

罗辉, 苟阿宁, 康岚, 等, 2020. 四川盆地一次中反气旋超级单体的雷达回波特征研究[J]. 气象, 46(10):1362-1374. Luo H, Gou A N, Kang L, et al, 2020. Radar echo characteristics of an meso-anticyclonic supercell of Sichuan in August 2016[J]. Meteor Mon, 46(10):1362-1374(in Chinese).

四川盆地一次中反气旋超级单体的雷达回波特征研究^{*}

罗 辉^{1,2} 苟阿宁^{3,4} 康 岚^{1,2} 郭云云^{1,2} 毛立昕⁵ 银 航^{1,2}

1 四川省气象台, 成都 610072

2 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072

3 武汉中心气象台, 武汉 430074

4 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074

5 甘肃省皋兰县气象局, 兰州 730020

提 要: 利用成都多普勒天气雷达、风廓线雷达以及加密自动站资料, 详细分析了超级单体的形成演变, 以及中反气旋的形成原因, 得到以下结论: 中反气旋超级单体形成于高空冷涡西部的偏北气流下, 中高层伴有强的冷平流, 对流不稳定能量达到 $5029.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 500~850 hPa 温差达到 29°C , 500~925 hPa 风切变矢量差约为 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 探空整体呈现上干冷、下暖湿的喇叭口形状, 低层逆温的存在利于能量的累积; 地面偏西风在龙泉山脉的强迫抬升下触发雷暴, 雷暴中下沉气流产生冷流出, 在北侧不断触发新单体, 雷暴与新生单体合并发展为超级单体。中反气旋超级单体风暴伴随低层强辐合、中反气旋、后侧入流、后侧入流缺口、涡旋偶等回波特征; S1 超级单体风暴内中反气旋的形成由低层和中层两个部分合并形成。对于低层中反气旋, 雷暴单体合并时产生小涡旋, 干冷空气侵入与暖湿上升气流造成斜压涡度, 使辐合产生旋转, 在强辐合作用下雷暴强烈发展, 强的上升运动使垂直涡度拉伸, 旋转增强。中层中反气旋, 3~4 km 高度内水平涡度约为 $1.2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, 利于水平涡管的形成, 在强的上升气流与下沉气流作用下产生涡旋偶, 中高层风随高度逆时针旋转利于反气旋的发展。

关键词: 中反气旋, 超级单体, 后侧入流, 回波特征

中图分类号: P447

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.10.010

Radar Echo Characteristics of an Meso-Anticyclonic Supercell of Sichuan in August 2016

LUO Hui^{1,2} GOU Aning^{3,4} KANG Lan^{1,2} GUO Yunyun^{1,2} MAO Lixin⁵ YIN Hang^{1,2}

1 Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610072

2 Heavy Rain and Drought-Flood Disaster in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

3 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

4 Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074

5 Gaolan County Meteorological Station of Gansu Province, Lanzhou 730020

Abstract: The formation and evolution of the supercell that happened in Chengdu on 7 August 2016 were discussed. Based on Chengdu Doppler Weather Radar, wind-profiling radar, and densely laid-out automatic

^{*} 中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-097, CMAYBY2020-081)、四川省气象局强对流预报创新团队[川气函(2017)313号]、高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室开放研究基金项目(2018-青年-01、青年专项-SCQXKJQN2020022)和湖北省雷电灾害防御科研专项(FL-Z-201401)共同资助

2019 年 11 月 12 日收稿; 2020 年 4 月 4 日收修定稿

第一作者: 罗辉, 主要从事短时临近天气预报工作. E-mail: 623885263@qq.com

通讯作者: 苟阿宁, 主要从事雷电和强对流预报预警技术方法研究. E-mail: aning0770@163.com

station observation, the contributing factors of the meso-anticyclone were studied in this paper. The results are as follows. The meso-anticyclonic supercell was formed under the northerly airflow in the west of the upper cold vortex, with strong cold advection in middle and upper levels. The convective instability energy (CAPE) reached $5\,029.7\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, the temperature difference between 500 hPa and 850 hPa was 29°C , and the wind shear vector difference between 500 hPa and 925 hPa was about $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The sounding as a whole took on the shape of a bell mouth, in which the upper level was dry and cold while the lower level was warm and wet. The existence of lower-level inversion was conducive to energy accumulation. Thunderstorms were triggered by westward winds under the forced uplift of Longquan Mountains, while downward flow produced cold outflow and triggered new cells continuously on the north side. Thunderstorms and new cells merged into supercell. The meso-anticyclonic supercell storm was accompanied by the echo characteristics such as low-level strong convergence, meso-anticyclone, rear inflow, rear inflow gap, vortex couple, etc. The formation of meso-anticyclone in S1 supercell storm was formed via merging the lower and middle levels. For low-level meso-anticyclones, small eddies were generated when thunderstorm and cells merged. The baroclinic vorticity was caused by the intrusion of dry cold air and warm wet updraft, which caused convergence to rotate. Thunderstorm developed strongly under strong convergence, and strong upward motion caused vertical vorticity to stretch, increasing rotation. For mid-level meso-anticyclones, the horizontal vorticity in the height range of 3–4 km was about $1.2\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$, which was beneficial to the formation of horizontal vortex tubes. Vortex couples were generated under the strong updraft and downward airflow. The anticyclones were developed by counterclockwise rotation of mid-level and high-level winds.

Key words: meso-anticyclone, supercell, rear inflow, echo characteristic

引 言

超级单体风暴通常会产生冰雹、大风等强对流天气,造成严重的气象灾害。随着多普勒天气雷达的出现,许多学者对超级单体的有界弱回波区、回波悬垂、入流急流、钩状回波等特征进行了分析(郑媛媛等,2004;俞小鼎等,2006;金巍等,2009;农孟松等,2011;吴芳芳等,2013;蔡森等,2014;覃靖等,2017;郑艳等,2017;胡鹏等,2019),杨波等(2019)对两次超级单体大风过程的回波特征进行了对比分析,吴海英等(2017)对一次超级单体的结构特征和维持机制进行了详细讨论,陈明轩等(2012)对超级单体发展维持的热动力机制进行了模拟分析;赵坤等(2008)对一次超级单体过程的中气旋特征进行分析,刁秀广等(2009)对三次超级单体中气旋的三维特征进行了分析,吴芳芳等(2012)统计了中气旋与各种强对流天气的关系。

对于中气旋的形成,俞小鼎等(2008)分析认为暖湿空气入流的水平涡度在入流逐渐转变为上升气流的过程中被扭曲为垂直涡度,该垂直涡度在上升气流的进一步拉伸作用下形成中层中气旋。陶岚等

(2016)对一次过程中的 3 个中气旋进行研究,认为其产生的机制为:阵风锋导致环境垂直风切变增大,改变了雷暴的发展环境,形成了经典中气旋生成的有利环境;雷暴的合并使得上升运动加强,对流不断发展,增强了雷暴内的旋转程度,从而有利于中气旋的形成;雷暴中弱的出流被相邻雷暴产生的下沉气流抬升,在中低层形成出流和入流间的旋转。国外早期 Lemon and Doswell III (1979)提出,中气旋起源于中层(5~8 km)并向上、下增长,随后 Ziegler et al(2001)观测发现,超级单体发展初期,中、低层分别存在独立的中气旋并伴随上升运动,随后两个气旋逐渐合并成一个强中气旋并伴随下沉运动。Weisman and Klemp (1982)和 Brooks et al(1994)研究认为超级单体风暴内中层中气旋是环境垂直风切变形成的水平涡管,经对流上升运动的倾斜作用而造成。低层中气旋则起源于蒸发冷却下沉气流与暖湿入流边界的斜压涡度。

对于超级单体的分裂,Yu et al(2012)统计了中国 200 多次超级单体风暴过程,只有不足 5% 的超级单体出现分裂。王福侠等(2014)分析得到垂直风切变矢量方向随高度逆时针旋转,使得分裂后左移的反气旋风暴得到加强,发展成为具有深厚中反气

旋的左移超级单体风暴,而右移的气旋性风暴受到抑制。伍志方等(2014)分析发现风切变矢量随高度的变化决定了左移和右移风暴的发展趋势,左移超级单体回波具有中反气旋、弱回波区和旁瓣回波及强回波中心位于其移动方向左侧等特点。陈晓燕等(2011)研究认为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,右移风暴伴随弱中气旋,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。而国外Klemp and Wilhelmson(1978)首次成功模拟了超级单体风暴的分裂过程。国外一些学者对超级单体风暴分裂以及选择性加强的动力学机制进行了研究,发现沿风暴上升气流两侧的垂直气压梯度力是风暴分裂的基础,而环境风垂直切变方向随高度的变化是造成风暴选择性加强的主要原因(Rotunno and Klemp, 1982; Klemp, 1987; Markowski and Richardson, 2010)。

目前国内外学者对于超级单体回波特征、形成机理、动力结构等进行了详细研究,但目前出现的中反气旋超级单体的个例中,大多为超级单体风暴分裂后的左移风暴,而此个例的中反气旋超级单体由多个单体雷暴合并发展形成,比较罕见。此次过程发生在四川盆地西部,地理位置特殊,在高空冷涡背景下,造成冰雹、大风、强降水等强对流天气,对人民财产等产生较大影响,因此有必要对该个例进行分析研究。文章利用成都多普勒天气雷达、风廓线雷达以及加密自动站资料,对个例中超级单体风暴的产生、发展以及中反气旋的演变进行了详细分析,并尝试解释中反气旋的形成原因。

1 天气背景

1.1 灾情与天气形势

受高空冷涡影响,2016 年 8 月 7 日 15—18 时,

成都市出现了雷雨大风天气,期间伴有雷电、冰雹、大风、局地短时强降水等天气,成都主城区、天府新区、双流区和龙泉驿区的局部地方出现冰雹(1~2 cm),金堂($26\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)、青白江、龙泉驿、双流出现了 8~10 级阵性大风。全市共 7 人因树木被大风吹倒而受伤,中心城区及天府新区共倒伏树木 1 867 株,双流 28 辆汽车被倒树压坏,龙泉区 10 余个茶棚被吹倒,200 余米观光架被吹倒,另有部分板房被吹倒。如图 1 所示,当日 08 时,500~200 hPa 成都上空为高空冷涡西部偏北气流控制,500 hPa 冷涡中心位于重庆北部,冷涡北部存在强的冷中心,温江站有强负变温,同时温江站 700 hPa 以上为偏北风,天气晴好,利于太阳辐射地面升温,增加温度垂直递减率,使层结不稳定性的增强,利于雷暴的强烈发展。

1.2 层结不稳定条件

图 2a 为温江站 08 时探空,探空整体呈现上干冷、下暖湿的喇叭口形状,中低层湿度较高,中高层存在干层,低层有明显的抑制能量,925 hPa 伴有弱逆温层,利于能量的累积。K 指数和 SI 指数分别达到 43 和 -5.8°C , 0°C 层和 -20°C 层高度为 4 946、8 375 m,有利于冰雹的产生,500~925 hPa 风切变矢量差约为 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,为中等强度。图 2b 中假相当位温 θ_e 与饱和假相当位温 θ_{es} 在 850~500 hPa 随高度迅速降低,气层处于强的条件不稳定层结。从 6 日 20 时和 7 日 08 时的物理量对比看(表 1),对流不稳定能量在 6 日 20 时达到 $3\,996.5\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,7 日 08 时受地面辐射降温的影响,对流不稳定能量低,采用 14 时地面温度(31°C)和露点温度(24°C)对探空曲线进行订正后,对流不稳定能量达到 $5\,029.7\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,逆温消失,其他指数在 7 日 08 时均相对于 6 日 20 时明显增强,大气变得更不稳定。从风的垂直分布看,700~500 hPa 有明显的风随高度逆转,最大垂直风切变位于该层次间。在上干冷、下暖湿,强对流不稳定能量,强不稳定层结等条件下,非常有利于强对流天气的产生。

表 1 2016 年 8 月 6—7 日温江的环境要素

Table1 Environmental factors in Wenjiang Station during 6—7 August 2016

时间/月.日.时	CAPE/(J·kg ⁻¹)	K/℃	SI/℃	T ₈₅₀₋₅₀₀ /℃	θ _{se500-850} /℃	θ _{se850} /℃	0℃层高度/m	-20℃层高度/m
8.6.20	3996.5	39	-4.36	28	-15.3	83	5148	8353
8.7.08	298.6	43	-5.82	29	-24.1	84.8	4946	8373

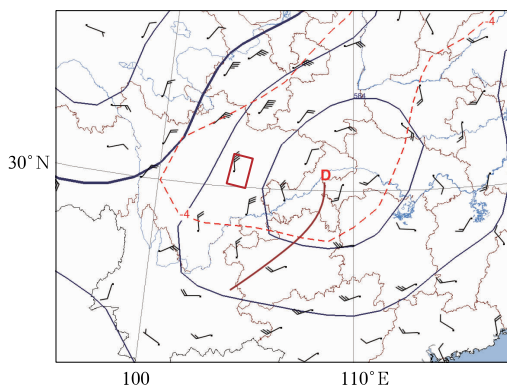


图 1 2016 年 8 月 7 日 08 时 500 hPa 位势高度(蓝线)、风场和等温线(红虚线)
(红色矩形为该过程的主要影响区域)

Fig. 1 Geopotential height (blue line), wind and temperature (red dashed line) at 500 hPa at 08:00 BT 7 August 2016
(Red rectangle is the major impact area of this process)

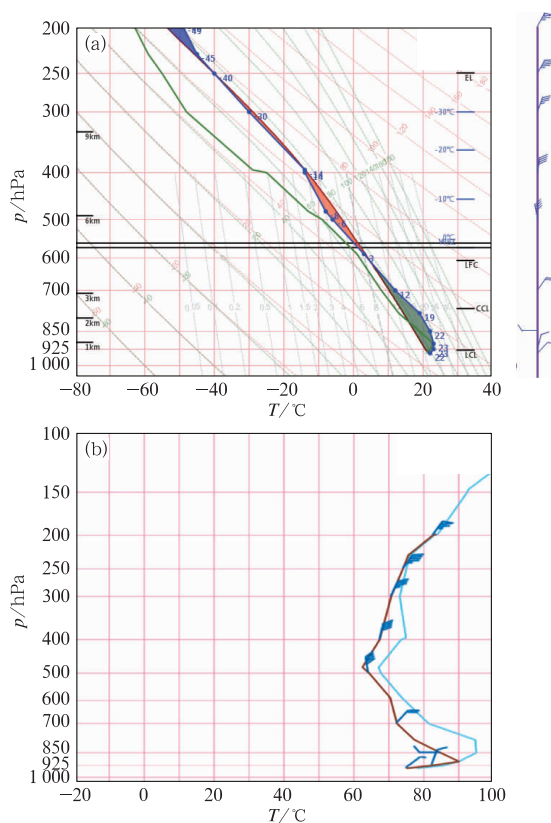


图 2 2016 年 8 月 7 日 08 时温江(a)探空曲线,
(b) θ_e 和 θ_s 风的垂直廓线

Fig. 2 (a) T -log p from sounding and (b) vertical profile of θ_e and θ_s wind in

Wenjiang Station at 08:00 BT 7 August 2016

2 雷达回波特征分析

2.1 雷暴演变过程概述

2016 年 8 月 7 日 15—18 时成都、德阳受强对流的影响,地面产生冰雹与大风等强对流天气。整体回波演变如图 3 所示,期间多个单体不断新生合并,使得雷暴长时间的维持发展,其中 S1、S2 雷暴发展期间分别向南、北方向各自传播,并先后发展为超级单体,产生冰雹大风。S1 雷暴在 15:50 形成强的中反气旋持续 35 min, S2 雷暴的中反气旋在 16:30 达到最强,持续时间为 15 min, S2 超级单体发展强度较 S1 弱,下文主要针对较强超级单体 S1 进行分析。14:56 在金堂县西部有 2 个雷暴单体新生(图 3a),随后快速合并,15:16 在其北侧又有 3 个单体发展(图 3b),雷暴间继续合并,15:35 已完全合并为较强雷暴单体 S1(图 3c),15:50 S1 北侧有单体新生(图 3d),新生单体随后与其北侧的新生单体合并,在 16:40 形成 S2 号雷暴(图 3g),随后 S1、S2 雷暴分别与西侧、北侧的新生雷暴合并,向西南、北方向传播发展。

2.2 雷暴的抬升触发与合并

通常雷暴的触发因子包括地面辐合线、地形、重力波等(王华和孙继松,2008;俞小鼎等,2006),如图 4 所示,14:46 在龙泉山脉西侧至金堂县东侧有雷暴开始新生(图 4c),金堂站从 14 时开始为 $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的持续偏西风(图 4b),地面风与龙泉山脉走向接近垂直,山脉对偏西风的持续强迫抬升触发雷暴。随后在龙泉山附近先后共有 3 个单体新生,3 个单体逐渐合并后迅速发展(图略),15:06 雷暴已完全合并,最大强度超过 60 dBz,最大反射率高度达到 6 km,存在明显的回波悬垂(图 4d),5 min 后雷暴高层回波范围明显扩大,回波质心迅速下降至 2 km 左右(图 4e),雷暴质心的快速下降产生强的下沉气流(俞小鼎等,2006;刁秀广等,2009),三星镇站的风向在 15:10 由偏西风转为偏南风,15:20 风速增强至 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 4b)。雷暴质心的快速下降产生下沉气流,在地面产生阵风,而金堂站在 15:00

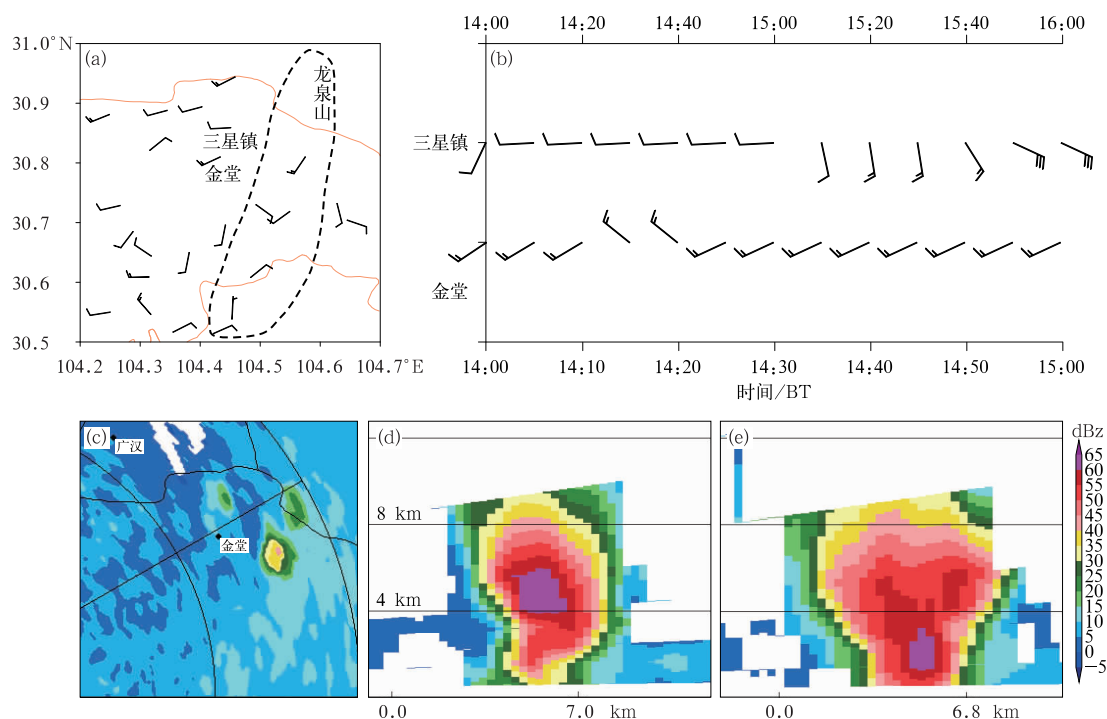


图4 2016年8月7日14—16时地面风演变和雷达反射率

(a)15时地面风场,(b)14—16时金堂和三星镇地面风随时间变化(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),

(c)14:46的 0.5° 仰角反射率,(d)15:06和(e)15:11雷达反射率垂直剖面

Fig. 4 Surface wind and reflectivity from 14:00 to 16:00 BT 7 August 2016

(a) surface wind at 15:00 BT, (b) surface wind evolution at Jintang and

Sanxingzhen stations from 14:00 to 16:00 BT (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),

(c) reflectivity at 0.5° elevation at 14:46 BT, vertical cross-section of

radar reflectivity at (d) 15:06 BT and (e) 15:11 BT

暴15:20开始合并,对应速度回波出现小尺度涡旋,对应低层无明显的风场辐合(图6a,6e,6i),15:25雷暴1 km高度以上均已合并,速度回波 3.4° 、 4.3° 仰角涡旋范围逐渐扩大,涡旋的强度增强(图6b,6f,6g)。15:30雷暴已完成合并,中低层形成明显的辐合区, 3.4° 、 4.3° 仰角辐合的最大风速差分别达到 23.4 、 $24.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图6c,6g,6k),强的辐合产生强的上升运动,雷暴进一步发展,15:35雷暴东侧入流强度迅速增大至 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 2.4° 仰角强度回波的对位位置出现明显的入流缺口, $3 \sim 4 \text{ km}$ 高度辐合开始旋转,形成反气旋式辐合(图6d,6h,6l)。

雷暴在整个发展过程中移动缓慢,金堂站在雷达 0.5° 、 1.5° 、 2.4° 、 3.4° 、 4.3° 、 6.0° 仰角对应高度分别为 0.5 、 1.3 、 2.0 、 2.8 、 3.6 、 4.9 km 。如图7所示,15:40时 3.4° 、 4.3° 仰角的反气旋式辐合范围与强度增大,对应 2 km 以下高度辐合区的最大风速差达到 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,此时 6.0° 仰角有南北向排列的3组

涡旋形成,从北至南分别为气旋、反气旋、气旋(图7a~7d),15:45时在 $2.4^\circ \sim 4.3^\circ$ 仰角反气旋式辐合发展的同时,3组涡旋中气旋减弱反气旋增强(图7e~7h),15:50时 6.0° 仰角南北两个气旋已明显减弱,反气旋范围和强度继续增强, 4.3° 仰角形成完整的中反气旋,旋转速度达到 $18.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,同时反气旋不断向下扩展(图7i~7l),15:55中反气旋继续维持(图7m~7p)。在中反气旋发展过程中, 2.4° 以下存在明显的辐合, $3.4^\circ \sim 4.3^\circ$ 仰角约 3 km 高度存在明显的干冷空气的侵入,最大速度超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 6.0° 仰角 $4.6 \sim 5.4 \text{ km}$ 高度有涡旋偶存在。

超级单体在形成过程中,伴随着强烈的低层辐合、干冷空气的侵入以及涡旋发展,其强度回波中存在对应特征。15:35时 3.4° 、 4.3° 仰角出现干冷空气侵入,干冷空气使得水滴蒸发,对应回波减弱,如图8a,8b所示,15:40时 1.5° 、 2.4° 仰角存在明显入流缺口,在垂直剖面入流一侧存在弱回波区(图8i),

15:45 时 2.4° 仰角入流缺口消失, 1.5° 仰角雷暴东西两侧回波梯度明显增大(图 8c, 8d), 对应强度剖面图上雷暴东西两侧均存在弱回波区(图 8j), 由速度剖面可见(图 8k), 东侧干冷空气进入雷暴后以倾斜下沉气流为主, 并与偏西风在中低层形成辐合, 利于雷暴的持续发展, 15:50 时 1.5° 仰角受低层强辐合的作用, 回波梯度增大, 随着中反气旋的形成和干冷空气的减弱, 入流缺口逐渐消失(图 8e, 8f), 雷暴的发展高度在中气旋最强时刻的后一个体扫达到最大, 在 5 km 高度有超过 60 dBz 质心存在(图 8l), 15:55 雷暴继续发展, 超过 65 dBz 雷暴质心发展至 8 km(图 8m)。与一般典型超级单体不同的是观测中未出现钩状回波等特征, 一般典型超级单体钩状回波的形成主要由于其低层强入流的旋转上升造成, 而该超级单体入流高度超过 4 km, 明显高于一

般典型超级单体, 入流气流不能在低层形成强烈的旋转上升运动, 从而未形成钩状回波, 仅在对高度形成入流缺口。

S1 超级单体在形成前, 雷暴从 15:30 开始合并增强, 图 9 为风速辐合或反气旋式辐合的最大速度差在 $1.5^\circ \sim 9.9^\circ$ 仰角的分布, 虚线圆圈中所示为中反气旋出现的时间和所在仰角, 标注中左侧为 35 dBz 最大发展高度, 右侧为对应体扫时间。雷暴合并发展为超级单体时首先在中低层形成辐合, 辐合最强在 2.0~3.4 km 高度, 15:35 时 3.4° 、 4.3° 仰角开始出现反气旋式辐合, 15:45—15:55 扩展至 $2.4^\circ \sim 6.0^\circ$ 仰角, 辐合速度明显增强, 中反气旋最大旋转速度出现在 15:50, 达到 $18.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。中反气旋在发展过程中, 雷暴发展高度不断增大, 15:30 时 35 dBz 发展最大高度为 8.3 km, 15:35 中反气旋出

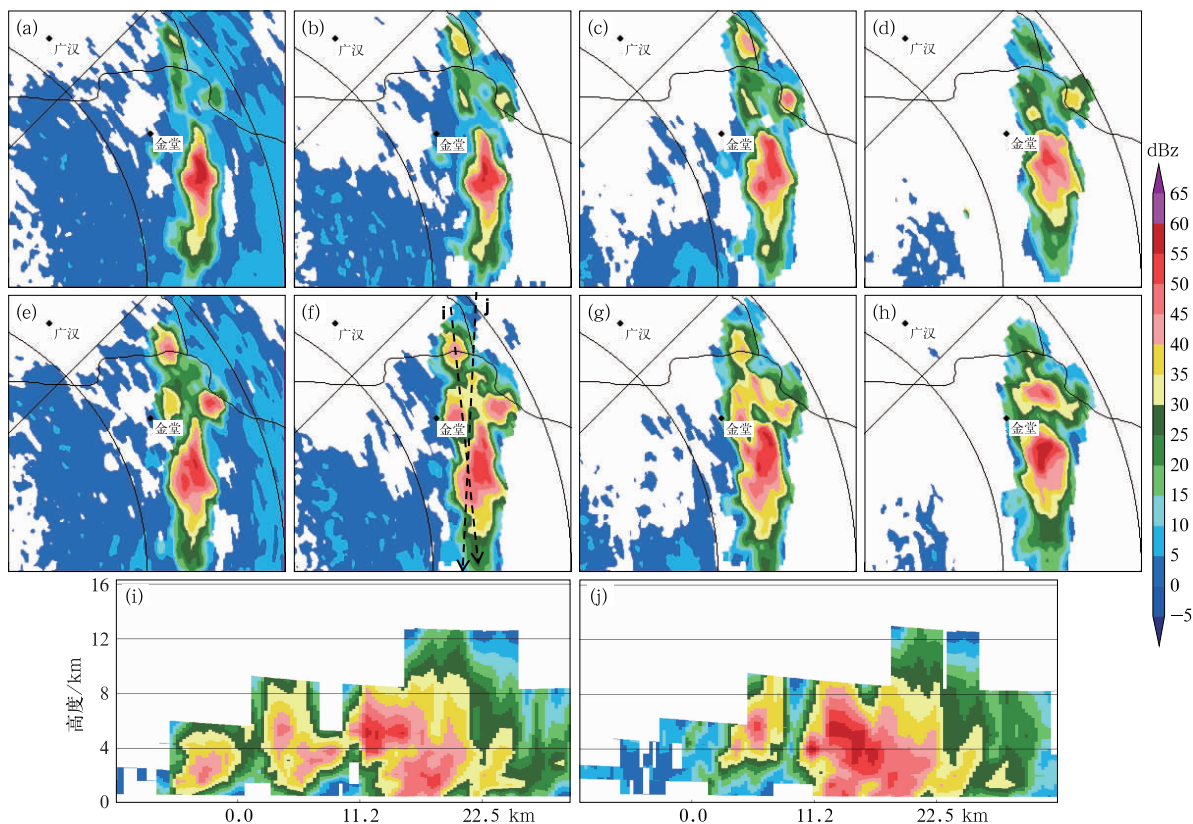


图 5 2016 年 8 月 7 日 (a~d) 15:16 和 (e~h) 15:20 S1 超级单体风暴 2.4° (a, e), 3.4° (b, f), 4.3° (c, g) 及 6.0° (d, h) 仰角反射率;

15:20 沿图 5f 中 (i) i 虚线和 (j) j 虚线的反射率垂直剖面

Fig. 5 Reflectivity and vertical cross-section of supercell storm S1 at (a, e) 2.4° , (b, f) 3.4° , (c, g) 4.3° , (d, h) 6.0° elevations at (a—d) 15:16 BT and (e—h) 15:20 BT 7 August 2016, (i, j) reflectivity along the dotted lines i and j in Fig. 5f at 15:20 BT 7 August 2016

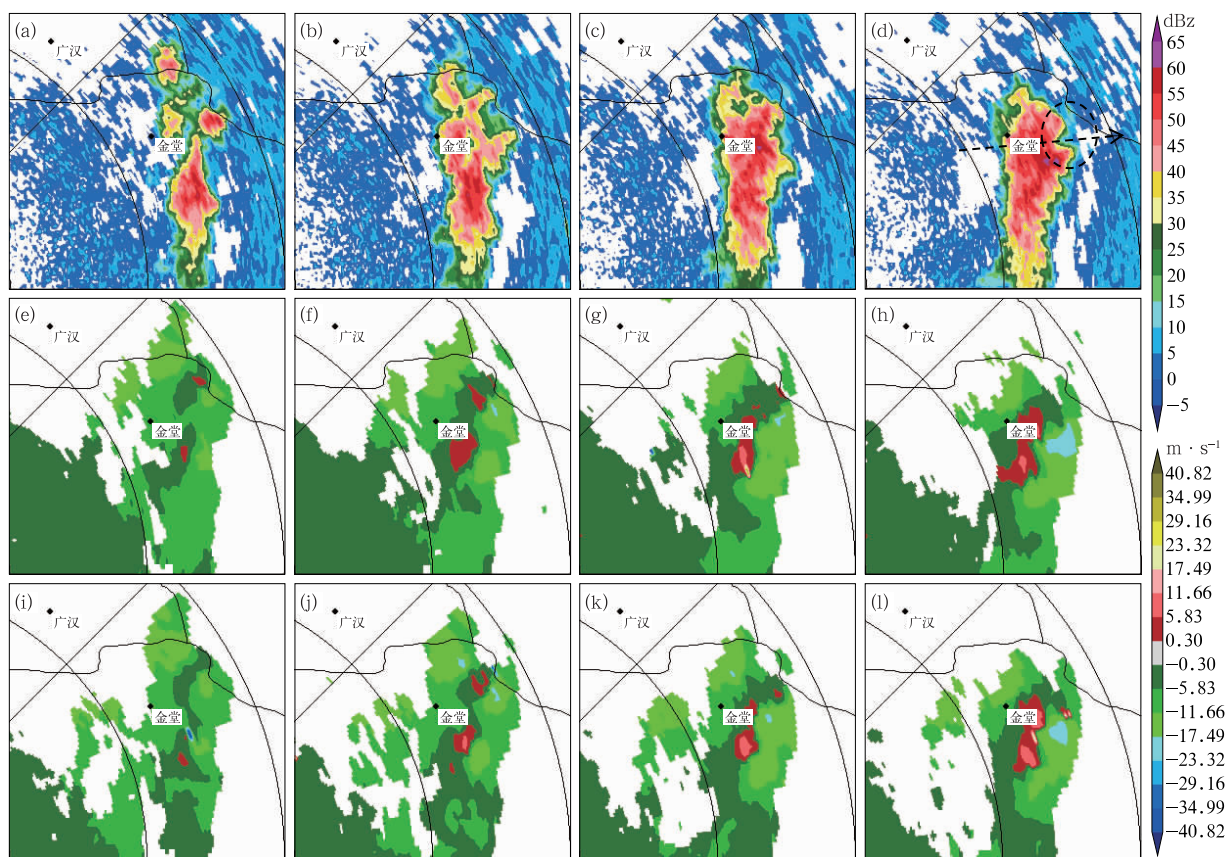


图 6 2016 年 8 月 7 日 (a,e,i)15:20,(b,f,j)15:25,(c,g,k)15:30,(d,h,l)15:35

2.4°仰角反射率(a~d)、3.4°(e~h)和 4.3°(i~l)仰角径向速度

Fig. 6 Reflectivity at 2.4° elevation (a~d), radial velocity at 3.4° (e~h) and 4.3° (i~l) elevations at (a, e, i) 15:20 BT, (b, f, j) 15:25 BT, (c, g, k) 15:30 BT, (d, h, l) 15:35 BT 7 August 2016

现时,雷暴35 dBz 高度迅速增长至 11.6 km,高度增加了 3.3 km,雷暴强烈的上升运动使得垂直涡旋的涡度快速拉伸,从而旋转加快(俞小鼎等,2008),15:40 时 6.0°仰角开始形成涡旋偶(图 7d),雷暴继续发展,35 dBz 回波发展高度继续增大,15:50 中反气旋最强时,35 dBz 发展高度最大,达到 15.7 km。

新都、龙泉风廓线雷达分别位于金堂西侧和南侧,如图 10 所示,15:30 新都风廓线在 1~3 km 高度为 $2\sim4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的偏西风(图 10a),与图 6 中的速度回波对应,持续的偏西风为雷暴的低层辐合提供动力。龙泉风廓线在 15:00—16:30 时段 3~5 km 高度风随高度逆时针旋转(图 10b),反映了高空存在强的冷平流,有利于中反气旋的形成(Klemp and Wilhelmson,1987),15:40 在涡旋偶形成时,0~6 km 垂直风切变超过 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,3~4 km 高度风明显增大,垂直风切变最强。金堂站的地面风在

15:30 出现风向的迅速偏转,15:35 偏东风增大至 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,随后地面风持续增强(图 10e),15:35 沿后侧入流缺口位置做强度和速度垂直剖面(图 6d 中虚线处),在强度回波入流一侧有明显的回波悬垂结构(图 10c),对应速度剖面可看到入流进入雷暴后分为上下两支(图 10d),上升支与西风形成辐合,产生强的上升运动,使雷暴发展,入流的下沉支使下沉气流增强,导致地面大风。

3 中反气旋形成的讨论

中反气旋与中气旋流场差异明显,但其形成结构存在一定的相似性。目前普遍认为中气旋的形成分为两种,一是中等或强的风垂直切变产生水平涡度,形成水平涡管,强的垂直气流将水平涡管扭曲产生垂直涡度,同时垂直涡度在上升运动的垂直拉伸

下进一步加强为中/反气旋(Rotunno and Klemm, 1985; Klemm, 1987);二是由中层和低层两个部分组成,中层中气旋是环境垂直风切变形成的水平涡管,经对流上升运动的倾斜作用而形成,低层中气旋则起源于蒸发冷却下沉气流与暖湿入流边界的斜压涡度,或者在超级单体附近预先存在的冷暖气团边界(Weisman and Klemm, 1982; 1984; Rotunno and Klemm, 1985; Brooks et al, 1994)。从目前学者们的研究发现,中反气旋超级单体由风暴分裂形成的个例

较多,而此次中反气旋超级单体由雷暴单体合并后形成,个例中 S1 超级单体中反气旋的形成与第二种观点较为接近,即中反气旋由低层和中层 2 个部分合并形成。

低层中反气旋在超级单体形成前,多个雷暴单体合并产生小涡旋,随后涡旋发展为辐合,在雷暴西侧低层为一致偏西风入流,进一步加速上升运动, 15:35 雷暴东侧 2~4 km 高度处存在强干冷空气侵入,最大速度达到 $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,此时辐合开始旋转。强

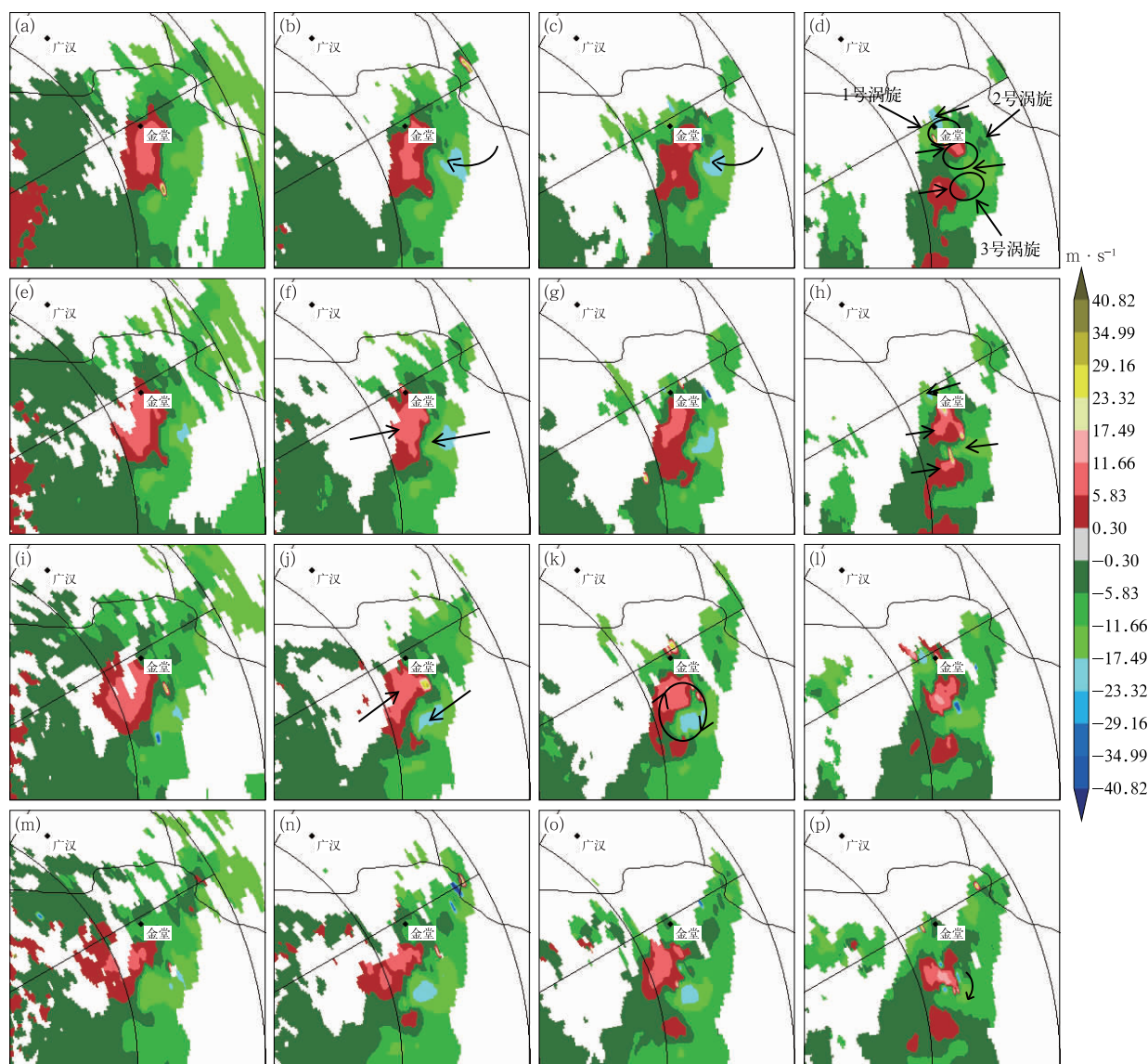


图 7 2016 年 8 月 7 日(a,e,i,m)2.4°, (b,f,j,n)3.4°, (c,g,k,o)4.3°和(d,h,l,p)6.0°仰角径向速度
(a~d) 15:40, (e~h) 15:45, (i~l) 15:50, (m~p) 15:55

Fig. 7 Radial velocity at (a, e, i, m) 2.4°, (b, f, j, n) 3.4°, (c, g, k, o) 4.3° and (d, h, l, p) 6.0° elevations at
(a~d) 15:40 BT, (e~h) 15:45 BT, (i~l) 15:50 BT, (m~p) 15:55 BT 7 August 2016

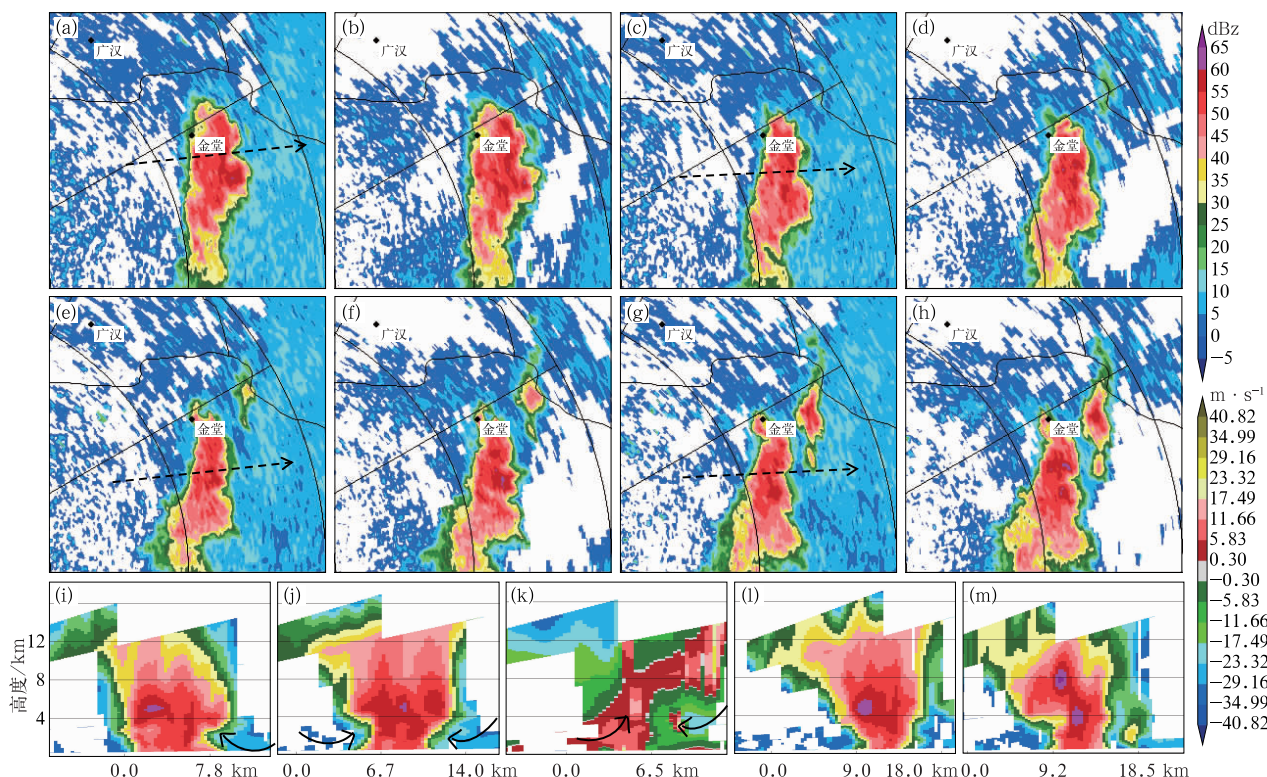


图 8 2016 年 8 月 7 日 1.5°(a,c,e,g)和 2.4°(b,d,f,h)仰角反射率和垂直剖面
(a,b)15:40,(c,d)15:45,(e,f)15:50,(g,h)15:55

(i,j,l,m)沿图 8a(i),8c(j),8e(l),8g(m)中虚线的反射率垂直剖面,(k)沿图 8c 中虚线的速度垂直剖面

Fig. 8 Reflectivity and vertical section at 1.5° (a, c, e, g) and 2.4° (b, d, f, h) elevations at

(a, b) 15:40 BT, (c, d) 15:45 BT, (e, f) 15:50 BT, (g, h) 15:55 BT 7 August 2016;

(i, j, l, m) vertical section of reflectivity along dotted line in Fig. 8a (i), Fig. 8c (j),

Fig. 8e (j), Fig. 8g (m), (k) vertical section of velocity along dotted line in Fig. 8c

干冷空气的侵入产生上升和下沉两支气流,干冷的下沉气流与暖湿上升气流造成斜压涡度,导致辐合开始旋转上升,在辐合与干侵入上升气流的作用下,15:30—15:35 雷暴发展高度迅速增大,在强上升气流的作用下垂直涡度拉伸,使辐合的旋转增强,中反气旋进一步得到发展。而对于为什么呈反气旋式旋转,并没有找到合理原因来解释,有待于进一步研究。

高层强的垂直风切变对于涡旋偶的形成非常关键(Markowski,2002),Hogsett and Stewart(2013)假设垂直风切变形成的涡管与环境风的方向垂直,在有利的垂直风切变条件下,形成垂直于环境风的两个涡旋。个例中龙泉风廓线 3~4 km 高度内水平风的矢量差为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,对应水平涡度约为 $1.2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,产生明显的水平涡度,形成水平涡管,强上升气流与下沉气流将水平涡管扭曲产生气旋和

反气旋对,15:40 时 6.0° 仰角速度回波中存在涡旋偶(图 7 所示),涡旋的排列大致为南北方向,环境风

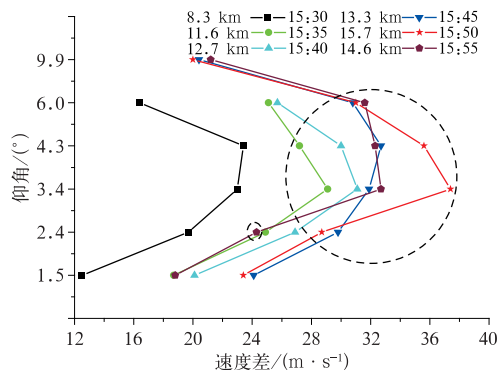


图 9 辐合与反气旋的最大速度差
在 $1.5^\circ \sim 9.9^\circ$ 仰角的分布

Fig. 9 Distribution of maximum velocity difference of convergence and anticyclones from 1.5° to 9.9° elevations

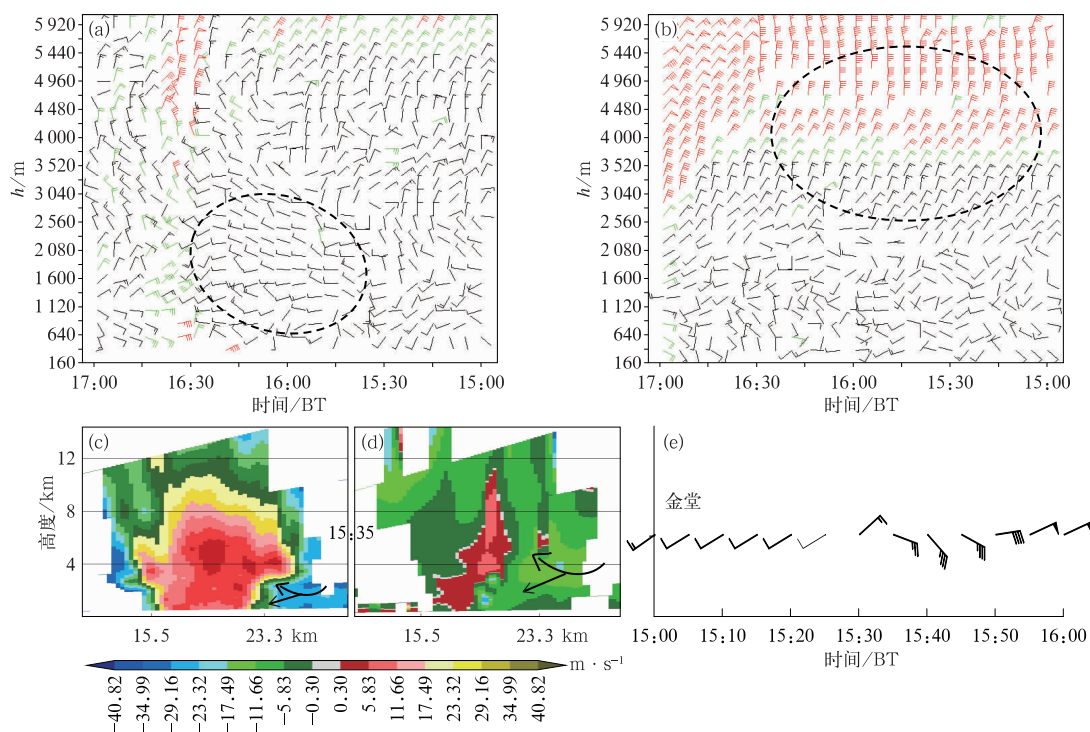


图 10 2016 年 8 月 7 日 15—17 时 (a) 新都和 (b) 龙泉风廓线 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 沿图 6d 虚线处的 (c) 反射率与 (d) 速度剖面, (e) 15—16 时金堂间隔 10 min 地面风 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 10 (a) Xindu and (b) Longquan wind profiles, (c) reflectivity and (d) velocity sections along dotted line in Fig. 6d, (e) surface wind evolution every 10-minute interval on Jintang at 15:00 BT to 16:00 BT 7 August 2016

大致为东北风,其夹角约为 45° 。涡旋偶形成时干冷空气的侵入较强,上升支的干冷空气可能对于涡旋偶的形成有一定的作用。Rotunno and Klemp (1982) 和 Klemp and Wilhelmson (1978) 提出,在风随高度逆时针旋转的情况下,利于中反气旋超级单体的发展,15:40 涡旋偶形成后,南北两侧气旋随着雷暴的发展逐渐减弱,而反气旋发展增强,形成中反气旋。

4 结论与讨论

通过对高空冷涡背景下一次中反气旋超级单体的雷达回波特征进行分析和讨论,主要得到以下结论:

(1) 在高空冷涡西部的偏北气流下,中高层存在强的冷平流,850 hPa 以上均为偏北气流,08 时存在弱的逆温,探空整体呈现上干冷下暖湿的喇叭口形状,在强对流不稳定能量与强不稳定的层结条件下,非常有利于强对流天气的产生。

(2) 地面持续的偏西风在龙泉山脉的强迫抬升下触发多个单体雷暴,雷暴中的下沉气流产生冷流出,在北侧不断触发新单体,雷暴与新生单体不断合并发展为超级单体 S1,该超级单体风暴伴随低层强辐合、中反气旋、后侧入流、后侧入流缺口、涡旋偶等回波特征。

(3) S1 超级单体风暴内的中反气旋由低层、中层两个部分合并形成。低层:雷暴单体合并时产生小涡旋,并发展为辐合,强干冷空气的下沉气流与暖湿上升气流造成斜压涡度,使辐合产生旋转,强烈的上升运动使垂直涡度拉伸,旋转增强。中层:3~4 km 高度水平风切变大,利于水平涡管的形成,在强的上升气流与下沉气流的作用下产生涡旋偶。

文章针对此次超级单体风暴的形成演变,以及中反气旋的形成原因进行了分析,在中反气旋超级单体风暴形成的环境条件和临近预报方面得到一些认识。中反气旋超级单体能够形成以及长时间的维持,主要取决于环境的热动力条件,主要包括有利的不稳定层结、强冷平流、垂直风切变、强的对流不稳

定能量等因子,尤其是中层的垂直风切变和干冷空气的侵入;在中反气旋超级单体的临近预报方面,需要着重分析实况资料的变化特征,包括利用加密自动站资料分析地面风对雷暴触发、雷暴中气流的变化,利用天气雷达分析雷暴的演变、低层辐合以及垂直结构等特征,结合风廓线雷达分析风随高度逆转、强垂直风切变等环境要素特征。

参考文献

- 蔡森,周毓荃,蒋元华,等,2014. 一次超级单体雷暴观测分析和成雹区识别研究[J]. 大气科学,38(5):845-860. Cai M, Zhou Y Q, Jiang Y H, et al, 2014. Observations, analysis, and hail-forming area identification of a supercell hailstorm[J]. Chin J Atmos Sci, 38(5):845-860(in Chinese).
- 陈明轩,王迎春,肖现,等,2012. 基于雷达资料四维变分同化和三维云模式对一次超级单体风暴发展维持热动力机制的模拟分析[J]. 大气科学,36(5):929-944. Chen M X, Wang Y C, Xiao X, et al, 2012. A case simulation analysis on thermodynamical mechanism of supercell storm development using 3-D cloud model and 4-D variational assimilation on radar data[J]. Chin J Atmos Sci, 36(5):929-944(in Chinese).
- 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[J]. 气象,37(4):423-431. Chen X Y, Fu Q, Cen Q L, et al, 2011. Analysis of environmental conditions and the structure of radar echo for a split supercell in southwest prefecture of Guizhou[J]. Meteor Mon, 37(4):423-431(in Chinese).
- 刁秀广,朱君鉴,刘志红,2009. 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,67(1):133-146. Diao X G, Zhu J J, Liu Z H, 2009. Analysis of three supercell storms with Doppler weather radar data[J]. Acta Meteor Sin, 67(1):133-146(in Chinese).
- 胡鹏,焦洋,高帆,2019. 鲁中地区一次超级单体风暴的雷达观测分析[J]. 海洋气象学报,39(2):134-142. Hu P, Jiao Y, Gao F, 2019. Observational case study on a supercell storm in central Shandong Province[J]. J Mar Meteor, 39(2):134-142(in Chinese).
- 金巍,曲岩,安来友,2009. 超级单体引发的龙卷天气过程分析[J]. 气象,35(3):36-41. Jin W, Qu Y, An L Y, 2009. Analysis on the tornado weather process induced by a super-cell[J]. Meteor Mon, 35(3):36-41(in Chinese).
- 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. Nong M S, Qi L Y, Huang H H, et al, 2011. A case study on supercell storm of hail in the northwest of Guangxi[J]. Meteor Mon, 37(12):1519-1525(in Chinese).
- 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. Qin J, Pan H, Liu L, 2017. Analysis of supercell storm leading to disastrous hail in Liuzhou on 9 April 2016[J]. Meteor Mon, 43(6):745-755(in Chinese).
- 陶岚,戴建华,孙敏,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. Tao L, Dai J H, Sun M, 2016. Analysis on interaction of thunderstorms and evolution of mesocyclones[J]. Meteor Mon, 42(1):14-25(in Chinese).
- 王福侠,俞小鼎,闫雪瑾,2014. 一次超级单体分裂过程的雷达回波特征分析[J]. 气象学报,72(1):152-167. Wang F X, Yu X D, Yan X J, 2014. Analysis of the splitting processes of the supercell storms based on the Doppler weather radar data[J]. Acta Meteor Sin, 72(1):152-167(in Chinese).
- 王华,孙继松,2008. 下垫面物理过程在一次北京地区强冰雹天气中的作用[J]. 气象,34(3):16-21. Wang H, Sun J S, 2008. Effects of underlying surface physical process on a severe hail event occurred in Beijing area[J]. Meteor Mon, 34(3):16-21(in Chinese).
- 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等,2012. 对流风暴内中气旋特征与强烈天气[J]. 气象,38(11):1330-1338. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al, 2012. The characteristics of the mesocyclone and severe weather associated with convective storms[J]. Meteor Mon, 38(11):1330-1338(in Chinese).
- 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等,2013. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J]. 气象学报,71(2):209-227. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al, 2013. A study of the environmental conditions and radar echo characteristics of the supercell-storms in northern Jiangsu[J]. Acta Meteor Sin, 71(2):209-227(in Chinese).
- 吴海英,陈海山,刘梅,等,2017. 长生命史超级单体结构特征与形成维持机制[J]. 气象,43(2):141-150. Wu H Y, Chen H S, Liu M, et al, 2017. Structure characteristics, formation and maintenance mechanism of supercell with long life cycle[J]. Meteor Mon, 43(2):141-150(in Chinese).
- 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[J]. 气象,40(6):655-667. Wu Z F, Pang G Q, He H Q, et al, 2014. Comparative analysis of environmental conditions and structural features for the left moving supercell and the supercell in squall line in April 2012 Guangdong[J]. Meteor Mon, 40(6):655-667(in Chinese).
- 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[J]. 大气科学,32(3):508-522. Yu X D, Zheng Y Y, Liao Y F, et al, 2008. Observational investigation of a tornadic heavy precipitation supercell storm[J]. Chin J Atmos Sci, 32(3):508-522(in Chinese).
- 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等,2006. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. 高原气象,25(5):914-924. Yu X D, Zheng Y Y, Zhang A M, et al, 2006. The detection of a severe tornado event in Anhui with China new generation weather radar[J]. Plateau Meteor, 25(5):914-924(in Chinese).
- 杨波,孙继松,刘鑫华,2019. 两类不同风灾个例超级单体特征对比分析[J]. 气象学报,77(3):427-441. Yang B, Sun J S, Liu X H, 2019. Comparative analysis of supercells associated with two different types of wind disaster[J]. Acta Meteor Sin, 77(3):427-441(in Chinese).

- 赵坤,周仲岛,潘玉洁,等,2008.台湾海峡中气旋结构特征的单多普勒雷达分析[J].气象学报,66(4):637-651. Zhao K, Zhou Z D, Pan Y J, et al. 2008. Single-Doppler radar analysis of a mesocyclone in the Taiwan Strait[J]. Acta Meteor Sin, 66(4): 637-651 (in Chinese).
- 郑艳,俞小鼎,任福民,等,2017.海南一次超级单体引发的强烈龙卷过程观测分析[J].气象,43(6):675-685. Zheng Y, Yu X D, Ren F M, et al. 2017. Analysis on a severe tornado process in Hainan triggered by supercell[J]. Meteor Mon, 43(6): 675-685 (in Chinese).
- 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分析[J].气象学报,62(3):317-328. Zheng Y Y, Yu X D, Fang C, et al. 2004. Analysis of a strong classic supercell storm with Doppler weather radar data[J]. Acta Meteor Sin, 62(3): 317-328 (in Chinese).
- Brooks H E, Doswell III C A, Wilhelmson R B, 1994. The role of midtropospheric winds in the evolution and maintenance of low-level mesocyclones[J]. Mon Wea Rev, 122(1): 126-136.
- Hogsett W A, Stewart S R, 2013. Dynamics of tropical cyclone intensification; deep convective cyclonic "left movers" [J]. J Atmos Sci, 71(1): 226-242.
- Klemp J B, 1987. Dynamics of tornadic thunderstorms[J]. Ann Rev Fluid Mech, 19: 369-402.
- Klemp J B, Wilhelmson R B, 1978. Simulations of right-and left-moving storms produced through storm splitting[J]. J Atmos Sci, 35(6): 1097-1110.
- Lemon L R, Doswell III C A, 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis[J]. Mon Wea Rev, 107(9): 1184-1197.
- Markowski P M, 2002. Hook echoes and rear-flank downdrafts: a review[J]. Mon Wea Rev, 130(4): 852-876.
- Markowski P M, Richardson Y, 2010. Organization of isolated convection// Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.: 202-244.
- Rotunno R, Klemp J B, 1982. The influence of the shear-induced pressure gradient on thunderstorm motion[J]. Mon Wea Rev, 110(2): 136-150.
- Rotunno R, Klemp J B, 1985. On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms[J]. J Atmos Sci, 42(3): 271-292.
- Simpson J, Westcott N E, Clerman R J, et al, 1980. On cumulus mergers[J]. Arch Met Geoph Biokl Ser A, 29(1/2): 1-40.
- Weisman M L, Klemp J B, 1982. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy[J]. Mon Wea Rev, 110(6): 504-520.
- Weisman M L, Klemp J B, 1984. The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears[J]. Mon Wea Rev, 112(12): 2479-2498.
- Westcott N E, Kennedy P C, 1989. Cell development and merger in an Illinois thunderstorm observed by Doppler radar[J]. J Atmos Sci, 46(1): 117-131.
- Yu X D, Wang X, Zhao J, et al, 2012. Investigation of supercells in China: environmental and storm characteristics// Preprints, 26th Conf. on Severe Local Storm. Nashville: Amer Meteor Soc.
- Ziegler C L, Rasmussen E N, Shepherd T R, et al, 2001. The evolution of low-level rotation in the 29 May 1994 Newcastle-Graham, Texas, storm complex during Vortex[J]. Mon Wea Rev, 129(6): 1339-1368.