

# 1 诱发四川冕宁“6.26”山洪灾害的突发性暴雨特征及其形成 2 机制\*

3 陈博宇<sup>1</sup> 谌芸<sup>1,4\*</sup> 孙继松<sup>2,5\*</sup> 陈涛<sup>1,4</sup> 陈朝平<sup>3</sup> 胡宁<sup>1</sup>

4 1. 国家气象中心, 北京, 100081

5 2. 中国气象科学研究院, 北京, 100081

6 3. 四川省气象台, 成都, 610072

7 4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海, 519082

8 5. 南京气象科技创新研究院, 南京, 210009

9 **摘 要** 基于多源观测、再分析和对流可分辨模式预报资料, 运用物理量诊断、标准化异常、相似过程比较  
10 等方法, 分析了2020年6月26日四川冕宁突发性暴雨过程的特征和形成机制。结果表明:(1)该过程是  
11 一次伴有多条带状 $\gamma$ 中尺度对流系统、“列车效应”产生极端小时雨量的局地突发性暴雨过程, 其对流回波  
12 质心较低, 对流云团具有中尺度对流复合体云团特征;(2)冕宁北部的对流冷池出流与较强的谷地偏南气  
13 流相遇形成的辐合抬升构成了对流的触发机制;(3)川西南低空偏南气流具有阶段性增强特征并提供了持  
14 续的暖湿空气输送, 其在过程初期与下山冷池的相互作用及后期与盆地西部南下冷空气的汇合, 使对流反  
15 复在冕宁站西侧和南侧初生, 并在下游形成“列车效应”;(4)对比历史相似过程, 环境大气的对流有效位  
16 能等物理量具有更显著的异常和异常持续性;(5)川西南北部的高海拔地形对延缓冷空气进入安宁河谷和  
17 维持河谷内的不稳定层结有显著作用, 并且该区域地形强迫抬升形成了河谷上游地区潜在的对流触发条件。  
18 最后给出了此次暴雨过程形成机制的概念模型。

19 **关键词:** 山洪, 突发性暴雨, 列车效应, 冷池, 水汽输送带, 地形

20 **文章编号:** 2021186A

21 **doi:** 10.3878/j.issn.1006-9895.2201.21186

## 23 **The Characteristics and Formation Mechanism of Sudden Rainstorm Inducing 24 the "6.26" Mountain Torrent Disaster in Mianning of Sichuan Province**

25 CHEN Boyu<sup>1</sup> CHEN Yun<sup>1,4\*</sup> SUN Jisong<sup>2,5\*</sup> CHEN Tao<sup>1,4</sup> CHEN Zhaoping<sup>3</sup> HU Ning<sup>1</sup>

26 1. *National Meteorological Center, Beijing 100081, China*

27 2. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

28 3. *Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610072, China*

29 4. *Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China*

30 5. *Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210009, China*

31 **Abstract** Based on multi-source observations, reanalysis and convection-resolving model forecast  
32 data, the characteristics and formation mechanism of the sudden rainstorm process in Mianning  
33 of Sichuan province on June 26, 2020 were analyzed by using physical quantity diagnosis,  
34 standardized anomaly analysis, comparison with similar processes. Results were as follows: (1)  
35 The process was a local sudden rainstorm process with several banded meso- $\gamma$  convective systems  
36 and extreme hourly precipitation, which generated by the "train effect". The center of convective  
37 echoes was low, and the convective cloud clusters had the characteristics of mesoscale convective  
38 complex. (2) The surface convergence and uplift, formed by the outflow of convective cold pool

收稿日期: 2021-09-26; 网络预出版日期

\* 作者简介: 陈博宇, 博士, 主要从事定量降水预报和集合预报研究。E-mail: [chenboyu@cma.gov.cn](mailto:chenboyu@cma.gov.cn)

通讯作者: 谌芸, E-mail: [chenyun@cma.gov.cn](mailto:chenyun@cma.gov.cn); 孙继松, E-mail: [sunjs@cma.gov.cn](mailto:sunjs@cma.gov.cn)

资助课题: 国家自然科学基金(91937301), 国家重点研发计划(2018YFC1505705、2018YFC1507200), 灾害天气国家重点实验室开放课题(2021LASW-A16)

1 in the northern part of Mianning and the strong southerly wind in valley, constituted to the  
2 convection triggering. (3) The southerly low-level flow in Southwest Sichuan had the  
3 characteristics of phased enhancement, and provided continuous warm and moist air transportation.  
4 Its interaction with the downhill cold pool in the early stage of the process and confluence with  
5 the southward cold air from western basin at the later stage of process, caused convective cells  
6 were repeatedly triggered on the west and south side of Mianning station, and generated the "train  
7 effect" in downstream areas. (4) Compared with similar process in history, the physical quantities  
8 such as convective effective potential energy of environmental atmosphere had more significant  
9 anomalies and persistence of anomalies. (5) The high-altitude terrain in the northern part of  
10 Southwest Sichuan has a significant effect on delaying the entry of cold air into Anning river  
11 valley and maintaining unstable stratification in the valley. The forcing uplift of the terrain  
12 in this area formed a potential convection triggering condition in upstream areas of the river  
13 valley. Finally, the conceptual model of the formation mechanism of this rainstorm process was  
14 presented.

15 **Key words** Mountain torrent, Sudden rainstorm, Train effect, Cold pool, Vapor conveyor belt,  
16 Terrain

## 17 1 引言

18 在全球气候变暖背景下, 极端暴雨天气事件频率增加 (Alexander, et al, 2006)。近  
19 年来, 华北、华南及西南地区等地突发性、高影响的中小尺度暴雨过程成为研究热点 (徐珺  
20 等, 2018; 肖递祥等, 2020)。突发性暴雨具有前期天气尺度征兆弱、雨强大、强降水时段  
21 集中、范围小、破坏性强等特点 (Luo, et al, 2016)。在四川西南部 (简称川西南) 凉山  
22 州地区, 以突发性暴雨为主要诱因的山洪灾害对该地区人民生命财产安全影响巨大 (郁淑华,  
23 2003; 杜俊等, 2015)。统计数据显示, 在四川省所有地级行政单元中, 凉山州、阿坝州、  
24 甘孜州和雅安市发生灾害最多, 约占全省山洪灾害总数的 70%, 其中凉山州占比高达 26% (熊  
25 俊楠等, 2018)。2006-2011 年, 凉山州以突发性暴雨为主要诱因的山洪灾害次数约占成灾  
26 总次数的 79% (钟燕川等, 2018)。研究表明, 夏季四川盆地 (简称盆地) 及边缘山谷地区  
27 常具有高能高湿的环境条件, 年均降水量的最大值位于盆地西南部 (邵远坤等, 2005)。高  
28 原与盆地的过渡地带易出现短时强降水 (小时雨量大于 20 mm), 而强降水持续 2 h 以上的  
29 暴雨过程将造成中型以上山洪灾害风险显著增加 (周长艳等, 2011; 李国平等, 2016)。

30 四川盆地暴雨过程天气学成因分析表明, 高原槽、西南低涡、低空切变线、低空及边界  
31 层急流等是引发区域性暴雨的主要影响系统 (何光碧, 2012; 李琴等, 2016; 高守亭等,  
32 2018), 但在弱高空环境场条件下, 一些较弱的低层风场水平切变、辐合及地形作用都可能  
33 触发并形成中尺度对流系统 (MCS), 导致出现局地突发性暴雨 (张芳丽等, 2020)。针对地  
34 形影响下的局地异常强降水过程的研究, 黄小彦等 (2020) 指出, 边界层急流将暖湿空气向  
35 地形迎风坡的 MCS 发生区输送, 与对流降水形成的冷池出流对峙, 有利于强降水的维持和增  
36 强。另外, 已有研究通过气候统计、物理量诊断及敏感性试验等方法 (赵玉春等, 2012; 周  
37 秋雪等, 2019; 金妍等, 2021), 揭示了盆地周边地区的显著地形起伏和多山地特点对周围  
38 大气环流、强降水发生发展所产生的影响机制。谢家旭等 (2021) 指出, 西南山区的突发性  
39 暴雨是地形与天气系统共同作用的结果, 通过山谷风、重力波等物理过程对局地环流产生影  
40 响, 诱发局地强降水。

41 尽管针对四川暴雨过程已开展了大量有意义的研究工作, 但研究内容大多以盆地区域性

1 暴雨和大地形作用的诊断分析为主。然而,盆地边缘起伏地形下突发性暴雨所涉及的科学问  
2 题,诸如多尺度系统协同作用下的特殊地形对暴雨的影响,以往的研究涉及甚少。目前,对  
3 川西南山地暴雨的主客观业务预报能力整体较低,主要原因在于对川西南山地中尺度暴雨形  
4 成机制的认识仍然欠缺,主流业务数值模式的预报能力显著不足。因此,对川西南地区特殊  
5 地形影响下的中尺度暴雨对流触发、对流组织机制还有待深入分析。

6 2020年6月26日夜,凉山州冕宁县因突发性暴雨(简称“6.26”过程)引发了山洪  
7 灾害,造成了严重生命财产损失。欧洲中期数值预报中心(ECMWF)等全球模式降水预报明  
8 显偏弱,中国气象局的不同业务区域模式对降水强度、落区的预报存在显著分歧,造成针  
9 对此次突发性暴雨是否发生以及可能发生的时间、位置、强度的预报难度极大。本文将在分析  
10 此次暴雨过程的多尺度天气系统特征的基础上,揭示复杂地形影响下的对流触发和维持机  
11 制,以为川西南山地暴雨业务精细化预报提供有益的参考。

## 12 2 资料与方法

13 文中采用多源观测、再分析和对流可分辨模式预报资料做综合分析。资料包括:(1)中  
14 国气象局整编逐小时国家站和逐5 min地面自动站观测资料;(2)风云2号(FY-2G)红外  
15 辐射亮温(TBB)资料;(3)西昌站多普勒天气雷达逐6 min体扫数据和雷达组网反射率因  
16 子(REF)资料;(4)ECMWF逐小时0.25°分辨率全球再分析资料(ERA5)和中国气象局陆面  
17 同化系统(CMA Land Data Assimilation System, CLDAS)逐小时5 km分辨率再分析资料  
18 (师春香等,2019);(5)中国气象局中尺度天气数值预报系统3 km分辨率预报资料  
19 (CMA-MESO-3KM; Shen, et al, 2020);(6)西南地区1 arc-min高分辨率地形资料。

20 本文第三节介绍暴雨过程的实况与灾区地理概况,第四节分析大气环流背景与中小尺度  
21 系统的活动特征。MCS形成机制与环境大气的异常特征将在第五节中给出,主要利用自动站  
22 分钟级观测、CLDAS资料分析冷空气、低空偏南气流对MCS发生发展的影响,并选取2015  
23 年7月14日冕宁暴雨过程(简称“7.14”过程),运用标准化异常方法进行比较,分析降水  
24 极端性成因(Sun and Zhang, 2017)。第六节将基于ERA5再分析资料,结合CMA-MESO-3KM  
25 模式资料,分析川西南北部地形的作用,提炼关键因子,总结此次暴雨过程形成机制的概念  
26 模型。

## 27 3 暴雨过程实况与灾区地理概况

28 2020年6月26日08时至27日08时(北京时,下同),盆地南部和西南部山区出现了  
29 两片相互独立的暴雨区,其中,西南部山区暴雨以上量级降水主要出现在冕宁县中部和北部  
30 (图1a中“红框”)、越西县等地,大暴雨出现在小相岭两侧长宽约30 km的区域中,暴雨  
31 过程局地性特征明显。

32 冕宁地处川西南山区北部,整体地势北高南低,周边地形多尺度特征明显。灾情发生地  
33 位于安宁河谷北端,其东侧为小相岭,西侧为牦牛山,均为南北向山脉,山谷高差悬殊(图  
34 1b)。5-9月为川西南山区雨季,降水量相对集中,占全年总量的90%以上。6-7月是川西  
35 南山洪灾害的爆发期,约占夏半年发生总次数的64%(吴莉娟等,2011)。根据6月和7月  
36 月平均降水量分析,凉山州的主雨带沿安宁河谷分布并在河谷南北两端出现极值中心,而其  
37 中之一位于冕宁境内,达到460 mm以上(图1a)。

2020年6月26日23时至27日00时，强降水引发山洪并形成河道洪积扇。曹古乡、  
 灵山寺站位于冕宁站东侧与小相岭西麓的东西走向分支山谷中（图1b），26日16时至27  
 日03时，灵山寺站降水量达182.1 mm，其周边的曹古乡、惠安镇和冕宁站降水量分别为84.9、  
 148.5和27.6 mm。26日22时，灵山寺站累计雨量快速增加，山洪滞后1-2 h发生。27日  
 00时，灵山寺站出现69.3 mm小时雨量（图1c）。惠安镇站在过程初始即出现了30.3 mm  
 小时雨量，之后强降水持续时间超过5 h。据2005-2019年国家站小时雨量统计，冕宁站的  
 最大小时雨量为55.2 mm（2019年8月22日06时）。可见，本次暴雨过程具有水平尺度小、  
 突发性强、累计雨量大的特点，并且出现了极端小时雨量。

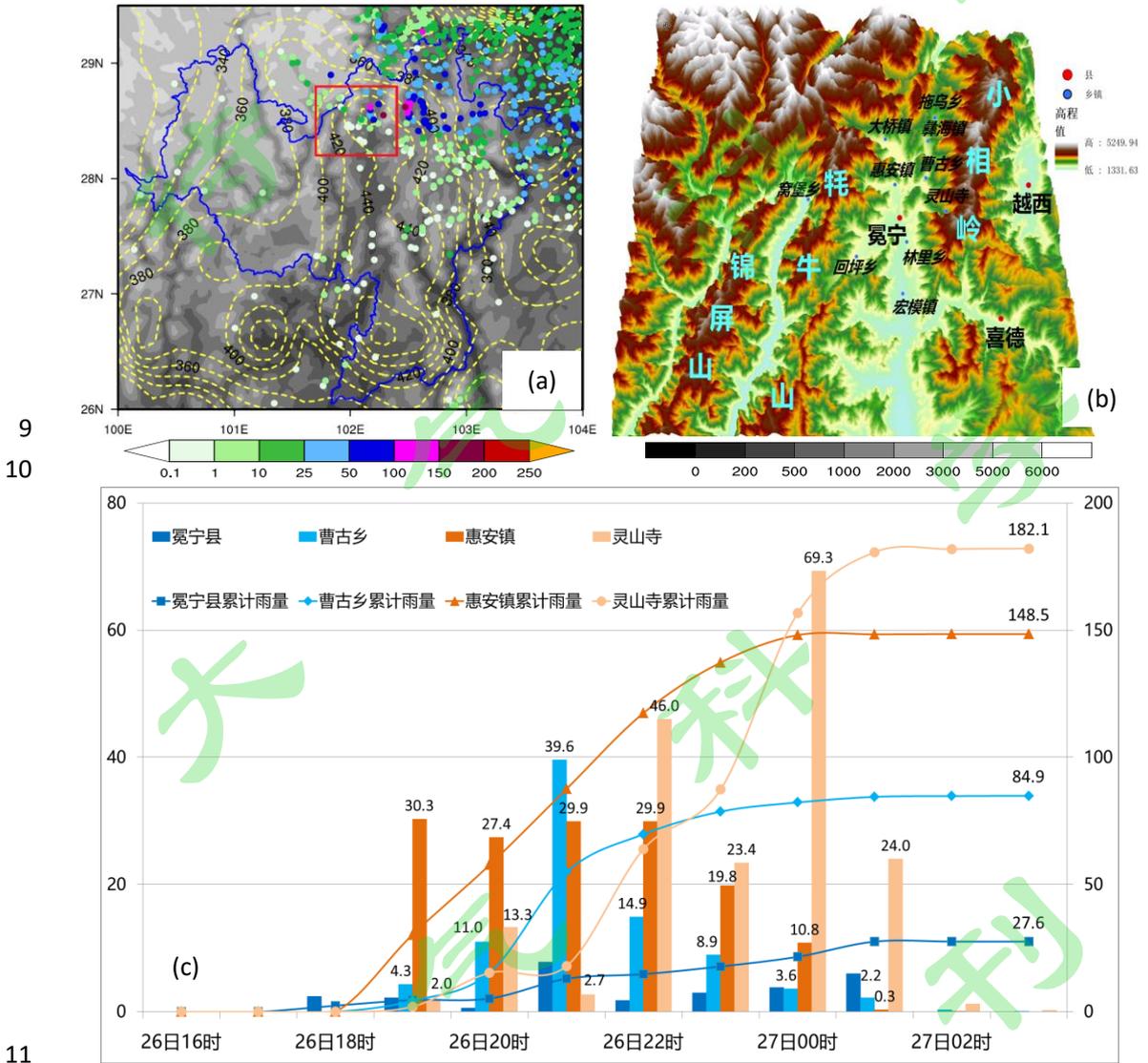
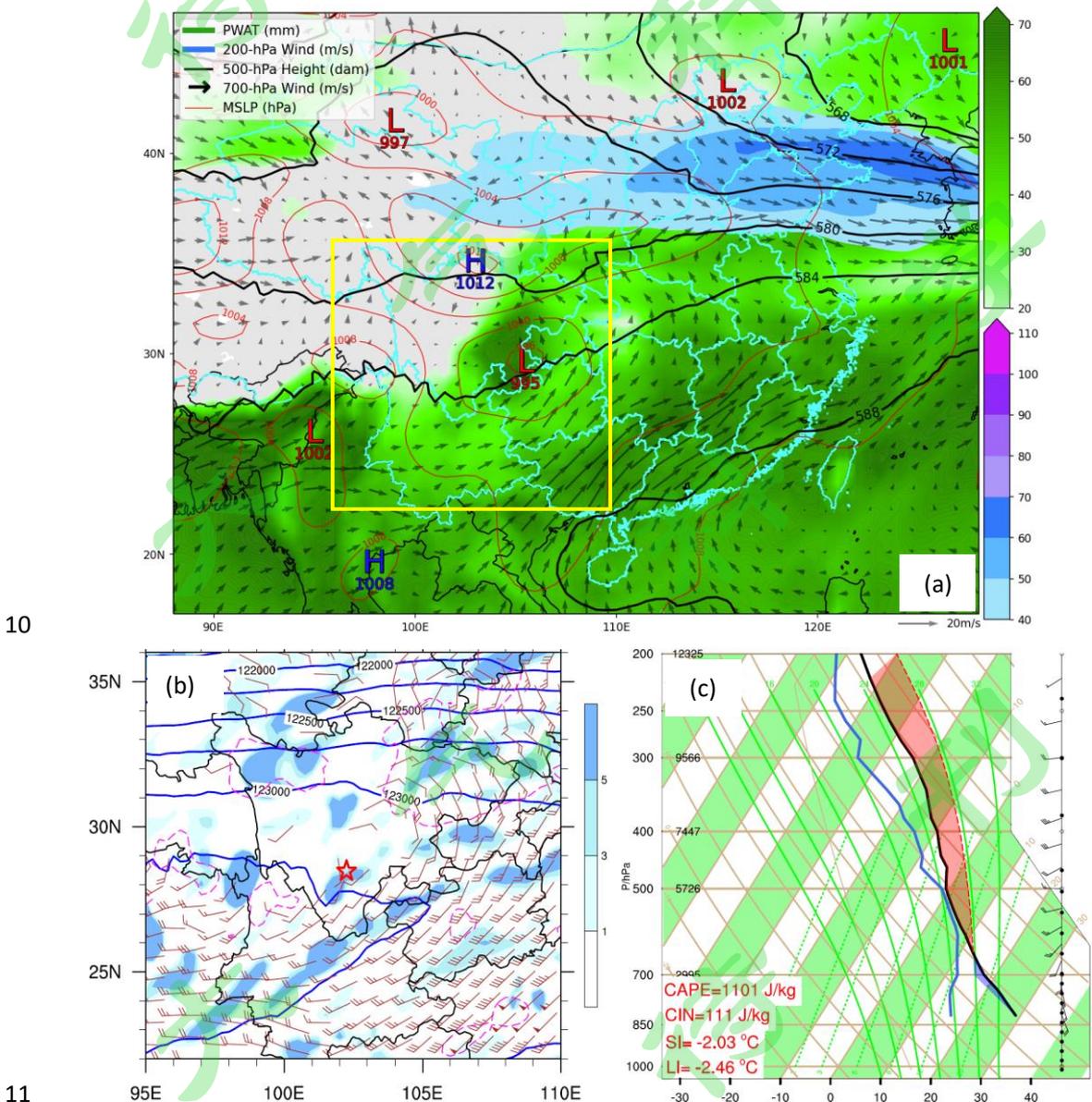


图1 (a) 2020年6月27日08时凉山州24 h降水量(圆点; 单位: mm, 下同)、6月和7月月平均降水量之和(等值线)及地形高度(填色; 单位: m; 方框表示关注区域, 下同); (b) 冕宁县地形分布; (c) 26日16时至27日03时冕宁县、惠安镇、曹古乡和灵山寺逐小时雨量(柱形)和累计雨量(折线)  
 Fig. 1 (a) 24-h precipitation in Liangshan (dot; unit: mm, similarly hereinafter) at 08:00 on June 27, 2020, sum of monthly mean precipitation in June and July (isoline), and terrain height (shaded; unit: m; box indicates the area of concern, similarly hereinafter); (b) terrain distribution of Mianning; (c) hourly (column) and accumulative precipitation (line) at Mianning, Hui'an, Caogu and Lingshan temple from 16:00 on 26 to 03:00 on 27

# 1 4 大气环流背景和中小尺度系统的活动特征

## 2 4.1 大气环流背景条件

3 基于再分析资料的分析结果显示，6月26日14时，川西南地区受浅槽影响，西太平洋  
4 副热带高压（简称副高）西脊点位于北部湾附近。川陕交界地区前期有高原波动过境，冷空  
5 气主体位于甘陕南部，在槽后偏北风的引导下进入盆地西部。傍晚至夜间，盆地低涡开始形  
6 成，川西南整层可降水量（PWAT）达到35 mm（图2a）。700 hPa，西南暖湿气流经川西南山  
7 区北上与盆地西部偏北气流相遇，在盆地西部形成“西北-东南”走向的切变线。200 hPa，  
8 四川中西部处于南亚高压东北部弱分流区，其中川西高原及川西南的部分地区存在高层辐  
9 散，500-700 hPa 垂直风切变大值区主要分布在四川北部（图2b）。



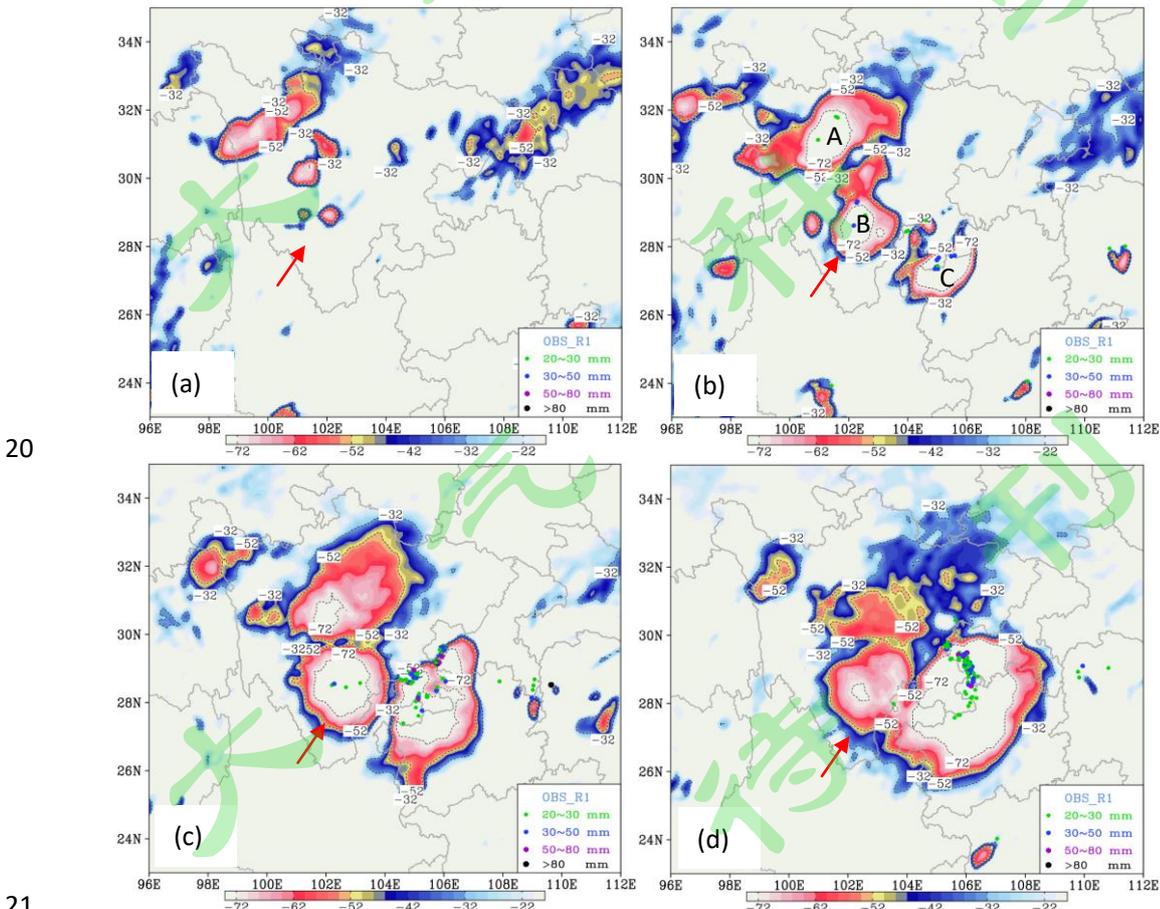
11 图2 (a) 2020年6月26日14时500 hPa位势高度（黑色等值线）、700 hPa风（箭头）、PWAT（绿色填  
12 色）、200 hPa风速（蓝色填色）、海平面气压场（红色等值线）和高压中心值；(b) 200 hPa位势（实线；  
13 单位： $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ）、散度（填色；单位： $10^{-5} \text{s}^{-1}$ ）、500-700 hPa垂直风切变（ $\geq 12 \text{ m/s}$ ；虚线）和700 hPa风  
14

1 (风杆; 单位: m/s; “☆”表示冕宁站位置, 下同); (c) 26日20时西昌站 T-lnP 图  
 2 Fig. 2 (a) 500 hPa geopotential height (black isoline), 700 hPa wind (arrow), PWAT (green shaded),  
 3 200 hPa wind speed (blue shaded), sea level pressure (red isoline) and the values of high and  
 4 low centers at 14:00 on June 26, 2020; (b) 200hPa geopotential (solid line; unit:  $m^2 s^{-2}$ ), divergence  
 5 (shaded; unit:  $10^{-5} s^{-1}$ ), 500-700 hPa vertical wind shear ( $\geq 12$  m/s; dashed line), and 700 hPa wind  
 6 (barb; unit: m/s; “☆” indicates the location of Mianning station, similarly hereinafter); (c)  
 7 T-lnP chart of Xichang station at 20:00 on 26

8 26日20时, 西昌站(位于冕宁站南侧约70公里处)的探空资料显示, 对流有效位能  
 9 (CAPE)达1101.0 J/kg, 500-700 hPa空气接近饱和, 700 hPa比湿大于12 g/kg, 沙氏指  
 10 数(SI)和抬升指数(LI)表明大气具有一定的对流不稳定性。然而, 对流发生前高空天气  
 11 尺度强迫较弱, 河谷近地面层空气较干, 700 hPa以下为“干暖”的偏南风, 平均风速达8 m/s,  
 12 对流抑制能量(CIN)较强(111.0 J/kg), 对流触发需要河谷内出现对流环境调整和较明显  
 13 的抬升机制。全球业务模式对上述不稳定指数预报明显偏弱(ECMWF模式24h时效CAPE预  
 14 报为200-300 J/kg)。从实时预报角度, 这是一次前期征兆不显著的山地突发性暴雨过程。

#### 15 4.2 中小尺度对流系统的活动特征

16 26日午后至夜间造成冕宁山洪灾害的MCS(图3中箭头所指)发生发展过程可分为4  
 17 个阶段:(1)对流初生与局地对流组织化阶段(26日15时-17时);(2)MCS形成与快速发  
 18 展阶段(26日17时-20时);(3)MCS成熟阶段(26日20时-27日00时);(4)MCS减弱阶  
 19 段(27日00时-03时)。

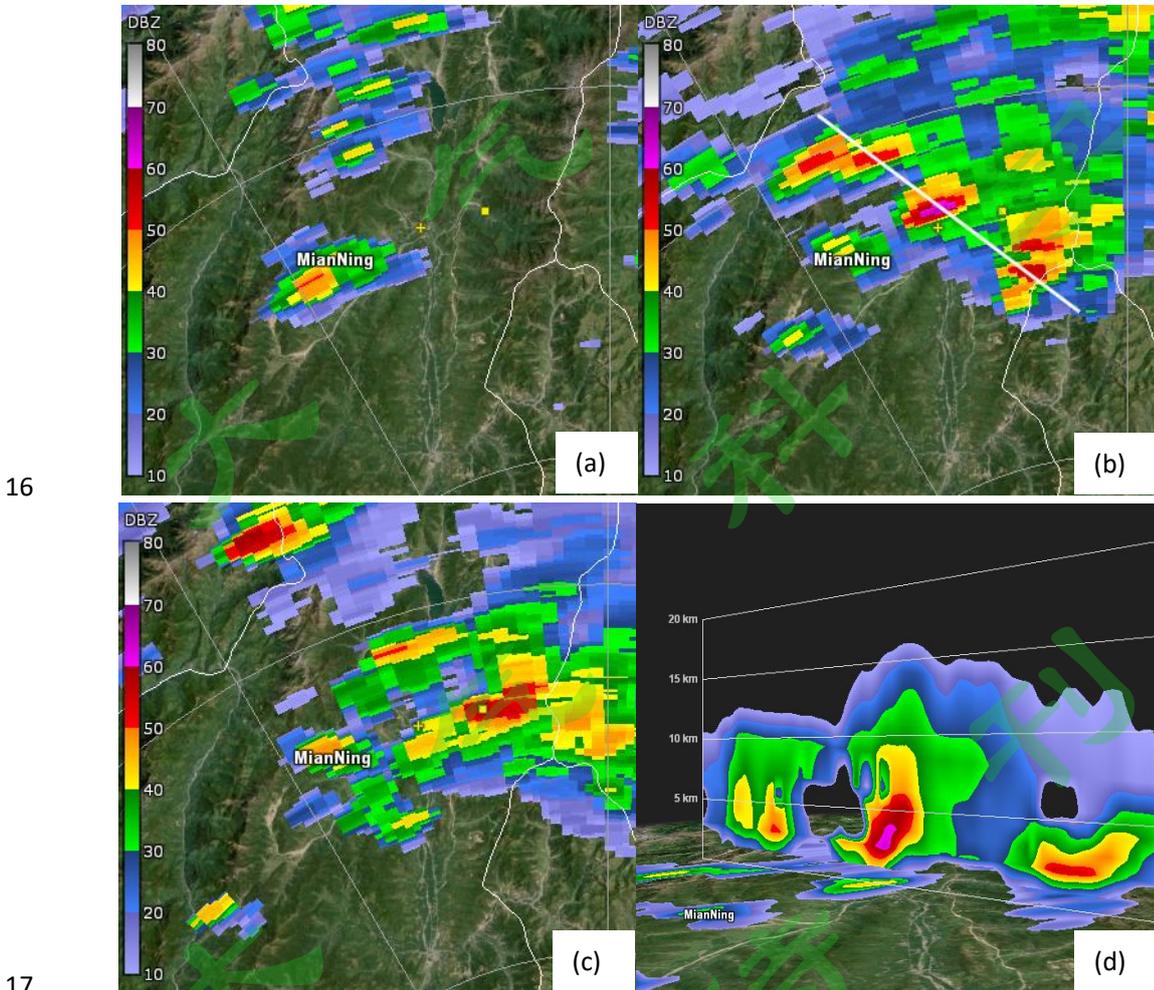


20  
 21 图3 2020年6月26日16时(a)、19时(b)、22时(c)和27日01时(d) TBB(填色; 单位:  $^{\circ}C$ )与小  
 22 时雨量( $\geq 20$  mm; 圆点)  
 23

1 Fig. 3 TBB (shaded; unit: °C) and hourly precipitation ( $\geq 20$  mm; dot) at 16:00 (a),  
 2 22:00 (c) on June 26 and 01:00 (d) on June 27, 2020

3 在图 3b 中，四川西部和南部存在 3 个云团，其中云团 A 与川西高原北部的高原波动相  
 4 联系，云团 C 与盆地低涡东南部的辐合上升区相对应（图 1a），云团 B 是凉山州北部暴雨过  
 5 程的直接影响系统。如图 3a 所示，第 1 阶段，甘孜州东南部九龙县（冕宁县西北侧）出现  
 6 分散性对流，对流单体初生于一“东北-西南”走向的云系中，并在移动过程中组织化程  
 7 度增强。第 2 阶段，凉山州北部于 26 日傍晚出现 MCS，云团 B 表现为接近圆形的中尺度云  
 8 团（较大范围冷云罩），而短时强降水出现在云团中心，3 个云团的空间分布近似等距排列  
 9 （图 3b）。第 3 阶段，云团 B 范围较第 2 阶段明显增大，呈现中尺度对流复合体（MCC）形  
 10 态，短时强降水站点增多（图 3c）。第 4 阶段，冷云罩范围显著减小，云体开始塌陷，MCS  
 11 快速减弱（图 3d）。

12 分析表明，本次过程对流云团具有 MCC 云团特征，云团 B 的快速发展和成熟阶段持续近  
 13 7 个小时。结合环流背景和对流环境场分析，川西低槽和凉山州北侧切变线是川西高原对流  
 14 形成的主要影响系统，对冕宁对流（B 云团）直接触发的影响不明显。为揭示冕宁致灾对流  
 15 暴雨的触发机制，须进一步分析中小尺度对流系统的活动特征。



16  
 17  
 18 图 4 2020 年 6 月 26 日 17 时 (a)、19 时 (b) 和 22 时 (c) 1.5 度仰角雷达 REF (单位: dBz; “+”和 “■”  
 19 分别表示冕宁站和灵山寺站位置，直线表示剖面); (d) 图 4b 直线上 REF 垂直剖面

20 Fig. 4 1.5 degree elevation angle REF at 17:00 (a), 19:00 (b), and 22:00 (c) on June 26, 2020  
 21 (unit: dBz; “+” and “■” indicate the location of Mianning and Lingshan temple station respectively,  
 22 straight line indicates the cross-section line)

in Fig. 4b

26日17时,冕宁站偏西方向出现局地对流(最大REF达50 dBz以上),在西南风引导下向东北方向移动(图4a)。傍晚,冕宁中北部局地对流迅速增多。19时,冕宁中北部有3条“西南-东北”向的带状 $\gamma$ 中尺度(meso- $\gamma$ )对流系统,位于中间的带状对流系统最大REF达60 dBz以上(冕宁站北侧惠安镇附近),3条带状对流系统最强单体排列呈“西北-东南”走向(图4b)。此后,冕宁站南侧不断有对流新生并向东北方向移动,在灵山寺附近达到最强(55 dBz以上),冕宁站北侧的带状对流系统强度有所减弱(图4c)。根据19时REF剖面图分析,对流回波的质心较低(距地面约3 km),位于环境大气的0°C层以下(图2c),回波中心南侧边界层存在明显的弱回波区(图4d)。

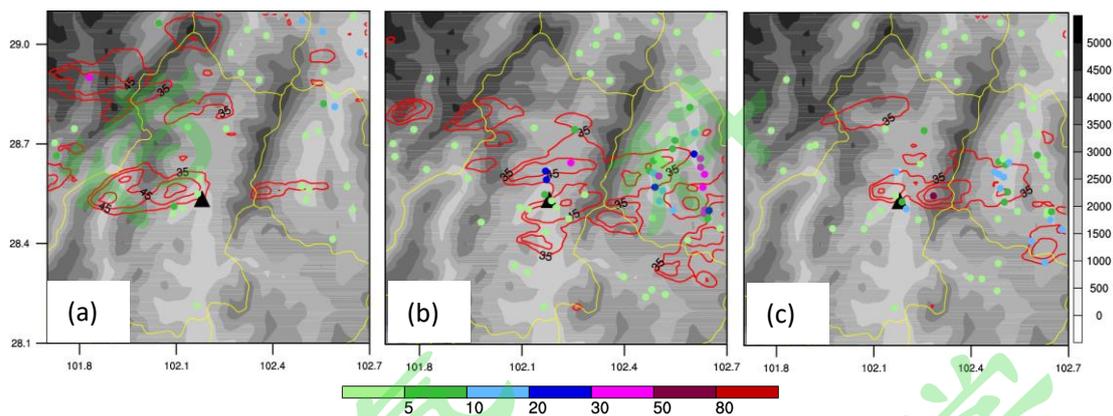


图5 2020年6月26日18时(a)、21时(b)和27日00时(c) CREF ( $\geq 35$  dBz; 等值线)、小时雨量(圆点)、地形高度(填色; 三角形代表冕宁站位置, 下同)

Fig. 5 CREF ( $\geq 35$  dBz; isoline), hourly precipitation (dot), terrain height (shaded; triangle indicates the location of Mianning station, similarly hereinafter) at 18:00 (a), 21:00 (b) on June 26 and 00:00 (c) on June 27, 2020

对雷达组合反射率因子(CREF)和自动站小时雨量资料分析,结果显示:26日18时甘孜州九龙县对流发展旺盛,出现了小时雨量超过30 mm的短时强降水,同时冕宁西部牦牛山的“缺口”处不断有对流新生并向东扩展(图5a);21时,冕宁东部对流发展旺盛,冕宁站北侧和南侧对流回波向东移动并影响小相岭西麓的曹古乡和灵山寺,冕宁站北侧多个站点出现短时强降水,河谷内带状对流回波在南北方向上移动缓慢(图5b);27日00时,对流回波范围略有缩小,但灵山寺附近CREF中心值仍在增加,达到55dBz以上,灵山寺站出现极端小时雨量(图5c)。

中小尺度对流系统特征分析表明,冕宁站北侧和南侧的2条带状meso- $\gamma$ 对流系统造成了局地强降水,对流在冕宁站西侧和南侧不断新生,存在后向传播特征,在惠安镇和灵山寺附近出现“列车效应”,并形成了持续性强降水。

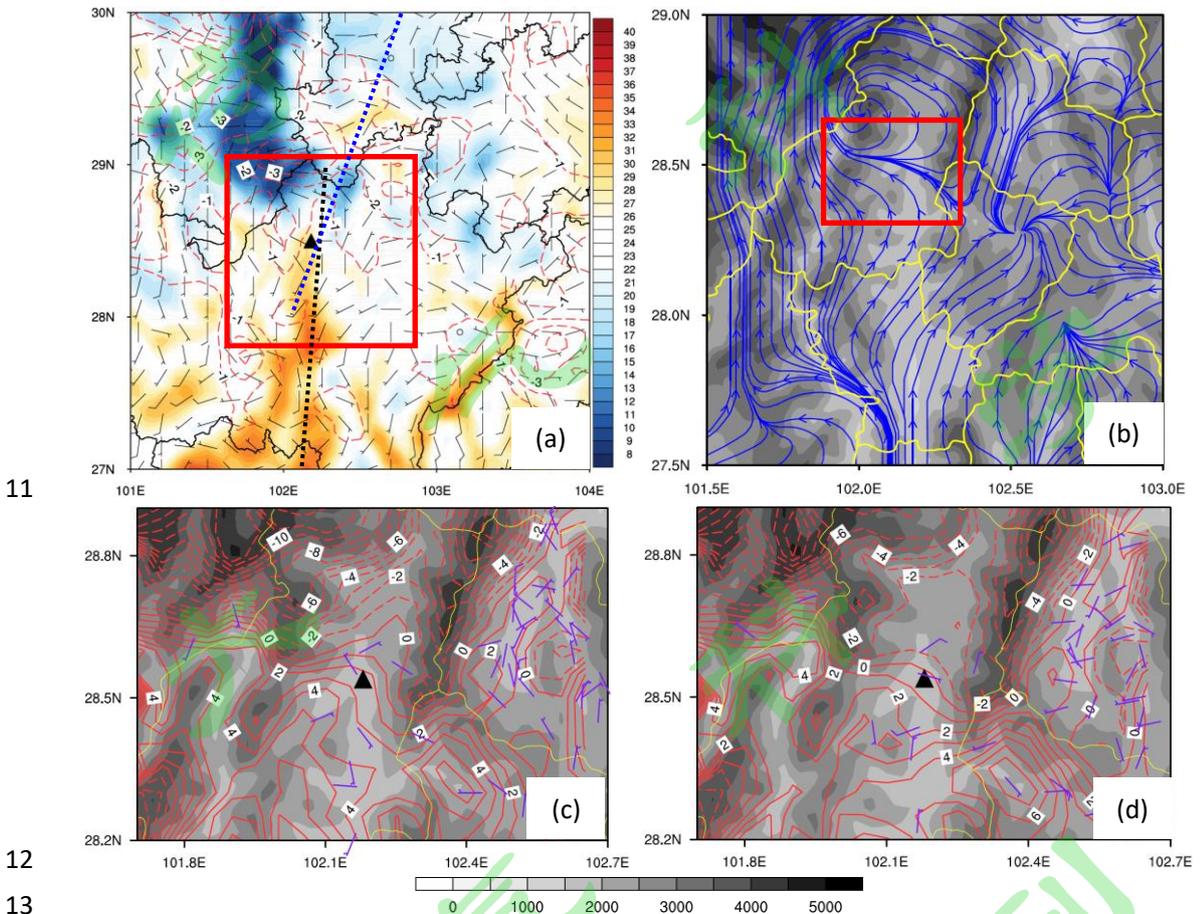
## 5 MCS形成机制与环境大气的异常特征

### 5.1 上游对流冷池出流与冷空气的作用

26日午后至傍晚,进入盆地西部的次天气尺度冷空气(简称冷空气)以及前期在川西高原出现的对流系统是否与冕宁局地对流暴雨的触发存在联系?对CLDAS资料分析,结果显示:26日17时,受甘孜州东南部对流影响,九龙县、石棉县(冕宁北侧)等地出现了较强负变温和冷池,1小时最大降温幅度超过4°C(图6a);与之对应的地面流场表现为中尺度

1 反气旋（雷暴高压），地面冷池沿牦牛山西侧山谷地区向南推进，出现 1-2℃ 的负变温；冕  
 2 宁站位于安宁河谷“暖舌”前沿，冕宁站与北部地区的温差达 10℃ 以上（图 6a）。相应地，  
 3 冕宁县西北侧高海拔地区的对流冷池出流（简称对流出流）与河谷偏南气流形成了地面辐合  
 4 线（图 6b）。受盆地西部冷空气影响，冕宁东侧的越西县和甘洛县出现了较大范围的弱降温，  
 5 南下冷空气被阻挡在小相岭以东的地区。

6 基于 CLDAS 和自动站风场资料分析与经向平均气温的温差，结果显示：17 时冕宁站偏  
 7 西方向为冷暖气流的交汇处，地面温度梯度较大，冕宁站以北地区的地面风为偏北风，而冕  
 8 宁南部受偏南风控制（图 6c）；23 时，冕宁站东南侧的地面温度梯度增强（图 6d）。由此可  
 9 见，在强降水过程中，河谷内边界层存在中尺度锋生，且冷暖气流的汇合区稳定出现在冕宁  
 10 站附近。



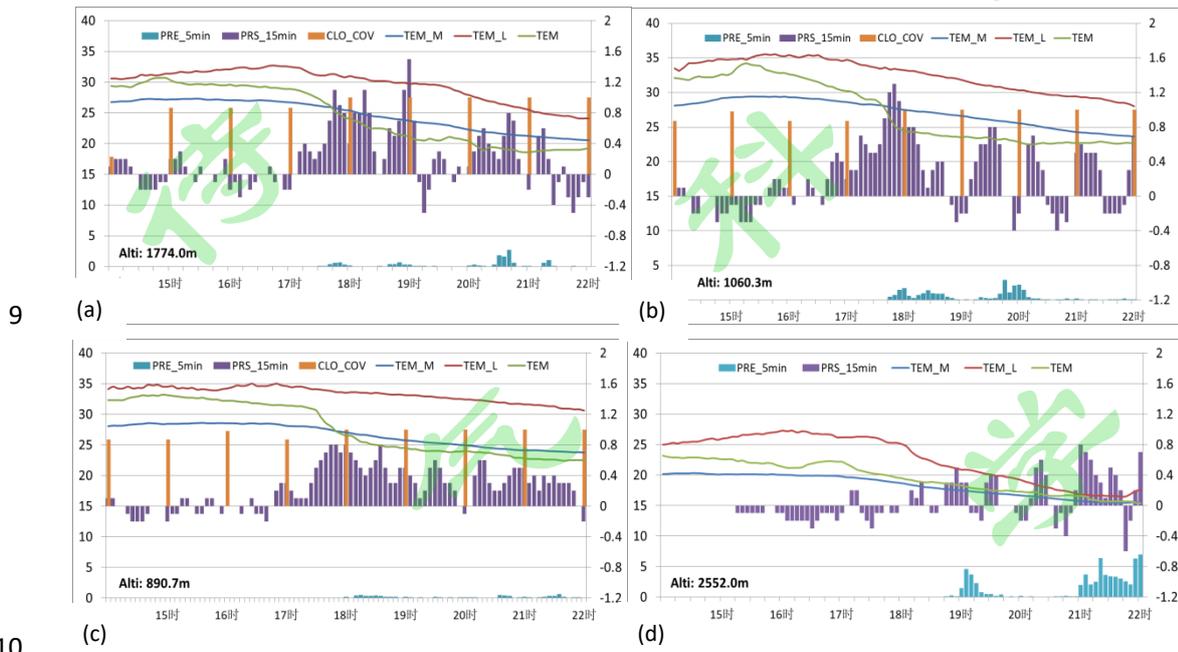
11  
 12  
 13 图 6 2020 年 6 月 26 日 CLDAS 资料分析：(a) 17 时地面风（风杆）、气温（填色；单位：℃，下同）和 1 h  
 14 变温（等值线）；(b) 17 时 CLDAS 地面流场（流线）和地形高度（填色）；17 时 (c) 和 23 时 (d)，与经向  
 15 平均气温的温差（等值线）、地面风（风杆；自动站）和地形高度（填色）

16  
 17 Fig. 6 CLDAS analysis on June 26, 2020: (a) Surface wind (barb), temperature (shaded; unit: °C,  
 18 similarly hereinafter), and 1 h temperature change (isoline) at 17:00; (b) Surface flows  
 19 (streamline) at 17:00 and terrain height (shaded); temperature difference from the meridional  
 20 mean temperature (isoline), surface wind (barb; automatic station) at 17:00 (c) and 23:00 (d),  
 21 and terrain height (shaded)

22 上述分析表明，冕宁县西北侧高海拔地区的对流冷池出流与河谷偏南气流形成的地面辐  
 23 合线对河谷对流的触发起到了关键作用，而冷空气对冕宁县对流触发的直接影响非常小。这  
 24 一点可以从分布于川西南北部不同位置的站点观测得到证实。

25 根据自动站分钟级观测分析，结果显示：受上游对流出流影响，冕宁站于 17 时 10 分左

1 右开始出现持续增压和降温，降温开始时间比降水提前 20 分钟左右。对比前一日（晴空日）  
 2 气温和同时刻近 10 d 平均气温的变化，17 时以前，没有出现明显升温 and 降温现象（图 7a）；  
 3 15 时 40 分起，甘洛站（冕宁东侧）出现持续降温和小幅增加压现象，这显然与盆地西部冷  
 4 空气南下侵入的过程有关。17 时 30 分起，出现快速降温和增压，并于 10 分钟后出现明显  
 5 降水，这一降温增压过程显然是对流冷池在地面要素上的反应，表明甘洛站出现降水之前受  
 6 冷空气的影响较明显（图 7b）；石棉站（冕宁北侧）在 17 时之前的气温降幅总体高于冕宁  
 7 站而低于甘洛站，这说明冷空气对石棉站的影响相对较小（图 7c）；16 时前，灵山寺站出现  
 8 小幅降温，17 时后，受上游对流出流影响后，气温持续下降（图 7d）。



9 (a) (b)  
 10 (c) (d)  
 11 图 7 26 日 14 时-22 时冕宁 (a)、甘洛 (b)、石棉 (c) 和灵山寺 (d) 5 分钟降水量 (PRE\_5min)、15 分钟  
 12 变压 (PRS\_15min; 单位: hPa)、地面气温 (TEM)、25 日同时刻地面气温 (TEM\_L) 和同时刻近 10 d 地面  
 13 平均气温 (TEM\_M) 及逐小时云量 (CLO\_COV)

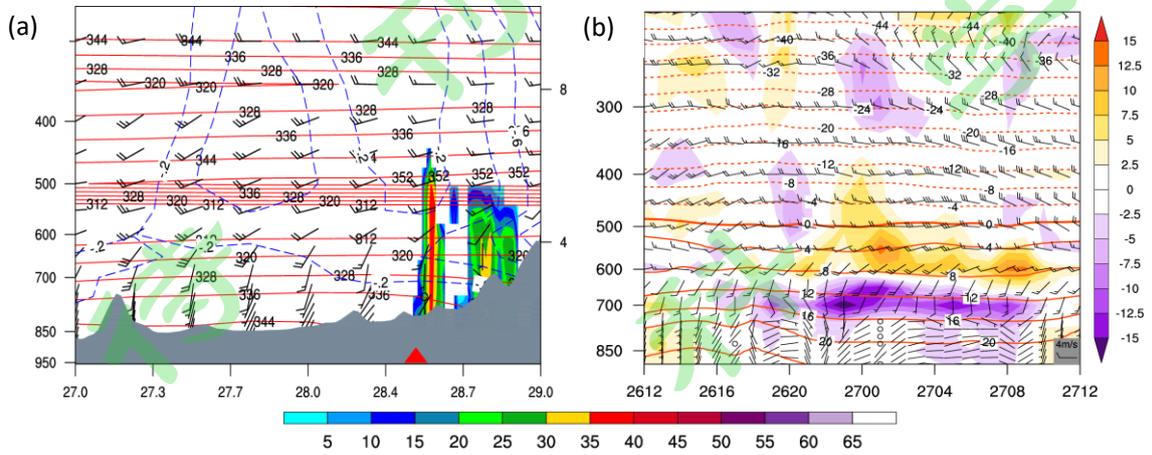
14 Fig. 7 5-minute precipitation (PRE\_5min), 15-minute allobaric (PRS\_15min; unit: hPa), surface  
 15 temperature (TEM), surface temperature at the same time on 25 (TEM\_L), surface mean temperature  
 16 at the same time in the past ten days (TEM\_M), and hourly cloud cover (CLO\_COV) in Mianning (a),  
 17 Ganluo (b), Shimian (c) and Lingshan temple (d) from 14:00 to 22:00 on 26

## 18 5.2 低空偏南气流的作用

19 基于 ERA5 和三维雷达 REF 资料分析，结果显示：26 日 18 时假相当位温大值区出现在  
 20 冕宁站以南地区，达到 344 K 以上；冕宁站以南河谷地区，650 hPa 以下层次受偏南风控制，  
 21 其中 650-700 hPa 风速可达 12 m/s；从 27° N 至 29° N，海拔高度提高近 2 km，河谷上游  
 22 地形对偏南气流有强迫抬升作用；冕宁北部及其以北地区存在系统性动力抬升，而 REF 的高  
 23 值位于垂直速率大值区的南侧，这表明上游对流出流对冕宁站附近对流的触发有直接影响  
 24 （图 8a）。另一方面，川西南低空偏南气流是低层水汽和能量输送的关键系统。在冕宁站风  
 25 廓线图中（图 8b），16 时起，650-700 hPa 偏南气流的动力特征表现为风速增大、风速脉动  
 26 及持续辐合，其中辐合强度分别于 19 时和 23 时两次达到峰值。在此期间，500 hPa 上气温  
 27 呈缓慢下降趋势，低层存在持续暖湿输送。因此，低空偏南气流对不稳定层结的发展及对流  
 28 维持也发挥了关键热力作用。

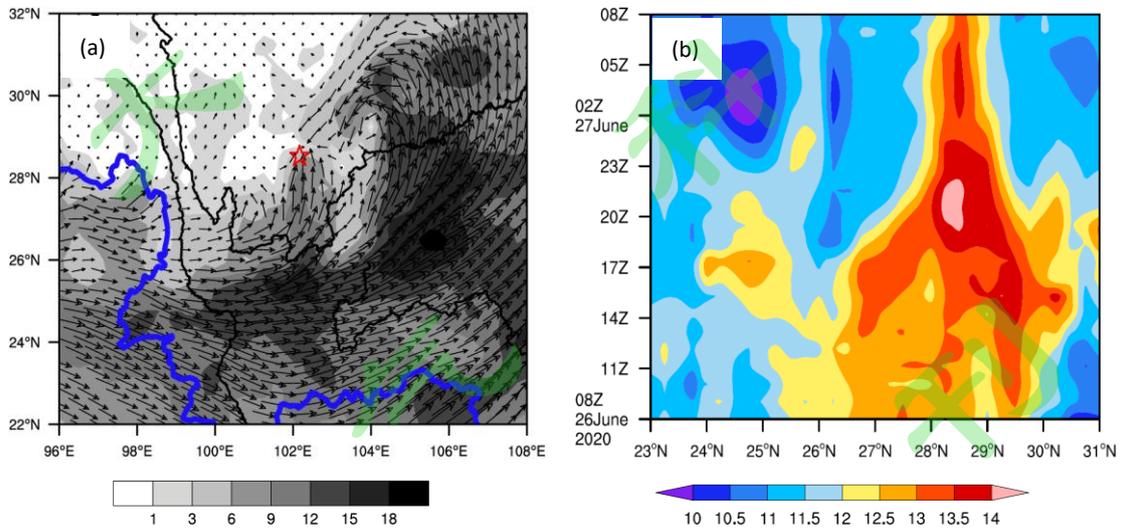
29 上述这支低空偏南气流是源自孟加拉湾（简称孟湾）的水汽输送带的一部分，该水汽输

1 送带进入西南地区南部后表现出分岔现象，其中一支作为主体经贵州进入盆地南部，另一支  
 2 经凉山州南部进入暴雨区（图 9a）。冕宁站以南的分支水汽输送带分别在 18 时和 21 时后出  
 3 现阶段性增强特征，与盆地西部偏北气流的辐合区在凉山州北部缓慢南移。比较 14 时 700  
 4 hPa 水汽通量场（图略）和经向比湿时空图，冕宁站以南的分支水汽输送带持续约 9 h，700  
 5 hPa 比湿达 13-14 g/kg，且大值区稳定出现在 28.3° N-28.8° N 附近（图 9b）。



6  
 7  
 8 图 8 (a) 26 日 18 时图 6a 黑线上剖面风 (风杆)、假相当位温 (实线; 单位: K)、垂直速度 ( $\leq -0.2$  Pa/s;  
 9 虚线)、3D-REF (填色) 和地形 (灰色填色); (b) 26 日 12 时-27 日 12 时冕宁站风廓线 (风杆)、温度 (等  
 10 值线) 和散度 (填色; 单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

11 Fig. 8 (a) Wind profile (barb), pseudo-equivalent potential temperature (solid line; unit: K),  
 12 vertical velocity ( $\leq -0.2$  Pa/s; dashed line), 3D-REF (shaded), and terrain (gray shaded) on black  
 13 line in fig. 6a at 18:00 on 26; (b) wind profile (barb), temperature (isoline), and divergence  
 14 (shaded; unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) from 12:00 on 26 to 12:00 on 27



15  
 16 图 9 (a) 26 日 23 时 700 hPa 风 (箭头) 和水汽通量 (填色; 单位:  $\text{g cm}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ); (b) 700 hPa 比湿  
 18 纬度-时间图 ( $120.2^\circ \text{ E}$ ; 填色; 单位:  $\text{g/kg}$ )

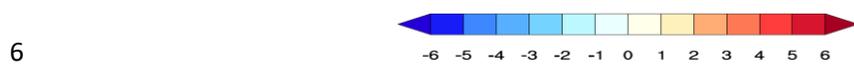
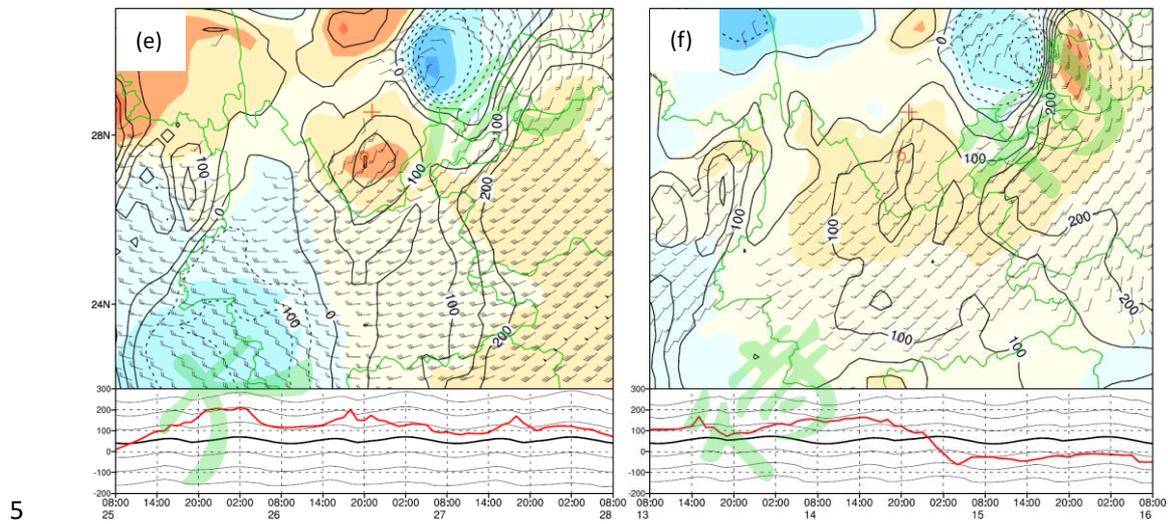
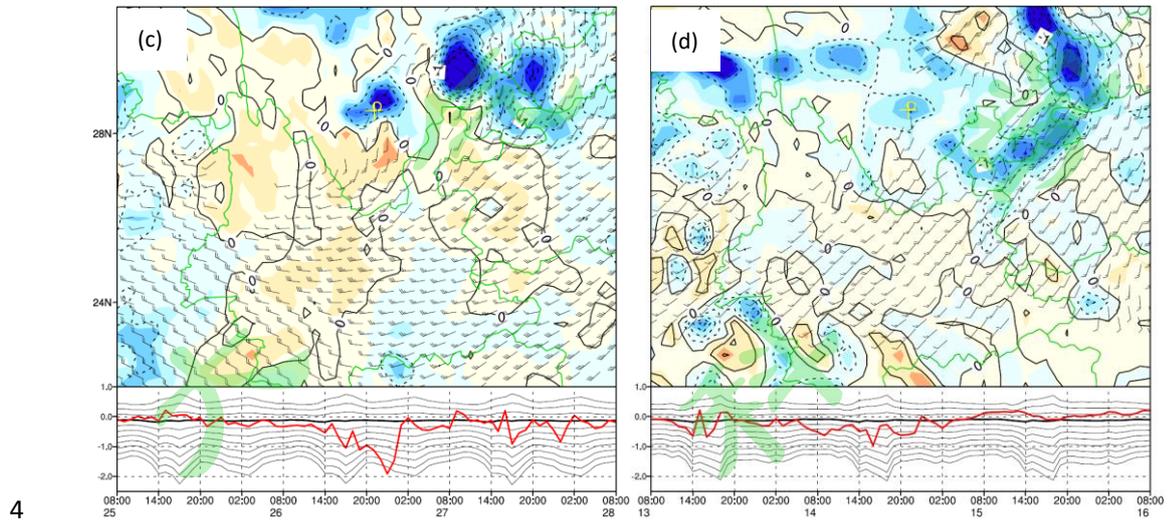
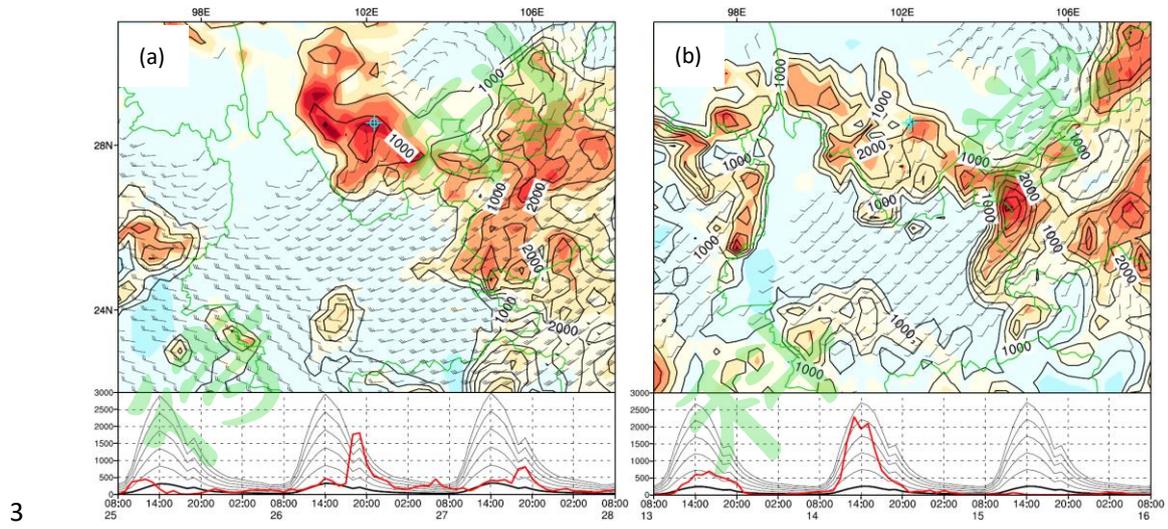
19 Fig. 9 (a) 700 hPa wind (arrow) and moisture flux (shaded; unit:  $\text{g cm}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) at 23:00 on 26;  
 20 (b) latitude-time chart of 700 hPa specific humidity ( $120.2^\circ \text{ E}$ ; shaded; unit:  $\text{g/kg}$ )

### 21 5.3 环境大气的异常特征

22 针对本次过程出现极端小时雨量和持续性强降水的特征,可通过对物理量偏离气候态的  
 23 程度进行分析,一般认为偏离 3 倍以上标准差预示着小概率严重事件发生的可能性(Hart and

1 Grumm, 2001)。某一变量偏离气候态的程度可以用标准化异常 ( $D_s$ ) 来表征:

2 
$$D_s = (V - M) / \sigma,$$



1 图10 “6.26” (a, c, e) 和“7.14”暴雨过程 (b, d, f) 环境大气特征对比: 26日18时 (a) 和14日  
2 14时 (b) CAPE (等值线; 单位: J/kg)、26日23时 (c) 和14日16时 (d) 垂直积分水汽通量散度 (VIDMF;  
3 等值线; 单位:  $10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )、26日18时 (e) 和14日14时 (f) 垂直积分北向水汽通量 (VINMF; 等值  
4 线; 单位:  $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ), 填色分别表示CAPE、VIDMF和VINMF的标准化异常, 风杆表示700 hPa风, 折线图  
5 表示单点 (与“○”对应) 的物理量 (CAPE、VIDMF和VINMF) (红线)、气候态 (粗黑线) 及气候态增加或  
6 减少若干倍标准差后的变量随时间的变化 (灰线)

7 Fig. 10 The comparison of environmental atmosphere features between “6.26” (a, c, e) and “7.14”  
8 (b, d, f) torrential rain: CAPE (isoline; unit: J/kg) at 18:00 on 26 (a) and 14:00 on 14, Vertical  
9 Integral of Divergence of Moisture Flux (VIDMF; isoline; unit:  $10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) at 23:00 on 26 (c)  
10 and 16:00 on 14, Vertical Integral of Northward Moisture Flux (VINMF; isoline; unit:  $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )  
11 at 18:00 on 26 (e) and 14:00 on 14 (f), the shaded indicates the standardized anomaly of CAPE,  
12 VIDMF and VINMF respectively, the barb indicates 700 hPa wind, the line chart indicates changes  
13 of physical quantity (CAPE, VIDMF and VINMF) (red line), climate state (thick black line) and  
14 the states (gray line), after adding or subtracting several times of standard deviation to the  
15 climate state, on single point (corresponding to “○”)

16 其中,  $V$ 为某一时刻变量或物理量的值,  $M$ 为该变量同时刻30年、21天滑动平均,  $\sigma$ 为  
17 气候标准差。气候及分析数据采用1981—2010年ERA5资料。为了更好揭示“6.26”暴雨过  
18 程的极端性, 选取具有相似影响系统 (如低空偏南气流、盆地低涡等) 的另一次冕宁对流暴  
19 雨过程 (2015年7月14日) 进行对比分析 (图10b)。在“7.14”过程中, 冕宁、灵山寺及  
20 彝海镇的日降水量 (7月14日08时—15日08时) 分别为49.2 mm、58.9 mm和86.4 mm。

21 从环境大气的不稳定能量看, CAPE的高值容易出现在每天14时, 而6月26日冕宁站  
22 的CAPE最大值出现在18时, 达到1500 J/kg以上,  $D_5$ 超过 $5\sigma$ , 这显然与低层偏南风暖湿平  
23 流增强过程有关, 且27日00时以前,  $D_5$ 均超过 $3\sigma$  (图10a)。“7.14”过程中, 14日午后  
24 冕宁站南侧CAPE达到2000 J/kg以上,  $D_5$ 超过 $3\sigma$ , 但16时后, CAPE迅速减弱并回落至气  
25 候态附近 (图10b)。两次过程中, CAPE均表现出明显的异常, 其中“6.26”过程的异常更  
26 为显著, 且CAPE迅速增加与强降水几乎同时出现, 具有较强的突发性。

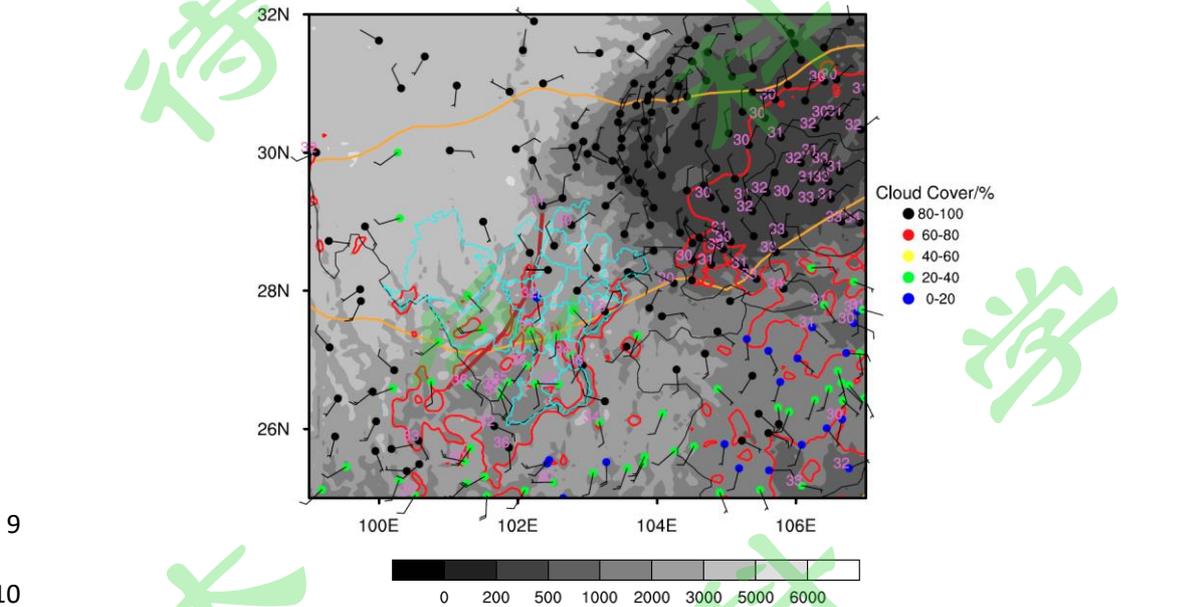
27 2020年6月26日23时, 冕宁站东北侧的垂直积分水汽通量散度 (Vertical Integral  
28 of Divergence of Moisture Flux, VIDMF; Van Z J and Van D A, 2007) 出现最低值, 即  
29 出现极端水汽辐合的时间和位置与随后1小时的极端小时雨量的时间和位置一致,  $D_5$ 低于  
30  $-7\sigma$ , 且 $D_5$ 低于 $-2\sigma$ 的时长接近9 h (图10c)。“7.14”过程中VIDMF异常较“6.26”过程明  
31 显偏弱, 仅有一个时次 $D_5$ 低于 $-3\sigma$  (图10d)。此外, “6.26”过程中冕宁站南侧的垂直积分  
32 北向水汽通量 (Vertical Integral of Northward Moisture Flux, VINMF) 和CAPE的最大  
33 值出现的时间一致 (26日18时), 并与冕宁站附近强降水发生时刻较为接近, 其峰值达到  
34  $200 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ,  $D_5$ 超过 $2\sigma$  (图10e)。“7.14”过程VINMF异常程度略低于“6.26”过程 (图  
35 10f)。

36 本节分析表明, 26日17—18时, 上游对流出流与午后逐渐加强的谷地偏南气流相遇形  
37 成的地面辐合是对流触发的直接原因, 谷地偏南气流增强有利于对流环境调整。午后至夜间,  
38 川西南分支水汽输送带的阶段性增强和维持, 成为对流不断生成并在冕宁站北侧和东侧形成  
39 “列车效应”的关键因子。另一方面, 通过比较分析, “6.26”过程中的关键物理量均表现  
40 出明显异常, 这些异常物理量共同作用为形成具有极端性的暴雨过程创造了有利条件。

# 1 6 地形作用与关键因子

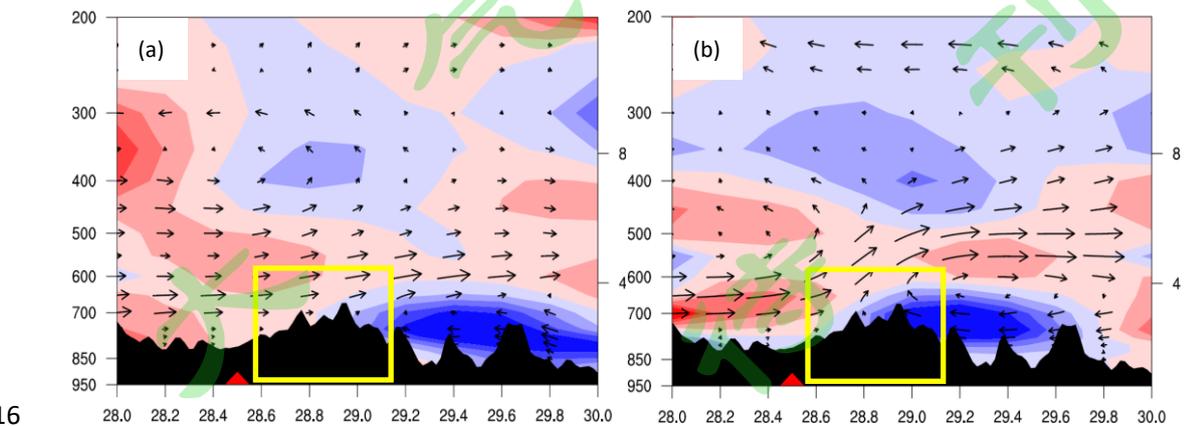
## 2 6.1 地形作用

3 已有研究表明，暴雨过程中地形的强迫作用不容忽视 (Houze, 2012)。川西南地区整体  
4 地势北高南低，受辐射日变化作用，午后边界层易形成暖脊；安宁河谷呈现南北狭长地形特  
5 征，河谷午后盛行偏南风。受冷空气和川西西北部高海拔地形的共同影响，河谷内气温明显  
6 高于同纬度盆地西南部地区。另外，川西低槽东移速度较快，16 至 17 时，暖脊位置较为稳  
7 定，而低槽过境后形成了前倾槽结构，槽后中层弱冷空气侵入将增加川西西北部地区的对流  
8 潜势 (图 11)。因此，在过程中川西南地区的特殊地形在动力和热力方面均表现出显著影响。



9  
10 图 11 26 日 17 时云量 (圆点)、地面风 (风杆)、气温 ( $\geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 数值和红色等值线)、500 hPa 位势高度  
11 (橙色等值线)、地形高度 (填色) 和凉山州边界 (浅蓝线)

12  
13 Fig. 11 Cloud cover (dot), surface wind (barb), temperature ( $\geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; value and red isoline),  
14 500 hPa geopotential height (orange isoline), terrain height (shaded) and Liangshan boundary  
15 (light blue line) at 17:00 on 26



16

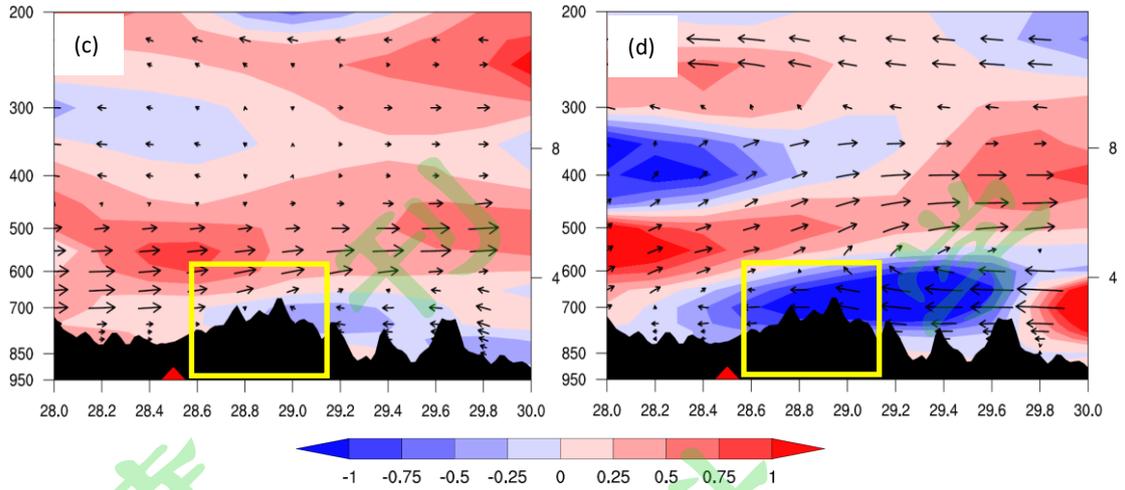
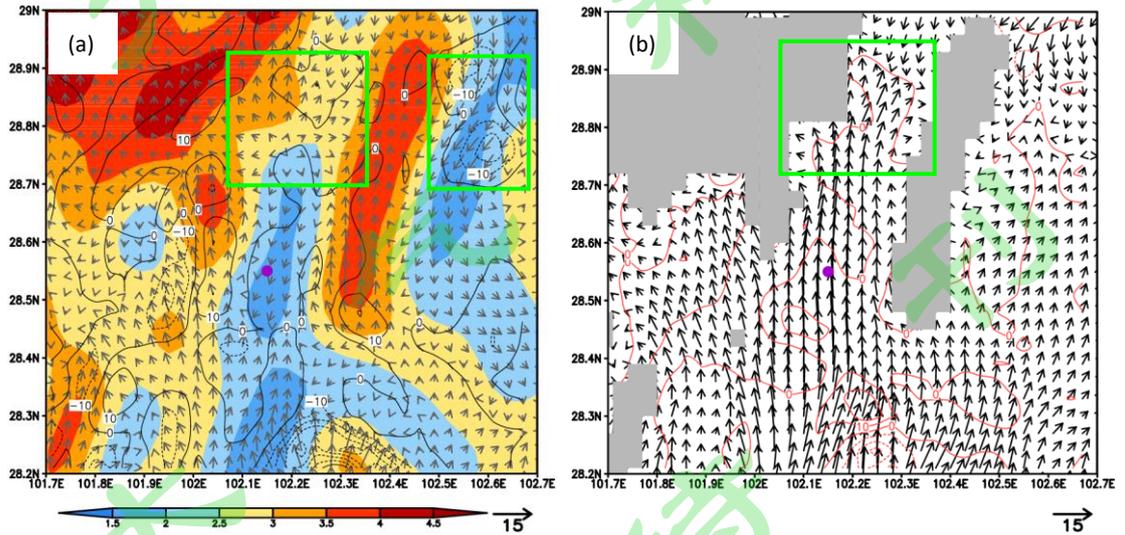


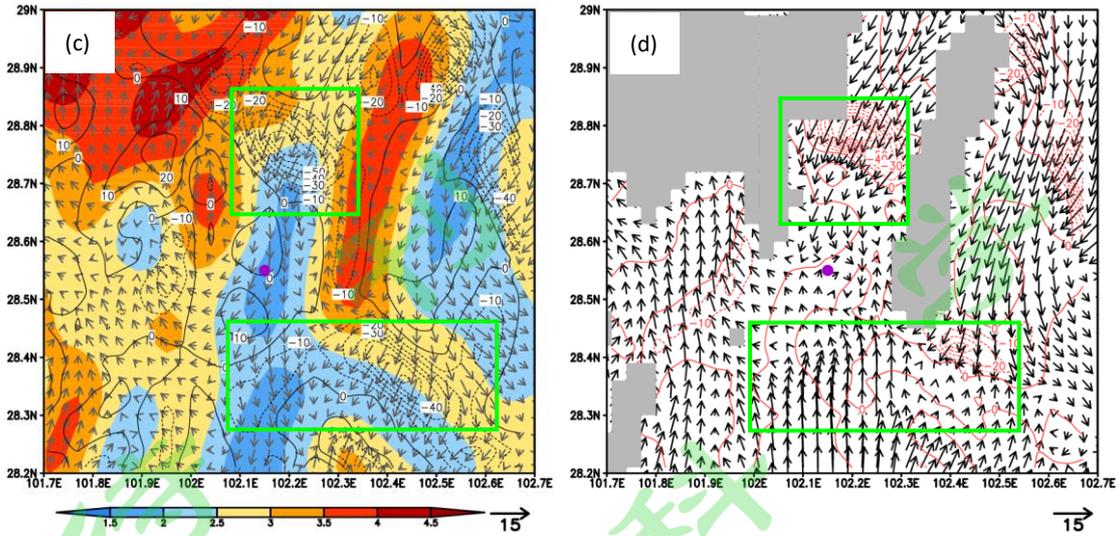
图 12 6 月 26 日 17 时 (a)、23 时 (b) 和 7 月 14 日 14 时 (c)、20 时 (d) 图 6a 蓝线上剖面 V-W 气流 (箭头)、温度平流 (填色; 单位:  $10^{-4} \text{K s}^{-1}$ ) 及地形 (黑色填色)

Fig. 12 Cross-section V-W flow on blue line in Fig. 6a (arrow), temperature advection (shaded; unit:  $10^{-4} \text{K s}^{-1}$ ) and terrain (black shaded) at 17:00 (a), 23:00 (b) on June 26 and 14:00 (c), 20:00 (d) on July 14

基于 ERA5 资料分析高空冷暖平流, 结果表明: 在“6.26”和“7.14”过程中, 川西南北部的高海拔地形对冷空气南下进入安宁河谷有一定的阻滞作用 (图 12); “6.26”过程初期, 冷空气势力较强, 但冕宁北部高海拔地区近地面层仍表现为偏南风 (图 12a); 过程后期, 两次过程均出现冷空气翻越小相岭的现象 (冕宁北部高海拔地区近地面层转为偏北风, 图 12b 和 d), 但“7.14”过程冷空气势力增强和南下入侵更明显。比较结果显示, 冕宁地区对流降水的发展和维持与翻越小相岭冷空气的强度、低空偏南气流的强度及其风速核的高度有密切关系 (“6.26”过程后期低空暖平流增强, 且偏南气流风速核的高度明显低于“7.14”过程)。这进一步表明, 安宁河谷内 MCS 的强烈发展与维持是多尺度系统与地形相互作用的结果。



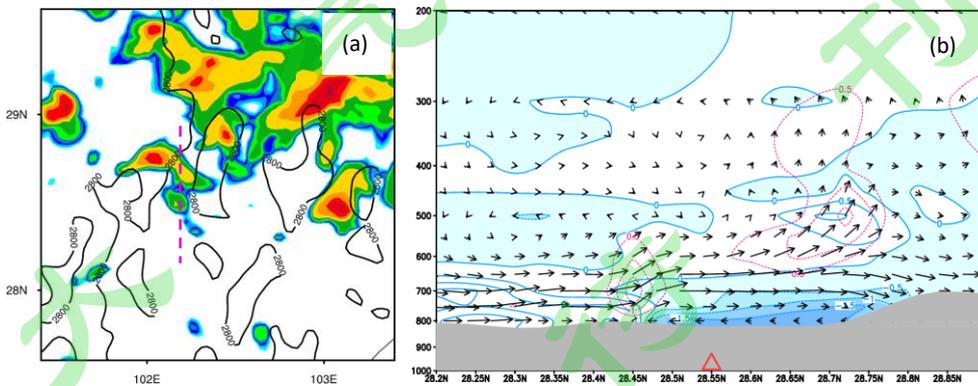
17



1  
2 图 13 26 日 19 时 (a, b) 和 22 时 (c, d), 地面风 (箭头)、温度平流 (等值线; 单位:  $10^{-4} K s^{-1}$ )、模式  
3 地形高度 (填色; a, c; 单位: km) 和 700 hPa 风 (箭头)、温度平流 (等值线)、模式 3000 m 以上地形 (填  
4 色; b, d; “●” 代表冕宁站位置)

5 Fig. 13 Surface wind (arrow), temperature advection (isoline; unit:  $10^{-4} K s^{-1}$ ), model terrain height  
6 (shaded; a, c; unit: km), and 700 hPa wind (arrow), temperature advection (isoline), model terrain  
7 above 3000 m (shaded; b, d; “●” represents the location of Mianning station) at 19:00 (a, b)  
8 and 22:00 (c, d) on 26

9 研究表明 (Zhang, et al, 2021), 当对流可分辨模式所提供的地形描述与实际地形较  
10 为接近时, 有助于揭示地形对局地环流和降水的影响。在“6.26”过程短期时效降水预报检  
11 验结果中, CMA-MESO-3KM 模式 24 h 降水预报达到大到暴雨量级, 在众多模式中表现最优。  
12 选取 26 日 08 时为初始时刻的 CMA-MESO-3KM 资料进行分析, 如图 13a 所示, 模式地形较好  
13 表现出冕宁站东侧小相岭和西侧牦牛山的基本地形特征。26 日 19 时, 从地面温度平流可知,  
14 冕宁站附近的偏北风与盆地西部冷空气并不存在直接联系, 但小相岭东侧地区明显受到冷空气  
15 的影响, 地面偏北风与冷平流对应。700 hPa, 川西南北部受低空切变线影响, 河谷内受  
16 偏南风控制 (图 13b)。22 时, 翻越川西南北部高海拔山岭的冷空气与河谷上游对流冷池结  
17 合并开始向南侵入, 而小相岭东侧冷空气已影响冕宁县东南侧区域 (图 13c)。700 hPa, 冕  
18 宁站位于偏北冷气流和偏南暖气流交汇区 (图 13d)。分析表明, 川西南北部的高海拔地形  
19 对延缓冷空气进入安宁河谷并维持河谷内不稳定层结的发展有显著作用。



20

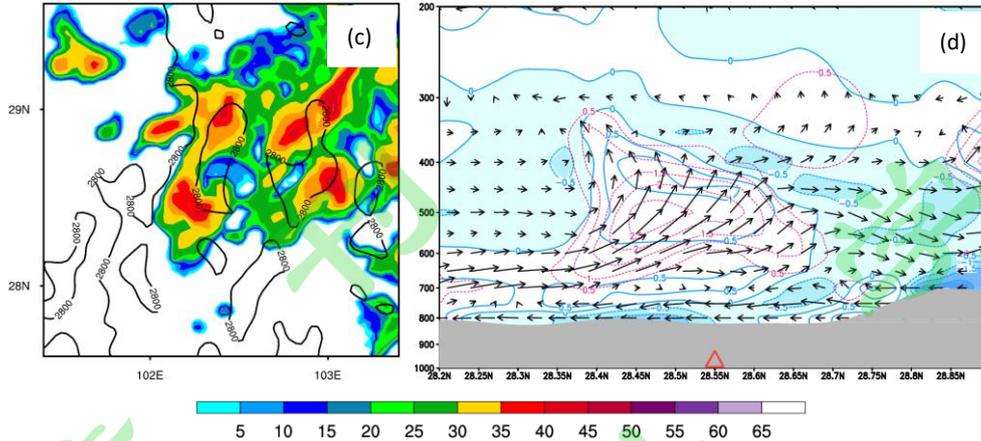
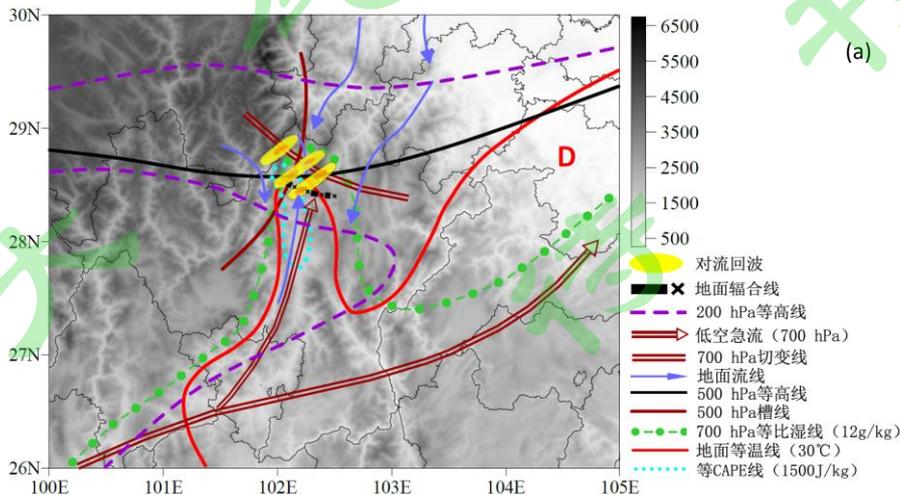


图 14 26 日 19 时 (a, b) 和 22 时 (c, d), CREF (填色)、模式地形 2800 m 线 (等值线; a, c) 和图 14a 虚线上 V-W 气流 (箭头)、与经向平均气温的温差 (实线和填色)、垂直速度 (虚线; 单位: m/s)、模式地形 (灰色填色; b, d)

Fig. 14 CREF (shaded), 2800 m line of model terrain (isoline; a, c), and cross-section V-W flow on dashed line in Fig. 14a (arrow), temperature difference from the meridional mean temperature (solid line and shaded), vertical velocity (dashed line; unit: m/s), model terrain (gray shaded; b, d) at 19:00 (a, b) and 22:00 (c, d) on 26

对比 26 日傍晚至夜间九龙县及河谷内出现的对流回波 (图 4 和图 5), CMA-MESO-3KM 的模拟对流回波与实况较为接近, 但持续时间略短于实况。19 时, 上游对流形成的冷池沿河谷向南移动, 冷池出流边界与谷地偏南气流在冕宁站附近形成了强烈的对流抬升机制 (图 14b), 造成冕宁站附近的局地对流被触发 (图 14a)。22 时, 对流系统持续影响冕宁站附近地区并向东移动 (图 14c)。由于浅薄冷池沿河谷向南推进, 地面受偏北风控制, 但冕宁站附近由于对流增强, 形成冷池堆积现象, 随着冷空气开始进入谷地以及上游地区对流持续, 造成河谷偏北风的强度和厚度随纬度增加 (向北) 而增强、增厚, 同时低空偏南气流相比过程初期有所增强, 为对流系统强度维持提供了持续性的动力抬升机制 (图 14d)。此结果与前述的基于观测和再分析资料的分析结果是吻合的。此外, 19 时冕宁上游高海拔地区对流系统出现在偏南气流与地形高度梯度大值区的结合处 (图 13b 和图 14a)。这表明除川西南北部的低空切变线外, 冕宁北部的地形强迫抬升亦构成了上游高海拔地区初始对流的潜在触发机制。

## 6.2 关键因子与概念模型



23

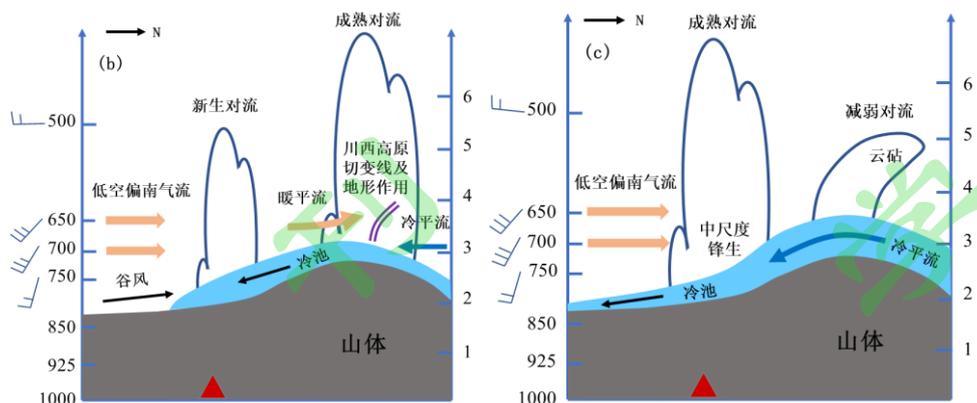


图 15 四川冕宁“6.26”突发性暴雨的形成机制概念模型 (a:多尺度系统和物理量配置; b和 c: 对流触发与维持机制示意图; 三角形代表冕宁站位置, 风杆代表冕宁站南侧河谷地区的环境风)

Fig. 15 Formation mechanism conceptual model of “6.26” sudden rainstorm in Mianning of Sichuan province (a: multi-scale systems and physical quantity configuration; b and c: schematic diagram of convection triggering and maintenance mechanism; triangle indicates the location of Mianning station, barb indicates the environment wind in the valley on the south side of Mianning station)

冕宁“6.26”暴雨过程的天气尺度斜压强迫较弱, 但与 MCS 强度维持有关的关键物理量具有明显的强度异常特征, 在冕宁地区“河谷-山地”地形及上游对流系统影响等机制作用下, 形成了持续性、高强度的夜间突发性中尺度暴雨过程。综合前述分析结果, 归纳总结此次暴雨过程形成机制和预报的关键因子与概念模型: (1) 源自孟湾的西南暖湿输送带上出现了分支水汽通道进入冕宁暴雨区 (偏南气流强度达 12 m/s 左右), 其中 VINMF 异常超过  $2\sigma$ , 暴雨区位于“湿舌” (比湿达 12 g/kg 以上) 前沿; (2) 盆地低涡西部偏北气流与川西南低空偏南气流形成了缓慢南压的低空切变线; (3) 过程发生前冕宁河谷内地面气温达  $30^{\circ}\text{C}$ , CAPE 达 1500 J/kg 以上, 异常超过  $5\sigma$ 。川西低槽过境后形成前倾结构, 进一步加强了对流不稳定性 (图 15a); (4) 26 日午后, 冕宁上游地区的高原对流形成近地面冷池, 在冷池扩张过程中与河谷内的偏南风 (风速 6-8 m/s) 形成了中小尺度辐合线及显著的抬升机制 (图 15b); (5) 26 日前半夜, 低空偏南气流还在持续增强, 进一步增强了向暴雨区的水汽输送和对流能量输送。同时, 上游地区持续的对流冷池出流与翻越山岭的冷空气合并后向南侵入, 由冷暖气流对峙形成的边界层动力抬升有利于冕宁站附近中尺度暴雨对流系统长时间维持 (图 15c)。

## 7 结论与讨论

针对诱发四川冕宁“6.26”山洪的突发性暴雨过程, 本文分析了降水实况、灾区地理环境及多尺度系统特征, 研究了该地区复杂地形条件下对流的触发和维持机制, 提炼了关键预报因子, 总结了暴雨过程形成机制的概念模型。结果表明:

(1) 该过程是一次由多条带状 meso- $\gamma$  对流系统产生的、伴有极端小时雨量的局地突发性暴雨过程。产生强降水的对流云团发展快、强度高, 具有 MCC 云团特征, 强对流回波质心较低, 强降水持续时间长。对流发展具有明显的后向传播特征和“列车效应”;

(2) 过程发生前, 环境大气具有一定的对流不稳定性, 但低层存在较强的对流抑制能量。上游对流冷池出流、盆地西部冷空气以及傍晚至夜间增强的低空偏南气流对冕宁地区对流环境调整并形成持续性、高强度的对流暴雨产生了直接且显著的影响。另外, 对比历史相

1 似过程，该过程的关键物理量具有更显著的异常和异常持续性；

2 (3) 川西西北部高海拔地形对冷空气南下进入安宁河谷具有一定的阻滞作用，而午后  
3 低云量条件下河谷边界层易形成暖脊，川西低槽过境后形成的前倾结构，增强了该地区的对  
4 流不稳定性。另外，在较强的谷地偏南风背景下，川西西北部地形强迫抬升形成了河谷上游  
5 地区潜在的对流触发条件；

6 (4) 由川西低槽、低空偏南气流和切变线构成的天气系统配置有可能触发川西高原对  
7 流系统，造成对流冷池沿高原谷地向下游推进。这些影响系统及其演变在业务应用中需要重  
8 点关注。川西南 700 hPa 等比湿线 (12 g/kg)、边界层暖脊、中等强度以上 CAPE 的分布以  
9 及分支水汽输送带、上游对流冷池出流与谷地偏南气流形成的地面辐合线等构成了该地区突  
10 发性暴雨预报的关键因子。

11 “6.26”暴雨形成机制的分析结果表明，对于短期时效预报，盆地西部冷空气的强度及  
12 其与川西南低空偏南气流相互作用是关注重点。如果冷空气偏强，南下侵入较快，川西西北  
13 部降水时间较短；如冷空气偏弱，在川西西北部地形的阻挡下，对安宁河谷上游地区产生的  
14 影响较小。仅当冷空气达到合适强度，在过程初期不能迅速翻越冕宁北部高海拔地形，在冕  
15 宁北部形成系统性抬升并出现对流，其冷池出流为下游地区提供潜在的对流触发条件。如预  
16 计在对应时段河谷内将出现较强且持续的偏南气流，需要考虑该地区复杂地形条件下产生的  
17 “列车效应”及由此引发的持续性强降水和山洪风险。因此，研究冕宁暴雨过程与盆地西部  
18 冷空气的关系有重要的应用价值。此外，针对盆地低涡对川西南暴雨的影响以及该地区暴雨  
19 可预报性等问题也亟需开展深入研究。

20

21 致谢：感谢中国气象科学研究院梁旭东研究员和夏茹娣副研究员、国家气象中心陈双和权婉晴在本研  
22 究结果交流讨论过程中给予的指导！

## 23 参考文献

24 Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of  
25 temperature and precipitation [J]. *J. Geophys. Res.*, 111(D5): D05109. doi: 10.1029/2005JD006290.

26 杜俊, 丁文峰, 任洪玉. 2015. 四川省不同类型山洪灾害与主要影响因素的关系 [J]. *长江流域资源与环境*,  
27 24(11): 1977-1983. Du Jun, Ding Wenfeng, Ren Hongyu. 2015. Relationships between different types of flash  
28 flood disasters and their main impact factors in the sichuan province [J]. *Resources and Environment in the*  
29 *Yangtze Basin (in Chinese)*, 24(11): 1977-1983. doi: 10.11870/cjlyzyyhj201511023.

30 高守亭, 周玉淑, 冉令坤. 2018. 我国暴雨形成机理及预报方法研究进展 [J]. *大气科学*, 42(4): 833-846. Gao  
31 Shouting, Zhou Yushu, Ran Lingkun. 2018. A review on the formation mechanisms and forecast methods for  
32 torrential rain in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(4): 833-846. doi:  
33 10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17277.

34 Hart R E, Grumm R H. 2001. Using normalized climatological anomalies to rank synoptic-scale events objectively  
35 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129(9): 2426-2442. doi: 10.1175/1520-0493(2001)129<2426:UNCATR>2.0.CO;2.

36 何光碧. 2012. 西南低涡研究综述 [J]. *气象*, 38(2): 155-163. He Guangbi. 2012. Review of the southwest vortex  
37 research [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 38(2): 155-163. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2012.2.003.

38 Houze R A, Jr. 2012. Orographic effects on precipitating clouds [J]. *Rev. Geophys.*, 50(1): RG10 01. doi:  
39 10.1029/2011RG000365.

40 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*  
41 *报*, 78(4): 551-567. Huang Xiaoyan, Sun Jisong, Liu Wenting. 2020. The interaction between low-level jet

1 evolution and severe convective rainstorms under topographic effect [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in  
2 Chinese), 78(4): 511-524. doi: 10.11676/qxxb2020.034.

3 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 Yan, Li  
4 Guoping. 2021. Impact of flow around and flow over in sudden rainstorm on mountains [J]. *Plateau  
5 Meteorology* (in Chinese), 40(2): 314-323. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00041.

6 李国平. 2016. 近 25 年来中国山地气象研究进展 [J]. *气象科技进展*, 6(3): 115-122. Li Guoping. 2016.  
7 Progress and prospects in research of mountain meteorology in China during the past 25 years [J]. *Adv.  
8 Meteor. Sci. Technol.* (in Chinese), 6(3): 115-122. doi: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.016.

9 李琴, 杨帅, 崔晓鹏, 等. 2016. 四川暴雨过程动力因子指示意义与预报意义研究 [J]. *大气科学*, 40(2):  
10 341-356. Li Qin, Yang Shuai, Cui Xiaopeng, et al. 2016. Diagnosis and forecasting of dynamical parameters  
11 for a heavy rainfall event in Sichuan province [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese),  
12 40(2): 341-356. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1507.14296.

13 Luo Y L, Wu M W, Ren F M, et al. 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China [J]. *J  
14 Climate*, 29(24): 8703-8719. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0057.1.

15 邵远坤, 沈桐立, 游泳, 等. 2005. 四川盆地近 40 年来的降水特征分析 [J]. *西南农业大学学报 (自然科学  
16 版)*, 27 (6): 749 - 752. Shao Yuankun, Shen Tongli, You Yong, et al. 2005. Precipitation features of Sichuan  
17 basin in the recent 40 decades [J]. *Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science)* (in  
18 Chinese), 27(6): 749-752.

19 Shen X S, Wang J J, Li Z C, et al. 2020. Research and Operational Development of Numerical Weather Prediction  
20 in China [J]. *J. Meteor. Res.*, 34(4): 675-698. doi: 10.1007/s13351-020-9847-6.

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

24 Sun J, Zhang F Q. 2017. Daily extreme precipitation and trends over China [J]. *Science China Earth Sciences*,  
25 60(12): 2190-2203. doi: 10.1007/s11430-016-9117-8.

26 Van Z J, Van D A. 2007. Vertically integrated moisture flux convergence as a predictor of thunderstorms [J].  
27 *Atmospheric Research*. 83(2-4): 435-445. doi: 10.1016/j.atmosres.2005.08.015.

28 吴莉娟, 肖天贵, 顾林康, 等. 2011. 四川凉山平川镇“7.14”泥石流灾害的气象成因 [J]. *成都信息工程大学  
29 学报*, 26(6): 669-674. Wu Lijuan, Xiao Tianguai, Gu Linkang, et al. 2011. Analysis on the meteorological  
30 causes of the July 14 extreme debris flow hazards in Pingchuan town of Liangshan prefecture in Sichuan  
31 province [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology* (in Chinese), 26(6): 669-674. doi:  
32 10.16836/j.cnki.jcuit.2011.06.012.

33 肖递祥, 王佳津, 曹萍萍, 等. 2020. 四川盆地突发性暖区暴雨特征及环境场条件分析 [J]. *自然灾害学报*,  
34 29(03): 110-118. Xiao Dixiang, Wang Jiajin, Cao Pingping, et al. 2020. Characteristics and environmental  
35 conditions of the sudden warm-sector rainstorms in Sichuan basin [J]. *Journal of Natural Disasters* (in  
36 Chinese), 29(03): 110-118. doi: 10.13577/j.jnd.2020.0312.

37 谢家旭, 李国平. 2021. 重力波与对流耦合作用在一次山地突发性暴雨触发中的机理分析 [J]. *大气科学*,  
38 45(3): 1-16. Xie Jiaxu, Li Guoping. 2021. Mechanism analysis of a sudden rainstorm triggered by the  
39 coupling of gravity wave and convection in mountainous area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*  
40 (in Chinese), 45(3): 1-16. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20137.

41 熊俊楠, 赵云亮, 程维明, 等. 2018. 四川省山洪灾害时空分布规律及其影响因素研究 [J]. *地球信息科学学  
42 报*, 20(10): 1443-1456. Xiong Junnan, Zhao Yunliang, Cheng Wwiming, et al. 2018. Temporal-spatial  
43 distribution and the influencing factors of mountain-flood disasters in Sichuan province [J]. *Journal of  
44 Geo-information Science* (in Chinese), 20(10): 1443-1456. doi: 10.12082/dqxxkx.2018.180193.

- 1 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):  
2 511-524. Xu Jun, Bi Baogui, Chen Yun, et al. 2018. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the  
3 unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese).  
4 76(4): 511-524. doi: 10.11676/qxxb2018.016.
- 5 郁淑华. 2003. 四川盆地泥石流、滑坡的时空分布特征及其气象成因分析 [J]. 高原气象, 22(s1): 83-89. Yu  
6 Shuhua. 2003. Analyses on spatial-temporal characteristics of mud-rock flow and landslide in Sichuan basin  
7 and its meteorological cause [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22(s1): 83-89. doi:  
8 10.3321/j.issn:1000-0534.2003.z1.011.
- 9 Zhang F, Zhang Q H, Sun J Z. 2021. Initiation of an elevated mesoscale convective system with the influence of  
10 complex terrain during Meiyu season [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126, e2020JD  
11 033416. doi: 10.1029/2020JD033416.
- 12 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.  
13 Zhao Yuchun, Xu Xiaofeng, Cui Chunguang. 2012. A Study of convective rainstorms along the east slope of  
14 western Sichuan plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17(5): 607-616. doi:  
15 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.11056.
- 16 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):  
17 321-332. Some influence factors of a sudden rainstorm event in northeast Sichuan basin of China [J]. Plateau  
18 Meteorology (in Chinese), 39(2): 321-332. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00080.
- 19 钟燕川, 郭海燕, 徐金霞, 等. 2018. 四川省泥石流活动与降水因子特征 [J]. 水土保持研究, 25(06): 390-396.  
20 Zhong Yanchuan, Guo Haiyan, Xu Jinxia, et al. 2018. Characteristics of debris flow and precipitation in  
21 Sichuan province [J]. Research of Soil and Water Conservation (in Chinese), 25(06): 390-396. doi:  
22 10.13869/j.cnki.rswc.20180705.002.
- 23 周长艳, 岑思弦, 李跃清, 等. 2011. 四川省近 50 年降水的变化特征及影响 [J]. 地理学报, 66(5): 619-630.  
24 Zhou Changyan, Cen Sixuan, Li Yueqing, et al. 2011. Precipitation variation and its impacts in Sichuan in the  
25 last 50 years [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 66(5): 619-630. doi: 10.11821/xb201105005.
- 26 周秋雪, 康岚, 蒋兴文, 等. 2019. 四川盆地边缘山地强降水与海拔的关系 [J]. 气象, 45(6): 811-819. Zhou  
27 Qiuxue, Kang Lan, Jiang Xingwen, et al. 2019. Relationship between heavy rainfall and altitude in  
28 mountainous areas of Sichuan basin [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 45(6): 811-819. doi: 10.7519/  
29 j.issn.1000-0526.2019.06.007.