

康岚,刘炜桦,肖递祥,等,2018.四川盆地一次极端大风天气过程成因及预报着眼点分析[J].气象,44(11):1414-1423.

# 四川盆地一次极端大风天气过程成因 及预报着眼点分析\*

康 岚<sup>1,2</sup> 刘炜桦<sup>1,2</sup> 肖递祥<sup>1,2</sup> 师 锐<sup>1,2</sup> 王秀明<sup>3</sup>

1 四川省气象台,成都 610071

2 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,成都 610071

3 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

**提 要:** 利用常规观测资料、FY-2E 卫星云图、多普勒雷达产品、闪电定位资料、自动气象站资料等,分析了 2015 年 4 月 4 日傍晚到夜间发生在四川盆地的极端大风天气过程。分析指出:本次雷暴大风过程是由冷锋对暖湿气团的强迫抬升及干冷空气进入暖湿区域触发形成。中空干层、大的温度直减率、高低空急流耦合区、低层温度脊附近是利于极端雷暴大风出现的潜势区域。该区域为雷暴形成提供了条件不稳定、水汽、动力抬升等有利环境条件。冷空气首先从盆地西北部中低层入侵,在低层切变线上触发生成了一系列雷暴单体,在最有利于对流发展的潜势区域迅速发展。潜势区域中线状回波北段的中尺度涡旋环流、前侧入流和后侧入流的相互作用形成单体弓形回波,该弓形回波具有比普通雷暴更高的反射率因子、垂直液态含水量。根据雷达回波演变特征推断,本次极端大风是由单体弓形回波带来的湿下击暴流所导致。弓形回波中高反射率因子的高度连续下降意味着下沉气流伴随降水粒子下降,干空气被夹卷进入下沉气流使得雨滴被迅速蒸发,大大加强了下沉气流强度,因而显著增加了大风强度。分析还指出:通过分析对流发展背景条件,确定最有利对流发展的潜势区域,关注该区域中回波的生成、形态特点、演变特征,可提前预警大风天气。

**关键词:** 环境场特征,单体弓形回波,极端雷暴大风,湿下击暴流

中图分类号: P456,P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.11.004

## Analysis on Formation Reason and Forecast of an Extreme Gale in Sichuan Basin

KANG Lan<sup>1,2</sup> LIU Weihua<sup>1,2</sup> XIAO Dixiang<sup>1,2</sup> SHI Rui<sup>1,2</sup> WANG Xiuming<sup>3</sup>

1 Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610071

2 Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610071

3 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

**Abstract:** Using conventional weather data, FY-2E satellite data, Doppler radar products, lightning location data, automatic weather station data, this paper analyzes the 4 April 2015 evening-to-night thunderstorm gale process in Sichuan Basin. Our analysis shows that the thunderstorm gale process was formed by the cold front forced uplift on warm air mass as well as dry and cold air into the warm area. The area of hollow dry layer, large temperature lapse rate, coupling of high-low jet area and the low-level temperature near the ridge were conducive to the potential area of extreme thunderstorm gale. This area provided a favorable environmental condition for the thunderstorm such as significant unstable conditions, water vapor, dynamic uplift, etc. Cold air firstly invaded from the middle and lower layers of the northwestern part of

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506006)和四川强对流预报创新团队(川气函[2017]313号)、全国强对流预报专家团队共同资助  
2017年4月5日收稿; 2018年8月23日收修定稿

第一作者:康岚,主要从事天气预报及相关研究. Email: kanglan\_330@163.com

the basin and triggered a series of thunderstorm cells on the low-level shear line, which developed rapidly in the most favorable area for the development of convection. The interaction of the mesoscale vortex, the front inflow and the posterior inflow into the northern part of the latent region led to the formation of a single bow echo, which had much higher reflectivity and liquid water content than ordinary thunderstorm. According to the development characteristics of radar echo, the extreme gale was caused by the wet downburst brought by single bow ech. The descending height of the high reflectivity factor in the bow echo means that the sinking air stream was accompanied by a drop in precipitation particles. The dry air was trapped in the sinking air stream and raindrops evaporated quickly, greatly increasing the intensity of the sinking air stream, and thus increasing the strength of the gale. Our analysis also indicates that, by analyzing the background conditions of convective development, forecasters could identify the potential regions for the most favorable convective development paying close attention to the location of the trigger conditions and the characteristics of the radar echo shape as well as the evolution characteristics in the region could be helpful for the early warning of gale weather.

**Key words:** ambient field features, single bow echo, extreme thunderstorm gale, wet downburst

## 引 言

雷暴大风是造成气象灾害的主要强对流天气类型之一。关于雷暴大风,气象工作者在形成机制(朱乾根等,2003;姚叶青等,2008;廖晓农等,2008;朱君鉴等,2008)、环境场条件(钟利华等,2010;费海燕等,2016;杨新林等,2017)、预报方法(王福侠等,2016;曾明剑等,2015)等方面做了大量研究。俞小鼎(2012;2006b)等总结了有利于雷暴大风发生的环境场条件和基于多普勒雷达特征的临近预警技术,指出反射率因子核心的逐渐降低并伴随云底以上的速度辐合的回波特征可以用来提前数分钟预警下击暴流的发生。王秀明等(2013)对比了两类雷暴大风环境场特征并构建了相应的环境温、湿度廓线。陈贵川等(2011)、王晓明和谢静芳(1994)、隋迎久等(2010)讨论了地形对强对流天气的触发、加强作用及分布影响,曾明剑等(2015)基于中尺度数值模式建立了分类强对流客观预报系统。上述研究对雷暴大风的预报预警具有重要意义。对四川风雹天气的研究集中在环流形势配置及能量条件方面(李淑芳等,1986;陈章和顾清源,1994;蒲吉光等,2002),认为一定梯度的冷空气、300 hPa 冷槽、500 hPa 阶梯槽、对流层中层强冷空气夹卷及盆地大气层结高能不稳定是有利于产生风雹天气的背景场。另外,王秀明(2008)通过模拟指出,低层地形强迫、中层切变线波动、高层中尺度高空槽系统及大气湿不稳定是四川强对流的发展机制。李庆和黄成亮(2002)初步

总结了一次风雹天气过程飚线回波的演变特征。费海燕等(2016)统计的 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的我国强雷暴大风空间分布显示,2004—2013 年四川盆地累计出现强雷暴大风 5 站次,属于小概率区域,然而一旦其发生,往往造成严重灾害。总体而言,对四川强雷暴大风的背景条件研究较多,而对流潜势及多普勒雷达特征涉及较少,有必要对其进行深入探讨,为今后预报此类天气及发布预警信号提供参考。

本文使用的资料包括:(1)常规地面、探空观测资料;(2)南充站多普勒天气雷达探测资料;(3)FY-2E 红外卫星资料;(4)闪电定位仪资料;(5)地面自动站观测资料;(6)西南区域中心区域模式分析场资料,模式空间分辨率为 9 km。

## 1 天气背景特征

2015 年 4 月 4 日傍晚至夜间,四川盆地出现了强烈的风雹、雷雨天气过程。雷雨主要出现在盆地中部—东北部,雨量为大雨或暴雨, $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的大风有 94 站,主要位于盆地中北部,其中广安市武胜县的三溪镇、飞龙镇分别于 21:41 和 21:50 出现了瞬时风速达  $38.5$ 、 $36.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的雷暴大风,并伴有平均直径为 3 mm 的冰雹。风速之大为当地有气象记录以来罕见,严重的风灾导致农作物大量受损、房屋垮塌,造成 8 人死亡、2 人重伤,直接经济损失 2 亿元。

过程前期,四川盆地以多云到晴天气为主,日平均气温持续偏高,4 日盆地东部、南部日平均气温较

历史同期偏高  $7^{\circ}\text{C}$  以上。前期持续高温,为强对流天气的发生准备了较好的能量条件。

## 1.1 天气形势

### 1.1.1 高空形势

在 2015 年 4 月 4 日 20 时 200 hPa 天气图上(图 1a),南支急流位于川渝南部,中心风速达  $52\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,盆地东北部和重庆市正好位于南支急流出口区左前侧高空辐散最为清楚的位置。同时刻 500 hPa 上空(图 1b),从甘肃南部到川西高原有低槽,槽前西南风速达  $16\sim 18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,高度槽后伴有温度槽。在 700 hPa 图上(图 1c)河套西部到甘肃南部为一支  $8\sim 16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的显著偏北气流,气流中携带有大片的 24 h 负变温区,变温中心达  $-8^{\circ}\text{C}$ ,昆明经威宁到重庆为  $14\sim 16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的西南风急流,盆地东北部既是南北两支气流对峙具有强的动力辐合抬升条件的位置,又是低空急流头部质量辐合最为清楚的位置。在 850 hPa 图上(图 1d)有 3 支气流,一支是位于盆地西部的冷东北风急流,温江站 24 h 气温下降  $6^{\circ}\text{C}$ ;另一支是从南边北上的暖湿气流受大巴山阻挡转为东北气流;还有一支是位于重庆的东南风急流,东北气流和东南风急流间形成切变线,切变线的位置和温度脊位置重合,叠置在 925 hPa 温度脊和地面暖低压上空,增强了该区域上空的条件不稳定层结。分析显示,盆地东北部和重庆市是动力抬升作用最强和条件不稳定最为显著的区域。

### 1.1.2 地形形势

在 4 月 4 日 20 时地面图上(图略),河套一带为庞大的冷高压,盆地受暖低压控制,冷锋到达盆地北部边缘,指标站酒泉、兰州与盆地低压中心气压差值均超过 22 hPa,大于《四川省短期天气预报手册》中总结的出现梯度风的压差阈值(15 hPa;李淑芳等,1986),有利于冷空气进入盆地。同时次自动站监测显示(图 2a 和 2b),地面堆积的干冷空气已经从盆地西北部进入盆地,地面转为北风, $T$  和  $T_d$  均较前一日下降  $3\sim 7^{\circ}\text{C}$ ,盆地东部仍然维持高温和高湿的状态,东西部  $T$  与  $T_d$  的差值达  $6^{\circ}\text{C}$  以上,形成温度锋区和露点温度锋区,在锋区两侧由于冷暖气和干湿分布不均匀容易引起大气层结不稳定,而地面显著气流由干冷区域吹向暖湿区域,容易在暖湿一侧触发形成对流。

## 1.2 环境场条件分析

极端大风于 4 月 4 日 21:40 前后出现在距离重

庆西北方向 50 km 的武胜县。重庆站 20 时的探空资料能代表当时的环境场特征。图 3b 显示,550 hPa 以下层  $T$  与  $T_d$  的差值较 08 时(图 3a)不同程度变小,500 和 850 hPa 之间温度递减率增大到  $27^{\circ}\text{C}$ ,中低层水汽条件变好和条件不稳定性增强导致对流有效位能由  $30\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$  上升至  $770\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,对流抑制能量迅速下降至  $190\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,发生深厚湿对流的潜势增大,只要具备合适的抬升触发条件就能克服负浮力将气块抬升到自由对流高度。同时,550 hPa 以上存在明显干层,有利于干空气夹卷进入雷暴下沉气流,使雨滴剧烈蒸发产生负浮力,加速雷暴内下沉气流速度,具有发生雷暴大风的潜势。各层风速明显增大,700~300 hPa 风速增至  $16\sim 35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,0~3 km 垂直风切变为  $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,0~6 km 垂直风切变达  $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,中等以上强度的垂直风切变有利于相对风暴气流发展,而风暴承载层平均风较大可能会导致形成的雷暴移速较快,其惯性作用也可以使得下沉气流导致的辐散风在沿着雷暴移动方向变得更大;该时次重庆站温湿廓线呈 X 形分布,形态类似王秀明等(2013)分析的湿下击暴流探空廓线形态。利用武胜站的地面  $T$  和  $T_d$  对重庆探空进行订正,对流有效位能上升至  $1400\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,指示武胜附近的环境场更有利发生深厚湿对流。

由于实况探空空间分辨率较低,不能代表不同位置大气层结状态。利用西南区域模式 4 月 4 日 20 时分析场资料沿  $30.4^{\circ}\text{N}$  做假相当位温( $\theta_{sc}$ )垂直剖面(图 4),分析发生极端大风前盆地内东西方向大气层结状态。图 4 显示,  $105.1^{\circ}\text{E}$  以西,  $\theta_{sc}$  分布上大下小,850 hPa 以下层不足  $56^{\circ}\text{C}$ ,整个大气层结处于稳定状态;  $105.1^{\circ}\sim 106.0^{\circ}\text{E}$ ,800 hPa 附近有  $68^{\circ}\text{C}$  的高值区,500 hPa 附近为  $64^{\circ}\text{C}$  的低值区,边界层内处于层结稳定状态,边界层以上处于对流不稳定状态;  $106^{\circ}\sim 108^{\circ}\text{E}$ ,  $\theta_{sc}$  分布上小下大,800 hPa 以下层为高值区,中心达  $70^{\circ}\text{C}$ ,500 hPa 附近为低值区,中心为  $50^{\circ}\text{C}$ ,整个大气层结相当不稳定。盆地自西部—中部—东部大气层结由稳定状态转为边界层以上不稳定再到整层条件不稳定,越向东大气层结越有利对流发展。

综上所述,显著偏高的地面气温及河套区域庞大的冷高压是本次过程发生的背景条件。盆地层结越向东越有利于对流发展。盆地东北部和重庆市既位于高空辐散最为清楚的位置,也是中下层动力抬升作用最强和条件不稳定最为显著的区域,同时还

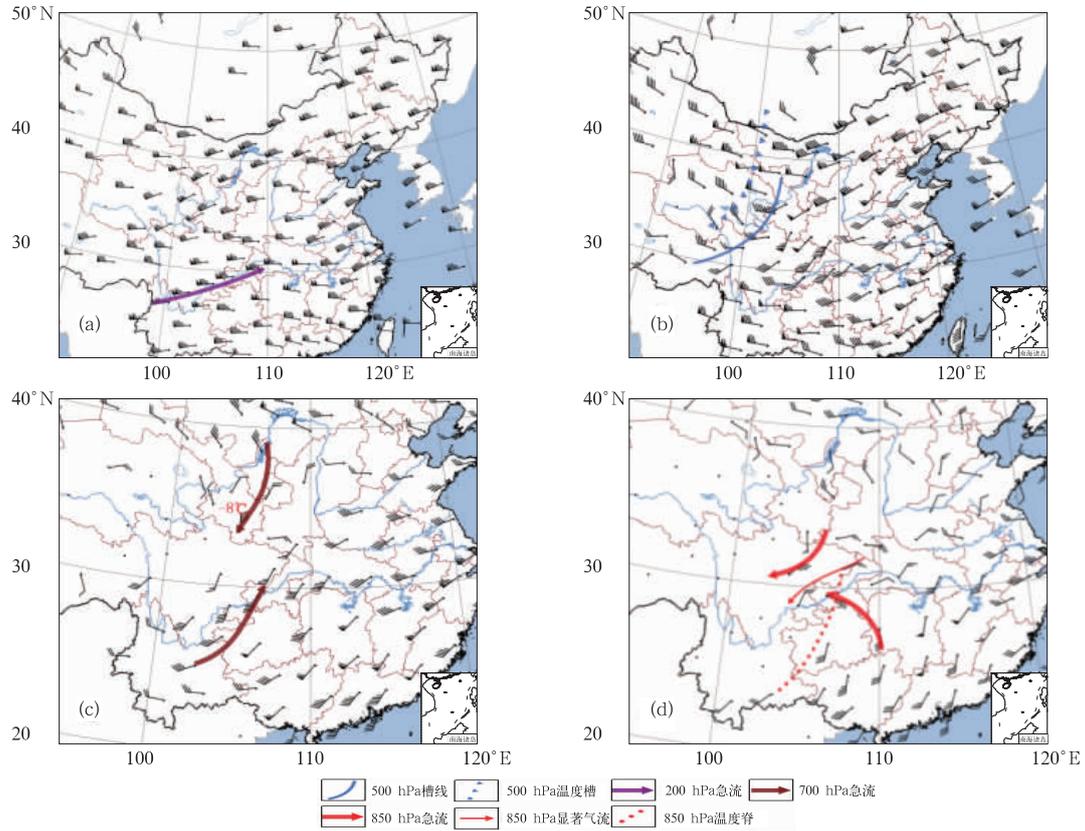


图 1 2015 年 4 月 4 日 20 时天气形势及风场

(a)200 hPa,(b)500 hPa,(c)700 hPa,(d)850 hPa

Fig. 1 The synoptic situation and wind field at 20:00 BT 4 April 2015

(a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, (d) 850 hPa

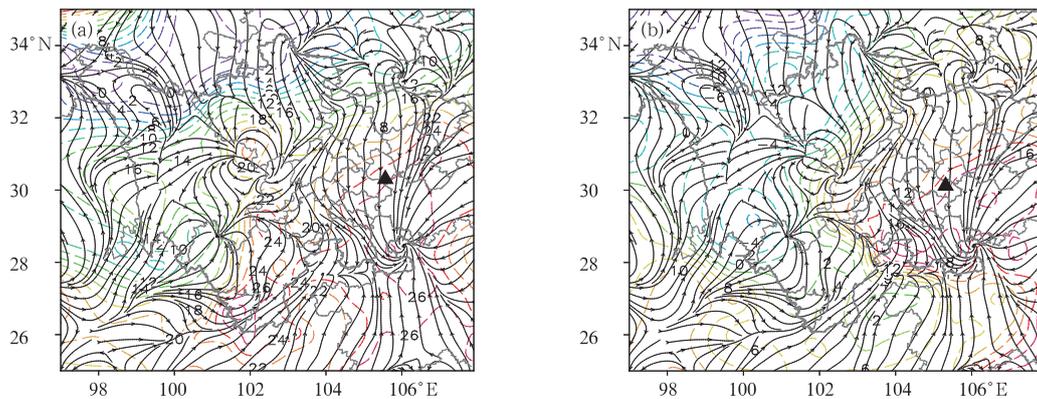


图 2 2015 年 4 月 4 日 20 时地面流线(箭头)和  $T(a)$ 、 $T_d(b)$ (虚线,单位:  $^{\circ}C$ ) 叠加

(▲:初始回波位置)

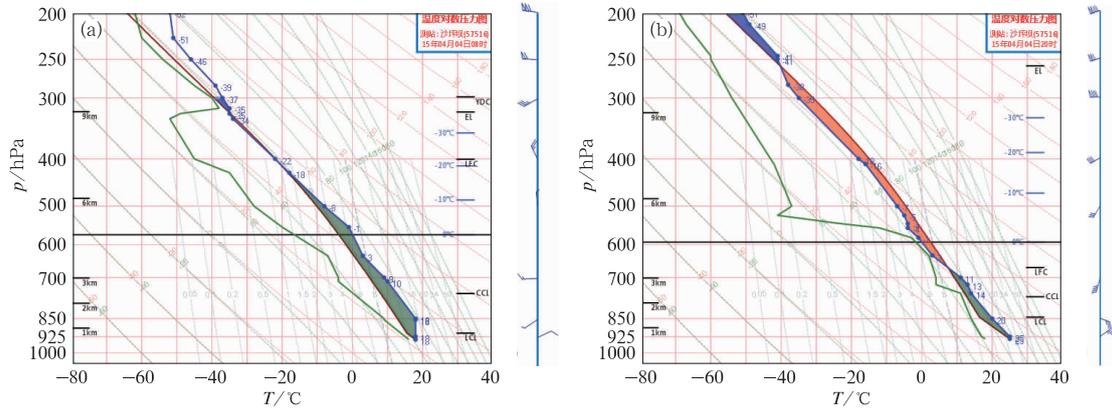
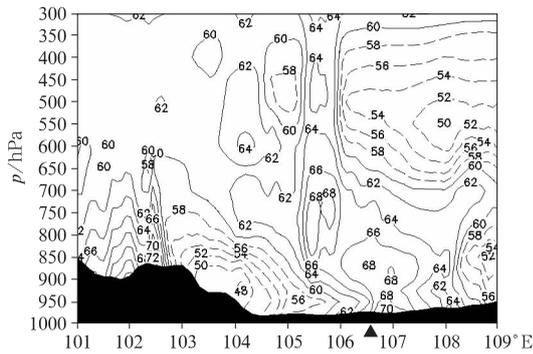
Fig. 2 Superposition of surface streamline (arrow) and temperature (a, unit:  $^{\circ}C$ , dashed line),

dew point (b, unit:  $^{\circ}C$ , dashed line) at 20:00 BT 4 April 2015

(▲: initial echo position)

具备中空干层、大的温度直减率、中等强度垂直风切变,有利于有组织性的风暴形成及干冷空气的夹卷进入。只要具备触发条件,就能促使该区域不稳定

能量释放,启动对流,形成对流风暴。该区域是最有利对流发展的潜势区域。

图 3 2015 年 4 月 4 日 08 时(a)和 20 时(b)重庆站  $T\text{-log}p$  图Fig. 3  $T\text{-log}p$  of Chongqing Station at 08:00 BT (a) and 20:00 BT (b) 4 April 2015图 4 2015 年 4 月 4 日 20 时沿  $30.4^\circ\text{N}$   $\theta_{se}$  (单位:  $^\circ\text{C}$ ) 剖面  
(▲: 极端大风位置)Fig. 4 The  $\theta_{se}$  (unit:  $^\circ\text{C}$ ) profile along the  $30.4^\circ\text{N}$  at 20:00 BT 4 April 2015  
(▲: extreme gale position)

## 2 对流风暴演变及多普勒雷达特征

### 2.1 对流风暴特征

在 4 月 4 日 15:00 FY-2E 红外云图上(图略), 从内蒙古西部到川西高原北部是一条东北—西南向冷锋云系, 四川盆地西部有低云覆盖, 气温仅为  $19\sim 24^\circ\text{C}$ , 中东部为晴空少云区, 近地层充分接收太阳短波辐射, 气温迅速上升至  $27\sim 30^\circ\text{C}$ , 大气中温度直减率增大, 条件不稳定性增强。盆地中东部具有比西部更有利于上升运动发展的环境条件。追踪逐小时红外云图, 冷锋云系缓慢东移, 19 时(图 5a)冷锋云系前部进入盆地西北部, 以层状云系为主, 没有闪电发生。20 时(图 5b)冷锋云系前部进入对流条件相对好的中部区域, 由于冷锋对暖湿气团的强迫抬升, 冷锋云系前沿有米粒状的对流云团生成, 锋前监测到闪电。与此同时, 在对流潜势最有利区域也

有对流云团生成, 同样监测到闪电。Maribel(2002)指出, 要想单体中能够产生雷电, 单体回波中 40 dBz 以上回波的顶高必须高于 7 km。闪电的存在, 说明相应区域有对流发展。21 时(图 5c)锋前对流云团和潜势区域对流云团云顶亮温降低, 面积增大, 连接成带状, 闪电频次也明显增加。从南充站  $1.5^\circ$  仰角 20:40 反射率因子图(图 5d)可以看出, 盆地回波主要由冷锋前沿多个对流单体连接形成的线状回波 A, 冷锋后部的层状云回波以及暖区内多个雷暴单体发展形成的线状回波 B 共同组成。本次大风过程是冷锋后部的梯度风以及冷锋前沿和暖区的雷暴大风共同组成的混合性大风, 极端大风由暖区线状回波在东移发展过程中产生。

### 2.2 极端雷暴大风多普勒雷达特征

上文分析指出, 极端雷暴大风是由潜势区域生成发展的线状回波造成, 下文重点分析线状回波 B 生成、发展及演变特征。

#### 2.2.1 线状回波 B 形成

分析显示: 20 时, 北方冷空气已经从盆地西北部中低层入侵, 地面风向转为一致的偏北风, 引导干冷空气移向盆地东部最为暖湿的区域, 触发不稳定区域释放对流有效位能, 获得上升运动。在 19:50 的  $1.5^\circ$  仰角反射率因子图上(图 6a), 于温度、露点温度梯度密集区暖湿区一侧有回波单体开始生成, 强度剖面(图 6b)显示该回波在中空发展, 40 dBz 以上回波位于  $4\sim 8.5$  km 高度, 最强回波中心为 55 dBz (位于 7.5 km 高度)。回波生成的位置正好是低层切变线的位置, 20:08—20:47(图 6c~6e), 沿切变线上不断有大小不等、强度不同的回波单体新生, 在有利雷暴发展的潜势区域, 各雷暴单体迅速

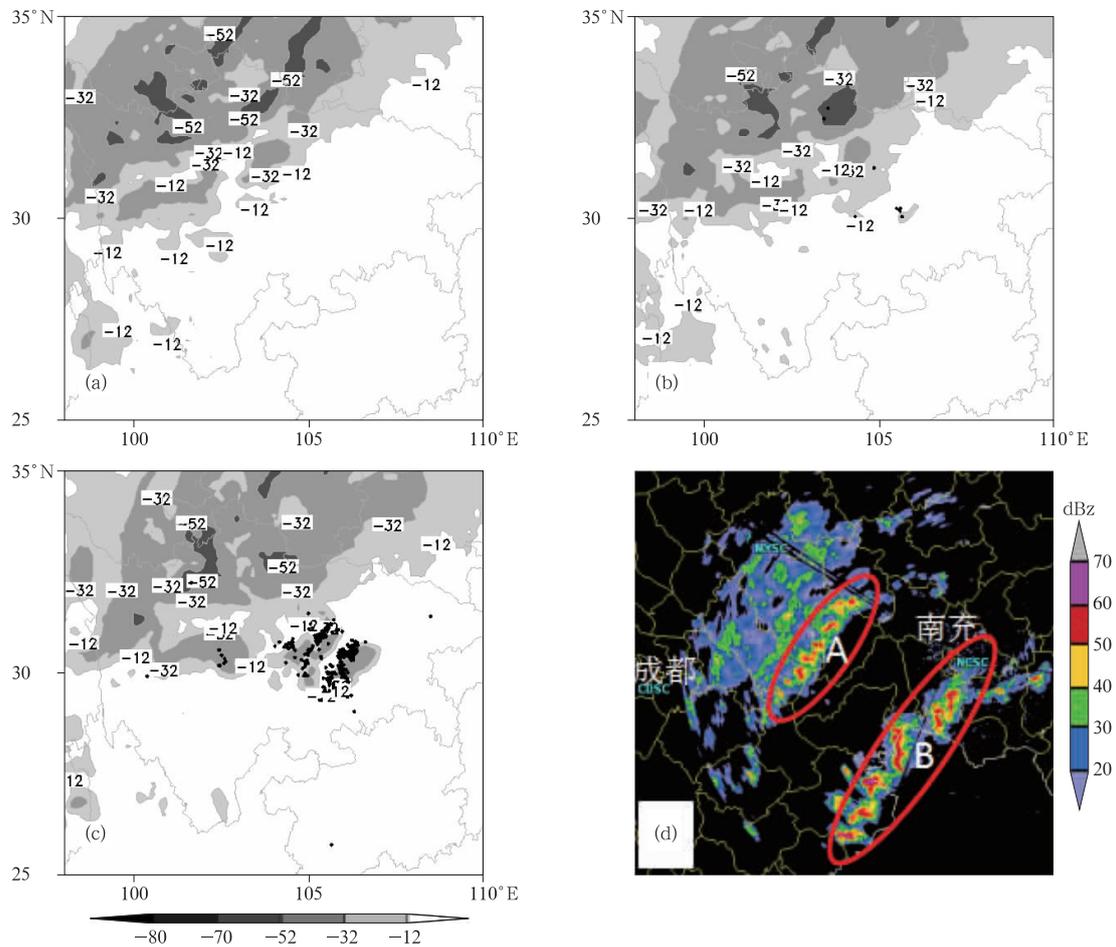


图 5 2015 年 4 月 4 日 TBB 和闪电叠加(a, b, c;阴影:TBB,单位:°C;黑点:闪电位置)及南充站 1.5°仰角反射率因子(d;A:锋前线状回波, B:暖区线状回波)  
(a) 19:00, (b) 20:00, (c) 21:00, (d) 20:40

Fig. 5 Superposition of TBB and lightning on 4 April 2015 (a, b, c; shaded area: TBB, unit: °C; black spots: lightning) and reflectivity factor at 1.5° elevation at Nanchong Radar Station (d; A: front line echo, B: warm echo)  
(a) 19:00 BT, (b) 20:00 BT, (c) 21:00 BT, (d) 20:40 BT

发展,于 21:01(图 6f)排列形成线状回波,在 500~700 hPa 西南气流引导下向东北方向移动。线状回波呈东北—西南向,形成初期长约 140 km、宽约 25 km,主要由 6 个风暴单体组成,在其前进方向右侧出现前侧 V 型缺口,是上升气流所在地,表明低层入流从前方进入上升气流中。线状回波上的风暴单体一方面受西南气流引导向东北方向移动,另一方面还受到冷锋东移南压的影响,整个移动方向是由西南向东北方向移动,雷达风暴追踪产品也证明了这一点(图略)。线状回波 B 在移动过程中给盆地东部带来了大范围的雷暴大风天气,其中  $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上的极端大风由风暴 C 造成,其他部位的大风风速均在  $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下,下文重点分析 C 风暴特征。

### 2.2.2 单体弓形与下击暴流

图 6f 显示,线状回波由多个独立的风暴组成,其中 C 风暴结构密实,面积最大,强度最强,右侧具有强反射率因子梯度,和风暴移动方向一致;中心强度超过 65 dBz,对应垂直液态水含量达  $80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  (图略),均超过普通雷暴强度;在风暴两侧分别有前侧入流缺口和后侧弱回波通道。仰角逐步抬升至  $2.4^\circ$ (图 7a)和  $4.3^\circ$ (图略),对应风暴高度 1.5~4 km,强反射率因子梯度仍然位于入流一侧,高仰角强回波叠置在低仰角弱回波区之上。仰角抬升后前侧入流缺口和后侧弱回波通道仍然清晰,说明中低层暖湿入流深厚,暖湿入流一部分直升云顶,一部分随着风暴移动方向向右斜升,形成悬垂回波,后侧

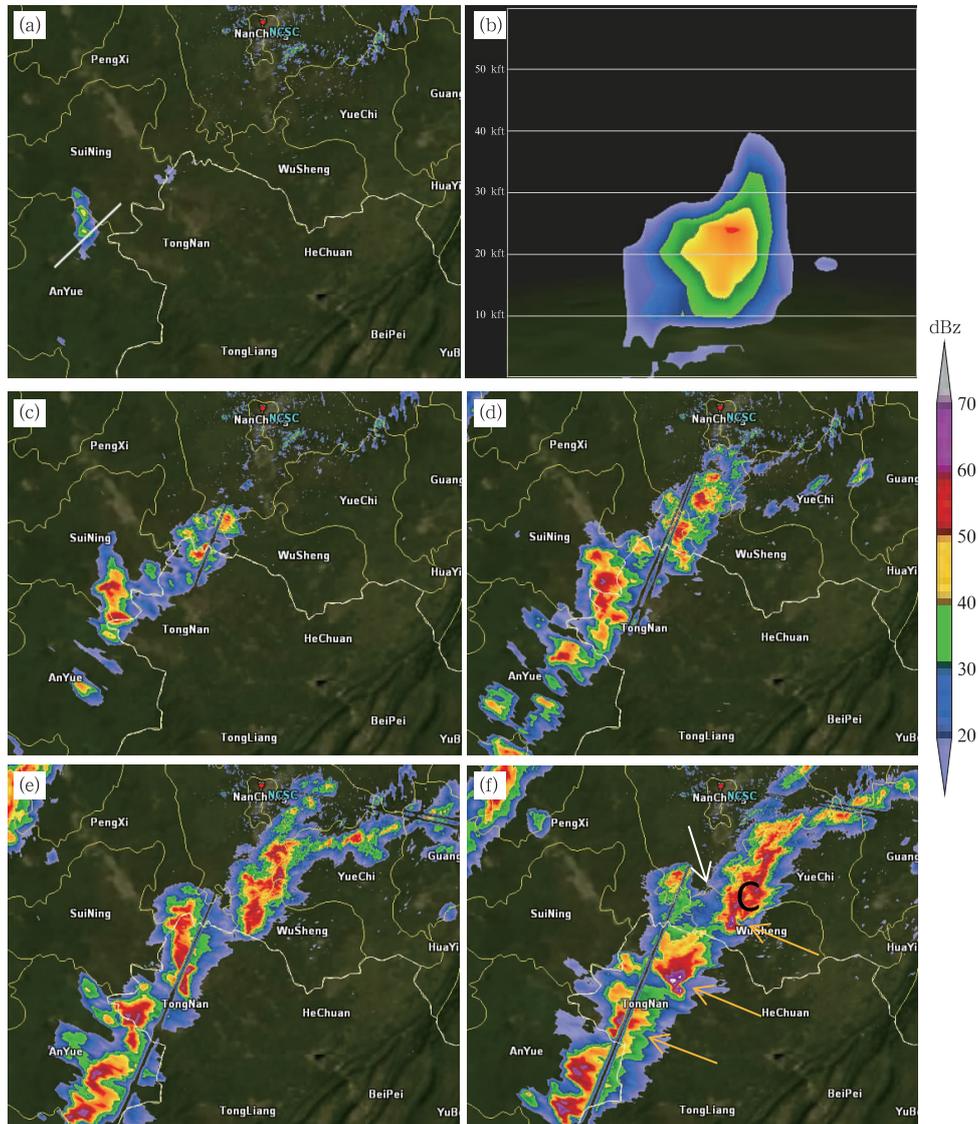


图 6 2015 年 4 月 4 日  $1.5^\circ$  仰角反射率因子 (a, c~f) 和反射率因子剖面 (b) (a) 19:50, (b) 19:50 剖面, (c) 20:08, (d) 20:25, (e) 20:47, (f) 21:01 (黄色箭头为前侧入流, 白色箭头为后侧弱回波通道, 白色实线为剖面位置)

Fig. 6 Reflectivity factor at  $1.5^\circ$  elevation (a, c~f) and reflectivity factor profile (b) on 4 April 2015

(a) 19:50 BT, (b) 19:50 BT, (c) 20:08 BT, (d) 20:25 BT, (e) 20:47 BT, (f) 21:01 BT

(yellow arrow: front side inflow, white arrow: backward weak echo channel, white solid line: profile position)

弱回波通道表明中低层有干冷空气侵入。在同时段径向速度图上, 在风暴前沿强回波区对应有径向速度辐合区。 $1.5^\circ$  仰角速度图上 (图略), 风暴前沿为径向速度风速辐合线, 辐合线后为大片的离开雷达的大风速区, 最大风速达  $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $2.4^\circ$  仰角图 (图 7b) 上, 风暴前沿为正负速度辐合线, 最大负径向速度为  $-12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最大正径向速度为  $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,

两者差值达  $33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 直至  $4.3^\circ$  仰角都维持了类似特点, 具有中层径向辐合的特征。中层径向辐合 (俞小鼎, 2006a) 的出现预示将出现较强下沉气流, 导致地面大风, 此时可根据线状回波移动方向及移动速度发布大风预警, 预警时间提前  $30 \sim 40 \text{ min}$ 。21:09, 前侧入流缺口和后侧弱回波通道仍然清晰 (图 7c), 中层径向辐合维持, 并且雷达在辐合线南

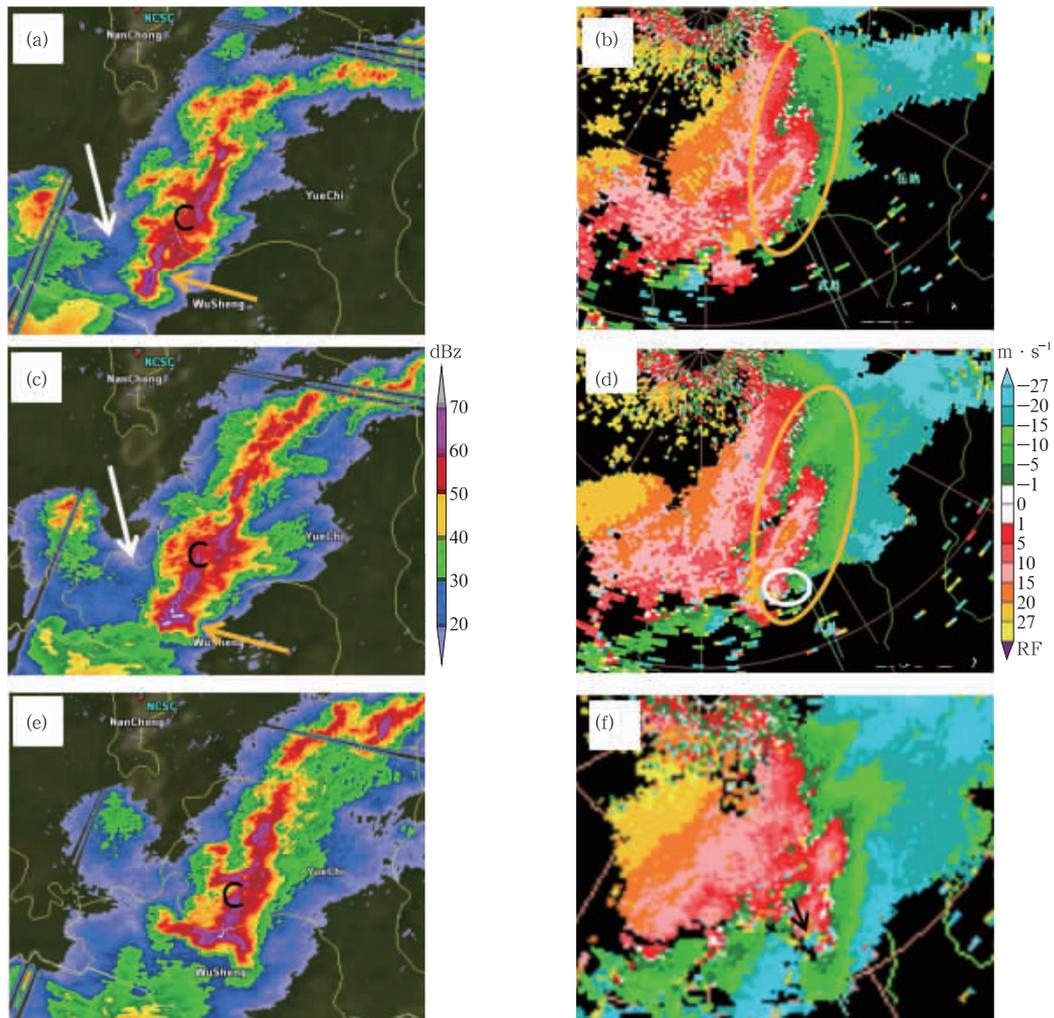


图 7 2015 年 4 月 4 日 2.4°仰角反射率因子(a,c,e)和径向速度(b,d,f)

(a, b)21:01,(c, d)21:09,(e, f)21:23

(黄色圈为中层径向辐合区,白色圈为中气旋位置,黄色箭头为前侧入流缺口,白色箭头为后侧弱回波通道,黑色箭头为后侧入流)

Fig. 7 Reflectivity factor (a, c, e), radial velocity (b, d, f) on 4 April 2015 at 2.4° elevation

(a, b) 21:01 BT, (c, d) 21:09 BT, (e, f) 21:23 BT

(yellow circle: middle radial convergence zone, white circle: mid cyclone position, yellow arrow: front side inflow, white arrow: weak echo channel in the back, black arrow: rear inflow)

部识别有中气旋(图 7d),中气旋一直到 4.3°仰角(图略),高度大约为 4 km,属于较为深厚的中气旋,中气旋的旋转将促使弱回波通道内干冷空气夹卷进入风暴内部,使得雨滴蒸发,进一步加强下沉气流,中气旋的出现可进一步确定大风强度,仍然有 20~30 min 预警时间。随后两个体扫速度图上同样识别出中气旋,正是由于中尺度涡旋环流及前侧入流和后侧入流的相互作用导致风暴 C 发展,于 21:23 形成单体弓形回波(图 7e),最强反射率因子达

71 dBz,60 dBz 以上强回波区垂直伸展到 8 km 以上,后部伴有 20 m·s<sup>-1</sup>的低层后侧入流(图 7f)。研究表明,弓形回波一旦形成,其相应的中尺度风场和对流结构特征将进一步加强灾害性大风事件的强度(俞小鼎等,2006b),此时可确定将出现强风天气,但留下的预警时间非常有限。21:31(图 8a~8d),6.0°仰角,极端大风上空约 5.5 km 高度,回波反射率强度达 72 dBz,4.3°、2.4°、0.7°仰角则分别为 53、41、21 dBz,具有高悬强回波的特点,同时刻

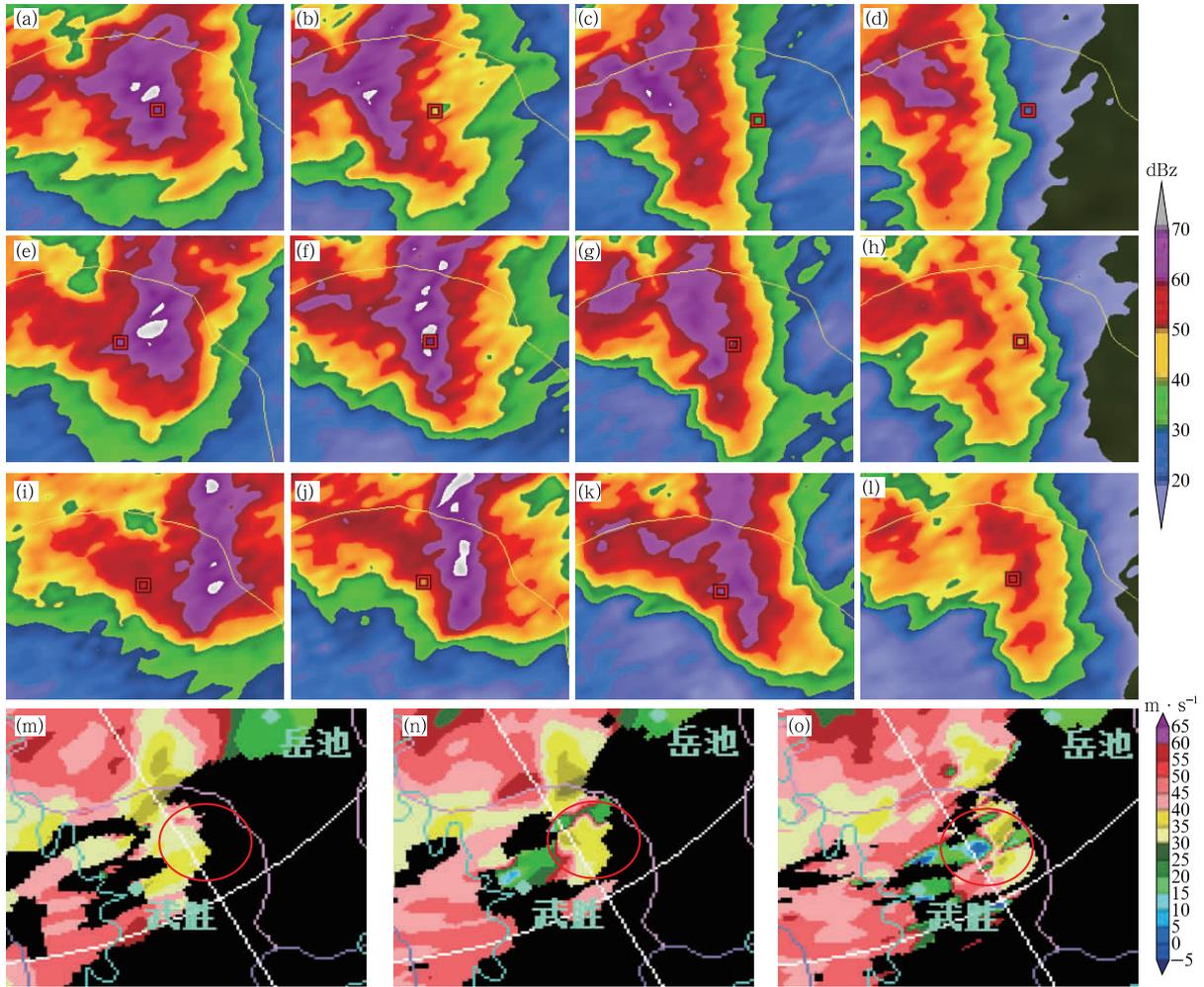


图 8 2015 年 4 月 4 日反射率因子(a~l)及  $0.5^\circ$  仰角径向速度(m~o)

(a)21:31,  $6.0^\circ$ ; (b)21:31,  $4.3^\circ$ ; (c)21:31,  $2.4^\circ$ ; (d)21:31,  $0.7^\circ$ ; (e)21:36,  $6.0^\circ$ ; (f)21:36,  $4.3^\circ$ ;  
 (g)21:36,  $2.4^\circ$ ; (h)21:36,  $0.7^\circ$ ; (i)21:40,  $6.0^\circ$ ; (j)21:40,  $4.3^\circ$ ; (k)21:40,  $2.4^\circ$ ; (l)21:40,  $0.7^\circ$ ;  
 (m)21:31; (n)21:36; (o)21:40  
 (□和红色圆圈所示为极端大风位置)

Fig. 8 Reflectivity factor (a-l) and radial velocity diagram (m-o) at  $0.5^\circ$  elevation on 4 April 2015

(a) 21:31 BT,  $6.0^\circ$ ; (b) 21:31 BT,  $4.3^\circ$ ; (c) 21:31 BT,  $2.4^\circ$ ; (d) 21:31 BT,  $0.7^\circ$ ; (e) 21:36 BT,  $6.0^\circ$ ;  
 (f) 21:36 BT,  $4.3^\circ$ ; (g) 21:36 BT,  $2.4^\circ$ ; (h) 21:36 BT,  $0.7^\circ$ ; (i) 21:40 BT,  $6.0^\circ$ ; (j) 21:40 BT,  $4.3^\circ$ ;  
 (k) 21:40 BT,  $2.4^\circ$ ; (l) 21:40 BT,  $0.7^\circ$ ; (m) 21:31 BT; (n) 21:36 BT; (o) 21:40 BT  
 (□ and red circle are the maximum wind position)

$0.5^\circ$  径向速度图上(图 8m),以离开雷达的正速度为主,极端大风位置径向速度为  $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。21:36(图 8e~8h), $6.0^\circ$ 、 $4.3^\circ$ 、 $2.4^\circ$ 、 $0.7^\circ$  仰角反射率强度分别为 59、72、61、48 dBz,高仰角强度降低,低仰角强度增加,强反射率核心下移至 4 km 高度,在  $0.5^\circ$  仰角速度图上(图 8n),相同位置径向速度增大至  $33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,西北侧开始出现辐散气流;21:40(图 8i~8l),强反射率核心高度继续下降, $2.4^\circ$ 、 $0.7^\circ$  仰角强度增至 67、57 dBz,在  $0.5^\circ$  仰角径向速度图上

(图 8o)观测到串在径向上的正负速度对,正负速度差值约  $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,三溪站随即监测到  $38.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的灾害性大风并伴有平均直径 3 mm 的冰雹和  $34.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的短时强降水。飞龙站大风也具有类似回波特征并伴有  $14.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  降水。通过上述分析可以推断,本次极端大风是由单体弓形回波带来的湿下击暴流所导致。单体弓形回波中高反射率因子的高度连续下降意味着下沉气流伴随降水粒子下降,干空气被夹卷进入下沉气流使得雨滴迅速

蒸发,大大加强了下沉气流强度,因而显著增加了大风强度。

综合分析显示,低层气流引导干冷空气进入暖湿区域,在低层切变线上触发生成一系列雷暴单体,雷暴单体在有利雷暴大风形成的潜势区域迅速发展成线状回波,其中一个风暴发展成单体弓形回波,弓形回波在快速移动过程中强反射率因子高度的连续下降导致地面产生极端雷暴大风。

### 3 结 论

本文利用常规观测资料、FY-2E 卫星资料、多普勒雷达产品、闪电定位资料、自动气象站资料等,分析了 2015 年 4 月 4 日出现在四川盆地的极端大风过程的天气特点、环境场条件及相应的多普勒雷达观测事实,总结了本次过程的成因及预报着眼点。

(1) 本次大风过程发生在前期天气晴好,日平均气温持续偏高,具有显著高空冷平流和地面冷空气的天气背景下。雷暴大风由冷锋对暖湿气团的强迫抬升以及干冷空气进入暖湿区域触发形成。极端雷暴大风发生在中等强度垂直风切变环境中,其上空既具有中空干层和大的温度直减率,同时又位于高低空急流耦合区域及低层温度脊附近,是动力抬升作用最强和条件不稳定显著的区域。

(2) 本次个例冷空气首先从盆地西北部中低层入侵,在低层切变线上触发生成一系列雷暴单体,在最有利对流发展的潜势区域迅速发展成线状回波。线状回波北段观测到的中尺度涡旋环流、前侧入流和后侧入流的相互作用导致形成单体弓形回波。极端雷暴大风就是由移动线状回波上发展的单体弓形回波带来的湿下击暴流所导致。弓形回波中强反射率因子的高度连续下降意味着下沉气流伴随降水粒子下降,干空气被夹卷进入下沉气流使得雨滴迅速蒸发,大大加强了下沉气流强度,因而显著增加了大风强度。

(3) 云顶亮温降低、闪电频次同步增加可以判断雷暴处于爆发阶段,对强对流临近预警有指示作用。

(4) 本次过程的预报着眼点在于,首先根据实况观测资料,判断是否具备产生强对流天气的背景条件。再进行对流潜势综合分析,确定最有利对流发展的潜势区域。在短时临近预报时段重点关注潜势区域中具备触发条件的位置及该区域雷暴的发展演变,最后根据雷达回波形态特点、移动方向、演变

趋势提前发布大风预警信号。

**致谢:**感谢中国气象局气象干部培训学院俞小鼎教授的悉心指导。

### 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.
- 陈章,顾清源,1994.四川盆地一次非典型环境场的强对流过程[J].四川气象,14(1):30-33,13.
- 费海燕,王秀明,周小刚,等,2016.中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J].气象,42(12):1513-1521.
- 李庆,黄成亮,2002.四川盆地一次罕见强烈飏线雷达回波分析[J].四川气象,22(1):46-48.
- 李淑芳,王之义,郑家骅,等,1986.四川省短期天气预报手册[M].成都:四川省气象局:125-127.
- 廖晓农,俞小鼎,王迎春,2008.北京地区一次罕见的雷暴大风过程特征分析[J].高原气象,27(6):1350-1362.
- 蒲吉光,甚贵珣,康岚,2002.“4·4”强对流天气成因分析[J].四川气象,22(3):17-19.
- 隋迎久,蔡丽娜,王昌双,2010.一次山地环流激发对流天气的数值模拟[J].气象,36(5):78-84.
- 王福侠,俞小鼎,裴宇杰,等,2016.河北省雷暴大风的雷达回波特征及预报关键点[J].应用气象学报,27(3):342-351.
- 王小明,谢静芳,1994.东北地形对强对流天气影响的分析[J].地理科学,14(4):347-354.
- 王秀明,2008.强对流云实例的发生发展和结构演变模拟研究[D].北京:中国科学院大气物理研究所:27-66.
- 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.
- 杨新林,孙建华,鲁蓉,等,2017.华南雷暴大风天气的环境条件分布特征[J].气象,43(7):769-780.
- 姚叶青,俞小鼎,张义军,等,2008.一次典型飏线过程多普勒天气雷达资料分析[J].高原气象,27(2):373-381.
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等,2006a.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社:91-180.
- 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等,2006b.一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析[J].应用气象学报,17(4):385-393.
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].气象学报,70(3):311-337.
- 曾明剑,王桂臣,吴海英,等,2015.基于中尺度数值模式的分类强对流天气预报方法研究[J].气象学报,73(5):868-882.
- 钟利华,曾鹏,李勇,等,2011.广西雷暴大风环流特征和物理量诊断分析[J].气象,37(1):59-65.
- 朱君鉴,刁秀广,曲军,等,2008.4.28 临沂强对流灾害性大风多普勒天气雷达产品分析[J].气象,34(12):21-26,129.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等,2003.天气学原理和方法:第 3 版[M].北京:气象出版社:235-245,340-349.
- Martinez M, 2002. The relationship between radar reflectivity and lightning activity at initial stages of convective storms [C] // 82nd Annual Meeting, First Annual Student Conference. Orlando: American Meteorological Society.