

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).

## 重庆一次弱天气系统强迫下的极端 短时强降水事件分析<sup>\*</sup>

李 琴 邓承之

重庆市气象台,重庆 401147

**提 要:** 利用常规观测、多普勒雷达、FY-2F 卫星、加密自动站等数据和 ERA-Interim  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$  再分析资料,对 2019 年 4 月 19 日重庆极端短时强降水事件的环境条件和发展机制进行了分析。结果表明:在天气尺度垂直运动较弱的背景下,此事件由准静止的  $\beta$  中尺度对流系统(M $\beta$ CS)形成。对流发展前本地水汽充足,“上干下湿”的层结不稳定特征显著。对流发展于云贵高原向四川盆地过渡的綦江河谷附近,河谷三面环山,地势由西南向东北倾斜。 $\gamma$  中尺度对流从河谷南侧下山增强,导致河谷内的局地强降水和冷池。冷池与河谷东坡上暖湿气团间的强中尺度水平温度梯度,有利于近地面西南风加速向东侧山体辐合,促使已移至河谷内的  $\gamma$  中尺度对流向东坡移动并加强为一个孤立的 M $\beta$ CS。受冷池的持续增强、东侧地形的阻挡、两个  $\gamma$  中尺度对流的并入和弱环境气流引导的共同影响,M $\beta$ CS 得以较长时间维持并影响同一局地区域,导致綦江、万盛局地发生极端短时强降水。

**关键词:** 极端短时强降水,复杂地形,冷池

**中图分类号:** P458

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.09.004

## Analysis of a Short-Time Extreme Precipitation Event in Chongqing Under Weak Synoptic Forcing

LI Qin DENG Chengzhi

Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147

**Abstract:** Based on conventional weather data, FY-2F satellite data, Doppler radar products, densely-observed data from automatic surface weather observation system and ERA-Interim  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$  reanalysis data, the ambient condition and evolution of the short-time extreme precipitation event in Chongqing on 19 April 2019 is analyzed. The results show that under weak synoptic-scale vertical motion, this severe rain process was formed by a quasi-stationary meso- $\beta$  scale convective system (M $\beta$ CS) over Qijiang River Valley and its vicinity. Before the development of the severe convection, the local water vapor was sufficient, and stratification instability which was established and maintained by the wetter low-level and the drier mid-high-level was prominent. With the terrain inclining from southwest to northeast, Qijiang River Valley, located in the transition zone from Yungui Plateau to Sichuan Basin, was surrounded by mountains on three sides. Flowing from the south side of the valley, the increasing meso- $\gamma$  scale convective cell brought about heavy rainfall and cold pool in the river valley. The strong mesoscale temperature gradient between the cold pool and the eastern slope of the valley promoted the intense convergence of the

<sup>\*</sup> 中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-095)资助

2020 年 4 月 15 日收稿; 2021 年 6 月 21 日收修定稿

第一作者:李琴,主要从事短期天气预报和中尺度灾害天气预报研究. E-mail:liqin990@163.com

near-surface southwest wind to the eastern hillside, which was advantageous to the eastward convergence of the convective cell and strengthening, then the convection was organized into an isolated M $\beta$ CS. With the coaction of continuous enhancement of the cold pool, topography blocking effect, merging of two M $\gamma$ CSs and weak ambient flow, the M $\beta$ CS moved slowly, finally resulting in the localized extreme short-time rainfall over Qijiang and Wansheng.

**Key words:** short-time extreme precipitation, complex terrain, cold pool

## 引 言

强降水在重庆时有发生,是当地汛期主要的灾害性天气之一。大量研究指出,重庆强降水多发生在有利的天气尺度背景下,其中包括高原槽(涡)、西南低涡、切变线、低空急流和地面冷锋等天气系统,强降水的产生常是多尺度天气系统共同作用的结果(周国兵等,2006;王中和陈艳英,2007;刘德等,2012;孙一昕,2012;刘婷婷等,2014;孟晓文等,2017;邓承之等,2019)。如卢萍等(2014)对 2010 年重庆夏季两次暴雨过程的热力、动力演变进行了分析,指出西南涡造成的降水落区位于低涡中心附近,整个降水过程雨带分布与低涡移动路径相一致。邓承之等(2018)通过个例研究指出中尺度对流系统生成并维持于西南涡前部次级环流的上升支内。康岚等(2008)指出 2007 年 7 月中旬的川渝大暴雨过程是西南涡和高原涡两个天气系统逐步耦合的结果,副热带高压的西进北抬为此次过程提供了有利的水汽输送条件。

在强降水天气中,Doswell III(2001)将小时雨量达到或超过 50 mm 的强降水事件归类为极端强对流天气,俞小鼎(2013)将 1 h 雨量 $\geq 50$  mm 或 3 h 雨量 $\geq 100$  mm 的降水事件定义为极端短时强降水事件。这类事件形成的暴洪危害极大,尤其是天气尺度强迫较弱形势下的极端短时强降水事件,突发性和局地性强,预报难度极大,已引起广泛关注(徐珺等,2018;曾智琳等,2019;范元月等,2020)。Luo et al(2016)指出 2011—2015 年中国大陆 5 800 次极端小时强降水的天气形势可划分为 4 类,其中弱天气强迫类极端小时强降水占 39.0%,且主要发生在中国东南、华北、西南和东北的东部地区,而 2003—2012 年中国台湾的弱天气强迫天气形势下的极端小时强降水占 9%~13%(Wu et al,2017)。Lin et al(2011)调查了 2005—2008 年中国台湾弱天气强迫天气形势下的暖季雷暴的时空分布特征,指出

有午后雷暴日与无午后雷暴日的地面风场、温度、露点温度有明显的日变化。孙继松等(2006)在分析一次北京局地暴雨过程中指出,在天气尺度垂直运动并不利于强降水发生的背景下,城市和郊区因下垫面热力性质差异造成的中尺度辐合线对对流单体有明显的组织作用。肖现等(2015)通过数值模拟研究了两次处于弱天气系统强迫和弱层结背景下的北京风暴过程,表明局地冷池和环境风场的相互配合是造成山上对流风暴是否能够顺利传播下山的关键机制。孙靖和程光光(2017)指出在弱天气尺度环流影响下,雷暴自身强弱是其下山后强度可否增强的主要因素之一。Wang et al(2018)指出,弱天气尺度背景下一次发生在中国台湾西南部的晨间对流主要是在向岸的西南风涌与离岸的陆/山风之间触发的。

目前对于重庆地区弱天气系统强迫下极端短时强降水事件的研究,尚不多见。由于这类过程往往无明显主导天气尺度或大尺度系统,强降水突发性和局地性特征明显,目前对其的预报还存在很大的不确定性(张楠等,2018),往往容易漏报。同时,重庆位于长江上游,西接四川盆地,东北部雄踞大巴山地,东南部斜贯有巫山、七曜山、大娄山和武陵山等山脉,地形地貌复杂(图 1),自然生态环境脆弱,突发性的局地强降水常带来严重的次生地质危害。因此,有必要加强对此类降水天气过程的认识,本文将对 2019 年 4 月 19 日发生在重庆局地的极端短时强降水案例进行分析,以期当地未来此类天气的预报提供参考。

## 1 天气实况概述

2019 年 4 月 19 日 00—12 时(UTC,下同),重庆出现了一次强降水天气过程,重庆南部的綦江、万盛地区出现了暴雨到大暴雨天气(图 2 紫色方框区域),11 个区域加密自动气象观测站的 12 h 累计降水量 $\geq 100$  mm,其中万盛的铜鼓滩站最大,达 170.7 mm。强降水区域同时伴有雷电、短时强降水、阵性大风等

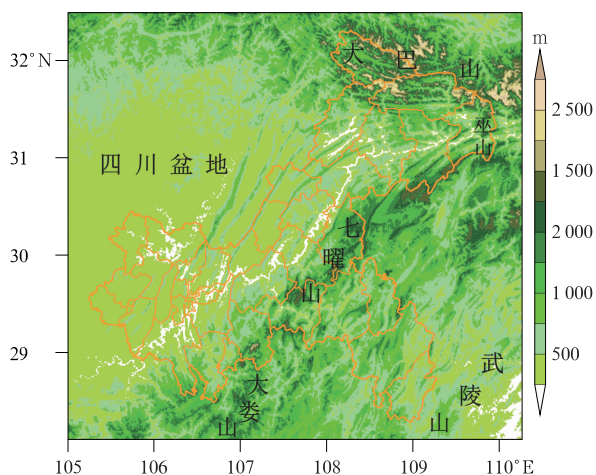


图1 重庆及周边地区地形高度

Fig. 1 Terrain height of Chongqing and its surrounding area

强对流天气(图3)。綦江、万盛的降水主要发生在午后,持续时间约为6 h(05—11时),万盛的南门和铜鼓滩站于09时发生了 $>100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的极端短时强降水天气(俞小鼎, 2013),小时雨强分别高达 $109.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $100.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。这次极端强降水事件历时短、局地性强、突发性明显,具有显著的

中小尺度特征。强降水突发在重庆南部地形复杂的綦江河谷附近,极端短时强降水事件发生后,綦江、万盛局地出现了山洪地质灾害,造成綦江(1人)、万盛(4人)共计5人死亡,6人受伤,给当地人民的生命及财产造成了重大损失。

## 2 天气形势分析

### 2.1 环流背景

极端短时强降水开始前,19日06时重庆地区为“东高西低”的环流形势,500 hPa 青藏高原上为宽广的低压槽区,重庆及其以东地区为弱脊区(图4a),中低层重庆上空均为较弱的偏南风,重庆西部位于暖性弱低压区,而其东部为高压脊区,高压脊稳定且强大,有利于阻碍或延缓上游低值系统东移(图4b, 4c)。可见,降水开始前重庆地区存在天气尺度的抬升运动,但由于地面至500 hPa 风场都较弱、垂直风切变很小,天气尺度的垂直运动较弱,极端短时强降水发生在弱天气尺度系统强迫环境下。19日06时贵州北部—重庆南部的可降水量达

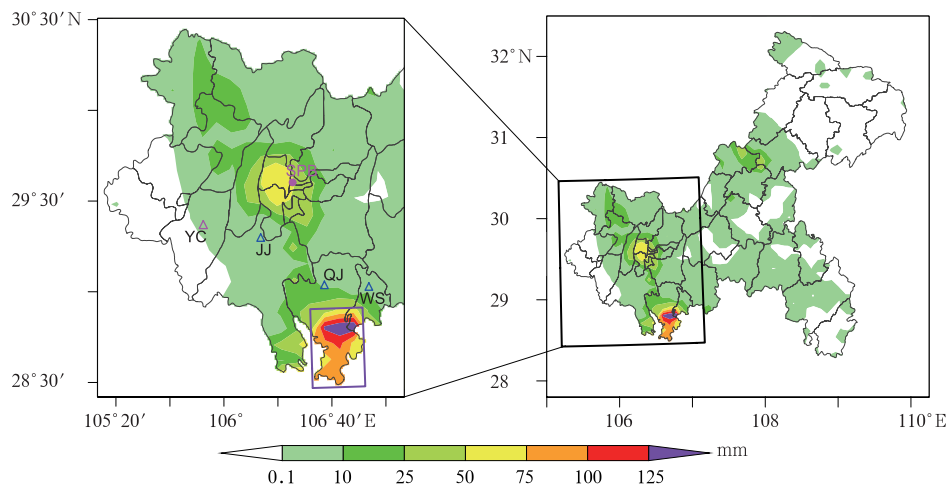


图2 2019年4月19日00—12时重庆市地面自动气象站和区域加密自动气象观测站的12 h 累计降水量分布(填色)

[紫色圆点为沙坪坝站(SPB),蓝色三角形依次为江津站(JJ)、綦江站(QJ)和万盛站(WS),紫色三角形为永川(YC)雷达站]

Fig. 2 The 12 h accumulated precipitation of the conventional meteorology observation stations and dense automatic weather stations in Chongqing from 0000 UTC to 1200 UTC 19 April 2019 (colored)

[purple dot and triangle represent Shapingba (SPB) Weather Station and Yongchuan (YC) Radar Station, blue triangle and black abbreviation denote weather stations of Jiangjin (JJ), Qijiang (QJ), and Wansheng (WS), respectively]

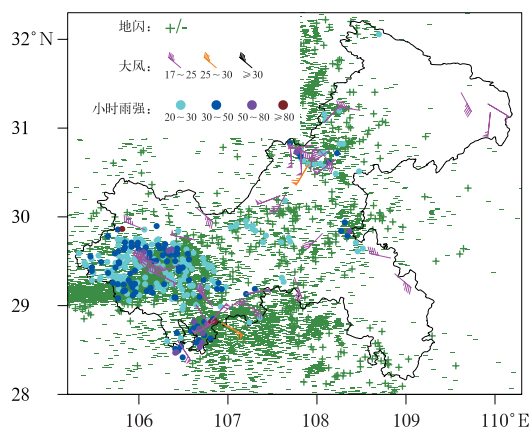


图 3 2019 年 4 月 19 日 00—12 时重庆强对流天气

(地闪:绿色十字和短线;阵性大风:风向杆,

单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;最大小时雨强:圆点,

单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。地闪数据来自中国 ADTD\*

地闪探测网;阵性大风和最大小时强降水数据来源  
于地面自动气象站和区域加密自动气象观测站)

Fig. 3 The convective weather in Chongqing  
from 0000 UTC to 1200 UTC 19 April 2019

(cloud-to-ground lightning flash: green

short-line and cross; gale: wind barb,

unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; maximum hourly severe

rainfall: dot, unit:  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ .

The lightning data, gale and the maximum

hourly severe rainfall data are from the ADTD

lightning network, the conventional meteorology

observation station and dense automatic

weather station network in China, respectively)

到 46~48 mm,为季节性的高值,且存在较明显的水汽通量辐合和西南—东北走向的水汽舌,利于局地强降水的发生(图 4d)。

## 2.2 不稳定层结条件

沙坪坝站的  $T\text{-log}p$  图(图 5)表明,19 日 00 时 700 hPa 以下为湿层,而 500 hPa 以上温度露点差较大(如 400 hPa 上约为  $38^\circ\text{C}$ ),垂直方向“上干下湿”的特征显著,这有利于位势不稳定的发展加强(丁一汇,2005;孙明生等,2012;孙继松等,2014;郑永光等,2017;雷蕾等,2011)。在降水开始前,19 日 00 时尽管对流有效位能(CAPE)数值不高( $134 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),但根据对流发展前的最高气温( $26.2^\circ\text{C}$ )订正后的 CAPE 高达  $1486 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 5),“狭长型”的 CAPE 形态有利于强降雨的发生。19 日 00 时异

常偏强的负沙氏指数( $-3.3^\circ\text{C}$ )和 K 指数( $41^\circ\text{C}$ )都表明重庆西部地区处于显著的不稳定状态。虽然对流层中低层风速小,垂直风切变弱,不利于对流的倾斜发展和传播,但由于承载层风速弱,同样有利于局地对流发展后在源地附近影响更长时间。过程开始前,存在一定的对流抑制能量(CIN 为  $258 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),不利于初始对流的触发。但需要注意的是,重庆綦江、万盛南部位于云贵高原向四川盆地的过渡带,由于山坡上抬升的初始气块海拔较高,实际气块抬升需要穿透的阻力较沙坪坝站(海拔高度约为 200 m)更小,且降水开始后抬升凝结高度(LCL)持续降低,在对流层低层高湿环境中,低 LCL 表明只需要较弱抬升就可以触发对流,有利于对流风暴的发生发展(Brooks et al,2003)。

## 3 中尺度对流系统的发展机制分析

高强度的降水往往是由中小尺度系统直接产生(郑永光等,2017),因此有必要在分析环流背景的同时,进一步利用精细化资料对该过程的中小尺度特征进行分析。

### 3.1 $\beta$ 中尺度对流系统的演变

根据 Orlanski(1975)的尺度划分标准、马禹等(1997)的判别方法,本文将水平尺度在 20~200 km,云顶亮温(TBB) $\leq -32^\circ\text{C}$ 的中尺度对流云团定义为  $\beta$  中尺度对流系统(M $\beta$ CS)。FY-2F 卫星 TBB 资料表明(图 6),19 日 06 时,綦江—万盛地区已经新生出一个孤立对流云团,08 时云团加强发展成一个圆形的 M $\beta$ CS;09 时 M $\beta$ CS 覆盖面积进一步增大,长轴达 110 km 左右,随后东移减弱消亡。从云团发展演变过程来看,这个云团呈准静止状态,在整个过程中 TBB 均高于  $-52^\circ\text{C}$ ,云盖较暖。结合图 2 可知,綦江、万盛南部的极端短时强降水事件主要发生在此 M $\beta$ CS 发展加强的过程中。

由宜宾和永川等天气雷达(重庆雷达缺资料)同步组网观测得到的组合反射率因子拼图显示(图 7),19 日 03:42—04:00,江津、綦江以南的谷地产生了  $\gamma$  中尺度对流单体 A、B 和 C。在缓慢下山过程中,单体 A 和 C 减弱消散, B 略微加强。05:24,

\* ADTD: Advanced TOA (time of arrival) and Direction.



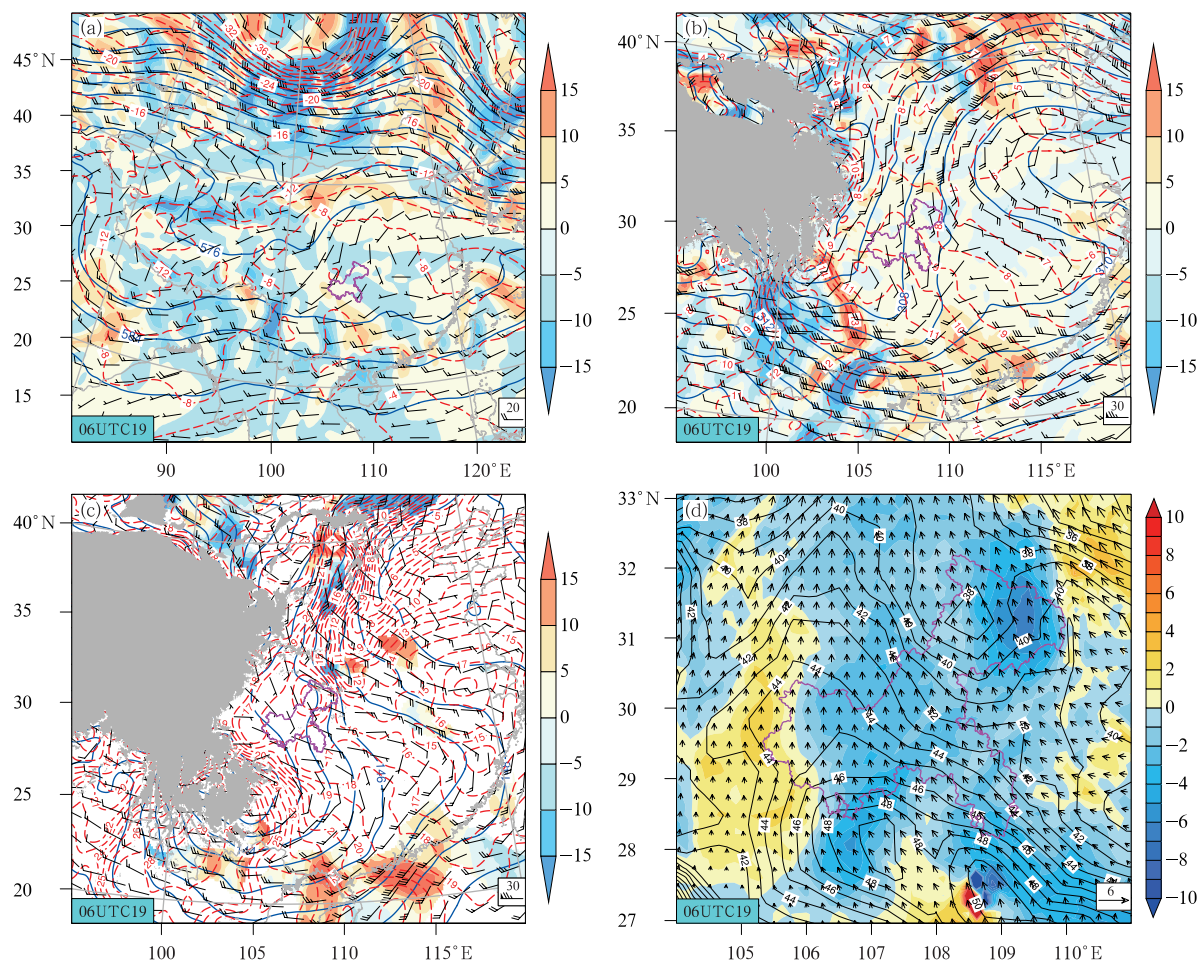


图4 2019年4月19日06时(a)500 hPa、(b)700 hPa和(c)850 hPa的天气形势图  
(蓝实线:位势高度场,单位:dagpm;红虚线:温度场,单位:℃;风向杆:风场,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  
灰色阴影:地形;填色:温度平流,单位: $10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ ), (d)整层水汽通量(矢量箭头,  
单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )、整层水汽通量散度(填色,单位: $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )和可降水量(黑线,单位:mm)

Fig. 4 Synoptic charts at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa and (c) 850 hPa at 0600 UTC 19 April 2019

(blue solid line: geopotential height, unit: dagpm; red dashed line: temperature, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ;  
wind barb: wind field, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; gray shading: terrain; colorful shading:  
temperature advection, unit:  $10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(d) the integrated moisture flux (vector, unit:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ), integrated  
divergence of moisture flux (colored, unit:  $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )

and precipitable water (black contour, unit: mm) at 0000 UTC 19 April 2019

綦江河谷中又新生对流单体 D、E 和 F,随后它们加强组织成带状对流 G,G 在 06:06 发展为“弓”形后减弱分裂,在此期间单体 B 仍在缓慢下山。单体 B 到达綦江河谷后迅速增强,随后向河谷东坡缓慢移动且加剧发展,逐渐形成了 M $\beta$ CS。该单体在 07:18 反射率因子由低到高向东南倾斜,开始出现弱回波区和其上的悬垂回波结构(图 8a),该单体进入强风暴阶段。05:48 和 07:42 各有一个孤立的  $\gamma$  中尺度对流单体 H 和 I 在高海拔地区新生,在北移或下山

过程中增强后,它们又分别于 07:30 和 08:42 并入雷暴 B,东北—西南向的带状雷暴 B 得以维持。07:30—08:48 有界弱回波区结构清晰(图 8b,8c),在此期间径向速度图上出现了  $\beta$  中尺度辐合线(王福侠等,2014),如:08:22,2.4°仰角径向速度图在綦江河谷东侧山坡上显示了径向速度辐合(图 9a 紫色方框区域),并出现了较大的负速度中心,6.0°仰角径向速度显示了较强的风暴顶辐散(图 9b), $\beta$  中尺度辐合线的形状和位置与强降水回波带非常吻合

(图 7, 图 9a), 08:48 万盛南门站和铜鼓滩站附近最强回波强度达 65 dBz, 雷暴 B 发展强盛。直至 09 时, 雷暴 B 的东段一直稳定位于极端强降水区上空, 09 时万盛地区产生了极端短时强降水, 南门和铜鼓滩站小时雨强分别高达  $109.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $100.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 08—09 时, 分钟雨强分别为  $4.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  和  $3.7 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  (图 10)。雷暴 B 在发展成熟后, 其垂直剖面显示该风暴单体的有界弱回波区结构消失 (图 8d), 在高层偏西风的引导下东移, 其主体于 10:42 移出重庆, 随后减弱消亡, 降水停歇。垂直反射率因子剖面图表明 (图 8), 雷暴 B 是伴有有界弱回波区和悬垂回波结构的准静止强风暴, 有利于局地强降水的发生, 甚至可能出现冰雹, 但并未收到冰雹的观测报告。

综上所述, 初始对流在綦江南侧的高海拔谷地附近被触发, 在其北移下坡过程中, 大部分对流消散, 同时又有多个  $\gamma$  中尺度对流在綦江河谷中新生, 且发展为“弓”状对流后减弱消散。然而綦江河谷南坡上的对流 B 北移下山加强, 并在向綦江河谷东侧山坡移动的过程中发展为孤立的 M $\beta$ CS, 随后有两个在高海拔地带新生且向北移动加强的  $\gamma$  中尺度对流先后并入其中, M $\beta$ CS 得以在綦江河谷东坡上维持 2 h 以上, 造成了綦江、万盛南部局地的极端短时强降水。

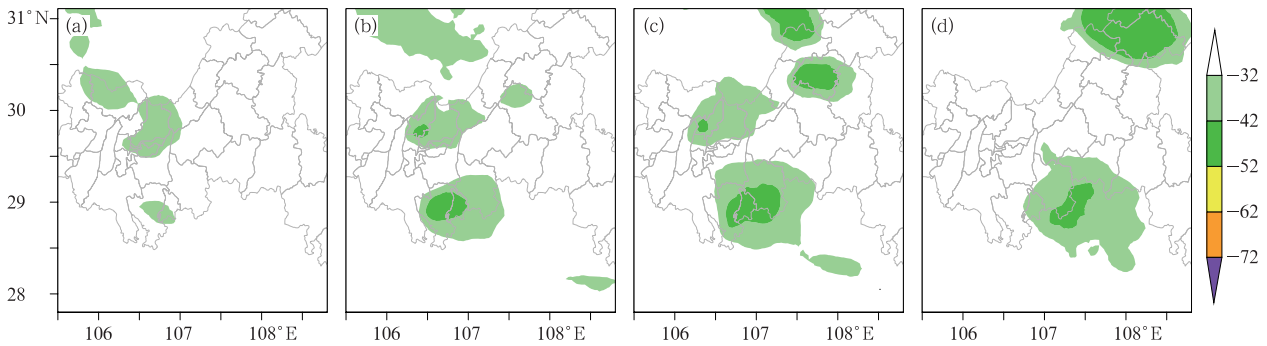


图 5 2019 年 4 月 19 日 03 时沙坪坝站订正探空曲线 (基于 00 时沙坪坝探空资料)  
(蓝色实线: 露点温度, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ; 红色粗实线: 层结曲线; 黑色实线: 状态曲线; 蓝色和橙色阴影: CIN 和 CAPE)

Fig. 5 The revised sounding of Shapingba Station at 0300 UTC 19 April 2019 based on sounding data of Shapingba Station at 0000 UTC 19 (blue solid line: dew-point temperature, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ; red thick solid line: stritification curve; black solid line: condition curve; blue and orange shadings: CIN and CAPE)

图 6 2019 年 4 月 19 日 (a) 06 时、(b) 08 时、(c) 09 时和 (d) 11 时 TBB 分布  
(填色表示  $TBB \leq -32^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 6 The brightness temperature at 0600 UTC (a), 0800 UTC (b), 0900 UTC (c) and 1100 UTC (d) 19 April 2019 ( $TBB \leq -32^{\circ}\text{C}$  in colored zones)

### 3.2 $\beta$ 中尺度对流系统发展机制分析

重庆江津、綦江、万盛等地及与其相邻的贵州习水县位于云贵高原向四川盆地的过渡地带, 地势南高北低, 以山地为主, 多小尺度地形, 其间分布有习

水河和綦江河 (图 11a)。从整体上来看, 习水河谷较綦江河谷位置偏南且海拔高 0.4 km 左右, 綦江河谷西侧和南侧山脉高大连绵, 而东侧山脉低矮且不连续, 此次强降水主要分布在綦江河谷及其周围坡地上。



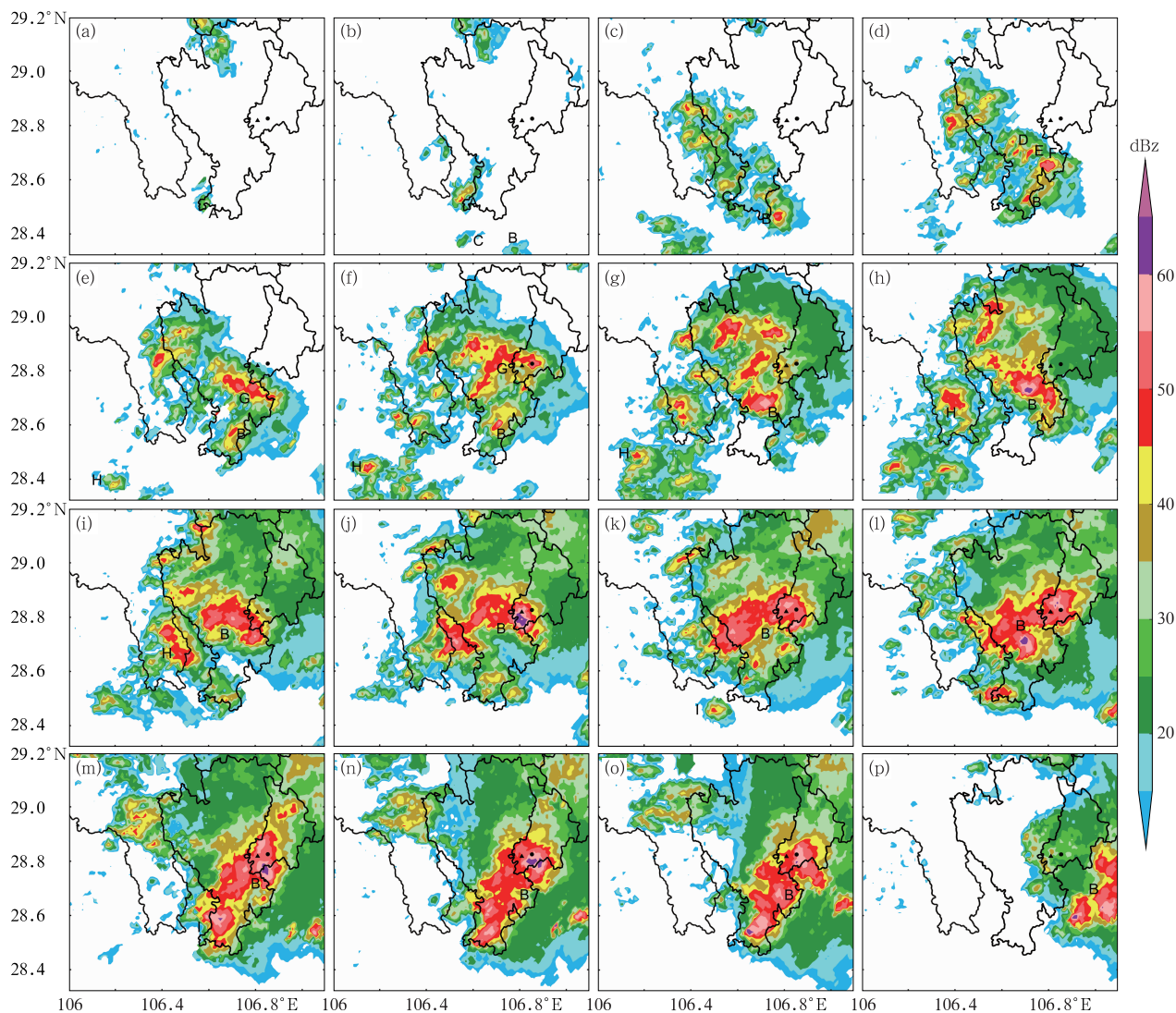


图7 2019年4月19日(a)03:42、(b)04:00、(c)05:06、(d)05:24、(e)05:48、(f)06:06、  
(g)06:30、(h)06:48、(i)07:12、(j)07:30、(k)07:42、(l)08:12、(m)08:42、(n)08:48、  
(o)09:00和(p)10:42的雷达组合反射率演变(填色)

(黑色三角形和圆点分别表示万盛的南门、铜鼓滩地面加密气象观测站)

Fig. 7 Evolution of composite radar reflectivity mosaic (colored) at (a) 0342,

(b) 0400 UTC, (c) 0506 UTC, (d) 0524 UTC, (e) 0548 UTC, (f) 0606 UTC, (g) 0630 UTC,

(h) 0648 UTC, (i) 0712 UTC, (j) 0730 UTC, (k) 0742 UTC, (l) 0812 UTC, (m) 0842 UTC,

(n) 0848 UTC, (o) 0900 UTC and (p) 1042 UTC 19 April 2019

(Black dots and triangles indicate Nanmen and Tonggutuan automatic weather stations in Wansheng)

19日04时,在江津、綦江、万盛南部的高位温区有 $\gamma$ 中尺度对流单体新生(图略)。05时,綦江河谷南坡上转为偏南风(图11i),单体B逐渐北移下坡并加强发展,当地开始有弱降水产生(图11c),且出现了 $4^{\circ}\text{C}$ 以上的降温(图略),这导致綦江河谷南坡上形成一个弱的冷空气堆(图11j),即冷池(Weckwerth and Parsons, 2006)。斜坡地形使得弱冷池出流加速北下,并与偏北气流间有地面辐合线

生成(图11j),在其附近触发多个 $\gamma$ 中尺度对流单体D、E和F(图7),这些单体呈西北—东南向排列,并于06时组织发展为向北凸出的“弓”状对流G,对流G很快分裂减弱,但对流G产生的降水导致綦江北部冷池范围南扩,此时江津、綦江及万盛等地的位温呈“鞍型”分布(图11j),习水河谷西侧山体和万盛东部区域的位温较高,对流单体H于06时在习水河谷西侧的高位温山区内被触发。

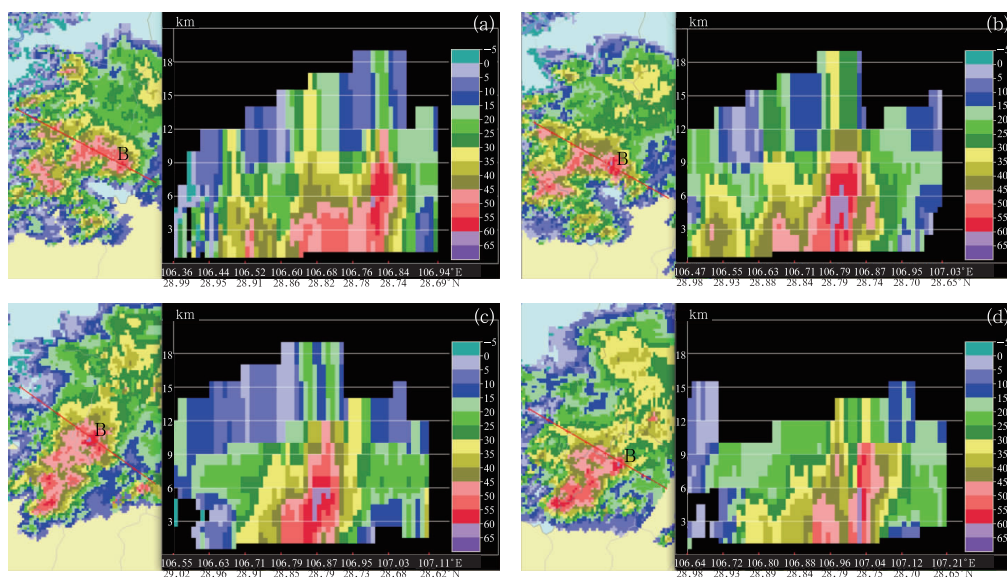


图 8 2019 年 4 月 19 日 (a)07:18、(b)07:30、(c)08:48 和 (d)09:30

沿着左侧经过雷暴 B 的红线的永川雷达反射率因子剖面(填色,单位: dBZ)

Fig. 8 The Yongchuan radar reflectivity mosaic profile along the left red lines through thunderstorm B (colored, unit: dBZ) at (a) 0718 UTC, (b) 0730 UTC, (c) 0848 UTC and (d) 0930 UTC 19 April 2019

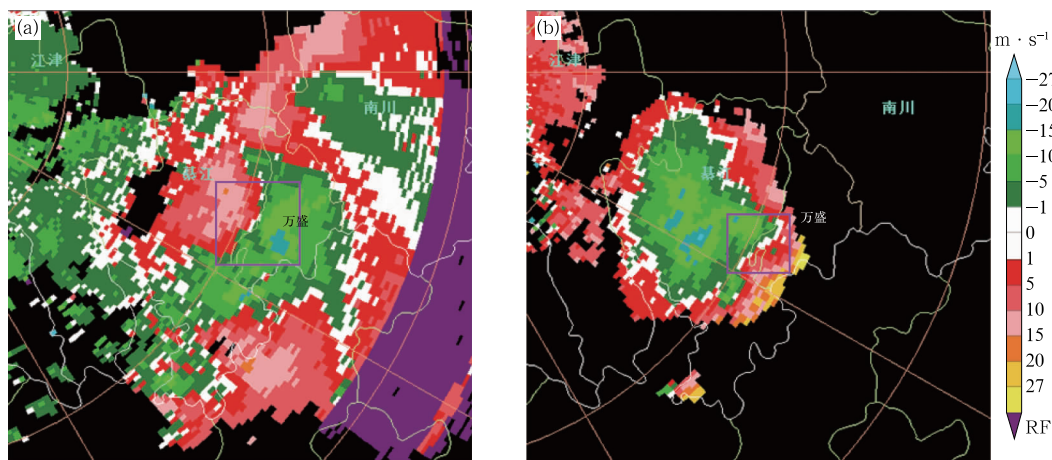


图 9 2019 年 4 月 19 日 08:22(a)2.4°和(b)6.0°仰角永川雷达基本径向速度(填色)

Fig. 9 The base velocity (colored) at (a) 2.4° and (b) 6.0° from Yongchuan Radar at 0822 UTC 19 April 2019

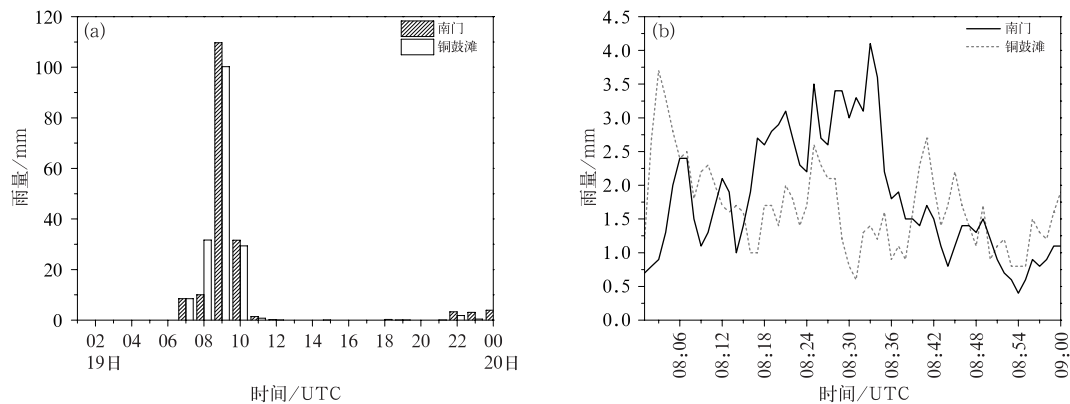


图 10 2019 年 4 月 19 日南门、铜鼓滩地面加密气象观测站(a)01 时至 20 日 00 时逐时雨量和(b)08—09 时逐分钟雨量

Fig. 10 (a) Hourly rainfall from 0100 UTC 19 to 0000 UTC 20, and (b) minutely rainfall from 0800 UTC to 0900 UTC 19 April 2019 at Nanmen and Tonggutai automatic weather stations



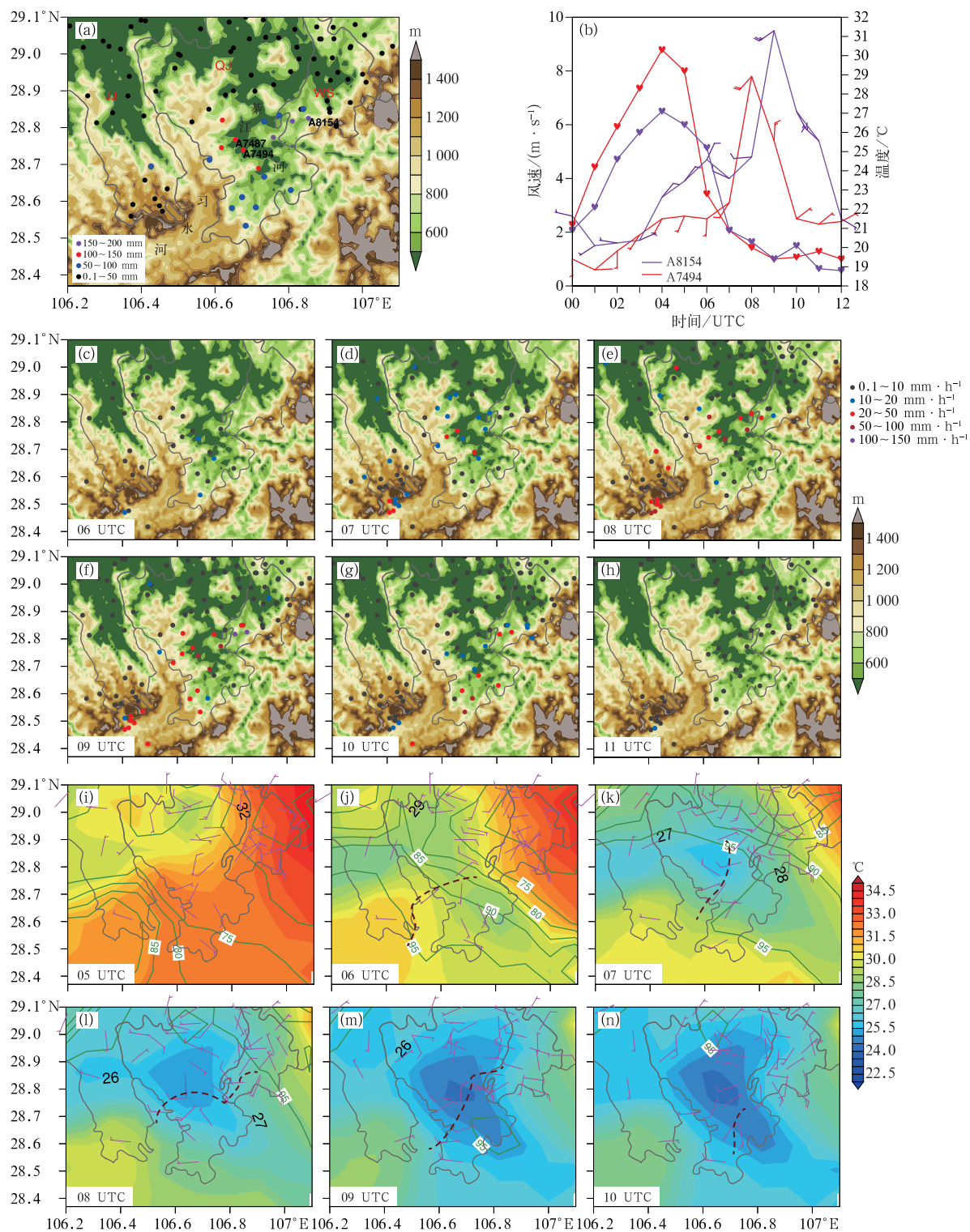


图 11 2019 年 4 月 19 日 (a) 00—12 时重庆偏南地区 12 h 站点累计降水量 (圆点, 单位: mm); (b) 图 11a 中两个代表站 A8154 和 A7494 的逐时温度 (折线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) 和风力 (风向杆, 单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); (c~h) 06—11 时逐时降水量 (圆点, 单位:  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ); (i~n) 05—10 时逐时位温 (填色)、相对湿度 (等值线, 单位: %) 和地面观测站风场 (风向杆, 单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(图 11j~11n 中棕色粗虚线为地面中尺度风场辐合线; 图 11a、图 11c~11h 中阴影为地形)

Fig. 11 (a) Distribution of 12 h accumulated rainfall amount at stations in southern Chongqing from 0000 UTC to 1200 UTC 19 April 2019 (dot, unit: mm); (b) hourly temperature (polyline, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) and surface wind (wind barb, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) of two representative stations A8154 and A7494 shown in Fig. 11a; (c~h) hourly rain (dot, unit:  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) from 0600 UTC to 1100 UTC 19 April 2019; (i~n) potential temperature (colored), surface relative humidity (contour, unit: %), surface wind filed (wind barb, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and the mesoscale convergence lines of surface wind field (brown bold dashed line) from 0500 UTC to 1000 UTC 19 April 2019

(In Figs. 11a and 11c~11h, the shadings are terrain height)



由于 06 时前降水较弱, 綦江河谷内的温度仅有小幅度下降, 河谷近地面气流温度仍高于南坡下山气流温度, 充足的热力条件利于单体 B 在下山过程中持续发展(陈双等, 2011; 陈明轩等, 2017), 07 时单体 B 已移至綦江河谷东侧山脚下, 强回波面积不断扩大, 最强回波高达 60 dBz, 此时产生了大于  $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的强降水(图 11d)。綦江河谷两侧为高山, 地势南高北低, 特殊地形形成狭管效应, 构成河谷南坡冷池北下的重要通道(徐姝等, 2019), 随后河谷南坡的冷池与綦江北部冷池逐渐合并发展为强冷池中心(图 11k)。綦江河谷温度远低于其东侧区域温度, 即  $\partial\theta/\partial x > 0$ , 水平位温梯度达  $1^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ km})^{-1}$ , 这种量级的水平温度梯度可以在迎风坡强迫产生相对独立的中尺度垂直切变, 且形成强对流切变环境的响应时间仅需要十几分钟到一小时(孙继松等, 2006)。根据温度水平分布和风垂直切变的近似关系  $\left[\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x}\right]$  (孙继松和杨波, 2008), 则边界层的风垂直切变逐渐变小且边界层顶西风或南风加速明显慢于近地面层。为了定量分析此次降水过程, 本文也给出了綦江河谷及其东侧山坡上的两个代表站点 A7494 和 A8154 的温度和风场变化(图 11a, 11b)。图 11b 显示, 05—09 时綦江河谷气温持续下降, 但西南风在 06—08 时持续加大; 其东侧山坡上的降水偏晚, 07—09 时也由弱偏北风逐渐转为了强西南风, 这符合孙继松等(2006)的研究结论。从平面上来看, 在中尺度温度梯度作用下, 07 时綦江河谷冷池的东侧盛行偏西风(图 11k), 这有利于低层气流加速向东侧山坡辐合, 对流 B 在向东北方向移动过程中快速发展, 逐渐形成 M $\beta$ CS。随着地面中尺度辐合线向南伸展(图 11m), 雷暴 B 的南段也逐渐组织发展。在此期间雷暴 B 得以长时间维持的原因主要有两个: 一是北移或下山增强的单体 H 和 I 并入雷暴 B(付丹红和郭学良, 2007); 二是随着雷暴 B 组织化, 08 时綦江河谷及其东侧山坡上出现了大于  $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的强降水(图 11e), 这导致冷池加强且东扩(图 11l), 尽管东坡上的温度有所降低, 但它们间的位温梯度仍然存在, 从而迫使东坡近地表的西南风速持续加强, 如南门站(A8154) 09 时风速增加到  $9.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 11b), 从而地形辐合增强。高空引导气流偏弱, 雷暴 B 的东段稳定少动, 这最终导致万盛偏南地区产生了大于  $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的极端短时强降水(图 11f)。

09 时后地面冷池进一步加强(图 11m, 11n), 随着极端短时强降水的发生(图 11g, 11h)、不稳定能

量的释放和边界层风垂直切变的减小, 雷暴在发展成熟后, 整体向东移出重庆并逐渐减弱(Weisman and Klemp, 1982; 肖现等, 2015)。

地面中尺度辐合线与强对流天气的发生发展关系密切(Mueller et al, 1993; Wilson and Mueller, 1993; 李青春等, 2011; 王从梅等, 2018)。此次过程中地面中尺度辐合线呈东北—西南走向和缓慢向东南移动的趋势, 生命史约为 5 h。上述分析表明雷暴 B 的位置、形态和持续时间与地面中尺度辐合线基本吻合。下面以图 11a 所示的两个站点 A7487 和 A7494 来分析地面中尺度辐合线的形成及演变情况。A7487 站位于 A7494 站的西北方, 两者相距约 4 km, 降水开始前, 19 日 02—04 时这两个测站都盛行偏南风(图 12), 受綦江北部弱降水导致的冷池南下影响(图 11i), A7487 站于 05 时转为偏北风, 它与 A7494 站之间开始有地面中尺度辐合线形成, 尽管此时这两站的风速很小, 但在对流层低层高湿的不稳定环境中, 轻微的辐合就能触发对流, 06 时 A7487 站已有降水产生(图 11c), 07 时 A7494 站风速明显加强, 增强的辐合导致了 08 时出现大于等于  $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的极端强降水(图 11e)。地面中尺度辐合线维持了 3 h 后(图 12), 19 日 08 时 A7487 站由偏北风转为偏西风, 随着冷池进一步南扩, A7494 站由西南风转为了偏北风, 这促使了地面中尺度辐合线向东向南移动(图 11m, 11n)。

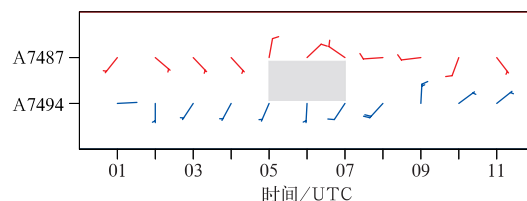


图 12 2019 年 4 月 19 日 01—11 时自动气象观测站 A7487 和 A7494

的逐时风力(风向杆, 单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )时间序列  
(灰色阴影表示这两个测站间地面中尺度辐合线存在的时段)

Fig. 12 Hourly surface wind (wind barbs, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) of A7487 and A7494 automatic weather stations from 0100 UTC to 1100 UTC 19 April 2019  
(Gray shadow indicates the period of time with the surface mesoscale convergence line between the two stations)

## 4 结论与讨论

利用常规观测、地面加密自动站、多普勒雷达、FY-2F 卫星等数据,结合 ERA-Interim  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 再分析资料,对 2019 年 4 月 19 日 00—12 时重庆局地极端短时强降水事件进行了分析,得到以下结论:

(1)这次次极端强降水事件历时短、局地性强、突发性明显,具有显著的中尺度特征。

(2)尽管这次过程天气尺度的垂直运动弱,但重庆偏南地区水汽通量有较明显的辐合且可降水量达到季节性高值,水汽条件充足。“上干下湿”的湿度特征利于大气不稳定层结的增强与维持。

(3)这次次极端短时强降水事件发生在云贵高原与四川盆地过渡地带的綦江河谷附近,地形条件复杂,綦江河谷三面环山,河谷附近地势由西南向东北倾斜。在充足的热力条件下, $\gamma$  中尺度对流在河谷南侧高海拔谷地生成并北移下山发展,其产生的较强降水导致綦江河谷南坡逐渐形成较强的冷池。河谷冷池与其东坡暖区间的强水平温度梯度,有利于近地面西南风增速并在东侧山坡前辐合抬升,促使对流向河谷东坡移动且快速发展为一个孤立的  $M\beta CS$ 。

(4)在近地面中尺度风场辐合线的组织作用下, $M\beta CS$  先后与两个在高海拔地带新生且下山增强的  $\gamma$  中尺度对流合并,河谷内冷池持续增强导致近地面西南气流持续增速,在东侧山体的阻挡和高空弱引导气流作用下,中尺度对流系统得以在綦江河谷东坡上维持 2 h 以上,造成了綦江、万盛局地的极端短时强降水。

复杂地形下,常规的高低空天气分析图上很难捕捉到中小尺度雷暴发生发展的详细过程。根据已有的观测结果,在对流不稳定条件下,我们推测高海拔地带的多个新生对流可能是因山地的热力不稳定而触发。此过程的中尺度特征明显,较低分辨率的全球模式对这类降水的预报能力有限,在今后的日常业务工作中,对此类强降水的预报,预报员应特别关注地形复杂地区的局地中尺度环流以及局地地形影响。考虑到这种中小尺度对流发展机理的困难程度,将来有必要开展高分辨率数值模拟试验,更进一

步验证和探索此过程的发生发展物理机制。

## 参考文献

- 陈明轩,肖现,高峰,2017. 出流边界对京津冀地区强对流局地新生及快速增强的动力效应[J]. 大气科学,41(5):897-917. Chen M X, Xiao X, Gao F, 2017. Dynamical effect of outflow boundary on localized initiation and rapid enhancement of severe convection over Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Chin J Atmos Sci, 41(5):897-917(in Chinese).
- 陈双,王迎春,张文龙,等,2011. 复杂地形下雷暴增强过程的个例研究[J]. 气象,37(7):802-813. Chen S, Wang Y C, Zhang W L, et al, 2011. Intensifying mechanism of the convective storm moving from the mountain to the plain over Beijing Area[J]. Meteor Mon, 37(7):802-813(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,赵宇,牟容,等,2018. 一次西南涡特大暴雨过程中 MCS 的演变特征[J]. 气象科技,46(1):121-128. Deng C Z, Zhao Y, Mu R, et al, 2018. Evolution features of MCS during a torrential rain caused by southwest vortex[J]. Meteor Sci Technol, 46(1):121-128(in Chinese).
- 丁一汇,2005. 高等天气学:第2版[M]. 北京:气象出版社:318-320. Ding Y H, 2005. Advanced Synoptic Meteorology[M]. 2nd ed. Beijing:China Meteorological Press:318-320(in Chinese).
- 范元月,罗剑琴,张家国,等,2020. 宜昌极端短时强降水中小尺度对流系统特征分析[J]. 气象,46(6):776-791. Fan Y Y, Luo J Q, Zhang J G, et al, 2020. Characteristics analysis of mesoscale convective system causing the extreme flash rain in Yichang[J]. Meteor Mon, 46(6):776-791(in Chinese).
- 付丹红,郭学良,2007. 积云并合在强对流系统形成中的作用[J]. 大气科学,31(4):635-644. Fu D H, Guo X L, 2007. The role of cumulus merger in a severe mesoscale convective system[J]. Chin J Atmos Sci, 31(4):635-644(in Chinese).
- 康岚,冯汉中,屠妮妮,等,2008. 一次川渝大暴雨的中尺度分析[J]. 气象,34(10):40-49. Kang L, Feng H Z, Tu N N, et al, 2008. Mesoscale analysis of a torrential rain in Sichuan and Chongqing [J]. Meteor Mon, 34(10):40-49(in Chinese).
- 雷蕾,孙继松,魏东,2011. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J]. 气象,37(2):136-141. Lei L, Sun J S, Wei D, 2011. Distinguishing the category of the summer convective weather by sounding data in Beijing[J]. Meteor Mon, 37(2):136-141(in Chinese).
- 李青春,苗世光,郑祚芳,等,2011. 北京局地暴雨过程中近地层辐合线的形成与作用[J]. 高原气象,30(5):1232-1242. Li Q C, Miao S G, Zheng Z F, et al, 2011. Formation and effect of surface convergence line in local rainstorm process of Beijing[J]. Plateau Meteor, 30(5):1232-1242(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:104-113. Liu D, Zhang Y P, Chen G C, et al, 2012. Chongqing Weather Forecast Technical Manual [M].

- Beijing: China Meteorological Press; 104-113 (in Chinese).
- 刘婷婷, 苗春生, 张亚萍, 等, 2014. 多普勒雷达风场反演技术在西南涡暴雨过程中的应用[J]. 气象, 40(12): 1530-1538. Liu T T, Miao C S, Zhang Y P, et al, 2014. Application of Doppler radar wind field retrieval technique to southwest vortex rainstorm process[J]. Meteor Mon, 40(12): 1530-1538 (in Chinese).
- 卢萍, 李建, 李英, 2014. 重庆 2 次西南涡暴雨过程的类比分析[J]. 暴雨灾害, 33(1): 34-40. Lu P, Li J, Li Y, 2014. Analogy on the two cases of southwest vortex rainstorms in Chongqing[J]. Torr Rain Dis, 33(1): 34-40 (in Chinese).
- 马禹, 王旭, 陶祖钰, 1997. 中国及其邻近地区中尺度对流系统的普查和时空分布特征[J]. 自然科学进展, 7(6): 701-706. Ma Y, Wang X, Tao Z Y, 1997. Geographic distribution and life cycle of mesoscale convective system in China and its vicinity[J]. Prog Nat Sci, 7(6): 701-706 (in Chinese).
- 孟晓文, 隆霄, 周国兵, 等, 2017. 同化常规资料对重庆地区一次暴雨过程的数值模拟研究[J]. 暴雨灾害, 36(4): 309-318. Meng X W, Long X, Zhou G B, et al, 2017. Numerical simulation analysis on conventional data assimilation for a rainstorm in Chongqing [J]. Torr Rain Dis, 36(4): 309-318 (in Chinese).
- 孙继松, 戴建华, 何立富, 等, 2014. 强对流天气预报的基本原理与技术方法[M]. 北京: 气象出版社; 51, 74. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. Fundamental Theory and Technical Methods for Severe Convective Weather Forecasting[M]. Beijing: China Meteorological Press; 51, 74 (in Chinese).
- 孙继松, 王华, 王令, 等, 2006. 城市边界层过程在北京 2004 年 7 月 10 日局地暴雨过程中的作用[J]. 大气科学, 30(2): 221-234. Sun J S, Wang H, Wang L, et al, 2006. The role of urban boundary layer in local convective torrential rain happening in Beijing on 10 July 2004[J]. Chin J Atmos Sci, 30(2): 221-234 (in Chinese).
- 孙继松, 杨波, 2008. 地形与城市环流共同作用下的  $\beta$  中尺度暴雨[J]. 大气科学, 32(6): 1352-1364. Sun J S, Yang B, 2008. Meso- $\beta$  scale torrential rain affected by topography and the urban circulation[J]. Chin J Atmos Sci, 32(6): 1352-1364 (in Chinese).
- 孙靖, 程光光, 2017. 北京城区热力条件对雷暴下山后强度的影响[J]. 高原气象, 36(1): 207-218. Sun J, Cheng G G, 2017. Influence of thermal and dynamical conditions over Beijing City area on strength of down-to-hill thunderstorms[J]. Plateau Meteor, 36(1): 207-218 (in Chinese).
- 孙明生, 高亭亨, 孙继松, 等, 2012. 北京地区暴雨、强对流天气分析与预报技术[M]. 北京: 气象出版社; 32-54. Sun M S, Gao S T, Sun J S, et al, 2012. Analysis and Forecast Technology of Rainstorm and Strong Convective Weather in Beijing[M]. Beijing: China Meteorological Press; 32-54 (in Chinese).
- 孙一听, 2012. 重庆“5.6”强对流过程动力学分析[D]. 南京: 南京大学. Sun Y X, 2012. Dynamic analysis of the Chongqing severe convection event on 6 May 2010[D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese).
- 王从梅, 俞小鼎, 刘瑾, 等, 2018. 弱天气尺度背景下太行山极端短时强降水预报失败案例剖析[J]. 气象, 44(1): 107-117. Wang C M, Yu X D, Liu J, et al, 2018. Analysis of a forecast failure case of extreme flash-rain under weak synoptic-scale background in Taihang Mountain[J]. Meteor Mon, 44(1): 107-117 (in Chinese).
- 王福侠, 俞小鼎, 王宗敏, 等, 2014. 河北暴雨的多普勒天气雷达径向速度特征[J]. 气象, 40(2): 206-215. Wang F X, Yu X D, Wang Z M, et al, 2014. Characteristics of Doppler radar velocity field in severe rainstorms in Hebei[J]. Meteor Mon, 40(2): 206-215 (in Chinese).
- 王中, 陈艳英, 2007. 触发重庆山洪灾害的典型环流和影响系统分析[J]. 高原气象, 26(3): 609-614. Wang Z, Chen Y Y, 2007. Analyses on major effect systems and typical atmospheric circulation triggering mountain torrential disasters in Chongqing[J]. Plateau Meteor, 26(3): 609-614 (in Chinese).
- 肖现, 陈明轩, 高峰, 等, 2015. 弱天气系统强迫下北京地区对流下山演变的热动力机制[J]. 大气科学, 39(1): 100-124. Xiao X, Chen M X, Gao F, et al, 2015. A thermodynamic mechanism analysis on enhancement or dissipation of convective systems from the mountains under weak synoptic forcing[J]. Chin J Atmos Sci, 39(1): 100-124 (in Chinese).
- 徐琨, 毕宝贵, 湛芸, 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).
- 徐姝, 东高红, 熊明明, 2019. 冷池对引发新乡“7·9”特大暴雨的中尺度对流系统的影响分析[J]. 气象, 45(10): 1426-1438. Xu S, Dong G H, Xiong M M, 2019. Impact of cold pool on mesoscale convective system for extreme rainfall over Xinxiang on 9 July 2016[J]. Meteor Mon, 45(10): 1426-1438 (in Chinese).
- 俞小鼎, 2013. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害, 32(3): 202-209. Yu X D, 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain[J]. Torr Rain Dis, 32(3): 202-209 (in Chinese).
- 曾智琳, 湛芸, 朱克云, 2019. 2017 年 6 月一次华南沿海强降水的对流性特征及热动力机制研究[J]. 大气科学, 43(6): 1295-1312. Zeng Z L, Chen Y, Zhu K Y, 2019. Convective characteristics and thermal dynamic mechanisms for coastal torrential rainfall over South China during June 2017[J]. Chin J Atmos Sci, 43(6): 1295-1312 (in Chinese).
- 张楠, 何群英, 刘彬贤, 等, 2018. 非典型环流形势下天津一次局地暴雨过程中尺度特征分析[J]. 暴雨灾害, 37(3): 230-237. Zhang N, He Q Y, Liu B X, et al, 2018. Analysis on the mesoscale characteristics of a local rainstorm event under atypical circulation situation in Tianjin[J]. Torr Rain Dis, 37(3): 230-237 (in Chinese).
- 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎, 2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象, 43(6): 641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D, 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. Meteor Mon, 43(6): 641-652 (in Chinese).
- 周国兵, 沈桐立, 韩余, 2006. 重庆“9·4”特大暴雨天气过程数值模拟分析[J]. 气象科学, 26(5): 572-577. Zhou G B, Shen T L, Han Y, 2006. Numerical simulation analysis of a heavy rainfall in Chongqing area on 4 September 2004[J]. Sci Meteor Sin, 26(5): 572-577 (in Chinese).
- Brooks H E, Lee J W, Craven J P, 2003. The spatial distribution of



- severe thunderstorm and tornado environments from global re-analysis data[J]. *Atmos Res*, 67-68: 73-94.
- Doswell III C A, 2001. Severe convective storms—an overview[J]. *Meteor Monogr*, 28(50): 1-26.
- Lin P F, Chang P L, Jou B J D, et al, 2011. Warm season afternoon thunderstorm characteristics under weak synoptic-scale forcing over Taiwan Island[J]. *Wea Forecasting*, 26(1): 44-60.
- Luo Y L, Wu M W, Ren F M, et al, 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China[J]. *J Climate*, 29(24): 8703-8719.
- Mueller C K, Wilson J W, Crook N A, 1993. The utility of sounding and mesonet data to nowcast thunderstorm initiation[J]. *Wea Forecasting*, 8(1): 132-146.
- Orlanski L, 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 56: 527-530.
- Wang C C, Chen G T J, Nagi C H et al, 2018. Case study of a morning convective rainfall event over southwestern Taiwan in the Mei-Yu season under weak synoptic conditions[J]. *J Meteor Soc Japan*, 96(5): 461-484.
- Weckwerth T M, Parsons D B, 2006. A review of convection initiation and motivation for IHOP\_2002[J]. *Mon Wea Rev*, 134(1): 5-22.
- Weisman M L, Klemp J B, 1982. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy[J]. *Mon Wea Rev*, 110(6): 504-520.
- Wilson J W, Mueller C K, 1993. Nowcasts of thunderstorm initiation and evolution[J]. *Wea Forecasting*, 8(1): 113-131.
- Wu M W, Wu C C, Yen T H et al, 2017. Synoptic analysis of extreme hourly precipitation in Taiwan during 2003-12[J]. *Mon Wea Rev*, 145(12): 5123-5140.