

唐钱奎,张涛.2019.成都一次雷暴大风的中尺度特征分析[J].暴雨灾害, 38(4):338-345

TANG Qiankui,ZHANG Tao. 2019. Analysis of mesoscale characteristics of a thunderstorm gale in Chengdu[J].Torrential Rain and Disasters, 38(4):338-345

成都一次雷暴大风的中尺度特征分析

唐钱奎,张涛

(成都市气象局,成都 610071)

摘要:利用常规观测资料、加密自动站资料、自动站5 min资料、天气雷达资料和风廓线雷达组网资料,对2017年7月27日夜间出现在成都地区的一次雷暴大风天气过程进行分析,结果表明:本次过程发生在副热带高压和切变线共同影响下,地面辐合线、弱垂直风切变、层结不稳定和较大的对流有效位能为雷暴大风的发生提供了有利的环境条件。此次雷暴大风天气过程是由多单体风暴产生的;雷达回波具有窄带回波、反射率因子质心快速下降、风暴前侧出流、后侧入流和中层径向辐合等特征,这些特征对监测和预警雷暴大风有很好的指示意义。雷暴高压和强冷中心对雷暴大风的形成和维持有着重要作用。在大风过程中,风向突变伴有瞬时风速增大,但风向突变出现时间较最大瞬时风速出现提前了5 min左右,中尺度气旋式辐合的出现时间较最大瞬时风速有15 min的提前量。阵风锋坡度愈大,前侧上升气流坡度愈大;阵风锋后部的垂直风速变化落后于水平风速的变化。

关键词:雷暴大风;雷暴高压;阵风锋;中尺度特征

中图分类号: P458.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1004-9045.2019.04.006

Analysis of mesoscale characteristics of a thunderstorm gale in Chengdu

TANG Qiankui, ZHANG Tao

(Meteorological Bureau of Chengdu, Chengdu 610071)

Abstract: Based on data from conventional observations, intensive automatic weather stations, automatic station 5-minute, weather radar and wind profile radar network, a thunderstorm gale in Chengdu during the night of 27 July 2017 was analyzed. The main results are as follows. The event occurred under the influence of subtropical high and the shear line. Several factors such as surface convergence, weak vertical wind shear, unstable stratification and large convective available potential energy were favorable to the development of the thunderstorm gale. The thunderstorm gale was caused by the highly organized multi-cell storm. Radar echoes had characteristics of narrow-band echo, rapid declines of the core of reflectivity factor, inflow in the front side, outflow flows in the back side and mid-altitude radial convergence. The characteristics had a significant importance in the monitoring and warning of the thunderstorm gale. The thunderstorm high and strong cold center had played an important role in the formation and maintenance of the thunderstorm gale. During the thunderstorm gale, the wind direction change was accompanied by the instantaneous wind speed increase, but the wind direction change occurred about 5 minutes earlier than the maximum instantaneous wind speed, and the appearance of the mesoscale cyclone convergence was 15 minutes earlier than the appearance of the maximum instantaneous wind speed. The larger slope the gust front was, the greater the updraft in the front side was. The rear vertical wind speed change of the gust front had been behind the horizontal wind speed.

Key words: thunderstorm gale; thunderstorm high; gust front; mesoscale characteristics

引言

雷暴大风(于波等,2017)是指因对流活动引起的除龙卷以外的地面灾害性强风,它产生的成因有三种:(1)因对流风暴中的下沉气流降至地面产生强辐散

风造成;(2)对流风暴中的下沉气流由于降水蒸发冷却在到达地面时形成冷空气堆(冷池)并向四周扩散,冷空气堆与暖湿气流之间形成的阵风锋也是形成雷暴大风的重要原因;(3)低层暖湿气流在即将进入上升气流区时受到上升气流的抽吸作用而导致地面大风。

收稿日期:2019-03-17;定稿日期:2019-07-20

资助项目:四川省气象局科研项目(SCQXKJQN2019027);成都市气象局科研项目(2017-2018-2)

第一作者:唐钱奎,主要从事短期天气预报。E-mail: 52089401@163.com

雷暴大风(非龙卷强风事件)可以分为下沉辐散的下击暴流和地面直线型风害(Fujita, 1981; Donald, 1994),对应的风暴母体可以是孤立的一般单体,也可以是线状多单体,也可以是高度组织的超级单体和飑线。因风暴母体不同,其形成原因和特征也不同。对于雷暴大风的研究,国内外已有很多学者从生成环境、形成机制和空间结构等方面进行了深入研究, Kenneth(2005)研究表明,下击暴流的发生通常具有较大的对流有效位能和中等以上强度的垂直风切变为雷暴大风的形成提供了有利的环境条件。支树林等(2015)和阎访等(2013)研究表明,雷暴大风主要是由超级单体对流风暴引发的。许长义等(2017)通过多种观测资料对天津地区一次弱降水雷暴大风过程分析指出,强冷池的快速移动是弓形回波复合阶段形成雷暴大风的直接原因。涂小萍等(2014)研究指出,浙江地区一次致灾大风是出流边界与阵风锋合并造成的。农孟松等(2014)对广西一次飑线大风分析发现,降水粒子的拖曳作用和飑线的快速移动都对地面大风的产生及增幅有一定的作用。王彦等(2006)和李胜山等(2012)研究指出,弓形回波和阵风锋可以产生雷暴大风,而弓形回波向前突起产生的大风更强烈。张涛等(2013)通过3次阵风锋过程分析指出,阵风锋产生的瞬时最大风速与窄带回波的强度不一定成正比。杨芳园等(2018)研究指出,地面大风与飑线和中尺度辐合线密切相关,根据地面辐合线可以提前1 h预警飑线。

目前,下击暴流引起的雷暴大风,通过雷达预警的提前量仅有几分钟(王秀明等, 2012; 敖泽建等, 2017);而对地面直线型风害的预警时间相对较长,但后者却因雷达强回波区与本站距离较远,时常不能引起足够的重视和警惕。从市县两级预警服务情况来看,经验不足的预报员,常常在发布雷电预警或暴雨预警的同时发布大风预警,这将直接导致大风预警没有提前量或预警发布在大风结束之后,这种现象在成都地区普遍存在。成都市位于青藏高原东麓,地形地貌复杂,地处盆地西部,其西部属于盆地边缘地区,以山地为主,而东部属于盆地盆底平原,地势平坦,在成都地区形成的雷暴大风以偏北大风较为常见,而偏南雷暴大风甚是少见。因此,有必要对偏南雷暴大风进行分析研究。本文利用常规观测资料、加密自动站资料、自动站5 min资料、天气雷达资料和风廓线雷达组网资料,从大尺度环流背景和中尺度特征方面对2017年7月27日(北京时,下同)夜间发生在成都的一次偏南雷暴大风天气过程进行分

析,旨在加强对该类雷暴大风天气过程的认识,为该类灾害性天气的监测和预警提供一定的参考依据。

1 天气过程概况

2017年7月27日20时至28日06时,成都地区出现了较大范围的雷暴大风天气(风速 $V \geq 17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 8级及其以上),并伴有短时强降水、雷电等强对流天气,具有局地性强、持续时间长和范围广等特征。图1为该过程瞬时大风和短时强降水(雨强大于等于 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)的叠加图。统计结果显示,全市243个自动气象站中有51站出现大风天气,占全市自动气象站的21%,最大瞬时风速出现在23:42邛崃临济镇为 $23.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。短时强降水有50站,主要集中在西部沿山一带,最大短时强降水出现在28日01—02时都江堰五桂村为 68.4 mm 。从各区县极大瞬时风速出现时间上看,此次大风天气过程是自西南向东北方向穿越成都地区的,除新津和主城区外,其余各区县均达到了灾害性大风级别。

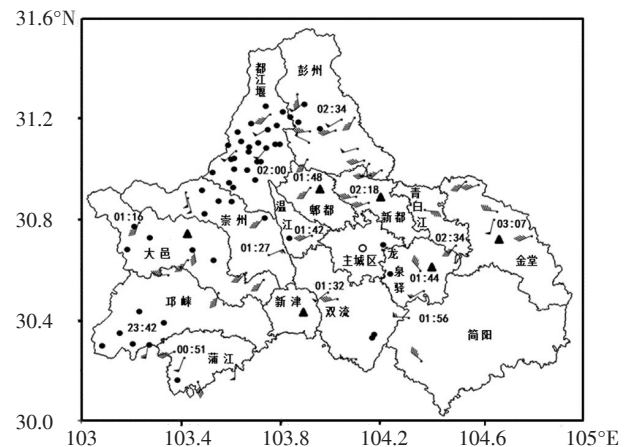


图1 2017年7月27日20时—28日06时成都强对流天气叠加图(风羽为瞬时极大风速,“●”为短时强降水,“○”表示天气雷达,“▲”表示风廓线雷达,数字表示瞬时极大风速出现时间)

Fig.1 The strong convective weather occurred in Chengdu from 20:00 BT on 27 to 06:00 BT on 28 July 2017(Bar indicates instantaneous maximum wind speed, “●” indicates short-time strong rainfall, “○” indicates the weather radar, and “▲” indicates the wind profile radar. The figures indicates the time of the instantaneous maximum wind speed).

统计自动站地面大风和短时强降水站数可知(表1):此次强对流天气主要发生在27日23时—28日04时,强对流在28日03时影响范围最大,此时阵性大风和短时强降水站数最多,分别为27站和35站,而最大瞬时大风和短时强降水分别出现在00时和03时。从上报的灾情来看,地面阵性大风是本次过程

的主要致灾因子。因此,本文主要分析地面灾害性大风的成因。

表1 2017年27日20时—28日06时成都逐小时短时强降水和大风站数

Table 2 The hourly stations of the short-time strong rainfall and strong wind in Chengdu from 20:00 BT on 27 to 06:00 BT on 28 July 2017.

强对流类别	时间				
	00时	01时	02时	03时	04时
短时强降水站数	7	6	19	35	1
大风站数	2	6	14	27	1

2 天气背景分析

2.1 大尺度环流背景分析

图2为2017年7月27日20时综合分析图。500 hPa上副高588 dagpm线稳定维持在川西高原东部,成都受其脊线内偏南暖湿气流控制,青藏高压控制着青海中部以西地区,两高之间的切变维持在青海东部至川西高原西北部。700 hPa上,四川东北部有切变线逐渐东移南下,切变线后有温度槽配合,风场与温度场之间有一定夹角,这种配置结构有利于低层冷空气以偏东路径向西南方向输送(杨芳园等,2018),触发本地不稳定能量的释放形成雷暴大风天气。850 hPa上,甘肃南部有偏北风携带冷平流经盆地东北部影响成都地区,使暖湿气流和冷平流在成都地区交汇,为此次强对流天气的发生提供不稳定条件。

地面图上(图略),成都地区一直处于热低压控制,低压中心值为995 hPa,并位于多单体风暴形成位置的东南侧,热低压中心附近的地面温度较成都地区偏高3~5℃,地面快速增温使得层结不稳定性进一步增

强。此外,在多单体风暴形成区的东南侧存在东北风和偏南风形成的地面辐合线,为雷暴大风的发生提供了动力抬升机制。

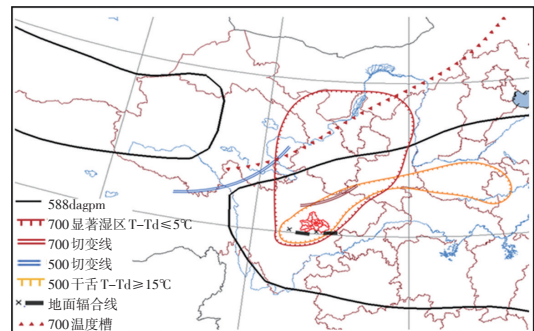


图2 2017年7月27日20时综合分析图

Fig.2 The comprehensive analysis diagram at 20:00 BT on 27 July 2017.

2.2 环境条件分析

图3为2017年7月27日08时和20时温江探空图和风玫瑰图。从图中可知,27日08时(图3a),700 hPa以下湿度相对较好,层结曲线与等比湿线构成上干下湿的漏斗状结构,有明显的不稳定能量。受副热带高压影响,白天升温明显,12 h后(图3b),不稳定能量得到聚集;近地面至850 hPa风随高度顺时针旋转,有暖平流存在,850—700 hPa风随高度逆时针旋转,有冷平流存在,冷暖平流的配置增强了层结不稳定;0—6 km垂直风切变较弱,但08时到20时风切变从5.4 m·s⁻¹增强至7.9 m·s⁻¹,为对流风暴的发生和维持提供了有利条件;探空曲线上低层大气较08时更干,850—700 hPa为相对湿度层(温度露点差为4℃),700 hPa以上为相对较干层(露点温度差大于10℃),850 hPa以下呈向下开口的喇叭状结构,这种典型的喇叭口结构非常有利于雷暴大风的发生。

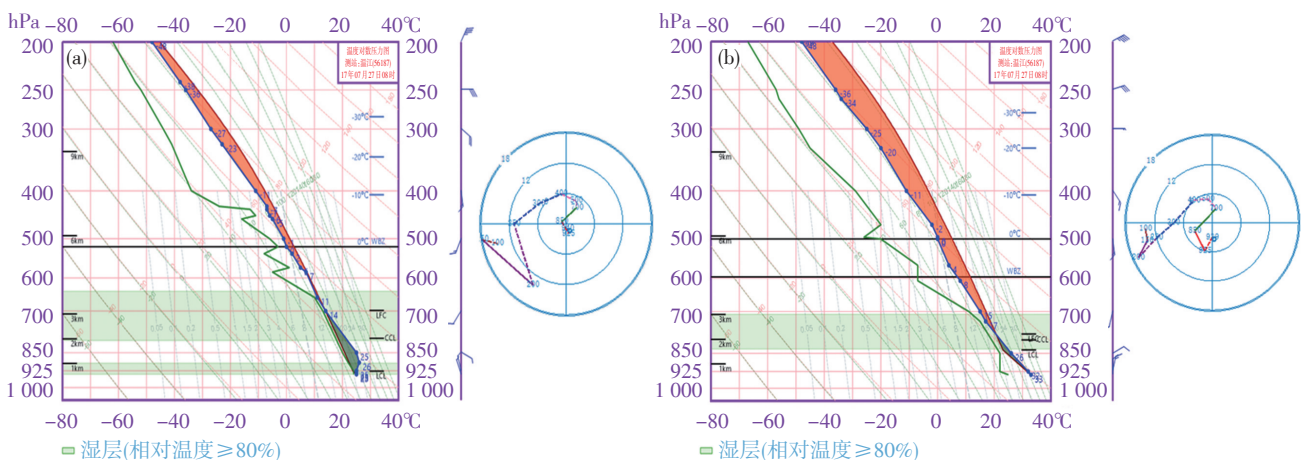


图3 2017年7月27日08时(a)和20时(b)温江探空站T-logP图和风玫瑰图

Fig.3 The diagram of T-logP and wind rose for Wenjiang at (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT on 27 July 2017.

K指数、SI指数和LI指数等作为反映大气层结稳定度的物理量,常用于强对流天气预报中。从表2可知,27日08时,成都地区大气层结已处于不稳定状态

且存在明显的热力不稳定条件,有发生深厚对流的潜势。随着白天温度不断升高,20时,各种对流指数发生明显的变化,SI指数和LI指数分别由-2.93℃

和-2.19 °C增大至-4.28 °C和-5.12 °C,说明大气层结不稳定度进一步增强;CAPE值由08时1 273.8 J·kg⁻¹猛增至3 907.2 J·kg⁻¹,说明热力不稳定也进一步增大,有

利于对流旺盛发展;DCI指数增大至53.1 °C,说明对流层中低层条件不稳定度也明显增强,有利于深厚对流天气的发生。

表2 2017年7月27—28日温江站对流参数

Table 2 The convection parameters at Wenjiang on 27 July 2017.

时间	K/°C	SI/°C	LI/°C	DCI/°C	CAPE/(J·kg ⁻¹)
27日08时	45	-2.93	-2.19	47.2	1273.8
27日20时	44	-4.28	-5.12	53.1	3907.2

以上分析表明,弱垂直风切变、层结不稳定和较大的对流有效位能为此雷暴大风的发生提供了有利的环境条件。SI指数、LI指数、DCI指数和CAPE对本次雷暴大风预报具有较好的指示意义。

3 雷达回波特征分析

为了细致分析此次雷暴大风天气的产生过程,利用成都天气雷达对多单体风暴的移动和结构进行分析。从雷达回波图上看,此次大风天气过程与三个多单体风暴(分别称为多单体风暴A、B和C)有关,并从影响先后和区域不同,把多单体风暴A作为第一阶段,而B和C作为第二阶段。

第一阶段:多单体风暴A从22:51开始影响蒲江西部边缘,并迅速移动至邛崃西南部边缘。从平均径

向速度图上,23:28在1.5°仰角上有中-γ尺度的气旋式辐合(图4a),而2.4°上则为中-γ尺度的强辐合(图4b),往上至6.0°均有明显的径向辐合存在,且辐合位置略有偏移,倾斜的旋转气流利于风暴垂直伸展。23:42多单体风暴移至邛崃临济镇附近,反射率因子剖面图上(图略)的质心下降且地面有短时强降水和23.4 m·s⁻¹的雷暴大风产生。由此可知,下沉气流在强烈的拖曳作用下,配合临济镇的特殊地形作用在地面形成雷暴大风。随着下沉气流向外推出,与环境空气在风暴移动的右侧形成阵风锋(图5a),由于多单体风暴A和其产生的阵风锋移动方向不同,且两者在移动过程中均不断减弱,该阵风锋过境区的地面自动站风速仅有1-2个等级的增大,并没有达到雷暴大风(8级),而6级以上大风主要位于多单体风暴A的下方。阵风锋北移

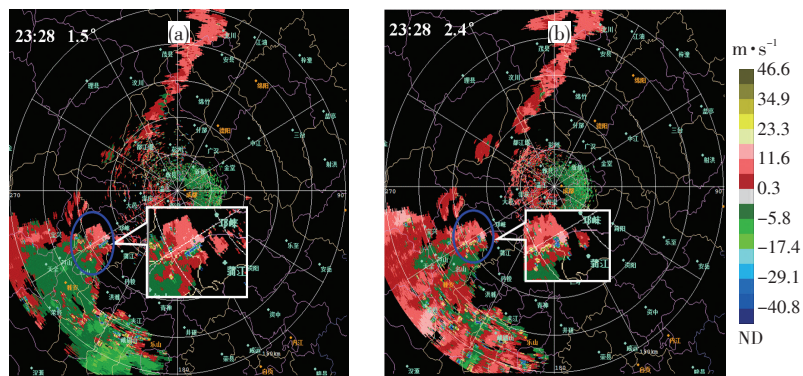


图4 2017年8月27日成都雷达23:28的1.5°仰角(a)和2.4°仰角(b)的径向速度图(单位:m·s⁻¹)

Fig.4 The radial velocities from Chengdu Doppler weather radar at (a) 1.5° elevation angle and (b) 2.4° elevation angle at 23:28 BT on 27 July 2017.

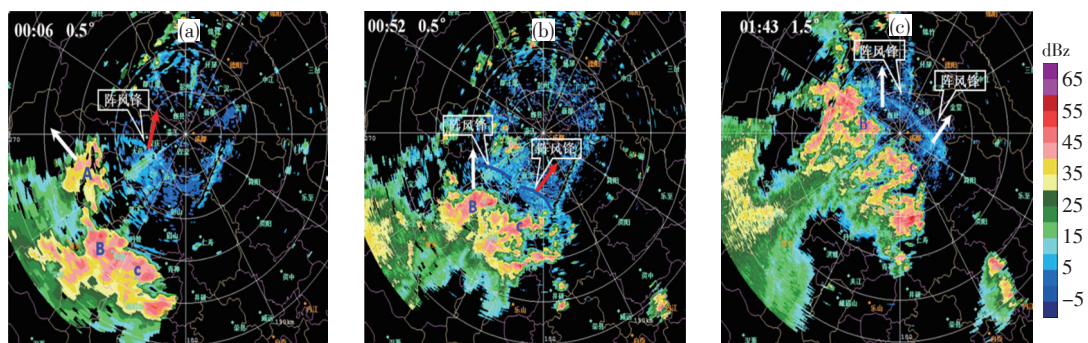


图5 2017年7月28日成都雷达00:06(a)、00:52(b)和01:43(c)组合反射率因子图(单位:dBz)(箭头表示移动方向)

Fig.5 The composition reflectivity of Chengdu Doppler weather radar at (a) 00:06 BT, (b) 00:52 BT and (c) 01:43 BT on 28 July 2017 (The arrow indicates direction of movement).

过程中,受地形的抬升作用,00:15在大邑东部触发对流(图略);在继续北移过程中,崇州、都江堰也触发生成多个多单体(图5b)。从径向速度剖面图(图6a)上可以看出,多单体风暴A中具有明显的MARC特征和非

常浅薄的低层雷暴出流,有利于产生大风天气。此阶段雷暴大风是下沉气流在强降水拖曳下加强形成,影响范围小;雷达具有反射率因子质心快速下降、雷暴出流浅薄和MARC等特征。

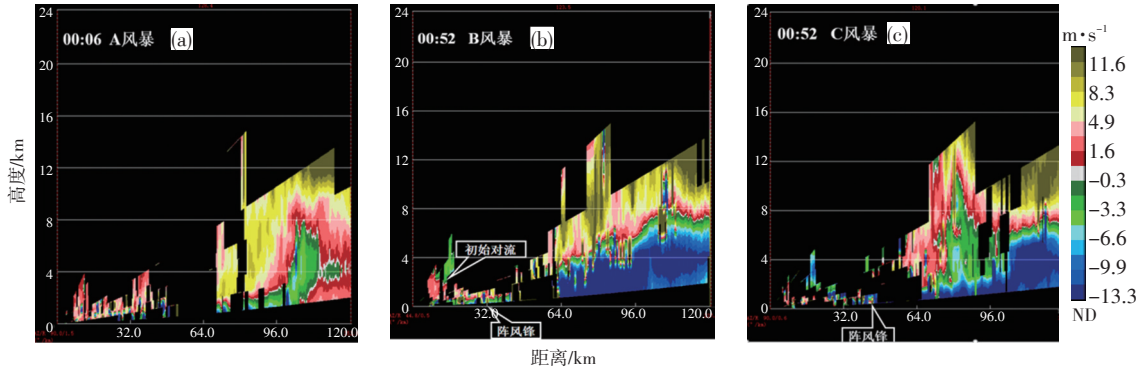


图6 2017年6月28日成都雷达径向速度(单位: $m \cdot s^{-1}$)沿 252° (a)、 227° (b)和 200° (c)方向剖面图

Fig.6 The radial velocities from Chengdu Doppler weather radar along (a) 252° direction, (b) 227° direction and (c) 200° direction on 28 July 2017.

第二阶段前期:一方面由多单体风暴B形成的阵风锋在00:20开始影响蒲江,在向北移动过程中影响邛崃、大邑、温江和崇州(图5b),并产生了雷暴大风,但移动中阵风锋“窄带回波”和第一阶段多单体风暴A的阵风锋触发产生的对流混合在一起而无法辨别。从径向速度剖面图(图6b)中可以看出:多单体风暴B的干冷空气入流较多单体风暴A更强更深厚,无明显的MARC特征存在,多个对流单体的下沉气流连通,形成厚度达3.5 km的强雷暴出流通道,这非常有利于雷暴大风的形成;但如此深厚雷暴出流反而不利于暖湿空气进入多单体风暴母体,从而使多单体风暴B强度逐渐减弱。在反射率因子剖面图上(图7a),在下沉气流处有水平尺度 > 10 km、强度 > 55 dBz的强质心,表明下沉气流与载水有关(王秀明等,2012),地面降水量也反映有短时强降水发生。另一方面多单体风暴C向北移动,其前侧的阵风锋在00:52开始影响新津和

双流南部边缘(图5b)。从速度剖面图上可以看出(图6c),后侧干冷空气入流强且深厚,前侧单体具有明显的MARC特征,雷暴出流强且厚度在2 km以下,较之于多单体风暴B更有利于多单体风暴母体的维持。在反射率因子剖面图上具有和多单体风暴B类似的质心快速下降特征,但强度偏弱,反射率质心强度以50—55 dBz为主(图7b)。第二阶段后期:由阵风锋触发的对流单体不断并入多单体风暴B中,使风暴B得到加强和维持,其前侧的雷暴出流和多单体风暴C形成的阵风锋在01:43连成一线(图5c),给都江堰、郫都、彭州和新都西部造成灾害性大风。1 h后,多单体风暴B北移至德阳地区,而风暴C逐渐减弱消散(图略),成都地区的大风天气也随之逐渐结束。通过以上分析,第二阶段雷暴大风是由阵风锋形成,影响范围大;雷达回波上具有窄带回波、反射率因子质心快速下降、雷暴前侧出流、显著的后侧入流和MARC等特征。

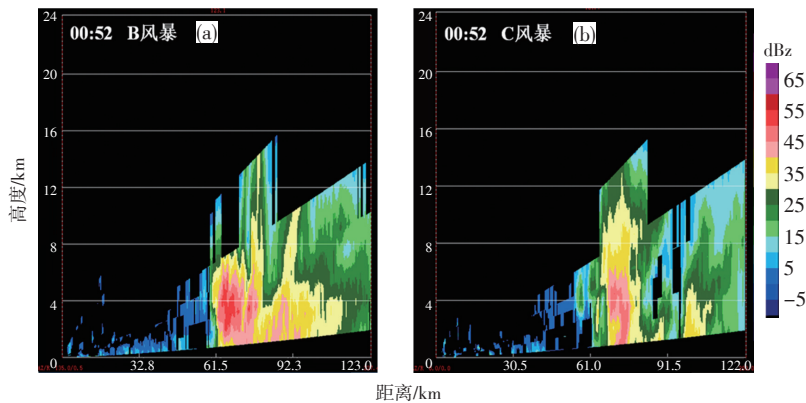


图7 2017年6月28日成都雷达反射率因子(单位: dBz)沿 227° (a)和 200° (b)方向剖面图

Fig.7 The cross-sections of Chengdu Doppler weather radar along (a) 227° direction and (b) 200° direction on 28 July 2017.

综上所述,此次雷暴大风天气过程是由多单体风暴产生的。反射率因子图上具有窄带回波、强质心快

速下降等特征;径向速度上有风暴前侧出流、后侧入流和MARC等特征,这些特征为监测和预警雷暴大风

提供了参考依据。

4 地面中尺度特征分析

4.1 地面中尺度系统分析

雷暴高压下形成的强冷中心对多单体风暴的维持和雷暴大风的产生有重要作用,地面冷中心也是多单体风暴维持的主要机制(张勇等,2013)。分析27日20时至28日06时地面逐时变温和变压可知(图8):此次雷暴大风伴有明显的雷暴高压和强冷中心。

在初始阶段(图8a),雷暴高压强度最强、尺度最小且分散,变压最大值($+2.9 \text{ hPa}\cdot\text{h}^{-1}$)位于冕宁;冷中心尺度最小、强度最强且分散为三块,最强冷中心($-7.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$)也位于冕宁,对应的最大瞬时风速为 $20.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。但1 h内最强瞬时风速 $32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 却位于次中心汉源,变压 $+1.5 \text{ hPa}\cdot\text{h}^{-1}$ 、变温 $-6.9 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$;这是因为汉源站的气压变化正好跨了时界,实际对应为 $+4.2 \text{ hPa}$ 。随着多单体风暴向北移动,28日00时,成都西南地区的雷暴高压(对应多单体风暴A)的高压中心和冷中心偏离明显,

冷中心强度明显减弱,多单体风暴A也快速减弱消失;而多单体风暴B和C对应的雷暴高压接近重合在一起,冷中心也趋于重合(图8b),结合地面自动站的瞬时最大风速演变图(图略)可知,这预示着大风天气的开始。28日01时前后,多单体风暴B和C对应的雷暴高压北移至成都南部并融合在一起,且雷暴高压中心和冷中心重合呈团状结构(图8c),成都大风范围进一步扩大;此时,雷暴高压中心和冷中心更偏向于多单体风暴C,而未来1 h内成都市瞬时风速最大值出现在东部龙泉驿($22.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。02时,雷暴高压由团状变为带状(图8d);多单体风暴B在成都西北部得到加强,其冷中心($-5.5 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$)也偏向于成都西北部;多单体风暴C对应的雷暴高压明显超前于冷中心,对应的地面风速也明显减小。04时(图略),多单体风暴B北移至德阳和绵阳西部山区,雷暴高压中心略微加强($+2.3 \text{ hPa}\cdot\text{h}^{-1}$),但对应的冷中心($-3.3 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$)明显减弱,两中心之间的距离进一步加大,表明多单体内部下沉气流明显减弱,近地面的最大瞬时风速也随之减弱。

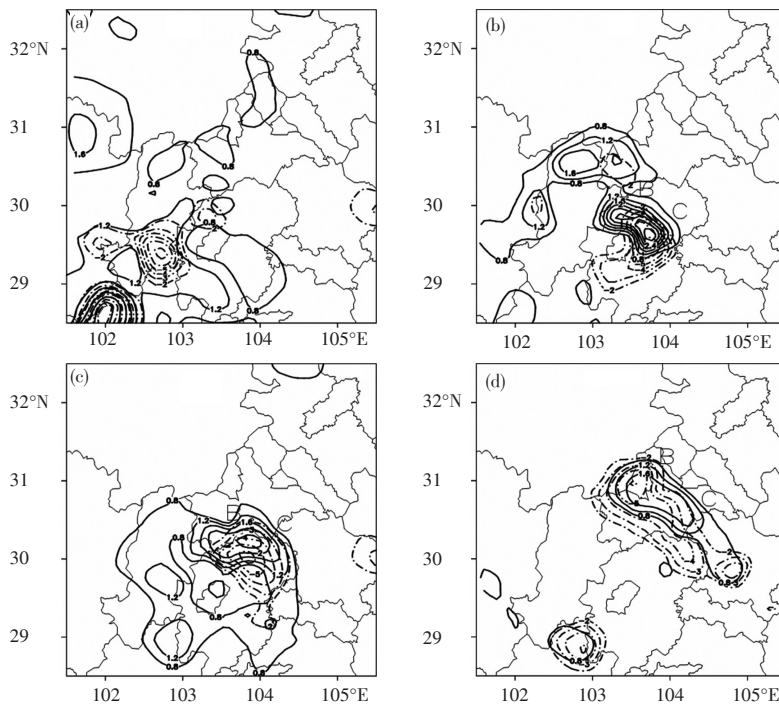


图8 2017年7月27日22时(a)、28日00时(b)、28日01时(c)、28日02时(d)四川省逐小时变压(实线,单位: $\text{hPa}\cdot\text{h}^{-1}$)和变温(虚线,单位: $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$)分布图

Fig.8 The distribution of hourly temperature (line) and pressure (dotted line) in Sichuan at (a) 22:00 BT on 27, (b) 00:00 BT on 28, (c) 01:00 BT on 28 and (d) 02:00 BT on 28 July 2017.

从上述分析可知,此次雷暴大风天气过程近地面均伴有雷暴高压和冷中心,而雷暴大风与雷暴高压的气压梯度有关。

4.2 单站要素变化分析

根据不同多单体风暴影响时间和形成大风原因不同,选取邛崃临济镇、都江堰国家站和双流桂花村3

个自动气象站5 min时间分辨率资料进行分析(图9),它们分别代表先后受多单体风暴A和B影响、多单体风暴B影响和多单体风暴C影响。3站气象要素变化能看出有气温骤降、气压陡升、风向突变和风速剧增的现象。对比最大瞬时风速与气象要素变化发现:在最大瞬时风速出现时刻,邛崃临济镇气温最低和5 min降水

最大;而都江堰和双流胜利桂花村则出现在5 min负变温最大和降水开始之前。此时,风暴母体和3站的关系是:临济镇正好位于多单体风暴A前沿的正下方;都江堰紧靠多单体风暴前侧;桂花村则位于较远的地方。

从三站的气象要素分析还可发现:1) 5 min降水

最大值和最高本站气压相对应,且略先于后者出现;2) 每次风向突变都伴有瞬时风速增大,但风向突变时间较最大瞬时风速出现时间提前了5 min左右;3) 结合图4a、b可以发现:中尺度气旋式辐合的出现时间较最大瞬时风速出现时间有15 min提前量。

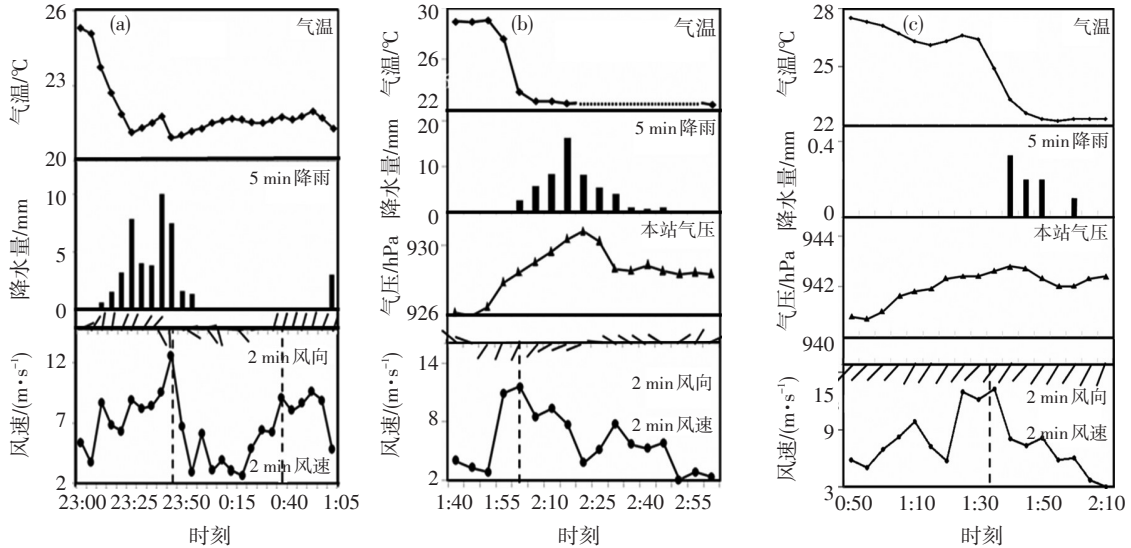


图9 临济镇(a)、都江堰(b)和桂花村(c)自动站气象站5 min气象要素时间变化图(虚线对应最大瞬时风速,点虚线为缺值)

Fig.9 The temporal changes of 5 min meteorological elements with automatic weather stations at (a) Tongji, (b) Du Jiangyan and (c) Guihua (The dotted line corresponds to maximum instantaneous wind speed. The point dotted line indicates missing value).

5 风廓线雷达组网资料分析

根据成都风廓线雷达的空间分布(图1),仅能对此次雷暴大风天气过程的第二阶段进行分析。下面利用6部风廓线雷达的组网资料(组网产品中使用的

度均为海平面高度,下同)进行分析。28日00:30,在水平风场上(图10a),雷暴大风前沿刚达到西南部的新津和大邑时,1 km以下风向由北风迅速转为西南风,且风速随高度明显减小,1—1.5 km内存在一个风速不连续面;在成都主城区南部近地面存在西南风和偏北风

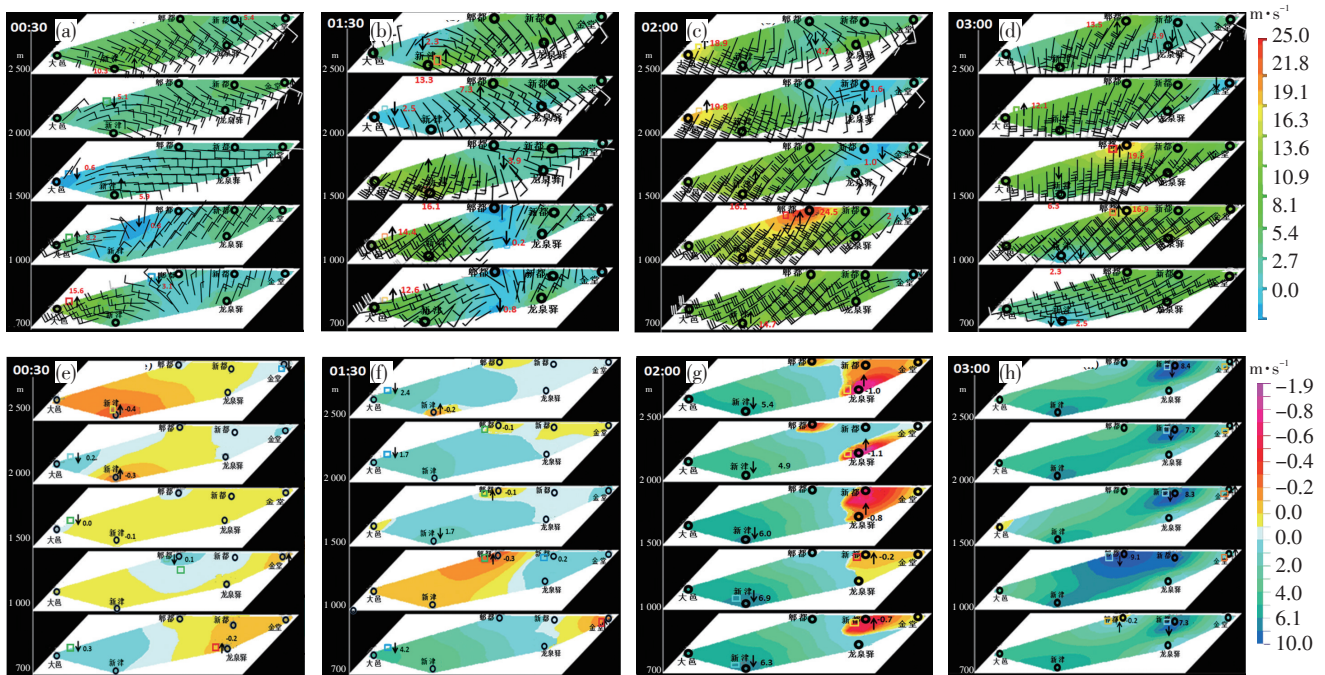


图10 2017年7月28日成都风廓线雷达水平风(a-d)和垂直风(e-h)组网图(单位: $m \cdot s^{-1}$)

Fig.10 (a-d) The vertical speed and (e-h) the horizontal speed of the wind profile radar network from Chengdu on 28 July 2017.

的辐合切变,此处与雷达图上的“窄带回波”的位置一致,即阵风锋。从水平风随高度变化可知,在阵风锋移动的前侧,风向随高度顺转有暖平流存在,后侧风向随高度逆转有冷平流存在。在垂直风场上(图10e),阵风锋后侧的西部沿山迎风坡处,近地面下沉气流略有增加,下沉气流为 $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;前部近地面的上升速度较前一时刻减弱,对流层中层的上升速度有所增大。

随着风暴北移,01:30阵风锋前沿已北移至郫都(图10b),阵风锋厚度增大,1—1.5 km高度上的水平风明显增大,最大风速达 $16.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。最显著的变化位于垂直风场上(图10f),阵风锋后部冷中心的下沉气流明显增大,最大下沉风速达 $4.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由于阵风锋的作用,上升气流也明显北移,并表现出明显的倾斜性。随着冷中心主体的北移,02时郫都及附近的水平风速进一步增大(图10c),新津和大邑附近的风速开始有所减小,这与地面自动站风速变化一致;阵风锋后的下沉气流厚度达到2 km以上(减去站点海拔高度),环境空气的入流被抬升得更加明显,上升气流变得更加垂直,不利于上升气流斜入风暴内部(图10g)。

1 h后,阵性大风移至成都与德阳交界处,成都地区低层水平风速明显减小,特别是南部的新津站已经减小至 $2.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图10d),但仍然维持西偏南风,且风向随高度逆转,有冷平流存在。成都地区为宽广的下沉气流区,强下沉气流中心位于郫都和新都附近(图10h),不利于本地雷暴再生,同时也说明垂直风速的变化落后于水平风速的变化。

6 结论

(1) 本次过程产生于500 hPa副热带高压和700 hPa切变线共同影响下,850 hPa冷空气的入侵触发了本地不稳定能量的释放造成了雷暴大风天气,地面辐合线具有抬升触发作用。弱垂直风切变、层结不稳定和较大的CAPE为雷暴大风的发生提供了有利的环境条件。对流参数对强对流天气预报具有一定指示意义。

(2) 此次雷暴大风是由多单体风暴产生的,第一阶段是下沉气流在强降水拖曳下加强形成,影响范围小;第二阶段是阵风锋形成,影响范围大。雷达回波上具有窄带回波、强质心快速下降、风暴前侧出流、后侧入流和MARC等特征,这些特征对监测和预警雷暴大风有很好的指示意义。

(3) 此次雷暴大风天气过程近地面均伴有雷暴高压和冷中心,而雷暴大风与雷暴高压的气压梯度有关。

(4) 在雷暴大风过程中,风向突变伴有瞬时风速增

大,但风向突变出现时间较最大瞬时风速出现时间提前了5 min左右,而中尺度气旋式辐合的出现时间较最大瞬时风速出现时间有15 min提前量。

(5) 风廓线雷达组网资料能显示出阵风锋的空间结构,“窄带回波”处有水平风速的辐合存在,阵风锋后侧的冷性大风区对前侧的环境空气具有明显的抬升作用,阵风锋坡度愈大,前侧上升气流坡度愈大。此外,阵风锋前侧有暖平流存在,后侧有冷平流存在;阵风锋后部的垂直风速变化落后于水平风速变化。

参考文献:

- 敖泽建,傅朝,蒋友严,等. 2017. 甘兰高原“4·15”冰雹天气的多普勒雷达特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 11(2):34-42
- 李胜山,张殿江,胡玲,等. 2012. 一次下击暴流显著弓形回波特征[J]. 气象与环境学报, 28(4):84-89
- 农孟松,翟丽萍,屈梅芳,等. 2014. 广西一次飏线大风天气的成因和预警分析[J]. 气象, 40(12):1491-1499
- 涂小萍,姚日升,漆梁波,等. 2014. 浙江省北部一次灾害性大风多普勒雷达和边界层特征分析[J]. 高原气象, 33(6):1687-1696
- 万夫敬,江敦双,赵传湖. 2018. 2017年8月6日山东罕见雷暴大风成因分析[J]. 海洋气象学报, 38(2):60-66
- 王秀明,俞小鼎,周小刚,等. 2012. “6.3”区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析[J]. 高原气象, 31(2):504-514
- 王秀明,周小刚,俞小鼎. 2013. 雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究[J]. 气象学报, 71(5):839-852
- 王彦,吕江津,王庆元,等. 2006. 一次雷暴大风的中尺度特征结构分析[J]. 气象, 32(2):75-80
- 许长义,易笑园,段丽瑶,等. 2017. 多种观测资料在一次弱降水雷暴大风分析中的综合应用[J]. 气象科技, 45(2):355-363
- 于波,荆浩,孙继松,等. 2017. 北京夏季一次罕见偏南大风天气的成因分析[J]. 高原气象, 36(6):1674-1681
- 阎访,陈静,卞韬,等. 2013. 一次雷暴大风的物理环境场和多普勒雷达回波特征[J]. 气象与环境学报, 37(1):33-39
- 杨芳园,沈茜,周稀,等. 2018. 云南省一次飏线大风天气过程的中尺度特征分析[J]. 暴雨灾害, 37(1):48-56
- 支树林,许爱华,张娟娟,等. 2015. 一次影响江西的致灾性飏线天气成因分析[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(4):352-359
- 张涛,李柏,杨洪平,等. 2013. 三次雷暴导致的阵风锋过程分析[J]. 气象, 39(10):1275-1283
- 张勇,刘德,张亚萍,等. 2013. 渝西一次强对流风暴过程的中尺度特征分析[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(4):338-345
- Donald W M. 1994. Windex—a new index for forecasting microburst potential [J]. Weather forecasting, 9(4): 532-541
- Fujita T T. 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales [J]. J Atmos Sci, 38(8): 1511-1534
- Kenneth L P. 2005. Forecasting convective downburst potential over the United States great plains[J]. Physics, arXiv: physics/0511245

(责任编辑 邓 雯)