

刘泽, 郭凤霞, 郑栋, 等. 一次暖云强降水主导的对流单体闪电活动特征. 应用气象学报, 2020, 31(2): 185-196.  
DOI: 10.11898/1001-7313.20200206

# 一次暖云强降水主导的对流单体闪电活动特征

刘泽<sup>1)2)</sup> 郭凤霞<sup>1)</sup> 郑栋<sup>2)\*</sup> 张阳<sup>2)</sup> 吴翀<sup>2)</sup> 姚雯<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/  
气象灾害预报预警与评估协同创新中心/中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044)

<sup>2)</sup>(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室/雷电物理和防护工程实验室, 北京 100081)

## 摘 要

利用中国气象局雷电野外科学试验基地(CMA\_FEELS)三维闪电观测数据, 结合广州双偏振雷达观测数据, 分析了 2017 年 5 月 7 日广东一次暖云强降水对流单体的闪电活动及其与云降水结构的关系。该单体在 4 h 内产生 1250 个闪电, 地闪比例约 24%。绝大多数闪电出现在 4~12 km 高度, 对应温度层为 0℃至 -40℃; 闪电放电活动的峰值高度出现在 8.5 km, 对应环境温度约 -19℃。分析的强降水单体宏观上呈现上正、中负、下正的三极性电荷结构, 中部负电荷核心区约为 -8℃至 -15℃。在闪电活动区域中, 由于雪粒子主导区域占比约 82%, 霰粒子主导区域占比约 11%, 且大部分与闪电活动关联的霰粒子主要位于 4~8 km 高度。总闪频数与 30 dBZ 雷达回波顶高、-20℃温度层上大于 20 dBZ 的回波体积具有较好的相关性。闪电活动的平均位置高度与 20 dBZ 雷达回波顶高和 -20℃温度层上大于 30 dBZ 的回波体积具有较好的相关关系。闪电活动与最大降水强度之间具有较好的时序对应关系, 单个闪电表征降水量的值为 10<sup>7</sup> kg/l 量级。

关键词: 极端降水; 暖云降水; 三维闪电活动; 双偏振雷达; 云降水结构

## 引 言

闪电由对流活动产生, 由于起电过程通常与云内的水成物粒子, 尤其是冰粒子之间的碰撞联系在一起<sup>[1-3]</sup>, 所以, 闪电活动往往与雷暴云的动力和降水过程之间存在密切联系。

一些研究注意到闪电活动与雷暴云结构的空对应关系, 并指出大部分闪电活动出现在 0℃层以上的混合相态区域, 主要对应的冰相物粒子是霰和干雪<sup>[4]</sup>。闪电活动对应雷达反射率因子的峰值区间约为 30~40 dBZ, 不同类型对流系统之间可能存在一定差异, 且闪电起始位置对应的雷达反射率因子峰值区间可能大于闪电通道传播位置对应的雷达反射率因子区间<sup>[5]</sup>。地闪接地位置之上的云内对应混合相态区域可能有较弱的上升和下沉气流<sup>[6]</sup>, 这可

能是由于弱的上升和下沉气流更有利于带电粒子的聚集和分层, 产生较好支撑放电的电场条件<sup>[7]</sup>。

闪电频数往往与雷暴云发展的强度正相关, 因此一些研究建立了闪电活动与雷暴云结构特征参量的关系。从闪电发生的条件看, 王飞等<sup>[8]</sup>指出当雷达 40 dBZ 回波顶高超过 -10℃层或 40 dBZ 回波顶高超过 0℃层且 40 dBZ 以上回波体积占 25 dBZ 以上回波体积的 5% 以上时, 闪电将会发生。闪电频数随雷暴云的增强(减弱)相应地增加(减小), 且闪电频数峰值出现在雷暴云发展到最强的时间附近, 其中雷暴云发展强度通常用雷达回波参量的特征值, 如回波高度、体积等参量来表征<sup>[6,9-11]</sup>。降水也是雷暴云对流活动的产物, 一些研究注意到闪电活动与对流降水量之间有较好的相关性<sup>[12-13]</sup>。在我国北京及周边地区, 郑栋等<sup>[12]</sup>、王婷波等<sup>[14]</sup>发现单个闪电对应的平均降水量为 10<sup>7</sup> kg/l 量级。

2019-10-26 收到, 2020-01-09 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研究发展计划(2017YFC1501503), 国家自然科学基金项目(41975003, 41875001, 41675005)

\* 通信作者, 邮箱: zhengdong@cma.gov.cn

具有不同对流强度的雷暴系统,其闪电活动特征往往表现不同。如典型雷暴系统中地闪比例约为20%~30%,正地闪比例约为10%;而具有极强对流的超级单体或冰雹雷暴系统中,地闪和正地闪比例可超过50%<sup>[4,15-16]</sup>。总体而言,已有较多研究揭示了典型雷暴系统或具有极强对流特征的灾害性雷暴系统的闪电活动特征,但关于由暖云降水主导的极端降水过程中闪电活动及其与降水云结构的关系却鲜见报道。本研究选取2017年5月7日凌晨(北京时,下同)发生在广东省珠江三角洲附近的一次暖云降水过程中极端强降水对流单体,对它的三维全闪活动、闪电活动对应水成物粒子特征以及闪电活动和降水结构的关系进行分析。该研究将丰富对不同类型雷暴系统中闪电活动规律和特征的认识。

## 1 数据和方法

### 1.1 三维全闪观测数据及分析方法

三维闪电数据来自低频电场探测阵列(Low-Frequency E-field Detection Array, LFEDA)的观测,其站点位置在图1中显示(黑色三角形)。LFEDA由中国气象科学研究院研发,当前在中国气象局雷电野外科学试验基地(CMA\_FEELS)建设了10个子站,在160~600 kHz频段观测闪电引起的电场变化,通过时差法对脉冲信号进行定位,获得闪电脉冲放电事件(简称放电事件)的三维位置和时间。关于该系统的介绍和数据应用可参考文献[17-19]。基于在CMA\_FEELS开展的人工触发闪电试

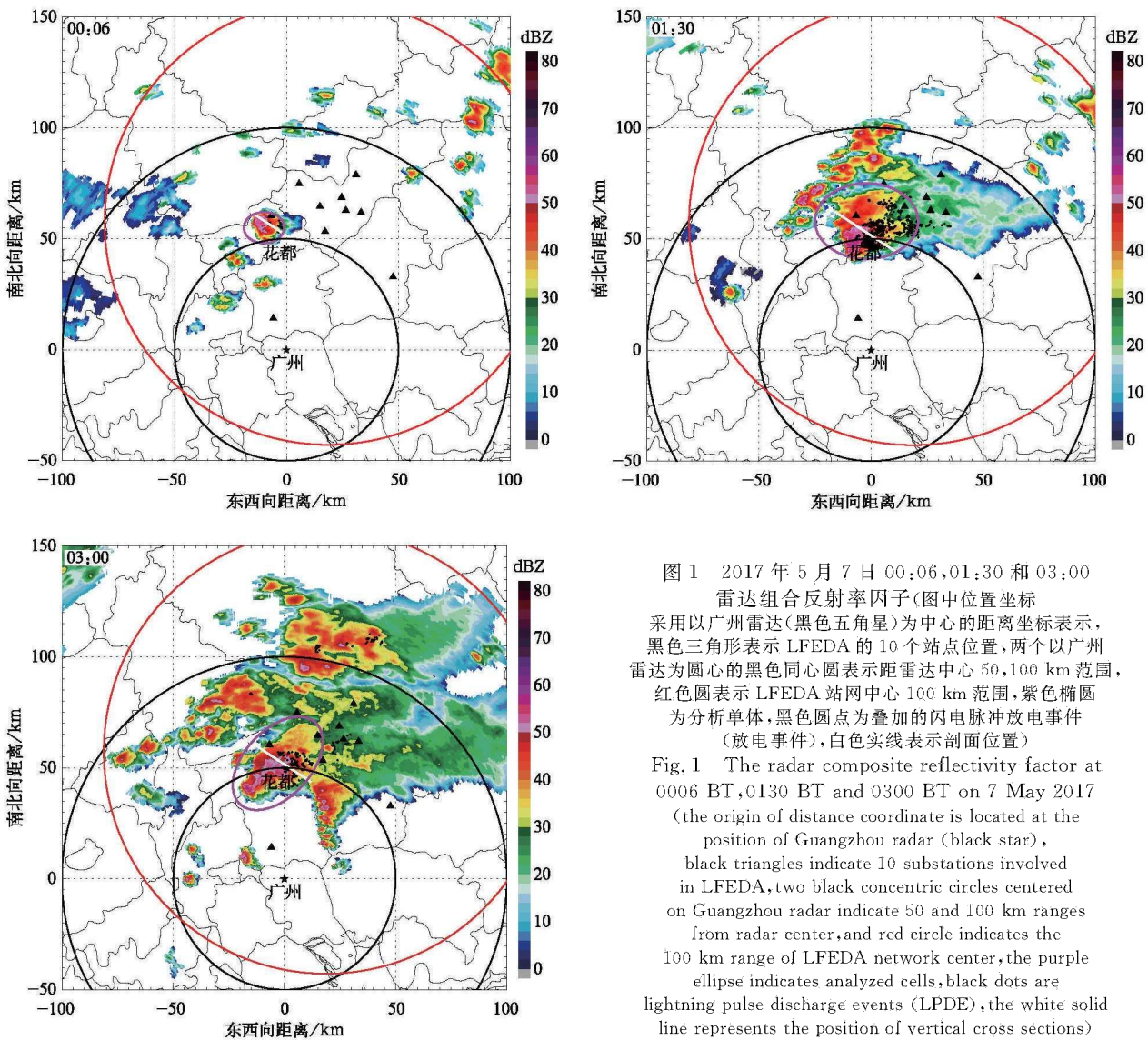


图1 2017年5月7日00:06,01:30和03:00  
雷达组合反射率因子(图中位置坐标  
采用以广州雷达(黑色五角星)为中心的  
距离坐标表示,黑色三角形表示LFEDA  
的10个站点位置,两个以广州雷达为  
圆心的黑色同心圆表示距雷达中心  
50,100 km范围,红色圆表示LFEDA  
站网中心100 km范围,紫色椭圆  
为分析单体,黑色圆点为叠加的闪电  
脉冲放电事件(放电事件),白色实线  
表示剖面位置)

Fig. 1 The radar composite reflectivity factor at 0006 BT, 0130 BT and 0300 BT on 7 May 2017 (the origin of distance coordinate is located at the position of Guangzhou radar (black star), black triangles indicate 10 substations involved in LFEDA, two black concentric circles centered on Guangzhou radar indicate 50 and 100 km ranges from radar center, and red circle indicates the 100 km range of LFEDA network center, the purple ellipse indicates analyzed cells, black dots are lightning pulse discharge events (LPDE), the white solid line represents the position of vertical cross sections)

验的评估指出 LFEDA 对触发闪电和回击的探测效率分别为 100% 和 95%, 回击位置定位误差平均值为  $102 \text{ m}^{[17]}$ 。针对一次雷击致死闪电事件的定位, LFEDA 给出闪电放电过程的三维空间分布以及接地通道形态, 对 7 次回击定位的平均误差约为  $27 \text{ m}^{[18]}$ 。

分析中使用的 LFEDA 观测数据, 要求定位数据的高度低于  $20 \text{ km}$ , 表征定位过程中拟合优度的参量小于 10。将 LFEDA 定位到的放电事件归为闪电的思路是: 属于某一个闪电的放电事件必须发生在当前被判断的该闪电时序上最后一个放电事件之后  $t_1$  时间内, 并且与属于当前判断闪电的其他任何一个放电事件(只有一个即可)在空间上满足距离在  $d$  之内, 时间在  $t_2$  之内。该归闪方法的思路参考了 Lightning Mapping Array 的闪电算法<sup>[4,20]</sup>。针对本次分析过程, 通过测试算法与人工判断对比, 选定参数为  $t_1=0.4 \text{ s}$ ,  $t_2=0.6 \text{ s}$ ,  $d=4 \text{ km}$ 。此外, 进入分析的闪电要求至少包含 5 个放电事件定位点。当归闪后的 LFEDA 闪电中存在低于  $2 \text{ km}$  高度的放电事件时, 认为这个闪电属于一次地闪。LFEDA 对某些闪电的初始过程具有较好的探测能力, Zheng 等<sup>[19]</sup>利用 LFEDA 对两次广东雷暴系统发展过程中部分闪电初始负极性先导(简称负先导)的定位, 分析了负先导的属性特征以及它们与起始高度和起始对应雷暴系统区域的关系。闪电的初始先对应闪电起始到闪电通道进入电荷核心区(高密度电荷区)的这一阶段, 具有明显垂直发展的特征, 而随后闪电通道在电荷核心区内的传输则以水平方向为主。本文参考 Zheng 等<sup>[19]</sup>的方法, 通过判断闪电三维连续定位结果, 获得负先导的起始位置和发展方向, 有助于对宏观电荷结构的分析。

## 1.2 雷达数据及分析方法

位于广州番禺区( $23.0039^\circ\text{N}$ ,  $113.3553^\circ\text{E}$ )的 S 波段双偏振雷达(图 1), 提供了关于分析单体的降水结构信息。将雷达原始极坐标数据插值为水平分辨率为  $0.25 \text{ km} \times 0.25 \text{ km}$ , 垂直分辨率为  $0.5 \text{ km}$  的直角坐标数据。除反射率因子信息外, 广州雷达还提供了差分反射率因子( $Z_{dr}$ )、差示传播相移率( $K_{dp}$ )、协相关系数( $\rho_{hv}$ )等信息。基于中国气象科学研究院开发的粒子相态识别软件<sup>[21]</sup>, 获得粒子相态信息。该软件是基于 Park 等<sup>[22]</sup>的 S 波段雷达粒子相态识别算法, 将粒子类型分为 10 种: ①地物杂波, 包括由于异常造成的杂波传播; ②生物散射体; ③干雪; ④湿雪; ⑤冰晶; ⑥霰; ⑦大雨滴; ⑧小雨和

中雨; ⑨大雨; ⑩雨和冰雹的混合物。此外, 本文使用了由双偏振雷达反演的地面降水强度数据, 反演方法来自 Chen 等<sup>[23]</sup>改进的 S 波段双偏振雷达降水量算法 DROPS2.0, 该算法由水成物分类机制驱动。基于水成物相态识别分类结果进行缩减归类, 分为液态、雨雹混合物和其他 3 类。根据上述 3 个类别以及选定的水平反射率因子( $Z_h$ ),  $Z_{dr}$  和  $K_{dp}$  阈值结合判断, 选择相应的降水估算公式进行降水估算。

## 2 暴雨过程简介

2017 年 5 月 7 日凌晨, 广州突发大暴雨至特大暴雨。此次强降水持续时间长, 累积降水量大, 其中日降水量破广州历史纪录, 造成广州多地出现严重水浸, 房屋倒塌, 人民群众受灾严重。截至 2017 年 5 月 7 日 20:00, 地面自动气象站数据显示 24 h 累积降水量超过  $50 \text{ mm}$  的自动气象站达 142 个, 大多数集中分布在广州范围内, 其中 7 个站点的累积降水量超过  $250 \text{ mm}$ , 分别位于花都区东部和增城区西南部。不少学者从中尺度对流系统的触发和组织维持机制、降水特征等方面对这一过程进行了分析<sup>[24-27]</sup>, 指出此次暴雨发生于弱天气背景下, 当日大气层结表现出弱对流抑制和低抬升凝结核高度的特征。偏南暖湿气流的不断输送, 使充足水汽的供应得到保证, 地形带来的山风与南风对峙促使深厚湿层的形成, 地形阻挡抬升和高温度梯度又使得上升运动加强, 进而触发对流。总体上, 此次暴雨属于一次由中尺度对流系统产生的空间尺度小、发展迅速、由暖云降水主导的高效率降水过程。极高的降水效率可能由对流系统内高效的云水转化引起<sup>[27]</sup>。

雷达回波显示此次过程主要集中在 2017 年 5 月 7 日 00:00—12:00, 该降水系统的发展过程伴随复杂的单体间合并与分裂。大约 04:00 前, 一个从广州花都区东部出现的单体在附近发展, 根据雷达反演降水得到的地面对应 00:00—04:00 最大累积降水量为  $261 \text{ mm}$ 。该单体发展过程相对独立, 且在预先的调查中, 发现该单体具有活跃的闪电活动, 本文分析 00:00—04:00 该单体的活动。图 2 显示了该单体发展过程中 3 个时刻垂直剖面的  $Z_h$ ,  $Z_{dr}$ ,  $K_{dp}$  和  $\rho_{hv}$ , 3 个时刻分别对应闪电开始出现、闪电峰值和闪电频数下降 3 个阶段。图 1 中紫色椭圆即为本文的分析单体。整体看, 在主要的闪电活动阶段,

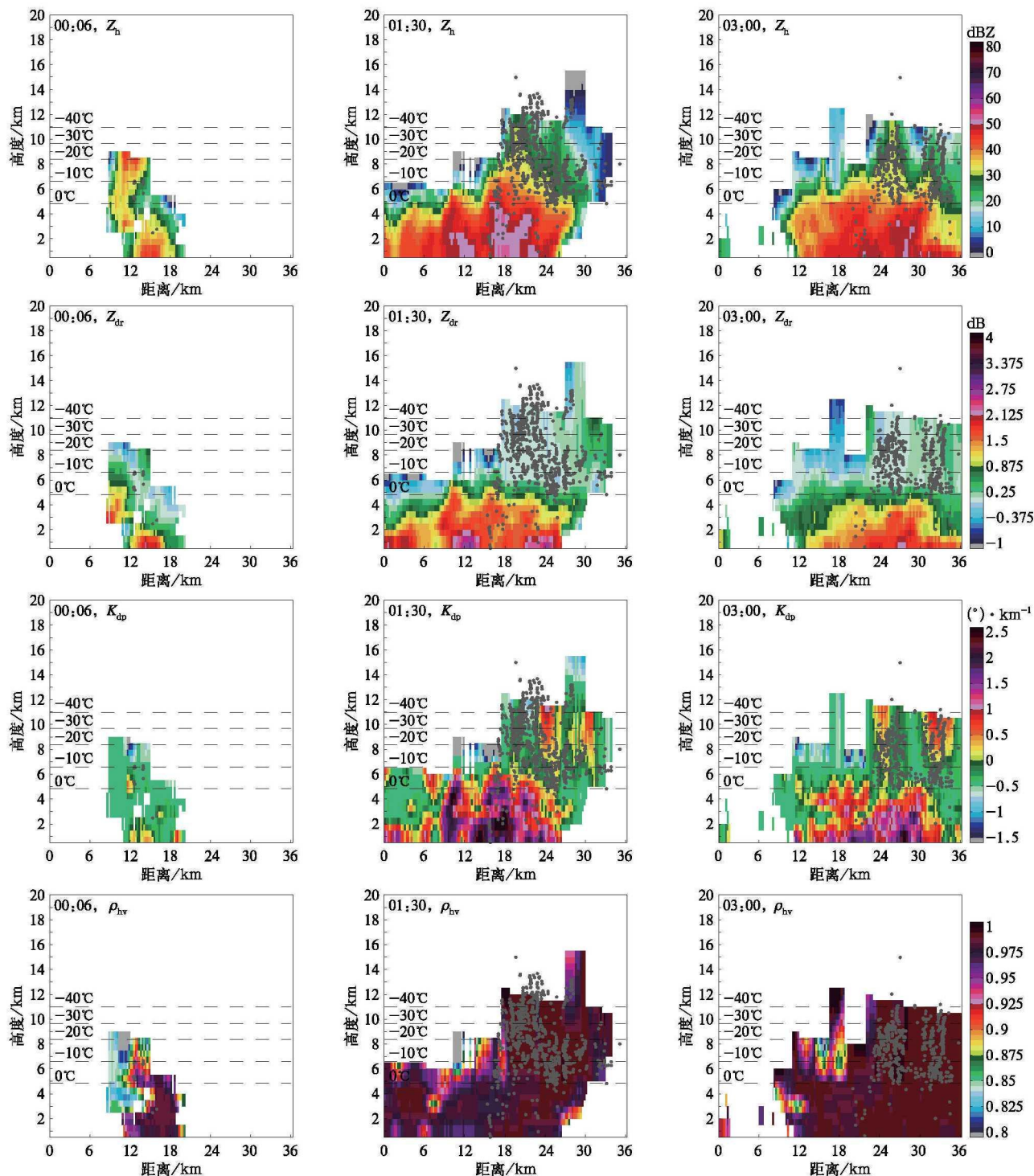


图2 2017年5月7日00:06,01:30和03:00广州雷达变量垂直剖面

(图中灰色圆点为叠加的对应剖面(图1白色实线)半宽5 km范围内的放电事件,黑色虚线从下到上分别表示2017年5月6日20:00清远探空站0,-10,-20,-30,-40℃温度层高度)

Fig. 2 Vertical cross sections of Guangzhou radar variable at 0006 BT,0130 BT and 0300 BT on 7 May 2017

(gray dots represent lightning pulse discharge event(LPDE) within 5 km of vertical cross sections (the solid white line in Fig. 1),dashed black lines indicate the height of 0, -10, -20, -30℃ and -40℃ isotherms,which provided by Qingyuan sounding at 2000 BT 6 May 2017)

40 dBZ 发展的高度主要在-10℃层以下,说明此次 过程的对流相对较弱。闪电活动出现的区域主要对



应雷达反射率因子小于 30 dBZ,差分反射率因子为 0~0.25 dB,差示传播相移率在 0 左右,协相关系数在 0.95 以上,意味着闪电活动的主要区域对应较小的冰相粒子。

### 3 整体闪电活动

图 3、图 4 显示了 2017 年 5 月 7 日 00:00—04:00 分析单体的闪电活动频数以及高度分布。LFEDA

在此期间共定位 26191 个放电事件,被归为 1250 个闪电,其中有 102 个闪电可较明确地识别出初始负先导,包括初始负先导向向上发展的闪电 84 个,初始负先导向下发展的闪电 18 个,它们的起始位置标注在图 4a 中。期间,分析单体通过放电事件高度判别的闪电 301 个(对应广东电力地闪定位系统<sup>[28]</sup>的地闪 326 个,与 LFEDA 判断的地闪数量接近),地闪占比约 24%,接近于典型雷暴系统。

由图 3 可以看到,降水单体的闪电频数呈先增

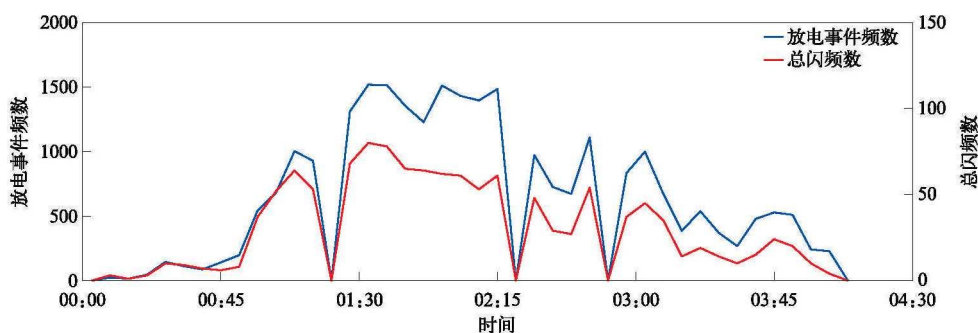


图 3 2017 年 5 月 7 日 00:00—04:00 分析单体内放电事件和总闪频数随时间变化(时间间隔为 6 min)

Fig. 3 Evolution of frequencies of LPDE and flashes in the investigated cell during 0000—0400 BT on 7 May 2017(time interval is 6 min)

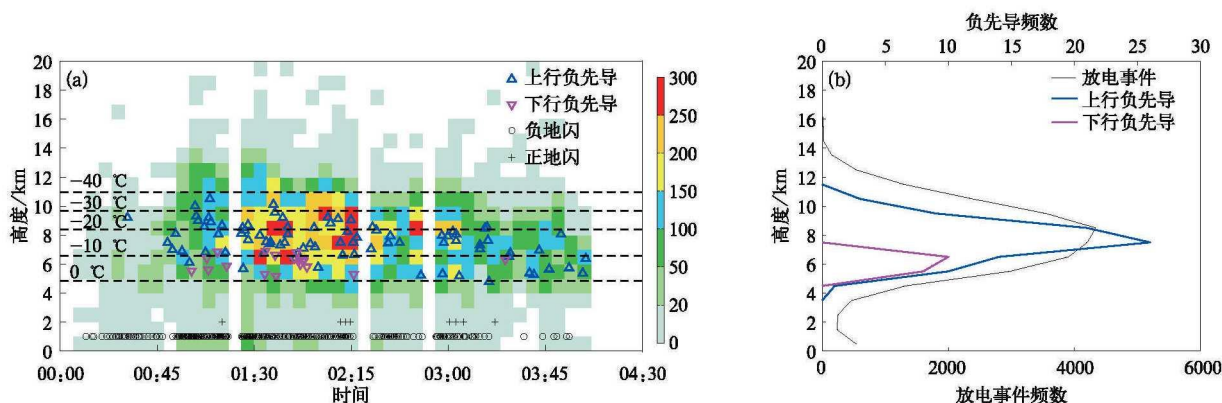


图 4 2017 年 5 月 7 日 00:00—04:00 分析单体内闪电活动

(a)放电事件密度随高度和时间的分布(时间间隔为 6 min,高度间隔为 1 km,其上叠加上、下行负先导闪电起始位置以及正负地闪发生时间;黑色虚线从下到上分别表示 2017 年 5 月 6 日 20:00 清远探空站 0, -10, -20, -30, -40℃ 温度层高度), (b)放电事件和上、下行负先导闪电起始位置的高度分布

Fig. 4 Lightning activity in the investigated cell during 0000—0400 BT on 7 May 2017

(a) density of LPDE as a function of height and time(time interval is 6 min, height interval is 1 km, the initiation of upward negative initial leader(UNIL) and downward negative initial leader(DNIL) and positive cloud-to-ground lightning flashes and negative cloud-to-ground lightning flashes are superposed, dashed black lines labelled the isotherms of 0, -10, -20, -30℃ and -40℃ obtained from Qingyuan sounding at 2000 BT 6 May 2017), (b) height distributions of LPDE and initiation dots of UNIL and DNIL

加后减少的时序特征,01:30—01:36时段出现最大值80个/(6 min),整个过程中的平均总闪频数约为5个/min,平均地闪频数约为1.3个/min。图4a显示,放电事件在0~20 km高度范围内均有分布,但主要集中在0℃至-40℃温度层之间,这与起电机制建议的起电区域<sup>[1]</sup>以及其他类型雷暴系统中给出的闪电活动主要温度区域<sup>[16,19,29]</sup>一致。整个时段内放电事件的峰值高度出现在8.5 km,对应环境温度约-19℃(图4a)。

结合图4a和图4b可以看到,分析时段,上行负极性初始先导(简称上行负先导)的峰值起始高度为7.5 km,下行负极性初始先导(简称下行负先导)的峰值起始高度为6.5 km,分别对应环境温度-15℃和-8℃。考虑到负先导从负电荷核心区(高密度电荷区)边缘始发向正电荷区发展<sup>[18,30]</sup>,上述分布形态表明整体上雷暴系统具有宏观上的上正-中负-下正的三极性电荷结构,属于在雷暴系统中较为常见的电荷结构<sup>[30]</sup>。但同时也可以看到,02:30后,可以识别的负先导几乎均向上发展,这些上行负先导的起始高度相比02:30之前有所下降,统计得到上行负先导在前一个时段的平均起始高度为8.0 km,后一时段为6.9 km。这意味着电荷区高度在02:30后可能整体下降,闪电频数在相应时段整体呈现减弱趋势,说明雷暴云动力条件在减弱。从地闪看,整个分析阶段,负地闪始终处于绝对主导地位(负地闪比例约97%),说明地闪主要由中部负电荷区和下部正电荷区贡献,也就是说,宏观上的三极性电荷结构形态应该在分析时段内持续存在。

#### 4 闪电活动与雷暴云降水结构的关系

##### 4.1 闪电活动对应的云内水成物粒子特征

雷达双偏振参量提供了粒子形态的额外信息,可以帮助了解闪电活动对应的主要粒子类型。考虑到雷达体扫过程中偏上仰角以及偏远位置,相邻两个仰角扫描锥面之间的距离较大,空间分辨率较低,为使分析更准确,本文只选择位于雷达扫描锥面上下1 km范围内的放电事件数据。此外,由于地闪先导回击过程中出云后向地面发展的先导一般不像云内闪电通道一样通过电荷区,所以,在分析中也排除了3 km以下高度的定位数据。在统计过程中,一个雷达网格无论有1个放电事件还是多个放电事件,该网格的粒子属性都只被统计1次。上述统计

针对每6 min 1次的雷达体扫进行。在00:00—04:00分析时段内,与放电事件相关的样本数(即雷达网格数)为9374个,它的高度分布以及某种相态粒子主导网格在相同高度范围上占有所有放电事件网格的比例如图5和图6所示。整体看,分析单体中,闪电放电位置对应的主要带电粒子是干雪,霰的比例较低。干雪主导的放电事件的区域占比约为82%,霰主导的产生放电事件的区域仅占比11%。上述比例对应闪电起始(闪电的第1个放电事件)分别为86%和10%,与放电事件相似(图略)。由图5还可以看到,大部分霰主导的放电区域主要位于4~8 km高度,8 km高度以上,与放电事件相关的霰区域占比极低。由图6可知,霰主导放电区域的最高占比为22%,出现在6~7 km高度,而7 km以上,干雪主导区域的占比普遍大于90%;同时,8 km以下的干雪占比呈下降趋势,在3~4 km与闪电活动相关的主导性粒子是水滴。

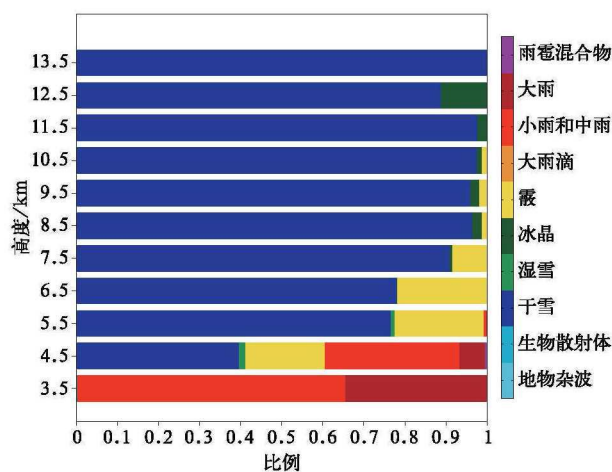


图5 2017年5月7日00:00—04:00分析单体内放电事件位置对应不同相态水成物粒子网格在不同高度上所占比例

Fig. 5 Proportions of radar grid boxes with different-type hydrometeors in LPDE position at different heights in the investigated cell during 0000—0400 BT on 7 May 2017

此次降水过程中闪电放电主导性粒子是干雪,霰扮演次要角色,这似乎与之前的研究不同。如Zheng等<sup>[4]</sup>在超级单体分析中发现与霰和冰晶主导位置对应的闪电起始都占到总闪电起始的44%,霰和干雪对闪电放电的贡献几乎相同。原因可能是由于此次降水过程以暖云降水为主<sup>[24-27]</sup>,意味着对流

强度和混合相态区域的冰相过程相对较弱,大的冰相粒子难以成规模地形成或维持,使得冰粒子的尺寸整体相对偏小,小尺度冰晶聚集形成的干雪成为云内主要粒子形态。

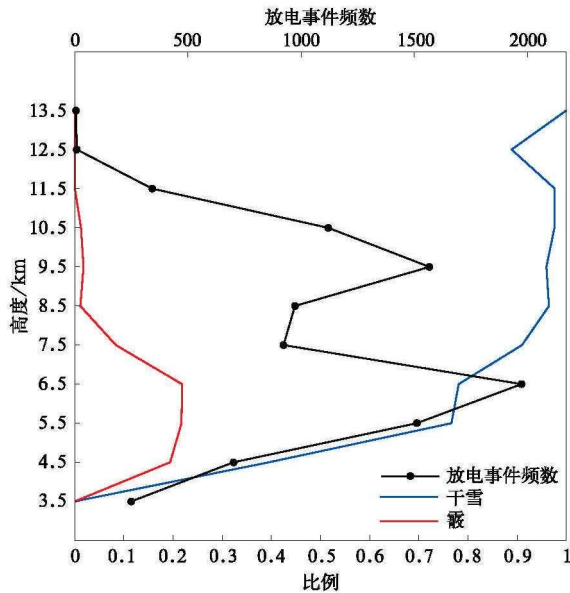


图6 2017年5月7日00:00—04:00分析单体内放电事件频数以及对应干雪和霰产生放电事件的网格比例在各高度的分布

Fig. 6 Proportions of radar grid boxes dominantly featured by graupel and dry snow and the frequency of LPDE at different heights in the investigated cell during 0000—0400 BT on 7 May 2017

#### 4.2 闪电活动与雷达回波参数关系

回波顶高和雷达回波体积是分析对流系统降水结构的常用参数。回波顶高反映对流发展的强度,回波体积反映水成物粒子的空间分布尺度。本文对强降水单体发展过程中闪电活动与20 dBZ, 30 dBZ和40 dBZ雷达回波顶高以及不同温度层上各雷达回波体积的关系进行分析(图7,各温度层高度数据来自2017年5月6日20:00清远探空),文中相关系数除特别说明,均达到0.05显著性水平。

分析发现总闪频数和20 dBZ, 30 dBZ以及40 dBZ雷达回波顶高的相关系数分别为0.59, 0.74和0.34,总闪频数与30 dBZ雷达回波顶高相关性最好。图7a给出了总闪频数与30 dBZ雷达回波顶高随时间变化曲线,总闪频数峰值出现在01:30(峰值时间表示该时刻及其随后6 min,下文表述同此),30 dBZ雷达回波顶高出现在01:12,略超前于

总闪频数峰值时间。

分析总闪频数与不同温度层上大于20 dBZ, 30 dBZ和40 dBZ雷达回波体积关系时发现,大于20 dBZ回波体积与总闪频数的相关性最好,其中-20℃温度层之上大于20 dBZ的回波体积与总闪频数的相关系数为0.88。图7b显示了总闪频数和整个单体以及0℃, -10℃, -15℃, -20℃温度层以上大于20 dBZ的回波体积随时间变化曲线,回波体积的峰值稍微落后于总闪频数的峰值。

图7c是闪电高度与20 dBZ雷达回波顶高随时间变化曲线,其中闪电高度由统计间隔6 min内的所有放电事件高度求平均得到。可以看到,二者随时间变化趋势相似,相关性达0.79。20 dBZ雷达回波顶高峰值出现在01:24,略落后于放电事件的高度峰值01:12。闪电高度与30 dBZ, 40 dBZ雷达回波顶高的相关系数分别为0.63和0.16(未达到0.05显著性水平),相关性均弱于20 dBZ。

图7d是放电事件平均高度和不同温度层上大于30 dBZ的回波体积随时间变化曲线,后者的峰值时间均落后于前者的峰值时间,其中-20℃温度层上大于30 dBZ的回波体积与放电事件平均高度的相关性最好,相关系数为0.79。上述分析表明,对此次暖云降水系统而言,闪电活动仍然是与该降水单体对流强度以及冰相区域的冰相物正相关。闪电频数与雷达回波顶高、闪电活动高度与雷暴系统回波顶高时序变化的相似性表明,对流的增强和减弱与起、放电过程紧密联系。另一方面,由于本分析个例暖云降水过程主导的特征,该分析单体中时序上与闪电活动相关性最好的雷达属性往往对应较低的温度层阈值(体现相对较强的对流作用)和较小的反射率因子阈值(与较小尺度的粒子相关)。如本研究中闪电频数与-20℃温度层上大于20 dBZ回波体积相关性最好。作为对比,石玉恒等<sup>[31]</sup>在北京地区雷暴活动的分析中发现-15℃温度层以上超过30 dBZ的回波体积与总闪频数关系最好,相关系数达到0.89。易笑园等<sup>[32]</sup>在线状中尺度对流系统研究中指出,6 km高度以上40 dBZ体积与闪电活动具有很好的相关性。可能的原因如下:对流较强的系统中,大尺度的冰粒子能够更好地体现出与闪电活动关系密切的动力和微物理过程的作用,而大冰粒子通常高度较低,对应较大的雷达反射率因子,所以体现在上述相关性分析的阈值选择上就是温度较高(即高度较低)、反射率因子较大。弱对流的系统

则相反,大冰粒子比较少,小冰粒子占主导地位。在该情况下,高处的小冰粒子更能体现与起电活动关

系密切的对流能力,在相关分析的阈值选择上体现为较低的温度(较高的高度)和较小的反射率因子。

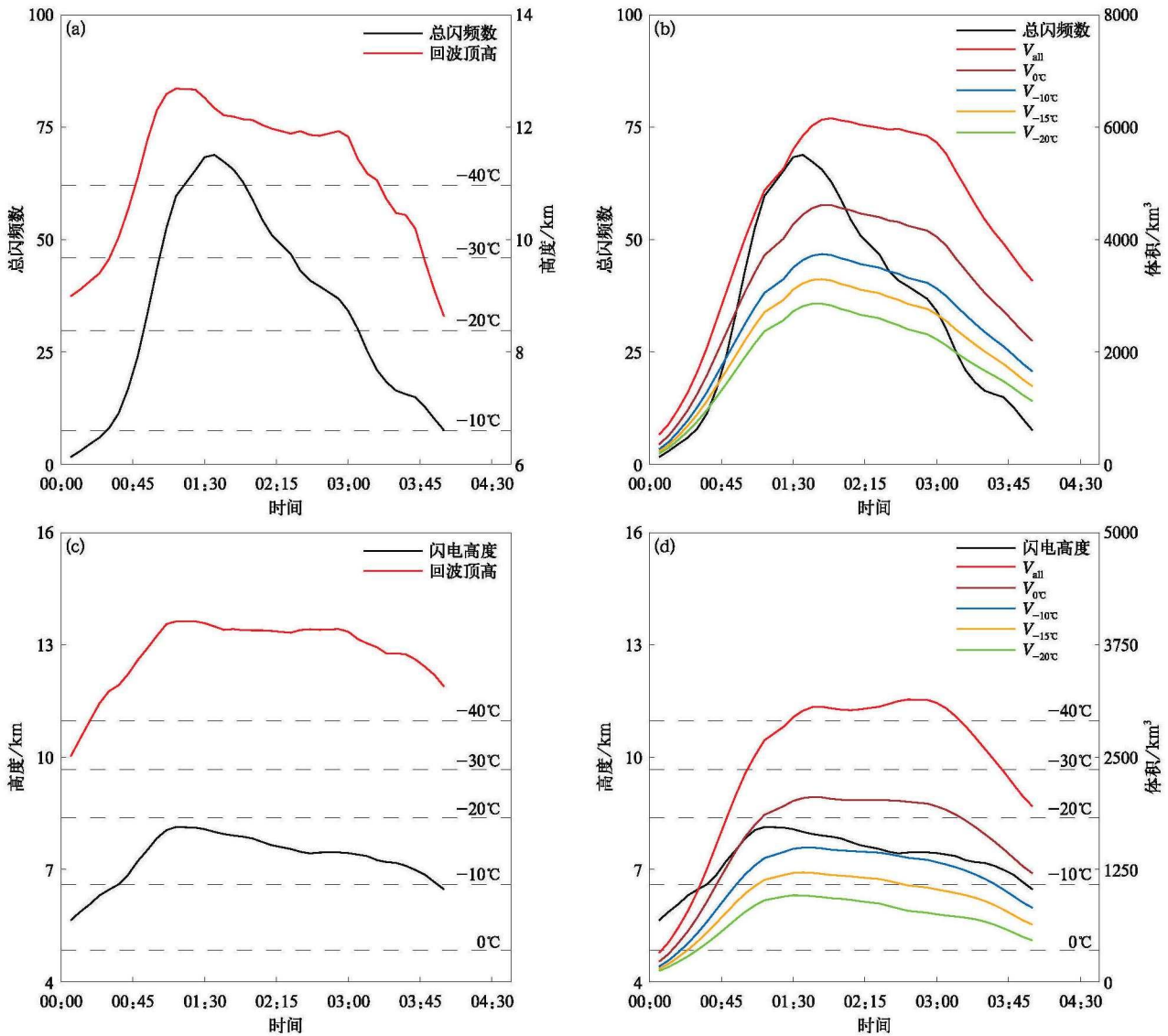


图7 2017年5月7日00:00—04:00分析单体内闪电活动与雷达回波参数变化

(数据经五点滑动平均处理,黑色虚线从下到上分别表示2017年5月6日20:00清远探空站0,-10,-20,-30,-40℃温度层高度)

(a)总闪频数与30 dBZ雷达回波顶高,(b)总闪频数与不同高度范围反射率因子大于20 dBZ回波体积

( $V_0, V_{-10}, V_{-15}, V_{-20}$ 和 $V_{all}$ 依次表示0,-10,-15,-20℃温度层和整个单体体积)

(c)平均放电事件高度与20 dBZ雷达回波顶高,(d)平均放电事件高度与不同高度范围反射率因子大于30 dBZ回波体积

Fig. 7 Time-sequence changes of lightning activity and echo parameters in the investigated cell during 0000–0400 BT

on 7 May 2017 (data processed by five-point moving average, dashed black lines indicate heights of 0, -10, -20, -30°C

and -40°C isotherms, which provided by Qingyuan sounding at 2000 BT 6 May 2017)

(a) total flash frequency versus 30 dBZ radar echo top height, (b) total flash frequency versus volumes of

regions with radar echoes above 20 dBZ in different height ranges ( $V_0, V_{-10}, V_{-15}, V_{-20}$  and

$V_{all}$  represent 0, -10, -15, -20°C layer and the cell, respectively),

(c) average height of LPDE versus 20 dBZ radar echo top height, (d) average height of LPDE versus

volumes of regions with radar echoes above 30 dBZ in different height ranges



### 4.3 闪电活动与降水关系

选择最大降水强度、降水量以及单个闪电对应降水量(rainyields per flash, RPF)分析闪电活动和降水的关系。上述参量计算均针对每6 min 1次雷达体扫进行。本文选择了两个降水阈值进行统计,分别是  $2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。相关参量的计算均基于降水率大于上述阈值区域计算。降水量即为每 6 min 对应区域的总降水量,RPF 为对应区域的降水总质量除以雷暴系统产生的闪电频数。

图 8a 展示了最大降水强度与闪电频数的关系。该强降水单体的最大降水强度出现时间与总闪电峰值时间一致,均位于 01:30,之后降水强度和总闪电频数都随时间下降,但闪电活动的减弱趋势明显大于最大降水强度的下降趋势,二者的相关系数为 0.66。

图 8b 中总闪电频数与不同降水强度分区中降水量随时间的变化未表现出较强的相关性,相关系数对应降水率大于  $2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  区域分别为 0.49 和 0.41,降水量峰值处反而对应着较小的闪电频数。

对每 6 min 1 次的雷达体扫分析,对应  $2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的降水阈值,RPF 变化范围分别为  $1.4 \times 10^7 \sim 2.2 \times 10^8 \text{ kg/fl}$  和  $2.9 \times 10^6 \sim 1.8 \times 10^8 \text{ kg/fl}$ 。整个分析过程,RPF 为  $2.9 \times 10^7 \text{ kg/fl}$  和  $2.2 \times 10^7 \text{ kg/fl}$ 。同时,本文对这两个降水率区域对应 RPF 与总闪电频数的相关性进行了统计,相关系数分别为 -0.63 和 -0.60,表明 RPF 与闪电频数为负相关,这也存在于之前雷暴过程 RPF 和闪电频数的时序关系分析中<sup>[33]</sup>,在关于 RPF 与闪电频数的空间对应关系的气候分析也存在<sup>[34-35]</sup>。

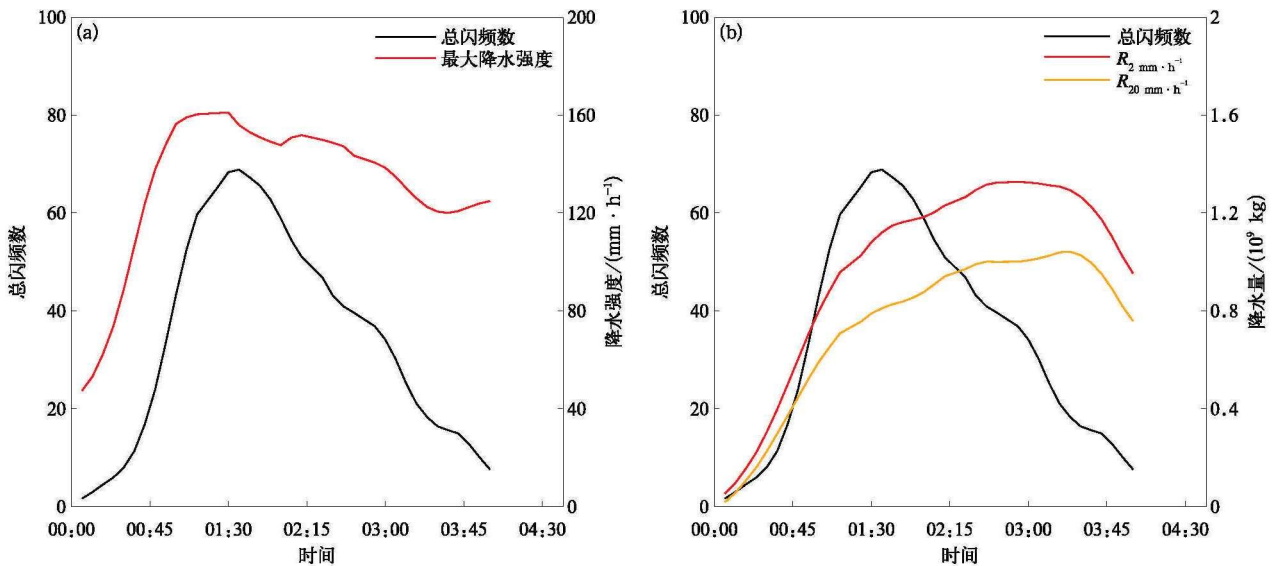


图 8 2017 年 5 月 7 日 00:00—04:00 分析单体内闪电活动与降水特征变化(数据经五点滑动平均处理)

(a) 总闪电频数与最大降水强度,(b) 总闪电频数与降水率大于  $2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $R_{2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}}$ ) 和  $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $R_{20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}}$ ) 区域对应的降水量

Fig. 8 Time-sequence changes of lightning frequency and precipitation characteristics

in the investigated cell during 0000—0400 BT on 7 May 2017(data processed by five-point moving average)

(a) total flash frequency versus maximum precipitation intensity,(b) total flash frequency and rainfall quantity in the regions where the rain rate greater than  $2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  and  $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , respectively

此次暖性强降水单体闪电和降水的关系与一些研究结果存在差异。如文献[12]和文献[36]均指出闪电频数和降水量通常具有较好的相关性,但该暖云强降水单体的闪电活动与降水量相关不显著。可能因为这些工作的研究对象是以冷云降水过程主导的典型雷暴系统,冷云降水和闪电活动都与混合相

态区域内动力微物理过程相关,使得两者相关性较强。而暖云降水为主的过程,主要的降水部分与混合相态区域的动力微物理过程关系较小,因此,与闪电活动关系也较差。与此同时,闪电活动与最大降水强度之间具有较好的对应,这可能是由于最大降水强度与强对流之间存在更紧密的关系。另一方

面,该单体 RPF 值与典型雷暴系统的 RPF 值在量级上( $10^7$  kg/fl)相当<sup>[12,37]</sup>。可能原因是,虽然此次降水过程闪电频数整体较低,但由于暖云过程主要贡献的降水在强度上也小于典型雷暴系统中冷云过程贡献的降水,所以该过程闪电频数和降水量都小于典型雷暴系统,使 RPF 值与典型雷暴系统量级相同。

## 5 结 论

本文利用 CMA\_FEELS 的 LFEDA 三维闪电观测数据和广州双偏振雷达观测数据,分析了 2017 年 5 月 7 日广东暖云降水过程主导的暴雨系统中一个极端强降水对流单体的闪电活动特征及其与云降水结构的关系,得到以下结论:

1) 该单体在 4 h 内共探测到 1250 个闪电,峰值闪电频数为 80 个/(6 min),平均闪电频数约为 5 个/min,地闪比例约 24%。绝大多数闪电出现在 4~12 km 高度,对应温度层为 0℃至-40℃,闪电活动的峰值高度出现在 8.5 km,对应环境温度约为-19℃。宏观上看,单体呈现上正-中负-下正的三极性电荷结构,中部负电荷核心区约在-8℃至-15℃。

2) 闪电放电位置对应的主导水成物粒子主要是干雪,霰的贡献较低。在闪电活动区域中,由于雪主导区域占比约为 82%,霰主导区域占比约为 11%,且大部分与闪电活动关联的霰粒子主要位于 4~8 km 高度。该单体闪电活动区域由于雪主导的情况可能与整体上此次暖云降水过程对流强度较弱有关。

3) 闪电活动与雷达回波参数相关性分析表明:总闪频数与 30 dBZ 雷达回波顶高、-20℃ 温度层上大于 20 dBZ 的回波体积具有较好的相关性;同时,闪电活动的平均位置高度与 20 dBZ 雷达回波顶高和-20℃温度层上大于 30 dBZ 的回波体积在时序变化上具有较好的一致性。结果表明,对于此次暖云降水系统而言,闪电活动仍然是与对流强度以及冰相区域的冰相物含量正相关。

4) 闪电活动与最大降水强度之间具有较好的相关性,但与总降水量之间的相关性较弱,单个闪电表征降水量的值为  $10^7$  kg/fl 量级。

暴雨过程,特别是暖云降水主导的暴雨过程中的闪电活动过去研究较少。本研究展示了此次暖云

降水主导的暴雨过程与典型雷暴系统在闪电活动及其与云降水结构关系方面的异同,未来有必要基于更多的个例研究进一步验证、明确这种异同,并从机理角度认识暖云降水主导的暴雨系统中闪电活动的独特性。

## 参 考 文 献

- [1] Takahashi T. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. *J Atmos Sci*, 1978, 35(8): 1536-1548.
- [2] 王飞,董万胜,张义军,等. 云内大粒子对闪电活动影响的个例模拟. *应用气象学报*, 2009, 20(5): 564-570.
- [3] 张义军,周秀骥. 雷电研究的回顾和进展. *应用气象学报*, 2006, 17(6): 829-834.
- [4] Zheng D, MacGorman D R. Characteristics of flash initiations in a supercell cluster with tornadoes. *Atmos Res*, 2016, 167: 249-264.
- [5] Mecikalski R M, Carey L D. Radar reflectivity and altitude distributions of lightning flashes as a function of three main storm types. *J Geophys Res Atmos*, 2018, 123(22): 12814-12828.
- [6] Wang C, Zheng D, Zhang Y, et al. Relationship between lightning activity and vertical airflow characteristics in thunderstorms. *Atmos Res*, 2017, 191: 12-19.
- [7] Wang F, Zhang Y, Zheng D, et al. Impact of the vertical velocity field on charging processes and charge separation in a simulated thunderstorm. *Acta Meteor Sinica*, 2015, 29(2): 328-343.
- [8] 王飞,张义军,赵均壮,等. 雷达资料在孤立单体雷电预警中的初步应用. *应用气象学报*, 2008, 19(2): 153-160.
- [9] Carey L D, Petersen W A, Rutledge S A. Evolution of cloud-to-ground lightning and storm structure in the Spencer, South Dakota, tornadic supercell of 30 May 1998. *Mon Wea Rev*, 2003, 131(8): 1811.
- [10] 孟青,樊鹏磊,郑栋,等. 青藏高原那曲地区地闪与雷达参量关系. *应用气象学报*, 2018, 29(5): 524-533.
- [11] 王艳,郑栋,张义军. 2000—2007 年登陆台风中闪电活动与降水特征. *应用气象学报*, 2011, 22(3): 321-328.
- [12] 郑栋,张义军,孟青,等. 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*, 2010, 21(3): 287-297.
- [13] 王婷波,郑栋,周康辉,等. 暴雨和雹暴个例中闪电特征对比. *应用气象学报*, 2017, 28(5): 568-578.
- [14] 王婷波,郑栋,张义军,等. 基于大气层结和雷暴演变的闪电和降水关系. *应用气象学报*, 2014, 25(1): 33-41.
- [15] 冯桂力,郑秀书,袁铁,等. 雹暴的闪电活动特征与降水结构研究. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(1): 123-132.
- [16] Zheng D, Zhang Y, Meng Q, et al. Lightning activity and electrical structure in a thunderstorm that continued for more than 24 h. *Atmos Res*, 2010, 97(1/2): 241-256.
- [17] Shi D D, Zheng D, Zhang Y, et al. Low-frequency E-field Detection Array (LFEDA)-Construction and preliminary results. *Sci China Earth Sci*, 2017, 60(10): 1896-1908.

- [18] Fan X P, Zhang Y J, Zheng D, et al. A new method of three-dimensional location for low-frequency electric field detection array. *J Geophys Res Atmos*, 2018, 123(16): 8792-8812.
- [19] Zheng D, Shi D, Zhang Y, et al. Initial leader properties during the preliminary breakdown processes of lightning flashes and their associations with initiation positions. *J Geophys Res Atmos*, 2019, 124(14): 8025-8042.
- [20] MacGorman D R, Rust W D, Schuur T J, et al. TELEX the thunderstorm electrification and lightning experiment. *Bull Amer Meteor Soc*, 2008, 89(7): 997-1014.
- [21] Wu C, Liu L, Wei M, et al. Statistics-based optimization of the polarimetric radar hydrometeor classification algorithm and its application for a squall line in South China. *Adv Atmos Sci*, 2018, 35(3): 296-316.
- [22] Park H S, Ryzhkov A V, Zrnić D S, et al. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: Description and application to an MCS. *Wea Forecasting*, 2009, 24(3): 730-748.
- [23] Chen H, Chandrasekar V, Bechini R. An improved dual-polarization radar rainfall algorithm (DROPS2.0): Application in NASA IFloodS field campaign. *J Hydrometeorol*, 2017, 18(4): 917-937.
- [24] 傅佩玲, 胡东明, 张羽, 等. 2017年5月7日广州特大暴雨微物理特征及其触发维持机制分析. *气象*, 2018, 44(4): 500-510.
- [25] 田付友, 郑永光, 张小玲, 等. 2017年5月7日广州极端强降水对流系统结构, 触发和维持机制. *气象*, 2018, 44(4): 469-484.
- [26] 徐瑶, 毕宝贵, 湛芸, 等. “5.7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析. *气象学报*, 2018, 76(4): 511-524.
- [27] 曾智琳, 湛芸, 朱克云, 等. 2017年“5.7”广州特大暴雨的中尺度特征分析与成因初探. *热带气象学报*, 2018, 34(6): 791-805.
- [28] Zheng D, Zhang Y, Meng Q, et al. Climatological comparison of small-and large-current cloud-to-ground lightning flashes over southern China. *J Climate*, 2016, 29(8): 2831-2848.
- [29] Krehbiel P R. The Electrical Structure of Thunderstorms. *The Earth's Electrical Environment*, 1986: 90-113.
- [30] Williams E R. The tripole structure of thunderstorms. *J Geophys Res Atmos*, 1989, 94(D11): 13151-13167.
- [31] 石玉恒, 张义军, 郑栋, 等. 北京地区雷暴的雷达回波特征与闪电活动的相关关系. *气象*, 2012, 38(1): 66-71.
- [32] 易笑园, 张义军, 王红艳, 等. 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*, 2013, 71(6): 1035-1046.
- [33] 王婷波. 北京地区雷暴闪电活动与降水关系的分类研究. 成都: 成都信息工程学院, 2013.
- [34] 齐鹏程, 郑栋, 张义军, 等. 青藏高原闪电和降水气候特征及时空对应关系简. *应用气象学报*, 2016, 27(4): 488-497.
- [35] Zheng D, Zhang Y, Meng Q, et al. Climatology of lightning activity in South China and its relationships to precipitation and convective available potential energy. *Adv Atmos Sci*, 2016, 33(3): 365-376.
- [36] Chang D E, Weinman J A, Morales C A, et al. The effect of spaceborne microwave and ground-based continuous lightning measurements on forecasts of the 1998 Groundhog Day storm. *Mon Wea Rev*, 2001, 129(8): 1809-1833.
- [37] Soula S, Chauzy S. Some aspects of the correlation between lightning and rain activities in thunderstorms. *Atmos Res*, 2001, 56: 355-373.

## Lightning Activities in a Convection Cell Dominated by Heavy Warm Cloud Precipitation

Liu Ze<sup>1)2)</sup> Guo Fengxia<sup>1)</sup> Zheng Dong<sup>2)</sup> Zhang Yang<sup>2)</sup> Wu Chong<sup>2)</sup> Yao Wen<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD)/Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

<sup>2)</sup> (Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering/State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

### Abstract

Lightning activity in a convection cell that occurred in Guangzhou of China on 7 May 2017 dominated by heavy warm cloud precipitation and its relationship with the precipitation structure of the cell are discussed, using three-dimensional lightning location data of the Low-Frequency E-field Detection Array (LFE-DA) in the Field Experiment Base on Lightning Sciences, China Meteorological Administration (CMA-FEBS) and Guangzhou polarimetric radar observations. According to the ground precipitation obtained by radar inversion, the maximum cumulative precipitation from 0000 BT to 0400 BT in the cell dominated by warm cloud precipitation is 261 mm. The cell produces a total of 1250 detected lightning flashes within 4 h, with the ratio of cloud-to-ground flashes being about 24%. Lightning discharges mainly occur in the height range of 4–12 km, corresponding to the isotherm layers between approximately 0°C and –40°C. The height and isotherm associated with the peak-frequency lightning discharges are about 8.5 km and –19°C, respectively. The heavy rainfall cell represents general tripolar charge structure, i. e., the upper positive charge region, middle negative charge region and lower positive charge region, with the negative charge core being between approximately –8°C and –15°C layers. The region featuring lightning discharges and dominated by dry snow account for about 82% of all, while the ratio for the region featuring lightning discharges and dominated by graupel account for about 11%. Most graupel-dominating regions associate with lightning discharges are located between 4 km and 8 km layers. This may be related to the weak convection in the cell dominated by warm cloud precipitation. Total lightning rate show relatively significant correlations with the 30 dBZ radar echo top height and volumes of the regions where radar echoes are greater than 20 dBZ and heights are larger than –20°C level. The average height of lightning discharges is well related with the 20 dBZ radar echo top height and volumes of regions where radar echoes are greater than 30 dBZ and heights are larger than –20°C level. Relative prominent corresponding relationship is also found between total flash frequency and maximum precipitation intensity. Meanwhile, the rainfall per flash is in the order of  $10^7$  kg/fl.

**Key words:** extreme rainfall; warm cloud precipitation; three-dimensional lightning activity; polarimetric radar; cloud precipitation structure