

覃靖, 潘海, 刘蕾, 2017. 柳州“4·09”致灾冰雹的超级单体风暴过程分析[J]. 气象, 43(6): 745-755.

柳州“4·09”致灾冰雹的超级单体 风暴过程分析*

覃 靖 潘 海 刘 蕾

广西壮族自治区柳州市气象局, 柳州 545001

提 要: 利用柳州和桂林天气雷达(SB)资料和相关实况资料,对 2016 年 4 月 9 日夜间柳州一次强雹暴天气的环境条件和雷达回波结构演变特征进行了详细分析。结果表明:(1)雹暴发生在低层热低压发展,中层有冷温槽发展东移,高层有急流的背景下。地面干线和中尺度辐合线触发的对流云团在不稳定层结和较强的深层垂直风切变作用下发展为超级单体。(2)超级单体的低层反射率因子呈现出明显的钩状回波或倒“V”型入流缺口。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,其值达到 65 dBz。相应的中低层径向速度图呈现出一个强中气旋,旋转速度达到 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。该中气旋的发展和维持使得超级单体风暴发展并维持。(3)得出大冰雹临近预警的雷达参数量化指标:最大反射率因子达到 60 dBz,中等强度以上中气旋,VIL 值和 VIL 密度分别达到 $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $5.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,50 dBz 以上强回波区伸展到 -30°C 层高度以上。

关键词: 冰雹,超级单体,中气旋,VIL 值

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.06.011

Analysis of Supercell Storm Leading to Disastrous Hail in Liuzhou on 9 April 2016

QIN Jing PAN Hai LIU Lei

Liuzhou Meteorological Office of Guangxi, Liuzhou 545001

Abstract: Based on the Doppler weather radar data of Liuzhou and Guilin, and the conventional upper-air and surface observation data, this paper analyzes the environmental condition and radar echo structure of the severe hailstorm which occurred in Liuzhou on 9 April 2016. The results show that: (1) The background responsible for the hailstorm includes intense heating-up of the surface which led to the development of thermal depression in the lower atmosphere, the developing eastward cold temperature trough in the mid-level, and an upper-level jet stream above the convective location. The convective clouds triggered by surface dryline and the mesoscale convergence line evolved into supercells under the influence of the unstable stratification and significant vertical wind shear. (2) The low-level reflectivity of the supercell showed a typical hook echo or inverted V-notch. Along the inflow direction and through the strongest echo, the reflectivity showed typical BWER, overhanging echo and echo wall. The strongest echo was within a vertical narrow zone along the echo wall and the value got to 65 dBz. The corresponding radial velocity in the lower atmosphere had a strong mesocyclone with rotation speed reaching $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The development and maintenance of mesocyclone made the supercell storm develop and maintain. (3) Maximum reflectivity reaches 60 dBz, strong echo over 50 dBz extending to the height of -30°C layer, VIL value over $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$

* 柳州市气象局自立项目(柳气科 201602)资助

2016 年 5 月 31 日收稿; 2017 年 4 月 20 日收修定稿

第一作者:覃靖,主要从事短期、短时临近天气预报工作. Email:48911409@qq.com

and VIL density over $5.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, mesocyclone in moderate or severe intensity can be taken as the early warning indicator of severe hail.

Key words: hail, supercell, mesocyclone, VIL (vertically integrated liquid) value

引 言

冰雹是桂北地区春季主要发生的灾害天气之一,常常给农业生产带来严重危害,甚至造成人员伤亡。但因其具有局地性、突发性和强烈性等特征,对冰雹的预报和预警是短时临近预报中的难点。近年来,随着加密地面气象观测网的建设,利用新一代天气雷达对冰雹等强对流天气的监测和分析已取得不少成果(周泓等,2014;周小刚等,2015;朱江山等,2015;徐芬等,2016;夏文梅等,2016;张小玲等,2016;曾明剑等,2016)。朱君鉴等(2004)研究了中气旋与降雹的关系,并对冰雹风暴中的流场结构与大冰雹生成区进行了研究;刘黎平等(1992)用 C 波段双线偏振雷达研究冰雹云,发现反射率因子和降雹强度不是一一对应关系;陈贵川等(2011)对一次强风雹天气进行了分析,发现中层径向辐合和反射率因子核心的反复上升下降是形成地面大风和冰雹的重要特征;陈秋萍等(2015)分析了两个强降雹超级单体特征,发现中气旋维持时间的差异与垂直风切变、垂直涡度存在差异有关;沈杭锋等(2016)对浙江一次强对流天气进行分析,发现 925 hPa 中尺度辐合线与 700 hPa 垂直上升运动区重合时,易产生强对流天气;黄晓龙和高丽(2016)对台州一次冰雹过程的分析表明 0~3 和 0~6 km 垂直风切变较大有利于风雹类强对流天气的发生;陶岚等(2016)分析了雷暴单体相互作用与中气旋的演变关系得出,雷暴的合并使得上升气流加强,有利于中气旋的形成。这些研究都得出了较好的结果,对冰雹等灾害性天气监测和预警发挥了重要作用。

2016 年 4 月 9 日夜间,广西柳州市北部融安、融水县遭受强对流风暴的袭击,19 个乡镇出现冰雹,持续时间长,降雹量大,观测到的最大冰雹直径达 5.2 cm,受灾严重,为多年来罕见,局部还出现大暴雨和 7 级大风,最大 1 h 降雨量达 60.9 mm。此次强烈雹暴天气是由两个超级单体风暴造成的,出现最强冰雹的区域位于柳州雷达北面 100 km、桂林雷达西面 100 km 附近,两部多普勒雷达对其进行连续跟踪观测。通过分析此次超级单体的生成和

发展演变,研究强烈雹暴产生的环境条件和雷达回波特征,以期为桂北雹暴的潜势预报和临近预警提供参考。

1 环境条件分析

1.1 天气形势分析

4 月 9 日 08 时(图略),500 hPa 在川东到滇东地区有一冷槽,广西处于槽前西南气流控制中;850 和 925 hPa 切变线位于湘黔南部,桂北地区的 850 与 500 hPa 温差达 27°C ,上冷下暖,温度直减率较大,850 hPa 湿舌从南海地区向东北方向伸展。20 时(图 1),500 hPa 冷槽加深缓慢东移,槽后西北风和槽前西南风呈 90° ,槽后冷平流明显。桂东北处于槽前 24 h 负变温中心区域,达 -5°C ,对流层中层有冷平流入侵,而 850 hPa 则为 24 h 正变温区,冷平流叠加在暖平流之上,形成了上干冷、下暖湿的不稳定层结。高空急流轴穿过广西北部,桂北地区处于急流出口区左侧,具备有利于强对流发生发展的高空辐散条件,500 hPa 中空急流与高空急流相交,风速随高度明显增大,500 和 925 hPa 风速差达 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风向随高度顺转 90° ,深层的垂直风切变,有利于深厚对流的发展。

9 日 08 时(图略)地面热低压位于滇东地区,白天太阳照射,下垫面迅速加热,热低压发展并向东扩展,柳州地区最高气温上升至 30°C 左右,较前一天升高了 6°C ,能量在不断积累,低层强烈加热与高层冷平流配合,使不稳定层结加剧。地面辐合线稳定维持在河池—融安—桂林一线。

1.2 热力条件和对流不稳定性分析

因柳州未设探空站,采用邻近的河池和桂林站探空资料来估计柳州上空的大气层结状况。9 日 18 时左右,对流起源于贵阳南面一带,并向东南方向移动进入柳州北部。从图 2 可以看出,河池上空 700 hPa 以下温度露点差很小,尤其是 850 hPa 附近,温度露点差仅为 1°C ,空气接近饱和,湿层厚度相比樊李苗和俞小鼎(2013)经过中国大量冰雹个例

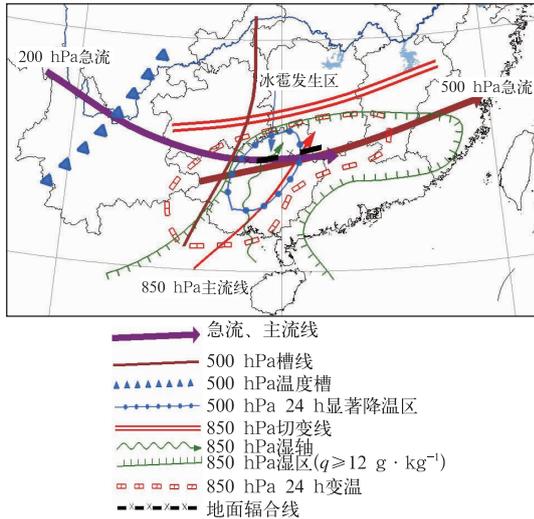


图 1 2016 年 4 月 9 日 20 时综合分析天气图
Fig. 1 Composite analysis on synoptic situation at 20:00 BT 9 April 2016

统计得出的平均值要厚,而 500 hPa 以上温度露点差迅速增大到 27℃,说明对流层中高层有干冷空气入侵,上、下层干湿差异很大,气层不稳定性增大。

根据国内外众多关于强对流指数的应用研究(俞小鼎等,2006;李耀东等,2004;竹利和王厚伯,2008),K 指数和沙氏指数(SI)反映大气稳定性,对流有效位能(CAPE)是气块在给定环境中绝热上升时的正浮力所产生的能量的垂直积分,是风暴潜在强度的一个重要指标,综合判断这些物理量对预报强对流天气有重要指示意义。从表 1 可以看出,K 指数、SI 指数、850 与 500 hPa 温差和假相当位温差值均指示大气具有较强的不稳定性,而且河池比桂林的不稳定性更强,这也许是超级单体东移至桂林一带减弱的原因。河池的 CAPE 值从 08 时的 78.2 J · kg⁻¹ 上升到 20 时的 1287.3 J · kg⁻¹,对流抑制能量(CIN)从 -289.8 J · kg⁻¹ 下降到 -120.7 J · kg⁻¹,说明白天的热力不稳定性在增大,有利于对流发展。反映动力条件的最大上升速度 ω 达到 50.7 m · s⁻¹,强烈持久的上升气流对产生冰雹非常有利。桂林处于地面辐合线北侧,地面有弱冷空

气渗透,CAPE 值较小,由于 CAPE 并非唯一影响对流风暴中上升运动的因子,在强垂直风切变环境中,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较小至中等的 CAPE 中得以发展,潘晓滨等(1996)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垂直风切变环境下,垂直风切变矢量差在 20~30 m · s⁻¹,河池和桂林均具有较强的 0~6 km 深层垂直风切变,强垂直风切变存在较大的水平涡度,风暴内外的垂直速度差异使得涡度扭曲,产生风暴内垂直涡度,从而有利于超级单体发展。且 700~300 hPa 的风向变化不大,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气流和下沉气流,形成持久的组织化风暴。

强冰雹的产生还需要有合适的 0℃ 和 -20℃ 层高度,根据观测和分析,最利于降雹的 0℃ 和 -20℃ 层高度分别为 3.0~4.5 和 5.0~9.0 km(农孟松等,2011),河池、桂林的 0℃ 和 -20℃ 层高度均在 4.5 和 7.6 km 附近,是有利于降雹的高度。此外,强冰雹的有利环境条件还包括微物理条件,如 0℃ 层以上,尤其在冰雹增长层 -30~-10℃ 存在足够的过冷却水滴,河池、桂林的 -30℃ 层高度位于

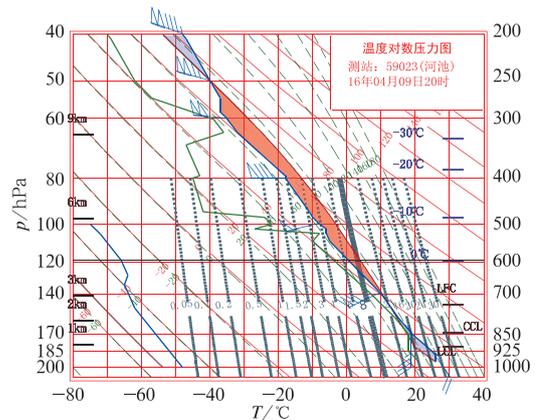


图 2 2016 年 4 月 9 日 20 时河池 T-lnp 图
Fig. 2 T-lnp diagram of Hechi at 20:00 BT on 9 April 2016

表 1 2016 年 4 月 9 日 20 时表征稳定度指标的对流参数

Table 1 Convective parameters indicating the stability index at 20:00 BT 9 April 2016

	K/°C	SI/°C	CAPE /J · kg ⁻¹	CIN /J · kg ⁻¹	ω /m · s ⁻¹	$T_{850} - T_{500}$ /°C	$\theta_{ec850} - \theta_{ec500}$ /°C	0~6 km 垂直风切变 /m · s ⁻¹
河池	42	-5.7	1287.3	-120.7	50.7	27	25	18
桂林	34	-5	14.9	-468.8	5.5	27	20	24

8.9 km高度附近,后面分析雷达回波结构特征的时候再作进一步分析。

1.3 近地面层的触发条件

以上分析表明柳州上空热力条件和气层不稳定条件较好,具有很好的对流发生发展的环境和产生冰雹的潜势,而强对流的发生发展需要外力作用触发。从地面资料分析可见(图 3a),9日 17 时(图略)贵阳南面存在一条干线,干线两侧露点温度相差 5℃,1 h 后在干线附近开始有对流云团发生东移,之后随着干线缓慢南移,不断触发对流,对流云团整体呈现向东南移动的趋势。从地面加密观测资料来看,17—20 时融安、融水附近有中尺度风场辐合线存在,20 时以前辐合线两侧均为弱的正 1 h 变压,20 时开始,紧挨着辐合线南侧的罗城一带突然出现一块小尺度的负 1 h 变压区(图 3b),气流辐合增强,在气流辐合最强的融水和罗城交界一带激发出对流云团 A,并沿辐合线向东北方向移动。表明地面中

尺度辐合线作为动力触发条件,在低层辐合产生上升运动触发对流不稳定能量的释放,产生强对流。

1.4 地形的作用

强风暴的形成和发展与局地地形有重要关系。融水西北部山区海拔超过 1000 m,融安三面环山,地势相对较低,形成“喇叭口”地形,偏南暖湿气流所带来的水汽和热量在迎风坡堆积,导致其上空对流不稳定性增强,中尺度辐合线附近出现小尺度扰动,触发对流 A(图 4),并沿着辐合线向融安移动,在不稳定层结和较强的垂直风切变作用下迅速发展为超级单体风暴。在地形高度高梯度区上空(山区和河谷过渡区)也不断有对流云生成。从黔东南移来的雷暴云团 B 越过山脊,与低层沿地形爬升的偏南暖湿气流相遇,产生的垂直扰动相叠加,激发上升运动强烈发展,使雷暴发展演变为多单体强风暴并长久维持。刘蕾等(2015)针对融水西北部中尺度地形对强降水的影响所做的数值试验结果表明,地形对降

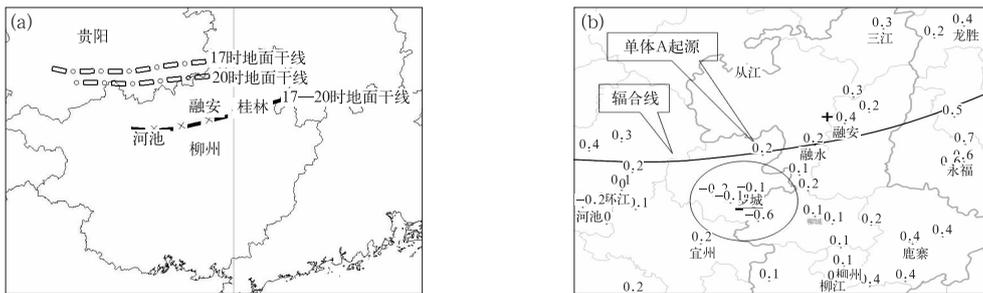


图 3 2016 年 4 月 9 日 20 时地面分析(a)和 1 h 变压(b)
Fig. 3 Surface analysis (a) and 1 h change of surface air pressure (b)
at 20:00 BT 9 April 2016

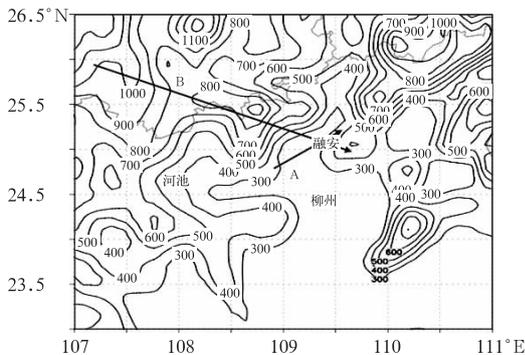


图 4 地形与超级单体风暴发生演变移动位置示意图
Fig. 4 Topography and the location evolution of supercell storm

水有增幅作用。可见地形对风暴的发展有抬升和触发的作用。

2 雹暴的雷达回波特征分析

2.1 风暴的演变过程

2016 年 4 月 9 日 18 时左右在贵阳南面开始有孤立的对流云团 B 生成(图略),此后回波不断发展加强,并向东南方向移动,同时位于黔桂交界一带的地面干线附近不断有对流单体生成,并伴有大片的降水回波。对流云团 B 逐渐发展成中尺度对流风

暴,中心强度增强到 63 dBz,并出现旁瓣回波。20:27(图 5a),多单体 B 在径向速度图(图 6a)上出现中气旋特征,旋转速度 $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。21:20(图 5b),多单体 B 继续向东南方向移动进入融水西北部山区,中心强度已超过 65 dBz,并在入流一侧出现倒“V”型缺口,表明低层有较强的偏南气流进入上升气流。21:38(图 5c),多单体 B 再次出现旁瓣回波,回波前沿呈圆弧形,后侧出现“V”型缺口,表明具有较强的下沉气流和后侧偏西气流。21:55(图 7b),多单体 B 强度有所减弱,中心强度 58 dBz,最强反射率因子下降到 5 km 高度附近。22:18(图 5d),多单体 B 继续减弱,回波结构趋于松散,只在 5 km 以下表现出旋转特性,此时多单体 B 即将到达融安站,由 22 时中尺度自动站风场资料(图略)可知此时地面辐合线仍位于融安站附近。22:30(图略),多单体 B 刚好到达融安且与单体 A 相遇,地面辐合线的动力抬升作用和单体之间的合并使得多单体 B 迅速发展,回波结构变得紧实,中心强度超过 65 dBz,50 dBz 以上强回波范围增大到 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$,旋转特性伸展到 7 km 高度附近,旋转速度达到

$21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。22:42(图 5e),50 dBz 以上强回波范围增大到 $20 \text{ km} \times 15 \text{ km}$,合并后的 B 演变为强降水超级单体风暴,前侧“V”型缺口回波表明前侧的上升运动迅速加强,后侧“V”型缺口表明存在强的下沉气流,造成融安 1 h 57.1 mm 的降水和 $13.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的阵风,该风暴与东北面的多个对流单体相连,形成一回波带。23:29(图 5f 和图 6f),带状回波演变成弓形,强回波高度下降到 6 km 以下,远低于 -20°C 层的高度,已不具备形成冰雹的条件,桂林也确实没有收到冰雹的报告,紧随其后的两个多单体风暴也演变成弓形回波,这 3 个弓形回波主要造成雷暴大风天气,不属于本文研究的范畴。

20:27(图 5a),融水和罗城交界一带开始有对流回波生成,21:20(图 5b)对流单体 A 迅速发展,呈现出长约 15 km、宽 10 km 的椭圆形,中心强度超过 65 dBz。21:38(图 5c)对流单体 A 发展旺盛,入流一侧有明显“V”型缺口,并且缺口内较高仰角出现中气旋特征(图略),最大旋转速度达 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,位于 6~7 km 高度附近,旋转向上、下延伸,表明中气旋将继续发展。21:55(图 7a)单体 A 入流一侧“V”

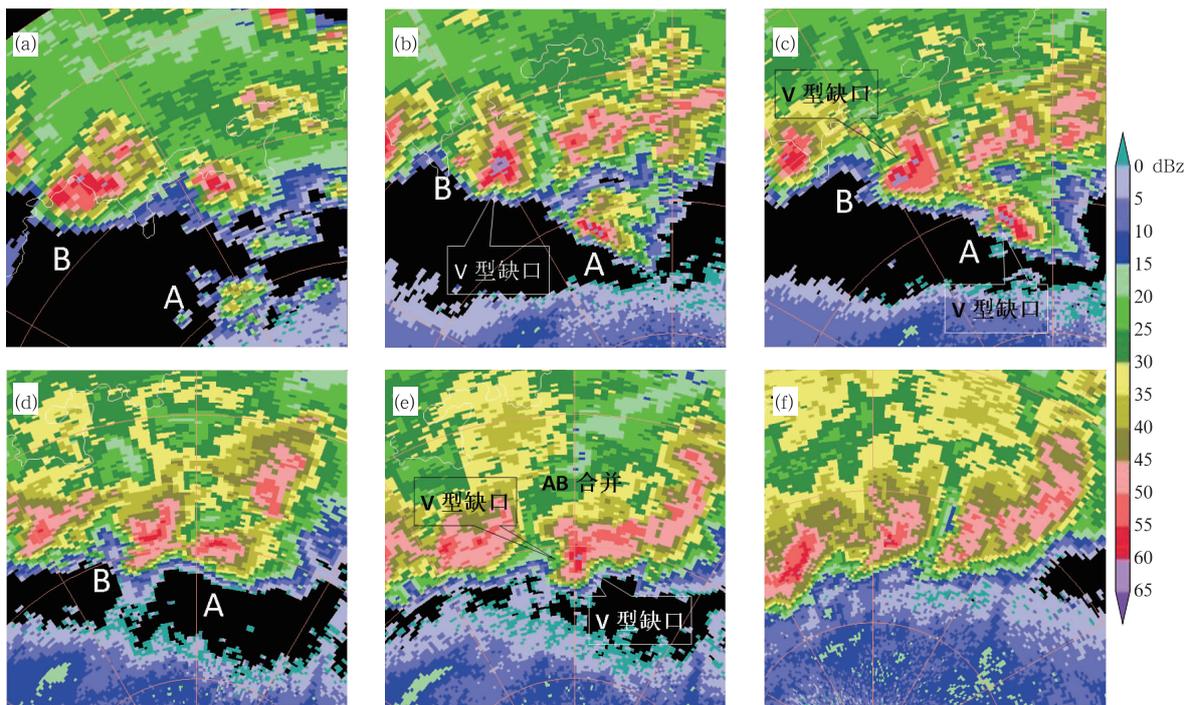


图 5 2016 年 4 月 9 日柳州雷达 1.5° 仰角反射率因子演变图
(a)20:27, (b)21:20, (c)21:38, (d)22:18, (e)22:42, (f)23:29

Fig. 5 Evolution of reflectivity factors at 1.5° elevation observed from Liuzhou Radar Station at (a) 20:27, (b) 21:20, (c) 21:38, (d) 22:18, (e) 22:42, (f) 23:29 BT 9 April 2016

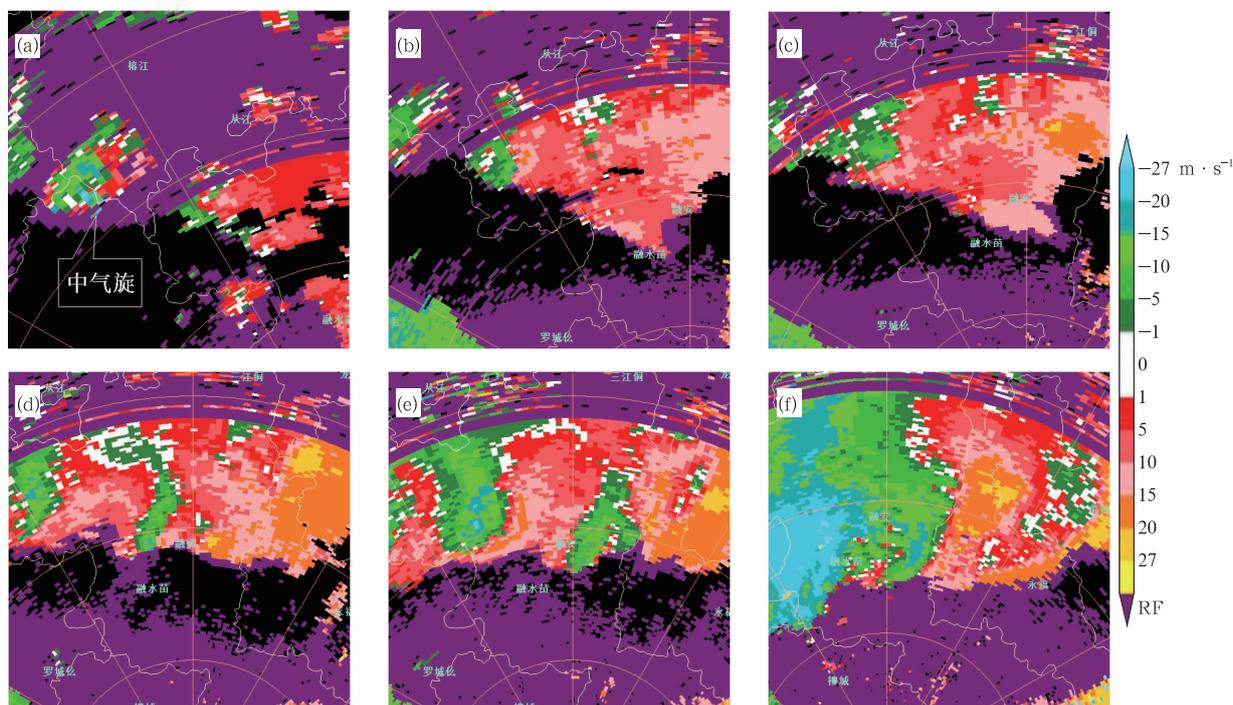


图 6 同图 5, 但为径向速度

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for radial velocity

型缺口演变为钩状回波, 显现出超级单体低层反射率因子特征, 紧挨着单体 A 相对于移动方向的左侧出现一小块负速度(图 7f), 中心出现速度模糊, 入流速度达到 $-31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 表明中层存在后侧入流急流。22:18(图 5d), 单体 A 钩状回波特征已经消失, 强度迅速减弱, 中心强度 58 dBz, 50 dBz 以上强回波范围明显缩小, 系统已不能识别中气旋。

造成融水地区雹灾的实体是多单体风暴 B, 融安地区雹灾是由超级单体风暴 A 和演变为强降水超级单体风暴的单体 B 共同造成, 所以灾情更严重。超级单体定义为具有深厚、持久中气旋的强风暴, 超级单体风暴 A 的中气旋特征持续了约 1 h, 风暴 B 的中气旋特征持续了约 2.5 h(包括多单体风暴和强降水超级单体风暴时期), 两个风暴的生命史分别长达 2 和 6 h, 可见中气旋对超级单体风暴的长久维持具有重要作用。在此期间, 对流层平均层风向为西偏南, 单体 A 的移动方向几乎与平均层风向一致, 单体 B 则偏向盛行风向右侧 60° 左右, 属于右移超级单体风暴。

2.2 超级单体的垂直结构

图 7 给出了 21:55 柳州雷达 0.5° 、 2.4° 、 3.4° 和

6.0° 仰角的反射率因子和相对风暴径向速度图。此时超级单体 A 正好位于融安上空。可以看到, 0.5° 仰角的反射率因子图上(图 7a)显示出带有钩状回波的超级单体 A, 相应的高度约为 1.7 km, 最大反射率因子位于钩状回波东北部, 超过 65 dBz。在相对风暴径向速度图上(图 7e)表现为气旋式辐合, 核心区直径约 5 km, 旋转速度 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 2.4° 仰角的反射率因子图上(图 7b), 入流一侧存在一个倒“V”型弱回波区, 该弱回波区位于低层钩状回波之上, 相应高度约 4.8 km, 最大反射率因子超过 65 dBz, 反射率因子廓线相对于 0.5° 仰角向东北扩展, 相应的速度图上(图 7f)中气旋特征更显著, 仍为气旋式辐合, 旋转速度 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 此处距离雷达约 90 km, 按照美国国家强风暴实验室规定的中气旋判据属于强中气旋, 紧挨着单体 A 相对于移动方向的左侧出现一小块负速度, 中心出现速度模糊, 入流速度达到 $-31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 3.4° 仰角的反射率因子图上(图 7c)呈现出有界弱回波区位于低层钩状回波之上。 6.0° 仰角的反射率因子图上(图 7d)最大反射率因子达到 63 dBz, 相应高度约 10.8 km, 反射率因子廓线相对于 2.4° 仰角继续向东扩展, 超级单体反射率因子由低层往高层向低层入流一侧倾斜, 呈现出回波悬垂,

相应的速度图上(图 7h)中气旋表现为气旋式辐散,正、负速度差值达到 $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,高层辐散远大于低层辐合,有利于中气旋的维持,正是由于中气旋的发展和维持,使得超级单体发展并维持,造成融安地区强冰雹天气。

图 8 和图 9 分别给出柳州和桂林雷达对超级单体 A 所做的垂直剖面。显现出超级单体反射率因子由低往高向低层入流一侧倾斜的特征,与低层钩状回波的入流缺口相对应的有界弱回波区和其上的

回波悬垂以及回波墙清晰可见, $>50 \text{ dBz}$ 的强回波伸展到 11 km 高度,远远高于 -20°C 层的高度 (7.6 km),甚至 -30°C 层的高度 (8.9 km),说明在冰雹增长层 $-30 \sim -10^\circ\text{C}$ 存在丰富的过冷却水滴,非常有利于大冰雹的产生。相应的径向速度垂直剖面可以看到,在风暴入流一侧存在一支很强的斜升气流,并从上部流出,这支强烈的上升气流为风暴输送水汽,维持风暴的发展,并且其托举作用能够使小冰粒长成大冰雹;另外有一支干冷的下沉气流从风

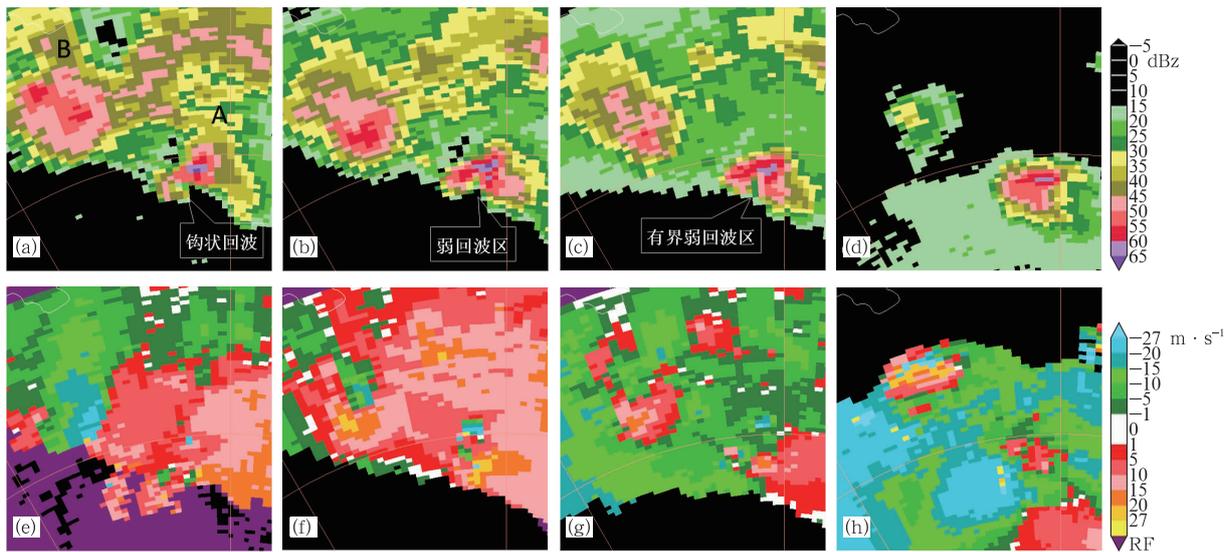


图 7 2016 年 4 月 9 日 21:55 柳州雷达不同仰角的反射率因子(a~d)和相对风暴径向速度(e~h)
(a, e) 0.5° , (b, f) 2.4° , (c, g) 3.4° , (d, h) 6.0°

Fig.7 Reflectivity (a—d) and storm relative radial velocity (e—h) with different elevation angles observed from Liuzhou Radar Station at 21:55 BT 9 April 2016
(a, e) 0.5° , (b, f) 2.4° , (c, g) 3.4° , (d, h) 6.0°

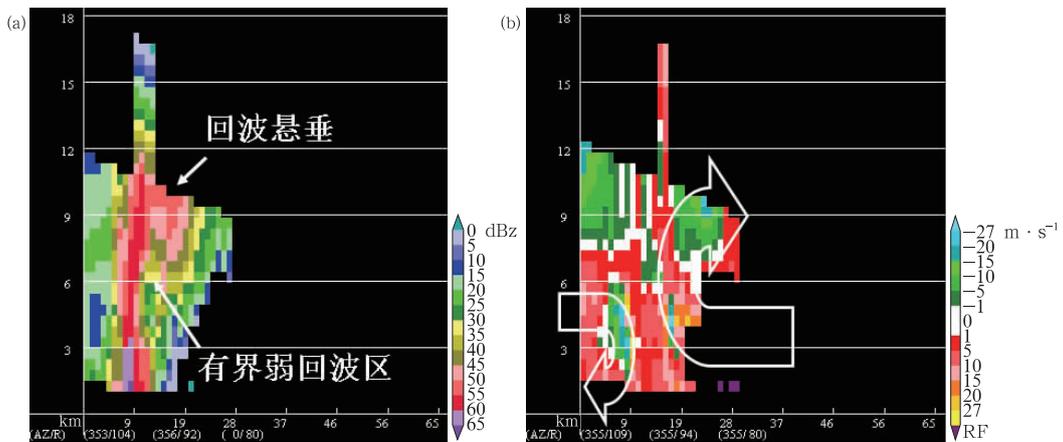


图 8 2016 年 4 月 9 日 21:55 柳州雷达反射率因子(a)和径向速度(b)沿径向 355° 垂直剖面
Fig.8 Vertical cross-sections of reflectivity (a) and radial velocity (b) along azimuth 355° from Liuzhou Radar Station at 21:55 BT 9 April 2016

暴后部中层流入,从风暴的底部流出,形成地面雷暴高压和冰雹落区。前侧强上升和后侧下沉气流错开,互不妨碍又相互促进,这是风暴流场自组织的一种机制或自维持结构,两股气流在 3~6 km 高度强烈辐合,流入、流出速度均出现速度模糊,中层径向辐合达 $64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图 10 给出 21:55 多单体风暴 B 的垂直剖面,此时风暴强度正在减弱,50 dBz 以上强回波范围缩小,强回波高度基本位于 7 km 以下,但回波悬垂结构

仍存在(图 10a),中层径向辐合特征仍明显(图 10b),并且 12 km 高度附近风暴顶强烈辐散。从图 7e~7h 可以看出,中气旋的低层为气旋性辐合,中下层为反气旋性辐合,高层为辐散,正、负速度差值达到 $58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,高层辐散远大于低层辐合,有利于中气旋的维持,中气旋的发展和维持又使风暴不至于减弱得太快。图 11 给出 22:42 风暴 B 的反射率因子垂直剖面,图中显现出超级单体风暴的经典结构:低层入流缺口以及位于其上方的有界弱回

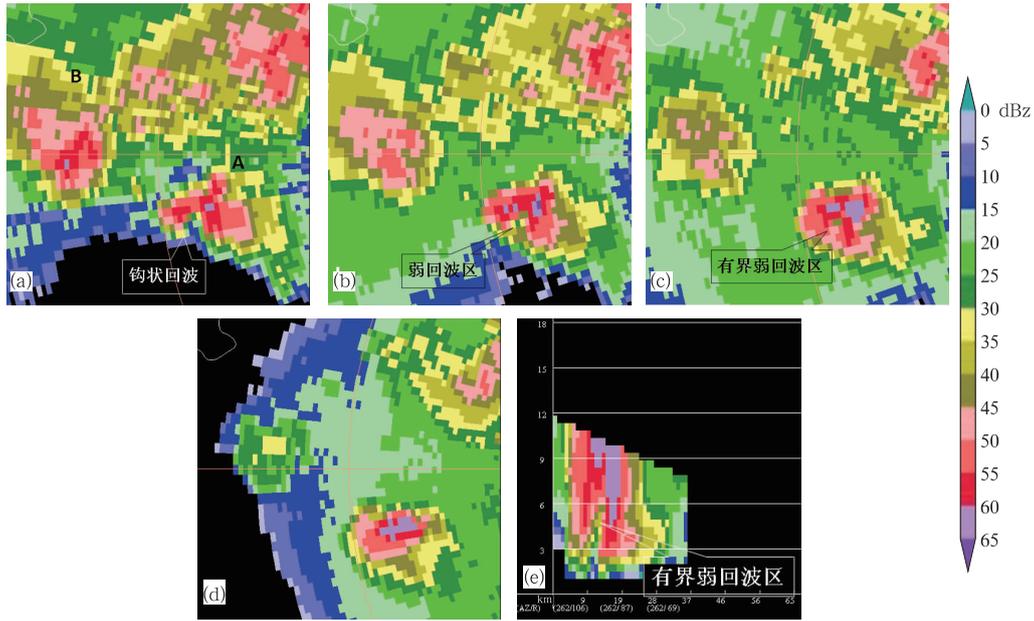


图 9 2016 年 4 月 9 日 21:56 桂林雷达不同仰角反射率因子(a~d)和雷达站沿径向 262°垂直剖面(e)
(a)2.4°, (b)3.4°, (c)4.3°, (d)6.0°

Fig. 9 Reflectivity with different elevation angles (a-d) and vertical cross-section of reflectivity along azimuth 262° (e) from Guilin Radar Station at 21:56 BT 9 April 2016
(a)2.4°, (b)3.4°, (c)4.3°, (d)6.0°

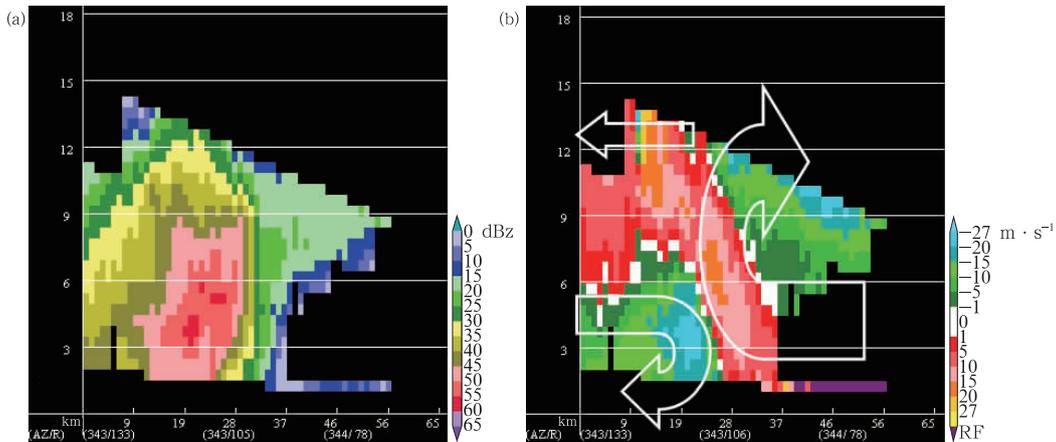


图 10 同图 8, 但为沿径向 343°垂直剖面
Fig. 10 Same as Fig. 8, but for azimuth 343°

波区、回波悬垂和有界弱回波区左侧的强大回波墙, 50 dBz 以上强回波范围明显增大, 强回波区伸展到 10 km 高度附近, 远远高于 -20℃ 层的高度 (7.6 km), 甚至 -30℃ 层的高度 (8.9 km), 非常有利于大冰雹的产生, 再次给融安地区带来强冰雹天气。正是由于地面辐合线的动力抬升作用和单体之间的合并使多单体风暴 B 发展演变为超级单体风暴, 可见, 地面中尺度辐合线的动力抬升作用以及单体的合并是超级单体风暴发展和维持的重要原因。

2.3 VIL 值与大冰雹

观测实践表明, 垂直累积液态水含量 (VIL 值) 对大冰雹有较好的指示, 本次雹暴过程中 VIL 值有很好的指示作用。根据美国俄克拉何马州的统计, 4 月对应于出现大冰雹的 VIL 阈值为 $45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 广西 3—5 月冰雹云和大冰雹风暴单体的 VIL 阈值分别为 $43 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (张正国等, 2012) 和 $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (胡胜等, 2015)。在本次个例中, 风暴距离柳州雷达约 90~120 km, 出现大冰雹时 VIL 值在 $50 \sim 75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 变化, 明显比俄克拉何马州大冰雹对应的 VIL 值和广西同期冰雹云的 VIL 阈值大, 超过广东同期大冰雹的 VIL 阈值, 且这样的大值持续时间长达 1.5~4 h 左右 (图 12), 表明降大冰雹的可能性很大。

Amburn and Wolf (1997) 定义 VIL 与风暴顶高度之比为 VIL 密度, 并且研究表明 90% 雹暴的 VIL 密度 $\geq 3.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 而几乎所有 VIL 密度 $\geq 4.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的风暴都会产生直径 $\geq 2 \text{ cm}$ 的冰雹, 根据胡胜等 (2015) 的研究得出广东大冰雹风暴单体的 VIL 密度为 $3 \sim 5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均值为 $4.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在本例中, 降大雹时 VIL 密度在 $4.5 \sim 7.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 12), 远大于俄克拉何马州和广东的阈值, 观测到的最大冰雹直径达 5.2 cm。图 12 中显示风暴成

熟期 VIL 值有 3~4 次明显跃增现象, VIL 密度变化趋势几乎与之同步。风暴 A 发展初期的 20:45, VIL 值只有 $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 约 4 个体扫后迅速增大到 $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 1 个体扫后继续增大到 $70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 反映了云体内冰雹粒子在生长区正迅速碰并长大, 之后一直稳定维持在 $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上的大值, 21:38—21:43 又一次明显跃增, 从 $55 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 增大到最大值 $75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, VIL 密度也达到最大值 $7.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 这时雹云内的冰粒已经充分长大, 22:18 VIL 值突然下降到 $52 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 表明云内水汽含量急剧下降, 而地面融安站 22 时左右出现冰雹天气。由此可见, 降雹前 20 min 左右, VIL 值有明显跃增现象, 一个体扫内跃增量达 $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 这为冰雹的预警提供了有价值的信息。而 VIL 值出现多次跃增是由于雹块降落后上升气流又占据主导地位, 使得生长区较小的冰雹得到进一步增长, 使 VIL 值有所增大, 这也是雹云可以长时间维持的重要原因。

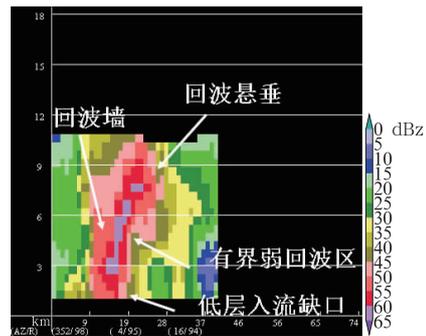


图 11 2016 年 4 月 9 日 22:42 柳州雷达沿低层入流方向并穿过风暴核心的反射率因子垂直剖面

Fig. 11 Vertical cross-section of reflectivity along low-level inflow direction of storm and through the storm reflectivity core from Liuzhou Radar Station at 22:42 BT 9 April 2016

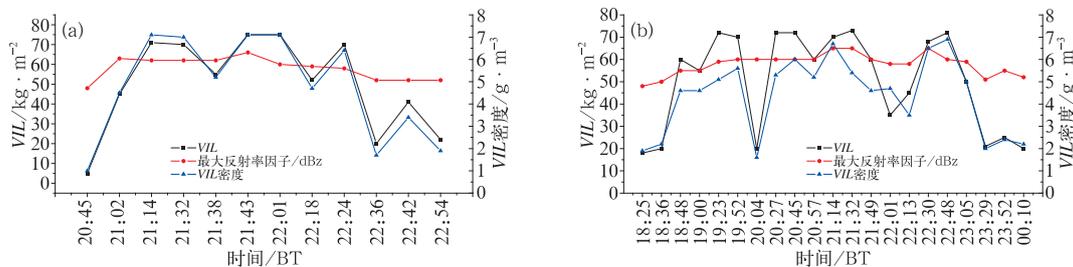


图 12 2016 年 4 月 9 日风暴 A(a) 和风暴 B(b) 的 VIL 值及 VIL 密度随时间的变化

Fig. 12 Temporal evolution of VIL value and VIL density of storm A (a) and B (b) on 9 April 2016

2.4 冰雹的预警指标

根据观测统计(表 2),柳州地区 3—5 月出现大冰雹的强风暴反射率因子中心值超过 60 dBz,出现中等强度以上中气旋,VIL 值和 VIL 密度分别达到 $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $5.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,50 dBz 以上强回波区伸展到 -30°C 层高度以上。而此次超级单体中气旋强且维持时间长达 1~2.5 h,反射率因子长时间维持在 60 dBz 以上,最大 VIL 值和 VIL 密度分别达到

$75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $7.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,并且长时间维持在 $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $5.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上,各项指标均为多年来少有。因此,可用强风暴单体反射率因子中心值达 60 dBz,出现中等强度以上中气旋,VIL 值和 VIL 密度分别达到 $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $5.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,50 dBz 以上强回波区伸展到 -30°C 层高度以上,作为大冰雹的预警指标,可用 VIL 值明显跃增提前 20 min 预警冰雹。

表 2 2009—2016 年柳州大冰雹雷达参数特征

Table 2 Characteristics of severe hail parameters of radar in Liuzhou from 2009 to 2016

日期	冰雹直径 /mm	距离雷达 /km	最大反射率 因子/dBz	VIL / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	VIL 密度 / $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	旋转速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	-30°C 层 高度/km	强回波伸展 高度/km
20160417	鸡蛋大小	180	67	78	5.0	24(强)	9.2	13
20160412	鸡蛋大小	50	69	61	7.1	18(中等)	9.2	9.5
20160409	52	95	66	75	7.1	24(强)	8.9	11
20160403	20	50	64	75	6.5	22(强)	8.2	10
20150419	95	135	67	105	6.9	27(强)	9.3	15
20130323	鸡蛋大小	50	73	67	7.1	21(中等)	8.2	12
20120412	20	80	64	76	5.4	24(强)	9.1	12
20090412	20	35	72	63	6.1	20(强)	8.6	10

3 结 论

(1) 此次发生在柳州地区的强冰雹天气,其有利的环境背景是地面热低压的强加热效应,加强了地面辐合以及不稳定能量的积累,上下层热力平流的差异使原来上干下湿的不稳定层结更加不稳定。地面干线和中尺度辐合线的加强触发了对流,高空急流的强辐散作用有利于低层的辐合上升运动,较强的深层垂直风切变使对流云团发展成超级单体风暴。

(2) 有利的地形、地面中尺度辐合线的动力抬升作用以及单体的合并是超级单体风暴发展和维持的重要原因。

(3) 此次超级单体反射率因子长时间维持在 60 dBz 以上,最大 VIL 值和 VIL 密度分别达到 $75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $7.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,并且长时间维持在 $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $5.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上,中气旋强且维持时间长达 1~2.5 h,最大旋转速度约 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且高层辐散远大于低层辐合,有利于中气旋和风暴的维持。

(4) 可用强风暴单体反射率因子中心值达 60 dBz,出现中等强度以上中气旋,VIL 值和 VIL

密度分别达到 $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $5.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,50 dBz 以上强回波区伸展到 -30°C 层高度以上,作为大冰雹的预警指标,可用 VIL 值明显跃增提前 20 min 预警冰雹。

参考文献

- 陈贵川,谌芸,乔林,等,2011.重庆“5·6”强风暴天气过程成因分析[J].气象,37(7):871-879.
- 陈秋萍,陈齐川,冯晋勤,等,2015.“2012.4.11”两个强降雹超级单体特征分析[J].气象,41(1):25-33.
- 樊李苗,俞小鼎,2013.中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J].高原气象,32(1):156-165.
- 胡胜,罗聪,张羽,等,2015.广东大冰雹风暴单体的多普勒天气雷达特征[J].应用气象学报,26(1):57-65.
- 黄晓龙,高丽,2016.2014年3.19台州冰雹过程中尺度分析[J].气象,42(6):696-708.
- 李耀东,刘健文,高守亭,2004.动力和能量参数在强对流天气预报中的应用研究[J].气象学报,62(4):401-409.
- 刘蕾,张凌云,李家文,2015.中尺度地形对柳州一次大暴雨过程影响的数值实验[J].暴雨灾害,34(1):74-79.
- 刘黎平,徐宝祥,王致君,等,1992.用C波段双线偏振雷达研究冰雹云[J].大气科学,16(3):370-376.
- 农孟松,祁丽燕,黄海洪,等,2011.桂西北一次超级单体风暴过程的分析[J].气象,37(12):1519-1525.
- 潘晓滨,陈家华,魏绍远,1996.垂直风切变对风暴云影响的数值模拟[J].气象科学,16(2):135-143.

- 沈杭锋,张红蕾,高天赤,等,2016. 浙江盛夏一次强对流天气的特征及其成因分析[J]. 气象,42(9):1105-1113.
- 陶岚,戴建华,孙敏,等,2016. 一次雷暴单体相互作用与中气旋的演变过程分析[J]. 气象,42(1):14-25.
- 夏文梅,王晓君,孙康远,等,2016. V型缺口在C波段多普勒雷达中的应用研究[J]. 气象,42(1):67-73.
- 徐芬,郑媛媛,肖卉,等,2016. 江苏沿江地区一次强冰雹天气的中尺度特征分析[J]. 气象,42(5):567-577.
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等,2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社:92-97.
- 曾明剑,吴海英,王晓峰,等,2016. 梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷对流风暴结构特征分析[J]. 气象,42(3):280-293.
- 张小玲,杨波,朱文剑,等,2016. 2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷天气分析[J]. 气象,42(11):1304-1314.
- 张正国,汤达章,邹光源,等,2012. VIL产品在广西冰雹云识别和人工防雹中的应用[J]. 热带地理,32(1):50-53.
- 周泓,段玮,赵爽,等,2014. 滇中地区冰雹的多普勒天气雷达及闪电活动特征分析[J]. 气象,40(9):1132-1144.
- 周小刚,费海燕,王秀明,等,2015. 多普勒雷达探测冰雹的算法发展与业务应用讨论[J]. 气象,41(11):1390-1397.
- 朱江山,刘娟,边智,等,2015. 一次龙卷生成中风暴单体合并和涡旋特征的雷达观测研究[J]. 气象,41(2):182-191.
- 朱君鉴,郑国光,王令,2004. 冰雹风暴中的流场结构及大冰雹生成区[J]. 南京气象学院学报,27(6):735-742.
- 竹利,王厚伯,2008. 川东北一次西北气流型强冰雹天气的[J]. 暴雨灾害,27(3):242-247.
- Amburn S A, Wolf P L, 1997. VIL density as a hail indicator[J]. Wea Forecasting,12(3):473-478.