

线状中尺度对流系统内多个强降水单体的结构演变及闪电活动特征^{* 1}

易笑园^{1,2} 张义军² 王红艳² 董昊¹ 张楠¹ 徐姝¹

YI Xiaoyuan^{1,2} ZHANG Yijun² WANG Hongyan² DONG Hao¹ ZHANG Nan¹ XU Shu¹

1. 天津市气象台,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 Observatory, Tianjin 300074, China*

2. *Key Laboratory of weather disasters, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2013-03-28 收稿,2013-08-22 改回.

易笑园,张义军,王红艳,董昊,张楠,徐姝. 2013. 线状中尺度对流系统内多个强降水单体的结构演变及闪电活动特征. 气象学报, 71(6): 1035-1046

Yi Xiaoyuan, Zhang Yijun, Wang Hongyan, Dong Hao, Zhang Nan, Xu Shu. 2013. Characteristics of the evolution of the severe rainfall cells structure in the Leading Line Meso-scale Convective System and the lightning activity. *Acta Meteorologica Sinica*, 71(6): 1035-1046

Abstract The data from the Doppler radar, SAFIR3000 lightning location system and high-density automatic meteorological stations observations are used to design a variety of radar quantitative parameters and analyze the evolution of cells structures, the lightning activity and electrical vertical structure of the severe rainfall cells structure in a Leading Line Meso-scale Convective System (LL-MCS). The relationship between convective cells and β -mesoscale LL-MCS is revealed. The conclusions are as follows. At first, the four cells (Gu'an in Hebei, Shunyi and Fangshan in Beijing, Baodi in Tianjin) in the single squall respectively brought rainfalls of about 23 mm, 50 mm, 27 mm and 70 mm in one hour. In the Fangshan cell, two smaller monomers were merged. The cell of Shunyi was followed by the other cell. In the Gu'an and Baodi cell, their development is related to LL-MCS by feeding and swallowing. Secondly, V_{40} (40 dBz echo volume range), V_{40UP-6} (40 dBz echo volume above the height of 6 km), S_{ETH1} (echo area range at 11 km level) could describe the 3D quantitative structure change of a cell, and F_{cg} (CG lightning frequency) and F_{ic} (IC flash frequency) were closely related to the radar parameters, such as its correlation coefficient with V_{40UP-6} being between 0.63 and 0.97. The flash frequency of IC was more sensitive than CG to echo structure change. Thirdly, the height of the radiant point maximum concentration area in the Gu'an cell was below 6 km, which was far lower than the other cells at the same stage. At last, the feature of lightning frequency of CG and lightning frequency of IC increased with the main positive charge area significantly lifted after the merger of convective cells, and the characteristics of the lightning frequency increase showing relationship with the rainfall intensity increasing as well as the lightning frequency peak leading the maximum of rainfall intensity have positive significance for warning of disaster weather.

Key words LL-MCS, γ -mesoscale convective cell, Structure evolution, Radar parameter, Lightning activity

摘 要 利用多普勒雷达、SAFIR3000 三维闪电定位系统和气象自动站等观测资料,以线状中尺度对流系统内多个 γ 中尺度强降水单体为研究对象,揭示了单体之间、单体与 β 中尺度线状对流系统的多种相互关系,设计多种雷达参量对单体的结构演

* 资助课题:公益性行业(气象)专项(GYHY201006005)、国家自然科学基金(41275044、41030960)、灾害天气国家重点实验室开放课题(2013LASW-09)、中国气象局预报员专项(CMATG2009YB04)。

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

变进行量化描述,进一步建立了对流单体结构演变与闪电活动的相互关系。得到以下结论:(1)线状中尺度对流系统内顺义、房山、固安、宝坻对流单体分别造成了1 h降雨23、50、27、70 mm,在其演变过程中,顺义单体被另一个单体追逐、供给,房山单体包括2个更小单体的合并过程,而固安、宝坻单体的初生和发展与线状中尺度对流系统是被喂养、吞食的关系。(2)设计的雷达参量 V_{40} (40 dBz强回波核的体积大小)、 V_{40UP-6} (6 km高度以上40 dBz强回波核的体积大小)、 S_{ET11} (回波顶在11 km处的回波范围大小)量化描述了单体的三维结构演变特征, F_{ic} (云闪频数)和 F_{cg} (地闪频数)与上述雷达参量关系密切,如与 V_{40UP-6} 的相关系数为0.63—0.97;而 F_{ic} 比 F_{cg} 更敏感地呼应单体结构的变化。(3)固安单体在成熟阶段,主正电荷区(即辐射点最大密集区所处的地方)维持在较低位置,远低于其他单体在成熟阶段主正电荷区的高度。(4)在对流单体合并后, F_{ic} 和 F_{cg} 增大且主正电荷区明显抬升、闪电频数陡增对应降水强度增大、闪电频数峰值超前于降水强度极值等特征,对灾害天气的预警具有积极意义。

关键词 线状中尺度对流系统, γ 中尺度对流单体, 结构演变, 雷达参量, 闪电活动

中图法分类号 P458.1⁺21

1 引言

线状中尺度对流系统(Leading Line Mesoscale Convective System, LL-MCS)包括飚线系统和尺度雨带两类,是雷暴、暴雨、冰雹和短时大风等强对流天气的重要制造者,其对流区常由众多尺度在几十千米的对流单体侧向排列集合而成(Houze, et al, 1990),在空间结构、生命期、移动等方面,这些对流单体既受制于更大尺度的线状中尺度对流系统,也有各自的独立性。近期中外学者的一些研究表明,与相近尺度的、孤立的雷暴单体相比,存在于线状中尺度对流系统内的对流单体既有其独特性,也有共性。刁秀广等(2011)曾统计了54个超级单体雷暴的结构特征,认为在最大反射率因子及其高度、回波顶高、垂直积分液态含水量等方面,孤立的超级单体均比嵌于中尺度对流系统内的超级单体要强大。Steiger等(2007)的研究也认为,在线状中尺度对流系统中,雷暴大风、雷达回波特征和闪电活动三者之间联系程度不如超级单体那样保持得持久;还推断这一对应关系的减弱是由于嵌在线状中尺度对流系统内的多个对流单体之间相互影响造成的。而潘玉洁等(2008)利用多普勒雷达分析发现,强飚线系统内的强降水区中存在一个同经典超级单体一样的中气旋,其起源于3.5—5 km高度,随后向上、下发展,最大旋转速度达到24 m/s,4—7 km高度以旋转为主,7 km以上为辐散出流。随着中小尺度监测技术的进步,中外学者将研究尺度从上百千米的 β 中尺度转移到几十千米的 γ 中尺度,特别是嵌于线状中尺度对流系统内且造成恶劣天气的对流单体,其演变规律越来越受关注。Lang等(2008)选取了飚线系统内1个造成大风的对流单

体和2个造成冰雹的对流单体,利用雷达和总闪电资料开展针对单体的电荷结构、微物理过程和动力作用等方面的研究。Weiss等(2008)利用闪电定位仪(LMA, Lightning Mapping Array)和E电场探空资料,研究了 β 中尺度对流系统内4个对流单体中的电荷分布,发现每个单体的电荷分布都不相同,电荷结构为2—6层不等,闪电活动也非常复杂。Zheng等(2010)利用SAFIR3000闪电资料研究了中尺度暴雨雨带中 γ 中尺度对流区范围内的电荷垂直结构。袁铁等(2010)在研究华南飚线内闪电活动与降水结构的关系时也将研究视角放在单体尺度上。与先前针对线状中尺度对流系统整体开展的相关研究(Goodman, et al, 1986; Rutledge, et al, 1988; Holle, et al, 1994; 曹治强等, 2005; 刘冬霞等, 2010; Liu, et al, 2011)相比,研究尺度减小,突出了处于不同发展阶段的各单体自身的演变特征、规律及其与冰雹、雷暴大风、强降水等的关系,弥补了整体研究线状中尺度对流系统时所得结论是多个对流单体共同作用结果的不足。

就对流单体而言,其内部存在着对流、降水(降雹)以及起电放电3种物理过程,分别对应着动力场(即气流运动速度场)、微观场(也称降水场,即各类相态水成物粒子的时空分布)、电活动(起电→带电粒子分离形成正、负电荷分布区→产生电场→放电),此3种物理过程必然有密切的关联。非感应起电机制(Takahashi, 1978; Saunders, 1993)认为,只有强的上升气流,才能将过冷液态水带到较高的高度,凝结为冰晶,并加速冰晶和霰的碰撞转移电荷,使不同的粒子携带不同种类的电荷,在自身重力、云内动力场的作用下产生分离,不同的电荷区叠加形成电荷结构,从而产生闪电活动。因此,闪电活

动既与对流系统结构及其变化有关系(如 Keighton 等(1991)分析表明,地闪活动和 6 km(约 -10°C 层)高度处对流云的面积(雷达参量 $S_{40\text{UP-6}}$)有很强的正相关),也与对流区降水有关系(如以 R_{PF} (Rainyields Per Flash)表征每个闪电代表的降水量,基于 SAFIR3000 资料,在北京地区的 R_{PF} 为 $2.65 \times 10^7 \text{ kg}$ (郑栋,2010a);西班牙的 R_{PF} 为 $(0.72-2.04) \times 10^7 \text{ kg}$ (Soula, et al,2001))。

近几年,多种中尺度探测设备的布设为研究尺度缩小为 γ 中尺度提供了前提条件,而运用多普勒雷达、北京 SAFIR3000 定位系统、加密自动站等观测资料,研究对流单体的结构演变和闪电活动特征及其之间的关系,对闪电资料在强对流天气预警中的运用具有积极意义。

2 资料和方法

2.1 资料

(1) 雷达资料源于北京 (39.81°N , 116.47°E , 31.3 m) 和天津 (39.04°N , 117.72°E , 70.3 m) 雷达三维组网拼图资料,包括直角坐标系下的基本反射率 (R , dBz)、回波顶高 (km), 时间间隔 6 min。雷达直角坐标系的水平分辨率为 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$, 面积约为 1.23 km^2 。在垂直方向, $0.5-5.5 \text{ km}$ 分为 11 层, 间隔 0.5 km ; $6-10 \text{ km}$ 分为 5 层, 间隔 1 km ; $11-20 \text{ km}$ 分为 5 层, 间隔 2 km , 共计 21 层。

(2) 闪电资料来源于北京 SAFIR3000 闪电定位资料。该系统用干涉法测量闪电产生的甚高频 (VHF, $110-118 \text{ MHz}$) 辐射信号, 提供闪电辐射点的三维分布以及云-云闪电信息, 并结合低频 (LF, $300 \text{ Hz}-3 \text{ MHz}$) 信息得到地闪资料。该系统包括 3 个探测子站 (永清、丰润、怀柔) 和一个中心站 (北京), 理论上 200 km 范围内定位误差小于 2 km , 探测效率可达 90% 。

为了获取闪电频数信息, 在处理闪电资料时遵循通用规则 (郑栋等, 2010b):

(a) 每条记录即一个辐射点。以第一行记录为基准, 用第 2 行的记录与第一个记录比较, 只有满足时间 $\geq 100 \text{ ms}$ 且距离 $\geq 7 \text{ km}$ 时才认为是另一闪电, 否则为同一次闪电, 然后再进行下一个记录比较, 直到满足该条件为止。当该闪电满足以上条件时, 认为是一次云闪。

(b) 在每个辐射点记录中, 从右向左第 13 列, 字符为“4”被认为是首次回击, “5”是继后回击, 将标

记为“4”、“5”的认为是地闪。

(c) 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。

另外, 考虑到一次云闪空间伸展尺度很大, 研究中不涉及云闪在垂直方向的位置, 只考虑某一时段所选水平范围内云闪的个数, 并认定被比较的第一个辐射点的经纬度为此次云闪的水平位置。为了确保所选对流单体内闪电资料的定位精度和可供研究的数量, 通过将 6 min 内云闪、地闪的水平位置与相应时刻雷达回波图进行叠加 (雷达回波时刻前后 3 min), 且全程跟踪, 从而选定研究单体。

(3) 地面自动气象站资料为 10 min 间隔, 包括风向、风速、温度、湿度、气压、降水量等要素。

2.2 方法

受目前探测能力制约, 难以实现直接探测对流单体内部上升运动的强烈程度、水成物粒子的性质和多少等, 但是, 通过科学分析多普勒雷达获得的对流单体回波结果, 能够间接地获得以上信息。如回波顶高度较高则反映对流单体发展旺盛, 其内部上升运动强烈; 强回波核 (大于 40 dBz) 范围大可能反映对流单体内部可降水粒子含量高、粒子大; 而强回波核在一定高度以上 (如低于 -10°C 、甚至 -20°C) 时可以推断其内部的水成物粒子相态为固态的冰晶和霰, 而不是液态的云滴。设置雷达参量是为了更恰当地、量化地描述对流单体或对流系统的结构及其变化, 这对于实现计算机快速甄别、资料同化具有深远的意义。

此外, 从非感应起电机和数值模拟 (言穆弘等, 1996) 可知, 水成物粒子性质、含量以及上升运动与起放电过程有着密切的关系, 而这种关系的量化首先要求选取物理意义明确且符合观测事实的雷达参量。

2.2.1 雷达参量 V_{40} 和 $V_{40\text{UP-6}}$

如图 1 所示, 圆柱体示意在某一回波强度范围内的云体 (如 40 dBz 强回波核) (图 1a), 直角坐标系雷达数据为格点数据 (图 1b), 水平切面的高度可任意选取 (如 6 km 或 0°C 、 -20°C 层处的高度等), 该切面与圆柱交面内网格点的总和为某一高度处 (H)、某回波强度范围内 (R) 的面积, 记为 S_{R-H} 。圆柱内由 21 层 S_{R-H} 组成, 每层之间的高度固定为 1 或 2 km , 所以, $V_{R-H} = S_{R-H} \times 1 \text{ km}$ 为每层体积, 各层体积总和定义为某一高度之上某回波强度范围内 (R) 的体积 $V_{\text{RUP-H}}$ (单位为个)。如 $V_{40\text{UP-6}}$ 指某一时刻

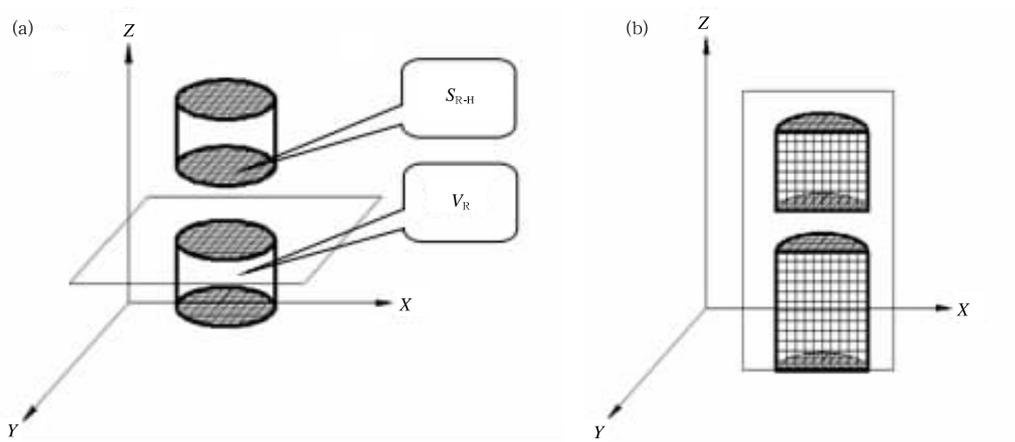


图1 利用直角坐标系雷达资料计算雷达参量的示意图
Fig.1 Schematic diagram for calculating the radar parameters using the radar data in the orthogonal coordinates

6 km 高度以上 40 dBz 区域的体积,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、旺盛程度、降水强度。

2.2.2 雷达参量 S_{ET11}

由于在对流系统中,各处的回波顶高度此起彼伏,有些相对独立,有些低层相连而高层独立。 S_{ET11} 代表回波顶高于 11 km 的所有网格点数的总和,反映了上升气流的强烈程度和系统体积发展庞大的程度。 S_{ET11} 越大,表明系统不但发展得高,而且范围也大。因此,雷达参量 S_{ET11} 描述了对流系统发展的旺盛程度。其“骤升和骤降”对应着对流系统的发展阶段和减弱阶段;峰值区对应的是对流系统的旺盛时期。还尝试了其他的雷达参量,并与以前中外学者提到的相关雷达参数进行了比较,如 S_{40-6} (6 km 高度处的强回波的面积,Keighton, et al, 1991),发现在本例中 S_{40-6} 与 S_{ET11} 的相关系数达到 0.92,说明二者物理意义相近,考虑研究的连续性(易笑园等,2009,2012),故仍然沿用 S_{ET11} 。

3 线状中尺度对流系统内各强降水单体的结构演变和闪电水平分布特征

2007 年 7 月 18 日 05—12 时(北京时,下同),北京、天津及河北东北部出现强降水,河北省 164 个乡镇雨量为 50—100 mm,38 个乡镇雨量在 100 mm 以上,最大雨强达 107.5 mm/h,部分地区出现了短时大风。天津宝坻总降水量达到 90 mm,最大雨强达到 70 mm/h;北京的密云和平谷也出现了 70 mm 以上的暴雨。宝坻自动气象站在 08 时 02 分监测到

有雹出现。此外,从 17 日 20 时北京探空曲线(图略)可以看出,925—700 hPa 为对流不稳定层,且 500 hPa 是最干区,这种上干下湿的湿度层结有利于不稳定天气的发生。17 日 20 时,3 km 高处的温度约为 13℃,5 km 高处的温度约为 0℃,7 km 高处的温度约为 -10℃,9 km 高处的温度约为 -24℃,11 km 高处的温度约为 -40℃。

3.1 强降水单体的确定

图 2a—f 分别为 2007 年 7 月 18 日 05 时 48 分—07 时 48 分间隔 24 min 回波顶高与云闪叠加的水平分布。可见,在线状中尺度对流系统内镶嵌着多个回波顶高明显高于周围的对流单体,回波顶高均达到 12 km(粉色)。根据研究时段内,各时次叠加图中闪电资料与雷达回波的对应情况及可供研究的数量确定了顺义、房山、固安和宝坻 4 个对流单体为研究对象。在线状中尺度对流系统的演变过程中,地闪(图略)、云闪的水平位置均与 4 个对流单体有很好的对应关系,绝大部分闪电落入回波顶高大于 11 km 的区域,说明所选 4 个单体的闪电资料水平定位精度较高,相关研究可靠。表 1 是根据观测资料列出的以上对流单体的影响地点、选取的范围、所处的演变阶段、降雨强度大小和起止时间(限于研究时间内)。降雨强度为自动气象站所记录的 1 h 内的降雨量,超过 20 mm/h 定义为强降水,可知,上述 4 个对流单体均为强降水单体。

3.2 强降水单体的结构演变

图 2a—f 反映了各强降水单体在线状中尺度对流系统中的水平分布,为了进一步了解各强降水单

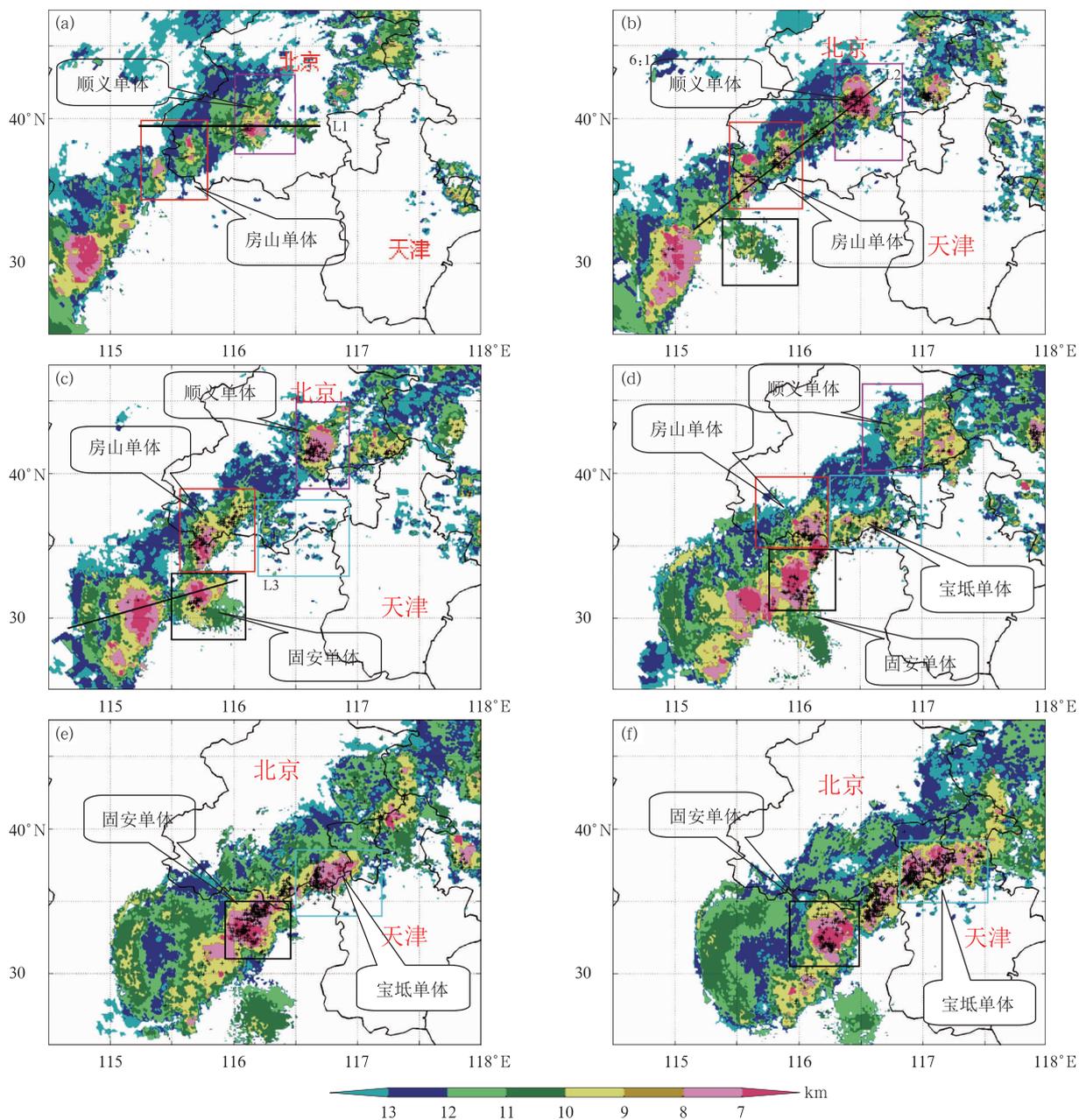


图2 2007年7月18日05时48分—07时48分回波顶高(阴影)与云闪(“+”号)叠加水平分布

(a. 05时48分, b. 06时12分, c. 06时36分, d. 07时00分, e. 07时24分, f. 07时48分; 粉色方框圈入的为顺义单体, 红色方框为房山单体, 黑色方框为固安单体, 蓝色方框为宝坻单体)

Fig. 2 Horizontal distribution of the echo top (shaded) and IC lightning (sign “+”) from 05:48 BT to 07:48 BT 18 July 2007 (Time interval is 24 min. Pink panes indicate Shunyi severe rainfall cell. Red panes indicate Fangshan. Blank panes indicate Gu’an, and Blue ones indicate Baodi)

体结构演变的细致过程, 沿着图 2a 直线 L1 做垂直剖面, 得到图 3a、b, 沿着图 2b 直线 L2 做垂直剖面, 得到图 3c—e, 沿着图 2c 直线 L3 做垂直剖面, 得到图 3f、g。运用回波顶高和 RHI(用来显示雷达垂直剖面图像的距离-高度指示器)分析各单体多样的演

变过程, 可知单体间、单体与线状中尺度对流系统的相互作用。

3.2.1 顺义单体

从图 2a 可见, 05 时 48 分在线状中尺度对流系统内的顺义单体的西侧有一个回波顶高约为 10 km

表 1 2007 年 7 月 18 日 05 时 36 分—08 时 24 分线状中尺度对流系统内 4 个强降水对流单体的特征

Table 1 A survey of the four severe rain cells in a squall line from 05:36 to 08:24 BT 18 July 2007

| 单体号 | 影响地点 | 经度范围 | 纬度范围 | 降雨强度 (mm/h) | 起止和 持续时间 | 研究时段 |
|------|-------------------|----------------------|--------------------|----------------|-------------------------------|-----------------|
| 顺义单体 | 北京城区、昌平、 顺义、密云 | 116°— 117.05°E | 39.7°— 40.6°N | 23 | 05 时 36 分—07 时 00 分 90 min | 初生—发展— 旺盛—减弱 |
| 房山单体 | 涿水、房山、 北京城区 | 115.25°— 116.20°E | 39.35°— 39.85°N | 50 | 05 时 36 分—06 时 48 分 78 min | 初生—发展—旺盛 |
| 固安单体 | 新城、固安、 霸州、永清 | 115.85°— 116.80°E | 39.0°— 39.7°N | 27 | 07 时 00 分—08 时 24 分 90 min | 发展—旺盛—减弱 |
| 宝坻单体 | 大兴、通州、香河、 天津宝坻 | 116.20°— 118.1°E | 39.25°— 40.2°N | 70 有大风 | 06 时 48 分—08 时 06 分 90 min | 初生—发展—旺盛 |

注:降水观测源于自动气象站,由于站点密度所限,该值不代表所选区域内最大降雨强度值。

的单体,称为 1 号单体,跟踪其演变可知,在之前 30 min 既已存在,从 RHI 上可见,1 号单体不断靠近顺义单体,05 时 36 分(图 3a)两单体均有独立的强回波核心,回波强度分别为 45 和 50 dBz。在 6 km 高度以下 30 dBz 回波(黄色区域)联为一体,35 dBz 回波部分开始合并,但在 8 km 以上,两单体 30 dBz 回波边界清晰。1 号单体的西侧为线状中尺度对流系统的层云区(即云砧),回波强度为 15—35 dBz。05 时 48 分(图 3b)两单体合并,40 dBz 区域连为一体,但两单体仍有各自的强回波核。06 时(图 3c)1 号单体回波顶高度降低,回波核范围减小,表明此时该单体强度减弱,同时顺义单体回波顶高度、50 dBz 范围的高度均有所上升,此时顺义单体强度有所加强,但两单体仍是合并状态。06 时 12 分(图 3d),1 号单体与顺义单体强回波核的距离开始增大,而顺义单体回波顶高度继续升高,12 km 以上范围扩大。直到 06 时 30 分(图 3e),1 号单体回波核强度仅为 35 dBz,回波顶高度降为 6 km,且与顺义单体分裂开来,而顺义单体仍维持旺盛状态。概括而言,一个单体追逐上另一个单体,合并加强一段时间后,以一个单体减弱为代价,而另一个单体旺盛发展,最后分离,它们的关系为追逐、供给关系。翟菁等(2011, 2012)通过观测和 MM5 数值模拟得到相似结论:当两个单体都处于相近的发展阶段,合并后单体发展增强;当一个单体强度大于另一个单体时,合并后一个单体得到增强,另一个单体减弱消亡。

3.2.2 房山单体

从图 2a 可见,05 时 48 分红色框内存在两个回波顶高于 12 km 的单体,如图 2b 中沿 L2 做 06 时 00—30 分线状中尺度对流系统剖面得到图 3c—e,可见 06 时组成房山单体的两个单体具有独立的强

回波核,分别为 40 和 45 dBz, 30 dBz 区域开始合并,合并时的云桥出现在 4—5 km 高度,而后合并范围向上、下同时扩展,至 06 时 12 分(图 3d),40 dBz 强回波开始合并,但仍有单独的回波顶,同时由图 2b 可见两合并的单体内闪电个数增多。至 06 时 30 分(图 3e),房山单体回波顶高抬升、强回波垂直范围扩大,表明该单体在壮大。虽然仍有两个回波顶,但 40 dBz 强回波已经合为一体。房山单体演变中的合并发生在 06 时 00—12 分。

3.2.3 固安、宝坻单体

固安、宝坻单体发展过程相似,仅以固安单体为例。沿图 2c 上 L3 做线状中尺度对流系统剖面可清楚地看到单体在线状中尺度对流系统前进方一侧被激发、吞食的过程。从图 2b、c 可见,在 06 时 12 和 36 分,固安单体和宝坻单体为初生阶段,回波顶较低,且均出现在线状中尺度对流系统的前沿附近,其生成与线状中尺度对流系统有密切关系,而后回波顶高度抬高,且与线状中尺度对流系统的距离越来越远。以固安单体为例,从图 3f 可见线状中尺度对流系统对流区强回波墙回波顶达到 13 km,最强回波核强度为 50 dBz,强回波墙后侧为层云区。线状中尺度对流系统的前方,固安单体旺盛发展,经历了近 1 h 后,7 时 24 分(图 3g),固安单体与线状中尺度对流系统合并,40 dBz 范围合在一起。单体在线状中尺度对流系统营造的有利于其发展的环境中被激发、发展,最后融入线状中尺度对流系统内继续壮大,单体与线状中尺度对流系统是一种被喂养、吞食的关系。这一过程与 Dennis 等(1970)提出的喂养单体合并过程相似,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。

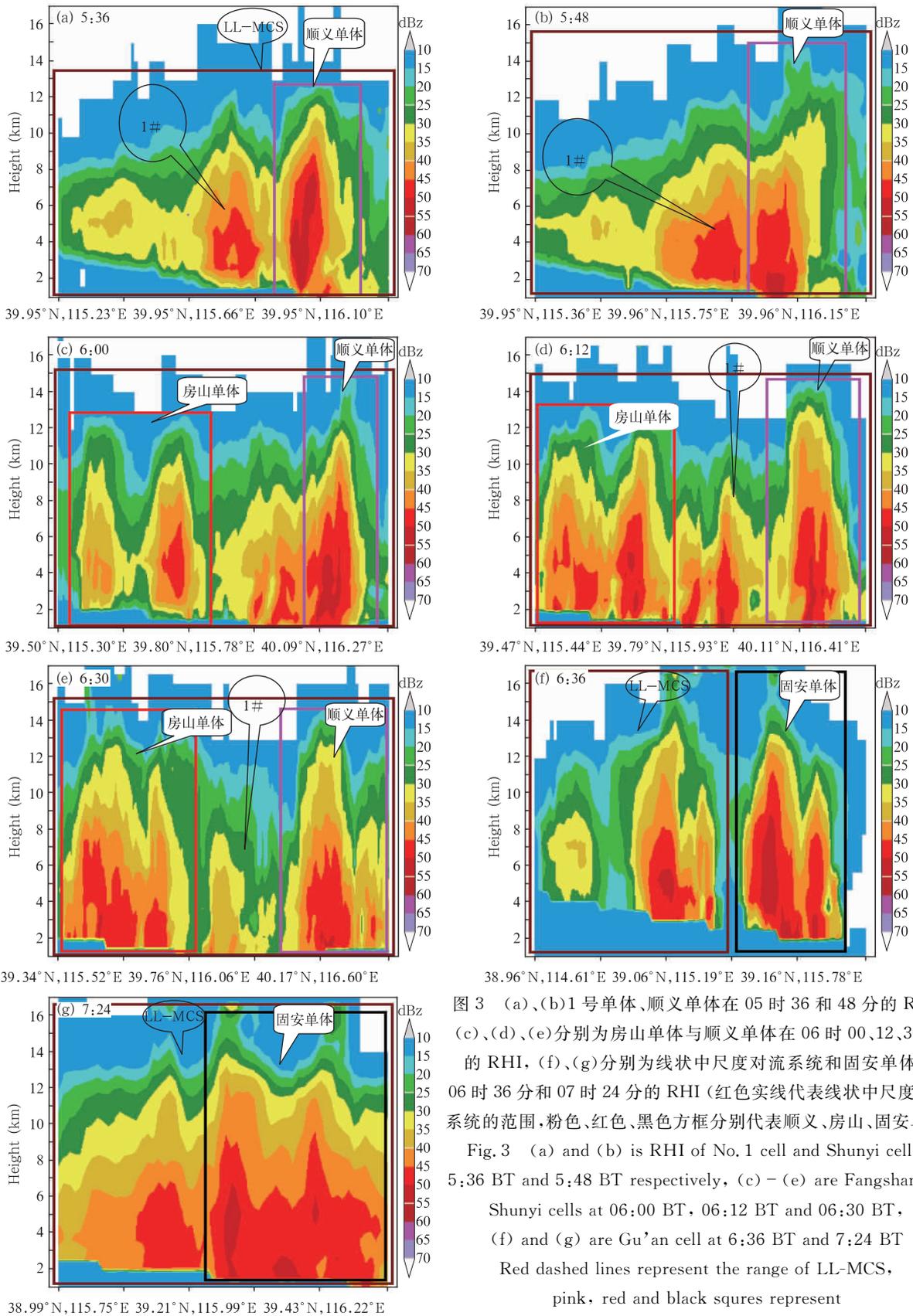


图3 (a)、(b)1号单体、顺义单体在05时36和48分的RHI, (c)、(d)、(e)分别为房山单体与顺义单体在06时00、12、30分的RHI, (f)、(g)分别为线状中尺度对流系统和固安单体在06时36分和07时24分的RHI (红色实线代表线状中尺度对流系统的范围,粉色、红色、黑色方框分别代表顺义、房山、固安单体)

Fig. 3 (a) and (b) is RHI of No. 1 cell and Shunyi cell at 5:36 BT and 5:48 BT respectively, (c) - (e) are Fangshan and Shunyi cells at 06:00 BT, 06:12 BT and 06:30 BT, (f) and (g) are Gu'an cell at 6:36 BT and 7:24 BT Red dashed lines represent the range of LL-MCS, pink, red and black squares represent respectively Shunyi, Fangshan and Gu'an cell

4 各强降水单体的结构演变与闪电活动的关系

4.1 雷达参量 V_{40UP-6} 和闪电频数的关系

由第2节可知, V_{40UP-6} 代表对流单体在 6 km 上部 40 dBz 强回波的体积, 在一定程度上反映了单体发展的旺盛程度。首先分别计算研究时段 4 个单体内 V_{40UP-6} 与 F_{ic} 、 F_{cg} 时间序列变化的相关系数。在顺义单体中, $R_{ic} = 0.772$, $R_{cg} = 0.63$; 在房山单体中, $R_{ic} = 0.819$, $R_{cg} = 0.874$; 在固安单体中, $R_{cg} = 0.952$; $R_{ic} = 0.929$; 在宝坻单体中, $R_{ic} = 0.974$, R_{cg}

$= 0.894$ 。可见, 相关系数均在 0.63 以上, 最高达到 0.974, 因此, 描述单体结构变化的雷达参量 V_{40UP-6} 与闪电频数的关系极为密切。其次, 针对代表时刻, 进一步通过 V_{40UP-6} 与 F_{ic} 、 F_{cg} 的关系反映闪电活动与对流单体结构变化的关系。

顺义单体在 05 时 54 分、06 时 18、42 分, V_{40UP-6} 曲线出现低谷(图 4a), 对应 F_{ic} 均相应出现低谷, 可见云闪活跃的程度与单体 6 km 高度上部体积大小关系较密切。在 06 时 18 分, 出现了值得进一步研究的现象——即 F_{ic} 与 F_{cg} 呈反位相关系。

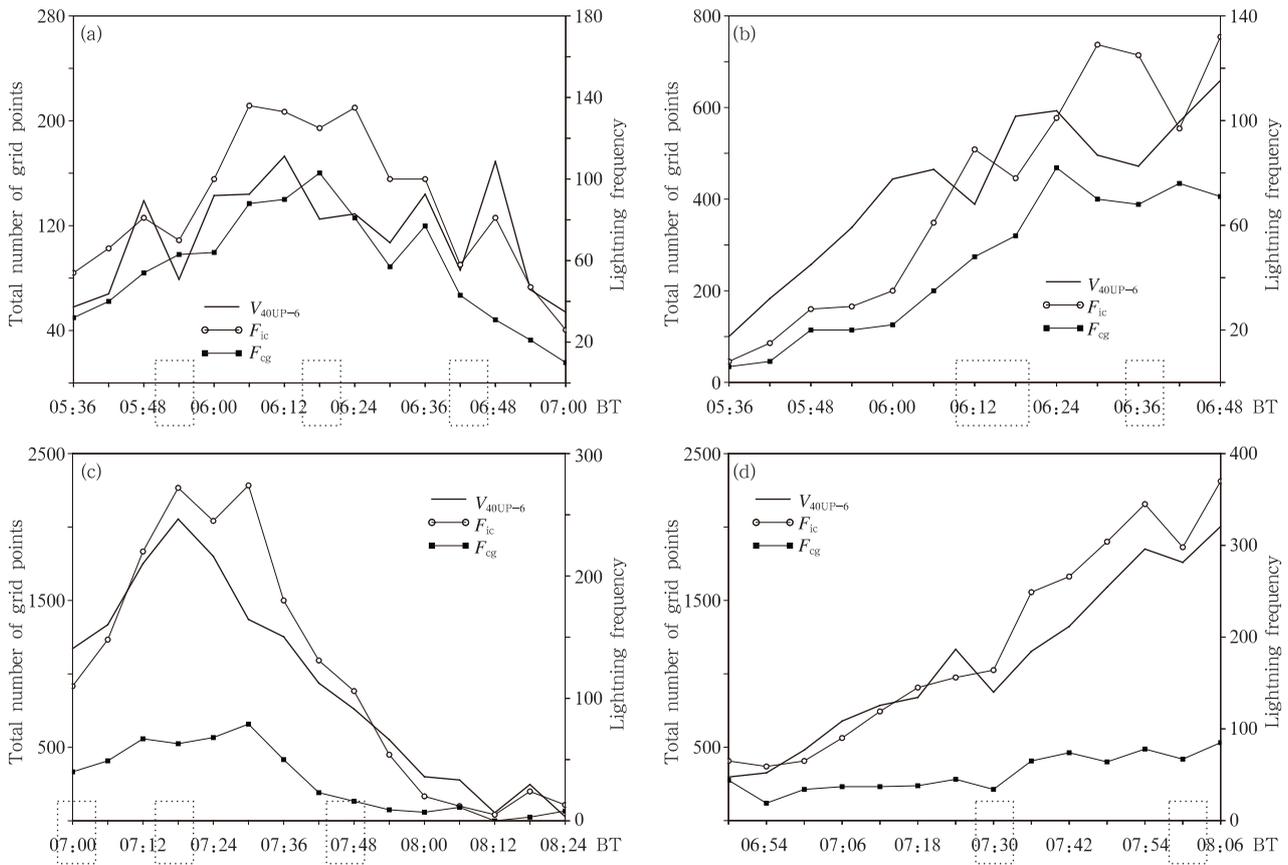


图 4 顺义(a)、房山(b)、固安(c)、宝坻(d)单体的雷达参量 V_{40UP-6} 和云闪频数 F_{ic} 、地闪频数 F_{cg} 的时间序列

Fig. 4 Time series of the radar parameter V_{40UP-6} and frequencies for IC and

CG respectively in Shunyi (a), Fangshan (b), Gu'an (c), and Baodi (d) severe rainfall cells

房山单体 V_{40UP-6} 曲线 06 时 12 分出现低谷(图 4b), 对照图 3a、b 可知, 此时恰好是 2 个单体合并时刻, 而后 V_{40UP-6} 曲线快速上升, 并在 06 时 18 分出现高峰。由此可知, 单体合并后旺盛发展, 但在合并瞬间, 单体在 6 km 以上有塌陷的特征。这与王俊等

(2011b)、易笑园等(2012)的观测事实一致。 V_{40UP-6} 曲线 06 时 36 分又现低谷, 对比雷达回波顶高图像(图略)可知, 此时房山单体内出现 2 个核心, 说明多核心现象的出现对单体 6 km 以上体积是有影响的。值得关注的是, F_{ic} 在 V_{40UP-6} 曲线出现低谷的 06

时 12、36 分和高峰的 06 时 06、18 分等 4 个时刻之后的 6—12 min 均对应出现谷值和峰值。说明云闪活动变化落后于对流单体 6 km 以上的结构变化。

由图 4c 可见,在固安单体中,无论云闪、还是地闪活动,在对流单体发展至成熟阶段(07 时 00—18 分),闪电活动活跃,频数快速增多;在减弱阶段(07 时 48 分),闪电活动减弱。可见云闪频数(F_{ic})和地闪频数(F_{cg})与 V_{40UP-6} 相关性极高。

由图 4d 可见,宝坻单体在 07 时 30 分、08 时, V_{40UP-6} 曲线出现小波动,而 F_{ic} 、 F_{cg} 曲线也相应地起伏。进一步说明闪电活动很大程度受对流单体 6 km 以上结构变化的影响。值得注意的是,在 08 时 02 分,宝坻自动气象站记录出现“飏”现象(气压升高,气温骤降,风向突变,风速大增),这些小波动

是否与其他灾害性天气有关,还有待进一步证实。

从以上分析得出,闪电活动与雷达参量 V_{40UP-6} 相关性很高, V_{40UP-6} 很好地表征了对流单体的发展和结构变化特征,在单体合并和多核心的时刻,单体 6 km 以上体积有塌陷特征。闪电活动有落后于单体结构变化的趋势,与地闪相比,云闪活动更为敏感地呼应其变化。

4.2 雷达参量 V_{40} 和闪电频数的关系

雷达参量 V_{40} 代表强回波 40 dBz 范围的体积,由于降水量与回波反射率存在着 Z-R 关系,6 min 内 V_{40} 在一定程度上表征了这一时段的降雨量,即降雨强度。

图 5a—d 分别为 4 个强降水单体 V_{40} 高度-时间分布和云闪、地闪、正地闪等频数时间序列。可见:

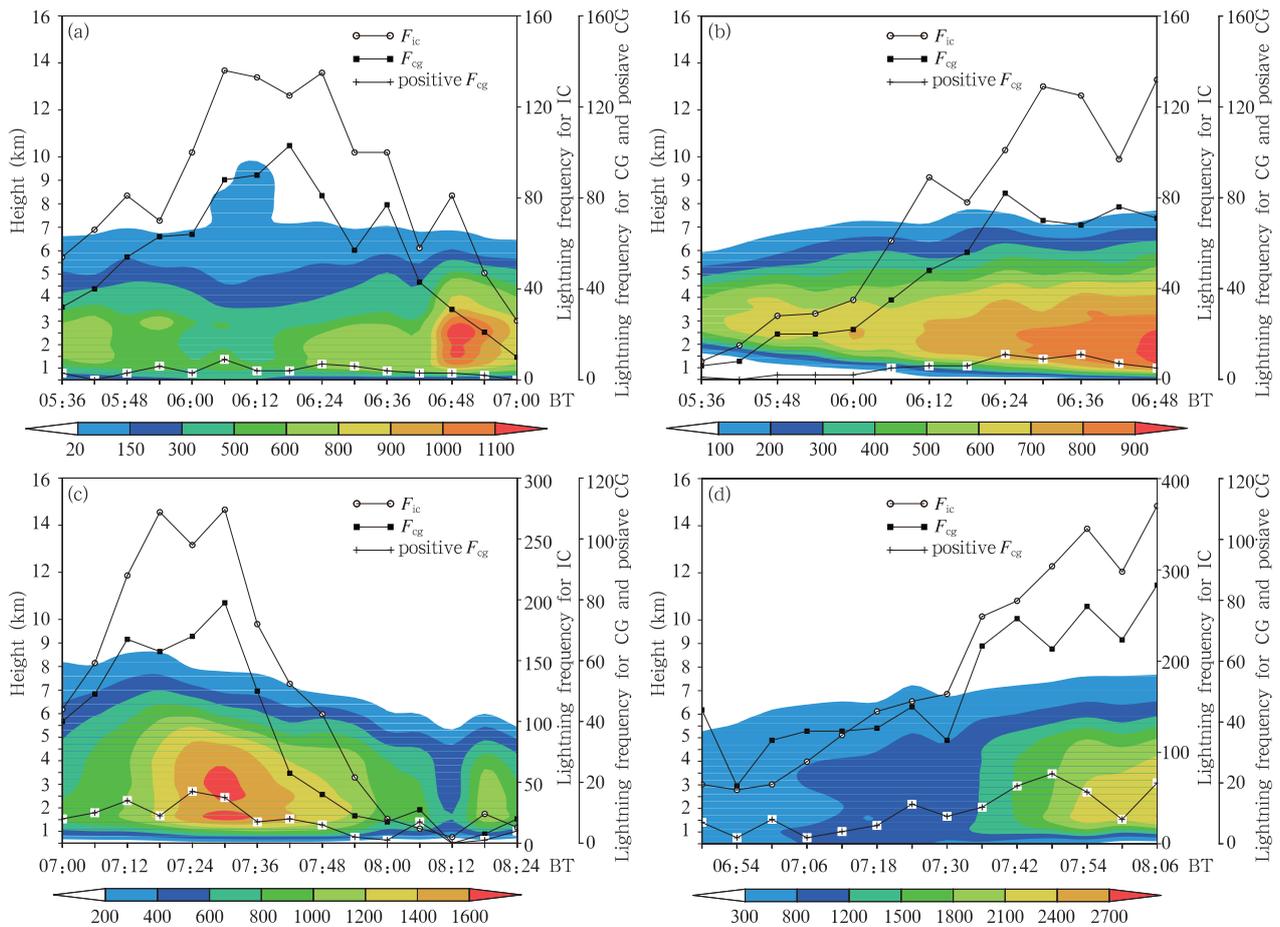


图 5 顺义(a)、房山(b)、固安(c)、宝坻(d)单体的雷达参量 V_{40} (阴影,单位:网格个数)垂直分布和云闪频数、地闪频数、正地闪频数的演变(闪电频数单位:个/(6 min))

Fig. 5 Time-height diagram of the radar parameter V_{40} (shaded, unit is number of grids) and the evolution of frequencies for IC, CG and positive CG respectively in Shunyi (a), Fangshan (b), Gu'an (c), and Baodi (d) severe rain cells

(1) 闪电较活跃时期与 V_{40} 的大值区相对应, 除顺义单体(图 5a)以外, 随着 V_{40} 增大, 闪电频数呈快速增多趋势。说明闪电活动随着强对流云体积的扩大发展而活跃。(2) V_{40} 的大值中心出现在闪电跃增或峰值之后, 说明最强降水出现在闪电快速增多或峰值之后。Rutledg 等(1988)、Holle 等(1994)、Soula 等(2001)也都发现闪电峰值超前降水强度峰值的现象。Williams 等(1989)、张义军等(1995)认为, 闪电活动导致空中电场变化, 电场力使上升速度增大, 同时加强了冰相粒子的碰并增长, 从而加速和加强降水的发生。在图 5a 中, V_{40} 中心出现在闪电活动的减弱期, 表明在闪电活动减弱时, 仍可出现强降水。(3) V_{40} 的大值中心所处高度较低, 在 3 km 附近。说明低层的强回波体积对总降水量有重大贡献。

4.3 各强降水单体内主正电荷区位置的变化特征

前面分析了闪电频数与对流单体结构变化的关系, 然而, 闪电活动很大程度上取决于云内电荷垂直结构。由于受 SAFIR3000 的辐射源资料在垂直方

向上定位精度所限, 这里不研究辐射源具体高度, 只关注最大辐射源垂直密度所在高度的演变趋势。有研究表明, 这一高度是主正电荷区所在高度, 因为闪电通道的负极性脉冲较强, 容易被探测到(Thomsa, et al, 2001)。而双向先导传输模型表明, 闪电通道的负极性击穿脉冲主要发生在正电荷区(张义军等, 2002)。郑栋等(2010)利用这一信息展示了冰雹单体在发展旺盛时, 主正电荷区高度较低的情形, 并认为这是反极性结构。那么, 在强降水单体中, 主正电荷区高度演变情况又如何?

首先, 确定对流单体所处的生命阶段。 S_{ET11} 大小反映了对流单体发展程度, 其值大反映对流旺盛、对流单体发展高且体积大。在用 S_{ET11} 量化对流单体发展阶段, S_{ET11} 曲线快速递增, 说明对流单体在发展, 峰值时段说明对流单体已经达到旺盛, 下滑表明对流单体在减弱时期。根据 S_{ET11} 曲线变化趋势将各强降水单体的生命史划分成不同阶段。

顺义单体(图 6a)、房山单体(图 6b)内的主正电

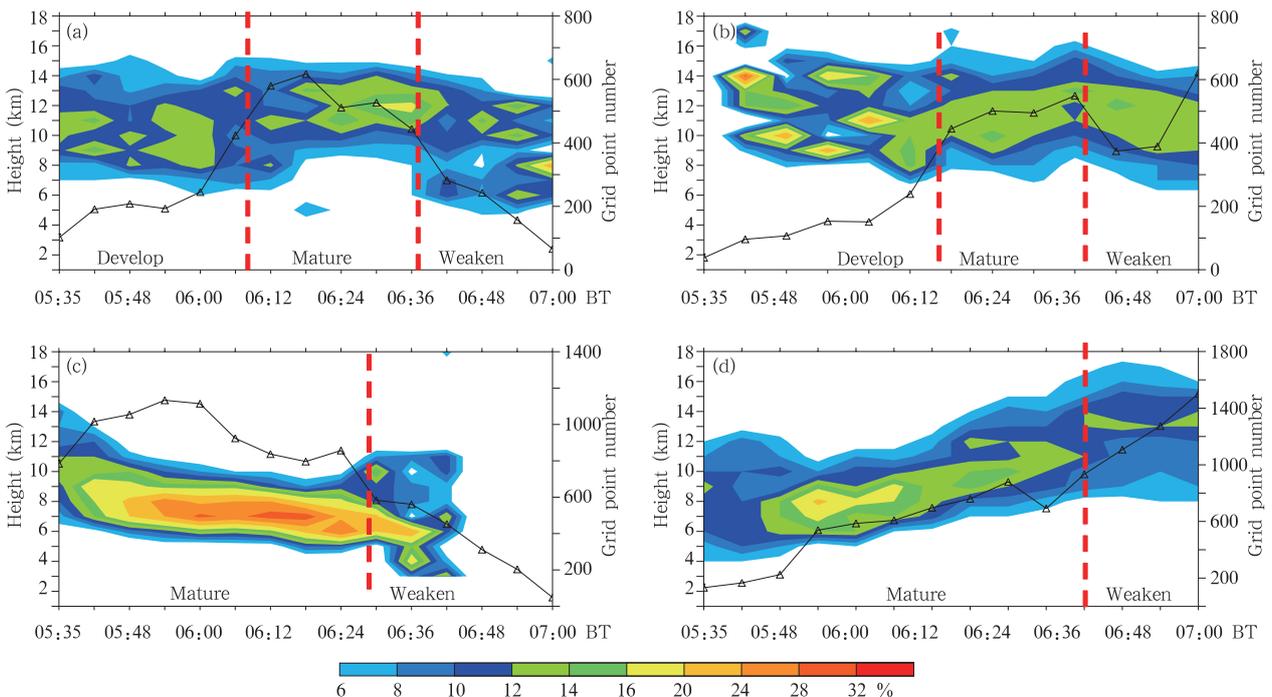


图 6 顺义(a)、房山(b)、固安(c)、宝坻(d)强降水对流单体的 S_{ET11} (曲线, 单位: 网格个数) 和辐射点密度百分率垂直分布(阴影)的演变

Fig. 6 Time-height diagram of the radiant points ratio (shaded) and time series of the radar parameter S_{ET11} (curve line) in Shunyi (a), Fangshan (b), Gu'an (c), and (d) severe rainfall cells

荷区在生命各阶段均维持较高水平,只是在发展和减弱阶段,辐射点垂直分布分散,出现百分比有多个大值中心。

宝坻单体(图 6d)从发展阶段到成熟阶段,主正电荷区呈明显上升趋势。在成熟阶段,同顺义单体、房山单体相似,主正电荷区维持较高。这与 Hansen 等(2010)的结论相似,即辐射点最大密度区(主正电荷区)所处的高度呈现出随着雷暴单体的发展而升高,减弱而降低的趋势。

然而,固安单体(图 6c)内的主正电荷区高度演变却与其他 3 个单体不同:在成熟阶段,主正电荷区维持在较低高度;在减弱阶段,也出现多个大值中心现象。这与郑栋等(2010b)分析的冰雹单体有一致的特征。

5 结 论

利用多普勒雷达、SAFIR3000 三维闪电定位系统和自动气象站等观测资料,主要以线状中尺度对流系统内多个 γ 中尺度强降水单体为研究对象,揭示了单体之间、单体与 β 中尺度线状对流系统的多种相互关系,设计多种雷达参量对单体的结构演变进行定量化描述,进一步建立了对流单体的结构演变、闪电活动特征及其相互关系。得到以下结论:

(1) 顺义、房山、固安、宝坻对流单体分别造成了 1 h 降雨 23、50、27 和 70 mm,在其演变过程中,顺义单体被另一个单体追逐、供给,房山单体包括 2 个更小单体的合并过程,而固安、宝坻单体的初生和发展与 β 中尺度线状对流系统是被喂养、吞食的关系。

(2) 雷达参量 V_{40UP-6} 与闪电活动的相关性很高, V_{40UP-6} 很好地表征了对流单体的发展及其结构变化特征,在单体合二为一和多核心时,单体 6 km 以上的体积有塌陷特征;闪电活动受对流单体在 6 km 以上部分的变化影响很大,并有落后于单体结构变化的趋势;与地闪活动相比,云闪活动变化更为敏感。随着雷达参量 V_{40} 增大,闪电频数快速增大,闪电较活跃时期与 V_{40} 的大值区相对应,说明闪电活动随着对流云体积的扩大发展而活跃。 V_{40} 的大值中心出现在闪电跃增或峰值之后,说明最强降水出现在闪电快速增加或峰值之后。这是由于闪电活动可能导致空中电场变化,电场力使上升速度增大,同时加强了冰相粒子之间的碰并增长,从而加速和

加强降水的发生。 V_{40} 中心出现在闪电活动的减弱期,表明在闪电活动减弱时,可出现强降水。

(3) 4 个强降水单体内 F_{cg} (地闪频数)和 F_{ic} (云闪频数)与上述雷达参量均有着密切的关系;与 V_{40UP-6} 的相关系数在 0.63—0.97。而对流单体中电荷的垂直结构较复杂,除固安单体外,在发展阶段主正电荷区均抬升;而固安单体在成熟阶段,主正电荷区位置较低,其他单体主正电荷区高度却较高。虽然目前尚无详实的资料证明其是反极性结构,但至少说明了强降水单体中也可能出现如冰雹单体中出现的电荷分布特征。

(4) 在对流单体合并后,出现 F_{cg} 和 F_{ic} 明显增大,主正电荷区明显抬升的特征。在线状中尺度对流系统内对流单体在合并瞬间(约 6—12 min)或多核心出现时, F_{cg} 和 F_{ic} 表现出减少、主正电荷区下降,而这一特征可成为合并后闪电活动即将增强的征兆。同时,闪电频数的陡增和峰值对降水强度增大、降水极值的出现也有预警意义。

致谢: 感谢中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室提供的雷达三维拼图资料。

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(3): 314-324
- 刁秀广, 杨传风, 李静等. 2011. 济南地区超级单体强度和流场结构分析. 高原气象, 30(2): 489-497
- 刘冬霞, 郗秀书, 冯桂力. 2010. 华北一次中尺度对流系统中的闪电活动特征及其与雷暴动力过程的关系研究. 大气科学, 34(1): 95-104
- 潘玉洁, 赵坤, 潘益农. 2008. 一次强飊线内强降水超级单体风暴的单多普勒雷达分析. 气象学报, 66(4): 621-636
- 王昂生, 赵小宁. 1983. 云体併合及雹云形成. 气象学报, 41(2): 204-210
- 王俊, 龚佃利, 刁秀广等. 2011a. 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
- 王俊, 盛日锋, 陈西利. 2011b. 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
- 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. 2009. 华北飊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
- 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

- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社, 314pp
- 袁铁, 鄒秀书. 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
- 郑栋, 张义军, 孟青等. 2010a. 北京地区雷暴过程闪电与地面降水的相关关系. 应用气象学报, 21(3): 287-297
- 郑栋, 张义军, 孟青等. 2010b. 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
- 张义军, 华贵义, 言穆弘等. 1995. 对流和层状云系电活动、对流及降水特性的相关分析. 高原气象, 14(14): 396-404
- 张义军, 刘欣生, Krehbiel P R. 2002. 雷暴中的反极性放电和电荷结构. 科学通报, 47(15): 1192-1195
- 张义军, 言穆弘, 孙安平. 2009. 雷暴电学. 北京: 气象出版社, 384pp
- 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
- 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
- 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
- Goodman S J, MacGorman D R. 1986. Cloud-to-ground lightning activity in mesoscale convective complexes. Mon Wea Rev, 114: 2320-2328
- Hansen A E, Fuelberg H E, Pickering K E. 2010. Vertical distributions of lightning sources and flashes over Kennedy Space Center, Florida. J Geophys Res, 115(D14), D14203, doi:10.1029/2009JD013143
- Houze R A Jr, Smull J B F, Dodge P. 1990. Mesoscale organization of springtime rainstorms in Oklahoma. Mon Wea Rev, 118(3): 613-654
- Holle R L, Watson A I, López R E, et al. 1994. The life cycle of lightning and severe weather in a 3-4 June 1985 PRE-STORM mesoscale convective system. Mon Wea Rev, 122(8): 1798-1808
- Keighton S J, Bluestein H B, MacGorman D R. 1991. The evolution of a severe mesoscale convective system: Cloud-to-ground lightning location and storm structure. Mon Wea Rev, 119(7): 1533-1556
- 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
- Lang T J, Lyons W A, Rutledge S A, et al. 2010. Transient luminous events above two mesoscale convective systems: Storm structure and evolution. J Geophys Res, 115(A5), A00E22, doi:10.1029/2009JA014500
- 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
- Rutledge S A, MacGorman D R. 1988. Cloud-to-ground lightning activity in the 10-11 June 1985 Mesoscale Convective System observed during the Oklahoma-Kansas PRE-STORM Project. Mon Wea Rev, 116(7): 1393-1408
- Saunders C P R. 1993. A review of thunderstorm electrification processes. J Appl Meteor, 32(4): 642-655
- Soula S, Chauzy S. 2001. Some aspects of the correlation between lightning and rain activities in thunderstorms. Atmos Res, 56: 355-373
- Steiger S M, Orville R E, Carey L D. 2007. Total lightning signatures of thunderstorm intensity over North Texas. Part II: Mesoscale Convective Systems. Mon Wea Rev, 135(10): 3303-3324
- Stolzenburg M, Rust W D, Marshall T C. 1998. Electrical structure in thunderstorm convective regions 1: Mesoscale convective system. J Geophys Res, 103(D12): 14059-14078, doi:10.1029/97JD03547
- Takahashi T. 1978. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. J Atmos Sci, 35(8): 1536-1548
- Tessendorf S A, Wiens K C, Rutledge S A. 2000. Radar and lightning observations of the 3 June 2000 electrically inverted storm from STEPS. Mon Wea Rev, 135: 3665-3680
- Thomsa 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
- Weiss S A, Rust W D, Macgorman R, et al. 2008. Evolving complex electrical structures of the STEPS 25 June 2000 multicell storm. Mon Wea Rev, 136(2): 741-756
- Williams E R, Weber M E, Orville R E. 1989. The relationship between lightning type and convective state of thunderclouds. J Geophys Res, 94(D11): 13213-13220
- Zheng D, Zhang Y J, Meng Q, et al. 2010. Lightning activity and electrical structure in a thunderstorm that continued for more than 24 h. Atmos Res, 97(1-2): 241-256