

雷暴单体合并进行中雷达回波参数演变 及闪电活动的特征分析*

易笑园^{1,2} 孙晓磊¹ 张义军² 郭玲¹ 王艳春¹

YI Xiaoyuan^{1,2} SUN Xiaolei¹ ZHANG Yijun² GUO Ling¹ WANG Yanchun¹

1. 天津市气象局,天津,300074

2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京,100081

1. *Tianjin Meteorological Bureau, Tianjin 300074, China*

2. *Key Laboratory of Weather Disasters, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2016-06-23 收稿,2017-06-19 改回.

易笑园,孙晓磊,张义军,郭玲,王艳春. 2017. 雷暴单体合并进行中雷达回波参数演变及闪电活动的特征分析. 气象学报, 75(6):981-995

Yi Xiaoyuan, Sun Xiaolei, Zhang Yijun, Guo Ling, Wang Yanchun. 2017. Evolution of radar parameters and lightning activity during thunderstorm cells merging. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(6):981-995

Abstract The merging of thunderstorm cells not only plays a very important role in the growth, intensification and maintenance of convective systems, but also has a close relationship with the development of severe weather. This paper analyzes the merging processes of a hailstorm event and a heavy rainstorm case respectively and summarizes the features of multiple samples. In total 23 samples are used. Detections of Doppler radar and SAFIR3000 lightning location system are selected for the present study. The method of radar parameters reconstruction is implemented to verify the phenomenon of "dump", which is the phenomenon that the volume of a convective cell with more than 40 dBz above 6 km often experiences a sudden decrease in the process of merging, and to reveal the lighting characteristics during the "dump" process. The results indicate that: (1) At the initiation of merging, most of the samples are below 5 km, which account for 86% of the total. From the perspective of time-consuming (from the time when the 30 dBz begins to converge to the moment when the strongest echoes merge into one), all the samples fall within the range of 6–36 min. The merging time is less than 12 min for 56.5% of the samples, while no more than 16% of the samples take 30 min for merging. After the beginning of merging, radar parameters of V_{40} (total volume above 40 dBz) and V_{40up-6} (total volume with more than 40 dBz over 6 km) experience increasing for 97% of the samples, and V_{40} increases by 7%–590% and V_{40up-6} increases by 3%–638%; 60.1% of the samples have the maximum value of V_{40up-6} appearing between 12–18 min, and 34.8% of the samples have the maximum value appearing between 24–36 min after the initiation of merging. (2) 87% of the samples demonstrate the feature of "dump" during the merging process, which occurs within 6–18 min after the initiation of merging for 77% of the samples. (3) In the 10 lightning samples, the lightning frequencies of nine samples experience "jump" or even reach the peak after the initiation of merging. The height of the main positive charge region of all samples decreases to some extent following the "dump" with the decreases within the range of 1–4 km, but the frequency of lightning remains almost unchanged.

* 资助课题:国家自然科学基金(41275044、41575049、41475050)、国家重点基础研究发展计划 973 项目(2014CB441406)、灾害天气国家重点实验室开放课题(2013LASW-9)、天津市自然科学基金青年项目(16JCQNJC07500)和天津市气象局“气象预报预警创新团队”。

作者简介:易笑园,主要从事中尺度灾害性天气预报预警技术和闪电资料应用的相关研究。E-mail: yixy123@sina.com

通讯作者:张义军,主要从事雷暴电学及雷电预警技术研究。E-mail: 87284025@qq.com

Key words Cell merging, Radar parameters, Evolution, Lightning activity, Statistical analysis

摘要 雷暴单体合并是促使对流系统成长、增强、持久的重要因素,合并与灾害性天气有着密切的关系。针对 23 次合并样本(其中有闪电活动的样本 10 例),利用多普勒雷达和 Safir3000 闪电定位系统的探测数据,基于雷达回波参数的构建与计算,分别以一次冰雹暴雨过程和一次强降水过程为例,对合并及雷暴系统的演变进行了物理过程分析,对所有样本特征进行了统计归纳。最后发现并验证了雷达回波参数 $F_{V_{40\text{up-6}}}$ (即 6 km 以上对流单体大于 40 dBz 体积的变率)常常在合并进行中出现突然减小现象,简称为“突降”;同时揭示了合并进行中闪电活动的特征。具体结论如下:(1)就合并最初开始位置而言,高度在 5 km 之下的样本最多,比例达 86%。从合并用时看(即 RHI 图中 30 dBz 回波开始衔接至最强回波合为一体为止),全都在 6—36 min,其中用时在 12 min 以内的占 56.5%;达到 30 min 的仅占 16%。合并开始后,在 97% 的样本中,回波参数 V_{40} (即大于 40 dBz 的总体积)、 $V_{40\text{up-6}}$ (即 6 km 以上大于 40 dBz 的总体积)出现增大; V_{40} 增幅为 7%—590%, $V_{40\text{up-6}}$ 增幅为 3%—638%; $V_{40\text{up-6}}$ 最大值出现时刻距合并开始时刻 12—18 min 的,占总样本的 60.1%;24—36 min 的,占总样本的 34.8%。(2)在雷暴单体合并进行中有“突降”现象的,占总样本的 87%;其中又有 77% 的“突降”出现在距合并开始后的 6—18 min 内。(3)在 10 个闪电活动样本中,有 9 个样本在合并开始后,闪电频数出现了“跃增”,甚至出现峰值;全部样本中参与放电的正主电荷区高度随着“突降”均有下降,降幅在 1—4 km,而此时的闪电频数几乎没有变化。

关键词 雷暴单体合并, 回波参数, 演变, 闪电活动, 统计分析

中图法分类号 P446

1 引言

雷暴单体合并是促使雷暴系统成长、增强、持久的重要因素,伴随着合并,闪电、冰雹、雷暴大风、短时强降水及龙卷等灾害性天气频繁出现。因此,研究合并过程的相关问题,对掌握灾害天气的发生发展规律、提升临近预警能力有积极意义。

合并是一个很复杂的非线性过程。从 20 世纪 70 年代开始,中外学者就开始运用雷达观测和数值模拟等技术手段,探索研究合并过程中雷暴系统的结构变化、物理机制及其与灾害性天气的联系等,大量已有的研究表明,合并与强对流天气有着密切的关系。Carey 等(2003)的研究指出:97% 的降水和混合冰团以及 100% 的云地闪来源于合并后的对流系统;超级单体和飏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)观测到有 54% 的龙卷出现在合并前后的 15 min 内。Tessendorf 等(2007)、Gauthier 等(2010)均发现:在合并后约 10 min,出现正地闪频数峰值,且正地闪在总地闪中的比例出现激增。中国的科研人员也关注到:冰雹、雷暴大风、短时强降水、强闪电等灾害性天气时常与合并相伴出现(胡雯等,2010;易笑园等,2012,2013;黄勇等,2015)。

对雷暴单体合并的许多认识是基于雷达图像的定性观测和模式模拟结果。研究的着眼点主要有三

个方面:一,关注云桥(或云桥单体)的位置及物理机制。雷达资料分析(Simpson,1980;Westcott,1984,1994)和数值模拟结果(Tao, et al,1984,1989)均指出:低层云桥(或云桥单体)是由于下沉气流到达地面后形成冷池外流,从而在两个对流单体间激发出新的回波扰动气压场的分布(与冷池出流有关)在合并中起作用,水平气压梯度力(其方向是从新生的、弱的单体指向老的、强壮的单体)有助于上升气流的发展,而上升运动出现在冷池出流区域的上方。此外,云桥有时还在中层出现,高度在 4—5 km(Westcott, et al,1989;易笑园等,2013)或 7—9 km(Cunning, et al,1982;易笑园等,2012)。李艳伟等(2009)的模拟认为:从云中上部开始的合并是由于较强的风切变造成旋转倾向大于上升倾向的缘故。二,合并前后雷暴系统的结构变化。如云顶抬高、回波面积扩大、强回波核和扭转程度增强等(Simpson,1980;Westcott,1994;Lee, et al,2006)。三,合并与物理过程的关系。Tao 等(1984,1989)、付丹红等(2007)、翟菁等(2011,2012)的模拟研究均认为:合并会导致上升、下沉气流增强,云水及冰相物含量升高、地面降水增加等现象。黄勇等(2015)利用双偏振雷达也观测到:在中下部开始合并时,出现冰相粒子浓度升高的现象。

由于合并是一个过程,是在一段时间内完成的。而在已有的相关研究中,针对合并进行中,雷暴系统

在空间、气流及微物理变化少有提及,且针对合并后,以观测事实为依据提出雷暴系统定量变化的也很少。由多普勒雷达及拼图资料提供的高时空分辨率的雷达数据信息为更精细、定量地研究合并相关问题提供了条件。构建物理意义明确的回波参数是一种间接了解云内对流、降水、起电等物理过程的有效手段,易笑园等(2012,2013)、Xu等(2016)利用这种方法对雷暴结构与降水、强降水、闪电等强对流天气的关系进行了个例分析,发现:回波参数 $F_{V40up-6}$ (或 $F_{V40down-6}$) (6 km 以上(以下)对流单体大于 40 dBz 体积的变率)在合并进行中,会出现突然减小,简称“突降”。本文中筛选出 23 次雷暴单体合并的样本进行统计、验证,并针对挑选出的 10 个闪电资料质量达标样本,梳理了合并进行中闪电活动的变化特征,并应用非感应起电机制加以解释。

2 资料和方法

2.1 合并标准

确定合并开始和结束时间是量化分析的关键。不同合并标准对合并起止时间的判断会造成较大差异。在已有的相关研究中,合并标准多种多样,有的以雷达组合反射率 30 dBz 确定一个对流单体的外边界(Westcott, 1984; Gauthier, et al, 2010);有的是以某一高度上某一回波强度值来确定边界(Carey, et al, 2003; Bruning, et al, 2007; Lang, et al, 2008);Lee等(2006)以 0.5°仰角的最大反射率中心核的合并来确定;数值模式模拟研究一般以系统自定义的最小回波值(5 dBz)确定边界(付丹红等, 2007;李艳伟等, 2009;吕玉环等, 2012)。目前,还没有合并的统一标准或定义。

文中定义的合并标准是:在雷达垂直回波剖面(即 RHI)上,两个合并单体 30 dBz 回波边缘合围在一起,即是合并的开始,直到最强回波核合并,即是结束。这一标准的优点在于:(1)避免了极坐标下雷达回波在高度上的偏差;(2)鉴于合并开始位置各异的问题,RHI 比 CAPPI(某一高度上回波)更准确,能及时地判定合并起、止时间和位置。

2.2 所用资料

雷达探测资料源于天津塘沽(39.04°N, 117.717°E)和北京大兴(39.81°N, 116.47°E)两部 S

波段多普勒雷达,如图 1 中“▲”所示。雷达三维拼图资料为直角坐标系数据,水平分辨率 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$,即一个格点,垂直方向 21 层,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。

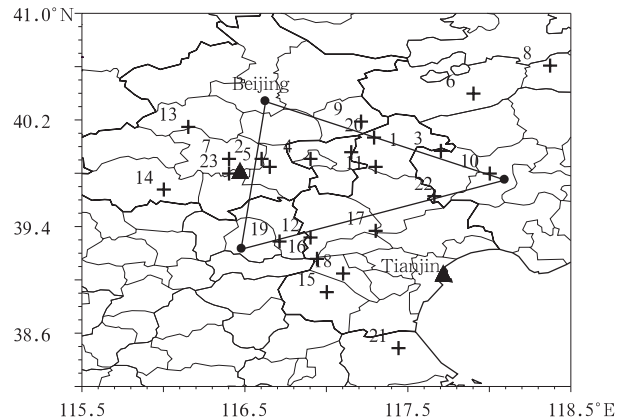


图 1 “+”为合并地点的位置,其左上方数字代表过程编号,“●”为 SAFIR3000 闪电定位系统子站位置,“▲”为多普勒雷达位置
Fig. 1 The symbol “+” indicates the location of merging, the number represents merging number, “●” shows the location of Safir3000 sub-station, “▲” is the location of Doppler radar

闪电资料源于 Safir3000 闪电定位系统,该系统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(即辐射脉冲发生的位置)的三维分布和云-云闪电(IC)信息,并结合低频(LF, 频率为 300 Hz—3 MHz)信息得到云-地闪电(CG)资料。它包括 3 个探测子站(图 1 中“●”)和一个中心站,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%,探测精度 500 m,时间分辨率 100 μ s。相关研究(Lee, et al, 2006;郑栋等, 2010;易笑园等, 2012, 2013;Liu, et al, 2011, 2013;Xu, et al, 2016)在处理闪电资料时遵循:(1)每条记录即一个辐射点。以第 1 行记录为基准,用第 2 行的记录与第 1 个记录比较,只有满足(时间 ≥ 100 ms 和距离 ≥ 7 km)时才认为是另一闪电,否则为同一次闪电。(2)将每个辐射点记录中,从右向左第 13 列,4 被认为是首次回击,5 被认为是继后回击,将标记为 4、5

的认为是地闪。(3)只有电流强度超过 10 kA 的地闪,才被当作正地闪,否则认为是云闪。考虑到一次云闪会有很大尺度的空间伸展,并包含很多个辐射点,文中将被比较的第一个辐射点记录的经纬度认定为此次闪电的水平位置。研究中只考虑所选水平范围内云闪个数;关注辐射点聚集高度随时间变化的差值,忽略其高度的确切位置,回避了资料在垂直向上的系统定位误差。另外,为了确保所选闪电资料的定位精度和可供研究的数量,通过将云闪、地闪及辐射点的水平位置与相应时刻雷达回波图进行叠加,进行全程跟踪。

2.3 雷达回波参数和闪电参数

V_{40} 或 S_{40-H} : 21 层中每层回波强度不小于 40 dBz 的区域围起的体积或面积。它们反映某一时刻回波核的大小,间接地反映了回波发展的旺盛程度、雷暴云内水成物粒子的多少。各层 S_{40-H} 在垂直向分布勾勒出 40 dBz 强回波的外部空间轮廓。

V_{40up-6} 或 $V_{40down-6}$: 6 km 高度以上 10 层(或以下 11 层)40 dBz 强回波围起的体积。6 km 高度及以上的温度一般为 -15°C 至 -20°C , 此高度云中主要是冰相粒子(霰、冰晶、冰雹),而冰相粒子携带着不同极性的电荷。它们在一定程度上反映了云内上升气流的旺盛程度和冰相粒子的浓度。因为只有强劲的上升气流才能将大量的水成物粒子带到 -15°C 至 -20°C 的高度,丰富的冰相粒子又加强了回波强度。

上述回波参数的单位是单元,一个单元大小是水平 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$, 垂直高度为层与层间的厚度。即 6 km 以下垂直厚度 1 km, 一个单元约为 1.23 km^3 ; 6 km 以上垂直厚度 2 km, 一个单元约为 2.46 km^3 。

$F_{V40up-6}$ 或 $F_{V40down-6}$: V_{40up-6} 或 $V_{40down-6}$ 前后 6 min 间隔的变化量,即为变率。它反映了单位时间 V_{40up-6} 或 $V_{40down-6}$ 的增减幅度,其为正值反映了 V_{40up-6} 是发展增强的趋势;其数值减小反映了 V_{40up-6} 或 $V_{40down-6}$ 虽然有发展,但势头减弱;其为负值,说明不再发展。实际上,变率起着放大 V_{40up-6} 或 $V_{40down-6}$ 变化程度的作用。某时刻的 $F_{V40up-6}(t) = V_{40up-6}(t+1) - V_{40up-6}(t)$, 单位:单元/(6 min)。

F_{ic} 和 F_{cg} : 闪电频数,即 6 min 内云闪和地闪个数。它是表示闪电活动强弱的参数。

F 和 H : 某一高度上辐射点数量占总数的百分比,即为辐射点密度百分率 F (单位:%);在垂直高度上 F 最大值所在的高度,常被认为是参与放电的主正电荷区所在的位置,即为 H 。

3 选取的合并样本及要素特征

(1) 选取有单体合并现象的强对流天气过程。由于在分离单体时,回波顶高(ET)图像比反射率图像更具优势,所以运用 ET 图来确定有合并现象的过程。

(2) 根据雷达反射率 RHI 图像,从中选择出单体生命史在 1 h 以上(不少于 10 个体扫)且相对独立、边界清晰的样本,共 23 次(表 1)。将合并类型分为 3 类:孤立合并的两个单体,称为 CC 型(cell-cell),共 12 个例子;合并的两个单体嵌在中尺度对流系统内,称为 CCM 型(cell-cell in MCS),只有 5 个;CCS 为多个对流单体聚集在一起,为单体群,共 6 个过程。

(3) 确定合并开始时刻,即图 2 中浅黄色区域(30 dBz)首次连接的时刻,包括云桥、合并单体间出现的云桥单体。如图 2a₂ 中 2014 年 6 月 6 日 12 时 48 分(北京时,下同),30 dBz 回波边缘在两单体间建立了云桥,高度在 3 km 附近,按照 2.1 节的规定确定此时为合并开始。合并结束以最大回波核合二为一且具有同一个强回波核来确定,如图 2a₇,合并结束时最大回波核为 50 dBz。

统计表明:23 个样本的合并用时均在 6—30 min, 12 min 以内的占总样本的 56.5%;而达到 30 min 的只有 4 次,仅占 16%。合并开始位置在低层(3 km 以下)、中层(4—5 km)、高层(7—8 km)的分别为 10、10 和 3 次。可见,合并开始位置在高层的比例很小,只占 13%,而其他两种各占到 43.5%。根据闪电资料对资料质量控制的要求(见 2.2 节),确定了 10 个具有闪电活动的样本。

4 雷达回波参数及物理过程分析

4.1 “2014.6.6”冰雹暴雨过程

从图 2a 可见,两个单体的合并是在 12 时 48 分—13 时 18 分,共 30 min。合并后在 13 时 24 分,回波开始增强发展,55 dBz 强回波核升到 5—9 km,出现

表1 合并样本、合并起止时间及时长、合并地点、合并结束时回波核强度、合并类型及云桥位置

Table 1 Date and number of the merging process, starting-ending time and duration, location, and echo core intensity at the end of merging, and cell type and height of cloud-bridge

序号	合并样本	合并起止时刻/时长(min)	合并地点	合并结束强度(dBz)	样本类型	云桥位置
1*	20040621-a	16:42—17:00/18	三河市(39.91°N,117.15°E)	40	CC	上
2*	20040621-b	16:48—16:54/6	朝阳区(39.86°N,116.6°E)	45	CC	下
3*	20040621-c	17:36—17:54/18	蓟州区(39.92°N,117.7°E)	50	CC	中
4*	20040621-d	17:18—17:24/6	香河县(39.86°N,116.9°E)	50	CC	中
5*	20040622	18:42—19:00/18	通州区(39.8°N,116.65°E)	50	CC	下
6	20050531	16:36—16:48/12	兴隆县(40.35°N,117.9°E)	40	CCM	下
7*	20050612-a	22:30—22:36/6	东城区(39.86°N,116.4°E)	40	CCS	下
8	20050612-b	23:30—23:36/6	兴隆县(40.56°N,118.37°E)	45	CC	中
9*	20050708	22:48—23:18/30	平谷县(40.14°N,117.21°E)	45	CCM	下
10	20050711	13:12—13:24/12	丰润区(39.75°N,118°E)	45	CCM	中
11*	20060624	17:24—17:54/30	蓟州区(39.8°N,117.3°E)	40	CCS	中
12*	20060625	20:18—20:30/12	武清区(39.27°N,116.9°E)	35	CC	上
13*	20070718-a	05:42—06:00/18	顺义区(40.1°N,116.15°E)	40	CCM	中
14*	20070718-b	06:00—06:24/24	房山区(39.63°N,116°E)	45	CCM	中
15*	20080828	14:54—15:06/12	静海县(38.86°N,117°E)	60	CC	上
16	20110710	15:36—15:42/6	西青区(39.11°N,116.94°E)	40	CC	中
17	20110714-a	15:30—15:42/12	北辰区(39.32°N,117.3°E)	45	CCS	中
18	20110714-b	16:36—16:48/12	西青区(39.0°N,117.1°E)	45	CCS	下
19	20130811	16:36—16:54/18	廊坊市(39.24°N,116.71°E)	45	CC	下
20	20140606-a	12:48—13:18/30	蓟州区(40.02°N,117.29°E)	50	CC	下
21	20140606-b	15:30—15:48/18	黄骅市(38.44°N,117.44°E)	40	CCS	下
22	20140610-a	14:12—14:24/12	宁河县(39.58°N,117.66°E)	40	CCS	中
23	20140610-b	14:36—15:06/30	大兴区(39.75°N,116.4°E)	45	CC	下

备注: *表示有 safir3000 闪电数据且符合相关规则的样本。

了悬垂结构(即高层回波强且范围大,低层回波弱且范围小)。13时30—36分,高层强回波核进一步增强为60 dBz,低层出现有界弱回波区,即出现“穹隆”结构,这意味着上升运动非常强,降雹即将开始。13时42分,“穹隆”结构瓦解,强回波及地,说明此时降雹、降水已经开始;13时43分,蓟州区国家气象站记录到降冰雹,直径约8 mm。13时48分,强回波高度下降,回波强度明显减小。由图2b记录的13时30分—14时05分5 min间隔的降雨量可见:13时30—35分,仅降雨5.2 mm;13时35—45分雨强明显增大,10 min内降雨量达到36.9 mm;13时50分,降水开始减小;14时00—05分,5 min降雨仅为0.6 mm,整个降水过程仅维持约40 min,降雨总量62 mm,5 min最大降水量为18.9 mm,显然这是一次突发局地冰雹暴雨过程。

从图3a可见,从合并开始的12时48分到合并结束的13时18分, V_{40} 和 V_{40up-6} 曲线均呈增大趋势(图3a), V_{40} 在13时18分达到最大,此时距合并开

始时刻30 min;而 V_{40up-6} 在合并结束后仍继续增大,直到13时36分达到最大值,距合并开始时刻48 min。值得注意的是:在12时54分—13时(箭头①所指)和13时18—24分(箭头②所指),回波参数 V_{40up-6} (图3a虚线)的增长势头明显变缓,图3b中 $F_{V40up-6}$ 的曲线(实线)表明:12时54分(箭头③所指)和13时18分(箭头④所指), $F_{V40up-6}$ 同样在持续上升中突然减小,出现了所谓的“突降”。可见:箭头①与箭头③、箭头②与箭头④所指时刻, V_{40up-6} 出现增长变缓,而 $F_{V40up-6}$ 也出现“突降”。可见参数的变率起到了使变化凸出的作用。对照图2a雷达RHI可见,第1次“突降”(箭头①与箭头③所指时刻)正逢两个对流单体30 dBz边缘合并,而第2次“突降”(箭头②与箭头④所指时刻)恰恰发生在45 dBz强回波中心核合并的时刻。而在这两个时刻,地面观测站并没有观测到明显的降雨或降雹,也就是说云内水粒子基本没有缺失,因此,这种“突降”与降水无关。由于6 km之上强回波核的体积减小,

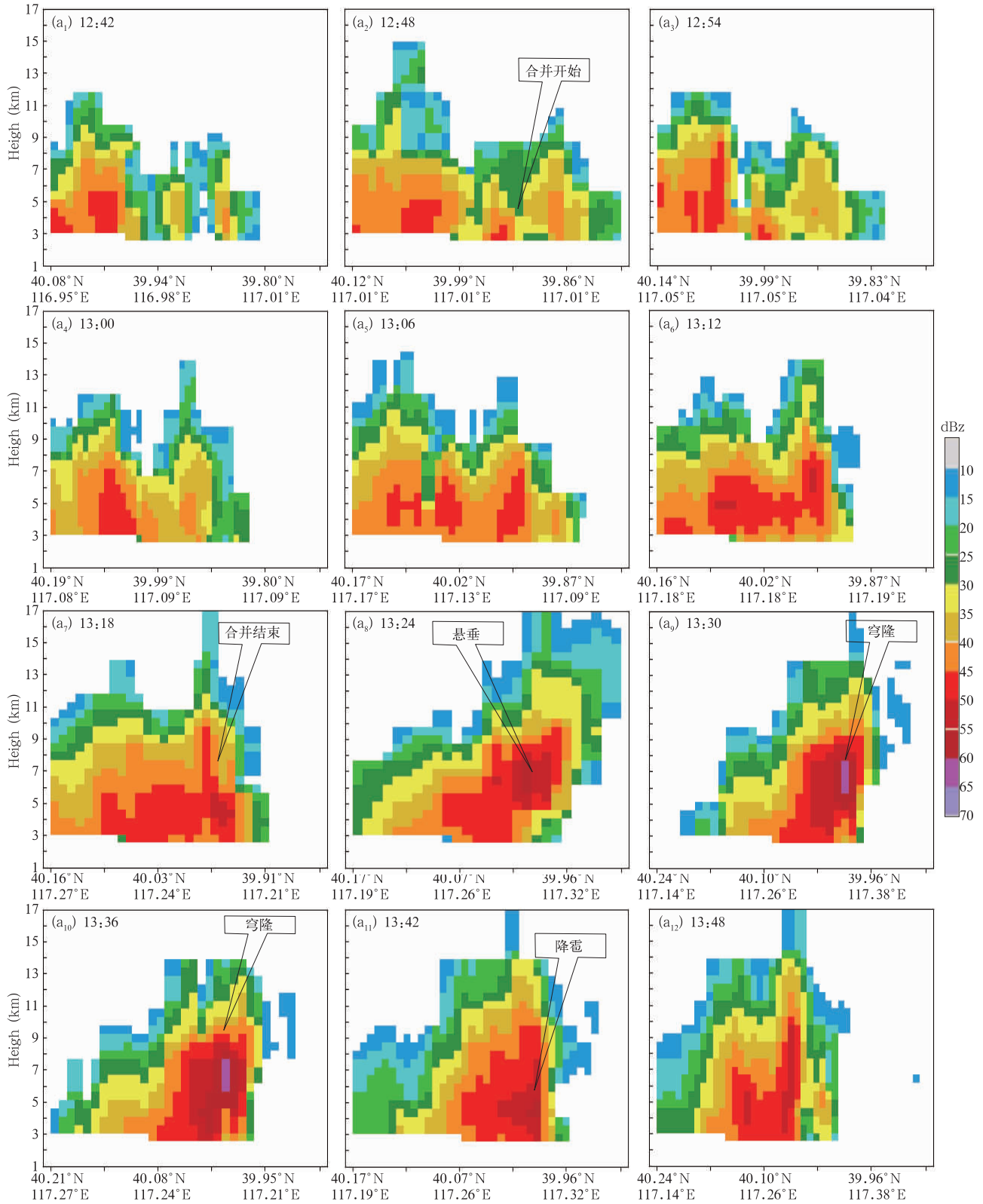
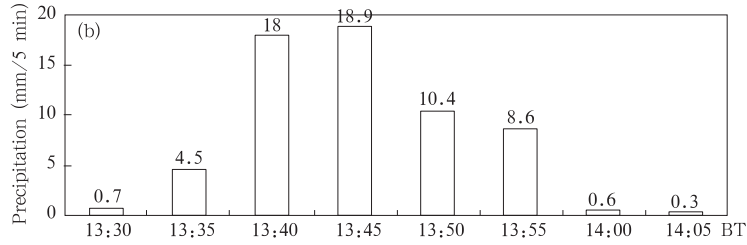


图2 2014年6月6日天津蓟州区的冰雹暴雨过程(12时42分—13时48分)

(a. 雷达回波 RHI 演变, b. 5 min 降雨量时序)

Fig. 2 Hail and rainstorm processes at Jizhou district in Tianjin on 6 June, 2014

(a. evolution of RHI echoes, b. time series of precipitation at 5-min intervals)



续图 2

Fig. 2 Continued

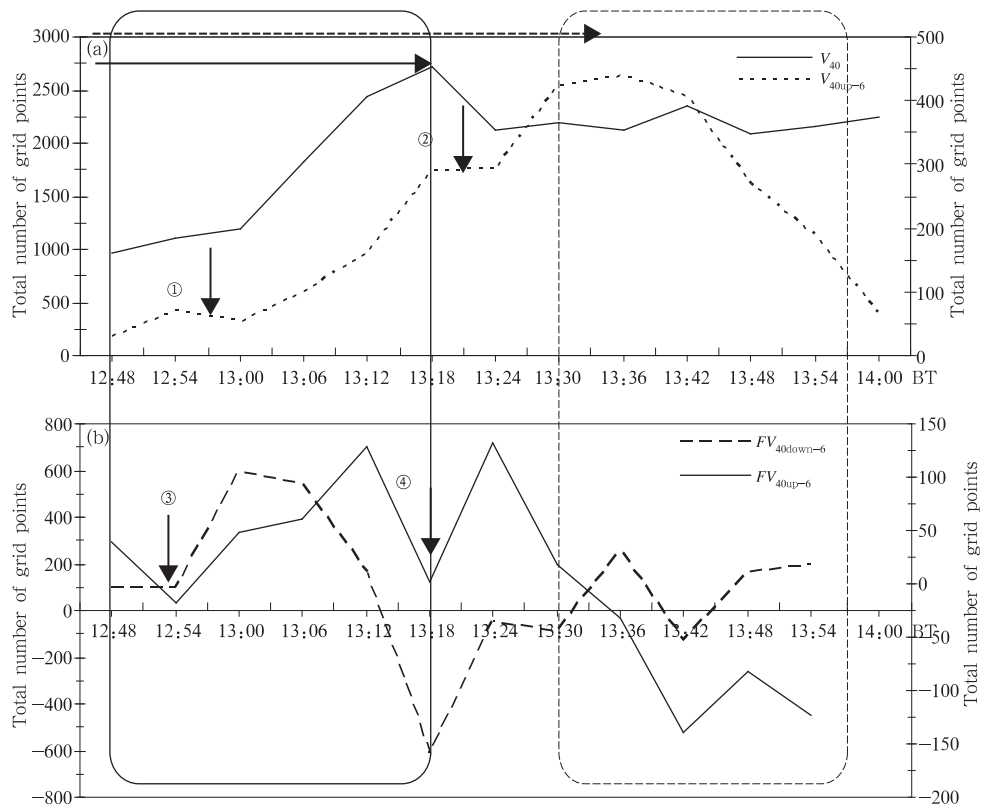


图 3 2014 年 6 月 6 日 12 时 48 分—14 时天津蓟州区冰雹暴雨过程雷达回波参数的演变

(a. V_{40} (实线, 体积以网格单元数表示, 左边坐标, 单位: 个, 下同) 和 V_{40up-6} (虚线, 右边坐标)

的时间序列, 水平的箭头线表明合并开始后, 雷达回波参数增大至最大值所用的时间;

b. $F_{V40down-6}$ (虚线, 左边坐标) 和 $F_{V40up-6}$ (实线, 右边坐标), 实线框: 合并时段;

虚线框: 降雹和暴雨时期; 1 号和 2 号箭头、3 号和 4 号箭头分别表示合并进行

中 V_{40up-6} 缓慢变化和 $F_{V40up-6}$ 的“突降”)

Fig. 3 (a) Time series of radar parameters of hail and rainstorm processes from 12:42 BT

to 14:00 BT at Jizhou in Tianjin on 6 June 2014 (The solid line is for V_{40} and

the dotted line for V_{40up-6} ; the horizontal arrows indicate the duration time from

the beginning to the time when maximum of V_{40} and V_{40up-6} appear)

(b) $F_{V40up-6}$ (solid line) and $F_{V40down-6}$ (the dotted line) (The box in solid line

is the period of merging and the box in dotted line shows severe

weather period. The arrows indicate the time of dump)

间接地说明了上升气流的强度在短时间内减弱,即在合并进行中,雷暴系统整体上升气流的强度被削弱了。王俊等(2011)利用双雷达反演出的气流情况进一步证明这是由于上升和下沉气流的相互作用所致。在合并结束后(13时24—36分), V_{40} 基本维持不变, V_{40up-6} 继续增大,并出现全过程的峰值,而 $F_{V40up-6}$ 和 $F_{V40down-6}$ 在此期间的变化呈反位相, $F_{V40up-6}$ 下降,同时 $F_{V40down-6}$ 上升,即高层强回波核体积变率出现正值但在减小;而低层强回波核的体积变率增大,甚至出现最大值,这说明:6 km高处以上强回波核体积仍在增大,但速度变缓,而以下强回波核体积变率为负,表明低层的强回波减小,这是悬垂结构构建的特征。13时36—42分, $F_{V40up-6}$ 为负值(图3b右坐标), $F_{V40down-6}$ 为正值(图3b左坐标),说明此时6 km以上强回波核体积减小,而以下强回波核体积增大,表明穹隆结构的瓦解,观测站记录到13时35—45分出现强降水,13时43分出现小冰雹(图2b)

4.2 “2005.7.8”强降水过程

根据北京国家气象站的观测:2005年7月8日22—23时,怀柔的杨宋站降雨量达77.1 mm,平谷金海湖站降雨量为35.5 mm。8日23时—9日00时,该站降雨量24.5 mm,顺义大孙各庄站降雨量36.4 mm。由此可知:8日22时—9日00时,北京东北部地区怀柔、平谷、顺义均出现短时强降水(即1 h降水量超过20 mm),但没有降冰雹的记载。

从图4a—d可见:在22时48分—23时18分的30 min内,云闪绝大多数落入回波顶高度在10 km以上的强对流区域内(红色区),且闪电数量大,资料质量完全达到研究要求。沿图4a—d中AB线做剖面得到RHI(图4e—h),按照2.1节的规定,确定合并时段自22时48分回波30 dBz开始连接,到23时18分最大回波55 dBz的汇合而结束。

从图6a看到: $F_{V40up-6}$ 在合并进行中出现了“突降”(22时54分—23时06分),与此同时 $F_{V40down-6}$ 出现了反位相,即6 km以上强回波核体积急剧减小,以下体积快速增大,表明上升气流的强度被削弱。而此时的观测事实是:22时54分—23时12分,北京东北部各区县有强降水出现。这种在合并进行中,不仅有“突降”,还伴有强降水的情况与4.1节“2016.6.6”冰雹暴雨过程不同。在“2005.7.8”过程中,上升气流的减弱有两种可能:一种是降水拖曳作用造成的;另一种就是合并,“突降”现象是上升气

流在合并过程中被削弱的表现。都是上升气流被削弱,然而合并与降水拖曳对上升气流的作用有明显的区别。原因之一是:当出现强降水时,下沉气流的增强会在一段时间内持续,上升气流不会快速反弹增强。而合并伴随的“突降”是短暂的,图6a表明 $F_{V40up-6}$ 在“突降”后会快速反弹,也就是上升气流在“突降”后快速加强。这种合并导致上升气流减弱的情形在付丹红等(2007)数值模拟的结果中也曾出现过。在其研究中,对流旺盛时期(即585 min时)最大上升气流突然出现了减弱,速度骤降5 m/s;而15 min后,上升气流就增大到34 m/s,重新达到45 min之前的强度。

4.3 统计特征分析

雷暴单体合并过程中,回波参数 $F_{V40up-6}$ 出现“突降”的特征是否具有代表性?在“突降”之后,系统结构又有怎样的变化?为了找到答案,依据表1中列出的23次合并样本,通过跟踪单体、划定范围、确定合并起止时间、计算回波参数等步骤,得到图5($F_{V40up-6}$ 值进行了归一化处理)。

据分析,23例样本中有20个 $F_{V40up-6}$ 演变出现了“突降”现象,占总样本的87%。因此,“突降”具有代表性,是合并进行中雷达回波参数出现的独特现象。图5a和b均为回波参数 $F_{V40up-6}$ 曲线在合并起止时间内出现“突降”的情形,图中曲线包括合并前(6 min)——合并开始(0 min)——合并后(24 min)的时间序列。

图5a包含10个样本,其共性是在合并“0”时刻, $F_{V40up-6}$ 曲线最先没有出现高正值,有3次出现最小值,即“突降”出现在合并开始时刻;还有5次最小值出现时间距合并开始的时间超过12 min。

图5b包含10个样本,其共性是在合并“0”时刻, $F_{V40up-6}$ 曲线最先出现高正值,随后的18 min内会有“突降”出现,时间为6 min的占9次。

图5c是 V_{40} 和 V_{40up-6} 在合并开始后增减幅度的情况,正值为增大,负值为缩小,由于每个过程表示体积的格点数差异很大,所以用%为单位。计算自合并开始时刻至回波参数达到首个峰值时的时间;如无峰值,则计算研究结束时刻或30 min后的参数值。从图中可见:合并开始后, V_{40} 和 V_{40up-6} 出现增强的样本分别占92%和96%,且增幅差别较大; V_{40} 增幅在7%—590%、 V_{40up-6} 增幅在3%—638%(2008年8月28日过程 V_{40up-6} 增幅1367%为特例未列入);

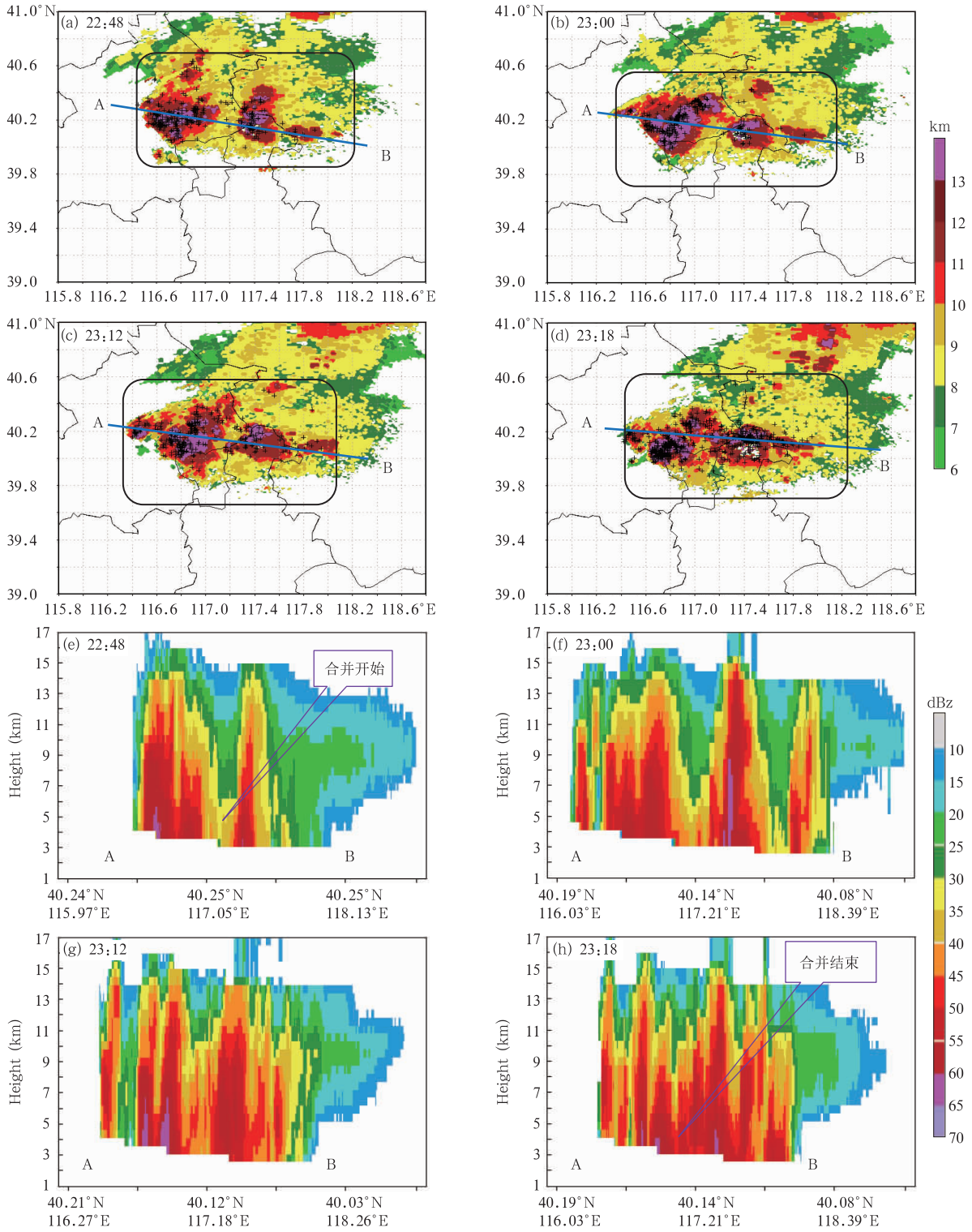


图4 2005年7月8日22时48分—23时18分京津北部地区强降水过程
 (a—d) 雷达回波顶高(色阶)与同时刻前后3 min内出现的云闪IC(“+”所示)叠加,
 黑色方框为研究区域;(e—h)沿AB做雷达回波剖面得到RHI

Fig. 4 Hail and rainstorm processes in the north of Beijing and Tianjin for 22:18 to 23:08 BT 8 July 2005
 (a, b, c, d) Radar echo top superimposed on IC flashes before and after 3 min;
 (e, f, g, h) evolution of RHI echoes along AB line

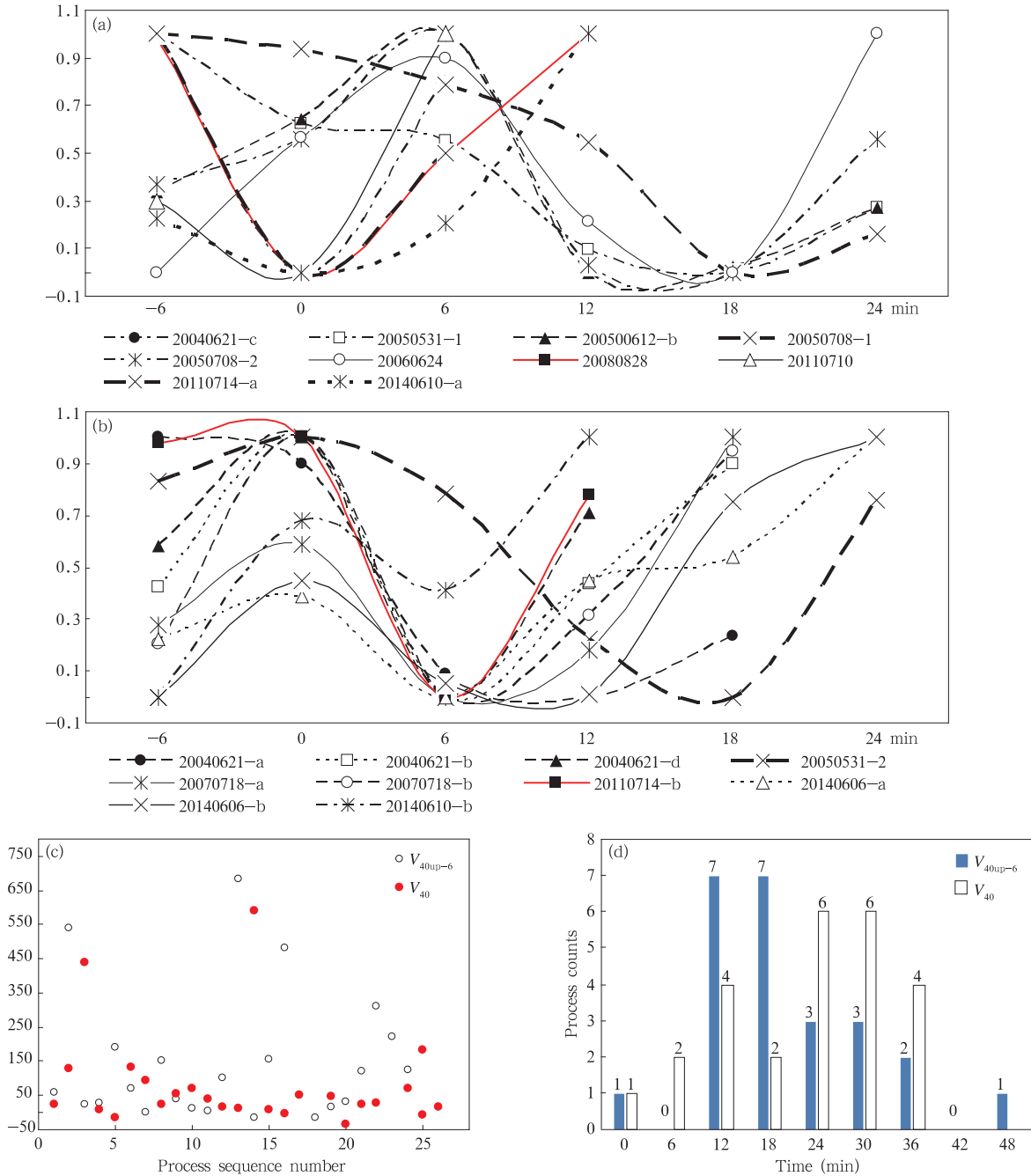


图5 (a)和(b)均为 $F_{V_{40up-6}}$ 在合并前后30 min内(合并前6 min—合并后24 min)的时间序列(归一化处理后), “0”时刻代表合并开始时刻;(c)20次合并过程中 V_{40} (实心点)和 V_{40up-6} (圆圈)在合并开始后增减幅度(正值为增加,负值为减少,单位:%), (d) V_{40} (空心柱)和 V_{40up-6} (实心柱)从合并开始时至其达到增幅最大值所用时间在各档的过程次数(单位:个)

Fig. 5 (a) and (b) Time of series of $F_{V_{40up-6}}$ (after normalized) in merging process. The number “0” indicates the beginning time of merging. (c) Increase and decrease in V_{40} and V_{40up-6} (positive values for increase and negative values for decrease, unit:%). (d) Process counts of time-taken by V_{40} and V_{40up-6} from initiation to the time of maximum occurrence (unit: number)

V_{40} 出现减小的仅有2次,分别是2011年7月11日(减小18%)和2014年6月10日a过程(减小

29%);而 V_{40up-6} 仅有1次减小,即2006年6月25日,减小13%。

图 5d 统计了从合并开始时刻到 V_{40} 和 V_{40up-6} 增幅最大值所用的时间 (T_{max})。 V_{40} 和 V_{40up-6} 在合并开始时刻就达到增幅最大值的样本仅有 3 次; 而有 20 次 T_{max} 大于 12 min。 其中, 就 V_{40} 而言, T_{max} 达到 24—30 min 的, 有 12 次, 最长的 36 min; 而 V_{40up-6} , T_{max} 达到 12—18 min 的, 有 14 次, 最长的 48 min。 V_{40} 和 V_{40up-6} 达到最大值时, 雷暴系统发展最为强烈。

5 雷达回波参数演变与闪电活动的关系

云内闪电活动的强弱取决于冰相粒子的密度、碰撞、电荷转移和分离等因素。 只有上升气流足够强, 才能将过冷却水带到高处, 凝结或冻结成更多的冰相粒子, 同时上升气流对冰晶和霰碰撞、转移电荷量以及冰晶弹开分离等方面均起着积极的作用(张义军等, 2009; Qie, et al, 2014)。 之前的分析表明, 雷达参数“突降”现象是合并过程中上升气流被削弱的表现; 而且在合并开始后, 绝大多数雷暴系统强烈发展。 那么, 闪电活动(包括闪电频数和参与放电的主正电荷区位置)在“突降”以及合并开始后的表现又如何呢?

5.1 个例分析

图 6b 为“2005. 7. 8”强降水过程云闪频数 F_{ic} 、总地闪频数 F_{cg} 和正、负地闪频数的演变。 由图 6a 和 b 可见: 合并进行中的“突降”出现在 23 时 06 分(箭头①所指), 此时对应的云闪频数略有降低(箭头②所指), 而地闪频数没有变化。“突降”过后 12 min, 23 时 12—18 分, 闪电频数骤升, 出现“跃增”现象; 24 min 后, 23 时 30 分闪电活动最为强烈, 出现频数峰值。 可见闪电活动的跃增出现在合并结束时刻, 且峰值出现在合并结束之后。 这与 Carey 等(2003)、Tessendorf 等(2007)、Gauthier 等(2010)的观测事实一致。

由于闪电的负极性脉冲比正极性脉冲强(一般大一个量级), 更容易被探测到。 因此, 辐射点最为集中(即密度最大)的区域即为负极性脉冲区。 根据双向先导传输模型, 负极性脉冲区主要发生在正电荷区(Shao, et al, 1996; Thomas, et al, 2001; Zhang, et al, 2002, 2006; MacGorman, et al, 2005)。 因此, 最大辐射点密度百分率(F)所在的位置被认为是参与放电的主正电荷区。 从图 6c—f 看到: 在合并进行中, S_{40} 垂直分布的整体形态没有明显变化, 始终

为枣核状, 最大值位置维持在 3 km 附近, 根据当天的探空资料, 此高度在 0℃ 层之下, 是典型的强降雨回波特征。 23 时(图 6c) F 垂直廓线, 锋值所在高度 H , 即主正电荷区为 10 km。 对比图 4f 可知, 此时合并自低层刚刚开始。 23 时 06 分(图 6d), H 下降到 8 km, 6 min 后(图 6e), 该高度略有回升; 到 23 时 18 分(图 6f), H 重新回到 10 km, 对照图 4h 可见, 此时最强回波核 55 dBz 已经合并在一起, 合并过程在此刻结束。 可见, 在合并进行中(22 时 48 分—23 时 18 分), 伴随“突降”出现的时刻(23 时 00—06 分), 参与放电的主正电荷区位置也随之下降, 降幅为 2 km, 表明主正电荷区高度受“突降”的影响很明显。

5.2 统计分析

从图 5c 可知, 在合并开始后, V_{40} 和 V_{40up-6} 出现增大, 这与闪电频数存在着怎样的联系? 接下来, 对这一问题进行讨论。

V_{40up-6} 增大表明, 6 km 以上(约低于 -15℃ 层)冰相粒子增多, 上升气流足够强盛, 致使大量过冷云水被带到高处。 V_{40} 增大说明雷暴云内水成物粒子(过冷水、霰、冰晶)密度增大, 为转化为冰相粒子提供保障。 也就是说, 合并导致上升气流增强, 进而加强了水汽转化, 形成更多的过冷云水和冰相粒子, 而足够数量和大小冰相粒子, 伴随着足以使冰相粒子上升到一定高度的上升气流, 是雷暴云内发生闪电活动的首要条件。 因此, V_{40} 和 V_{40up-6} 反映了上升气流、水成物粒子、冰相粒子变化。 从图 7 可见, 除了“2004. 6. 22”过程外, 其他样本在合并开始后, 云闪频数(F_{ic})、地闪频数(F_{cg})均出现增多, 甚至达到峰值, 其中有 7 次过程闪电频数峰值是在合并结束后出现的。 在合并进行时, 有 8 次样本中云闪频数曲线出现“突降”, 而地闪频数变化却不明显。

“2004. 6. 22”样本的闪电频数变化是个特例, 即在合并刚刚开始后(18 时 42 分), 云闪频数、地闪频数、正地闪频数均呈快速减少之势, 峰值则出现在合并开始时。 究其原因发现: 18 时 46 分, 大兴地面观测站记录到出现了直径 5 mm 的小冰雹, 且在 20 时之前还出现 23 mm 的强降水。 可知在合并开始后, 降雹(降雨)使冰相粒子数目迅速减少, 同时降水使下沉拖曳气流加强, 所以上升气流被明显削弱。 另外, 在 19 时以后, 主正电荷区高度(H)出现抬高(图略)而闪电频数(云闪频数、地闪频数)维持较低的状态。

况,这很可能是因为合并结束后,上升气流有所加强,致使 H 有所抬升,然而冰相粒子却由于降雹、降

雨而被消耗较多的缘故。

表2表明:伴随着雷达回波参数 $F_{V40up-6}$ 的“突

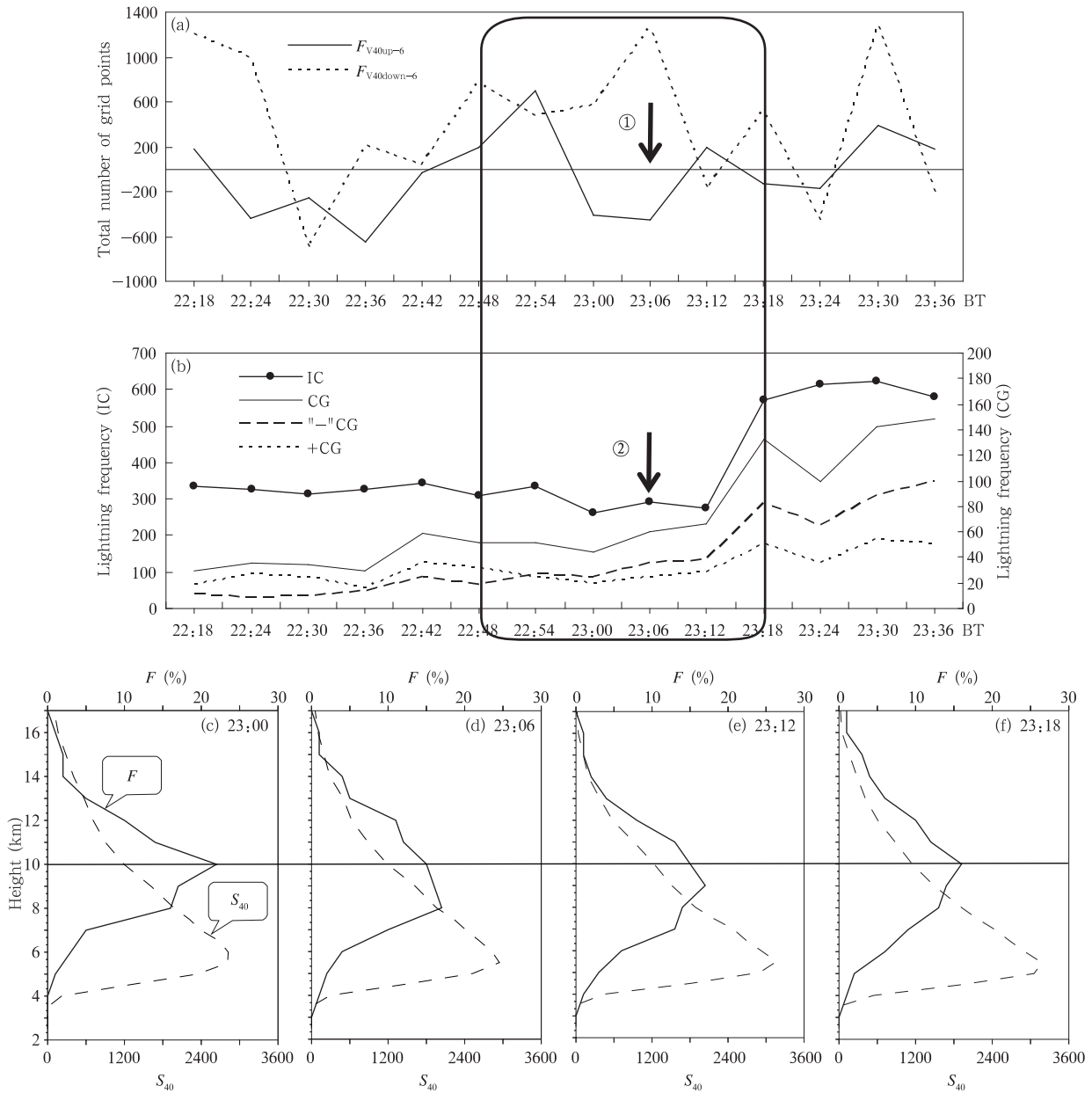


图6 (a) 雷达回波参数 $F_{V40up-6}$ (实线)、 $F_{V40down-6}$ (虚线) 时间演变 (实线框: 合并过程起止时间段, 箭头表示“突降”), (b) 闪电频数 (云闪、地闪、负地闪、正地闪) 演变; (c) — (f) 2005 年 7 月 8 日强降水过程中各时刻辐射点密度百分比 F (实线, 单位: %) 和 40 dBz 面积大小 S_{40} (虚线, 单位: 格点单元数) 的垂直分布

Fig. 6 (a) The red solid line indicates $F_{V40up-6}$, and the black dotted line indicates $F_{V40down-6}$. The solid box is the period of merging and the dotted box shows severe weather period. The arrows are the time of dump. (b) Evolution of lightning frequency (cloud-cloud flash, cloud-to-ground discharge, negative and positive CG). (c, d, e, f) Vertical distributions of the maximum percentage of density of radiation dots (F) during the merging process from 23:00 BT to 23:24 BT 8 July 2005 (The solid lines for F (%) and the dashed lines for S_{40} (point))

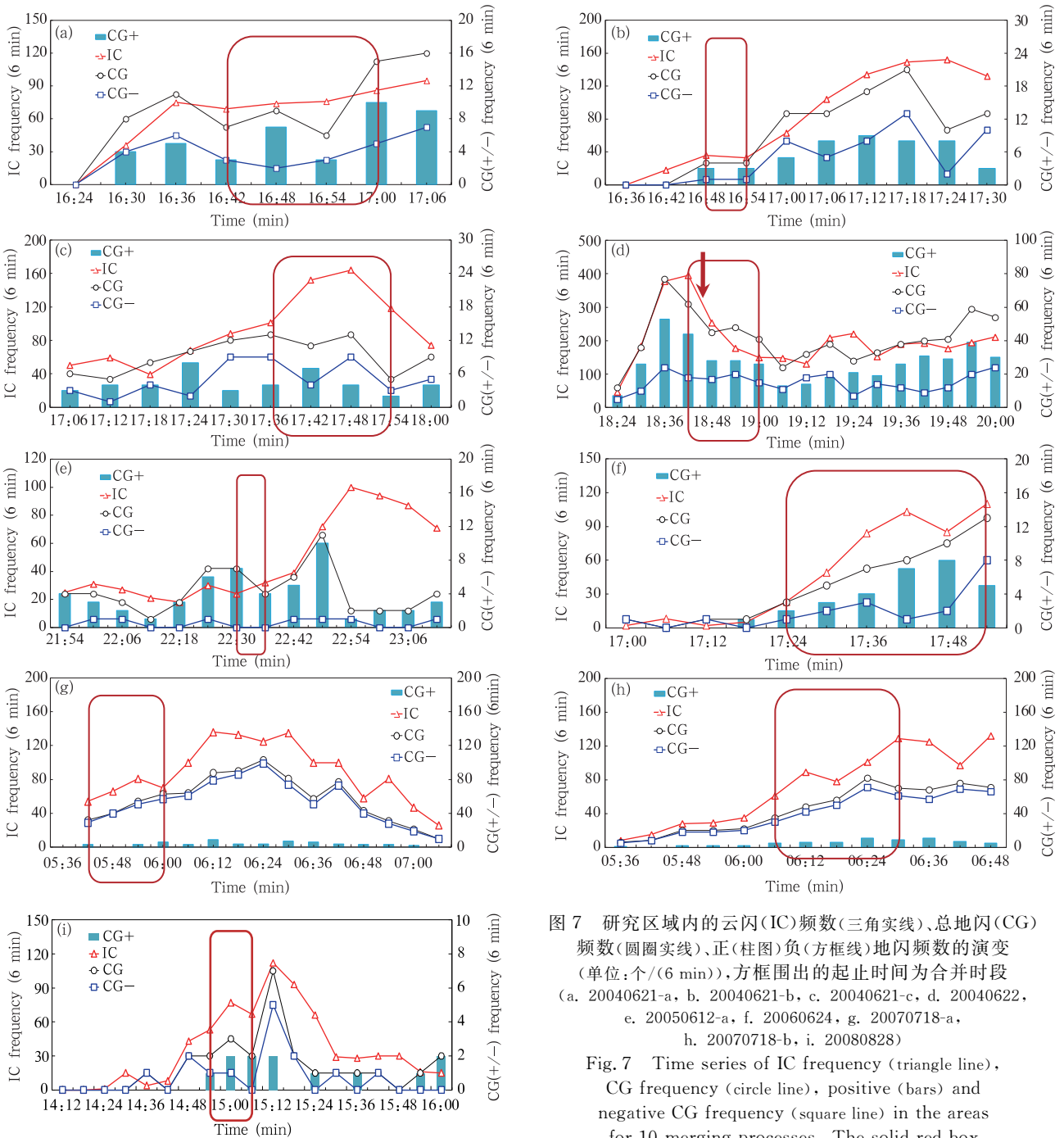


图7 研究区域内的云闪(IC)频数(三角实线)、总地闪(CG)频数(圆圈实线)、正(柱图)负(方框线)地闪频数的演变(单位:个/(6 min)),方框围出的起止时间为合并时段(a. 20040621-a, b. 20040621-b, c. 20040621-c, d. 20040622, e. 20050612-a, f. 20060624, g. 20070718-a, h. 20070718-b, i. 20080828)

Fig. 7 Time series of IC frequency (triangle line), CG frequency (circle line), positive (bars) and negative CG frequency (square line) in the areas for 10 merging processes. The solid red box indicates merging period (a. 20040621-a, b. 20040621-b, c. 20040621-c, d. 20040622, e. 20050612-a, f. 20060624, g. 20070718-a, h. 20070718-b, i. 20080828)

降”,10次样本中有9次主正电荷区高度(H)下降,降幅在1—4 km,一般在6—12 min后,又重新回到原先高度。影响参与放电的主正电荷区高度的重要因素是上升气流,当上升气流加强,电荷区被抬升;减弱时,反之。主正电荷区位置与“突降”时刻相呼

应的关系进一步反映了雷暴系统内上升气流是由于合并而被削弱了。因此,主正电荷区高度与雷达回波参数 $F_{V40up-6}$ 的同步变化传递出了一个信息,即闪电资料同雷达回波参数一样具有反映云内上升气流变化的能力。

表2 10次样本中合并进行时电荷垂直结构特征的统计

Table 2 Statistics of charge structure change in the 10 processes of merging

序号	合并过程	合并起止时间	“突降”时 H 下降时刻/高度差		“突降”后 H 回弹时刻/高度差					
1	20040621-a	16:42—17:00	16:42	-3 km	16:54	+2 km				
2	20040621-b	16:48—16:54	16:54	-4 km	17:00	+2 km				
3	20040621-c	17:36—17:54	17:48	-2 km	17:54	+3 km				
4	20040622	18:42—19:00	19:00	-1 km	19:06	+3 km				
5	20050612-a	22:30—22:36	22:30	-4 km	22:42	+3 km				
6	20050708	22:48—23:18	23:06	-2 km	23:24	+2 km				
7	20060624	17:24—17:54	17:42	-4 km	17:48	+3 km				
8	20070718-a	05:42—06:00	05:48/06:00 -1 km		06:06	+3 km				
9	20070718-b	06:00—06:24	06:06	-2km	06:18	-1 km	06:12	+2 km	06:30	+3 km
10	20080828	14:54—15:06	无	0 km	15:12	-1 km				

6 小 结

针对23次雷暴单体合并样本(其中有闪电活动的样本10个),利用多普勒雷达和Safir3000闪电定位系统的探测资料,通过构建和计算雷达回波参数的方法,分别以一次冰雹暴雨过程和一次强降水过程为例进行了详细的物理过程分析,并进行了统计归纳。最终发现并验证了雷达回波参数 $F_{V40up-6}$ 常常在合并进行中出现“突降”且具有一定的代表性;同时揭示了闪电活动与“突降”有着密切的关系。具体得出结论如下:

(1) 就合并最初开始位置而言,高度在5 km之下的样本最多,比例达86%。从合并用时看,所有样本都在6—36 min,其中用时在12 min以内的,占56.5%;不少于30 min的,仅占16%。合并开始后,在97%的样本中,雷达回波参数 V_{40} 和 V_{40up-6} 出现增大; V_{40} 增幅在7%—590%, V_{40up-6} 增幅在3%—638%; V_{40up-6} 最大值出现时刻距合并开始12—18 min的,占60.1%;24—36 min的,占样本的34.8%。

(2) 在雷暴单体合并进行中 $F_{V40up-6}$ 有“突降”现象的,占样本总数的87%;其中又有77%的“突降”出现在距合并开始后的6—18 min。有3例样本未出现“突降”现象,这可能与两个合并的雷暴单体处于各自不同的生命期有关或其他原因,有待进一步研究。

(3) 在10个闪电资料质量达标的样本中有9个样本在合并开始后,闪电频数出现了“跃增”,甚至出现峰值;全部样本参与放电的主正电荷区高度随着“突降”均有所下降,降幅在1—4 km,但“突降”对闪电频数影响不大。

鉴于目前直接监测雷暴云内动力场、微观场、起放电过程非常困难,借助高时、空分辨率的雷达和闪电资料及构建计算回波参数的方法,是间接了解雷暴系统内气流及微物理变化的有效途径。

参考文献

- 付丹红, 郭学良. 2007. 积云并在强对流系统形成中的作用. 大气科学, 31(4): 635-644. Fu D H, Guo X L. 2007. The role of cumulus merger in a severe mesoscale convective system. Chinese J Atmos Sci, 31(4): 635-644 (in Chinese)
- 胡雯, 黄勇, 汪腊宝. 2010. 夏季江淮区域对流云合并的基本特征及影响. 高原气象, 29(1): 206-213. Hu W, Huang Y, Wang L B. 2010. Characteristic and effect of convective cloud merger in Yangtze and Huaihe river basins in summer. Plateau Meteor, 29(1): 206-213 (in Chinese)
- 黄勇, 吴林林, 冯妍等. 2015. 两次对流云合并过程的双偏振雷达观测研究. 高原气象, 34(5): 1474-1485. Huang Y, Wu L L, Feng Y, et al. 2015. Two clouds merger cases observation by dual linear polarization radar. Plateau Meteor, 34(5): 1474-1485 (in Chinese)
- 李艳伟, 牛生杰, 姚展予等. 2009. 云合并的初始位置探讨. 大气科学, 33(5): 1015-1026. Li Y W, Niu S J, Yao Z Y, et al. 2009. Initial part discussion of cloud merger. Chinese J Atmos Sci, 33(5): 1015-1026 (in Chinese)
- 刘冬霞, 郗秀书, 王志超等. 2013. 飑线系统中的闪电辐射源分布特征及云内电荷结构讨论. 物理学报, 62(21): 219201-1-9. Liu D X, Qie X S, Wang Z C, et al. 2013. Characteristics of lightning radiation source distribution and charge structure of squall line. Acta Phys Sinica, 62(21): 219201-1-9 (in Chinese)
- 吕玉环, 李艳伟, 金莲姬等. 2012. 云合并过程中物理特征演变的模拟研究. 大气科学, 36(3): 471-486. Lü Y H, Li Y W, Jin L J, et al. 2012. Simulation of physical characteristics evolution in cloud merger. Chinese J Atmos Sci, 36(3): 471-486 (in Chinese)
- 王俊, 龚佃利, 刁秀广等. 2011. 一次弓状回波、强对流风暴及合并

- 过程研究 I: 以单多普勒雷达资料为主的综合分析. 高原气象, 30(4): 1067-1077. Wang J, Gong D L, Diao X G, et al. 2011. Case study of bow echo, severe convective storm and merger process I: Taking single Doppler radar data as a case. Plateau Meteor, 30(4): 1067-1077 (in Chinese)
- 易笑园, 张义军, 沈永海等. 2012. 一次海风锋触发的多单体雹暴及合并过程的观测分析. 气象学报, 70(5): 974-985. Yi X Y, Zhang Y J, Shen Y H, et al. 2012. Observational analysis of a multicell hailstorm triggered by a sea-breeze front and its merging process. Acta Meteor Sinica, 70(5): 974-985 (in Chinese)
- 易笑园, 张义军, 王红艳等. 2013. 线状中尺度对流系统内多个强降雨单体的结构演变及闪电活动特征. 气象学报, 71(6): 1035-1046. Yi X Y, Zhang Y J, Wang H Y, et al. 2013. Characteristics of the evolution of the severe rainfall cells structure in the leading line meso-scale convective system and the lightning activity. Acta Meteor Sinica, 71(6): 1035-1046 (in Chinese)
- 翟菁, 黄勇, 胡雯等. 2011. 强对流系统中对流云合并的观测分析. 气象科学, 31(1): 100-106. Zhai J, Huang Y, Hu W, et al. 2011. Observation and analysis on cumulus merging in severe mesoscale convective system. Sci Meteor Sinica, 31(1): 100-106 (in Chinese)
- 翟菁, 胡雯, 冯妍等. 2012. 不同发展阶段对流云合并过程的数值模拟. 大气科学, 36(4): 697-712. Zhai J, Hu W, Feng Y, et al. 2012. Numerical simulations of convective cloud merging processes at different development stages. Chinese J Atmos Sci, 36(4): 697-712 (in Chinese)
- 张义军, 言穆弘, 孙安平. 2009. 雷暴电学. 北京: 气象出版社, 324-333. Zhang Y J, Yan M H, Sun A P, et al. 2009. Electricity of Thunderstorm. Beijing: China Meteorological Press, 324-333 (in Chinese)
- 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. Zheng D, Zhang Y J, Meng Q, et al. 2010. Total lightning characteristics and the electric structures evolution in a hailstorm. Acta Meteor Sinica, 68(2): 248-263 (in Chinese)
- Bruning E C, Rust W D, Schuur T J, et al. 2007. Electrical and polarimetric radar observations of a multicell storm in TELEX. Mon Wea Rev, 135(7): 2525-2544
- 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
- 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
- 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
- Lang T J, Rutledge S A. 2008. Kinematic, microphysical, and electrical aspects of an asymmetric bow-echo mesoscale convective system observed during STEPS 2000. J Geophys Res, 113(D8): D08213, doi: 10.1029/2006JD007709
- Lee B D, Jewett B F, Wilhelmson R B. 2006. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part II: 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
- MacGorman D R, Rust W D, Krehbiel P, et al. 2005. The electrical structure of two supercell storms during STEPS. Mon Wea Rev, 133(9): 2583-2607
- Qie X S, Liu D X, Sun Z L. 2014. Recent advances in research of lightning meteorology. J Meteor Res, 28(5): 983-1002
- Shao X M, Krehbiel P R. 1996. The spatial and temporal development of intracloud lightning. J Geophys Res, 101(D21): 26641-26668
- Simpson J, Westcott N E, Clerman R J, et al. 1980. On cumulus mergers. Arch Meteor Geophys Bioklimato Ser A, 29(1-2): 1-40
- Tao W K, Simpson J. 1984. Cloud interactions and merging: Numerical simulations. J Atmos Sci, 41(19): 2901-2917
- Tao W K, Simpson J. 1989. A further study of cumulus interactions and mergers: Three-dimensional simulations with trajectory analyses. J Atmos Sci, 46(19): 2974-3004
- 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
- Thomas R J, Krehbiel P R, Rison W, et al. 2001. Observations of VHF source powers radiated by lightning. Geophys Res Lett, 28(1): 143-146
- Westcott N E. 1984. A historical perspective on cloud mergers. Bull Amer Meteor Soc, 65(3): 219-226
- Westcott N E, Kennedy P C. 1989. Cell development and merger in an Illinois thunderstorm observed by Doppler radar. J Atmos Sci, 46(1): 117-131
- Westcott N E. 1994. Merging of convective clouds: Cloud initiation, bridging, and subsequent growth. Mon Wea Rev, 122(5): 780-790
- Xu S, Zheng D, Wang Y Q, et al. 2016. Characteristics of the two active stages of lightning activity in two hailstorms. J Meteor Res, 30(2): 265-281
- Zhang Y J, Krehbiel P R, Liu X S. 2002. Polarity inverted intracloud discharges and electric charge structure of thunderstorm. Chinese Sci Bull, 47(20): 1725-1729
- Zhang Y J, Meng Q, Lu W T, et al. 2006. Charge structures and cloud-to-ground lightning discharges characteristics in two supercell thunderstorms. Chinese Sci Bull, 51(2): 198-212