

陈晓燕,付琼,岑启林,等. 黔西南州一次分裂型超级单体风暴环境条件和回波结构分析[J]. 气象,2011,37(4):423-431.

黔西南州一次分裂型超级单体风暴 环境条件和回波结构分析^{*}

陈晓燕^{1,2} 付琼² 岑启林² 张辉²

1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

2 贵州省兴义市黔西南州气象局, 兴义 562400

提 要: 应用兴义多普勒雷达资料和相关实况资料,分析了 2009 年 4 月 14 日傍晚发生在黔西南州安龙、兴义和兴仁的一次强雹暴天气的环境条件和雷达回波结构,详细分析了强雹暴发展过程的回波结构特征,以及在超级单体中观测到的中反气旋流场结构。雹暴发生在地面加热强烈,低层热低压发展,中层有小槽发展东移,高空有急流的背景下。小槽触发的对流云团在向东南移的过程中,在不稳定层结和较强垂直风切变的作用下发展成为超级单体。强风暴在傍晚 18:36 左右分裂成左移风暴和右移风暴,左移风暴发展强烈,伴随着一个中反气旋,核区直径最小达 3 km,旋转速度绝对值之和一度达到 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中反气旋维持了至少 40 多分钟,风暴是沿着平均风(西北风)左侧向东东南方向移动,是较为少见而又很强的反气旋旋转超级单体风暴,此风暴产生了 40 mm 的大冰雹;右移风暴伴随着一个弱中气旋,弱中气旋维持了 3 个体扫左右的时间,是沿平均风右侧向南移的右移风暴,此风暴产生了 20 mm 的冰雹。雷达回波显示风暴从回波低层出现强反射率因子梯度,弱回波区和有界弱回波,前后入流缺口,钩状回波、强中反气旋和弱中气旋等超级单体特征,维持了 3~4 个小时左右的时间。本文还分析了风暴最强盛阶段强中反气旋的结构,强中反气旋在低层为反气旋式辐合,中层为纯粹的反气旋旋转,中反气旋强烈发展时,旋转速度对核直径缩小至 3 km,垂直延伸 4.8 km,旋转的强度同时向低层和中高层延伸,显示出强烈的辐合上升运动特征。文章探讨了 VIL 值在本次的冰雹预报中的应用,VIL 大值在本例中对大冰雹有很好的指示性,同时由于 VIL 大值维持较长时间,是判断超级单体出现的一个依据。

关键词: 垂直风切变,左移超级单体风暴,强中反气旋,VIL 值

Analysis of Environmental Conditions and the Structure of Radar Echo for a Split Supercell in Southwest Prefecture of Guizhou

CHEN Xiaoyan^{1,2} FU Qiong² CEN Qilin² ZHANG Hui²

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 Xingyi Meteorological Office, Southwest Prefecture of Guizhou Province, Xingyi 562400

Abstract: Based on the Xingyi Doppler weather radar data, routine upper-air and surface observations, a detailed analysis of the atmospheric environmental conditions and radar echo structure of a strong hailstorm which occurred in Anlong, Xingyi and Xingren of the Southwest Prefecture of Guizhou on 14 April 2009 is made, and also the echo structure of the mesoanticyclone that embedded in the left moving supercell is analyzed in detail. The backgrounds for occurrence of the hail storm are intense heating-up of the surface, which leads to the development of thermal depression in the lower atmosphere, the developing eastward meso- α scale trough in the mid-level, and an upper-level jet stream above the convective location. The eastward convective clouds triggered by the meso- α scale trough evolve into supercells under the influence of the unstable stratification and significant vertical wind shear. The strong hailstorm splitted into a right moving supercell and a left moving supercell at 18:36 BT 14 April 2009, the left moving supercell developed into a strong one, accompanied by a mesoanticyclone with a diameter of 3 km, rotational speed once reaching $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in average, and travelling leftward along the mean wind (northwest wind) towards the

* 贵州省气象局 2008 年气象科技开放研究基金项目“基于兴义 CINRAD 及自动站的黔西南州雨季面雨量计算研究”资助
2010 年 1 月 4 日收稿; 2010 年 7 月 19 日收修定稿
第一作者:陈晓燕,主要从事短期、短时临近天气预报工作。Email:xychenxiaoyan@yahoo.com.cn

southeast direction, it is a rare but very strong anticyclone supercell; this supercell produced hails up to 40 mm in size. The right moving supercell is accompanied with a weak mesocyclone producing hails of 20 mm in size. The radar echoes displayed the characteristics of supercell; the strong reflectivity echo gradient in low levels, weak echo region and bounded weak echo region, front inflow and rear inflow, hook-shaped echo, strong mesoanticyclone and weak mesocyclone, all these lasted for 3 to 4 hours. This article also gives an analysis on the structure of the mesoanticyclone in the strongest stage of hailstorm, and a discussion of the application of *VIL* (vertically integrated liquid) value in the forecast of hailstorm.

Key words: vertical wind shear, left-moving supercell, strong mesoanticyclone, *VIL* (vertically integrated liquid) value

引 言

超级单体是所有对流性风暴中最强的风暴单体,常产生龙卷、灾害性大风、大冰雹、暴雨等强烈天气现象,因而带来的损失远远大于一般性的对流风暴所产生的灾害,常常为气象学家所重视和研究^[1-2]。多普勒雷达对风暴的探测更加精细,雷达资料时空分辨率足以对小尺度的风暴结构进行研究。近年来,我国逐步在全国各地布设多普勒雷达,根据雷达资料,气象专家对产生龙卷、下击暴流、大冰雹、暴雨等各类强天气的超级单体的回波形态特征和流场结构作了不少研究和总结^[3-14]。俞小鼎等^[3]研究了一次伴随龙卷的超级单体回波形态结构及其可能产生机制,对在强降雨超级单体中的中气旋结构及形成机制进行了研究。刘娟等^[4]分析了 2007 年 7 月 3 日发生在安徽天长附近的超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征。段丽等^[5]用 SA 雷达产品对京西三次局地暴雨落区的形成进行精细分析。朱敏华等^[6]对强烈雹暴产生的假回波三体散射现象的多普勒天气雷达资料进行了分析。超级单体也常伴随着灾害性大风,俞小鼎等^[7]研究了一次系列下击暴流的多普勒天气雷达资料。廖玉芳等^[8]比较分析了一次系列风暴个例的多普勒天气雷达资料,李淑玲等^[9]分析了产生灾害性大风的一次飚线过程多普勒雷达资料。刁秀广等^[10-11]研究了三次超级单体风暴雷达产品特征及气流结构差异性以及应用雷达资料分析边界层辐合线在局地强风暴临近预警中的应用。降雹的对流单体常会出现高 *VIL* 值,刘治国等^[12]研究了青藏高原东北侧雹云单体最大垂直累积液态水含量的演变特征,认为雹云单体在演变过程中最大 *VIL* 值存在“爆发式增长”和“爆发式降低”现象;雹云单体出现第 1 次“爆发式增长”现象时地面不会降雹,出现第 2 次“爆发式增长”现象时地面开始降雹,出现“爆发式降低”现象时地面降雹停止,说明了 *VIL* 值对冰雹的指示作用。

超级单体总是伴随着一个持久深厚的中气旋^[2],有时伴随中反气旋,大多数情况下超级单体伴随中气旋,并以右移风暴为主(移向云层中平均风的右侧),少数超级单体伴随着中反气旋,主要为左移风暴。左移风暴较为少见而很少观测到。2009 年 4 月 14 日傍晚,在青藏高原东南侧斜坡地带的黔西南州,兴义多普勒雷达观测到一次分裂超级单体发展过程,一个强风暴在向东南移的过程中产生分裂,并发展出左移和右移 γ 尺度的超级单体风暴,左移的超级单体强度高,造成黔西南州安龙县境内 40 mm 的大冰雹,右移的超级单体较左移风暴弱,在黔西南州兴义市与安龙县交界鲁屯镇和万屯镇产生 20 mm 的冰雹,鲁屯镇降雹密度大,2000 多粒/ m^2 ,低洼处堆集 10 多厘米厚。几个村寨的小麦、油菜、蔬菜、秧苗、烟苗等农作物均受灾,有 20 hm^2 油菜基本绝收,电线杆被大风吹倒,并引起镇上停电。两个超级单体风暴还产生了局地大风天气。这次以大冰雹伴随大风和小到中雨过程对春播农作物造成了严重的损失。

黔西南州位于青藏高原东南斜坡地带,地势崎岖不平,地形的极度复杂和不均匀加热导致中小尺度的强天气发生较为频繁。该州一年四季都可能产生冰雹,尤其以春季频率高。此次雹暴产生于 4 月,4 月是该州出现冰雹最多的月份。对产生此类强天气的中小尺度系统的分析要求高分辨率的探测资料,兴义多普勒雷达高分辨率体积扫描资料可以用来分析此类强对流天气回波的空间结构特征。本文利用贵州省兴义多普勒雷达观测资料和实况资料对这次罕见的分裂超级单体环境和结构进行分析。

1 大尺度环流形势分析

1.1 高空环流形势

2009 年 4 月 14 日 08 时中高纬度上,欧亚地区 500 hPa 为两槽一脊的形势。乌拉尔山到欧洲大陆一带为一低涡,巴尔喀什湖到贝加尔湖受高压脊控制,贝加尔湖到鄂霍次克海受低槽影响。青藏高原

到西南地区为偏西北气流影响。200 hPa 高空云南、贵州、广西至广东一带有一条高空急流,急流位于 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 之间,轴中心最大风速为 $64\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,说明以上地区包括黔西南州上空的高空辐散强是一个有利于对流发生的条件之一^[15],可加强中低层的垂直上升运动。700 hPa 图上云南中部有一个中尺度小槽缓慢东移,如图 1a 所示,小槽后的温度槽很明显,冷平流较强,500 hPa 也有弱的冷平流向 700 hPa 小槽上空的位置输送,冷平流的作用将使小槽发展东移,同时高空的干冷空气东移叠加在低层暖层上,环境空气层越发不稳定(图 1)。

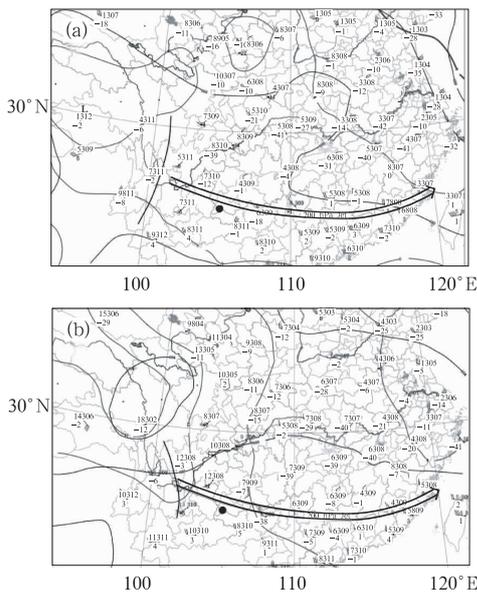


图 1 2009 年 4 月 14 日 08 时(a)和 20 时(b)700 hPa 观测资料 箭头为 200 hPa 急流位置,黑点为对流发生地大致位置

Fig.1 Upper air observations on April 14, 2009: (a) 700 hPa at 08 BT. (b) 700 hPa at 20 BT Arrow shows upper air jet at 200 hPa, dark dots show the approximate place of convective activities

小槽的触发作用在云贵交界处产生了块状对流回波,之后回波向东南方向移向黔西南州的过程中,受较强垂直风切变的作用,在层结不稳定条件下,以及低层热低压产生的辐合效应使得回波加强为超级单体。

1.2 地面形势

14 日 08 时地面图上,青藏高原到云南和黔西南州受热低压影响,高原上的热低压强度强。在对流发生前,位于高原东南侧的黔西南州为晴热少云天气,地面加热强烈,下午 14 时 8 个气象站最高气温达到 $24\sim 32^{\circ}\text{C}$ 。由于云贵高原太阳辐射加热,加

上山气流摩擦辐合作用,下午地面热低压继续加强发展,14 日 14 时和 17 时云南、贵州及其交界处的黔西南州均有明显的 3 小时负变压(图略)。低层的强烈加热与高空的偏西北气流配合,形成上冷下暖的不稳定层结,低层的辐合作用增强,有利于垂直上升运动的加强和对流性天气的出现。

1.3 对流不稳定条件和垂直风切变

强对流总是发生在不稳定的大气层结中, $T\text{-}\log p$ 图是分析大气稳定度的重要工具,黔西南州境内没有探空站,因而从其附近挑选了 4 个离对流发生处最近的探空站来进行分析,分别是昆明、贵阳、威宁和百色(图 2a 黑圆点),4 个探空站分别位于黔西南州的西、东北、西北和西南方向,各探空站离对流发生地的距离为 $200\sim 240\text{ km}$ 不等。

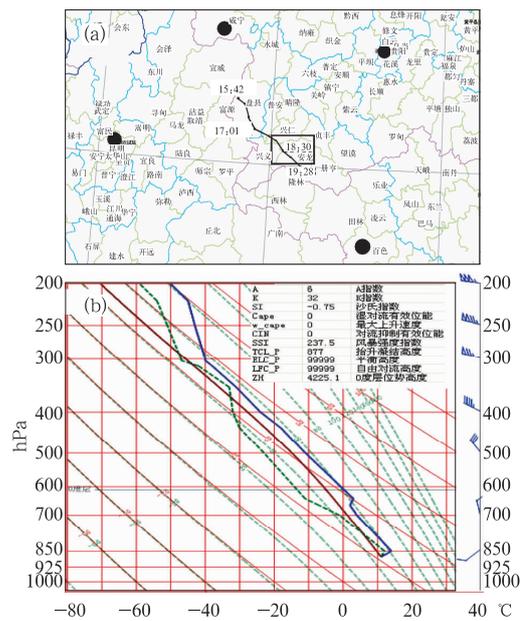


图 2 (a)2009 年 4 月 14 日风暴路径图(4 个黑点为对流区附近的探空站:威宁、贵阳、百色、昆明,大冰雹出现的位置在长方形内); (b)贵阳站 14 日 08 时 $T\text{-}\ln p$ 图

Fig.2 (a) Hailstorm path in the afternoon on 14 April 2009, four dark dots represent soundings nearby convective places: Weining, Guiyang, Baise and Kunming, heavy hail location is within rectangle; (b) Guiyang sounding observation at 08 BT 14 April 2009

对流有效位能 CAPE 值是衡量热力不稳定大小的最佳参数,是风暴潜在强度的一个重要指标。大的对流有效位能是产生大冰雹的有利条件之一^[2],但在 14 日 08 时 4 个探空站除百色探空站的 CAPE 值为 $40\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外,其他 3 个探空站 CAPE 值为 0,从 08 时的 CAPE 值上很难看出下午的强对

流潜势,这与探空站的时空分辨率低有关系。强加热作用是在上午 10 时以后,4 个探空站早上 08 时的温度为 8~19 °C,下午对流发生前探空站及其附近地区为晴到少云天气,无降水发生,14 时 4 个探空站的气温升高到 21~28 °C,如果以 14 时各探空站的地面气温作为气块抬升的起始温度,地面到 1 km 之间每 100 m 高度气温递减 0.78 °C,以此来粗略地估算下午 14 时 4 个探空站 CAPE 值,则 CAPE 值在 687~992 J·kg⁻¹ 之间,可见晴空强加热作用下,潜在的不稳定能量增大。进一步分析垂直风廓线,4 个探空站的垂直风切变都比较强。以贵阳探空站的风廓线为例,低层 850 hPa 为偏西南风 4 m·s⁻¹,700 hPa 为偏北风 4 m·s⁻¹,风向切变大,风随高度顺转有暖平流,到 500 hPa、400 hPa 转为西北风 12 m·s⁻¹ 和西西北风 18 m·s⁻¹,到 200 hPa 风速增大到偏西风 62 m·s⁻¹,风速迅速增大,风速切变大,风随高度逆转有冷平流。风廓线特征及冷暖平流特征为有利于对流发展的潜势。较强的垂直风切变有利于风暴的加强和较久的维持时间^[16],本例中各层间的风切变都较强,切变值在 0.003~0.012 s⁻¹ (见表 1),由于 200 hPa 高空急流的存在,300 hPa 到 200 hPa 间的垂直风切变值为 0.012 s⁻¹。可见 CAPE 值并非唯一影响对流风暴中上升运动的因子^[2]。较大的垂直风切变有利于产生大冰雹,在强风切变的环境中,动力效应也可以加强上升气流的强度,因此强烈上升运动也能够在此小至中等的 CAPE 中得以发展。

表 1 2009 年 4 月 14 日 08 时贵阳
上空各层间垂直风切变
Table 1 Vertical wind shear of Guiyang
sounding at 08 BT 14 April 2009

层次/hPa	风向(°)	风速/m·s ⁻¹	垂直风切变/s ⁻¹
200	280	62	0.0124
300	290	29	0.0065
400	305	17	0.005
500	330	11	0.0028
700	350	4	0.0039
850	225	3	0.0059
877	180	1	

4 个探空站除昆明站外,还有一个共同特点是贵阳、威宁和百色站的低层有一薄层逆温层,逆温层的存在对发生强对流的有利作用主要是贮藏不稳定能量。逆温层阻碍了热量及水气的垂直交换,使低层变得更暖更湿,高层相对变得更冷更干,因此不稳定能量大量积累起来。一旦冲击力破坏了逆温,严

重的对流性天气就往往发生。此逆温层的存在是这次强对流天气能量积累的重要因素之一。从探空曲线上还可分析出中高层干冷空气,对雹暴移动时加强下沉气流产生地面大风有着重要影响^[15]。

2 雹暴的雷达回波分析

兴义雷达站处于云贵高原东南斜坡处,雷达站以西地形阻挡严重,0.5°的仰角看不到西部的回波,要抬高仰角至 2.4°以上才能看到西部的回波发展情况,在该州发展成熟的对流单体通常起源于雷达西部或北部,即云南东北与贵州的交界处,因而在实际工作中要特别注意西部和北部生成的回波,由于地形关系,在监测雷达站以西的回波时一定要抬高仰角。

本例回波演变主要分析 2.4°仰角以上的回波。黔西南州大多数对流性风暴都发生在中午到夜间,以午后到傍晚频率最高。此次的雹暴天气也不例外,下午 16 时左右有小冰雹降落在兴仁境内,大冰雹降落时段在 18:30—19:30 之间。由雷达反射率因子图可见,下午 14:00 左右开始生成分散积状云回波,在较强的垂直风切变条件下,18:30 在多单体对流云带中发展出一个强风暴,强风暴不断加强,在 18:48 左右分裂成一个左移超级单体风暴和一个右移超级单体风暴,左移超级单体发展强盛并伴有一个强中反气旋,右移超级单体则伴有一个弱中气旋,左移超级单体产生最大冰雹直径 40 mm,右移超级单体产生最大冰雹直径 20 mm。

2.1 雷达反射率因子回波演变

反射率因子强度图表明,14 日 14 时左右云南东部富源和贵州的盘县附近生成一些分散的块状积状云对流回波,回波移动缓慢,到 15:12 几乎还在源地,但有新生回波单体加入,并逐渐合并成一长条状回波带,回波带长 90 km 左右,宽有 10 km。从回波带的生成源地来看,与 700 hPa 的小槽位置有关。在较强垂直风切变及午后的强加热作用下,15:12 到 16:00,多单体回波带向东南方向移动缓慢并不断加强,带状回波中有 3 个发展较强的单体,1 小时左右的时间最大回波强度从 42 dBz 增强到 55 dBz。回波带中几个积云对流单体发展成较为独立的强风暴单体,到 17 时,回波带发展成多单体风暴,其中的位于回波带右端一个强对流单体在 17—18 时在黔西南州兴仁县降了几毫米的小冰雹,左端的强风暴单体 16 时左右从盘县附近向东南方向移向黔西南州

时不断加强,组合反射率因子图上16时到17时之间最大回波强度从50 dBz增强到59 dBz。17—18时,最大回波强度维持在60~69 dBz之间(图3)。该强风暴17时低层入流处回波梯度大,45 dBz以上强回波中心面积增大,剖面图上出现了弱回波区(图5),17:33分,回波低层梯度继续增大,并向南伸出突出物。18:00—19:28,最大回波强度维持在67~72 dBz之间,18时以后突出物很明显,低层入流处梯度非常大,入流缺口显现出来,剖面图上显示出有界弱回波区。18:30到19:00强风暴低层表现出明显的勾状回波特征,强风暴在18:36开始分裂并在18:48发展成左移和右移两个超级单体,左移超

级单体风暴反气旋式旋转,右移超级单体气旋式旋转。勾状回波为右移风暴的低层特征,原来的强风暴分裂出的左移风暴和右移风暴很靠近,每个超级单体风暴尺度大小约为8~15 km,不仔细分辨会把两个风暴误认为是一个风暴单体,仔细分析发现(图4),在回波图上可分辨左移和右移超级单体成对的前后侧入流缺口,两个强回波中心,强回波中心分别是两个超级单体的回波墙,左移超级单体的前后侧入流缺口明显。强风暴从回波低层出现强反射率因子梯度以及弱回波区和有界弱回波,前后侧入流缺口,勾状回波、弱中气旋和强中反气旋等超级单体特征,维持了3~4个小时左右的时间。

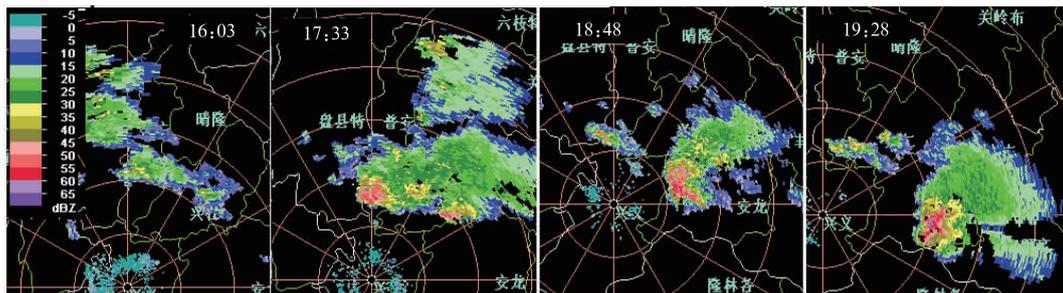


图3 2009年4月14日3.4°仰角16:03—19:28强风暴反射率因子时间演变
Fig. 3 The evolution of 3.4° elevation reflectivity from 16:03 to 19:28 BT for the supercells occurring on 14 April 2009 in southwest Guizhou Province

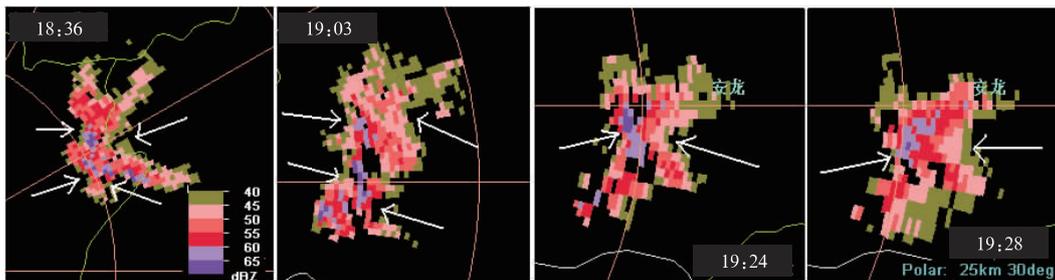


图4 2009年4月14日3.4°仰角18:30—19:28左移风暴和右移风暴大于40 dBz以上回波演变
箭头为前侧或后侧入流
Fig. 4 The evolution of 3.4° elevation reflectivity greater than 40 dBz from 18:30 to 19:28 BT for the left moving supercell and the right moving supercell occurring on 14 April 2009 in southwest Guizhou Province
The arrow indicates the front-flank or rear-flank inflow

2.2 反射率因子剖面时间演变

冰雹成长的有利环境是合适的0℃层、-20℃层高度^[15],以及-20℃高度以上有无超过45 dBz的反射率因子核^[2]。4月14日当天0℃层在4.2 km,-20℃在7 km,-30℃层在8.3 km,17时的反射率回波高度上,回波顶高11 km,剖面图上45 dBz的回波还未伸展到-20℃以上。从强中心回波高度来看,此时单体的回波强度虽然已经比较强,但强回波向上伸展的高度还未达到有利于冰雹

成长的层次,但单体发展迅速,17:10时,回波顶高升展到12.5 km,45 dBz回波最大高度约在8~9 km高度(图5),也就是说45 dBz强度的回波已达到-30℃,有利于冰雹成长。剖面图上强回波向上伸展的面积还不小,回波发展强,从VIL值突然增大也可看出这10分钟内回波发展很快,17:01到17:10二个体扫内VIL值从21 kg·m⁻²陡增到41 kg·m⁻²。速度图上中低层辐合非常显著。之后回波继续发展,并向上向下伸展,发展出BWEAR等超级单体特征,从图5反射率因子剖面图时间演

变可见逐渐发展起来的弱回波区和有界弱回波区、回波墙等超级单体特征。

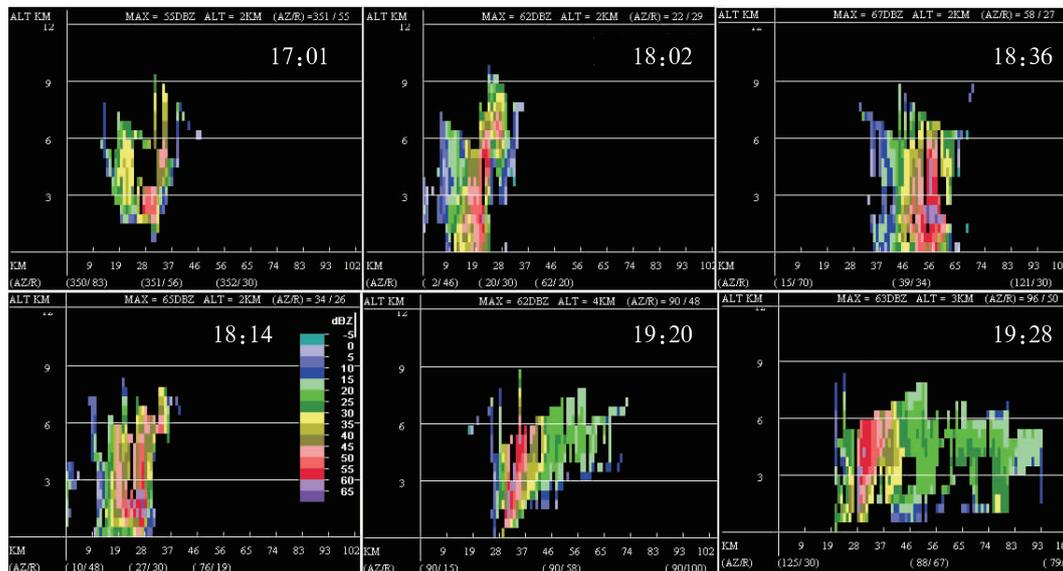


图 5 2009 年 4 月 14 日 17:01—19:28 沿入流方向穿过反射率因子核的强风暴反射率因子剖面时间演变

Fig. 5 The evolution of vertical cross sections of reflectivity from 17:01 to 19:28 BT along inflow location through the storm core of reflectivity on 14 April 2009

2.3 VIL 值与大冰雹

观测实践证明,垂直累积液态水 VIL 值对大冰雹有较好的指示,本次的超级单体风暴引发的大冰雹中 VIL 值有很好的指示作用。 VIL 值表示将反射率因子数据转换成等价的液态水值,并假定反射率因子是完全由液态水反射得到的。美国平原和中西部,垂直累积液态水(VIL)对辨别带有大冰雹的风暴是有用的。持续高的 VIL 值可能与超级单体风暴有关^[2]。在黔西南州,在出现冰雹时也可能出现 VIL 大值,但分析时要注意不同季节以及距离雷达的合适的区域,2007 年 6 月黔西南州兴义市的一次大冰雹(最大直径 70 mm)回波,由于降雹靠近雷达,因而降大雹时 VIL 最大值只有 $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,所以 VIL 值的分析对应不同季节的大冰雹的 VIL 值是不同的,较近距离的 VIL 值被低估和较远距离的 VIL 值高估等情况要注意区别使用,对各雷达使用的不同扫描方式等也会影响 VIL 值。

降大冰雹对应的 VIL 值与季节关系较大,夏季通常比春季要求更大的 VIL 值。Oklahoma 州大冰雹对应的 VIL 值随季节变化图上,4 月对应的是 $45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[2]。在本次超级单体个例中,风暴距雷达距离约 $50 \sim 70 \text{ km}$,出现大冰雹时 VIL 值在 $42 \sim 49 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间变化,说明黔西南州 4 月出现大冰雹的 VIL 值与 Oklahoma 州大冰雹对应的 VIL 值接近。Amburn 和 Wolf(1997)定义 VIL 与风暴顶

高度之比为 VIL 密度。他们的研究表明,如果 VIL 密度超过 $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,则风暴几乎肯定会产生直径超过 20 mm 的大冰雹^[2]。在本例中(图 6),降大雹时 VIL 密度在 $3.44 \sim 3.95 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间。而在风暴不断发展强盛的时候, VIL 值在 17:10—19:28 维持两个多小时的较大值,这对风暴可能发展成超级单体有很好的警示作用,这两小时内的 VIL 平均值为 $41.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, VIL 的密度平均为 $3.49 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

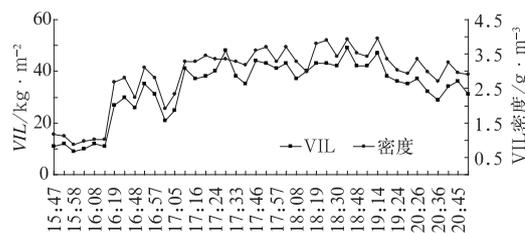


图 6 2009 年 4 月 14 日强风暴的 VIL 值及 VIL 密度时间变化

Fig. 6 The time evolution of hailstorm's VIL value ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) and VIL density ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) on 14 April 2009

3 超级单体雹暴的径向速度特征

大多数的超级单体风暴为气旋性旋转的右移风暴,很少观测到左移风暴。本例中的强风暴在 18:36 发生分裂后,18:48 发展成左移和右移两个超级单体风暴,左移的超级单体强,伴随强中反气旋,移向为平

均风(本例为西北风)的左侧;右移超级单体较弱,有一个弱中气旋,右移风暴移向为平均风右侧,右移的超级单体风暴的中气旋从 18:48 维持到 19:03,19:14 中气旋消失,右移超级单体减弱。左移中反气旋从 18:48 到 19:28 旋转不断增强,19:28 强中反气旋发展最强,19:28—20:26 缺测资料,回波资料在 20:26 恢复,20:26 回波移到贵州和广西交界处时,最大强中心达 63 dBz。从强中反气旋发展的强度及回波移到广西时的反射率因子强度,可推断强中反气旋在 19:28 以后还要维持一段时间。

3.1 3.4°仰角径向速度回波分析

由前所述,山区的回波遮挡较多,所以大部分的时间要分析较高仰角的回波,在本例中,分析 3.4°仰角的径向速度回波的发展变化,速度图像的变化大致可分为三个阶段,一是以辐合为主的辐合弱旋转阶段,二是以旋转为主的阶段,三是风暴分裂为左移超级单体和右移超级单体,弱中气旋和强中反气旋发展阶段,也是超级单体发展最强时期,大冰雹降落的时间段。

如图 7 所示(注意白色方框内的回波变化),15:00—16:14,由于新生回波不断合并到回波带中,原分散的积状云回波合并发展为大块的回波,在回波块中镶嵌有密实的小块强对流云团,并在径向和方位上表现出小尺度的辐合和旋转的特征。16:14—17:20回波在径向上发展出强烈辐合特征,且辐合的尺度增大到几十千米的长度,径向辐合的部分正负速度绝对值之和达 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,大部分回波的辐合速度对达到 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在这段时间内兴仁县境内有小冰雹报告。之后有小范围的回波逐渐在方位上表现出气旋式旋转。17:20 以后,在强辐合上升气流中的气旋式旋转加强,从方位和径向上的速度图表现来看,17:20—18:00,风暴气流是气旋式气流加强并存在气流辐合的阶段,说明这段时间的气流涡度增大,上升气流增强,风暴处于发展之中。随着强风暴发展东南移,18:02—18:30,原来在回波南部的强辐合特征逐渐消失,而在回波的西北方发展出反气旋图像特征,方位径向上,表现为以反气旋旋转为主带有弱辐散的气流特征。18:30 反气旋回波的南端出现辐合特征,此处的辐合在 18:48 发展出一个弱中气旋。18:36 风

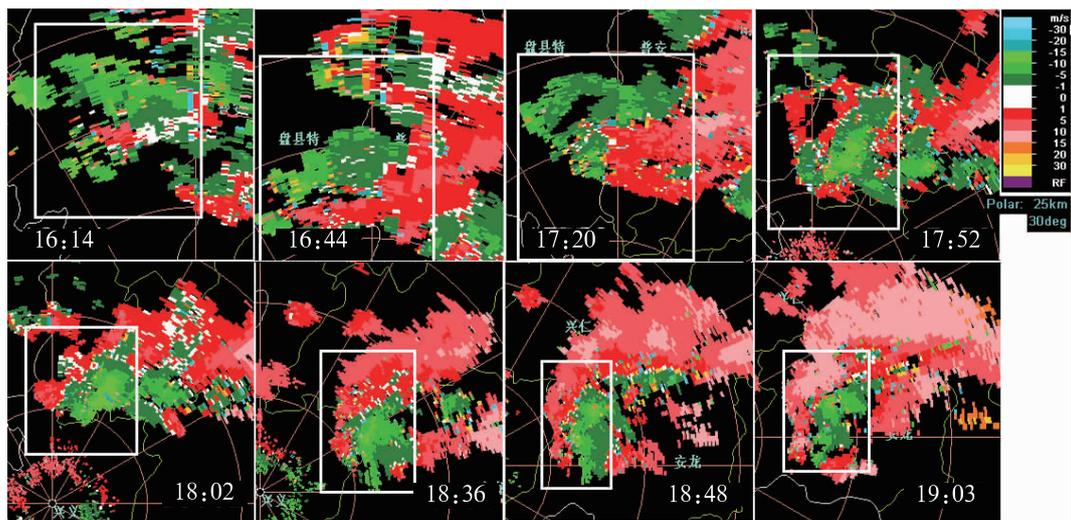


图 7 2009 年 4 月 14 日 3.4°仰角的径向速度演变

Fig. 7 The evolution of 3.4° elevation radial velocity on 14 April 2009

暴分裂为左移风暴和右移风暴。

3.2 18:30—19:28 左移风暴和右移风暴变化

在 3.4°仰角上分析超级单体的发展变化,18:00到 18:30 速度图上安龙县西北部与兴仁县交界处维持强的反气旋辐合流场,回波强中心大于 60 dBz,回波向东南方安龙县移来,并不断加强,18:36风暴单体后侧出现两支入流,反射率因子回波

上可分析出两对入流缺口(图 4),原来的强风暴单体在此时分裂成左移风暴和右移风暴,而两对入流缺口正对应左移风暴和右移风暴的前后侧入流,18:48速度图上有伴随着左移风暴的中反气旋,右移风暴的弱中气旋,右移风暴中的弱中气旋核心区直径 8 km(图 8),旋转速度绝对值之和为 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,左移风暴中的中反气旋核心区直径 10 km,旋转速度绝对值之和为 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。19:03 左移风暴加强,并沿

西西北方向移向平均风(西北风)的左侧,旋转核心区直径缩小至 5 km,右移风暴维持弱中气旋结构,偏南方向移向平均风的右侧。19:14—19:28 右移风暴维持但有所减弱,而左移风暴中反气旋继续增强,

速度绝对值之和达 $29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,19:24—19:28 左移风暴发展强盛,回波强中心达到 72 dBz,中反气旋核心区直径 3~4 km,旋转速度绝对值之和一度达到 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

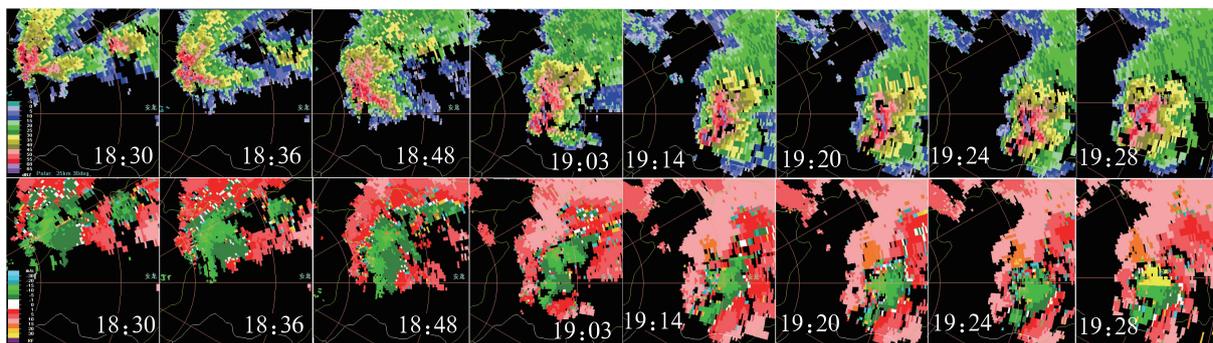


图 8 2009 年 4 月 14 日 18:30—19:28 左移风暴和右移风暴 3.4°仰角反射率和径向速度演变
Fig. 8 The evolution of 3.4° elevation reflectivity and radial velocity for the left moving supercell and the right moving supercell on 14 April 2009

安龙县从 18:53 开始降雹,从 40 mm 大冰雹降落的位置来看,是由左移风暴的中反气旋不断增强时产生的。而 18:50 左右在兴义与安龙交界的鲁屯镇附近降落 20 mm 的冰雹,是由右移风暴产生。冰雹的大小显然与超级单体风暴的强弱有关,本例中伴有强中反气旋的左移超级单体因强度比右移超级单体强,降雹也大得多。

时的各仰角速度图。19:24—19:28 是左移超级单体风暴发展最强盛的时候,19:24 中反气旋在低层 2.4°仰角上主要是反气旋旋转,中反气旋核附近有气流辐合,3.4°和 4.3°仰角上中反气旋是纯粹的反气旋旋转流场,核心区直径 4~5 km,旋转速度对绝对值之和达到 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中反气旋垂直延伸超过 3.2 km;19:28 中反气旋旋转强度向上向下延伸,2.4°仰角上旋转速度较前一体扫增大,为反气旋式辐合流场,4.3°仰角的旋转加强并出现速度模糊,旋转核心区直径只有 3 km 左右,速度绝对值之和为 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中反气旋从

3.3 中反气旋结构

图 9 是左移超级单体风暴中反气旋发展最强盛

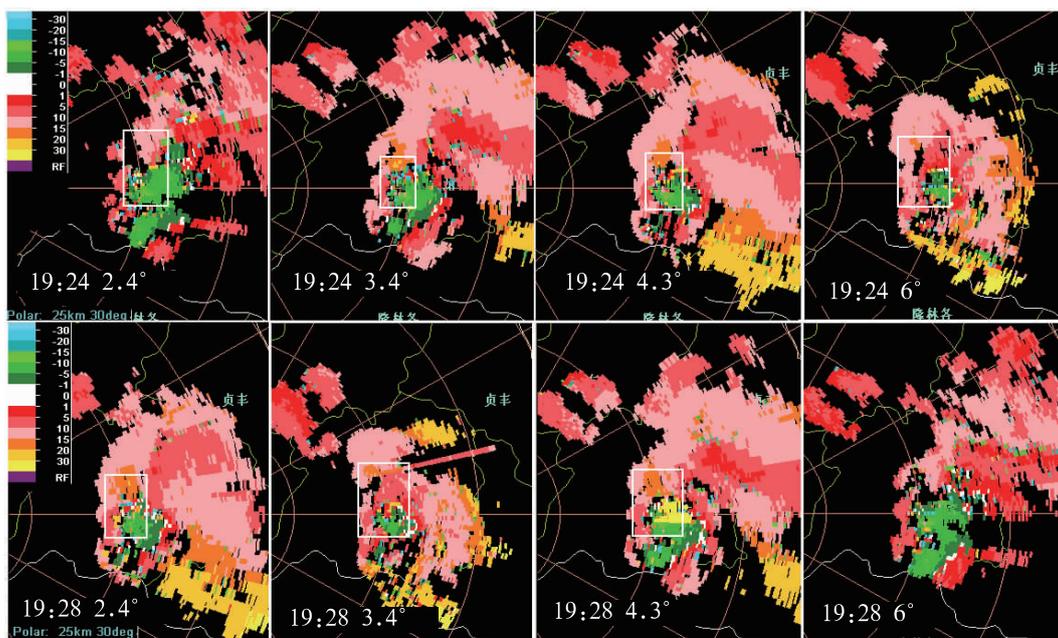


图 9 2009 年 4 月 14 日 19:24 及 19:28 2.4°、3.4°、4.3°、6.0°仰角径向速度
白色长方框为中反气旋位置

Fig. 9 The radial velocity on 2.4°, 3.4°, 4.3° and 6° elevations at 19:24 and 19:28 BT 14 April 2009. The anti-mesocyclone is within the white rectangle

0.5°仰角延伸到6°仰角,对应垂直延伸高度为4.8 km。虽然19:28后缺资料,但从此时强中反气旋的发展强度来看,19:28以后强中反气旋至少还要维持两个体扫的时间,从18:48以后计算,此强中反气旋至少维持了9个体扫的时间。

4 总结和讨论

(1) 此次发生在黔西南州部分地区的雹暴天气,其有利的大气背景主要是地面热低压的强加热效应,加强了低层辐合,以及不稳定能量的累积。中低层的中尺度小槽东移触发对流初生,中层的干冷空气及上午低层逆温层的存在,使得低层更加湿热,而高层更加干冷,大气层结不稳定,不稳定能量得到积累,为午后到傍晚雹暴的发展提供了能量。高空急流的强辐散作用有利于中低层的辐合上升运动。对流云团在向黔西南州东南移的过程中,受较强垂直风切变的作用加强发展成为超级单体。

(2) 风暴整体主要沿平均风向东南方向移动,反射率因子回波显示风暴发展为超级单体期间,最大反射率因子维持在67~72 dBz,从回波低层出现强反射率因子梯度,以及弱回波区和有界弱回波,前后入流缺口,勾状回波、强中反气旋和弱中气旋等超级单体特征,维持了3~4个小时左右的时间。

(3) 本次强风暴分裂成左移风暴和右移风暴,左移风暴发展强烈伴随强中反气旋,产生40 mm大冰雹,右移风暴伴随弱中气旋,产生20 mm冰雹。中反气旋维持了40多分钟,旋转速度绝对值之和达到 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,强中反气旋在低层为反气旋式辐合,中层为纯粹的反气旋旋转,中反气旋强烈发展时,旋转速度对核直径缩小,旋转的强度同时向低层和中高层延伸,显示出强烈的辐合上升运动特征。

(4) *VIL* 值在本例中对大冰雹有很好的指示性,同时也是判断超级单体出现的一个依据,*VIL* 值维持较大值2小时左右,表现出超级单体的准稳定状态。*VIL* 值接近于Oklahoma州4月大冰雹对

应的*VIL* 值 $45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由于目前大冰雹的多普勒雷达回波个例较少,还未统计出黔西南州*VIL* 值在各月的大冰雹对应的临界值。从本例*VIL* 值对大冰雹和超级单体明显的指示作用来看,有必要在今后的工作中加强这方面的研究,并需要考虑多普勒雷达探测的局限性。

参考文献

- [1] 王鼎生,徐乃璋. 强烈雹暴结构和降雹[J]. 大气科学,1983,7(1):95-101.
- [2] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006:90-241.
- [3] 俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究[J]. 大气科学,2008,32(3):508-522.
- [4] 刘娟,朱君鉴,魏德斌,等. 070703天长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征[J]. 气象,2009,35(10):32-39.
- [5] 段丽,卞素芬,俞小鼎,等. 用SA雷达产品对京西三次局地暴雨落区形成的精细分析[J]. 气象,2009,35(3):21-28.
- [6] 朱敏华,俞小鼎,夏峰,等. 强烈雹暴三体散射的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报,2006,17(2):215-223.
- [7] 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等. 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,2006,17(4):385-391.
- [8] 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):656-661.
- [9] 李淑玲,刁秀广,朱敏,等. 一次飚线过程多普勒雷达资料分析[J]. 气象,2009,35(3):60-65.
- [10] 刁秀广,朱君鉴,刘志红. 三次超级单体风暴雷达产品特征及气层结构差异性分析[J]. 气象学报,2009,67(1):133-146.
- [11] 刁秀广,车军辉,李静,等. 边界层辐合线在局地强风暴临近预警中的应用[J]. 气象,2009,35(2):29-33.
- [12] 刘治国,俞小鼎,陶健红,等. 青藏高原东北侧雹云单体最大垂直累积液态含水量的演变特征及其在降雹定时判断中的应用[J]. 气象学报,2008,66(4):609-619.
- [13] 孙靖,王建捷. 北京地区一次引发强降水的中尺度对流系统的组织发展特征及成因探讨[J]. 气象,2010,36(12):19-27.
- [14] 张德林,马雷鸣. "0730"上海强对流天气个例的中尺度观测分析及数值模拟[J]. 气象,2010,36(3):62-69.
- [15] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法(第4版)[M]. 北京:气象出版社,2007:432-453.
- [16] 胡明宝,高太长,汤达章. 多普勒天气雷达资料分析与应用[M]. 北京:解放军出版社,2000:174.