

陈桂峰, 胡萍, 陈军, 等. 铜仁市一次雷暴大风过程分析[J]. 中低纬山地气象, 2023, 47(3): 53 - 60.

铜仁市一次雷暴大风过程分析

陈桂峰¹, 胡萍², 陈军², 张李娟³, 兰世敏⁴, 龙飞翼⁴

(1. 贵州省江口县气象局, 贵州 江口 554400; 2. 贵州省铜仁市气象局, 贵州 铜仁 554300;
3. 贵州省万山特区气象局, 贵州 万山 554200; 4. 贵州省石阡县气象局, 贵州 石阡 555100)

摘要:利用常规站资料、ERA5 资料($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)、务川雷达和铜仁新一代多普勒天气雷达资料对 2022 年 4 月 24 日发生在贵州铜仁市多个区(县)的一次雷暴大风过程进行分析。结果表明:(1)此次天气过程发生在上干下湿的不稳定环境中,高空槽、南支槽、低涡、切变线和地面辐合线都为此次强对流天气过程提供了触发条件。(2)大的 DCAPE 值、中层中等强度的垂直风切变和低层较强的垂直风切变以及较大的 850 hPa 与 500 hPa 的温差都是利于大风产生的条件。(3)大风常常出现在弓形回波前部突出处,高悬的强回波、弱回波区、高的回波顶高以及径向速度中出现逆风区和强并且深厚的中层径向辐合等都是出现大风天气的雷达产品特征。

关键词:雷暴大风;弓形回波;逆风区

中图分类号:P458.1+21.1 **文献标识码:**A

Analysis of a Thunderstorm Gale Process in Tongren City

CHEN Guifeng¹, HU Ping², CHEN Jun², ZHANG Lijuan³, LAN Shimin⁴, LONG Feiyi⁴

(1. Jiangkou Meteorological Bureau of Guizhou Province, Jiangkou 554400, China; 2. Tongren Meteorological Bureau of Guizhou Province, Tongren 554300, China; 3. Wanshan Meteorological Bureau of Guizhou Province, Wanshan 554200, China; 4. Shiqian Meteorological Bureau of Guizhou Province, Shiqian 555100, China)

Abstract: Base on station data, ERA5 data ($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$), Wuchuan radar and Tongren new-generation Doppler weather radar data, the process of a thunderstorm gale occurred in Tongren City, Guizhou Province on April 24, 2022 was analyzed. The results show that: (1) the weather process is dry wet unstable environment, high trough, south trough, vortex, shear line and ground convergence conditions for the strong convective weather process. (2) Large DCAPE value, moderate strength vertical wind shear in the middle layer, strong vertical wind shear in the lower layer, and a large temperature difference between 850 hPa and 500 hPa are all conditions conducive to strong wind generation. (3) Strong wind often appears at the protrusion of the front part of the bow echo. The high hanging strong echo, weak echo area, high echo top high and strong headwind zone and deep middle level radial convergence in the radial velocity are all the characteristics of radar products in windy weather.

Key words: thunderstorm wind; bow echo; headwind area

0 引言

在影响我国的灾害性天气中,强对流天气是最为常见的,铜仁市受强对流天气影响也十分频繁。

生成、发展、消亡迅速,区域性强,过程强烈都是强对流天气的明显特性,这也给天气预报造成很多困难。铜仁市出现的强对流天气一般有雷暴大风、短时强降水、冰雹,它们都是影响铜仁市的重要灾害

收稿日期:2022-09-03

第一作者简介:陈桂峰(1998—),男,助工,主要从事短临天气预报及雷达短临监测预警,E-mail:739072153@qq.com。

资助项目:贵州省气象局科研业务项目(黔气科登[2021]07-10号):铜仁市雷暴大风特征及预报指标分析;铜仁市短临预报预警研究团队。

性天气,给人民群众造成财物经济损失,甚至危害人民的生命安全。为了与常规性大风相区分,把在雷暴大风天气过程中出现的 >7 级 ($\geq 17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 的阵风称为“雷暴大风”或“雷雨强风”。贵州省地势复杂多变,西高东低,主要以高原、山地、丘陵冲积平原为主。根据李力等^[1]的研究,贵州雷暴大风发生在 3—10 月,雷暴大风发生的高频时段在午后到前半夜。

强对流天气中,雷暴大风发生的频率很高,但预报难度也很大。在短临预报中,常利用雷达产品资料对雷暴大风作出预测,气象工作者在这方面做了大量工作^[2-7],得出产生雷暴大风主要有 2 个因素:一个是多复合单体内的下沉气体在地面辐散聚集后,以较快的速率往前移动形成的强风;另一个是雷暴内的下沉气体到达地表附近形成的强辐散风。

本文利用常规站资料、ERA5 资料 ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) 以及务川雷达和铜仁新一代多普勒天气雷达资料,对 2022 年 4 月 24 日发生在贵州省铜仁市的一次区域性雷暴大风天气过程进行分析,总结铜仁市雷暴大风天气的环流、物理量和雷达产品的特征,为今后铜仁雷暴大风天气的预报监测提供一定的参考。

1 雷暴大风分布及环流背景

1.1 天气概况

2022 年 4 月 24 日 13—19 时,贵州省铜仁市出现了 2 次强对流天气过程。午后的过程中松桃出现了大风、冰雹和短时强降水天气,其中盘信镇出现 $27.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (盘信站)、 $18.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (杨柳站) 的雷暴大风,盘信镇杨柳村与子云村出现冰雹天气。傍晚的过程中江口、石阡、思南、德江、印江出现大范围的雷暴大风、短时强降水天气,其中思南县、印江县均出现小时雨强 $20 \sim 30 \text{ mm}$ 的短时强降水(图 1)。

1.2 环流形势分析

08 时 500 hPa 高空槽位于宁夏南部—四川—贵州西北部,铜仁市受槽前西南气流影响;南支槽位于贵州东南部—广西中部,铜仁市处于干区 ($T - T_d \geq 15^\circ \text{C}$);700 hPa 低涡位于川东,铜仁市受低涡切变东南侧西南急流影响;850 hPa 低涡位于四川东南部,铜仁市位于低涡底部前部,铜仁市处于湿区 ($T - T_d \leq 5^\circ \text{C}$) 以及 $T_{850-500}$ 大值区 ($T_{850-500} \geq 25^\circ \text{C}$);地面辐合线位于铜仁市北部(图 2a)。铜仁市处于“上干下湿”及较强的热力不稳定层结中,受地面中尺

度辐合线抬升,利于触发强对流天气。

20 时 500 hPa 高空槽东移至陕西南部—重庆—贵州中北部,铜仁市仍受槽前西南气流控制;南支槽加深发展,西太副高西伸北抬至南部沿海,经降水影响后, $T - T_d$ 增大;700 hPa 低涡位于重庆、陕西交界,铜仁市受切变影响;850 hPa 低涡在湖北中北部,切变线在铜仁市东南部,即将移出铜仁市。铜仁市处于湿区 ($T - T_d \leq 5^\circ \text{C}$);地面辐合线位于铜仁市中部—贵州省中部(图 2b)。此时铜仁市的不稳定能量已基本释放,但仍有很好的触发抬升条件和更好的水汽条件,这种环流形势下以短时强降水天气为主,强对流天气过程趋于结束。

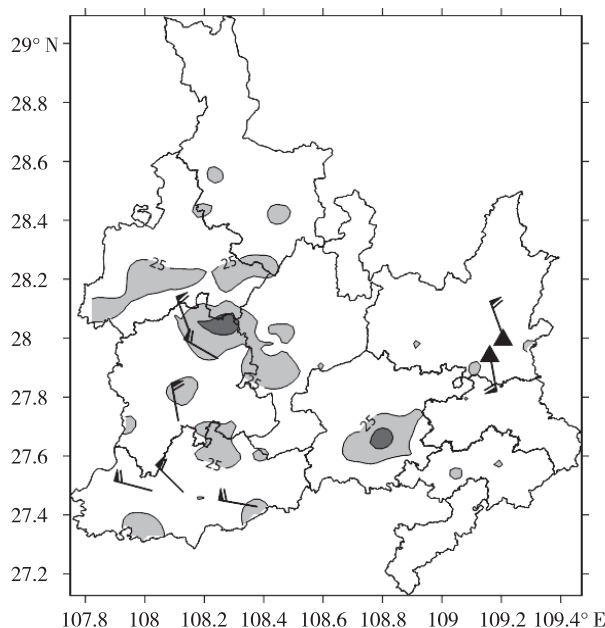


图 1 2022 年 4 月 24 日贵州省铜仁市大风、降水分布与冰雹落区(▲)

Fig. 1 Distribution of gale and precipitation and hail (▲) in Tongren City, Guizhou Province on April 24, 2022

1.3 环境条件

强对流过程发生前的大气环境条件,除了对天气形势和天气系统配置分析外,还需要对表征大气热力、水汽条件和动力状态的物理参数进行研究^[8]。为了进一步分析强对流天气发生前的环境条件,我们对怀化站和贵阳站的探空资料和 $T - \ln P$ 图进行了分析。08 时怀化探空层结曲线与露点曲线之间呈向上开口喇叭状,为上干下湿的不稳定层结,贵阳站探空也为向上开口喇叭状的上干下湿不稳定层结,铜仁市受低压影响,白天升温明显,不稳定能量得到聚集,十分有利于强对流天气的发生。

08 时贵阳站对流有效位能 (CAPE) 为 857.4 J

$\cdot \text{kg}^{-1}$,为中等强度。DCAPE 值怀化站为 887.7,贵阳站为 5.6。怀化站具有很强的 DCAPE 值,是产生雷暴大风的一个很好的指标。怀化站 0~6 km 垂直风切变为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,贵阳站为 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,属于中

等强度的垂直风切变;0~1 km 的垂直风切变为 $13.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,贵阳站为 $11.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,低层具有较强的垂直风切变。0℃层在 600 hPa 附近, -20℃层在 400 hPa 附近,有利于冰雹的产生。

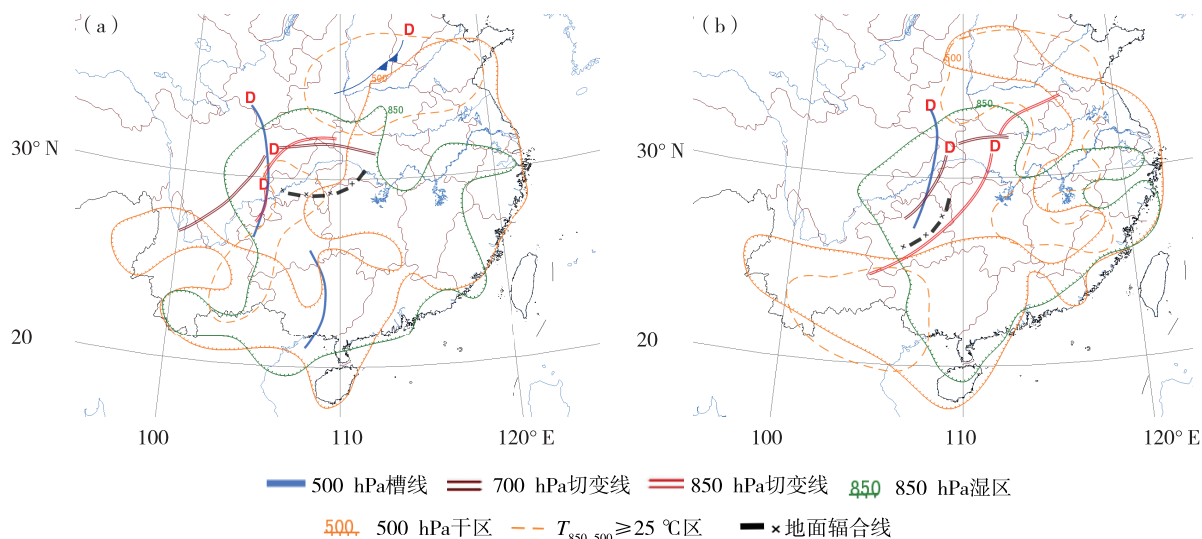


图2 2022年4月24日08时(a)和20时(b)强对流天气系统配置

Fig.2 Severe convective weather system configuration at 08:00 (a) and 20:00 (b) on April 24, 2022

20时怀化站、贵阳站湿层均增厚,怀化站对流有效位能(CAPE)为 $631.1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,贵阳站为 $57.1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。0~6 km 垂直风切变怀化站为 $13.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,贵阳为 $10.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;0~1 km 的垂直风切变怀化站为 $12.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,贵阳站为 $7.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,贵阳站垂直风切变减小,怀化站低层仍有较强的垂直风切

变。08时、20时2个站850 hPa与500 hPa的温度差都超过 23°C ,都具有一定的不稳定层结。怀化、贵阳站的对流有效位能已经释放,怀化站的能量重新积蓄,由于湿层增厚贵阳以降水为主,怀化以雷暴大风、短时强降水为主。

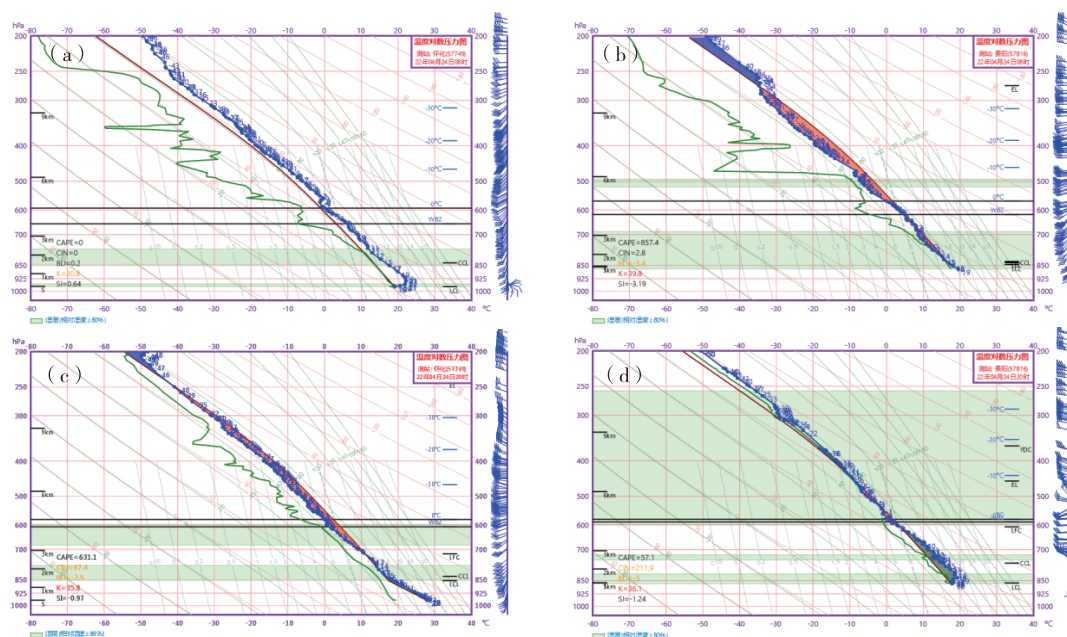


图3 2022年4月24日08时怀化站(a)、贵阳站(b)和20时怀化站(c)、贵阳站(d)探空图

Fig.3 Sounding curve of Huaihua station(a), Guiyang station (b) at 08:00 and Huaihua station(c) and Guiyang station(d) at 20:00 on April 24, 2022

表 1 2022 年 4 月 24 日怀化站、贵阳站的对流参数

Tab. 1 Convection parameters of Huaihua station and Guiyang station on April 24, 2022

时间	K 指数/℃	SI 指数/℃	CAPE/ (J · kg ⁻¹)	$\Delta T_{850} - T_{500}$ /℃	0 - 6 km 垂直 风切变/(m · s ⁻¹)	0 - 1 km 垂直 风切变/(m · s ⁻¹)
怀化 08 时	30.8	0.64	0.0	23.6	14.0	13.1
贵阳 08 时	35.8	-0.97	857.4	25.0	17.0	10.8
怀化 20 时	35.8	0.97	631.1	24.7	13.3	12.7
贵阳 20 时	36.1	-1.24	57.1	23.6	11.7	7.9

4 月 24 日强对流发生前,地面气压场上铜仁市位于低压底前部,贵州省东北部—湖南西部存在一条地面辐合线,铜仁市受辐合线影响。从表 2 可知,4 月 24 日 16 时后张家寨站,18 时后伍德站、国荣站气温也出现骤降,最大小时降温幅度达 6.9℃(国

荣)。18 时后铜仁市大部的气压都增加,19 时、20 时的 3 h 变压都为正变压。随着低涡切变线的移入,铜仁市自西向东部分乡镇先后出现了雷暴大风、短时强降水等强对流天气。

表 2 2022 年 4 月 24 日 16—20 时伍德、国荣、张家寨温度及降水变化

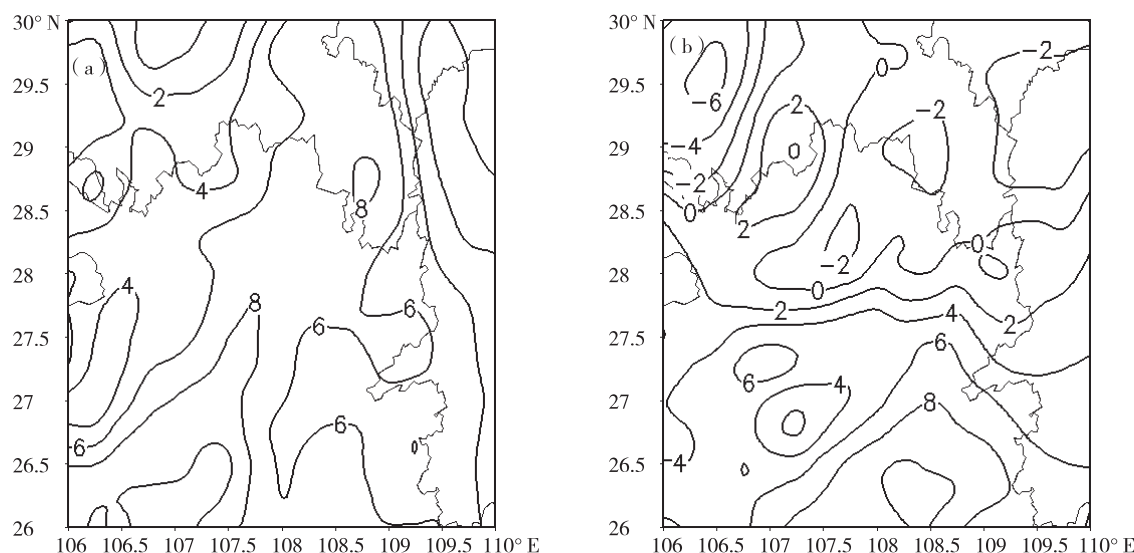
Tab. 2 Temperature and precipitation changes of Wude, Guorong and Zhangjiazhai from 16:00 to 20:00 on April 24, 2022

时刻	伍德(20.3 m · s ⁻¹)		国荣(24.4 m · s ⁻¹)		张家寨(20.2 m · s ⁻¹)	
	温度/℃	降水/mm	温度/℃	降水/mm	温度/℃	降水/mm
16 时	25.6		26.9		26.8	
17 时	24.7		25.9		21.9	0.1
18 时	24.0		24.4		18.0	25.8
19 时	21.3	1.9	17.5	0.1	18.6	0.2
20 时	18.0	30.8	17.5		18.6	4.1

1.4 热力不稳定条件

利用 ERA5 资料绘制 2022 年 4 月 24 日 700 hPa 与 500 hPa 假相当位温的 θ_{se} 的差值 $\Delta\theta_{se}$ 分布图。由图可以看出,24 日 13 时(图 4a)铜仁市假相当位温差值在 6℃左右,为正值,说明 700 ~ 500 hPa

之间存在对流不稳定;强对流天气(雷暴大风、冰雹)发生后,20 时(图 4b)铜仁市 $\Delta\theta_{se}$ 减小到 0 ~ 2℃左右,对流不稳定减弱,且对流不稳定能量已经释放,图 4 对流趋于稳定。

图 4 2022 年 4 月 24 日 700 hPa 与 500 hPa 的假相当位温差值 $\Delta\theta_{se}$ 的分布(单位:℃)Fig. 4 Distribution of potential pseudo - equivalent temperature $\Delta\theta_{se}$ on 700 hPa and 500 hPa on 24 April 2022 (unit: °C)

1.5 水汽条件

利用 ERA5 资料绘制 2022 年 4 月 24 日 13 时

和 17 时铜仁市附近的风场和比湿场分布图(图 5)。由图可以看出,13 时和 17 时 700 hPa 为西南气流,

风速在 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,比湿在 $8 \sim 9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;850 hPa 为偏南气流,13 时风速在 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,比湿大约为 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;17 时风速增大至 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,比湿在 $14 \sim 15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;700 hPa 和 850 hPa 的西

南风与偏南风风速不大,但都给铜仁市提供了丰富的水汽输送,而正比湿平流的存在,也给雷暴与短时强降水天气提供了很好的水汽条件。

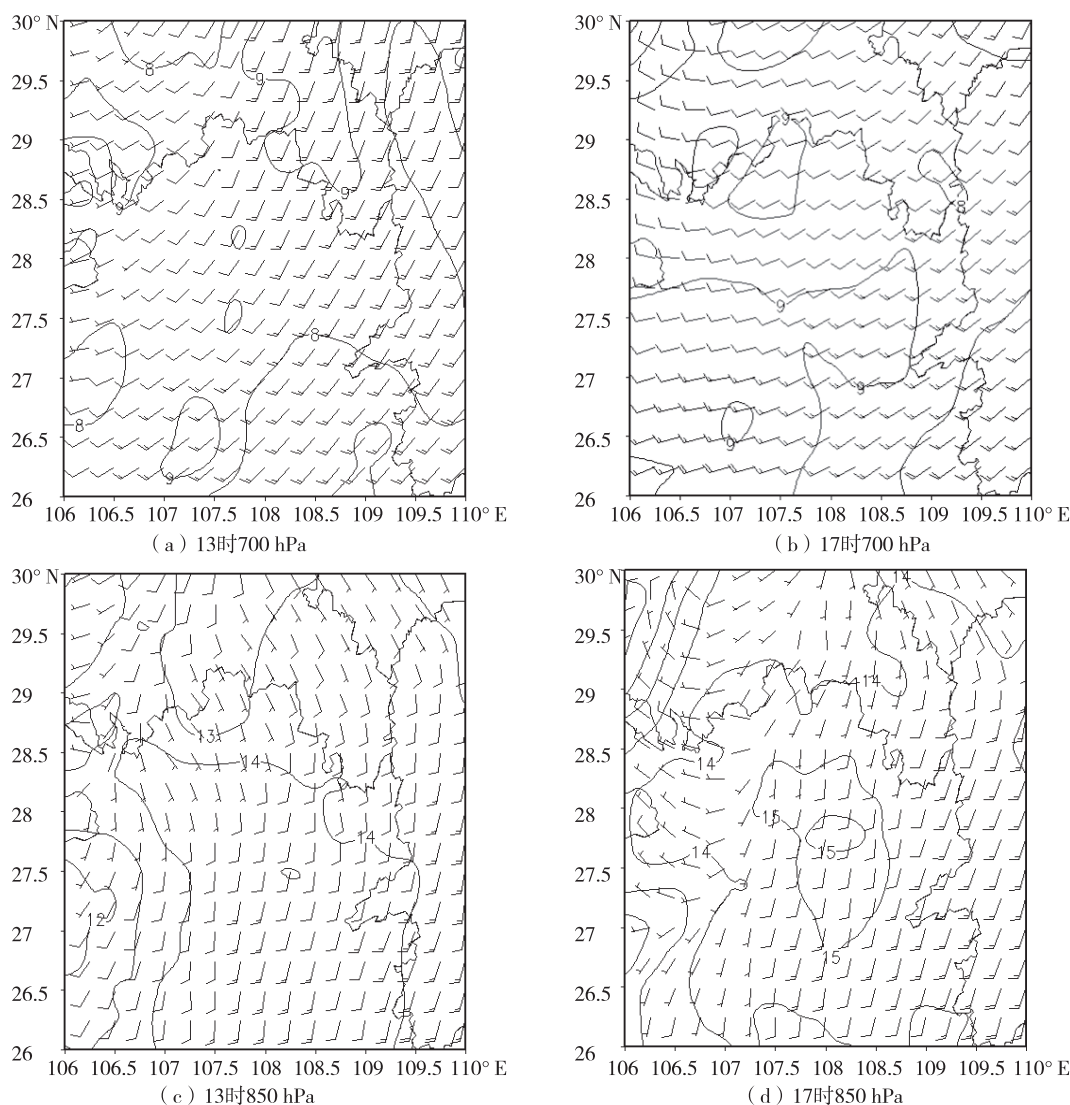


图5 2022年4月24日13时、17时700 hPa与850 hPa的风场(风向标,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和比湿场(实线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)分布

Fig. 5 Distribution of wind field (wind vane, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and specific humidity field (solid line, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) on 700 hPa and 850 hPa at 13:00 and 17:00 on April 24, 2022

1.6 动力条件

选择2个出现大风的站点作散度垂直剖面图和垂直速度剖面图,其中盘信站(109.2°E 、 28°N 附近)13时48分出现 $27.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风,国荣站(108.11°E 、 25.5°N 附近)18时46分出现 $24.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风。

从散度垂直剖面图可见,盘信14时中低层为辐合区,在800 hPa、600~500 hPa附近的辐合中心散度 $\leq -4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,即近地面层辐散。近地面层辐散、中低层辐合,说明近地面层有下沉运动,中层为

上升运动(图6a)。国荣18时近地面层弱辐合,900 hPa附近为强辐散区,辐散中心强度 $\geq 8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,800 hPa附近为辐合区,辐合中心强度 $\leq -4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,700~400 hPa为辐散区(图6b)。说明近地面层有下沉运动、低层有上升运动、中层有下沉运动。

从垂直速度垂直剖面可见,盘信14时低层和近地面层有弱下沉气流,中高层为上升气流,强中心位于400~500 hPa,最大的垂直速度 $\geq -1.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ (图7a)。国荣18时整层都是下沉气流,中低层是弱下沉气流,高层的下沉气流较强,强中心位于

600 ~ 500 hPa, 最大的垂直速度 $\geq 0.7 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 7b)。强烈的上升气流触发强的抬升, 给降雹提供很好的条件。导致下击暴流和地面阵风的主要原

因之一就是下沉气流, 所以下沉气流是强风暴的一个重要特征。

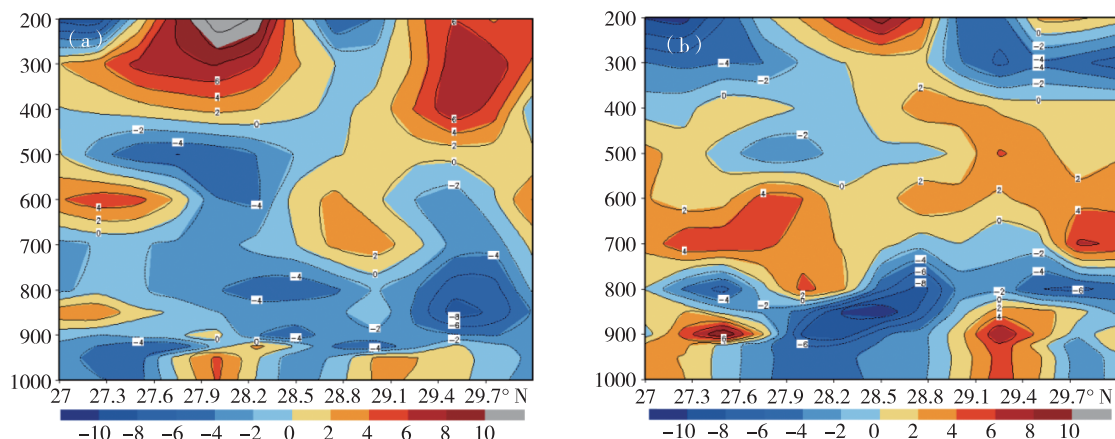


图 6 2022 年 4 月 24 日 14 时沿 109.2°E(a) 和 18 时沿 108.11°E(b) 散度剖面图

Fig. 6 Divergence profiles at 14:00 along 109.2°E (a) and at 18:00 along 108.11°E(b) on April 24, 2022

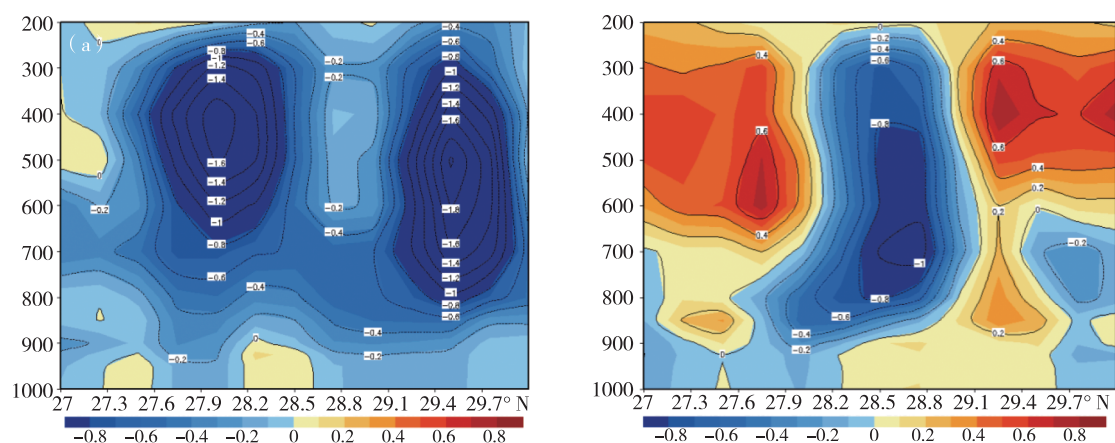


图 7 2022 年 4 月 24 日 14 时沿 109.2°E(a) 和 18 时沿 108.11°E(b) 垂直速度剖面图

Fig. 7 Vertical velocity profiles at 14:00 along 109.2°E (a) and at 18:00 along 108.11°E(b) on April 24, 2022

2 雷达回波特征

本文选择了务川和铜仁的多普勒雷达回波资料进行分析。4 月 24 日强对流过程可以分为 2 个阶段, 即 13—14 时松桃县盘信镇的大风、冰雹过程和 17—19 时铜仁市西部、中部的大风、短时强降水过程。

12 时 20 分左右回波在江口县生成后北移发展, 13 时 34 分单体风暴移至松桃县并发展得很旺盛, 回波顶高最高为 18.1 km, 十分有利于雷暴大风的产生(图 8a); 13 时 29 分—13 时 40 分, 垂直液态水含量(VIL)从 $41 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 跃增到 $54 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 8b), 很大程度上提升了降雹的可能性。13 时 40 分回波中心强度达 71.5 dBz, 贵州使用的是 C 波段雷

达, 在这一波段, 小冰雹也可产生 TBSS 现象^[10], 组合反射率图上出现了三体散射(TBSS)现象(图 8c)。由于回波离务川雷达站距离远, 所以无法扫到低层的回波, 不过从反射率因子剖面图仍可以看出, 55 dBz 强度的强中心已经伸展到 10 km 左右, 65 dBz 以上强度的强中心伸展高度也达到 8 km 左右, 回波顶高超 12 km, 且存在弱回波区(图 8d)。

松桃县盘信镇的杨柳站和盘信站, 在 13 时 40 分与 13 时 48 分分别出现 $18.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 与 $27.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的雷暴大风, 同时伴有冰雹天气。结合上述雷达回波特征分析, 高悬的回波、强的回波中心以及弱回波区都是发生雷暴大风和冰雹天气很好的指示, 另外, 高的回波顶高、大的垂直液态水含量及激增分别对雷暴大风、冰雹的发生更有指导意义。

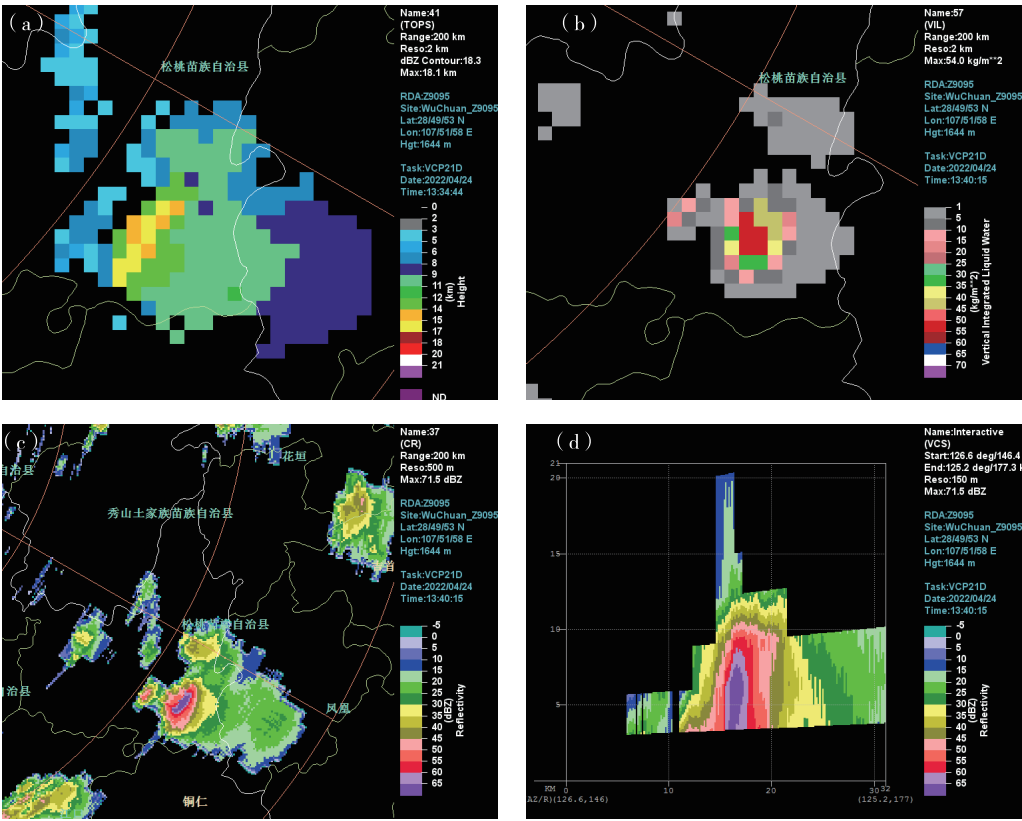


图 8 回波顶高(a)、垂直液态水含量(b)、组合反射率(c)、组合反射率剖面图(d)

Fig. 8 Height of echo top(a), vertical liquid water content(b), combined reflectance(c), combined reflectance profile(d)

径向速度图(图 9a)上环境风场为西北风,大片的正速度区中加夹着负速度区,有“逆风区”存在。说明风暴区中存在着小尺度垂直环流,为风暴单体的

持续和发展提供有利的动力条件^[11]。从径向速度垂直剖面上可以看出,黑色方框处(即出现大风区域)出现强并且深厚的中层径向辐合(图 9b)。

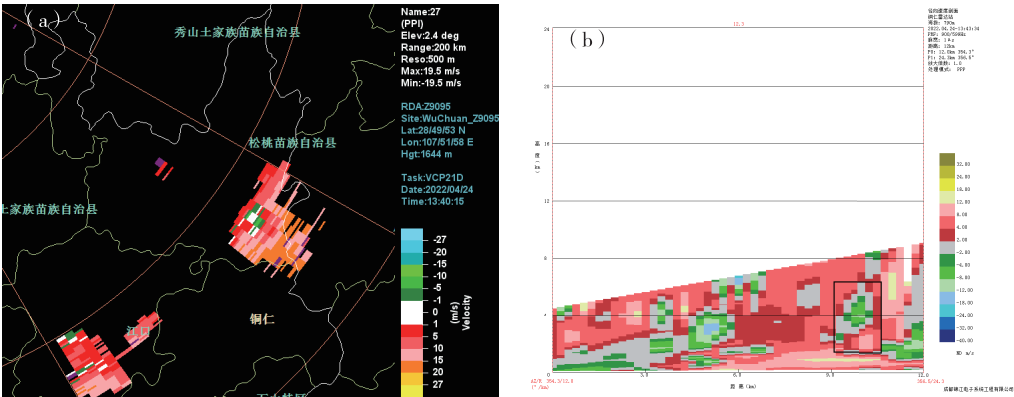


图 9 径向速度图(a)、径向速度剖面图(b,黑色方框为出现大风区域)

Fig. 9 Radial velocity diagram(a), radial velocity profile (b,black box is high wind area)

高悬的强回波、弱回波区、高的回波顶高以及径向速度中出现逆风区和强并且深厚的中层径向辐合等雷达产品特征,都有助于很好地识别对流性大风天气。在雷达反射率图上,无法直接识别下击暴流。下击暴流可能发生在大部分类型的对流风暴中,并且也非常有可能发生在超级单体风暴的钩状或弓形回波的顶点附近。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^[12-13];在短临监测中,由于雷达产品更新的滞后,这种雷暴大风往往只有大风出现了才会发布预警信号,这对预警的提前量和短临的服务都是不利的。

17 时 30 分遵义方向回波已经东移进入铜仁市,18 时 30 分石阡在弓形回波的影响下出现了大风天气(图 10)。

显著的弓形回波往往出现在层结不稳定和中等到强的垂直风切变的环境中^[14]。弓形回波后有“V”型弱回波区,并且回波中心前凸越明显,对流性大风一般越强,王彦等^[15]和李胜山等^[16]研究也指出,弓形回波和阵风锋可以产生雷暴大风,而弓形回波向前凸起产生的大风更强烈。

务川雷达 0.5°仰角 PPI 产品中,弓形回波中出现速度 $>15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的入流速度区域且出现 $>10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的辐合区域,说明在弓形回波处存在强的后侧入流急流。所以当弓形回波有“后侧入流急流”时,弓形回波向前凸起处往往会产生大风天气(图 11)。利用弓形回波的雷达特征,可以很好地提前预报弓形回波下游的大风区。

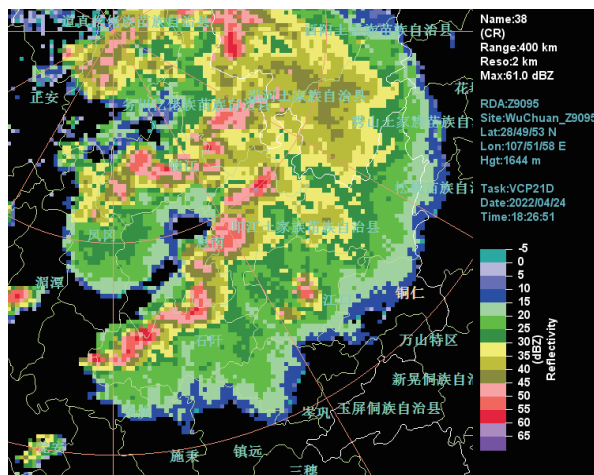


图 10 18 时 26 分组合反射率图

Fig. 10 Combined reflectance plot at 18:26

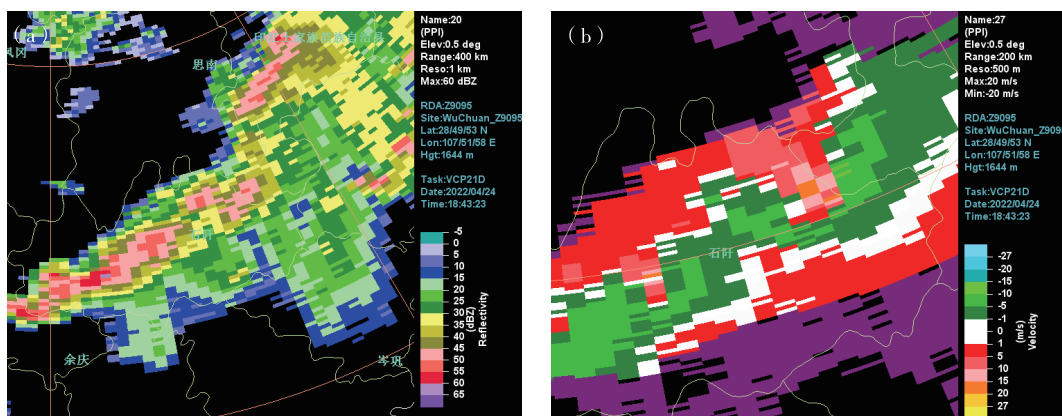


图 11 18 时 43 分 0.5°仰角反射率因子图(a)和径向速度图(b)

Fig. 11 Reflectivity factor plot (a) and radial velocity diagram (b) at 18:43 at 0.5° angle of elevation

3 结论

(1)此次天气过程发生在上干下湿的不稳定环境中,高空槽、南支槽、低涡、切变线和地面辐合线都为此次强对流天气过程提供了触发条件。铜仁市白天受到低压的影响,随着温度的显著升高,不稳定能量也显著升高,对流不稳定的存在和很好的水汽条件,以及强的下沉运动也是导致此次强对流天气过程的主要因素。

(2)大的 DCAPE 值、中层中等的垂直风切变和低层较强的垂直风切变以及较大的 850 hPa 与 500 hPa 的温差都十分有利于大风产生。同时合适的 0℃层和 -20℃层高度、强烈的上升气流触发的抬升增大了降雹的可能性。

(3)大风常常出现在钩状回波附近或弓形回波前部突出处,高悬的强回波、弱回波区、高的回波顶高以及径向速度中出现逆风区和强并且深厚的中层径向辐合等雷达产品特征,都有助于很好地识别

对流性大风天气,提高了在短临监测中对大风天气的预报预警能力。

(4)由于个例分析方法的限制,对铜仁市雷暴大风仍没有总体、系列化的认识,需要更多的大风个例,对铜仁市雷暴大风进行总体、系列化的深入探讨,从而为铜仁市雷暴大风的预报预警给出更有价值的依据。

参考文献

- [1] 李力,万雪丽,齐大鹏,等.贵州省雷暴大风时空分布及对流参数特征分析[J].中低纬山地气象,2020,44(2):1-8.
- [2] 廖晓农,俞小鼎,王迎春.北京地区一次罕见的雷暴大风过程特征分析[J].高原气象,2008,27(6):1350-1362.
- [3] 方翀,俞小鼎,朱文剑,等.2013年3月20日湖南和广东雷暴大风过程的特征分析[J].气象,2015,41(11):1305-1314.
- [4] 伍志方,张春良,张沛源.一次强对流天气的多普勒特征分析[J].高原气象,2001,20(2):202-207.
- [5] 廖玉芳,俞小鼎,郭庆.一次强对流系列风暴个例的多普勒天气雷达资料分析[J].应用气象学报,2003,14(6):656-662.

(下转第 67 页)