

肖红茹,周春花,龙柯吉,等,2025. 四川盆地两次持续性极端暴雨对比分析[J]. 气象,51(3):269-284. Xiao H R, Zhou C H, Long K J, et al, 2025. Comparative analyses of two persistent extreme rainstorms in Sichuan Basin [J]. Meteor Mon, 51(3):269-284(in Chinese).

四川盆地两次持续性极端暴雨对比分析^{*}

肖红茹^{1,2} 周春花³ 龙柯吉¹ 谌 芸⁴ 但 玻¹

1 四川省气象台,成都 610072

2 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,成都 610072

3 四川省气象灾害防御技术中心,成都 610072

4 国家气象中心,北京 100081

提 要: 2020 年 8 月 10—13 日、14—18 日(分别简称“8. 10-13”“8. 14-18”),四川盆地连续出现两次持续性极端暴雨天气过程,降水强度大,落区高度重叠,引发次生灾害导致人员伤亡和巨大经济损失。为了深入认识极端暴雨发生发展机制,理解其致灾机理,文章利用高空、地面观测、FY-4A 红外云图、多普勒雷达资料和 ERA5 再分析资料,对比分析了“8. 10-13”“8. 14-18”暴雨过程的降水特征和最强降水阶段中尺度对流系统的发展演变及触发机制。结果表明:两次过程均发生在中高纬“两槽一脊”环流背景下,是盆地典型的“东高西低”型暴雨,都出现了极端降水。“8. 10-13”暴雨小时雨强超历史极值,“8. 14-18”暴雨小时雨强与历史统计值相当。“8. 10-13”暴雨最强降水阶段属于暖区强降水,由一个中尺度对流复合体(MCC)发生—发展—成熟—减弱过程导致,≥40 dBz 的回波范围大,持续时间长,回波质心低,强度超过 55 dBz;“8. 14-18”暴雨最强降水阶段属于混合性降水,由两个 α 中尺度对流系统(α -MCS)发生—发展—合并—减弱过程导致,≥40 dBz 的回波范围小,持续时间短,低质心回波强度达 50 dBz。“8. 10-13”暴雨喇叭口地形绕流和迎风坡抬升作用及陡峭地形过渡区温度高梯度带触发对流,配合低层较强暖平流,高层弱冷平流,对流维持;“8. 14-18”暴雨对流层低层冷暖气流交汇辐合抬升和暖区低空急流左侧辐合触发了对流,冷暖气流交汇形成的切变使得降水持续。

关键词: 四川盆地,极端暴雨,短时强降水,MCC,MCS,对比分析

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2025. 011601

Comparative Analyses of Two Persistent Extreme Rainstorms in Sichuan Basin

XIAO Hongru^{1,2} ZHOU Chunhua³ LONG Keji¹ CHEN Yun⁴ DAN Bo¹

1 Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610072

2 Sichuan Key Laboratory of Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin, Chengdu 610072

3 Sichuan Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Chengdu 610072

4 National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Two persistent extreme rainstorms occurred in Sichuan Basin during 10—13 and 14—18 August 2020 resulting in secondary disasters, casualties, and huge economic losses. To deeply understand the development mechanism of extreme rainstorms and the disaster-causing mechanism, using various observations and ERA5 reanalysis data, we comparatively analyze the precipitation characteristics of these two

^{*} 国家自然科学基金项目(52239006,41930972,41975001 和 91937301)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J016)和中国气象局西南区域气象中心创新团队基金(XNQYCXTD-202202)共同资助

2024 年 6 月 27 日收稿; 2025 年 1 月 11 日收修定稿

第一作者:肖红茹,主要从事天气预警预报工作和高原东侧灾害性天气研究. E-mail:13927919@qq. com

通讯作者:谌芸,主要从事中尺度天气研究. E-mail:chenyun@cma. gov. cn

rainstorms, and the development, evolution and trigger mechanism of mesoscale convective systems (MCSs) in the heaviest precipitation stage. The results show that the two rainstorm processes both occurred under the circulation background with “two troughs and one ridge” in the middle and high latitudes. They were typical rainstorms accompanied by “east-high-pressure and west-low-pressure” in the basin, and brought precipitation over $250 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (or $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$). The hourly rainfall of the 10–13 August rainstorm exceeded the historical extremes, while that of the 14–18 August rainstorm was equivalent to the historical statistical value. The most intense precipitation stage of the 10–13 August rainstorm was a warm-sector rainstorm, which was caused by a mesoscale convective complex occurrence-development-maturation-weakening process. The radar echo areas $\geq 40 \text{ dBz}$ in this rainstorm were wide and long-lasting. And the echo centroid was low and the intensity was more than 55 dBz . The heaviest precipitation phase of the 14–18 August rainstorm was a mixed precipitation induced by a two α -MCS occurrence-development-merger-weakening process. The radar echo areas $\geq 40 \text{ dBz}$ were narrow and short-lived. The echo centroid was low and the intensity reached 50 dBz . Convection in the 10–13 August rainstorm was produced by horn-mouth terrain flow, windward slope uplift and high temperature gradient zone, and was sustained with strong warm advection at low level, weak cold advection at high level at the same time. The 14–18 August rainstorm convection was triggered by the convergence of the lower troposphere cold, warm currents and the left convergence of the low-altitude jet stream in the warm zone. The shear formed by the intersection of the cold and warm currents led to the persistence of the precipitation.

Key words: Sichuan Basin, extreme rainstorm, short-time severe precipitation, mesoscale convective complex (MCC), mesoscale convective system (MCS), comparative analysis

引 言

在全球气候变暖背景下,极端天气事件频发,例如高温热浪、干旱、强降水等的频率更高且强度更大(秦大河,2014;王蕾等,2022)。近年来我国因极端强降水而引发的暴雨洪涝、泥石流、城市内涝等带来的人员伤亡和经济损失都越来越大,造成巨大的社会影响(湛芸等,2012;伍志方等,2018;苏爱芳等,2022;陈博宇等,2023;张芳华等,2023)。研究表明,我国陆地夏季极端强降水事件频次呈增多趋势(任正果等,2014;曾颖婷和陆尔,2015;罗玉等,2019),且日尺度和次日尺度的极端降水强度也呈增多、增强趋势(Xiao et al,2016;高荣等,2018;吴梦雯和罗亚丽,2019;张芳华等,2020)。加强极端降水特征及成因、强降水触发机制等的研究进而提高其预报准确率,是积极应对极端降水天气日趋常态的有效途径。

四川盆地四川地区形如向东南开口的“C”,其西部紧靠川西高原和川西南山地。东北—西南走向的龙门山脉位于盆地西缘,与成都平原相对高差达 2000 m 以上,由此形成盆西北陡峭地形迎风坡面和

盆西南雅安地区呈西北—东南走向的迎风喇叭口。特殊的地理位置和复杂的地形特征,导致盆地夏季暴雨频发(四川省气象局,2014),是我国短时强降水和极端降水事件发生的次大值区(陈炯等,2013;李建等,2013;吴梦雯和罗亚丽,2019),且强降水具有明显的日变化、夜发性和突发性(周秋雪等,2015;毛冬艳等,2018;肖递祥等,2017;2020;肖红茹等,2021),极端日降水出现在盆地西南部、西北部的概率大(张顺谦和马振峰,2011;肖递祥等,2017);短时强降水($\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)以 $[20, 30) \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 为主,超过 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时强降水突发性强,持续时间 1 h 以上容易造成极端降水事件,且小时降水量大于 50 mm 的极端强降水主要集中在盆地西部边缘地区(周秋雪等,2015;毛冬艳等,2018;肖红茹等,2021),因此极易造成山洪、滑坡、泥石流等次生灾害(冉津江等,2023)。

四川盆地极端暴雨天气学成因分析表明,高原低值系统(涡、槽、切变线)、西南低涡、低层切变线、低空急流等是暴雨的影响系统(杨康权等,2017;肖递祥等,2017;肖红茹等,2021;邓承之等,2021;张芳等,2022);暴雨发生在高能高湿和层结不稳定的有利环境条件下(肖递祥等,2015),由多个 γ 中尺度到

β 中尺度的对流系统发展形成 α 中尺度对流系统 (α -MCS) 导致极端降水, 在雷达回波图上可见“列车效应”(陈永仁等, 2014)。持续的极端暴雨强降水区除了有异常的大气可降水量外(肖递祥等, 2015), 还有来自中低纬地区的暖湿气流向盆地不断输送辐合, 并且有多条水汽路径同时输送(周长艳等, 2015; 王佳津等, 2015)。另外, 盆地边缘地形对强降水的产生有重要作用, 一方面使气流在山前辐合抬升, 另一方面使冷暖空气在山前对峙, 导致锋生作用加强(杨舒楠等, 2016)。

2020年8月10—13日、14—18日, 四川盆地连续出现两次持续性极端暴雨天气过程(分别简称“8.10-13”“8.14-18”), 降水强度大、持续时间长, 导致盆地西部暴雨区高度重叠, 雨强突破历史极值, 暴雨引发次生灾害和城市内涝造成人员伤亡和巨大经济损失。盆地西部自“5·12”大地震后, 龙门山脉地质结构脆弱, 泥石流、山洪等气象次生灾害与极端降水事件密切相关, 因此基于降水观测资料揭示强降水的极端性特征和成因进而深入理解致灾机理, 为此类事件的预警预报提供思路是很有必要的。

1 资料与方法

本文所用资料包括:(1)高空常规观测资料, 地面降水、气温、风场资料: 四川盆地自动气象观测站逐小时雨量、10分钟平均最大风, 经过质量控制后共4081站, 时段为2020年8月10日21:00至13日20:00、14日21:00至18日20:00(北京时, 下同), 芦山、绵竹1959—2020年逐日降水资料;(2)FY-4A红外云图资料、多普勒雷达基本反射率因子资料; 以上资料来自四川省气象台和国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>); (3)ERA5再分析资料(时间分辨率为1h, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$), 网址<https://cds.climate.copernicus.eu/>。主要采用统计和天气学方法对极端降水的时空分布特征和成因进行分析。

盆地对流层低层盛行东南风时, 在迎风坡往往会产生强迫抬升, 地形抬升速度 V_g 计算公式(傅抱璞, 1992)如下:

$$V_g = \frac{V}{2} \cos \sigma \sin 2\alpha$$

式中: V 为盛行风; $\sigma = \theta - \beta$, 为风向与坡向的交角, 其中 θ 为风向, β 为坡向; α 为坡度。

2 降水空间分布特征

“8.10-13”暴雨过程持续3d, 累计降水量超过250mm的站点有262个站, 主要分布在盆地西部山前(图1a), 最大累计降水量542.1mm, 位于盆地西北部的德阳什邡师古。逐日降水显示, 10—12日强降水区稳定在盆地西部, 呈东北—西南走向带状, 13日雨带东移(图略)。10日夜间至11日白天(图1b)是过程降水最强时段, 雨带窄, 位于龙门山前; 强度大, ≥ 50 mm降水中大暴雨以上占比64%, 有南北两个降水中心: 芦山芦阳镇429.2mm, 广汉新平镇369.9mm。“8.14-18”暴雨过程强降水稳定维持在盆地西部4d(图1c), 累计降水量超过250mm的站点有832个站, 最大累计降水量865.1mm, 位于盆地西北部德阳旌阳区黄许镇。逐日降水显示(图略), 强降水区也呈东北—西南走向带状, 14—17日大暴雨区主要位于盆地西北部, 18日大暴雨区主要位于盆地西南部(图略)。15日夜间至16日白天是过程降水最强阶段, 大暴雨范围明显宽于10—11日, ≥ 50 mm降水中大暴雨以上占比51%, 降水中心: 黄许镇540.1mm(图1d)。

由上分析可知, 两次过程累计降水量中心邻近, 均位于盆地西北部, “8.14-18”暴雨在盆地西部持续时间更长, 落区高度重叠, 导致更强的累计降水量。最强降水阶段, “8.10-13”过程强降水落区窄, 靠山, “8.14-18”过程强降水落区更宽, 但大暴雨占比不如前者。

3 降水极端性特征

3.1 日尺度降水极端性差异

张顺谦和马振峰(2011)针对1961—2009年四川极端强降水的气候统计分析中指出, 四川盆地50年一遇的日降水量为230mm以上, 100年一遇的日降水量为260mm以上。“8.10-13”暴雨中有7个国家站日降水量超过230mm, 4个国家站日降水量超过260mm, 其中4个站创有气象记录以来日降水量极值, 芦山(425.2mm)为四川省国家站历史日降水量第二高值, 第一高值为峨眉山(524.7mm, 1993年7月29日); “8.14-18”暴雨中有6个国家站日降水量超过230mm, 3个国家站日降水量超过

260 mm, 其中 2 个站创有气象记录以来日降水量极值。从两次过程降水中心国家站芦山、绵竹(302.6 mm)自 1959 年建站以来日降水量 ≥ 100 mm 降水量排序来看, 2 个站日降水量均排位第一(图 2), 属于极端降水, 且芦山站降水量与排位第二的差值

达 236.6 mm, 绵竹站降水量与排位第二的差值仅 10.1 mm。

由上可知, 两次暴雨过程在日尺度降水上都具有明显的极端性, 但“8.10-13”暴雨极端强度更强。

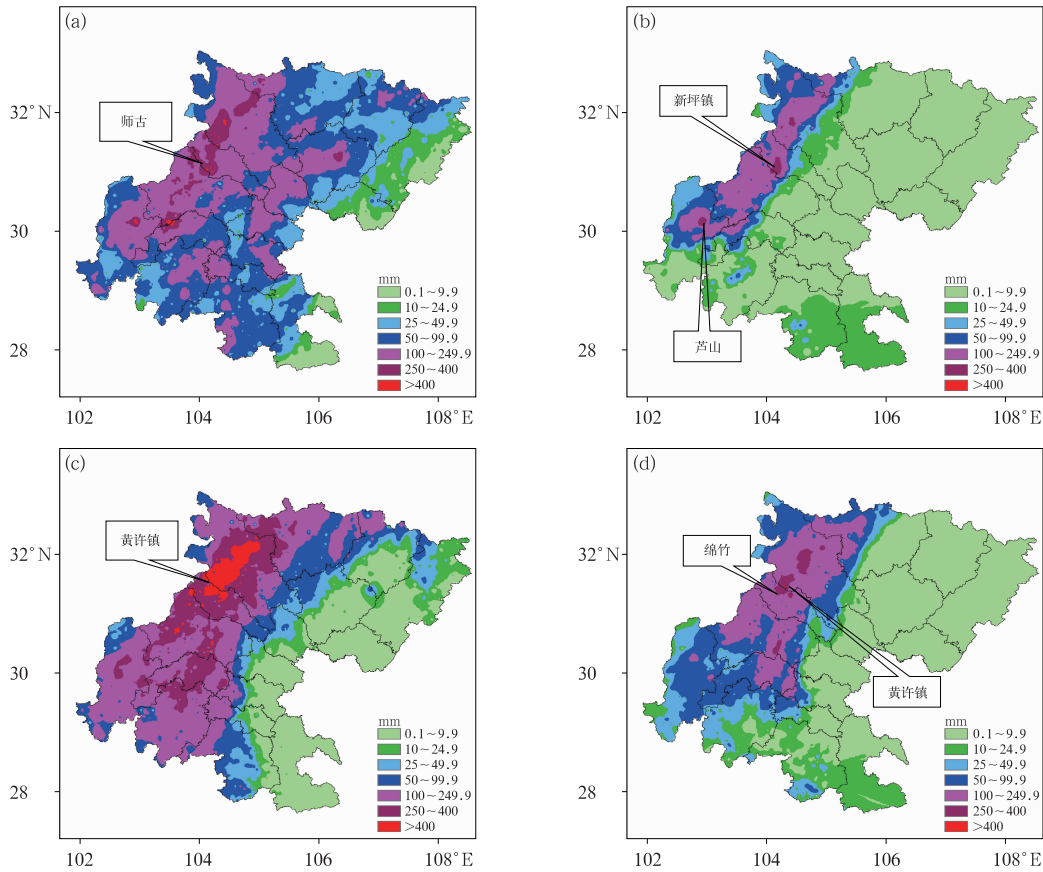


图 1 2020 年 8 月(a)10 日 21:00 至 13 日 20:00, (b)10 日 21:00 至 11 日 20:00, (c)14 日 21:00 至 18 日 20:00, (d)15 日 21:00 至 16 日 20:00 四川盆地累计降水量空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of accumulated precipitation in Sichuan Basin during

(a) 21:00 BT 10 to 20:00 BT 13, (b) 21:00 BT 10 to 20:00 BT 11,

(c) 21:00 BT 14 to 20:00 BT 18 and (d) 21:00 BT 15 to 20:00 BT 16 August 2020

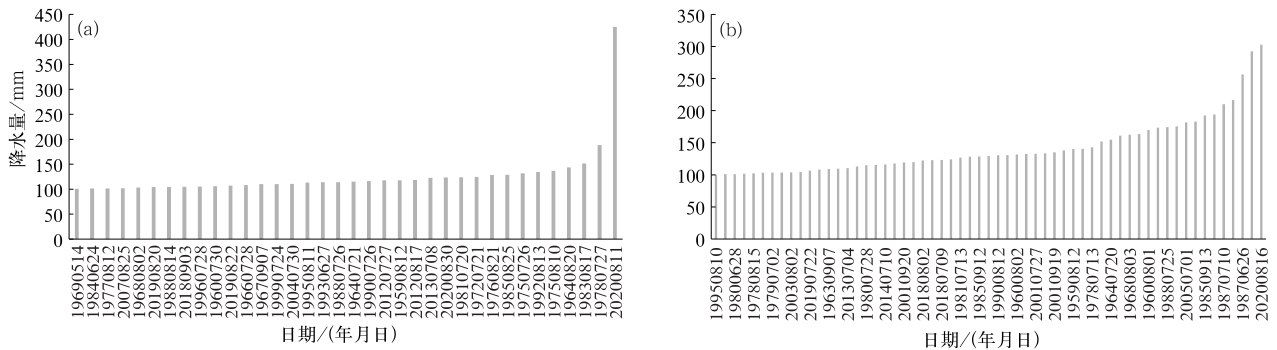


图 2 1959—2020 年(a)芦山站, (b)绵竹站日降水量 ≥ 100 mm 降水量排序

Fig. 2 Rainfall ranking of daily precipitation ≥ 100 mm at

(a) Lushan and (b) Mianzhu stations from 1959 to 2020

3.2 阶段性小时极端降水差异

“8.10-13”暴雨降水有3个阶段(图3a):第一阶段为10日夜间至11日白天,雨强大,持续时间长,无明显日变化,有2个降水量峰值。11日00:00—06:00为1个降水高峰,强降水范围窄,集中在盆地

西南部雅安地区;最大小时雨强普遍 $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,多个站点小时降水量持续超过70 mm,最大雨强出现在01:00的芦山芦阳镇磨刀,为 $156.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,芦山清仁连续3小时降水量超过100 mm,芦山本站最大雨强 $134.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图3c),打破盆地国家站小时最大降水量值(毛冬艳等,2018)。从最

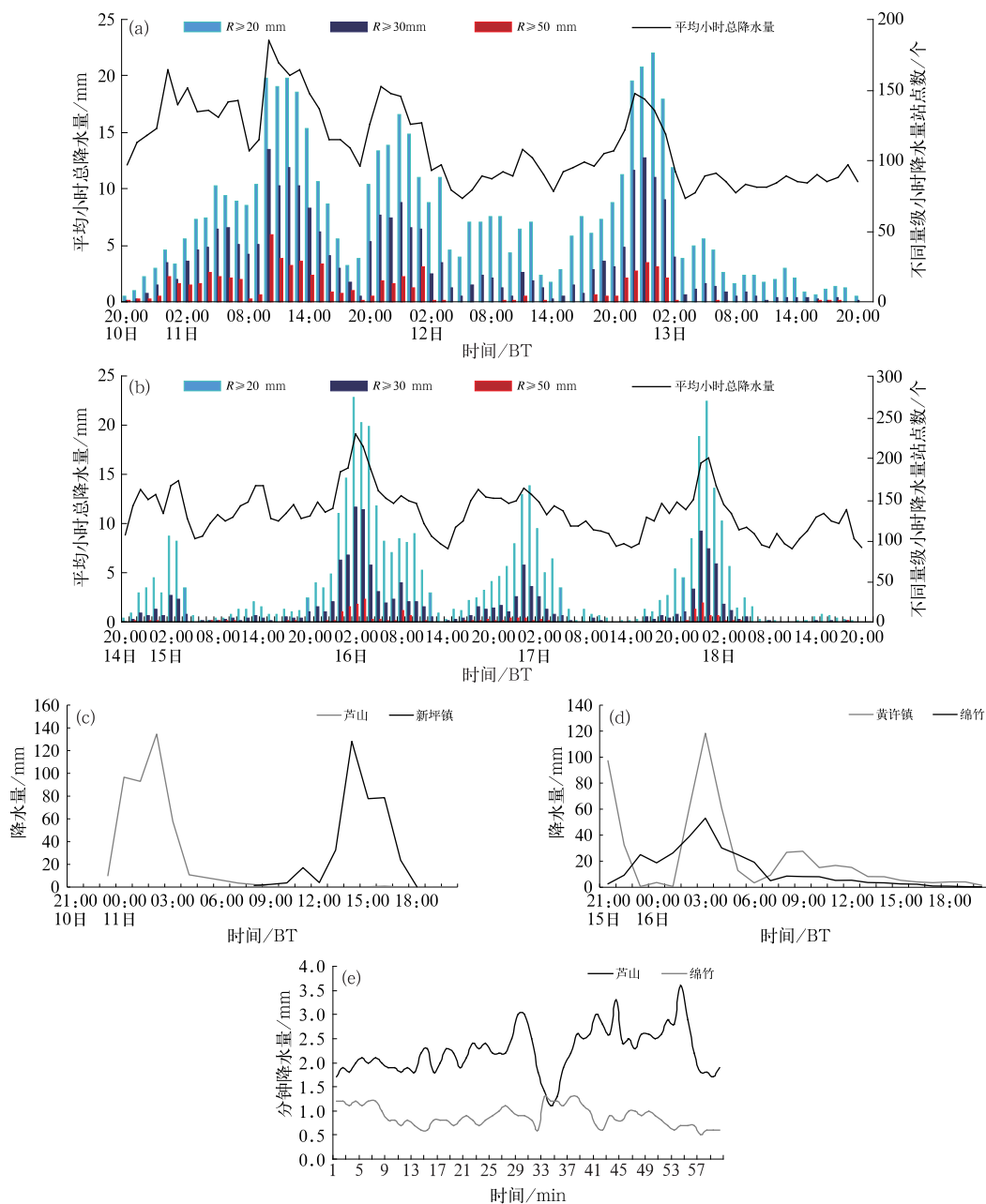


图3 2020年8月(a)10日20:00至13日20:00,(b)14日20:00至18日20:00平均小时总降水量和不同量级小时降水量站点数;(c)10日21:00至11日20:00芦山和新坪镇,(d)15日21:00至16日20:00绵竹和黄许镇小时降水量序列;(e)11日02:00芦山和16日03:00绵竹分钟降水量序列

Fig. 3 (a, b) Average hourly total precipitation and stations of hourly rainfall of different orders during (a) 20:00 BT 10 to 20:00 BT 13, (b) 20:00 BT 14 to 20:00 BT 18; (c, d) time series of hourly rainfall at (c) Lushan and Xinpingzhen stations during 21:00 BT 10 to 20:00 BT 11, at (d) Mianzhu and Huangxuzhen stations during 21:00 BT 15 to 20:00 BT 16; (e) time series of minute rainfall at Lushan Station at 02:00 BT 11 and at Mianzhu Station at 03:00 BT 16 August 2020

强小时降水的分钟降水序列图上可以看到,分钟降水量普遍在 2~3 mm(图 3e)。11 日 09:00—16:00 为另一个降水高峰,强降水范围较广,位于盆地西北部,小时雨强 $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的站点占比 57%,最大雨强出现在德阳广汉三星,为 $138.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 3c)。第二、三阶段降水分别是 11 日夜间至 12 日中午、12 日傍晚至 13 日早上,都具有明显的日变化,最大小时雨强 $99.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。整个过程小时雨强为 $[20, 30) \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的占比 53.2%, $[30, 50) \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的占比 33.9%, $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的占比 12.9%。

“8.14-18”暴雨降水有 4 个阶段,均具有明显日变化(图 3b),第一阶段强降水出现在 14 日 22:00 至 15 日 04:00,降水范围窄,小时雨强普遍 $< 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (73.2%)。第二阶段强降水发生在 15 日 23:00 至 16 日 11:00,是整个过程降水最强阶段,小时雨强 $[20, 30) \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的站数占比 60%,峰值出现在 16 日 00:00—05:00,最大雨强出现在德阳黄许镇,为 $118.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 02:00—04:00 小时降水量持续超过 60 mm,绵竹站最大雨强出现在 03:00 ($53.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) (图 3d),其分钟降水量普遍低于 1.2 mm,明显弱于芦山(图 3c),但降水小时数明显多于芦山,导致极端累计降水量。第三阶段强降水发生在 16 日 18:00 至 17 日 05:00,最大小时雨强为 $70.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。第四阶段强降水发生在 17 日 20:00 至 18 日 04:00,最大小时雨强为 $85 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。整个过程小时雨强 $[20, 30) \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的占比 66.1%, $[30, 50) \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的占比 29.4%, $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的占比 4.5%。

由上可见,两次过程小时雨强均有明显极端性,但“8.10-13”暴雨小时雨强更强,极端性更显著,明显偏强于历史统计结果,而“8.14-18”暴雨小时雨强和历史统计结果相当(毛冬艳等,2018;冉津江等,2023),但降水时间长导致累计降水量大。

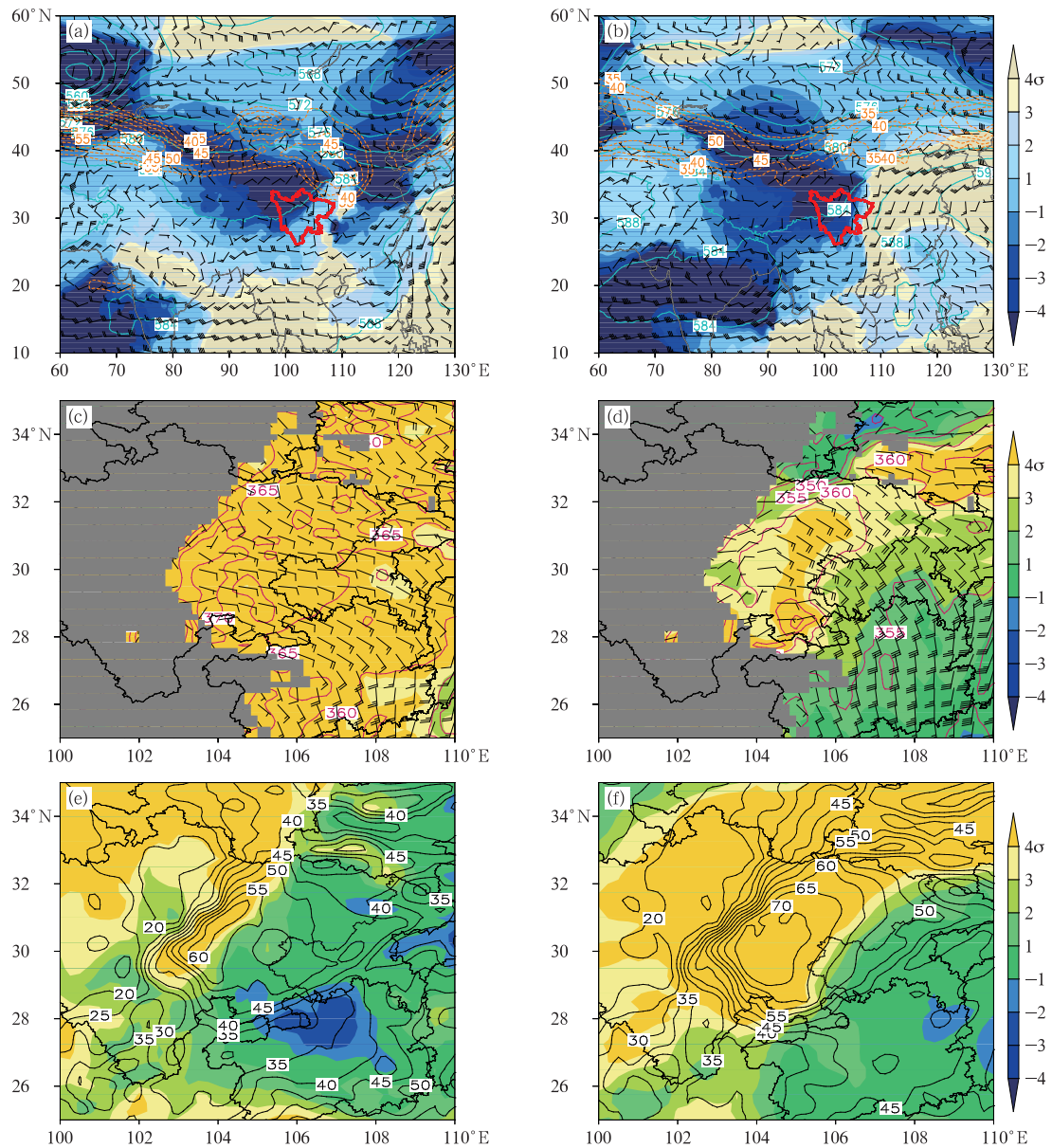
4 环流形势及物理条件异常

两次暴雨过程均发生在 500 hPa 欧亚中高纬“两槽一脊”,中纬度为“东高西低”(肖递祥等,2017;郭云云等,2022;周春花等,2022)的环流形势下,中低纬阿拉伯海到孟加拉湾一带有热带风暴活动,有利于热带暖湿气流向我国西南输送。新疆地区到青藏高原东侧一带高度场较 30 年(1990—2019 年)气

候平均异常偏低,标准化异常度达 3σ ,我国西北地区和青藏高原持续有低值系统东移,川渝东侧受西太平洋副热带高压(以下简称副高)影响;高层 200 hPa 四川盆地均处在高空急流右侧分流区(图 4a, 4b)。地面图上盆地东部存在热低压。

“8.10-13”暴雨 10 日夜间至 12 日白天,西风带低槽和高原槽东移叠加,经向度加深,盆地西部处于槽前,同时副高加强西伸,588 dagpm 线由浙闽一带西伸到鄂西—渝东南—云贵一线;700 hPa 云贵到盆地偏南气流加强为急流,11 日 08:00 温江风速达到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,并出现气旋弯曲,12 日盆地出现西南涡;850 hPa 华南经贵州到川渝南转东南偏东气流,同样在 11 日 08:00 达到急流强度(重庆东南风 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),在盆地西南部发生气旋旋转形成低涡;中低层急流持续整个过程,上述高低空环流配置正是盆地西部阻塞型暴雨形势(四川省气象局,2014)。物理环境条件上,盆地整层可降水量在 60 mm 以上,最大可达 80 mm(图 4e),标准化异常度超 4σ , 850 hPa 假相当位温盆地大部在 85°C (358 K) 以上(图 4c)。10 日 20:00 西部代表站温江 CAPE 为 $3293 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 5a),盆地西部对流层存在明显的水汽垂直递减率,低层比湿超过 $18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 5c),物理量值高于盆地出现极端暴雨的平均值(肖递祥等,2017),高能高湿不稳定环境具有很高的短时强降水发生潜势。12 日地面冷锋南下,暴雨区东移。

“8.14-18”暴雨中高纬环流形势未发生调整,副高 588 dagpm 线西段稳定在 110°E 附近,14—16 日盆地西部仍然受西风低槽和高原槽东移叠加影响,17 日青藏高原开始发展,导致河套到川西高原槽加深,有利于盆地西南部强降雨发生;中低层偏南风急流维持,最大风速可达 $12 \sim 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,为中尺度系统的发生发展提供了能量和水汽;16 日西南涡形成,为对流的发展提供动力条件,且西南涡表现出夜间加强、白天减弱的特征(周春花等,2023),与图 3b 中降水日变化特征相符。物理环境条件上,盆地整层可降水量维持在 $60 \sim 70 \text{ mm}$,标准化异常度达 4σ (图 4f);因前期持续降水能量释放,温江 CAPE 在 14 日、17 日均为 $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,15 日、16 日分别为 $22.0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 850 hPa 盆地西部假相当位温大部时段低于 358 K (图 4d),显著低于 10—11 日,但中低层急流和西南涡为对流的发生发展提供热力和动力条件。从比湿垂直分布来看,14—17 日夜间对



注:图 c,d 灰色阴影为高于 1500 m 高度地形。

图 4 2020 年 8 月(a,c,e)10 日 20:00 和(b,d,f)15 日 20:00

(a,b)500 hPa 位势高度场(青色实线,单位:dagpm)和标准化异常度(填色)、200 hPa 急流(橙色虚线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、700 hPa 风场(风羽),(c,d)850 hPa 假相当位温(等值线,单位:K),标准化异常度(填色)和风场(风羽),(e,f)整层可降水量(等值线,单位:mm)和标准化异常度(填色)

Fig. 4 (a, b) 500 hPa geopotential height (solid blue contour, unit: dagpm), standardized anomalies (colored), 200 hPa jet (dotted orange line, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and 700 hPa wind (barb), (c, d) 850 hPa pseudo-equivalent potential temperature (contour, unit: K), standardized anomalies (colored) and wind (barb), (e, f) total column water vapour (contour, unit: mm) and standardized anomalies (colored) at (a, c, e) 20:00 BT 10 and (b, d, f) 20:00 BT 15 August 2020

流层均存在明显的水汽垂直递减率(图 5c),但对比 10—11 日,CAPE 小,对流上升速度小,同时 15 日对流云底高于 10 日,而 0°C 层高度相当(图 5a,5b),暖

云降水厚度小,因此小时雨强稍弱(孙继松,2017)。

对比两次过程最强降水阶段开始时的环流形势,10 日 20:00 西南急流未建立,11 日 08:00 建立,

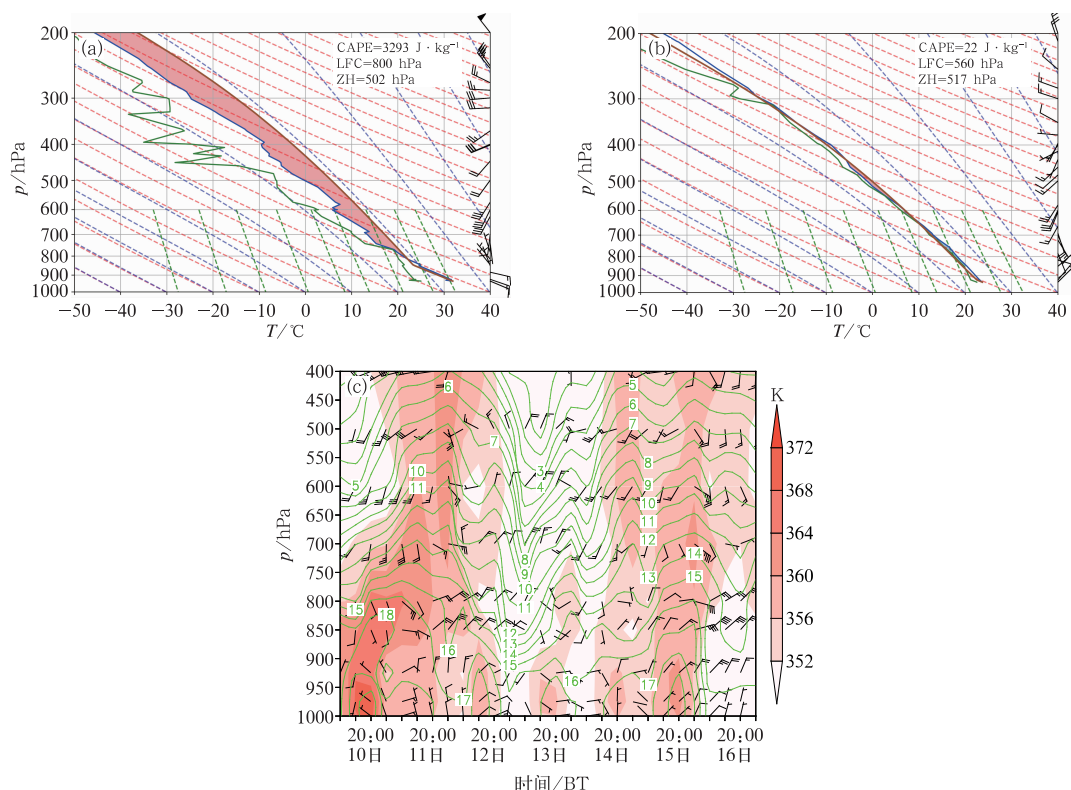


图 5 2020 年 8 月温江站(a)10 日 20:00 和(b)15 日 20:00 T - $\ln p$ 图,(c)10—17 日水平风(风羽)、比湿(等值线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、假相当位温(填色)垂直分布

Fig. 5 (a, b) T - $\ln p$ diagrams at (a) 20:00 BT 10 and (b) 20:00 BT 15, (c) vertical distribution of horizontal wind (barb), specific humidity (contour, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and pseudo-equivalent potential temperature (colored) at Wenjiang Station from 10 to 17 August 2020

热带风暴偏西、偏南,水汽输送主要来自阿拉伯海和孟加拉湾(图 4a);15 日 20:00 盆地北部有地面弱冷锋的影响,中低层在盆地西北部均有切变生成,西南急流已建立,提供了能量和水汽输送,热带风暴偏东、偏北,水汽源地除了阿拉伯海和孟加拉湾外,还有来自南海的水汽输送(图 4b)。“8. 10-13”过程中对流能量极端值更高,是阶段性降水极端性更强的一个因素。

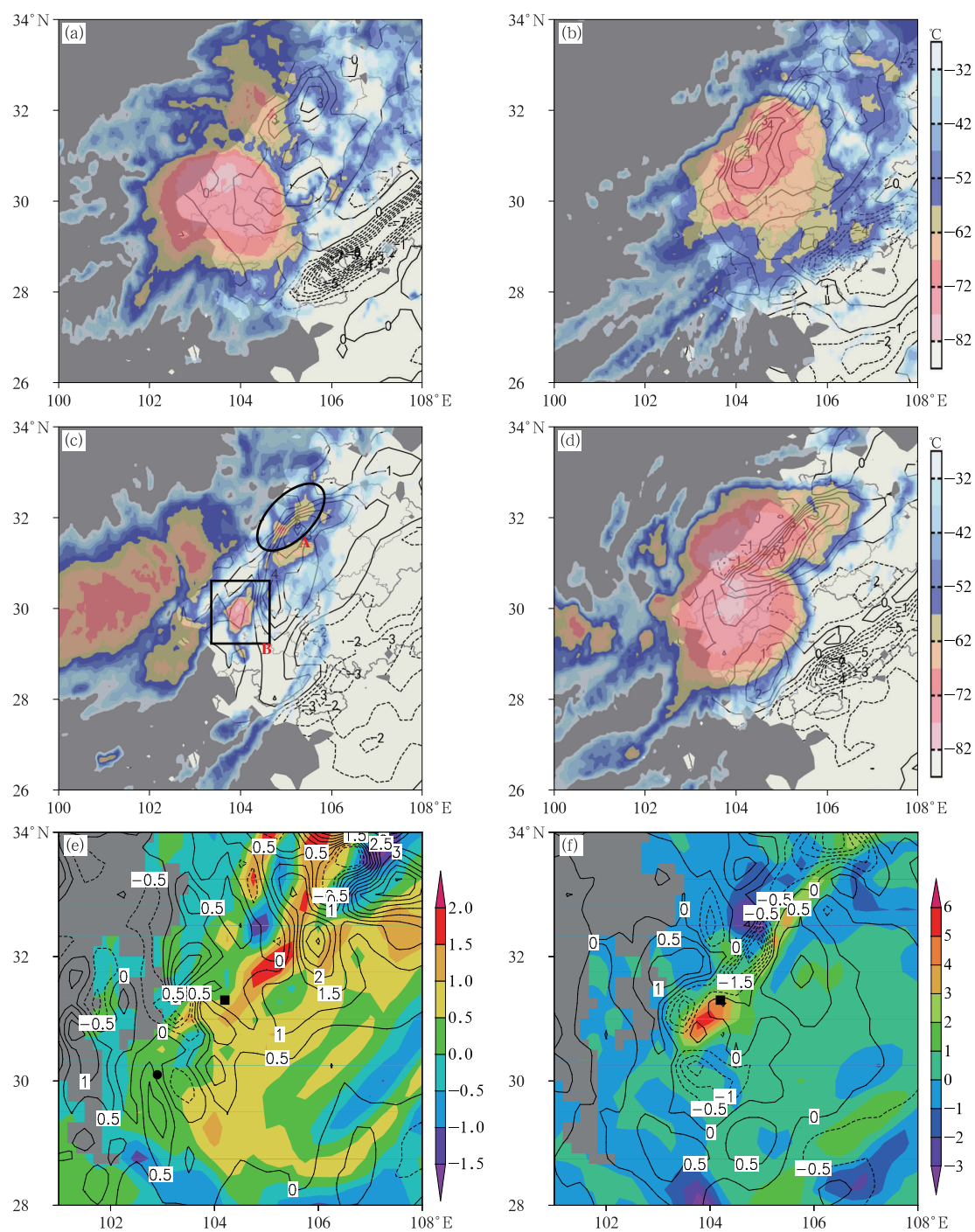
5 中尺度对流系统发展演变

从前面的降水特征分析中可知,两次暴雨过程突破历史极值的强降水分别出现在 10—11 日、15—16 日,下面将针对这两个时段的中尺度系统发展演变进行对比分析。

5.1 对流云团演变特征对比——MCS 发展强度差异

10—11 日强降水 MCS 的发生、发展过程可分为 4 个阶段:第一阶段(10 日 20:00—22:00),对流

初生与局地对流组织化阶段。20:00 盆地西南部雅安地区受地形作用,出现多个 γ 中尺度对流单体,并在源地发展中组织化程度增强(图略)。第二阶段(10 日 23:00 至 11 日 04:00),MCS 形成与快速发展阶段。在喇叭口地形作用下,500 hPa 高原冷平流、700 hPa 以下暖平流向雨区输送,对流快速组织发展,10 日 23:00 形成一个 β -MCS,11 日 00:00 云团近似圆形,冷云罩边缘清晰,云体结构密实(图略),出现前文所述的最强短时强降水。第三阶段(11 日 05:00—10:00),中尺度对流复合体(MCC)阶段。中低层较暖平流增强水汽和能量的供应, β -MCS 原地发展为 α -MCS,05:00 呈现 MCC 形态,云顶最低温度低于 -82°C ,07:00 MCC 云顶亮温(TBB) -72°C 以下的云区范围最大,边缘平滑,其西南侧由高层流出造成的絮状特征清晰(图 6a),在强西南气流引导下沿龙门山缓慢北移,08:00 冷云罩边缘开始出现毛边。第四阶段(11 日 11:00—16:00),MCC 减弱为 MCS 阶段。MCC 移出喇叭口地形后,减弱为 MCS,其北侧加强的东南风受地形抬升触发



注:图 a~d 中灰色阴影为 1500 m 以上地形;图 c 中黑色方框、椭圆均为初生对流;

图 e,f 中灰色阴影为 3000 m 以上地形,黑色实心圆和方块分别代表芦山、绵竹。

图6 2020年8月(a)11日07:00,(b)11日11:00,(c)15日23:00,(d)16日03:00 FY-4A 红外云图 TBB(填色)与850 hPa 温度平流(等值线,单位: $10^{-4}^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$);(e)11日09:00,(f)16日03:00 500 hPa(等值线)、700 hPa(填色)温度平流(单位: $10^{-4}^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig. 6 (a–d) TBB (colored) of FY-4A satellite infrared image and 850 hPa temperature advection (contour, unit: $10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) at (a) 07:00 BT 11, (b) 11:00 BT 11, (c) 23:00 BT 15, (d) 03:00 BT 16; (e, f) 500 hPa (contour) and 700 hPa (colored) temperature advctions (unit: $10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) at (e) 09:00 BT 11, (f) 03:00 BT 16 August 2020

对流并入,配合 500 hPa 槽前有冷平流向盆地西部输送,对流维持(图 6b,6e),直至傍晚时解体。

15—16 日强降水 MCS 也经历 4 个发展阶段:第一阶段(15 日 20:00—23:00),对流初生发展阶段。20:00—21:00,先后在盆地西北部弱冷平流和暖平流交汇区及南部暖平流区出现小尺度初生对流,并发展形成带状云团 A 和块状云团 B(图 6c);第二阶段(16 日 00:00—01:00),MCS 形成并快速发展。在高层槽前冷平流和中低层切变附近冷暖平流作用下,A 快速增长为较强的带状 α -MCS,B 在低层偏南急流出口左侧加强为近圆形 α -MCS(图略),强降水高峰开始;第三阶段(16 日 02:00—04:00),MCS 合并阶段。500 hPa 冷平流达 $-3 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,中、低层暖平流达 $6 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,明显强于 11 日,且垂直叠加,天气系统强迫增强,B 向 A 移动合并形成一个尺度更大的 α -MCS,冷云罩几乎覆盖盆地西部、南部,但云体结构相对松散(图 6d,6f),造成盆地西部大范围混合性降水;第四阶段(16 日 05:00—11:00),MCS 减弱阶段。16 日 05:00 暖平流中心显著减小,冷云罩塌陷,随后低于 -62°C 冷云区范围也逐渐减小,呈带状位于盆地西部,短时强降水强度逐渐减弱。整个过程中,700 hPa 和 850 hPa 暖平流明显强于冷平流,导致 MCS 在盆地西北部维持。

对比而言,10—11 日强降水对流云团是一个 MCC 发生—发展—成熟—消亡的过程,15—16 日强降水对流云团则是两个 α -MCS 发展—合并—减弱的过程,其尺度更大,但结构相对松散,导致其暴雨落区范围大于 10—11 日过程,而短时强降水强度次之。

5.2 雷达回波对流发展与结构对比——低质心回波强度和范围差异

进一步从雷达回波分析中小尺度对流的活动特征,10 日 20:00,盆地西南部雅安地区局地对流(γ 中尺度)迅速增多,沿喇叭口地形内边缘分布,最强回波超过 50 dBz,受高低层冷暖平流作用,孤立对流快速发展并组织起来,23:25 形成 β 中尺度团状回波,最强回波超过 55 dBz(图略),对应近圆形对流云团。从 23:25 回波剖面图分析(图 7a),块状回波内存在强对流单体, >45 dBz 的强回波主要堆积在 6 km(0°C 层)以下,回波质心在 4 km 以下,达 57 dBz,降水效率高,由此导致极端短时强降水。

MCC 形成后,团状回波范围增大(图略),带来大片短时强降水。在西南急流引导下,MCC 北移逐渐减弱。11 日 08:00 开始,东南风受迎风坡强迫抬升,盆地西北部龙门山前回波逐渐增强,呈窄带状,带上有成片 ≥ 40 dBz 的强回波,从强降水高峰 09:07 回波剖面分析(图 7b),大于 45 dBz 的强回波仍然堆积在 0°C 层以下,质心超过 50 dBz,但弱于 MCC 回波。

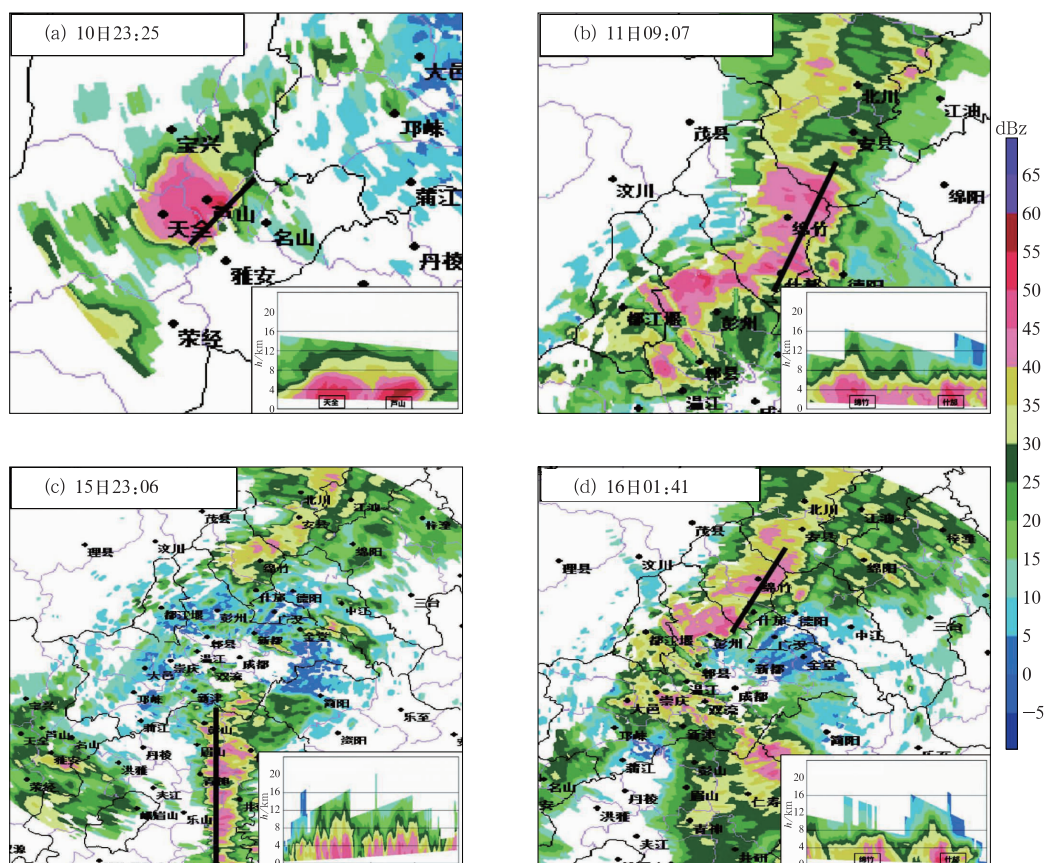
15—16 日过程开始时,盆地西北部、南部有 >35 dBz 的分散回波出现,受高原低槽、低层切变线和低空急流影响,回波组织性增强(图略),西北部回波快速组织形成西南—东北走向带状回波,盆地南部暖区内南北向回波带上排列着多个东西向的条状回波,南段不断有对流触发,呈现准静止“列车效应”,条状回波快速组织起来,形成南北向的窄带状回波,从剖面图可以看到,15 日 23:06 强回波呈“火焰”状排列,最强回波在 40~50 dBz,质心在 5 km 以下(图 7c),位于环境大气 0°C 层下,导致盆地南部小范围短时强降水。随着切变线向南发展,16 日 01:00,南北回波连接,在冷暖平流作用下,强回波维持在盆地西北部,从回波剖面图上可见,在层状云回波上镶嵌有孤立的 40 dBz 以上低质心回波单体,最强回波可达 50 dBz(图 7d)。受地面弱冷空气影响,盆地西北部降水回波范围逐渐东扩,以片状层状云回波为主,积状云回波分散(图略),因此短时强降水不明显。

由上分析可知,两次过程强降水均出现了低质心回波特征,对比而言,10—11 日强降水回波呈团状和窄带状且沿山,积状云回波特征更明显,当回波维持在盆地西北部呈带状时, ≥ 40 dBz 的积状云回波分布成片,导致整个过程短时强降水强度更强。

6 对流触发机制分析——地形作用与天气系统触发降水差异

两次过程发生的环流背景和环境条件非常相似,但从对流的发生、发展演变特征可知,强降水触发的机制是不同的。相同区域短时间内连续出现两次极端强降水,在四川盆地较罕见,有必要对强降水的触发机制进行分析研究。

10 日夜间对流层中低层来自云贵一带的偏南气流受盆地西南部喇叭口地形绕流作用,850 hPa 有小尺度涡旋生成(图略),同时环境场高能高湿,边界层喇叭口地形产生的抬升速度、气旋式涡度和水



注:黑实线为剖面的位置。

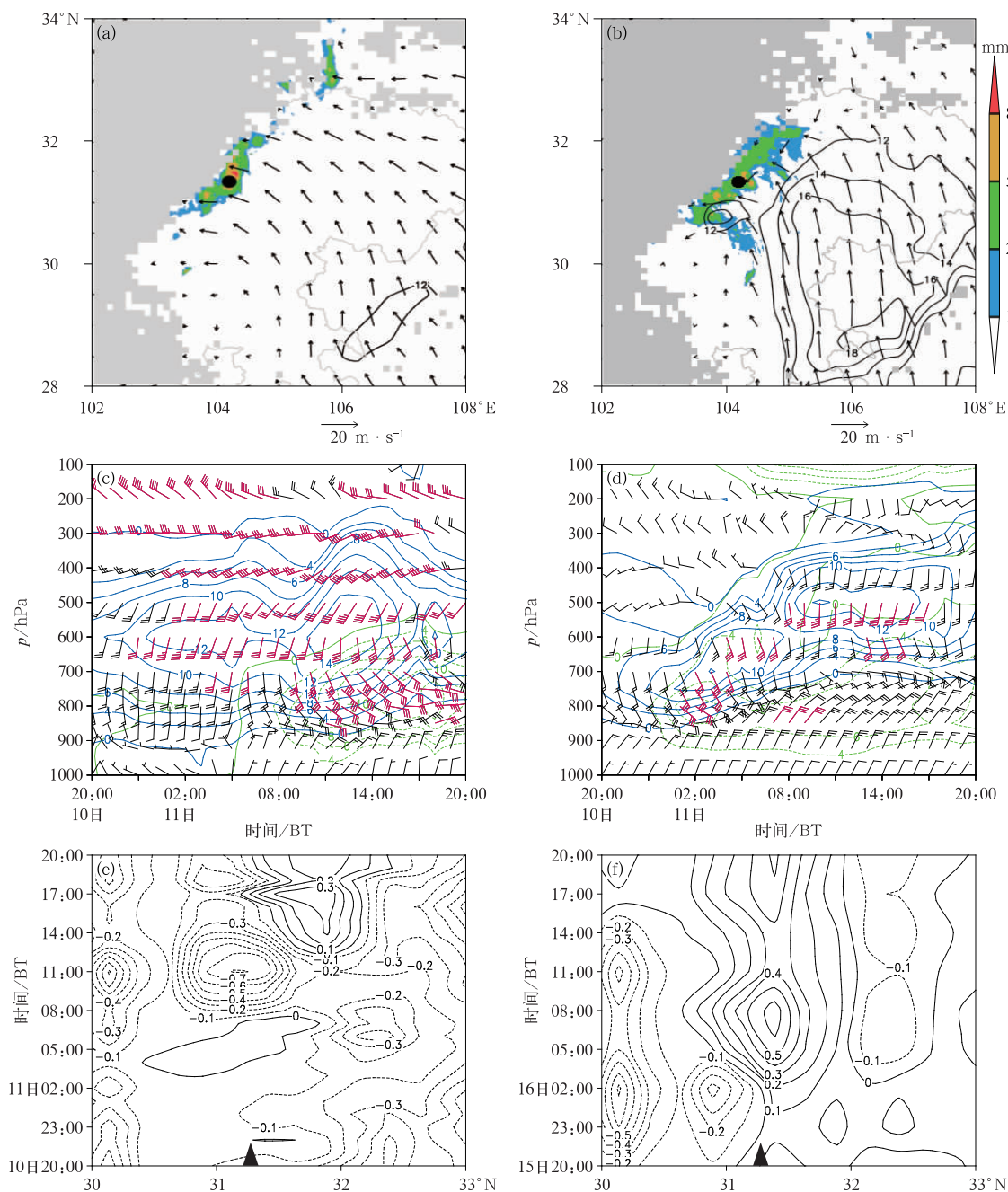
图7 2020年8月(a,b)10—11日,(c,d)15—16日成都多普勒雷达 0.5° 仰角基本反射率和对应的垂直剖面

Fig. 7 Basic reflectivity at 0.5° elevation and its vertical profile along black line for Chengdu Doppler Weather Radar in (a, b) 10—11, (c, d) 15—16 August 2020

平辐合与系统性垂直上升运动、涡度和散度叠加,增强低层辐合,加剧垂直上升运动形成强对流,进而导致盆地西南部极端降水(黄楚惠等,2022)。盆地西北部对流层低层夜间为弱的南风($4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右)气流,未出现明显降水,极端的对流能量未释放。11日08:00,700 hPa盆地西部急流形成,由南风转为东南风,850 hPa盆地东南气流也显著加强,强降水落区由盆地西南部北移到西北部(图8a)。从绵竹站水平风的时序图上可以看到(图8c),11日08:00 850~700 hPa由南风转为东南风,风力达到急流,持续8 h,为对流的维持提供了水汽和能量。800~750 hPa南风分量和东风分量大小相当,风向 135° 附近,与龙门山脉迎风坡几乎垂直,地形对风的强迫抬升作用大。从过绵竹站的地形垂直速度纬度-时间变化图上可以发现(图8e),11日08:00之前绵竹附近地形强迫垂直速度在 $0\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,未出现地形抬升。08:00前后,随南风的增强,地形强迫速度明显增大,10:00—11:00地形抬升作用最明显,垂直

上升速度达到最大,达 $-0.7\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$,对应绵竹11:00最强小时降水。东南风的维持使得地形强迫抬升运动持续到午后,造成午后绵竹到德阳附近最强小时降水量138.3 mm。当南风分量和东风分量大小差异变大,地形强迫抬升速度减小,降水也减弱。同时,地面上盆地西北部边缘为龙门山脉山前,是海拔800~1200 m左右的山地,属于盆地向高原陡峭地形过渡区域,08:00前后在该区域形成明显的温度高梯度带,对流触发,个别站点出现短时强降水(图9a)。温度高梯度带的维持使得1 h后对流发展加强,伴随出现明显强降水。10:00降水进一步增强,小时降水量普遍超过20 mm,绵竹站北侧有4个站小时降水量超过80 mm,最大达115.7 mm(图略)。当温度梯度减小后,降水也随之减弱。由此可见,MCC减弱后形成MCS的维持与迎风坡对持续东南风的抬升及山前温度高梯度带的存在有密切关系。

15日20:00,对流层中低层甘南有弱的偏北气



注:图 a,b 中黑色圆点表示绵竹站,图 c,d 中黑色风羽、红色风羽分别表示水平全风速 $<12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 绿线、蓝线分别为 u 和 v 分量;图 e,f 中黑色三角表示绵竹站。

图 8 2020 年 8 月 (a)11 日 10:00, (b)16 日 03:00 850 hPa 风场(风矢)和小时降水量(填色); (c,e)10 日 20:00 至 11 日 20:00, (d,f)15 日 20:00 至 16 日 20:00 (c,d)绵竹站水平风(风羽)垂直分布, (e,f)地形垂直速度(单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)沿 104.2°E 的纬向分布

Fig. 8 (a, b) 850 hPa wind (vector) and hourly rainfall (colored) at (a) 10:00 BT 11, (b) 03:00 BT 16; (c, d) vertical distribution of horizontal wind (barb) over Mianzhu Station, (e, f) zonal distribution of orographic uplift speed (unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) along 104.2°E from (c, e) 20:00 BT 10 to 20:00 BT 11, (d, f) 20:00 BT 15 to 20:00 BT 16 August 2020

流进入四川盆地,与来自云贵的偏南气流在盆地西北部形成切变(图 6c),触发了绵阳西部带状对流;同时 850 hPa 盆地南部东南急流左侧存在明显风速

风向辐合,触发暖区块状对流。随着偏北气流南下和盆地偏南急流北推,切变线维持在盆地西北部,带状对流发展加强。切变线南端为急流出口左侧,冷

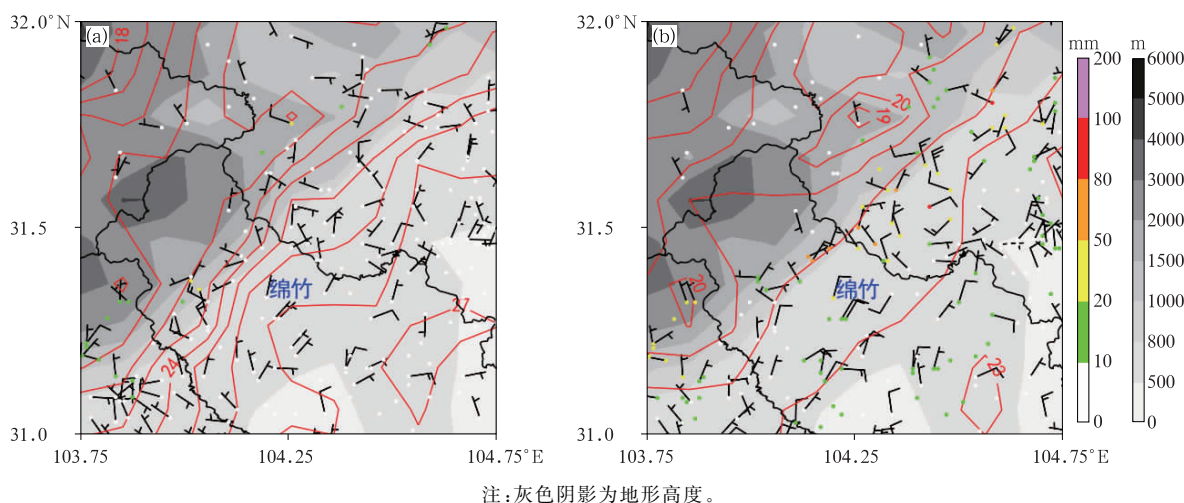


图9 2020年8月(a)11日08:00,(b)16日01:00地面10分钟平均最大风(风羽)、2 m气温(红色等值线)和小时降水量(彩色圆点)

Fig. 9 Maximum 10-minute average hourly surface wind (barb), 2 m temperature (red line) and hourly rainfall (colored dot) at (a) 08:00 BT 11, (b) 01:00 BT 16 August 2020

暖交汇,辐合最强,导致极端短时强降水发生(图8b)。从绵竹站整层水平风的时序图上可以看到,16日03:00后,800 hPa以下维持东北风,南风分量与东风分量大小差异较大(图8d),与龙门山交角小,地形抬升作用不明显。在地形强迫垂直速度纬度-时间图上也可以看到(图8f),15日23:00至16日04:00,绵竹站附近有非常弱的地形抬升速度,速度值 $>-0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,对应了本次过程最强降水阶段。其余时段,绵竹附近地形强迫垂直速度为正,表示地形没有产生抬升作用。对比10—11日过程,15—16日过程地形强迫抬升作用显著偏弱。随偏北风的推进,导致盆地西北部切变线东移,从而造成盆地西北部大片的混合性降水回波。地面图上,沿山有明显弱冷空气从甘南沿高原边坡地形扩散进入盆地,盆地西北部气温差异不大,无明显的温度锋区

形成,10 mm $\cdot\text{h}^{-1}$ 强度的降水范围较大(图9b),符合天气尺度系统降水特点。

对比分析,10—11日过程地形作用在强对流的发展演变中起到了重要作用,而15—16日过程对流层中低层冷暖气流交汇形成辐合是触发强降水发生发展的主要因素。结合上文影响系统、中尺度对流系统演变特征和对流的触发分析,总结出两次过程最强降水时段对流触发概念模型:10—11日过程在异常高的热力和水汽条件下,夜间盆地西南部喇叭口地形对低空东南气流的绕流作用生成小尺度涡旋触发对流,并发展加强为MCC维持。随着中低层偏南气流加强为急流,MCC北移逐渐减弱为MCS。白天盆地西北部龙门山迎风坡地形抬升和山前温度高梯度带作用使得MCS维持(图10a)。15—16日过程同样在较好的热力和水汽条件下,盆地南部低

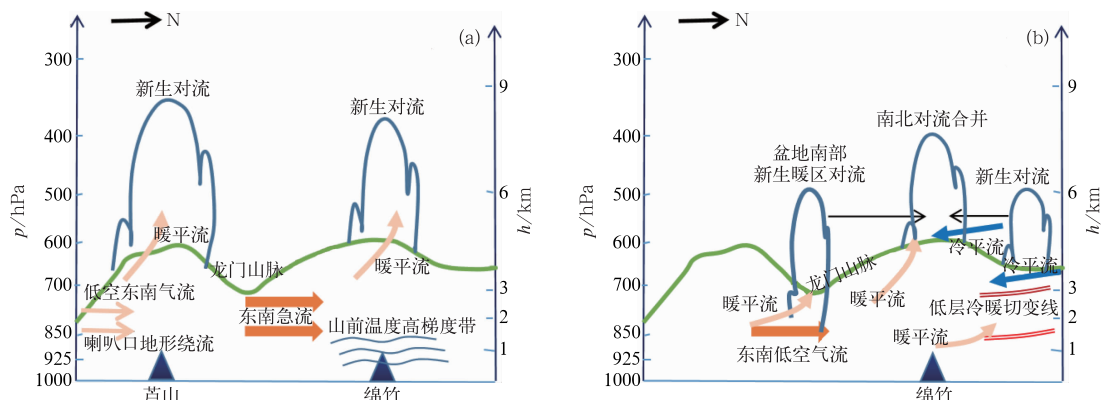


图10 2020年8月两次暴雨过程最强降水阶段(a)10—11日,(b)15—16日对流触发机制概念模型示意图

Fig. 10 Formation mechanism conceptual model of the heaviest precipitation stage in (a) 10—11, (b) 15—16 August 2020

空急流左侧触发暖区强对流,在偏南气流引导下北移,与盆地西北部冷暖平流交汇形成的切变线触发对流合并,切变线的维持使得带状 MCS 持续发展(图 10b)。

7 结 论

基于多源数据资料对四川盆地 2020 年 8 月 10—13、14—18 日(“8. 10-13”“8. 14-18”)两次极端暴雨过程的降水特征及过程最强降水阶段中尺度对流系统发展及触发做了对比分析,主要得到以下结论:

(1)两次暴雨过程均发生在中高纬“两槽一脊”,中纬度为“东高西低”的环流形势下,“8. 10-13”暴雨副高 588 线逐渐西伸到 110°E ,有两条主要水汽通道,“8. 14-18”暴雨副高 588 线稳定在 110°E 附近,有三条水汽通道。前者为自西向东移动性暴雨过程,暴雨在盆地西部持续 2 d,最强降水出现在第一天,过程累计最大降水量 542.1 mm,日降水极端性更强,有 4 个国家站创有气象记录以来日降水量极值,芦山站日降水量(425.2 mm)为四川省国家站历史日降水量第二高值。后者为盆地西部稳定性极端暴雨过程,持续 4 d,最强降水出现在第二天,极端性突出表现在累计降水量上,最大降水量为 865.1 mm,国家站最大日降水量为绵竹站(302.6 mm)。

(2)“8. 10-13”暴雨小时雨强更强, $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时强降水占比达 46.8%,强度强于历史统计值,最大极端小时降水量为 156.8 mm,国家站最大小时降水量达 134.6 mm,突破盆地国家站历史小时降水量极值。“8. 14-18”暴雨小时雨强与历史统计值相当,普遍在 $[20, 30) \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (66.1%),最大极端小时降水量为 118.4 mm,国家站最大小时降水量为 63.8 mm。

(3)“8. 10-13”暴雨最强降水阶段属于暖区强降水,强降水是由多个 γ 中尺度单体快速组织化发展加强为 MCC,再减弱为 MCS 导致,成熟阶段强回波呈块状,质心强度超过 55 dBz,且 $\geq 40 \text{ dBz}$ 的积状云回波范围广,持续时间长,短时强降水强度也强;“8. 14-18”暴雨最强降水阶段属于混合性降水,强降水由两个 α -MCS 合并—发展—减弱造成,降水回波为混合性回波,质心强度达 50 dBz,强度低于 40 dBz 的降水回波范围广,持续时间长,雨强普遍相对较弱。

(4)“8. 10-13”暴雨最强降水阶段喇叭口地形绕流作用和迎风坡陡峭地形的强迫抬升作用以及陡峭地形过渡区温度高梯度带触发了强对流,地形和高低层冷暖平流作用使对流发展并维持。“8. 14-18”暴雨最强降水阶段对流层中低层冷暖气流交汇形成辐合抬升和低空急流左侧辐合触发了强对流,冷暖气流交汇形成的切变维持是强降水发生并维持的主要因素。

本文所得结果主要是基于观测事实的特征对比,进而从宏观天气学角度对强对流的触发机制进行了分析,对于中尺度对流系统的组织、维持机制(如 MCC 的形成和维持)还需进行更详细深入的研究。另外,虽然两次过程发生的大环流形势很相似,但在物理环境条件方面存在不同,导致雨强差异较大,如两次暴雨最强降水开始前,“8. 10-13”暴雨盆地西部 CAPE 达 $3292.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,“8. 14-18”暴雨盆地西部 CAPE 仅为 $22.3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,CAPE 的大小决定了强对流过程中雨滴的大小和密度,也决定了降水的强度(孙继松,2014;2017),有必要对于两次过程中极端降水的云微物理特征另做详细分析。

参考文献

- 陈博宇,湛芸,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]. Chin J Atmos Sci, 47(1):1-19(in Chinese).
- 陈炯,郑永光,张小玲,等,2013. 中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J]. 气象学报,71(3):367-382. Chen J, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2013. Analysis of the climatological distribution and diurnal variations of the short-duration heavy rain and its relation with diurnal variations of the MCSs over China during the warm season[J]. Acta Meteor Sin, 71(3):367-382(in Chinese).
- 陈永仁,师锐,代涛,等,2014. 四川盆地“7·7”极端暴雨事件的多尺度观测分析[J]. 高原山地气象研究,34(3):10-16. Chen Y R, Shi R, Dai T, et al, 2014. Multi-scale observation analysis of extreme heavy rain on July 7th—11th in Sichuan Basin[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 34(3):10-16(in Chinese).
- 湛芸,孙军,徐珺,等,2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J]. 气象,38(10):1255-1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part I: observation and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10):1255-1266(in Chinese).
- 邓承之,赵宇,孔凡铎,等,2021. “6·30”川渝特大暴雨过程中西南低涡发展机制模拟分析[J]. 高原气象,40(1):85-97. Deng C Z, Zhao Y, Kong F Y, et al, 2021. A numerical simulation study of

- the southwest vortex mechanism during the “6·30” heavy rain event in Sichuan and Chongqing[J]. Plateau Meteor, 40(1): 85-97(in Chinese).
- 傅抱璞, 1992. 地形和海拔高度对降水的影响[J]. 地理学报, 47(4): 302-314. Fu B P, 1992. The effects of topography and elevation on precipitation[J]. Acta Geogr Sin, 47(4): 302-314(in Chinese).
- 高荣, 宋连春, 钟海玲, 2018. 2016年汛期中国降水极端特征及与1998年对比[J]. 气象, 44(5): 699-703. Gao R, Song L C, Zhong H L, 2018. Characteristics of extreme precipitation in China during the 2016 flood season and comparison with the 1998 situation[J]. Meteor Mon, 44(5): 699-703(in Chinese).
- 郭云云, 康岚, 邓莲堂, 等, 2022. 不同定义的位置对四川盆地一次极端暴雨的诊断[J]. 高原气象, 41(5): 1242-1250. Guo Y Y, Kang L, Deng L T, et al, 2022. Diagnosis of different definitions potential vorticity in an extreme rainstorm in the western Sichuan Basin[J]. Plateau Meteor, 41(5): 1242-1250(in Chinese).
- 黄楚惠, 李国平, 牛金龙, 等, 2022. 2020年8月10日四川芦山夜发特大暴雨的动热力结构及地形影响[J]. 大气科学, 46(4): 989-1001. Huang C H, Li G P, Niu J L, et al, 2022. Dynamic and thermal structure and topographic impact of the night torrential rainfall in Lushan, Sichuan on August 10, 2020[J]. Chin J Atmos Sci, 46(4): 989-1001(in Chinese).
- 李建, 宇如聪, 孙微, 2013. 中国大陆地区小时极端降水阈值的计算与分析[J]. 暴雨灾害, 32(1): 11-16. Li J, Yu R C, Sun W, 2013. Calculation and analysis of the thresholds of hourly extreme precipitation in China's mainland[J]. Torr Rain Dis, 32(1): 11-16(in Chinese).
- 罗玉, 陈超, 马振峰, 等, 2019. 四川盆地夏季区域性极端降水事件特征及其成因[J]. 西南大学学报, 41(5): 128-138. Luo Y, Chen C, Ma Z F, et al, 2019. Characteristics and causes of regional extreme precipitation events in summer over Sichuan Basin[J]. J Southwest Univ (Nat Sci Ed), 41(5): 128-138(in Chinese).
- 毛冬艳, 曹艳察, 朱文剑, 等, 2018. 西南地区短时强降水的气候特征分析[J]. 气象, 44(8): 1042-1050. Mao D Y, Cao Y C, Zhu W J, et al, 2018. Climatic characteristics of short-time severe precipitation in Southwest China[J]. Meteor Mon, 44(8): 1042-1050(in Chinese).
- 秦大河, 2014. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. 地理科学进展, 33(7): 874-883. Qin D H, 2014. Climate change science and sustainable development[J]. Prog Geogr, 33(7): 874-883(in Chinese).
- 冉津江, 齐玉磊, 龙治平, 等, 2023. 基于高密度站点的四川盆地短时强降水特征分析[J]. 高原气象, 42(4): 949-961. Ran J J, Qi Y L, Long Z P, et al, 2023. Characteristics of short-time heavy rainfall in the Sichuan Basin based on high-density station observations[J]. Plateau Meteor, 42(4): 949-961(in Chinese).
- 任正果, 张明军, 王圣杰, 等, 2014. 1961—2011年中国南方地区极端降水事件变化[J]. 地理学报, 69(5): 640-649. Ren Z G, Zhang M J, Wang S J, et al, 2014. Changes in precipitation extremes in South China during 1961—2011[J]. Acta Geogr Sin, 69(5): 640-649(in Chinese).
- 四川省气象局, 2014. 四川天气预报手册[M]. 成都: 西南交通大学出版社: 1-124. Sichuan Meteorological Bureau, 2014. Sichuan Weather Forecast Manual[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press: 1-124(in Chinese).
- 苏爱芳, 席乐, 吕晓娜, 等, 2022. 豫北“21·7”极端暴雨过程特征及成因分析[J]. 气象, 48(5): 556-570. Su A F, Xi L, Lü X N, et al, 2022. Analysis on characteristics and causes of the July 2021 extreme rainstorm in Northern Henan[J]. Meteor Mon, 48(5): 556-570(in Chinese).
- 孙继松, 2014. 从天气动力学角度看云物理过程在降水预报中的作用[J]. 气象, 40(1): 1-6. Sun J S, 2014. Role of cloud physics in precipitation forecasting by synoptic dynamics[J]. Meteor Mon, 40(1): 1-6(in Chinese).
- 孙继松, 2017. 短时强降水和暴雨的区别与联系[J]. 暴雨灾害, 36(6): 498-506. Sun J S, 2017. Differences and relationship between flash heavy rain and heavy rainfall[J]. Torr Rain Dis, 36(6): 498-506(in Chinese).
- 王佳津, 王春学, 陈朝平, 等, 2015. 基于HYSPLIT4的一次四川盆地夏季暴雨水汽路径和源地分析[J]. 气象, 41(11): 1315-1327. Wang J J, Wang C X, Chen C P, et al, 2015. Analysis of a summer rainstorm water vapor paths and sources in Sichuan Basin based on HYSPLIT4 model[J]. Meteor Mon, 41(11): 1315-1327(in Chinese).
- 王蕾, 张百超, 石英, 等, 2022. IPCC AR6报告关于气候变化影响和风险主要结论的解读[J]. 气候变化研究进展, 18(4): 389-394. Wang L, Zhang B C, Shi Y, et al, 2022. Interpretation of the IPCC AR6 on the impacts and risks of climate change[J]. Climate Change Res, 18(4): 389-394(in Chinese).
- 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]. Torr Rain Dis, 38(5): 502-514(in Chinese).
- 伍志方, 蔡景就, 林良勋, 等, 2018. 2017年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J]. 气象, 44(4): 485-499. Wu Z F, Cai J J, Lin L X, et al, 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 485-499(in Chinese).
- 肖递祥, 杨康权, 徐栋夫, 等, 2015. 副高西侧四川盆地两次极端暴雨过程分析[J]. 高原山地气象研究, 35(4): 10-18. Xiao D X, Yang K Q, Xu D F, et al, 2015. Analysis of two extreme heavy rain processes at the edge of West Pacific subtropical high in Sichuan Basin[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 35(4): 10-18(in Chinese).
- 肖递祥, 杨康权, 俞小鼎, 等, 2017. 四川盆地极端暴雨过程基本特征分析[J]. 气象, 43(10): 1165-1175. Xiao D X, Yang K Q, Yu X D, et al, 2017. Characteristics analyses of extreme rainstorm events in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 43(10): 1165-1175(in Chinese).
- 肖递祥, 王佳津, 曹萍萍, 等, 2020. 四川盆地突发性暖区暴雨特征及环境场条件分析[J]. 自然灾害学报, 29(3): 110-118. Xiao D X, Wang J J, Cao P P, et al, 2020. Characteristics and environmental conditions of the sudden warm-sector rainstorms in Sichuan Basin[J]. J Nat Dis, 29(3): 110-118(in Chinese).
- 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]. Meteor Mon, 47(3): 303-316(in Chinese).
- 杨康权, 卢萍, 肖递祥, 等, 2017. 高原低值系统影响下一次极端强降水天气诊断分析[J]. 高原山地气象研究, 37(2): 1-7. Yang K Q, Lu P, Xiao D X, et al, 2017. Impact of the low-pressure system of Qinghai-Xizang Plateau on the occurrence and maintenance of extreme heavy rainfall event[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 37(2): 1-7(in Chinese).
- 杨舒楠, 张芳华, 徐珺, 等, 2016. 四川盆地一次暴雨过程的中尺度对流及其环境场特征[J]. 高原气象, 35(6): 1476-1486. Yang S N, Zhang F H, Xu J, et al, 2016. Mesoscale convective systems and characteristics of environment field of a heavy rainfall process occurred in Sichuan Basin[J]. Plateau Meteor, 35(6): 1476-1486(in Chinese).
- 曾颖婷, 陆尔, 2015. 1961—2010 年我国夏季总降水和极端降水的变化[J]. 气候变化研究进展, 11(2): 79-85. Zeng Y T, Lu E, 2015. Changes of summer rainfall and extreme precipitation during 1961—2010 in China[J]. Climate Change Res, 11(2): 79-85(in Chinese).
- 张芳, 张芳华, 孔期, 等, 2022. 2018 年 5 月 21 日四川盆地极端暴雨的中尺度成因和预报偏差分析[J]. 气象, 48(6): 691-704. Zhang F, Zhang F H, Kong Q, et al, 2022. Mesoscale mechanisms and forecast bias of the extreme rainstorm in Sichuan Basin on 21 May 2018[J]. Meteor Mon, 48(6): 691-704(in Chinese).
- 张芳华, 陈涛, 张芳, 等, 2020. 2020 年 6—7 月长江中下游地区梅汛期强降水的极端性特征[J]. 气象, 46(11): 1405-1414. Zhang F H, Chen T, Zhang F, et al, 2020. Extreme features of severe precipitation in Meiyu period over the middle and lower reaches of Yangtze River Basin in June—July 2020[J]. Meteor Mon, 46(11): 1405-1414(in Chinese).
- 张芳华, 杨舒楠, 胡艺, 等, 2023. “23·7”华北特大暴雨过程的水汽特征[J]. 气象, 49(12): 1421-1434. Zhang F H, Yang S N, Hu Y, et al, 2023. Water vapor characteristics of the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. Meteor Mon, 49(12): 1421-1434(in Chinese).
- 张顺谦, 马振峰, 2011. 1961—2009 年四川极端强降水变化趋势与周期性分析[J]. 自然资源学报, 26(11): 1918-1929. Zhang S Q, Ma Z F, 2011. Change tendency and cyclicity analysis of extreme precipitation over Sichuan Province during 1961—2009[J]. J Nat Resour, 26(11): 1918-1929(in Chinese).
- 周长艳, 唐信英, 邓彪, 2015. 一次四川特大暴雨灾害降水特征及水汽来源分析[J]. 高原气象, 34(6): 1636-1647. Zhou C Y, Tang X Y, Deng B, 2015. Precipitation characteristics and water vapor source analysis of record heavy rainfall process in Sichuan[J]. Plateau Meteor, 34(6): 1636-1647(in Chinese).
- 周春花, 肖递祥, 陈朝平, 2023. 四川盆地西部连续两次特大暴雨过程的西南涡特征分析[J]. 高原山地气象研究, 43(1): 26-33. Zhou C H, Xiao D X, Chen C P, 2023. Characteristics of Southwest vortex during two consecutive heavy rains in western Sichuan Basin[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 43(1): 26-33(in Chinese).
- 周春花, 肖递祥, 郁淑华, 2022. 诱发四川盆地极端暴雨的西南涡环流背景和结构特征[J]. 气象, 48(12): 1577-1589. Zhou C H, Xiao D X, Yu S H, 2022. Circulation background and structural characteristics of the southwest vortex inducing extreme rainstorm in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 48(12): 1577-1589(in Chinese).
- 周秋雪, 刘莹, 冯良敏, 等, 2015. 2008—2012 年四川强小时雨强的时空分布特征[J]. 高原气象, 34(5): 1261-1269. Zhou Q X, Liu Y, Feng L M, et al, 2015. Analysis on temporal and spatial distribution characteristics of strong hour rainfall intensity in Sichuan during 2008—2012[J]. Plateau Meteor, 34(5): 1261-1269(in Chinese).
- Xiao C, Wu P L, Zhang L X, et al, 2016. Robust increase in extreme summer rainfall intensity during the past four decades observed in China[J]. Sci Rep, 6(1): 38506.

(本文责编: 俞卫平)