

李强,王秀明,张亚萍,等,2019.一次副高影响下的局地强风暴触发及维持机制探析[J].气象,45(2):203-215. Li Q,Wang X M,Zhang Y P, et al,2019. Analysis and explanation on triggering and maintaining mechanism of a localized severe storm under the influence of subtropical high[J]. Meteor Mon,45(2):203-215(in Chinese).

一次副高影响下的局地强风暴触发及维持机制探析*

李 强^{1,2} 王秀明³ 张亚萍¹ 何 跃¹ 张 勇¹ 黎中菊¹

1 重庆市气象台,重庆 401147

2 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,成都 610072

3 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

提 要: 利用自动站观测资料、FY-2G 卫星资料和多普勒雷达等资料,对发生在副热带高压影响下的重庆局地强风暴过程进行了观测和数值模拟分析,探讨了其中尺度对流系统(MCS)演变,抬升触发和维持机制。结果表明:(1)在副热带高压影响下,重庆处于高温、高湿气团中,大气层结极不稳定;(2)此次局地风暴抬升触发的关键因子是地面附近浅薄边界层中尺度辐合线,辐合线由川渝盆地中西部 MCS 的雷暴高压与重庆地面热低压共同作用形成;(3)中尺度辐合线触发的对流风暴形成小范围冷池流出与环境风场形成新的辐合线,加强对流风暴发展,并再次触发新的对流单体。承载层平均风为偏南风,使得对流单体向北缓慢移动,冷池流出和边界层辐合线共同作用使得风暴单体向西向北传播和长时间维持。

关键词: 西太平洋副热带高压,超级单体,冷池,局地风暴

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.02.006

Analysis and Explanation on Triggering and Maintaining Mechanism of a Localized Severe Storm Under the Influence of Subtropical High

LI Qiang^{1,2} WANG Xiuming³ ZHANG Yaping¹ HE Yue¹ ZHANG Yong¹ LI Zhongju¹

1 Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147

2 Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

3 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on conventional automatic meteorological data, FY-2G satellite data, Doppler radar data and other related data, a localized severe storm under the influence of subtropical high in Chongqing is analyzed and simulated. This paper discusses evolution process of mesoscale convective system (MCS), triggering and maintaining mechanism. The results show that mesoscale environment of high temperature, high humidity air mass and extreme unstable atmospheric stratification conditions were provided under the influence of subtropical high. The triggering key factor of the local convective storm was mesoscale convergence line in shallow boundary near the ground. The convergence line was generated by combined contribution from thunderstorm high pressure of MCS in the central and western Sichuan and Chongqing Basin and the surface thermal low in Chongqing. Small range of cold pool outflow was generated by convective storm triggered by convergence line. A new convergence line was formed by small range of pool generated

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506006)、中国气象局 2017 年预报员专项(CMAYBY2017-060)、高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室开放研究基金项目(SZKT2016004)及重庆市技术创新与应用示范项目(cstc2018jcsx-msyb1270)共同资助

2017 年 7 月 19 日收稿; 2018 年 7 月 9 日收修定稿

第一作者:李强,主要从事数值天气预报研究. Email:cqlqlq@163.com

通信作者:王秀明,主要从事强对流短临预报教学和研究. Email:wangxm@cma.gov.cn

by convective storm triggered by mesoscale convergence line and ground ambient wind, strengthening development of convection storm and triggering new convection cells. The convective cells moved slowly northward under the average south wind in the bearing layer. Thus the cold pool outflow and the boundary convergence lines caused convective cells to propagate northwestward and maintain a long time.

Key words: Western Pacific subtropical high, super cell, cold pool, local storm

引 言

川渝盆地所在的西南地区东部的强对流天气多发生在西南低涡系统影响下,且以强降水为主,大量研究均强调了西南涡在强降水或者强对流中的作用(康岚等,2008;宗志平等,2013;陈永仁和李跃清,2013;杜倩等,2013)。

天气系统分析表明,重庆大范围强降水天气有近 87% 与西南涡相关(江玉华等,2009)。陈贵川等(2013)分析了 2012 年 7 月 21 日西南涡极端强降水的成因,在“北槽南涡”形势下,西南涡两侧冷空气促进气旋式环流的形成,造成强降水超级单体的发展和维持,导致了极端短时强降水。相对而言,川渝盆地在西太平洋副热带高压(以下简称副高)气团影响下的对流风暴发生概率较低,相关研究也较少。副高影响下的对流性天气常发生在西风槽逼近副高西缘、冷暖空气强烈辐合区附近(周淑玲等,2009;肖鹏等,2013),副高西北边缘与西风槽之间形成较强的能量锋区,强对流常发生在强的能量锋区附近(刘还珠等,2007)。顾清源等(2009)认为低空急流对副高西北侧强降水具有触发作用。陈贵川等(2011)对重庆“5·6”强风雹分析指出,冷锋和副热带高空急流在风雹发生地近乎重叠的配置结构促进了次级环流的形成并有利于上升运动的强烈发展。副高影响之下,气团常常高温高湿、大气层结极不稳定,对流性天气具有突发性、局地性特点,短期时段预报极具挑战,短时时段其难点在于抬升触发机制。

地面中尺度辐合线与对流天气的发生、发展关系非常密切,对局地强对流具有触发、组织和增强作用(王华和孙继松,2008;祁东平等,2008;郑祚芳等,2009;谌芸等,2012);同时,地面中尺度辐合线形成物理过程及其对雷暴活动的影响亦非常复杂,辐合线可以触发对流,对流系统也可以激发新的地面辐合线。代刊等(2010)对北京一次雷暴过程分析表明,城市热岛效应形成的地面辐合线,以及地形辐合抬升形成的边界层扰动,使得移入北京的对流系统

再度发展成为强对流,造成北京城区强降水;此后,强对流系统地面高压流出气流与山风形成新的地面辐合线,从而诱发新的对流系统。王丽荣等(2013)研究指出,地面辐合线不会直接触发对流,只有在有利的天气系统配合下,才会产生较为强烈的对流天气,且无论何种类型的辐合线,对流天气首先出现在辐合线附近。近地面冷池是对流风暴另一个重要的边界层特征。Wakimoto(1982)、Mueller and Carbone(1987)的观测分析研究表明,对于大多数风暴来说,其传播速度由风暴产生的冷池移动速度控制,从而影响整个风暴系统的移动速度,因为新的风暴单体极易被冷池前沿的阵风锋触发。Droegemeier and Wilhelmson(1985;1987)数值模拟试验证明,如果存在低层风切变,近地面冷池能够触发其前沿暖空气产生较强的垂直上升运动,有利于触发新的风暴单体。张文龙等(2014)对北京发生雷暴群形式的研究指出,一定强度的冷池出流、边界层前期的暖湿空气和对流不稳定能量的积累,是冷池出流触发雷暴新生和演变的必要条件。张家国等(2015)对一次极端强降水型中尺度对流系统特征分析表明,雷暴冷下沉气流在近地面形成冷池,冷池的运动又引起雷暴的新生和发展,冷池向上风方运动导致对流单体后向传播,是指状对流云团形成的重要机制。

2016 年 7 月 31 日 14—20 时,重庆位于副高 588 dagpm 线(以下简称 588 线)控制下出现了一次局地强风暴过程,且影响主城区时为风暴最强烈阶段,突发的强对流对人口密度高的主城区造成了较大影响,引起了社会的强烈反响。由于当日副高加强西伸控制了重庆大部分地区,一般而言,副高西伸,其阻塞作用使得西侧西风槽不能东移而影响重庆,且有组织的风暴出现的概率下降。在短期预报时效上因不具备抬升触发对流的中尺度系统而漏报,短时临近时段仅发布了雷电和短时强降水预警,漏报了大风和冰雹。对此次副高影响下的可预报性较差的强对流天气,文章先分析了强对流产生中尺度环境条件,然后基于卫星和雷达产品给出 MCS 演变过程,重点研究了初始对流的抬升触发机制及

风暴在主城区强烈发展的物理过程。

1 研究方法 with 资料

ARPS (The Advanced Regional Prediction System) 模式系统是美国俄克拉荷马大学风暴分析和预测中心研发的非静力高分辨率的非静力中尺度数值模式。其三维变分资料同化系统(3DVAR)能够处理地面观测、雷达反射率和径向风等数据,其中的复杂云分析模块是基于局地分析和预报系统(Local Analysis and Prediction System) (Zhang, 1999)的云分析方案构造的。它可以利用雷达、卫星等非常规观测资料进行物理量反演并进行三维云分析,构建一个高分辨率的三维云场和水凝物场。通过湿绝热或非绝热初始化方法对温度场、湿度场和风场等物理量场进行调整,不仅补充了初始场的湿度信息,而且还根据云中水汽凝结释放潜热的加热作用调整初始热力场,为模式提供一个更合理的初始场,使模式实现“热启动”,从而缩短模式的“spin-up”时间(盛春岩等,2006;王叶红等,2012),进而能够模拟出初始对流的过程。大量的研究者把地面自动站观测和多普勒雷达基数据应用到改进数值预报初始场中(Xue et al, 2001; 2003; Gao et al, 2001; 2004; 徐枝芳等, 2007a; 2007b), 提高了对中小尺度天气系统的预报和模拟能力,改善短时降水范围、强度和降水中心的预报效果。在多次超级单体风暴、飑线、龙卷等中小尺度风暴模拟中都取得了比较好的效果(Schenkman et al, 2011a; 2011b; Xue et al, 2014)。

研究所采用的资料包括常规地面自动站观测,沙坪坝和宜宾站探空(站点位置见图1),FY-2G 卫星红外和永川 SA 雷达, $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ NCEP 再分析资料等。在同化雷达资料和地面资料之前进行了资料的质量控制。利用 ARPS-3DVAR 同化了地面观测和雷达资料,再利用 WRF-ARW 进行模拟预报试验,探讨对流风暴触发和维持机制。试验中利用中尺度数值预报最内层 3 km 预报场,为风暴尺度 3 km 同化分析提供初始背景场和边界条件,网格格点数为 481×361 , 试验区域中心位于: $29.8^{\circ}N$ 、 $106.3^{\circ}E$, 垂直层均为 51 层。风暴尺度预报试验采用的物理参数化方案:Thompson 微物理过程方案;MYJ 边界层方案;RRTM 长波辐射方案和 RRTM 短波辐射方案;Noah 陆面过程方案,不使用积云参数化方



图1 探空站,雷达站和重庆区县自动站分布图

(Δ : 宜宾和沙坪坝探空站位置;
□: 永川雷达位置)

Fig. 1 Distribution of sounding station, radar station and automatic weather stations in Chongqing

(Δ : the location of sounding stations,
□: location of Yongchuan Radar Station)

案。WRF 模拟预报试验模式积分时间为 7 月 31 日 14—20 时,利用试验结果研究此次局地强风暴触发和长时间维持成因。

2 大气环流及天气实况分析

从主城区杨家坪站和陈家坪站 10 min 雨量、温度和极大风速变化上(图 2),降水峰值均出现在 17:30 左右,18:30 降水明显减弱,强降水持续时间约 1 h,其中陈家坪站峰值较杨家坪站降水峰值大。降水发生后温度骤降,接近 $10^{\circ}C$,且在降水发生前地面风已明显增大,如杨家坪站 17 时极大风达 $16 m \cdot s^{-1}$ 。此次强风暴天气过程范围集中,影响时间短,且同时伴随有多种灾害性强对流天气特征。主城区强降水大于 25 mm 以上区域仅 $10 km^2$ 左右,具有明显的 γ 中尺度特征,重庆主城区局地风暴主要影响时间仅 1.5 h(16:30—18:00),有短时强降水、大风和冰雹,具有灾害性天气突发性和种类多的特点。

在 08 时的 500 hPa 环流上(图 3c),副高 588 线控制了华东和华南大部分地区,西端脊线伸展至贵州中部地区,大陆高压控制了西北东部地区,两个高压之间的切变线从甘肃南部经过川渝盆地延伸至四川南部。08—14 时的 6 h 25 mm 以上强降水位于川渝盆地西部和北部地区(图 3a,散点),主要为受两高之间的切变线影响产生的强降水,而重庆西部边缘主要为 1 mm 以下的弱降水。14 时(图 3d)

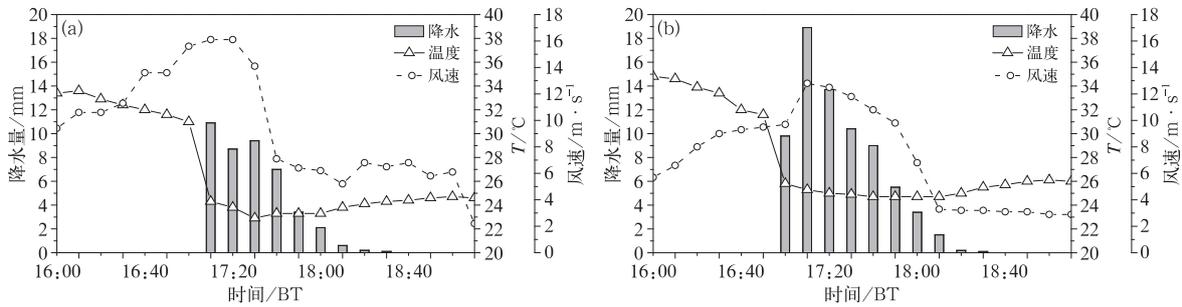


图 2 2016 年 7 月 31 日 16:00—19:10 杨家坪站(a)、陈家坪站(b)10 min 间隔雨量、温度和极大风速演变

Fig. 2 Precipitation, temperature and maximum wind velocity with 10 min interval at (a) Yangjiaping and (b) Chenjiaping stations during 16:00—19:10 BT 31 July 2016

副高中心 592 dagpm 线控制范围增大,控制了长江中下游大部分地区,588 线西进明显,位于贵州中部的 588 线西伸至云南中部地区,北侧 588 线与大陆高压相连,且两高之间切变线有所西进,位于川渝盆地西部,重庆大部分地区为副高 588 线影响。14—20 时川渝盆地降水范围明显减小(图 3a,等值线),25 mm 以上的降水区分为两处,一处位于重庆以北的四川东北角,另一处位于重庆西部,集中在重庆主城区附近 50 km² 范围内。14—20 时(图 3b)重庆主城区和巴南区出现了 17 站次小时雨强 20 mm · h⁻¹ 以上的短时强降水,最大小时强降水发生在杨家坪站(60.9 mm);出现了 7 站次 ≥17 m · s⁻¹ 瞬时大风,15 时万盛本站出现 9 级瞬时大风,风速达 24.4 m · s⁻¹,17:10 主城区陈家坪站出现 16.1 m · s⁻¹ 瞬时大风。根据雷达监测,16:55 主城区九龙坡地区为局地强风暴发展为最强时段,根据目击者见证,该地区同时也有伴随着冰雹发生。

3 中尺度环境条件

14 时,与 500 hPa 切变线对应,700 hPa 上低涡切变线从四川九龙伸展到川渝盆地中部位置,850 hPa 上切变线位于川渝盆地北部(图略),重庆上空无明显中低层影响系统,重庆大部分地区受副高气团影响,大气层结极不稳定。由表 1,重庆沙坪坝探空站 08 时对流有效位能(CAPE)已超过 2000 J · kg⁻¹,且从 08—14 时 CAPE 显著增加,14 时接近 4000 J · kg⁻¹,SI 指数为 -3.88 °C。另一方面,14 时沙坪坝和宜宾探空站对流抑制(CIN)为零,自由对流高度低(500 m 以下),雷暴极易触发,出现午

后分散对流概率较大。700 和 850 hPa 重庆上空维持高湿($T_d \geq 18^\circ\text{C}$),K 指数达 42 °C,低层高湿且湿层深厚,有利于短时强降水产生。宜宾位于沙坪坝站西南侧,08—14 时未出现强降水,其大气层结亦不稳定,但其 CAPE 值远小于重庆。08 和 14 时,两站风垂直切变均在 12 m · s⁻¹ 以下,为弱的风垂直切变。在这种在低层高温高湿、大气层结极不稳定且风垂直切变弱的环境下,有组织的风暴出现的概率下降,增加了强风暴预报预警难度,由于 CAPE 大,有可能出现的强风暴为脉冲风暴,造成短时强降水及非常局地的大风。重庆 500 hPa 附近干冷空气不明显,850 hPa 与 500 hPa 温差为 25 °C,不是典型的上干下湿的“喇叭口”型湿下击暴流探空。

4 中尺度对流系统触发和维持机制

4.1 观测中尺度对流分析

14 时 FY-2G 卫星红外显示分散对流在重庆中部涪陵区生成(图 4a),永川雷达 14:11 组合反射率因子(图 4g)上有 3 个对流单体,一个位于涪陵区西部(直径约 30 km),一个位于南川区西北部(直径约 25 km),一个位于綦江区东部(直径约 18 km),此时三个对流单体中心反射率因子均达 50 dBz,整体上呈南北向排列,主要以雷电和弱的阵性降水天气为主,中尺度对流系统组织特征表现为分散的一般单体雷暴。15 时(图 4b)云图上重庆涪陵区的雷暴逐渐发展呈狭长的南北向对流云团,16 时(图 4c)由南到北贯穿重庆中西部地区,云顶亮温中心强度小于 -52 °C。而此时重庆以北的四川和重庆以南的

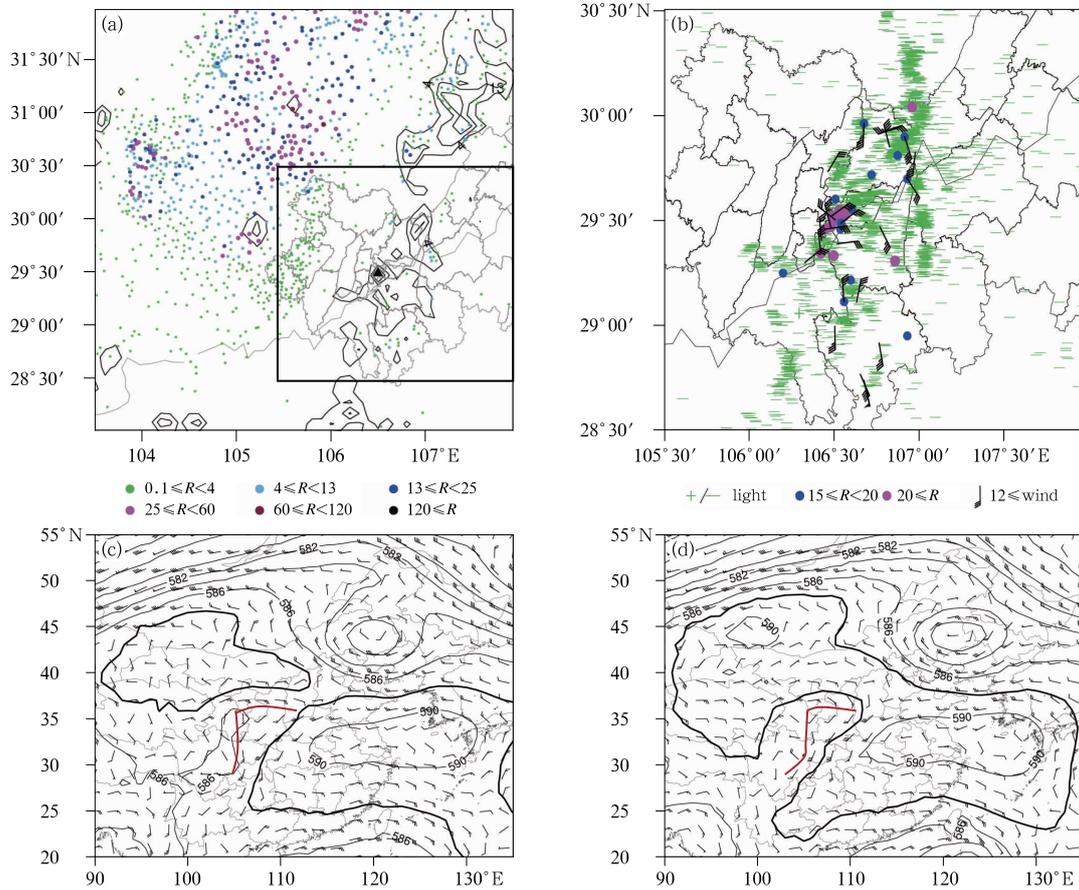


图 3 2016 年 7 月 31 日 08—14 时(散点)和 14—20 时(等值线)6 h 降水实况(a, 单位: mm;

▲: 杨家坪和陈家坪站位置, 方框表示图 3b 空间范围和强对流天气监测(b,

正负号: 雷电, 圆点: 不同阈值短时强降水, 风羽: 瞬时阵风),

08 时(c)和 14 时(d)500 hPa 风场(单位: $m \cdot s^{-1}$)

和高度场(单位: dagpm, 加粗等值线: 588 dagpm, 红色线: 切变)

Fig. 3 (a) The 6 h precipitation observation (unit: mm) of automatic weather stations during 08:00–14:00 BT (scattered) and 14:00–20:00 BT (contour line) 31 July 2016 (unit: mm, ▲: the location of Yangjiaping and Chenjiaping stations), and (b) severe convective weather monitoring at Chongqing Station during 14:00–20:00 BT; the 500 hPa wind field (unit: $m \cdot s^{-1}$) and geopotential height (unit: dagpm) at 08:00 BT (c) and 14:00 BT (d) 31 July 2016 (black solid lines: 588 dagpm geopotential height lines, red line: shear)

表 1 沙坪坝站(57516)和宜昌站(56492)探空指数

Table 1 Sounding indexes for Shapingba and Yinbi stations

站名	时间/BT	CAPE / $J \cdot kg^{-1}$	K 指数/ $^{\circ}C$	SI 指数 / $^{\circ}C$	CIN / $J \cdot kg^{-1}$	$T_{850-500}$ / $^{\circ}C$	自由对流 高度/hPa	0~6 km 垂直 切变/ $m \cdot s^{-1}$
沙坪坝 (57516)	08:00	2167.4	40.3	-1.61	65.8	26	754.2	11.70
	14:00	3722.6	42.0	-3.88	0	25	944.9	10.32
	20:00	706.5	40.3	-1.7	347	28	592.7	6.73
宜宾 (56492)	08:00	519.7	40.9	-4.01	150.7	24	624.1	8.37
	14:00	1674.0	36.0	-2.12	0	23	967.9	7.25
	20:00	2467.5	40.6	-2.36	0	24	964.9	4.50

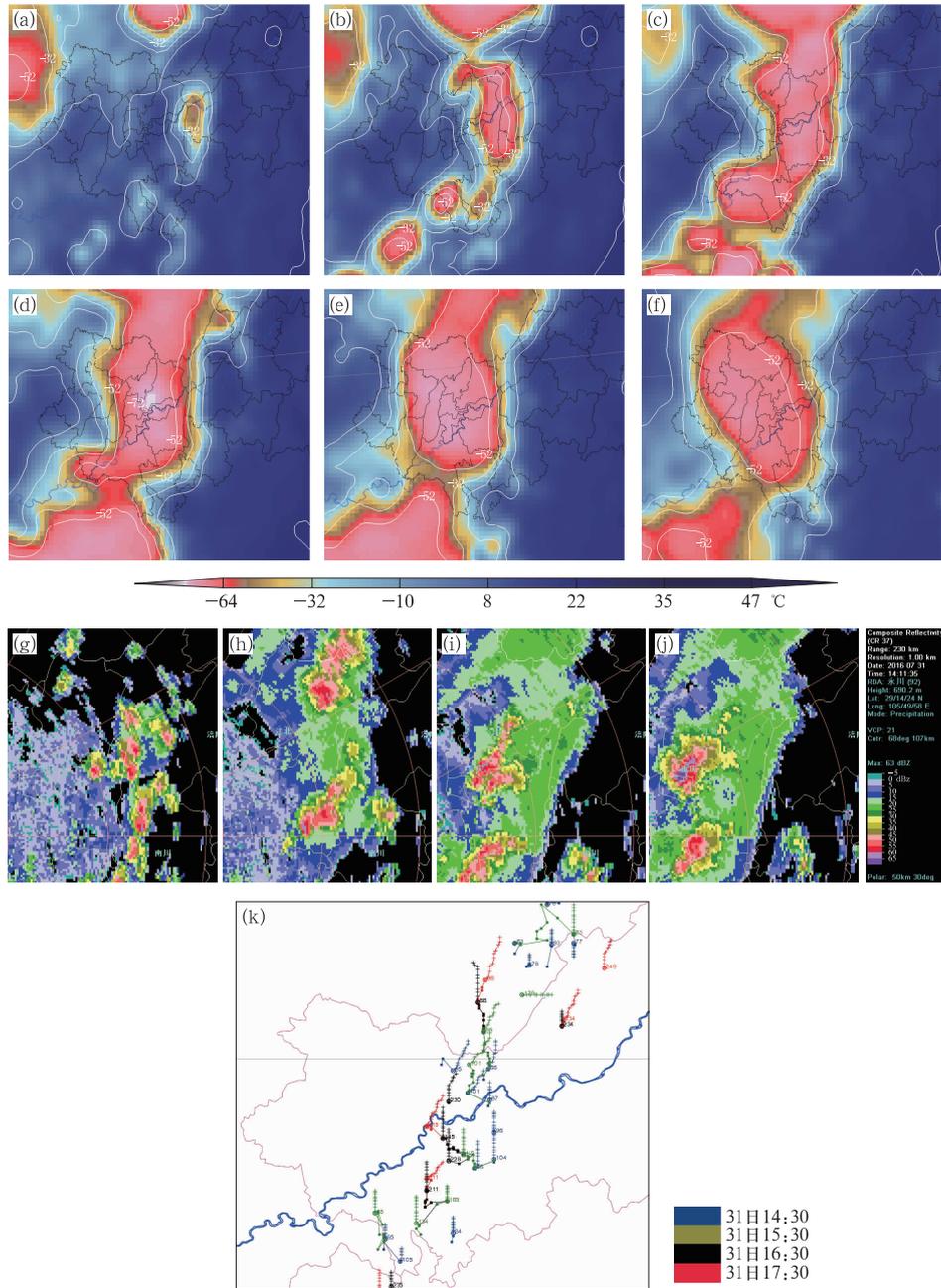


图 4 2016 年 7 月 31 日 14—19 时 FY-2G 卫星 IR1 通道 TBB 云图(a~f),

永川雷达组合反射率因子(g~j,单位:dBz)和回波跟踪(k)

(a)14:00,(b)15:00,(c)16:00,(d)17:00,(e)18:00,(f)19:00,(g)14:11,(h)15:27,(i)16:37,(j)16:55

Fig. 4 The FY-2G satellite IR1 channel and TBB images (a~f), composite reflectivity (g~j, unit: dBz)

and echo tracking (k) of Yongchuan Radar during 14:00—19:00 BT 31 July 2016

(a) 14:00 BT, (b) 15:00 BT, (c) 16:00 BT, (d) 17:00 BT, (e) 18:00 BT,

(f) 19:00 BT, (g) 14:11 BT, (h) 15:27 BT, (i) 16:37 BT, (j) 16:55 BT

贵州亦有雷暴发展,随后贵州、重庆和四川东北部的对流云团发展为一条南北向的对流云带。15:27(图 4h)南北向分散的单体雷暴并未继续发展成飑线,而发展成两个 β 中尺度对流单体,北部对流单体

位于渝北区与长寿区交界处,回波中心强度达 55 dBz,南部对流单体位于巴南区东南部地区,中心强度也达 55 dBz 以上,此时强对流天气以短时强降水和雷电天气为主,MCS 组织特征表现为普通单体

线状向团状发展。17 时(图 4d) $\leq -52^{\circ}\text{C}$ 对流云团空间范围进一步扩大控制了重庆西部大部地区, TBB 也发展到最强(中心值 $\leq -72^{\circ}\text{C}$), 16: 37 (图 4i) 雷达上位于重庆渝北区的对流单体已减弱成层状云回波并移出重庆, 而巴南区对流单体向北偏西方向移动至主城区上, 并进一步发展。16: 55 (图 4j) 主城的对流单体进一步增强, 发展为超级单体, 中心强度达 65 dBz 以上, 重庆主城灾害性强对流天气发生在这一时段, 回波顶高(ET)达 15 km, 垂直累积液态水含量值(VIL)达 $60\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (图略)。 0.5° 、 1.5° 和 6.0° 仰角雷达反射率因子和速度图上(图 5), 具有钩状回波, 弱回波区和强回波反射率因子位于弱回波之上的特征。平均径向速度图上(图 5e、图 5f, 0.5° 和 1.5° 仰角)出现了中反气旋, 1.5° 仰角上, 中反气旋离开雷达速度中心为 $23\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 朝向雷达速度中心为 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 为中等强度中气旋。此超级单体持续了 3 个体扫, 造成了主城区杨家坪附近的短时强降水、大风和冰雹强

对流天气。18 时(图 4e)重庆上空的 MCS 已经减弱, TBB 中心强度较前一个时刻减弱, 50 dBz 以上范围也明显减小, VIL 为 $30\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 由于南部有新生单体并入, 重庆 MCS 还继续存在了一个多小时。14—18 时回波跟踪路径上(图 4k), 对流单体由南向北移动缓慢。

在 13 时地面图上(图 6a), 川渝盆地降水区气压明显高于周围地区, 同时形成呈南北走向的温度相对低值区($\leq 24^{\circ}\text{C}$), 此时重庆大部为相对暖的低压区, 在气压梯度力的作用下, 在等温线密集带上形成了明显的西北风。14 时(图 6b)川渝盆地中部仍有弱降水, 低温带仍维持, 重庆中西部为多云到晴的天气, 地面增温明显, 温度梯度仍维持; 增温作用下热低压进一步发展, 气压梯度带也仍维持, 等温线密集带上的北风维持, 暖低压区风相对较弱, 且以偏东南风为主, 因而形成大致为南北走向穿过重庆西部主城区的边界层中尺度辐合线(图 6 中虚线), 同时热低压发展, 使得辐合线有所加强。14 时, 多个

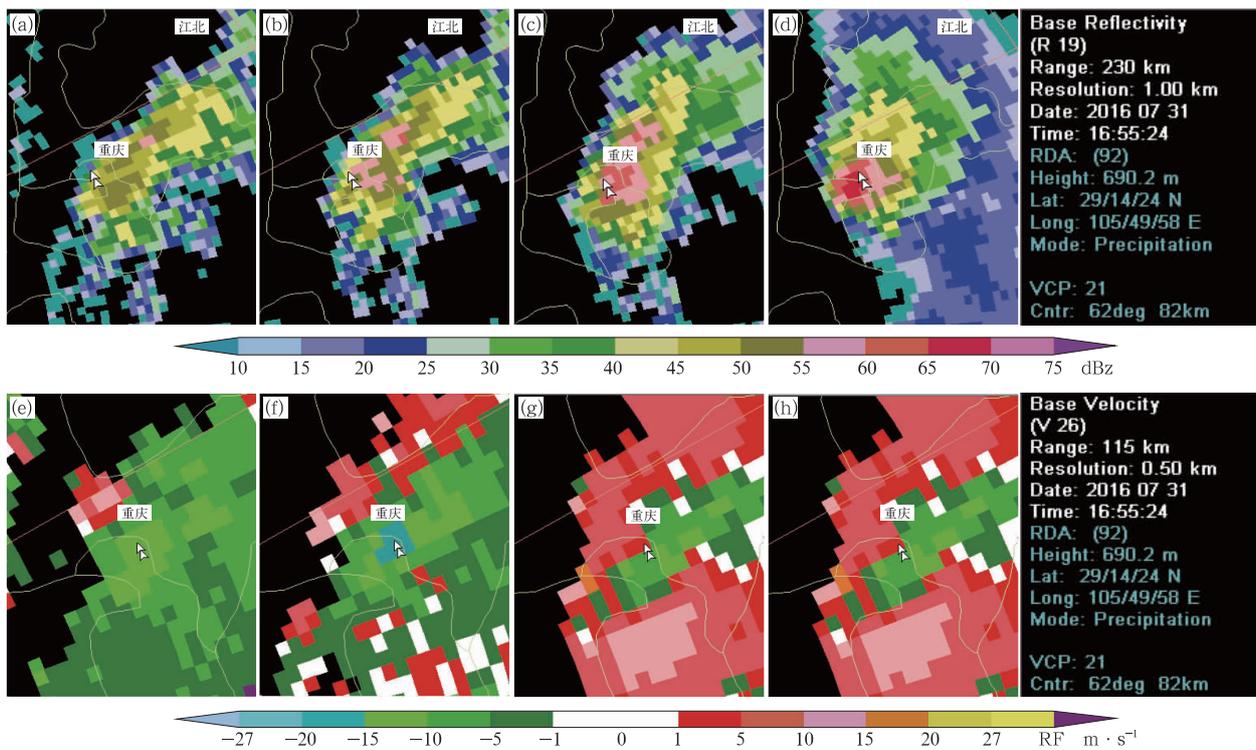


图 5 2016 年 7 月 31 日 16:55 时永川雷达反射率因子(a, b, c, d; 0.5° 、 1.5° 、 3.4° 和 6.0° 仰角)、平均径向速度(e, f, g, h) (图中双箭头表示主城区风暴发生位置)

Fig. 5 Radar reflectivity (R, a, b, c, d, 0.5° , 1.5° , 3.4° and 6.0° elevation angles) and mean radial velocity (V, e, f, g, h) plane position image (PPI) at 16:55 BT 31 July 2016 (Double arrows indicate the location of severe storm)

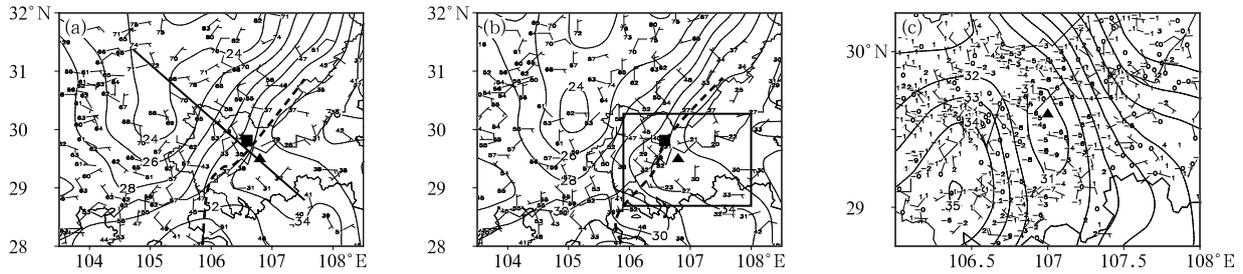


图 6 2016 年 7 月 31 日 13 时(a)和 14 时(b)自动站地面实况

(等值线:温度,单位: $^{\circ}\text{C}$;图上数值表示自动观测站气压,单位:hPa;风羽表示 10 min 平均风,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

▲:对流初始位置,■:后续对流发展位置,虚曲线:地面辐合线,粗实线:图 9 空间剖面位置,

图中方框表示图 3c 空间范围),15:00(c)重庆地区区域自动站地面实况

(等值线:15 时温度;数值:与 14 时温度差值,单位: $^{\circ}\text{C}$;风羽表示 10 min 平均风,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 Automatic weather station surface analysis at (a) 13:00 BT and (b) 14:00 BT

(digitals: pressure of automatic weather stations, barb: mean wind velocity with 10 min,

▲: the location of initial convection, ■: the location of subsequent convection,

dashed curve lines: mesoscale surface convergence line, thick solid line: cross-sections in Fig. 9);

regional automatic weather station surface analysis at 15:00 BT (c) 31 July 2016

(black solid lines: temperature, unit: $^{\circ}\text{C}$, digitals: temperature difference between 14:00 BT

and 15:00 BT, barb: mean wind velocity with 10 min, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

雷暴单体在辐合线附近被触发,初始雷暴位置位于重庆涪陵区西部地区(图 6 中黑色三角形),即热低压中心附近,在初始雷暴触发生成后,其余雷暴单体也逐渐被触发生成,且雷暴单体沿地面辐合线呈南北向。15 时(图 6c),雷暴沿辐合线进一步发展(图 6a、图 6b 黑色方框),并形成南北向排列的对流风暴带(图 4c),从涪陵区伸展到南川区。14 时雷暴触发初始位置,重庆涪陵区游江村站和长益村站温度分别降低到 25 和 25.4 $^{\circ}\text{C}$,分别较 13 时降温达 13.2 和 10.7 $^{\circ}\text{C}$,15 时雷暴触发后形成了 $\leq 31^{\circ}\text{C}$ (图 6c,等值线)以下冷池温度相对低值区,且随着雷暴的进一步发展,其范围逐渐增大,且温度低值区向南向北扩展,中心最低温度位于南川境内(22.1 $^{\circ}\text{C}$),由 15 与 14 时温度差值分布(图 6c,数值)可见,明显的温度差值负值区,且与 $\leq 31^{\circ}\text{C}$ 以下冷池空间范围较为一致。由辐合线的位置和走向及图 6 给出的对流带可知,后续雷暴依然在辐合线附近触发、发展,形成南北向的对流风暴带与地面辐合线走向位置基本一致,辐合线是带状风暴的组织者。

4.2 模拟和实况对比

从 14 时的 500 hPa 分析场(图 7a)可见,重庆大部分地区为副高 588 线影响,且从重庆西部穿过,与图 3d 实况 588 线位置较一致。副高和大陆高压之间的切变位于川渝盆地西北部地区,与图 3d 实况切

变线位置也较吻合。从 2 m 温度空间分布上,重庆大部分为 32 $^{\circ}\text{C}$ 以上温度高值区,而川渝盆地中部由于降水产生为 26 $^{\circ}\text{C}$ 以下温度相对低值区,这与实况温度(图 6b)的时空分布较一致。从 14—20 时实况和模拟游江村站(图 7b)降水和温度实况和模拟对比上,14 时已经出现降水,模拟也出现降水,而后实况降水逐渐减弱,模拟的降水也呈减弱趋势;从温度时间变化上,由于 14 时游江村站也出现雷暴天气,温度迅速降低至 25 $^{\circ}\text{C}$,模拟的温度也与实况温度较一致。

从同化了地面自动站和雷达分析场与实况对比上,14 时(图 8a)分析场在 107 $^{\circ}\text{E}$ 附近以西主要为西北风,以东主要东南风,形成了西北风与东南风辐合线,且辐合线空间位置与实况的位置较为吻合(图 6);在辐合线作用下,触发了对流单体活动,且单体最大反射率因子达 35 dBz 以上,而后对流单体进一步发展成南北走向对流带,强度和范围明显增大,这与 14:05(图 8c)对流单体的位置和强度较一致。15 时预报的最大反射率因子上(图 8b),对流单体进一步发展,重庆中部地区出现两个强的对流中心,北部对流中心呈东西向,南部呈南北向,强度均达 50 dBz 以上,且对流带与南川区对流单体逐渐相连,整体上南北对流带的结构明显,且外围 5 dBz 回波向西伸展明显;实况上(图 8d)对流也发展呈南北向,强度上,北部的对流中心达到 50 dBz 以上,也

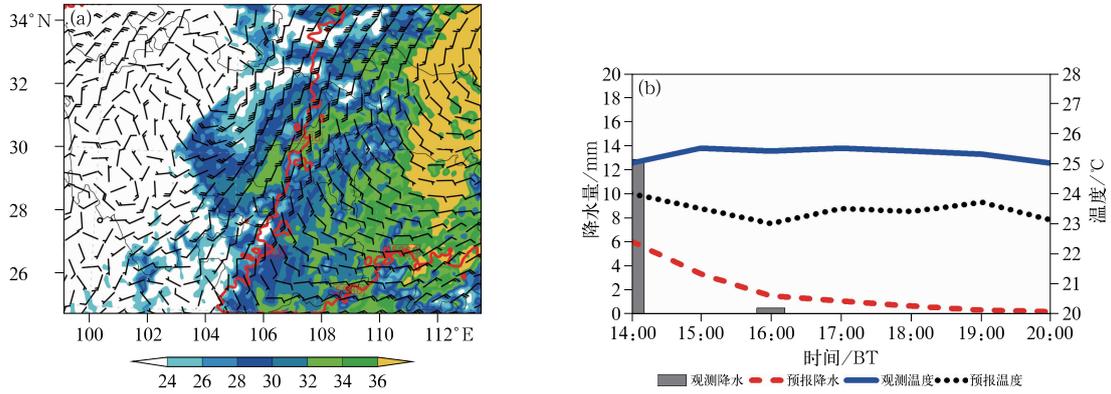


图 7 2016 年 7 月 31 日(a)14 时 500 hPa 位势高度(红色等值线,单位:gpm)、
风场(风羽,单位: $m \cdot s^{-1}$)和 2 m 温度分析场(彩色阴影,单位:°C),
(b)14—20 时游江村站降水、温度实况和模拟

Fig. 7 Geopotential height (red contours, unit: gpm), wind at 500 hPa (barb, unit: $m \cdot s^{-1}$), and 2 m temperature (shaded area, unit: °C) based on analyzed fields at 14:00 BT 31 July (a); observations and simulations of rainfall and temperature in Youjiangchun Station during 14:00—20:00 BT (b) 31 July 2016

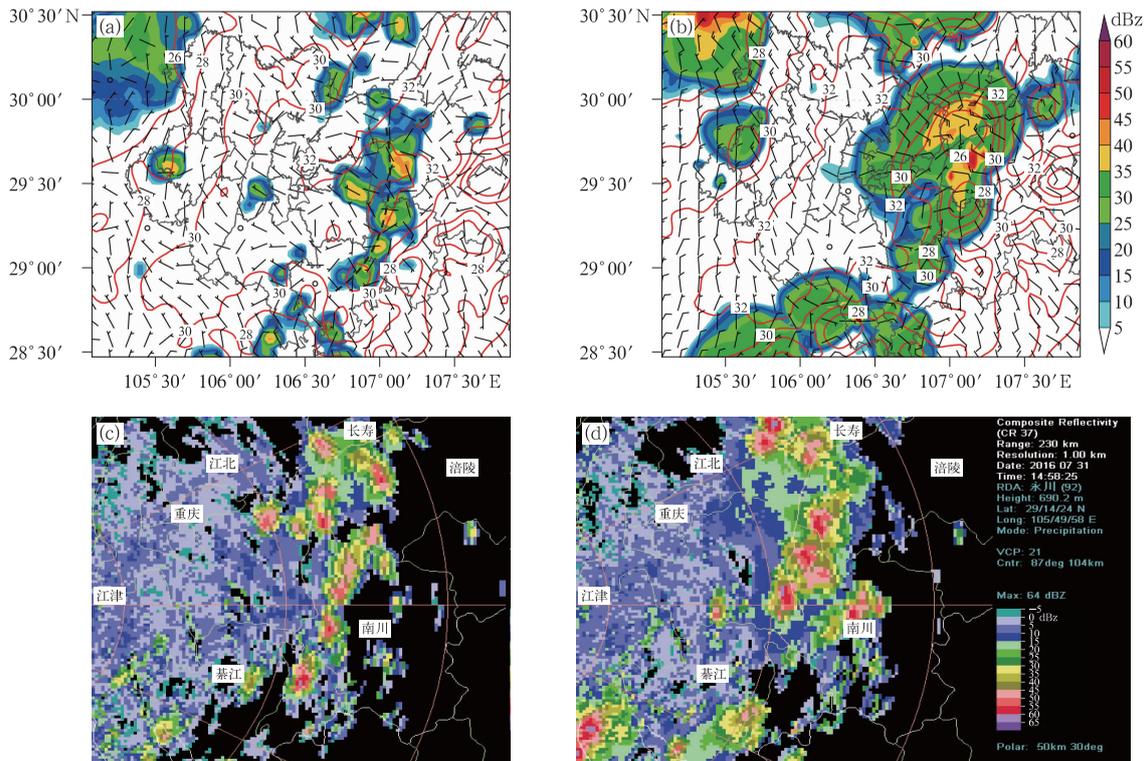


图 8 2016 年 7 月 31 日 14 时分析场(a)和 15 时预报场(b)10 m 地面风场(单位: $m \cdot s^{-1}$)、
2 m 地面温度(红色等值线,单位:°C)和最大反射率因子(阴影),
以及 14:05(c)和 14:58(d)的永川雷达组合反射率因子(单位:dBz)

Fig. 8 Analysis field at 14:00 BT (a) and forecast filed at 15:00 BT (b), the 10 m surface wind (unit: $m \cdot s^{-1}$),
2 m temperature (unit: °C, red solid lines) and maximum radar reflectivity (shaded area)
composite refflevtivity (unit: dBz) of Yongchuan Radar at 14:05 BT (c) and 14:58 BT (d) 31 July 2016

呈现东西向结构,南部也出现了 50 dBz 以上对流中心,呈南北向结构,与预报一致,且从 5 dBz 对流外围伸展空间上,北部向西伸展明显,这与模拟的空间位置较一致。

4.3 基于模拟结果的触发和维持机制分析

由同化了雷达和地面加密自动站的 14 时分析场和 15 时预报场,14 时(图 8a)重庆西部为西北风,而 107°E 以东地区为东南风,形成了在涪陵—南川—綦江地区的地面辐合线,在其作用下,触发了南北向排列的多单体风暴。15 时(图 8b),对流风暴进一步发展,空间水平尺度范围也扩大,且向西向北伸展较明显,涪陵区西部对流中心最大反射率因子达 50 dBz 以上,且与南川区以及綦江区对流单体相连。雷暴触发的冷池空间范围也进一步扩大,且在对流单体中心均有冷中心,涪陵区和南川区的冷中心均为 26°C 以下,而外围温度达 32°C 以上,这与实况的自动站观测(图 6c)一致。在雷暴外围东西两侧,冷池东侧的空间范围扩展到涪陵区中部地区,对流前沿 5 dBz 与冷池空间范围较一致;冷池西侧的空间范围已经扩展到渝北区西部和巴南区西部,且对流前沿 5 dBz 较冷池空间范围向外略伸展,西侧的对流伸展位于冷池外围,而东侧的对流与冷池较为吻合。风场空间分布上,形成了由中心向外出流的风场,即明显的雷暴冷池出流,在其作用下,在冷池东西两侧附近,均有出流的地面辐合线,东侧主要为西北风与东南风的辐合,西侧主要为偏东风与西北风的辐合,且从空间位置上,东侧辐合线与 14 时地面辐合线位置较为一致(107°E 附近),西侧前沿位于 106.5°E 附近。

空间分布上,东侧对流前沿与冷池空间范围较一致,而西侧对流前沿较冷池空间范围向外略伸展。对流风暴在辐合线附近触发后,风暴出流阵风锋有利于触发新对流,但冷池东侧地区(涪陵区东部)为高海拔的山地地形,由于地面温度相对较低,导致与冷池之间的温度梯度较小,且能量条件较差,不利于新生对流发展;而冷池西侧,地面温度高,形成了大的温度梯度区,且具有高不稳定能量,同时风暴出流阵风锋与原边界层中尺度锋区上升气流叠加处更有利于触发强对流,导致了风暴在冷池西侧进一步发展和维持,向西向北方向传播,使得冷池西侧雷暴比东侧发展得更为强烈,伸展范围也更大。

图 9 表示沿图 6a 实线空间剖面,可见 14 时形

成的 1 km 以下向东伸展的相当位温冷舌(红色虚线标注),东侧伸展至 105.5°E 附近,其前沿东侧在 $105.5^{\circ}\sim 106^{\circ}\text{E}$,高度 1.5 km 以下存在一个次级环流(黑色实线标注),次级环流底层主要偏北气流,这与近地面的风场环流较吻合,环流上升支位于 106.5°E 附近,恰好位于雷暴初始触发地附近。由图 6a 和 6b 可知, 105.5°E 四川境内为明显的低温高压区,而重庆境内为高温低压区,形成了明显梯度风,表现为辐合线以西的西北气流,说明雷暴的抬升触发辐合线是由四川境内降水形成的冷高压与东侧重庆境内热低压之间形成的中尺度锋区共同作用。

综上所述,由于环境大气层结极不稳定且对流抑制小,多个对流单体雷暴在边界层中尺度锋区及其伴随的辐合线附近被触发,形成南北向排列的带状风暴,带状风暴上较强的对流单体产生了地面冷池,冷池西侧出流阵风锋与边界层中尺度锋区上升气流叠加,使得冷池前沿触发的雷暴发展和维持,从而使得风暴具有一定空间尺度,且持续了一定时间

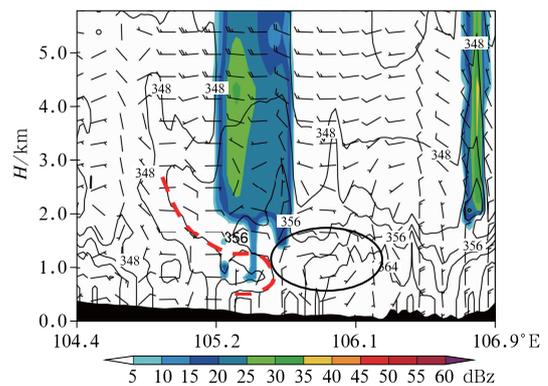


图 9 2016 年 7 月 31 日 14 时沿图 6a 实线空间剖面分析场(红色虚线:冷舌,粗实线:次级环流)雷达反射率(彩色阴影)、风场(风羽,垂直速度增大 10 倍)和相当位温(等值线,单位:K)分布(黑色阴影:地形高度)

Fig. 9 Vertical cross-sections along the black solid line in Fig. 6a (red curve line: cold tongue, thick solid line: secondary circulation), radar reflectivity (colored area), wind barb (vertical speed amplified by 10 times), and equivalent potential temperature (black solid lines, unit: K) at 14:00 BT 31 July 2016 (black shadow: terrain height)

段中尺度对流系统,同时,在副高影响下,承载层平均风为偏南风,引导了对流单体向北向西移动,对流冷池便易于向西传播和发展。

5 结论和讨论

文章分析了发生在副高影响下重庆一次局地强风暴形成原因,包括中尺度环境条件、中尺度对流系统抬升触发及维持发展机制,主要结论如下:

(1) 此次局地强风暴具有水平尺度小、突发性强和灾害种类多特点。在副热带高压加强西伸,副高588线影响下,环境大气层结极不稳定,边界层高温、高湿,CAPE为 $3722.6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,且CIN为0,自由对流高度低,同时低层(925~850 hPa)具有明显风向垂直切变,极有利于对流触发和发生。副高西伸,低层风(850 Pa)有所减小,500~400 hPa风亦减小,不利于组织性强的系统性风暴发生,冷池出流产生出局地的地面辐合线,进而影响重庆西部雷暴新生演变,使得此次风暴极具局地性和突发性。

(2) 受重庆中西部地区边界层南北向中尺度辐合线的影响,触发了影响重庆的南北向带状中尺度对流系统的对流单体,因此中尺度辐合线是此次局地强风暴形成的关键系统。中尺度边界层辐合线由川渝盆地内中西部较大范围强降水造成的冷高压区出流与重庆中西部地区中尺度暖低压共同作用形成,边界层辐合线触发并组织了此次局地强风暴。

(3) 雷暴在辐合线附近抬升触发而形成带状风暴,同时在风暴西侧,具有高不稳定能量区,以及风暴出流阵风锋与边界层中尺度锋区叠加作用,进一步加强了风暴的发展和维持。川渝盆地内降水由副高外围切变线直接造成,其形成的冷高压出流间作用于重庆局地强风暴,但由于出流强度弱,因而重庆境内在副高影响下的热低压是不可或缺的。

(4) 南北向排列的带状风暴上对流单体在环境偏南风的引导下缓慢向北移动,在冷池出流和边界层中尺度辐合线作用下向西向北传播,造成了主城区局地强风暴天气,且影响主城区的局地强风暴有超级单体结构,并出现了罕见的中反气旋。

此次风暴过程属于重庆强对流类型中低空暖平流强迫型(张亚萍,2015),但与低空暖平流强迫类相比,850和700 hPa虽然存在切变线,但切变线并非

重庆强对流风暴的触发系统,且西南气流强度相对较弱,主要为副高影响之下的局地强风暴。以上研究结果能够提高对低空暖平流强迫型强对流风暴补充认识,为以后开展副高控制之下的强对流风暴研究和预报提供参考。

参考文献

- 陈贵川, 谌芸, 乔林, 等, 2011. 重庆“5.6”强风雹天气过程成因分析[J]. 气象, 37(7): 871-879. Chen G C, Chen Y, Qiao L, et al, 2011. The causation analysis of the 6 May 2010 severe wind-storm weather process in Chongqing[J]. Meteor Mon, 37(7): 871-879(in Chinese).
- 陈贵川, 谌芸, 张勇, 等, 2013. “12.7.21”西南涡极端强降雨的成因分析[J]. 气象, 39(12): 1529-1541. Chen G C, Chen Y, Zhang Y, et al, 2013. Causes analysis of the southwest vortex extremely heavy rainfall on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 39(12): 1529-1541(in Chinese).
- 陈永仁, 李跃清, 2013. “12.7.22”四川暴雨的 MCS 特征及对短时强降雨的影响[J]. 气象, 39(7): 848-860. Chen Y R, Li Y Q, 2013. Characteristics of mesoscale convective system and its effects on short-time severe rainfall in Sichuan Basin during 21-22 July 2012[J]. Meteor Mon, 39(7): 848-860(in Chinese).
- 谌芸, 孙军, 徐珺, 等, 2012. 北京721特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J]. 气象, 38(10): 1255-1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part I: observation and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10): 1255-1266(in Chinese).
- 代刊, 何立富, 金荣花, 2010. 加密观测资料在北京2008年9月7日雷暴过程分析中的综合应用[J]. 气象, 36(7): 160-167. Dai K, He L F, Jin R H, 2010. Synthetic applications of intensive observations to analysis of the 7 September 2008 severe convective systems in Beijing[J]. Meteor Mon, 36(7): 160-167(in Chinese).
- 杜倩, 覃丹宇, 张鹏, 2013. 一次西南低涡造成华南暴雨过程的FY-2卫星观测分析[J]. 气象, 39(7): 821-831. Du Q, Qin D Y, Zhang P, 2013. Observation and analysis of a southwest vortex rain-storm in southern China using FY-2 satellite data[J]. Meteor Mon, 39(7): 821-831(in Chinese).
- 顾清源, 肖逸祥, 黄楚惠, 等, 2009. 低空急流在副高西北侧连续性暴雨中的触发作用[J]. 气象, 35(4): 59-67. Gu Q Y, Xiao D X, Huang C H, et al, 2009. Trigger role of the low level jet for the continuous rainstorm in the northwest side of subtropical high[J]. Meteor Mon, 35(4): 59-67(in Chinese).
- 江玉华, 何跃, 邓承之, 等, 2009. 重庆市大范围暴雨与西南低涡[C]. 第26届中国气象学会年会论文集. 杭州: 中国气象学会: 2441-2447. Jiang Y H, He Y, Deng C Z, et al, 2009. Large-scale rain-storm and Southwest vortex in Chongqing[C]. Hang Zhou: Proceedings 26th Annual Meeting of the Chinese Meteorological

- Society;2441-2447(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).
- 刘还珠,王维国,邵明轩,等,2007.西太平洋副热带高压影响下北京区域性暴雨的个例分析[J].大气科学,31(4):727-734. Liu H Z, Wang W G, Shao M X, et al, 2007. A case study of the influence of the western pacific subtropical high on the torrential rainfall in Beijing Area[J]. Chinese J Atmos Sci, 31(4):727-734 (in Chinese).
- 祁东平,周建志,王珊珊,等,2008.一次局地强降水过程的中尺度特征及预报难点分析[J].暴雨灾害,27(1):42-48. Qi D P, Zhou J Z, Wang S S, et al, 2008. The forecasting difficulties and mesoscale characteristics of a local heavy precipitation[J]. Torrential Rain Disasters, 27(1):42-48(in Chinese).
- 盛春岩,浦一芳,高守亭,2006.多普勒天气雷达资料对中尺度模式短时预报的影响[J].大气科学,30(1):93-107. Sheng C Y, Pu Y F, Gao S T, 2006. Effect of Chinese doppler radar data on now-casting output of mesoscale model[J]. Chinese J Atmos Sci, 30(1):93-107(in Chinese).
- 王华,孙继松,2008.下垫面物理过程在一次北京地区强冰雹天气中的作用[J].气象,34(3):16-21. Wang H, Sun J S, 2008. Effects of underlying surface physical process on a severe hail event occurred in Beijing Area [J]. Meteor Mon, 34(3):16-21 (in Chinese).
- 王丽荣,刘黎平,王立荣,等,2013.太行山东麓地面辐合线特征分析[J].气象,39(11):1445-1451. Wang L R, Liu L P, Wang L R, et al, 2013. Analysis of surface convergence line features in the eastern side of Taihang Mountain [J]. Meteor Mon, 39(11):1445-1451(in Chinese).
- 王叶红,赖安伟,赵玉春,2012.降水资料同化在梅雨锋特大暴雨个例模拟中的应用研究[J].气象学报,70(3):402-417. Wang Y H, Lai A W, Zhao Y C, 2012. A study of application of the precipitation data assimilation technique to numerical simulation of an excessive meiyu front rainfall event [J]. Acta Meteor Sinica, 70(3):402-417(in Chinese).
- 肖鹏,夏利,于竹娟,等,2013.副高边缘两次大暴雨天气过程物理量特征分析[J].高原山地气象研究,33(2):51-56. Xiao P, Xia L, Yu Z J, et al, 2013. The physical quantity discussion of two rain-storm weather on the edge of subtropical high [J]. Plateau Mountain Meteor Res, 33(2):51-56(in Chinese).
- 徐枝芳,龚建东,王建捷,等,2007a.复杂地形下地面观测资料同化 I:模式地形与观测站地形高度差异对地面资料同化的影响研究[J].大气科学,31(2):222-232. Xu Z F, Gong J D, Wang J J, et al, 2007a. A study of assimilation of surface observational data in complex terrain Part I: influence of the elevation difference between model surface and observation site [J]. Chinese J Atmos Sci, 31(2):222-232(in Chinese).
- 徐枝芳,龚建东,王建捷,等,2007b.复杂地形下地面观测资料同化 II:模式地形与观测站地形高度差异代表性误差[J].大气科学,31(3):449-458. Xu Z F, Gong J D, Wang J J, et al, 2007b. A study of assimilation of surface observational data in complex terrain Part II: representative error of the elevation difference between model surface and observation site [J]. Chinese J Atmos Sci, 31(3):449-458(in Chinese).
- 张家国,周金莲,谌伟,等,2015.大别山西侧极端降水中尺度对流系统结构与传播特征[J].气象学报,73(2):291-304. Zhang J G, Zhou J L, Chen W, et al, 2015. The structure and propagation characteristics of the extreme-rain-producing MCS on the west side of Dabie Mountain [J]. Acta Meteor Sinica, 73(2):291-304 (in Chinese).
- 张文龙,崔晓鹏,黄荣,2014.复杂地形下北京雷暴新生地点变化的加密观测研究[J].大气科学,38(5):825-837. Zhang W L, Cui X P, Huang R, 2014. Intensive observational study on evolution of formation location of thunderstorms in Beijing under complex topographical conditions [J]. Chinese J Atmos Sci, 38(5):825-837(in Chinese).
- 张亚萍,2015.重庆市强对流天气分析图集[M].北京:气象出版社:8-11. Zhang Y P, 2015. Analysis Atlas of Severe Convection Weather in Chongqing [M]. Beijing: China Meteorological Press: 8-11(in Chinese).
- 郑祚芳,刘红燕,张秀丽,2009.局地强对流天气分析中非常规探测资料应用[J].气象科技,37(2):243-247. Zheng Z F, Liu H Y, Zhang X L, 2009. Application of non-conventional observational data to local heavy rain analysis [J]. Meteor Sci Technol, 37(2):243-247(in Chinese).
- 周淑玲,闫淑玲,张灿,2009.2007年8月10—12日山东半岛持续性大暴雨的维持机制分析[J].热带气象学报,25(5):628-634. Zhou S L, Yan S L, Zhang C, 2009. Analysis of maintaining mechanisms of persistent severe heavy rain events in Shandong Peninsula from 10 to 12 August 2007 [J]. J Trop Meteor, 25(5):628-634(in Chinese).
- 宗志平,陈涛,徐珺,等,2013.2012年初秋四川盆地两次西南涡暴雨过程的对比分析与预报检验[J].气象,39(5):567-576. Zong Z P, Chen T, Xu J, et al, 2013. Analysis and forecast verification of two southwest vortex torrential rain events in Sichuan Basin in early Autumn of 2012 [J]. Meteor Mon, 39(5):567-576(in Chinese).
- Droegemeier K K, Wilhelmson R B, 1985. Three-dimensional numerical modeling of convection produced by interacting thunderstorm out flows. Part I: control simulation and low-level moisture variations [J]. J Atmos Sci, 42(22):2381-2403.
- Droegemeier K K, Wilhelmson R B. 1987. Numerical simulation of thunderstorm outflow dynamics. Part I: outflow sensitivity experiments and turbulence dynamics [J]. J Atmos Sci, 44(8):1180-1210.
- Gao J D, Xue M, Shapiro A, et al. 2001. Three-dimensional simple ad-

- joint velocity retrievals from single-Doppler radar[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 18(1):26-38.
- Gao J D, Xue M, Brewster K, et al. 2004. A three-dimensional variational data analysis method with recursive filter for Doppler radars[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 21(3):457-469.
- Mueller C K, Carbone R E. 1987. Dynamics of a thunderstorm outflow[J]. *J Atmos Sci*, 44(15):1879-1898.
- Wakimoto R M. 1982. The life cycle of thunderstorm gust fronts as viewed with Doppler radar and rawinsonde data[J]. *Mon Wea Rev*, 110(8):1060-1082.
- Schenkman A D, Xue M, Shapiro A, et al. 2011a. The analysis and prediction of the 8-9 May 2007 Oklahoma tornadic mesoscale convective system by assimilating WSR-88D and CASA radar data using 3DVAR[J]. *Mon Wea Rev*, 139(1):224-246.
- Schenkman A D, Xue M, Shapiro A, et al. 2011b. Impact of CASA radar and Oklahoma Mesonet data assimilation on the analysis and prediction of tornadic mesovortices in an MCS[J]. *Mon Wea Rev*, 139(11):3422-3445.
- Xue M, Droegemeier K K, Wong V, et al. 2001. The advanced regional prediction system (ARPS) — A multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool, Part II: model physics and applications [J]. *Meteor Atmos Phys*, 76 (1/2/3/4): 143-165.
- Xue M, Hu M, Schenkman A D. 2014. Numerical prediction of the 8 May 2003 Oklahoma City tornadic supercell and embedded tornado using ARPS with the assimilation of WSR-88D data [J]. *Wea Forecasting*, 29(1):39-62.
- Xue M, Wang D H, Gao J D, et al. 2003. The advanced regional prediction system (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation [J]. *Meteor Atmos Phys*, 82(1-4): 139-170.
- Zhang J. 1999. Moisture and diabatic initialization based on radar and satellite observations [D]. Norman: University of Oklahoma.