北京城区相继多次降雹的一次强雷暴的闪电特征·

孙萌宇[1, 4]，郄秀书[1, 4*]，孙凌[2]，刘冬霞[1]，王东方[1, 4]，袁善峰[1, 4]，
陈志雄[1, 4]，徐文静[1, 4]，孙成云[3]，苏德斌[2]

1. 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室，北京，100029

2. 成都信息工程大学大气科学学院，成都，610225

3. 中国气象局北京城市气象研究所，北京，100089

4. 中国科学院大学地球与行星科学学院，北京，100049

摘 要 受东北冷涡和低层暖湿气流影响，2016 年 6 月 10 日北京城区午后爆发了相继 5 次降冰雹的一次强烈雷暴天气过程。利用国家“973”项目“雷电重大灾害天气系统的动力-微物理-电过程和成灾机理（雷暴 973）”2016 夏季协同观测期间获得的闪电全闪三维定位和多普勒天气雷达等资料，详细分析了此次雹暴的闪电活动和雷达回波特征。此次雹暴过程包括三个孤立的单体相继发展、并合，所分析的 4 次降雹过程中，总闪电频数在降雹期间都有明显增多，最高可达 365 fl/min，云闪占全部闪电的 80%以上，其中 3 次降雹前正地闪出现突增，比例升高，正地闪占全部地闪的比例最高达 56%。降雹时雷达回波>45dBZ 的面积增大，顶高超过 13km。整个雹暴过程，闪电辐射源主要分布在 6~10km 的高度区域，与强回波具有一致性。全部 4 次降雹过程均出现明显的闪电频数跃增，并通过 2 ϭ 阈值检验，其中 3 次提前时间为 8-18 分钟，说明总闪频数对于降雹过程有一定的预警能力。

关键词 雹暴，闪电活动，辐射源三维定位，雷达回波

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1910.19134

收稿日期：2019-03-26；网络预出版日期：

资助项目：国家自然科学基金重点项目（41630425）和国际(地区)合作与交流项目（41761144074）

作者简介：孙萌宇，主要从事大气环境和大气电学研究。E-mail: sunmengyu16@mails.ucas.edu.cn

*通讯作者：郄秀书，qiex@mail.iap.ac.cn

Lightning Activity of a Severe Thunderstorm with Several Hail-fall Stages in Beijing Metropolitan Region

Sun Mengyu[1,4], Qie Xiushu[1,4*], Sun Ling[2], Liu Dongxia[1], Wang Dongfang[1,4], Yuan Shanfeng[1,4], Chen Zhixiong[1,4], Xu Wenjing[1,4], Sun Chengyun[3], Su Debin[2]

1 Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

3 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

4 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences，Beijing 100049

Abstract Influenced by the Northeast China cold vortex and warm-moist airflow in low level, a damaging thunderstorm with 5 hail-fall stages took place in Beijing on 10 June 2016. Based on the 3D-location results of total lightning from Beijing Lightning Network (BLNET) and Doppler radar data during the STORM 973 2016 campaign, the characteristics of lightning activity and radar reflectivity structure during this thunderstorm were analyzed. The thunderstorm consisted of three isolated cells triggered in sequence and merged together finally, total lightning frequency increased significantly during the 4 hail-falling stages analyzed, up to 365 fl/min. IC (intra-cloud) lightning flashes accounted for more than 80% of total lightning. The ratio of PCG/CG (positive CG to CG) increased sharply before 3 hail fall stages, up to 56%. During the developments of hailstorm, the area of radar echo greater than 45dBZ increased and echo top exceeded 13km. Lightning radiation sources mainly distributed in the altitude layer from 6 to 10 km throughout the hailstorm process, which was consistent with strong radar echo region. In addition, the total lightning flashes increased dramatically before the 4 analyzed processes, and passed 2 б -threshold test. Three of them were 8-18 minutes ahead of the hail-fallings, which shows that the total lightning frequency has a certain early warning ability for hail fall process.

Keywords Hailstorm; Lightning; 3D-location results of lightning radiation sources; Radar reflectivity

1. 引言

冰雹云（也称雹暴）是一种发展旺盛的强对流系统，产生的冰雹也是一种常见的灾害性天气，冰雹的形成和预报至今仍是灾害性天气研究的重点和难点。雹暴的发生发展过程伴随着云内复杂的动力、热力、微物理及起电、闪电等物理过程及相互作用。相对于普通雷暴，由于综合同步观测资料较少，目前对于冰雹云内闪电活动研究较少。

早期的研究主要是基于地闪定位开展的。Reap 和 MacGorman（1989）发现出现大冰雹的可能性随着正地闪频数的增加而增大，随后的研究也发现雹暴常常在正地闪频发阶段出现大冰雹（MacGorman and Burgess，1994；Stolzenburg，1994；冯桂力等，2007；Liu et al., 2009）。Soula 等（2004）利用具有云闪探测能力的 SAFIR 闪电资料对欧洲南部雹暴的研究发现，与仅产生降水的雷暴相比，所有产生降雹的雷暴其地闪频数相对于总闪电而言异常低，但是正地闪相对于总地闪而言却有较高的比例，产生冰雹的雷暴地闪频数不超过 2 次/min，而仅产生大雨的雷暴地闪频数则可以超过 12 次/min。郑栋等（2010）利用 SAFIR3000 的三维闪电定位系统与雷达结合对北京一次冰雹过程的闪电活动特征研究发现，地闪仅占 6.16%，但正地闪占总地闪的比例达 20%。因此仅用地闪资料对冰雹云进行研究是不全面或者是不合适的。但受探测资料的限制，目前基于总闪三维定位对冰雹云的闪电研究还非常少。

2016 年 6 月 10 日（北京时，下同）北京地区午后爆发了一次强雹暴过程，这次过程在北京城区发生并发展，在其成熟东移的过程中伴随三个孤立单体相继发展、并合，并先后 5 次降雹，并造成北京城区部分地区出现内涝、部分楼牌倒塌、车辆由于冰雹损毁严重。国家“973”项目“雷电重大灾害天气系统的动力-微物理-电过程和成灾机理（雷暴 973）”2016 夏季协同观测期间，获得了这次过程的全闪三维定位资料，本文将据此并结合多普勒天气雷达资料、探空、自动气象站网和 FY-2G 静止卫星云顶亮温等资料，对这次强降雹天气过程进行研究。

2. 观测资料及方法

本文采用资料来自“雷暴973”的协同观测资料，主要包括：北京闪电综合探测网（BLNET）的全闪三维定位资料，北京、天津以及石家庄的3部S波段和张北的1部C波段的雷达组合反射率，北京市气象局的自动气象站网资料、冰雹观测数据，以及美国怀俄明大学网站（http://weather. uwyo.edu/）的探空数据和云顶亮温等。BLNET是一个区域性的、多频段的闪电综合探测和定位网，共有16个测站构成，能同时对地闪和云闪辐射脉冲进行三维定位（王宇 等，2015；Wang et al., 2016），网络对云闪的探测效率约为97.4%，对地闪的识别效率为73.9%（Srivastava et al., 2017）。

根据气象站地面人工观测，此次雹暴过程共包括五次降雹过程。第1次降雹发生在14:48~15:00（北京时，下同），BLNET在14:46探测到第一个5站同时定位闪电，但由于此时段BLNET 16个测站尚未完全开机、闪电资料不完整，故分析从有可靠闪电资料的15:00开始，第1次降雹过程在此不做讨论，主要分析后面的4次降雹过程。下面将综合利用上述资料，对2016年6月10日雹暴过程的天气背景、闪电活动演化特征、以及闪电与降雹时间的关系等进行研究。

3. 雹暴过程分析

3.1 天气背景

2016年6月10日14:24冰雹云单体在北京海淀区北部生成并迅速发展，14:48该区域突降暴雨并伴有闪电、短时大风及冰雹，与此同时，冰雹云向东南移动并旺盛发展，15:50 北京市及部分区县气象局相继发布了雷电蓝色预警及冰雹黄色预警。图1给出了08:00时的天气形势图，由图可见本次雹暴过程东北冷涡发展较为深厚，京津冀上空500 hPa以东北冷涡南部盛行的偏西气流为主，冷涡西部的偏北气流和槽后的西北气流带来北方中层的干冷空气，低层850 hPa为西南暖湿气流，在京津冀地区形成了明显的不稳定层结，为此次对流发展提供了很好的动、热力条件。

图 2a 给出了北京站 08:00 的探空廓线，水平风从低到高出现顺转趋势，风速依次增大，低层存在强的水平风垂直切变；800 hPa 以上，温度露点差较大，水汽含量较低；800 hPa 以下，温度露点差较小，水汽较为丰富，上干下湿，形成不稳定层结；低层有明显逆温层，有利于不稳定能量的累积，这种环境条件容易触发强对流天气。

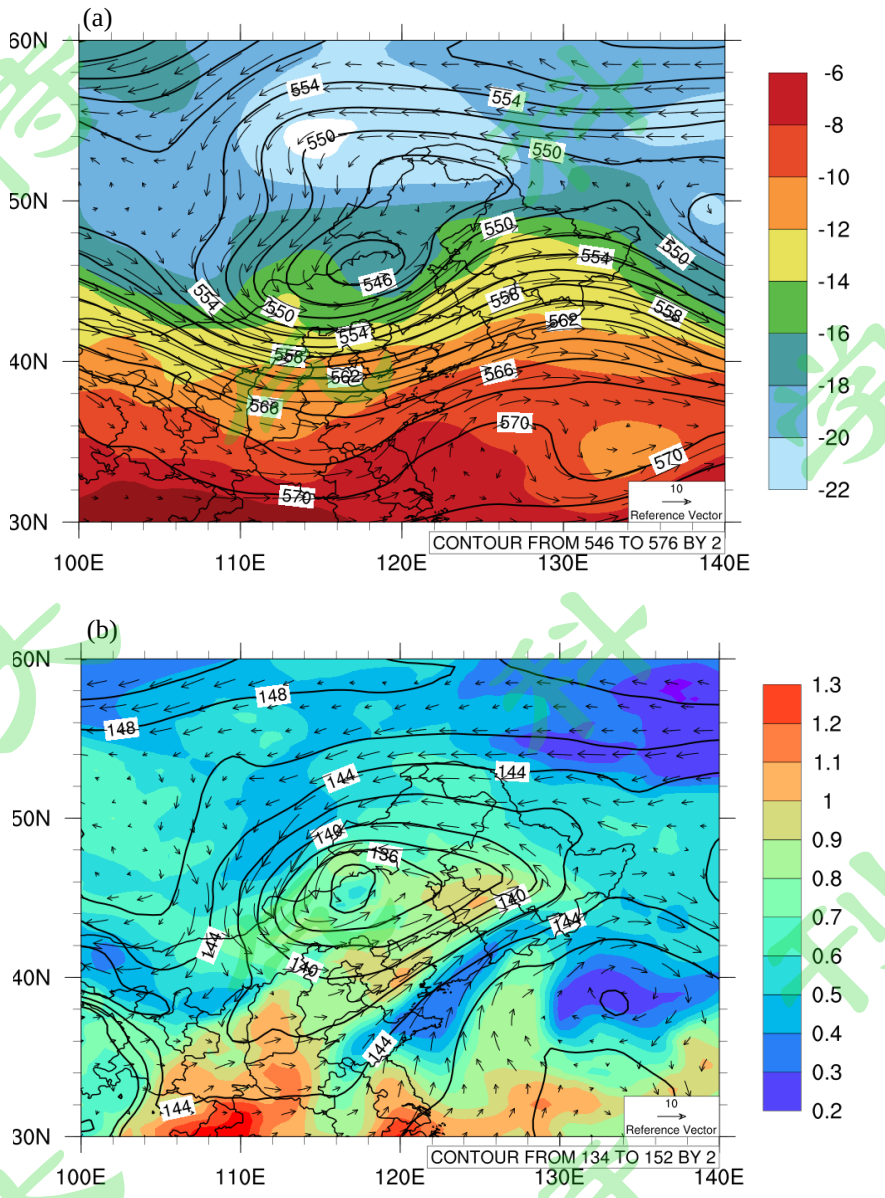


图 1 2016年6月10日08时（a）500 hPa等高线（黑线，单位：gpm）和温度（填色，单位℃），（b）850 hPa等高线（黑线，单位：gpm）、比湿（填色，单位 g/kg）和风矢量（箭头，单位：m/s）

Figure 1 (a) 500 hPa geopotential height (black lines, units gpm) and temperature (shaded, unit℃),(b)850 hPa geopotential height (black lines, units gpm), specific humidity (shaded，units

g/kg) and wind vectors (arrows, unit m/s) at 0800BJT on June 10, 2016

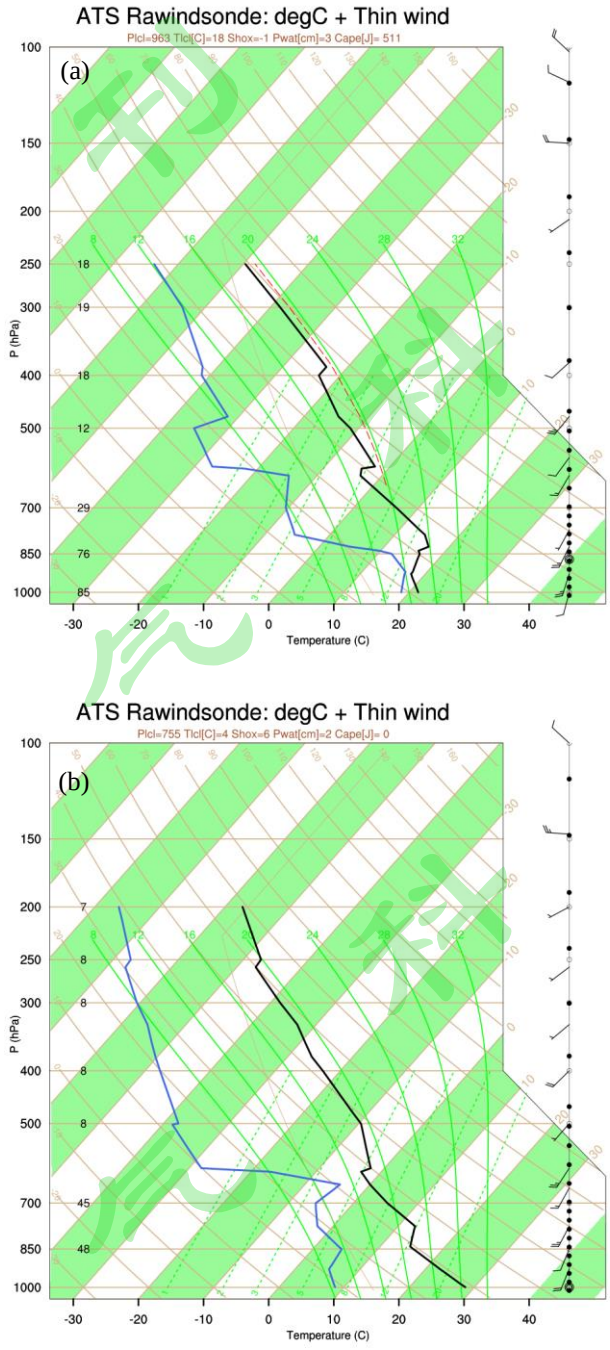


图 2 2016年6月10日北京站探空廓线，黑色实线表示环境温度曲线，蓝色实线表示环境露点温度曲线，红色点划线表示状态曲线（a）08时，（b）20时

Figure 2 Sounding profiles for Beijing at (a) 0800BJT, (b) 2000BJT on Jun10, 2016. The black, blue solid lines and red dashed line represent temperature, dew point, parcel adiabatic lapse rate,

respectively

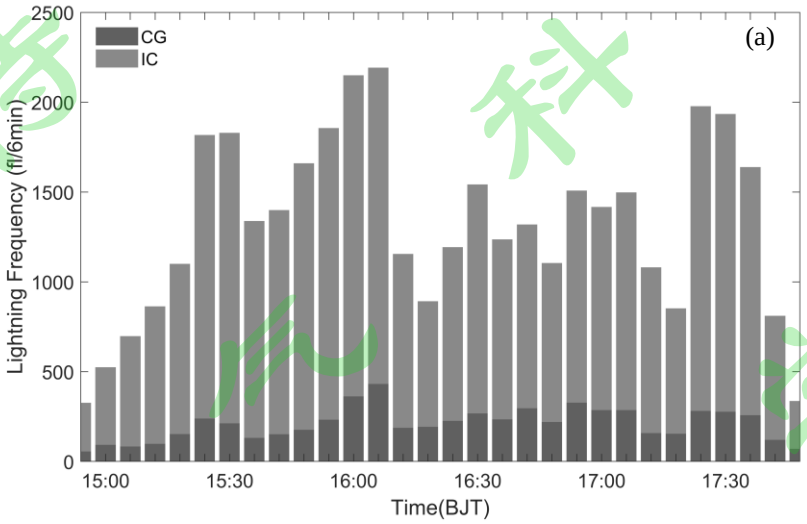
3.2 闪电活动的演变特征

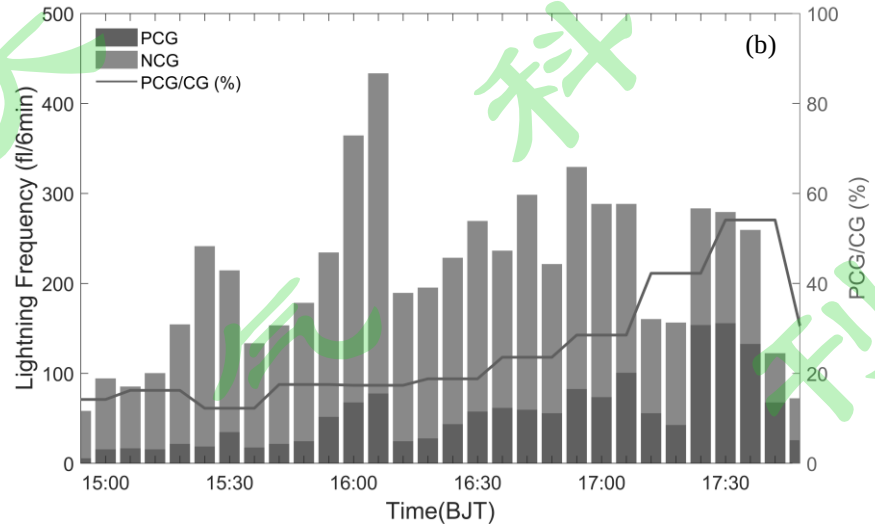
图 3 为此次雹暴过程从北京城区生成直至在天津地区消亡的闪电频数随时间的演变。由图 3a 可知，整个雹暴生命期内闪电活动主要以云闪为主，并呈出多峰值分布特征，峰值出现在 15:30、16:00、16:30、17:06 及 17:30，总闪频数依次为 304 fl/min、365 fl/min、256 fl/min、251 fl/min、329 fl/min，其中云闪占绝大部分，大部分时段云闪占 80%以上。其中 15:30、16:00 及 17:30 的总闪电峰值时段，分别对应朝阳区、郊县通州及天津地区地面降雹过程（分别为第 2、3、5 次降雹），17:06 的总闪峰值出现在郊县大兴降雹（第 4 次降雹）之后。对于正地闪，整个过程中正地闪占比整体超过 20%，第 5 次降雹中甚至达到 53%。第 2、3、5 次降雹过程中，正地闪比例均明显增加，只有第 4 次正地闪跃增稍迟于降雹。

为了解此次雹暴过程中闪电活动在云内的分布，进一步运用 BLNET 三维定位资料来分析闪电辐射源的分布特征（统计时间间隔 6min，垂直分辨率 0.5km）。从图 3c 可以看出，辐射源在第二次降雹前分布在高度 5～12km，15:18（对应第 2 次降雹）其辐射源数量迅速增多，高值区垂直分布扩展到 6~10km，并向上延伸出弱的集中区高度达 14km。这次降雹过程是辐射源密度最大的阶段，对应高度层的温度为-20 ℃~-40 ℃，说明雷暴云内的对流活动旺盛，强烈的上升气流将水成物粒子抬升至温度更低的区域，有助于冰雹的进一步发展、长大。此后辐射源减弱，16:00（第 3 次降雹）再次活跃，上部中心扩大（10~14km）。随第 3 次降雹过程的结束，辐射源数目再次减少，直到 16:24 辐射源集中高度升高，总闪电频数缓慢增加，16:42 小范围的辐射源集中在 12km 处，发展至 16:54（第 4 次降雹），10~12km 形成辐射源高值区，此时总地闪处于峰值，正地闪占总地闪比例出现小幅跃增。17:24（第 5 次降雹）辐射源再次出现密度集中区，主要位于 10~12 km，高度最高可达 14 km，总闪频数对应图 3a 中的峰值 189 fl/min，且

正地闪比例最大（达到 53%）。之后辐射源数量明显减少，集中高度降低，垂直分布范围缩小。

上述分析表明，此次雹暴过程的闪电活动与降雹有很好的对应：从垂直结构来看，辐射源形成密度高值区、发展高度达到极大值的时间基本与四次降雹过程一致；在时间的演变方面，总闪频数峰值出现、正闪比例跃增的时间与降雹过程均有较好的对应。





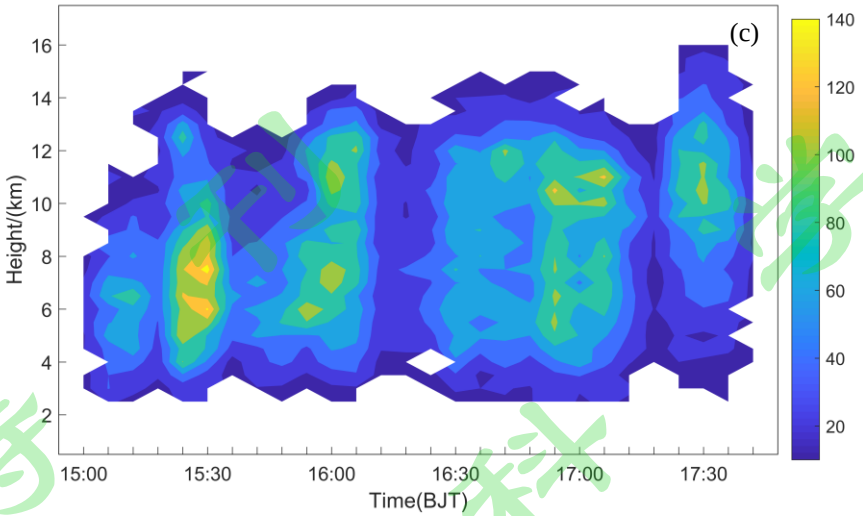


图 3 （a）总闪、（b）地闪活动与（c）冰雹云系的辐射源高度（填色，单位：个/6min）、40dBZ（虚线）、50dBZ（实线）回波顶高的时间变化

Figure 3 (a) Temporal variation in lightning activities, (b) Temporal variation in cloud-to-ground lightning activities, and (c) time-height distribution of lightning radiation (shaded, units: number/6min) and temporal variation of maximum echo top of 40dBZ (dashed line) and 50dBZ (solid line)

3.3 降雹阶段的闪电活动与云顶亮温

冰雹云发展旺盛、演变迅速，所以对其发展及演变特征进行研究存在较大的困难，而静止卫星能够针对特定地区提供大范围全天候的监测信息，特别是FY-2G 静止卫星的逐小时相当黑体亮温产品，为分析闪电活动与冰雹云的相互关系提供了资料保障。云顶亮温可用来表征对流活动，亮温越低，表明云顶越高，云层越厚，对流越旺盛。选取此雹暴过程中 4 个时次 FY-2G 静止卫星云顶亮温与之后 15min 内的闪电活动进行叠加，并给出相应时刻 30dBZ 雷达组合反射率区域（图中绿色等值线），如图 4 所示。可以看出，云团起初位于北京东侧，南北各有一冷云中心，南侧冷云核亮温最低值小于-50℃。此时冰雹云系分布在北京主城区，呈东北-西南向，贯穿房山、丰台、东城及朝阳区，位置与云顶亮温南侧梯度大值区相对应，闪电活动主要分布在此梯度大值区，与 30dBZ 回波相重合的区域。另外，在北侧也存在一同样位于亮温梯度大值区的雷暴。

云团向北京东南部发展加强，闪电活动有所增加，且正、负地闪主要集中在30dBZ 回波内，低于-50℃的冷云核内发生大量云闪。随着冰雹云系内的单体合并，到 17:00 冰雹云系 30dBZ 回波面积有所增加，此时，冷云进一步发展旺盛，云顶亮温中心值低于-60℃，位于冰雹云系北侧。随着冷云核温度的降低，闪电活动更加旺盛，说明冰雹云内聚集大量的冰相粒子，云内的非感应起电机制（Takahashi, 1978; Saunders et al., 1991; Saunders and Peck, 1998）被加强，同时由于云内电场的增加，与电场有关的水成物粒子感应起电过程也进一步加强。由图 4c 可见，此时正地闪明显增加，主要分布在-60℃冰核至南侧亮温梯度大值区之间。云团系统在 18:00 已完全离开北京进入天津境内，北京地区亮温逐渐升高，闪电数量明显减少。在整个冰雹云的演变过程中，云顶亮温低值区的位置、数值与闪电活动的移动、强度均有良好对应。

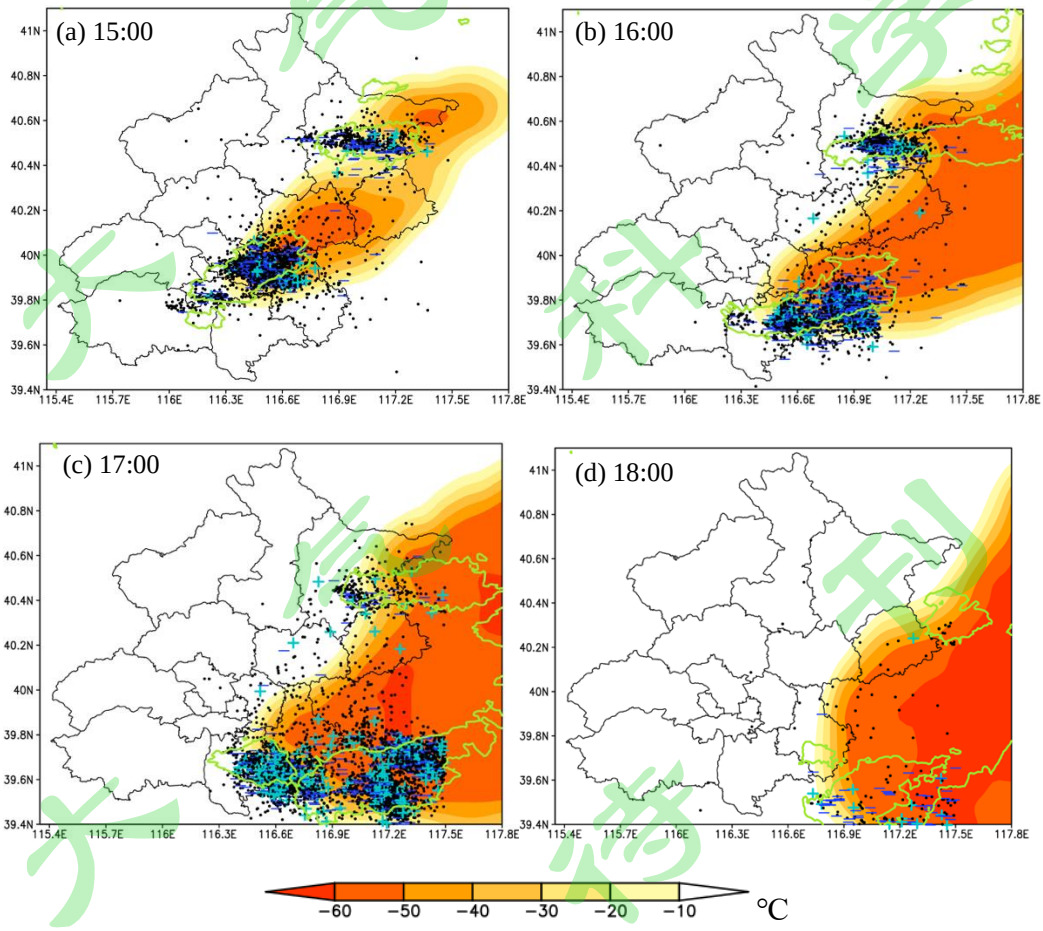


图 4 不同时次云顶亮温（填色，单位:℃）、30 dBZ 雷达组合反射率（绿色等值线）与之后15 min闪电的叠加（黑色“•”为云闪，浅蓝色“+”为正地闪，深蓝色“-”为负地闪）

Figure 4 TBB (shaded, unit ℃), 30 dBZ composite reflectivity (green contour) and 15min

lightning (IC black "·"，PCG light blue "+"，NCG dark blue "-")

3.4 降雹阶段的闪电活动与雷达回波特征

由前两节分析可知，此次雹暴过程中，辐射源形成密度高值区在时间上基本与四次降雹相一致，总闪与正闪跃增的时间与降雹过程也有较好对应，并且闪电主要发生在云顶亮温梯度大值区，并与>30dBZ 的强回波区域重合。下面将结合多普勒天气雷达及 BLNET 辐射源定位资料，对各降雹阶段中闪电活动与雷达回波之间的关系进行分析。第 2~5 次降雹阶段的雷达组合反射率及之后 6min 的闪电叠加如图 5 所示，该次雹暴过程受冰雹云单体 A、B 和 C 影响而发生。14:24 左右北京海淀区出现对流单体 A，15:00 左右北京地区出现两个对流单体 A、B，并向东移动，移动过程中发生合并后继续向东南发展至天津地区，此过程中，B 的西南侧有新单体 C 生成并发展。

单体 A 向东南方向移至朝阳区过程中发生第 1 次，第 2 次降雹（15:18～15:30，图 5a）也由单体 A 产生，此时单体 B 也发展成熟，产生的闪电频数逐渐增多，闪电主要分布在单体 A、B 的强回波区，在大于 45dBZ 的强对流区内，闪电活动以云闪为主。根据北京市气象局提供的冰雹人工观测资料（图略），降雹区域与闪电发生区域一致。第 3 次降雹过程（16:00～16:06，图 5b）由单体 A 向东移至郊县通州区继续发展而产生，此时，冰雹云 A 的正地闪明显增多，分布于 60dBZ 的雷达强回波区。单体 B 西侧的单体 C 开始生成且产生闪电。冰雹云单体 C 向东南移动过程中，第 4 次降雹（16:54～17:00，图 5c）发生，此时整个冰雹云系所产生的云闪和正地闪持续增多。单体 A、B 开始合并，存在两个地闪集中区，均位于雷达回波 60dBZ。第 5 次降雹过程（17:24～17:36，图 5d）冰雹云单体 A、B 合并后向东发展至天津地区，闪电辐射源集中于对流单体 C 内，正地闪绝大多数位于雷达 45dBZ 以上回波区。此阶段产生的总闪及地闪频数为整个过程中的极大值。

值得注意的是，该次雹暴过程的辐射源集中在回波强度>30dBZ 的强回波区域，但在 15dBZ 的弱回波区域内也有辐射源分布。这一方面是由于闪电放电发展到云外的通道所产生的闪电辐射被定位所致，另一方面也可能是由于 S 波段降

水雷达对主要由冰晶粒子构成的相对弱的上部云体探测能力较弱所致，而冰晶粒子是雷暴云中最重要的荷电粒子。从图 4 可以看到闪电发生区域和云顶亮温位置有更好的重合，也从一定程度上证明了这一点。

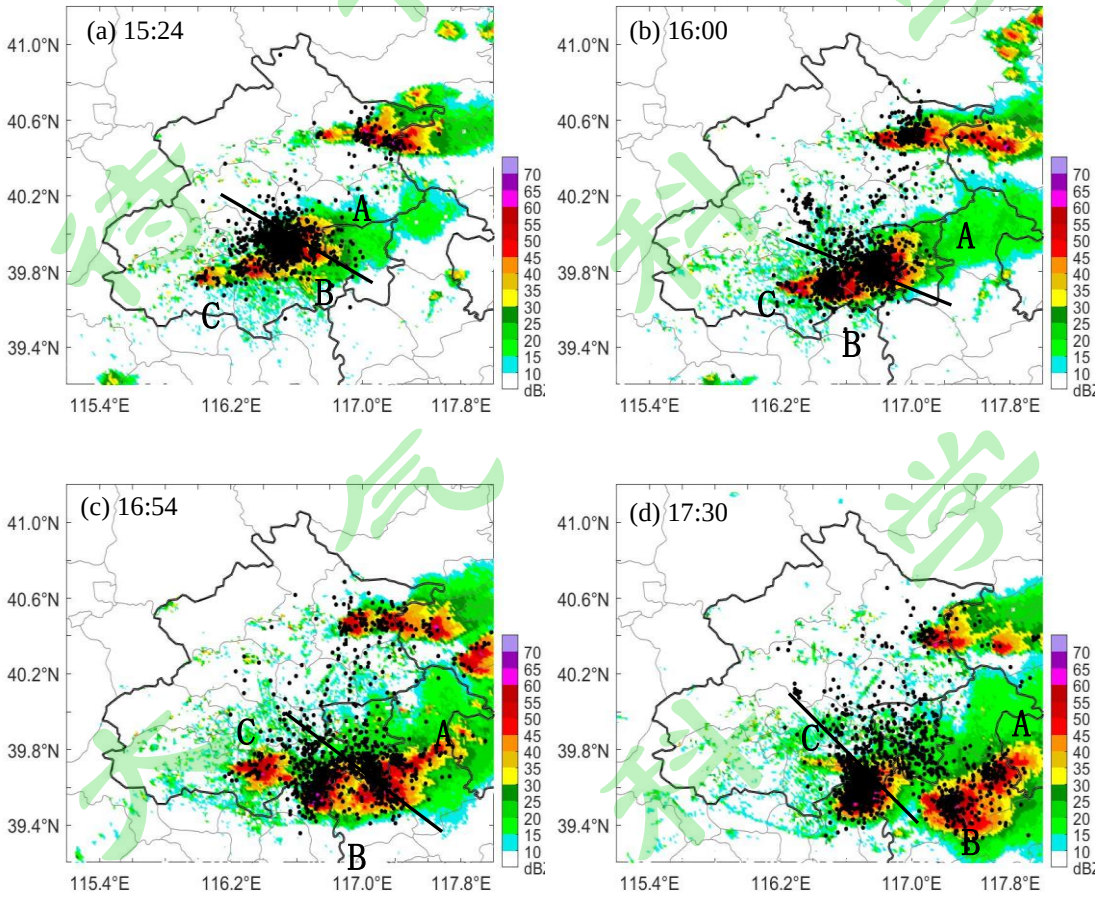


图 5 四次降雹阶段的雷达组合反射率（填色，单位：dBZ）与之后6min内的闪电叠加（黑色“·”），A、B、C：对流单体

Figure 5 Composite reflectivity (shaded, unit dBZ) at 4 hail-falling stages and 6 min lightning (black “·”), A, B, C represents different convective cells

图 6 给出沿图 5 线段做剖面得到的雷达回波，剖面两侧 10km 范围内 6min 探测到的闪电也叠加在上面。此次雹暴过程开始阶段（图 6a 与 6b）距离北京站雷达过于接近，故雷达回波高空部分有所缺失。根据 08:00 北京站探空资料，当时 0℃ 高度为 3.6km，−20℃ 高度为 7.1km。从图 6a（对于第 2 次降雹）可见，45dBZ、55dBZ 回波顶高分别达到 13km、11km 高度，远超过−20℃ 高度，强回波中心达到 60dBZ。闪电辐射源分布区域向上达 15km，向下伸展到地面附近，

大部分集中分布于 5～12km 雷达回波大于 45dBZ 区域。值得注意的是，辐射源在水平距离 30km 处，从 6km 高度向冰雹云右侧层云区伸展，弱回波区也有少量闪电零散分布。与前一降雹阶段相比，第 3 次过程（图 6b）45dBZ 回波顶高明显升高，强回波中心达到 55dBZ，闪电辐射源较均匀分布在 5～13km 的强回波区之间。第 4 降雹阶段持续时间较短，相比于前几次降雹阶段，冰雹云 C 发展较弱（图 6c），但绝大多数辐射源仍分布在 7～12km 高度上，与 45dBZ 强回波区相对应。从冰雹云 B 的垂直剖面（图 6d）可见，最后一次降雹中 55dBZ 回波顶高明显升高，强回波中心达到 60dBZ，且发展到 9km 高度。此时辐射源数目在强回波区明显增多，集中区的高度也随回波顶高升高，位于 6～13km。

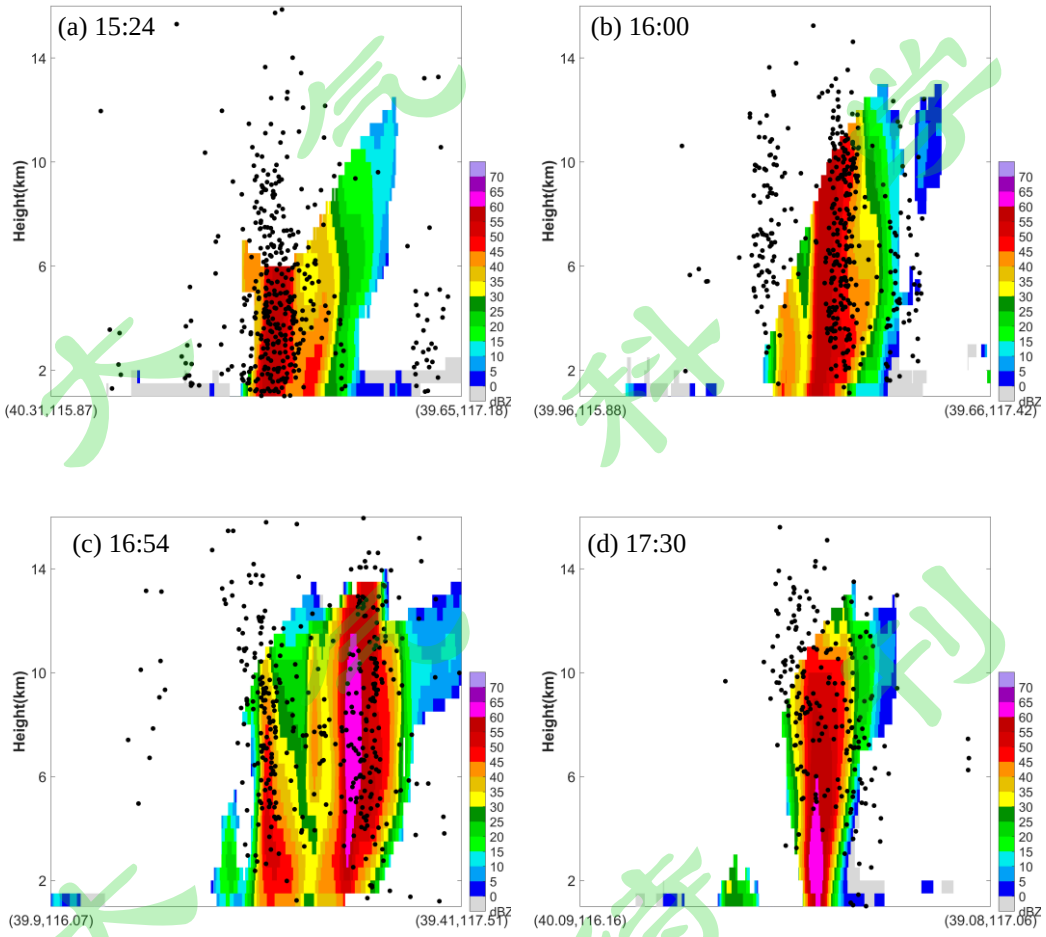


图6 沿图5中剖线的雷达反射率（填色，单位：dBZ）与之后6min内剖线10km范围内的闪电（“ •”）

Figure 6 Vertical profile of radar reflectivity (shaded, unit dBZ) and distribution of lightning

(black "·") within 10km in 6min through the convective cell shown in Figure 5

综合上述分析，在 2016 年 6 月 10 日的雹暴生成发展阶段，中心回波强度达 45dBz，顶高达到 7km；降雹时段，强对流中心发展旺盛，45dBz 回波面积增大，回波顶高超过 13km，云顶温度<−20 ℃。四次降雹过程中闪电主要分布在单体所对应的强回波区内，BLNET 探测到的辐射源密集区与雷达强回波区对应，并且随冰雹活动向东南移动，闪电位置也相应移动。在垂直方向，辐射源数目在强回波区明显增多，集中区的高度与强回波区具较好的一致性。闪电活动的位置、频数与冰雹活动均有较好的对应。

3.5 闪电活动与降雹时间

此次雹暴系统在北京中心城区发生突然，发展迅速，并在移动过程中多次降雹。通过分析，经 BLNET 定位得到的总闪、正地闪，其空间位置、频数可以较好的反映冰雹活动。为了寻找闪电活动与冰雹发生时间的对应关系，并进一步验证 BLNET 定位的闪电结果对强对流天气的预警能力。

Williams 等（1999）曾发现在强对流灾害发生前闪电会出现突然增加现象，Schultz 等（2009）和 Gatlin 等（2010）进一步对这一现象进行量化，利用2σ来衡量闪电的跃增（lightning jump）现象。下面利用这一2σ阈值算法来检验在四次降雹之前是否存在闪电跃增现象，具体计算方法为：

（1）以 2min 为时间间隔对 BLNET 资料的总闪电活动进行统计，得到随时间变化的闪电频数$f(t)$。

（2）利用闪电频数$f(t)$计算当前时刻总闪电频数的时间变化率$f'(t)$，计算公式为：

$$f' = \frac{d}{dt}f = \frac{f(t+\Delta t) - f(t)}{\Delta t}$$

（3）根据$f'(t)$计算得到f'_{thres}跃增阈值（jump threshold），即：

$$f'_{thres} = \overline{f'(t)} + 2\sigma[f'(t)]$$

式中，$\overline{f'}$及σ分别为闪电变化率f'的前 12min 滑动平均及标准差，其计算公式分别为：

$$\overline{f'(t)} = \frac{1}{N}\sum_{t=t-N}^{t} f'(t)$$

$$\sigma[f'(t)] = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{t=t-N}^{t}[f'(t) - \overline{f'(t)}]^2}$$

式中，在时间 t=12min 处计算滑动平均及标准差。

（4）将总闪频数时间变化率f'与跃增阈值f'_{thres}进行比较，如前者大与后者，则认为发生了一次闪电跃增，闪电频数的统计时间间隔为 2min。

计算当前时刻总闪电频数的时间变化率（图中柱状阴影）以及跃增阈值（jump threshold，图中黑色实线）示于图 7，表 1 列出四次降雹过程的总闪频次突变情况，分析时段内的四次降雹过程全部通过2σ阈值检验。由图 7 及表 1 可见，所关注的四次降雹过程均出现了正的闪电突变信号，说明在各过程中，均存在闪电活动的明显增强。对应降雹发生的时刻，第 2、5 次降雹过程的总闪跃增提前于降雹 8min，最大超前时间为 18min（第 3 次降雹），但第二次降雹过程的闪电跃增发生在降雹开始后 4 分钟。另外，在 16:34BJT 发生一次跃增，但随后 30min 内并未发生降雹。总体来说，此次雹暴过程的闪电跃增都发生在降雹过程早期，甚至有较长时间的提前，BLNET 总闪电综合探测定位资料对于本次雹暴的降雹过程有一定的预报能力。

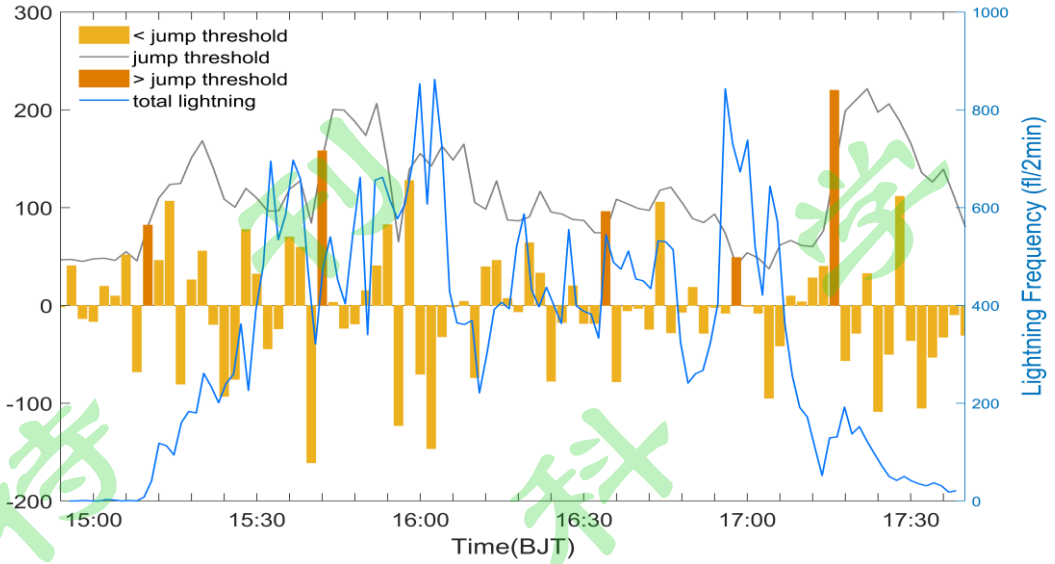


图 7 降雹的总闪电频次突增特征，其中柱形：总闪电频数的时间变化率，蓝色实线：总闪，黑色实线：跃增阈值（单位：fl/2min）

Figure 7 Time plot of the rate of change of the total lightning. The bars denotes the rate of change of the total lightning, the blue line represents total lightning, the black line is the jump threshold (unit: fl/2min)

表 1 降雹的总闪电频次突变特征

Table 1 The rate of change of the total lightning

降雹过程	降雹时间（BJT）	总闪跃增	超前时间（min）
2	15:18～15:30	15:10	8
3	16:00～16:06	15:42	18
4	16:54～17:00	16:58	-4
5	17:24～17:36	17:16	8

4 结论

2016 年 6 月 10 日一次强雷暴过程在北京城区生成并先后产生 5 次降雹，本文综合利用总闪辐射源三维定位、S 波段多普勒天气雷达资料、探空、自动气象

站网和 FY-2G 静止卫星云顶亮温等资料，详细分析了此次雹暴的发生发展过程及闪电活动特征，得到以下结论：

（1） 本次雹暴过程受东北冷涡以及高空槽影响，西北气流带来的强烈冷平流与暖湿气流在北京交汇，为本次过程的爆发提供了有利的天气条件，08:00 的探空资料显示 CAPE 值为 550J/kg。

（2） 雹暴生成发展阶段，中心回波强度达到 45dBz，顶高达到 7km。降雹时段，强对流中心发展旺盛，45dBz 回波面积增大，回波顶高超过 13km，并呈现出弓形回波结构。BLNET 探测到的辐射源密集区与雷达强回波区基本对应；在垂直方向，辐射源在强回波区明显增多，高度主要分布在 6~10km，与强回波具较好的一致性。

（3） 强雷暴整个生命期内先后共发生了 5 次降雹过程，在所分析的四个降雹时段，总闪电频数在降雹前和降雹阶段均出现跃增，最高可达 189 次/min，云闪占全部闪电的 80%以上。其中 3 次正地闪在降雹前出现突增，比例升高，正地闪占全部地闪的比例最高达 53%，降雹后正地闪频数减少。闪电跃增对降雹有很好的指示意义，分析时段内的四次降雹过程全部通过2σ阈值检验，3 次总闪频数在降雹之前发生突变，提前时间为 8-18 分钟，表明 BLNET 总闪电综合探测定位资料对于本次雹暴的降雹过程有一定的预报能力。

由于 BLNET 可以给出地闪和云闪辐射源的三维定位结果，为我们研究云闪占绝对优势的冰雹云的闪电特征提供了非常好的资料，研究得到了对这次雹暴在发展过程中的闪电演化特征及其与雷暴结构的关系。不过，虽然我们对辐射源的高度进行了分析，但是由于辐射源与不同电荷区域的联系尚在研究中，还不能得到此次雹暴的电荷结构，今后的工作将进一步基于正、负先导不同的物理特性和辐射特征，利用辐射源的强度、发展速度和辐射源密度等信息结合，来确定每一辐射源的极性及其对应的雷暴云电荷区域的极性，从而推断雷暴的电荷结构，并结合数值模式对冰雹云的起电机制和电荷分布等进行详细研究。另外，闪电频数对降雹的预警能力和微物理机制也需要进行一步检验和深入研究。

参考文献 (References)

冯桂力, 郄秀书, 袁铁, 等. 2007. 雹暴的闪电活动与降水结构研究. 中国科学 D 辑地球科学, 37(1) 123-132

王宇, 郄秀书, 王东方, 等. 2015. 北京闪电综合探测网(BLNET)网络构成与初步定位结果. 大气科学, 39(3) 571-82

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, 68 248-63

Brooks I M, Saunders C P R, Mitzeva R P, et al. 1997. The effect on thunderstorm charging of the rate of rime accretion by graupel. Atmos Res, 43 277– 295

Feng G L, Qie X S, Yuan T, et al. 2007. Analysis on lightning activity and precipitation structure of hailstorms, Sci China Ser D-Earth Sci, 50 (4) 629-639

Fierro A O, Mansell E R, MacGorman D R, et al. 2013. The Implementation of an Explicit Charging and Discharge Lightning Scheme within the WRF-ARW Model Benchmark Simulations of a Continental Squall Line, a Tropical Cyclone, and a Winter Storm. Mon Weather Rev, 141(7) 2390-2415

Guo F X, Li Y, Huang Z C, et al. 2017. Numerical simulation of 23 June 2016 Yancheng City EF4 tornadic supercell and analysis of lightning activity. Sci China Earth Sci, 60(12) 2204-2213

Helsdon J H, and Farley R D. 1987. A numerical modeling study of a Montana thunderstorm 1. Model results versus observations involving electrical aspects. J Geophys Res, 92(D5) 5661–5675

Kuetter J P, Zev L, Sartor J D. 1982. Thunderstorm electrification-inductive or non-inductive. J Atmos Sci, 38 2470-2484

Kuhlman K M, Ziegler C L, Mansell E R, et al. 2006. Numerically simulated electrification and lightning of the 29 June 2000 STEPS supercell storm. Mon Weather Rev, 134(10) 2734-2757

Liu D X, Feng G L, Wu S J. 2009. The characteristics of cloud-to-ground lightning activity in hailstorms over northern China. Atmos Res, 91 459-465

MacGorman D R and Burgess D W. 1994. Positive cloud-to-ground lightning in tornadic storms and hail storms. Mon Weather Rev, 122 1671-1697

MacGorman D R, Straka J M, and Ziegler C L. 2001. A lightning parameterization for numerical cloud models. J Appl Meteor, 40 459–478

Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. 2002. Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model. J Geophys Res, 107(D9) 4075

Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. 2005. Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm. J Geophys Res, 110 (D12) ACL2-1-2-14

Mansell E R, MacGorman D R, Bruning E C. 2010. Simulated Electrification of a Small Thunderstorm with Two-Moment Bulk Microphysics. J Atmos Sci, 67 171-194

Mansell E R, Ziegler C L. 2013. Aerosol Effects on Simulated Storm Electrification and Precipitation in a Two-Moment Bulk Microphysics Model. J Atmos Sci, 70(7) 2032-2050

Qie X S, Zhang T L, Chen C P, et al. 2005. The lower positive charge center and its effect on lightning discharges on the Tibetan Plateau. Geophys Res Lett, 32 L05814

Reap R M, MacGorman D R. 1989. Cloud-to-ground lightning Climatological characteristics and relationships to model fields, radar observations, and severe local storms. Mon Weather Rev, 117 518–535

Saunders C P R, Keith W D, Mitzeva R P. The effect of liquid on thunderstorm charging[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96: 11007-11017.

Saunders C P R, and Peck S L. 1998. Laboratory studies of the influence of the rime accretion rate on charge transfer during crystal/graupel collisions. J Geophys Res, 103(D12) 13949-13956

Srivastava A, Tian Y, Qie X S, et al. 2017. Performance assessment of Beijing

Lightning Network (BLNET) and comparison with other lightning location networks across Beijing. Atmos Res, 197 76-83

Stolzenburg M. 1994. Observations of high ground flash densities of positive lightning in summertime thunderstorms. Mon Weather Rev, 122 1740-1750

Soula S, Seity Y, Feral L, et al. 2004. Cloud-to-ground lightning activity in hail-bearing storms. J Geophys Res, 109(D02101)

Tan Y B, Liang Z W, Shi Z, et al. 2014. Numerical simulation of the effect of lower positive charge region in thunderstorms on different types of lightning. Sci China Earth Sci, 57 2125–2134

Takahashi, T. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms[J]. J. Atmos. Sci., 1978, 35: 1536–1548.

Wang Y, Qie X S, Wang D F, et al. 2016. Beijing Lightning Network (BLNET) and the observation on preliminary breakdown processes. Atmos Res, 171 121-132

Xu S, Zheng D, Wang Y, et al. 2016. Characteristics of the two active stages of lightning activity in two hailstorms. Acta Meteorol Sin, 30(2) 265-281

Ziegler C L. 1985. Retrieval of thermal and microphysical variables in observed convective storms. Part I Model development and preliminary testing. J Atmos Sci, 42 1487–1509

Ziegler C L, and MacGorman D R. 1994. Observed lightning morphology relative to modeled space charge and electric field distributions in a tornadic storm. J Atmos Sci, 51 833–851

Zhang, Y J, Meng Q, Lu W T, et al. 2009. Positive charge region in lower part of thunderstorm and preliminary breakdown process of negative cloud-to-ground lightning. Acta Meteor. Sinica, 23(1) 95-104.

Zheng D, Zhang Y J, Meng Q, et al. 2009. Total lightning characteristics and electric structure evolution in a hailstorm. Acta Meteorol Sin, 23(2) 233-249