

大巴山和平行岭谷对中尺度对流系统及暴雨的作用

罗娟¹ 李国平² 刘超¹ 刘俸霞³ 陈冷羽³

1 重庆市气象台, 重庆 401147;

2 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

3 重庆市万盛经开区气象局, 万盛 400800

摘要: 利用加密自动站资料、ERA5 再分析资料和雷达探测资料, 分析了 2021 年 6 月 17—18 日大巴山南麓川东平行岭谷地区北端一次大暴雨过程的环流形势、中尺度对流系统的组织和传播特征, 以及大巴山和平行岭谷地形对大暴雨的共同作用。结果表明, 此次大暴雨发生在大巴山与川东平行岭谷山脉地形交汇处, 先后经历了三次中尺度对流系统的演变。多条东北-西南向带状对流系统沿着平行岭谷山脉组织和发展, 对流单体列车效应和多条雨带叠加效应加强了降水。盆地冷锋和地面辐合线对中尺度对流系统的触发和组织有重要作用。盆地冷锋东移, 与沿巫山和长江河谷入侵的东路冷空气发生锢囚, 有利于对流系统的加强和维持。大巴山地形对暴雨的作用体现在阻挡作用和热动力抬升方面, 迎风坡地形对水汽和能量输送有阻挡和汇聚作用, 东西向水汽辐合带和假相当位温高值区在大巴山南麓维持, 边界层锋生、正涡度区、低层辐合区和上升运动区均沿着大巴山倾斜发展。川东平行岭谷地形对暴雨的作用则体现在边界层水汽聚集、地面辐合线维持以及中尺度锢囚锋的形成等方面, 使得北移的中尺度对流系统在大巴山南麓发展旺盛, 从而引发此次山区大暴雨事件。

关键词: 山区大暴雨, 大巴山, 川东平行岭谷, 中尺度对流系统, 地形作用

中图分类号: P458, P426 **DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.071802

The Role of the Daba Mountain and the Parallel Ridge-Valley on Mesoscale Convective Systems and Heavy Rainfall

LUO Juan¹ LI Guoping² LIU Chao¹ LIU Fengxia³ CHEN Lingyu³

1 Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147;

2. School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

3. Wansheng Economic Development Zone Meteorological Station of Chongqing, Chongqing 400800

*国家自然科学基金项目(42175002)、中央引导地方科技发展项目(2024ZYD0175)和重庆市气象部门人才支持性项目(RCZC-202301)共同资助

2024-07-22 收稿 2025-07-18 收修订稿

第一作者: 罗娟, 主要从事地形强降水预报及订正技术研究。Email:443153195@qq.com

通讯作者: 李国平, 主要从事暴雨动力学、高原山地气象学研究。E-mail:liguoping@cuit.edu.cn

Abstract: Using encrypted automatic station data, ERA5 reanalysis data, and radar detection data, this study analyzed the synoptic situation, mesoscale convective system and propagation characteristics, as well as the combined effects of the Sichuan Basin's Parallel Ridge-Valley Region and the Daba Mountain on a heavy rain event on June 17-18, 2021. The result showed that the heavy rain occurred at the junction area of the Daba Mountain and the Sichuan Basin's Parallel Ridge-Valley Region, and it went through three stages of evolution of mesoscale convective systems. Multiple northeast-southwest oriented strip-shaped convective systems were organized and developed along the mountains of Parallel Ridge-Valley, with convective cell train effects and rainband stacking effects intensifying the precipitation. The cold front over the basin and the ground convergence line played an important role in triggering and organizing the mesoscale convective systems. Additionally, the cold front over the basin interacted with the eastward-moving cold air invading along the Wu Mountain and the Yangtze River valley, leading to the strengthening and maintenance of the convective systems. The role of the Daba Mountains in the heavy rain was reflected in their blocking effect and thermodynamic lifting. The windward slope of the terrain had a blocking and converging effect on the transport of water vapor and energy, with east-west oriented water vapor convergence belts and high pseudo-adiabatic potential temperature areas maintained on the southern slope of the Daba Mountains. The boundary layer frontogenesis, positive vorticity areas, low-level convergence areas, and upward motion areas developed along the slope of the Daba Mountain. The role of the Sichuan Basin's Parallel Ridge-Valley terrain in precipitation was reflected in the aggregation of boundary layer water vapor, the quasi-stationary maintenance of the ground convergence line, and the formation of mesoscale occlusion fronts, which caused the mesoscale convective systems to move northward to the southern slope of the Daba Mountain. The mesoscale convective systems stagnated there and develop vigorously, thus triggering this heavy rain event in the mountainous area.

Keywords: mountainous heavy rainstorm, Daba Mountain, the parallel ridge-valley in eastern Sichuan, mesoscale convective system, terrain effect

引言

暴雨灾害是中国主要气象灾害之一，也是灾害性天气预报的重点。暴雨过程中强降水的发生不仅与大气环流系统有关，地形也是影响暴雨分布和强度的重要因素，学者们已对地形

与暴雨的关系进行了大量研究(陶诗言, 1980; 孙继松, 2005; 廖移山等, 2011; 李超等, 2018; 黄小彦等, 2020; 陈博宇等, 2023; 杨晓亮等, 2023; 陈涛等, 2024; 邓承之等, 2024; 肖红茹等, 2025)。地形对暴雨的影响主要表现在动力和热力两个方面, 即迎风坡对气流的辐合抬升作用、山脉对气流的阻挡绕流作用以及地形下垫面对大气的加热作用等(陶诗言, 1980; 肖庆农和伍荣生, 1995; 朱民等, 1999; 孙继松, 2005; 赵玉春等, 2011; 赵思雄等, 2018; 钟水新, 2020)。陶诗言(1980)指出地形迎风坡具有动力及屏障作用, 可以使气流绕地形流动和被迫爬升, 并认为地形也可以作为中尺度对流系统触发机制, 促使不稳定能量释放。金妍和李国平(2021)通过绕流和爬流方程探讨地形对过山气流的影响及其对降水的作用, 研究得出气流对山地屏障的地形适应以爬流运动为主, 绕流运动次之, 地形爬流产生的垂直上升运动与雨带分布密切相关。高珩洲和李国平(2020)对贵州省雷山县一次突发性暴雨过程进行中尺度天气学分析和数值试验, 其结果表明地形可以通过改变山地动力、水汽等物理量场来影响暴雨的落区和强度, 地形的抬升作用造成水汽与不稳定能量在迎风坡堆积, 使层结不稳定性增强, 在强烈上升运动作用下触发对流不稳定发展。黄楚惠等(2022)对四川雅安芦山特大暴雨的分析指出, 在弱天气尺度背景下, 雅安“迎风坡”、“喇叭口”地形和芦山西南向“Λ”型峡谷多尺度地形对水汽输送有阻挡和汇聚作用, 边界层地形作用产生的地形抬升速度、气旋式涡度和水平辐合与系统性垂直上升运动、涡度和散度叠加, 增强了垂直运动和降水。陈双等(2016)分析北京香山一次短时局地大暴雨过程指出, 在中尺度对流系统发生发展过程中, 复杂地形起到重要作用, 山前辐合抬升, 增强大气垂直上升速度, 加大动力和热力不稳定, 触发新生对流和使对流快速加强。章翠红等(2018)研究表明, 地形会使冷池出流下山速度加快、冷池出流厚度升高以及冷池出流与偏东暖湿气流的辐合抬升作用是对流新生和加强的重要因素。以上研究均表明, 地形在中尺度对流系统触发、组织和移动过程中扮演着非常重要的角色, 地形的动力热力作用、对水汽输送的阻挡和汇聚对强降水过程发生、维持和增强具有重要影响。

重庆地处四川盆地周山地向盆地过渡地带, 川东平行岭谷地区则位于川渝交界处, 北起大巴山南麓, 南至云贵高原北侧, 东靠武陵山脉, 主要由一系列东北-西南走向的平行状山岭和谷地(简称平行岭谷)组成, 重庆西部位于川东平行岭谷山脉南端, 北部位于平行岭谷北端(图 1a)。目前, 川东平行岭谷山脉对降水影响的研究还不多, 赵衍斌等(2023)对重庆西部(平行岭谷山脉南端)地形作用下局地暴雨天气过程进行了分析, 发现岭谷地区 850 hPa 以下的边界层存在明显的水汽聚集、辐合上升以及不稳定性增强, 在岭谷地形作用下, 冷锋配合沿地面辐合线北抬的辐合中心在迎风坡抬升, 加强了垂直上升运动和山前暴雨。而重庆

北部地处川东平行岭谷山脉北端，既受到平行岭谷地形影响，又受到大巴山脉影响，多尺度地形复合作用使得重庆北部降水较西部更为复杂，具有降雨强度大、突发性强、次生灾害重且预报难度大的特点。一些学者已对重庆北部暴雨进行了研究，如程晓龙等（2016）研究发现水汽受地形阻挡作用在大巴山以南堆积，引发了大巴山南麓的暴雨。邓承之等（2016）对2014年一次渝东北大暴雨的研究发现，地形对降水增幅作用显著，TREC（雷达回波外推的相关性跟踪方法）风场显示大巴山南麓维持西南气流，风向与山脉走向近乎垂直，地形的强迫抬升作用加大了山前降水，形成与山脉走向基本一致的暴雨区。

需要指出的是，前人研究主要侧重于大巴山对暴雨影响的研究，而大巴山与川东平行岭谷山脉共同作用，大尺度和中小尺度山脉复合作用下中尺度对流系统组织和传播特征、触发和维持机制研究还比较欠缺。因此，本文选取2021年6月17—18日发生在大巴山南麓川东平行岭谷山脉北端（重庆北部）的一次大暴雨过程，分析在有利大尺度环流形势下，川东平行岭谷地区中尺度对流系统的组织和传播特征，大巴山和平行岭谷多尺度复合地形对暴雨作用等，为重庆北部复杂地形下暴雨的精准预报提供参考。

1 资料

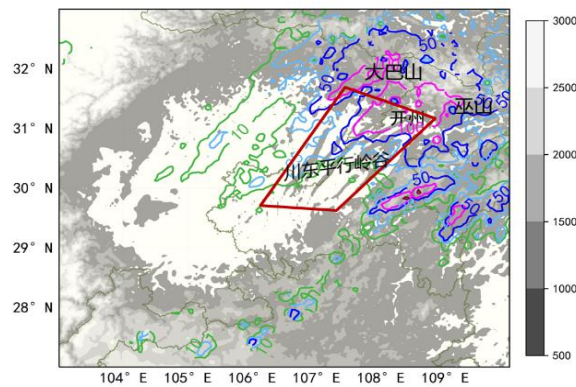
本文使用多源观测资料做综合分析。所用资料包括：（1）地面加密及自动站观测资料，时间分辨率为1 h，观测数据包括温度、小时降水量、风向风速以及站点气压，主要用于降水量分布、中尺度雨团演变和地面中尺度系统分析。（2）欧洲中期天气预报中心第五代再分析资料（ERA5），时间分辨率为1 h，空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，主要用于环流形势和物理量诊断分析。（3）重庆万州S波段多普勒天气雷达的反射率产品，用于中尺度对流系统特征和演变分析。（4）四川盆地及周边山地地形资料，空间分辨率为30 km和3 km，其中30 km主要用于大巴山地形对降水作用的分析，3 km则用于川东平行岭谷地形对降水影响的分析。

2 暴雨概况与环流形势

2.1 大暴雨概况

图1给出了2021年6月17日14:00至18日14:00（北京时，下同）重庆及周边地区累计降水量，重庆有226个雨量站达暴雨，128个雨量站为大暴雨，1个雨量站为特大暴雨。结合地形分布可以看出，雨带分布及走向与地形密切相关，100 mm以上降水形成4条东北-西南向多雨带分布，其中北边两条雨带位于大巴山脉南麓，川东平行岭谷山脉北端，雨带

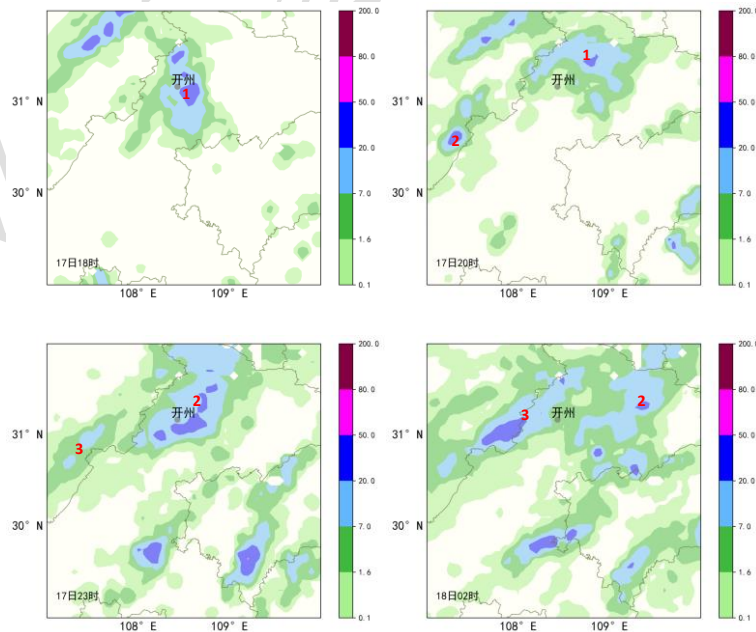
走向与平行岭谷山脉一致，南边两条雨带位于武陵山区，走向与武陵山脉一致，大暴雨中心开州站位于大巴山和川东平行岭谷山脉交汇处，过程累计降水量达 249.5 mm。从逐小时降水量演变图可以看出（图 2），大巴山南麓大暴雨并非由一次连续降水造成，而是中尺度雨团（雨带）不断生成和移入的结果，共经历了 3 次 β 中尺度雨团（雨带）的演变。雨团 1 在大巴山南麓开州附近发展强盛并维持约 3 h。而雨带 2 和 3 均在川东平行岭谷山脉南端初生，随后沿着平行岭谷山脉向东北方向移动，拉伸成东北-西南向带状 β 中尺度雨带，最后在大巴山南麓发展强盛，并受地形阻挡作用雨带准静止维持。



注：图中红色矩形框代表川东平行岭谷区域；开州为暴雨中心点，下同。

图 1 2021 年 6 月 17 日 14:00 至 18 日 14:00 累计降水量（等值线，单位：mm）及地形（阴影，单位：m）分布

Fig. 1 Cumulative rainfall (contours, unit: mm) from 14:00 BT on 17 June to 14:00 BT on 18 June 2021 and topographic distribution map (shaded, unit: m)



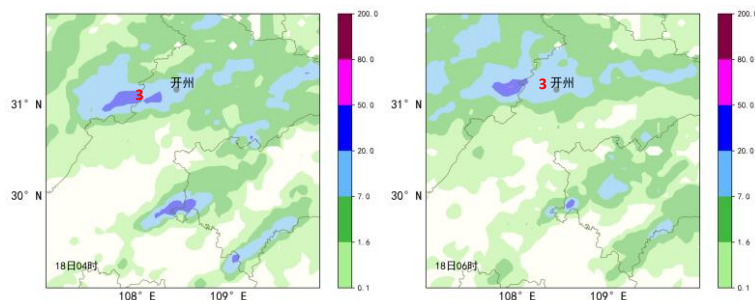


图 2 2021 年 6 月 17 日 18:00 至 18 日 06:00 逐小时降水量 (单位: mm)

(a) 17 日 18 时, (b) 17 日 20 时, (c) 17 日 23 时, (d) 18 日 02 时, (e) 18 日 04 时, (f) 18 日 06 时

Fig. 2 Hourly rainfall (unit: mm) from 16:00 BT on 17 June to 07:00 BT on 18 June 2021

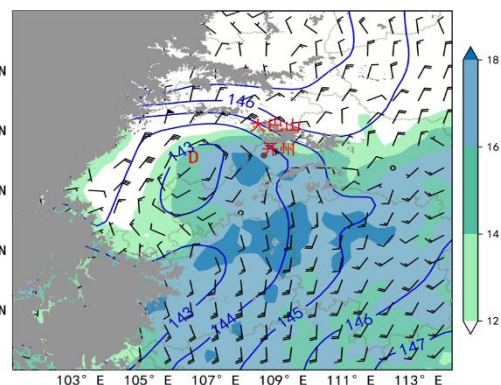
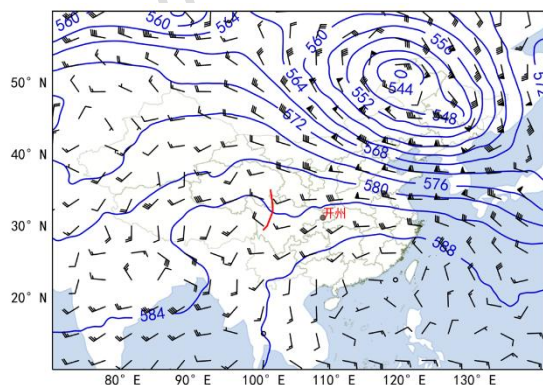
(a) 18:00 BT 17, (b) 20:00 BT 17, (c) 23:00 BT 17, (d) 02:00 BT 18, (e) 04:00 BT 18, (f) 06:00 BT 18

2.2 环流形势

此次大暴雨发生在有利的环流形势背景下, 17 日 14:00 暴雨发生前, 500 hPa (图 3a) 亚洲中高纬为“两槽一脊”环流型, 脊区位于新疆北部, 脊前偏北气流携带冷空气侵入四川盆地, 中低纬西北太平洋副热带高压 (简称副高) 控制我国江南华南大部地区, 副高外围西南暖湿气流持续输送水汽到四川盆地, 为降水发生提供有利环流背景。同时, 川西高原有短波槽活动, 短波槽东移引导低层低值系统发展东移。700 hPa (图 3c、图 3d) 四川盆地北部有西南低涡 (简称西南涡) 活动, 17 日 20:00 (图 3c) 西南涡中心值为 309 dagpm, 夜间西南涡东移加强, 18 日 08:00 (图 3d) 中心值为 308 dagpm, 副高西伸导致与西南涡之间的急流加强, 风速达 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 强盛的西南急流为大暴雨发生带来充沛的水汽、能量和动量输送。18 日 02:00, 850 hPa 西南涡 (图 3b) 位置较 700 hPa 略偏南, 位于四川盆地中部, 其东部切变线影响大巴山南麓, 为大暴雨发生提供了较好的动力条件。川东平行岭谷地区比湿超过 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而大巴山南麓比湿达 $18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远超过重庆夏季暴雨比湿阈值 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (刘德等, 2012), 因此水汽条件具有一定的极端性, 此时对应为大暴雨的强盛阶段。

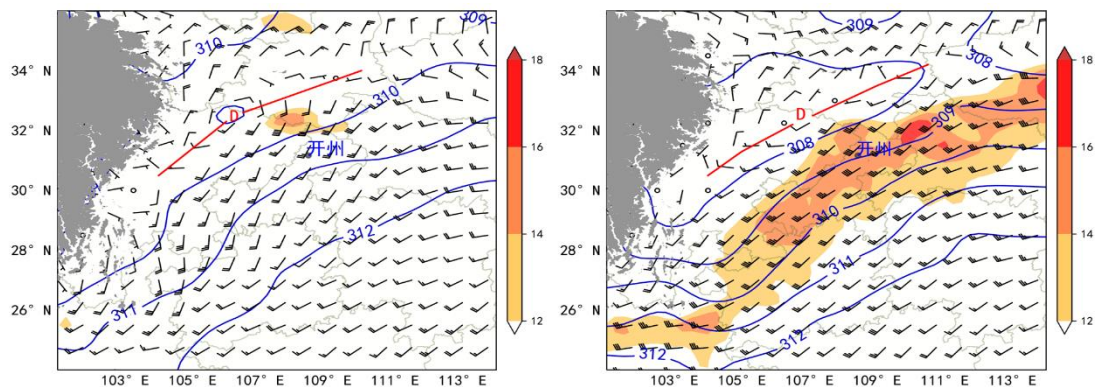
(a)

(b)



(c)

(d)



注：D 代表低压中心，图 a 中红色短线代表低槽，图 b 中灰色阴影为 1500 m 以上的地形，图 c 和图 d 中灰色阴影为 3000 m 以上的地形，红色实线代表切变线。

图 3 2021 年 6 月 (a) 17 日 14:00 500 hPa 高度场 (等值线, 单位: dagpm) 和风场 (风矢), (b) 18 日 02:00 850 hPa 高度场 (等值线, 单位: dagpm)、风场 (风矢) 和比湿 (填色, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (c) 17 日 20:00 和 (d) 18 日 08:00 700 hPa 高度场 (等值线, 单位: dagpm)、风场 (风矢) 和 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南急流 (填色, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

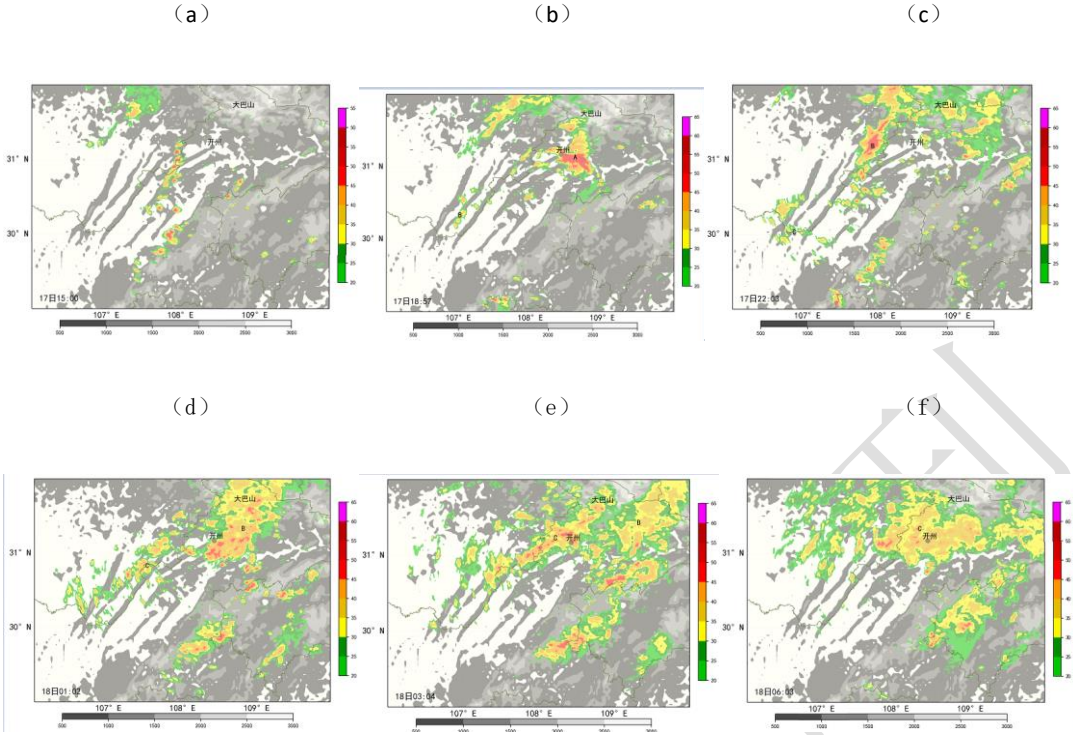
Fig. 3 (a) 500 hPa height field (contours, unit: dagpm) and wind field (wind vectors) at 14:00 BT on 17 June 2021, (b) 850 hPa height field (contours, unit: dagpm), wind field (wind vectors), and specific humidity (colored, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) at 02:00 BT on 18 June 2021, (c) 700 hPa height field (contours, unit: dagpm), wind field (wind vectors), and $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ southwesterly jet (color fill, unit: m/s) at 20:00 BT on 17 June 2021, (d) 700 hPa height field (contours, unit: dagpm), wind field (wind vectors), and $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ southwesterly jet (colored, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 08:00 BT on 18 June 2021

3 大巴山和平行岭谷地形对暴雨的作用

3.1 平行岭谷地形下中尺度对流系统的组织和传播特征

结合地形及重庆万州雷达探测的组合反射率演变分析可知 (图 4), 中尺度对流系统组织传播、发展演变与山脉地形密切相关。大巴山南麓强降水先后经历了 3 次中尺度对流系统的演变。17 日 15:00, 川东平行岭谷地区有分散对流单体触发, 随后这些对流单体合并加强, 向东北方向移动, 在大巴山南麓开州附近形成中尺度对流系统 A。17 日 18:57, 对流系统 A 发展成熟, 反射率因子超过 55 dBz, 对应雨团 1 的强降水。同时, 在川东平行岭谷山脉南端也有分散对流触发, 对流单体沿山脉组织发展, 拉伸成东北-西南向带状回波 B, 随后向东北方向移动, 与大巴山残余回波合并后发展强盛, 与雨带 2 的强降水对应。17 日 22:03, 新生对流单体在川东平行岭谷山脉南端再次发展, 演变过程同中尺度对流系统 B 一致, 沿着山脉先组织成东北-西南向带状回波 C, 随后北移到大巴山南麓加强, 受地形阻挡, 带状回波 C 准静止维持约 5 h, 形态也转为同大巴山脉一致的东-西向, 与雨带 3 的强降水对应。另外还可以看出, 带状对流系统 B 和 C 中镶嵌着多个对流单体, 西南方向不断有单体新生, 再移入对流带母体合并, 具有明显的后向传播特征。因此, 多条东北-西南向带状对流系统沿着

平行岭谷山脉组织发展,对流单体列车效应和多条雨带叠加效应造成了大巴山南麓的大暴雨天气。



注: A 为中尺度对流系统 A, B、C 为带状回波 B、C。
图 4 2021 年 6 月 17—18 日万州雷达组合反射率因子(填色,单位: dBZ)叠加重庆及周边地形(阴影,单位: m)分布 (a) 17 日 15:00, (b) 17 日 18:57; (c) 17 日 22:03; (d) 18 日 01:02; (e) 18 日 03:04; (f) 18 日 06:03

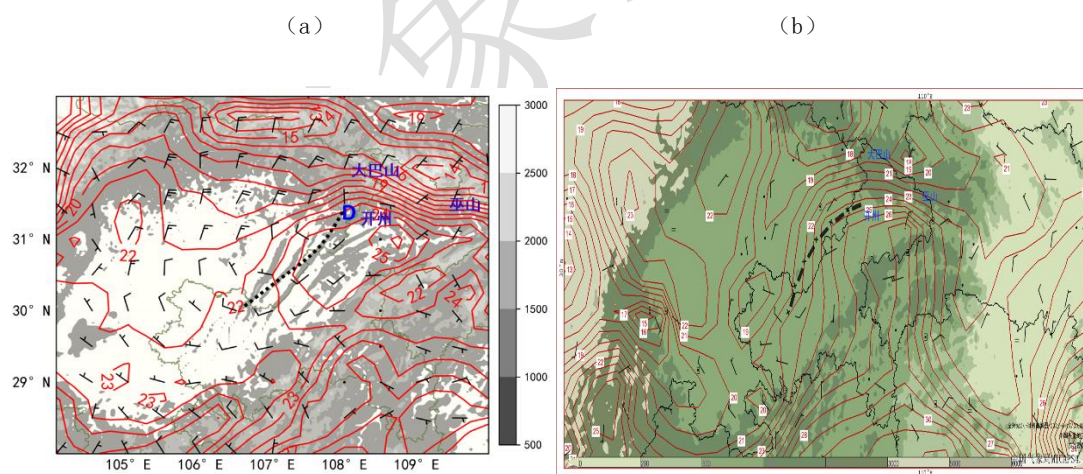
Fig. 4 Composite reflectivity factor (colored, unit: dBZ) of Wanzhou Radar from 17 to 18 June 2021, superimposed on the topography (shaded, unit: m) of Chongqing and its surrounding areas (a) 15:00 BT 17, (b) 18:57 BT 17, (c) 22:03 BT 17, (d) 01:02 BT 18, (e) 03:04 BT 18, (f) 06:03 BT 18

3. 2 中尺度辐囚锋和辐合线的触发和组织作用

中尺度抬升机制是强天气触发的必要条件,局地强天气往往发生在地面中尺度辐合线和锋面附近(王坚红等, 2017; 徐珺等, 2018; 雷蕾等, 2020; 李琴和邓承之, 2021)。考虑到大巴山脉和川东平行岭谷地形复杂,因此有必要对 ERA5 再分析资料与实况资料进行对比以确认再分析资料的适用性,选取 17 日 20:00ERA5 再分析资料(图 5a)的 10 m 风场和 2 m 温度场与实况资料(图 5b)进行对比,ERA5 再分析资料的 2 m 温度场整体分布与实况一致,略有 1~2℃偏差,大巴山脉等温线密集区与实况基本一致。10 m 风场整体表征也较好,四川盆地为偏北风,巫山和长江河谷为高压底部的东北风,表明近地面有浅薄冷空气侵入,另外,地面辐合线与实况位置也较为接近,故 ERA5 再分析资料可以很好地反映该地区近地面气象要素实际情况。

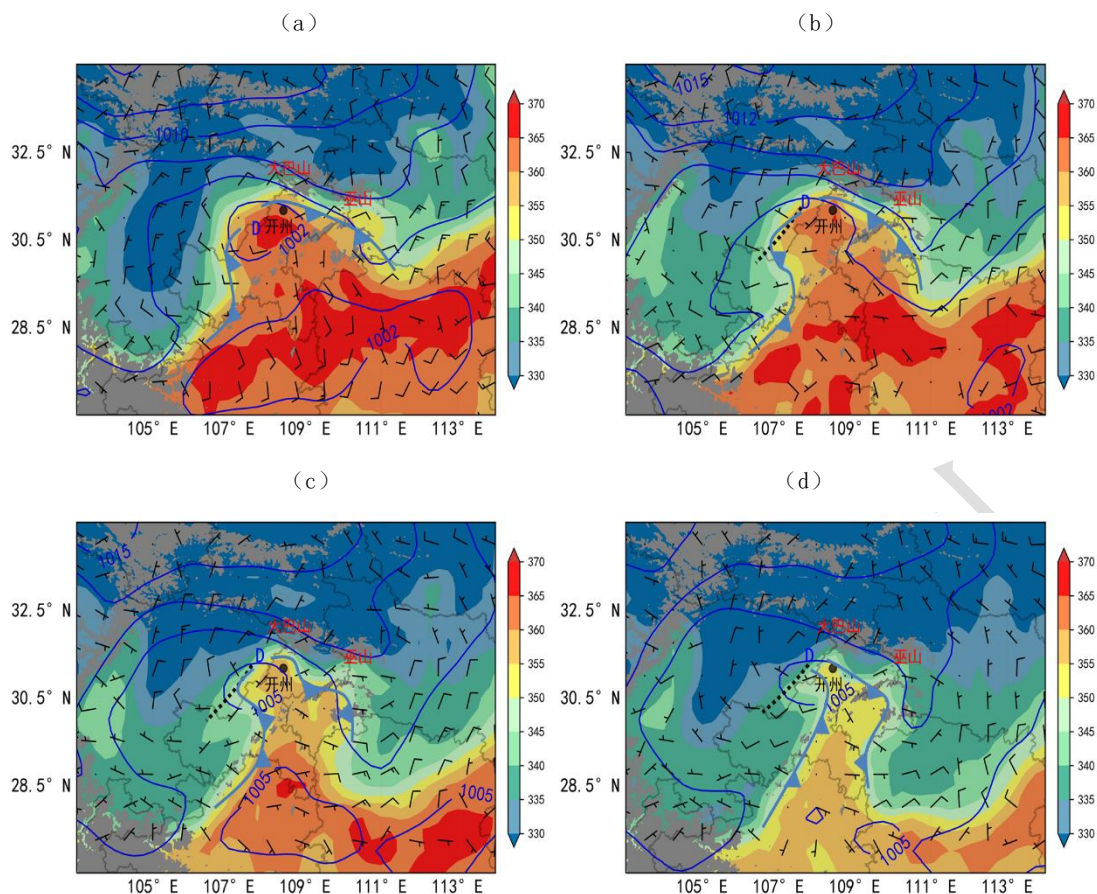
图 6 为海平面气压、地面 10 m 风场和假相当位温。可以看出，受秦岭和大巴山脉阻挡，降水过程中冷高压主体并未南下，高压中心和冷中心停留在大巴山以北。高压底部冷空气分东西两路渗透南下，西路冷空气侵入四川盆地，东路冷空气侵入湖北湖南一带。大巴山南侧为低压中心和暖中心，有大量暖湿气流和不稳定能量聚集。17 日 15:00（图 6a），川东平行岭谷地区有暖低压发展，并有假相当位温高能舌与之配合，中心值超过 365K。四川盆地入侵的浅薄冷空气进入暖低压，触发不稳定能量释放和分散对流发生，此时对应降水开始阶段。17 日 19:00（图 6b），低压中心略有北移，川东平行岭谷地区有地面辐合线形成，辐合线与盆地冷锋位置一致，对流系统沿着辐合线和冷锋触发组织，形成东北-西南向带状对流系统沿着山脉分布，此时对应雨带组织发展阶段。17 日 22:00（图 6c），盆地冷锋南段快速东移，已移过地面辐合线，北段准静止维持，仍然和辐合线位置一致，此时对应川东平行岭谷地区南部降水减弱，北部降水增强。18 日 02:00（图 6d），盆地冷锋继续东移，与沿巫山和长江河谷侵入的东路冷空气相遇，在川东平行岭谷山脉北端发生锢囚，两侧冷空气夹挤暖湿气流，使得中尺度对流系统在此停滞并发展到强盛阶段。可见，盆地冷锋和地面辐合线对中尺度对流系统触发和组织有重要作用，而中尺度锢囚锋的形成则使对流系统发展旺盛。

川东平行岭谷山脉对边界层风场改变有重要影响，平行岭谷山脉西侧为偏北风，南端转为偏西风，东侧转为西南风。偏北风与西南风形成的地面辐合线稳定少动，即使在盆地冷锋已东移的情况下，辐合线仍然维持。



注：黑色虚线代表地面辐合线；图 a 中 D 为地面辐合中心。
图 5 2021 年 6 月 17 日 20:00 (a) ERA5 地面 10 m 风场（风矢）和 2 m 温度场（等值线，单位：℃），地形（阴影，单位：m），(b) 地面实况 10 m 风场（风矢）和 2 m 温度场（等值线，单位：℃），地形（绿色阴影，单位：m）

Fig.5 (a) ERA5 surface 10 m wind field (barbs) and 2 m temperature field (contours, unit: °C) at 20:00 BT on 17 June 2021, topography(shaded, unit: m), (b) Actual surface 10 m wind field (barbs) and 2 m temperature field (contours, unit: °C) at 20:00 BT on 17 June 2021, topography(green shaded, unit: m)



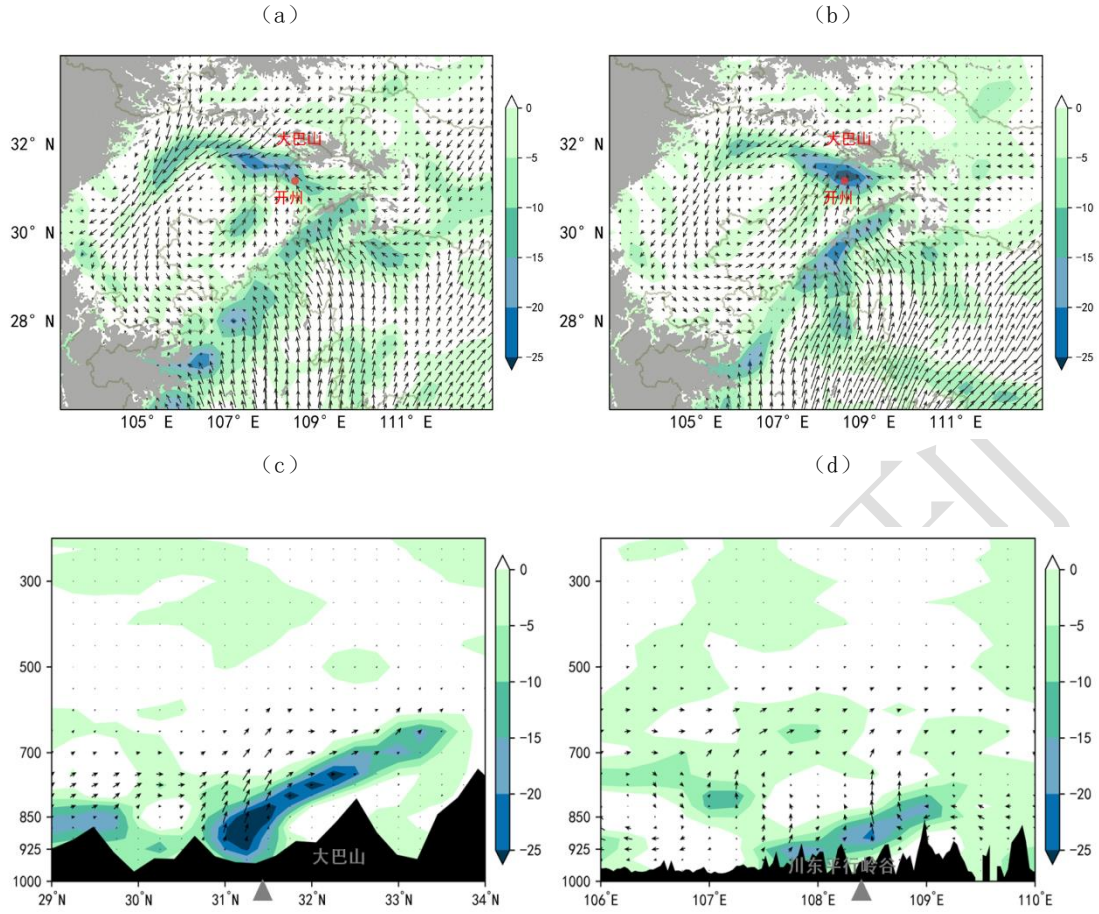
注：灰色阴影为 1500~3000 m 高度的地形，D 为地面辐合中心，黑色虚线为地面辐合线，蓝色锯齿线为地面冷锋。

图 6 2021 年 6 月 (a) 17 日 15:00, (b) 17 日 19:00, (c) 17 日 22:00, (d) 18 日 02:00 海平面气压 (等值线, 单位: hPa) 和地面 10 m 风场 (风矢) 叠加假相当位温 (填色, 单位: K)

Fig. 6 Sea level pressure (contours, unit: hPa) and 10 m surface wind field (barbs) superimposed on the pseudo-equivalent potential temperature (colored, unit: K) at (a) 15:00 BT on 17 June (b) 19:00 BT on 17 June, (c) 22:00 BT on 17 June and (d) 02:00 BT on 18 June 2021

3. 3 地形对水汽输送的阻挡和汇聚作用

地形对水汽输送有绕流、阻挡和汇聚作用 (刘晶等, 2019; 汪小康等, 2020; 姚秀萍等, 2024)。大暴雨发生前, 受地形阻挡作用, 水汽在大巴山前堆积, 主要集中在 700 hPa 以下。17 日 20:00 (图 7a), 水汽通量散度辐合大值区呈东西向带状分布, 位于四川盆地北部边缘, 即大巴山前迎风坡处, 中心值超过 $20 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。18 日 02:00 (图 7b), 夜间低空急流加强带来更为强劲的水汽输送, 大巴山南麓东西向水汽辐合带有所东移, 辐合中心值超过 $25 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 使得暴雨区水汽持续处于饱和状态, 降水效率高且持续时间长。水汽通量散度剖面图显示 (图 7c), 水汽辐合大值区沿着大巴山脉倾斜分布, 850 hPa 以下有强的水汽辐合。另外, 川东平行岭谷地区水汽分布呈东北-西南向, 走向与地形一致, 近东西向水汽辐合带集中在 925 hPa 或 850 hPa 以下的边界层 (图 7d), 也说明地形对水汽输送有阻挡和汇聚作用。



注：图 a 和图 b 中灰色阴影为 1500 m 以上的地形，图 c 和图 d 中黑色阴影为地形，灰色三角形代表开州。
 图 7 2021 年 6 月 (a) 17 日 20:00、(b) 18 日 02:00 850 hPa 水汽通量（矢量箭头，单位： $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ）
 和水汽通量散度（填色，单位： $10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ），(c) 17 日 20:00 沿 108°E 和 (d) 沿 31.5°N 的水
 水汽通量（矢量箭头，单位： $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ）和水汽通量散度（填色，单位： $10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ）
 Fig. 7 (a) 850hPa water vapor flux (vector arrows, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and water vapor flux divergence (color
 fill, unit: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 20:00 on June 17, 2021 and (b) at 02:00 on June 18, 2021. (c) Water vapor flux
 (vector arrows, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and water vapor flux divergence (color fill, unit: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
 along 108°E at 20:00 on June 17, 2021, and (d) along 31.5°N .

3. 4 地形的热动力抬升作用

锋面与地形相互作用会触发和增强降水。锋面附近的锋生强度可以通过锋生函数进行定量诊断分析，锋生函数 F 的计算公式如下(张芳华等, 2014; 邓承之等, 2019; 贺哲等, 2022):

$$F = \frac{d}{dt} |\nabla \theta_{se}| = F_1 + F_2 + F_3 \quad (1)$$

$$F_1 = -\frac{1}{2|\nabla \theta_{se}|} (\nabla \theta_{se})^2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$F_2 = -\frac{1}{2|\nabla \theta_{se}|} \left\{ \left[\left(\frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right)^2 \right] \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2 \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \quad (3)$$

277

$$F_3 = -\frac{1}{|\nabla\theta_{se}|} \frac{\partial\theta_{se}}{\partial p} \left(\frac{\partial\theta_{se}}{\partial x} \frac{\partial\omega}{\partial x} + \frac{\partial\theta_{se}}{\partial y} \frac{\partial\omega}{\partial y} \right) \quad (4)$$

278

式中, θ_{se} 为假相当位温, u/v 为水平风速分量, ω 为垂直速度, F_1 、 F_2 、 F_3 分别为水平辐散项、水平变形项和垂直运动有关的倾斜项, 当 $F>0$ 时对应锋生, $F<0$ 时对应锋消。

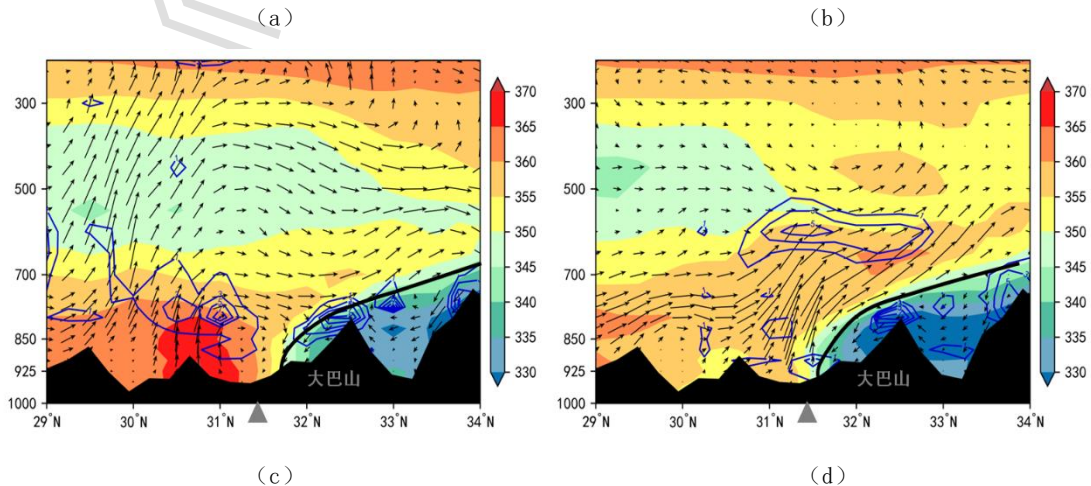
280

图 8a 和图 8b 为沿 $108^\circ E$ 假相当位温、锋生函数和垂直环流剖面图。可以看出, 受大巴山地形阻挡, 冷空气主体很难直接翻越大巴山脉, 大尺度锋区在此停滞, 前沿位于 $31.5^\circ N$ 附近, 同时有大量水汽和不稳定能量在山前聚集。17 日 15:00 (图 8a), 对流初生时, 大尺度冷锋前为高温高湿区, 近地面到 700 hPa 都为假相当位温大值区, 中心值超过 365K, 而 600~400 hPa 则为假相当位温冷中心, 形成上干冷下暖湿的位势不稳定层结, 有强的对流不稳定。同时 850~700 hPa 伴有较强的锋生, 中心值为 $7 \times 10^9 s^{-1}$, 垂直上升气流在 $30^\circ N$ 附近强烈发展。18 日 02:00 (图 8b) 降水强盛时, 上升气流区北移到大巴山南麓 $31^\circ N$ 附近, 暖湿气流沿着大巴山和锋面倾斜爬升, 与秦岭和大巴山区的下沉气流, 构成锋面垂直环流圈。同时大巴山南麓有边界层锋生发展, 中层锋生叠加在边界层锋生之上, 利于对流系统在此增强和维持。结合图 8c 和 8d 涡度、散度和垂直速度剖面图可以看出, 大巴山迎风坡地形对涡度增长和垂直运动增强有重要作用。17 日 15:00 (图 8c), 辐合区和上升运动区距大巴山还有 1 个纬度左右的距离, 但低层偏南风与大巴山垂直, 地形强迫抬升作用造成大巴山迎风坡靠近山顶处有正涡度生成, 中心值为 $10 \times 10^{-5} s^{-1}$ 。18 日 02:00 (图 8d) 夜间偏南急流增强, 地形强迫抬升作用也进一步增强, 正涡度区沿着大巴山倾斜发展, 中心值达 $15 \times 10^{-5} s^{-1}$ 。同时低层辐合也沿着地形和锋面倾斜向北发展, 700~500 hPa 中层辐散较强, 中心值超过 $8 \times 10^{-9} s^{-1}$, 这种低层辐合、中高层辐散的配置, 有利于垂直方向上大气抽吸作用增强, 大巴山南麓上升运动强烈发展, 向上伸展至 300 hPa。因此, 锋面抬升和大巴山地形的共同作用, 为中尺度对流系统在大巴山南麓停滞并增强提供了有利的热力和动力条件。

298

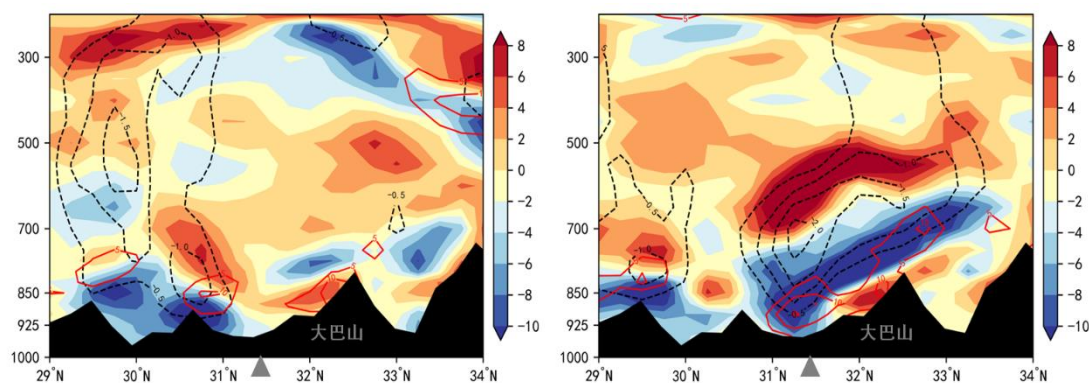
299

300



301

302



注：黑色阴影为地形，灰色三角形代表开州；图 a，图 b 中黑色实线代表锋面。

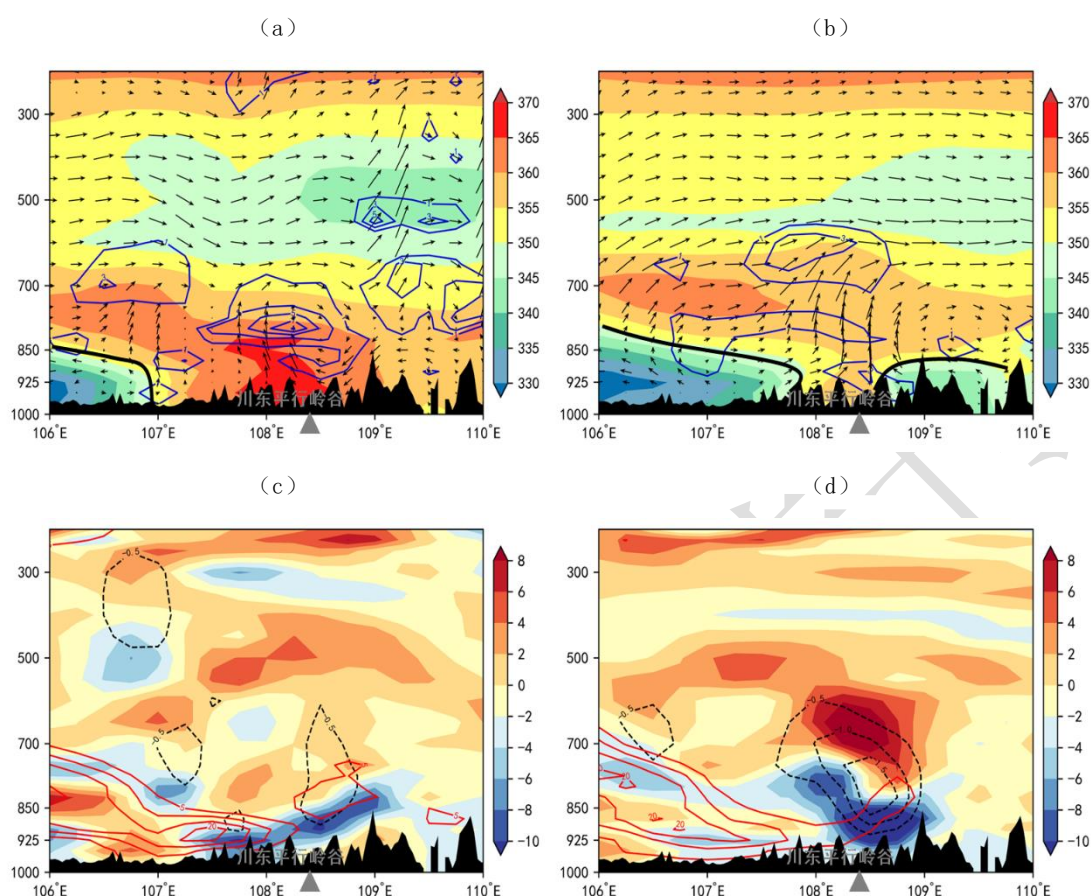
图 8 2021 年 6 月(a)17 日 15:00、(b)18 日 02:00 沿 108°E 的经向风(矢量箭头,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和-10倍垂直速度(矢量箭头,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)合成风场、假相当位温(填色,单位: K)和锋生函数(等值线,单位: 10^{-9}s^{-1})纬向垂直剖面;(c) 17 日 15:00 和 (d) 18 日 02:00 沿 108°E 的涡度(红色等值线,单位: 10^{-5}s^{-1})、散度(填色,单位: 10^{-5}s^{-1})和垂直速度(黑色等值线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)剖面图。

Fig. 8 (a) At 15:00 BT on June 17, 2021, and (b) at 02:00 BT on June 18, 2021, along 108°E, the meridional-vertical cross-section of the v and -10ω composite wind field (vector arrows, with meridional wind unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ and vertical velocity unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), pseudo-equivalent potential temperature (colored, unit: K), and frontogenesis function (contours, unit: 10^{-9}s^{-1}). (c) At 15:00 BT on June 17, 2021, and (d) at 02:00 BT on June 18, 2021, along 108°E, the cross-section of vorticity (red contours, unit: 10^{-5}s^{-1}), divergence (colored, unit: 10^{-5}s^{-1}), and vertical velocity (black contours, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

图 9 为沿 31.5°N 假相当位温、锋生函数和垂直环流剖面图，可以看出大巴山前东西两路弱冷锋相向而行，川东平行岭谷地区北端有中尺度锢囚锋形成。其中，17 日 15:00（图 9a），首先在四川盆地 850 hPa 以下边界层有浅薄冷空气侵入，盆地冷锋位于 107°E 附近，而川东平行岭谷地区位于盆地冷锋前，有强烈的对流不稳定，同时 850~700 hPa 伴有较强的锋生，中心值为 $7\times 10^{-9}\text{s}^{-1}$ 。18 日 02:00（图 9b）盆地冷锋东移到 108°E 附近，平行岭谷山脉东侧也有弱冷空气入侵，并伴随边界层锋生发展，其值约为 $1\times 10^{-9}\text{s}^{-1}$ ，东移的盆地冷锋与长江河谷侵入的东路冷锋发生锢囚，使得中尺度对流系统在此停滞加强。另外，盆地冷锋和东路冷锋移向与平行岭谷山脉垂直，且冷锋强度弱，位于边界层内，地形阻挡作用也有利于中尺度锢囚锋的形成。图 9c 和图 9d 为沿 31.5°N 涡度、散度和垂直速度剖面图，可以看出，西南涡产生的正涡度中心位于 106°E 附近的 850~700 hPa，而川东平行岭谷地区位于西南涡东侧，东西向正涡度区位于 850 hPa 以下边界层。同时伴随有近东西向低层辐合区。18 日 02:00，低层辐合区东移，并伴有 700 hPa 辐散区增强，此时上升运动也加强，降水进入强盛阶段。

图 10 为大巴山南麓大暴雨中心开州站小时降水量、900 hPa 锋生函数、散度和涡度的时间演变图。可以看出,降水发生前,大巴山南麓有弱的边界层锋生和辐合,并伴随有正涡度增长。17 日 23:00,边界层辐合和正涡度均明显增大,降水快速增强,此后边界层辐合和锋

生进一步增强，并有较强的正涡度维持。18 日 06:00，辐合和锋生都达到最强，降水发展强盛。18 日 08:00 后，边界层辐合和锋生均快速减弱，降水也明显减弱。



注：黑色阴影为地形，灰色三角形代表开州，图 a、图 b 中黑色实线代表锋面。

图 9 2021 年 6 月(a)17 日 15:00、(b)18 日 02:00 沿 31.5°N 的经向风(矢量箭头,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和-10倍垂直速度(矢量箭头,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)合成风场、假相当位温(填色,单位:K)和锋生函数(等值线,单位: 10^{-9}s^{-1})的垂直剖面图,(c)17 日 15:00 和 (d)18 日 02:00 沿 31.5°N 的涡度(红色等值线,单位: 10^{-5}s^{-1})、散度(填色,单位: 10^{-5}s^{-1})和垂直速度(黑色等值线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)剖面图

Fig. 9 (a) At 15:00 BT on 17 June 2021, and (b) at 02:00 BT on 18 June 2021, along 31.5°N, the vertical cross-section of the v (vector arrows, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and -10ω (vector arrows, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) composite wind field, pseudo-equivalent potential temperature (colored, unit: K), and frontogenesis function (contours, unit: 10^{-9}s^{-1}). (c) At 15:00 BT on 17 June 2021, and (d) at 02:00 BT on 18 June 2021, along 31.5°N, the cross-section of vorticity (red contours, unit: 10^{-5}s^{-1}), divergence (color fill, unit: 10^{-5}s^{-1}), and vertical velocity (black contours, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

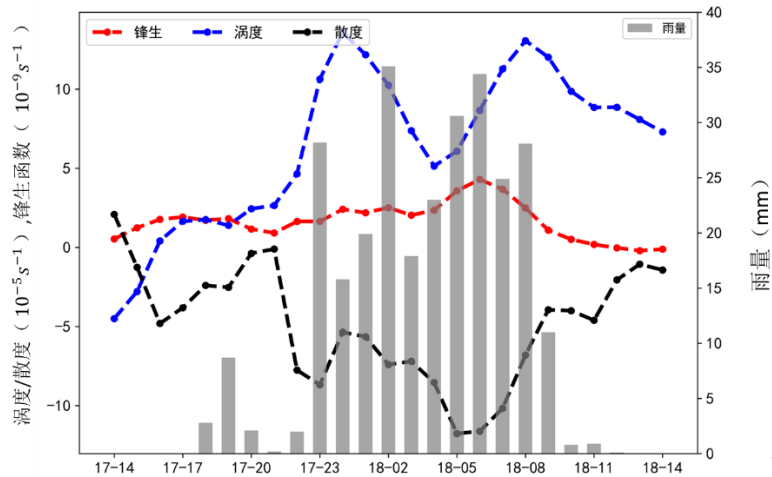


图 10 开州站逐小时降水量（单位：mm）、925 hPa 涡度（单位： $10^{-5} s^{-1}$ ）、散度（单位： $10^{-5} s^{-1}$ ）和锋生函数（单位： $10^{-9} s^{-1}$ ）演变

Fig. 10 The evolution of hourly rainfall (unit: mm), vorticity at 925 hPa (unit: $10^{-5} s^{-1}$), divergence (unit: $10^{-5} s^{-1}$), and frontogenesis function (unit: $10^{-9} s^{-1}$) at Kaizhou Station

4 大巴山南麓平行岭谷地形大暴雨事件的概念模型

综合以上各方面分析结果，可以给出 2021 年 6 月 17—18 日大巴山南麓川东平行岭谷地形下大暴雨事件的物理概念模型（图 11）。西南涡位于四川盆地北部边缘，其东侧南风气流中有地面暖低压发展。冷空气主体在大巴山北侧堆积，四川盆地有浅薄冷空气侵入，川东平行岭谷地区形成沿山分布的地面辐合线，中尺度对流系统沿辐合线和盆地冷锋组织发展，并随西南引导气流向平行岭谷山脉北端移动。大巴山地形阻挡作用使得水汽和不稳定能量在迎风坡堆积，层结不稳定能量增强，锋面垂直环流上升支配地形强迫抬升，使得中尺度对流系统在大巴山南麓发展成熟并准静止维持。另外，盆地冷锋与沿巫山和长江河谷侵入的东路冷空气相遇，在川东平行岭谷山脉北端发生锢囚，也使得中尺度对流系统在此加强。以上过程可勾勒出大巴山南麓平行岭谷地形区大暴雨的物理图像。

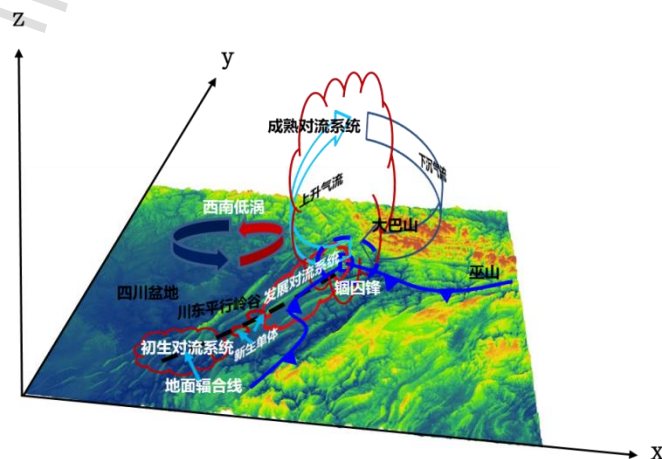


图 11 2021 年 6 月 17—18 日大巴山南麓平行岭谷地形下大暴雨事件的概念模型
Fig. 11 Conceptual model of the heavy rainstorm event under the parallel ridge-valley topography on the southern slope of Daba Mountain during 17 — 18 June 2021

5 结论与讨论

本文对 2021 年 6 月 17—18 日大巴山南麓川东平行岭谷山脉北端的一次大暴雨过程，从环流形势、中尺度对流系统的组织与传播特征、大巴山和川东平行岭谷多尺度地形等多个维度开展了综合分析，主要结论如下：

（1）东移短波槽、西南低涡、低空急流、边界层浅薄冷空气入侵以及川东平行岭谷和大巴山脉地形的共同作用，诱发了此次大暴雨天气过程。大暴雨期间共经历三次中尺度对流系统的演变，东北-西南向带状对流系统沿平行岭谷山脉组织并发展，对流单体列车效应和多条雨带叠加效应加强了降水。

（2）降水过程中，冷高压主体滞留于大巴山以北，其高压底部冷空气分东、西两路渗透南下，其中西路冷空气侵入四川盆地触发对流发生。带状对流系统沿川东平行岭谷地区的地面辐合线和盆地冷锋组织发展，随着盆地冷锋东移，与沿巫山和长江河谷入侵的东路冷空气发生锢囚，导致中尺度对流系统于该地区停滞并发展旺盛。

（3）大巴山地形对暴雨的作用主要体现在阻挡作用和热动力抬升作用：一方面，迎风坡地形对水汽和能量输送有阻挡和汇聚作用，使东西向水汽辐合带和假相当位温高值中心在大巴山南麓维持；另一方面，大巴山地形对冷空气的阻挡使锋区在此停滞，大巴山南麓有锋生、正涡度区、辐合区和强上升运动区沿着大巴山呈倾斜带状分布，为北移的中尺度对流系统提供有利的热动力条件。

（4）平行岭谷地形对降水的作用体现在边界层水汽的聚集、地面辐合线维持以及中尺度锢囚锋的形成等方面。平行岭谷地区水汽辐合带集中在 925 hPa 或 850 hPa 以下的边界层。东北-西南向地面辐合线沿平行岭谷山脉分布，即使盆地冷锋已东移，辐合线仍准静止维持。此外，平行岭谷山脉走向与两侧冷锋移动方向近乎垂直，地形阻挡作用也利于中尺度锢囚锋的形成和维持，从而增强降水。

本研究基于多源观测资料和再分析资料着重分析了川东平行岭谷地形下中尺度对流系统的组织和传播特征，平行岭谷地形下的中尺度辐合线和锢囚锋的作用，以及大巴山热动力抬升作用和阻挡作用对暴雨的影响，揭示出重庆北部复杂地形暴雨的若干精细化特征，也为认识该地区暴雨机理提供了一些有益线索。然而，重庆北部地处四川盆地向盆周山地过渡地带，多尺度山脉交错，地形对暴雨的影响极其复杂，本文分析的样本还不多，所用资料尚不能十分准确地反映细微地形与降水的对应关系和具体作用，涉及多尺度地形相互作用下暴雨

机制的分析还有欠缺, 这些局限性需要应用更高分辨率地形数据和包括卫星遥感在内的高分辨率资料以及中尺度数值模式开展进一步研究。

参考文献:

- 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]. Chin J Atmos Sci, 47(1): 1-19 (in Chinese).
- 陈双, 王迎春, 张文龙, 2016. 北京香山“7·29” γ 中尺度短时局地大暴雨过程综合分析[J]. 暴雨灾害, 35(2): 148-157. Chen S, Wang Y C, Zhang W L, 2016. A comprehensive analysis of the meso- γ scale local heavy rain event around Xiangshan in Beijing on 29 July 2009[J]. Torr Rain Dis, 35(2): 148-157 (in Chinese).
- 陈涛, 谌芸, 方翀, 等, 2024. “23·7”华北极端暴雨精细特征和天气学成因分析[J]. 气象学报, 82(5): 600-614. Chen T, Chen Y, Fang C, et al, 2024. Fine characteristics of the July 2023 extreme rainfall in North China and associated synoptic weather patterns[J]. Acta Meteor Sin, 82(5): 600-614 (in Chinese).
- 程晓龙, 李跃清, 衡志炜, 2016. 四川盆地特殊地形下基于加密观测的一次低涡暴雨水汽结构分析[J]. 高原山地气象研究, 36(4): 1-8. Cheng X L, Li Y Q, Heng Z W, 2016. A comparative experimental study of an extreme rainstorm caused by the Southwest China vortex during the intensive observation period[J]. Plateau Mt Meteor Res, 36(4): 1-8 (in Chinese).
- 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. Diagnosis and analysis of the cause of a rainstorm in the north of eastern Chongqing in 2014[J]. Meteor Sci Technol, 44(2): 290-296 (in Chinese).
- 邓承之, 张亚萍, 方德贤, 等, 2019. 一次纬向暴雨过程的湿对称不稳定与锋生分析[J]. 气象, 45(11): 1527-1538. Deng C Z, Zhang Y P, Fang D X, et al, 2019. Analysis on moist symmetric instability and frontogenesis of one zonal torrential rain[J]. Meteor Mon, 45(11): 1527-1538 (in Chinese).
- 邓承之, 周国兵, 李强, 等, 2024. 四川盆地一次西南低涡影响下的爬线天气特征及其成因[J]. 气象, 50(7): 777-790. Deng C Z, Zhou G B, Li Q, et al, 2024. Characteristic and formation of a squall line influenced by the southwest vortex in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 50(7): 777-790 (in Chinese).
- 高珩洲, 李国平, 2020. 黔东南地形影响局地突发性暴雨的中尺度天气分析与数值试验[J]. 高原气象, 39(2): 301-310. Gao H Z, Li G P, 2020. Mesoscale synoptic meteorology analysis and numerical experiment of local sudden rainstorm affected by topography in southeast part of Guizhou Province[J]. Plateau Meteor, 39(2): 301-310 (in Chinese).
- 贺哲, 竹磊磊, 张霞, 等, 2022. 河南省秋季连续两个暴雨日的锋生和 instability 诊断分析[J]. 气象, 48(9): 1101-1115. He Z, Zhu L L, Zhang X, et al, 2022. Diagnosis of the frontogenesis and instabilities in two continuous autumn torrential rain days in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(9): 1101-1115 (in Chinese).
- 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).
- 黄小彦, 孙继松, 刘文婷, 2020. 地形作用下低空急流的演变与强降水对流风暴系统的相互作用[J]. 气象学报, 78(4): 551-567. Huang X Y, Sun J S, Liu W T, 2020. The interaction between low-level jet evolution and severe convective rainstorms under topographic effect[J]. Acta Meteor Sin, 78(4): 551-567 (in Chinese).
- 金妍, 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 Meteor, 40(2): 314-323 (in Chinese).
- 雷蕾, 邢楠, 周璇, 等, 2020. 2018年北京“7·16”暖区特大暴雨特征及形成机制研究[J]. 气象学报, 78(1): 1-17. Lei L, Xing N, Zhou X, et al, 2020. A study on the warm-sector torrential rainfall during 15-16 July 2018 in Beijing area[J]. Acta Meteor Sin, 78(1): 1-17 (in Chinese).
- 李超, 崔春光, 蒋兴文, 等, 2018. 特殊地形对鄂东北一次局地强降水过程的作用机制分析[J]. 气象, 44(9): 1117-1135. Li C,

Cui C G, Jiang X W, et al, 2018. Mechanism analysis of the effect of special topography in middle-lower reaches of Yangtze river on local severe precipitation in Northeast Hubei[J]. Meteor Mon, 44(9): 1117-1135 (in Chinese).

李琴, 邓承之, 2021. 重庆一次弱天气系统强迫下的极端短时强降水事件分析[J]. 气象, 47(9): 1073-1085. Li Q, Deng C Z, 2021. Analysis of a short-time extreme precipitation event in Chongqing under weak synoptic forcing[J]. Meteor Mon, 47(9): 1073-1085 (in Chinese).

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 Meteor Sin, 69(6): 945-955 (in Chinese).

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: 1-389. Liu D, Zhang Y P, Chen G C, et al. 2012. Chongqing Weather Forecast Technical Manual [M]. Beijing: China Meteorological Press: 1-389.

刘晶, 周玉淑, 杨莲梅, 等, 2019. 伊犁河谷一次极端强降水事件水汽特征分析[J]. 大气科学, 43(5): 959-974. Liu J, Zhou Y S, Yang L M, et al, 2019. A diagnostic study of water vapor during an extreme precipitation event in the Yili River Valley[J]. Chin J Atmos Sci, 43(5): 959-974 (in Chinese).

孙继松, 2005. 气流的垂直分布对地形雨落区的影响[J]. 高原气象, 24(1): 62-69. Sun J S, 2005. The effects of vertical distribution of the lower level flow on precipitation location[J]. Plateau Meteor, 24(1): 62-69 (in Chinese).

陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社: 1-255. Tao S Y, 1980. Rainstorm in China[M]. Beijing: Science Press: 1-255 (in Chinese).

汪小康, 崔春光, 王婧羽, 等, 2020. “21·7”河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J]. 气象, 48(5): 533-544. Wang X K, Cui C G, Wang J Y, et al, 2020. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(5): 533-544 (in Chinese).

王坚红, 杨艺亚, 苗春生, 等, 2017. 华南沿海暖区辐合线暴雨地形动力机制数值模拟研究[J]. 大气科学, 41(4): 784-796. Wang J H, Yang Y Y, Miao C S, et al, 2017. The numerical study of terrain dynamic influence on warm area heavy rainfall of convergence lines in South China coast[J]. Chin J Atmos Sci, 41(4): 784-796 (in Chinese).

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).

肖庆农, 伍荣生, 1995. 地形对于气流运动影响的数值研究[J]. 气象学报, 53(1): 38-49. Xiao Q N, Wu R S, 1995. Numerical study of the influence of terrain on air flow movement[J]. Acta Meteor Sin, 53(1): 38-49 (in Chinese).

徐珺, 毕宝贵, 谌芸, 等, 2018. “5·7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J]. 气象学报, 76(4): 511-524. Xu J, Bi B G, Chen Y, et al, 2018. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Acta Meteor Sin, 76(4): 511-524 (in Chinese).

杨晓亮, 金晓青, 孙云, 等, 2023. “23·7”河北太行山东麓罕见特大暴雨特征及成因[J]. 气象, 49(12): 1451-1467. Yang X L, Jin X Q, Sun Y, et al, 2023. Evolution characteristics and formation of the July 2023 severe torrential rain on the eastern foothills of Taihang mountains in Hebei Province[J]. Meteor Mon, 49(12): 1451-1467 (in Chinese).

姚秀萍, 黄逸飞, 包晓红, 等, 2024. “23·7”华北极端强降水特征和水汽条件研究[J]. 气象学报, 82(5): 585-599. Yao X P, Huang Y F, Bao X H, et al, 2024. Characteristics of the July 2023 extreme rainfall in North China and its water vapor supply[J]. Acta Meteor Sin, 82(5): 585-599 (in Chinese).

张芳华, 陈涛, 杨舒楠, 等, 2014. 一次冬季暴雨过程中的锋生和条件对称不稳定分析[J]. 气象, 40(9): 1048-1057. Zhang F H, Chen T, Yang S N, et al, 2014. Diagnosis of the frontogenesis and CSI features during a torrential rainfall event in winter[J]. Meteor Mon, 40(9): 1048-1057 (in Chinese).

章翠红, 夏茹娣, 王咏青, 2018. 地形、冷池流出和暖湿空气相互作用造成北京一次局地强降水的观测分析[J]. 大气科学学报, 41(2): 207-219. Zhang C H, Xia R D, Wang Y Q, 2018. Observational analysis of a local heavy rainfall in Beijing caused by terrain, cold pool outflow and warm moist air interactions[J]. Trans Atmos Sci, 41(2): 207-219 (in Chinese).

485 赵思雄, 孙建华, 鲁蓉, 等, 2018. “7·20”华北和北京大暴雨过程的分析[J]. 气象, 44(3): 351-360. Zhao S X, Sun J H, Lu R, et
486 al, 2018. Analysis of the 20 July 2016 unusual heavy rainfall in North China and Beijing[J]. Meteor Mon, 44(3): 351-360 (in
487 Chinese).

488 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.
489 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
490 ridge-valley topography[J]. Meteor Mon, 49(6): 657-670 (in Chinese).

491 赵玉春, 王叶红, 崔春光, 2011. 大对流有效位能和条件不稳定下地形降水的三维理想数值研究[J]. 气象学报, 69(5):
492 782-798. Zhao Y C, Wang Y H, Cui C G, 2011. An idealized three-dimensional numerical study of the topographic precipitation
493 under air flow of large CAPE and conditionally unstable stratification[J]. Acta Meteor Sin, 69(5): 782-798 (in Chinese).

494 钟水新, 2020. 地形对降水的影响机理及预报方法研究进展[J]. 高原气象, 39(5): 1122-1132. Zhong S X, 2020. Advances in the
495 study of the influencing mechanism and forecast methods for orographic precipitation[J]. Plateau Meteor, 39(5): 1122-1132 (in
496 Chinese).

497 朱民, 余志豪, 陆汉城, 1999. 中尺度地形背风波的作用及其应用[J]. 气象学报, 57(6): 705-714. Zhu M, Yu Z H, Lu H C,
498 1999. Effects and applications of mesoscale mountain lee waves[J]. Acta Meteor Sin, 57(6): 705-714 (in Chinese).

499

500