

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. 气象, 41(1):25-33.

“2012. 4. 11”两个强降雹超级单体特征分析^{* 1}

陈秋萍¹ 陈齐川¹ 冯晋勤² 黄铃光¹

1 福建省气象台,福州 350001
2 福建省龙岩市气象局,龙岩 364000

提 要: 利用常规气象资料、自动站资料、新一代天气雷达和风廓线雷达等资料,对一次强对流天气过程中两个强风暴单体的形势背景、强对流发生条件、强风暴单体演变及结构特征、风暴异同点进行了详细分析。结果表明:(1) 本次强对流过程是发生在强的垂直风切变条件下;高层冷平流降温减湿、低层暖平流增温增湿的对流不稳定层结,高 CAPE 值为强对流发生发展提供了必要的能量条件;上干下湿的水汽分布有利于冰雹、雷暴大风产生;适宜的 0℃、-20℃ 层高度使此次过程地面以降雹为主;地面倒槽低压、辐合线及低层锋区的南压是这次强对流天气的触发因子。(2) 两个强降雹单体雷达回波共同特征是降大雹前均出现了三体散射长钉回波,弱回波区,回波强度高,VIL 密度均大于 4 kg·m⁻³,成熟阶段均右偏高空风约 30°。(3) 长生命史超级单体风暴Ⅱ的中气旋维持 2 个多小时,它保证了一支强上升气流支撑空中大冰雹的增长,维持了雷暴的持续发展,使其生命史长达近 6 h,同时也存在前侧、后侧入流缺口,反映了上升气流与下沉气流共存的风暴动力特征,其高层辐散更强,移动路径东略偏南且移向稳定,平均右偏高空风约 28°,移速均匀为 14 m·s⁻¹;超级单体风暴Ⅰ的中气旋维持时间仅十几分钟,且处于弱中气旋的下限,其高层辐散和上升气流更弱,风暴生命史更短,移动路径东略偏北,除成熟阶段外右偏高空风 10°~20°。这些差异与产生风暴的环境条件如垂直风切变、垂直涡度等存在差异有密切关系。

关键词: 超级单体, 中气旋, 三体散射, 垂直风切变, 相对风暴螺旋度

中图分类号: P445 **文献标志码:** A **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2015. 01. 003

Analysis of Two Severe Hail Supercell Storms on 11 April 2012

CHEN Qiuping¹ CHEN Qichuan¹ FENG Jinqin² HUANG Lingguang¹

1 Fujian Meteorological Observatory, Fuzhou 350001
2 Longyan Meteorological Office of Fujian, Longyan 364000

Abstract: Using conventional and intense automatic observation, CINRAD/SA and wind profiler radar data, the environmental conditions, structures and evolution of two supercell storms are analyzed. The results are as follows: (1) Favorable conditions for the severe convective weather process are large vertical wind shear, high-level cold and low-level warm, high-level dry and low-level moist, right height of 0℃ and -20℃ layer and large convective available potential energy (CAPE). The trigger of the severe convective weather is low-pressure on surface, convergence line, low-level frontal zone. (2) The common characteristics of the two supercell storms are three-body scatter, weak echo areas, stronger echo intensity, VIL density value over 4 kg·m⁻³, and moving rightward 30° with upper-wind in the mature stage. (3) The meso cyclone of long life supercell storm Ⅱ lasts more than 2 h, strong updraft causes hails to grow, and storm Ⅱ lasts 6 h. At the same time, high-level divergence is longer. Meso cyclone of supercell storm Ⅰ lasts only 18 min, high-level divergence and updraft are weak, and their lives are short. These differences are closely bound up with the environmental conditions such as vertical wind shear and vertical vorticity.

Key words: supercell storm, meso cyclone, three-body scatter, vertical wind shear, relative storm helicity

^{*} 福建省自然科学基金项目(2010J01244 和 2014J01148)共同资助
2013 年 6 月 17 日收稿; 2014 年 3 月 25 日收修定稿
第一作者:陈秋萍,主要从事短时临近预报业务工作. Email:chenqiuping1962@163.com

引言

研究表明超级单体的形成演变方式、雷达回波形态等是多种多样的,有些单体是经典超级单体,有些是由多单体风暴演变而来,有些超级单体生命史长,有些生命史短。但超级单体风暴与其他强风暴的本质区别在于超级单体风暴含有强烈旋转的中气旋(俞小鼎等,2006a;2006b)。在超级单体三维模式中,上升气流从右前方进入风暴,到了高层气旋式旋转进入云砧区,下沉气流在对流层中层从风暴右侧进入,从左后方低层离开。

近年来,国内的广大气象工作者对一些超级单体结构及其产生环境条件进行了分析研究(刁秀广等,2014;伍志方等,2014)。俞小鼎等(2008)对一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴进行了分析;郑媛媛等(2004)对安徽一次典型超级单体风暴结构和演变进行了分析;农孟松等(2011)对桂西北一次超级单体风暴过程进行了分析;陈晓燕等(2011)对黔西南州一次分裂型超级单体环境条件和回波结构进行了分析;雷蕾等(2011)分析表明 0°C 、 -20°C 层高度、垂直风切变能区分冰雹和暴雨天气;刁秀广等(2009)对边界层辐合线在局地强风暴临近预警中的应用进行了分析。

2012年4月11日午后至12日凌晨,福建省中北部出现较大范围冰雹、雷暴大风强对流天气。其中三明市的尤溪县11日14:08出现直径3 cm冰雹;12日01:30左右安溪县北部乡镇出现鸡蛋大小的冰雹,最大达10 cm。雷达观测表明这两个最严重灾害是由两个超级单体强风暴引起。本文利用福建省建阳、龙岩、长乐3部新一代天气雷达和加密天气观测资料,对天气环境背景、强对流发生条件、强风暴单体演变及结构特征、两个强风暴单体异同点进行了详细分析,提出对不同强风暴短时临近预报的思路。

1 天气形势背景

此次强对流过程乌拉尔山附近的高压脊稳定,其东侧有小短波槽东移,引导冷空气南下,槽后有冷平流;副热带高压西北侧的西南暖湿气流活跃,冷暖空气交汇于福建中北部上空。11日08:00福建省低层有暖脊发展,暖平流增温增湿明显,中层冷平流

降温,大气不稳定性加大;低层福建中部有切变线(图1a),200 hPa高空急流轴线穿过闽西北,这种高低空配置为强对流的产生提供了有利的动力抬升条件。

20时850 hPa福建省中部形成暖式切变,中层中北部 $3\sim 6^{\circ}\text{C}$ 降温,低层中南部升温,低层锋区南压,925 hPa在龙岩北部一低涡发展形成,夜里强对流区也随切变南压,在925 hPa切变附近的暖区里触发产生强风暴单体并沿切变线东略南移。

2 强对流发生发展条件分析

2.1 不稳定条件

11日08时福建北部负变温,并向南推进,700 hPa以下低层增温达 $2\sim 6^{\circ}\text{C}$,850与500 hPa的温差大于 25°C ,午后地面增温增湿显著,夜里低层升温区位于中南部,中北部为降温区,不稳定区南移到福建中南部(图1b),850与500 hPa的温差增大为 26°C ,北部不稳定性则减小。

11日08时福建中北部CAPE值较小,14时中部CAPE值迅速增大,08时龙岩站的探空计算,对流有效位能仅 $217\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,对流抑制能量为 $147\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,且自由对流高度较高,约640 hPa(图2a)。重新构建龙岩站14时 $T-\ln p$ 图,CAPE增大为 $1880\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,表明午后趋于更加不稳定。20时龙岩对流有效位能仍超过 $1100\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (探空数据仅到400 hPa高度层,以上数据缺失,估算大于此值),且自由对流高度降低为810 hPa(图2b)。这些均表明午后到夜里强对流天气发生前,福建中北部环境场已具有很强的热力不稳定条件。

2.2 水汽条件

11日08时比湿场上福建中南部近地层很湿,925 hPa有一湿舌从广东至福建中南部为 $12\sim 13\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的高湿区,850 hPa比湿 $q>11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;20时 $12\sim 13\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的湿层达850 hPa,中层有明显干区发展。龙岩单站探空显示夜里500~400 hPa中层有明显干侵入,450 hPa中层温度露点差达 35°C (图2),上干下湿的对流不稳定层结非常明显,这种大气水汽垂直分布非常有利冰雹、雷暴大风产生。

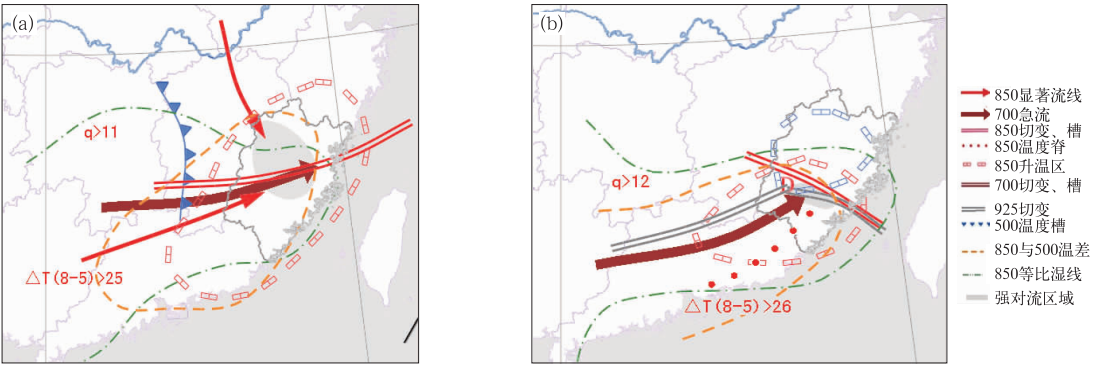


图 1 2012 年 4 月 11 日 08 时(a)、20 时(b)综合分析图
Fig. 1 Comprehensive chart at 08:00 BT (a) and 20:00 BT (b) 11 April 2012

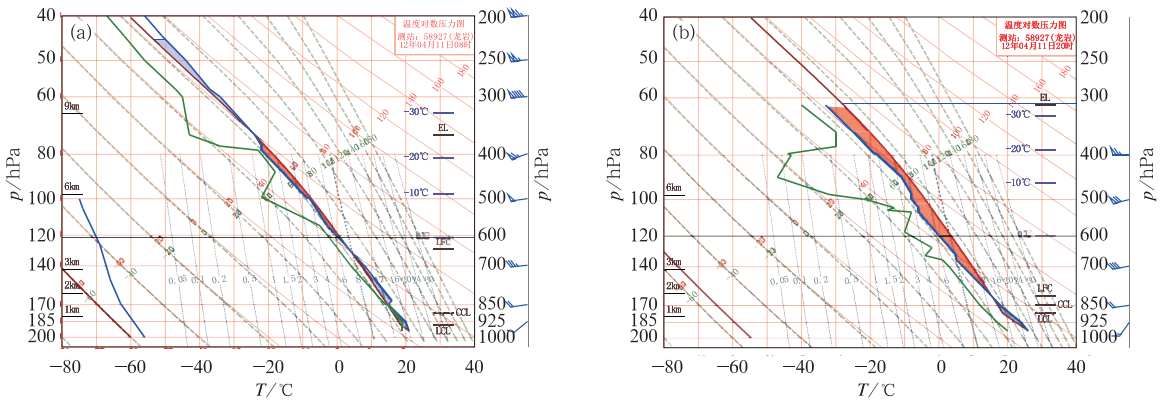


图 2 2012 年 4 月 11 日 08 时(a)、20 时(b)龙岩站 $T\text{-}\ln p$ 图
Fig. 2 $T\text{-}\ln p$ diagram at 08:00 BT (a) and 20:00 BT (b) at Longyan on 11 April 2012

2.3 垂直风切变

垂直风切变大小极大地影响对流风暴的组织 and 演变,本次过程有强的中层环境风垂直切变。11 日 08:00 高空急流轴位于福建中北部上空,850 hPa 风速为 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,地面至中层的垂直风切变较 10 日明显增大;20 时西南部垂直风切变更大。图 2 中 08 时龙岩站探空资料显示 500 hPa 高空风 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,垂直风切变增大为 $3.6\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 。20 时 500 hPa 风速增大到 $28\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,使垂直风切变增大为 $4.7\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$,达到强切变条件,有利于孤立的超级单体风暴的发展维持。

3 地面中尺度分析

受午后日射加热和西南暖平流减压影响,11 日午后在福建中南部气压明显下降,广东至福建中南部是大片 $-4\sim -3\text{ hPa}$ 的 3 h 变压区,14 时出现低

压倒槽区,倒槽内有一偏北风与偏南风辐合线随弱锋面南压(图 3a),午后的强对流发生在辐合线两侧。20 时(图 3b)在龙岩及泉州北部发展形成 1007 hPa 尺度约 $180\text{ km}\times 100\text{ km}$ 的中低压,925 hPa 相应位置上有一低涡发展(图 1b)。夜里对流单体正是在此辐合线上中低压西北侧发展加强形成超级单体风暴并沿辐合线东移。可见地面低压倒槽、辐合线及锋面南压所形成的强烈辐合、抬升是强风暴发生的动力触发机制。

4 雷达回波分析

4.1 强风暴单体演变及结构特征

11 日午后至 12 日凌晨中北部的强天气均是由一些块状强风暴单体产生,过程中出现了 2 个超级单体(下称超级单体 I、II),它们在生命史中均产生了大冰雹、雷暴大风。雷达系统 SCIT 算法识别的 2

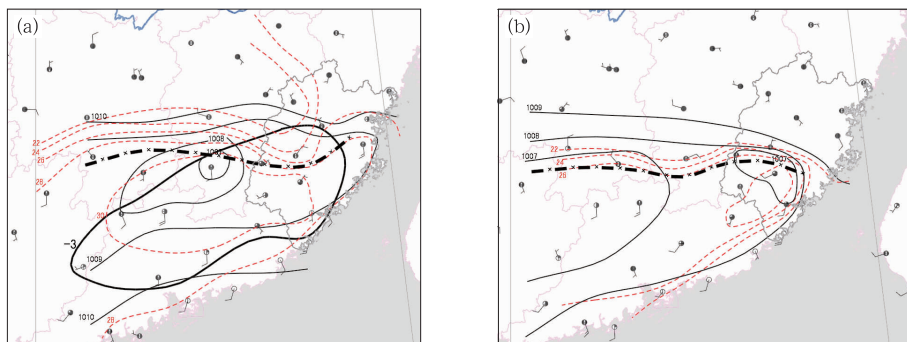


图 3 2012 年 4 月 11 日 14 时(a)、20 时(b)地面中尺度分析

(图中细实线是等压线,虚线是等温线,粗实线是 3 h 变压 < -3 hPa 区,点划线是辐合线)

Fig. 3 Surface mesoscale analysis at 14:00 BT (a) and 20:00 BT (b) 11 April 2012

(Thin solid line is contour of pressure, dash line is contour of temperature, thick line is regions that variation of pressure is below -3 hPa, dot dash line is convergence line)

个强风暴活动路径如图 4, 图中单体 I 从 11 日 11:38—14:53 持续时间为 3 小时 15 分钟, 单体 II 从 11 日 22:05 至 12 日 03:45 持续时间为 5 小时 40 分钟, 两个单体平均移速相差不大, 约为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右。根据收集的实况, 单体 I 所经之处的明溪、尤溪两个县(市)有 3 个乡镇在 12:09—12:15 及 14:02—14:15 期间出现冰雹, 其中在 14:08 尤溪县西城镇 30 mm 的冰雹; 单体 II 所经之处的漳平、安溪、南安三个县(市)北部共有 8 个乡镇在 0:33—02:25 期间出现冰雹, 01:30 左右安溪县北部感德镇、剑斗镇降下鸡蛋大小的冰雹, 大的达 10 cm。两个风暴的演变及结构、强度、速度场、地面天气等特征有异、同之处, 本文对此进行详细分析。

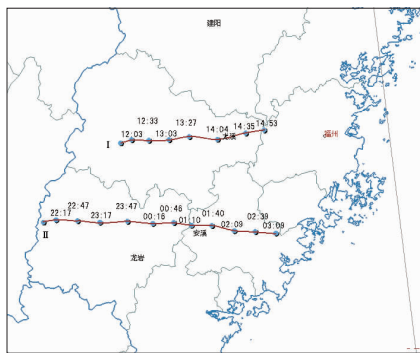


图 4 风暴单体 I、II 移动路径图

Fig. 4 Moving path chart of supercell storms

(1) 超级单体 I 演变及结构特征

11 日 12 时左右建阳雷达探测到在西南部对流单体发展, 13:27 进入沙县南部大洛镇时强度为 67 dBz, 垂直累积液态水 (VIL) 由 10 分钟前的

$34 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 跃增到 $54 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 表明强回波区高度增厚、增高, VIL 密度约 $4.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 此时开始出现三体散射长钉回波, 长度仅 6 km。14:04 在仰角 $0.5^\circ \sim 2.4^\circ$ 约 2.5~7.2 km 高度上 (0°C 、 -20°C 层高度为 4.1 km、7.3 km) 均出现三体散射长钉回波, 1.5° 约 4.9 km 高度上, 三体散射长钉回波长度最长、宽度最宽, 达 20 km (图 5), 各个层次产生三体散射长钉回波的强核心强度都超过 65 dBz, 最大达 74 dBz, 3.4° 约 9 km 高度上已无三体散射长钉回波且最强回波强度降为 50 dBz 以下。从图 5b 可看到 13:58 即大雹降落前 10 分钟雷暴发展旺盛, 60 dBz 以上强区发展到 8.5 km 高度, 弱回波区上方存在明显的悬垂强回波区, 该强回波区处于 4~8 km 高度, 即 $0 \sim -20^\circ\text{C}$ 温度层, 最强回波处于 6~7 km, 表明该层为大冰雹增长区。降雹前悬垂强回波不断降低, 最强回波降低到 4 km, 表明上升气流开始减弱, 大冰雹区下降。此现象从建阳雷达风暴追踪信息产品的强风暴单体降雹前后雷达参数变化信息上可以反映出来, 由表 1 中可见在降雹前 13:58 风暴顶高 TOP 为 10.8 km, 最强回波高度 HT 为 6.6 km, 一个体扫后最强回波高度下降为 4.4 km, 但此时风暴顶高未降低, 所以垂直累积液态水 VIL 反而稍有增大, 至 14:10 风暴顶坍塌高度降低为 8.8 km, VIL 陡降为 $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 此间最强回波强度 dBzm 无变化。该单体于 14:02 时在尤溪西侧的管前镇降下小冰雹, 14:08 在尤溪西城镇降下直径 3 cm 大冰雹并伴 8 级大风。

建阳雷达与尤溪距离 125 km, 在降雹期间 3 个体扫探测到中气旋。13:52 即降雹前 17 分钟从相

对径向速度图看最大转动速度在 $0.5^{\circ}\sim 1.5^{\circ}$ 仰角约 $2.5\sim 4.8$ km 高度,转动速度 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 2.4° 仰角 7 km 高度转动速度减小为 $11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,此后 2 个体扫 $2.5\sim 4.8$ km 高度转动速度减小为 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,在高层 4.3° 约 11 km 为辐散,正负速度差值 $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,根据中气旋识别标准,属于弱中气旋等级靠近下限。

(2) 超级单体 II 演变及结构特征

11 日 22:17 龙岩西北部的长汀对流单体发展东移,吸收合并了其北部单体,合并后强度迅速加强,12 日 00:10 后增强到 70 dBz 以上,强中心高度上升,VIL 也由 $33\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 跃增到 $58\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,VIL 密度达 $4.3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,风暴前侧低层有弱回波

区,弱回波区上方存在 70 dBz 以上的悬垂强回波区。00:16 后风暴单体进入漳平境内后,超级单体旋转特征出现,00:28 风暴单体产生波动,东北段向后凹进,西南段向前突出,中气旋位于东北端入流缺口的“钩”状回波处。00:40 该特征非常明显,几乎呈斜 S 型(图 6),反映出前侧暖湿入流气流、后侧干冷下沉气流的发展加强,但前侧缺口比后侧缺口明显,表明前侧入流气流强于后侧入流气流,这有利于风暴上升运动的加强维持。在 0.5° 仰角(约 2 km)图上,超级单体东北段入流缺口处气旋性旋转的转动速度约 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;仰角 $1.5^{\circ}\sim 6^{\circ}$ (约 $2.8\sim 6$ km)气旋性旋转的转动速度约 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 5);至 14.6° (约 13 km)已转为辐散流场,正负径向速度差

表 1 强风暴单体 I、II 雷达参数变化特征
Table 1 Radar parameter features of supercell storms

	风暴单体 I			风暴单体 II 阶段 A		风暴单体 II 阶段 B		
	13:58	14:04	14:10	00:34	00:40	01:27	01:33	01:39
VIL/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	52	55	40	57	50	52	47	45
dBzm/dBz	72	73	72	74	74	69	70	65
HT/km	6.6	4.4	4.4	4.8	2.9	6.8	3.6	3.5
TOP/km	10.8	10.9	8.8	11.6	8.0	12.5	9.4	9.2

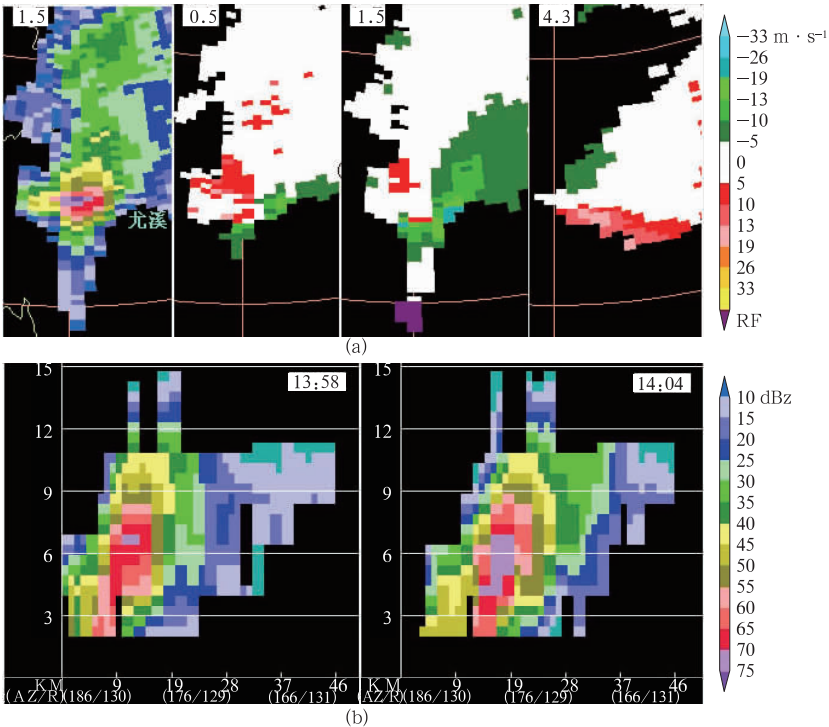


图 5 2012 年 4 月 11 日建阳雷达探测的风暴单体 I 雷达回波图

(a)14:04 反射率因子和相对径向速度图,(b)沿左上图强中心切向的垂直剖面图

Fig. 5 Radar echo chart of supercell storm I in Jianyang on 11 April 2012

(a) reflectivity and relative radial velocity at 14:04 BT, (b) the vertical cross-section along tangent of the strong center

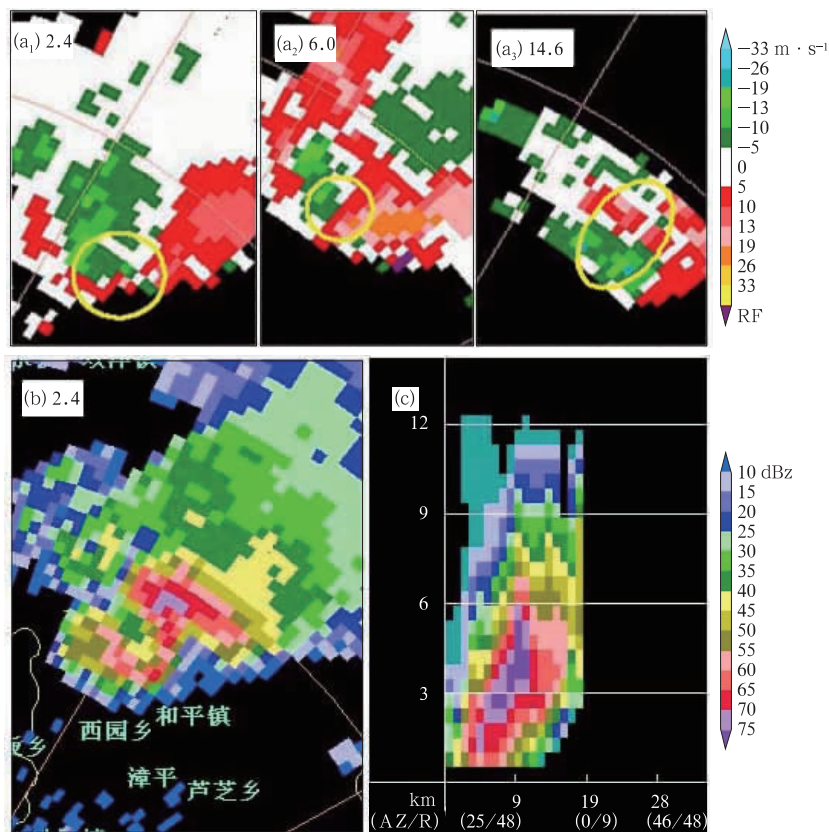


图 6 2012 年 4 月 12 日 00:40 龙岩雷达探测的风暴单体 II 雷达回波图

(a)相对径向速度图,(b)反射率因子,(c)沿切向穿过强中心的垂直剖面图

Fig. 6 Radar echo chart of supercell storm II in Longyan at 00:40 BT 12 April 2012

(a) relative radial velocity, (b) reflectivity, (c) the vertical cross-section along tangent of the strong center

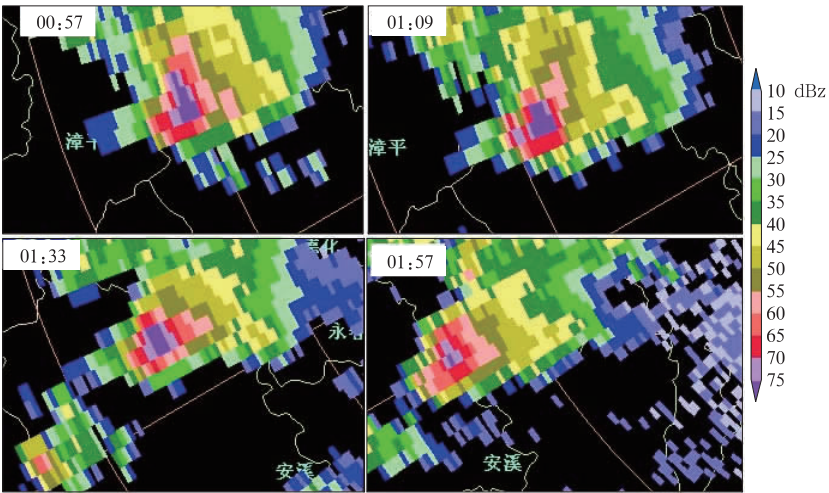


图 7 2012 年 4 月 12 日长乐雷达探测的风暴单体 II 仰角为 0.5°基本反射率图

Fig. 7 Reflectivity of supercell storm II at elevation 0.5° in Changle on 12 April 2012

值达 $39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6 椭圆内), 相应地面上漳平一些乡镇出现直径 1 cm 以下冰雹及强降水, 但此时未见 2 cm 以上大冰雹, 表明此时冰雹在强上升气流支

撑下处于继续增长阶段。与风暴单体 I 一样也观测到降雹前特别是降大雹前风暴顶高和最强回波高度明显下降, 垂直积分液态含水量 VIL 减小的现象

(表 1), 从 12 日 01:33 前后的 0.5° 、 1.5° 基本反射率图上三体散射回波的长短、宽度的变化也可判断强核的下降。

龙岩雷达监测该超级单体在 00:22—02:39 均有中气旋报警, 但整个生命史中未探测到大雹的三体散射长钉回波特征。而长乐雷达在 00:51 风暴进入其探测范围不久即安溪境内时, 就已探测到大冰雹的三体散射长钉回波特征, 持续到 01:57 离开安溪县(图 7), 该超级单体在三体散射长钉回波特征出现后约半小时即 01:30 左右在安溪北部感德镇、剑斗镇降下鸡蛋大小的冰雹, 大的达 10 cm, 此时长钉回波长度 20 km。雹云离开安溪县后, 虽然三体散射长钉回波特征消失, 但 65~70 dBz 的回波强度还维持了半小时, 而龙岩雷达也继续检测到中气旋特征半小时才消失, 其移入南安县西北部仍产生小冰雹、强降水。由于风暴距离长乐雷达较远, 所以在整个风暴过程中长乐雷达未探测到中气旋及低层的钩状等特征, 而龙岩雷达与该风暴距离近, 检测到中气旋, 但未探测到三体散射长钉回波特征, 由此更加表明了三体散射长钉回波特征是大雹的充分而非必要条件以及雷达探测识别中气旋受距离因素影响。

4.2 强暴雹单体的异同点

11 日午后尤溪与 12 日凌晨安溪强降雹单体共同点是降大雹前均出现了三体散射长钉回波, 弱回波区, 回波强度高, VIL 密度均大于 $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 降雹前风暴顶高和最强回波高度明显下降及 VIL 减小, 地面以降雹为主并伴雷暴大风等特征; 不同点主要表现在下面几个方面, 造成差异的原因在第五节讨论。

(1) 中气旋

龙岩雷达在 12 日 00:22—02:39 均检测到超级单体 II 有中气旋, 该风暴当时距雷达约 50 km 左右, 中低层旋转速度达到 $13 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 符合弱中气旋的强度标准, 它保证了一支强盛的上升气流支撑空中大冰雹的增长, 对维持雷暴的发展起了重要作用, 其入流区位于风暴的右前侧; 超级单体 I 的中气旋仅维持 3 个体扫, 且处于弱中气旋的下限, 其上升气流相对弱, 地面降雹点少、降雹持续时间短。

(2) 风暴顶辐散

大冰雹的形成, 必须有强的上升气流, 上升气流越强, 冰雹在上升气流中增长的时间就越长。风暴顶辐散是与风暴中强上升气流密切相关的小尺度特

征, 它可作为判断大冰雹的另一个指标, 辐散越强, 对应地面冰雹越大。本例超级单体 I 在 11 km 高度正负径向速度差值为 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。超级单体 II 在 13 km 高度正负径向速度差值达 $39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 显然超级单体 II 高层辐散强于风暴单体 I, 表明前者上升气流比后者强, 相应地面出现冰雹尺寸也更大。

(3) 移动路径

统计表明风暴单体越强右偏高空风越多, 风暴单体通过右移, 使环境垂直风切变产生的水平涡度在沿着低层入流方向的水平涡度分量增大, 并随着低层入流转变为上升气流过程中转变为垂直涡度, 使主上升气流的旋转得到加强维持。由图 4 可见超级单体 I 初生阶段, 移向东北方向 (250°), 基本与 500 hPa 风向一致, 发展阶段移动路径右偏中层风 20° , 此间移速仅中层风一半, 在强降雹前后 (13:52—14:22) 移向为 280° , 右偏中层风 30° , 强降雹后即减弱阶段移向东北方向, 仅右偏高空风约 15° , 成熟至减弱其移速加快到中层风的 75% (约 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); 超级单体 II 移动路径稳定的东略偏南, 平均右偏高空风约 28° , 发展成熟阶段右偏约 30° , 移速平均为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。本例两个超级单体的右偏高空风状况体现了风暴单体强度不同或处于不同发展阶段与高空引导风偏离程度不同的特点, 这也可以为强风暴临近预报预警提供思路。

(4) 生命史

11 日午后尤溪强降雹单体(超级单体风暴 I)起源于三明西部, 其生命史约 3.5 h, 横跨 150 km; 11 日夜里至 12 日凌晨安溪强降雹单体 II 起源于龙岩西北部长汀, 该单体横跨 280 km, 生命史将近 6 h, 达到超级单体标准时间长达 2 个多小时, 是一个长生命史的稳定的超级单体。

5 风暴环境条件差异

5.1 垂直风切变

对于超级单体风暴中中气旋的产生, 目前比较一致的观点是: 环境垂直风切变产生水平涡度, 沿着对流单体低层入流方向的水平涡度分量在随着低层入流转变为上升气流过程中被逐步扭曲为垂直涡度, 随后垂直涡度在上升运动的垂直拉伸下进一步加强为中气旋。

11 日 20 时龙岩 500 hPa 西南风增大, 由 08 时

的 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大为 $28\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。中层垂直风切变对风暴发展维持有重要的作用,强大的中层风使风暴移速很快,进而加大低层入流,使风暴增强暖湿气流输送,且使相对风暴气流与下沉气流产生的外流保持平衡,不致阻断入流气流,从而有利风暴单体维持,超级单体风暴Ⅱ正是在此风垂直切变增强区也即水平涡度增强区得到发展加强并长时间维持,其生命史比超级单体Ⅰ长、中气旋及三体散射长钉回波维持时间更长且稳定、冰雹尺寸也更大。

5.2 相对风暴螺旋度

相对风暴螺旋度定义为:

$$H_{SR} = \int_z (V - C) \cdot \Omega_{xy} dz$$

(1)

式中, $(V - C)$ 是相对于风暴的速度, Ω_{xy} 是环境水平涡度。相对风暴螺旋度不仅表征了环境场的旋转程度,而且还表示输入到对流系统中的环境涡度的多少。在具有旋转性的大气里,对流系统相对速度 $(V - C)$ 把环境水平涡度输送到对流系统中,上升气流又将进入对流系统的水平涡度变为垂直涡度,而垂直涡度对于对流系统的产生具有至关重要的作用。

Lilly(1986a;1986b)研究指出,强对流风暴具有高螺旋度特征,它的螺旋度从环境场中获得并在浮力效应下增强,同时,高螺旋度阻碍了扰动能量耗散,对超级单体风暴的维持有重要作用,稳定的强对流风暴常发生在螺旋度值大的地方。

用 NCEP 分析场资料计算 $0\sim3\text{ km}$ 相对风暴螺旋度 H_{SR} (图 8),由分布图可以看出 14 时风暴单体Ⅰ处于 $80\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ 左右的低值区,20 时风暴单体Ⅱ处于 $200\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ 以上的高值区(12 日 02 时缺 NCEP 资料),该值已超过国外研究得出的产生龙卷的临界值 $150\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ 。同时根据式(1)利用与尤溪、安溪降大雹点分别相距约 60 km 、 50 km 的永安风廓线雷达测得的高时空精度的风场数据分别计算 11 日 14 时、12 日 01 时的相对风暴螺旋度(刘健文等,2005),风暴移动方向和速度根据雷达观测该风暴单体获得,由此得出 11 日 14 时 $0\sim3\text{ km}$ 高度层 H_{SR} 为 $138\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$,12 日 01 时为 $261\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$,可见夜里风暴单体Ⅱ所处环境的相对风暴螺旋度几乎是风暴单体Ⅰ的两倍,这种大的 H_{SR} 使风暴单体Ⅱ能从环境气流中获取更多能量,并有利于它长时间维持,形成有利超级单体风暴产生的环境。

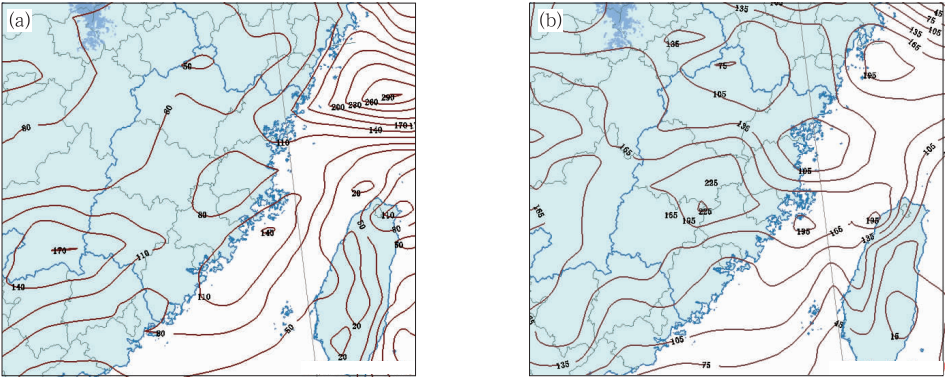


图 8 2012 年 4 月 11 日 14 时(a)、20 时(b)相对风暴螺旋度

Fig. 8 Storm relative helicity at 14:00 BT (a) and 20:00 BT (b) 11 April 2012

5.3 垂直涡度

Kung 等(1975)研究了次天气尺度风暴区的动能收支,结果表明次天气尺度风暴区消耗的动能大部分是本区产生的,并且发现在有锋面对流活跃的个例中,在 900 hPa 以下的近地层中有大量的能量通过风穿过等高线流向低值区,产生涡动动能。而它们的发展在摩擦作用下会形成强辐合,这种低层强辐合对风暴的发生、发展和维持都是很有利的。

11 日 08 时 925 hPa 福建中部为一西北风与西南风切变,14 时在尤溪附近涡度仅 $0.5\times10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 左右。20 时在龙岩北部的切变线上中尺度低压发展,从 20 时地面中分析图上(图 2)也可看到在龙岩北部东北部有低涡辐合,在龙岩东北部的漳平附近涡度 $3.0\times10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 左右(图略),因此,夜里该地区近地层涡旋辐合条件更好,是垂直涡度增强区,超级单体风暴Ⅱ正是进入此有利对流产生的环境正涡度区域得到发展加强并长时间维持。

6 结 论

(1) 本次强对流过程是发生在高层冷平流降温、低层暖平流增温的强的温度垂直梯度下,高CAPE值为强对流发生发展提供了必要的能量条件;上干下湿的水汽垂直分布,具备强的对流不稳定层结,有利于冰雹、雷暴大风产生;适宜的 0°C 、 -20°C 层高度使此次过程地面以降雹为主;地面中尺度低压、辐合线及低层锋区的南压是这次强对流天气的触发因子。

(2) 高空、中空急流的配置形成了强的中层垂直风切变和深层垂直风切变,特别是夜里中空急流的增强使得风暴单体Ⅱ移速很快,对加大相对风暴入流和相对风暴螺旋度等有重要作用,有利孤立的超级单体风暴的发生、发展和维持。

(3) 两个强降雹单体雷达回波共同特征是降大雹前均出现了三体散射长钉回波,弱回波区 WER,回波强度高,VIL 密度均大于 $4\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。单体成熟阶段均右偏高空风 30° 。

(4) 两个强风暴虽然都是超级单体,但中气旋强度及维持时间、风暴生命史,上升气流强度、风暴移动路径、出现灾害严重程度均有明显差异。风暴单体Ⅱ的中气旋处于弱中气旋的上限,中气旋维持时间长达 2 小时 17 分钟,使风暴得到稳定、持续的发展,风暴生命史长达近 6 h,并始终维持孤立状态,同时也存在前侧、后侧入流缺口,反映了上升气流与下沉气流共存的风暴动力特征,其高层辐散更强,移动路径东略偏南且移向稳定,平均右偏高空风约 28° ;超级单体风暴Ⅰ的中气旋仅维持 3 个体扫,且处于弱中气旋等级的下限,风暴生命史 3 个多小时,除发展阶段与其他单体合并外基本维持孤立状态,其高层辐散更弱,上升气流相对弱,生命史相对短,移动路径东略偏北,成熟阶段右偏高空风 30° ,发展及减弱阶段右偏高空风 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 。这些差异与产生风暴的环境条件如垂直风切变、垂直涡度等存

在差异有密切关系。

(5) 另外,超级单体风暴常常是强对流过程中重大灾害的主要制造者,短时临近预报业务上应加强对不稳定条件、垂直风切变、地面中尺度环境的分析,注意诊断其中是否存在有利于超级单体出现的环境条件,然后基于多普勒雷达回波资料进行判别和外推,可以有效提高对该类强风暴的临近预报预警成功率。

参考文献

- 陈晓燕,付琼,岑启林,等. 2011. 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. 气象,37(4):423-431.
- 刁秀广,车军辉,李静,等. 2009. 边界层辐合线在局地强风暴临近预警中的应用. 气象,35(2):29-33.
- 刁秀广,万明波,高留喜,等. 2014. 非超级单体龙卷风暴多普勒天气雷达产品特征及预警. 气象,40(6):668-677.
- 雷蕾,孙继松,魏东,等. 2011. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别. 气象,37(2):136-141.
- 刘健文,郭虎,李耀东,等. 2005. 天气分析物理量计算基础. 北京:气象出版社,127-132.
- 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. 气象,37(12):1519-1525.
- 伍志方,庞古乾,贺汉青,等. 2014. 2012 年 4 月广东左移和飑线内超级单体的环境条件和结构对比分析. 气象,40(6):655-667.
- 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. 北京:气象出版社,90-155.
- 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等. 2006b. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析. 高原气象,25(5):914-924.
- 俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等. 2008. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究. 大气科学,32(3):508-522.
- 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 2004. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测资料分析. 气象学报,62(3):317-328.
- Lilly D K. 1986a. The tructure,energetics and propotation of rotating convective storms. Part I: Energy exchange with the mean folw. J Atmos Sci,43(2):113-125.
- Lilly D K. 1986b. The tructure and propotation of rotation convective storm. Part II: helicity and storm. J Atmos Sci,43(2):126-140.
- Kung E C, Tsui T L. 1975. Subsynoptic-scale kinetic energy balance in the storm area. J Atmos Sci,32(4):729-740.