

曹冬杰, 郟秀书, 杨静, 等. 2011. 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. 2011. 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.

闪电初始放电阶段亚微秒电场变化波形特征

曹冬杰^{1, 2} 郟秀书¹ 杨静¹ 王俊芳¹ 王东方¹

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, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 本文选取 2008 年西藏羊八井地区与 2009 年东北大兴安岭地区快、慢天线闪电电场变化仪观测资料, 对云闪起始阶段和地闪预击穿阶段亚微秒电场变化波形特征进行了统计分析, 发现, 无论是云闪还是地闪, 初始阶段快电场变化波形均表现为一系列脉冲形式, 且以归一化幅值小于 0.5、脉冲宽度小于等于 $10 \mu\text{s}$ 的窄脉冲为主; 同低海拔地区相比, 高原地区地闪预击穿阶段脉冲总数相对较高, 窄脉冲所占比例相对较低, 幅值可与首次回击峰值相比拟的双极性大脉冲的发生比例较低。在统计的基础上, 对产生双极性脉冲的物理机制进行了分析, 发现较大的电流传输速度和电流衰减长度, 是导致双极性大脉冲波形幅值远大于其它脉冲的主要原因。

关键词 闪电 初始放电阶段 亚微秒电场变化 下部正电荷区 (LPCC) 传输线模型

文章编号 1006-9895 (2011) 04-0645-12

中图分类号 P427.3

文献标识码 A

Analysis on Characteristics of Sub-microsecond Electric Field Change Waveform during the Initial Stage of Lightning Discharge

CAO Dongjie^{1, 2}, QIE Xiushu¹, YANG Jing¹, WANG Junfang¹, and WANG Dongfang¹

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

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The characteristics of sub-microsecond electric field change waveforms during the initial stage of intra-cloud (IC) flashes and preliminary breakdown process of cloud-to-ground (CG) flashes have been studied based on the observation data. The data include fast electric field change and slow electric field change of IC flashes and CG flashes measured in Yangbajing of the Tibetan Plateau in 2008, and in Da Hinggan Ling in 2009. It is found that the electric field change waveforms during the initial stage of IC flashes and preliminary breakdown process of CG flashes appear as a series of pulses. The majority of pulses are narrow with pulse width less than or equal to $10 \mu\text{s}$. The majority of pulses are weak with the normalized amplitude value less than 0.5. Compared with the lower altitude area, the number of pulses during the preliminary breakdown process of negative CG flashes measured in the Tibetan Plateau is larger and the proportion of narrow pulses is smaller. The proportion of large bipolar pulses with large peak-to-peak amplitude that is equal to or larger than the peak amplitude of electric field change of the first return stroke is small. Based on the statistics, the mechanism of discharge processes that produce bipolar pulses has been discussed theoretically. It is found that if the propagation speed of current pulse and the damp length of current

收稿日期 2010-09-06, 2011-02-24 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40774083、40930949, 国家科技支撑计划项目 2008BAC36B03, 中国科学院百人计划资助项目

作者简介 曹冬杰, 男, 1980 年出生, 博士研究生, 主要从事大气电学方面的研究。E-mail: cdjie17@163.com

pulse are large, the peak-to-peak amplitude of bipolar pulse will be large.

Key words lightning, initial stage of discharge, sub-microsecond electric field change, lower positive charge center (LPCC), modified transmission line model

1 引言

闪电是自然界中发生的一种瞬态、大电流、超长距离放电现象,其放电过程具有快速、瞬变的特点。闪电多开始于云内放电,有时可能从高耸的物体上引发。初始放电阶段的电场变化波形通常表现为一系列不同幅值、极性和宽度的脉冲形式,同时伴随有电磁辐射产生。对闪电初始放电物理过程进行研究,了解其辐射脉冲特征,对于研究雷电的物理机制非常重要。

关于闪电初始放电阶段电场变化特征的研究,前人已经做了很多工作,Clarence and Malan (1956) 根据地闪预击穿阶段对应的电场变化特征,提出了其主要与发生在雷暴云中下部主负电荷区和下部正电荷区之间的放电有关。Beasley et al. (1982) 对地闪电场变化特征的分析发现,预击穿过程开始于首次回击之前 65 ms,甚至更早,并给出了区分预击穿过程与先导过程的方法。Villanueva et al. (1994) 对云闪电场变化特征进行了分析,认为云闪起始阶段对应的大脉冲主要产生于闪电通道的形成过程。Weidman and Krider (1979) 对云闪电场变化波形进行了统计,发现只有极少数脉冲的宽度小于 10 μs ,云内放电过程对应的正极性脉冲宽度的统计平均值为 40 μs 。Rakov et al. (1996) 对云闪起始阶段电场变化波形进行了统计,发现脉冲宽度为 50~80 μs ,各脉冲之间的时间间隔为 600~800 μs ;对地闪预击穿阶段电场波形的统计发现,脉冲宽度为 20~40 μs ,脉冲之间的时间间隔为 70~130 μs 。Qie et al. (2002) 对地闪预击穿阶段快电场波形进行了分析,发现负地闪和正地闪预击穿阶段的脉冲间隔时间分别为 211 μs 和 165 μs ,脉冲宽度分别为 32 μs 和 27 μs 。Nag and Rakov (2008) 发现与负地闪预击穿过程相似,但其后未发生回击的一类云内放电过程,在开始和结束阶段对应的电场波形均为宽度为 1~2 μs 的极窄脉冲;脉冲序列持续时间的统计平均值为 2.7 ms,脉冲宽度的统计平均值为 17 μs ,脉冲时间间隔的统计平均值为 73 μs 。Nag et al. (2009) 对 12 次地闪和 12

次云闪过程初始阶段对应的电场波形特征进行了统计分析,发现脉冲序列以幅值较小且宽度较窄的小脉冲为主,云闪起始阶段 26 % 的脉冲和地闪预击穿阶段 22 % 的脉冲,其宽度小于 1 μs 。陈成品等 (2005) 对地闪甚高频辐射资料进行了统计分析,发现地闪预击穿过程 VHF 辐射波形中的孤立脉冲数大于梯级先导中的孤立脉冲数。王东方等 (2009) 利用多站快电场资料对云闪起始过程的辐射脉冲进行了定位分析,认为在雷暴发展的最旺盛阶段,云闪起始过程的辐射脉冲发生区域较高,随着雷暴的减弱,发生高度较低。

根据雷暴云电荷结构特征分析,Qie et al. (2005) 认为在高原三极性的雷暴云中,闪电多发生于雷暴云下部的偶极子,云闪多为反极性且起始于负电荷区,虽然存在较大的下部正电荷区 (Lower Positive Charge Center, 简称 LPCC),但可能由于其下部没有反极性电荷,所以较难发生正地闪,而负地闪多发生在雷暴发展后期 LPCC 减弱时,高原地区雷暴云下部较大的 LPCC 的存在阻碍了负地闪的形成。Nag and Rakov (2009) 对闪电初始阶段电场波形特征进行归类分析,也发现雷暴云下部较大的正电荷区会阻碍初始放电向下发展形成地闪。Shao and Heavner (2006) 利用改进的传输线模型 (Nucci et al., 1998; Shao et al., 2004) 对闪电初始阶段电场波形中的双极性大脉冲序列进行了模拟分析,对初始放电阶段电流脉冲的产生机制进行了解释。

本文利用 2008 年西藏羊八井地区 [(30°13'N, 90°26'E), 海拔高度 4300 m] 和 2009 年东北大兴安岭地区 [(124°6'N, 50°18'E), 海拔高度 390 m] 快天线闪电电场变化仪观测资料进行分析。对两个地区的云闪起始阶段和地闪预击穿阶段电场变化波形特征进行了统计比较,统计包括脉冲类型、归一化幅值和脉冲宽度等,结合雷暴云电荷结构对统计结果的地区差异进行了讨论;根据统计得到的电场波形中双极性脉冲序列的特征,从理论上对双极性脉冲序列产生的物理机制进行了分析。

2 实验仪器和数据分析方法

2008 年、2009 年分别在西藏羊八井地区、东

北大兴安岭地区开展了闪电观测试验, 观测仪器主要包括, 用于测量雷暴电场的大小和极性的的大气平均电场仪, 测量范围可选, 包括 ± 10 kV/m 和 ± 100 kV/m 两个选择档, 响应时间为 0.1 s, 探测频段范围为 DC-1 kHz; 用于测量闪电电场变化的快天线闪电电场变化仪和慢天线闪电电场变化仪, 采样率为每秒记录 5×10^6 个采样点, 探测频段范围分别为 1 kHz~2 MHz 和 10 Hz~1 MHz, 时间常数分别为 0.1 ms 和 6 s; 用于提供信号触发时间的高精度 GPS 时钟, 授时精度为 50 ns。

在观测试验开始前, 我们对快(慢)天线闪电电场变化仪进行了标定, 从而得到实测的闪电电场变化的绝对值。快(慢)天线闪电电场变化仪标定系统示意图如图 1 所示, 将信号发生器输出的正弦波信号加在平板上, 平板上所加电压大小的变化使快(慢)天线与平板之间的电场发生变化, 快(慢)天线感应板的感应电荷量大小发生变化, 示波器测量的是快(慢)天线感应板上的电压变化。将与快天线在同一平面的圆环平板与信号发生器的接地端相连接, 使得圆环平板与大地的电位相同, 消除了快(慢)天线感应板由于与地面存在高度差而导致所测量的是发生畸变的电场。实际观测时, 由于快天线的天线板下有支架, 因此并不是完全与地面相平。由于天线板的高度约为 70 cm, 远小于测站与闪电之间的距离, 因此电场畸变的影响较小可忽略。

根据示波器测量的电压的峰值 V_{out} 与平板上所加电压的峰值 V_{in} , 由 (1) 式计算可得标定系数 S 。其中, 平板与快(慢)天线感应板之间的距离 d 为 1.42 cm, 保持平板上所加信号的电压峰值不变,

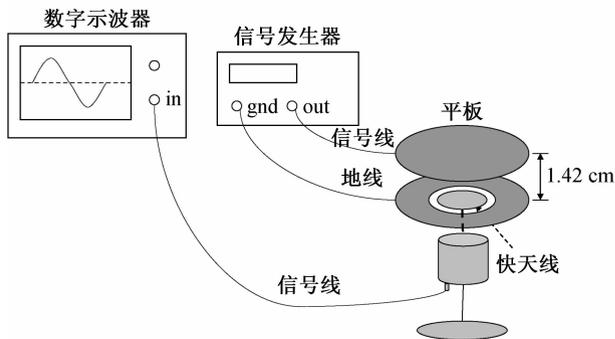


图 1 快、慢天线闪电电场变化仪标定系统示意图

Fig. 1 The diagram of calibration system of fast antenna and slow antenna used for measuring lightning electric field change

在快(慢)天线所测带宽范围内更改信号发生器输出的信号频率, 得到所测带宽范围内标定系数的变化情况, 标定试验得到的快天线的标定系数 S 的平均值为 2.84×10^{-3} , 将实测的电压变化值和标定系数 S 代入 (2) 式, 可计算得到实测的闪电引起的电场变化值 (E)。

$$S = \frac{V_{out}}{E} = \frac{V_{out}}{V_{in}E} \times V_{in} = \frac{V_{out}}{V_{in}E} \times Ed = \frac{V_{out}}{V_{in}} \times d, \quad (1)$$

$$E = \frac{V_{out}}{S}. \quad (2)$$

在西藏羊八井地区进行的闪电观测只有 1 个月的时间, 期间只有三次比较强的雷暴过程, 观测到比较强的负地闪只有 7 次。为了能够较好地进行对比分析, 所选资料包括 2008 年西藏羊八井地区 7 次负地闪和 12 次云闪, 初始放电阶段电场波形中共有 1088 个脉冲; 2009 年东北地区 7 次负地闪和 12 次云闪, 初始放电阶段电场波形中共有 908 个脉冲。通过对快天线闪电电场变化仪测量的电场变化数据(以下简称快电场变化)的分析, 将波形规则的脉冲归类如下, (1) 按照脉冲极性变化特征分为正单极性脉冲(正脉冲)、负单极性脉冲(负脉冲)、正双极性脉冲和负双极性脉冲四类; (2) 对每一个闪电进行统计时, 均以该闪电快电场变化波形中幅值最大的双极性脉冲(以下简称双极性大脉冲)为标准, 对脉冲幅值进行归一化, 其中, 单极性脉冲的幅值对应于脉冲的峰值, 双极性脉冲的幅值对应于脉冲的峰峰值。按照归一化幅值将脉冲分为极小脉冲(≤ 0.25)、小脉冲(> 0.25 且 ≤ 0.5)、中等脉冲(> 0.5 且 ≤ 0.75)、大脉冲(> 0.75 且 ≤ 1.0) 四类; (3) 按照脉冲宽度分为窄脉冲($\leq 10 \mu s$)和宽脉冲($> 10 \mu s$) 两类。这种分类是依据对脉冲宽度的大量统计分析, 脉冲宽度小于 $10 \mu s$ 的小脉冲对应于较小空间尺度的击穿放电。

3 分析结果

3.1 云闪起始阶段电场变化特征

3.1.1 一次云闪起始阶段电场变化特征

图 2a 所示为青藏高原地区一次云闪过程起始阶段快电场变化波形图, 图中所示快电场变化值为标定后的电场变化值, 这里规定电场正向变化, 对应云中的负电荷被中和, 反之亦然(下同)。根据

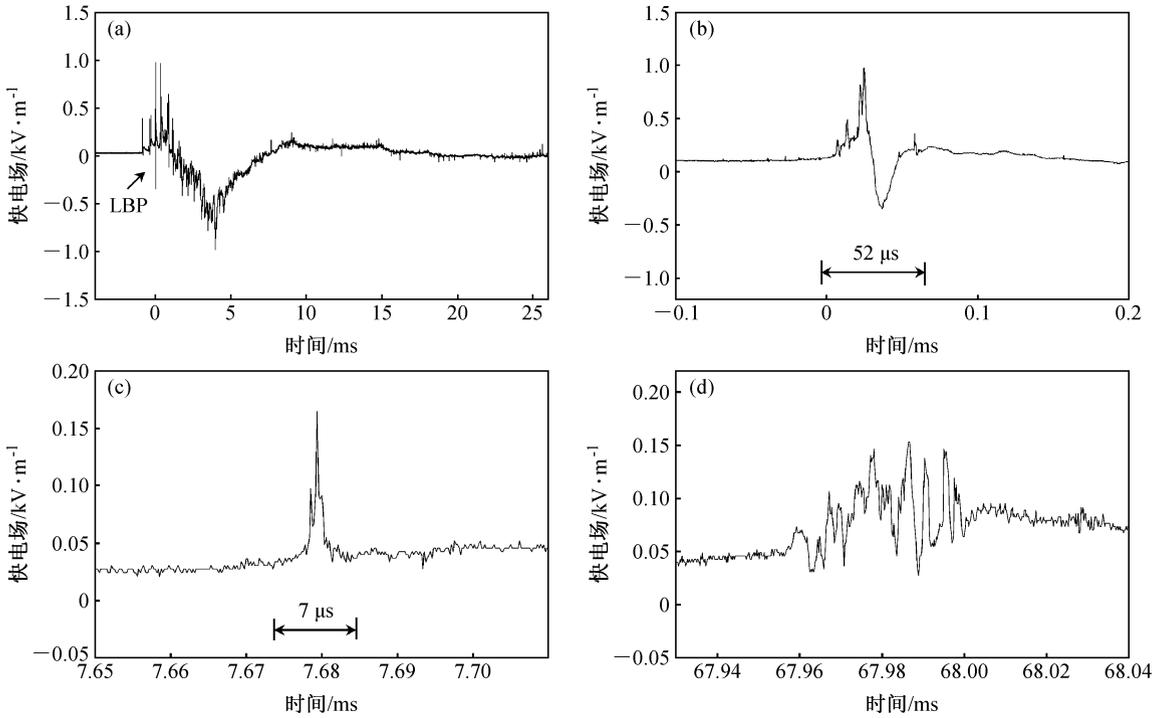


图2 云闪 20080818204336 快电场变化波形图: (a) 起始阶段快电场变化; (b) 典型的正双极性大脉冲; (c) 负极性窄脉冲; (d) “杂乱”脉冲
Fig. 2 Electric field record of intracloud (IC) flash 20080818204336: (a) Electric field record of initial stage of IC flash; (b) positive large bipolar pulse; (c) negative narrow unipolar pulse; (d) “chaotic” pulse

观测时的声光差记录, 这次云闪过程发生的位置距离测站约 3 km, 以双极性大脉冲 (Large Bipolar Pulse, 简称 LBP) 起始时间作为数据记录的时间零点, 脉冲序列总长度为 31 ms; 图 2b 所示为典型的正双极性大脉冲, 脉冲宽度为 $52 \mu\text{s}$, 归一化幅值为 1; 图 2c 所示为正极性窄脉冲, 脉冲宽度为 $7 \mu\text{s}$, 归一化幅值为 0.1; 图 2d 所示为波形变化呈“杂乱”状的不规则脉冲, 统计中不包括这类脉冲。

下面从归一化幅值和脉冲宽度两方面, 对图 2a 所示的云闪起始阶段快电场波形特征进行统计分析, 选择的脉冲总样本数为 118。其中, 负双极性脉冲样本数为 14, 占总数的 12%; 正双极性脉冲样本数为 28, 占总数的 24%; 负脉冲样本数为 29, 约占总数的 24%; 正脉冲样本数为 47, 占总数的 40%。宽度小于等于 $4 \mu\text{s}$ 的脉冲样本数为 50, 占总数的 42%; 宽度大于 $4 \mu\text{s}$ 且小于等于 $10 \mu\text{s}$ 的脉冲样本数为 55, 占总数的 47%; 宽度大于 $10 \mu\text{s}$ 且小于等于 $20 \mu\text{s}$ 的脉冲样本数为 8, 占总数的 7%; 宽度大于 $20 \mu\text{s}$ 的脉冲样本数为 5, 占总数的 4%。图 3a-d 给出了不同归一化幅值、宽度和极性的脉冲个数的分布, 从归一化幅值看, 大多数脉

冲属于极小脉冲; 从脉冲宽度看, 大多数脉冲属于窄脉冲, 且集中分布在 LBP 出现的前后, 窄脉冲与极小脉冲数随时间的变化趋势基本一致; 从脉冲极性看, 大多数脉冲属于单极性脉冲。

3.1.2 云闪起始阶段脉冲序列特征统计

表 1 给出了对大兴安岭地区 12 次云闪起始阶段快电场变化波形中脉冲特征的统计结果, 不同云闪中, 小脉冲和极小脉冲总共所占比例为 59%~99%, 窄脉冲所占比例为 14%~85%。表 2 给出了羊八井地区 12 次云闪起始阶段脉冲特征的统计结果, 不同云闪中, 小脉冲和极小脉冲总共所占比例为 87%~97%, 窄脉冲所占比例为 12%~94%。从脉冲归一化幅值分布看, 两个地区云闪起始阶段脉冲特征无明显差异。Nag et al. (2009) 对 Florida 地区的 12 次云闪进行了统计, 发现不同云闪中, 小脉冲和极小脉冲总共所占比例为 52%~99%, 脉冲宽度小于等于 $4 \mu\text{s}$ 的窄脉冲所占比例为 73%~95%。与之不同的是, 这里将脉冲宽度小于等于 $10 \mu\text{s}$ 的脉冲归类为窄脉冲, 从统计结果对比分析来看, 与 Florida 地区相比, 这里的统计给出的窄脉冲所占比例相对较小。

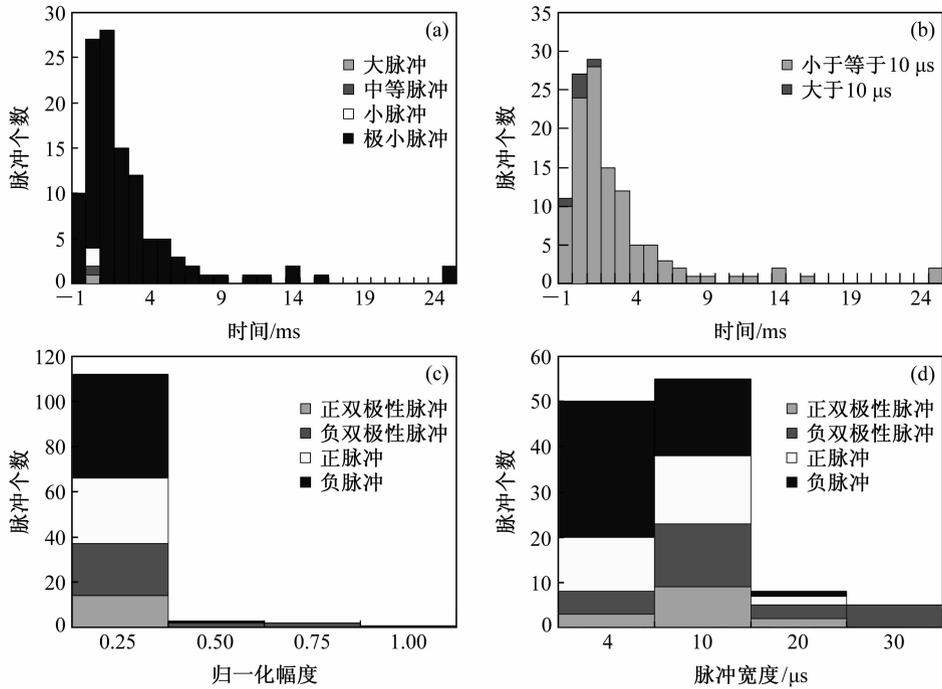


图 3 云闪 20080818204336 起始阶段脉冲特征：(a) 不同幅值脉冲随时间的分布；(b) 不同宽度脉冲随时间的分布；(c) 不同幅值脉冲对应脉冲类型的分布；(d) 不同宽度脉冲对应脉冲类型的分布

Fig. 3 Characteristics of pulses during the initial stage of IC flash 20080818204336: (a) Occurrence of pulses with different amplitudes during the initial stage of IC flash; (b) occurrence of pulses with different pulse widths during the initial stage of IC flash; (c) histogram of pulse amplitude for four types of pulses in the flash; (d) histogram of pulse width for four types of pulses in the flash

表 1 大兴安岭地区 12 次云闪起始阶段小脉冲和窄脉冲所占比例

Table 1 Summary of occurrence of smaller and narrower pulses in 12 selected IC flashes observed in Da Hinggan Ling

闪电序号 (年/月/日/时/分)	脉冲总数	小脉冲与极小脉冲数 (所占比例)			脉冲宽度小于或等于 10 μs 的脉冲数 (所占比例)		
		双极性	单极性	总计	双极性	单极性	总计
200906171304	21	2	17	19(90%)		3	3(14%)
200906171306	34	17	16	33(97%)	2	4	6(18%)
200906171307	30	3	22	25(83%)	1	4	5(17%)
200906171308	32		22	22(69%)		18	18(56%)
200907060109	23	7	14	21(91%)	3	8	11(48%)
200907060119	209	77	131	208(99%)	15	72	87(42%)
200907060121	45	24	20	44(98%)	9	15	24(53%)
200907060123	27	6	10	16(59%)	2	2	4(15%)
200907061421	87	37	48	85(98%)	21	34	55(63%)
200907061430	38	12	22	34(89%)	10	19	29(76%)
200907061432	59	15	36	51(86%)	15	35	50(85%)
200908102040	32	7	23	30(94%)	4	19	23(72%)
总计	637	207	381	588(92%)	82	233	315(49%)

图 4a 和图 4b 分别给出了大兴安岭地区 12 次云闪和羊八井地区 12 次云闪起始阶段不同宽度脉冲所占的比例。可以看出，脉冲宽度的分布均呈对

数正态分布，大兴安岭地区，脉冲宽度算术平均值为 17.6 μs，窄脉冲所占比例为 49%，其中 8% 的脉冲，宽度小于等于 4 μs；羊八井地区，脉冲宽度算

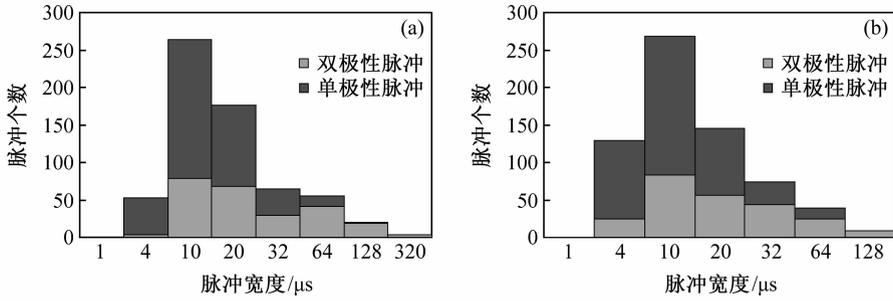


图4 云闪起始阶段脉冲个数按照脉冲宽度大小分布图：(a) 大兴安岭地区 12 次云闪；(b) 羊八井地区 12 次云闪

Fig. 4 Histogram of unipolar and bipolar pulses vs. pulse width during the initial stage of IC flashes: (a) 12 selected IC flashes observed in Da Hinggan Ling; (b) 12 selected IC flashes observed in Yangbajing

表 2 羊八井地区 12 次云闪起始阶段小脉冲和窄脉冲所占比例

Table 2 Summary of occurrence of smaller and narrower pulses in 12 selected IC flashes observed in Yangbajing

闪电序号 (年/月/日/时/分)	脉冲总数	小脉冲与极小脉冲数 (所占比例)			脉冲宽度小于或等于 $10\mu\text{s}$ 的脉冲数 (所占比例)		
		双极性	单极性	总计	双极性	单极性	总计
200808151816	51	14	35	49(96%)	5	24	29(57%)
200808151821	33	11	19	30(91%)	5	8	13(39%)
200808151835	25	12	10	22(88%)		3	3(12%)
200808182032	70	25	36	61(87%)	6	17	23(33%)
200808182037	53	22	29	51(96%)	9	10	19(36%)
200808182038	67	16	49	65(97%)	11	44	55(82%)
200808182040	29	8	20	28(97%)	2	15	17(59%)
200808182043	118	39	76	115(97%)	32	74	106(90%)
200808182049	81	16	59	75(93%)	8	40	48(59%)
200808182050	45	16	28	44(98%)	5	12	17(38%)
200808182054	62	27	33	60(97%)	26	32	58(94%)
200808182059	31	8	21	29(94%)		11	11(35%)
总计	665	214	415	629(95%)	109	290	399(60%)

术平均值为 $12.9\mu\text{s}$ ，窄脉冲所占比例为 60%，其中 20% 的脉冲，宽度小于等于 $4\mu\text{s}$ 。与低海拔地区相比，高原地区云闪起始阶段窄脉冲所占比例较高，脉冲宽度算术平均值较小。

3.2 地闪预击穿阶段电场变化特征

3.2.1 一次负地闪预击穿阶段电场变化特征

图 5a 所示为青藏高原地区一次负地闪过程的快电场变化波形图，根据观测时的声光差记录，这次地闪过程发生的位置距离测站约 6 km；图 5b 所示为预击穿阶段，图中以双极性大脉冲 LBP 的起始时间作为数据记录的时间零点，脉冲序列总长度为 20 ms；图 5c 所示为典型的正双极性大脉冲，脉冲宽度为 $57\mu\text{s}$ 。

下面从归一化幅值和脉冲宽度两方面，对图

5b 所示的脉冲序列进行统计分析，选择的脉冲总样本数为 78，其中负双极性脉冲样本数为 5，占总数的 6%；正双极性脉冲样本数为 25，占总数的 32%；负脉冲样本数为 7，占总数的 9%；正脉冲样本数为 41，占总数的 53%。宽度小于等于 $4\mu\text{s}$ 的脉冲样本数为 9，约占总数的 11%；宽度大于 $4\mu\text{s}$ 且小于等于 $10\mu\text{s}$ 的脉冲样本数为 42，占总数的 54%；宽度大于 $10\mu\text{s}$ 且小于等于 $20\mu\text{s}$ 的脉冲样本数为 17，占总数的 22%；宽度大于 $20\mu\text{s}$ 的脉冲样本数为 10，占总数的 13%。图 6a-d 给出了不同归一化幅值、宽度和极性的脉冲个数的分布情况，从归一化幅值看，大多数脉冲属于极小脉冲；从脉冲宽度看，大多数脉冲属于窄脉冲，且集中分布在 LBP 出现的前后，与云闪不同的是，在 LBP 出现

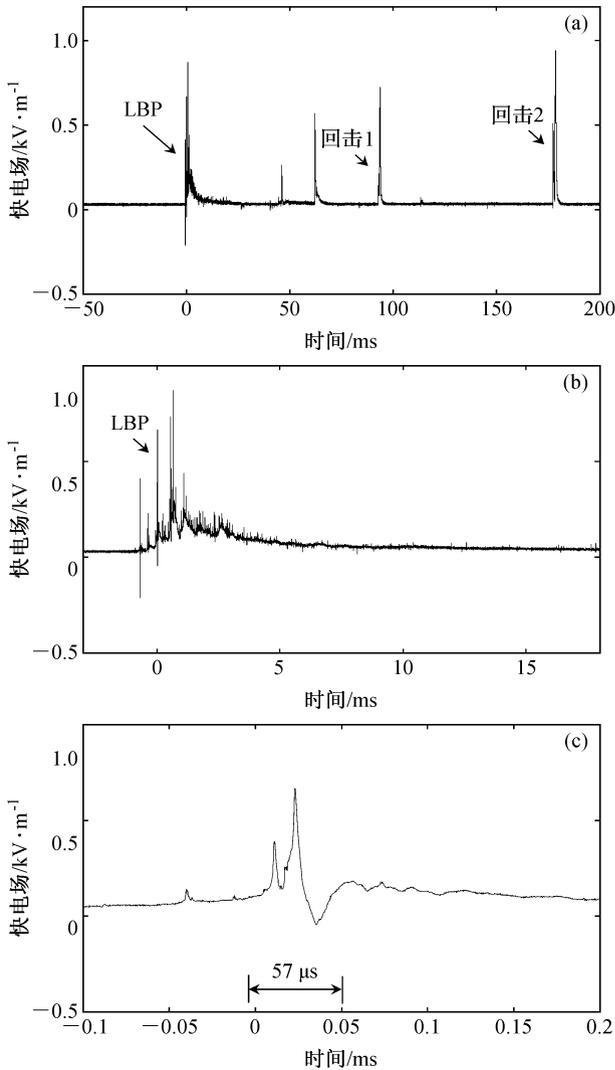


图5 负地闪 20080815184231 快电场变化波形图: (a) 地闪过程快电场变化波形图; (b) 预击穿阶段脉冲序列; (c) 典型的正双极性大脉冲

Fig. 5 Electric field record of negative cloud-to-ground (CG) flash 20080815184231: (a) Electric field waveform of the whole CG flash; (b) electric field record of preliminary breakdown of CG flash; (c) positive large bipolar pulse

3 ms 之后, 窄脉冲与极小脉冲数随时间变化的分布基本一致; 从脉冲极性看, 大多数脉冲属于单极性脉冲。

与图 3 中的云闪统计结果不同, 地闪电场变化波形特征的统计表明, 在 LBP 出现之后约 2 ms, 窄脉冲数才达到峰值, 在 LBP 出现之后约 5 ms, 窄脉冲数达到另一个峰值。双极性大脉冲幅值与首次回击峰值之比为 1.46。极小脉冲对应强度较弱的电流脉冲, 窄脉冲对应持续时间较短的电流脉

冲。雷暴云下部正电荷区的存在会造成强电场区 (Pawar and Kamra, 2004), 地闪开始于雷暴云主负电荷区对下部正电荷区的负极性击穿放电, 在此期间出现了 LBP, 然后在负电荷区与下部正电荷区之间产生大量的击穿放电, 对应的快电场变化以大量小脉冲、极小脉冲为主, 大量的击穿放电使得放电先导穿过下部正电荷区, 形成地闪。

3.2.2 地闪预击穿阶段脉冲序列特征统计

表 3 给出了大兴安岭地区 7 次负地闪预击穿阶段脉冲特征的统计结果, 不同地闪中, 小脉冲和极小脉冲总共所占比例为 39%~95%, 窄脉冲所占比例为 83%~100%。表 4 给出了羊八井地区 7 次负地闪预击穿阶段脉冲特征的统计结果, 可以看出, 高原地区总脉冲数远大于低海拔地区。不同地闪中, 小脉冲和极小脉冲总共所占比例为 77%~97%, 窄脉冲所占比例为 60%~87%。Nag et al. (2009) 对 Florida 地区的 12 次地闪进行了统计, 发现不同地闪的预击穿过程中, 小脉冲和极小脉冲总共所占比例为 57%~98%, 脉冲宽度小于等于 4 μs 的窄脉冲所占比例为 22%~89%。从统计结果对比分析来看, 与 Florida 地区相比, 我们的统计给出的小脉冲和极小脉冲所占的比例相对较小。Qie et al. (2002) 对中国内陆高原地区地闪首次回击前, 预击穿阶段对应的慢电场变化波形中的脉冲特征进行了统计, 分析的负地闪共 152 个脉冲的持续时间为 $32.0 \pm 20.0 \mu\text{s}$ 。与之相比, 我们的统计得到的脉冲宽度的变化范围较大。

我们对大兴安岭地区和羊八井地区地闪双极性大脉冲幅值与首次回击峰值之比进行了统计, 比值分别为 0.14~1.46 和 0.03~1.64, 平均值分别为 0.65 和 0.48。幅值可与回击峰值相比拟的双极性大脉冲数在总脉冲数中所占的比例分别为 7%和 4%。

图 7a、b 给出了大兴安岭地区 7 次负地闪和羊八井地区 7 次负地闪预击穿阶段脉冲总数按照脉冲宽度大小的分布。可以看出, 脉冲宽度的分布均呈对数正态分布。大兴安岭地区, 脉冲宽度算术平均值为 4.4 μs , 窄脉冲所占比例为 94%, 其中 62% 的脉冲宽度小于等于 4 μs ; 羊八井地区, 脉冲宽度算术平均值为 10 μs , 窄脉冲所占比例为 70%, 其中 18% 的脉冲宽度小于等于 4 μs 。与低海拔地区相比, 高原地区地闪预击穿阶段窄脉冲所占比例较低, 脉冲宽度算术平均值较大。

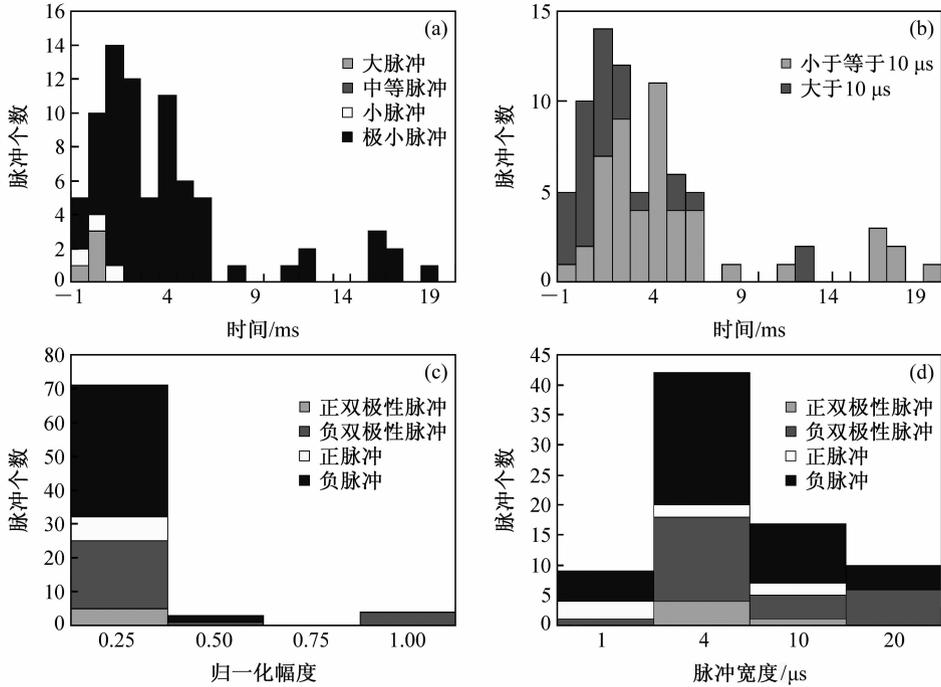


图 6 负地闪 20080815184231 预击穿阶段脉冲特征, 其余同图 3

Fig. 6 Same as Fig. 3, but for characteristics of pulses during the preliminary breakdown process of negative CG flash 20080815184231

表 3 大兴安岭地区 7 次地闪预击穿阶段小脉冲和窄脉冲所占比例

Table 3 Summary of occurrence of smaller and narrower pulses in seven selected CG flashes observed in Da Hinggan Ling

闪电序号 (年/月/日/时/分)	脉冲总数	小脉冲与极小脉冲数 (所占比例)			脉冲宽度小于或等于 $10 \mu s$ 的脉冲数 (所占比例)		
		双极性	单极性	总计	双极性	单极性	总计
200906171259	31	5	20	25 (81%)	4	23	27 (87%)
200906171301	30	3	16	19 (63%)	5	20	25 (83%)
200906181602	22	1	8	9 (41%)	7	15	22 (100%)
200906181606	23	3	6	9 (39%)	6	14	20 (87%)
200908101725.06	78	43	31	74 (95%)	46	31	77 (99%)
200908101725.29	19	6	10	16 (84%)	6	12	18 (95%)
200908101726	68	17	46	63 (93%)	20	45	65 (96%)
总计	271	78	137	215 (79%)	94	160	254 (94%)

表 4 羊八井地区 7 次地闪预击穿阶段小脉冲和窄脉冲所占比例

Table 4 Summary of occurrence of smaller and narrower pulses in seven selected CG flashes observed in Yangbajing

闪电序号 (年/月/日/时/分)	脉冲总数	小脉冲与极小脉冲数 (所占比例)			脉冲宽度小于或等于 $10 \mu s$ 的脉冲数 (所占比例)		
		双极性	单极性	总计	双极性	单极性	总计
200808151812	48	23	20	43 (90%)	19	19	38 (79%)
200808151813	31	12	18	30 (97%)	12	15	27 (87%)
200808151826	129	56	65	121 (94%)	40	55	95 (74%)
200808151839	40	14	21	35 (88%)	6	18	24 (60%)
200808151842	78	26	48	74 (95%)	19	32	51 (65%)
200808151843	39	16	14	30 (77%)	13	12	25 (64%)
200808182054	58	29	26	55 (95%)	17	18	35 (60%)
总计	423	176	212	388 (92%)	126	169	295 (70%)

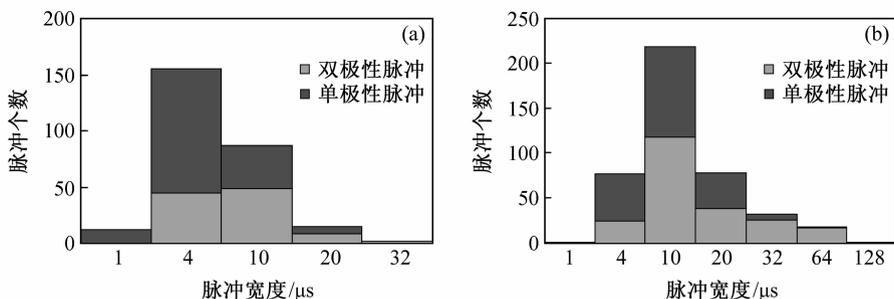


图7 地闪预击穿阶段脉冲个数按照脉冲宽度大小分布图: (a) 大兴安岭地区7次地闪; (b) 羊八井地区7次地闪

Fig. 7 Histogram of unipolar and bipolar pulses vs. pulse width during the preliminary breakdown process of CG flashes: (a) Seven selected CG flashes observed in Da Hinggan Ling; (b) seven selected CG flashes in Yangbajing

从云闪起始阶段脉冲特征的统计可以看出, 高原地区和低海拔地区云闪起始阶段的脉冲总数相差不多, 以小脉冲和极小脉冲为主, 高原地区窄脉冲所占的比例较高; 从地闪预击穿阶段脉冲特征的统计可以看出, 高原地区脉冲总数远大于低海拔地区, 高原地区窄脉冲所占的比例较低, 脉冲幅值可与首次回击峰值相比拟的双极性大脉冲的发生比例较低。

位于较高纬度的大兴安岭地区与高原地区的闪电活动特征有明显区别。对羊八井地区2009年6月至8月闪电观测资料进行的统计发现, 所有地闪均为负地闪, 负地闪占闪电总数的比例约为14.6%, 所有负地闪首次回击之前都有持续时间较长的预击穿过程, 对应的电场变化表现为双极性脉冲簇。对大兴安岭地区2009年6月至8月的闪电观测资料进行的统计发现, 地闪占闪电总数的比例为18.4%, 且统计的52次负地闪中约55.8%的负地闪首次回击之前有较长持续时间的预击穿过程。

雷暴云通常具有三极性的电荷结构特征 (Williams, 1989), Krehbiel et al. (2003) 对 LMA (Lightning Mapping Array) 定位资料的分析发现, 云闪一般起始于中部主负电荷区向上部正电荷区发展的击穿放电, 而地闪一般起始中部主负电荷区向下发展的击穿放电。张义军等 (2008) 分析 LMA 定位资料发现, 负地闪预击穿过程的发展与云下部正电荷区有关。郭凤霞等 (2007) 利用三维强风暴动力和电耦合模式模拟青藏高原那曲地区雷暴过程的电荷结构, 发现雷暴云呈明显的三极性电荷结构。青藏高原平均海拔高度为4000 m以上, 由于受其大范围热、动力作用的影响, 使得青藏高原及

邻近地区的夏季闪电活动具有一定的特殊性, 与低海拔地区相比, 存在较大的下部正电荷区 (Qie et al., 2005; 张廷龙等, 2008, 2009)。这可能是高原地区闪电初始阶段脉冲特征与低海拔相比, 较为复杂的主要原因。

3.3 闪电初始放电阶段电场波形脉冲序列模拟

根据电场探空结果 (Marshall et al., 1995), 闪电放电起始位置的电场虽然低于空气击穿要求的电场, 但满足发生逃逸击穿放电所需的条件, 因此, 对于现有的闪电激发机制的理论分析, 这里倾向于逃逸击穿机制 (Gurevich et al., 1992, 1997; Gurevich and Zybin, 2001; Dwyer, 2005) 对闪电的激发过程的解释。闪电激发之后的初始击穿放电, 会形成持续的电流脉冲, 随着通道的不断延伸与通道本身电导率的变化, 电流脉冲的速度、持续时间、传输距离都会发生变化, 其产生的辐射场也会发生相应的变化, 电场变化波形表现为不同归一化幅值、不同脉冲宽度的脉冲序列。通常以一个或几个幅值较小的脉冲开始, 之后出现双极性大脉冲, 双极性大脉冲之后可能会连续出现几个幅值较大的双极性脉冲, 这之后是以单极性窄脉冲为主的脉冲序列, 有时也会出现幅值较大的宽脉冲。Kasemir (1960) 在对闪电通道进行理想化假定的情况下, 曾对闪电放电过程进行了模拟分析。Shao and Heavner (2006) 利用改进传输线模型 (Nucci et al., 1988) 对辐射场波形中的脉冲序列进行了模拟分析, 在模型中假设波形中的脉冲对应于放电通道发展过程中, 从通道头部向通道尾部传输的电流脉冲。由于只针对闪电初始放电阶段进行模拟, 假设放电通道沿垂直方向发展, 对应的电流脉冲产生的辐射场变化由公式 (3) 给出。

$$E_z = \frac{v}{2\pi\epsilon_0 c^2 r} \left[i(0, t') - \frac{1}{\lambda} \int_0^{L'} i(0, t' - z'/v) e^{-z'/\lambda} dz' \right], \quad (3)$$

其中, c 为真空中的光速, v 为电流的传输速度, r 为电流脉冲与测站间的距离, z' 为电流脉冲沿通道方向与通道头部之间的距离, t' 为推迟时间, $L' = vt'$ 为放电通道总长度, λ 为静止坐标系中电流传输过程中的衰减长度, 且满足 $\lambda \ll r$ 。假设起始电流脉冲 $i(0, t')$ 变化波形为 Gaussian 形状, 根据 (3) 式, 辐射场波形主要受到三个参量的影响: (1) 电流衰减长度 λ 越长, 辐射场波形越趋近于单极性且幅值越大; (2) 传输速度 v 越大, 辐射场波形越趋近于双极性且幅值越大; (3) 起始电流脉冲宽度 t' 越大, 辐射场波形越趋近于双极性且幅值越小。

从 Shao and Heavner (2006) 的模拟结果来看, 双极性大脉冲前后的两个小脉冲幅值基本相同, 双极性大脉冲幅值与两个小脉冲幅值的比值均小于 2, 这与我们的实测结果不一致。通过对实测波形中与双极性大脉冲临近的两个小脉冲的统计分析, 我们发现, 统计的羊八井地区 19 次闪电中 16 (17) 次闪电的初始阶段, 双极性大脉冲幅值与其前 (后) 面的小脉冲幅值之比大于 2, 占闪电总数的 84% (89%); 统计的大兴安岭地区 19 次闪电中 14 (16) 次闪电的初始阶段, 双极性大脉冲幅值与其前 (后) 面的小脉冲幅值之比大于 2, 占闪电总数的 74% (84%)。统计还发现, 双极性大脉冲的脉冲宽度均大于其前后临近的两个小脉冲。此外, 统计的绝大多数双极性大脉冲的初始半周峰值远大于相反极性的后半周峰值, 且初始半周的电场变化波形上升沿很陡。我们对这个问题进行了分析, 认为其与起始电流脉冲特征有关, Shao and Heavner (2006) 在模拟脉冲序列时, 假定起始电流脉冲为 Gaussian 形状, 模拟结果不能很好地反映实测波形的上述特征。

Heidler 函数 (1985) 一般用于地闪回击通道底部电流波形的模拟, 考虑到云内存在大量的自由电荷, 初始放电接近垂直发展, 放电发展过程产生较大的电场变化, 可将公式 (4) 给出的 Heidler 函数用于模拟云内初始放电阶段的击穿电流。

$$i(0, t) = \frac{i_0}{u} \frac{(t/\tau_1)^2}{[(t/\tau_1)^2 + 1]} e^{-t/\tau_2}, \quad (4)$$

其中, i_0 为电流峰值, u 为电流峰值修正因子, τ_1 决

定波形的上升时间, τ_2 决定波形的下降时间。因为主要模拟起始电流波形的变化特征, 不做定量分析, 所以 Heidler 函数中的参数选取经验值 (Nucci et al., 1993), $i_0 = 10.7 \text{ kA}$, $u = 2$, $\tau_1 = 0.25 \mu\text{s}$, $\tau_2 = 2.5 \mu\text{s}$ 。利用 Heidler 函数模拟的起始电流波形能够较好地反映电流快速上升、而后缓慢下降的特征。

我们根据 Shao and Heavner (2006) 的方法, 对闪电初始放电阶段快电场变化波形中的脉冲序列进行了模拟, 不同的是, 这里利用 Heidler 函数模拟起始电流波形, 并对 Shao and Heavner (2006) 假定的电流传输速度与电流衰减长度两个参量的变化值做了一些调整, 电流传输速度和电流衰减长度均先增大后减小。模拟结果如图 8 所示, 不同脉冲对应于不同的放电过程, 这里为了更好的显示脉冲序列的波形特征, 脉冲之间的时间间隔设置较小, 为 $30 \mu\text{s}$ (实测的脉冲间隔一般为数百微秒)。模拟中假定电流脉冲发生位置与测站间的距离为 20 km , 双极性大脉冲对应的起始电流脉冲宽度为 $20 \mu\text{s}$, 电流传输速度为 $1.2 \times 10^8 \text{ m/s}$, 电流衰减长度为 200 m 。模拟结果较好地反映了实测电场波形的特征, 从模拟结果可以看出, 脉冲序列以幅值较小的脉冲开始, 之后出现双极性大脉冲, 然后连续出现几个幅值较大的双极性脉冲, 最后表现为幅值较小的单极性窄脉冲; 双极性脉冲的初始半周峰值远大于相反极性的后半周峰值, 且初始半周上升沿很陡。与其前后的脉冲相比, 双极性大脉冲对应的电流传输速度较大, 电流衰减长度较大, 使得双极性大脉冲的幅值远大于其它脉冲。

由于实际闪电放电通道的发展与空间电位、电荷分布等有关, 通道可能会发生弯曲、多级分叉等,

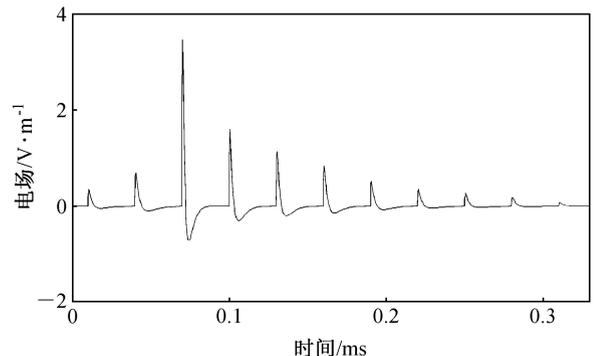


图 8 双极性脉冲序列模拟图

Fig. 8 Simulation of bipolar pulse trains

模型中影响波形特征的参量不能全面反映这些因素的影响。模型中的假设不能完全真实地模拟自然闪电, 因此实测的电场波形与模拟得到的波形相比, 会多出一些次峰, 可能是多个放电过程电场波形的叠加, 这也是雷暴云内电场环境与通道发展的复杂程度所致。基于 MTL 模型, 只能分析影响电场变化的部分参量, 不能给出对放电机制较为全面的物理解释。

4 结论与讨论

根据对云闪起始阶段和地闪预击穿阶段快电场变化波形中脉冲序列的统计, 及对脉冲序列产生机制的讨论, 我们得到以下分析结果。

(1) 闪电初始放电阶段对应的快电场变化波形表现为一系列不同极性、不同幅值和不同宽度的脉冲。根据对脉冲特征的统计分析, 初始阶段快电场变化波形以归一化幅值小于 0.5 的小脉冲和极小脉冲、宽度小于等于 $10 \mu\text{s}$ 的窄脉冲为主。脉冲幅值与脉冲宽度的变化基本成正比。对比高原地区一次云闪与负地闪, 发现在地闪预击穿阶段 LBP 出现 3 ms 之后, 窄脉冲与极小脉冲数随时间的分布情况才趋于一致, 而云闪起始阶段的窄脉冲与极小脉冲数随时间的分布特征始终保持一致。云闪和地闪初始阶段脉冲宽度的分布均呈对数正态分布。

(2) 高原地区云闪起始阶段脉冲总数同低海拔地区相比相差不大; 高原地区负地闪预击穿阶段脉冲总数同低海拔地区相比明显较大, 窄脉冲所占比例相对较低, 幅值可与首次回击峰值相比拟的双极性大脉冲的发生比例较低。高原地区雷暴云下部存在较大的正电荷区, 可能是高原地区地闪预击穿过程更为复杂的主要原因。关于正地闪预击穿过程由于目前没有观测到足够多的样本数, 将来会在一定资料积累量的基础上加以分析。

(3) 根据波形特征统计结果, 在 MTL 模型的基础上, 对闪电初始放电阶段电场变化波形中的脉冲序列的产生机制进行了模拟分析。模拟结果较好的反映了初始放电阶段对应的电场波形特征, 较大的电流传输速度和电流衰减长度, 是双极性大脉冲波形幅值远大于其它脉冲的主要原因。

闪电初始放电过程较为复杂, 仅利用放电模型对其物理机制进行解释比较局限, 基于放电模型的分析, 只能对影响电场变化的部分参量进行初步的

理论分析, 不能给出对放电过程较为全面的物理解释。今后的工作中需要结合闪电辐射源定位对辐射源时空分布的反演, 及多站慢电场同步定位观测对雷暴过程电荷源的反演结果, 对闪电初始放电的物理机制进行更为全面、详细的分析。

参考文献 (References)

- Beasley W H, Uman M A, Rustan P L. 1982. Electric fields preceding cloud-to-ground lightning flashes [J]. *J. Geophys. Res.*, 87: 4883 - 4902.
- 陈成品, 鄢秀书, 张泉, 等. 2005. 地闪放电过程的甚高频辐射特征分析 [J]. *中国电机工程学报*, 25 (19): 122 - 126. Chen Chengpin, Qie Xiushu, Zhang Quan, et al. 2005. Analysis of VHF radiations of discharging of cloud-to-ground flashes [J]. *Proceedings of the CSEE (in Chinese)*, 25 (19): 122 - 126.
- Clarence N D, Malan D J. 1956. Preliminary discharge processes in lightning flashes to ground [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 83 (356): 161 - 172.
- Dwyer J R. 2005. The initiation of lightning by runaway air breakdown [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L20808, doi: 10.1029/2005GL023975.
- 郭凤霞, 张义军, 穆穆弘. 2007. 青藏高原那曲地区雷暴云电荷结构特征数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 31 (1): 28 - 36. Guo Fengxia, Zhang Yijun, Yan Muhong. 2007. A numerical study of the charge structure in thunderstorm in Nagqu area of the Qinghai - Xizang Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (1): 28 - 36.
- Gurevich A V, Milikh G M, Roussel-Dupre R. 1992. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm [J]. *Physics Letters A*, 165: 463 - 468.
- Gurevich A V, Milikh G M, Valdivia J A. 1997. Model of x-ray emission and fast preconditioning during a thunderstorm [J]. *Physics Letters A*, 231: 402 - 408.
- Gurevich A V, Zybin K P. 2001. Runaway breakdown and electric discharges in thunderstorms [J]. *Phys. Usp.*, 44: 1119 - 1140.
- Heilder F. 1985. Traveling current source model for LEMP calculation [C]. *Proc. 6th International Symposium on EMC, Zurich, Switzerland*, 29F2, 157 - 162.
- Kasimir H W. 1960. A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge [J]. *J. Geophys. Res.*, 65 (7): 1873 - 1878.
- Krehbiel P, Rison W, Thomas R J, et al. 2003. Lightning Modes in Thunderstorms [C]. Presented at the Fall Meeting of the American Geophysical Union in San Francisco, California, December 2003.
- Marshall T, Rust W, Stolzenburg M. 1995. Electrical structure and updraft speeds in thunderstorms over the southern Great Plains [J]. *J. Geophys. Res.*, 100 (D1): 1001 - 1015.
- Nag A, Rakov V A. 2008. Pulse trains that are characteristic of preliminary breakdown in cloud-to-ground lightning but are not fol-

- lowed by return stroke pulses [J]. *J. Geophys. Res.*, 113, D01102, doi: 10.1029/2007JD008489.
- Nag A, DeCarlo B A, Rakov V A. 2009. Analysis of microsecond- and submicrosecond-scale electric field pulses produced by cloud and ground lightning discharges [J]. *Atmos. Res.*, 91: 316–325.
- Nag A, Rakov V A. 2009. Some inferences on the role of lower positive charge region in facilitating different types of lightning [J]. *Geophys. Res. Letts.*, 36, L05815, doi: 10.1029/2008GL036783.
- Nucci C A, Mazzetti C, Rachidi F, et al. 1988. On lightning return stroke current models for LEMP calculations [C]. Paper Presented at 19th International Conference on Lightning Protection, Austrian Electrotech. Assoc., Graz, Austria.
- Nucci C A, Rachidi F, Ianoz M V, et al. 1993. Lightning-induced voltages on overhead lines [J]. *IEEE. Trans. EMC.*, 35 (1): 75–86.
- Pawar S D, Kamra A K. 2004. Evolution of lightning and the possible initiation/triggering of lightning discharges by the lower positive charge center in an isolated thundercloud in the tropics [J]. *J. Geophys. Res.*, 109, D02205, doi: 10.1029/2003JD003735.
- Qie X S, Wang D H, Yu Y, 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 L, Chen C P, et al. 2005. The lower positive charge center and its effect on lightning discharges on the Tibetan Plateau [J]. *Geophys. Res. Letts.*, 32, L05814, doi: 10.1029/2004GL022162.
- Rakov V A, Uman M A, Hoffman G R, et al. 1996. Bursts of pulses in lightning electromagnetic radiation: Observations and implications for lightning test standards [J]. *IEEE. Trans. EMC.*, 38 (2): 156–164.
- Shao X M, Jacobson A R, Fitzgerald T J, et al. 2004. Radio frequency radiation beam pattern of lightning return strokes: A revisit of theoretical analysis [J]. *J. Geophys. Res.*, 109, D19108, doi: 10.1029/2004JS004612.
- Shao X M, Heavner M. 2006. On the VLF/LF radiation pulse shapes at the initial milliseconds of lightning discharges [C]. 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 402–404.
- Villanueva Y, Rakov V A, Uman M A. 1994. Microsecond-scale electric field pulses in cloud lightning discharges [J]. *J. Geophys. Res.*, 99 (D7): 14353–14430.
- 王东方, 鄒秀书, 袁铁, 等. 2009. 利用快电场变化脉冲定位进行云闪初始放电过程的研究 [J]. *气象学报*, 67 (1): 165–174. Wang Dongfang, Qie Xiushu, Yuan Tie, et al. 2009. An analysis on the initial stage of intracloud lightning with the location technique of fast electric change pulses [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67 (1): 165–174.
- Weidman C D, Krider E P. 1979. The radiation field wave forms produced by intracloud lightning discharge processes [J]. *J. Geophys. Res.*, 84 (C6): 3159–3164.
- Williams E R. 1989. The tripole structure of thunderstorms [J]. *J. Geophys. Res.*, 94 (D11): 13151–13167.
- 张廷龙, 鄒秀书, 袁铁, 等. 2008. 中国内陆高原地区典型雷暴过程的地闪特征及电荷结构反演 [J]. *大气科学*, 32 (5): 1221–1228. Zhang Tinglong, Qie Xiushu, Yuan Tie, et al. 2008. The characteristics of cloud to ground lightning flashes and charge structure of a typical thunderstorm in Chinese inland plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (5): 1221–1228.
- 张廷龙, 鄒秀书, 言穆弘, 等. 2009. 中国内陆高原不同海拔地区雷暴电学特征成因的初步分析 [J]. *高原气象*, 28 (5): 1006–1017. Zhang Tinglong, Qie Xiushu, Yan Muhong, et al. 2009. Preliminary analysis on formation of electrical characteristics of thunderstorm in different altitude regions in Chinese inland plateau [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28 (5): 1006–1017.
- 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.