0577-6619/2012/70(5)-0974-85 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

一次海风锋触发的多单体雹暴及合并过程的观测分析*

易笑园[1,2] 张义军[3] 沈永海[4] 刘一玮[1] 孙晓磊[1]

YI Xiaoyuan[1,2] ZHANG Yijun[3] SHEN Yonghai[4] LIU Yiwei[1] SUN Xiaolei[1]

1. 天津市气象台,天津,300074
2. 南京信息工程大学大气科学学院,南京,210044
3. 中国气象科学研究院雷电物理和防护工程实验室,北京,100081
4. 北京市气象局大气探测技术保障中心,北京,100085
1. *Tianjin Meteorological Observatory*, *Tianjin* 300074, *China*
2. *School of Atmospheric Sciences*, *NUIST*, *Nanjing* 210044, *China*
3. *Laboratory of Lightning Physics and Protection Enginnering*, *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*
4. *Support Center for Atmospheric Observing Technology*, *Beijing Meteorological Bureau*, *Beijing* 100085, *China*

2011-05-12 收稿,2012-02-19 改回.

Yi Xiaoyuan, Zhang Yijun, Shen Yonghai, Liu Yiwei, Sun Xiaolei. 2012. Observational analysis of a multicell hailstorm triggered by a sea-breeze front and its merging process. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(5): 974-985

Abstract The observational data from Doppler radar, SAFIR3000 three-dimensional lightning position system, microwave radiameter, and from high-density meteorology automatic stations were used to analyze a big hail case caused by a multicell hailstorm which connected with a sea breeze front on the west coast of the Bohai bay. The characteristic of merger process, lightning activity parameters and quantificational structures of hailstorm were studied. The results show that: Firstly, the humid and cold sea breeze convergence line in the local instable region on ground was the mechanism for storms' triggering and developing with the time of early warning for hailstorms of 2 h. Secondly, there were two merger types of γ-mesoscale convective cells and small β-mesoscale convective cells, that is, the independence type, and the feeder type. As cells merging, the cloud bridge between two cells emerged at the height of 4 − 6 km or 9 − 10 km. Thirdly, at the time of merging, the development of storm was limited and hailfall and the peak of lightning emerged after merger. Fourthly, the relationship of the evolution of quantificational storm 3D-structure (time-height cross sections of the radar parameters of Z_{max}, Z_{mean15}, V_{40}, V_{50} etc.) with lightning activity was investigated, with the result that the radar parameters of $V_{40\text{-Fup}}$, $V_{40\text{-Fdown}}$, S_{ET11} were able to describe properly the feature of merger process and the change of hailstorm structures, and pulled ahead of the total lightning flash peak for 12 min.

Key words Sea breeze front, Multi-cell hailstorm, Merger, Observational analysis, Radar parameter

摘 要 综合利用雷达、SAFIR3000 三维闪电定位系统、微波辐射仪和加密气象自动站等多种观测资料,针对一次与海风锋有关的多单体雷暴造成的大冰雹事件,通过雷达图像和多种雷达、闪电参量的定性、定量分析得到以下结论:(1)地面局地不稳定区配合湿冷的海风锋是触发雷暴并促进其发展的机制,局地背景条件对雹暴发生的预警时间达 2 h。(2)γ 中尺度或小的 β 中尺度对流单体间的合并主要出现了 2 种类型,即独立型合并和喂养型合并。对流单体合并时,云桥有时在单体间的中空

* 资助课题:国家自然科学基金(41030960、41275044、41005006)、公益性行业专项(GYHY20100605)、中央级公益性科研院所专项(IUMKY201002)和国家科技支撑计划重点项目(2008BAC37B05/B01)。

作者简介:易笑园,主要从事中尺度灾害天气预报和闪电相关研究。E-mail: yixy123@sina.com

(4—6 km)、有时在高空(9—10 km)，而二者成因的物理机制截然不同。(3)独立型合并的瞬间(约 12 min 内)，雷暴整体上升的发展趋势受到抑制；合并后，上升重新加强发展。降雹和云闪频数峰值出现在独立型合并之后，而喂养型合并处在雷暴消亡阶段，闪电频数平稳下降。(4)雷达参量 Z_{max}、Z_{mean15}、V_{40}、V_{50} 等可以定量地描述雹暴三维结构变化，并且，能间接地反映云体发展空间大小、上升气流强弱、水成物粒子多少及其相态。雷达参量 $V_{40\text{-}Fup}$、$V_{40\text{-}Fdown}$、S_{ET11} 能描述合并、降雹、闪电活动时雷暴结构变化。

关键词 海风锋，多单体雹暴，合并，观测分析，雷达参数

中图法分类号 P458.1+21.2

1 引 言

多单体雷暴系统是由一些处于不同发展阶段的生命史短暂的对流单体所组成。由于不断有新单体并入，使雷暴系统的整体强度加强、生命史延长，因此，多单体雷暴是造成强闪电、冰雹、龙卷等灾害天气的重要中小尺度天气系统。对流单体的新生、合并和多核心是多单体雷暴系统的普遍特征，多单体雷暴系统的发展演变过程是一个复杂的、包含了垂直运动和微物理结构等方面变化的非线性过程。

自 20 世纪 70 年代开始，随着雷达探测技术的发展，一些有关雷暴单体合并的观测事实逐步被认识。Dennis 等(1970)提出了喂养型单体合并过程，即在距离父辈单体不远处、距地几千米高度上有新单体生成，且新单体发展，迅速与父辈单体合并。王昂生等(1983)认为冰雹云演变中存在吞食、射流、指状、追逐以及辐合等合并类型，但受雷达资料分析工具的限制，其研究都是基于雷达的水平扫描图像(CAPPI)，在垂直方向上没有涉及。而对于最先合并的位置及物理原因，则是人们感兴趣的。Simpson 等(1980)提到云桥现象，即在对流单体合并时，由于下沉气流在低层产生的辐合作用，在两个单体间激发出新的回波，云桥在 1 km 附近出现，而 Cunning 等(1982)的研究表明，有些对流单体合并时云桥出在 9 km 附近。Westcott(1984,1994)在概括之前有关合并研究时指出，合并后单体在最大反射率、顶高、回波面积等方面有所增大，而这些变化与合并前各单体回波核的寿命和发展趋势有关，但合并单体间的协同作用并不是很显著。中国利用雷达资料揭示对流系统和对流单体合并过程的事例还很少，庄薇等(2010)指出，对流单体间的辐合线促使合并，合并是从中层开始的，然后扩展到低层。王俊等(2011)的研究发现，在合并的瞬间，两个对流系统均有所减弱。

黄美元等(1987)利用二维暖积云模式研究了积云之间的合并及相互作用，认为合并是水平气压场和云内环流流场共同作用的结果。付丹红等(2007)利用数值模式模拟了一次积云合并过程的细致变化，并指出，云桥和下沉气流在合并中起着重要作用，合并导致上升、下沉气流增强，进而水汽转化加强，形成大量过冷云水和冰相粒子。已有的研究表明，雷暴系统内足够数量和大小的冰相粒子，并有足以使冰相粒子上升到一定高度的上升气流，是产生闪电活动和出现冰雹的首要条件。言穆弘等(1996)在模拟非感应起电机制时指出，云内上升气流只有强到穿过 −20℃温度层的高度时，才会产生强烈的闪电活动；冰相粒子垂直分布结构的改变，会使起电率、电荷的时空分布随之改变。张义军等(2004)、孙安平等(2004)用三维动力-电耦合模式模拟的结果表明，云中的电活动可以改变水成物粒子的降落速度(可能是碰并或融化、升华的后续反应)，影响水成物之间的相态转换量和时空分布等微物理过程，增加云内潜热释放，从而使上升气流区的范围和强度都相应增加。可见，虽然上述结论均是基于数值模拟的结果，尚缺少事实依据，但是合并、上升气流、冰相粒子与降雹和闪电等天气现象之间有着密切的关系是不容置疑的。

进入 21 世纪以来，合并与冰雹、龙卷、闪电等灾害天气的关系越来越引起人们的关注。Carey 等(2000)的研究指出，97%的降水和混合冰团以及 100%的云地闪产生于合并后的对流系统。Carey 等(2003)在分析 1998 年 5 月 30 日美国南达科他州发生的 F4 龙卷、冰雹时发现，超级单体和飑线尾部的合并很大程度上促进了正地闪的加强和龙卷的灾害程度。Lee 等(2006)在研究美国伊利诺斯州 1996 年 4 月龙卷爆发期间合并所起作用时指出，有 54%的龙卷出现在合并前后的 15 min 内；且用 3 种合并类型的事例证实了合并可使反射率增大，即上升气流有所加强、单位体积内粒子数量有所增多；同时还增强了雷暴内的旋转程度。Tessendorf 等(2007)、Gauthier 等(2010)均观测发现，合并后约 10 min，正地闪频数出现峰值和正地闪占总地闪的比例出现

激增的现象。

近几年,中国气象局布设了多种新型探测设备,如雷达、闪电定位、微波辐射计和自动站,所得到的高分辨率监测资料不仅为定性研究中小尺度天气现象提供了条件,更使定量综合分析成为可能,而定量研究是实现回波识别等客观化分析、模式验证及提高预警技术的关键。本文旨在利用多种观测资料,揭示一次与海风锋有关的多单体雹暴三维结构演变及其与降雹、闪电等天气现象的关系,并且运用 Z_{max}、Z_{mean15}、V_{40}、V_{50}、$V_{40\text{-}Fup}$、$V_{40\text{-}Fdown}$、S_{ET11} 等雷达参量量化上述特征,从而捕获水成物粒子、上升气流及相态变化等信息,为灾害性天气的预警提供科学依据。

2 资料和仪器

雷达资料来源于天津塘沽的多普勒雷达(39°02′38″N,117°43′01″E),14—16 时(北京时,下同),跟踪多单体雹暴演变,间隔 6 min。雷达资料为直角坐标系数据,水平分辨率 0.01°×0.01°(约 1.23 km^2)。垂直方向将 0.5—5.5 km 分为 11 层,间隔 0.5 km;6—10 km 分为 5 层,间隔 1 km;11—20 km 分为 5 层,间隔 2 km,共计 21 层。

MP3000 型微波辐射计观测站位于北京南郊,可以较好地代表站点上方 200 km 范围大气的辐射亮温等探空信息,并利用神经网络反演方法,反演得到大气廓线。14 时 0℃、-10℃和-20℃等温度层高度用北京微波辐射计资料来确定,并与 08 时的探空数据进行了订正。微波辐射计对本例 0℃、-10℃、-20℃和-40℃高度的观测分别为 4.077、5.494、6.897 和 9.48 km。

加密地面气象自动站资料为 10 min 间隔,包括风向、风速、温度、湿度、气压等要素资料。

目前,中国闪电资料的主要来源有 3 种:(1)TRMM 卫星闪电成像仪(LIS)资料(袁铁等,2010);(2)全国地闪定位网资料(冯桂力等,2006);(3)SAFIR3000 闪电定位系统资料(郑栋等,2010;Liu 等,2011)。SAFIR3000 用干涉法测量闪电产生的甚高频(VHF,频率为 110—118 MHz)辐射信号,提供闪电辐射点的三维分布和云-云闪电信息,并结合低频(LF,频率为 300 Hz—3 MHz)信息得到云地闪资料。它包括 3 个探测子站(永清、丰润、怀柔)和一个中心站(北京),理论上距三角形网格中心 200 km范围内位置误差小于 2 km,探测效率可达 90%。本例闪电资料来源于第 3 种,研究区域在允许范围内。为了获取闪电频数信息,在处理闪电资料时遵循下列规则:(1)每条记录即一个辐射点。两个辐射点记录只有满足(时间≥100 ms 且距离≥7 km)时才认为是另一个闪电,否则为同一个闪电;(2)将每个辐射点记录中,从右向左第 13 列,如数字为“4”被认为是首次回击,“5”被认为是继后回击,将标记为“4”或“5”的认为是地闪;(3)只有电流强度超过 10 kA 的地闪,才被当作是正地闪,否则认为是云闪。

3 实况和中尺度背景条件

2008 年 8 月 28 日 15 时,天津静海出现最大直径为 35 mm 大冰雹事件,且闪电活跃,但无强降水。雹暴事件的制造者是多单体雷暴,由于不断有新雷暴生成并入,生命史超过 2 h(14 时 00 分—16 时 42 分)。闪电活动集中在 14 时 00 分—16 时 00 分,总闪为 713 个,地闪极少,仅占 3.6%;云闪占绝大多数(687 个),占总闪的 96.4%。

海陆风环流是沿海地区特有的中尺度天气系统,它是由下垫面加热不均匀而产生的,由海洋吹向陆地的风,称为海风。海风常与湿冷气团配合,类似浅薄的锋面,也称为海风锋。研究表明,沿海地区雷暴产生、组织、发展与海风锋关系密切(王树芬,1990;Carey, et al,2000;刘运策等,2001;尹东屏等,2010;Gauthier, et al,2010)。渤海西岸地区,由于海陆温差作用,在午后风向主要以偏东风为主,天津沿海与其西部地区的温湿度差异较大(表 1),13 时,天津沿海气象站塘沽与西南部静海的温度差为 5.0℃,相对湿度差是 28%,这表明有一股湿、冷的气流正由渤海向内陆侵入,配合风场(图1a—c)可知,

表 1 天津沿海(塘沽)与其西南部(静海)站温湿度对比

Table 1 Comparison of the temperature and relative humidity between Tanggu (at seaside) and Jinghai (southwest of Tianjin)

要素	代表站	13 时	14 时	15 时
温度(℃)	塘沽	25.8	26.6	27.5
	静海	30.8	31.5	31.9
温差(℃)	—	-5.0	-4.9	-4.4
相对湿度(%)	塘沽	82	71	75
	静海	54	53	47
湿度差(%)	—	28	18	28

冷湿气团的前沿气象要素的不连续面就是海风锋。利用08时北京探空和12—15时地面5要素气象自动站的观测数据计算综合热力、动力不稳定能量SWEAT指数(图1a—c)。

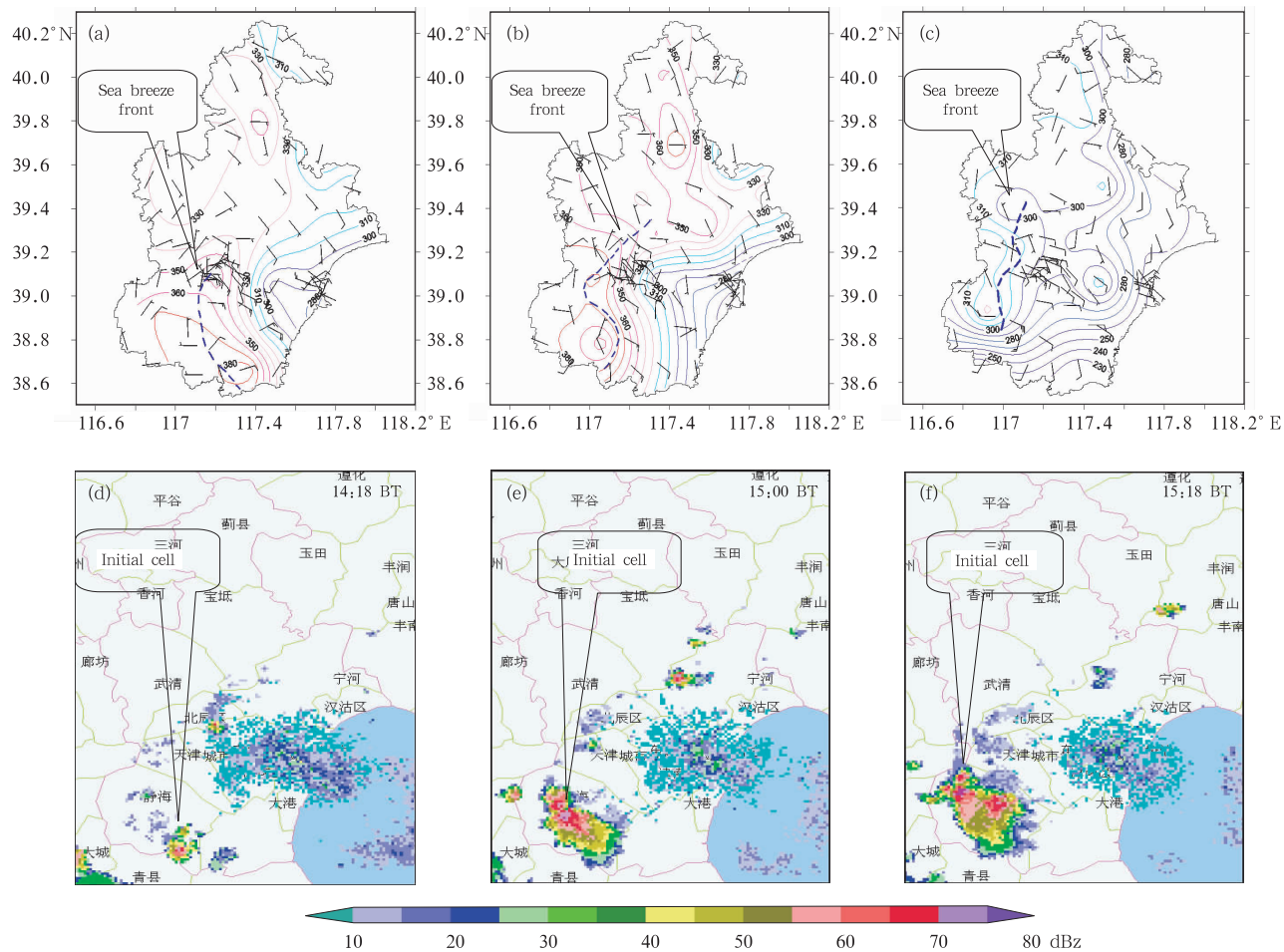

图1 (a—c)12、13、14时的SWEAT指数(实线，最大值400、最小值230、等值线间隔10)和12—13、13—14、14—15时的极大风速分布(虚线为海风辐合线)及(d—f)14时18分、15时00分、18分雷达反射率回波(仰角2.4°)

Fig. 1 (a)-(c) Distribution of the SWEAT(solid lines) and max wind field on ground (dashed line is for the sea breeze convergence line) at 12:00, 13:00 and 14:00 BT; and (d)-(f) the radar reflectivity (at the elevation of 2.4°) for the different times

$$I_{\mathrm{SWEAT}} = [12T_{\mathrm{d}}^{850\ \mathrm{hPa}} + 20(T^{850\ \mathrm{hPa}} + T_{\mathrm{d}}^{850\ \mathrm{hPa}}) - 2T^{500\ \mathrm{hPa}} - 49] + 2V^{850\ \mathrm{hPa}} + V^{500\ \mathrm{hPa}} + 125(S + 0.2) \quad (1)$$

SWEAT指数包含了低高层湿度、温度及风场信息；而且，考虑了环境风在垂直方向上的旋转。S为500与850 hPa风向差的正弦；T、T_{d}为不同高度上的温度和露点。

可见存在一条由渤海湾向西伸到内陆的低值舌(低能舌自12时已经出现，随时间逐渐向西伸入)，12—15时，西南部的静海地区始终为不稳定高值中心，13时更是达到400。在静海这一高不稳定区域内，存在着海风与其他风向形成的地面辐合线。对比图1d—f可知，14时18分，沿着辐合线，有多个γ中尺度对流单体初生，15时在高不稳定区，沿地面辐合线，单体发展为雹暴，15时18分不稳定程度减弱(SWEAT指数降为320)，雹暴由单一回波核心分裂减弱为多核的多单体雷暴。对比图1a—c可知，高不稳定区内的海风辐合线触发了γ中尺度对流单体，预警时间在2 h左右；γ中尺度对流单体的发展依赖高不稳定区提供的能量和地面动力辐合抬

升。由此可见,利用探空和自动站资料,分析不稳定区的分布和地面辐合线,关注辐合线的位置,是预警局地强对流天气有效的手段。

4 多单体雹暴演变

2008年8月28日多单体雹暴具有3个特殊性。(1)其发展演变伴有多次合并过程;(2)存在与超级单体雷暴相近的结构特征;(3)多个单体有各自生命周期,并有多个回波核。

图 $2a_1$—a_6 为不同时刻 -15℃温度层(约6 km高度)的反射率CAPPI图。图 $2b_1$—b_6 为沿 A 直线剖面得到RHI图,同样,图 $2c_1$—c_6、d_1—d_3 为沿 B、C 直线剖面得到RHI图像。从图2可以看到雷暴合并、降雹时,对流单体结构的细致变化。

14时42分—15时00分为独立型合并,即合并的两个雷暴单体从初生时间、强度等均没有联系。从图 $2b_1$—b_4 看到,南北两个对流单体不断接近,同时核心强度加强,14时42分两单体核心均在6 km高度,强度为55 dBz。14时48分核心加强为65 dBz,但高度有所降低,均为5 km高度;14时54分两单体合并,合并开始于6—10 km高度,回波强度大于45 dBz,两单体连接处不是在低空,这与Simpson等(1980)的观测结果不同,而与Cunning等(1982)的结果相近。15时00分为开始降雹时刻,两对流单体合并为唯一核心,65 dBz的核心范围增大,且高度上升至约9 km,从14时微波辐射计资料看,9 km的环境温度为-35℃左右,此时的雷暴云内含有大量的冰相粒子。

15时06分,图 $2c_5$ 可见悬垂状回波,核心强度65 dBz,位于7 km高度处(环境温度为-20℃左右),说明此时上升气流非常强盛。从图 $2b_5$ 看,65 dBz强回波已经及地,与地面降雹相对应。径向速度分布(图3)表明,在钩状回波附近的强降水区中存在一个强烈的中气旋,位于中层3.0—3.4 km,最大径向旋转速度达到30 m/s,为双涡式旋转结构(Moller,1994;刁秀广等,2009),这种深厚的内部环流结构有利于对流系统的维持。因为双涡管式结构形成近似刚体的风暴柱,使环境风绕其而过,不能进入其中。

本次过程中气旋维持时间并未达到超级单体的标准(Browning,et al,1960),但中气旋的出现,也说明对流系统具有上升和旋转运动。同时还反映出有界弱回波区、悬垂、V形缺口、钩状回波等超级单体多普勒雷达回波特征。

15时12分,图 $2b_6$、c_6 中,回波核心降至3—4 km(环境温度为0℃左右),65 dBz强回波都接地,中气旋相对径向速度明显降低,仅为11 m/s。此时雷暴云内的水成物粒子主要是水粒子。

对流单体合并的主要特征是云桥,云桥位置较低主要是因为合并单体中下沉气流造成的外流冷空气使周围暖湿空气抬升所致。而云桥的位置较高,甚至达到两个对流单体的头部,其原因可能是:当两单体靠近时,它们之间下沉气流由于相加作用而加强。根据流体力学中的柏努里方程"密度×速度=常数"的原理,对流单体之间空气密度会降低,而气压减小,单体间的区域和周围外界的压力差加大,从而加速其合并。尤其是顶部,上下及侧压差比其他部位都大,所以,头部最先降低且靠近,合并形成云桥。但是这仅是推论,还需要进一步证实。

值得注意的是,15时12分的图 $2b_6$ 上,大的对流单体北侧,一个最大反射率为30 dBz的小单体在3—6 km的中空处新生,距大单体的距离约为3 km,它是大单体内下沉气流抬升其前部的暖湿气团而形成的。所以,新生单体是大单体的子单体,大单体为父单体。图2、4记录了子单体与父单体的合并过程,发生在15时12—36分。

15时18分(图 $4a_1$ 和 b_1),子单体强度增强到35 dBz,核心高度上升至6 km,父单体核心高度也升高了3 km,此时父子单体间出现云桥,在3—8 km高度,回波强度30 dBz。15时24分(图 $4a_2$、b_2),子单体强度增强到45 dBz,核心高度上升至9 km,父单体强度增强到70 dBz,云桥在4—7 km,回波强度35 dBz。15时30分(图 $4a_3$、b_3),云桥在3—5 km,回波强度45 dBz。父子单体强度、核心高度都相同了,且子单体回波顶高度超过父单体。至15时36分(图 $4a_4$、b_4),父子单体合并,强回波核心趋于合二为一。

整个合并过程表明它们之间具有依附关系,Dennis等(1970)称这种类型的合并为喂养型,即父单体为附近的子单体成长创造了有利的局地环境。对于喂养型合并时,子单体之所以在父单体的呵护下发展的原因是:(1)强盛的父单体内部有很强的上升气流,在其上空存在辐散,辐散的区域虽然是局地的,尺度不大,但足以覆盖周围几千米、甚至十几

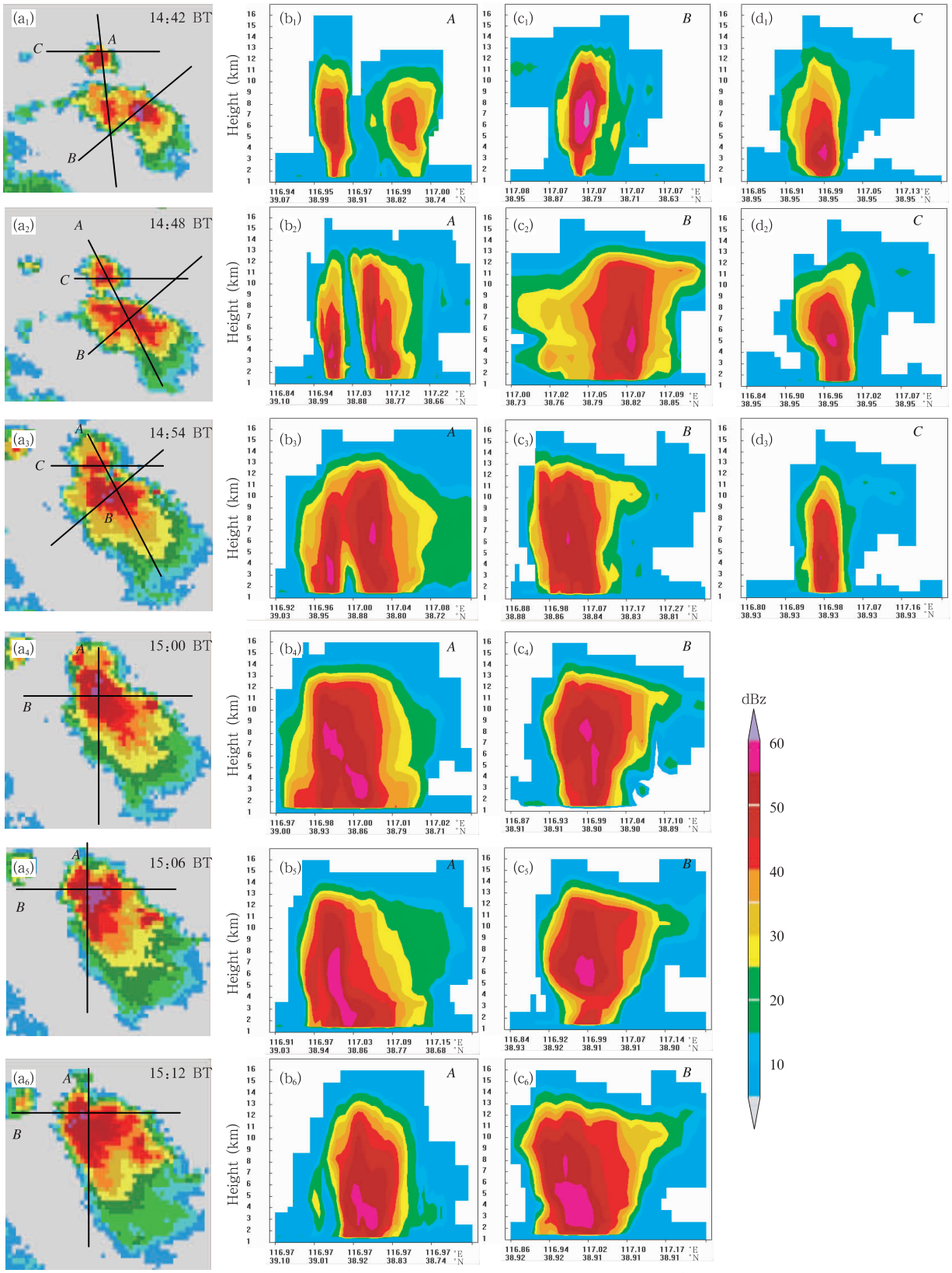

图 2 2008 年 8 月 28 日 14 时 42 分—15 时 12 分(a_1—a_6)-15℃高度(约 6 km)雷达回波和沿 A(b_1—b_6)、B(c_1—c_6)、C(d_1—d_3)直线的回波垂直剖面

Fig. 2 Radar reflectivity at the temperature height of -15℃ (a_1-a_6) and the RHI cross section along line A(b_1—b_6), B(c_1—c_6), C(d_1—d_3) respectively from 14:42 to 15:12 BT 28 August 2008

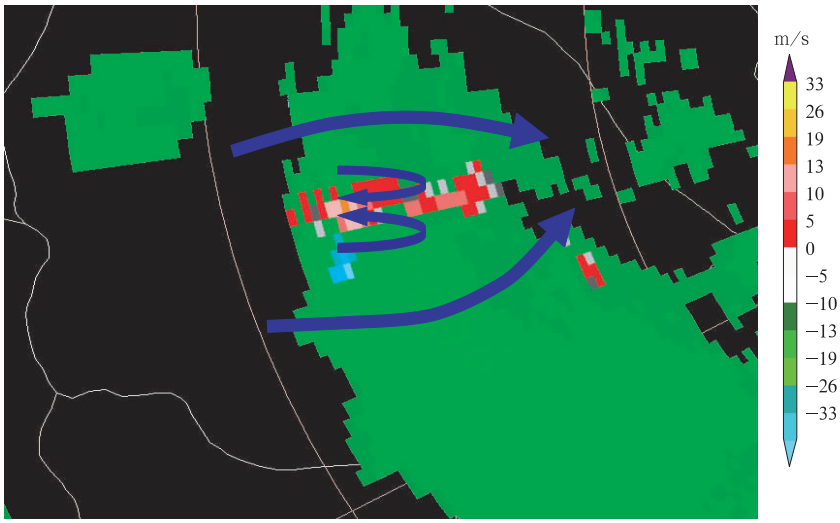

图 3 2008 年 8 月 28 日 15 时 06 分 3.0—3.4 km 处径向速度(仰角 2.4°)

Fig. 3 Radial velocity from the Doppler radar with the double vortex structure shown at the hight of 3.0 − 3.4 km at 15:06 BT 28 August 2008

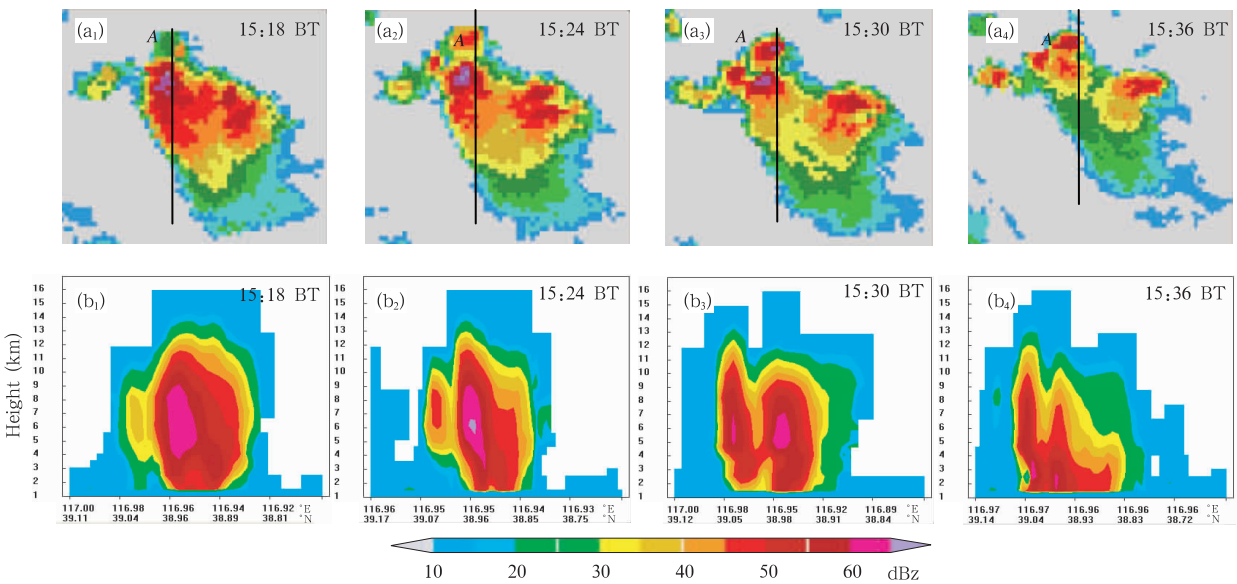

图 4 15 时 18(a_1、b_1)、24(a_2、b_2)、30(a_3、b_3)、36 分(a_4、b_4)在 −15℃层的雷达反射率回波(a_1—a_4)和沿 A 直线的雷达垂直剖面(b_1—b_4)

Fig. 4 As in Fig. 2 but from 15:18 to 15:36 BT

千米,这种局地辐散场的存在,有利于促进上升气流发展,为其附近的子单体发展提供了有利的动力背景。(2)由于强大父单体的存在,降水或降雹会使局地环境内湿度大增,从而为子单体的发展提供了水汽条件。但是,无论是动力条件还是湿度条件,其影响的范围均较小,所以,在没有更大范围能量补充下,局地能量更多地给予了子单体,而父单体则渐渐衰弱。

在关注合并的同时,从图 2a_4—a_6,图 4a_1—a_4 也看到从 15 时 00 分开始,多单体雷暴的回波核心(45 dBz 以上的强回波)就不止一个,同处于一个雷暴中。15 时 36 分,以两个核心为主体,分裂为两个雷暴单体,一个向东,一个向北。可见多单体雷暴中具有多核心,核心合并,促进其发展,核心分裂,加速

其消亡的特点。

5 用雷达参量描述多单体雹暴结构演变与闪电活动

雷达是目前获得雷暴结构信息最有效的工具之一，在研究灾害天气时，对流系统的结构常以雷达回波来描述；而闪电活动是强对流天气最基本的特征。因此，雷达闪电资料的运用，是掌握强对流天气系统及其演变的基础。近几年，中国学者对不同类型对流系统的结构与闪电活动的关系进行了研究。例如，对于带状中尺度对流系统，曹治强等(2005)、冯桂力等(2006)、袁铁等(2010)、Liu 等(2011)将闪电与雷达回波 CAPPI 资料进行水平叠加，认为闪电主要集中在 6 km 高度上，回波强度在 35—50 dBz 的区域内，在广大的层云区域闪电分布稀疏，但仍有正地闪存在。对于超级单体雷暴，郑栋等(2010)分析了闪电与雷达回波的垂直叠加，认为闪电集中在回波强度等值线梯度大的地方。在上述研究中，都试图应用雷达参量最有效地反映雷暴空间变化、内部动力过程和水成物粒子变化等信息。

本文应用一些新的雷达参量，以实现量化描述雷暴结构的问题，并依据非感应起电机制(Saunders，1993)理论，将雷达参量变化与闪电活动结合起来进行分析。这些雷达参量的垂直分布，在一定程度反映该时刻上升气流的强弱。回波处于温度层的位置决定了水成物粒子的性质，即以水滴为主，还是以冰晶为主。回波大值中心的高度反映云中的水成物粒子集中存在的高度。强回波核的面积或体积反映了雷暴云的发展程度。

5.1 描述多单体结构特征的雷达参量

Z_{max}：指定研究区域内，某一时刻每层反射率最大值(dBz)，反映了最大反射率核心所在的高度。

Z_{mean15}：指定研究区域内，某一时刻每层 15 dBz 区域内反射率的平均值(dBz)。反映某一时刻云内发展的整体强度，一定程度上反映云中水成物粒子的数量。

V_{40}、V_{50}：指定研究区域内，某一时刻每层间隔 40、50 dBz 区域内回波的体积(格点数乘以 1.23 km^3)。反映某一时刻强回波核的大小和所处的高度，在一定程度上反映了对流云云体的空间大小和降水强度。

图 5a—d 分别为上述雷达参量垂直分布随时间的变化。以下逐项分析。

分析 Z_{max} 和闪电频数序列(图 5a)可以看出：

(1)14 时 12 分—16 时 00 分，在 −20℃ 层以上始终有 50 dBz 以上的回波，特别在 14 时 36 分—15 时 12 分，−40℃ 层以上最大反射率均超过 55 dBz(黄色)。对照云闪和地闪频数曲线看，云闪频数陡增，且 55 dBz 回波越过 −40℃ 层高度(约 9.48 km)并持续 36 min、当其达到最高点之后，云闪和地闪频数出现了峰值。这表明冰晶被上升气流运送到较高处，并维持一段时间，有助于闪电的频繁活动。这一点从非感应起电机制的解释中可以得到答案。

(2)14 时 36—42 分和 15 时 24 分前后，Z_{max} 出现高层值大、低层值小的悬垂结构特征，说明这 2 个时次上升气流异常强烈，64 dBz 的回波达到 −10℃ 层高处。

(3)悬垂时刻过后，14 时 48 分—15 时 06 分和 15 时 30 分—36 分，在 0℃ 层以下出现 64 dBz 高强度回波，而地面站只记录到 15 时 00 分降 35 mm 大冰雹，对于 15 时 30 分前后，是否降雹则无记录。Z_{max} 垂直分布随时间的变化描述了高悬的冰晶(冰雹)降落或大量水滴的出现过程。

从 Z_{mean15} 和闪电频数序列(图 5b)可以看出：

(1)这次雹暴过程整体平均回波强度的最大值超过 36 dBz；34 dBz 回波区出现在 14 时 48 分—15 时 42 分，表明该阶段水成物粒子最多，此时段闪电也最为活跃，总闪数占整个过程总数的 82.7%，说明闪电活动与水成物粒子的多少有关。

(2) −20℃ 层以上回波平均强度达 25 dBz，说明此阶段上升气流强盛。25 dBz 回波区与云闪频数变化趋势一致，特别在 14 时 48 分和 15 时 00 分出现的 2 个峰值分别对应 12 min 后的云闪频数峰值。

从 V_{40}、V_{50} 和闪电频数序列(图 5c、d)可以看出：

(1)V_{40} 也反映了雹暴在 14 时 48 分附近的悬垂结构，其他时刻强回波核均呈现塔状结构。强回波核体积和高度上峰值与闪电频数峰值相对应。15 时 06 分过后(既降雹以后)，在 0℃ 层之上，V_{40} 由

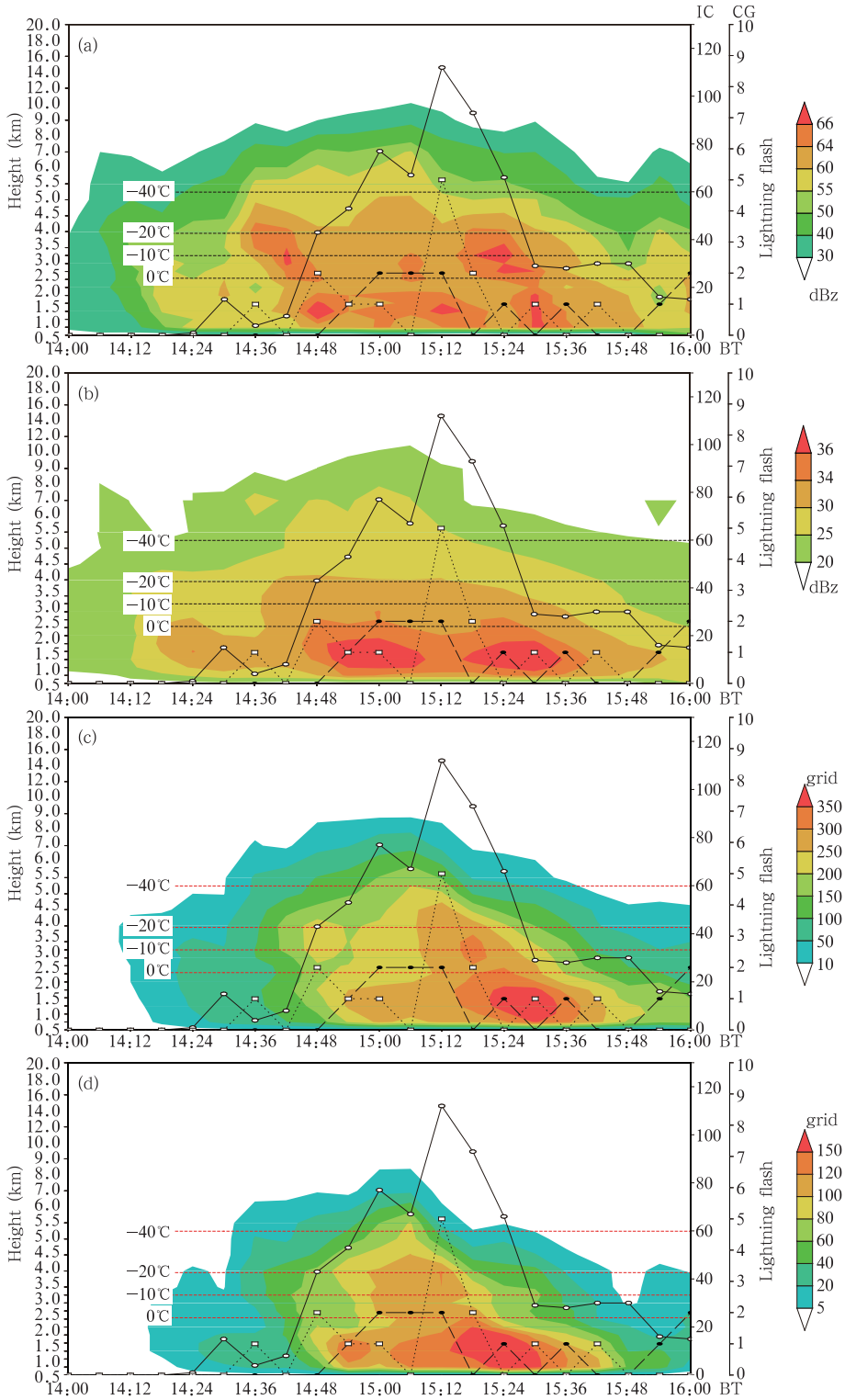

图 5 2008 年 8 月 28 日 14—16 时(a)Z_{max}、(b)Z_{mean15}、(c)V_{40}、(d)V_{50}的垂直剖面演变(色标,1 grid≈1.23 km^3)和闪电频数(实线 6 min 的云闪,点线为负地闪数,短划线为正地闪数,虚直线为各温度层(单位:℃)高度;右侧纵坐标里边对应云闪,外边坐标对应地闪)

Fig. 5 Time-height cross sections of (a) the maximum reflectivity (Z_{max}, dBz), (b) the mean reflectivity (Z_{mean15}, dBz), (c) the 40 dBz reflectivity echo volume (V_{40}, 1 grid≈1.23 km^3), and (d) the 50 dBz reflectivity echo volume (V_{50}, 1 grid≈1.23 km^3) The 6 min average lightning flash rate is repeated for comparison right *y*-axis: inner is for ic lightning, outer is for ig lightning The heights of the different temperature are indicated in terms of the horizontal dashed lines with the corresponding temperature marked (solid line is ic lightning flash, dotted line is negative cg lightning, dot-dashline is positive cg lightning)

200 个格点增至 250 个，200 和 250 格点线高度伸展到 －20℃到 －40℃高度。表明降雹后积云仍在发展，空间范围庞大，强对流云核高度高、云中仍有大量冰晶存在，上升气流仍很强盛，因此，出现了闪电活动峰值。这进一步解释了闪电频数峰值出现在降雹后的原因，也说明降雹与闪电活动程度同是雷暴系统内部结构演变的外在的具体表现。

(2)$V_{40}\geqslant150$ 和 $V_{50}\geqslant60$ 个格点区与闪电频数变化有很好的对应。14 时 42 分—15 时 06 分格点数陡峭上升，强回波迅速发展，达到峰值。此外，15 时 18—30 分，V_{40}、V_{50} 的最大值中心（分别是 350、150 个）均出现在 0℃层以下，此时云内以雨粒子为主，且降水强度加强，但对应的闪电活动却急剧减弱。至于在闪电频繁活动后降水加强，这是否表示闪电信息对短时强降水的出现时间有预警意义，尚有待于进一步研究。

5.2 描述合并、降雹、闪电峰值与多单体雷暴结构变化的雷达参量

因为 －10—－20℃为起电层，所以，本例以 －15℃层为分界线计算变率。体积变率是后一时刻 V_{40} 与前一时刻之差，反映了强回波核的位置和大小变化幅度。

$V_{40\text{-Fup}}$：－15℃层高度以上 V_{40} 体积变率；$V_{40\text{-Fdown}}$：－15℃层以下 V_{40} 体积变率（图 6a）；S_{ET11}：回波顶高（ET，限制在 18 dBz）高于 11 km 的格点总和（图 6b），不仅反映了雷暴系统的发展高度，也反映了系统的大小，是描述系统旺盛程度的参量。

从图 6a 可知，14 时 48 分前，$V_{40\text{-Fup}}$、$V_{40\text{-Fdown}}$ 曲线的变化趋势几乎相同，说明这段时间多单体雷暴整体是发展加强的；14 时 48—54 分，$V_{40\text{-Fup}}$ 曲线达低谷，但变率为正值；对应图 1 可知此时为合并时刻。此时，在 －15℃层以上高度，40 dBz 强回波体积变化很少；可以推断，在两个雷暴合并短暂的瞬间，V_{40} 并没有迅速加大。表明合并抑制雷暴发展，但对雷暴整体强度的影响并不是很大。15 时 00—06 分（此时开始降雹），即合并后约 12 min，$V_{40\text{-Fup}}$ 达到最高点，说明此时强回波核所在的位置上升且体积剧增。对应图 2，此时多单体雷暴悬垂回波特征明显，冰粒子含量最多，上升气流最强。而且，此时 $V_{40\text{-Fdown}}$ 为负低谷，充分说明：此时强回波位置较高，只在 －15℃温度层以上旺盛发展，这与悬垂特征一致。15 时 06—12 分上述 3 条曲线均出现转折，$V_{40\text{-Fup}}$ 骤降，从正值峰值骤降至负值峰值，表明 －15℃温度层以上 V_{40} 迅速减少；$V_{40\text{-Fdown}}$ 开始增加，表明 －15℃温度层以下 V_{40} 体积增加，强回波核所处的高度随着降雹急剧下降。直到 15 时 12 分，$V_{40\text{-Fdown}}$ 达到极大，$V_{40\text{-Fup}}$ 达到极小值。可见用 $V_{40\text{-Fup}}$、$V_{40\text{-Fdown}}$ 恰当地展现了强回波核体积、位置的变化，并清楚地反映出对流单体合并的瞬间（6—12 min）及前后、降雹前后等，其结构演变特征。

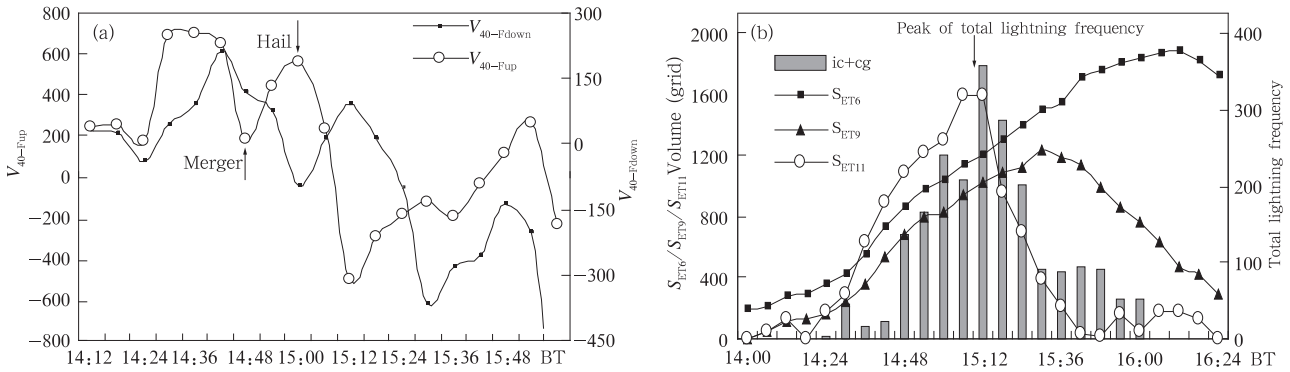

图 6 (a)$V_{40\text{-Fup}}$、$V_{40\text{-Fdown}}$ 时间序列与(b)S_{ET6}、S_{ET9}、S_{ET11} 总闪频数时间序列

（箭头所指合并、降雹和全闪频数峰值出现的时刻）

Fig. 6 (a)Curves for the time series of the radar-parameters of $V_{40\text{-Fup}}$, $V_{40\text{-Fdown}}$, and (b) Time series of the total lightning frequency radar-parameters of S_{ET6}, S_{ET9}, S_{ET11}

(arrows are for the time at which merger, hailfall or the peak of total lightning frequency)

图 6b 分别表示回波顶高于 6、9 和 11 km 高度处的格点总和,分别以 S_{ET6}、S_{ET9} 和 S_{ET11} 表示,直方图为总闪频数(为了对比明显,频数扩大了 3 倍)。从 3 条曲线和总闪频数曲线的变化趋势看,S_{ET11} 与总闪变化最为一致;从 3 条曲线达到最大值对应的时间上看,S_{ET11} 出现的时间最早,S_{ET9} 次之,S_{ET6} 最晚;而且,S_{ET11} 变化趋势超前闪电,因此,其最具预警意义。易笑园等(2008)在分析 3 个飑线对流系统时,也得到 S_{ET11} 与地闪频数正相关的结论。在描述多单体雷暴生命史和强度变化方面,S_{ET11} 更有优势,即 15 时 12 分之前,雷暴整体快速发展,之后,至 15 时 42 分进入消亡阶段。它与重力位势(张家国等,2008)一样能清楚地划分雷暴发展的不同阶段。

6 结 论

雷达、SAFIR3000 三维闪电定位系统、微波辐射计和加密自动站等观测资料,为深入了解中小尺度对流系统的结构及合并等细致过程,掌握降雹、闪电等灾害天气及雷暴系统结构演变的复杂关系提供了事实依据。本文对渤海西岸一个与海风辐合线有关的多单体雹暴的生成发展局地背景进行了分析,研究了多单体雹暴合并时的不同类型特征,并通过雷达参量量化雹暴结构演变及合并、降雹等物理过程,对比了结构变化与闪电活动的密切关系。得到以下主要结论:

(1)地面局地不稳定区配合湿冷海风辐合线是触发、促进雷暴生成发展的机制,局地背景对雹暴的预警时间达到 2 h。因此,渤海西岸地区强对流天气的预警,要关注湿冷的海风辐合线和局地高不稳定区的配合,这是激发普通雷暴、普通雷暴发展为多单体雷暴、超级单体雷暴有利的中尺度局地条件。

(2)γ 中尺度或小的 β 中尺度单体合并时有 2 种类型,即独立型合并、喂养型合并;二者成因的物理机制截然不同。根据流体力学中的柏努里方程"密度×速度=常数"的原理,对流单体之间空气密度会降低,而气压减小,单体间的区域和周围外界的压差加大,从而加速其合并。尤其是顶部,上下及侧压差比其他部位都大,所以头部最先降低且靠近,合并形成的云桥位置在云顶。喂养型合并时,父单体为附近的子单体成长创造了有利的局地环境。当有下沉气流遇地散开产生出流时,会激发出新的对流单体。合并时云桥有时在单体间的中空(4—6 km)、有时在高空(9—10 km)出现。

(3)独立型合并的瞬间(约 12 min 内),雷暴整体上升发展趋势受到抑制;合并后,重新加强发展。降雹和云闪频数峰值出现在独立型合并之后,而喂养型合并处在雷暴消亡阶段,闪电频数平稳下降。

(4)雷达参量 Z_{max}、Z_{mean15}、V_{40}、V_{50} 能较好地反映雹暴空间大小及结构的变化;反映了上升气流强弱、水成物粒子多少及其性质与灾害性天气的关系。$V_{40\text{-}Fup}$、$V_{40\text{-}Fdown}$、S_{ET11} 能很好地描述合并、降雹、闪电峰值时雷暴结构的变化。

致谢:感谢中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室王红艳高工提供的相关资料。

参考文献

曹治强,李万彪. 2005. 两个中尺度对流系统的降水结构和闪电特征. 气象学报,63(2):243-249

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. 气象学报,67(1):133-146

冯桂力,郄秀书,袁铁等. 2006. 一次冷涡天气系统中雹暴过程的地闪特征分析. 气象学报,64(2):211-220

付丹红,郭学良. 2007. 积云并合在强对流系统形成中的作用. 大气科学,31(4):635-644

黄美元,徐华英,吉武胜. 1987. 积云并合及相互影响的数值模拟研究. 中国科学 B 辑,(2):214-224

刘运策,庄旭东,李献洲. 2001. 珠江三角洲地区由海风锋触发形成的强对流天气过程分析. 应用气象学报,12(4):433-441

孙安平,张义军,言穆弘. 2004. 雷暴电过程对动力发展的影响研究. 高原气象,23(1):26-32

王昂山,赵小宁. 1983. 云体并合及雹云形成. 气象学报,41(2):78-84.

王俊,盛日锋,陈西利. 2011. 一次弓状回波、强对流风暴及合并过程研究Ⅱ:双多普勒雷达反演三维风场分析. 高原气象,30(4):1078-1086

王树芬. 1990. 一次由海风锋触发的强对流天气分析. 大气科学,14(4):504-507

言穆弘,刘欣生,安学敏等. 1996. 雷暴非感应起电机制的模拟研究Ⅰ:云内因子影响. 高原气象,15(4):425-437

易笑园,宫全胜,李培彦等. 2008. 华北飑线系统中地闪活动与雷达回波顶高的关系及预警指标. 气象,35(2):34-40

袁铁,郄秀书. 2010. 基于 TRMM 卫星对一次华南飑线的闪电活动及其与降水结构的关系研究. 大气科学,34(1):58-70

尹东屏,吴海英,张备等. 2010. 一次海风锋触发的强对流天气分析. 高原气象,29(5):1261-1269

张家国,万玉发,王珏. 2008. 风暴生命史雷达特征量反演. 应用气象学报,19(1):101-105

张义军,孙安平,言穆弘等. 2004. 雷暴电活动对冰雹增长影响的数值模拟研究. 地球物理学报,47(1):25-32

庄薇,刘黎平,薄兆海等. 2010. 新疆一次强飑线过程双多普勒雷达观测的中尺度风场结构分析. 气象学报,68(2):224-234

郑栋,张义军,孟青等. 2010. 一次雹暴的闪电特征和电荷结构演变研究. 气象学报,68(2):248-263

Browning K A, Ludlam F H. 1960. Radar analysis of a hailstorm// Tech noteno. 5, contract AF 61(052-254), Dept of Meteorlogy, Imperial College, London, 109pp

Cunning J B, Holle R L, Gannon P T, et al. 1982. Convective evolution and merger in the FACE experimental area: Mesoscale convection and boundary layer interactions. J Appl Meteor, 21(7): 953-977

Carey L D, Rutledge S A. 2000. The relationship between precipitation and lightning in tropical island convection: A C-band polarimetric radar study. Mon Wea Rev, 128(8): 2687-2710

Carey L D, Petersen W A, Rutledge S A. 2003. Evolution of cloud-to-ground lightning and storm structure in the Spencer, South Dakota, tornadic supercell of 30 May 1998. Mon Wea Rev, 131(8): 1811-1831

Dennis A S, Jameson C A, Koscielski A. 1970. Characteristics of hailstorms of western South Dakota. J Appl Meteor, 9(1): 127-135

Gauthier M L, Petersen W A, Carey L D. 2010. Cell mergers and their impact on cloud-to-ground lightning over the Houston area. Atmos Res, 96(4): 626-632

Lee B D, Jewett B F, Wilhelmson R B. 2006. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part2: Cell mergers and associated tornado incidence. Wea Forecasting, 21(4): 449-464

Liu D X, Qie X S, Xiong Y J, et al. 2011. Evolution of the total lightning activity in a leading-line and trailing stratiform mesoscale convective system over Beijing. Adv Atmos Sci, 28(4): 866-878

Moller A R. 1994. The operational recognition of supercell thunderstorm environment and storm structure. Wea Forecasting, 9: 327-347

Saunders C P R. 1993. A review of thunderstorm electrification processes. J Appl Meteor, 32(4): 642-655

Simpson J, Westcott N E, Clerman R J, et al. 1980. On cumulus mergers. Arch Meteor Geoph Biokl Ser A, 29(1-2): 1-40

Tessendorf S A, Rutledge S A, Wiens K C. 2007. Radar and lightning observations of normal and inverted polarity multicellular storms from STEPS. Mon Wea Rev, 135(11): 3682-3706

Westcott N E. 1984. A historical perspective on cloud mergers. Bull Amer Meteor Soc, 65(3): 219-226

Westcott N E. 1994. Merging of convective clouds: Cloud initiation, bridging, and subsequent growth. Mon Wea Rev, 122(5): 780-790