

黎勋, 郅秀书, 刘昆, 等. 2017. 基于高时间分辨率快电场变化资料的北京地区地闪回击统计特征 [J]. 气候与环境研究, 22 (2): 231–241. Li Xun, Qie Xiushu, Liu Kun, et al. 2017. Characteristics of cloud-to-ground lightning return strokes in Beijing based on high temporal resolution data of fast electric field change [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (2): 231–241, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16007.

基于高时间分辨率快电场变化资料的北京地区 地闪回击统计特征

黎勋^{1,2} 郅秀书² 刘昆¹ 王宇² 王东方² 刘明远² 孙竹玲² 张鸿波²

¹ 成都信息工程大学, 成都 610225

² 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 利用 2014 年北京闪电网观测到的 4 站及以上同步高时间分辨率闪电快电场变化资料, 对北京地区 5 次雷暴过程中 304 次正地闪和 1467 次负地闪的回击特征进行了统计分析, 主要包括: 回击次数、10%~90% 上升时间、下降时间、半峰值宽度、回击间隔、回击峰值电场强度、回击间隔和回击序数的关系等。结果表明, 正、负地闪中单回击地闪所占比例分别为 91.1% 和 24.2%, 单次负地闪的平均回击次数为 3.8 次, 观测到的最大回击数可达 20 次。304 次正地闪首次回击的 10%~90% 上升时间、下降时间和半峰值宽度的算术平均值分别为 4.2 μs 、14.5 μs 和 6.2 μs ; 29 次正地闪继后回击对应值分别为 3.6 μs 、12.6 μs 和 5.7 μs ; 1467 次负首次回击的对应值分别为 2.4 μs 、23.9 μs 和 5.3 μs ; 4109 次负继后回击的对应值分别为 1.7 μs 、19.5 μs 和 3.4 μs 。正、负地闪回击间隔的几何平均值分别为 106 ms 和 59 ms。负地闪回击间隔呈对数正态分布, 平均回击间隔随着回击序数的增加有逐渐减小的趋势。最后, 还对 70 次正回击、421 次负首次回击和 789 次负继后回击峰值电场进行了统计, 将其归一化到 100 km 的平均值分别为 11.2 V/m、7.2 V/m 和 5.0 V/m。平均来看, 负地闪首次回击峰值电场比继后回击峰值电场大 1.4 倍, 但是有 23.5% 的继后回击峰值电场大于其对应的首次回击。

关键词 正地闪 负地闪 回击过程 波形特征参数 北京地区

文章编号 1006-9585 (2017) 02-0231-11

中图分类号 P427.32⁺1

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16007

Characteristics of Cloud-to-Ground Lightning Return Strokes in Beijing Based on High Temporal Resolution Data of Fast Electric Field Change

LI Xun^{1,2}, QIE Xiushu², LIU Kun¹, WANG Yu², WANG Dongfang², LIU Mingyuan²,
SUN Zhuling², and ZHANG Hongbo²

¹ Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

² Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Return stroke waveform characteristics of 304 positive cloud-to-ground (CG) flashes and 1467 negative CG flashes observed during five storms in Beijing region were analyzed based on high temporal resolution data of fast electric field change collected by Beijing Lightning Network (BLNET). Characteristic parameters presented in this work are: The number of strokes per flash, 10%–90% risetime, falling time, full width at half maximum (FWHM), interstroke

收稿日期 2016-01-08; 网络预出版日期 2016-05-31

作者简介 黎勋, 女, 1990 年出生, 硕士, 主要从事雷电科学与防护技术研究。E-mail: lixun@mail.iap.ac.cn

通讯作者 刘昆, E-mail: liukun@cuit.edu.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 项目) 2014CB441401, 国家自然科学基金 41305005

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2014CB441401), National Natural Science Foundation of China (Grant 41305005)

interval, peak electric field and the relationship between the interstroke interval and stroke order, etc. The results indicate that the percentages of single stroke in positive and negative CG flashes were 91.1% and 24.2%, respectively. The average number of stroke per flash for negative CG flashes was 3.8 and the max stroke number was 20. The arithmetic means of 10%–90% risetime, falling time, and half-peak width for the 304 first strokes of positive CG flashes were 4.2 μs , 14.5 μs , and 6.2 μs ; the corresponding values for the 29 subsequent strokes of positive CG were 3.6 μs , 12.6 μs , and 5.7 μs ; the corresponding values for the 1467 negative first strokes were 2.4 μs , 23.9 μs , and 5.3 μs , and the corresponding values for the 4109 negative subsequent strokes were 1.7 μs , 19.5 μs , and 3.4 μs , respectively. In addition, interstroke intervals of positive and negative CG flashes showed a more or less log-normal distribution and yielded the geometric mean values of 106 ms and 59 ms. Moreover, the geometric mean interstroke interval for negative CG flashes of particular multiplicity tended to decrease with the stroke order. Finally, peak electric fields of the 70 positive, 421 negative first, and 789 negative subsequent strokes, when normalized to 100 km, were 11.2 V/m, 7.2 V/m, and 5.0 V/m, respectively. On average, peak electric field for the first stroke was 1.4 times larger than its subsequent counter part for negative CG flashes. However, about 23.5% of subsequent return strokes were stronger than the corresponding first stroke.

Keywords Positive CG flashes, Negative CG flashes, Return stroke, Waveform characteristic parameter, Beijing region

1 引言

地闪是雷暴云荷电区域与地面目标物之间的瞬时放电过程。相对于发生在云内不同极性电荷区或不同云体相反极性电荷区之间的云闪而言,由于地闪直接击中地面目标,因此产生的危害最直接,不仅可造成人畜伤亡,还可引起森林、建筑物火灾,油库、化工厂爆炸以及电力和通信中断等重大灾害。回击是地闪过程中最强烈的放电过程,不仅具有大电流、高电压特征,同时也产生强烈的电磁辐射,地闪回击过程还严重干扰电子和微电子设备的正常工作,甚至造成设备的严重损坏,因此地闪的回击特征一直是雷电研究的重要对象。

由于地域和雷暴种类的差异,不同地区的地闪回击波形特征可能存在差别。多年来,国内外研究者利用不同探测手段分别在不同地区对地闪回击波形特征进行了观测研究。Tiller et al. (1976) 利用电场测量系统对 Florida 地区 16 次小型对流雷暴进行了观测,对其地闪回击特征进行了统计分析,得出其中两次雷暴首次和继后回击的上升时间分别为 3.7 μs 、2.5 μs 和 2.7 μs 、2.1 μs , 首次回击归一化到 100 km 的初始峰值电场平均值为 9.9 V/m, 其对应的继后回击的值为 5.7 V/m。郅秀书和郭昌明 (1990) 利用闪电定位系统(Lightning Location System, LLS)在兰州地区和北京地区探测到的地闪资料,对这两地区的地闪波形进行了对比分析,发现兰州地区和北京地区的正地闪回击电场峰值一样,均为 14.8 V/m, 而兰州地区的负地闪回击电场

峰值比北京地区大,分别为 6.5 V/m 和 5.2 V/m。郅秀书等 (2001) 还发现兰州地区继后回击与首次回击强度比约为 0.70, 但是 54% 的负地闪中至少有一次继后回击强度大于首次回击,而且约 20% 的继后回击强度大于其对应的首次回击。张其林和郅秀书 (2003)、张其林等 (2003) 对甘肃平凉地区的地闪回击辐射场特征进行了分析,观测得到不同距离范围内的回击峰值电场,15~50 km 范围内的平均峰值电场为 13.6 V/m, 50~100 km 内的平均值为 9.8 V/m, 100~150 km 内的平均值为 6.6 V/m, 发现回击初始峰值电场随距离的变化比较大。Saba et al. (2006, 2010) 利用高速摄像机拍摄到的光学资料对巴西地区正、负地闪的回击特征进行了统计分析,发现 233 次负地闪中,单回击占 20%, 单次闪电的平均回击次数为 3.8 次。39 次正地闪中,单回击占 72%。正、负地闪回击间隔的几何平均值分别为 117 ms 和 61 ms, 正地闪的回击间隔约为负地闪的 2 倍。最近, Zhu et al. (2015) 对安徽地区一次局地雷暴的 1085 次负地闪回击特征进行了分析,发现单回击比例为 30.5%, 平均回击次数为 3.3 次; 2525 个回击间隔表现出近似对数正态分布,其几何平均值为 62 ms; 753 次多回击负地闪,有 41.4% 的负地闪至少一次继后回击强度大于对应的首次回击,继后回击与首次回击电场强度比为 0.52。

北京地区地处华北平原北部,西、东、北三面群山环绕,属温带大陆性季风气候,年平均雷暴日为 36.3 d, 是雷电的多发区。由于北京地区地理位置、气候条件特殊,其闪电活动也可能存在特殊性;另外,近年来城市化发展导致的城市热岛效应、城市气溶胶和城市高建筑物等可能影响

本地区雷暴活动。北京是全国经济文化中心, 人口密集, 雷电一旦造成灾害, 可能造成较大的经济损失和社会影响。因此对北京地区的地闪特征, 特别是地闪的回击特征进行研究不仅对了解这一地区的闪电物理特征和机制有重要的科学意义, 同时对京津冀大城市群区域的雷电防护也有重要的实际参考价值。

为了对北京地区的雷电特征进行监测和研究, 中国科学院大气物理研究所(简称大气所)与北京市气象局合作, 在北京建立了一个可以同时地对地闪和云闪进行探测和定位的北京闪电网(Beijing Lightning NETwork, BLNET), 并不断升级改进。目前 BLNET 实现了对全闪辐射脉冲的二维定位和部分三维定位(Wang et al., 2016), 并可以对地闪回击中和的电荷源进行反演(武智君等, 2016)。本文利用 2014 年 BLNET 观测到的高时间分辨率(0.2 μs)闪电快电场变化资料, 对 5 次雷暴过程中的 1771 次地闪, 包括 1467 次负地闪和 304 次正地闪的回击波形特征进行统计分析。如此高时间分辨率和大样本的研究, 可以更好地反映北京地区地闪回击波形的统计特征, 同时, 回击波形特征参数的统计结果也可以为闪电定位系统中回击波形的自动识别提供基础数据, 提高地闪的识别准确率。

2 试验与方法

本文资料来源于 2014 年北京闪电网(BLNET)的观测资料。2014 年, BLNET 共建有 15 个观测子站, 整个 BLNET 探测的东西方向跨度约为 100 km, 南北方向跨度约 85 km, 覆盖了北京大部分的区域。中心测站为大气所站, 位于北京市中国科学院大气物理研究所 40 号楼楼顶。每个测站共有闪电快电场变化探测仪(快天线)、慢电场变化探测仪(慢天线)和 VHF 探测仪 3 套传感器, 15 个测站之间均采用高精度 GPS 时钟进行时间同步, 授时精度为 50 ns。本文主要利用快天线资料进行分析, 其探测频段为 1.5 kHz~2 MHz, 时间常数为 0.1 ms, 采样率为 5 MS/s, 记录时长为 1 s, 预触发百分比为 20%。对于北京闪电探测网的详细介绍请参考文献(王宇等, 2015)。

本文选择 2014 年经过 BLNET 上空的 5 次代表性雷暴过程的闪电资料进行研究。这 5 次雷暴分别为 6 月 13 日、7 月 30 日、8 月 3 日、8 月 28 日、9 月 19 日, 其中 6 月 13 日和 8 月 28 日为中尺度对流系

统, 均为飑线过程, 其他为普通雷暴。所选择的 1771 次地闪个例均具有 4 个及以上测站的同步观测资料。

图 1 为一次典型的负地闪回击快电场波形, 图中采用了大气电学符号定义, 即云中向地面输送负电荷(云中负电荷减少)引起的电场变化的方向为正方向。如图 1 所示, 回击的快电场波形在微秒和亚微秒时间分辨率上通常具有典型的特征(Weidman and Krider, 1978, 1980), 即较大的幅值和快速变化的上升沿等, 这是本文识别地闪并进行分析的基础。下面以该回击波形为例, 介绍本文分析的波形特征参数的含义。通过图 1 中所标注的波形幅度和基准位置, 对波形的参数定义如下:

(1) 回击电场初始峰值 E_{max} :

$$E_{\text{max}} = E_{\text{Pmax}} - E_{\text{baseline}}, \quad (1)$$

其中, E_{max} 为回击峰值点与基准线之间的电场差值, P_{max} 为回击峰值点, E_{Pmax} 为回击峰值点处的电场值, baseline 为基准线, E_{baseline} 为回击波形的参考电场值。

(2) 10%~90% 上升时间 t_r :

$$t_r = T_{c1} - T_{a1}, \quad (2)$$

其中, t_r 为脉冲上升沿 10% 幅度位置 $a1$ 点到 90% 幅度位置 $c1$ 点之间的时间差, T_{c1} 为波形上 $c1$ 点对应的时刻, T_{a1} 为波形上 $a1$ 点对应的时刻。

(3) 下降时间 t_f :

$$t_f = T_{d2} - T_{P_{\text{max}}}, \quad (3)$$

其中, t_f 为脉冲峰值点 P_{max} 到下降沿与基准线相交的第一个零点 $d2$ 之间的时间差, T_{d2} 为波形上 $d2$ 点对应的时刻, $T_{P_{\text{max}}}$ 为波形上峰值点 P_{max} 对应的时刻。

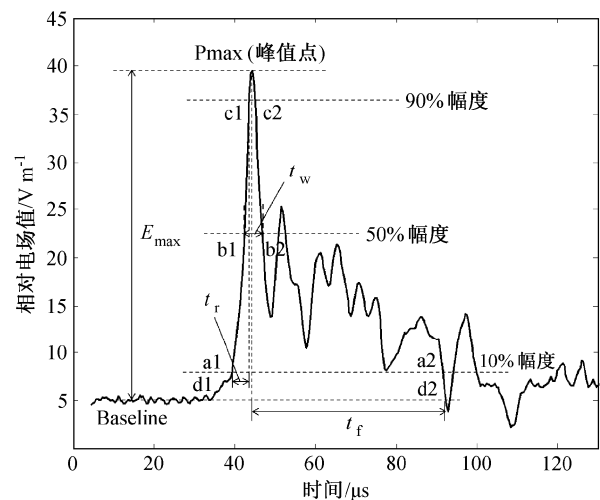


图 1 快电场波形特征参数的定义

Fig. 1 Definition of characteristic parameters of fast electric field waveform

(4) 半峰值宽度 t_w :

$$t_w = T_{b2} - T_{b1}, \quad (4)$$

其中, t_w 为脉冲上升沿 50% 幅度位置 b_1 点到下降沿 50% 位置 b_2 点之间的时间差, T_{b2} 为波形上 b_2 点对应的时刻, T_{b1} 为波形上 b_1 点对应的时刻。

(5) 回击间隔: 为一次地闪中继后回击峰值与前一次回击峰值间的时间差。

由于北京地区地闪主要集中在 6~9 月 (张阳等, 2010), 在每个月中选取至少一次雷暴, 对于统计和分析北京地区 2014 年雷暴的特性更具代表性, 而且本文选取的 5 次雷暴过程均有较好的地闪定位结果, 因此可以对不同距离范围内的回击特征进行分析。本文的资料样本量大、采样率高, 所得出的结论具有较好的统计特征和代表性。

3 统计结果

BLNET 对上述 5 次雷暴过程共定位 1771 次地闪, 其中正地闪 304 次, 负地闪 1467 次, 负地闪数远大于正地闪数, 其比例约为 4.8:1, 这与陈成品等 (1999) 对北京和中川地区的研究结论一致, 但郗秀书等 (1998a) 统计得出北京地区的正负地闪比例略高于中川地区。

表 1 列出了这 5 次雷暴中正地闪的比例。从表中可以看出, 每次雷暴中正地闪的比例存在差异, 分布范围为 10.1%~33.6%, 处于典型的美国夏季雷暴的 6.6% 和日本冬季雷暴的 41% 之间 (郗秀书等, 2001)。不同地区雷暴的正地闪发生比例可能会有很大变化, 即使同一地区的不同雷暴之间正地闪的比例也有可能不同, 其发生比例与雷暴云内的电荷分布特征、地形特征等都有关系, 因此针对不同雷暴特征或类型的详细研究是必要的。由于正地闪的发生比例和产生机制不是本文的主要内容, 这里不做更深入的探讨。下面利用这些个例资料对回击特

征进行详细研究, 包括回击次数、10%~90% 上升时间、下降时间、半峰值宽度、回击间隔和回击峰值电场强度等。

3.1 回击次数

考虑到有些回击可能会有多个接地点 (Kong et al., 2009), 若有多接地点的回击可能会增大平均回击数, 为了统计每次地闪的回击数, 所以本文所有的统计结果均只选取了一个接地点的回击。图 2a、2b 分别为正、负地闪的回击次数分布图。从图中可以看出, 正、负地闪的样本数随回击序数的增加而逐渐减小, 其中单次回击的样本数最多。

观测到的一次负地闪过程中回击数可多达 20 次, 负地闪的平均回击次数为 3.8 次。负地闪单回击占负地闪总数的比例为 24.2%, 回击次数在 10 次以上的负地闪只占 6.1%, 比合肥地区 (祝宝友等, 2002) 的比例略大。一次正地闪过程中回击数最多次, 正地闪单回击占正地闪总数的比例为 91.1%。单回击地闪占总地闪的 35.7%。

表 2 为国内外不同地区正、负地闪回击次数和单回击比例的结果对比。从表 2 可以看出, 北京地区的负地闪回击次数平均值比 Heidler and Hopf (1998) 的观测结果大, 比 Rakov and Uman (1990)、Zhu et al. (2014) 的观测结果小, 与 Cooray and Pérez (1994)、郗秀书等 (2001)、Saba et al. (2006) 和 Zhu et al. (2015) 的观测结果基本一致, 说明北京地区与瑞典乌普萨拉地区、中国内陆高原地区和安徽地区的负地闪回击特征具有一定的相似性。而北京地区正地闪单回击比例与兰州、那曲、大兴安岭地区的结果比较接近。

3.2 10%~90% 上升时间

正、负地闪回击电场波形 10%~90% 上升时间的统计直方图如图 3 所示。从图上可以看出, 正、负地闪的上升时间均服从对数正态分布。304 次正首次回击的 10%~90% 上升时间为 0.4~11.1 μs , 算术平均值和几何平均值分别为 4.2 μs 、3.6 μs (方差为 2.1 μs , 下同), 比日本地区 (Hojo et al., 1985)、瑞典地区 (Cooray, 1986)、大兴安岭地区 (房广洋等, 2012) 和巴西地区 (Schumann et al., 2013) 的观测结果略小, 可能与这些地区的样本数较少有关, 同时也说明了本文大样本分析的必要性。1467 次负首次回击的 10%~90% 上升时间为 0.3~12.5 μs , 算术平均值和几何平均值分别为 2.4 μs 、2.2 μs (1.2 μs); 4109 次负继后回击的 10%~90% 上升时

表 1 5 次雷暴中正地闪的比例

Table 1 Ratios of positive cloud-to-ground (CG) to total flashes in five thunderstorms

雷暴时间	地闪数	正地闪比例
2014-06-13	408	33.6%
2014-07-30	218	12.8%
2014-08-03	114	30.7%
2014-08-28	963	10.1%
2014-09-19	68	10.3%

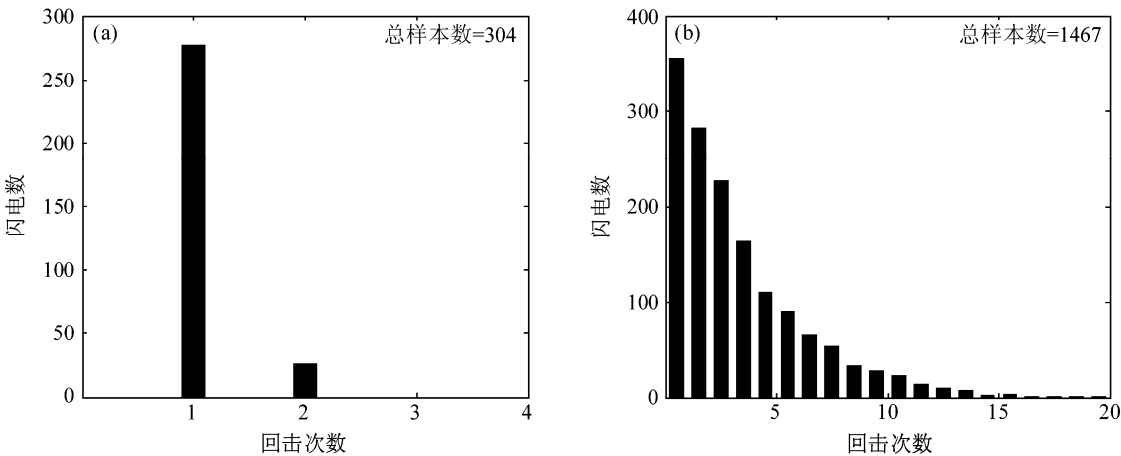


图2 (a) 正地闪、(b) 负地闪回击次数分布
Fig. 2 Stroke multiplication distribution of CG lightning: (a) Positive CG flashes; (b) negative CG flashes

表 2 不同地区正、负地闪回击次数的结果对比

Table 2 Multiplicity for positive and negative CG flashes in different regions

	地区	样本数	单回击比例	最大回击数	平均回击次数	来源
负地闪	美国佛罗里达	76	17%	18	4.6	Rakov and Uman (1990)
	瑞典	137	18%	10	3.4	Cooray and Pérez (1994)
	德国	81	—	—	2.4	Heidler and Hopf (1998)
	中国内陆高原	50	39.80%	14	3.76	郗秀书等 (2001)
	巴西	233	20%	16	3.8	Saba et al. (2006)
	中国广州	570	28%	14	—	张义军等 (2013)
	美国佛罗里达	220	30.50%	16	4.5	Zhu et al. (2014)
	中国合肥	1085	24.30%	17	3.3	Zhu et al. (2015)
	中国北京	1467	24.20%	20	3.8	本文
正地闪	中国兰州	112	90.30%	2	—	郗秀书和郭昌明 (1990)
	中国北京	179	82.90%	5	—	
	德国	45	73.30%	4	—	Heidler and Hopf (1998)
	中国那曲	45	91%	4	—	赵阳等 (2004)
	巴西	39	72%	3	1.33	Saba et al. (2010)
	中国大兴安岭	185	94.60%	3	1.1	Qie et al. (2013)
	中国北京	304	91.10%	4	1.1	本文

间为 0.2~13.8 μs ,算术平均值和几何平均值分别为 1.7 μs 、1.5 μs (1.0 μs),与美国佛罗里达地区 (Master et al.,1984) 和大兴安岭地区 (房广洋等, 2012) 的观测结果比较一致, 而与日本地区 (Hojo et al., 1985)的结果有差别,可能与日本冬季雷暴特殊的电荷结构和闪电特征有关;受其影响,正地闪中和的电荷量比其他地区的都大。

对比正、负地闪结果可以发现,平均而言,首次回击的 10%~90%上升时间比继后回击的大,郗秀书等 (1998b) 认为主要原因是继后回击后通道的电离状况比首次回击好,而且继后回击通道的分叉较少,使得回击电流在通道中的传播速度快,从而导致了较快的电场变化上升沿时间。另外,对比

正、负地闪首次回击的 10%~90%上升时间,发现正地闪的 10%~90%上升时间是负地闪的近两倍,这与郗秀书等 (1998b) 的研究结论一致,可能与慢前沿过程和下行先导的电荷累积有关。

3.3 下降时间

图 4 所示为正、负地闪回击初始峰值下降时间的分布直方图。从图中可以看出,下降时间相对于上升时间分布要广得多,负地闪下降时间 98.7%都集中在 0.3~100 μs 之间,故图中仅给出了 100 μs 以下的下降时间分布。正地闪首次回击和继后回击下降时间的算术平均值为 14.5 μs (11.0 μs) 和 12.6 μs (6.1 μs);负地闪的首次回击和继后回击下降时间的算术平均值为 23.9 μs 和 19.5 μs 。此结果比广

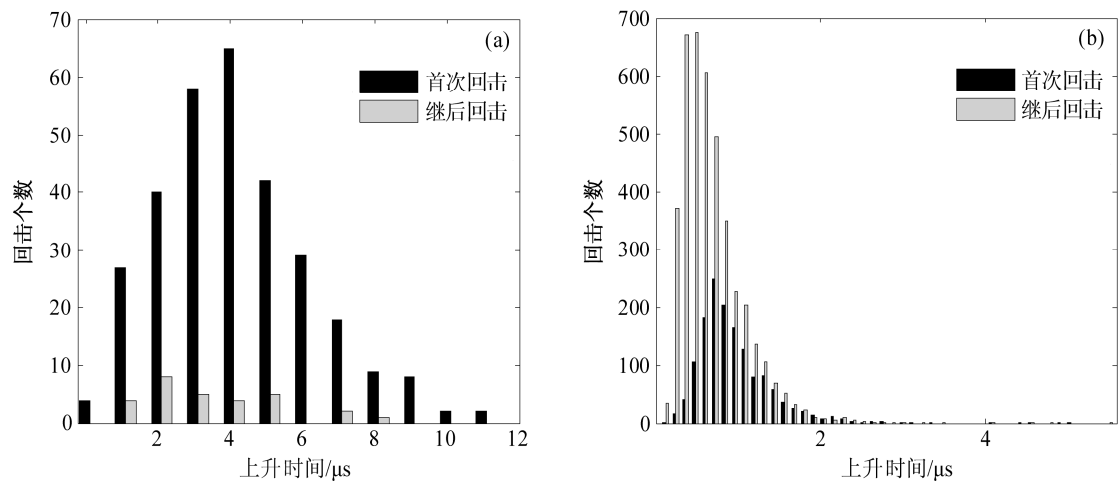


图3 (a) 正地闪、(b) 负地闪 10%~90% 上升时间分布

Fig. 3 Distribution of 10%~90% risetime for return stroke waveform: (a) Positive CG flashes; (b) negative CG flashes

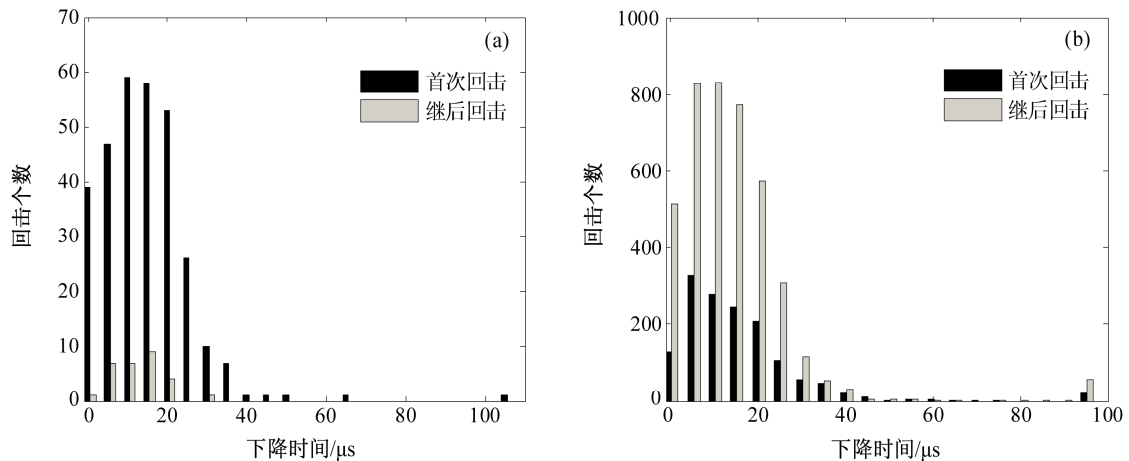


图4 (a) 正地闪、(b) 负地闪下降时间分布

Fig. 4 Falling time distribution of return stroke waveform: (a) Positive CG flashes; (b) negative CG flashes

东从化地区的观测结果小的多(刘恒毅等, 2009), 可见广东从化地区的放电时间比北京地区更长。从统计图还可以发现, 负地闪回击波形的下降时间平均比正地闪的下降时间大, 首次回击的下降时间比继后回击的下降时间大, 造成差别的原因可能与回击放电通道的电导性等因素有关, 值得进一步研究。

3.4 半峰值宽度

对于远区辐射场而言, 半峰值宽度基本可以作为衡量放电时间长短的一个参量, 并且是一个比较容易准确确定的参量, 因此本文对远区辐射场的半峰值宽度也进行了统计。将统计的正、负地闪的回击半峰值宽度结果列于表3中。从表中可以看出, 正地闪首次回击的半峰值宽度大于负地闪首次回

击的半峰值宽度, 算术平均值分别为 $6.2 \mu\text{s}$ 和 $5.3 \mu\text{s}$, 这从一定程度上说明正地闪具有更长的对地放电时间, 对地面物体造成的危害可能较负地闪更大。就负地闪来说, 首次回击的半峰值宽度比继后回击的大, 平均值分别为 $5.3 \mu\text{s}$ 和 $3.4 \mu\text{s}$ 。这些结果比大兴安岭地区(房广洋等, 2012)的结果小得多, 大约为其 $1/2$, 说明北京地区回击放电时间比大兴安岭地区更短。北京地处低海拔地区, 而大兴安岭处于高海拔地区, 山脉居多, 地形地貌比较复杂, 电荷区离地面的距离更近, 这两个地区半峰值宽度存在差异不仅跟地域地形有关, 而且还跟雷暴种类、放电通道特征等有关。

3.5 回击间隔

由于正地闪本身数量少, 多回击正地闪就更

少，导致对其回击间隔的研究较少。本文中，由于具有较大的样本数，可以得到正地闪的回击间隔的统计结果（如图 5a 所示）。北京地区正地闪回击间隔的算术平均值和几何平均值分别为 160 ms 和 106 ms（162 ms），最小和最大的回击间隔为 17 ms 和 787 ms。图 5b 给出了 1112 次多回击负地闪过程所包含的 4109 次继后回击与前一次回击之间的时间间隔分布直方图，服从对数正态分布，其算术平均值、几何平均值分别为 88 ms、59 ms（99 ms），最小值为 0.4 ms，最大值为 792 ms。仅有 2.6%的回击间隔在 10 ms 以下，有 43.6%的回击间隔落在 40~100 ms 之间，约 24.9%的回击间隔大于 100 ms。回击间隔较短，通道保持一定程度的导电性，云内很

容易产生向下传播的直窜先导并引发回击放电，不利于云内电荷大量积累。而长回击间隔更容易产生梯级（或直窜）先导并引发强回击放电（祝宝友等，2002）。下一步研究可以针对回击间隔与前后回击相对强弱之间的关系作讨论，从而进一步揭示地闪回击通道内的放电物理特性。

为了便于比较，本文将国内外对正、负地闪回击间隔的统计结果列于表 4 中。从表 4 中可以发现，本文正地闪的结果比 Cooray and Pérez (1994)、Heidler and Hopf (1998) 的观测结果大，比 Saba et al. (2010) 的观测结果小，而负地闪的结果与 Heidler and Hopf (1998)、Saba et al. (2006)、Zhu et al. (2014, 2015) 的观测结果都十分一致，但是比 Cooray and

表 3 正、负地闪回击半峰值宽度
Table 3 Full width at half maximum (FWHM) for strokes in positive and negative CG flashes

回击类型	样本数		算术平均值/ μ s		几何平均值/ μ s		方差/ μ s		最小值/ μ s		最大值/ μ s	
	正地闪	负地闪	正地闪	负地闪	正地闪	负地闪	正地闪	负地闪	正地闪	负地闪	正地闪	负地闪
首次回击	304	1467	6.2	5.3	4.8	3.7	4.4	20.3	0.8	0.6	23.1	585
继后回击	29	4109	5.7	3.4	4.5	2.8	4.2	3.2	1.4	0.2	16.6	135

表 4 不同地区正、负地闪回击间隔的对比
Table 4 Interstroke intervals of positive and negative CG flashes in different regions

	地区	样本数	算术平均值/ms	几何平均值/ms	方差/ms	最小值/ms	最大值/ms	来源
负地闪	瑞典	568	65	48	—	2.5	376	Coorayand Pérez（1994）
	德国	414	87	60	96	—	—	Heidlerand Hopf（1998）
	中国内陆高原	238	64.3	46.6	—	4.8	328.5	鄯秀书等（2001）
	巴西	608	83	61	—	2	782	Saba et al.（2006）
	美国佛罗里达	780	80	53	—	0.1	552	Zhu et al.（2014）
	中国合肥	2525	80	62	—	—	—	Zhu et al.（2015）
	中国北京	4109	88	59	99	0.4	792	本文
正地闪	瑞典	29	92	64	—	68	290	Cooray and Pérez（1994）
	德国	16	120	101	97	—	—	Heidler and Hopf（1998）
	巴西	13	168	117	131	20	406	Saba et al.（2010）
	中国北京	29	160	106	162	17	787	本文

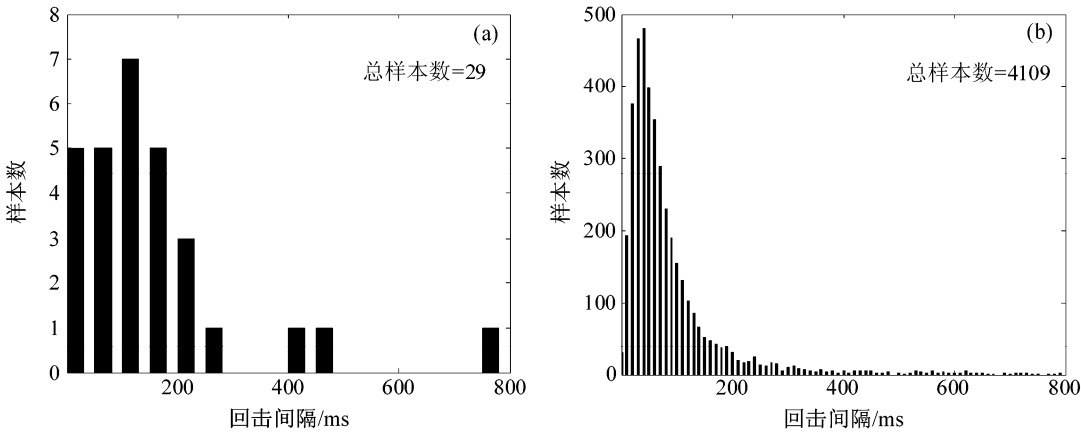


图 5 （a）正地闪、（b）负地闪回击间隔分布
Fig. 5 Interstroke interval distribution: (a) Positive CG flashes; (b) negative CG flashes

Pérez (1994) 和鄧秀书等 (2001) 的观测结果大。本文还发现所有地区正地闪的回击间隔比负地闪的回击间隔大得多, 约为两倍左右, 这是因为正地闪单回击占绝大多数, 而且很多都有长连续电流。

随回击序数变化的负地闪平均回击间隔如图 6 所示, 由于大于 9 次回击的回击间隔个例只占 6.2%, 所以本文只选取了 2~9 次回击的样本。从图上可以看出, 负地闪平均回击间隔随回击序数的增大呈减小的趋势, 回击间隔从 68.1 ms (回击序数=2) 下降到 41.5 ms (回击序数=9), 与 Schulz et al. (2005) 和 Zhu et al. (2015) 的结果一致。回击间隔对回击次数起着决定性的作用, 因为首次回击过后, 通道的导电性比首次回击之前的好, 在较短的时间内便可产生较多的继后回击 (Schulz et al., 2005; 张伟伟等, 2011; Zhu et al., 2015)。

3.6 初始峰值电场强度

初始峰值电场强度表征回击辐射强度, 不仅反映该地区雷暴放电的剧烈程度, 还与回击通道中的放电电流有关, 是雷电防护工程中必须考虑的重要参量之一。对于回击辐射场而言, 回击初始峰值电场强度随着距离的增加而减小。在已知距离的情况下, 将不同回击的初始峰值电场强度归一化到 100 km, 可以定量比较不同距离上的闪电强度。但是由于 BLNET 测站所处的环境不同, 如有的测站位于楼顶, 有的位于地面。为定量获得回击的峰值电场强度, 本文仅选取不受环境影响的测站进行分析, 同时为尽量减少地表对电磁波传播的影响 (Zhang et al., 2012), 本文选取的是 10~150 km 内的数据, 其中包括 70 次正首次回击、421 次负首次回击和 789 次负继后回击, 正、负地闪的回击初始峰值电

场归一化到 100 km 的统计分布如图 7 所示, 正地闪回击初始峰值电场的算术平均值为 11.2 V/m (5.0 V/m), 负地闪首次回击和继后回击峰值电场的算术平均值分别为 7.2 V/m (4.1 V/m) 和 5.0 V/m (3.4 V/m)。可以发现, 正地闪的回击峰值电场比负地闪的回击峰值电场大, 而负地闪的首次回击峰值电场比继后回击峰值电场大 1.4 倍, 与美国佛罗里达地区的结果一致 (Rakov and Uman, 1990; Nag et al., 2008), 但部分继后回击强度大于首次回击, 所占比例约为 23.5%。

表 5 为不同地区正、负地闪归一化到 100 km 的回击初始峰值电场大小对比, 从表中可以看出, 对于正地闪来说, 本文的结果比其他地区的结果小, 而对负地闪, 本文结果介于 Tiller et al. (1976) 和 Lin et al. (1979) 的结果之间。不同地区正、负地闪回击峰值电场的差别可能反映了雷暴云中的电荷分布、距离地面高度的不同, 需要结合闪电辐射

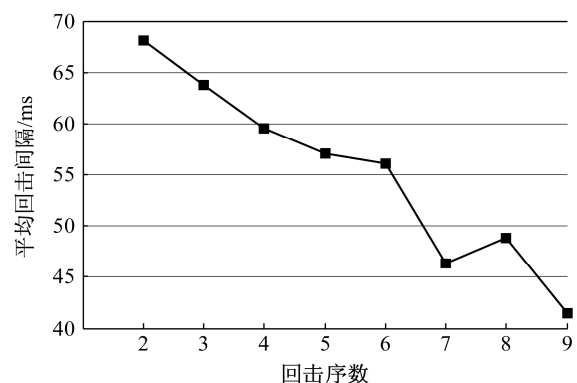


图 6 随回击序数变化的负地闪平均回击间隔

Fig. 6 Stroke order versus geometric mean interstroke intervals for negative CG flashes

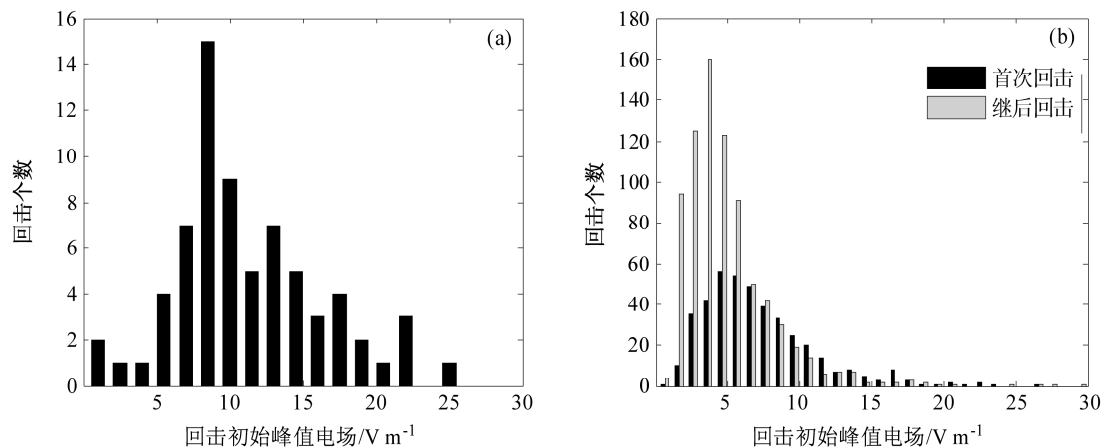


图 7 (a) 正地闪、(b) 负地闪归一化到 100 km 的回击初始峰值电场分布

Fig. 7 Distribution of the peak electric field normalized to 100 km: (a) Positive CG flashes; (b) negative CG flashes

表 5 不同地区正、负地闪归一化到 100 km 的回击初始峰值电场大小对比
Table 5 The peak electric fields of positive and negative CG flashes normalized to 100 km in different regions

			算术平均值/ V m ⁻¹		几何平均值/ V m ⁻¹		方差/V m ⁻¹		来源		
地区		样本数									
正地闪	中国兰州	—	14.8		—		—		鄢秀书和郭昌明（1990）		
	丹麦	46	15.7		—		6.7		Cooray et al.（2004）		
	中国北京	117	13.7		—		8.7		张阳等（2010）		
	巴西	66	17.0		13.4		12.3		Schumann et al.（2013）		
	中国北京	70	11.2		9.9		5.0		本文		
			首次回击			继后回击					
		算术平均值/ V m ⁻¹		几何平均值/ V m ⁻¹		算术平均值/ V m ⁻¹		几何平均值/ V m ⁻¹		方差/ V m ⁻¹	
地区		样本数	V m ⁻¹	V m ⁻¹	方差/V m ⁻¹	样本数	V m ⁻¹	V m ⁻¹	V m ⁻¹	来源	
负地闪	美国佛罗里达	75	9.9	—	6.8	163	5.7	—	4.5	Tiller et al.（1976）	
	美国恩斯维尔	51	6.7	—	3.8	83	5.0	—	2.2	Lin et al.（1979）	
	美国奥卡拉	29	5.8	—	2.5	59	4.3	—	1.5		
	美国佛罗里达	112	6.2	—	3.4	237	3.9	—	2.2	Master et al.（1984）	
	中国北京	421	7.2	6.2	4.1	789	5.0	4.2	3.4	本文	

源三维定位进行研究。

负地闪回击归一化到 100 km 平均初始峰值电场随回击序数的变化 (如图 8 所示), 从图上可以看出, 验证了首次回击峰值电场普遍比继后回击的大, 回击序数越大的电场值越不具代表性, 因为样本数逐渐减少, 序数为 12 的回击仅 3 次, 与美国佛罗里达地区的结果一致 (Rakov and Uman, 1990; Nag et al., 2008), 可能是由于越大序数的回击样本数越少导致的。

4 结论和讨论

本文通过 2014 年北京闪电网 (BLNET) 采集到的北京地区 5 次雷暴过程中的高时间分辨率快电场闪电资料, 对 1771 次地闪 (其中正地闪 304 次, 负地闪 1467 次) 的回击波形特征进行了统计分析。主要结论如下:

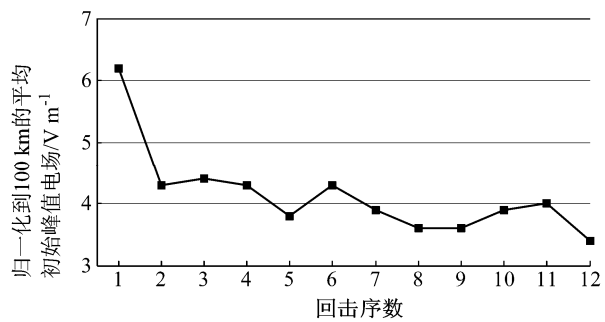


图 8 随回击序数变化归一化到 100 km 的平均初始峰值电场
Fig. 8 The geometric mean of initial stroke peak electric field normalized to 100 km for different stroke orders

(1) 5 次雷暴过程中正地闪的比例分布范围为 10.1%~33.6%。

(2) 单回击正地闪占 91.1%, 单回击负地闪占 24.2%。观测到的一次负地闪最大回击次数可达 20 次, 平均回击次数为 3.8 次, 回击次数在 10 次以上的负地闪只占 6.1%。负地闪平均回击间隔随回击序数的增大呈减小的趋势, 仅有 2.6% 的回击间隔在 10 ms 以下, 有 43.6% 的回击间隔落在 40~100 ms 之间, 约 24.9% 的回击间隔大于 100 ms。

(3) 正地闪首次回击波形 10%~90% 上升时间的算术平均值为 4.2 μs; 负地闪首次回击和继后回击 10%~90% 上升时间的对应值分别为 2.4 μs 和 1.7 μs。负地闪首次回击的上升时间比继后回击的上升时间大, 而正地闪首次回击上升时间又比负地闪首次回击的上升时间大, 正地闪是负地闪的近两倍。

(4) 正地闪首次回击下降时间的算术平均值为 14.5 μs, 半峰值宽度的对应值为 6.2 μs; 负地闪首次回击和继后回击下降时间的算术平均值分别为 23.9 μs 和 19.5 μs, 半峰值宽度的对应值分别为 5.3 μs 和 3.4 μs。这两个参数结果都明显比刘恒毅等 (2009) 和房广洋等 (2012) 的结果都小, 说明不同地区不同雷暴的回击特征存在一定的差异性。正、负地闪回击间隔的几何平均值分别为 106 ms 和 59 ms, 和 Saba et al. (2006, 2010) 的结果最接近, 正地闪的回击间隔约为负地闪的两倍。

(5) 正地闪回击初始峰值电场归一化到 100 km 的算术平均值为 11.2 V/m, 而负地闪首次回击和继

后回击归一化到 100 km 的初始峰值电场分别为 7.2 V/m 和 5.0 V/m。负地闪首次回击峰值电场平均比继后回击峰值电场大 1.4 倍, 但部分继后回击强度大于首次回击, 所占比例约为 23.5%。正地闪的平均峰值电场明显比负地闪的大, 表明正地闪对地面物体的损害要比负地闪大, 所以更应该加强对正地闪的防护。

本文利用较大的样本量, 对北京地区的地闪回击特征进行了统计分析, 明确了与国内外其他地区的异同, 同时, 也为北京闪电网的回击波形自动识别提供了基础数据, 有助于提高地闪识别的准确率。从实际应用的角度, 本文结果还可以为当地的防雷减灾工作提供重要参考数据。但是本文的研究也发现有些问题需要进一步研究, 特别是需要结合辐射源三维定位以及回击中和电荷源反演等对雷暴云内电荷结构的深入研究, 比如不同雷暴云中正地闪比例的差异, 正地闪产生的原因, 以及正、负地闪强度差异和波形特征差异的原因等。已有研究表明, 正地闪对地放电过程中, 中和的电荷量较大, 而且常常带有较长持续时间的连续电流, 所以比负地闪对地面物体的损害更大, 需要更多的关注。BLNET 由于可以实现对闪电辐射源定位 (Wang et al., 2016) 和中和电荷源的反演 (武智君等, 2016), 为这些问题的进一步研究提供了条件, 将在今后的工作中不断深入开展。

参考文献 (References)

- 陈成品, 鄧秀书, 张广庶, 等. 1999. 地闪参量特征的统计分析 [J]. 中国电机工程学报, 19 (3): 50–54. Chen Chengpin, Qie Xiushu, Zhang Guangshu, et al. 1999. Statistical analysis of lightning ground flash characteristics [J]. Proceedings of the CSEE (in Chinese), 19 (3): 50–54, doi: 10.3321/j.issn:0258-8013.1999.03.012.
- Cooray V. 1986. A novel method to identify the radiation fields produced by positive return strokes and their submicrosecond structure [J]. J. Geophys. Res., 91(D7): 7907–7912, doi: 10.1029/JD091iD07p07907.
- Cooray V, Pérez H. 1994. Some features of lightning flashes observed in Sweden [J]. J. Geophys. Res., 99 (D5): 10683–10688, doi: 10.1029/93JD02366.
- Cooray V, Fernando M, Gomes C, et al. 2004. The fine structure of positive lightning return-stroke radiation fields [J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 46 (1): 87–95, doi: 10.1109/TEMC.2004.823615.
- 房广洋, 王东方, 曹冬杰, 等. 2012. 大兴安岭地区地闪回击辐射场特征 [J]. 气象科技, 40 (4): 656–660. Fang Guangyang, Wang Dongfang, Cao Dongjie, et al. 2012. Radiation field characteristics of lightning return strokes in Daxing'an Mountain range [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 40 (4): 656–660, doi: 10.3969/j.issn.1671-6345.2012.04.025.
- Heidler F, Hopf C. 1998. Measurement results of the electric fields in cloud-to-ground lightning in nearby Munich, Germany [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 40 (4): 436–443, doi: 10.1109/15.736204.
- Hojo J, Ishii M, Kawamura T, et al. 1985. The fine structure in the field change produced by positive ground strokes [J]. J. Geophys. Res., 90 (D4): 6139–6143, doi: 10.1029/JD090iD04p06139.
- Kong X Z, Qie X S, Zhao Y, et al. 2009. Characteristics of negative lightning flashes presenting multiple-ground terminations on a millisecond-scale [J]. Atmospheric Research, 91 (2–4): 381–386, doi: 10.1016/j.atmosres.2008.03.025.
- Lin Y T, Uman M A, Tiller J A, et al. 1979. Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurements [J]. J. Geophys. Res., 84 (C10): 6307–6314, doi: 10.1029/JC084iC10p06307.
- 刘恒毅, 董万胜, 王涛, 等. 2009. 闪电电场变化波形时域特征分析及放电类型识别 [J]. 气象, 35 (3): 49–59. Liu Hengyi, Dong Wansheng, Wang Tao, et al. 2009. A time-domain analysis on waveform change of lightning electric field and identification of discharge types [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 35 (3): 49–59.
- Master M J, Uman M A, Beasley W, et al. 1984. Lightning induced voltages on power lines: Experiment [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-103 (9): 2519–2529, doi: 10.1109/TPAS.1984.318406.
- Nag A, Rakov V A, Schulz W, et al. 2008. First versus subsequent return-stroke current and field peaks in negative cloud-to-ground lightning discharges [J]. J. Geophys. Res., 113 (D19), doi: 10.1029/2007JD009729.
- 鄧秀书, 郭昌明. 1990. 北京与兰州地区的地闪特征 [J]. 高原气象, 9 (4): 388–394. Qie Xiushu, Guo Changming. 1990. The characteristics of ground flashes in Beijing and Lanzhou regions [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 9 (4): 388–394.
- 鄧秀书, 刘欣生, 张广庶, 等. 1998a. 甘肃中川地区雷暴的地闪特征 [J]. 气象学报, 56 (3): 312–322. Qie Xiushu, Liu Xinsheng, Zhang Guangshu, et al. 1998a. Characteristics of lightning discharge to ground in Zhongchuan area [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 56 (3): 312–322, doi: 10.11676/qxxb1998.027.
- 鄧秀书, 郭昌明, 张翠华, 等. 1998b. 地闪回击的微秒级辐射场特征及近地面连接过程分析 [J]. 高原气象, 17(1): 44–54. Qie Xiushu, Guo Changming, Zhang Cuihua, et al. 1998b. Radiation electric field of return stroke and attachment process near the ground [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 17 (1): 44–54.
- 鄧秀书, 余晔, 王怀斌, 等. 2001. 中国内陆高原地闪特征的统计分析 [J]. 高原气象, 20 (4): 395–401. Qie Xiushu, Yu Ye, Wang Huaibin, et al. 2001. Analyses on some features of ground flashes in Chinese inland plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 20 (4): 395–401, doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2001.04.008.
- Qie X S, Wang Z C, Wang D F, et al. 2013. Characteristics of positive cloud-to-ground lightning in Da Hinggan Ling forest region at relatively high latitude, northeastern China [J]. J. Geophys. Res., 118 (24): 13393–13404, doi: 10.1002/2013JD020093.
- Rakov V A, Uman M A. 1990. Some properties of negative cloud-to-ground

- lightning flashes versus stroke order [J]. *J. Geophys. Res.*, 95 (D5): 5447–5453, doi: 10.1029/JD095iD05p05447.
- Saba M M F, Ballarotti M G, Pinto JrO. 2006. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 111 (D3), doi: 10.1029/2005JD006415.
- Saba M M F, Schulz W, Warner T A, et al. 2010. High-speed video observations of positive lightning flashes to ground [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D24), doi: 10.1029/2010JD014330.
- Schulz W, Cummins K, Diendorfer G, et al. 2005. Cloud-to-ground lightning in Austria: A 10-year study using data from a lightning location system [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D9), doi: 10.1029/2004JD005332.
- Schumann C, Saba M M F, Silva R B G D, et al. 2013. Electric fields changes produced by positives cloud-to-ground lightning flashes [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 92: 37–42, doi:10.1016/j.jastp.2012.09.008.
- Tiller J A, Uman M A, Lin Y T, et al. 1976. Electric field statistics for close lightning return strokes near Gainesville, Florida [J]. *J. Geophys. Res.*, 81(24): 4430–4434, doi: 10.1029/JC081i024p04430.
- 王宇, 鄒秀书, 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 Yu, Qie Xiushu, Wang Dongfang, et al. 2015. Beijing Lightning NETwork (BLNET)-part 1: 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.
- Wang Y, Qie X S, Wang D F, et al. 2016. Beijing lightning network (BLNET) and the observation on preliminary breakdown processes [J]. *Atmospheric Research*, 171: 121–132, doi: 10.1016/j.atmosres.2015.12.012.
- Weidman C D, Krider E P. 1978. The fine structure of lightning return stroke wave forms [J]. *J. Geophys. Res.*, 83 (C12): 6239–6247, doi: 10.1029/JC083iC12p06239.
- Weidman C D, Krider E P. 1980. Submicrosecond risetimes in lightning return-stroke fields [J]. *Geophys.Res.Lett.*, 7 (11): 955–958, doi: 10.1029/GL007i011p00955.
- 武智君, 鄒秀书, 王东方, 等. 2016. 北京地区负地闪回击转移的电荷量 [J]. *气候与环境研究*, 21 (3): 247–257. Wu Zhijun, Qie Xiushu, Wang Dongfang, et al. 2016. Charge transferred by the return stroke of negative cloud-to-ground lightning in the Beijing region [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 21 (3): 247–257, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14282.
- 张其林, 鄒秀书. 2003. 地闪回击辐射场波形的重构及地闪放电参数的估算 [J]. *高原气象*, 22 (3): 252–258. Zhang Qilin, QieXiushu. 2003. Reconstruction of return stroke radiation field waveforms and estimation of cloud-to-ground discharges parameters [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 22 (3): 252–258, doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2003.03.008.
- 张其林, 鄒秀书, 王怀斌. 2003. 高原雷暴地闪回击辐射场特征分析 [J]. *中国电机工程学报*, 23 (9): 94–98. Zhang Qilin, Qie Xiushu, Wang Huaibin. 2003. Characteristics of the radiation fields from return strokes in plateau thunderstorms [J]. *Proceedings of the CSEE (in Chinese)*, 23 (9): 94–98, doi: 10.3321/j.issn:0258-8013.2003.09.019.
- Zhang Q L, Yang J, Jing X Q, et al. 2012. Propagation effect of a fractal rough ground boundary on the lightning-radiated vertical electric field [J]. *Atmospheric Research*, 104–105: 202–208, doi: 10.1016/j.atmosres. 2011. 10.009.
- 张伟伟, 田杨萌, 王彩霞, 等. 2011. 北京地区的雷电物理特征 [J]. *北京信息科技大学学报*, 26 (3): 53–57. Zhang Weiwei, Tian Yangmeng, Wang Caixia, et al. 2011. The physical characteristics of lightning flashes occurred in Beijing [J]. *Journal of Beijing Information Science and Technology University (in Chinese)*, 26 (3): 53–57, doi: 10.3969/j.issn. 1674-6864.2011.03.011.
- 张阳, 张义军, 孟青, 等. 2010. 北京地区正地闪时间分布及波形特征 [J]. *应用气象学报*, 21 (4): 442–449. Zhang Yang, Zhang Yijun, Meng Qing, et al. 2010. Temporal distribution and waveform characteristics of positive cloud-to-ground lightning in Beijing area [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 21 (4): 442–449, doi: 10.3969/j. issn.1001-7313.2010.04.007.
- 张义军, 吕伟涛, 张阳, 等. 2013. 广州地区地闪放电过程的观测及其特征分析 [J]. *高电压技术*, 39 (2): 383–392. Zhang Yijun, Lu Weitao, Zhang Yang, et al. 2013. Observations of the cloud-to-ground lightning discharge process and analysis on its characteristic in Guangzhou [J]. *High Voltage Engineering (in Chinese)*, 39 (2): 383–392, doi: 10.3969/j. issn.1003-6520.2013.02.019.
- 赵阳, 张义军, 董万胜, 等. 2004. 青藏高原那曲地区雷电特征初步分析 [J]. *地球物理学报*, 47 (3): 405–410. Zhao Yang, Zhang Yijun, Dong Wansheng, et al. 2004. Preliminary analysis of characteristics of lightning in the Nagqu area of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 47 (3): 405–410, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733. 2004.03.006.
- 祝宝友, 陶善昌, 刘亦风. 2002. 合肥地区地闪特征 [J]. *高原气象*, 21 (3): 296–302. Zhu B Y, Tao S C, Liu Y F. 2002. Characteristics of ground flashes in Hefei region [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 21 (3): 296–302, doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2002.03.011.
- Zhu Y, Rakov V A, Mallick S, et al. 2014. Characterization of negative cloud-to-ground lightning in Florida: Revisited [C]// *Proceedings of 2014 International Conference on Lightning Protection*. Shanghai: IEEE, 1830–1834, doi: 10.1109/ICLP.2014.6973427.
- Zhu B Y, Ma M, Xu W W, et al. 2015. Some properties of negative cloud-to-ground flashes from observations of a local thunderstorm based on accurate-stroke-count studies [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 136: 16–22, doi: 10.1016/j.jastp.2015.07.007.