

王宇, 郅秀书, 王东方, 等. 2014. 正地闪和负地闪预击穿脉冲序列的统计分析与对比 [J]. 大气科学, 38 (1): 21–31, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12167. Wang Yu, Qie Xiushu, Wang Dongfang, et al. 2014. Comparisons of preliminary breakdown pulse trains in positive and negative cloud-to-ground lightning flashes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (1): 21–31.

正地闪和负地闪预击穿脉冲序列的统计分析与对比

王宇^{1,2} 郅秀书¹ 王东方¹ 刘明远¹ 王志超^{1,2}

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 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 2009~2010 年夏季, 在大兴安岭林区利用闪电快、慢电场变化测量仪组成的网络对自然闪电进行了多站同步观测。本文选取 2010 年夏季 3 次过境雷暴过程中具有 4 站以上同步的资料, 同时对表现出明显预击穿过程的 37 次正地闪和 56 次负地闪的预击穿脉冲序列进行了统计分析。统计的主要参数包括: 脉冲序列的总持续时间 (Total Duration), 脉冲序列和首次回击之间的时间间隔 (PB-RS Separation), 预击穿过程到首次回击的时间间隔 (Pre-RS Interval), 单个脉冲持续时间 (Individual Pulse Duration), 相邻脉冲时间间隔 (Interpulse Interval) 等。对于负地闪, 相应参数的算术平均值为 4.1 ms、55.4 ms、56.0 ms、8.8 μ s 和 111.0 μ s, 几何平均值为 3.7 ms、35.6 ms、36.5 ms、7.4 μ s 和 98.2 μ s; 对于正地闪, 相应参数的算术平均值为 4.5 ms、75.6 ms、77.3 ms、11.5 μ s 和 297.3 μ s, 几何平均值为 3.0 ms、57.8 ms、60.0 ms、10.0 μ s 和 217.9 μ s。对比发现, 正地闪预击穿脉冲序列相对负地闪预击穿脉冲序列持续时间更长, 和首次回击的时间间隔更大, 其单个脉冲更宽, 在整个序列中排列更稀疏。计算了正、负地闪最大预击穿脉冲幅值和首次回击幅值的比值 (PB/RS, PB 代表最大预击穿脉冲幅值, RS 代表首次回击幅值), 通过和其他研究结果的对比, 发现负地闪有 PB/RS 随纬度增大而增大的趋势, 而正地闪没有。另外, 检验了首次回击前地闪电场波形与 BIL 模型 (Breakdown Intermediate Leader, BIL) 的符合情况, 发现只有很小比例的电场波形符合 BIL 模型。

关键词 大兴安岭林区 地闪 预击穿脉冲 PB/RS BIL 模型

文章编号 1006-9895(2014)01-0021-11

中图分类号 P427.3

文献标示码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12167

Comparisons of Preliminary Breakdown Pulse Trains in Positive and Negative Cloud-to-Ground Lightning Flashes

WANG Yu^{1,2}, QIE Xiushu¹, WANG Dongfang¹, LIU Mingyuan¹, and WANG Zhichao^{1,2}

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

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract In the summers of 2009 and 2010, simultaneous multi-station observations of natural lightning were conducted in the Da Hinggan Ling forest region of China using a network primarily consisting of fast and slow antennas. In 2010, 37 positive and 56 negative cloud-to-ground (CG) lightning flashes from three thunderstorms were selected and their corresponding preliminary breakdown pulse (PBP) trains were statistically analyzed simultaneously. Several parameters were determined: the total duration of the PBP train (Total Duration), the separation between the PBP train

收稿日期 2012-10-12, 2013-03-18 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金重点项目 40930949

作者简介 王宇, 男, 1987 出生, 博士研究生, 主要从事大气电学方面的研究。E-mail: wangyu@mail.iap.ac.cn

通讯作者 郅秀书, E-mail: qiex@mail.iap.ac.cn

and the first return stroke (PB–RS Separation), the interval between the PBP train and the first return stroke (Pre–RS Interval), the individual pulse duration of the PBP train (Individual Pulse Duration), and the interval between successive pulses of the PBP train (Interpulse Interval). For negative CG lightning, the arithmetic means (AMs) of these parameters were 4.1 ms, 55.4 ms, 56.0 ms, 8.8 μ s, and 111.0 μ s, respectively, and the geometric means (GMs) were 3.7 ms, 35.6 ms, 36.5 ms, 7.4 μ s, and 98.2 μ s, respectively. For positive CG lightning, the respective AMs were 4.5 ms, 75.6 ms, 77.3 ms, 11.5 μ s, and 297.3 μ s, and the respective GMs were 3.0 ms, 57.8 ms, 60.0 ms, 10.0 μ s, and 217.9 μ s. PBP trains in positive CG lightning were found to exhibit longer durations and longer intervals preceding the RS (Return Stroke) than those for PBP trains in negative CG lightning. Moreover, single pulses of PBP trains in positive CG lightning were generally wider and arranged more sparsely throughout the sequences than their negative counterparts. The ratios between the maximum PBP and the RS (PB/RS, Preliminary Breakdown) for both negative and positive CG lightning were calculated. Comparison of these ratios with the results of previous studies suggests that the ratios for negative CG lightning increase with latitude, whereas those for positive CG lightning do not. In addition, the samples were investigated to ascertain whether they were in agreement with the so-called BIL model, and the results obtained here were compared with those of other studies.

Keywords Da Hinggan Ling forest region, Cloud-to-ground lightning, Preliminary breakdown pulse, PB/RS, BIL model

1 引言

预击穿过程是地闪发生在云内的初始放电过程。Clarence and Malan (1957) 指出地闪首次回击前的电场波形可以分为三个阶段：预击穿 (Preliminary Breakdown)、中间阶段 (Intermediate Stage) 和梯级先导 (Stepped Leader)，并将这种电场波形的划分称为“BIL 模型” (Breakdown Intermediate Leader)。在此模型中，预击穿过程直接引发后续过程的产生，与地闪从云内的始发过程密切相关，因此预击穿过程一直受到研究者的广泛关注。根据以往研究，预击穿过程电场波形由一系列脉冲宽度为微秒量级的双极性脉冲组成，脉冲序列的持续时间为数毫秒，有些脉冲序列的最大脉冲峰值可与首次回击峰值相比，双极性脉冲的前半周期极性通常和首次回击极性一致 (Clarence and Malan, 1957; Ushio et al., 1998; Gomes et al., 1998; Qie et al., 2002; Gomes and Cooray, 2004; Nag and Rakov, 2008; 2009)。

对于负地闪预击穿过程的研究较多，Clarence and Malan (1957) 研究了南非夏季雷暴后认为，预击穿过程是云中主负电荷区和其下部正电荷区之间的放电过程。Cooray and Scuka (1996) 认为云中主负电荷区以下垂直通道的建立是地闪形成的必要条件，而当主负电荷区同下部正电荷区 (Lower Positive Charge Center, LPCC) 的放电增强时，这种通道建立的可能性更高。他们进一步认为预击穿脉冲强度可以作为 LPCC 强度的一种度量。Gomes

et al. (1998) 分别研究了斯里兰卡和瑞典的夏季雷暴，发现瑞典地区的负地闪预击穿过程比斯里兰卡地区强，其脉冲的前半周期峰值与首次回击峰值的比值 (PB/RS, PB 代表最大预击穿脉冲幅值，RS 代表首次回击幅值) 为斯里兰卡地区负地闪预击穿过程相应参量的 6 倍，Gomes 认为这是由于热带地区对流旺盛，不利于主负电荷区下部 LPCC 电荷的积累，因而预击穿过程较弱，Gomes 所选样本都没有定位数据，因此距离测站较远的地闪，其预击穿过程电场脉冲很可能衰减到噪声水平以下，影响统计结果的准确性。Qie et al. (2002) 总结了中国内陆高原地区地闪多站同步观测的结果，发现该地区负地闪预击穿过程持续时间较长，并认为这可能与 LPCC 较大的三极性雷暴云电荷结构有关。Nag and Rakov (2008) 统计分析了佛罗里达地区 35 例具有负地闪预击穿脉冲序列特征但没有回击过程的电场波形，发现这种预击穿脉冲序列中双极性脉冲的前半周期持续时间和回击的持续时间相当，都为数十微秒，因此容易被闪电定位网误识别为弱地闪。另外，Mäkelä et al. (2008) 研究了芬兰地区的负地闪预击穿脉冲序列，发现在这一地区有 25% 的预击穿脉冲序列最大脉冲峰值大于首次回击峰值。Baharudin et al. (2012) 对比研究了马来西亚和美国佛罗里达地区的负地闪预击穿脉冲序列，结果表明纬度越高 PB/RS 比值越大。

由于正地闪的发生比例较低，已有的正地闪资料相对较少，因而对正地闪预击穿脉冲序列的研究也相对较少。另外，有些正地闪可以由云闪激发，

当云闪的某一个分叉穿出云底并发展至地面附近时,则可诱发正地闪的产生(Kong et al., 2008),这种情况下正地闪不存在明显的预击穿过程,导致对正地闪预击穿过程的研究更少。Ushio et al. (1998)对发生于日本北陆地区冬季雷暴的 19 次正地闪统计分析发现,正地闪预击穿脉冲的持续时间和相邻脉冲时间间隔都比负地闪小, Ushio 推测正地闪的预击穿脉冲是由正电荷区同屏蔽电荷层之间的放电产生的,另外 Ushio 还发现正地闪预击穿脉冲一般上升沿比较平滑。Gomes and Cooray (2004)根据预击穿脉冲的前半周期极性和首次回击极性的关系,将正地闪预击穿脉冲序列分为四种类型:(a)所有脉冲前半周期极性和首次回击极性相同;(b)脉冲序列分两段,前段所有脉冲前半周期极性和首次回击相同,后段所有脉冲前半周期极性和首次回击相反;(c)所有脉冲前半周期极性和首次回击极性相反;(d)无明显分区,极性相同和相反的脉冲无规则排列。发现其中(a)类正地闪预击穿脉冲序列占全部样本的 80% (57/71)。但是, Gomes and Cooray (2004)对每一个预击穿脉冲序列只取了其幅值最大的 5 个脉冲进行统计分析,这导致其统计结果不便同其他研究结果比较。

预击穿过程发生在云内,很难用光学手段对其进行研究,统计和分析预击穿过程电场资料的波形特征,对推测地闪的始发条件和形成机制都有很大帮助。另外,预击穿脉冲幅值有时可与回击幅值相比,统计出预击穿脉冲波形特征参量的典型值,有利于从工程上对雷电电磁脉冲(Lightning Electro-Magnetic Pulse, LEMP)进行防护。本文选取大兴安岭林区 2010 年 3 次过境雷暴过程中的具有 4 站以上同步资料的 37 次正地闪和 56 次负地闪,首次对发生在同一地区的正地闪和负地闪的预击穿脉冲序列进行了统计分析。4 站以上同步资料的选取,保证了所有地闪都可进行回击定位,所选取的正、负地闪个例均发生在 5~50 km 的范围内,这样尽量减小了极近距离时电场波形主要为静电场分量和极远距离时回击和预击穿过程电磁波衰减不一致对统计结果造成的影响。

2 实验与方法

大兴安岭林区位于中国东北边陲,面积 8.46 万平方公里,森林资源极其丰富。林区气候属寒温带大陆性季风气候,闪电活动较为频繁,由闪电造成

的森林火灾时有发生,为了清楚地认识该地区的闪电活动特征和成灾机理,2009 年至 2010 年,在该地区布置了由 7 个观测站组成的闪电探测和定位网,对自然闪电进行了地面电场变化的综合同步观测。定位网站点分布如图 1 所示,中心观测站设在科研站(50.32°N, 124.11°E)。每一观测站均布置在场地开阔地带,无高大建筑和树木遮挡。

各观测站均配置有闪电快、慢电场变化测量仪(快、慢天线)和高速大容量采集系统(曹冬杰等, 2011a)。快、慢电场变化测量仪的结构和原理与鄧秀书等(2008)中的介绍类似,主要用来监测闪电活动引起的地面垂直电场变化,时间常数分别为 2 ms 和 3 s,带宽分别为 2 MHz 和 1 MHz。高速大容量采集系统主要由采集板卡和工控机组成。采集板卡分辨率达 12 位,最高采样率达 60 MS s⁻¹ (Mega Samples per second),板载内存为 512 MB,能满足高分辨率、长时间采样的要求。实验中采样率设置为 5 MS s⁻¹,单次采样时间为 1 s,预触发百分比为 20%。测站之间用全球定位系统 GPS 模块同步,授时精度为 50 ns。快、慢电场变化测量仪在实验前都进行了标定(王东方等, 2011)。资料在符号上采用大气电学惯例,竖直向下的电场方向为正方向,即由云中向地面输送了负电荷产生正极性电场变化。

为了保证所选择的地闪个例具有距离信息,本文选择具有 4 站以上同步资料的地闪进行分析,所选地闪个例来自 2010 年 3 次过境的雷暴过程,具体发生时间为 2010 年 5 月 31 日、2010 年 6 月 7 日和 2010 年 7 月 16 日。所分析的地闪电场波形均来自中心测站,并采用时间差定位法计算了地闪回

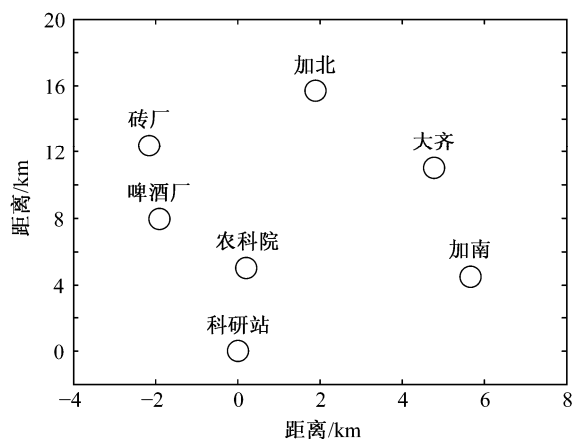


图 1 2010 年闪电定位网站点位置分布图

Fig. 1 Sketch map of the observation stations in 2010

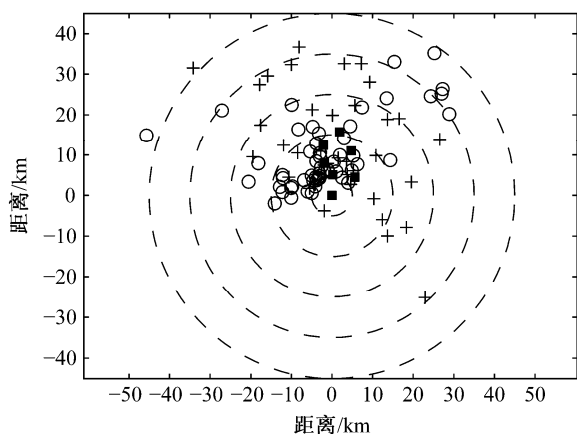


图2 所分析地闪的回击发生位置分布, 黑色方块代表测站位置, “+”代表正地闪, “o”代表负地闪。相邻虚线圆半径相差 10 km

Fig. 2 Location of Cloud to Ground lightning. The black square represents the observation stations, the plus represents positive CG lightning, and the circle represents negative CG lightning. The radius difference between the adjacent dashed circles is 10 km

击点的位置, 作为预击穿过程发生位置的估计。由于回击脉冲和预击穿脉冲频率成分不同, 它们的传播机制是不同的, 回击脉冲主要以地波形式传播, 而预击穿脉冲主要以空间波形式传播, 考虑到大地的电导率有限, 回击脉冲的衰减程度比预击穿脉冲大 (Cooray et al., 2007; Zhang et al., 2012), 因此, 选取距离中心测站 5 到 50 公里的闪电作为样本来分析, 以保证回击脉冲和预击穿脉冲有大致相同的衰减。样本闪电位置分布如图 2 所示。

统计的参数主要有: 脉冲序列的总持续时间 (Total Duration, T_1), 脉冲序列和回击之间时间间隔 (PB-RS Separation, T_2), 预击穿过程到首次回击过程的时间间隔 (Pre-RS Interval, T_3), 单个脉冲持续时间 (Individual Pulse Duration, T_4), 相邻脉冲时间间隔 (Interpulse Interval, T_5), 最大脉冲峰值和回击峰值的比值 (PB/RS Ratio)。各参数的定义如下:

脉冲序列总持续时间 (T_1): 脉冲序列中首尾脉冲的前半周期峰值点之间的时间间隔, 只有脉冲幅值大于局部噪声 2 倍的脉冲才参与统计, 如果相邻脉冲之间的时间间隔超过 2 ms, 则认为后一脉冲可能由其他放电过程所引起, 此脉冲亦被排除;

脉冲序列和回击之间时间间隔 (T_2): 脉冲序列中最大脉冲的前半周期峰值点同回击峰值点之间的时间间隔;

预击穿过程到首次回击过程的时间间隔 (T_3): 脉冲序列首个脉冲的前半周期峰值点到首次回击

的峰值点之间的时间间隔;

单个脉冲持续时间 (T_4): 指脉冲的全宽度 (Full width), 包含双极性脉冲前、后半周期的持续时间;

相邻脉冲时间间隔 (T_5): 指相邻两个脉冲的前半周期峰值点之间的时间间隔;

最大脉冲峰值和回击峰值比值 (PB/RS): 脉冲序列中最大脉冲相对局部噪声的峰值与首次回击相对局部噪声的峰值的比值 (Nag and Rakov, 2008, 2009)。

3 结果与分析

3.1 预击穿脉冲序列整体波形特征及 BIL 模型分析

首次回击前预击穿过程的电场波形表现为由若干脉冲宽度为微秒量级的双极性脉冲组成的脉冲序列。负地闪和正地闪的预击穿脉冲序列波形分别如图 3a-d 所示, 从图中可以看出, 负地闪预击穿脉冲序列呈“不对称梭型”, 即最大脉冲一般出现在序列的前半部分, 然后序列中的脉冲幅值慢慢减小至噪声水平, 这与 Nag and Rakov (2008) 的结果一致。正地闪预击穿脉冲由于相对噪声的幅值不够大, 因此看不出明显类似的形状。另外负地闪预击穿脉冲上升沿上一般会叠加几个脉冲宽度不到 1 μ s 的小脉冲, 这与曹冬杰等 (2011b) 结果一致, 而正地闪预击穿脉冲上升沿一般比较平滑, 见图 5a、d。正、负地闪预击穿脉冲后半周期的幅值 (过冲) 一般都比前半周期幅值小, 例如 Ushio et al. (1998) 统计了正地闪预击穿脉冲前半周期峰值与过冲的比值, 其算术平均值为 1.3。

在本文统计的正、负地闪个例中发现存在三类预击穿脉冲序列: 1) 相同型 (Same, 简称 S 型), 即脉冲序列中所有脉冲前半周期极性与首次回击极性相同; 2) 相反型 (Different, 简称 D 型), 即脉冲序列中所有脉冲前半周期极性与首次回击极性相反; 3) 混杂型 (Chaos, 简称 C 型), 即脉冲序列中相同和相反极性的脉冲都有, 但是无规则排列, 在本文统计样本中相同极性脉冲比相反极性脉冲所占比例大。对于负地闪, 有 52 例样本属于 S 型 (占 92.9%), 1 例属 D 型 (占 1.7%), 3 例属 C 型 (占 5.4%); 对于正地闪, 有 24 例样本属 S 型 (占 64.9%), 有 6 例属 D 型 (占 16.2%), 7 例属 C 型 (占 18.9%)。本文没有发现 Gomes et al. (2004) 分析的所谓的 (b) 类预击穿脉冲序列, 即呈现两个明显分区的预击穿脉冲序列。已有的对预击穿序

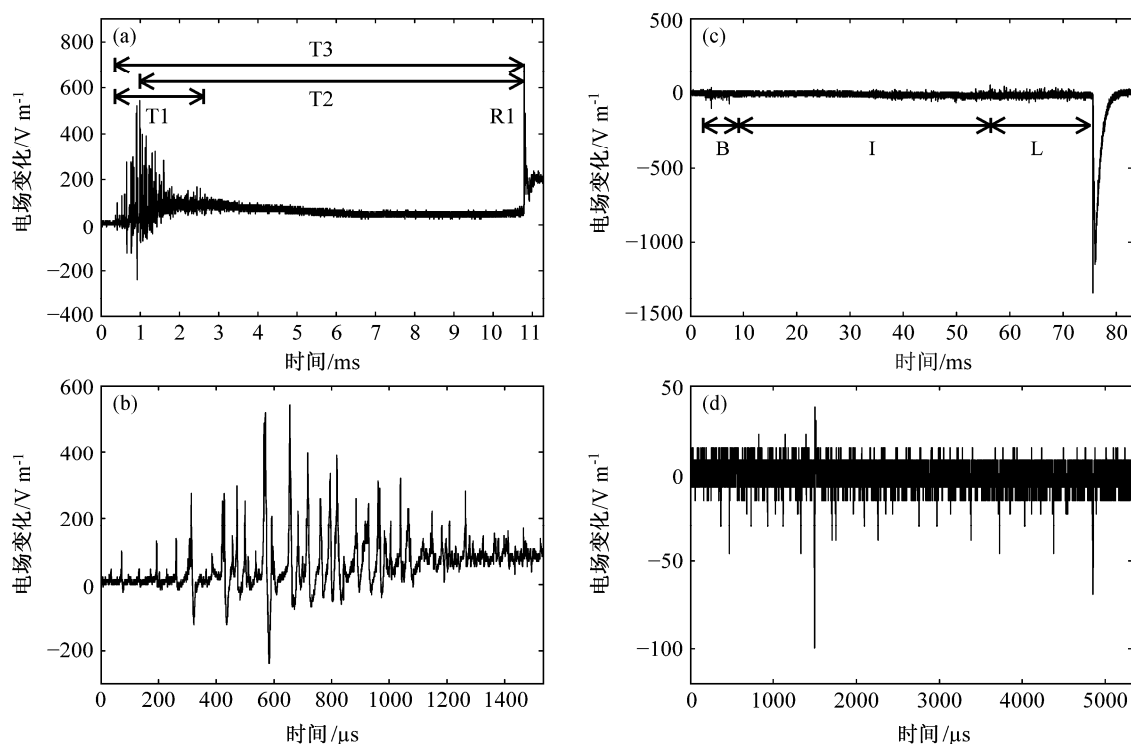


图3 (a) 负地闪预击穿脉冲序列, T_1 为脉冲序列总持续时间 (Total duration); T_2 为脉冲序列和回击之间时间间隔 (PB-RS separation); T_3 为预击穿过程到首次回击过程的时间间隔 (Pre-return interval); (b) 负地闪预击穿脉冲序列扩展图; (c) 正地闪预击穿脉冲序列, R_1 代表首次回击; (d) 正地闪预击穿脉冲序列扩展图

Fig. 3 (a) Preliminary breakdown pulse train in negative CG lightning, T_1 indicates total duration, T_2 indicates PB-RS separation, T_3 indicates pre-return duration; (b) detail of PBP train in negative CG lightning; (c) Preliminary breakdown pulse train in positive CG lightning, R_1 represents first return stroke; (d) detail of PBP train in positive CG lightning

列的分类研究都只涉及正地闪, Gomes et al. (2004) 统计的正地闪 S 型预击穿所占比例为 57/71 (80.2%), Zhang et al. (2011) 统计的正地闪 S 型预击穿所占比例为 66/83 (79.5%), Zhang et al. (2013) 统计的北京地区、广州地区正地闪 S 型预击穿所占比例分别为 55/100 (55.0%) 和 39/48 (81.0%), 这些结果和本文正地闪 S 型预击穿比例 24/37 (64.9%) 一样所占比例都较大。下面对正、负地闪三类预击穿过程的成因进行简要分析和讨论。

一方面, 雷暴云的电荷结构通常为顶部主正电荷区, 中间主负电荷区, 底部相对较小的正电荷区 (即 LPCC, 也称“口袋电荷区”), 负地闪一般由主负电荷区与口袋电荷区之间始发, 负地闪的预击穿过程对应的就是主负电荷区与口袋电荷区的放电过程 (Qie et al., 2005; 张义军等, 2008)。而 Nag and Rakov (2012) 分析了正地闪可能的 6 种成因, 其中雷暴云倾斜的正偶极结构和反偶极结构产生的正地闪可能伴随预击穿过程。另一方面, 我们知

道某一极性电荷分别向靠近和远离测站的方向放电会产生相反极性的电场变化。正是基于以上两方面的认识, 本文对产生三种预击穿波形的原因进行了简单的推测: 口袋电荷区在诱导地闪形成的前期阶段起到关键作用, 当主电荷区与口袋电荷区之间放电进而发展成地闪时, 地闪所伴随的预击穿过程为 S 型, 但是, 当口袋电荷区不够大或者地闪正好从口袋电荷区边缘始发时, 其“吸引力”就会减弱, 主电荷区就有可能向其他不规则电荷区放电, 从而在预击穿过程中夹杂相反极性的脉冲, 形成 C 型预击穿过程, 当口袋电荷区影响进一步减弱, 主电荷区可能完全不与下部的口袋电荷区放电, 而是相对其他区域放电, 如果位置合适, 也能顺利发展成地闪, 这时就形成 D 型预击穿过程。需要说明, 这里将“口袋电荷区”的概念推广了, 将产生正地闪预击穿过程的电荷结构, 其底部的电荷区域也称为口袋电荷区。根据统计结果, 正、负地闪三种预击穿过程都是 S 型所占比例最大, 说明在伴随有预击穿的地闪中, 口袋电荷区的作用是显著的。对比发现,

负地闪 S 型预击穿过程占的比例比正地闪 S 型预击穿过程占的比例大, 推测可能原因是负地闪口袋电荷区覆盖区域更大、总电荷量更多, 因此, 更能“吸引”主电荷区的放电过程。

预击穿脉冲序列中最大脉冲幅值一般比回击幅值小, 56 例负地闪样本中有 7 例预击穿脉冲幅值超过回击幅值, 37 例正地闪中没有预击穿脉冲幅值超过回击。如果将预击穿脉冲幅值与回击幅值的比值为 $0.5 \sim 2$ 界定为预击穿脉冲与回击脉冲可比, 那么负地闪预击穿脉冲与回击可比的比例为 $16/56$ (28.6%), 而正地闪预击穿脉冲与回击可比的比例为 $1/37$ (2.7%)。图 4 给出了负地闪预击穿脉冲幅值超过首次回击幅值的一个个例。

另外, 本文对首次回击前的电场波形进行了分析, 检验了电场变化波形与 BIL 模型的符合情况。Clarence and Malan (1957) 分析了这种模型的物理基础, 预击穿阶段对应主负电荷区和口袋电荷区之间的放电, 中间间歇阶段对应第一阶段放电产生的通道内电荷的聚集和电场的增强, 梯级先导阶段对应云中通道穿出云底向地面的发展。Mäkelä et al. (2008) 提出 BIL 模型表现在电场波形上为“M”型, 可以用在闪电定位系统中来识别地闪, 但 Mäkelä 没有给出样本符合 BIL 模型的比例, 如果 BIL 模型可以加入闪电定位算法中来识别地闪, 那么符合 BIL 模型的比例的地闪要足够高。但是, 本文负地闪样本中只有 11 例符合 BIL 模型, 占总数比例为 19.6%, 正地闪样本中有 9 例符合 BIL 模型, 占总数比例为 24.3%, Baharudin et al. (2012) 统计马来西亚负地闪符合 BIL 模型的比例为 47%, 和本

文的统计结果一样都较低。需要指出, Baharudin et al. (2012) 和本文使用宽带天线采集信号, 而 Mäkelä et al. (2008) 使用窄带天线采集信号, 这可能导致 Baharudin et al. (2012) 和本文的资料信噪比不如 Mäkelä et al. (2008) 的资料高, 很多预击穿过程电场变化和梯级先导过程电场变化处于噪声水平以下而不易被识别出来。

3.2 特征参数统计结果及对比分析

这里讨论的特征参数主要包括 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 和 T_5 。上文将正、负地闪预击穿电场波形都分成了 3 类, 为了便于正、负地闪统计结果的比较, 也为了便于同其他研究结果进行对比, 在统计 T_1 、 T_2 、 T_3 时, 仅对 S 型预击穿脉冲序列进行统计, 在统计 T_4 、 T_5 时, 对所有与首次回击极性相同的脉冲都进行统计, 即对 S 型预击穿脉冲序列的全部脉冲和 C 型预击穿脉冲序列中与首次回击极性相同的脉冲进行统计。所有特征参数的统计结果见表 1。

从表 1 可以看出, T_1 的算术平均值为 4.5 ms, 几何平均值为 3.0 ms, 而负地闪预击穿脉冲序列总持续时间的算术平均值为 4.1 ms, 几何平均值为 3.7 ms, 两者的算术平均值相当, 后者的几何平均值为前者的 1.2 倍, 正地闪预击穿脉冲序列的总持续时间分布更广, 为 $0.2 \sim 19.9$ ms, 而负地闪对应的变化范围为 $0.5 \sim 9.8$ ms。正地闪预击穿脉冲序列 T_2 的算术平均值为 75.6 ms, 是负地闪对应值 55.4 ms 的 1.4 倍, 几何平均值为 57.8 ms, 是负地闪对应值的 1.6 倍, 变化范围上正地闪预击穿脉冲序列同首次回击时间间隔也分布更广, 从 7.1 ms 到 177.6 ms, 而负地闪相应的变化范围只从 1.5 ms 到 146.1 ms。正地闪 T_3 的算术平均值为 77.3 ms, 几何平均值为 60.0 ms, 是负地闪对应参数的 1.4 倍和 1.6 倍, 前者的变化范围是 $9.9 \sim 179.7$ ms, 后者的变化范围是 $1.9 \sim 146.3$ ms。正地闪的 T_1 、 T_2 、 T_3 统计结果都比负地闪大, 可能由于正地闪发生前云中主电荷区和口袋电荷区之间的距离比负地闪发生前云中主电荷区和口袋电荷区之间的距离大, 也可能正地闪预击穿过程在口袋电荷区水平发展的时间更长。

本文统计得到负地闪 T_1 的算术平均值为 4.1 ms, 与 Nag and Rakov (2009) 分析 12 个负地闪预击穿个个例后得到的总持续时间算术平均值 3.4 ms 比较接近, 但比 Baharudin et al. (2012) 统计的马来西亚地区负地闪预击穿脉冲序列总持续时间小, 是

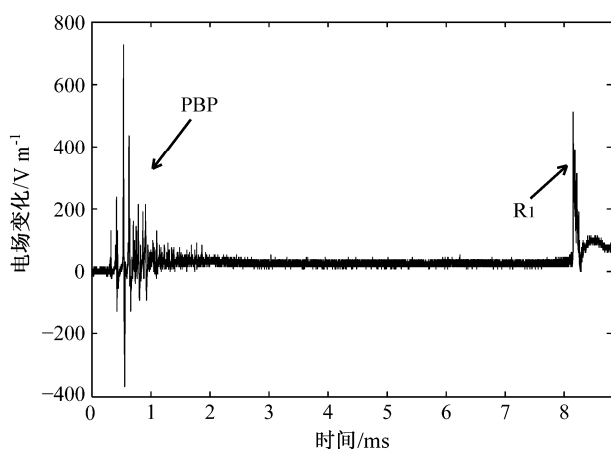


图 4 负地闪预击穿脉冲幅值超过首次回击幅值的个例

Fig. 4 One case of preliminary breakdown pulse with its amplitude exceeding the corresponding first return stroke in negative CG lightning

其算术平均值 12.3 ms 的 33.3%。本文统计出正地闪预击穿脉冲序列总持续时间的算术平均值为 4.5 ms, 是 Gomes et al. (2004) 分析瑞典地区正地闪资料后得到的统计结果 3 ms 的 1.5 倍, 是 Zhang et al. (2011) 分析广州地区正地闪资料后得到结果 8.9 ms 的 50.6%, 是 Zhang et al. (2013) 分析北京地区正地闪资料得到结果 3.1 ms 的 1.5 倍。参考表 1, 可以对正、负地闪 T_2 、 T_3 同其他研究结果进行类似的对比, 但没有发现 T_1 、 T_2 、 T_3 的统计结果和纬度有明显的关系。

对于负地闪预击穿脉冲序列, 统计了 52 例 S 型序列的所有脉冲和 3 例 C 型序列中极性和首次回击相同的脉冲, 共 759 个脉冲, 对于正地闪预击穿脉冲序列, 统计了 24 例 S 型序列的全部脉冲和 7 例 C 型序列中机型和首次回击相同的脉冲, 共 375 个脉冲。图 5 以每一个预击穿脉冲序列为单元来绘制箱线图, 按照参数中位数递增的顺序来排列个例。从图中箱线图可以看出, 对部分个例而言, 参

数的分布范围较大, 为不失代表性, 以个例参数的中位数为该个例典型值, 最后将所有个例的中位数取平均, 得到表 1 中的结果: 负地闪预击穿脉冲宽度的算术平均值为 8.8 μs , 几何平均值为 7.4 μs , 脉冲间隔的算术平均值为 111.0 μs , 几何平均值为 98.29 μs ; 正地闪预击穿脉冲宽度的算术平均值为 11.5 μs , 几何平均值为 10.0 μs , 脉冲间隔的算术平均值为 297.3 μs , 几何平均值为 217.9 μs 。

对比正、负地闪预击穿脉冲持续时间和相邻脉冲时间间隔, 发现正地闪预击穿单个脉冲持续时间的算术平均值为负地闪相应参数统计值的 1.3 倍, 正地闪预击穿相邻脉冲时间间隔的算术平均值为负地闪相应参数统计值的 2.7 倍。将表 1 中各研究结果进行比较, 发现无论统计的资料来自何纬度地区, 正地闪预击穿单个脉冲持续时间都比负地闪预击穿单个脉冲持续时间长, 猜测可能由于正极性击穿本身比负极性击穿发展缓慢, 或者正极性击穿的空间尺度比负极性击穿的空间尺度大, 单纯从统计

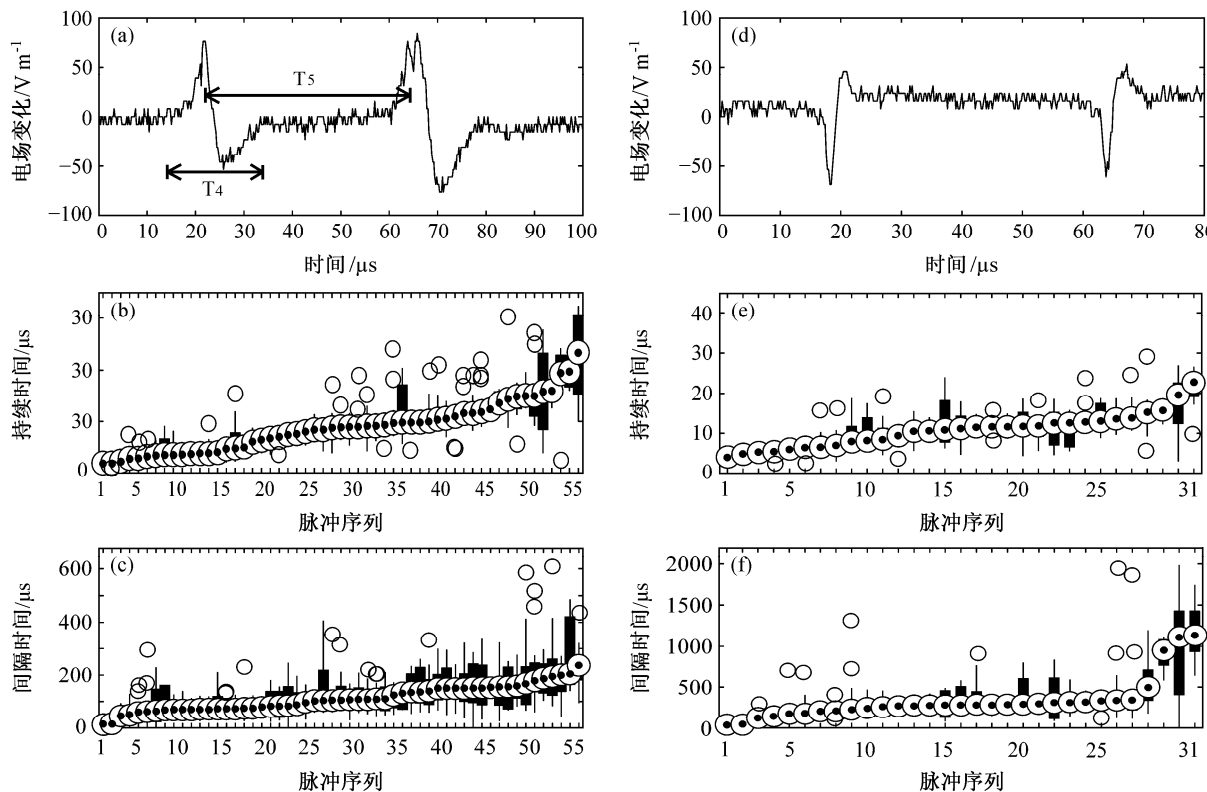


图 5 正、负地闪预击穿波形及脉冲宽度和相邻脉冲时间间隔箱线图: (a) 负地闪预击穿脉冲序列波形; (b) 负地闪预击穿脉冲宽度箱线图; (c) 负地闪预击穿相邻脉冲时间间隔箱线图; (d) 正地闪预击穿脉冲序列波形; (e) 正地闪预击穿脉冲宽度箱线图; (f) 正地闪预击穿相邻脉冲时间间隔箱线图。 T_4 代表单个脉冲持续时间, T_5 代表相邻脉冲时间间隔

Fig. 5 Waveform and boxplot of Pulse Duration and Interpulse Interval: (a) Waveform of PBP in negative CG lightning; (b) boxplot of pulse duration of PBP in negative CG lightning; (c) boxplot of interpulse interval of PBP in negative CG lightning; (d) waveform of PBP in positive CG lightning; (e) boxplot of pulse duration of PBP in positive CG lightning; (f) boxplot of interpulse interval of PBP in positive CG lightning. T_4 represents Individual Pulse Duration, and T_5 represents Interpulse Interval

数字不能得出这个结论,还需要借助对相应物理过程的三维定位来证实。从表 1 还可以看出,正地闪预击穿相邻脉冲时间大体上比负地闪预击穿相邻脉冲时间间隔更长。所以,从波形特征上,正地闪预击穿脉冲序列的脉冲比负地闪预击穿脉冲序列的脉冲更宽,排列得更稀疏。

3.3 PB/RS 与纬度的关系

预击穿过程强度可以用预击穿脉冲序列中最大脉冲的幅值来表示,但是离测站距离不同的预击穿脉冲衰减不一样,因而无法比较它们的强度,当选择距离合适的闪电作为样本,可以使预击穿脉冲和首次回击脉冲有大致一致的衰减,这样用预击穿脉冲幅值比上首次回击幅值(PB/RS)可以降低传输衰减的影响,同时又反映预击穿过程的强度。从图 6 中看出,点的分布比较散乱,负地闪和正地闪的 PB/RS 同距离之间均无明显关系,计算表明,负地闪的 PB/RS 和距离的相关系数 $R=0.12$,正地闪的 PB/RS 和距离的相关系数 $R=0.02$,相关性很低。这说明 PB/RS 这个参数可以较好地反映预击穿过程的真实强度。由于在本文统计的所有预击穿脉冲序列中,C 型预击穿脉冲序列最大脉冲的极性都与对应的首次回击极性相同,在统计 PB/RS 时,将 S 型与 C 型预击穿脉冲序列放在一起进行统计,为了和其他研究结果进行比较,暂不统计 D 型预击穿脉冲序列,因此负地闪预击穿脉冲序列的样本数为 55,正地闪预击穿脉冲序列的样本数为 31。

从图 7 中可以看出,负地闪 PB/RS 在 0.1 以下约占 18%,0.3 以下约占 60%,而正地闪 PB/RS 在 0.1 以下占 40%以上,0.3 以下约占 80%,说明正地闪 PB/RS 更多地集中在低值区。另外,负地闪有 7 例预击穿最大脉冲峰值超过首次回击峰值,占总数的 12.7%,而正地闪样本中没有预击穿脉冲峰值超过首次回击峰值。

表 1 总结了本文 PB/RS 和其他研究者的结果。比较后发现,除了 Nag and Rakov (2009) 统计的结果,其他负地闪 PB/RS 存在随纬度增大而增大的趋势,而正地闪 PB/RS 无此规律,尽管本文分析的样本闪电发生纬度最高,但是 PB/RS 的算术平均值仅为 Ushio et al. (1998) 结果的 56.3%,和 Zhang et al. (2011) 以及 Zhang et al. (2013) 对北京地区和广州地区正地闪资料的统计结果相当。可能需要更多的研究结果来确定正地闪 PB/RS 是否和纬度有关,因为天气背景和实验场地局地条件的影响可能会超过纬度位置的影响,如 Ushio et al. (1998) 分析的是日本冬季雷暴过程中的个例并且实验场地临海,这种季节差异和局地的环境因素可能影响雷暴云的电荷结构,更具体地说,可能影响主电荷区下部口袋电荷区的大小和电荷密度。

4 结论和讨论

本文选择大兴安岭林区 2010 年 3 次过境雷暴过程的 56 次正地闪和 37 次负地闪进行了分析,利

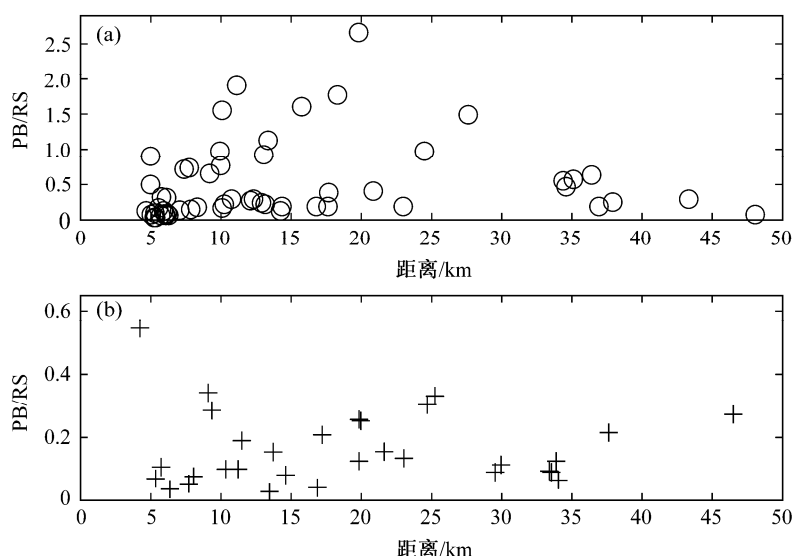


图 6 PB/RS 比值和距离的关系图: (a) 负地闪预击穿 PB/RS 比值和距离关系图; (b) 正地闪预击穿 PB/RS 比值和距离关系图

Fig. 6 Relationship between PB/RS Ratio and distance: (a) Relationship between PB/RS ratio of negative CG and distance; (b) relationship between PB/RS Ratio of positive CG and distance

表 1 统计结果与其他研究结果的对比

Table 1 Comparison of the statistical results in this paper with those in earlier studies

研究者 (地点)	经纬度	样本数	类型	T ₁ (ms)			T ₂ (ms)			T ₃ (ms)			T ₄ (μs)			T ₅ (μs)			PB/RS		
				AM	GM	RE	AM	GM	RE	AM	GM	RE	AM	GM	RE	AM	GM	RE	AM	GM	RE
Ushio et al.(1998) (斯里兰卡)	6.9°N	9	-CG	—	—	—	11.9	9.8	3.5~23.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16.5%	14.6%	6.2%~26.4%
Gomes et al.(1998) (瑞典)	59.8°N	41	-CG	—	—	—	13.8	8.7	2.0~70.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	101.4%	48.5%	8.2%~627.1%
Mäkelä et al. (2008) (芬兰)	60.4°N	193	-CG	—	—	—	18	38.5	2~320	—	—	—	—	—	—	—	—	—	61%	25%	1%~610%
Nag and Rakov(2009) (美国, 佛罗里达)	30°N	12	-CG	3.4	3.2	1.1~5	—	—	—	—	—	—	4.8	—	0.5~49	65	—	0.6~1585	62%	45%	16%~510%
Baharudin et al.(2012) (美国, 佛罗里达)	27°N	100	-CG	—	—	—	22	17.7	3.3~92.5	23	19	4~93	—	—	—	—	—	—	29.4%	22.3%	2.9%~149%
Baharudin et al.(2012) (马来西亚)	1°N	97	-CG	12.3	10.1	2~37	57.6	47.2	8.3~227.3	62	51	9~230	11	—	1~92	152	—	1~1908	27.8%	14.6%	2.6%~228.1%
本文 (大兴安岭)	50.3°N	56	-CG	4.1	3.7	0.5~9.8	55.4	35.6	1.5~146.1	56.0	36.5	1.9~146.3	8.8	7.4	1.8~23.3	111.0	98.2	13.4~236.5	49.6%	28.6%	2.7%~265.2%
Ushio et al.(1998) (日本, 北陆)	36°N	19	+CG	—	—	—	12	—	—	—	—	—	18.8	—	5~52	54.2	—	10~180	27%	—	2%~190%
Gomes et al.(2004) (瑞典)	59.8°N	57	+CG	3	—	—	56	—	—	—	—	—	38	—	—	96	—	—	—	—	—
Zhang et al.(2011) (中国, 广州)	23°N	79	+CG	8.9	—	—	98.5	—	—	—	—	—	25.0	—	—	271.0	—	—	16%	—	—
Zhang et al.(2013) (中国, 北京)	39.5°N	55	+CG	3.1	—	0.5~13.6	94.2	—	6.3~198.6	—	—	—	21.0	—	2.0~119.0	141.0	—	20.0~1829.0	19.7%	—	2.1%~52.4%
Zhang et al.(2013) (中国, 广州)	23°N	39	+CG	5.1	—	0.9~14.9	99.5	—	9.9~188.6	—	—	—	31.0	—	3.0~241.0	256.0	—	20.0~1961.0	19.5%	—	4.3%~59.4%
本文 (大兴安岭)	50.3°N	37	+CG	4.5	3.0	0.2~19.9	75.6	57.8	7.1~177.6	77.3	60.0	9.9~179.7	11.5	10.0	4.0~33.4	297.3	217.9	33.0~1132.9	14.9%	11.2%	2.7%~54.5%

AM: 算术平均值 (Arithmetic Mean); GM: 几何平均值 (Geometric Mean); RE: 范围 (Range)

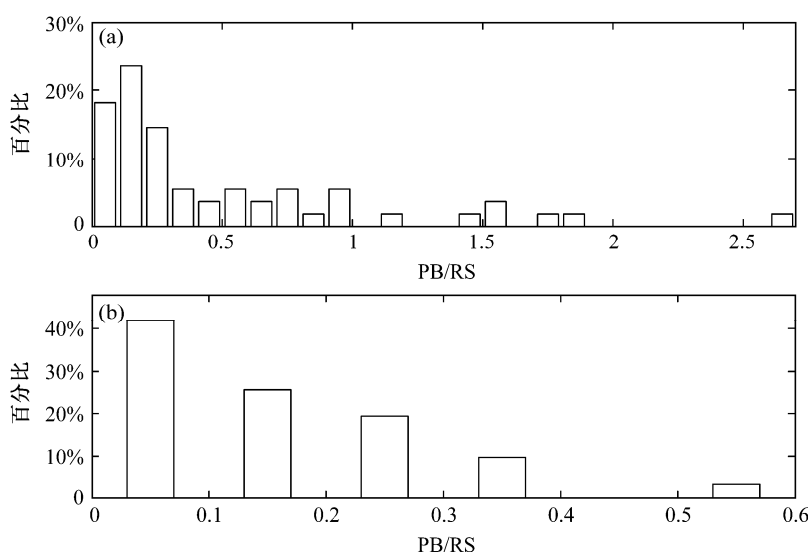


图7 (a) 正、(b) 负地闪 PB/RS 比值分布直方图

Fig. 7 Distribution of PB/RS Ratio for both positive and negative CG lightning

用快电场变化资料首次对同一地区的正地闪和负地闪预击穿脉冲序列进行了统计研究, 主要研究结果如下:

(1) 所有统计结果及与其他研究者的对比表明: (a) 正地闪预击穿脉冲序列持续时间更长, 和首次回击的时间间隔更大, 分析可能原因是该地区正地闪发生时雷暴云中主电荷区和下部口袋电荷区的距离比负地闪发生时两个电荷区之间的距离大, 或者正地闪预击穿过程在口袋电荷区水平发展的时间更长。(b) 正地闪预击穿脉冲序列中单个脉冲更宽, 排列更稀疏, 推测可能原因是正极性击穿发展比负极性击穿缓慢或者正极性击穿的空间尺度更大。另外, 单个负地闪预击穿脉冲波形的上升沿上一般会叠加几个持续时间为亚微秒量级的小脉冲, 而正地闪预击穿脉冲上升沿一般比较平滑。

(2) 在所有正、负地闪样本中分别发现三种预击穿波形: (a) S 型, 即所有预击穿脉冲极性和首次回击极性相同; (b) D 型, 即所有预击穿脉冲和首次回击极性相反; (c) C 型, 即预击穿脉冲序列中既有和首次回击极性相同也有和首次回击极性相反的脉冲, 但这些脉冲无规则排列。本文没有发现 Gomes et al. (2004) 提到的存在两个明显分区的预击穿脉冲波形。在正、负地闪样本中, S 型预击穿波形都占绝大多数, 但是, 负地闪 S 型预击穿脉冲序列所占的比例比正地闪 S 型预击穿脉冲序列所占比例大。三种预击穿波形产生的可能原因是: S 型预击穿波形可能是主电荷区和其下部口袋电荷区

放电产生; C 型预击穿波形可能是在主电荷区与下部口袋电荷区放电的同时向其他不规则电荷区放电, 从而在脉冲序列中夹杂有相反极性的脉冲; D 型预击穿过程可能发生于雷暴云的边缘部分, 主电荷区没有相对下部的口袋电荷区放电, 而是相对远离测站的处于雷暴云边缘的电荷区放电, 当这一预击穿过程结束时, 放电通道正好穿出云体, 从而可以顺利发展成地闪。当然, 雷暴云的电荷结构非常复杂, 这里分析的仅仅是雷暴云的等效电荷结构。

(3) 统计了正、负地闪首次回击前电场波形符合 BIL 模型的情况, 发现负地闪样本中只有 11 例符合 BIL 模型, 占总数比例为 19.6%, 正地闪样本中有 9 例符合 BIL 模型, 占总数的比例为 24.3%。如果要利用 BIL 模型具有的“M”型来识别地闪, 可能需要窄带天线来接收信号。另外, 统计了正、负地闪 PB/RS 比值的分布情况, 发现正地闪 PB/RS 比值更多地集中在低值区, 同其他研究结果比较表明, 负地闪 PB/RS 比值有随纬度增大而增大的趋势, 而正地闪没有这一趋势。

本文通过统计的方法分析了同一地区的正、负地闪预击穿脉冲序列电场波形, 并基于统计结果对导致它们差异的原因进行了推测, 但是, 要想通过统计分析来弄清它们的物理本质是困难的。这些统计结果为进一步深入研究正、负地闪预击穿过程提供了思路 and 方向, 接下来将组建闪电甚高频辐射源三维定位网, 专门针对预击穿过程以及其他云内电活动进行研究, 相信掌握了预击穿辐射源时空演变

的规律, 这些从统计结果上体现出来的差异就能从本质上解释清楚。

参考文献 (References)

- Baharudin Z A, Ahmad N A, Fernando M, et al. 2012. Comparative study on preliminary breakdown pulse trains observed in Johor, Malaysia and Florida, USA [J]. *Atmos. Res.* 117: 111–121. doi:10.1016/j.atmosres.2012.01.012.
- 曹冬杰, 田立言, 肖瑾, 等. 2011a. 闪电多参量高速大容量实时数据采集、显示和分析系统 [J]. *高原气象*, 30 (2): 518–524. Cao Dongjie, Tian Liyan, Xiao Jing, et al. 2011a. A fast recording, display and waveform analysis system on multi-parameter of lightning flash [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 30 (2): 518–524.
- 曹冬杰, 郗秀书, 杨静, 等. 2011b. 闪电初始放电阶段亚微秒电场变化波形特征 [J]. *大气科学*, 35 (4): 645–656. Cao Dongjie, Qie Xiushu, Yang Jing, et al. 2011b. Analysis on characteristics of sub-microsecond electric field change waveforms during the initial stage of lightning discharge [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (4): 645–656.
- Clarence N D, Malan D J. 1957. Preliminary discharge processes in lightning flashes to ground [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 83 (356): 161–172. doi:10.1002/qj.49708335603.
- Cooray V. 2007. Propagation effects on radiation field pulses generated by cloud lightning flashes [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69 (12): 1397–1406. doi:10.1016/j.jastp.2007.03.009.
- Cooray V, Scuka V. 1996. What attracts a lightning flash to ground? [C] // *Proc. Int. Conf. Atmos. Elect.*, Osaka, Japan, 256–259.
- Gomes C, Cooray V. 2004. Radiation field pulses associated with the initiation of positive cloud to ground lightning flashes [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66 (12): 1047–1055. doi:10.1016/j.jastp.2004.03.015.
- Gomes C, Cooray V, Jayaratne C. 1998. Comparison of preliminary breakdown pulses observed in Sweden and in Sri Lanka [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 60 (10): 975–979. doi:10.1016/S1364-6826(98)00007-8.
- Kong X S, Qie X S, Zhao Y. 2008. Characteristics of downward leader in a positive cloud-to-ground lightning flash observed by high-speed video camera and electric field changes [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35 (5): L05816. doi:10.1029/2007GL032764.
- Mäkelä J S, Porjo N, Mäkelä A, et al. 2008. Properties of preliminary breakdown processes in Scandinavian lightning [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70 (16): 2041–2052. doi:10.1016/j.jastp.2008.08.013.
- Nag A, Rakov V A. 2008. Pulse trains that are characteristic of preliminary breakdown in cloud-to-ground lightning but are not followed by return stroke pulses [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D1): 1–12. doi:10.1029/2007JD008489.
- Nag A, Rakov V A. 2009. Electric field pulse trains occurring prior to the first stroke in negative cloud-to-ground lightning [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 51: 147–150. doi:10.1109/TEM.2008.2005488.
- Nag A, Rakov V A. 2012. Positive lightning: An overview, new observations, and inferences [J]. *J. Geophys. Res.*, 117(D8), D08109, doi:10.1029/2012JD017545.
- Qie X S, Yu Y, Wang D, et al. 2002. Characteristics of cloud-to-ground lightning in Chinese inland plateau [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80 (4): 745–754.
- Qie X S, Zhang T, Chen C, et al. 2005. The lower positive charge center and its effect on lightning discharges on the Tibetan Plateau [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (5), L05814, doi:10.1029/2004GL022162.
- 郗秀书, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 2008. 大气探测高技术及应用研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 867–881. Qie Xiushu, Lü Daren, Chen Hongbin, et al. 2008. Advances in high technology of atmospheric sounding and application researches [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 867–881, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.14.
- Ushio T, Kawasaki Z I, Matsu-ura K, et al. 1998. Electric fields of initial breakdown in positive ground flash [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (D12): 14135–14139, doi:10.1029/97JD01975.
- 王东方, 宣越健, 刘继明, 等. 2011. 大兴安岭林区地闪放电特征的观测与分析 [J]. *大气科学*, 35 (1): 147–156. Wang Dongfang, Xuan Yuejian, Liu Jiming, et al. 2011. Analyses on the characteristic of cloud-to-ground lightning flash in Da Hinggan Ling forest region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (1): 147–156.
- Zhang Q, Yang J, Jing X, et al. 2012. Propagation effect of a fractal rough ground boundary on the lightning-radiated vertical electric field [J]. *Atmos. Res.*, 104–105: 202–208. doi:10.1016/j.atmosres.2011.10.009.
- 张义军, 孟青, 吕伟涛, 等. 2008. 云下部正电荷区与负地闪预击穿过程 [J]. *气象学报*, 66 (2): 274–282. Zhang Yijun, Meng Qing, Lü Weitao, et al. 2008. Positive charge region in lower part of thunderstorm and preliminary breakdown process of negative cloud-to-ground lightning [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66 (2): 274–282.
- Zhang Y, Zhang Y, Lu W, et al. 2011. An analysis of the initial breakdown pulse for positive cloud-to-ground flashes [C]// 2011 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), doi:10.1109/APL.2011.6111095.
- Zhang Y, Zhang Y, Lu W, et al. 2013. Analysis and comparison of initial breakdown pulses for positive cloud-to-ground flashes observed in Beijing and Guangzhou [J]. *Atmos. Res.*, 129–130: 34–41, doi:10.1016/j.atmosres.2013.03.006.