

2020 年“6·26”冕宁致灾暴雨成因观测分析

齐铎^{1,4,5*} 崔晓鹏^{1,2,3,4**} 邹强利^{1,4}

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

3 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166

4 中国科学院大学, 北京 100049

5 黑龙江省气象台, 哈尔滨 150030

摘要: 利用自动站、探空、雷达等观测数据, 结合 ERA5 再分析资料, 从环流背景、水汽条件、局地探空特征、对流系统演变以及地形影响等方面, 分析了“6.26”冕宁致灾暴雨的可能成因。结果表明: (1) 暴雨期间, 500 hPa 环流形势相对稳定, 伴随中纬度槽东移和副高西进, 二者间西南气流显著增强, 影响四川地区; 盆地低涡北部非地转风风向随时间顺时针变化, 使夜间向低涡中心辐合的气流增强, 促进低涡发展; 盆地低涡西部的偏北气流和攀西高原的西南气流同时增强, 使局地环流发生变化, 改变降水区低层动力和水汽辐合条件, 决定降水起止。(2) 因对流触发原因不同, 可将冕宁暴雨过程分为两个阶段: 前期, 受地形和冷池出流抬升影响, 以及叠加其上的中层辐合的接力抬升作用, 西南暖湿气流冲破对流抑制, 在灵山寺西南侧山前形成强对流单体, 强对流单体随引导气流向东北移动到灵山寺站, 带来强降水; 后期, 受山前地形阻挡和山后源自盆地的冷空气的共同作用下, 西南暖湿气流辐合上升运动的强度和伸展高度同时增加, 水汽辐合加强, 灵山寺站附近不断有质心高度较低的强回波单体生消, 降水强度显著增强。

关键词: 冕宁暴雨; 盆地低涡; 局地环流演变; 地形作用

文章编号: 2021146A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2206.21149

Observational analysis of the heavy rainfall case on June 26, 2020, in Mianning

QI Duo^{1, 4, 5}, CUI Xiaopeng^{*1, 2, 3, 4}, and ZOU Qiangli^{1, 4}

1 Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms (LACS), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

3 Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

5 Heilongjiang Meteorological Observatory, Harbin 150030, China

Abstract: An unpredictably heavy rainfall event with a maximum 8-hr accumulated rainfall exceeding 180 mm and a maximum hourly rate of 69.3 mm h⁻¹ occurred in Mianning on June 26,

收稿日期 2021-08-08; 网络预出版日期

*作者简介 齐铎, 女, 1988 年出生, 博士研究生, 主要从事暴雨研究。E-mail: qiduo@mail.iap.ac.cn

**通讯作者 崔晓鹏, E-mail: xpcui@mail.iap.ac.cn

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) 资助 XDA23090101, 中国气象局沈阳大气环境研究所基本科研业务费重点项目 2020SYIAEZD4

Funded by The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA23090101), The Institute of Atmospheric Environment of China Meteorological Administration (2020SYIAEZD4)

2020, inducing mountain torrents (MTs). Here, this event is studied using various observational data. The results indicated that (1) the favorable upper and lower circulation and terrain led to the rainstorm event. During the rainstorm, the situation at 500 hPa had little change. With the tiny westward west-Pacific subtropical high (WPSH) and the eastward mid-latitude trough, the southwesterly wind accelerated. The forming and developing of basin vortex (BV) can be explained well by the aspect change of ageostrophic wind. The convergence between the northerly wind of western BV and the southwesterly wind in Panxi Plateau determined the occurrence and development of rainstorm. (2) The rainstorm process can be divided into two stages: The first stage, the south branch of the updraft reached to the upper troposphere by the orographic lift, cold pool lift and convergence at the mid-level troposphere. The second stage, the south branch flow was uplifted by the orographic and the cold air associated with Sichuan basin. The maximum reflectivity over 50 dBZ closed the melting level on account of the maximum vertical velocity location descended during the period of large rainfall intensity in LLS. The maximum VIL over 50 kg/m² means the high precipitation efficiency and rain intensity.

Keywords: Mianning rainstorm, basin vortex, local circulation evolution, orographic effect

1 引言

我国地形复杂多样、暴雨多发，山洪、滑坡、泥石流等地质灾害发生频率高、灾情重。山洪灾害防治区面积约占陆地面积的 40%，造成的人员伤亡数量约占洪涝灾害的 70%（刘超等，2020），致灾风险严峻。四川地区是我国典型的暴雨多发区之一，区域内地形极其复杂，暴雨预报难度大（鲍名和黄荣辉，2006；林建和杨贵名，2014），山洪等灾害风险突出。因此，四川降水机理相关研究历来备受关注，大量研究工作重点关注了高原涡、西南涡等系统与四川强降水（暴雨）之间的联系（Luo et al., 2016；张元春等，2019；Fu et al., 2019；Mai et al., 2020；卢萍和李跃清，2021）；很多学者还借助观测诊断和数值模拟，从地形效应（何光碧，2006；谢娜等，2011；赵玉春等，2012；孙建华等，2015）、多尺度环流相互作用（李琴等，2014；宋雯雯等，2018a；张芳丽等，2020；杜梅等，2020）、水汽输送特征（Huang and Cui, 2015b；Huang and Cui, 2015c；岳俊和李国平，2016；宋雯雯等，2018b）及云微物理特征和过程（Huang and Cui, 2015a；Huang et al., 2016；顾小祥和李国平，2019；李山山等，2020）等多种角度，对四川暴雨过程发生机理进行了深入讨论；此外，还有很多工作从统计分析角度，研究四川盆地降水的日变化机制：Bao et al. (2011) 和 Zhang et al. (2019) 分别从山地平原热力环流日变化和边界层风场惯性震荡等角度揭示了四川盆地夜雨机理；Chen et al. (2018) 和 Hu et al. (2020) 对发生在盆地西部的降水个例进行合成，分析盆地降水的日变化和移动特征。前人的众多研究成果，为深入认识四川暴雨形成过程，提供丰富的理论基础，对暴雨预报能力提升起到重要作用。但还存在众多难题尚未突破，四川暴雨预报水平仍然不高，致灾风险严峻。同时，气候变化使未来降水复杂性加大、时空维度上极端性双增（Lenderink and Meijgaard, 2008；Pendergrass and Knutti, 2018；Paul et al., 2018），将进一步加剧四川暴雨致灾风险。

四川西南部的攀西高原（包括攀枝花市和凉山彝族自治州两个行政区域，大体位置如图 2a 蓝色虚线方框所示）地处横断山脉与四川盆地的过渡带，区域内山脉河谷纵横交错，地壳活动频密、土质松散，持续性暴雨或突发性强降水极易引发山洪、滑坡、泥石流、堰塞湖等次生地质灾害（Tang et al., 2009；崔鹏等，2013；兰恒星等，2013；Jing et al., 2015），造成公路长期阻断，严重影响区域经济发展，甚至造成重大经济损失和人员伤亡。尤其，2008 年汶川和 2013 年雅安两次强地震发生，使得该区域暴雨致灾风险显著加剧。前人研究

成果关注的暴雨过程，大多发生在盆地内以及盆地周边陡峭地形附近，对攀西高原复杂地形区域山地暴雨过程研究相对较少（肖递祥等，2010；李永军，2020），当前数值模式对这一地区的暴雨预报能力不足，深入研究山地暴雨机理，提升暴雨预报准确率，对于防灾减灾和建设美丽山区至关重要。

2020年6月26日夜間，受突发局地暴雨影响，四川攀西地区北部的冕宁县境内发生严重山洪灾害，造成22人死亡或失踪。发源于冕宁东北部山区的曹古河自东向西流经冕宁北部，曹古河两岸的大马乌村和大堡子村是此次山洪灾害的两处致灾点，冕宁东北部山区的强降水汇入曹古河，使曹古河水位暴涨，洪水漫流，导致大马乌村和大堡子村16人死亡，1人失踪；冕宁境内的灵山寺站观测到此次过程最大累积降水量，而其西侧，高阳街道辖区内的冕宁高速路出口附近，受暴雨山洪影响，国道248线局部崩塌，造成2人遇难，3人失踪（<https://baike.so.com/doc/29784298-31337330.html> [2021-11-17]）。此次暴雨过程，历时短、强度大、局地性和突发性强、灾害重，落区和强度准确预报的难度极大，有必要对其特点和成因展开深入分析，为未来相似暴雨过程预报以及灾害预防提供参考。本文利用多源观测数据和再分析数据，对“6·26”冕宁暴雨成因展开观测分析。

2 分析数据

（1）2020年6月26日18时-27日02时，四川省区域自动站（5006个）小时降水观测数据。文中选择包含主要降水落区（该时段累积降水 ≥ 20 mm 站点）（ 27.5° - 33° N， 100° - 107° E）内的4269个站点。

（2）2020年6月26日08和20时，西昌站探空观测数据。

（3）2020年6月26日16时-27日02时，西昌站雷达体扫基数据。雷达所处海拔高度为2688 m，波束展宽 0.92° ，有效探测半径为150 km，反射率因子水平分辨率1 km，每个体扫包括 0.5° - 19° 共9个仰角，6分钟完成一次体扫。其中，雷达东面 80.6° 、 89.3° 方位角上，存在 4.37° 的遮挡角（邓波等，2007）。

（4）2020年6月26日08时-27日08时，欧洲中期天气预报中心（The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF）ERA5再分析数据（Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalysis of the global climate，<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels> [2021-11-17]），时间分辨率为1 h，空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，垂直层次为37层。

（5）美国国家航天局（NASA）SRTM（Shuttle Radar Topography Mission，<http://srtm.csi.cgiar.org> [2021-11-17]）数字地形高程数据。根据分析范围大小不同，利用临近点插值方法，分别插值成 0.015° 、 0.03° 和 0.75° 三种不同分辨率。

3 暴雨过程降水实况

2020年6月26日18时-27日02时（图1a），西南地区的降水主要分布在三个区域：

（1）四川省北部阿坝州、甘孜及雅安交界处附近，小于50 mm的大范围相对较弱降水；（2）四川省东南部、重庆及贵州三省市交界处附近，大于100 mm的区域性暴雨；（3）攀西地区北部（中心位于冕宁县境内），大于100 mm的局地性暴雨。其中，攀西北部累积雨量大于100 mm的站点共有4个（图1b、c），分别位于冕宁东北部小相岭山脉两侧，按累积雨量大小排序依次为：LSS（冕宁县境内的灵山寺站，181.9 mm）、ZSZ（越西县境内的中所镇站，127.4 mm）、HA（冕宁县境内的惠安乡站，118.6 mm）和YX（越西县境内的越西国家站，102.8 mm）；除灵山寺站之外，其余3站大于20 mm/h的较强降水均主要出现在26日21时之前，且小时雨强均小于40 mm；21时开始，灵山寺站降水显著增强，最大小时

雨强出现在 26 日 23 时-27 日 00 时，达 69.3 mm/h（图 1c），促使该区域曹古河水位暴涨，导致山洪灾害发生。该过程历时短、强度大，局地性强，监测、预警困难。

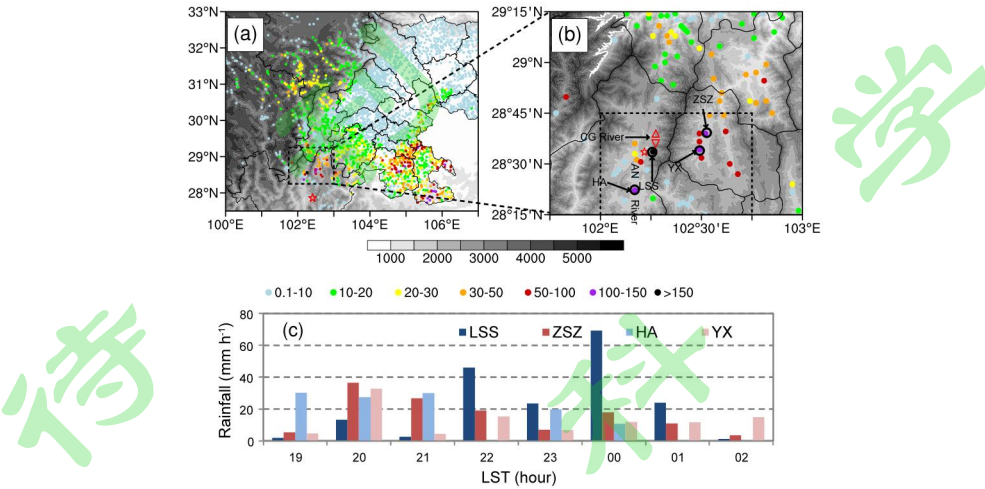


图 1 2020 年 6 月 26 日 18 时-27 日 02 时，（a）四川省区域自动站累积降水量分布（单位：mm），阴影为地形高度，海拔高度分辨率：0.03°，星号代表西昌雷达所在位置；（b）山洪灾害发生区域内的累积降水量（单位：mm），阴影为地形高度，海拔高度分辨率：0.015°；（c）山洪灾害发生区域内累积降水量大于 100 mm 自动站的小时降水量时间演变（单位：mm）。图（a）和（b）中彩色实心圆点及其颜色分别指示地面观测站及其累积降水量（单位：mm），图（b）中英文字母表征信息如下：CG River（曹古河）、AN River（安宁河），LSS（灵山寺站）、ZSZ（中所镇站）、HA（惠安乡站）、YX（越西站），红色五角星、红色倒三角和红色正三角符号分别指示冕宁高速公路路口、大马乌村和大堡子村等山洪灾害出灾点的大致位置

Fig. 1 (a) Distribution of the 8-h accumulated precipitation (mm; dots) 1800 LST 26 to 0200 LST 27 in June 2020 based on Sichuan rain gauge observations. The gray shading represents topography. The topography data spatial resolution is 0.03°. The location of Xichang radar is labeled by the star. (b), as in Figure 2a but for the Mianning Rainfall (MR) region denoted by a black dotted box in (a), and the topography data spatial resolution is 0.015°. The four-station names of 8-hr accumulated rainfall amounts greater than 100 mm are abbreviated in alphabetical order as follows: Lingshansi (LSS), Zhongsuozhen (ZSZ), Huian (HA), and Yuexi (YX). Other abbreviations: Caogu River (CG River), and Anning River (AN River). The MT disaster sites are labeled by the star (high-speed exit of Mianning), red triangle (Dapuzi village), and inverted triangle (Damawu village) (c) Time series of the hourly rainfall of the four stations mentioned in (b)

4 环流背景和水汽条件

“6·26”冕宁暴雨过程发生前（图 2a），500 hPa 高度场上，副热带高压（588 位势什米等值线）位于华南沿海-福建一带，四川上空存在一个浅槽；700 hPa 风场上，四川地区主要受西南气流影响。20 时（图 2b），副高略向西北移动，四川上空浅槽有所加深，两个系统之间的西南气流显著增强；同时，盆地内有低涡发展，低涡中心位于盆地西南部（图 2b 蓝色方框所示区域），“6·26”冕宁局地暴雨区/山洪灾害区（图 2b 中红色方框所示）位于紧邻此低涡环流的西南侧。

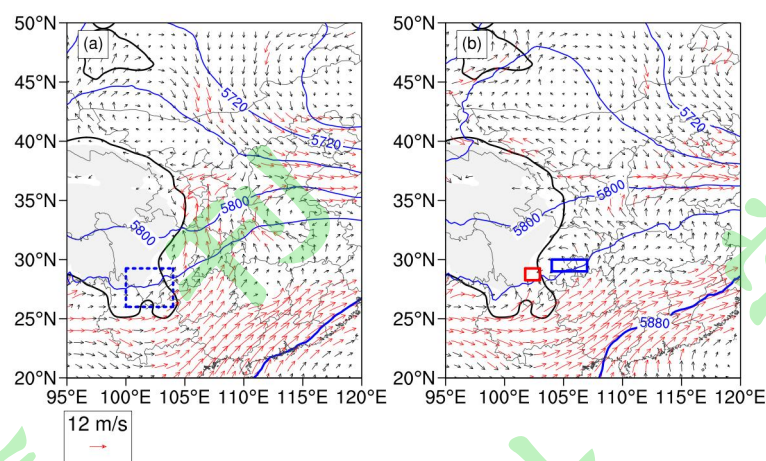


图 2 500 hPa 高度场 (蓝色等值线, 单位: gpm) 和 700 hPa 风场 (红色、黑色矢量分别代表 ≥ 8 m/s 和 < 8 m/s 的风矢量)。黑色粗等值线代表 2000 m 地形等高线 (地形分辨率: 0.75°) ;

图 a 中蓝色虚线方框为攀西高原的大致范围, 图 b 中红色小方框与图 1b 范围相同

(a) 26 日 08 时; (b) 26 日 20 时;

Fig. 2 Distribution of 500 hPa geopotential height (blue line; gpm) and 700 hPa wind vectors (m s^{-1} ; red and black vectors represent wind speeds more than 8 m s^{-1} and less than 8 m s^{-1} respectively) at (a) 0800, (b) 2000 LST 26 in June 2020. The bold blue and black lines indicate the geopotential height of 5880 gpm at 500 hPa and the altitude of 2000 m, respectively. The topography data spatial resolution is 0.75° . The blue dash rectangular in figure a and the red rectangular in figure b represent the Panxi plateau and the MR region, respectively

盆地低涡西侧偏北风向攀西高原爬升, 对于攀西高原北部边界层辐合的产生至关重要 (图 2b)。另外, 从低涡中心所在区域 (图 2b 中蓝色方框所示) 平均垂直涡度随时间和高度的变化上看 (图略), 盆地低涡在低层 850 hPa 上表现出明显的先增强后减弱的日变化特征, 且这种特征随时间逐渐向高层发展。因此, 通过计算盆地低层 (850 hPa) 低涡中心所在范围的平均垂直涡度, 冕宁暴雨区所在范围 (图 1b 中虚线范围) 低层 (700 hPa) 散度和站点小时最大降水量, 分析三者随时间的变化, 来诊断盆地低涡对冕宁降水的影响 (图 3)。从 08 时-22 时, 盆地低层区域平均垂直涡度逐渐增加, 当涡度增加到一定程度以后, 盆地低涡西部转为向攀西高原爬升的偏北风 (图略), 冕宁降水区辐合逐渐增强, 区域内最大降水强度的变化与该区域的辐合特征、盆地低涡强度增长变化特征几乎一致 (图 3)。可见, 盆地低涡的生成和发展有利于低涡西侧偏北气流与冕宁南部的偏南气流在冕宁地区辐合, 对此局地暴雨的发生至关重要。

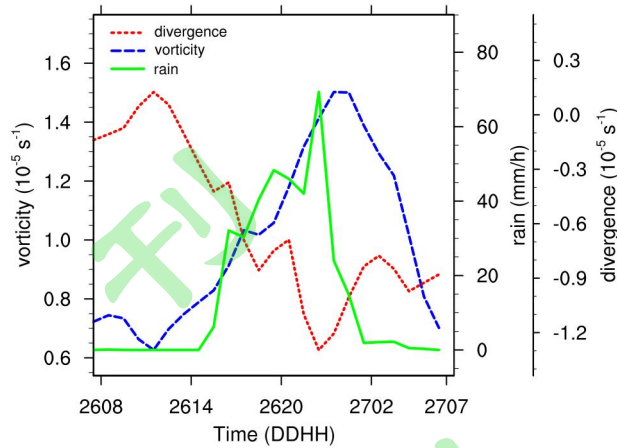


图 3 2020 年 6 月 26 日 08 时-27 日 07 时，850 hPa 区域（图 2b 蓝色方框所示区域， 29° - 30° N， 104° - 107° E）平均垂直涡度（蓝色虚线，单位： 10^{-5} s^{-1} ）、700 hPa 区域（图 2b 红色方框所示区域， 28.25° - 28.75° N， 102° - 102.75° E）平均水平散度（红色点线，单位： 10^{-5} s^{-1} ）及区域站点最大小时降水量（绿色实线，单位：mm）

Fig. 3 regional average of 850 hPa vertical vorticity (the region is represented by blue rectangular in fig. 2b, 29° - 30° N, 104° - 107° E, blue dashed line, 10^{-5} s^{-1}), average of 700 hPa horizontal divergence (the region is represented by red rectangular in fig. 2b, 28.25° - 28.75° N, 102° - 102.75° E, red dotted line, 10^{-5} s^{-1}), and the regional maximum hourly rainfall based on Sichuan rain gauge observations (green solid line, mm) during 0800 LST 26 to 0700 LST 27 in June 2020

水汽在降水区内辐合演变的特征，与盆地低涡发展以及降水区低层气流辐合的演变特征基本一致（图 4）。从降水发生前到降水结束，一直存在西南气流向四川地区输送水汽。伴随盆地低涡增强，低涡环流的气旋性曲率加大，盆地低涡西侧出现向攀西高原辐合的偏北气流，冕宁局地暴雨区水汽通量辐合开始加强（图 4b）；随着盆地低涡加强和攀西高原上空偏南气流的不断增强，在冕宁暴雨区南、北边界处形成两个强局地水汽通量辐合中心（图 4c）；到了 27 日 02 时以后，伴随盆地低涡东移，强局地水汽通量辐合区逐渐移出冕宁暴雨区（图 4d）。

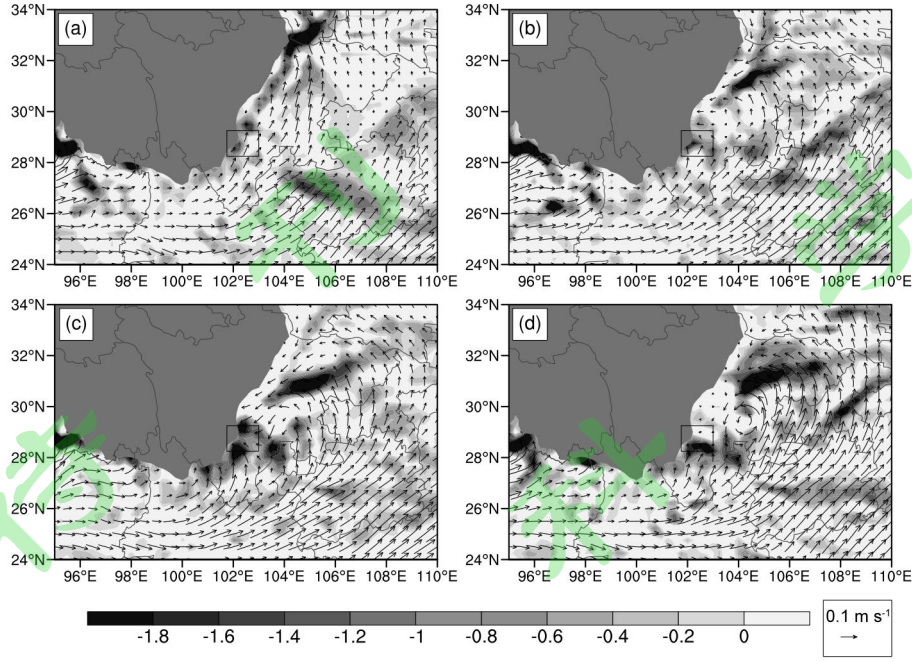


图 4 700 hPa 水汽通量（矢量箭头，单位： $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）和水汽通量散度（阴影，单位： $10^{-5} \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ hPa}^{-1}$ ）。图中黑色方框指示冕宁局地暴雨发生区域；深灰色区域为 700 hPa 以上的高原区域

(a) 26 日 08 时；(b) 26 日 14 时；(c) 26 日 20 时；(d) 27 日 02 时

Fig. 4 Distribution of 700 hPa water vapor flux (vectors; $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) and its divergence (shading; $10^{-5} \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ hPa}^{-1}$) at (a) 0800, (b) 1400, (c) 2000 LST 26 and (d) 0200 LST 27 in June 2020.

The black rectangular area represents the region of the MR, and the gray shading indicates the plateau area above 700 hPa

根据上述分析，盆地低涡的发展使盆地低涡西侧偏北气流建立，增强向攀西高原的气流辐合，造成冕宁降水区气流和水汽的辐合增强，进而影响冕宁地区降水生消和强度变化。为分析低层涡度增长的原因，在 $29^{\circ} - 30^{\circ} \text{ N}$ ， $104^{\circ} - 107^{\circ} \text{ E}$ 低涡中心所在范围，利用涡度方程，对造成低层 850 hPa 垂直涡度变化的各项因子进行诊断（图 5）。涡度方程表征了局地涡度随时间的变化，在大尺度的运动中，摩擦项忽略不计：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) - \left(u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} \right) - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} + \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} \right) - (f + \zeta) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

式中，等号左侧 $\frac{\partial \zeta}{\partial t}$ 代表相对涡度随时间的变化，右侧 $- \left(u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)$ 为相对涡度水平平流

项 B1， $- \left(u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} \right)$ 为地转涡度平流项 B2， $-\omega \frac{\partial \zeta}{\partial p}$ 为涡度垂直输送项 C， $\left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} \right)$ 为水平涡度扭转项 D， $-(f + \zeta) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$ 为水平辐合辐散项 E。

从诊断结果上看，局地涡度随时间的变化主要由水平辐合辐散项（E）贡献（图 5a）。其中，地转风分量对局地涡度增长的贡献小，除 26 日 19-20 时外，其他时间都表现为使局地涡度减小的特征（图 5b）；而非地转风分量几乎都表现为使局地涡度不断增加的特点，从各项因子的诊断结果上看，非地转风的水平辐合辐散项贡献较大，是造成局地涡度增长的主要原因（图 5c）。

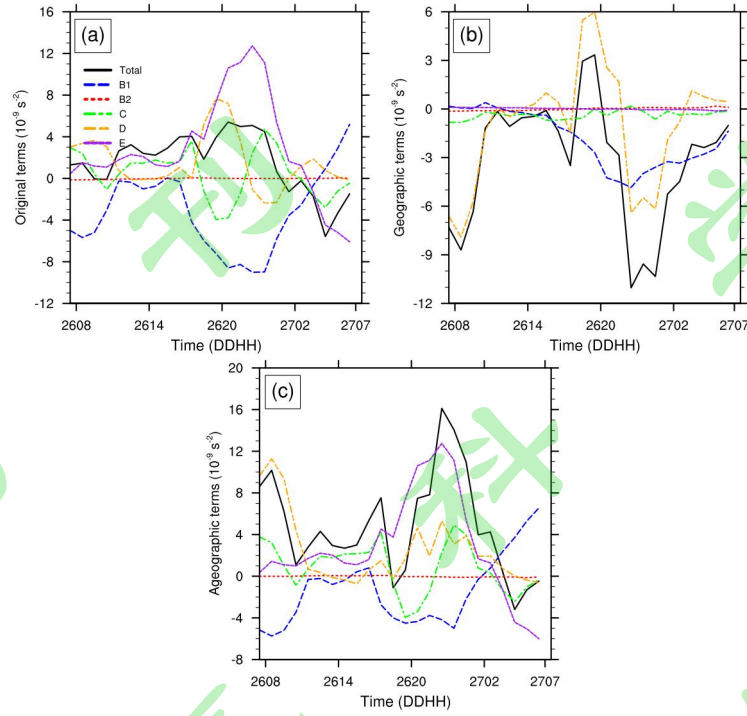


图 5 29° -30° N, 104° -107° E (图 2b 蓝色方框所示区域) 范围内, 850 hPa 平均垂直涡度收支诊断(相对涡度水平平流项 B1 (蓝色虚线): $-\left(u\frac{\partial\zeta}{\partial x} + v\frac{\partial\zeta}{\partial y}\right)$, 地转涡度平流项 (红色点线) B2: $-\left(u\frac{\partial f}{\partial x} + v\frac{\partial f}{\partial y}\right)$, 涡度垂直输送项 (绿色点划线) C: $-\omega\frac{\partial\zeta}{\partial p}$, 水平涡度扭转项 (橙色长虚线) D: $\left(\frac{\partial\omega}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial\omega}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial p}\right)$, 水平辐合辐散项 (紫色点线) E: $-(f + \zeta)\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)$, 总涡度局地变化 (黑色实线) Total: B1+B2+C+D+E)

Fig. 5 analysis on averaged local change of vertical vorticity in vortex center range (29° -30° N, 104° -107° E), B1 (blue dashed line, $-\left(u\frac{\partial\zeta}{\partial x} + v\frac{\partial\zeta}{\partial y}\right)$), B2 (red dotted line, $-\left(u\frac{\partial f}{\partial x} + v\frac{\partial f}{\partial y}\right)$), C (green dash-dotted line, $-\omega\frac{\partial\zeta}{\partial p}$), D (orange long dashed line, $\left(\frac{\partial\omega}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial\omega}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial p}\right)$), E (purple dotted line, $-(f + \zeta)\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)$), Total (black solid line, B1+B2+C+D+E)

从 26 日 08 时-27 日 05 时, 850 hPa 地转风和非地转风逐 3 小时日变化分布上看(图 6), 盆地内的地转风场一直都表现为中心位于盆地的气旋性环流, 风向变化不大; 盆地北部非地转风表现出顺时针旋转的日变化特征 (如图中红色空心箭头方向所示), 08 时 (图 6a) 非地转风为西南偏西向, 11-17 时 (图 6b-d) 转为西北偏西-西北向, 20 时-26 日 23 时 (图 6e-f) 转为东北方向, 27 日 02-05 时 (图 6g-h) 为东南偏东-东南向。盆地低涡北侧的非地转风, 在清晨到上午 (图 6g-h, 6a) 表现为偏南风分量, 对应从低涡中心向北的辐散, 不利于低涡环流发展; 在傍晚到夜间 (图 6b-f) 表现为偏北风分量, 对应向低涡中心的辐合, 有利于低涡增强。

这种盆地低层 (850hPa) 非地转风分量的日变化 (图 6), 与 Blackadar (1956) 提出的边界层风场惯性振荡的特征相似。由于地面强摩擦作用, 白天边界层内风场保持较强的次地

转特征，入夜后稳定边界层内湍流作用减弱，摩擦力减小，风场表现为超地转特征，在日变化上表现为，非地转风顺时针旋转的惯性振荡现象（Blackadar, 1956; Pan and Chen, 2019; Zhang et al., 2019）。另外，热力条件日变化也非常重要，坡地上由辐射作用造成的加热、冷却的热力变化可以通过改变水平气压梯度力来影响风场，对于南北向山脉东坡，白天有偏南向非地转风，夜间有偏北向非地转风（Holton, 1967; Parish et al., 2010）。这种非地转风的日变化特征也与本个例相似。但实际个例与以上两种机制的单一诊断结果相比，都存在一定偏差。偏差产生的原因可能有两个方面：一方面是由于气压梯度力日变化模型（Holton, 1967; Parish et al., 2010）是基于南北向的一维地形，而四川盆地周边都是海拔高度不同的山脉（地形分布如图 1a 阴影所示），其日变化特征必然与简化模型结果存在差异；另一方面，摩擦力的日变化（Blackadar, 1956）和气压梯度力的日变化（Holton, 1967）作用会相互影响，如果同时考虑上述两种日变化机制，需要通过长时间序列数据的统计平均，以消除天气系统等因素的变化，进而借助类似 Du et al. (2014) 发展的简化模型来开展诊断研究。因此，未来还需要对更多样本进行统计平均，再进一步综合诊断上述两种机制对盆地低涡北部非地转风日变化的可能影响和相对贡献。

另外，从垂直涡度方程诊断结果看，26 日 20 时前后（图 5a），涡度加速增长的时段，除了辐合辐散项对垂直涡度的贡献之外，扭转项也有一定的作用。以 26 日 20 时盆地西部某点（29° N, 104° E，如图 6a 星号所示位置）为例，近地面为西北风，对流层低层风向随高度顺转，700 hPa 附近转为东南偏东风，水平涡度方向指向西南，受盆地西部陡峭地形影响，使水平涡度转变为垂直涡度，有利于低涡增强。

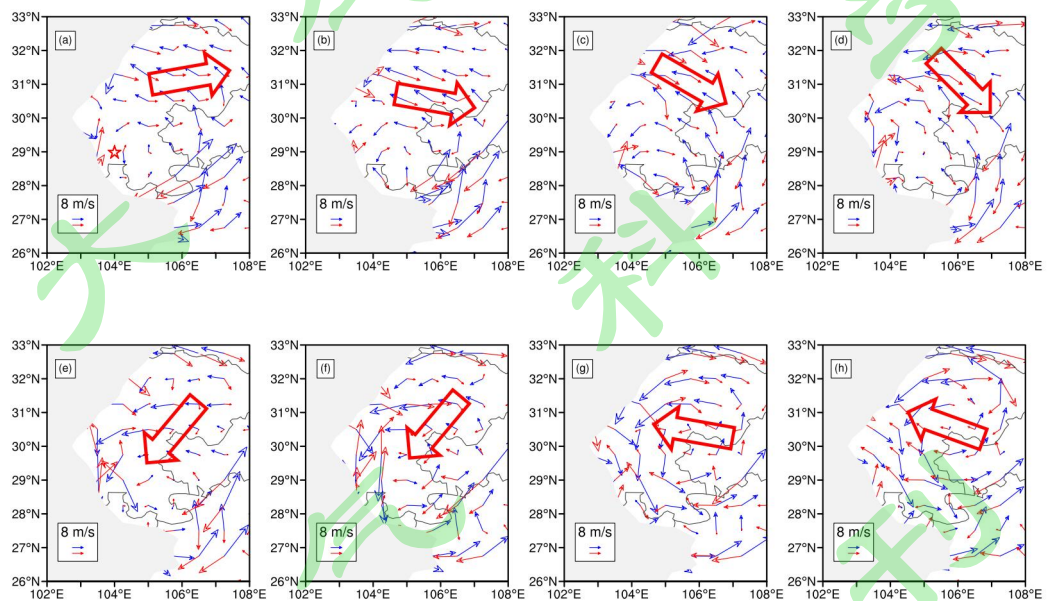


图 6 850 hPa 水平地转风（蓝色矢量，单位： m s^{-1} ）和非地转风（红色矢量，单位： m s^{-1} ，盆地北部的红色空心箭头代表非地转风的大致方向）

(a) 26 日 08 时； (b) 26 日 11 时； (c) 26 日 14 时； (d) 26 日 17 时；
(e) 26 日 20 时； (f) 26 日 23 时； (g) 27 日 02 时； (h) 27 日 05 时；

Fig. 6 850 hPa geographic wind (blue vector, m s^{-1}) and ageographic wind (red vector, m s^{-1} , big red arrows represent the aspects of ageographic wind) at (a) 0800, (b) 1100, (c) 1400, (d) 1700, (e) 2000, (f) 2300 LST 26, (g) 0200, (h) 0500 LST 27 in June 2020

5 区域探空特征及系统演变分析

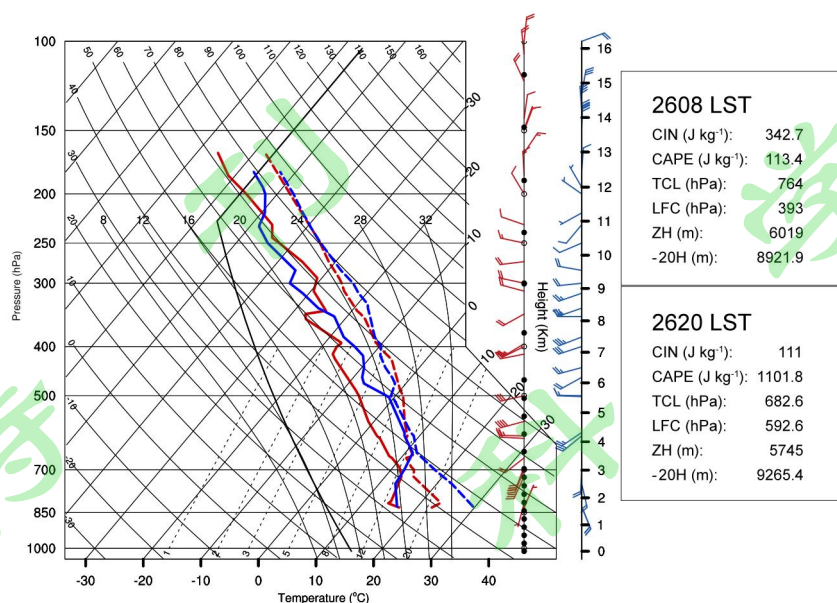


图 7 2020 年 6 月 26 日 08 时（红色）、20 时（蓝色）西昌站探空（左）和相关环境参数（右）
Fig. 7 Skew T-logP diagrams (left) and environmental indexes (right) obtained by the Xichang sounding at 0800 (red) and 2000 (blue) LST on June 26, 2020

在有利的高低空环流配置下，冕宁北部局地暴雨的发生与其环境条件密切相关。西昌探空站（图 1a 星号所处位置）位于冕宁暴雨中心上游（南侧）60 km 处，西昌到冕宁都受偏南气流控制。26 日 08 时-27 日 08 时，西昌站无降水发生，大气层结未受水汽相变影响，可利用该站探空分析暴雨区附近的环境条件（图 7）。26 日 08 时，西昌站对流有效位能（CAPE）仅为 113.4 J/kg，而对流抑制能量（CIN）达 342.7 J/kg，3-4 km 高度范围内存在浅薄逆温层，逆温层以下为强劲的西南风，有利于沿安宁河谷向暴雨区输送水汽。20 时，随着白天太阳辐射加强，边界层内逐渐升温（Li et al., 2017），4 km 以下温度升高显著，近地面升温达 7°C 以上，而 4 km 以上温度变化相对较小，逆温层消失。西昌附近的 CAPE 值增加到 1100 J/kg 以上，CIN 值降低，但仍有 111 J/kg，需要抬升到自由对流高度以上，才可突破对流抑制，触发深对流。

此次暴雨过程中，最大累积雨量出现在灵山寺站，为 181.9 mm。其中，26 日 21 时-27 日 01 时，连续 4 个小时灵山寺站雨强均超过 20 mm/h，最大小时雨强达 69.3 mm/h（26 日 23 时-27 日 00 时）。26 日 19 时 10 分-27 日 02 时 00 分，灵山寺站所在位置经向和纬向的雷达组合反射率时间演变（图 8）显示，强降水与该站附近活跃的对流系统密切相关：22 时 00 分前，不断有对流单体自西南向东北移动，影响灵山寺站，其中，21 时 28 分-22 时 00 分，影响灵山寺的单体回波强度达 60 dBZ 以上，灵山寺站出现小时雨强超过 40 mm/h 的短时强降水；26 日 22 时-27 日 01 时之间，层状云回波向东北移动过程中，不断在灵山寺附近组织为对流单体，并迅速增强，先后 3 个 60 dBZ 以上的对流单体在灵山寺上空形成并维持，使得该地区雨强达最大；27 日 01 时之后，影响灵山寺站的回波强度明显减弱，暴雨过程也趋于结束。

根据上述分析可知，冕宁地区的强对流是在条件不稳定的大气层结下发生的，动力抬升作用是条件不稳定大气中对流发生的必要条件，所以接下来将进一步分析造成冕宁暴雨中心（灵山寺站）附近对流触发的抬升条件以及相应的降水演变特点。

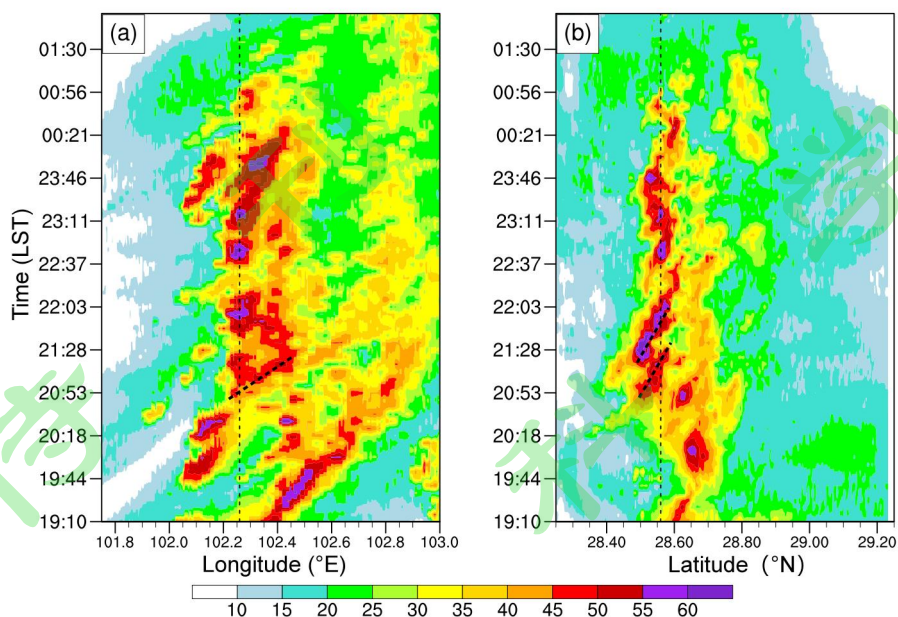


图 8 冕宁灵山寺站所在位置经度-时间 (a) 和纬度-时间 (b) 组合反射率分布 (彩色阴影, 单位: dBZ, 黑色虚线代表对流单体的传播方向)

Fig. 8 (a) Time-longitude cross-section of composite radar reflectivity (dBZ) along latitude 28.56°N from 1910 LST 26 to 0200 LST 27, in which bold dashed lines indicate the directions of peak reflectivity propagation; (b) same as in Figure 8a but along longitude 102.26°E

从主要降水时段内雷达组合反射率空间分布 (图 9) 看, 19 时 33 分 (图 9a), 回波在越西境内显著增强, 呈现西南-东北向带状分布, 南侧回波更强, 中心强度大于 55 dBZ (图 9a), 引发越西站短时强降水。

20 时 02 分 (图 9b), 越西境内回波向东北移动, 并逐渐减弱消散。

20 时 31 分 (图 9c), 回波在小相岭西侧山前发展, 多个对流单体呈西南-东北向带状分布。其中, 灵山寺西南部的强单体回波 (图 9c 椭圆标注位置) 在向东北移动的过程中, 逐渐影响灵山寺。沿该回波单体所在的回波带方向做剖面 (图 10a), 进一步分析其对流触发的原因。剖面斜穿过南北向小相岭山脉中部, 剖面图左端位于小相岭西南部谷地, 右端位于小相岭东北部与四川盆地西南部交界的位置, 剖面走向与攀西高原低层西南气流方向大体一致。有三个回波单体, 出现在小相岭西南侧山前的上升气流中 (以下简称为山前上升气流), 回波顶最大高度都在 7 km 以上, 达到深对流, 中间一个发展最强 (对应于图 9c 椭圆标注位置), 后期将移动到灵山寺, 带来强降水。分析山前上升气流中的垂直运动随高度变化的特点发现, 山前的垂直运动都表现为随高度先增大后减小再增大的特点。从假相当位温的垂直分布上看, 地面以上不足 1 km 的高度范围内, 有一个浅薄的假相当位温较低的干冷层, 可能对应于带状排列的对流单体后部的冷池流出。700 hPa 附近的西南暖湿气流受地形和地形以上的浅薄冷空气抬升, 表现为在山前 700 hPa 附近的强辐合中心和明显的上升运动。但上升运动并未随高度不断增加, 说明低层的抬升并未使暖湿气流冲破对流抑制, 所以山前上升气流在负浮力的作用下减速。但在 600 hPa 附近, 上升气流又开始加速, 分析其加速上升的原因, 可能与山前 600 hPa 附近的中层辐合有关, 中层辐合使上升气流得到进一步抬升, 最

终冲破对流抑制，之后在浮力作用下不断加速上升。分析此中层辐合产生的原因，可能与盆地冷空气随偏北气流在山后爬升有关。山后地形对偏北气流携带的盆地冷空气有抬升作用，形成上升运动。由于山后大气上暖下冷， $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial z} > 0$ 层结稳定，失去地形抬升作用后，气流上

升速度在 600 hPa 附近逐渐减弱，并出现水平辐散。其中山后 600 hPa 以上向南辐散的偏北气流，与山前相同高度处的西南气流汇合，在山前 600-400 hPa 产生中层辐合。

此后到 22 时 00 分之前（图 9d-e），系统特征变化不大。在低层的地形和冷池出流抬升以及中层辐合的接力抬升作用下，灵山寺站西南侧山前不断有对流触发并不断增强，随引导气流向东北方向移动，形成列车效应，持续影响灵山寺站。

22 时 00 分之后（图 9f-i），与上一阶段不同，对流触发位置移动到灵山寺站。选择雷达观测中，影响灵山寺站的单体回波强度最强的 23 时 47 分，对灵山寺站所在位置做西南-东北向剖面（图 10b），剖面方向与图 10a 一致。这一阶段，伴随盆地冷空气进一步南下，山脉东北部完全被干冷空气控制，山前的西南暖湿气流受地形和山后源自盆地的冷空气共同抬升，低层的辐合和上升运动都得到显著增强，500 hPa 以下为深厚的辐合层，辐合中心强度较上一时段明显增大，500 hPa 以上气流转为辐散，最大垂直上升运动出现在 500 hPa 附近。低层强烈的辐合抬升增加了水汽的辐合，使大于 50 dBZ 强回波主要出现在低层，VIL 极值达 50 kg/m² 以上（Zhong et al., 2015; Amburn and Wolf, 1997; 赵文等, 2016），降水最强达 69.3 mm/h。

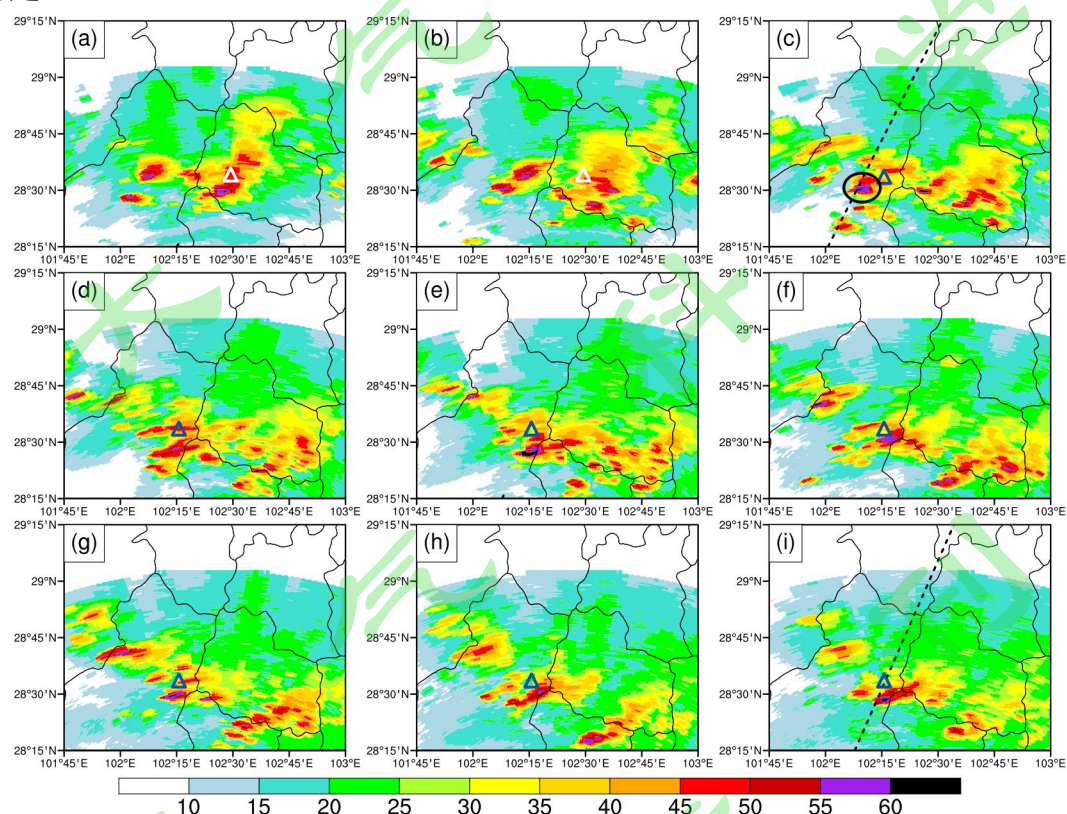


图 9 2020 年 6 月 26 日，西昌站雷达组合反射率分布（彩色阴影，单位：dBZ），黑色虚线指示图 10 中剖面所处位置，白色三角代表越西中所镇（ZSZ），蓝色三角代表灵山寺（LSS）

（a）19 时 33 分；（b）20 时 02 分；（c）20 时 31 分；（d）21 时 00 分；（e）21 时 28 分；（f）22 时 03 分；（g）22 时 43 分；（h）23 时 24 分；（i）23 时 47 分

Fig. 9 Horizontal map of CR (dBZ) at (a) 1933, (b) 2002, (c) 2031, (d) 2100, (e) 2128, (f) 2203, (g)

2243, (h) 2324 and (i) 2347 LST on 26 June. The dashed lines in (a), (c), (e) and (i) denote the position of the vertical cross-section in Fig. 10, the white and blue triangles denote the gauge stations of ZSZ and LSS, respectively

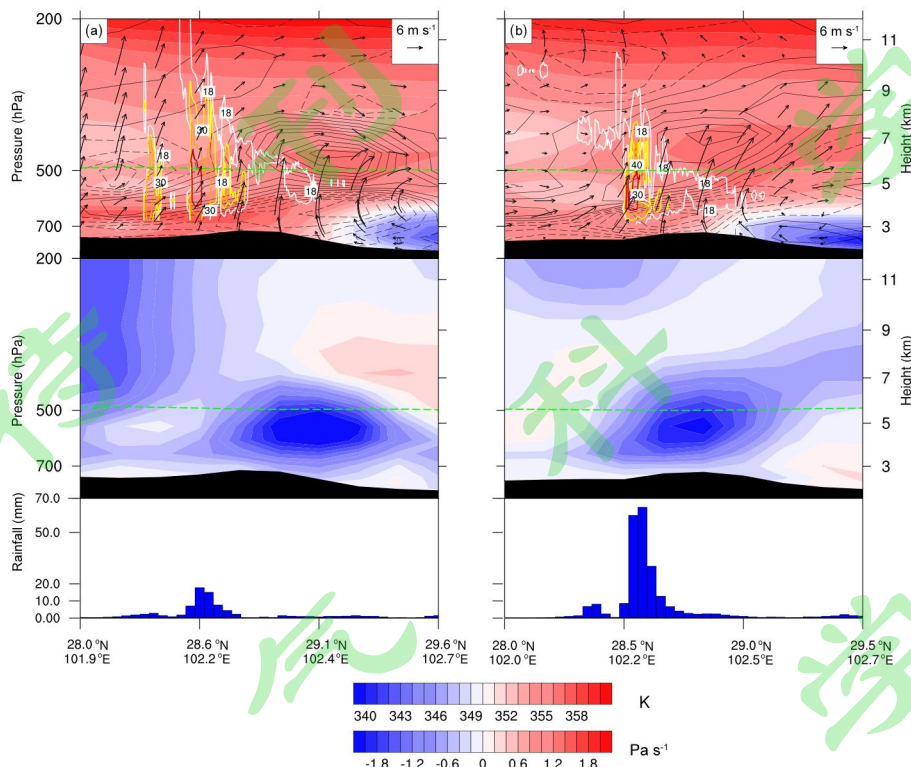


图 10 沿图 9 中虚线位置绘制的垂直剖面。各小图中，上图彩色阴影代表假相当位温（单位：K），黑色等值线为散度（单位： 10^{-5}s^{-1} ），彩色等值线为 $>18\text{ dBZ}$ 的雷达回波（单位：dBZ）；中图中彩色阴影为垂直速度（单位： Pa/s ）；上、中图中，绿色虚线为 0 度层位置，黑色阴影代表地形高度；下图中，蓝色直方图代表站点观测到的小时降水量在剖面所在位置上的插值（单位： mm/h ）。（a）26 日 21 时，沿图 9c 虚线所在位置剖面，雷达回波为 20 时 31 分；（b）27 日 00 时，沿图 9i 虚线所在位置剖面，雷达回波为 23 时 47 分

Fig. 10 Vertical cross-sections along the lines given in Fig. 9 for equivalent potential temperature (shaded; K), divergence (dashed and solid black contours at intervals of $1 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$), superimposed with in-plane flow vectors with vertical motion amplified by a factor of 5 in the upper portion, vertical velocity (shaded; Pa s^{-1}) in the middle portion, and hourly rainfall amounts (bar; mm) in the lower portion at (a) 2100 LST June 26 and (b) 0000 LST June 27 2020. The reflectivity vertical cross-sections indicate colorful contours (from 18 to 50 dBZ) in the upper portion at (a) 2031 and (b) 2347 LST June 26, 2020. The green dashed line represents the melting level. The terrain is shaded in black

6 结论与讨论

2020 年 6 月 26 日 18 时-27 日 02 时，四川省冕宁县突发累积雨量超过 180 mm 的局地强降水，最大过程累积降水和最大小时雨强都出现在灵山寺站。本文利用 ERA5 再分析资料、区域自动站降水资料、探空以及雷达观测资料，从环流背景、水汽和大气层结条件、局地对流触发原因等方面，探讨了此次局地暴雨过程的可能成因。主要结论如下：

（1）“6·26”冕宁暴雨是在有利高、低空环流形势和局地复杂地形的共同影响下出现

的。暴雨发生期间, 500 hPa 高度场上, 四川上空浅槽和其东侧的副高相向运动, 使二者之间的西南气流显著增强, 影响四川地区。受盆地北部非地转风随时间顺时针旋转的风向变化影响, 盆地中心出现了南北向气流辐合, 使盆地低涡形成并增强。盆地低涡西部偏北气流建立、加强, 从盆地向攀西高原爬升, 与攀西高原不断增强的偏南风在冕宁地区汇合, 造成水汽的强辐合, 导致此次暴雨过程发生。

(2) 局地环境条件分析表明, 26 日 08 时, 暴雨发生前, 大气层结稳定, 在 3-4 km 高度处存在逆温层。白天逆温层逐渐消失, 冕宁暴雨发生时, 大气条件不稳定, 需要一定强度的抬升才可突破对流抑制、触发深对流。

(3) 根据不同的对流触发原因, 可将冕宁暴雨过程可分为前、后两个阶段: 前期, 对流单体在灵山寺西南侧形成, 强度达到最强, 随引导气流向东北移动到灵山寺站, 带来强降水; 此阶段, 在地形和冷池出流抬升以及叠加其上的中层辐合的接力抬升作用下, 暖湿气流冲破对流抑制, 加速上升, 在山前形成强对流单体。后期, 在灵山寺站附近有强单体回波局地生消, 伴随最大的小时雨强; 此阶段, 地形和山后源自盆地的冷空气共同抬升山前西南暖湿气流, 低层辐合上升运动的强度和伸展高度同时增加, 使零度层之下的水汽辐合增强, 降水强度增大。

前人相关研究(李琴等, 2014; Hu et al., 2020)发现, 四川地区的暴雨过程往往伴有盆地低涡存在。本文利用涡度方程, 诊断了此次过程低涡出现和增强的原因, 以及对冕宁暴雨的作用。未来还需借助数值模拟、敏感性实验以及长期统计平均, 来进一步分析边界层惯性振荡、山地热力条件日变化、地形影响等因素在此类低涡形成过程中的具体作用。此外, 受观测资料时空分辨率的限制, 仍缺乏证实文中猜测的中尺度对流系统触发及演变原因的直接证据, 有待后续利用高分辨率的数值模拟资料, 借助粒子反向追踪等手段, 进一步分析和验证。

参考文献 (References)

- Amburn S A, Wolf P L. 1997. VIL density as a hail indicator [J]. *Weather and Forecasting*, 12(3): 473-478. doi:10.1175/1520-0434(1997)012<0473:VDAAH1>2.0.CO;2
- Blackadar A K. 1957. Boundary Layer Wind Maxima and Their Significance for the Growth of Nocturnal Inversions [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 38(5), 283-290. doi: 10.1175/1520-0477-38.5.283
- 鲍名, 黄荣辉. 2006. 近 40 年我国暴雨的年代际变化特征 [J]. *大气科学*, 30(6): 1057-1067. Bao Ming, Huang Ronghui. 2006. Characteristics of the interdecadal variations of heavy rain over China in the last 40 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30(6): 1057-1067. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.01
- Bao X H, Zhang F Q, Sun J H. 2011. Diurnal variations of warm-season precipitation east of the Tibetan Plateau over China [J]. *Monthly Weather Review*, 139(9): 2790-2810. doi: 10.1175/MWR-D-11-00006.1
- 崔鹏, 陈晓清, 张建强, 等. 2013. “4·20”芦山 7.0 级地震次生山地灾害活动特征与趋势 [J]. *山地学报*, 31(03): 257-265. Cui Peng, Chen Xiaoqing, Zhang Jianqiang, et al. 2013. Activities and tendency of mountain hazards induced by the ms7. 0 Lushan earthquake, April 20, 2013 [J]. *Journal of Mountain Science (in Chinese)*, 31(3): 257-265.
- Chen H M, Li J, Yu R C. 2018. Warm season nocturnal rainfall over the eastern periphery of the Tibetan Plateau and its relationship with rainfall events in adjacent regions [J]. *International Journal of Climatology*, 38(13): 4786-4801. doi: 10.1002/joc.5696
- 邓波, 顾清源, 罗菊芳. 2007. 攀西地区“7.7”暴雨雷达回波演变特征剖析 [J]. *气象*, 33(9): 64-68.

- Deng Bo, Gu Qingyuan, Luo Jufang. 2007. Anatomy of the evolution of radar echo at "7.7" heavy rain in the western Panzhihua [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 33(9): 64-68. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2007.09.010
- 杜梅, 李国平, 李山山. 2020. 高原横切变线与高原低涡关系的初步研究 [J]. *大气科学*, 44(2): 269-281. DU Mei, LI Guoping, LI Shanshan. A Preliminary Study of the Relationship between the Plateau Transverse Shear Line and Plateau Vortex[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2020, 44(2): 269-281. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1906.18191
- Du Y, Rotunno R. 2014: A simple analytical model of the nocturnal low-level jet over the Great Plains of the United States. *J. Atmos. Sci.*, 71, 3674-3683, doi:10.1175/JAS-D-14-0060.1
- Fu S M, Mai Z, Sun J H, et al. 2019. Impacts of convective activity over the Tibetan Plateau on plateau vortex, southwest vortex, and downstream precipitation [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 76(12): 3803-3830. doi: 10.1175/JAS-D-18-0331.1
- 顾小祥, 李国平. 2019. 云微物理方案对一次高原切变线暴雨过程数值模拟的影响 [J]. *云南大学学报 (自然科学版)*, 41(3): 526-536. Gu Xiaoxiang, Li Guoping. 2019. Impact of cloud microphysical schemes on numerical simulation of a plateau shear line rainstorm event [J]. *Journal of Yunnan University Natural Science* (in Chinese), 41(3): 526-536. doi: 10.7540/j.ynu.20180441
- 何光碧. 2006. 高原东侧陡峭地形对一次盆地中尺度涡旋及暴雨的数值试验 [J]. *高原气象*, 25(3): 430-441. He Guangbi. 2006. Simulation of impact of steep terrain on east side of Qinghai-Xizang Plateau on mesoscale vortex and rain storm over the basin [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 25(3): 430-441.
- Holton J R. 1967: The diurnal boundary layer wind oscillation above sloping terrain. *Tellus*, 19, 199-205. doi:10.3402/tellusa.v19i2.9766
- Hu X L, Yuan W H, Yu R C, et al. 2020. The evolution process of warm season intense regional rainfall events in Yaan [J]. *Climate Dynamics*, 54(7-8): 3245-3258. doi: 10.1175/JAS-D-18-0331.1
- Huang Y J, Cui X P. 2015a. Dominant cloud microphysical processes of a torrential rainfall event in Sichuan, China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32(3): 389-400. doi: 10.1007/s00376-014-4066-7
- Huang Y J, Cui X P. 2015b. Moisture sources of an extreme precipitation event in Sichuan, China, based on the Lagrangian method [J]. *Atmospheric Science Letters*, 16(2): 177-183. doi: 10.1002/asl2.562
- Huang Y J, Cui X P. 2015c. Moisture Sources of Torrential Rainfall Events in the Sichuan Basin of China during Summers of 2009-13 [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 16(4): 1906-1917. doi: 10.1175/JHM-D-14-0220.1
- Huang Y J, Cui X P, Li X F. 2016. A three-dimensional WRF-based precipitation equation and its application in the analysis of roles of surface evaporation in a torrential rainfall event [J]. *Atmospheric Research*, 169: 54-64. doi: 10.1016/j.atmosres.2015.09.026
- 兰恒星, 周成虎, 高星, 等. 2013. 四川雅安芦山地震灾区次生地质灾害评估及对策建议 [J]. *地理科学进展*, 32(4): 499-504. Lan Hengxing, Zhou Chenghu, Gao Xing, et al. 2013. Secondary geological hazard assessment and hazard mitigation countermeasures in Lushan, Yaan Earthquake, Sichuan Province [J]. *Progress in Geography* (in Chinese), 32(4): 499-504. doi: 10.11820/dlkxjz.2013.04.001
- Lenderink G, Meijgaard E V. 2008. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes [J]. *Nature Geoscience*, 1:511-514. doi: 10.1038/ngeo262
- Li H Q, Cui X P, Zhang D L. 2017. On the initiation of an isolated heavy-rain-producing storm near the

- central urban area of Beijing metropolitan region [J], *Monthly Weather Review*, 145(1): 181-197. doi: 10.1175/MWR-D-16-0115.1
- 李琴, 崔晓鹏, 曹洁. 2014. 四川地区一次暴雨过程的观测分析与数值模拟 [J]. *大气科学*, 38(6): 1095-1108. Li Qin, Cui Xiaopeng, Cao Jie. 2014. Observational analysis and numerical simulation of a heavy rainfall event in Sichuan Province [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 38(6): 1095-1108. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13255
- 李山山, 王晓芳, 万蓉, 等. 2020. 青藏高原东坡不同海拔区域的雨滴谱特征 [J]. *高原气象*, 39(5): 899-911. Li Shanshan, Wang Xiaofang, Wan Rong, et al. 2020. The characteristics of raindrop spectrum in different altitude region on the eastern slope of Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 39(5): 899-891. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.0008
- 李永军. 2020. 攀西地区南部一次MCC引发暴雨过程的分析 [J]. *高原山地气象研究*, 40(2): 43-48. Li Yongjun. 2020. The analysis of a rainstorm induced by MCC in south Panxi area [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (in Chinese), 40(2): 43-48. doi: 10.3969/j.issn.1674-2184.2020.02.007
- 林建, 杨贵名. 2014. 近30年中国暴雨时空特征分析 [J]. *气象*, 40(7): 816-826. Lin Jian, Yang Guiming. 2014. Spatio-temporal characteristics of rainstorm in China during 1981-2010 [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 40(7): 816-826. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.07.005
- 刘超, 聂锐华, 刘兴年, 等. 2020. 山区暴雨山洪水沙灾害预报预警关键技术研究构想与成果展望 [J]. *工程科学与技术*, 52(6): 1-8. Liu Chao, Nie Ruihua, Liu Xingnian, et al. 2020. Research conception and achievement prospect of key technologies for forecast and early warning of flash flood and sediment disasters in mountainous rainstorm [J]. *Advanced Engineering Sciences* (in Chinese), 52(6), 1-8. doi: 10.15961/j.jsuese.202000859
- 卢萍, 李跃清. 2021. 增强副热带高压对西南涡影响的数值试验 [J]. *大气科学*, 45(4): 851-862. LU Ping, LI Yueqing. 2021. Simulation of Effect of Subtropical High Enhancement on Southwest Vortex [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 45(4): 851-862. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.20161
- Luo Y L, Wu M W, Ren F M, et al. 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China. *Journal of Climate* [J], 29(24): 8703-8719. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0057.1
- Mai Z, Fu S M, Sun J H, et al. 2020. Key statistical characteristics of the mesoscale convective systems generated over the Tibetan Plateau and their relationship to precipitation and southwest vortices [J]. *International Journal of Climatology*, 41:875-896. doi: 10.1002/joc.6735
- Pan H, Chen G X. 2019. Diurnal Variations of Precipitation over North China Regulated by the Mountain-plains Solenoid and Boundary-layer Inertial Oscillation [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 36: 863-884. doi:10.1007/s00376-019-8238-3
- Parish T R, Oolman L D. 2010: On the role of sloping terrain in the forcing of the Great Plains low-level jet. *J. Atmos. Sci.*, 67, 2690-2699, doi:10.1175/2010JAS3368
- Pendergrass A G, Knutti R. 2018. The uneven nature of daily precipitation and its change [J], *Geophysical Research Letters*, 45(21): 11980-11988. doi:10.1029/2018GL080298
- Paul S, Ghosh S, Mathew M, et al. 2018. Increased spatial variability and intensification of extreme monsoon rainfall due to urbanization [J]. *Scientific Reports*, 8: 2045-2322. doi: 10.1038/s41598-018-22322-9
- 宋雯雯, 李国平, 龙柯吉, 等. 2018a. 两类动力因子对四川盆地一次低涡暴雨的应用研究 [J]. *高原气象*, 37(5): 1289-1303. Song Wenwen, Li Guoping, Long Keji, et al. 2018a. Application research of two types of dynamical factors in a vortex rainstorm in Sichuan basin [J]. *Plateau*

- Meteorology (in Chinese), 37(5), 1289-1303. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00015
- 宋雯雯, 李国平, 王皓. 2018b. 四川盆地一次强降水过程水汽特征 [J]. 气象科技, 46(1): 129-138.
- Song Wenwen, Li Guoping, Wang Hao. 2018b. Cooperative analysis of a heavy precipitation process in Sichuan basin by using WRF model and ground-based GPS water vapor data [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 46(1), 129-138. doi: 10.19517/j.1671-6345.2016063
- 孙建华, 李娟, 沈新勇, 等. 2015. 2013 年 7 月四川盆地一次特大暴雨的中尺度系统演变特征 [J]. 气象, 41(5): 533-543. Sun Jianhua, Li Juan, Shen Xinyong, et al. 2015. Mesoscale system study of extreme rainfall over Sichuan basin in July 2013 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 41(5), 533-543. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.05.002
- Tang C, Zhu J, Li W L, et al. 2009. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 68(2): 187-194. doi: 10.1007/s10064-009-0201-6
- 肖递祥, 毛家勋, 李庆. 2010. “09.7”四川攀西暴雨的 MCS 特征及其成因分析 [J]. 暴雨灾害, 29(1): 56-60. Xiao Dixiang, Miao Jiaxun, Li Qing. 2010. Analysis on MCS characteristics and its causes of rainstorm in the Panxi region of Sichuan Province in July 2009 [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 29(1), 56-60.
- 谢娜, 王咏青, 施娟, 等. 2011. 城区下垫面特征对成都地区一次暴雨过程影响的数值模拟 [J]. 高原气象, 30(6): 1472-1480. Xie Na, Wang Yongqing, Shi Juan, et al. 2011. Numerical simulation of city underlying surface effect on a rainstorm process in Chengdu [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30(6), 1472-1480.
- 岳俊, 李国平. 2016. 应用拉格朗日方法研究四川盆地暴雨的水汽来源 [J]. 热带气象学报, 32(2): 256-264. Yue Jun, Li Guoping. 2016. Study on the moisture source of rainstorms in Sichuan basin by the Lagrangian method [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 32(2), 256-264.
- 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 Fangli, Li Guoping, Luo Xiao. 2020. Some influence factors of a sudden rainstorm event in northeast Sichuan basin of China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 39(2), 321-332. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00080
- 张元春, 李娟, 孙建华. 2019. 青藏高原热力对四川盆地西部一次持续性暴雨影响的数值模拟 [J]. 气候与环境研究 24(1): 37-49. Zhang Yuanchun, Li Juan, Sun Jianhua. 2019. Numerical simulation of impacts of the Tibetan Plateau heating on a persistent heavy rainfall in western Sichuan basin [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(1), 37-49. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17166
- Zhang Y H, Xue M, Zhu K F, et al. 2019. What is the main cause of diurnal variation and nocturnal peak of summer precipitation in Sichuan basin, China? The key role of boundary layer low - level jet inertial oscillations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124(5): 2643-2664. doi: 10.1029/2018JD029834
- 赵文, 张强, 赵建华. 2016. 陇东南地区强降水过程与雷达 VIL 产品的定量关系研究 [J]. 高原气象, 35(2): 528-537. Zhao Wen, Zhang Qiang, Zhao Jianhua. 2016. Study on the quantitative relationship between the heavy precipitation process and VIL product of radar in Southeast Gansu Region [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35(2): 528-537. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00056
- 赵玉春, 许小峰, 崔春光. 2012. 川西高原东坡地形对流暴雨的研究 [J]. 气候与环境研究, 17(5): 607-616. Zhao Yuchun, Xu Xiaofeng, Cui Chunguang. 2012. A study of convective rainstorms

- along the east slope of Western Sichuan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17(5), 607-616. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.11056
- Zhong L Z, Mu R, Zhang D L, et al. 2015. An observational analysis of warm-sector rainfall characteristics associated with the 21 July 2012 Beijing extreme rainfall event [J]. Journal of Geophysical Research, 120(8): 3274-3291. doi: 10.1002/2014JD022686
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2014. 天气学原理和方法 [M]. 北京:气象出版社,第四版, 321. Zhu Qangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2014. Theories and techniques of synoptic meteorology [M]. 4th ed., Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 321.