。在中低层偏东急流的引导下,东西向的 MCS 向西移动与宜昌东部山区平原过渡带的准南北向 MCS 形成持续合并,形成最强降水阶段。

(4)宜昌东部山区平原过渡带 MCS 的冷出流与环境中的尺度气流共同组成近地层中尺度气旋性环

流,MCS 的正反馈作用(强降水的潜热释放)加热中低层空气,有利于涡旋 MCS 的组织发展加强;边界层冷空气抬升暖湿偏东急流产生的强烈东西向锋生(900~800 hPa)和暖湿偏东急流的水汽能量输送,有利于涡旋 MCS 长时间维持。

在特殊地形背景下,从多尺度天气系统相互作用角度探讨了极端强降水 MCS 的组织化机制,对极端强降水的预报预警有一定的启发作用。但利用观测分析方法对 MCS 的组织化的定性分析存在一定的缺陷,需要使用更高分辨率的观测资料和中尺度数值模式模拟等方式进行深入解析,以期对极端强降水 MCS 的演变及其机理有更加深入的认知。

参考文献

- 布和朝鲁, 诸葛安然, 谢作威, 等, 2022. 2021 年“7·20”河南暴雨水汽输送特征及其关键天气尺度系统[J]. 大气科学, 46(3): 725-744. Cholaw, Zhuge A R, Xie Z W, et al, 2022. Water vapor transportation features and key synoptic-scale systems of the “7·20” rainstorm in Henan Province in 2021[J]. Chin J Atmos Sci, 46(3): 725-744 (in Chinese).
- 蔡雪薇, 湛芸, 沈新勇, 等, 2018. 冷涡对两类对流系统结构演变作用的个例模拟对比分析[J]. 气象, 44(6): 790-801. Cai X W, Chen Y, Shen X Y, et al, 2018. Comparative simulation analysis of the effect of cold vortex on structural evolution of two types of mesoscale convective systems[J]. Meteor Mon, 44(6): 790-801 (in Chinese).
- 曹艳察, 郑永光, 盛杰, 等, 2020. 2018 年 7 月 15—17 日北京极端强降水过程三类对流风暴及其强降水特征分析[J]. 气象, 46(7): 885-897. Cao Y C, Zheng Y G, Sheng J, et al, 2020. Characteristics of three types of convective storms during the Beijing extreme precipitation event in 15—17 July 2018[J]. Meteor Mon, 46(7): 885-897 (in Chinese).
- 陈双, 王迎春, 张文龙, 等, 2011. 复杂地形下雷暴增强过程的个例研

- 究[J]. 气象, 37(7): 802-813. Chen S, Wang Y C, Zhang W L, et al, 2011. Intensifying mechanism of the convective storm moving from the mountain to the plain over Beijing Area[J]. Meteor Mon, 37(7): 802-813(in Chinese).
- 范元月, 罗剑琴, 张家国, 等, 2020. 宜昌极端短时强降水中尺度对流系统特征分析[J]. 气象, 46(6): 776-791. Fan Y Y, Luo J Q, Zhang J G, et al, 2020. Characteristics analysis of mesoscale convective system causing the extreme flash rain in Yichang[J]. Meteor Mon, 46(6): 776-791(in Chinese).
- 符娇兰, 权婉晴, 麦子, 等, 2023. “23·7”华北特大暴雨过程雨强精细化特征及动力和热力条件初探[J]. 气象, 49(12): 1435-1450. Fu J L, Quan W Q, Mai Z, et al, 2023. Preliminary study on the refined characteristics of rainfall intensity and dynamic and thermodynamic conditions in the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. Meteor Mon, 49(12): 1435-1450(in Chinese).
- 高彦青, 2020. 飑线系统对初始环境场的响应及其发生发展特征的数值研究[D]. 南京: 南京信息工程大学: 21-31. Gao Y Q, 2020. Numerical study on the response of squall lines to initial environmental fields and its formation and development characteristics[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology: 21-31(in Chinese).
- 郭英莲, 王继竹, 李才媛, 等, 2014. 锋生作用对 2011 年梅汛期湖北暴雨的影响[J]. 气象, 40(1): 86-93. Guo Y L, Wang J Z, Li C Y, et al, 2014. Effect of frontogenesis on rainstorm in Hubei during Meiyu period 2011[J]. Meteor Mon, 40(1): 86-93(in Chinese).
- 贺哲, 竹磊磊, 张霞, 等, 2022. 河南省秋季连续两个暴雨日的锋生和 不稳定诊断分析[J]. 气象, 48(9): 1101-1115. He Z, Zhu L L, Zhang X, et al, 2022. Diagnosis of the frontogenesis and instabilities in two continuous autumn torrential rain days in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(9): 1101-1115(in Chinese).
- 胡雅君, 张伟, 赵玉春, 等, 2020. “5·7”闽南沿海暖区特大暴雨中尺度特征分析[J]. 气象, 46(5): 629-642. Hu Y J, Zhang W, Zhao Y C, et al, 2020. Mesoscale feature analysis on a warm-sector torrential rain event in southeastern coast of Fujian on 7 May 2018[J]. Meteor Mon, 46(5): 629-642(in Chinese).
- 黄小彦, 孙继松, 刘文婷, 2020. 地形作用下低空急流的演变与强降水对 流风暴系统的相互作用[J]. 气象学报, 78(4): 551-567. Huang X Y, Sun J S, Liu W T, 2020. The interaction between low-level jet evolution and severe convective rainstorms under topographic effect[J]. Acta Meteor Sin, 78(4): 551-567(in Chinese).
- 金小霞, 刘梅, 李杨, 等, 2023. 江淮梅雨期不同类型暴雨过程锋生特征分析[J]. 大气科学学报, 46(4): 600-614. Jin X X, Liu M, Li Y, et al, 2023. Analysis of the frontogenesis characteristics of different types of rainstorms in the Jianghuai Meiyu period[J]. Trans Atmos Sci, 46(4): 600-614(in Chinese).
- 孔期, 符娇兰, 湛芸, 等, 2022. 河南“21·7”特大暴雨过程中尺度低空急流和低涡的演变特征及成因分析[J]. 气象, 48(12): 1512-1524. Kong Q, Fu J L, Chen Y, et al, 2022. Evolution characteristics and formation analysis of mesoscale low-level jet and vortex in Henan Province during the July 2021 severe torrential rain[J]. Meteor Mon, 48(12): 1512-1524(in Chinese).
- 雷蕾, 孙继松, 何娜, 等, 2017. “7·20”华北特大暴雨过程中低涡发展演变机制研究[J]. 气象学报, 75(5): 685-699. Lei L, Sun J S, He N, et al, 2017. A study on the mechanism for the vortex system evolution and development during the torrential rain event in North China on 20 July 2016[J]. Acta Meteor Sin, 75(5): 685-699(in Chinese).
- 李明娟, 郭大梅, 冯典, 等, 2023. 弱天气系统强迫下一次突发性大暴雨成因分析[J]. 高原气象, 42(4): 934-948. Li M J, Guo D M, Feng D, et al, 2023. Mechanism analysis of an abrupt torrential rain event under weak synoptic forcing[J]. Plateau Meteor, 42(4): 934-948(in Chinese).
- 李琴, 邓承之, 2021. 重庆一次弱天气系统强迫下的极端短时强降水事件分析[J]. 气象, 47(9): 1073-1085. Li Q, Deng C Z, 2021. Analysis of a short-time extreme precipitation event in Chongqing under weak synoptic forcing[J]. Meteor Mon, 47(9): 1073-1085(in Chinese).
- 梁必骐, 1991. 南海热带大气环流系统[M]. 北京: 气象出版社: 1-244. Liang B Q, 1991. Tropical Atmospheric Circulation System in the South China Sea [M]. Beijing: China Meteorological Press: 1-244(in Chinese).
- 廖移山, 李俊, 王晓芳, 等, 2010. 2007 年 7 月 18 日济南大暴雨的 β 中尺度分析[J]. 气象学报, 68(6): 944-956. Liao Y S, Li J, Wang X F, et al, 2010. A meso- β scale analysis of the torrential rain event in Jinan on 18 July 2007[J]. Acta Meteor Sin, 68(6): 944-956(in Chinese).
- 蒲义良, 卢翔诗, 胡胜, 等, 2023. 华南沿海一次暖区特大暴雨的对流特征和发展机制分析[J]. 气象, 49(2): 201-212. Pu Y L, Lu X S, Hu S, et al, 2023. Convective characteristics and development mechanisms of an extreme warm-sector rainfall in the coastal area of South China[J]. Meteor Mon, 49(2): 201-212(in Chinese).
- 齐道日娜, 王秀明, 俞小鼎, 等, 2023. 河南“21·7”极端暴雨过程天气尺度系统发展维持机制分析[J]. 气象学报, 81(1): 1-18. Chyi D, Wang X M, Yu X D, et al, 2023. Analysis of the mechanisms for development and maintenance of synoptic-scale weather systems during the 19—21 July extreme heavy rainfall in Henan, China[J]. Acta Meteor Sin, 81(1): 1-18(in Chinese).
- 沈晓玲, 冯博, 李锋, 等, 2024. 一次弱天气背景下浙江局地暖区暴雨成因分析[J]. 气象, 50(2): 170-180. Shen X L, Feng B, Li F, et al, 2024. Cause analysis of rainstorm in local warm sector under a weak weather background in Zhejiang Province[J]. Meteor Mon, 50(2): 170-180(in Chinese).
- 田付友, 郑永光, 张小玲, 等, 2018. 2017 年 5 月 7 日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J]. 气象, 44(4): 469-484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 469-484(in Chinese).
- 万夫敬, 孙继松, 孙敏, 等, 2021. 山东半岛海风锋在一次飑线系统演变过程中的作用[J]. 气象学报, 79(5): 717-731. Wan F J, Sun J S, Sun M, et al, 2021. Impacts of sea breeze front over Shandong Peninsula on the evolution of a squall line[J]. Acta Meteor Sin, 79(5): 717-731(in Chinese).
- 王东海, 曾智琳, 张春燕, 等, 2022. 南海暖季天气系统与中尺度对流过程研究进展[J]. 大气科学, 46(2): 419-439. Wang D H, Zeng

- Z L, Zhang C Y, et al, 2022. Advances in synoptic systems and mesoscale convective processes during the warm season over the South China Sea[J]. *Chin J Atmos Sci*, 46(2): 419-439 (in Chinese).
- 王孝慈, 李双君, 孟英杰, 2022. 武汉地区4次低质心类短时强降水对流风暴特征分析[J]. *气象*, 48(5): 633-646. Wang X C, Li S J, Meng Y J, 2022. Characteristics of four low-echo-centroid convective storms of short-time heavy rainfall in Wuhan[J]. *Meteor Mon*, 48(5): 633-646 (in Chinese).
- 韦惠红, 黄小彦, 刘文婷, 等, 2022. 复杂山地下引发特大暴雨的准静止 MCS 观测分析[J]. *暴雨灾害*, 41(3): 241-253. Wei H H, Huang X Y, Liu W T, et al, 2022. Analysis of quasi-stationary MCS causing extreme torrential rain event under complex mountains in Southwest Hubei[J]. *Torr Rain Dis*, 41(3): 241-253 (in Chinese).
- 徐琨, 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]. *Acta Meteor Sin*, 76(4): 511-524 (in Chinese).
- 徐琨, 湛芸, 张庆红, 2023. 华北春季一次后门冷锋过程及其相关中尺度对流系统的演变特征[J]. *气象学报*, 81(4): 531-546. Xu J, Chen Y, Zhang Q H, 2023. Characteristics of a backdoor cold front and associated MCS in North China during spring[J]. *Acta Meteor Sin*, 81(4): 531-546 (in Chinese).
- 徐姝, 东高红, 熊明明, 2019. 冷池对引发新乡“7·9”特大暴雨的中尺度对流系统的影响分析[J]. *气象*, 45(10): 1426-1438. Xu S, Dong G H, Xiong M M, 2019. Impact of cold pool on mesoscale convective system for extreme rainfall over Xinxiang on 9 July 2016[J]. *Meteor Mon*, 45(10): 1426-1438 (in Chinese).
- 杨晓亮, 金晓青, 孙云, 等, 2023. “23·7”河北太行山东麓罕见特大暴雨特征及成因[J]. *气象*, 49(12): 1451-1467. Yang X L, Jin X Q, Sun Y, et al, 2023. Evolution characteristics and formation of the July 2023 severe torrential rain on the eastern foothills of Taihang Mountains in Hebei Province[J]. *Meteor Mon*, 49(12): 1451-1467 (in Chinese).
- 杨晓亮, 王秀明, 杨敏, 等, 2022. 副热带高压控制下河北局地强降水触发与维持机制分析[J]. *气象*, 48(6): 677-690. Yang X L, Wang X M, Yang M, et al, 2022. The trigger and maintenance mechanism of local flash heavy rain under the control of subtropical high in Hebei[J]. *Meteor Mon*, 48(6): 677-690 (in Chinese).
- 杨晓亮, 杨敏, 段宇辉, 等, 2021. 京津冀一次暖区大暴雨的成因分析[J]. *暴雨灾害*, 40(5): 455-465. Yang X L, Yang M, Duan Y H, et al, 2021. Analysis on causes of a warm-sector torrential rain event in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Torr Rain Dis*, 40(5): 455-465 (in Chinese).
- 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]. *Torr Rain Dis*, 32(3): 202-209 (in Chinese).
- 章翠红, 夏茹娣, 王咏青, 2018. 地形、冷池出流和暖湿空气相互作用造成北京一次局地强降水的观测分析[J]. *大气科学学报*, 41(2): 207-219. Zhang C H, Xia R D, Wang Y Q, 2018. Observational analysis of a local heavy rainfall in Beijing caused by terrain, cold pool outflow and warm moist air interactions[J]. *Trans Atmos Sci*, 41(2): 207-219 (in Chinese).
- 张东方, 张涛, 成青燕, 等, 2023. 一次弱天气背景下极端短时强降水过程的风廓线雷达分析[J]. *高原山地气象研究*, 43(3): 99-105. Zhang D F, Zhang T, Cheng Q Y, et al, 2023. Wind profiler radar analysis of an extremely short time strong precipitation process under weak weather background[J]. *Plateau Mountain Meteor Res*, 43(3): 99-105 (in Chinese).
- 张兰, 陈炳洪, 张东, 等, 2023. 华南前汛期一次锋前暖区暴雨成因及中尺度对流系统分析[J]. *热带气象学报*, 39(5): 697-710. Zhang L, Chen B H, Zhang D, et al, 2023. Analysis of causation and the meso-scale convective systems in a strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China[J]. *J Trop Meteor*, 39(5): 697-710 (in Chinese).
- 张文龙, 崔晓鹏, 黄荣, 等, 2019. 北京“623”大暴雨的强降水超级单体特征和成因研究[J]. *大气科学*, 43(5): 1171-1190. Zhang W L, Cui X P, Huang R, et al, 2019. An investigation of the characteristics and mechanism of the high precipitation supercell in the Beijing “623” severe rainstorm[J]. *Chin J Atmos Sci*, 43(5): 1171-1190 (in Chinese).
- 张元春, 孙建华, 傅慎明, 等, 2023. “21·7”河南特大暴雨的中尺度系统活动特征[J]. *大气科学*, 47(4): 1196-1216. Zhang Y C, Sun J H, Fu S M, et al, 2023. Active characteristics of mesoscale systems during the heavy rainfall in Henan Province in July 2021[J]. *Chin J Atmos Sci*, 47(4): 1196-1216 (in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2007. 天气学原理和方法: 第4版[M]. 北京: 气象出版社: 99-103. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2007. Principle and Method of Synoptic Meteorology[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press: 99-103 (in Chinese).
- Chen G T J, Wang C C, Lin D T W, 2005. Characteristics of low-level jets over northern Taiwan in Mei-Yu season and their relationship to heavy rain events[J]. *Mon Wea Rev*, 133(1): 20-43.
- Ding Y H, Liu Y J, 2001. Onset and the evolution of the summer monsoon over the South China Sea during SCSMEX field experiment in 1998[J]. *J Meteor Soc Japan Ser. II*, 79(1B): 255-276.
- Wang H, Luo Y L, Jou B J D, 2014. Initiation, maintenance, and properties of convection in an extreme rainfall event during SC-MREX: observational analysis[J]. *J Geophys Res Atmos*, 119(23): 13206-13232.
- Zhong L Z, Mu R, Zhang D L, et al, 2015. An observational analysis of warm-sector rainfall characteristics associated with the 21 July 2012 Beijing extreme rainfall event[J]. *J Geophys Res Atmos*, 120(8): 3274-3291.

(本文责编:戴洋)