暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

2023年重庆长滩镇“7.4”局地特大暴雨的中尺度对流系统特征和成因

李强 夏鑐 周盈颖 刘伯骏 王志毅 何兴潼 李东川 蔡博 朱岩 庞

Characteristics and causes of mesoscale convective system induced the "7.4" local extremely heavy rainstorm event in Changtan Town, Chongqing in 2023

LI Qiang，XIA Fan，ZHOU Yingying，LIU Bojun，WANG Zhiyi，HE Xingtong，LI Dongchuan，CAI Bo，ZHU Yan，PANG Yue

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-185

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

梵净山东南侧夏季暖区暴雨中尺度系统演变与环境场特征个例分析

Analysis on mesoscale system evolution and environmental field characteristics of a warm-sector heavy rainfall event in summer in the southeast of Fanjing Mountains

暴雨灾害. 2021, 40(2): 125-135 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.003

四川盆地一次暖性西南低涡大暴雨的中尺度分析

Mesoscale analysis on one warm Southwest Vortex rainstorm in the Sichuan basin

暴雨灾害. 2023, 42(1): 24-36 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-024

豫东北一次春季大暴雨的环境条件与中尺度特征分析

Analysis of environmental condition and mesoscale characteristics for a heavy rainstorm event in Spring in northeast Henan

暴雨灾害. 2022, 41(1): 76-85 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.009

“23.7”河北罕见特大暴雨过程降水演变与中尺度特征分析

Analysis of precipitation evolution and mesoscale characteristics for a severe torrential rain event in Hebei from 29 July to 2 August 2023

暴雨灾害. 2024, 43(1): 1-12 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-191

苏南一次梅雨锋大暴雨的环境条件及对流系统演变特征

Analysis of environmental conditions and characteristics of convective system evolution of a Mei-Yu Front heavy rainstorm in southern Jiangsu

暴雨灾害. 2023, 42(5): 532-540 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-128

盛夏一次地面冷锋过境引发局地大暴雨的成因分析

Analysis on the local heavy rainfall caused by cold front in midsummer

暴雨灾害. 2021, 40(4): 393-400 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.007

关注微信公众号，获得更多资讯信息

李强,夏蘩,周盈颖,等.2026. 2023 年重庆长滩镇“7.4”局地特大暴雨的中尺度对流系统特征和成因[J].暴雨灾害,45(2):159−170. LI Qiang, XIA Fan, ZHOU Yingying, et al. 2026. Characteristics and causes of mesoscale convective system induced the "7.4" local extremely heavy rainstorm event in Changtan Town, Chongqing in 2023 [J]. Torrential Rain and Disasters,45(2):159−170 (in Chinese). doi: 10.12406/byzh.2024−185

2023 年重庆长滩镇“7. 4”局地特大暴雨的中尺度对流系统特征和成因

李强[1], 夏蘩[1], 周盈颖[1], 刘伯骏[1], 王志毅[1], 何兴潼[2], 李东川[3], 蔡博[1], 朱岩[1], 庞玥[1]

(1. 重庆市气象台, 重庆 401147; 2. 四川省泸州市气象局, 泸州 646000; 3. 重庆市万州区气象局, 万州 404100)

摘　要: 2023 年 7 月 3 日 14 时—4 日 14 时 (北京时, 下同), 重庆市万州区长滩镇发生局地特大暴雨, 且 4 日凌晨连续 4 h 超过 40 mm 的小时强降雨引发地质灾害、造成人员伤亡。利用地面气象站、FY-4A 卫星、多普勒天气雷达、CLDAS 融合和 ERA5 再分析等资料, 分析了此次局地特大暴雨形成的环流背景、环境条件, 并重点探讨了中尺度对流系统 (MCS) 特征和成因, 总结了影响此次过程的关键因子与概念模型。结果表明: (1) 在西太平洋副热带高压东退过程中, 其外围的暖湿气流与高空冷槽引导的冷空气交汇, 形成稳定维持的低涡切变线, 为中小尺度对流系统发生、发展提供了有利的动力和水汽辐合条件, 同时高不稳定能量舌为强降雨提供了必要的热力条件。(2) 万州区西部小尺度对流云团和重庆西南部对流云团合并, 发展成为导致万州区长滩镇强降雨的 MCS; 重庆中西部稳定维持的西南—东北走向的带状回波东移, 与万州区西部对流单体合并增强, 形成造成长滩镇短时强降雨的强回波“列车效应”。(3) 万州区东部七曜山地形有利于锋区动力抬升, 增强了垂直上升运动和水汽聚集, 同时与方斗山地形作用下形成的中尺度地形辐合线叠加, 促使 MCS 稳定和增强, 导致万州区长滩镇局地特大暴雨的发生。

关键词: 特大暴雨; 中尺度对流系统; 列车效应; 地形作用; 概念模型

中图法分类号: P458.1^{+}21.1　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−185

Characteristics and causes of mesoscale convective system induced the "7.4" local extremely heavy rainstorm event in Changtan Town, Chongqing in 2023

LI Qiang[1], XIA Fan[1], ZHOU Yingying[1], LIU Bojun[1], WANG Zhiyi[1], HE Xingtong[2], LI Dongchuan[3], CAI Bo[1], ZHU Yan[1], PANG Yue[1]

(1. *Chongqing Meteorological Observatory*, *Chongqing* 401147; 2. *Luzhou Meteorological Bureau of Sichuan Province*, *Luzhou* 646000; 3. *Wanzhou Meteorological Bureau of Chongqing*, *Wanzhou* 404100)

Abstract: A local extremely heavy rainstorm occurred in Changtan Town, Wanzhou District, Chongqing, from 14:00 BT on 3 to 14:00 BT on 4 July, 2023 (Beijing time, the same below). The hourly heavy rainfall exceeding 40 mm for four consecutive hours in the early morning of 4 July triggered geological disasters and caused casualties. Using data from surface weather stations, FY-4A satellite, Doppler weather radar, CLDAS fusion data and ERA5 reanalysis data, this study analyzed the circulation background and environmental conditions that led to the local extremely heavy rainstorm. The characteristics and causes of mesoscale convective system (MCS) were discussed. The key factors and conceptual model influencing this process were summarized. The results are as follows. (1) During the eastward retreat of the subtropical high, the stably maintained low vortex shear line was formed by the warm and humid airflow around the subtropical high converging with the cold air guided by the high-altitude cold trough, which provided favorable dynamic and moisture convergence conditions for the occurrence and development of mesoscale and microscale convective systems. Meanwhile, the high-instability energy tongue provided the necessary thermodynamic conditions for heavy rainfall. (2) The MCS was formed by the combination of the small scale convective cloud clusters in the west of Wanzhou and the convective cloud clusters in the southwest of

收稿日期: 2024−10−10; **定稿日期**: 2025−03−04

资助项目: 国家自然科学基金联合基金项目 (U2242202); 重庆市自然科学基金项目 (cstc2021jcyj-msxmX0057); 中国气象局复盘总结专项 (FPZJ2024-107); 中国气象局西南区域气象中心创新团队基金项目 (XNQYCXTD-202202); 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2022J011)

第一作者: 李强, 主要从事灾害性天气预报及相关理论和方法研究。E-mail: cqlqlq@163.com

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

Chongqing, which caused the heavy rainfall in Changtan Town, Wanzhou District. The local heavy rainstorm was mainly due to the "train effect", which was generated by the eastward movement of the stable and sustained "southwest northeast" oriented band echoes in the central and western parts of Chongqing and the convective cells in the western part of Wanzhou District merged and strengthened. (3) The topography effect of Qiyao Mountain in the east of Wanzhou was favorable for the dynamic lifting of the frontal zone, which enhanced the vertical uplift motion and water vapor aggregation. Moreover, the superposition effect of mesoscale topographic convergence line formed by Fangdou Mountain topography further promoted the stability maintenance and enhancement of MCS, ultimately triggering the local extreme rainstorm in Changtan Town, Wanzhou District.

Key words: heavy rain; mesoscale convective system; train effect; topography effect; concept model

引 言

四川盆地位于青藏高原大地形与长江中下游平原的过渡带，其天气气候受青藏高原系统、副热带季风以及热带季风等行星尺度、天气尺度和局地复杂地形的共同作用 (李跃清, 2000; 徐祥德等, 2002; 庞轶舒, 2017)，是我国暴雨多发地之一。引发该地区暴雨的主要天气系统有高原槽 (涡)、西南涡、低空切变线、急流等 (顾清源等, 2008; 邱静雅等, 2015; 张芳丽等, 2020; 卢萍和李跃清, 2021)，此外又叠加复杂地形的共同作用，使得该地区暴雨预报难度增大 (肖红茹, 2021; 宋雯雯等, 2024)。

暴雨的发生是多种尺度系统相互作用的结果，大尺度环流对暴雨的发生发展提供有利的背景环境 (冉令坤等, 2014)，中尺度对流系统 (MCS) 是导致暴雨的直接影响系统。中国地形复杂，因此影响我国的 MCS 的活动特征具有显著的区域差异，四川盆地 MCS 活动具有明显的夜发性单峰型活动特征 (郑永光等, 2008; 王婧羽等, 2022; 陈永仁, 2024; 竹利等, 2024)，且夜间生成的 MCS 更容易引发突发暴雨事件。王晓芳等 (2022) 指出异常环流条件下多尺度系统相互作用、异常水汽输送，并叠加地形影响造成了秦巴山脉区域性暴雨发生。邓承之等 (2023) 分析一次西南低涡大暴雨过程，指出移动缓慢、维持时间达 3~6 h 的 MCS 造成了大暴雨，暖湿不稳定和弱垂直风切变为 MCS 的形成提供了有利的环境条件。许多学者的研究揭示了四川盆地地形对夜间降雨峰值日时间变化和移动特征的影响 (Zhang et al., 2014; Chen et al., 2018; Hu et al., 2020; Chen et al., 2021)。四川盆地和周围山脉之间地形高度的分布差异，导致降雨分布与山地地形密切相关 (Qian et al., 2015)。Bao 等 (2011)和 Zhang 等 (2019) 揭示了四川盆地影响下，山地平原热力环流日变化和边界层风场惯性振荡形成的夜雨机理。四川盆地周围复杂地形地区夜雨具有突发性，张芳丽等 (2020) 发现不同尺度低空急流叠加形成的强辐合，以及秦巴山脉迎风坡和青藏高原东麓背风坡辐合抬升是造成突发性暴雨的主要原因。谢家旭和李国平 (2021) 指出，西南山区的突发性暴雨是地形与天气系统共同作用的结果，通过山谷风、重力波等物理过程对局地环流产生影响，诱发局地强降雨。金妍等 (2021) 将流场分解为绕流和爬流，探讨四川盆地西南部山地突发性暴雨地形对过山气流及降雨的作用，发现气流对于山地屏障的地形适应以爬流为主，爬流产生的垂直上升运动与雨带分布密切相关。陈博宇等 (2023) 和齐铎等 (2023) 研究了冕宁“6.26”局地暴雨特征和形成机制，指出局地地形强迫抬升造成对流触发，同时地形阻挡导致了西南暖湿气流辐合上升运动和伸展高度增强，使 MCS 发生发展，形成“列车效应”诱发局地强降雨。以上研究均表明川渝地区的复杂地形对 MCS 演变过程起到重要作用，进而影响暴雨发生发展过程，本文将分析局地特大暴雨过程的 MCS 特征和复杂地形作用机制。

2023 年 7 月 3 日 14 时—4 日 14 时 (北京时，下同)，重庆市万州区长滩镇发生局地特大暴雨 (以下将此次过程简称为“7.4”)，引发山体浅层滑坡、泥石流等地质灾害，因灾死亡 19 人。Li 等 (2022) 研究了重庆地区降雨量和降雨频次时空分布特征，结果表明大值区多分布在大巴山区、武陵山区、华蓥山地区，以及大娄山北部复杂地形山区，重庆市万州区东部也为山区，但空间分布显示该地区并非降雨量和频次大值区，那么产生此次局地特大暴雨的 MCS 具有何种特征，局地地形在暴雨过程中有何种作用？本文利用多源观测及再分析资料，分析“7.4”过程的环流背景、环境条件以及 MCS 特征和触发、维持机制，并总结影响此次过程的关键因子与概念模型，以期提高四川盆地东部复杂地形影响下暴雨预报的准确率，进而为灾害天气预防提供参考依据。

1 资料及实况

1.1 资料来源

本文使用的资料主要包括：(1) 国家气象信息中心提供的 2023 年 7 月 3 日 14 时—4 日 14 时重庆及

周围地区国家和区域气象观测站 (以下分别简称为国家站和区域站) 逐小时降雨资料, 用于分析过程降雨特征; (2) 国家气象信息中心提供的 4 日 00 时—06 时的中国气象局陆面同化系统 (CLDAS-V2.0) 逐小时网格融合分析产品 (师春香等, 2019), 用来分析地面中尺度辐合系统特征; (3) 3 日 20 时湖北宣恩站 (位于万州区长滩镇东南侧约 100 km) 探空资料, 用于分析过程前的大气环境物理量特征; (4) 国家卫星中心提供的 7 月 4 日 00 时—08 时 FY-4A 红外辐射亮温 (TBB) 资料, 用来分析 MCS 活动特征; (5) 重庆市气象局提供的 7 月 4 日 02:54—07:54 万州站多普勒天气雷达逐 6 min 体扫数据和 SWAN (Severe Weather Automatic Nowcast System) 雷达组网反射率因子资料, 用来分析影响此次过程中小尺度对流系统活动精细演变特征; (6) 欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 时间分辨率 1 h、空间分辨率 0.25°×0.25° 的第五代全球再分析资料 (ERA5), 共 37 层, 包括位势高度场、风场、温度场、海平面气压场等, 用来分析影响过程的大尺度环流背景条件及水汽、动力等物理量特征; (7) 中国地区 30 Arc-Second 高分辨率地形资料 (https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model), 用于地形绘制。

1.2 降雨实况

重庆市万州区地处四川盆地东部边缘, 长江自南向北穿越而过, 下垫面地形复杂, 以山地地形为主, 地势逐步由长江河谷开始, 向东西两侧升高, 海拔从 90 m 到 1 768 m, 西侧有铁峰山, 东侧有七曜山和方斗山 (图 1a)。万州区长滩镇 (108.5°E, 30.8°N) 位于万州区东部, 附近地势东高西低, 南高北低。

2023 年 7 月 3 日 14 时—4 日 14 时, 重庆出现强降雨天气过程, 强降雨雨带呈西南—东北走向, 主要集中在长江沿线, 沿线大部地区雨量大雨到暴雨, 部分乡镇大暴雨到特大暴雨, 16 个区县及万盛经开区的 136 个国家和区域站超过 100 mm (图 1b)。

3 日 14 时—4 日 14 时, 万州区 1 个区域站 24 h 累计降雨量超过 250 mm (图 1c), 40 个区域站超过 100 mm, 1 个国家和 69 个区域站超过 50 mm, 最大雨量 261.2 mm (长滩镇); 最大小时雨量 65.6 mm (梨树乡, 4 日 06 时)。重灾区雨量分别为: 走马镇 173.6 mm、白羊镇 138.4 mm、龙驹镇 118.4 mm、长岭镇 144.9 mm、长滩镇 261.2 mm。降雨集中在 7 月 3 日夜间至 4 日凌晨, 重灾区强降雨出现在 7 月 4 日凌晨, 其中 4 日 04—07 时长滩镇出现 43.5 mm、57.6 mm、50.5 mm、49.2 mm 的小时强降雨量, 4 h 降雨量达 200.8 mm (图 2a)。

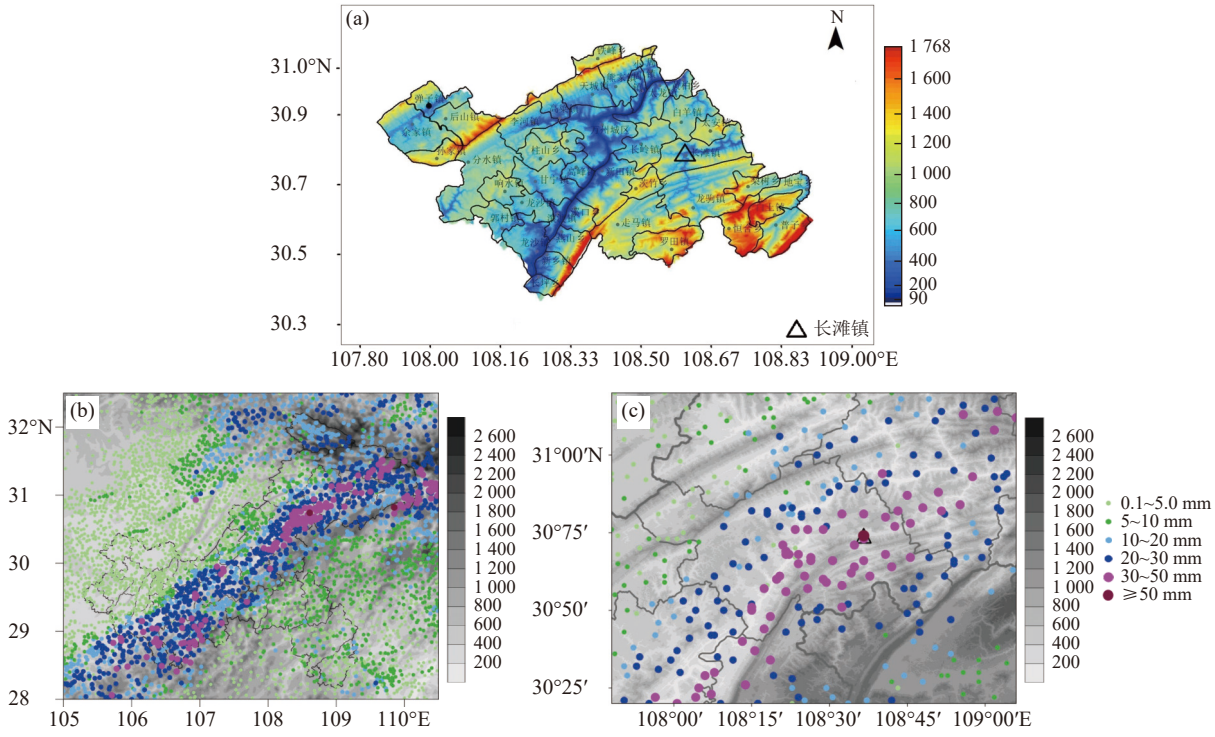


图 1 重庆市万州区高程图 (a, 单位: m), 2023 年 7 月 3 日 14 时—4 日 14 时重庆市 (b) 和万州区 (c) 累计雨量 (彩色圆点, 单位: mm) 和地形高度 (阴影, 单位: m) 空间分布 (图 a 中三角形表示长滩镇, 下同)

Fig. 1 (a) Digital elevation map of Wanzhou District of Chongqing (unit: m), distribution of cumulative precipitation (colored dots, unit: mm) and terrain (grey shading, unit: m) in (b) Chongqing and (c) Wanzhou District from 14:00 BT on 3 July to 14:00 BT on 4 July 2023 (The triangle represents Changtan Town in Fig. 1a, the same below)

万州区长滩镇 3 h、6 h、12 h 和 24 h 降雨量均为 2009 年 2 月建站以来第 1 位 (图 2b)。同时 4 日 04—07 时万州区 3 h 累计最大雨量 7 站历史排第 1 位，10 站历史排第 2 位。可见，此次过程降雨量大、短时雨强强、局地极端性和突发性强、造成灾害严重，有必要对其特征和成因展开深入分析。

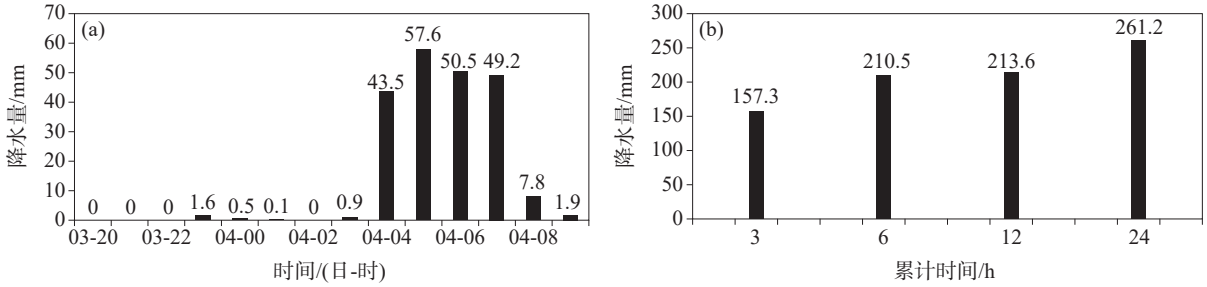


图 2 2023 年 7 月 7 月 3 日 20 时至 4 日 09 时万州区长滩镇逐小时降雨量 (a) 及 3 h、6 h、12 h、24 h 累计雨量 (b) 变化

Fig. 2 Time variation of (a) hourly precipitation, (b) cumulative precipitation of 3 h, 6 h, 12 h and 24 h from 18:00 BT on 3 July to 17:00 BT on 4 July, 2023 at Changtan Town in Wanzhou

2 环流形势和环境条件

7 月 3 日 20 时 (图 3a)，200 hPa 西北地区东部至内蒙古中东部地区为明显高空急流，四川盆地中东部处于高空急流右侧。500 hPa 受蒙古国冷涡影响，内蒙古至四川盆地为高空阶梯槽，西太平洋副热带高压 (以下简称为副高) 588 dagpm 等值线西伸至云南中部至四川南部地区，北界位于安徽中部至江苏中部地区，且控制重庆中西部及东南地区；700 hPa 高

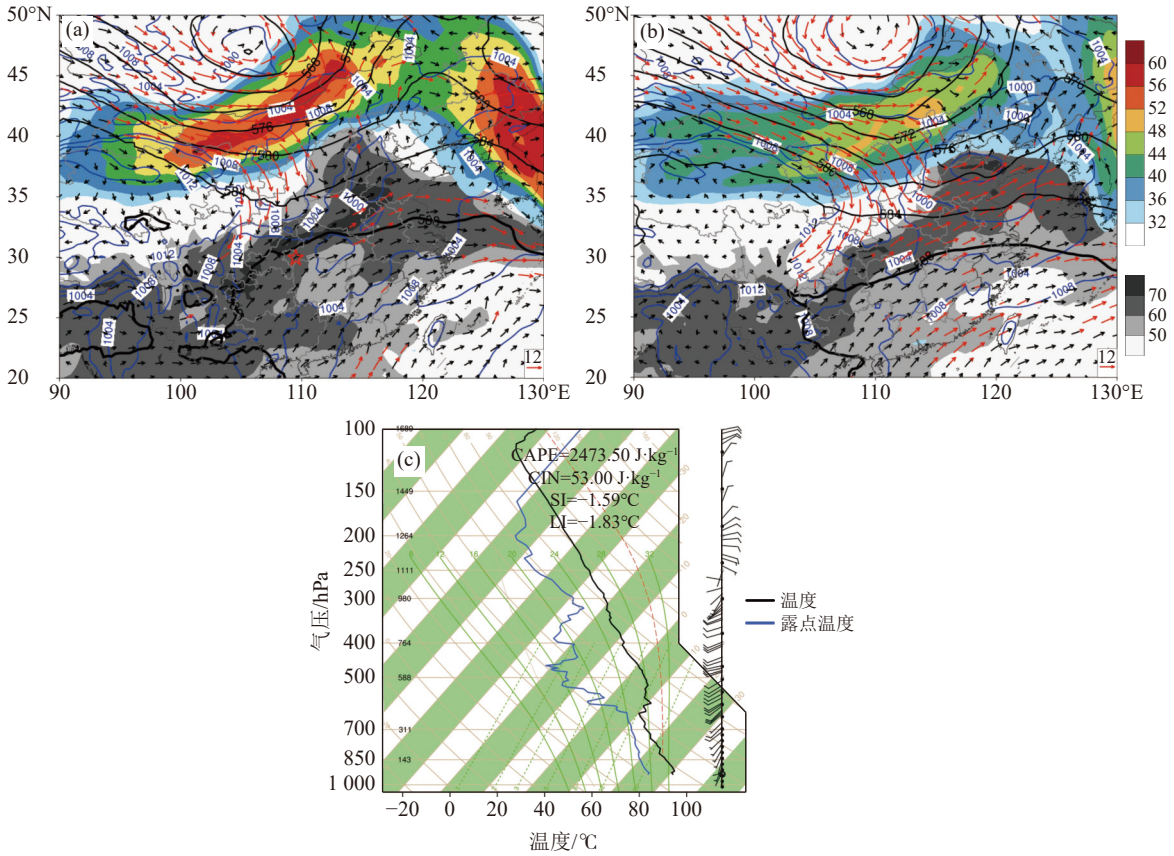


图 3 2023 年 7 月 3 日 20 时 (a) 和 4 日 08 时 (b) 500 hPa 位势高度 (黑色等值线，单位：dagpm)、700 hPa 风场 (箭头，单位：$m\cdot s^{-1}$；红色箭头表示风速≥12 $m\cdot s^{-1}$)、整层可降水量 (PWAT，灰色阴影，单位：mm)、200 hPa 风速 (彩色填色，单位：$m\cdot s^{-1}$)、海平面气压场 (蓝色等值线，单位：hPa) 综合图，3 日 20 时宣恩探空 (c) (图 a 中红色五角星表示宣恩站位置)

Fig. 3 Complex chart 500 hPa geopotential height (black isoline, unit: dagpm), 700 hPa wind field (arrow, unit: $m\cdot s^{-1}$; red arrow indicate wind speed≥12 $m\cdot s^{-1}$), precipitable water (PWAT, grey shading, unit: mm), 200 hPa wind speed (colored shading, unit: $m\cdot s^{-1}$), sea level pressure (blue contour, unit: hPa) at (a) 20:00 BT on 3 July 2023, (b) 08:00 BT on 4 July 2023 and (c) T–ln$p$ chart at Xuanen station at 20:00 BT on 3 July 2023 (The red star in Fig. 3a indicates the location of Xuanen station)

空槽后偏北风引导下冷空气进入四川盆地, 同时副高外围西南暖湿气流经盆地东部与盆地中西部偏北气流交汇, 形成了位于盆地东部呈西南—东北走向的低涡切变线, 万州区长滩镇位于切变线的暖区一侧, 同时万州 PWAT 达到 70 mm。7 月 4 日 04 时 (图略) 以后, 低涡切变东移南压, 位于重庆东北部, 切变线前侧西南风增强 2~4 $m\cdot s^{-1}$, 低涡强度明显加强, 同时长滩镇位于暖切变前侧, 为明显的暖湿舌控制; 06 时 (图略), 随着低涡切变进一步向东南移动, 低涡强度达到最强, 长滩镇位于暖切变线附近, 而后低涡强度减弱。4 日 08 时 (图 3b), 500 hPa冷涡东移至蒙古国东部, 高空槽东移至内蒙古中东部至重庆北部地区, 副高南压至重庆东南边缘地区, 700 hPa 低涡切变线东移至重庆东部地区, 降雨过程趋于结束。

3 日 20 时, 距离万州区长滩镇最近的宣恩站资料显示 (图 3c), 对流有效位能 (CAPE) 达 2 473.5 $J\cdot kg^{-1}$, 对流抑制能量 (CIN) 为 53 $J\cdot kg^{-1}$, 850—600 hPa 空气接近饱和, 600 hPa 以上为明显的干层, 700 hPa 比湿大于 12 $g\cdot kg^{-1}$, 沙氏指数 (SI) 为−1.59℃ 和抬升指数 (LI) 为−1.83℃, 表明大气具有一定的对流不稳定性, 抬升凝结高度 (LCL, 883.9 hPa) 和自由对流高度 (LFC, 817.9 hPa) 均较低。以上结果表明, 该地区具有明显的不稳定层结和有利于触发对流的潜势。下面将对影响此次过程的 MCS 特征和机制进行分析。

3 MCS 活动特征和机制

3.1 卫星云图特征

根据 Orlanski (1984)、叶朗明和苗俊峰等 (2014) 对天气过程时间和空间尺度划分标准及 MCS 的判别方法, 利用 FY-4A 的 TBB 资料对中尺度对流云团演变进行分析, 将水平尺度 20~250 km、生命史≥3 h、TBB≤−32℃ 的中尺度对流云团定义为 MCS。为分析影响万州区强降雨的 MCS 演变过程, 将 7 月 3 日夜间至 4 日凌晨造成重庆市万州区东部地区强降雨的 MCS (图 4a 箭头所指位置) 发生、发展过程分为 4 个阶段: 第 1 阶段局地对流生成阶段 (3 日 23 时—4 日 02 时); 第 2 阶段 MCS 形成与快速发展阶段 (4 日 02—04 时); 第 3 阶段 MCS 成熟阶段 (4 日 04—06 时); 第 4 阶段 MCS 减弱阶段 (4 日 06—08 时)。

7 月 3 日 20 时 (图略), 对流云团主体在四川盆地南部活跃, 仍未进入重庆境内, 同时对流在重庆西南部初生发展。第 1 阶段, 3 日 23 时 (图略) 盆地南部对流云系向重庆西南部逐渐扩大并加强; 4 日 00 时 (图 4a), 受切变系统影响重庆西南部对流云团 A 发展扩大影响重庆西部大部地区, 同时受切变线影响在重庆万州区产生局地对流形成云团 B, 此云团是万州区东部地区强降雨的初始对流系统; 01 时 (图 4b), 云团 B 分裂成两个较小对流云团, 云团 A 在

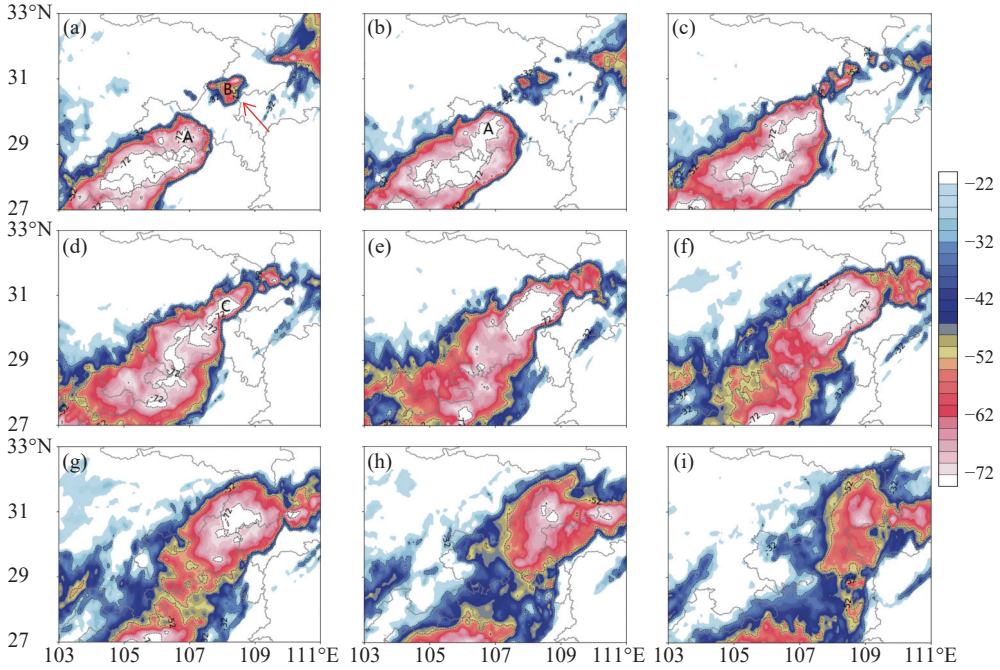


图 4 2023 年 7 月 4 日 00 时—08 时每隔 1 h (a—i) TBB (单位: ℃) (图 a 中箭头指示的为影响万州区的 MCS, A、B、C 表示云团编号)

Fig. 4 TBB (unit: °C) at (a) 00:00 BT, (b) 01:00 BT, (c) 02:00 BT, (d) 03:00 BT, (e) 04:00 BT, (f) 05:00 BT, (g) 06:00 BT, (h) 07:00 BT and (i) 08:00 BT on 4 July 2023 (The arrow indicates a MCS affecting Wanzhou district in Fig. 4a. The A, B, C indicate the number of cloud clusters, respectively, in Fig. 4a, Fig. 4b and Fig. 4d)

切变系统影响下，进一步向东北方向扩大影响重庆中部地区，TBB 最强中心达-72℃ 以下；02 时 (图 4c)，万州区东部分散对流云团稳定维持，且有所发展。第 2 阶段，03 时 (图 4d)，伴随着切变系统的维持和增强，云团 A 继续向东北方向发展，与云团 B 合并且快速发展成云团 C，此时影响万州区强降雨的 MCS 形成，−72℃ 以下 TBB 范围呈西南—东北走向，并北扩逐渐影响重庆东北部部分地区。第 3 阶段，04 时 (图 4e)，万州区-72℃ 以下 TBB 范围明显增大，云顶接近圆形的中尺度云团 (较大范围冷云罩)，且一直维持至 06 时，同时云图-72℃ 以下大值中心区域也出现明显的短时强降雨 (图 2a)。第 4 阶段，07 时 (图 4h)，对流云团仍主要影响重庆东北部地区，但−72℃ 以下范围明显减小，万州区对流云团呈片状分布，08 时 (图 4i)，对流云团进一步减弱，MCS 快速减弱。

3.2 雷达回波特征

进一步利用雷达资料对 7 月 4 日凌晨影响万州长滩地区局地强降雨的对流活动进行精细化分析。7 月 4 日 02:54 (图 5a)，低涡切变线作用下形成的西南—东北走向带状回波增强，位于万州区长滩镇上游，30 dBz 以上回波控制着重庆中部和东北部长江沿线地区，影响范围相对较窄，但中心强度超过 50 dBz，此时万州区中部已出现≥20 mm·h^{-1} 的短时强降雨，此后西南—东北走向带状回波东移南压，范围扩大，影响万州区东部大部分地区；03:54 (图 5b)，强回波中心东移停滞在长滩镇附近，同时在万州中西部地区有对流单体新生，并向东移动加强，形成“列车效应”，使得长滩镇附近对流维持，但万州区强回波分散呈块状；04:54 (图 5c)，万州区南部回波不断向东北方向移动，与万州中西部的回波合并增强，“列车效应”导

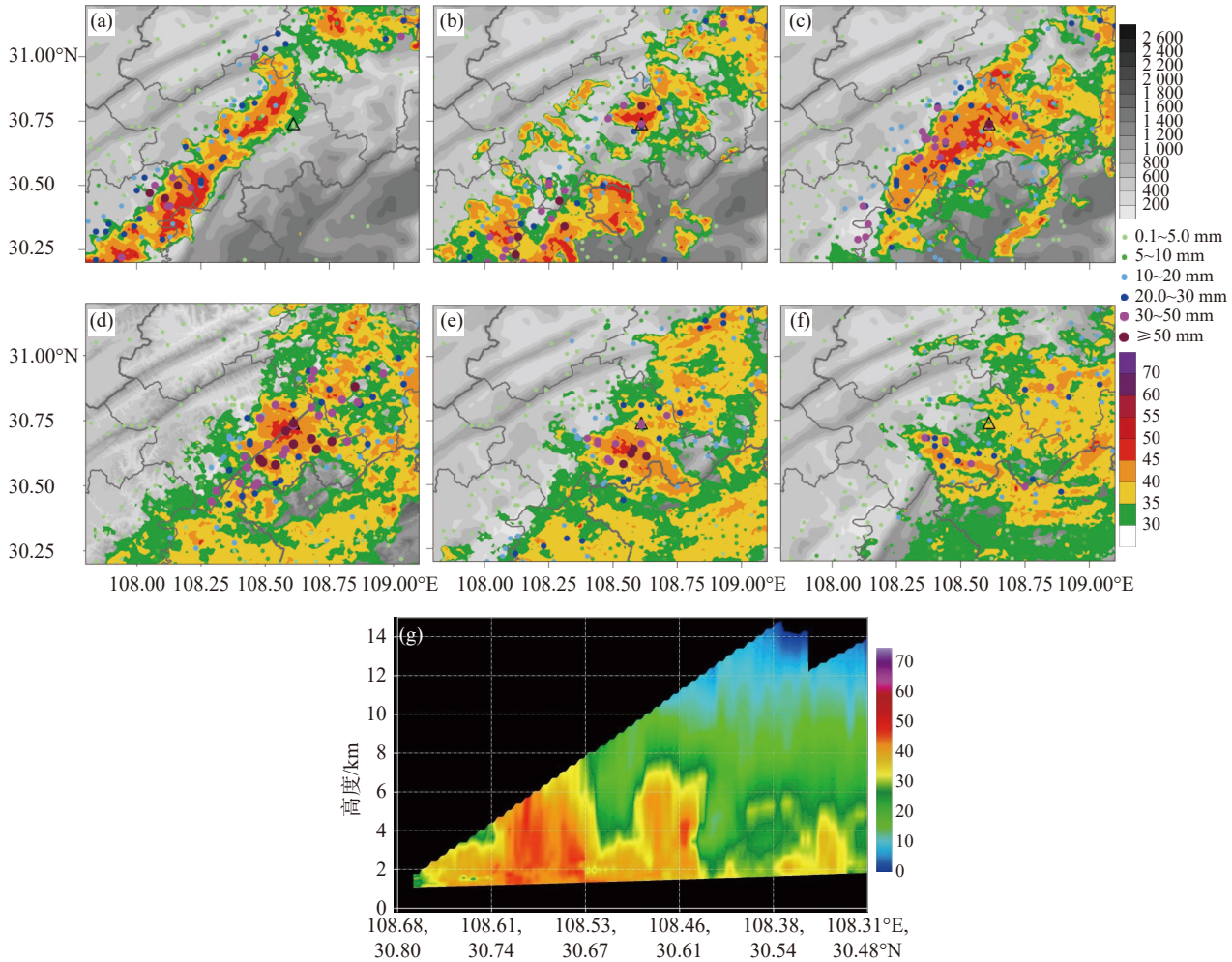


图 5 2023 年 7 月 4 日 02:54 (a)、03:54 (b)、04:54 (c)、05:54 (d)、06:54 (e) 和 07:54 (f) 万州雷达雷达组合反射率因子 (填色，单位：dBz)、整点小时降雨 (彩色圆点，单位：mm) 和地形高度 (阴影，单位：m) 分布以及 05:56 沿图 d 中黑线的反射率因子剖面 (g，单位：dBz)

Fig. 5 Combined reflectivity factor (colored shading, unit: dBz) at Wanzhou radar at (a) 02:54 BT, (b) 03:54 BT, (c) 04:54 BT, (d) 05:54 BT, (e) 06:54 BT and (f) 07:54 BT on 4 July 2023, hourly precipitation distribution (colored dots, unit: mm) and terrain (gray shading, unit: m), (g) reflectivity factor (unit: dBz) along the black line in Fig. 5d at 05:56 BT

致强回波带持续影响长滩镇, 50 dBz 以上强回波中心在长滩镇维持到 07 时, 与 MCS 发展成熟阶段的 −72℃ 以下 TBB 控制时间一致 (图 4e—g), 使得长滩镇 04—07 时连续 4 h 雨强超过 40 mm·h^{-1}。根据 05:56 经图 d 中黑线的反射率因子剖面 (图 5g) 分析, 强回波高度较低 (50 dBz 约在 4 km), 此强回波从 04 时维持到 07 时左右。07:54 (图 5f), 带状回波逐渐减弱消散, 并逐渐东移出重庆, 重庆东北部的强降雨趋于减弱。

3.3 MCS 演变机制

对比 TBB 和雷达回波演变特征可发现, 在四川盆地东部形成的 700 hPa 西南—东北走向的切变线影响下, 重庆西南部形成的 MCS 向东北方向移动, 同时在 850 hPa 低涡切变影响下, 万州区西部也有小尺度对流系统生成。图 6a 为 7 月 4 日 04 时 850 hPa 风场和散度场, 可见万州区长滩镇附近维持低涡切变线, 切变线位于 31°N 附近, 随着偏北气流入侵, 切变线缓慢南移; 06 时, 位于 30.5°N 附近 (图 6b); 同时散度场上, 切变线附近为明显的散度辐合区, 中心最大值低于−12×10^{-5} s^{-1}; 在低涡切变线动力作用下, 重庆西南部向东北方向移动的 MCS 与万州区西部东移的小尺度对流系统合并并发展, 表明在低涡切变线影响下该地区存在明显的低层辐合, 为万州区 MCS 的生成、发展提供有利的动力条件。结合万州区东部散度时间-高度垂直剖面 (图 6c), 4 日 04 时, 800 hPa 散度负值大值中心达到−10×10^{-5} s^{-1}; 05 时之后, 低于 −9×10^{-5} s^{-1} 的大值区迅速向上伸展, 到 07 时已经伸展至 700 hPa。同时, 700 hPa 以上为散度辐散区, 且在 05 时之后正值区也向上扩展, 达到 600 hPa 以上。在万州区强降雨发生时段 (4 日 04—07 时), 800—600 hPa 散度梯度明显加强, 即低层辐合、高层辐散的耦合进一步加强。另外, 从垂直速度时间-高度剖面分布 (图 6d) 可见 04 时, 700 hPa 垂直速度不断减小; 06 时, 整层垂直速度达到最小 (中心达−1.6 Pa·s^{-1}),

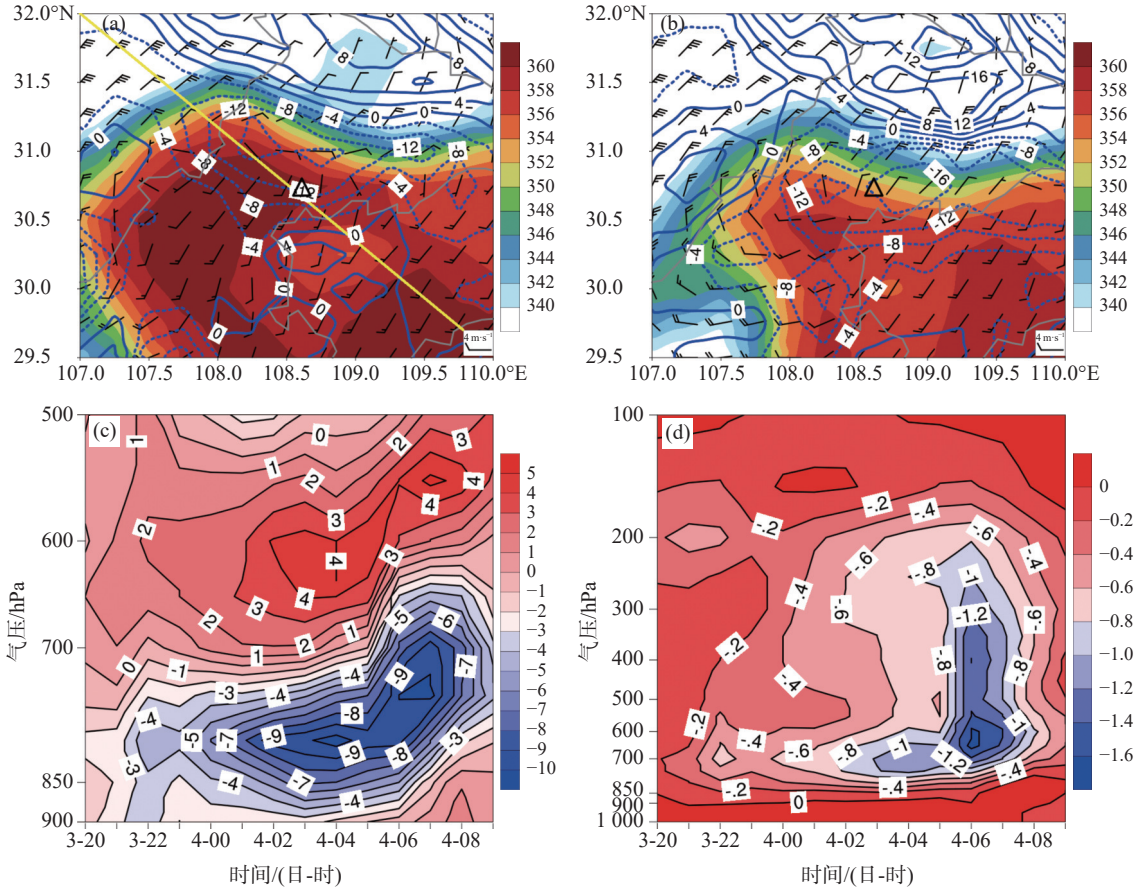


图 6 2023 年 7 月 4 日 04 时 (a) 和 06 时 (b) 850 hPa 风场 (风羽, 单位: m·s^{-1})、散度 (等值线, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 和假相当位温 (θ_{se}, 填色, 单位: K), 7 月 3 日 20 时—4 日 09 时沿 (108.15°—109°E, 30.5°—31.5°N) 的平均散度 (c, 填色, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 和沿 (108°—109°E, 30°—31°N) 的平均垂直速度 (d, 填色, 单位: Pa·s^{-1}) 的时间-高度剖面 (图 6a 黄色直线为图 8 和图 10 剖面位置)

Fig. 6 The 850 hPa wind field (wind plume, unit: m·s^{-1}), divergence (contour, unit: 10^{-5} s^{-1}) and θ_{se} (colored shading, unit: K) at (a) 04:00 BT, (b) 06:00 BT on 4 July 2023, time-height profile of (c) average divergence (color-filled, unit: 10^{-5} s^{-1}) along (108.15°-109°E, 30.5°-31.5°N), and (d) average vertical velocity (color-filled, unit: Pa·s^{-1}) along (108°-109°E, 30°-31°N) from 20:00 BT on 3 July to 09:00 BT on 4 July 2023 (The yellow line in Fig. 6a indicates the cross-section position of Fig. 8 and Fig. 10)

−0.8 Pa·s^{-1} 上升运动区向上扩展到 200 hPa, 其中, 较强垂直速度 (<−1.2 Pa·s^{-1}) 位于 700—300 hPa 之间, 即整个强降雨区域上空具有强烈的上升垂直运动。在特大暴雨发展过程中, 不断加强的低层辐合、高层辐散的耦合配置有利于垂直方向上形成大气抽吸效应, 从而加强垂直上升运动 (赵衍斌等, 2023)。

由 θ_{se} 空间分布上可见, 04 时 (图 6a), 在低涡切变东侧和南侧为明显 θ_{se} 大值区 (高能舌), 中心最大值超过 360 K, 为 MCS 的发生、发展提供了热力条件。在低涡切变线动力和热力作用下, 造成万州区的强降雨 MCS 稳定维持并增强, 万州区 TBB −72 ℃以下范围明显增大 (图 4e、f)。06 时 (图 6b), 随着低涡切变线缓慢南移和强降雨发生, θ_{se} 大值区范围逐渐缩小, 万州区 θ_{se} 中心最大值下降至 254 K 以下, 此后−72℃ 以下范围迅速减小 (图 4h), 降雨也随之减弱。

MCS 的演变过程与水汽的作用密切相关, 从水汽通量散度和水平风场时间-高度剖面图 (图 7) 近一步分析水汽输送过程, 3 日 20 时—4 日 09 时, 700 hPa 以下为水汽通量散度辐合大值区, 3 日 20 时—4 日 02 时, 强降雨前期水汽辐合逐渐增强; 05 时, 辐合向上和向下增厚; 08 时, 水汽辐合伸展至 700 hPa 附近, 但中心强度明显较弱。4 日 03—07 时, −8 g·(s·hPa)$^{-1}$·cm^{-2} 以下水汽通量散度负值大值区, 与该时段强降雨对应 (图 5b—e), 中心强度大于−10 g·(s·hPa)$^{-1}$·cm^{-2}, 尤其在 06—07 时 900—800 hPa 附近出现水汽通量散度大值区域, 表明该时段低层辐合将水汽不断地向

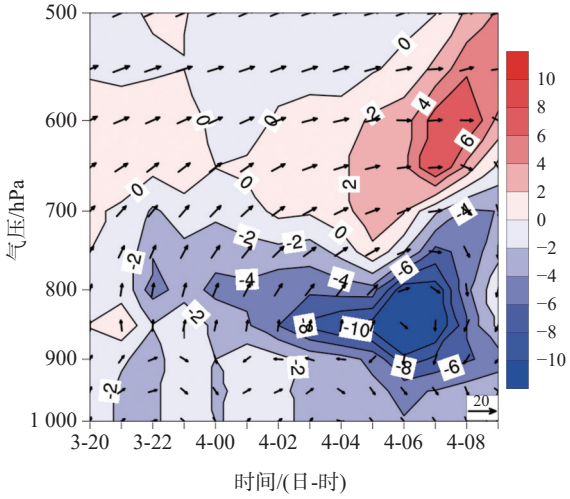


图 7 2023 年 7 月 3 日 20 时—4 日 09 时水汽通量散度 (填色, 单位: g·(s·hPa)$^{-1}$·cm^{-2}) 和风场 (矢量箭头, 单位: m·s^{-1}) 沿 (108°—109°E, 30°—31°N) 的时间-高度垂直剖面

Fig. 7 Height-time profile of average moisture flux divergence (colored shading, unit: g·(s·hPa)$^{-1}$·cm^{-2}) and average horizontal wind field (wind vector, unit: m·s^{-1}) along (30°-31°N, 108°-109°E) from 20:00 BT on 3 July to 09:00 BT on 4 July 2023

特大暴雨区上空输送, 且水汽聚集时段与特大暴雨发生时段有较好的一致性。

4 地形作用

4.1 引起锋面抬升

经长滩镇作西北—东南向垂直环流剖面, 随着冷空气入侵重庆东北部地区 (108.0°E, 31.2°N), 7 月 4 日 00 时 (图 8a), 其西北侧存在向冷区倾斜的 θ_{se} 等值线的密集区, 表明大尺度冷锋锋区逐渐影响该地区, 其东南侧为锋区前的高不稳定区 (360 K), 中低层为弱的垂直上升运动区。04 时 (图 8b), 随着大尺度锋区向东南方向推进, 锋区移近长滩镇附近, 但长滩镇仍位于冷锋前的暖区里。副高西侧、低涡切变前部西南气流加强, 在高温高湿不稳定层结下, 加上七曜山迎风坡地形作用, 锋前暖气团抬升, 垂直上升运动明显加强, 其向上伸展至 700 hPa 以上。04—05 时, 垂直速度小值中心位于 700 hPa (图 6d), 对应 04—05 时暖区对流性的短时强降雨 (图 2a), 同时在山后形成弱的次级环流, 其左侧的上升气流与锋前的上升气流合并, 加强了锋前的上升运动, 共同导致了暖区短时强降雨, 其右侧的下沉气流破坏了高 θ_{se} (360 K), 导致 360 K 的 θ_{se} 线断裂。06 时 (图 8c), 随着冷空气向东向南移动, 冷锋移至长滩镇, 锋面抬升和地形抬升的共同作用造成垂直上升运动进一步加剧, 强烈的垂直上升运动伸展至 200 hPa 附近, 此时上升运动速度达最强, 最小值中心 (<−1.6 Pa·s^{-1}) 位于 700 hPa 附近 (图 6d)。07 时 (图略), 锋区东移位于七曜山山顶, 其上空依然维持强烈的上升运动 (<−1.4 Pa·s^{-1} 中心位于 700 hPa), 而后逐渐减弱。

综上, 冷锋过境前 (04 时、05 时) 局地特大暴雨 (图 2a) 主要是由锋区前暖区对流和地形辐合抬升共同作用造成的。冷锋在过山时 (06 时、07 时) 受到七曜山抬升作用, 在迎风坡爬山时上升运动明显加强, 同时触发锋前强不稳定能量释放, 造成对流性和稳定性混合的短时强降雨。总之, 在有利的动力和热力不稳定条件下, 局地地形抬升作用导致了万州局地特大暴雨的发生。

考虑到万州东部地区的方斗山和七曜山地形作用, 对复杂地形地面要素进一步分析。4 日 00 时 (图 9a), 冷空气影响四川东北部和重庆东北部, 在重庆东北部 108°E 以西和 31°N 以北地区有等温线的密集区, 形成了西南—东北走向的冷锋锋区, 锋后有强的偏北气流, 锋前偏北气流较弱。同时, 方斗山以东湖北省恩施地区为明显的冷区, 对应的地面辐散

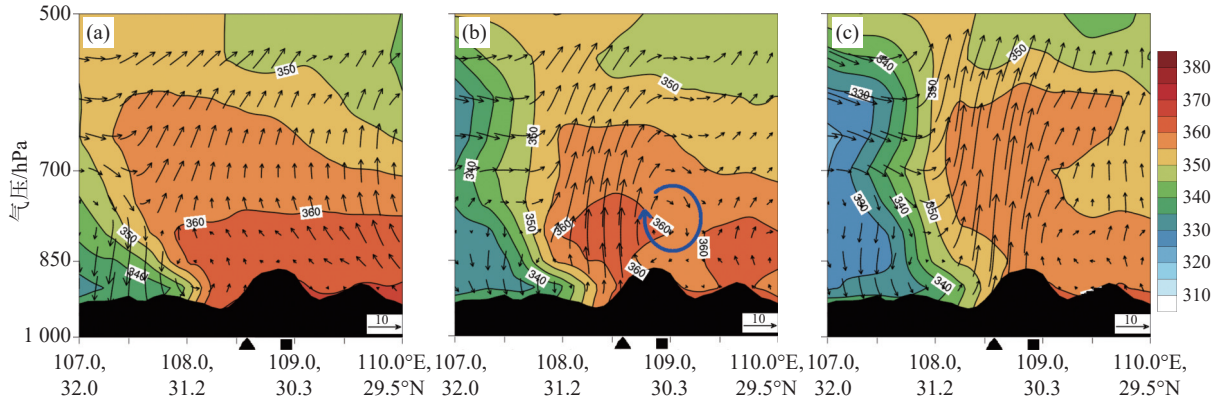


图 8 2023 年 7 月 4 日 00 时 (a)、04 时 (b) 和 06 时 (c) 沿图 6a 黄线西北—东南向经纬风与垂直速度合成的垂直环流 (箭头, 单位: $m\cdot s^{-1}$) 和 θ_{se} (填色, 单位: K) (黑色阴影表示地形; 黑色三角形和正方形分别为长滩镇站和七曜山, 下同; 蓝色箭头为次级环流)

Fig. 8 Composite vertical circulation (arrow, unit: $m\cdot s^{-1}$) along the yellow line in Fig. 6a from the northwest to southeast of longitude and latitude winds and vertical velocity, θ_{se} (colored shading, unit: K) at (a) 00:00 BT, (b) 04:00 BT and (c) 06:00 BT on 4 July 2023 (The black shading is terrain. The black triangle represents the location of Changtan Town station and black square indicates the location of Qiyao Mountain. The blue arrow indicates secondary circulation)

气流与冷锋前的西北气流形成了与方斗山走向一致的西南—东北走向中尺度辐合线, 此时冷锋前侧暖区温度≥25℃, 在锋区附近及暖区有零散的对流单体生成。04 时 (图 9b), 随着冷锋锋区向东南方向移动, 锋区前侧移近长滩镇附近, 锋前气流受七曜山迎风坡抬升作用, 在山后形成弱的次级环流 (图 8b), 增强了地面辐散气流, 导致中尺度辐合线仍维持到 05 时, 辐合线附近对流明显加强, 同时在长滩镇形成辐合中心, 辐合线附近出现大范围超过 30 dBz 的强回波 (图 5c), 进一步使得 MCS 快速发展。06 时 (图 9c), 冷锋东移与中尺度辐合线叠加, 锋区受到七曜山抬升作用, 此时低涡切变线正好经过长滩镇上空, 即低涡切变线的叠加影响, 导致上升运动达到最强 (图 6d), 导致了 MCS 成熟稳定维持。07 时 (图略), 锋区进一步东移, 移出万州区, 地面中尺度辐合线消失, 回波强度减弱, 降雨逐渐减弱结束。

在冷锋向东南方向推进过程中, 局地的热力不稳定作用触发了万州区中西部地区冷锋前暖气团中对流单体的新生, 在方斗山峡谷地形作用形成的中尺度辐合线及七曜山对锋面的抬升作用下, 导致了万州中西部对流单体东移过程中加强, 同时与重庆中西部西南—东北走向的对流合并加强并向东北方向移动, 共同导致万州长滩镇局地的对流维持发展 (回波最大强度达到 50 dBz) 以及强降雨的发生。

4.2 造成水汽聚集

7 月 4 日 00 时 (图 10a), 锋区位于重庆东北部地区附近, 锋区上空存在向冷区倾斜的水汽辐合区 (中心值达−15 $g\cdot(s\cdot hPa)^{-1}\cdot cm^{-2}$)。04 时 (图 10b), 锋区位于长滩镇附近, 在七曜山迎风坡和长滩镇上空存在明显水汽强辐合 (−10 $g\cdot(s\cdot hPa)^{-1}\cdot cm^{-2}$), 最强中心低于−22.5 $g\cdot(s\cdot hPa)^{-1}\cdot cm^{-2}$, 且 850 hPa 水汽通量散度大值区与七曜山迎风坡地形高度分布重叠, 这表明在七曜山地形抬升作用下, 垂直水汽输送明显增强, 地

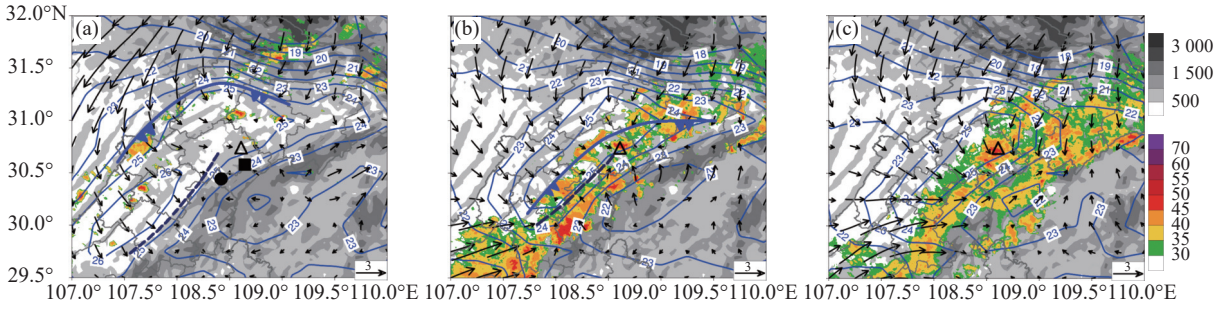


图 9 2023 年 7 月 4 日 00 时 (a)、04 时 (b) 和 06 时 (c) 地面风场 (箭头, 单位: $m\cdot s^{-1}$)、温度场 (等值线, 单位: ℃)、雷达组合反射率因子 (填色, 单位: dBz) 和地形高度 (阴影, 单位: m) 分布 (虚线为辐合线, 图 a 中黑色圆形表示方斗山位置)

Fig. 9 Surface wind field (unit: $m\cdot s^{-1}$), temperature field (unit: ℃), combined reflectivity factor (colored shading, unit: dBz) and terrain height (grey shading, unit: m) at (a) 00:00 BT, (b) 04:00 BT, (c) 06:00 BT on 4 July 2023 (The dashed line indicates convergence line, black circle indicates the location of Fangdou Mountain)

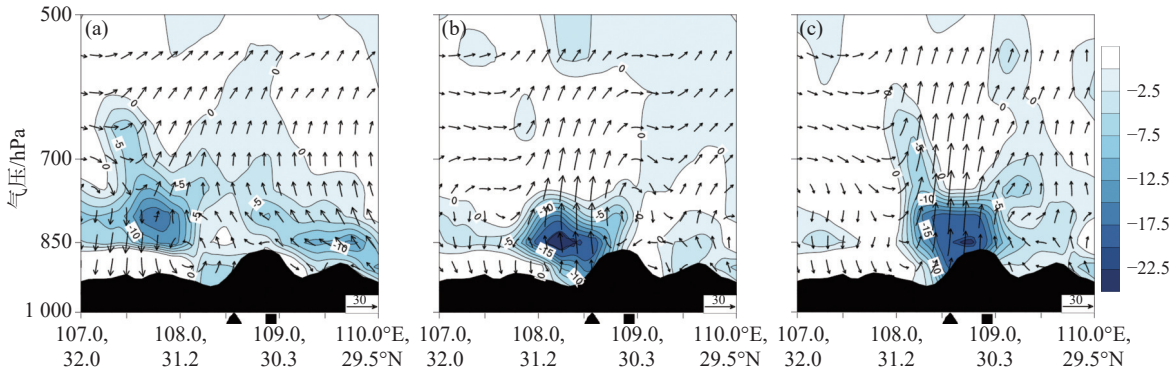


图 10 2023 年 7 月 4 日 00 时 (a)、04 时 (b) 和 06 时 (c) 沿图 6a 中黄线的水平水汽通量与垂直水汽通量合成的垂直环流 (箭头, 单位: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}) 和各层水汽通量散度 (填色, 单位: g·(s·hPa)$^{-1}$·cm^{-2})

Fig. 10 Composite vertical circulation (arrow, unit: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}) of longitude and latitude water vapor flux and vertical water vapor flux, divergence of water vapor flux at each level (shading, unit: g·(s·hPa)$^{-1}$·cm^{-2}) at (a) 00:00 BT, (b) 04:00 BT and (c) 06:00 BT on 4 July 2023

形对水汽具有显著的聚集作用。06 时 (图 10c), 锋区继续向七曜山推进, 山顶及靠近迎风坡一侧上空为明显水汽辐合大值区, 且大值区向上扩展到 850 hPa 以上。04—07 时, 特大暴雨区上空水汽主要来源于 850 hPa 附近的水汽辐合, 地形作用导致水汽聚集抬升, 使得湿空气处于饱和状态, 有助于降雨效率提高; 水汽通量散度大值区位于万州区长滩镇特大暴雨上空, 水汽强辐合中心则位于地形迎风坡附近特大暴雨区, 且水汽聚集时段与特大暴雨发生时段一致 (图 2a)。

5 关键影响因子与概念模型

受稳定维持的低涡切变线影响, 同时在万州区东部山地地形作用下, MCS 长时间维持, 导致了万州区长滩镇“7.4”持续性、局地性的特大暴雨过程。综合上文分析, 总结出此次过程概念模型 (图 11), 其预报关键因子如下: (1) 副高缓慢东退过程中, 其外围强盛的西南暖湿气流与高空冷槽引导下的偏北气流交汇, 形成了稳定维持西南—东北走向低涡切变线的动力条件因子。(2) 万州区长滩镇高不稳定能量锋区控制下 (θ_{se} 中心强度≥360 K), 提供了强降雨区触发对流的不稳定条件因子。(3) 强降雨过程中具有强烈的垂直上升运动条件 (中心最大垂直速度≤−1.6 Pa·s^{-1})。(4) 强降雨区为明显的水汽辐合区条件 (水汽通量散度≤−10 g·(s·hPa)$^{-1}$·cm^{-2})。(5) 局地地形作用下的锋面动力抬升作用, 促使垂直上升运动增强和水汽聚集, 同时在地形作用下的中尺度辐合线, 导致 MCS 发展和维持。

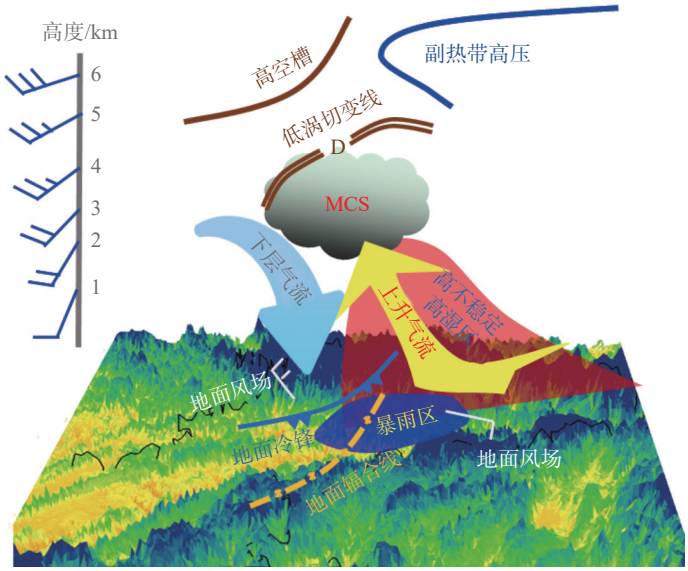


图 11 2023 年重庆长滩镇“7.4”局地特大暴雨天气概念模型

Fig. 11 Weather conceptual model map of the weather system for "7.4" local extremely heavy rainstorm in Changtan Town, Chongqing in 2023

6 结论和讨论

本文基于地面气象站、FY-4A、多普勒天气雷达、CLDAS 融合和 ERA5再分析等资料, 对 2023 年重庆万州区长滩镇“7.4”局地特大暴雨的实况特征、环流形势、环境条件进行了分析, 研究了 MCS 特征和成因机制, 重点分析了复杂地形作用, 并总结了过程形成的关键因子和概念模型, 得到以下主要结论:

(1) 高空冷槽引导入侵四川盆地的冷空气与缓慢东退的副高外围暖湿气流交汇, 形成了稳定维持的西南—东北走向的低涡切变线, 形成了≤−0.8 Pa·s^{-1} 垂直速度上升运动区, 为特大暴雨提供了强有利的动力条件, 同时特大暴雨区万州区长滩镇为整层可降雨量超过 70 mm 高湿区, 以及 θ_{se} 中心强度≥360 K 高不稳定能量锋区。

(2) 在稳定维持的中尺度低涡切变线动力作用下, 万州区西部小尺度对流云团和重庆西南部对流云团合并, 中小尺度对流系统得以发生、发展且成熟维持, 形成了造成万州区长滩地区强降雨的 MCS, 并进一步促使西南—东北走向带状回波不断东移至万州区长滩镇, 同时在万州区中西部多个对流单体生成并东移与南部带状强回波合并, 导致带状回波进一步增强, 形成了 04—07 时万州长滩地区强回波“列车效应”, 导致连续 4 h 出现超过 40 mm·h^{-1} 短时强降雨。

(3) 万州区东部的复杂地形具有明显抬升作用, 锋区经过长滩镇过程中, 在七曜山地形抬升作用下, 中心垂直速度达到−1.6 Pa·s^{-1} 以下, 水汽通量散度达到−10 g·(s·hPa)$^{-1}$·cm^{-2} 以下, 进一步增强垂直上升运动和水汽聚集效应; 在方斗山地形作用下形成的中尺度地形辐合线, 与锋区的叠加, 进一步维持和增强了 MCS, 即复杂地形的叠加效应共同导致万州长滩局地特大暴雨发生。

本文针对重庆万州区长滩镇“7.4”特大暴雨的 MCS 特征和形成机制进行了研究, 重点分析局地地形作用, 尤其地形对此次过程的动力抬升和水汽聚集作用, 后续将加强复杂地形下的多尺度系统相互作用机制研究, 尤其加强复杂地形作用下暴雨的边界层抬升触发和维持机制的研究; 同时加强低涡切变线影响下的局地极端降雨的形成机制研究, 尤其是对造成极端降雨的异常关键因子 (垂直速度和水汽等) 极端信号强度的分析。

参考文献 (References):

陈博宇,谌芸,孙继松,等.2023.诱发四川冕宁“6.26”山洪灾害的突发性暴雨特征及其形成机制[J].大气科学,47(1):1−19. Chen B Y, Chen Y, Sun J S, et al. 2023. Characteristics and formation mechanism of the sudden rainstorm inducing the “6.26” mountain torrent disaster in Mianning, Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,47(1):1−19 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2201.21186

陈永仁.2024.四川极端性暴雨的研究进展及新认识[J].高原山地气象研究,44(1):1−9. Chen Y R. 2024. Research progress and new understanding of extreme rainstorms in Sichuan [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(1):1−9 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.01.001

邓承之,张焱,李强,等.2023.四川盆地一次暖性西南低涡大暴雨的中尺度分析[J].暴雨灾害,42(1):24−36. Deng C Z, Zhang Y, Li Q, et al. 2023. Mesoscale analysis on one warm southwest vortex rainstorm in the Sichuan Basin [J]. Torrential Rain and Disasters,42(1):24−36 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−024

顾清源,周春花,青泉,等.2008.一次西南低涡特大暴雨过程的中尺度特征分析[J].气象,34(4):39−47. Gu Q Y, Zhou C H, Qing Q, et al. 2008. Mesoscale characteristics analysis of severe torrential rain caused by a southwestern low vortex process [J]. Meteorological Monthly,34(4):39−47 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2008.04.005

金妍,李国平.2021.爬流和绕流对山地突发性暴雨的影响[J].高原气象,40(2):314−323. Jin Y, Li G P. 2021. Impact of flow around and flow over in sudden rainstorm on mountains [J]. Plateau Meteorology,40(2):314−323 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2020.00041

李跃清.2000.青藏高原上空环流变化与其东侧旱涝异常分析[J].大气科学,24(4):470−476. Li Y Q. 2000. Analysis of circulation variations over the Tibetan Plateau and drought-flood anomalies on its eastern side [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,24(4):470−476 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2000.04.04

卢萍, 李跃清.2021.增强副热带高压对西南涡影响的数值试验[J].大气科学,45(4):851−862. Lu P, Li Y Q. 2021. Simulation of effect of subtropical high enhancement on southwest vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,45(4):851−862 (in Chinese) doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2008.20161

庞轶舒,马振峰,杨淑群,等.2017.盛夏高原季风指数的探讨及其对四川盆地降水的影响[J].高原气象,36(4):886−899. Pang Y S, Ma Z F, Yang S Q, et al. 2017. Discussion of plateau monsoon index and its impact on precipitation in Sichuan Basin in midsummer [J]. Plateau Meteorology,36(4):886−899 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2016.00027

齐铎,崔晓鹏,邹强利.2023. 2020 年“6·26”冕宁致灾暴雨成因观测分析[J].大气科学,47(2):585−598. Qi D, Cui X P, Zou Q L. 2023. Observational analysis of the causes for the heavy rainfall Case in Mianning on 26 June 2020 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,47(2):585−598 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2206.21149

邱静雅,李国平,郝丽萍.2015.高原涡与西南涡相互作用引发四川暴雨的位涡诊断[J].高原气象,34(6):1556−1565. Qiu J Y, Li G P, Hao L P. 2015. Diagnostic analysis of potential corticity on a heavy rain in Sichuan Basin under interaction between plateau vortex and southwest vortex [J]. Plateau Meteorology,34(6):1556−1565 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2014.00117

冉令坤,齐彦斌,郝寿昌,等.2014. “7.21”暴雨过程动力因子分析和预报研究[J].大气科学,38(1):83−100. Ran L K, Qi Y B, Hao S C, et al. 2014. Analysis and forecasting of heavy rainfall case on 21 july 2012

with dynamical parameters [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,38(1):83−100 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2013.12160

宋雯雯,李国平,叶瑶.2024.基于多源资料的四川盆地西部一次持续性极端暴雨过程分析[J].暴雨灾害,43(1):13−22. Song W W, Li G P, Ye Y. 2024. Analysis of a sustained extreme rainstorm event in western Sichuan Basin by using multi-source data [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):13−22 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−221

师春香,潘旸,谷军霞,等.2019.多源气象数据融合格点实况产品研制进展[J].气象学报,77(4):774−783. Shi C X, Pan Y, Gu J X, et al. 2019. A review of multi-source meteorological data fusion products [J]. Acta Meteorologica Sinica,77(4):774−783 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2019.043

王婧羽,崔春光,陈杨瑞雪,等.2022.西南山区 5—8 月产生突发性暴雨事件的中尺度对流系统的时空分布特征[J].气象学报,80(1):21−38. Wang J Y, Cui C G, Chen Y R X, et al. 2022. Temporal and spatial characteristics of mesoscale convective systems associated with abrupt heavy rainfall events over Southwest China during May—August [J]. Acta Meteorologica Sinica,80(1):21−38 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2022.006

王晓芳,李山山,汪小康,等.2022.秦巴山脉“4·23”区域性暴雨的若干异常特征[J].气象,48(3):345−356. Wang X F, Li S S, Wang X K, et al. 2022. Anomalous characteristics of regional torrential rain in Qinling and Daba mountains on 23 April 2021 [J]. Meteorological Monthly,48(3):345−356 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.093002

肖红茹, 王佳津,肖递祥,等.2021.四川盆地暖区暴雨特征分析[J].气象,47(3):303−316. Xiao H R, Wang J J, Xiao D X, et al. 2021. Analysis of warm-sector rainstorm characteristics over Sichuan Basin [J]. Meteorological Monthly,47(3):303−316 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.03.004

谢家旭,李国平.2021.重力波与对流耦合作用在一次山地突发性暴雨触发中的机理分析[J].大气科学,45(3):617−632. Xie J X, Li G P. 2021. Mechanism analysis of a sudden rainstorm triggered by the coupling of gravity wave and convection in mountainous area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,45(3):617−632 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2009.20137

徐祥德,陶诗言,王继志,等.2002.青藏高原-季风水汽输送“大三角扇型”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系[J].气象学报,3(3):257−266. Xu X D, Tao S Y, Wang J Z, et al. 2002. The relationship between water vapor transport features of Tibetan Plateau-Monsoon “Large Triangle” affecting region and drought-flood abnormality of China [J]. Acta Meteorologica Sinica,3(3):257−266 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2002.032

叶朗明,苗峻峰.2014.华南一次典型回流暖区暴雨过程的中尺度分析[J].暴雨灾害,33(4):342−350. Ye L M, Miao J F. 2014. Mesoscale analysis of a typical heavy rain event caused by returning flow in the warm sector in southern China [J]. Torrential Rain and Disasters,33(4):342−350 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2021.00038

张芳丽,李国平,罗潇.2020.四川盆地东北部一次突发性暴雨事件的影响系统分析[J].高原气象,39(2):321−332. Zhang F L, Li G P, Luo X. 2020. Some influence factors of a sudden rainstorm event in northeast Sichuan Basin of China [J]. Plateau Meteorolog,39(2):321−332 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2019.00080

郑永光,陈炯,朱佩君.2008.中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征[J].科学通报,53(4):471−481. Zheng Y G, Chen J, Zhu P J. 2008. Climatological distribution and diurnal variation of mesoscale convective systems over China and its vicinity during summer [J]. Chinese Science Bulletin,53(4):471−481 (in Chinese). doi:10.1360/csb2008−53−4−471

竹利,康岚,陈永仁,等.2024.青藏高原东坡两次暴雨的 MCS 演变及机理对比分析[J].暴雨灾害,43(5):509−520. Zhu L, Kang L, Chen Y R, et al. 2024. MCS evolution and mechanism comparison in the two rainstorm events on the eastern slope of the Qinghai Tibet Plateau [J]. Torrential Rain and Disasters,43(5):509−520 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−225

赵衍斌,李强,周盈颖,等.2023.重庆西部平行岭谷地形作用下的一次局地暴雨天气过程的分析[J].气象,49(6):657−670. Zhao Y B, Li Q, Zhou Y Y, et al. 2023. Analysis of a local rainstorm process in western Chongqing under the effect of parallel ridge-valley topography [J]. Meteorological Monthly,49(6):657−670 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2023.021701

Bao X H, Zhang F Q, Sun J H. 2011. Diurnal variations of warm-season precipitation east of the Tibetan Plateau over China [J]. Monthly Weather Review,139(9):2790−2810. doi:10.1175/MWR−D−11−00006.1

Chen H M, Li J, Yu R C. 2018. Warm season nocturnal rainfall over the eastern periphery of the Tibetan Plateau and its relationship with rainfall events in adjacent regions [J]. International Journal of Climatology,38(13):4786−4801. doi:10.1002/joc.5696

Chen Y, Wang X, Huang L, et al. 2021. Spatial and temporal characteristics of abrupt heavy rainfall events over Southwest China during 1981-2017 [J]. International Journal of Climatology,41:3286−3299. doi:10.1002/joc.7019

Hu X L, Yuan W H, Yu R C, et al. 2020. The evolution process of warm season intense regional rainfall events in Yaan [J]. Climate Dynamics,54(7–8): 3245−3258. doi:10.1007/s00382−020−05168−8

Isidoro Orlanski,汪秀仁.1984.对大气过程尺度的个种合理划分[J].气象科技,(3):55−58. Isidoro Orlanski, Wang X R. 1984. Various reasonable divisions of the scale of atmospheric processes [J]. Meteorological Science and Technology,(3):55−58 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.1984.03.009

Li Q, Zheng Y G, Zhou G B, et al. 2022. Diurnal variations of rainfall affected by complex topography based on high-density observation in Chongqing over southwest China [J]. Theoretical Applied Climatology,148:1373−1394. doi:10.1007/s00704−021−03918−0

Qian T, Zhao P, Zhang F, et al. 2015. Rainy-season precipitation over the Sichuan Basin and adjacent regions in southwestern China [J]. Monthly Weather Review,143(1):383−394. doi:10.1175/MWR−D−13−00158.1

Zhang Y C, Sun J H, Fu S M. 2014. Impacts of diurnal variation of mountain-plain solenoid circulations on precipitation and vortices east of the Tibetan Plateau during the Meiyu season [J]. Advances in Atmospheric Sciences,31(1):139−153. doi:10.1007/s00376−013−2052−0

Zhang Y H, Xue M, Zhu K F, et al. 2019. What is the main cause of diurnal variation and nocturnal peak of summer precipitation in Sichuan Basin, China? The key role of boundary layer low-level jet inertial oscillations [J]. Journal of Geophysical Research,24:2463−2664. doi:10.1029/2018JD029834

(责任编辑 唐国瑛)