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

大巴山南麓地形影响下两次暴雨过程对比分析

周盈颖 李强 赵衍斌 朱岩

Comparative analysis of two rainstorm events under the influence of topography at the southern foot of Daba Mountain

ZHOU Yingying，LI Qiang，ZHAO Yanbin，ZHU Yan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-019

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

贺兰山东麓两次局地暴雨过程的湿位涡诊断分析

Diagnostic analysis of moist potential vorticity for two local rainstorm events on the eastern foot of Helan Mountain

暴雨灾害. 2020, 39(2): 148-157 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.02.005

青藏高原东坡两次暴雨的MCS演变及机理对比分析

MCS evolution and mechanism comparison in the two rainstorm events on the eastern slope of the Qinghai Tibet Plateau

暴雨灾害. 2024, 43(5): 509-520 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-225

复杂地形影响下鄂东北梅雨锋大暴雨MCS的触发和演变

Initiation and evolution of MCS of Meiyu frontal heavy rain event in the complex terrain of northeast Hubei

暴雨灾害. 2020, 39(6): 611-619 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.06.009

复杂山地下引发特大暴雨的准静止MCS观测分析

Analysis of quasi-stationary MCS causing extreme torrential rain event under complex mountains in Southwest Hubei

暴雨灾害. 2022, 41(3): 241-253 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.001

2021年4月陕西一次极端暴雨过程的成因诊断

Diagnosis of the causation of an extreme rainstorm in Shaanxi in April 2021

暴雨灾害. 2022, 41(2): 109-118 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.001

乌鲁木齐两次极端暴雪天气过程对比分析

Comparative analysis of two extreme blizzard processes in Urumqi

暴雨灾害. 2020, 39(3): 225-233 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.002

关注微信公众号，获得更多资讯信息

周盈颖,李强,赵衍斌,等.2025.大巴山南麓地形影响下两次暴雨过程对比分析[J].暴雨灾害,44(4):515−525. ZHOU Yingying, LI Qiang, ZHAO Yanbin, et al. 2025. Comparative analysis of two rainstorm events under the influence of topography at the southern foot of Daba Mountain [J]. Torrential Rain and Disasters,44(4):515−525 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−019

大巴山南麓地形影响下两次暴雨过程对比分析

周盈颖[1], 李强[1], 赵衍斌[2], 朱岩[1]

(1. 重庆市气象台, 重庆 401147; 2. 重庆市渝北区气象局, 重庆 401120)

摘　要: 选取 2017 年 9 月 27 日和 2018 年 6 月 18 日重庆东北部大巴山南麓两次暴雨过程(简称“9.27”过程和“6.18”过程), 利用多源观测和再分析资料, 对比分析其环流背景、环境条件和地形作用机制的异同。结果表明: (1) “9.27”过程为锋面暴雨, “6.18”过程为暖区暴雨, 均受 500 hPa 东移低槽、低层切变、低空急流和地面辐合线等影响, 地面辐合线位置和强度的差异导致两次暴雨落区和雨带形态不同。(2) 两次过程初期均为弱对流不稳定和弱抬升条件, “6.18”过程午后对流不稳定性显著增强; 两次过程均建立了南海水汽通道, “9.27”过程水汽输送和辐合更强。(3) 两次过程受地形影响的程度不同。“9.27”过程观面山地形抬升加大锋面附近温度热力差异, 增强斜压不稳定性, 同时抬升暖湿气流, 增强水汽辐合, 在地面辐合线共同作用下, 触发 4 个对流单体先后移经开州北部暴雨区, 形成“列车效应”; “6.18”过程长江河谷及其两侧山脉动力抬升和热力强迫致使河谷近地面出现大风速区, 增强地面辐合, 触发多个对流单体沿长江河谷东移, 而后在奉节东部龙王山地形抬升下发展增强并稳定少动, 造成长江沿线及以北地区强降雨。

关键词: 暴雨; 地形作用; MCS; 大巴山南麓

中图法分类号: P458.121.1　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−019

Comparative analysis of two rainstorm events under the influence of topography at the southern foot of Daba Mountain

ZHOU Yingying[1], LI Qiang[1], ZHAO Yanbin[2], ZHU Yan[1]

(1. *Chongqing Meteorological Observatory*, *Chongqing* 401147; 2. *Yubei Meteorological Office of Chongqing*, *Chongqing* 401120)

Abstract: Using multi-source observation data, this study analyzed two heavy rainfall events (referred to as "9.27" event and "6.18" event) that occorred at the southern foot of Daba Mountain in northeast Chongqing on September 27, 2017, and June 18, 2018. The similarities and differences of the two events in circulation background, environmental conditions, and topographic action mechanism were compared. The results are as follows: (1) The "9.27" event was a frontal rainstorm, while the "6.18" event was a warm-sector rainstorm. Both were affected by the eastward movement of the 500 hPa trough, low-level shear, low-level jet, and surface convergence line. The differences in location and intensity of the surface convergence line lead to the differences in the fall area and rainband pattern of the two rainstorms. (2) Both events began with weak convective instability and weak uplift conditions. The convective instability increased significantly in the afternoon during the "6.18" event. In both events, water vapor transport channels from the South China Sea were established, with stronger water vapor transport and convergence intensity being found in the "9.27" event. (3) The mechanisms of topographic effects during the two rainstorms were different. During the "9.27" event, the topographic uplift of Guanmian Mountain intensified the thermal contrast near the front, enhanced baroclinic instability, and lifted the warm and wet air to strengthen the water vapor convergence. Under the triggering of the surface convergence line, four convective cells developed and successively passed through the heavy rain area in the north of Kaizhou, forming the "train effect". During the "6.18" event, the dynamic uplift and thermal forcing of the Yangtze River valley and the mountains on both sides caused a high wind speed area near the surface of the river valley, enhanced surface convergence, and triggered

收稿日期: 2024−01−20; **定稿日期**: 2024−08−30

资助项目: 重庆市自然科学基金项目(cstc2021jcyj-msxmX0057); 重庆市气象部门业务技术攻关项目(YWJSGG-202120); 中国气象局西南区域气象中心创新团队项目(XNQYCXTD-202202); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J011)

第一作者: 周盈颖, 主要从事强对流天气预报技术研究。 E-mail: 382124669@qq.com

通信作者: 李强, 主要从事灾害性天气预报技术研究。 E-mail: cqlqlq@163.com

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

several convective cells to move eastward along the Yangtze River Valley. Subsequently, under the topographic effects of Longwangshan Mountain in the east of Fengjie, the development of convective cells was enhanced and remained stable with little movement, resulting in heavy rainfall along and north of the Yangtze River.

Key words: rainstorm; topographic action mechanism; MCS; the southern foot of Daba Mountains

引　言

地形是触发和增强暴雨的重要因素，一直以来受到气象学者的广泛关注。研究表明，地形的阻挡作用可使天气系统停滞、维持并加强暴雨 (崔春光等, 2002; 廖移山等, 2011)，地形可影响气流垂直分布从而改变降水落区 (孙继松和杨波, 2008)，另外，地形的强迫抬升和辐合作用也能增强垂直运动从而引起降水增幅 (刘裕禄和黄勇, 2013; 王丛梅等, 2017; 栗晗等, 2018)。数值试验结果表明，精细的下垫面强迫刻画对提升复杂地形地区的暴雨预报效果至关重要 (Zeng and Yang, 2020; 徐渊等, 2024)，因此，深入研究地形对暴雨的触发增强机制，有助于加深对复杂地形区域暴雨发生发展的认识、提高暴雨预报能力。

大巴山脉地处川渝鄂陕交界，呈西北—东南走向，为四川盆地和汉中盆地地理界线，其南麓主要位于川渝境内，支脉众多、海拔落差大，具有喇叭口、峡谷、山地等复杂地形，暴雨常引发严重次生灾害；此外，山脉中段和东段地处三峡库区腹地，毗邻三峡水利工程，强降水也常造成防洪调度压力。研究表明，大巴山脉地形可影响降雨的发生发展及分布，重庆三大暴雨中心之一的开州即位于大巴山脉中东段南麓迎风坡 (刘德等, 2012)，开州、巫溪、城口交界地区常成为重庆东北部 (以下简称“渝东北”) 暴雨多发区域。大巴山南麓暴雨具有夜发性 (林之光, 1982; 周芳弛等, 2023)，多发生在 5 月和 9 月 (黄楚惠等, 2020)，暴雨峰值时段集中在暴雨事件中段 (周芳弛和李国平, 2024)，其夜间暴雨可分为西南涡型和偏南风型，西南低涡和低槽在夜间加强的特征促使偏南气流显著增强，爬流在迎风坡形成强垂直上升运动，盆地形成垂直环流，绕流则有利于局地涡旋产生和加强 (李毅和李国平, 2023)。地形的作用使得大巴山南麓“山地夜雨”降水以暖云过程为主 (Zhou and Li, 2024)，山地地形对中尺度对流系统的阻滞作用有利于对流系统旺盛发展 (张芳丽等, 2020)。大巴山地形还可通过对低涡的摩擦阻挡和对南北向气流阻挡影响西南涡移动，进而影响水汽输送、辐合汇聚和垂直运动，最终改变山地降水强度及分布 (Wang et al., 2016; Wang and Li, 2016; 邓承之等, 2016)。可见，大巴山南麓地形对暴雨形成和发展有重要作用，但目前该区域地形和暴雨相互作用的研究多基于秦巴山脉等较大尺度地形 (毕宝贵等, 2006; 赵强等, 2017)，中小尺度地形和降水的相互作用研究尚有不足。

本文通过对近 10 a 大巴山南麓暴雨过程进行统计分析，筛选出发生在大巴山南麓两个典型地形区域 (地势抬升区和长江河谷区) 的两次暴雨过程，时间分别为 2017 年 9 月 27 日 (以下简称“9.27”过程) 和 2018 年 6 月 18 日 (以下简称“6.18”过程)，利用多源观测和再分析资料对比分析两次过程的环流特征、动热力环境条件以及地形作用机制的异同，探讨大巴山南麓地形影响下暴雨的发生发展机制，以期提升大巴山区暴雨的预报预警能力。

1 研究区域及资料介绍

两次暴雨过程均发生在大巴山南麓地区 (图 1 中两个方框分别所示区域)，该区域山峰海拔在 2 000 m 以上，西侧为四川盆地丘陵岭谷区，东侧和南侧为巫山和七曜山区，长江自万州南面进入，而后折东横贯云阳、奉节、巫山进入湖北境内。两次暴雨落区有所不同，“9.27”过程位于渝东北开州北部观面山与大巴山交界处 (108.2°—109.2°E, 31.25°—31.75°N)，“6.18”过程位于奉节、巫山长江河谷及其北侧地区 (109°—110.2°E, 31.0°—31.2°N)。

本文资料时间为 2017 年 9 月 26—27 日和 2018 年 6 月 18—19 日，具体包括：(1) 渝东北及其周边地区 21 个国家气象观测站 (简称国家站) 和 1 011 个区域气象观测站 (简称区域站) (图 1 中黑点所示) 逐时降水、气温、极大风向风速资料，来源于中国气象局国家气象信息中心 CIMISS 系统 (China Integrated Meteorological Information Service System)，用于天气实况和地形作用机制分析；(2) 达州、恩施探空资料，分别分析“9.27”、“6.18”过程物理量场演变；(3) 渝东北万州 SB 多普勒雷达逐 6 min 体扫资料，来源于重庆市气象信息保障与技术中心，用于分析地形作用下中尺度回波的演变；(4) 欧洲中期天气预报中心 ERA5 (The fifth generation ECMWF Re-Analyses) 逐时再分析数据 (https://climate.copernicus.eu/products/climate-reanalysis)，空间分辨率为 0.25°×0.25°，垂直空间从地面到 0.01 hPa 共 137 层。

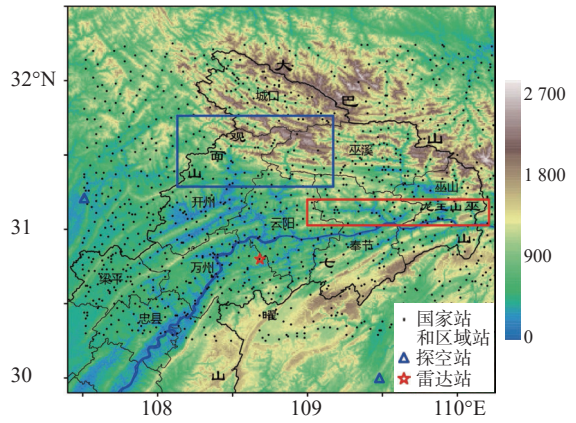


图 1 渝东北及周边地区国家站和区域站位置 (黑点)、地形高度 (色斑, 单位: m) 及主要降水范围分布图 (蓝色框为“9.27”过程暴雨落区, 红色框为“6.18”过程暴雨落区)

Fig. 1 Distribution of the locations (black dots) of the national stations and regional stations in the Northeast Chongqing and surrounding areas, terrain elevation (shaded, unit: m) and the main precipitation area (the blue and red frames indicate the fall areas of the “9.27” rainstorm and the “6.18” rainstorm, respectively)

2 降水实况

2017 年 9 月 26—27 日, 渝东北大巴山南麓与开州观面山交界处出现暴雨 (图 2a), 雨带近东西走向, 带长约 200 km, 最大累计雨量开州关坪 158.9 mm, 最大小时雨量 61.5 mm, 于 27 日 08:00 (北京时, 下同) 出现在开州鹿垌; 主要降雨时段为 27 日 08:00—13:00, 区域平均小时雨强超过 10 mm·h^{-1}, 09:00 增强到 23.5 mm·h^{-1}。

2018 年 6 月 18—19 日, 大巴山与七曜山之间的长江河谷及其北侧出现暴雨 (图 2b), 雨带呈东西走向, 带长约 190 km, 暴雨中心位于巫山龙王村, 过程累积雨量191.0 mm, 最大小时雨量 60.5 mm, 于 18 日 19:00 出现在巫山金坪; 主要降雨时段为 18 日 16:00—22:00, 区域平均小时雨强超过 15 mm·h^{-1}, 19:00 雨强增强为 23.6 mm·h^{-1}。

两次过程虽均发生在渝东北大巴山南麓, 但雨带形态和位置分布并不相同, “9.27”过程暴雨落区呈块状, 分布于大巴山南麓西段观面山向大巴山主脉延伸的地势抬升区域, 而“6.18”过程暴雨带则呈长条状, 位于大巴山南麓东段长江河谷北侧地区。“9.27”过程发生在清晨至上午, “6.18”过程则发生在傍晚至午夜, 二者暴雨雨团主要影响时段均为 6 h 左右, 但“6.18”过程区域平均雨强更强。

3 环流背景对比

9 月 27 日 08:00 (图 3a), 500 hPa 西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 西伸北抬, 588 dagpm 线控制重庆长江沿线及以南地区, 同时, 高原有低槽东移至四川盆地西部, 引导冷空气南下入侵盆地; 700 hPa 和 850 hPa切变线在渝东北叠加, 西南急流和偏东急流亦在此交汇, 形成有利的动力抬升条件。由图 3b 可见, 地面锋面南压进入重庆境内, 锋前为一致的偏南气流控制, 渝东北整层可降水量 (PW) 超过 50 mm, 达州附近 PW 达 60 mm。因此, 这次过程发生在副高西伸北抬, 高原低槽东移的环流背景下, 低层切变线、低空急流及地面锋面叠加影响是导致暴雨的直接原因。

6 月 18 日 08:00 (图 4a), 副高外围 584 dagpm 线控制江南、华南地区, 四川盆地有一低槽东移。700 hPa 川陕交界处暖式切变发展, 切变南侧贵州西部至湖北北部为暖湿气流大风速带, 渝东北位于大风速带左前侧, 有利于低层对流的触发和抬升。850 hPa 川东北有低涡切变发展, 北上暖湿气流与偏东暖湿回流交汇于大巴山附近形成暖式切变线, 于午后至夜间东移南下影响大巴山南麓长江河谷地区 (图略)。地面无冷空气影响, 为均压场。该区域 PW 超过 60 mm, 水汽条件较好。可见, 本次过程发生在副高

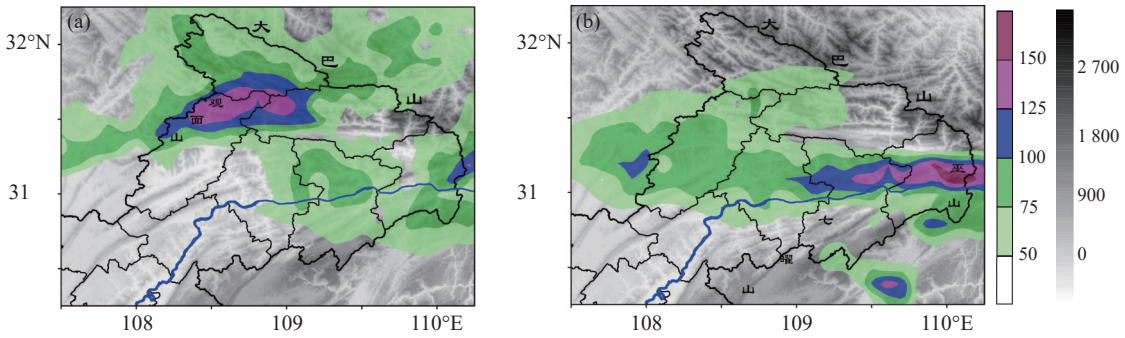


图 2 渝东北 2017 年 9 月 26 日 20:00—27 日 20:00 (a) 和 2018 年 6 月 18 日 08:00—19 日 08:00 (b) 累积雨量 (色斑, 单位: mm) 及地形高度 (阴影, 单位: m) 分布

Fig. 2 Distribution of the terrain elevation (shaded, unit: m) and accumulated precipitation (colored, unit: mm) in the Northeast Chongqing from (a) 20:00 BT on September 26 to 20:00 BT on September 27, 2017, and (b) 08:00 BT on June 18 to 08:00 BT on June 19, 2018

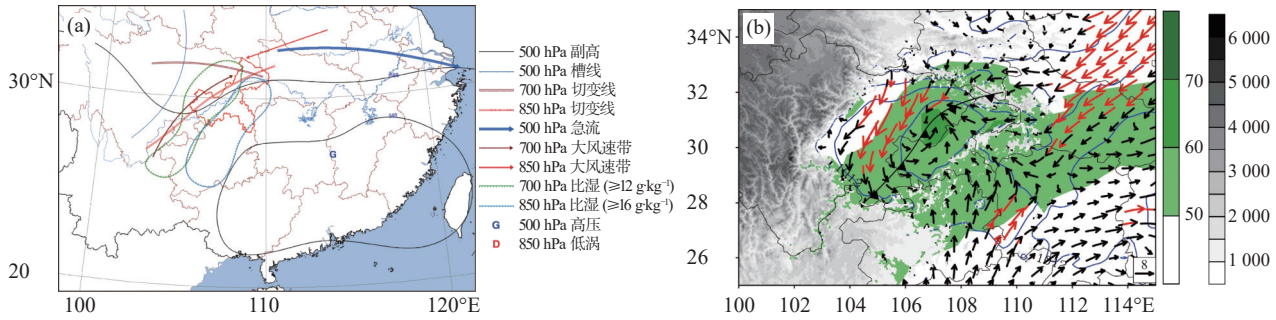


图 3 2017 年 9 月 27 日 08:00 主要天气系统综合图 (a) 和 900 hPa 风 (矢量, 单位: m·s^{-1}, 红箭头为风速≥10 m·s^{-1} 急流)、海平面气压 (蓝实线, 单位: hPa)、PW (填色, 单位: mm) 及地面锋面 (带黑色三角形线条) 地形 (灰色填色, 单位: m) 分布图 (b)

Fig. 3 (a) Comprehensive diagram of the major influencing weather systems, (b) wind field at 900 hPa (vector, unit: m·s^{-1}, red arrows show jets with wind speed≥10 m·s^{-1}), sea surface pressure (unit: hPa), precipitable water (green shaded, unit: mm), front (black line with triangle) and terrain elevation (gray shaded, unit: m) at 08:00 BT on September 27, 2017

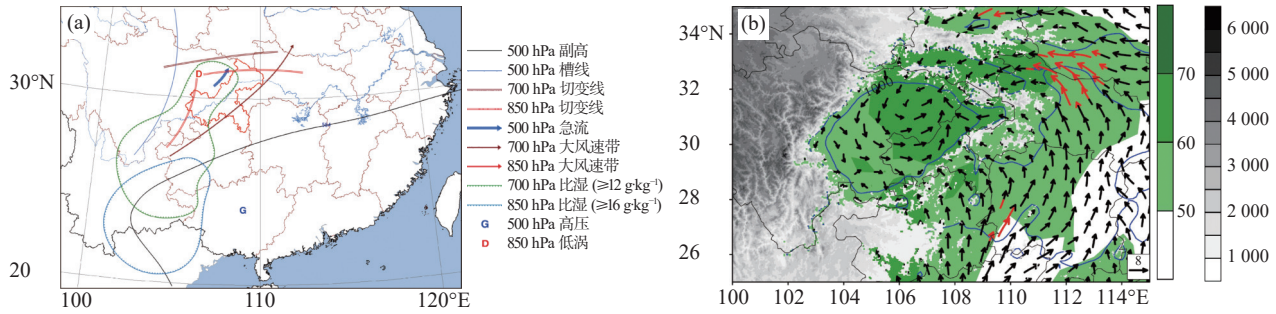


图 4 同图 3, 但为 2018 年 6 月 18 日 08:00

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for 08:00 BT on June 18, 2018

位置偏南, 中纬度多波动槽东移的环流背景下, 低层低涡切变和低空急流配合暖湿能量条件对暴雨的发生和发展非常有利。

由上述分析可知, 两次过程天气尺度背景不同, “9.27”过程为锋面暴雨, “6.18”过程为暖区暴雨。二者直接影响系统相似, 均有 500 hPa 低槽东移、低层切变扰动、低空急流、地面辐合线等主要影响系统, 前者受锋面扰动降水性质有差异, 两次过程地面辐合线均为直接影响系统, 其位置和强度不同导致暴雨落区和雨带形态不同。

4 环境条件对比

4.1 不稳定和动力条件

从“9.27”过程热动力场 (图 5a) 和达州探空演变 (表 1) 可见, 26 日 20:00 为弱对流不稳定和弱抬升运动, 500 hPa 以下假相当位温 (θ_{se}) 随高度递减, 但等值线稀疏, 垂直速度小于−0.4 Pa·s^{-1}, 自由对流高度 (LFC) 较高 (646 hPa), 对流有效位能 (CAPE)较小 (27.2 J·kg^{-1}), 850 hPa 一直为浅薄辐合层。直至27 日08:00, 850 hPa 辐合增强, 700 hPa 辐散增强, 垂直速度超过−0.4 Pa·s^{-1}, 此时, 强降水形成并发展, 350 K高能区向 700 hPa 以上伸展。12:00, 800 hPa 辐合中心超过−14×10^{-5} s^{-1}, 垂直速度达−2.0 Pa·s^{-1}, 而后 850 hPa出现 θ_{se} 低值区并向上下扩展, 随着稳定气层不断增厚, 低层出现下沉和辐散, 降水逐渐结束。

从“6.18”过程热动力场 (图 5b) 和恩施探空演变 (表 1) 可见, 过程前 500 和 850 hPa 假相当位温差 ($\theta_{se(500-850)}$) 亦为负, LFC 较低 (931 hPa), 具有一定 CAPE (624.2 J·kg^{-1}), 近乎无对流抑制能量 (CIN) (0.2 J·kg^{-1}), θ_{se} 均在 348 K 以上, 表明暖湿能量条件较好, 层结利于对流抬升。18 日 14:00 后区域性辐合逐渐增强, 但上升运动仍较弱, 到 18:00, 500 hPa以下对流不稳定性增强, 600 hPa 辐散加强, 抽吸机制形成, 垂直运动超过−0.6 Pa·s^{-1}。20:00 至次日 00:00为强抬升时段, 垂直速度及散度均出现大值中心, 此时 θ_{se} 线形似“Ω”型, 随着低层转为稳定层结, 降水逐渐结束。

经对比分析可知, 两次过程初期均处于弱不稳定和弱抬升条件下, “9.27”过程期间不稳定层结较浅薄, 而“6.18”过程因午后太阳辐射, 不稳定能量积聚, 500 hPa 以下不稳定层结深厚, 对流不稳定性较“9.27”过程更有利。

4.2 水汽条件

“9.27”过程发生在副高外围, 27 日 08:00, 850 hPa (图略) 贵州地区偏南低空急流将南海水汽输送到四

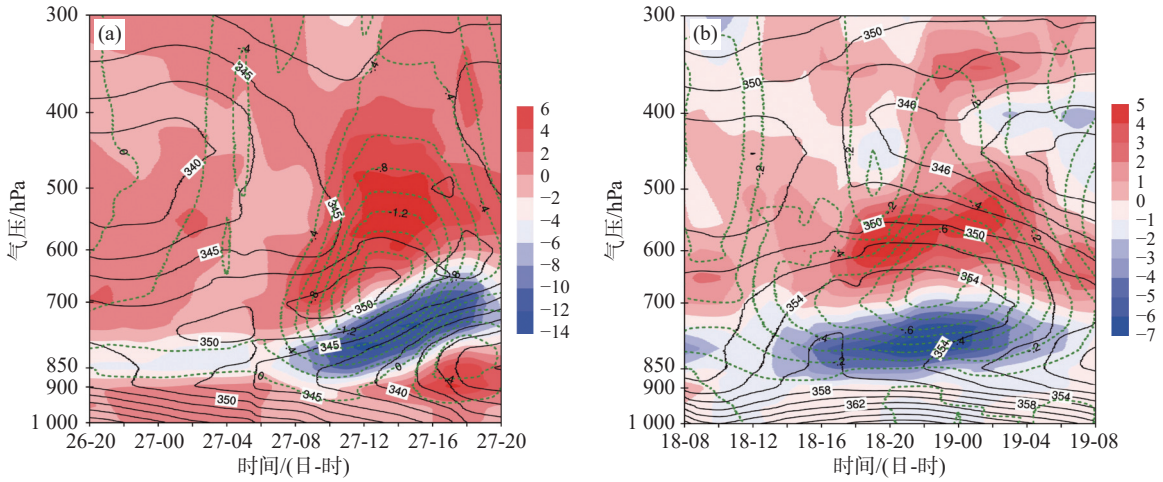


图 5 2017 年 9 月 26 日 20:00—27 日 20:00 图 1 蓝框区域 (a) 和 2018 年 6 月 18 日 08:00—19 日 08:00 图 1 红框区域 (b) 平均假相当位温 (黑色实线, 单位: K)、垂直速度 (绿色虚线, 单位: Pa·s^{-1}) 和散度 (填色, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 时间-高度剖面图

Fig. 5 Time-height profile of average potential pseudo equivalent temperature (black contours, unit: K), vertical velocity (dotted green lines, unit: Pa·s^{-1}) and divergence (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}) over the rainstorm area in Fig. 1 (a) blue frame from 20:00 BT on September 26 to 20:00 BT on September 27, 2017, and (b) red frame from 08:00 BT on June 18 to 08:00 BT on June 19, 2018

表 1 2017 年 9 月 26—27 日达州和 2018 年 6 月 18—19 日恩施探空站不同时次大气环境参数

Table 1 Environmental parameters of sounding station at the Dazhou on September from 26 to 27, 2017, and Enshi on June from 18 to 19, 2018

站名	时次	$\theta_{se(500\text{-}850)}$/℃	LFC/hPa	LCL/hPa	0 ℃层高度/m	CAPE/(J·kg^{-1})	CIN/(J·kg^{-1})
达州	9月26日20:00	−18.77	646	824	5 880	27.2	145
	9月27日08:00	1.82	963	969	5 283	2.6	0
	9月27日20:00	17.21	/	903	5 364	0	0
恩施	6月18日08:00	−15.29	931	935	5 178	624.2	0.2
	6月18日20:00	−15.09	805	881	5 268	1 238.7	56.7
	6月19日08:00	3.94	941	941	5 404	12.8	0

川盆地北部, 开州地区水汽通量超过 10 g·s^{-1}·hPa^{-1}·cm^{-1}, 而后水汽大值区随低涡东移。从水汽通量散度和垂直速度时序演变 (图 6a) 可见, 850 hPa 附近一直有浅薄的水汽辐合层, 27 日 06:00 辐合层开始向上下扩展, 08:00, 700 hPa 出现辐散, 抽吸作用形成, 上升运动不断增强, 12:00 辐合强度达到最强, 超过−1.6×10^{-4} g·s^{-1}·hPa^{-1}·cm^{-2}, 随后辐合中心出现下沉气流, 强度随之减弱, 降水亦减弱。

“6.18”过程贵州地区仍为明显的偏南气流, 建立起南海水汽通道 (图略), 但向北的水汽输送不足, 渝东北水汽通量一直低于 6 g·s^{-1}·hPa^{-1}·cm^{-1}。从时序图 (图 6b) 可见, 18 日午后至 19 日清晨, 700—850 hPa 为一致的水汽通量辐合区, 18 日 22:00 出现辐合中心, 对应 600 hPa 出现辐散, 此时水汽垂直输送强烈。19 日 04:00 后, 上升运动减弱, 水汽辐合减弱, 降水趋于结束。

综上可知, 两次暴雨过程均存在南海水汽输送通道, “9.27”过程暴雨区因位于副高外围, 水汽通量输送更强, 其水汽辐合强度亦强于“6.18”过程。强降水时段渝东北 PW (图 3a、4a) 均较高, 超过其历史同期 99 百分位值 (翟丹华等, 2020), “6.18”过程 PW 中心甚至达到 72 mm。

5 两次暴雨过程的地形影响

5.1 地形作用机制分析

沿暴雨中心作经向剖面, 可分析暴雨区层结及水汽分布与地形的对应关系。“9.27”过程 27 日 08:00 沿 108.5°E 的经向剖面 (图 7a) 显示, 暴雨区近地面存在弱不稳定层结, 大巴山附近锋面南下, θ_{se} 梯度较大, 且随高度向冷区倾斜, 存在一定斜压性, 加之大巴山南麓地形抬升, 经向温度差异进一步加大 (图略), 斜压性不稳定增强, 利于强降水发生。大巴山南缘低层暖湿气流遇山脉抬升后, 800 hPa 附近水汽辐合, 700 hPa 以上水汽辐散 (图 7b)。从地面 2 m 温度、极大风速及降水演变 (图 8) 可见, 27 日 05:00 (图 8a) 达州市区附近存在地面辐合线, 产生小时强

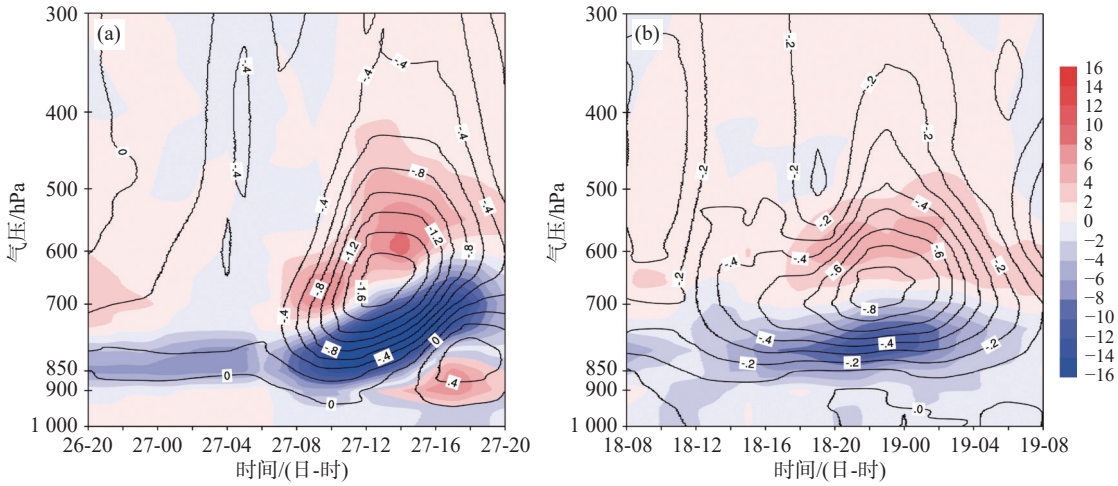


图 6 2017 年 9 月 26 日 20:00—27 日 20:00 暴雨区 (a, 图 1 蓝框区域) 和 2018 年 6 月 18 日 08:00—19 日 08:00 暴雨区 (b, 图 1 红框区域) 平均水汽通量散度 (填色, 单位: $g\cdot s^{-1}\cdot hPa^{-1}\cdot cm^{-2}$) 及垂直速度 (等值线, 单位: $Pa\cdot s^{-1}$) 时间-高度剖面图

Fig. 6 Time-height profile of average vapor flux divergence (shaded, unit: $g\cdot s^{-1}\cdot hPa^{-1}\cdot cm^{-2}$) and vertical velocity (contours, unit: $Pa\cdot s^{-1}$) over the rainstorm area in Fig. 1 (a) blue frame from 20:00 BT on September 26 to 20:00 BT on September 27, 2017, and (b) red frame from 08:00 BT on June 18 to 08:00 BT on June 19, 2018

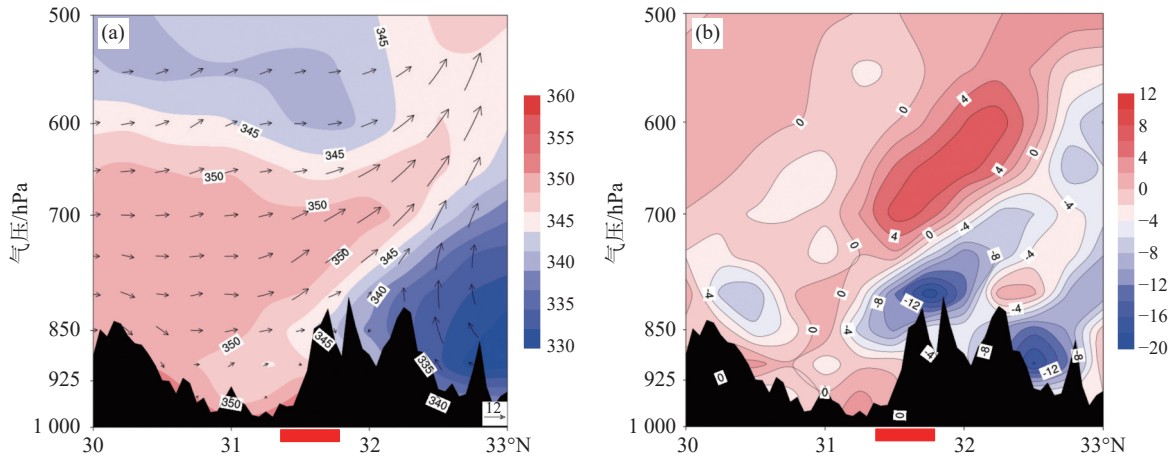


图 7 2017 年 9 月 27 日 08:00 沿 108.5°E 假相当位温 (色斑, 单位: K) 和 v、w 合成风场 (矢量, 单位: $10^{-2}\ m\cdot s^{-1}$) (a) 及水汽通量散度 (b, 单位: $g\cdot s^{-1}\cdot hPa^{-1}\cdot cm^{-2}$) 经向剖面图 (▬为暴雨区, 黑色区域为地形)

Fig. 7 Meridional profile of the (a) potential pseudo equivalent temperature (shaded, unit: K), composite wind (vector, unit: $10^{-2}\ m\cdot s^{-1}$) of v and w, (b) vapor flux divergence (unit: $g\cdot s^{-1}\cdot hPa^{-1}\cdot cm^{-2}$) along 108.5°E at 08:00 BT on September 27, 2017 (▬ represents rainstorm area, the black area is terrain)

降水 (图 8d), 最大小时雨量达 55 mm (位于暴雨云团西南侧), 此后辐合减弱东移, 于 07:00 北抬至观面山南侧, 同时在地面冷空气和地形叠加影响下, 形成了新的辐合线, 出现最大小时雨量 51 mm。08:00—09:00, 地面辐合线略北抬后稳定维持在观面山及其以东地区, 对流系统不断被生成且维持, 并沿辐合切变东移, 小时雨量由 08:00 单点 58 mm 增强至 09:00 线状大值区 (小时雨量 51~53 mm), 呈东北—西南向, 与切变走向相一致, 切变北侧雨强亦有所增强。10:00 后辐合切变东移北抬, 在环境气流引导下减弱移出, 降水强度亦随之减弱 (图 8k)。

6 月 18 日 17:00 沿 109.5°E 的经向剖面 (图 9) 显示, 长江河谷近地面 θ_{se} 超过 360 K, 随高度递减, 存在一定不稳定, 北上暖湿气流遇大巴山南麓抬升增强, 水汽亦在大巴山附近存在强辐合辐散中心, 长江河道上空有浅薄的辐合辐散层, 表明存在一定动力抬升和水汽辐合条件。从地面 2 m 温度、极大风速及降水演变 (图 10) 可见, 在暖式切变和低空急流影响下, 长江河谷始终维持暖湿和一定不稳定层结, 有利于中尺度降水系统的触发。具体来看, 16:00, 开州境内的对流减弱进入长江沿线, 受云阳东部和奉节西北部辐合线抬升, 对流再次增强, 雨强普遍 20~30 $mm\cdot h^{-1}$, 在地形动力和热力强迫作用下, 17:00 奉节河道附近地面风速加大, 形成近地面大风速区, 有利于暴雨中心强上升运动的维持, 亦能加强低空水汽向对流体中流入, 维持对流发展 (孙继松等, 2006),

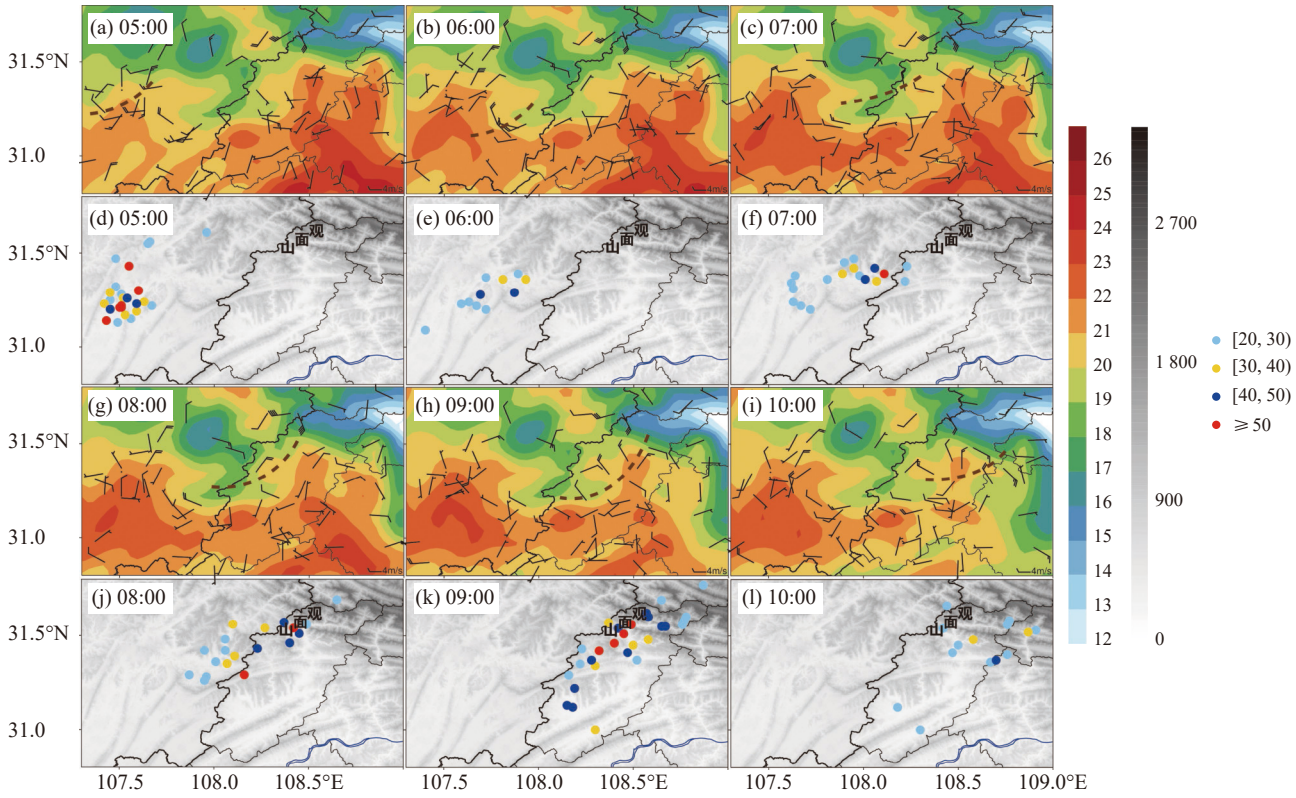


图 8 2017 年 9 月 27 日 05:00 (a, d)、06:00 (b, e)、07:00 (c, f)、08:00 (g, j)、09:00 (h, k)、10:00 (i, l) 地面风场 (风向杆, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 和 2 m 温度 (色斑, 单位: ℃) 分布 (a—c、g—i)及小时强降水 (圆点, 单位: mm, ≥20 mm 分级显示) 演变和地形 (阴影, 单位: m) 分布图 (d—f、j—l)(棕色虚线为地面辐合线, 蓝实线为长江, 下同)

Fig. 8 Distribution of (a-c, g-i) the surface wind (vector, unit: $m \cdot s^{-1}$) and 2 m temperature (shaded, unit: ℃), (d-f, j-l) the evolution of hourly heavy precipitation (dot, unit: mm, ≥20 mm grading display) and topographic (shaded, unit: m) at (a, d) 05:00 BT, (b, e) 06:00 BT, (c, f) 07:00 BT, (g, j) 08:00 BT, (h, k) 09:00 BT, (i, l) 10:00 BT on September 27, 2017 (The blue line indicate Yangtze River, the brown lines indicate surface convergence lines, hereinafter)

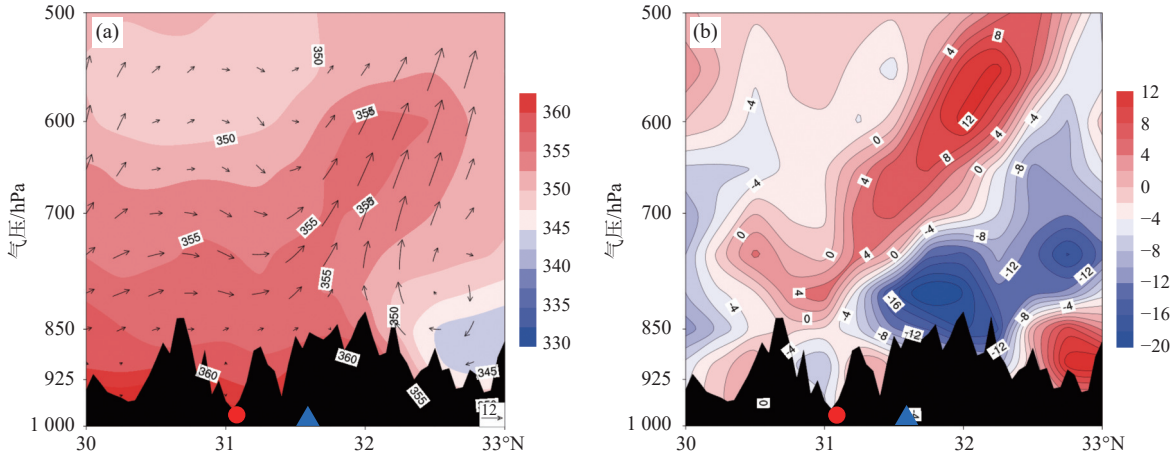


图 9 同图 7, 但为 2018 年 6 月 18 日 17:00 沿 109.5°E 经向剖面(● 为长江河谷, ▲大巴山)

Fig. 9 Same as Fig. 7, but meridional profile along 109.5°E at 17:00 BT on June 18, 2018 (● indicate Yangtze River, ▲indicate Daba Mountain)

此时雨强增强至 51 $mm \cdot h^{-1}$。18:00—19:00 切变辐合东移, 对流亦东移, 途径奉节、巫山交界的龙王山地区时, 暖湿气流在龙王山喇叭口地形抬升作用下, 雨强增大至 60.5 mm, 20:00 辐合东移减弱。20:00 后的降雨为系统南压造成的混合型降水。

综上, 渝东北大巴山南麓不同地形对两次暴雨过程作用机制有所不同。“9.27”暴雨过程处于地势抬升区, 观面山附近地形抬升加大了锋面附近的温度热力差异, 使斜压不稳定性增强, 同时抬升低层北上暖湿气流, 形成水汽汇, 在地面辐合线触发下形成暴雨, 辐合切变线的稳定维持是导致强降水持续的主要原因。“6.18”暴雨过程位于长江河谷区, 对流出流受长江河谷地形及热力强迫作用, 形成近地面大风速区, 地面辐合线增强, 触发并维持对流, 而后龙

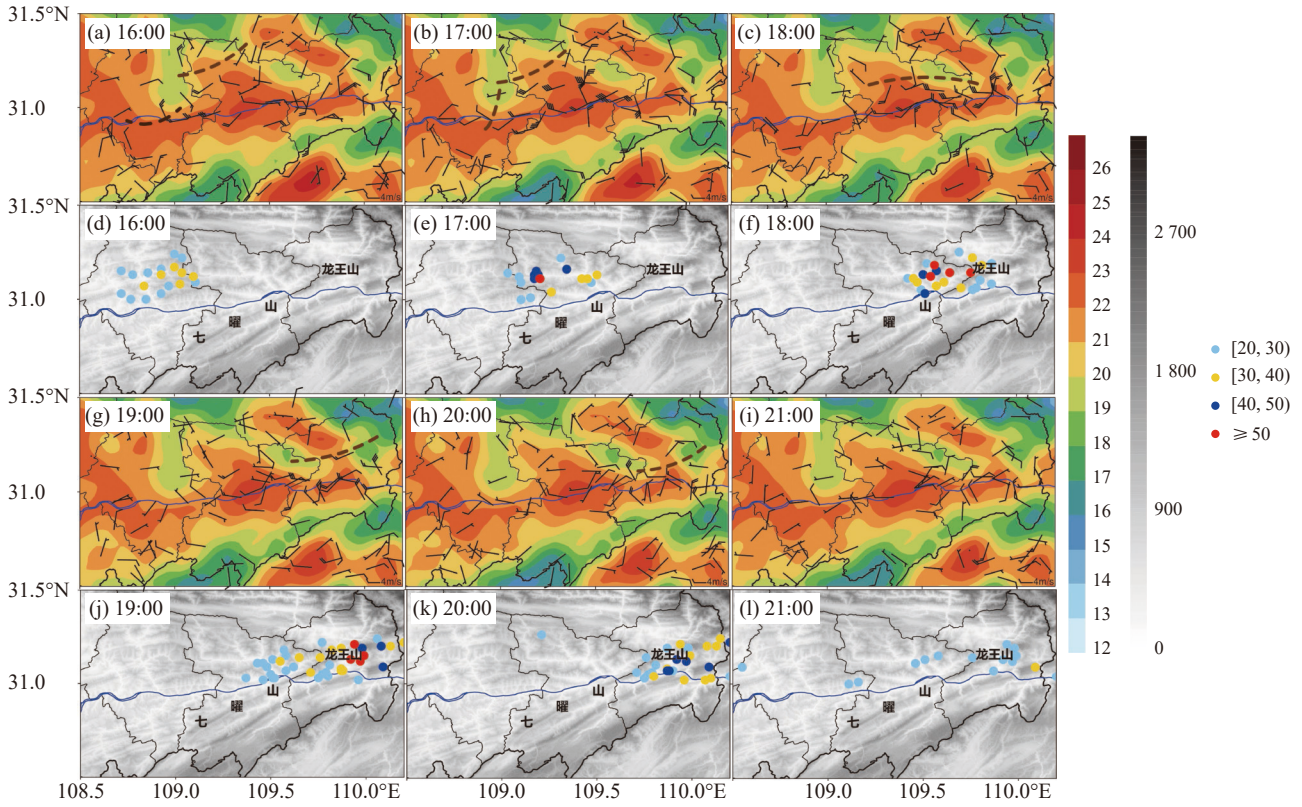


图 10 同图 8, 但为 2018 年 6 月 18 日 16:00—21:00

Fig. 10 Same as Fig.8 but for time from 16:00 BT to 21:00 BT on June 18, 2018

王山喇叭口地形致使暖湿气流抬升增强上升运动, 促进并维持强降水。

5.2 地形对 MCS 演变的影响

“9.27”暴雨过程在地面辐合线稳定维持下先后有 4 个对流单体沿西南—东北向移经开州北部暴雨区, 形成“列车效应” (图 11a—i)。27 日 05:00 (图 11a), 弱回波进入开州境内增强形成单体 A, 雨强在 10 mm·h^{-1} 以下, 后北抬减弱。此时, 达州市区附近在地面辐合作用下 γ 中尺度单体 B 发展, 于 06:19 (图 11b) 沿天白山与观面山间的东西峡谷地带进入开州境内, 随着地面辐合线北抬 (图 8c), 单体 B 维持的同时触发其后侧对流单体 C、D 形成 (图 11b、c)。07:27 (图 11d), 单体 C 并入 B 中, B 强回波面积扩大至 300 km^2, 形成 M$_\beta$CS 中尺度系统, 10 min 最大雨量达 17.9 mm, 随后在大巴山的阻挡下分裂减弱。单体 D 于 07:45 进入开州境内 (图 11e), 中心强度由 50 dBz 增至 58 dBz (图 11f), 09:05 (图 11g) 途径观面山峡谷时增强至 63 dBz, 10 min 最大雨量 13.6 mm, 后受地形抬升减弱消散。单体 E 移动路径同单体 D (图 11i), 于 10:00 发展加强, 10 min 最大雨量 14.4 mm, 0.5 h 后移入巫溪境内并逐渐减弱。

“6.18”暴雨过程为对流单体沿长江河谷及其北侧东移影响造成 (图 12a—i)。14:03 (图 12a), 降水回波进入云阳境内激发出 2 个 γ 中尺度对流单体 A、B, B 在东移过程中逐渐减弱 (图 12b)。单体 A 近河谷一侧在切变作用下不断有对流新生 (图 12b), 而北侧不断减弱。在移至云阳东部时, 切变在地形作用下出现气旋性结构, 原本减弱断裂的北侧对流又再次发展(图 12c)。16:00 进入奉节境内, 二者逐渐合并, 范围扩大至 400 km^2 (图 12d), 形成 M$_\beta$CS 中尺度系统, 境内长江河谷收窄, 在峡谷作用下风速加大, 形成局地大风速区。单体 A 沿河谷北侧东移, 于 17:00 左右移至奉节东部 (图 12e), 在龙王山地形抬升作用下, 后侧对流新生使 A 长时间维持, 30 min 降雨量大于 30 mm。17:30 后 (图 12f), A 移入巫山境内后移出, 其后侧沿长江一带多对流单体活动, 其中 C、D 进入巫山境内合并增强 (图 12g—h), A、C、D 的先后影响使巫山成为暴雨中心。20:00 后 (图 12i), 大片混合型回波形成“列车效应”, 致长江沿线及以北持续性强降雨。

综上所述, 两次过程均为 M$_\beta$CS 中尺度对流系统影响下的强降水过程, 降水初期 γ 中尺度对流单体在暖湿能量条件下受地面辐合线触发新生, 经地形作用不断合并或加强为 β 中尺度对流单体, 造成开州北部及长江河谷北侧暴雨。但两次过程回波

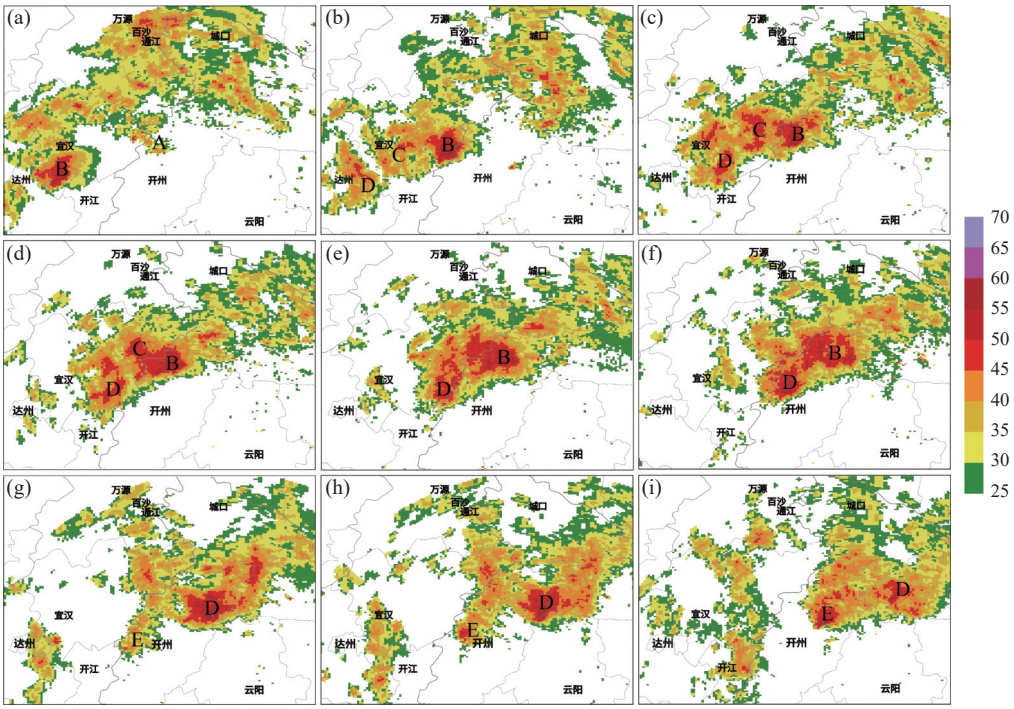


图 11 2017 年 9 月 27 日 04:59 (a)、06:19 (b)、07:02 (c)、07:27 (d)、07:45 (e)、08:10 (f)、09:05 (g)、09:24 (h)、10:01 (i) 万州雷达组合反射率因子(单位: dBz) 分布图

Fig. 11 Wanzhou radar composite reflectivity mosaic (unit: dBz) at (a) 04:59 BT、(b) 06:19 BT、(c) 07:02 BT、(d) 07:27 BT、(e) 07:45 BT、(f) 08:10 BT、(g) 09:05 BT、(h) 09:24 BT、(i) 10:01 BT on September 27, 2017

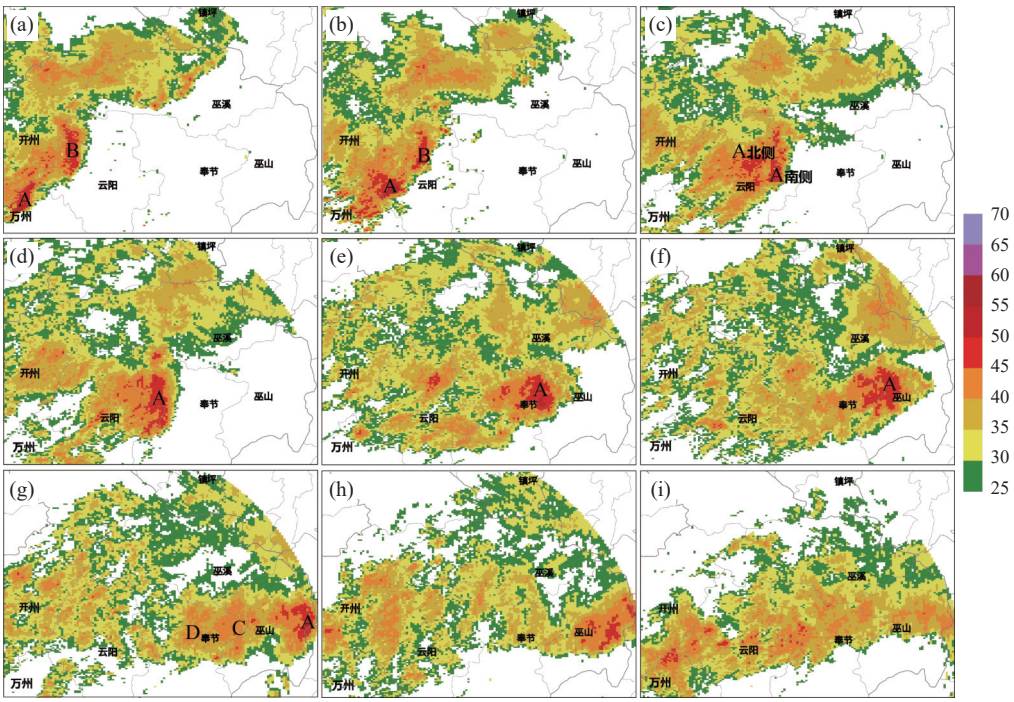


图 12 2018 年 6 月 18 日 14:03 (a)、14:40 (b)、15:29 (c)、16:00 (d)、17:02 (e)、17:32 (f)、18:28 (g)、19:30 (h)、20:38 (i) 万州雷达组合反射率因子(单位: dBz) 分布图

Fig. 12 Wanzhou radar composite reflectivity mosaic (unit: dBz) at (a) 14:03 BT、(b) 14:40 BT、(c) 15:29 BT、(d) 16:00 BT、(e) 17:02 BT、(f) 17:32 BT、(g) 18:28 BT、(h) 19:30 BT、(i) 20:38 BT on June 18, 2018

发展演变有所不同, “9.27”过程受地面锋面、观面山附近地形抬升影响, 地面辐合线稳定维持, 达州、宣汉地区新生对流单体在环境风西南气流引导下, 沿相同路径移经开州北部暴雨区, 形成“列车效应”。“6.18”过程受热力差异和地形作用致近地面出现大风速区, 增强地面辐合, 触发并维持对流单体沿长

江河谷东移，在奉节东部龙王山地形作用下强度增强且稳定少动，造成长江沿线及以北地区持续性强降雨。

6 结论和讨论

本文利用常规观测、区域站加密观测、多普勒天气雷达、ERA5 逐时再分析数据，对渝东北大巴山南麓地形影响下的 2017 年“9.27”和 2018 年“6.18”两次暴雨过程进行了对比分析，得到以下主要结论：

(1) 两次过程天气尺度背景不同，“9.27”过程为锋面暴雨，“6.18”过程为暖区暴雨，均有 500 hPa 低槽东移、低层切变扰动、低空急流、地面辐合线等影响系统，辐合线位置和强度的差异导致暴雨落区和雨带形态不同。两次过程初期均为弱对流不稳定和弱抬升条件，“6.18”过程因午后能量积聚，不稳定性显著增强。二者均建立南海水汽输送通道，“9.27”过程水汽输送和辐合强度更强。

(2) 大巴山南麓地形对两次暴雨过程作用机制不同。“9.27”过程大巴山南麓观面山地形抬升加大了锋面附近的温度热力差异，使斜压不稳定性增强，同时阻挡并抬升暖湿气流，增强水汽辐合，在地面辐合线触发下形成并维持强降水。“6.18”过程长江河谷及其两侧山脉动力抬升及热力强迫使河谷近地面出现大风速区，增强地面辐合，触发对流，奉节东部龙王山地形产生局地气旋性环流，增强上升运动，维持强降水。

(3) 地形影响下两次过程 $M_{\beta}CS$ 发展演变有所不同，“9.27”过程地面辐合线稳定维持，触发达州、宣汉附近 4 个对流单体在西南气流引导下先后移经开州北部暴雨区，形成“列车效应”。“6.18”过程近地面大风速区增强地面辐合，触发多个对流单体沿长江河谷东移，在奉节东部龙王山地形抬升作用下发展增强并稳定少动，造成长江沿线及以北地区持续性强降雨。

本文对比分析了大巴山南麓两次暴雨过程在动热力环境条件、中尺度系统发展演变上的异同，初步揭示了局地地形对暴雨的作用机制，但由于山地地形复杂，喇叭口、峡谷等小尺度地形众多，不同地形对暴雨的定量化作用如何，有待从高分辨率数值模拟、能量转换、云微物理过程等方面作进一步探讨研究。

参考文献 (References):

毕宝贵,刘月巍,李泽椿.2006.秦岭大巴山地形对陕南强降水的影响研究[J].高原气象,25(3):485−494. Bi B G, Liu Y W, Li Z C. 2006. Study on influence of the mechanical forcing of mesoscale topography on the extremely heavy rainfall in Southern Shaanxi on 8~9 June 2002 [J]. Plateau Meteorology,25(3):485−494 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:1000−0534.2006.03.016

崔春光,闵爱荣,胡伯威.2002.中尺度地形对“98.7”鄂东特大暴雨的动力作用[J].气象学报,60(5):602−612. Cui C G, Min A R, Hu B W. 2002. Dynamic effect of mesoscale terrain on "98.7" extremely heavy rain in the East of Hubei Province [J]. Acta Meteorologica Sinica,60(5):602−612 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:0577−6619.2002.05.011

邓承之,何跃,庞玥,等.2016. 2014 年一次渝东北大暴雨天气成因诊断分析[J].气象科技,44(2):290−296. Deng C Z, He Y, Pang Y, et al. 2016. Diagnostic analysis of a heavy rain over Northeastern Chongqing [J]. Meteorological Science and Technology,44(2):290−296 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.2016.02.019

黄楚惠,李国平,张芳丽,等.2020.近 10 a 气候变化影响下四川山地暴雨事件的演变特征[J].暴雨灾害,39(4):335−343. Huang C H, Li G P, Zhang F L, et al. 2020. Evolution characteristics of mountain rainstorms over Sichuan Province in the past ten years under the influence of climate change [J]. Torrential Rain and Disasters,39(4):335−343 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2020.04.003

栗晗,王新敏,张霞,等.2018.河南“7·19”豫北罕见特大暴雨降水特征及极端性分析[J].气象,44(9):1136−1147. Li H, Wang X M, Zhang X, et al. 2018. Analysis on extremity and characteristics of the 19 July 2016 severe torrential rain in the North of Henan Province [J]. Meteorological Monthly,44(9):1136−1147 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.09.002

李毅,李国平.2023.四川盆地东北部山地夜间暴雨特征的合成分析[J].高原山地气象研究,43(3):21−31. Li Y, Li G P. 2023. Composite analysis of nocturnal rainstorm characteristics in Northeastern Sichuan Basin [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,43(3):21−31 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2023.03.003

廖移山,冯新,石燕,等.2011. 2008 年“7.22”襄樊特大暴雨的天气学机理分析及地形的影响[J].气象学报,69(6):945−955. Liao Y S, Feng X, Shi Y, et al. 2011. Analysis of the mechanism for "2008.7.22" excessive rain event in Xiangfan with a focus on the terrain effect [J]. Acta Meteorologica Sinica,69(6):945−955 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2011.082

林之光.1982.我国的地形性夜雨[J].气象,8(6):18−20. Lin Z G. 1982. Topographic night rain in China [J]. Meteorological Monthly,8(6):18−20 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.1982.6.009

刘德,张亚萍,陈贵川,等.2012.重庆市天气预报技术手册[M].北京:气象出版社,389. Liu D, Zhang Y P, Chen G C, et al. 2012. Chongqing Weather Forecast Technical Manual [M]. Beijing:Meteorological Press,389

刘裕禄,黄勇.2013.黄山山脉地形对暴雨降水增幅条件研究[J].高原气象,32(2):608−615. Liu Y L, Huang Y. 2013. Study of Huangshan Mountain terrain on precipitation enhancement condition [J]. Plateau Meteorology,32(2):608−615 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2012.00059

孙继松,王华,王令,等.2006.城市边界层过程在北京 2004 年 7 月 10 日局地暴雨过程中的作用[J].大气科学,30(2):221−234. Sun J S, Wang H, Wang L, et al. 2006. The role of urban boundary layer in local convective torrential rain happening in Beijing on 10 July 2004 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,30(2):221−234 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2006.02.05

孙继松,杨波.2008.地形与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨[J].大气科学,32(6):1352−1364. Sun J S, Yang B. 2008. Meso-β Scale torrential rain affected by topography and the urban circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,32(6):1352−1364 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2008.06.10

王丛梅,俞小鼎,李芷霞,等.2017.太行山地形影响下的极端短时强降水分析[J].气象,43(4):425−433. Wang C M, Yu X D, Li Z X, et al. 2017. Investigation of extreme flash-rain events on the impact of Taihang Mountain [J]. Meteorological Monthly,43(4):425−433 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2017.04.004

徐渊,闵锦忠,庄潇然,等.2024.一次复杂地形下边界层抬升型暖区暴雨对流触发条件和可预报性的数值研究[J].大气科学,48(3):1095−1112. Xu Y, Min J Z, Zhuang X R, et al. 2024. Numerical study on convection initiation conditions and predictability of a warm-sector rainstorm lifting from boundary layer under complex terrain [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,48(3):1095−1112 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2207.22103

翟丹华,张亚萍,朱岩,等.2020.綦江流域一次破纪录洪水过程的水文与雷达回波特征分析[J].暴雨灾害,39(6):603−610. Zhai D H, Zhang Y P, Zhu Y, et al. 2020. Analysis of hydrological and radar echo characteristics for a record-breaking flood event in Qijiang catchment [J]. Torrential rain and disasters,39(6):603−610 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2020.06.008

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 Meteorology,39(2):321−332 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2019.00080

赵强,王建鹏,王楠,等.2017. 2012 年夏季秦巴山区暴雨过程的地形作用诊断[J].气象科技,45(1):139−147. Zhao Q, Wang J P, Wang N, et al. 2017. Diagnostic study of topographic effect of a rainstorm in Qinba Mountain in summer in 2012 [J]. Meteorological Science and Technology,45(1):139−147 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20160108

周芳弛,李国平.2024.四川盆周山地暖季单站暴雨事件的精细特征[J].气象科学,44(3):431−441. Zhou F C, Li G P. 2024. Fine characteristics of single station rainstorm events in warm season in mountain areas around Sichuan Basin [J]. Journal of the Meteorological Sciences,44(3):431−441 (in Chinese). doi:10.12306/2023jms.0023

周芳弛, 李国平, 黄楚惠.2023.四川山地暖季夜间暴雨的空间分布以及对海拔高度的依赖性[J].沙漠与绿洲气象,17(4):78−86. Zhou F C, Li G P, Huang C H. 2023. Spatial distribution of nighttime rainstorms in warm season in Sichuan mountains and the dependence on altitude [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(4):78−86. (in Chinese) doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.04.011

Zhou Y, Li G P. 2024. Evolution and roles of mesoscale convective system during the nocturnal rainfall in Sichuan Basin and its surrounding mountainous areas [J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 106. doi:10.1016/j.dynatmoce.2024.101445

Zeng Y, Yang L. 2020. Triggering mechanism of an extreme rainstorm process near the Tianshan Mountains in Xinjiang, an arid region in China, based on a numerical simulation [J]. Advances in Meteorology, 2020(1):8828060 doi:10.1155/2020/8828060

Wang P D, Li G P. 2016. Numerical experiments of the impact of Qin-Ba Mountainous terrain on a rainstorm caused by Southwest Vortex [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition),38(3):418−429. doi:10.7540/j.ynu.20150765

Wang Q, Xue M, Tan Z. 2016. Convective initiation by topographically induced convergence forcing over the Dabie Mountains on 24 June 2010 [J]. Advances in Atmospheric Sciences,33(10):1120−1136 doi:10.1007/s00376−016−6024−z

(责任编辑　张 文)