

农孟松,祁丽燕,黄海洪,等. 桂西北一次超级单体风暴过程的分析[J]. 气象,2011,37(12):1519-1525.

桂西北一次超级单体风暴过程的分析^{* 1}

农孟松^{1,2} 祁丽燕² 黄海洪² 邓汝伊³ 班荣贵³

1 南京信息工程大学大气科学学院,南京 210044
2 广西气象台,南宁 530022
3 广西百色市气象台,百色 533000

提 要: 本文利用常规观测资料和多普勒天气雷达资料,对 2009 年 4 月 12 日发生在广西西北部的大范围冰雹天气进行分析,得出以下结论:(1)导致冰雹发生的天气系统是高空低涡和低层切变线,冰雹发生前上午百色探空站有中等对流有效位能、上干下湿层结结构、强的深层垂直环境风切变,速度矢图上低层强的顺时针旋转曲率,已经具备强对流潜势发生条件。(2)超级单体右前方的低层反射率因子呈现明显的钩状回波,是超级单体风暴的典型特征之一。反射率因子垂直剖面呈现出典型的有界弱回波区、回波悬垂和回波墙。最大的回波强度出现在沿着回波墙的一个竖直的狭长区域,其值超过 65 dBz。相应的中低层径向速度图呈现一个中等强度的中气旋,旋转速度达到 $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;垂直累积液态水含量和密度分别超过 $70\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。(3)高空低涡正涡度区、高 CAPE 值、地面辐合线在右江河谷滞留以及特殊地形作用,是多个对流单体沿相似路径移动的主要原因。

关键词: 冰雹, 超级单体风暴, 多单体重复性, 强对流天气

A Case Study on Supercell Storm of Hail in the Northwest of Guangxi

NONG Mengsong^{1,2} QI Liyan² HUANG Haihong² DENG Ruyi³ BAN Ronggui³

1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044
2 Meteorological Observatory of Guangxi, Nanning 530022
3 Guangxi Baise Meteorological Observatory, Baise 533000

Abstract: Based on the routine observation data and the Doppler weather radar data, the large-scale hail in the northwest of Guangxi is analyzed. The results show that: (1) The systems csusing hail are upper-air-vortex and low-level shear line. Although the CAPE was moderate before the hail, it has necessary conditions for the severe convection potential occurrence such as the stratification of upper dry and lower wet, strong environmental wind shear and the strong clockwise curvature at low levels. (2) The low-level re-reflectivity on the right front of the supercell shows a typical hook echo and it is a typical feature of super-cells. Along the inflow direction and through the strongest echo, the reflectivity shows typical BWER (Boundary Weak Echo Region), overhang echo and echo wall. The strongest echo is within a vertical nar-row region along the echo wall and can be more than 65 dBz. The corresponding radial velocity in the lower atmosphere has a moderate meso-scale vortex street and its rotation speed can be $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Meanwhile the VIL exceeds $70\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ and its density exceeds $5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$. (3) The positive vorticity at upper levels, high CAPE value, convergence line on the ground stranding in the Youjiang Valley and the special terrain are the main causes for many convection cells moving along similar paths.

Key words: hail, supercell, multi-cell repetition, severe convection weather

^{*} 中国气象局新技术推广项目预报员专项(CMATG2008Y07)、广西科技厅(桂科攻 0993002-1、0816006-9)和广西青年基金(0991061)共同资助
2011 年 2 月 25 日收稿; 2011 年 7 月 29 日收修定稿
第一作者: 农孟松,主要从事天气预报和中尺度灾害性天气研究. Email:nmsong1997@163.com

引 言

强对流天气虽然出现的范围较小、时间较短,但来势猛、强度大,常伴有狂风骤雨和冰雹,往往给局部地区的农业、工业、电讯、交通运输以至人民的生命财产造成严重损失。因此,对强对流天气的分析研究一直是国内外气象工作者关注的焦点。近年来,在强对流环境场研究方面,雷蕾等^[1]指出 0℃ 层高度、-20℃ 层高度、500 和 850 hPa 温差、逆温层高度、低空风切变能比较显著地区分冰雹和暴雨天气。陈晓燕等^[2]对黔西南州一次超级单体风暴环境条件和回波结构分析表明,小槽触发块状对流回波,回波向东南方向移动过程中,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。刘兵等^[3]指出冰雹风暴初生于地形高度高梯度区上空,聚集在大山周围及山地偏南区的迎风坡,说明热力及地形对风暴的生成及能否发展成为冰雹云有着极为重要的作用。多普勒雷达资料对产生不同强对流天气的超级单体回波形态特征也有许多研究成果。俞小鼎等^[4]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。郑媛媛等^[5]给出了一次典型超级单体风暴的“钩状特征”和外流边界的图像识别特征。刁秀广等^[6-7]研究了三次超级单体风暴雷达产品特征,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 值区。

2009 年 4 月 12 日下午到晚上,在广西西北部出现了一系列的强对流风暴,从 14 时到 24 时(北京时间,下同),至少有三个雷暴单体所经过的路径几乎重合(如图 1 所示),造成严重灾害的是其中超级单体风暴 A,该风暴历经了 6 个多小时,其间自西北向东南方向移动了 250 km,右江河谷大部地区出现大风、冰雹和强降水天气,其中在有气象记录中受灾最严重的南宁市隆安县,12 日 18:56 出现了 $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的狂风,同时伴有直径为 40 mm 冰雹和大雨。此次强对流风暴的强烈程度在广西有雷达观测资料记录中是少有的。

本文利用常规观测资料和百色多普勒雷达资料产品,对 2009 年 4 月 12 日发生在广西西北部地区的一次冰雹天气过程进行分析,分析产生冰雹的天

气系统发展演变、垂直结构、以及产生冰雹天气时雷达资料的特征。

1 影响天气系统

12 日 08 时(图略),四川盆地有低涡,在垂直方向上其环流从 850 hPa 延伸到 300 hPa。500 hPa 高原东部低槽已移到四川盆地到云南北部,槽后 576 dagpm 振幅很大,在 $95^{\circ} \sim 100^{\circ} \text{E}$ 达 13 个纬度,冷温槽落后高度槽约 10 个经度,广西处于槽前西南气流控制中,在桂北有 $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强风速带。700 hPa 低槽已移到广西中部,槽后偏西北气流控制下,露点温度:昆明为 -5°C ,百色为 -5°C ,河池为 3°C ,在桂西北地区上空有露点温度梯度为 $8 \sim 9^{\circ} \text{C}$ 的露点锋存在。850 hPa 上,广西受西南急流控制,6 个探空站风速均 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,温度露点差在 $1 \sim 2^{\circ} \text{C}$,空气接近饱和。在贵州东南部有 147 dagpm 低涡中心,切变位于贵州南部、广西北部到湖南中部到江南北部一带,在切变后的江淮之间有 $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 东到东北气流,引导地面东路弱冷空气南下。地面静止锋位于贵州南部、广西北部到湖南北部一线,锋面附近有向西开口的倒槽存在。垂直方向上已经具备上干下湿的层结,这是典型的高空槽前型广西春末夏初冰雹的概念模型。

2 超级单体风暴产生、发展的条件分析

2.1 对流有效位能

三个主要对流单体从发展到结束都经过了右江河谷一带,位于百色和南宁探空站之间(见图 1)。图 2a 为 08 时百色探空图,对流温度为 28.3°C ;图 2b 是用午后 14 时百色地面温度 (32°C) 和露点

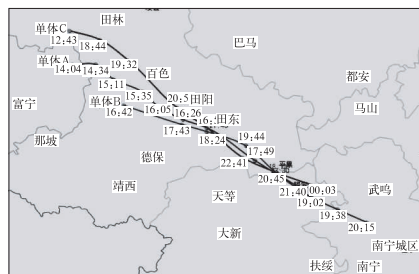


图 1 单体 A、B 和 C 移动路径图

Fig. 1 Moving paths of cells A, B and C

(19℃)订正后的探空图。08 时,百色站的 CAPE 为 $194.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,订正后增大为 $1789.6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明午后百色已经具备较高的对流不稳定条件。同时,对流抑制能量 CIN 由 $540.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 减小为 $0.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。气块仅需要自身浮力就可以做干绝热运动的起始点即自由对流高度,也从 603 hPa 下降到

987 hPa,距离地面仅有 500 m 左右的高度,这就意味着仅需要比较弱的近地面层对流触发条件,气块就可以做干绝热上升运动。因此,单从 08 时 CAPE 的分析很难看出下午具有发生强对流的潜势,只有对地面起始气块的温度和露点进行订正后得到的对流有效位能在对流潜势预报中才更具价值。

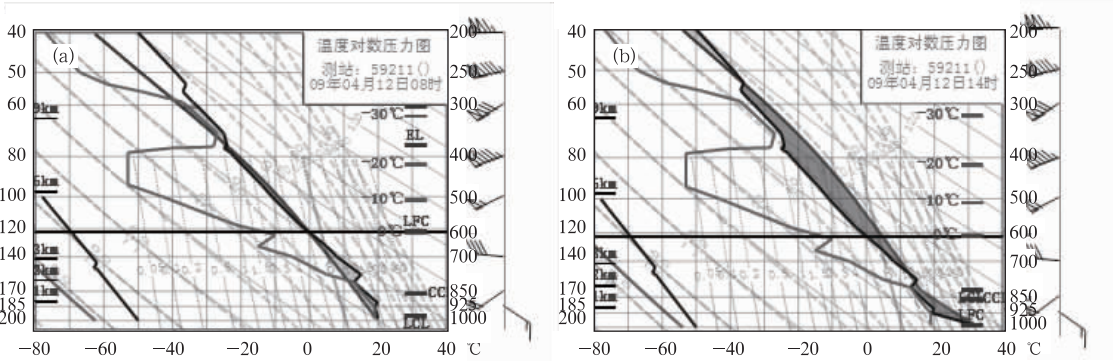


图 2 2009 年 4 月 12 日 08 时(a)和 14 时(b)百色温度对数压力图
Fig. 2 Emagrams of Baize Station at 08:00 BT (a) and 14:00 BT (b) 12 April 2009

2.2 中等到强的风垂直切变

风的垂直切变影响着对流云的发展、移动和分裂等过程,强的风垂直切变有助于普通风暴组织成持续性的强风暴,是维持和增强对流风暴的因子。经计算,0~6 km 垂直风矢量差在百色为 $23 \sim 24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,南宁为 $20 \sim 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,属于强垂直风切变。潘晓滨等^[8]对冰雹云的研究表明,比较强烈的冰雹云多出现在中等到强的环境风切变条件下,垂直风矢量差在 $20 \sim 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

从地面到高空的风向、风速变化,百色地面风到 850 hPa 风向随高度顺转显著(235°),有利于气旋式右移超级单体风暴的产生,风速由静风增大至 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,高空 700~250 hPa 风向逆转 15° ,风速从 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;850 与 500 hPa 之间的温度差 27°C ,与 400 hPa 之间温度差达 38°C ,说明低层有很强的暖湿平流,中层有较强的冷空气入侵,形成“上冷下暖”的对流潜势,加上高空急流的作用,使得对流不断发展,特别是 700~300 hPa 的风向、风速变化不大,有利于积雨云的上升和下沉气流变成有组织的两股对峙的倾斜上升和下沉气流,形成生命史维持较久的组织化风暴。

2.3 0℃层和-20℃层高度

0℃层和-20℃层分别是冷暖云分界线高度和大小滴的自然冰化区下界,是表示雹云特征的重要

参数。根据观测与分析,最有利于降雹的 0℃层海拔高度大约在 3.0~4.5 km(700~600 hPa),-20℃层高度约在 5.0~9.0 km(500~400 hPa 附近)。

12 日 08 时,百色 0℃层的高度为 4167 m,在 611 hPa 处,-20℃层的高度为 7166 m,位于 417 hPa。南宁 0℃层的高度为 4207 m,在 603 hPa,-20℃层的高度为 6760 m,位于 441 hPa。两站 0℃层高度均比历年 4 月份平均的 4500 m 要低。另外,从图 2 温度和露点曲线的差值可以看出,百色在 806 hPa 和南宁在 761 hPa 以下大气很湿,相对湿度均在 95%以上,而以上层结迅速变干,形成向上开口的“上干下湿”结构非常明显。

2.4 速度矢端图

速度矢图由切变矢量组成,其长度表示切变矢量的强度,超级单体风暴的速度矢图通常在风暴入流层中呈现出强烈的顺时针切变,当垂直切变风矢量随高度顺时针变化时,在各层切变矢量方向上,形成穿越上升气流的水平气压梯度;水平气压梯度加强了风暴右侧的上升运动和左侧下沉运动。因此,分裂的风暴对中右移的气旋式旋转的风暴上升气流得到加强,风暴进一步发展^[8]。在这种环境中所产生和发展的风暴已经具有发展为超级单体风暴的潜势。百色和南宁的速度矢图上(图略),在 700 hPa 以下均表现为顺时针的切变,分别从 90° 转到 290° ,从 90° 转到 270° ;百色站在 925 和 850 hPa 的切变值

为最大,而南宁则是地面到 925 hPa 的切变值为最大。低层具有强的风切变和明显的速度矢端图的曲率,这有利于加强风暴的旋转潜势。

3 多普勒雷达资料分析

3.1 风暴的演变

2009 年 4 月 12 日 14 时左右在云南富宁东部 (23.8°N、105.5°E) 开始有孤立的单体 A 生成(图略),此后该单体回波不断发展加强并向偏东方向移动。14:04(图 3a) 单体 A 靠近百色与富宁交界处,尺度大约 5 km,中心强度增强到 53 dBz。14:34(图 3b) 单体 A 已经进入广西百色市境内,尺度扩大到 30 km,中心强度继续增强。15:53(图 3c) 单体 A 继续向东偏南方向移动到百色市南部,强度增加到 63 dBz,尺度继续扩大,并沿着入流方向有钩状回波,开始显现出超级单体低层回波特征。16:24(图 3d) 对流单体 A 发展旺盛,钩状回波加深,并开始出现 TBSS(三体散射),此时强回波位于田阳县的西南方。16:42(图 3e),除钩状回波、三体散射仍在维持外,在强回波的左侧,还出现与强回波同步移动旁瓣回波,旁瓣回波强度在 5~10 dBz。17:06(图 3f),单体 A 继续向 130°方向移动到田东西南部,钩状回波、三体散射更明显,旁瓣回波仍然在伴随。18:25(图 3g),单体 A 距离雷达有 130 km 左右,由于扫描高度的升高而探测不到旁瓣回波,钩状回波已不明显,但三体散射仍然明显。至 19:02(图 3h),单体 A 移到隆安西南面,强度仍在 65 dBz,其相应的钩状回波特征消失,但三体散射仍然维持。

超级单体结构特征的钩状回波、三体散射、旁瓣回波、强回波等共持续了约 2 h,在此其间,整个对流层的平均风向为西偏北,而超级单体的移动方向在盛行风向的右侧 30°左右,是典型的右移超级单体风暴。单体 A 经过百色市、田阳、田东、平果和隆安县,约在 20 时在武鸣境内减弱消失,维持时间达 6 个小时。

单体 B 于 15:42 在百色南部生成,之后沿着与单体 A 相似的路径向东南方向移动,经过田东南部的时间在 18:44,与单体 A 时间间隔为 1 小时 50 分,之后继续向东南方向移动,21:40 在平果县境内减弱。单体 B 强度比单体 A 要弱,最大的反射率在 60 dBz。

单体 C 在 17 时左右在田林县南部生成,在引

导气流引导下向东南方向移动,经过田东南部时间为 21:40,与单体 B 时间间隔 3 个小时左右,13 日 00:30 在隆安县境内减弱。上述 3 个单体均经过了田阳、田东和平果气象站的南部,虽然观测站没有冰雹观测记录,但从灾情收集的冰雹照片,拍到田阳那坡镇永常村大片田野上有冰雹堆积,大量冰雹直径在 5 cm 以上。

3.2 超级单体结构分析

图 4 给出了 16:48 百色雷达 1.5°、4.3°和 6.0°仰角的基本反射率和径向速度。图 4a 1.5°仰角的反射率因子图上显示了带有钩状回波的超级单体 A(箭头处,相应的高度在此距离处约为 1 km),最大反射率因子位于钩状回波沿入流方向上(东北部),超过 65 dBz。在图 4d 速度图上有旋转辐合,尺度比中气旋(10 km 以下)略大,旋转速度约为 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。按照美国国家强风暴实验室规定的中气旋判据属于中等强度中气旋。

图 4b 4.3°仰角(在超级单体距离处高度约 5.3 km)反射率因子回波成羽毛状,流出在东北侧,强回波中心位于西侧,位于中低层有界弱回波区之下,显现出钩状回波特征,最强回波位于钩状回波北部,超过 65 dBz。反射率因子轮廓线相对 1.5°仰角向东北扩展。相应的速度图,图 4e,中气旋特征显著,旋转速度约为 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,与 1.5°相当。三体散射长钉明显可见。

图 4c 6.0°仰角(在超级单体距离处的高度约为 7 km),与箭头处相对应为接近圆形的弱回波区,即有界弱回波区,30 dBz 反射率因子的轮廓进一步向东北扩展,相应的速度图,图 4f 呈现出辐散的结构。三体散射长钉仍可见。

从雷达站出发,各沿 134°和 132°径向作反射率因子的垂直剖面,如图 5a 和 5b,在 134°的剖面上,展现出超级单体反射率因子自低往高向低层入流一侧倾斜的特征,呈现出明显的有界弱回波、回波悬垂、回波墙,与低层钩状回波的入流缺口相对应的闭合的有界弱回波区清晰可见,位置相对偏南,也就是说有界弱回波区也是自低往高向低层入流一侧倾斜的。而在偏左侧的 132°剖面上,回波顶伸展到 15 km 高度,并有三体散射长钉,有回波墙,大于 50 dBz 的强回波伸展到 9 km 高度,远远高于一 20℃层的高度(6.7 km),以上这些特征满足大冰雹产生的条件。

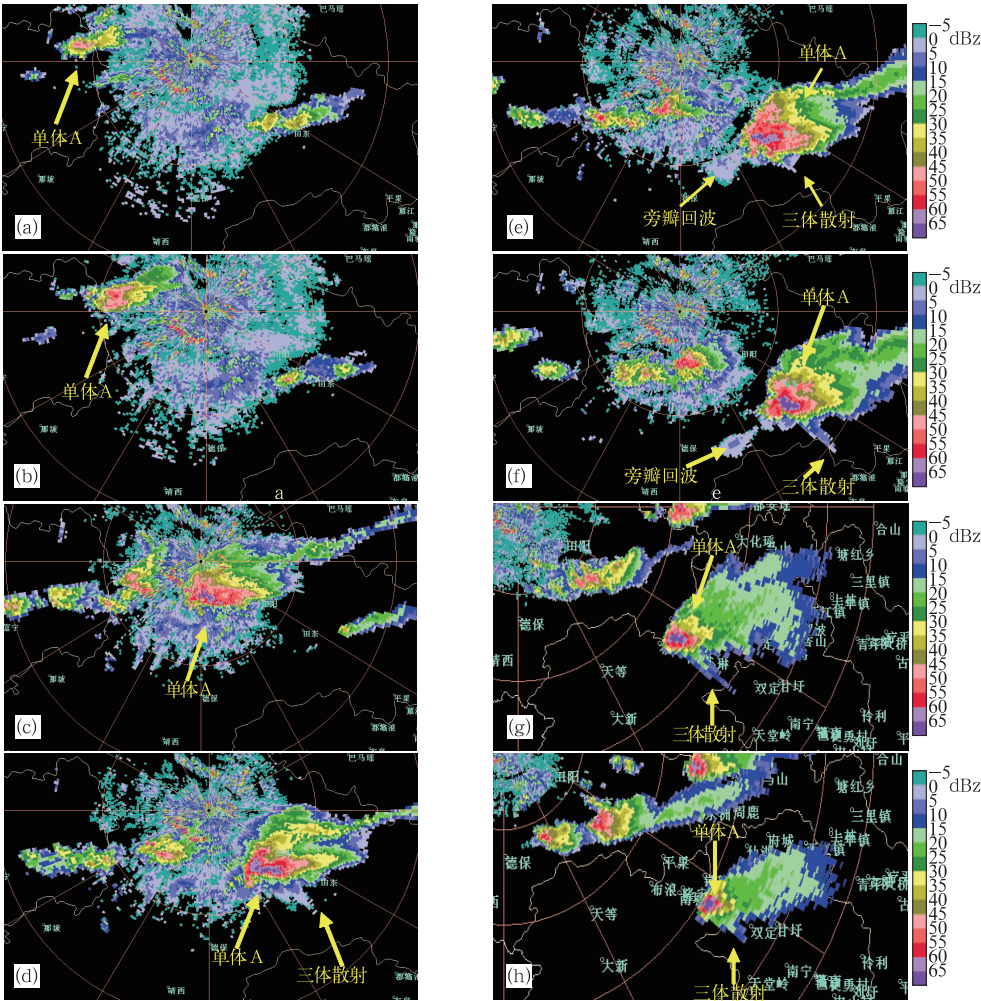


图 3 2009 年 4 月 12 日百色雷达 1.5°仰角反射率因子演变图
(a)14:04,(b)14:28,(c)15:53,(d)16:24,(e)16:42,(f)17:06,(g)18:25,(h)19:08
Fig. 3 Evolution of reflectivity factors at 1.5° elevation observed from Baise Radar Station at
(a) 14:04 BT, (b) 14:28 BT, (c) 15:53 BT, (d) 16:24 BT, (e) 16:42 BT, (f) 17:06 BT,
(g) 18:25 BT, and (h) 19:08 BT 12 April 2009

3.3 冰雹与 VIL

用来判断对流风暴强度的一个十分有用的参量是垂直累积液态水含量,其定义为液态水混合比的垂直积分。液态水混合比是通过雷达测量的反射率因子和雨滴之间的经验关系 $M = 3.44 \times 10^{-3} Z^{1/7}$ 进行计算的。对上式进行垂直积分即可得到垂直累积液态水含量(VIL)。VIL 如果远高于相应季节的对流单体的平均 VIL 值,则发生大冰雹的可能性很大。根据美国 Oklahoma 州的统计,5 月份对应于出现大冰雹的垂直累积液态含水量的阈值为 $55 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,6、7 和 8 月份的相应阈值为 $65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在 16:55,上述超级单体对应的最大 VIL 值超过 $70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,这样大的值在 4 月份的华南一带的对流

单体中是不常见的,因此表明降大冰雹的可能性很大。

Amburn 等^[9]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 2 cm 的大冰雹。对于此次个例,18:31,回波顶高为 13 km,垂直累积液态水含量超过 $70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,相应的 VIL 密度超过 $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。基于上述事实,本文认为,尽管气象站没有观测冰雹,但实际降下的最大冰雹尺寸要远远超过直径 2 cm,只是没有降在气象站附近,因而没有被观测到。

4 月 12 日 15:41 雷达垂直液态水含量 VIL 产品上,最大 VIL 值为 $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,强回波向东南方移动的过程中 VIL 值迅速增加,在 15:59 开始出现

VIL 值 $\geq 50\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的回波,在 16:24 最大值达 $68\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,之后一直稳定的保持在 $50\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上的最大值,在 18:01 出现跃增,一个体扫后 VIL 最大值由 $53\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 增加到 $62\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,反映了云体内冰雹粒子在生长区正迅速碰并长大,18:25—18:31 又一次明显增大,最大从 $61\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 增加到 $71\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,面积 2 km^2 ,这时的雹云内冰雹粒子已

经得到充分增长,到 18:44 最大值达到 $74\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,下一个体扫后突然下降到 $61\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,表明空气中的水汽含量下降剧烈,而隆安在 18:49 出现大风和冰雹天气。由上述 VIL 值的演变可见:降雹前 30 分钟左右,VIL 有一次明显的跃增,这为冰雹的临近预报提供了有价值的信息,当 VIL 再次明显增大,降雹可能即将发生。

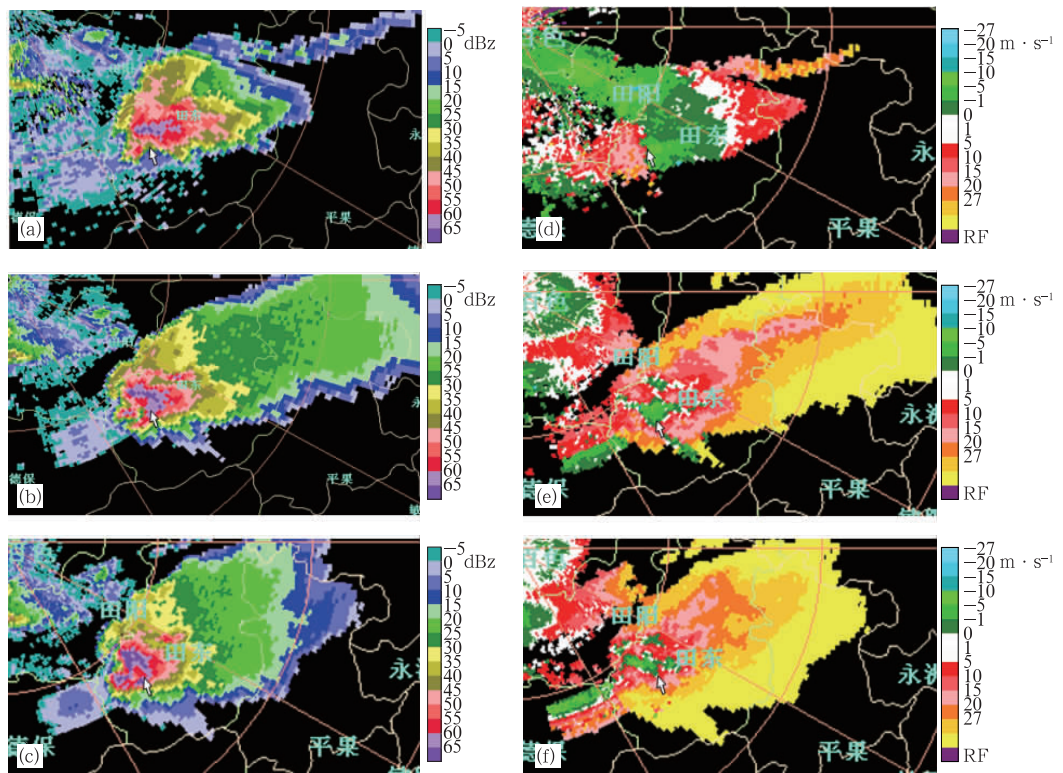


图 4 2009 年 4 月 12 日 16:48 百色雷达基本反射率(a,b,c)和径向速度(d,e,f)图
(a,d) 1.5° , (b,e) 4.3° , (c,f) 6.0°

Fig. 4 Images of reflectivity (a,b,c) and radial velocity (d,e,f) at elevations 1.5° (a,d), 4.3° (b,e) and 6.0° (c,f) observed from Baise Radar Station at 16:48 BT 12 April 2009

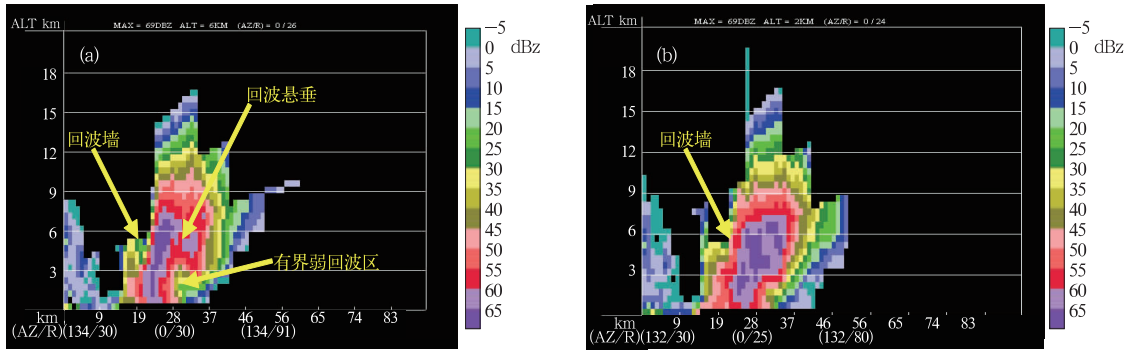


图 5 百色雷达基本反射率面图
(a)雷达站沿径向 134° , (b)雷达站沿径向 132°

Fig. 5 Vertical cross-sections of reflectivity from Baise Radar Station along azimuths (a) 134° , and (b) 132°

4 对流单体移动路径的重复性

4.1 深厚高空低涡东移

造成本次冰雹天气的高空天气系统之一的高空低涡非常深厚,12 日 08 时,700 hPa 在四川盆地有 306 dagpm 低涡(图略),它从 850 hPa 伸展到 300 hPa,呈准正压状态;500 hPa 从低涡中心向西南方向伸出的低槽位于四川南部,槽后在云南北部到青海有 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏北气流,等高线呈南北向,振幅达 15 个纬距,而槽底偏西风与西南风的辐合位于云南东部到广西西部之间,广西位于槽前;12 日 20 时(图略),低涡中心向偏东方向移到湖北北部,其南部低槽(西北风与西南风辐合)位于湖南北部—广西西北部之间,广西大部仍处于槽前西南气流控制。涡度分析中,12 日 08 时(图略)500 hPa 在四川南部有 $61.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 中心,而广西西北部达到 $42.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$;250 hPa 在广西北部涡度达 $35 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 以上;到 20 时,500 hPa 涡度正值区向偏东方向移动,广西北部仍有 $25 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 以上正涡度,400 hPa 到 250 hPa 的正涡度中心进入广西。从 12 日 08 时到 20 时,由于高空低涡深厚,其东移过程中,在广西上空维持较高的正涡度水平,为桂西北对流云的发展提供动力条件。

4.2 地面流场辐合线维持

地面静止锋 12 日 08 时移到贵州中部,呈东北—西南向,14 时南移到广西北部,17 时以后静止锋减弱,广西大部处于锋前暖区。在广西地面中尺度自动站逐小时的观测中,12 日 13 时,从北部湾经南宁再沿着右江河谷到田林为东南气流控制,而河谷的西南部吹偏南风西南风,沿着右江河谷到沿海可以分析出地面辐合线,到 17 时,此辐合线仍维持,右江河谷处于气压相对低值区,而且在百色南部还有 1011 hPa 的小尺度低压。地面辐合线的维持为午后对流单体发展提供了扰动条件。

4.3 地形和单体间相互作用

右江河谷位于广西西部,呈西北—东南向,其两侧为大石山区,本次对流单体 A、B 和 C 的风暴初生在地形高度高梯度区上空(山区与河谷之间),说明热力及地形对风暴的生成及能否发展成为超级单体有着极为重要的作用。

单体 A、B 和 C 均经过了田东南部和平果,单体 A 与单体 B 时间差为 2 个小时,单体 B 与单体 C 时间差为将近 3 个小时,后一单体风暴基本沿前一风暴边缘移动并影响相近的地方,其形状及强度较为相似。

5 结论与讨论

(1) 导致冰雹发生的天气系统是高空低涡和低层切变线,冰雹发生前上午百色探空站有中等对流有效位能、上干下湿层结结构、强的深层垂直环境风切变,速度矢表现为低层强的顺时针旋转曲率,已经具备强对流潜势发生条件。

(2) 超级单体右前方的低层反射率因子呈现明显的钩状回波结构,这是超级单体风暴的典型特征之一。从雷达站出发穿过最强回波位置的反射率因子垂直剖面呈现出典型的有界弱回波区(穹隆)、回波悬垂和有界弱回波区左侧的回波墙。最大的回波强度出现在沿着回波墙的一个竖直的狭长区域,其值超过 65 dBz。相应的中低层径向速度图呈现一个中等强度的中气旋,旋转速度达到 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。相应的垂直累积液态水含量和密度分别超过 $70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。降雹前 VIL 有明显的跃增现象。

(3) 高空低涡正涡度区、地面辐合线在右江河谷滞留以及特殊地形作用,是多个雷暴单体沿相似路径移动的主要原因。

参考文献

- [1] 雷蕾,孙继松,魏东,等.利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J].气象,2011,37(2):136-141.
- [2] 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.
- [3] 刘兵,戴泽军,胡振菊,等.张家界多个例降雹过程对比分析[J].气象,2009,35(7):23-32.
- [4] 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.
- [5] 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等.一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J].气象学报,2004,62(3):317-328.
- [6] 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流结构差异性分析[J].气象学报,2009,67(1):133-146.
- [7] 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.
- [8] 潘晓滨,陈家华,魏绍远.垂直风切变对风暴云影响的数值模拟[J].气象科学,1996,16(2):135-14.
- [9] Amburn S A, Wolf P L. VIL density as a hail indicator[J]. Weather and Forecasting,1997,12:473-478.