

孙萌宇, 郑秀书, 孙凌, 等. 2020. 北京城区相继多次降雹的一次强雷暴的闪电特征 [J]. 大气科学, 44(3): 601–610. SUN Mengyu, QIE Xiushu, SUN Ling, et al. 2020. Lightning Activity of a Severe Thunderstorm with Several Hail-Fall Stages in Beijing Metropolitan Region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(3): 601–610. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1910.19134

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} 郑秀书^{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日北京午后爆发了相继5次降冰雹的一次强雷暴天气过程。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年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179 flashes min⁻¹。云闪占全部闪电的80%以上, 其中3次降雹前出现正地闪突增, 其比例升高, 占全部地闪的比例最高达58%。降雹时雷达回波>45 dBZ的面积增大, 顶高超过13 km。整个雹暴过程, 闪电辐射源主要分布在6~10 km的高度区域, 与强回波具有一致性。所分析的4次降雹过程均出现明显的总闪频数跃增, 并通过2σ阈值检验, 其中3次提前时间为8~18 min, 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

文章编号 1006-9895(2020)03-0601-10

中图分类号 P446

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1910.19134

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

SUN Mengyu^{1,4}, QIE Xiushu^{1,4}, SUN Ling², LIU Dongxia¹, WANG Dongfang^{1,4},
YUAN Shanfeng^{1,4}, CHEN Zhixiong^{1,4}, XU Wenjing^{1,4}, SUN Chengyun³, and SU Debin²

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

2 School of Atmospheric Sciences, 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 five hail-fall stages occurred in Beijing on 10 June 2016. Based on the 3D-location results of total lightning from

收稿日期 2019-03-26; 网络预出版日期 2019-11-04

作者简介 孙萌宇, 女, 1994年出生, 博士研究生, 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 郑秀书, E-mail: qies@iaph.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41630425, 国际(地区)合作与交流项目 41761144074

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41630425), International (Regional) Cooperation and Exchange Project (Grant 41761144074)

Beijing Lightning Network (BLNET) and Doppler radar data during the STORM 973 (Dynamic–microphysical–electrical Processes in Severe Thunderstorms and Lightning Hazards) campaign in 2016, 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 finally merged together. The total lightning frequency increased significantly during the four analyzed hail-fall stages, up to $179 \text{ flashes min}^{-1}$. IC (intra-cloud) lightning flashes accounted for more than 80% of the total lightning. The ratio of PCG (positive cloud-to-ground) to CG (cloud-to-ground) lightning (PCG/CG) increased sharply before three hail-fall stages, by up to 58%. During the hailstorm developments, the area of radar echo greater than 45 dBZ increased, and the echo top exceeded 13 km. Lightning radiation sources mainly distributed in the altitude layer from 6 km to 10 km throughout the hailstorm process, which was consistent with a strong radar echo region. Moreover, the total lightning flashes increased dramatically before the three analyzed processes and passed the 2σ 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 processes.

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 and 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 et al. \(2004\)](#) 利用地闪探测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 min^{-1} ，而仅产生大雨的雷暴地闪频数则可以超过 12 min^{-1} 。[郑栋等 \(2010\)](#) 利用 SAFIR3000 的三维闪电定位系统的全闪定位资料与雷达结合对北京一次冰雹过程的闪电活动特征进一步研究发现，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，目前基于全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，造成北京城区部分地区出现内涝、部分楼牌倒塌、车辆损毁。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 年夏季协同观测期间，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（[徐燕等, 2018; 王东方等, 2020](#)），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/\[2019-03-20\]](http://weather.uwyo.edu/[2019-03-20])）的探空数据和云顶亮温等。BLNET 是一个区域性、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 5 次降雹过程。第 1 次降雹发生在 2016 年 6 月 10 日 14:48~14:54（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 的 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 霰暴过程分析

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 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。

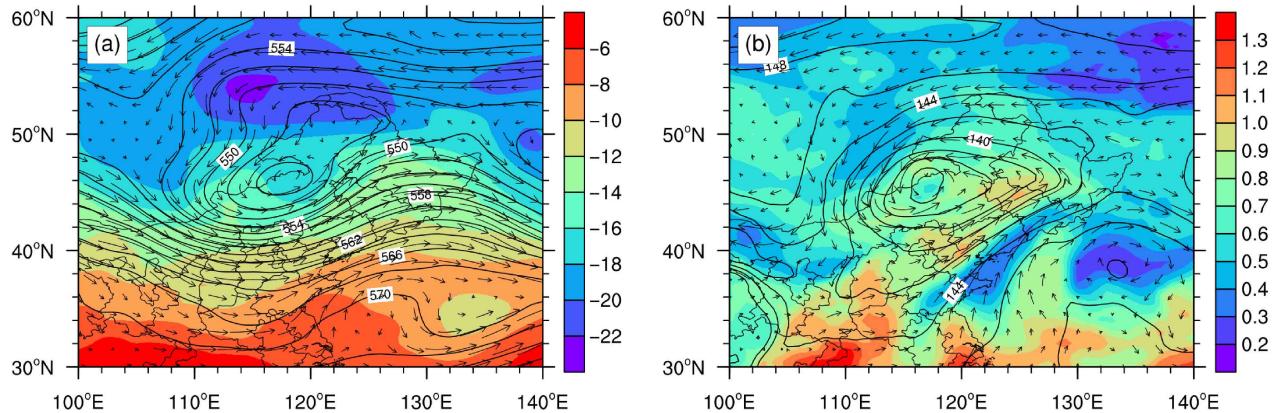


图 1 2016 年 6 月 10 日 08 时 (北京市, 下同) (a) 500 hPa 等高线 (黑线, 单位: dagpm)、温度 (填色, 单位: °C) 和风矢量 (箭头, 单位: m s^{-1}), (b) 850 hPa 等高线 (黑线, 单位: dagpm)、比湿 (填色, 单位: g kg^{-1}) 和风矢量 (箭头, 单位: m s^{-1})

Fig. 1 (a) 500-hPa geopotential height (black lines, units: dagpm), temperature (shadings, units: °C), and wind vectors (arrows, units: m s^{-1}), (b) 850-hPa geopotential height (black lines, units: dagpm), specific humidity (shadings, units: g kg^{-1}), and wind vectors (arrows, units: m s^{-1}) at 0800 BJT (Beijing time) on 10 June 2016

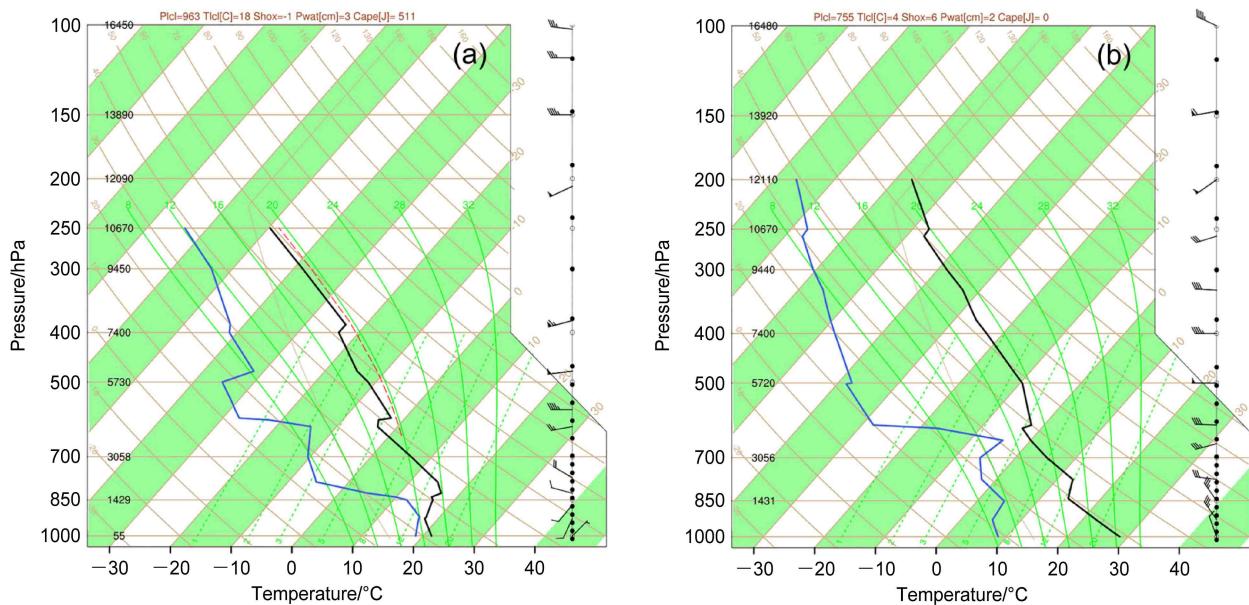


图 2 2016 年 6 月 10 日 (a) 08 时、(b) 20 时北京站探空廓线。黑色实线表示温度, 蓝色实线表示露点温度, 红色虚线表示状态曲线

Fig. 2 Sounding profiles for Beijing station at (a) 0800 BJT and (b) 2000 BJT on 10 June 2016. The black solid lines represent temperature, blue solid lines represent dew point temperature, and red dashed line represents parcel adiabatic lapse rate

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。

3.2 闪电活动的演变特征

图 3a、b 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 88 flashes min^{-1} 、143 flashes min^{-1} 、113 flashes min^{-1} 、145 flashes min^{-1} 、179 flashes min^{-1} , 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、郊区通州及天津地区地面降雹过程 (分

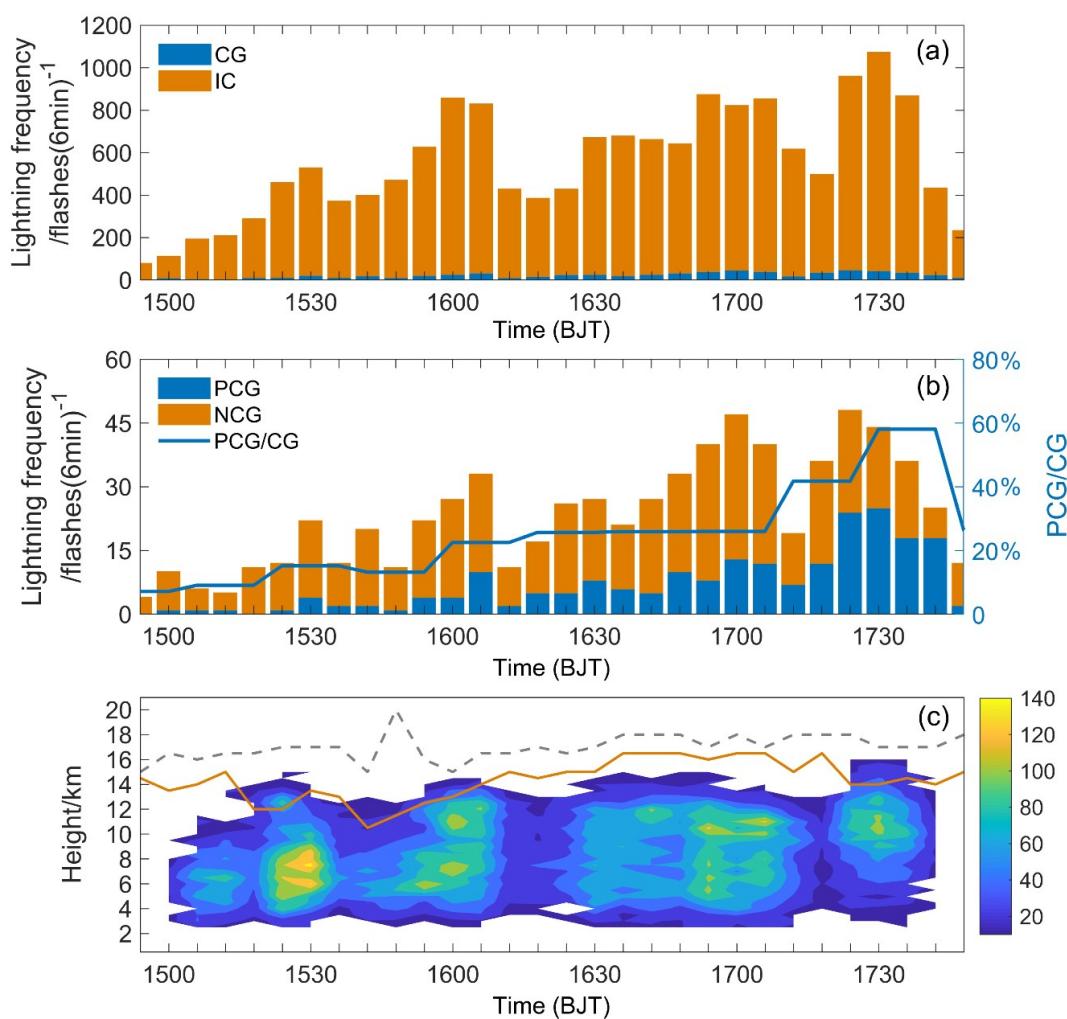


图 3 2016 年 6 月 10 日发生于北京地区一次雹暴过程中 (a) 地闪 (CG)、云闪 (IC) 频数 [单位: flashes $(6 \text{ min})^{-1}$], (b) 正 (PCG)、负地闪 (NCG) 频数 [单位: flashes $(6 \text{ min})^{-1}$, 左侧纵坐标] 及正地闪比例 (PCG/CG, 右侧纵坐标表示每 20 min 正地闪数占总地闪数的百分比), (c) 辐射源密度 (填色, 单位: pulses $(0.5 \text{ km } 6 \text{ min})^{-1}$), 40 dBZ (虚线)、50 dBZ (实线) 回波顶高度 (单位: km) 随时间的变化

Fig. 3 Time evolution of (a) lightning frequency [units: flashes $(6 \text{ min})^{-1}$] of IC (intra-cloud) and CG (cloud to ground) lightning flashes, (b) lightning frequency [units: flashes $(6 \text{ min})^{-1}$, left y-axis] of PCG (positive cloud to ground), NCG (negative cloud to ground) lightning flashes and percentage of PCG (PCG/CG), the right y-axis represents the percentage of PCG to CG per 20 min, (c) lightning radiation source density [shadings, units: pulses $(0.5 \text{ km } 6 \text{ min})^{-1}$] and height (units: km) of echo tops for 40 dBZ (dashed line) and 50 dBZ (solid line) during the hailstorm generated in Beijing region on 10 June 2016

别为第2、3、5次降雹), 17:06的总闪峰值出现在郊区大兴降雹(第4次降雹)之后。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58%。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6 min, 垂直分辨率0.5 km)。从图3c可以看出, 辐射源在第2次降雹前分布在高度5~12 km, 15:18(对应第2次降雹)辐射源数量迅速增多, 高值区垂直分布扩展到6~10 km, 并向上延伸出弱的集中区, 高度达14 km。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°C~-40°C, 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(10~14 km)。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, 总闪频数缓慢增加, 16:42小范围的辐射源集中在12 km处, 发展至16:54(第4次降雹), 10~12 km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179 flashes min⁻¹, 且正地闪比例最大(达到58%)。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4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。

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个时段FY-2G静止卫星云顶亮温与前后6 min内的闪电活动进行叠加, 并给出相应时刻30 dBZ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, 南北各有一个冷云中心, 南侧冷云核亮温最低值小于-50°C。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30 dBZ回波相重合的区域。另外, 在北侧也存在一个同样位于亮温梯度大值区的雷暴。

随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30 dBZ回波内, 低于-50°C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30 dBZ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°C, 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; 孙凌等, 2018)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°C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。

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4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>30 dBZ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6 min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左右北京地区存在两个对流单体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

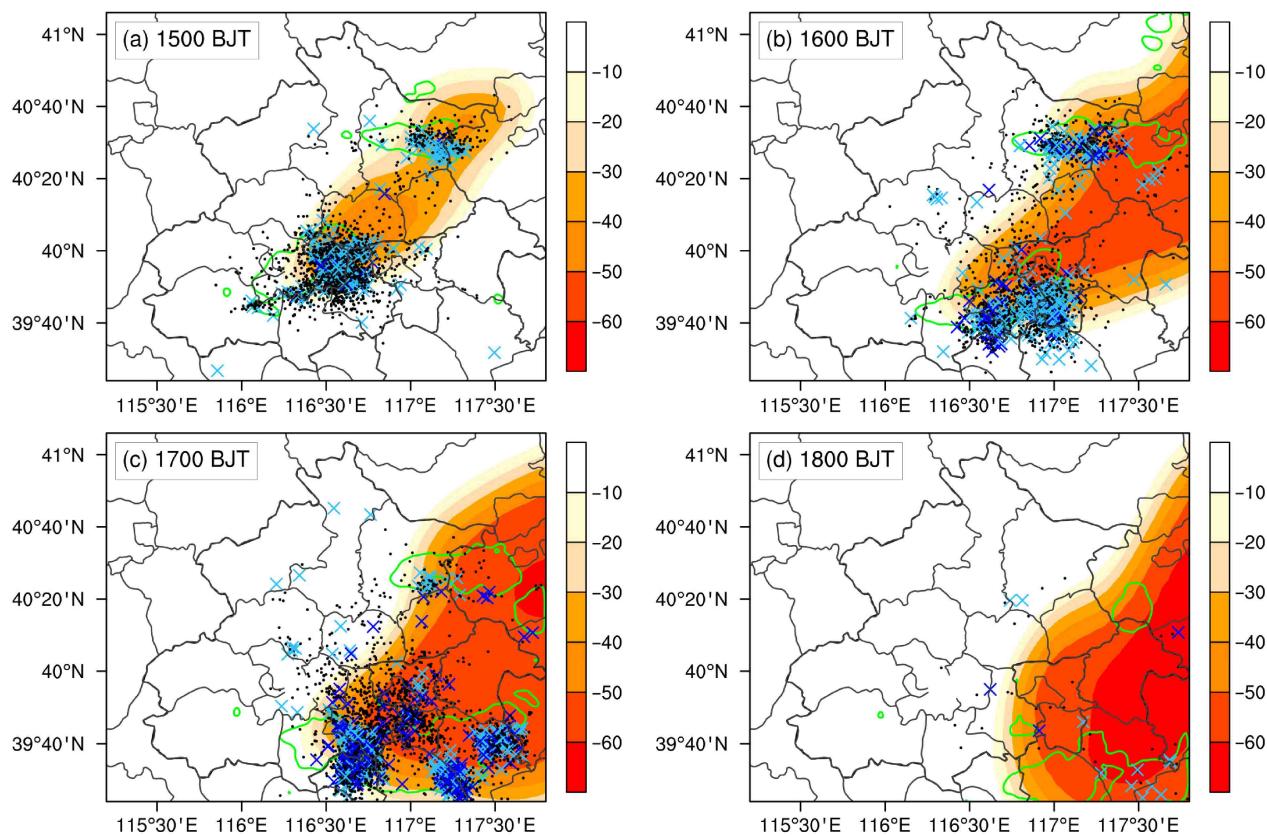


图4 2016年6月10日(a)15时、(b)16时、(c)17时、(d)18时云顶亮温(填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、30 dBZ雷达组合反射率(绿色等值线)与前后6 min内闪电分布(黑色“.”为云闪, 深蓝色“ \times ”为正地闪, 浅蓝色“ \times ”为负地闪)

Fig. 4 TBB (black body temperature, shadings, units: $^{\circ}\text{C}$), 30-dBZ composite reflectivity (green contours), and corresponding lightning (IC: black “.”; PCG: dark blue “ \times ”; NCG: light blue “ \times ”) in the preceding and following 6 min at (a) 1500 BJT, (b) 1600 BJT, (c) 1700 BJT, (d) 1800 BJT on 10 June 2016

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次降雹, 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45 dBZ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向东移至郊区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60 dBZ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, 存在两个闪电集中区, 均位于雷达回波60 dBZ回波区。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, 绝大多数位于雷达45 dBZ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>30 dBZ的强回波区域, 但在15 dBZ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上部云体探测能力较弱, 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6给出沿图5中的线段做剖面得到的雷达回波, 剖面两侧 $\pm 0.1^{\circ}$ 范围及其后6 min探测到的闪电辐射源也叠加在上面。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

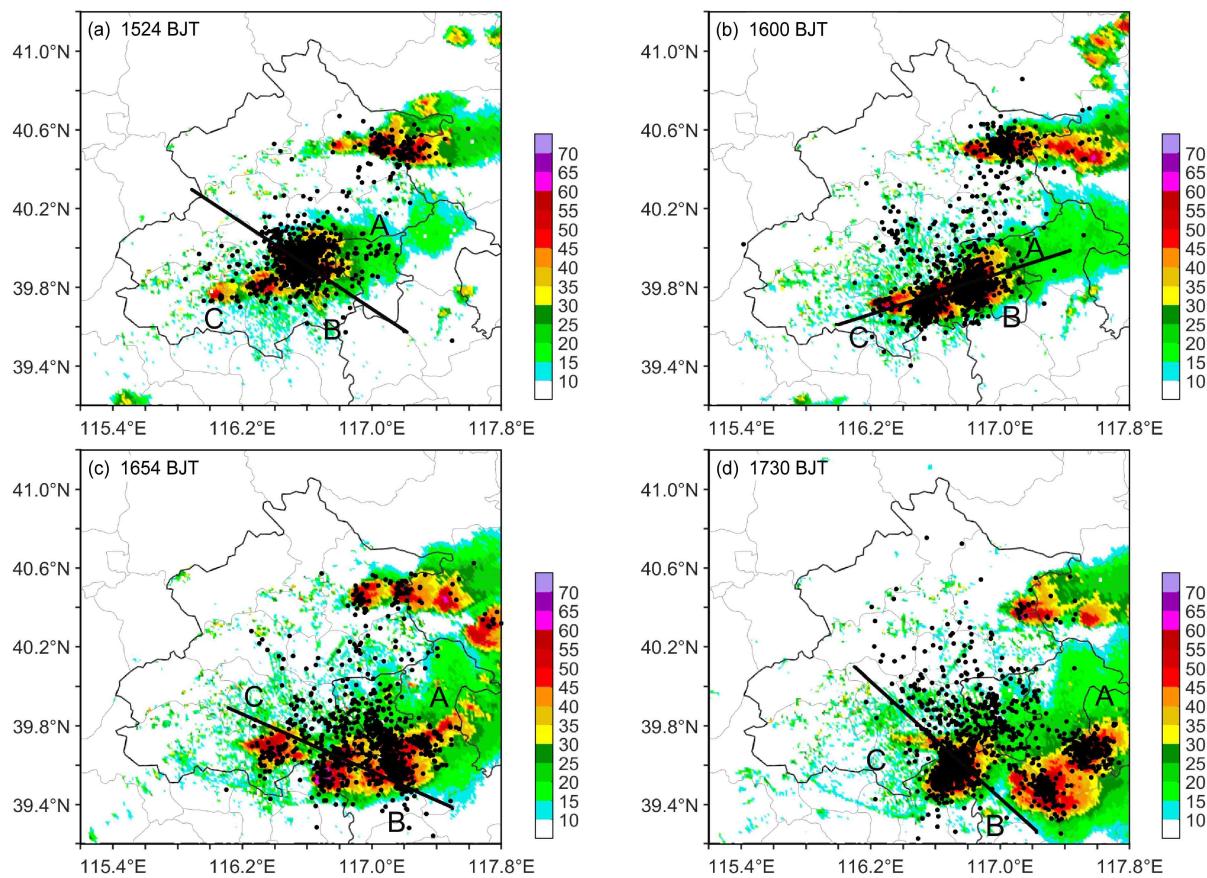


图5 2016年6月10日(a)15:24、(b)16:00、(c)16:54、(d)17:30四次降雹阶段的雷达组合反射率(填色, 单位: dBZ)与前后6 min内的闪电分布(黑色“.”)。A、B、C为对流单体

Fig. 5 Composite reflectivity (shadings, units: dBZ) at four hail-falling stages and distribution of lightnings (black “.”) in the preceding and following 6 min at (a) 1524 BJT, (b) 1600 BJT, (c) 1654 BJT, (d) 1730 BJT on 10 June 2016. A, B, and C represent different convective cells

波高空部分有所缺失。根据08:00北京站探空资料, 当时0°C高度为3.6 km, -20°C高度为7.1 km。从图6a(对应第2次降雹)可见, 45 dBZ、55 dBZ回波顶高分别达到9 km、8 km高度, 超过-20°C高度, 强回波中心达到50 dBZ。闪电辐射源分布区域向上达15 km, 向下伸展到地面附近, 大部分集中分布于5~12 km雷达回波>45 dBZ区域。与前一降雹阶段相比, 第3次过程(图6b)45 dBZ回波顶高明显升高, 强回波中心达到55 dBZ, 闪电辐射源较均匀分布在5~13 km的强回波区之间。值得注意的是, 辐射源在6 km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。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发展增强(图6c), 绝大多数辐射源仍分布在5~12 km高度上, 与45 dBZ强回波区相对应。从冰雹云B的垂直剖面(图6c与6d)可见, 最后一次降雹中55 dBZ回波顶高明显升高,

第4次过程强回波中心达到60 dBZ, 且发展到12 km高度。17:30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6~13 km。

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45 dBZ, 顶高达到7 km; 降雹时段, 强对流中心发展旺盛, 45 dBZ回波面积增大, 回波顶高超过13 km, 云顶温度<-20°C。4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突然发生, 发展迅速, 并在移动过程中多次降雹。通过分析, 经

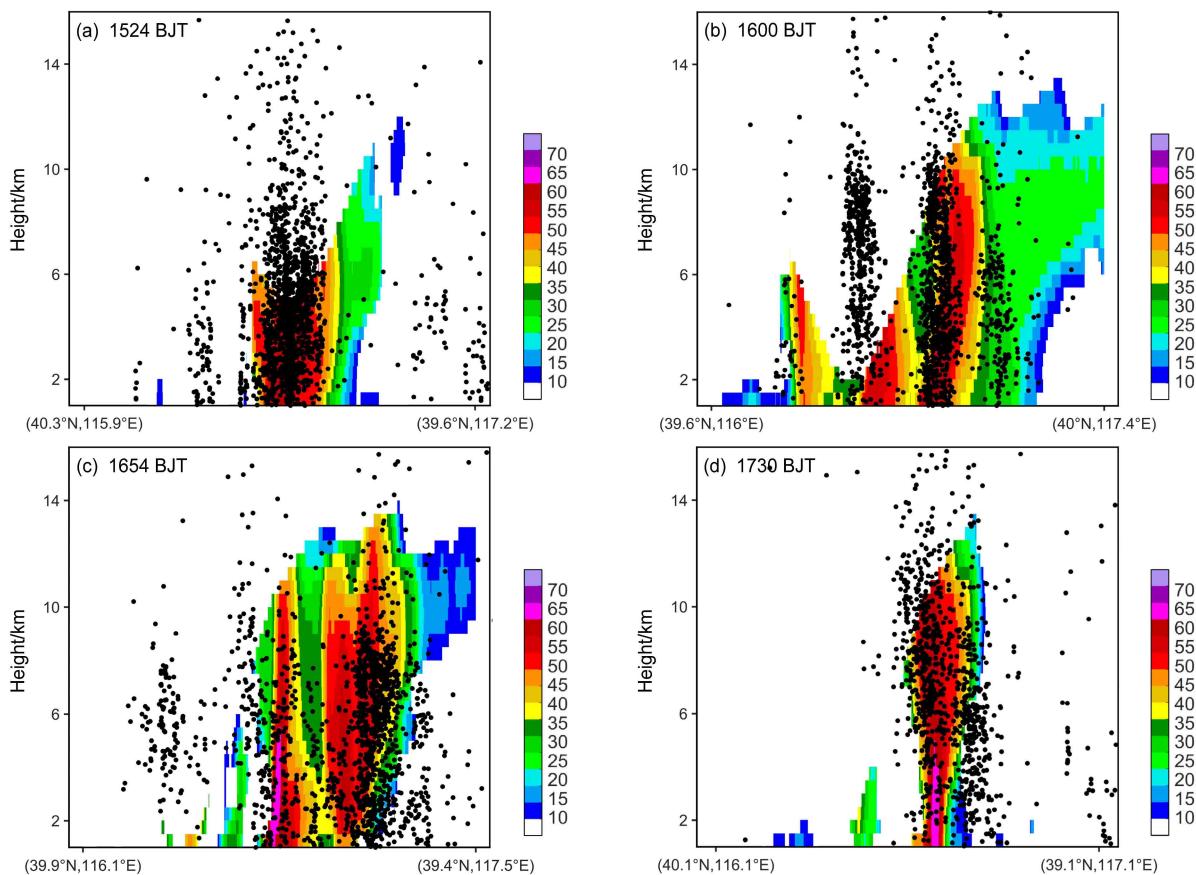


图 6 沿图 5 中线段做剖面的雷达反射率 (填色, 单位: dBZ) 与前后 6 min 内剖线 $\pm 0.1^\circ$ 范围内的闪电辐射源 (“.”)

Fig. 6 Cross sections of radar reflectivity (shadings, units: dBZ) along lines in Fig. 5 and distribution of corresponding lightning radiation sources (black “.”) in the preceding and following 6 min and within $\pm 0.1^\circ$ of the lines shown in Fig. 5

BLNET 定位得到的总闪、正地闪, 其空间位置、频数可以较好地反映冰雹活动。

Williams et al. (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 et al. (2009) 和 Gatlin et al. (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。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, 下面将利用这一 2σ 阈值算法来检验在 4 次降雹之前是否存在闪电跃增现象, 具体计算方法为:

(1) 以 2 min 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

$$f'(t) = \frac{\Delta f(t)}{\Delta t} = \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t}. \quad (1)$$

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

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

式中, $\overline{f'(t)}$ 及 σ 分别为闪电变化率 $f'(t)$ 的前 12 min 滑动平均及标准差, 其计算公式分别为

$$\overline{f'(t)} = \frac{1}{N} \sum_{t=t-N}^t f'(t), \quad (3)$$

$$\sigma[f'(t)] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=t-N}^t [f'(t) - \overline{f'(t)}]^2}, \quad (4)$$

在时间 $t=12$ min 处计算滑动平均及标准差。

(4) 将总闪频数时间变化率 $f'(t)$ 与跃增阈值 $f'_{\text{thres}}(t)$ 进行比较, 如前者大于后者, 则认为发生了一次闪电跃增。

计算当前时刻总闪电频数的时间变化率 (图 7 中柱状) 以及跃增阈值 (图 7 中黑色实线), 表 1 列出四次降雹过程的总闪频次突变情况, 分析时段内的第 2、3、5 次降雹过程通过 2σ 阈值检验。由

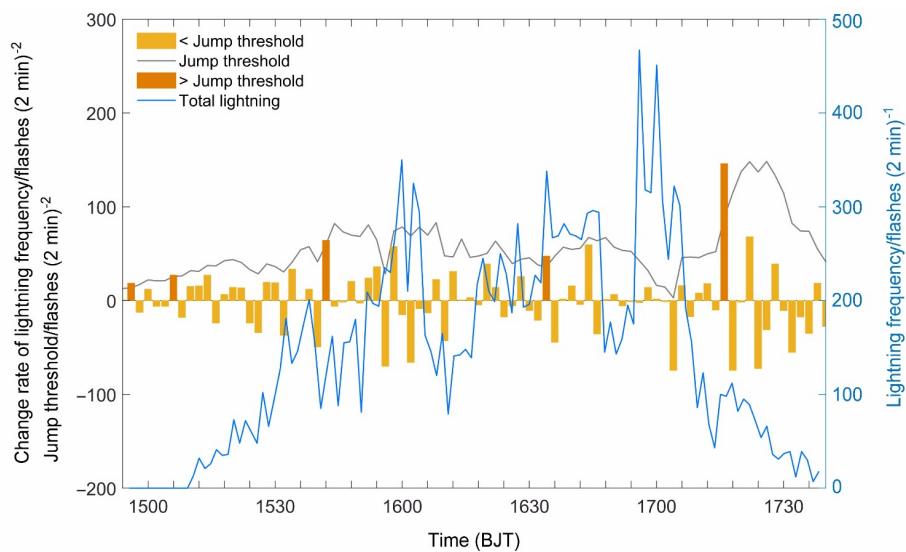


图 7 2016 年 6 月 10 日发生于北京地区一次雹暴过程中总闪频数(右侧纵坐标, 蓝色线, 单位: $\text{flashes} (2 \text{ min})^{-1}$)、总闪频数的时间变化率(左侧纵坐标, 柱状, 单位: $\text{flashes} (2 \text{ min})^{-2}$)、跃增阈值(左侧纵坐标, 黑色线, 单位: $\text{flashes} (2 \text{ min})^{-2}$)

Fig. 7 Total lightning frequency (right y-axis, blue line, units: $\text{flashes} (2 \text{ min})^{-1}$), change rate of total lightning frequency (left y-axis, bars, units: $\text{flashes} (2 \text{ min})^{-2}$), and jump threshold (left y-axis, black line, units: $\text{flashes} (2 \text{ min})^{-2}$) during the hailstorm generated in Beijing region on 10 June 2016

表 1 不同降雹过程的降雹时间、总闪跃增时刻以及总闪频数超前时间

Table 1 Time of hail-falling, total lightning jump, and advance of total lightning frequency in different hail-fall processes

降雹过程	降雹时间	总闪跃增	超前时间/min
2	15:18~15:30	15:06	12
3	16:00~16:06	15:42	18
4	16:54~17:00	未通过阈值检验	
5	17:24~17:36	17:16	8

图 7 及表 1 可见, 所关注的 4 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 12、8 min, 最大超前时间为 18 min(第 3 次降雹)。另外, 在 16:34 发生一次跃增, 但随后 30 min 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。

4 结论

2016 年 6 月 10 日一次强雷暴过程在北京地区生成并先后产生 5 次降雹, 本文综合利用总闪辐射

源三维定位、多普勒天气雷达、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, 14:00 的探空资料显示 CAPE (Convective Available Potential Energy) 值大于 3400 J kg^{-1} 。

(2) 霹雳生成、发展阶段, 中心回波强度达到 45 dBZ, 顶高达到 7 km。降雹时段, 强对流中心发展旺盛, 45 dBZ 回波面积增大, 回波顶高超过 13 km, 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 6~12 km, 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 4 次降雹时段, 总闪电频数在降雹前和降雹阶段均出现增加, 最高可达 $179 \text{ flashes min}^{-1}$, 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 58%, 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 3 次降雹过程通过 2σ 阈值检验, 总闪频数在降雹之前发生突变, 提前时间为 8~18 min,

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, 研究得到了此次雹暴发展过程中闪电的演化及其与雷达回波特征的关系。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, 综合利用辐射源的强度、发展速度和辐射源密度等信息, 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, 郑秀书, 袁铁, 等. 2007. 雹暴的闪电活动特征与降水结构研究 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 37(1): 123–132. Feng G L, Qie X S, Yuan T, et al. 2007. Lightning activity and precipitation structure of hailstorms [J]. *Sci. China Ser. D: Earth Sci.*, 37(1): 123–132. doi:10.1007/s11430-007-2063-8
- Gatlin P N, Goodman S J. 2010. A total lightning trending algorithm to identify severe thunderstorms [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 27(1): 3–22. doi:10.1175/2009jtech1286.1
- Liu D X, Feng G L, Wu S J. 2009. The characteristics of cloud-to-ground lightning activity in hailstorms over northern China [J]. *Atmos. Res.*, 91(2–4): 459–465. doi:10.1016/j.atmosres.2008.06.016
- MacGorman D R, Burgess D W. 1994. Positive cloud-to-ground lightning in tornadic storms and hailstorms [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122(8): 1671–1697. doi:10.1175/1520-0493(1994)122<1671:PCTGLI>2.0.CO;2
- Reap R M, MacGorman D R. 1989. Cloud-to-ground lightning: Climatological characteristics and relationships to model fields, radar observations, and severe local storms [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117(3): 518–535. doi:10.1175/1520-0493(1989)117<0518:CTGLCC>2.0.CO;2
- Saunders C P R, Peck S L. 1998. Laboratory studies of the influence of the rime accretion rate on charge transfer during crystal/graupe collisions [J]. *J. Geophys. Res.*, 103(D12): 13949–13956. doi:10.1029/97JD02644
- Saunders C P R, Keith W D, Mitzeva R P. 1991. The effect of liquid water on thunderstorm charging [J]. *J. Geophys. Res.*, 96(D6): 11007–11017. doi:10.1029/91JD00970
- Schultz C J, Petersen W A, Carey L D. 2009. Preliminary development and evaluation of lightning jump algorithms for the real-time detection of severe weather [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(12): 2543–2563. doi:10.1175/2009JAMC2237.1
- Soula S, Seity Y, Feral L, et al. 2004. Cloud-to-ground lightning activity in hail-bearing storms [J]. *J. Geophys. Res.*, 109(D2): D02101. doi:10.1029/2003JD003669
- 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 [J]. *Atmos. Res.*, 197: 76–83. doi:10.1016/j.atmosres.2017.06.026
- Stolzenburg M. 1994. Observations of high ground flash densities of positive lightning in summertime thunderstorms [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122(8): 1740–1750. doi:10.1175/1520-0493(1994)122<1740:OOHGFD>2.0.CO;2
- 孙凌, 郑秀书, Edward R. Mansell, 等 2018. 雹暴云内电场力对起电和电荷结构的反馈作用 [J]. 物理学报, 67(16): 169201. Sun L, Qie X S, Mansell, E R, et al. 2018. Feedback effect of electric field force on electrification and charge structure in thunderstorm [J]. *Acta Physica Sinica*, 67(16): 169201. doi:10.7498/aps.67.20180505
- Takahashi T. 1978. Rimming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms [J]. *J. Atmos. Sci.*, 35(8): 1536–1548. doi:10.1175/1520-0469(1978)035<1536:REAACG>2.0.CO;2
- 王东方, 郑秀书, 袁善锋, 等. 2020. 北京地区的闪电时空分布特征及不同强度雷暴的贡献 [J]. 大气科学, 44(2): 225–238. Wang D F, Qie X S, Yuan S F, et al. 2020. Spatial and temporal distribution of lightning activity and contribution of thunderstorms with different lightning-producing capabilities in Beijing metropolitan region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 44(2): 225–238. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1904.19128
- 王宇, 郑秀书, 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 [J]. 大气科学, 39(3): 571–582. Wang Y, Qie X S, Wang D F, et al. 2015. Beijing lightning NETwork (BLNET): Configuration and preliminary results of lightning location [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39(3): 571–582. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1407.14138
- Williams E, Boldi B, Matlin A, et al. 1999. The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms [J]. *Atmos. Res.*, 51(3–4): 0–265. doi:10.1016/s0169-8095(99)00011-3
- 徐燕, 孙竹玲, 周筠珺, 等. 2018. 一次具有对流合并现象的强飑线系统的闪电活动特征及其与动力场的关系 [J]. 大气科学, 42(6): 1393–1406. Xu Y, Sun Z L, Zhou Y J, et al. 2018. Lightning activity of a severe squall line with cell merging process and its relationships with dynamic fields [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 42(6): 1393–1406. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17220
- 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 [J]. 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 [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 68(2): 248–263. doi:10.11676/qxb2010.025