中国科学: 地球科学 2021 年 第 51 卷 第 1 期: 46 ~ 62
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

北京地区雷电灾害天气系统的动力-微物理-电过程观测研究

郄秀书[1,8*], 袁善锋[1], 陈志雄[1,8], 王东方[1], 刘冬霞[1], 孙萌宇[1,8], 孙竹玲[1], Abhay SRIVASTAVA[1], 张鸿波[1], 卢晶雨[1,8], 肖辉[2,8], 毕永恒[1], 冯亮[2], 田野[3,10], 徐燕[4,11], 蒋如斌[1], 刘明远[1,8], 肖现[3], 段树[1], 苏德斌[4], 孙成云[3], 徐文静[1], 张义军[5,9], 陆高鹏[1], Da-Lin ZHANG[5,12], 银燕[6], 余晔[7]

1. 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室(LAGEO), 北京 100029;
2. 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室(LACS), 北京 100029;
3. 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089;
4. 成都信息工程大学电子工程学院, 成都 610225;
5. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;
6. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点实验室, 南京 210044;
7. 中国科学院西北生态环境资源研究院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州 730000;
8. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;
9. 复旦大学大气与海洋科学系, 上海 200438;
10. 北京市气象局气象探测中心, 北京 100081;
11. 江西省人工影响天气领导小组办公室, 南昌 330096;
12. Department of Atmospheric and Oceanic Science, University of Maryland, Maryland 20742, USA
* 通讯作者, E-mail: qiex@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2020-03-11; 收修改稿日期: 2020-06-28; 接受日期: 2020-07-07; 网络版发表日期: 2020-10-15
国家自然科学基金项目(批准号: 41630425、41761144074)、中国科学院前沿科学重点研究计划项目(编号: QYZDJ-SSW-DQC007)和国家重点基础研究计划项目(编号: 2014CB441401)资助

摘要 在国家"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"(简称: 雷暴973)资助下, 2014~2018年连续五年在北京组织开展了雷电(也称闪电)灾害天气系统的暖季综合协同观测实验, 旨在获得对北京及周边城市群区域的雷电天气系统特征和规律的实际认识, 探索雷电资料在数值预报模式中的同化方法, 以期改进雷电重大灾害天气系统的预报效果. 主要观测设备包括: 由16个子站构成的雷电(全闪)三维定位系统、2台X波段双线偏振多普勒雷达和4台激光雨滴谱仪等, 协同观测还充分利用了中国气象局在京津冀地区的中尺度气象观测网. 观测结果表明, 受地形和环境条件影响, 飑线和多单体雷暴是影响北京地区的两类主要的雷电灾害天气系统, 它们除产生频繁的雷电活动外, 还常伴随突发性局地短时强降水和冰雹, 造成城区突发洪涝灾害. 雷电密度的高值区位于北京昌平区东部、顺义区的中部和东部以及中心城区. 超强雷暴(占总雷暴数的5%)、强雷暴(占比

中文引用格式: 郄秀书, 袁善锋, 陈志雄, 王东方, 刘冬霞, 孙萌宇, 孙竹玲, Srivastava A, 张鸿波, 卢晶雨, 肖辉, 毕永恒, 冯亮, 田野, 徐燕, 蒋如斌, 刘明远, 肖现, 段树, 苏德斌, 孙成云, 徐文静, 张义军, 陆高鹏, Zhang D, 银燕, 余晔. 2021. 北京地区雷电灾害天气系统的动力-微物理-电过程观测研究. 中国科学: 地球科学, 51(1): 46–62, doi: 10.1360/SSTe-2020-0060
英文引用格式: Qie X, Yuan S, Chen Z, Wang D, Liu D, Sun M, Sun Z, Srivastava A, Zhang H, Lu J, Xiao H, Bi Y, Feng L, Tian Y, Xu Y, Jiang R, Liu M, Xiao X, Duan S, Su D, Sun C, Xu W, Zhang Y, Lu G, Zhang D, Yin Y, Yu Y. 2020. Understanding the dynamical-microphysical-electrical processes associated with severe thunderstorms over the Beijing metropolitan region. Science China Earth Sciences, 64(1): 10–26, https://doi.org/10.1007/s11430-020-9656-8

© 2020 《中国科学》杂志社

35%)和弱雷暴(占比60%)对总雷电分布的贡献分别为37%、56%和7%. 北京城区的热岛效应对过境雷暴增强产生了重要作用, 超强雷暴在中心城区的雷电频数可以高达每分钟数百次. 雷电活动与雷暴云的热动力、微物理特征之间存在紧密联系, 因此雷电频数可以作为冰雹、短时强降水等灾害性天气的指示因子. 在对流可分辨数值预报模式中, 建立并引入雷电资料同化方案, 通过调整或修正模式的热动力和微物理参量, 可明显提高模式对强对流和降水的预报效果.

关键词　雷电(全闪)三维定位, 双线偏振多普勒雷达, 雷电灾害天气系统, 雷电资料同化, 冰雹, 短时强降水

1　引言

雷电(或闪电)灾害天气系统是指产生雷电的一类强对流天气系统, 也称为强雷暴, 常伴随强降水、雷电、冰雹、大风、龙卷等灾害性天气现象, 甚至导致洪涝灾害(Zhang等, 2011; 吴学珂等, 2013; Xia等, 2015; Guo等, 2017; Yang和Sun, 2018; Li等, 2018; Ribaud等, 2016). 雷电是雷暴系统最典型的灾害性天气事件之一, 中国每年超百万元经济损失的雷击事故几十起, 因雷电导致的人员伤亡超千人(马明等, 2008). 例如1989年8月12日因雷击引发山东黄岛油库火灾, 致19人死亡, 78人受伤, 当时直接经济损失4000万元, 间接经济损失近亿元. 2004年6月26日浙江临海市杜前村村民在树下避雨时惨遭雷击, 造成17人死亡, 13人受伤. 目前对包括雷电灾害天气过程在内的强对流天气过程的准确预测仍然是一个很大的挑战(穆穆等, 2017; Luo等, 2017; 孟智勇等, 2019; Qie和Zhang, 2019).

北京大城市群区域是中国经济最发达的地区之一, 也是雷电灾害天气系统影响比较大的区域. 夏季, 来自西南的季风气流与这里复杂的地形相互作用, 使北京城区经常遭受强雷暴和强降水的影响(Miao等, 2011; Xiao等, 2017; Liu等, 2020). 雷电天气也常造成首都机场航班大面积延误或取消, 产生严重的社会影响. 因此, 北京大城市群区域的强雷暴和强降水的准确预报不仅是气象预报最关心的问题之一, 也是政府和公众十分关心的重要问题. 北京西北部为山地地形, 东部、南部为平原, 东南部为渤海湾, 复杂地形、动力和热力特征以及城市环境等之间的多过程、多尺度之间的相互作用, 使得北京地区强雷暴的准确预报极为困难. 北京地区强雷暴的触发和增强仍然是需要深入研究的科学问题之一, 近年来持续吸引着众多学者的关注(如Wilson等, 2010; Yang等, 2014; 孙继松等, 2015; Yu等, 2017; Liang等, 2018; Zhang, 2020; 孙萌宇等, 2020a).

为研究雷电灾害天气系统中的动力、微物理和电过程以及它们之间的相互作用, 提高其预报水平, 在国家“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”(简称为“雷暴973”)资助下, 连续五年在北京、山东、广东等地组织开展了针对雷电灾害天气系统和雷电物理的夏季协同综合观测实验, 其科学目标包括: 建立北京地区的雷电灾害性天气过程的观测数据集, 揭示雷电灾害性天气系统的动力、微物理和电过程之间的相互关系, 揭示雷电在云内的始发、传输、接地等物理过程和机制; 发展雷电资料的同化方法, 提高对雷电重大灾害性天气的预报水平. “雷暴973”项目共设计6个研究课题, 包括: 雷电灾害天气过程的探测系统集成及协同观测实验、雷电重大灾害天气系统的动力过程及演变规律、雷电重大灾害性天气的云微物理过程及其对电过程的影响、雷电灾害性天气系统的云内电荷分布及放电始发机制、雷电发展传输的物理过程及其成灾机理, 以及雷电观测资料同化及雷电灾害性天气系统的监测预警方法.

针对雷电灾害性天气系统的综合协同观测实验主要在北京地区开展, 此外, “雷暴973”项目还充分利用已有的实验和观测平台, 在山东沾化(Sun等, 2014; Lu等, 2016, 2018; Jiang等, 2017; Qie等, 2017; Pu等, 2017, 2019; Fan等, 2018, 2019)和广州从化(Chen等, 2016, 2018a, 2018b; Zhang C等, 2017; Zhang等, 2018)同时进行基于火箭拖线技术的人工引发雷电实验; 另外, 还在广州(Gao等, 2014; Lu等, 2015, 2016; Qi等, 2016; Zhang Y等, 2017)和北京(Jiang等, 2014; Yuan等, 2017; Wang Z等, 2016)进行高建筑物始发的上行雷电

观测实验, 以研究雷电的物理机制和成灾机理, 并在青海大通开展高原雷暴云的起电和电荷结构观测实验(Wu等, 2016; Li Y等, 2017). 由于篇幅所限, 本文主要阐述在北京开展的雷电灾害天气系统的协同观测, 包括观测实验方案设计和资料的获取、典型雷电灾害天气过程个例分析, 并对部分研究结果进行总结.

2 雷电灾害天气系统协同观测实验和主要仪器设备

为全面认识不同类型雷电灾害天气系统中的雷电特征, 研究雷电与雷暴云动力和微物理特征之间的关系, 自主发展了一个包含16个探测子站的雷电全闪探测和三维定位系统, 即北京宽频带雷电网(Beijing Broadband Lightning Network, BLNET), 并联合使用2部X波段双线偏振多普勒雷达和4台雨滴谱仪等, 2014~2018年暖季(6~9月)在北京地区开展了连续5年的综合协同观测. 观测平台的主要构成和布局如图1所示, 两台X波段双线偏振多普勒雷达分别安装在中科院大气所(IAP)和顺义(SY), 直线距离约35km(以下分别简称为LAGEO-IAP雷达和LACS-SY雷达). 另外, 观测实验还充分利用了中国气象局的5个S波段或C波段的业务多普勒雷达、地闪(CG)定位系统、无线电探空以及密集的自动气象站等中尺度气象观测网资料.

BLNET是一个三维雷电(全闪)定位网络, 覆盖北京大部分地区. 通过对雷电脉冲波形的实时智能分析, 各探测子站将探测到的脉冲信号分成地闪(CG)与云闪(IC), 然后将各脉冲的类型和峰值到达时间传送到大气所数据处理中心, 进行实时三维定位或事后更高时间分辨率的雷电三维动态成像(Yuan等, 2020). 每个探测子站都架设有快天线电场变化仪(简称快天线), 部分站点还安装了慢天线、磁天线或甚高频雷电信号接收仪, 以探测雷电在不同频段的电磁辐射信号. 四种不同的传感器探测频段覆盖了甚低频到甚高频频段. BLNET首次引入Chan和Ho(1994)算法, 利用这一算法和通用的Levenberg-Marquart算法结合, 开发了一种协同定位技术, 提高了定位效率, 实现了实时定位(Wang Y等, 2016). BLNET对总闪平均探测效率为93.2%, 对地闪识别效率为73.9%(Srivastava等, 2017). 为减少大城市群地区复杂电磁环境对雷电信号探测的干扰, 所有站点的设备一直在不断升级改进. 为进行雷电物理研究并对BLNET的定位性能评估, 在中心站大气所安装了两台高速摄像机和全视野摄像系统, 以拍摄击中高建筑物的雷电. 对高塔雷电的定位结果表明,

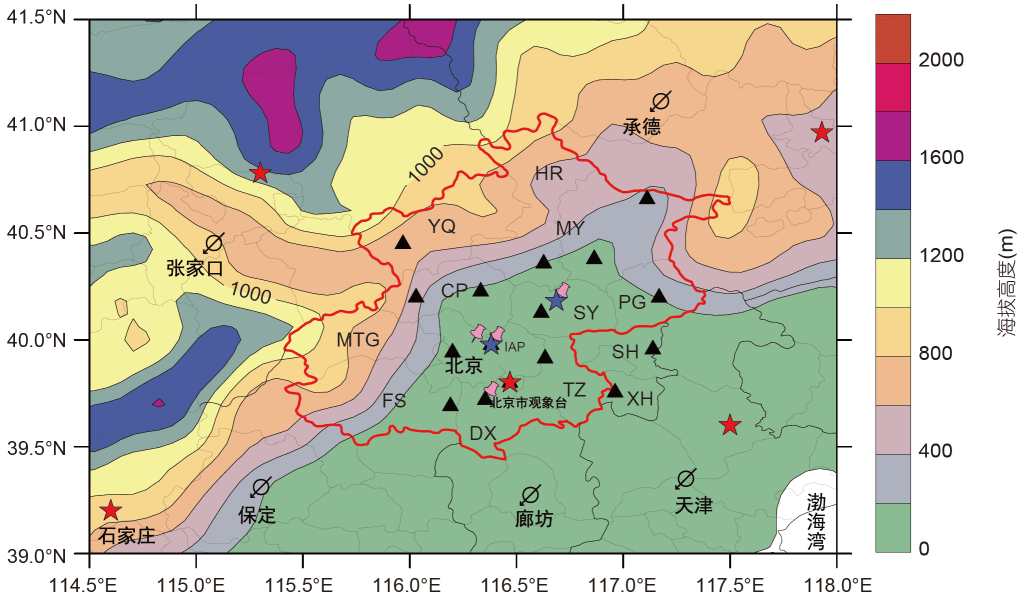


图 1 北京雷电灾害天气系统综合观测平台布局

16个黑色三角形代表BLNET探测子站, 五角星代表雷达站, 其中蓝色代表两部X波段(LAGEO-IAP雷达和LACS-SY雷达), 红色代表5个S波段或C波段多普勒雷达, 粉色钉子代表4台雨滴谱仪. 红色多边形表示北京市的边界, 彩色阴影表示地形, 等值线为海拔高度, 间隔为200m

BLNET的水平定位误差在50~250m.

X波段双线偏振雷达能够识别出云中不同水成物粒子的类型, 如霰、雪、大冰雹、小冰雹以及混合相降水等. 然而, X波段雷达在强降雨过程探测时衰减较大, 需要对其进行衰减订正后才能用于水成物粒子的识别(冯亮等, 2018). 此外, 与所有其他遥感方法一样, 基于偏振信息获得的水成物粒子分类结果需要原位探测的验证, 以证明其分类的可信度, 为此在两部X波段雷达的共同观测范围内安装了四台激光雨滴谱仪. 限于篇幅, 本文将不涉及X波段双线偏振雷达资料的处理和分析.

实验期间观测到雷暴过程共计220次, 雷暴种类具有多样性, 从小尺度的孤立单体, 到以飑线和多单体雷暴为主要特征的复杂中尺度对流系统(MCS), 偶尔也会发生超级单体, 表1列出了"雷暴973"项目观测期间的主要雷暴过程分类. 虽然观测到的雷暴形态多种多样, 但主要可归为3大类: 单体雷暴、多单体雷暴和飑线. 多年观测发现, 飑线和多单体雷暴是影响北京地区的两类最主要的雷电天气系统. 飑线是一种前部为对流线、后部拖带层云区的MCS, 通常会在中心城区产生强降水, 偶尔导致洪涝灾害; 而多单体雷暴通常包含多个中γ尺度单体雷暴的相继触发, 常造成局部短时强降水. 超级单体是北京地区另一种影响力大的雷电灾害天气系统, 但在北京城市群区域并不常见, 在5年的观测期间仅发生4次.

表2进一步列出了一些典型的强雷暴个例及发生的强天气现象, 同时还给出了BLNET覆盖范围内的峰值雷电频数、正地闪比例以及所获取的观测资料描述. 需要指出, 为了与传统意义上的一次雷电相对应, 这里将BLNET探测到的辐射源进行了聚类归闪处理, 即将定位所得到的一次辐射脉冲发生时间前后小于400ms, 水平距离小于15km, 且总持续时间不超过1.5s的辐射源被认为是同一次雷电, 并要求一次雷电至少有2个以上的辐射源, 即剔除了只包含一个辐射点的结果. 经过归闪处理后, 一次雷电通常包含几个到上千个定位点, 与雷电持续时间长短、强弱、背景干扰强弱, 以及接收到雷电信号的测站多少等多方面的因素有关.

可以看出飑线系统常表现出很高的雷电频数(最大值>1fl s^{-1}), 并伴随冰雹天气. 4个超级单体风暴的最大雷电频数从0.3~6.8fl s^{-1}不等, 而且都发生了降雹, 相应的正地闪比例也较高, 从24~50%不等. 多单体雷暴通常包含多个中γ尺度单体的爆发, 产生局地降雹和雷电, 也造成城市局部严重积水, 但常没有明显的前兆. 由于常常多个中γ尺度雷暴单体同时或先后在不同地点产生, 整体上涉及的空间范围和时间尺度可能都较大, 因此在北京造成的影响也很大. 下面以3次不同类型的雷电天气系统为例分别进行介绍.

3　三种不同类型的典型雷电天气系统

为了解不同雷电灾害天气过程的发展特征, 并说明所获取的资料情况, 这里选择三种典型的强雷电天气系统个例进行介绍, 分别为飑线、多单体和超级单体. 这三次强雷电天气过程的总闪(云闪和地闪)频数都很高(超过3fl s^{-1}), 个别雷暴发展生命史中也会出现很高的正地闪比例, 下面分别进行介绍. 全文统一使用北京标准时间.

3.1　2015年7月27日飑线过程

飑线过程是北京城区雷电灾害天气系统中最主要的过程之一, 已有工作对其中一些个例进行了详细研究(徐燕等, 2018; 孙凌等, 2019). 这里仅选择2015年7月27日飑线(简称20150727飑线)进行分析, 这次

表 1　"雷暴973"综合观测期间的主要雷暴分类统计

雷暴类型	每年观测起止时间					合计
	2014-05-10~09-30	2015-06-06~09-11	2016-05-11~09-25	2017-06-13~09-24	2018-05-15~08-25	
单体雷暴(超级单体4次)	20	15	13	13	14	75
多单体雷暴	15	29	26	24	27	121
飑线	4	7	8	4	1	24
合计	39	51	47	41	42	220

表 2　主要雷电天气过程个例及伴随的强天气现象和观测数据[a)]

日期	雷暴类型	强天气现象	最大闪电频数 (fl s^{-1})	最大半小时正地闪比例(%)	观测数据
2014-06-13	超级单体	冰雹、大风、强降水	2.7	50	1、2、3、4、5、6、7
2015-06-26	单体	大风、强降水	0.7	54	1、2、3、4、5、6、7
2015-07-27	飑线	冰雹、大风、强降水	6.2	30	1、2、3、4、5、6、7
2015-08-05	多单体	大风、强降水	0.6	50	1、2、3、4、5、6、7
2015-08-07	飑线	冰雹、大风、强降水	4.1	33	1、2、3、4、5、6、7
2016-06-10	多单体	冰雹、大风	3.2	60	1、5、6、7
2016-06-23	超级单体	冰雹、大风、强降水	0.3	24	1、2、3、4、5、6、7
2017-07-07	飑线	冰雹、大风、强降水	1.1	36	1、2、3、4、5、6、7
2017-07-13	飑线	大风、强降水	1.6	44	1、2、3、4、5、6、7
2017-08-05	超级单体	冰雹、大风、强降水	0.5	28	1、2、3、4、5、6、7
2017-08-08	多单体	冰雹、大风、强降水	1.0	47	1、2、3、4、5、6、7
2017-08-11	超级单体	冰雹、大风、强降水	6.8	24	1、2、3、4、5、6、7
2018-06-12	多单体	冰雹、大风、强降水	0.4	65	1、2、3、4、5、6、7
2018-06-30	多单体	冰雹、大风、强降水	0.4	66	1、2、3、4、5、6、7
2018-07-15	飑线	强降水	1.6	34	1、2、3、4、5、6、7

a) 观测数据: 1, 三维辐射源定位; 2, LACS-SY偏振雷达; 3, LAGEO-IAP偏振雷达; 4, 雨滴谱仪; 5, S波段多普雷雷达; 6, 探空; 7, 自动气象站. 冰雹资料来自北京市气象站的人工观测

过程是5年观测期间最强的一次雷电灾害天气系统. 受东北冷涡和西北副热带高压暖湿气流共同影响, 在北京地区激发了此次强飑线. 北京南郊观象台14:00的探空(图略)结果表明, 地面水汽混合比超过20g kg^{-1}, 低层有明显逆温层, 对流有效位能(CAPE)高达3438J kg^{-1}, 对流抑制能(CIN)很小, 为20J kg^{-1}, 环境层结非常有利于强对流天气的发生. 飑线系统发生于傍晚, 整体自西北向东南方向移动, 前后持续时间超过6h, 北京大部分地区出现暴雨, 局地累积降水量超过100mm, 并伴有冰雹、6级以上的短时大风以及频繁的雷电活动, 导致当天北京机场航班延误或取消超过1000架次.

北京西北部和东北部18:00左右开始出现孤立的对流单体, 图2给出了位于南郊观象台的S波段雷达观测到的此次飑线过程几个时刻的雷达组合反射率与雷电辐射源的叠加. 可以看到, 18:30时(图2a), 北京的西部形成弓状回波, 东北部也有强对流回波. 两个对流活动都发生在与冷涡冷锋有关的西南气流中, 两者之间有弱小的对流活动. 1h后, 两个对流单体向东南移动时合并(图2b), 20:00形成了飑线形态(图2c), 20:30对流线开始断裂(图2d), 之后逐渐减弱. 分析发现, 大约93%的雷电辐射源分布在对流线内以及距对流线边缘约10km的过渡区域内(徐燕等, 2018), 层云区辐射源很少. 从高度上看, 辐射源主要分布在距地面6~9km范围内(图2f), 且主要分布在对流区域, 少量辐射源沿对流线向后方的层云区传播, 层云区表现出明显的亮带, 但亮带内只有孤立的雷电辐射源.

图3给出了整个飑线期间雷电频数的演变特征, 其特点是雷电频数高, 整个过程中, 云闪占主导地位, 总闪频数的峰值出现在20:18, 超过2200fl (6min)$^{-1}$; 地闪频数在20:48左右达到峰值, 约240fl (6min)$^{-1}$(图3a). 正地闪在飑线系统的消散阶段比较活跃, 21:00~23:00正地闪占地闪的14~30%(图3b). 徐燕等(2018)详细分析了这次飑线过程内部的动力场特征, 发现19:24~20:18的对流合并过程中存在大量水汽辐合, 雷电频数峰值滞后于垂直积分液态水含量(VIL)峰值时间约24min. 基于变分多普勒雷达分析系统(VDRAS, Sun等, 2010)反演的风场发现, 对流单体的合并主要发生在低层辐合区, 20:18对流合并后, 上升气流的范围和强度都显著增加, 雷电活动变得更加活跃. 雷电主要集中发生在垂直风切变较大的区域, 而辐射源则稀疏的分布于对流线后部, 与下沉气流一致.

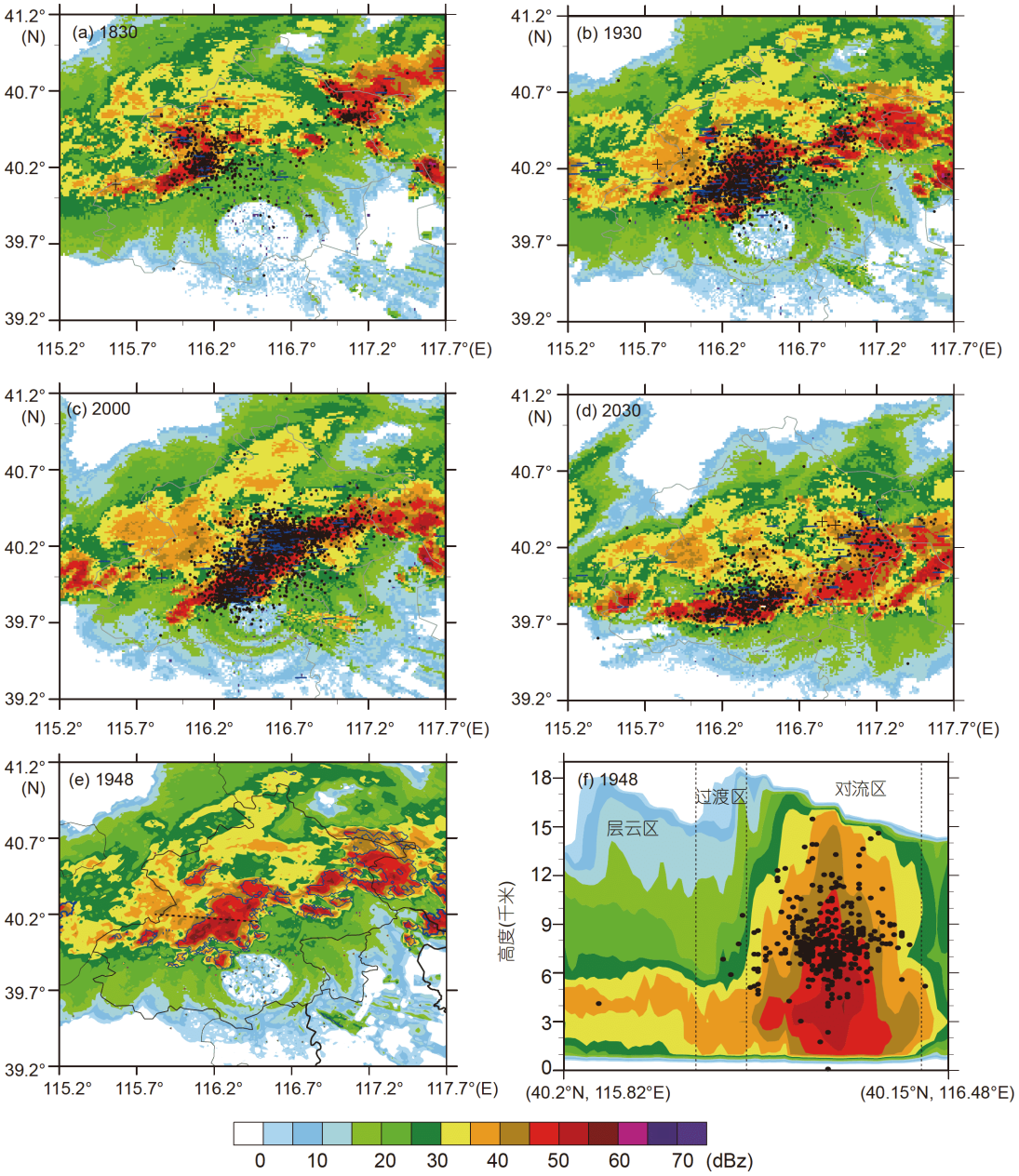


图 2　20150727飑线的S波段雷达组合反射率与6min雷电辐射源的叠加

·, 代表云闪; –, 负地闪; +正地闪, 下同. (a)~(d)分别对应18:30、19:30、20:00和20:30; (e)19:48的雷达组合反射率, 蓝色等值线内为对流云区; (f)沿图(e)所示虚线的雷达组合反射率垂直剖面和±0.1°经纬度范围内的雷电辐射源(下同)

3.2　2016年6月10日多单体冰雹云过程

这次多单体过程是一次明显的冰雹云过程(简称20160610多单体雹暴). 08:00的天气形势图显示(图略), 本次雹暴过程受东北冷涡以及高空槽共同影响. 850hPa高空槽前的低层西南暖湿气流形成明显的湿舌, 与干冷的西北气流在北京交汇, 形成明显的不稳定层结. 北京14:00时的探空显示CAPE值为2726J kg^{-1}, 900hPa附近存在逆温层, 800hPa以下温度露点差小, 水汽丰富; 800hPa以上, 温度露点差大, 水汽含量低, 上干下湿, 为此次多单体雹暴的爆发提供了很好的动力和热力条件.

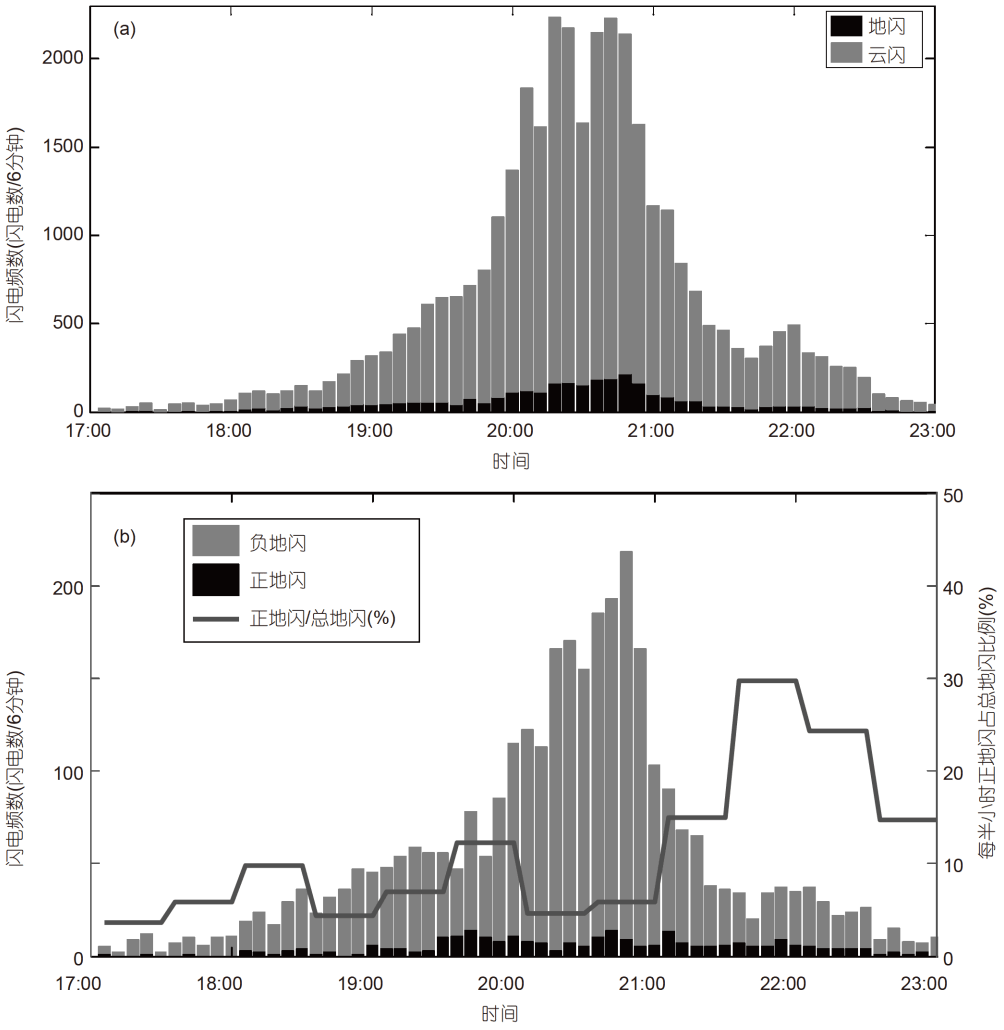


图 3　20150727飑线过程的雷电频数随时间的演变

(a) 云闪和地闪; (b) 正地闪和负地闪, 以及正地闪占总地闪的比例

20160610多单体雹暴包括多个单体相继触发, 前后持续时间超过5h. 图4给出了四个不同时刻的雷达反射率和雷电辐射源的叠加. 从14:54时的雷达回波(图4a)可以清楚看到, 在北京城区的海淀和北部的密云存在南、北部两个彼此分离的雷暴云团, 北侧密云雷暴向东移动, 而南侧雷暴云团则向东南移动, 最终在天津减弱消亡. 据北京气象站地面观测记录, 南侧云团在其移动路径上曾先后5次降雹, 因此这里只讨论南侧降雹的云团.

南侧云团上先后有三个单体相继爆发, A单体14:20左右在海淀西北部最早爆发(图略)并于14:48开始降雹, 持续时间约12min, 期间出现大于60dBZ的强回波, 其顶高约6km(见图4b), 这时, B单体也已经触发并不断增强. 15:18时C单体触发(见图4c), 单体B和单体A外围开始合并, 但二者分离的强回波中心持续清晰可见. 在向东南移动的路径上, A单体先后在海淀(14:48~15:00, 参见图4a和4b)、朝阳(15:18~15:30, 参见图4c)和通州(16:00~16:06, 参见图4d)降雹, 从气象站实况报告来看, 三个地区的降雹虽然都由单体A产生, 但时间上不连续. 16:54~17:00的第4次降雹发生于大兴, 由单体C产生, 此时C单体正好位于雷达站附近, 回波图上仅能看到一弱回波区, 雷达未能探测到强回波中心, 为了清楚起见, 图4e给出了降雹结束后17:06的雷达反射率与雷电辐射源, 图4f是相应时段的一个

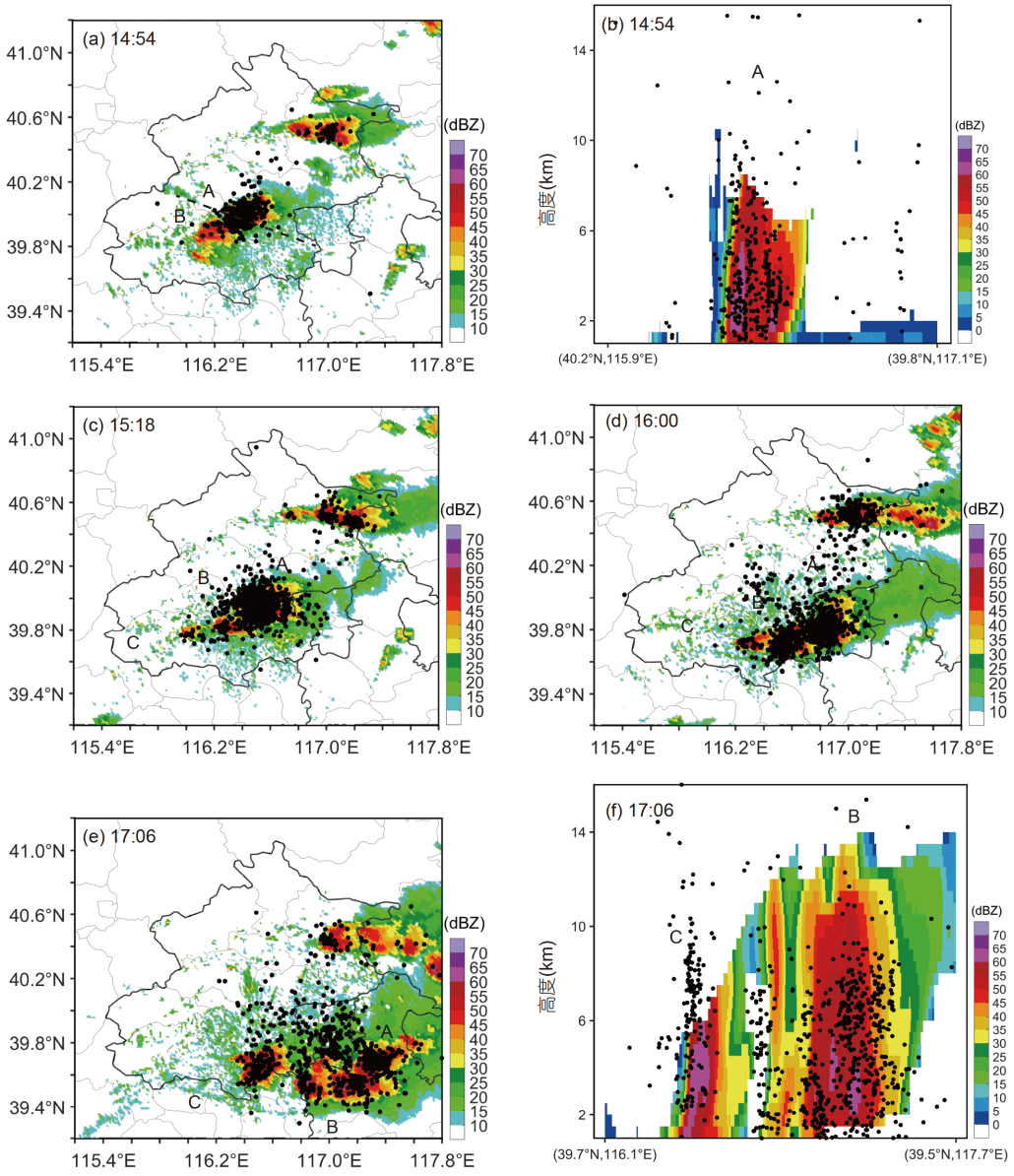


图 4　20160610多单体雷暴的雷达组合反射率和其后6min的雷电辐射源(黑点)叠加

(b)和(f)分别为沿图(a)和(e)黑色虚线的垂直剖面

垂直剖面, 可以看出即使降雹结束后, 回波强度依然很强, C单体大于60dBZ的强回波依然存在, 顶高超过6km, 但雷达仍未能探测到较高的雷暴云顶, 雷电辐射源三维定位得到的高度范围主要分布在2~10km, 最高超过了14km. 从图4f可以看到, 位于天津的B单体中存在前后两个60dBZ强回波区域, 40dBZ回波顶高超过13.5km. 少数辐射源高度接近地面, 应该是由个别地闪所产生. 17:24~17:36期间的第5次降雹发生在天津境内, 由A、B两单体合并后产生, 这里不详述.

从雹暴的演化过程来看, 三个单体整体上水平尺度都较小, 属中γ尺度单体雷暴, 但对流强度大, 强回波顶高较高, 大部分时段内40dBZ回波顶高超过13km, 降雹时段单体都出现了60dBZ强回波, 个别时刻其顶高超过11.5km, 雷电辐射源主要分布在大于40dBZ的强回波区域, 说明云中存在强烈的上升气流, 有利于冰雹的产生和增长, 进而加强了基于冰相粒子碰撞和

电荷转移的云内非感应起电机制(Saunders和Peck, 1998), 进一步促进了雷电的发生.

从图4可看到一些雷电辐射源分布在雷达回波之外, 主要原因是他们来自于发生在云外的放电分支通道, BLNET可以给出雷电过程中大部分辐射脉冲的定位结果, 其中云外的放电分支产生的辐射脉冲也可以被定位. 另一个原因是所用的雷达回波来自S波段雷达, 对于强回波外围较薄的弱回波没能有效探测, 回波区域可能并没有反映真实的雷暴外围结构. 遗憾的是两部X波段雷达错过了这次天气过程观测, 不能给出更多的细节特征. 另外, 由于地物遮挡以及雷暴云体靠近雷达测站存在盲区, 使得雷达对这次过程的探测很不完整, 大部分垂直剖面不能很好地反映雷暴云体的垂直结构和高度, 相比较而言, 雷电辐射源三维定位则不受地物影响, 可以在一定程度上弥补雷达观测的不足.

图5给出了这次过程的雷电频数和辐射源高度随时间的变化, 在其发展路径上的先后5个降雹时段在图中横坐标上用黑色线段标出. 由于在第一次降雹期间, BLNET的部分测站尚未开始运行, 因此不做详细分析. 在整个雷暴发展过程中, 云闪占总闪的比例达80%以上, 总闪频数在15:30、16:00、17:00和17:30达到最大值, 分别对应后4个降雹时段, 第5次降雹期间的雷电峰值最高, 超过1000fl (6min)$^{-1}$, 这时A、B两个单体完全合并, 降雹后的C单体也依然处于强盛阶段, 多单体暴雹整体上发展旺盛, 云体面积大, 因此产生了很高的雷电频数.

图5c给出了这次多单体暴雹过程的辐射源高度分布随时间的演变, 在15:24前后的第2次降雹时段, 雷电放电的辐射源数量明显增多, 主要集中在4~12km高度层, 并在5.5~9.0km左右高度层出现峰值区域. 在16:00前后的第3次降雹阶段, 辐射源分布区域向更高处扩展, 除5.5~9.0km左右高度层的峰值区域外, 在10~13km高度区域出现第二个辐射源密度峰值区域. 在16:54左右的第4次降雹阶段, A、B两个单体开始合并, 导致在较长的时段内雷电辐射源在4~13km高度层都比较活跃, 并在四个高度层上出现辐射源高值区, 降雹由增强的C单体产生. 之后经过短暂的寂静期, 17:24开始出现第5个降雹时段, 辐射源再一次出现活跃期, 17:30左右辐射源峰值区域显著增加, 辐射源高度主要分布在6~13km高度层, 并在10~12km高度层出现峰值, 雷电辐射源超过100pulses (0.5km 6min)$^{-1}$, 雷电频数超过1000fl (6min)$^{-1}$, 相比前几个降雹时段, 总雷电频数和云闪频数都是最高的, 正地闪比例也达到最大, 正地闪占总地闪的比例接近60%. 高雷电频数和高正地闪比例是冰雹云常见的特征, 可用于指示冰雹灾害的发生(冯桂力等, 2007; Logan, 2018; Xu S等, 2016; 孙萌宇等, 2020b). 实际上, 这次多单体雹暴过程整体上的正地闪与总地闪的比值超过20%, 在第3、4、5次降雹过程期间, 正地闪比例都显著增加.

需要指出的是, 本文所用的冰雹记录来自北京气象站的人工记录, 由于站点稀疏, 冰雹的开始和结束时间可能不完全准确, 每次实际冰雹过程的持续时间应该比图5所示的更长一些. 比如图4f所示的17:06雷暴单体B和C, 雷达回波强度都超过了60dBZ, 相应的雷电频数也很高(见图5), 此时两个单体应该仍处于降雹阶段, 即第四次降雹阶段的持续时间应该超过12min.

3.3 2017年8月11日超级单体

这次超级单体雷暴过程(简称为20170811超级单体)在北京引发强降雨, 并伴有冰雹、6~8级短时大风以及强烈的雷电活动, 城区和东部地区的平均雨量10~30mm, 局地超过100mm. 从08:00时天气形势上分析(图略), 500hPa中高纬地区存在较强的蒙古低涡, 北京上空以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850hPa西南低空急流活跃, 有湿舌覆盖, 西南气流将暖湿空气输送至干冷空气下方, 在北京地区形成了明显的不稳定层结. 08:00的探空廓线显示CAPE高达3937J kg^{-1}, 水平风从低层到高层出现顺转趋势, 存在强的水平风垂直切变, 是触发强对流天气的有利环境条件.

20170811超级单体初始阶段, 在北京南部的辐合区形成了几个弱小的回波单体(图6a), 之后强度和范围都迅速增加, 18:42~19:30期间, 雷暴云体在东北-西南方向上强回波的空间尺度增加超过了100km(图6b和6c). 20:00总闪频数超过1600fl (6min)$^{-1}$(图7a), 表明大量冰相粒子生成并随强上升气流碰撞、起电(Saunders和Peck, 1998; 孙凌等, 2018; Chen等, 2020). 20:30之后, 超级单体风暴进入成熟期(图6d), 此时地面产生降雹(雹粒半径>3cm), 总闪频数超过2000fl (6min)$^{-1}$

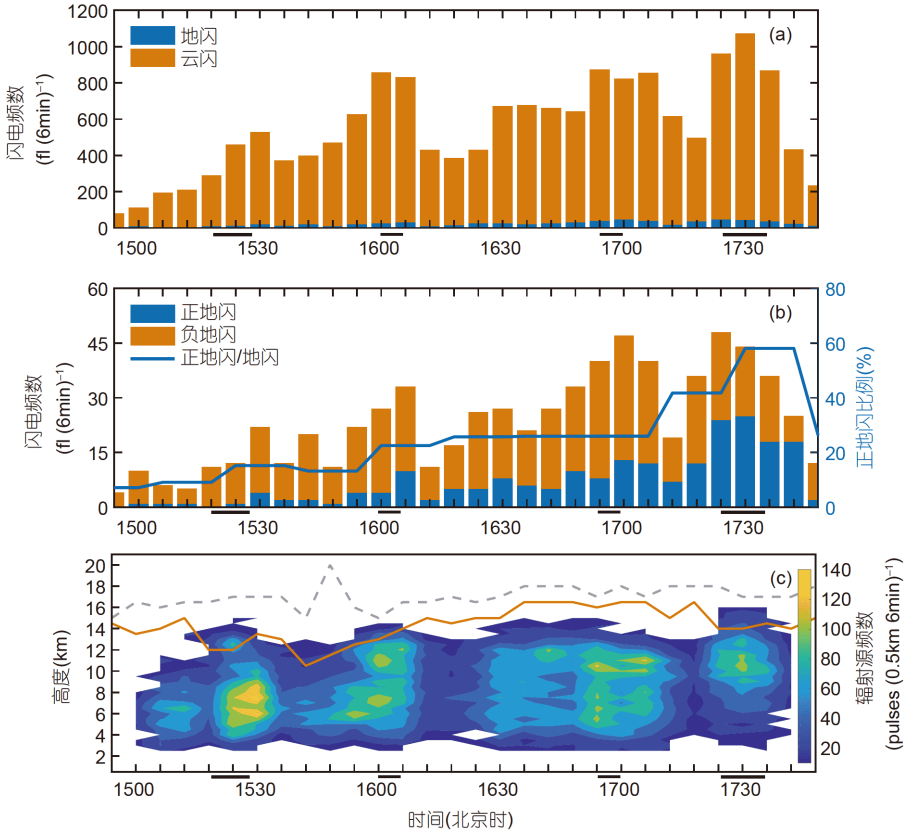


图 5　20160610多单体雷暴的雷电频数和辐射源高度随时间的变化

(a) 地闪(CG)和云闪(IC); (b) 负地闪(NCG)和正地闪(PCG), 以及正地闪比例; (c) 每0.5km高度层的辐射源频数, 色标单位: pulses (0.5 km 6min)$^{-1}$以及40dBZ(虚线)、50dBZ(实线)回波顶高度(单位: km)随时间的变化. 横坐标下面的黑色线段代表降雹时段

(图7a). 此后, 在超级单体继续向东南发展的过程中逐渐减弱, 21:30之后组织性越来越差(图6e), 后部形成大片层云区. 减弱的雷暴产生的雷电较少, 主要发生在一些孤立的高雷达反射率区域(图6f).

从图7可以发现, 尽管总闪频数减少对应着雷暴的减弱过程, 但在22:30之后, 当雷暴雷电频数非常低时, 正地闪与总地闪的比例却显著增加, 达到最大值24% (图7b). 而在发展和成熟阶段, 正地闪占总地闪的比例大约为10%. 在雷暴消亡期的这种高正地闪比例是雷暴过程中常见的现象, 主要是由于总雷电和地闪数量的减少而造成. 当然有时由于雷暴移远, 超出雷电探测网的有效探测范围, 仅能探测到一些较强的地闪, 也会造成正地闪比例、地闪比例虚高的假象. 特别是由于正地闪放电强, 峰值电流较大, 更容易被探测到, 而云闪相对较弱, 则不易被探测到. 对于本次过程而言, 主要是由于后期的雷暴减弱, 产生的总雷电频数减少引起的, 从雷达回波来看, 23:00以后雷达回波逐渐减弱, 雷电频数从约500fl (6min)$^{-1}$快速减小, 至23:42(图6f), 雷达回波已经分裂为几个分散的小单体, 雷电频数仅有200fl (6min)$^{-1}$快速减小, 地闪和正地闪的数目也只有1~3个.

4　雷电的空间分布及城市热岛效应对雷电和雷暴强度的可能影响

图8给出了北京地区的雷电密度空间分布, 可以看出, 昌平区东部、顺义区中部和东部, 以及北京主城区是雷电密度高值区, 最大值超过15.4fl km^{-2} a^{-1}, 北京地区的平均雷电密度约为1.9fl km^{-2} a^{-1}. 如果根据一次雷暴产生的雷电次数并参考雷达回波强度和持续时间, 可将北京地区所发生的雷暴分为超级雷暴(总闪频数>10000)、强雷暴(总闪频数介于1000~10000)和弱

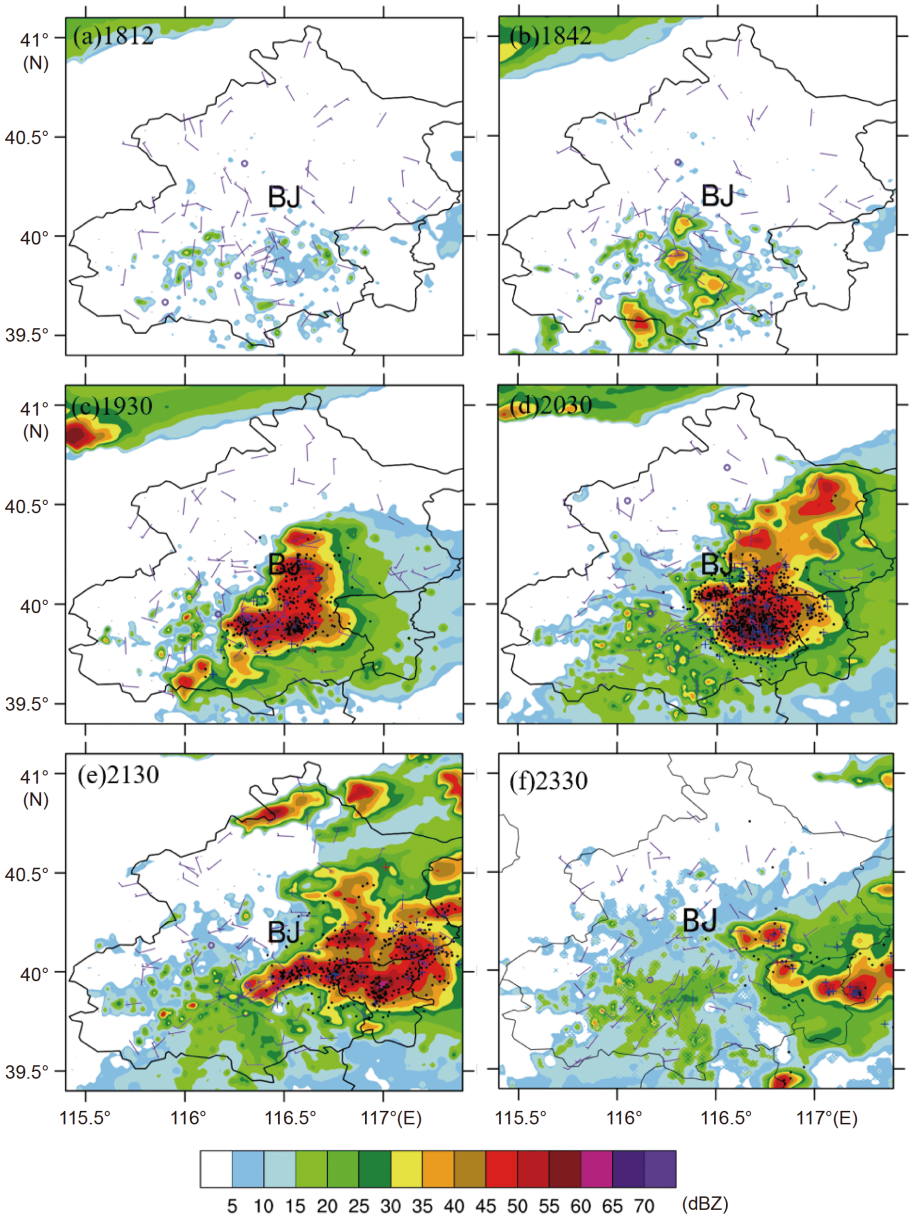


图 6　20170811超级单体6个时刻的雷达组合反射率与6min内归闪后的雷电叠加

风矢代表自动气象站的地面风场, 风羽的长、短线段分别代表2和4m s^{-1}

雷暴(总闪频数<1000), 雷达回波显示空间上明显分离或时间上明显不同的降水过程作为不同的雷暴分开统计, 则超级雷暴(占所有雷暴总数的5%)、强雷暴(占雷暴总数35%)和弱雷暴(占比60%)分别占所有雷电总频数的37%、56%和7%, 雷电密度高值中心主要由强雷暴和超级雷暴产生(王东方等, 2020). 实际上, 北京城区经常在夜间出现超强雷暴和强雷暴, 它们大都在西部或西北部山区生成后向东或东南传播, 而弱雷暴多发生在下午. 从图8的雷电密度分布图可以看出, 其高值区的分布与20150727飑线和20170811超级单体两次强雷电天气系统强盛时段的位置接近, 实际上强雷暴和超强雷暴强盛时段的位置在很大程度上决定了雷电密度的分布.

强雷暴和超强雷暴在平原上均表现为低的对流抑制能量和高的低层风速; 而飑线在平原上表现为更高的垂直风切变, 在山区和平原上则均表现为更强的风

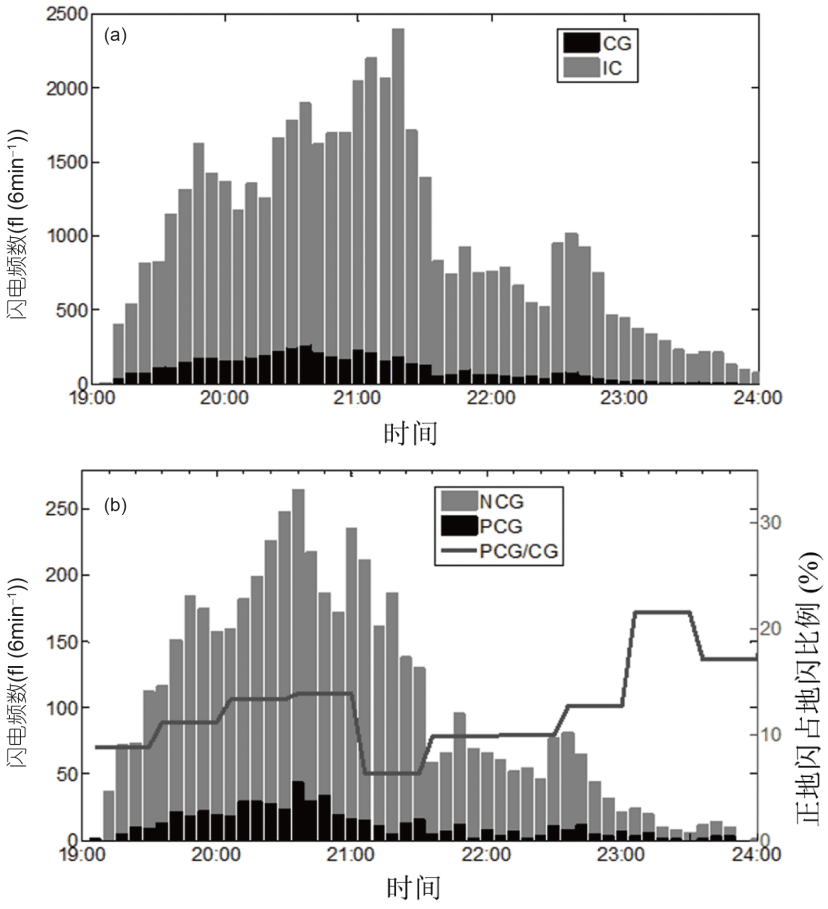


图 7　20170811超级单体过程的雷电频数随时间的演变

(a) 云闪和地闪; (b) 正地闪和负地闪, 以及正地闪占总地闪的比例

速(Xiao等, 2017, 2019). 受地形和环境条件影响, 高空冷涡后部的西北气流和来自渤海湾的东南气流交汇, 北京低层形成风场辐合线, 对流单体多数沿着这些辐合线触发增强, 在一段时间内多个单体同时存在, 可形成多单体雷暴, 但是随着单体发展扩大, 相互移近合并, 形成了明显的线状对流. 飑线过程中强的风速和垂直风切变会产生更强烈的下沉气流, 进一步导致冷池加深, 形成强的出流和辐合, 从而使城市地区的雷暴增强, 产生更多的雷电. 值得注意的是, 雷电在城市地区达到峰值, 而降水则在城市和下游达到峰值. 雷电峰值之后出现降水峰值, 预示着雷电有可能用来临近预警短时强降水事件(Wu等, 2017, 2018; Li等, 2017a).

城市热岛效应在增强区域降雨量方面起着重要作用(Shepherd, 2005; Zhang, 2020). 北京上空发生的大多数雷暴始发于西部山区, 作为一个超大城市, 北京城区对局地气象条件影响显著. 基于“雷暴973”的观测结果, 北京的城市热岛效应, 特别是中心城区, 对过境雷暴系统的增强起着至关重要的作用. 北京城市热岛效应可以显著改变城市地区与近郊地区的热湿通量(Yu等, 2017; Lang等, 2004); 城市热岛效应导致的边界层厚度增加有助于混合层顶对流起始处的水汽凝结(Li等, 2017b; Yang等, 2013); 城市地区的气溶胶浓度也会对雷暴云的微物理过程产生一定的影响, 并影响雷电的产生(孙萌宇等, 2020a). 热动力和微物理过程的共同作用显著地改变城市地区雷暴的发展演变过程, 当雷暴从西北山区向城区传播时, 强度增大并提高电荷分离和起电过程的效率, 从而增加城市地区的雷电活动. 值得今后进一步深入研究的是, 当雷暴经过北京城市区域时对流如何增强以及增强的程度.

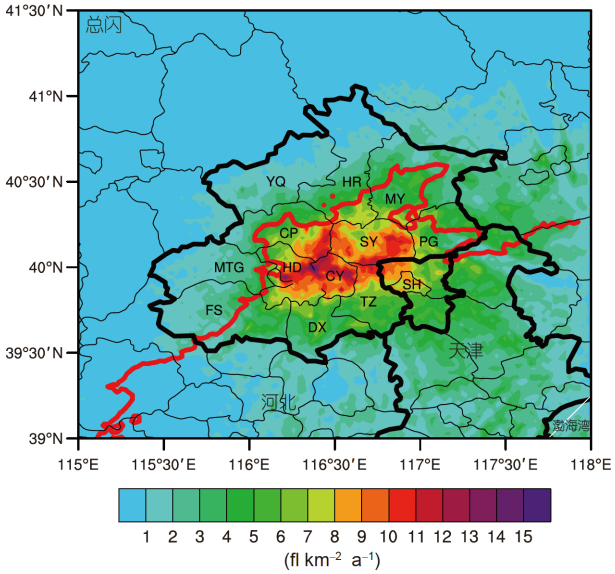


图 8　北京地区总闪密度分布

红色曲线表示海拔200m的等高线

5　雷电对强对流灾害事件的预警和雷电资料的同化应用

雷电的产生在很大程度上取决于雷暴系统的热动力和微物理过程. 因此, 正如上文所述, 强雷暴不仅产生很高的雷电频数, 也常产生冰雹、破坏性大风、短时强降水等恶劣天气或灾害性强天气事件. 同时, 产生这些灾害性强天气事件的强雷暴通常也伴随很高的雷电频数和特殊的雷电特征. 这表明雷电活动在灾害性天气的预测中有潜在的应用价值.

雷电可以作为冰雹预警的指示因子. 对于20160610多单体雷暴个例(见图4), 整个过程的总雷电和云闪频数都很高, 正地闪与总地闪的比值明显大于一般雷暴, 并在第2~5次降雹过程前, 正地闪比例显著增加, 特别是在第5次降雹阶段, 正地闪占比超过一半. 在第2、3和5次峰值之前的雷电频数均出现明显的跃增(孙萌宇等, 2020b). 基于2σ雷电跃增阈值(Schultz等, 2009), 对北京地区148次降雹事件BLNET探测到的雷电活动进行预报试验发现, 大部分冰雹过程都伴随较高的雷电频数, 而且在降雹事件之前, 会出现雷电频数的显著增加, 其中81.8%的降雹事件之前都出现了雷电频数的跃增, 雷电频数跃增的平均超前时间为27.1min(Tian等, 2019), 因此雷电频数跃增的2σ算法是一个很好的冰雹预报因子.

雷电和对流性降水常相伴而生, 有些雷暴系统中二者之间存在很好的相关性(Wu等, 2017; Li等, 2017a), Wu等(2018)认为基于雨强和雷电跃增之间的关系, 可以进行短时强降水事件的预警, 而且从中γ尺度到区域尺度的短时强降水事件都可以给出较好的预警效果, 因此, 在具备雷电全闪定位能力的地区有广泛的应用前景.

雷电定位资料可以作为一种新的数据同化源. 通过建立雷电频数与水汽混合比、霰粒子含量、上升气流速度和雷达反射系数等模式参量之间的关系, 同化进入模式, 可以在云分辨数值模式中改进强对流和降水的预报, 已有研究已经证明了引入雷电资料同化后对预报效果的改进, Chen等(2019)通过建立BLNET探测到的雷电频数与900~700hPa的低层水汽混合比、雷电与混合相态区域的霰粒子混合比之间的关系, 同化进入模式后显著改进了对强对流的预报效果. 雷电与水汽混合比(Q_v, g kg^{-1})、霰粒子混合比(Q_g, g kg^{-1})的同化函数如下:

$$\begin{aligned} Q_{\mathrm{v}} &= aQ_{\mathrm{sat}} + 0.2Q_{\mathrm{sat}}\tanh(0.05X)\left[1-\tanh(cQ_{\mathrm{g_model}}^{\alpha})\right], \\ Q_{\mathrm{g}} &= b + 0.002\tanh(0.05X)\left[1-\tanh(cQ_{\mathrm{g_model}}^{\alpha})\right], \end{aligned} \tag{1}$$

式中, Q_{sat}和$Q_{\mathrm{g_model}}$分别表示模式预测的水汽和霰粒子混合比, X为雷电频数. a、b、c和α是常数. 基于WRF的模拟结果表明, 雷电资料同化后由于低层补充增加的水汽, 使得对流向高层发展并可持续较长时间, 从而显著提高了降雨的定量预报技巧.

基于雷电频数与水汽混合比的经验关系, Zhang R等(2017)基于WRF-3DVAR(三维变分), 通过以10min为间隔的循环模拟, 研究了3DVAR雷电资料同化方法的效果. 研究表明, 采用3DVAR方法对3h内的累积降水量预报效果明显提高, 对飑线系统进行雷电资料同化的时间窗推荐用60min. Wang等(2017)在WRF-3DVAR中采用雷电频数代理相对湿度, 发现在雷达反射率和降水量的预测方面有改进, 7h后温度、露点温度和相对湿度廓线也有所改善, 这种积极的影响可以维持3h左右. Xiao等(2018)建立了总闪电频数与垂直速度最大值的关系, 并将该经验关系通过4DVAR的方式引入VDRAS模式, 利用同化闪电资料增加了中层的垂直速度, 并因此在整个反演区域带来较强的垂直运动和潜热释放, 从而有助于维持对流风暴的发展, 促

发新对流的产生, 而且进一步增加闪电后, 在一定程度上还可以抑制降水虚假回波.

目前在许多数值模式中都有以雷达反射率为观测算子的资料同化方案, 因此建立雷电资料与雷达反射率之间的关系, 可以在不开发新的观测算子的情况下, 直接采用模型中已有的方案进行雷电资料同化. 由于地闪定位资料在中国已有多年的积累, 且空间覆盖范围大, 基于地闪频数的代理雷达反射率, 通过物理初始化方法也可以实现雷电资料同化(Wang等, 2014; Yang等, 2015), 从而提高对流预报的精度.

雷电活动受到热动力过程和微物理过程的显著影响(Liu等, 2014; Wang等, 2015a, 2015b; Xu L T等, 2016; Zhao等, 2015), 因此可以根据热动力和微物理参数来预报雷电. Li等(2016)提出了一种改进的雷电潜势指数(MLPI)预测雷电的方法, 在基于冰相粒子含量的雷电潜势指数(LPI)基础上, 区分可降水冰相粒子和非降水冰相粒子来估算雷电密度, 利用WRF模式对一次准线状MCS的模拟和雷电预报结果表明: 雷电主要发生在CAPE梯度较大的区域, 绝大多数雷电发生在MCS的右侧和前方地面风场复合较强的地方, 与观测结果一致.

6　结论和展望

基于自行研制的雷电全闪三维定位系统BLNET和两部X波段双线偏振多普勒雷达等, 在北京地区开展了为期5年的暖季雷电天气系统综合观测实验. BLNET不仅可以给出包括云闪和地闪在内的全闪辐射脉冲的三维定位结果, 而且对辐射源的三维定位结果具有精度高、不受地形影响等优点, 可以在一定程度上弥补雷达容易受地形遮挡和近距离雷达观测盲区的不足.

观测研究发现, 持续时间长、影响范围大的飑线系统是影响北京最强的一类雷电灾害天气系统. 由于其前部对流线区域大, 因此强降水影响范围大, 雷电频数可以高达每分钟数百次, 值得进一步深入研究. 观测还发现由多个中γ尺度单体在多地相继或同时爆发的多单体雷暴系统也是严重影响北京的一类重要的雷电天气系统, 中γ尺度单体突发性强, 准确预报难度大, 而多个中γ尺度单体雷暴同时或先后相继在不同地点发生, 更增加了预报的难度, 也加重了对首都政治、经济和人民生活多方面的影响. 超级单体系统在北京虽不经常发生, 但是由于对流强度大, 空间范围广, 雷电频数高, 一旦发生, 对首都北京的影响是非常严重的. 基于BLNET的三维雷电辐射源定位和X波段双线偏振多普勒雷达等多探测手段的综合观测, 对时间和空间尺度都较小的中γ尺度的雷暴单体的观测具有很大的优势, 有助于深入认识小尺度雷电灾害天气系统的发展演变规律, 而且雷电观测可在一定程度上弥补雷达受地物遮挡、近距离盲区和强降水衰减的不足.

雷电定位资料可以作为数值预报模式的一种新的资料同化源, 对改进强对流和强降水的预报效果有重要意义. 另外, 雷电频数的快速跃增对地面降雹、短时强降水事件等都有一定的预警指示意义. 对于冰雹云的识别目前主要依赖于偏振雷达的粒子分类识别, 对冰雹的记录则主要依靠气象站的人工记录, 可能存在漏记的情况. 基于雷电资料对冰雹云的识别与预警可以作为重要的补充, 值得进一步深入研究.

当然, 要回答雷电天气系统中雷电、动力和微物理过程之间的相互关系, 关键是要认识和理解雷暴云内部的起电和电荷结构. 通过释放探空气球携带的电场探空仪入云观测是获得云内电荷结构的有效途径, 但由于空中管制和安全问题, 在北京释放气球携带的雷暴云电场探空仪仍然是一个具有挑战性的课题. 基于雷电辐射源的三维定位可以进行云内的电荷区识别, 有望在未来的研究中发挥重要作用. 因用于水成物粒子反演的X波段双偏振雷达在强降水探测时的衰减, 对20150727和20170811两次强降水天气过程的观测资料需要经过衰减订正和检验, 本文未做分析. 近期Liu等(2020)基于雷电三维定位和X波段双线偏振多普勒雷达同步观测资料, 探讨了20170613超级单体个例中雷电和云内起电与雷暴云内的强上升气流、混合相区域的冰相粒子、对流层中低层的水汽含量、垂直风切变等之间的联系, 未来将利用更多的个例进行更深入研究. 另外, 不同类型雷暴共同的动力学、微物理和雷电特征, 以及城市热岛效应、复杂下垫面和气溶胶浓度对雷暴的发生与发展演变的影响机制也是正在进行的另一个重要研究方向, 期望通过观测与数值模式的结合定量研究这些问题, 揭示地形和城市化对雷暴演化和增强的影响.

致谢 感谢所有参与“雷暴973”观测、数据收集和处理的人员.

参考文献

冯桂力, 郄秀书, 袁铁, 牛淑贞. 2007. 雹暴的闪电活动与降水结构研究. 中国科学: 地球科学, 37: 123–132

冯亮, 肖辉, 孙跃. 2018. X波段双偏振雷达水凝物粒子相态识别应用研究. 气候与环境研究, 23: 366–386

马明, 吕伟涛, 张义军, 孟青, 杨晶. 2008. 1997~2006年我国雷电灾情特征. 应用气象学报. 19: 393–400

孟智勇, 张福青, 罗德海, 谈哲敏, 方娟, 孙建华, 沈学顺, 张云济, 汪曙光, 韩威, 赵坤, 朱磊, 胡永云, 薛惠文, 马亚平, 张丽娟, 聂绩, 周瑞琳, 李飒, 刘泓君, 朱宇宁. 2019. 新中国成立70年以来的中国大气科学研究: 天气篇. 中国科学: 地球科学, 49: 1875–1918

穆穆, 段晚锁, 唐佑民. 2017. 大气-海洋运动的可预报性: 思考与展望. 中国科学: 地球科学, 47: 1166–1178

孙继松, 雷蕾, 于波, 丁青兰. 2015. 近10年北京地区极端暴雨事件的基本特征. 气象学报, 73: 609–623

孙凌, 郄秀书, Edward R M, 陈志雄, 徐燕, 蒋如斌, 孙竹玲. 2018. 雷暴云内电场力对起电和电荷结构的反馈作用. 物理学报, 67: 169201

孙凌, 陈志雄, 徐燕, 孙竹玲, 袁善锋, 王东方, 田野, 徐文静, 郄秀书. 2019. 北京一次强飑线过程的闪电辐射源演变特征及其与对流区域和地面热力条件的关系. 大气科学, 43: 759–772

孙萌宇, 郄秀书, 刘冬霞, Yair Y, 夏祥鳌, 袁善锋, 王东方, Ntwali D. 2020a. 北京地区闪电活动与气溶胶浓度的关系研究. 地球物理学报, 63: 1766–1774

孙萌宇, 郄秀书, 孙凌, 刘冬霞, 王东方, 袁善锋, 陈志雄, 徐文静, 孙成云, 苏德斌. 2020b. 北京城区相继多次降雹的一次强雷暴的闪电特征. 大气科学, 44: 601–610

王东方, 郄秀书, 袁善锋, 孙竹玲, 陈志雄, 李进梁, 张鸿波, 刘明远, Srivastava A, 刘冬霞. 2020. 北京地区的闪电时空分布特征及不同强度雷暴的贡献. 大气科学, 44: 225–238

吴学珂, 郄秀书, 袁铁. 2013. 亚洲季风区深对流系统的区域分布和日变化特征. 中国科学: 地球科学, 43: 556–569

徐燕, 孙竹玲, 周筠珺, 袁善锋, 陈志雄, 刘冬霞, 王东方, 田野, 徐文静, 郄秀书. 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. 大气科学, 42: 1393–1406

Chan Y T, Ho K C. 1994. A simple and efficient estimator for hyperbolic location. IEEE Trans Signal Process, 42: 1905–1915

Chen S, Zhang Y, Chen C, Yan X, Lu W, Zhang Y. 2016. Influence of the ground potential rise on the residual voltage of low-voltage surge protective devices due to nearby lightning flashes. IEEE Trans Power Deliver, 31: 596–604

Chen S, Zhang Y, Zhou M, Yan X, Lu W, Chen L, Zhang Y. 2018a. Observation of residual voltage in low-voltage surge protective devices due to nearby M-components. IEEE Trans Electromagn Compat, 60: 776–784

Chen S, Zhang Y, Zhou M, Yan X, Lu W, Zhang Y. 2018b. Influence on low-voltage surge protective devices of overhead distribution lines due to nearby return strokes. IEEE Trans Power Deliver, 33: 1099–1106

Chen Z, Qie X, Liu D, Xiong Y. 2019. Lightning data assimilation with comprehensively nudging water contents at cloud-resolving scale using WRF model. Atmos Res, 221: 72–87

Chen Z, Qie X, Yair Y, Liu D, Xiao X, Wang D, Yuan Y. 2020. Electrical evolution of a rapidly developing MCS during its vigorous vertical growth phase. Atmos Res, 246: 105201, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105201

Fan Y, Lu G, Li X, Zheng T, Zhang H, Jiang R, Liu M, Qie X, Zhang Y, Zhang Y, Lyu W, Zheng D. 2019. Measurements of burst of magnetic pulses during the initial continuous current in rocket-triggered lightning. J Geophys Res-Atmos, 124: 11710–11721

Fan Y, Lu G, Jiang R, Zhang H, Li X, Liu M, Qie X, Zheng D, Lyu W, Zhang Y, Zhang Y. 2018. Characteristics of electromagnetic signals during the initial stage of rocket-triggered lightning. J Geophys Res-Atmos, 123: 11625–11636

Gao Y, Lu W, Ma Y, Chen L, Zhang Y, Yan X, Zhang Y. 2014. Three-dimensional propagation characteristics of the upward connecting leaders in six negative tall-object flashes in Guangzhou. Atmos Res, 149: 193–203

Guo F X, Li Y, Huang Z C, Wang M F, Zeng F H, Lian C H, Mu Y J. 2017. Numerical simulation of 23 June 2016 Yancheng City EF4 tornadic supercell and analysis of lightning activity. Sci China Earth Sci, 60: 2204–2213

Jiang R, Qie X, Wu Z, Wang D, Liu M, Lu G, Liu D. 2014. Characteristics of upward lightning from a 325-m-tall meteorology tower. Atmos Res, 149: 111–119

Jiang R, Qie X, Zhang H, Liu M, Sun Z, Lu G, Wang Z, Wang Y. 2017. Channel branching and zigzagging in negative cloud-to-ground lightning. Sci Rep, 7: 3457

Lang T J, Miller L J, Weisman M, Rutledge S A, Barker Llyle J. I, Bringi V N, Chandrasekar V, Detwiler A, Doesken N, Helsdon J, Knight C, Krehbiel P, Lyons W A, Macgorman D, Rasmussen E, Rison W, Rust W D, Thomas R J. 2004. The severe thunderstorm electrification and precipitation study. Bull Amer Meteorol Soc, 85: 1107–1126

Li H, Cui X, Zhang D L. 2017a. A statistical analysis of hourly heavy rainfall events over the Beijing metropolitan region during the warm seasons of 2007–2014. Int J Climatol, 37: 4027–4042

Li H, Cui X, Zhang D L. 2017b. Sensitivity of the initiation of an isolated thunderstorm over the Beijing metropolitan region to urbanization, terrain morphology and cold outflows. Q J R Meteorol Soc, 143: 3153–3164

Li W, Qie X, Fu S, Su D, Shen Y. 2016. Simulation of quasi-linear

mesoscale convective systems in northern China: Lightning activities and storm structure. Adv Atmos Sci, 33: 85–100

Li X, Zhang Q, Zou T, Lin J, Kong H, Ren Z. 2018. Climatology of hail frequency and size in China, 1980–2015. J Appl Meteorol Climatol, 57: 875–887

Li Y, Zhang G, Wang Y, Wu B, Li J. 2017. Observation and analysis of electrical structure change and diversity in thunderstorms on the Qinghai-Tibet Plateau. Atmos Res, 194: 130–141

Liang X, Miao S, Li J, Bornstein R, Zhang X, Gao Y, Chen F, Cao X, Cheng Z, Clements C, Dabberdt W, Ding A, Ding D, Dou J J, Dou J X, Dou Y, Grimmond C S B, González-Cruz J E, He J, Huang M, Huang X, Ju S, Li Q, Niyogi D, Quan J, Sun J, Sun J Z, Yu M, Zhang J, Zhang Y, Zhao X, Zheng Z, Zhou M. 2018. SURF: Understanding and predicting urban convection and haze. Bull Am Meteorol Soc, 99: 1391–1413

Liu D, Qie X, Chen Y, Sun Z, Yuan S. 2020. Investigating lightning characteristics through a supercell storm by comprehensive coordinated observations over north China. Adv Atmos Sci, doi: 10.1007/s00376-020-9264-x

Liu D, Qie X, Peng L, Li W. 2014. Charge structure of a summer thunderstorm in North China: Simulation using a Regional Atmospheric Model System. Adv Atmos Sci, 31: 1022–1034

Logan T. 2018. Anomalous lightning behavior during the 26–27 August 2007 Northern Great Plains severe weather event. J Geophys Res-Atmos, 123: 1771–1784

Lu G, Fan Y, Zhang H, Jiang R, Liu M, Qie X, Cummer S A, Han C, Liu K. 2018. Measurement of continuing charge transfer in rocket-triggered lightning with low-frequency magnetic sensor at close range. J Atmos Sol-Terrestrial Phys, 175: 76–86

Lu G, Zhang H, Jiang R, Fan Y, Qie X, Liu M, Sun Z, Wang Z, Tian Y, Liu K. 2016. Characterization of initial current pulses in negative rocket-triggered lightning with sensitive magnetic sensor. Radio Sci, 51: 1432–1444

Lu W, Gao Y, Chen L, Qi Q, Ma Y, Zhang Y, Chen S, Yan X, Chen C, Zhang Y. 2015. Three-dimensional propagation characteristics of the leaders in the attachment process of a downward negative lightning flash. J Atmos Sol-Terrestrial Phys, 136: 23–30

Luo Y, Zhang R, Wan Q, Wang B, Wong W K, Hu Z, Jou B J D, Lin Y, Johnson R H, Chang C P, Zhu Y, Zhang X, Wang H, Xia R, Ma J, Zhang D L, Gao M, Zhang Y, Liu X, Chen Y, Huang H, Bao X, Ruan Z, Cui Z, Meng Z, Sun J, Wu M, Wang H, Peng X, Qian W, Zhao K, Xiao Y. 2017. The Southern China Monsoon Rainfall Experiment (SCMREX). Bull Am Meteorol Soc, 98: 999–1013

Miao S, Chen F, Li Q, Fan S. 2011. Impacts of urban processes and urbanization on summer precipitation: A case study of heavy rainfall in Beijing on 1 August 2006. J Appl Meteorol Climatol, 50: 806–825

Pu Y, Jiang R, Qie X, Liu M, Zhang H, Fan Y, Wu X. 2017. Upward negative leaders in positive triggered lightning: Stepping and branching in the initial stage. Geophys Res Lett, 44: 7029–7035

Pu Y, Qie X, Jiang R, Sun Z, Liu M, Zhang H. 2019. Broadband characteristics of chaotic pulse trains associated with sequential dart leaders in a rocket-triggered lightning flash. J Geophys Res-Atmos, 124: 4074–4085

Qi Q, Lu W, Ma Y, Chen L, Zhang Y, Rakov V A. 2016. High-speed video observations of the fine structure of a natural negative stepped leader at close distance. Atmos Res, 178-179: 260–267

Qie X, Pu Y, Jiang R, Sun Z, Liu M, Zhang H, Li X, Lu G, Tian Y. 2017. Bidirectional leader development in a preexisting channel as observed in rocket-triggered lightning flashes. J Geophys Res-Atmos, 122: 586–599

Qie X, Zhang Y. 2019. A review of atmospheric electricity research in China from 2011 to 2018. Adv Atmos Sci, 36: 994–1014

Ribaud J F, Bousquet O, Coquillat S. 2016. Relationships between total lightning activity, microphysics and kinematics during the 24 September 2012 HyMeX bow-echo system. Q J R Meteorol Soc, 142: 298–309

Saunders C P R, 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: 13949–13956

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 Appl Meteorol Climatol, 48: 2543–2563

Shepherd J M. 2005. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future. Earth Interact, 9: 1–27

Srivastava A, Tian Y, Qie X, Wang D, Sun Z, Yuan S, Wang Y, Chen Z, Xu W, Zhang H, Jiang R, Su D. 2017. Performance assessment of Beijing Lightning Network (BLNET) and comparison with other lightning location networks across Beijing. Atmos Res, 197: 76–83

Sun J, Chen M, Wang Y. 2010. A frequent-updating analysis system based on radar, surface, and mesoscale model data for the Beijing 2008 Forecast Demonstration Project. Weather Forecast, 25: 1715–1735

Sun Z, Qie X, Jiang R, Liu M, Wu X, Wang Z, Lu G, Zhang H. 2014. Characteristics of a rocket-triggered lightning flash with large stroke number and the associated leader propagation. J Geophys Res-Atmos, 119: 13388

Tian Y, Qie X, Sun Y, Wang D, Yuan S, Sun Z, Lu G, Yu L, Sun H, Li L, Du C. 2019. Total lightning signatures of thunderstorms and lightning jumps in hailfall nowcasting in the Beijing area. Atmos Res, 230: 104646

Wang F, Zhang Y, Zheng D, Xu L. 2015a. Impact of the vertical velocity field on charging processes and charge separation in a simulated thunderstorm. J Meteorol Res, 29: 328–343

Wang F, Zhang Y, Zheng D. 2015b. Impact of updraft on neutralized charge rate by lightning in thunderstorms: A simulation case study. J Meteorol Res, 29: 997–1010

Wang Y, Qie X, Wang D, Liu M, Su D, Wang Z, Liu D, Wu Z, Sun Z, Tian Y. 2016. Beijing Lightning Network (BLNET) and the observation on preliminary breakdown processes. Atmos Res, 171: 121–132

Wang Y, Yang Y, Liu D, Zhang D, Yao W, Wang C. 2017. A case study of assimilating lightning-proxy relative humidity with WRF-3DVAR. Atmosphere, 8: 55

Wang Y, Yang Y, Wang C. 2014. Improving forecasting of strong convection by assimilating cloud-to-ground lightning data using the physical initialization method. Atmos Res, 150: 31–41

Wang Z, Qie X, Jiang R, Wang C, Lu G, Sun Z, Liu M, Pu Y. 2016. High-speed video observation of stepwise propagation of a natural upward positive leader. J Geophys Res-Atmos, 121: 14307–14315

Wilson J W, Feng Y, Chen M, Roberts R D. 2010. Nowcasting challenges during the Beijing Olympics: Successes, failures, and implications for future nowcasting systems. Weather Forecast, 25: 1691–1714

Wu B, Zhang G, Wen J, Zhang T, Li Y, Wang Y. 2016. Correlation analysis between initial preliminary breakdown process, the characteristic of radiation pulse, and the charge structure on the Qinghai-Tibetan Plateau. J Geophys Res-Atmos, 121: 12,434

Wu F, Cui X, Zhang D L. 2018. A lightning-based nowcast-warning approach for short-duration rainfall events: Development and testing over Beijing during the warm seasons of 2006–2007. Atmos Res, 205: 2–17

Wu F, Cui X, Zhang D L, Qiao L. 2017. The relationship of lightning activity and short-duration rainfall events during warm seasons over the Beijing metropolitan region. Atmos Res, 195: 31–43

Xia R, Zhang D L, Wang B. 2015. A 6-yr cloud-to-ground lightning climatology and its relationship to rainfall over central and eastern China. J Appl Meteorol Climatol, 54: 2443–2460

Xiao X, Sun J, Chen M, Qie X, Wang Y, Ying Z. 2017. The characteristics of weakly forced mountain-to-plain precipitation systems based on radar observations and high-resolution reanalysis. J Geophys Res-Atmos, 122: 3193–3213

Xiao X, Sun J, Chen M, Qie X, Ying Z, Wang Y, Ji L. 2019. Comparison of environmental and mesoscale characteristics of two types of mountain-to-plain precipitation systems in the Beijing region, China. J Geophys Res-Atmos, 124: 6856–6872

Xiao X, Sun J, Qie X, Ying Z, He J. 2018. A new lightning assimilation technique based on 4DVAR. In: AGU Fall Meeting. San Francisco, USA

Xu L T, Zhang Y J, Liu H Y, Zheng D, Wang F. 2016. The role of dynamic transport in the formation of the inverted charge structure in a simulated hailstorm. Sci China Earth Sci, 59: 1414–1426

Xu S, Zheng D, Wang Y, Hu P. 2016. Characteristics of the two active stages of lightning activity in two hailstorms. J Meteorol Res, 30: 265–281

Yang L, Tian F, Smith J A, Hu H. 2014. Urban signatures in the spatial clustering of summer heavy rainfall events over the Beijing metropolitan region. J Geophys Res-Atmos, 119: 1203–1217

Yang P, Ren G, Hou W, Liu W. 2013. Spatial and diurnal characteristics of summer rainfall over Beijing Municipality based on a high-density AWS dataset. Int J Climatol, 33: 2769–2780

Yang X, Sun J. 2018. Organizational modes of severe wind-producing convective systems over North China. Adv Atmos Sci, 35: 540–549

Yang Y, Wang Y, Zhu K. 2015. Assimilation of Chinese doppler radar and lightning data using WRF-GSI: A case study of mesoscale convective system. Adv Meteorol, 2015: 1–17

Yu M, Miao S, Li Q. 2017. Synoptic analysis and urban signatures of a heavy rainfall on 7 August 2015 in Beijing. J Geophys Res-Atmos, 122: 65–78

Yuan S, Jiang R, Qie X, Wang D, Sun Z, Liu M. 2017. Characteristics of upward lightning on the Beijing 325 m meteorology tower and corresponding thunderstorm conditions. J Geophys Res-Atmos, 122: 12,093

Yuan S, Qie X, Jiang R, Wang D, Sun Z, Srivastava A, Williams E. 2020. Origin of an uncommon multiple-stroke positive cloud-to-ground lightning flash with different terminations. J Geophys Res-Atmos, 125: e2019JD032098, doi: 10.1029/2019JD032098

Zhang C, Lu W, Chen L, Qi Q, Ma Y, Yao W, Zhang Y. 2017. Influence of the Canton Tower on the cloud-to-ground lightning in its vicinity. J Geophys Res-Atmos, 122: 5943–5954

Zhang D L. 2020. Rapid urbanization and more extreme rainfall events. Sci Bull, 65: 516–518

Zhang R, Ni Y, Liu L, Luo Y, Wang Y. 2011. South China Heavy Rainfall Experiments (SCHeREX). J Meteorol Soc Jpn, 89A: 153–166

Zhang R, Zhang Y, Xu L, Zheng D, Yao W. 2017. Assimilation of total lightning data using the three-dimensional variational method at convection-allowing resolution. J Meteorol Res, 31: 731–746

Zhang Y, Krehbiel P R, Zhang Y, Lu W, Zheng D, Xu L, Huang Z. 2017. Observations of the initial stage of a rocket-and-wire-triggered lightning discharge. Geophys Res Lett, 44: 4332–4340

Zhang Y, Zhang Y J, Zheng D, Lu W. 2018. Characteristics and discharge processes of M events with large current in triggered lightning. Radio Sci, 53: 974–985

Zhao P, Yin Y, Xiao H. 2015. The effects of aerosol on development of thunderstorm electrification: A numerical study. Atmos Res, 153: 376–391

(责任编委: 张宏昇)