



人工引发闪电上行负先导的发展传输特征

李宗祥 蒋如斌 吕冠霖 刘明远 孙竹玲 张鸿波 刘昆 李小强 张雄

Characteristics of rocket-triggered positive lightning flashes and propagation properties of their initial upward negative leaders

Li Zong-Xiang Jiang Ru-Bin Lü Guan-Lin Liu Ming-Yuan Sun Zhu-Ling Zhang Hong-Bo Liu Kun
Li Xiao-Qiang Zhang Xiong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 199201 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210283

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210283>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一次对地转移电荷极性两次反转的人工引发雷电特征及反转机制分析

Characteristics and mechanism of a triggered lightning with two polarity reversals of charges transferred to ground
物理学报. 2020, 69(18): 189201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200374>

闪电双向先导理论及观测:极性不对称、不稳定及间歇性

Theory and observation of bidirectional leader of lightning: Polarity asymmetry, instability, and intermittency
物理学报. 2018, 67(20): 205201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181079>

光电离速率影响大气压空气正流注分支的机理研究

Influence of photoionization rates on positive streamer branching in atmospheric air
物理学报. 2019, 68(9): 095202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190060>

基于正交传播算子的闪电宽带甚高频辐射源定位方法研究

Broadband very high frequency localization of lightning radiation sources based on orthogonal propagator method
物理学报. 2019, 68(16): 165202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190522>

同轴枪正、负脉冲放电等离子体特性的对比

Comparative study of positive and negative pulsed discharge plasma characteristics of coaxial gun
物理学报. 2020, 69(3): 035202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191321>

由正负磁单极对相互作用诱导的孤立狄拉克弦

Isolated Dirac string induced by interaction between positive and negative monopoles
物理学报. 2021, 70(7): 071401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201744>

人工引发闪电上行负先导的发展传输特征*

李宗祥¹⁾²⁾ 蒋如斌^{2)†} 吕冠霖¹⁾²⁾ 刘明远²⁾³⁾ 孙竹玲²⁾
张鸿波²⁾ 刘昆¹⁾ 李小强⁴⁾ 张雄⁴⁾

1) (成都信息工程大学电子工程学院, 成都 610225)

2) (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)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

4) (国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205)

(2021年2月6日收到; 2021年4月23日收到修改稿)

在地面大气电场为正极性的条件下, 成功实现 12 次人工引发闪电, 对其放电特征、初始阶段上行负先导的传输特征与机理进行了研究. 引发闪电时地面大气电场强度均值约 5 kV/m, 最高超过 13 kV/m. 除一个例的放电发生了正、极性反转并产生多次负回击以外, 其他 11 次引发闪电均未产生继后回击过程, 闪电放电电流总体上在几百安培量级. 引发闪电起始后, 其向上传输的负梯级先导平均二维速度为 1.85×10^5 m/s, 获得 132 次梯级的长度范围为 0.8—8.7 m, 平均 3.9 m. 先导起始阶段的电流和电磁场呈现显著的脉冲特征, 其脉冲间隔、电流峰值、转移电荷量、半峰值宽度、电流上升时间 $T_{10\%—90\%}$ 平均值分别为 17.9 μ s, 81 A, 364 μ C, 3.1 μ s 和 0.9 μ s, 单次梯级的等效线电荷密度为 118.5 μ C/m. 先导通道的分叉一般伴随梯级过程发生, 存在两种方式: 1) 先导头部前方成簇的空间茎/空间先导在同一梯级周期内先后与先导头部发生连接, 对应的电流脉冲表现为多峰结构, 峰值点时间间隔约 2—3 μ s, 最长 6—7 μ s; 2) 曾熄灭的空间茎/空间先导重燃后侧向连接至先导通道.

关键词: 人工引雷, 正极性闪电, 上行负先导, 梯级, 分叉

PACS: 92.60.Pw, 42.68.Ay

DOI: 10.7498/aps.70.20210283

1 引言

先导是闪电在强电场作用下形成放电通道的重要过程, 根据先导头部聚集电荷的极性分为正先导和负先导^[1,2]. 对先导传输特征与机制的探索, 主要通过对实验室长间隙放电及发展出云的自然先导(多为下行先导)进行光学拍摄, 并结合电磁辐射探测来实现^[3,4]. 研究表明击穿空气的负极性先导通常以梯级方式发展和传输, 即: 以一定的时间周期发生间歇停顿和跳跃前进. Schonland 等^[5]最

早利用时间分辨率为 600 ns 的 Boys 相机(也称条纹相机)拍摄到负先导梯级长度为 10—200 m, 先导间歇为 40—100 μ s, 二维发展速度为 3.8×10^5 m/s. Berger^[6]利用条纹相机拍摄到负先导梯级步长为 3—17 m, 梯级间隔为 29—47 μ s, 二维发展速度为 0.9×10^5 — 4.4×10^5 m/s. Gorin 等^[7]基于实验室火花放电, 将负先导的梯级过程分为三个阶段: 1) 先导头部流光区域出现相对黯淡的空间茎(space stem), 通过电流的加热发展为明亮发光的空间先导; 2) 空间先导双向发展, 其负极性端向前延伸, 而正极性端向后发展靠近先导的头部; 3) 双向先

* 国家重点研发计划(批准号: 2017YFC1501502)、国家自然科学基金(批准号: 41775012, 41630425)、四川省重点研发计划(批准号: 2019YFG0104)和中国科学院青年创新促进会资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jiangrubin@mail.iap.ac.cn

导的后端与先导头部发生连接,完成一次梯级跳跃,通道瞬时延展,双向先导向前发展的负极性端成为先导的新头部,先导随即停顿,进入下一梯级周期.由于火花放电与自然闪电在放电尺度、强度等方面的差异,实验室内揭示的负先导梯级机制是否适用于自然闪电,一直不是十分确定.利用高采样率的高速摄像, Biagi 等^[8]和 Hill 等^[9]分别在人工引雷和自然闪电中观测到了负先导头部前方的空间先导.在引雷继后回击前的直窜-梯级先导头部前方,空间先导长 1—4 m,距离负先导主通道头部 1—10 m;在自然下行负梯级先导中,空间先导长 2.4—5.5 m,距离负先导头部 1.0—3.2 m,相应的梯级长度平均为 5.2 m,梯级时间间隔平均为 16.4 μs . Qi 等^[10]基于对 350 m 处一次自然下行负先导的观测,认为空间茎与先导通道存在三种可能演变情况:空间茎/空间先导未能与负先导通道连接;空间茎/先导与负先导通道连接后熄灭,在几十微秒后出现黯淡的流光;空间茎/先导与负先导通道连接并向上传播明亮的光波. Jiang 等^[11]利用 180 kfps 的高速相机记录到两次自然下行负地闪,统计分析了 96 个梯级样本,得到梯级长度为 1.3 到 8.6 m,几何平均值为 4.4 m;空间先导中心位置与通道之间的距离为 2.1 到 6.9 m,几何平均值为 3.6 m;尽管大多数梯级与先导原通道方向的夹角在 $\pm 30^\circ$ 范围内,但也有部分梯级过程发生明显方向偏转,接近甚至达到 90° ,闪电放电通道的蜿蜒曲折主要受到梯级过程的方向随机性所影响.

对于自然下行负先导,一般无法直接测量得到其电流、电荷量等关键参量^[12],对应的电磁场参量探测,也由于距离的随机性变化而存在不确定性.高塔闪电或人工引雷由于位置固定,便于开展综合观测^[13–16].不过,已报道的绝大多数高塔闪电或人工引雷,都是负极性的,目前国际上对上行正地闪的报道与研究还比较有限^[17–19].对其中初始阶段的上行负先导的研究,通常基于通道底部电流以及电磁场的少量观测数据得到^[20,21]. Miki 等^[22]曾在日本一座高塔上观测到自然上行正地闪,基于所获得的电流和空间分辨率相对粗糙的光学观测数据,得到上行负先导的梯级发展的二维速度 1.6×10^6 m/s,梯级步长 62 m、梯级间隔 13.3 μs 和梯级转移电荷量 0.013 C 等参数. Pu 等^[23]利用 2017 年在山东触发的两次正极性人工引雷综合观测数据,得到了相对精细的上行负先导初始阶段梯级和

分叉特征,先导二维局部速度范围为 $0—4.46 \times 10^5$ m/s,均值为 2.10×10^5 m/s,初始阶段电流脉冲间隔、半峰宽度、峰值电流和 $T_{10\%—90\%}$ 上升时间均值分别为 19.1 μs , 1.8 μs , 122.3 A 和 0.6 μs ,单位梯级长度转移电荷量均值 73.5 $\mu\text{C}/\text{m}$.

由于云层的遮挡,对自然下行负先导在初始阶段的形成与发展这一重要问题的认识还相对模糊.正极性人工引雷当中的上行负先导,可以为研究负先导的初始特征提供比较重要的观测依据,并可能为揭示负先导的起始过程提供启示,因此,对其研究有重要意义.近年来,山东人工引发雷电综合观测实验,在引发正极性闪电方面进行了积极探索,分别于 2015 年、2019 年成功引发正闪 2 次和 10 次,本文利用获取的高分辨率综合观测数据,对不同雷暴(电场)正极性引发闪电的基本特征差异及上行负先导初始阶段的梯级与分叉过程进行研究,获得负先导梯级传输的详细物理参量,研究揭示了负先导通道伴随梯级过程存在两种分叉方式,直接分叉行为对应的电流波形具有多峰结构,峰值时间差的典型值为 2—3 μs .

2 实验与数据

本文分析的数据来自山东人工引发雷电实验 (SHandong Triggering Lightning Experiment, SHATLE),实验点设在山东省滨州市沾化区,距离渤海湾约 35 km.实验设有两个主要的观测站点:其一是火箭发射场,占地约 $100 \text{ m} \times 80 \text{ m}$;另一个是距离发射场约 1 km 的主观测站.同时,实验还以引雷场为中心,建立了一个 8 站组网 LF/VLF 闪电定位网络,基线长度在 10—15 km 范围,用于探测过境雷暴天气系统中发生的闪电事件,并获得人工引雷的远距离电磁辐射信号^[24].此外,实验在火箭发射场和距离火箭发射场 10 km 处均架设了短基线 VHF 辐射源定位系统,其探测频段为 140—330 MHz,可以在微秒量级时间分辨率上实现对闪电放电通道的精细刻画^[25,26].

火箭发射场设有两个火箭发射平台,传统人工引雷平台主要关注雷电物理过程特征和放电机理(详见 Qie 等^[27], Jiang 等^[28]和 Sun 等^[25]),信号塔雷击测试平台着重开展雷电防护应用研究.本文研究个例主要由传统引雷平台获得,雷电电流经引流杆往下、流经 5 和 0.5 m Ω 的同轴分流器后由良好

的接地系统泄放至大地, 同轴分流器的探测带宽为 0—3.2 MHz, 设置不同的电流探测量程为 ± 2 和 ± 40 kA, 对个别个例, 还获得 200 A 量程的精细信号. 电流信号由具有高压隔离功能的光纤传输系统传至控制室内, 由高速示波器 DL850 以 20 MS/s 采样率进行触发记录, 记录时间为 2 s. 在距离传统火箭发射架 30 和 60 m 处均架设有 3 dB 带宽为 2 和 1 MHz 的快慢天线, 采样率为 5 MS/s, 时间常数分别为 0.1 ms 和 0.3 s. 引雷发射控制室距离传统火箭发射架 80 m, 安装了采集数据的电脑和示波器等仪器设备, 室顶架设有带宽为 2—800 kHz 的磁天线, 采样率为 10 MS/s. Campbell 公司生产的大气电场仪 (CS110) 用于记录雷暴过程中的大气平均电场, 并为确定引雷火箭发射时机提供判断依据.

距离火箭发射场地 970 m 处的主观测点, 也架设有快慢天线、磁天线、大气电场仪等设备, 并设置与火箭发射场设备不同的增益. 此外, 在二层观测室, 安装了多台 Vision Research 公司生产的高速摄像系统对雷电的发展过程进行高时间分辨拍摄, 包括 Phantom M310, V711 和 V1612 等. 在本文分析中, 使用了 V711 和 V1612 相机获得的光学图像, 其中, V711 相机的拍摄帧速为 14000 幅/秒, 分辨率为 1280 \times 720 像素, 单帧图像曝光时间为 20 μ s; V1612 相机的拍摄帧速为 90000 幅/秒,

分辨率为 256 \times 512 像素, 单帧图像曝光时间为 4 μ s. 上述的电磁场、光学等观测设备, 都通过高精度 GPS 进行时间同步, 时间精度为 25 ns. 在本文中, 大气电场的极性采用大气电学定义, 即云中正电荷占主导时, 地面电场为正, 相应的, 云中负电荷被中和 (如负回击) 将导致正向电场变化.

3 分析和结果

3.1 人工引发正极性闪电基本特征

表 1 给出了 2015 年和 2019 年当地面电场为正极性的条件下引发的 12 次闪电及其上行负先导从导线顶端向上传输的基本特征. 除 1901 以外, 其他所有正极性闪电均不包含继后先导-回击过程, 而仅包含平均强度在几百安培量级的初始连续电流, 当初始连续电流截止后, 整个正极性引发闪电的放电过程也相应结束. 比较遗憾的是, 2019 年 7 月 6 日的引雷实验, 由于所引发的闪电 1901 未沿着引流杆泄放电流, 而击中并损毁了信号传输装置, 导致电流传感器所测信号无法传输和记录, 因此当天的电流资料缺失. 根据地面电场变化资料和光学资料分析, 发现闪电 1901 实际上是一次双极性人工引雷过程, 首先在正极性大气电场条件下, 始发上行负先导并导致相应的初始连续电流, 持续时间约 290 ms, 之后在 332 ms 内产生 9 次负极性

表 1 正极性人工引发闪电放电及先导发展的基本特征

Table 1. The general characteristics of the positive triggered lightning discharge and the associated leader propagation.

| 日期 | 编号 | 引雷时的地面 大气电场强度 /(kV·m ⁻¹) | 平台/ 触发 方式* | 上行负先导 始发高度 /m | 先导主通道 二维平均速度 /(10 ⁵ m·s ⁻¹) | 闪电持 续时间 /ms | 闪电转移 电荷总量 /C | 闪电电 流峰值 /A | 平均电 流强度 /A |
|------------|------|--|------------------|---------------------|--|-------------------|--------------------|------------------|------------------|
| 2015/07/24 | 1501 | 4.31 | 1/传统 | 356 | 2.10 | 86 | 16.1 | 443 | 169 |
| 2015/07/30 | 1503 | 3.83 | 1/传统 | 453 | — | 76 | 19.7 | 983 | 258 |
| 2019/07/06 | 1901 | 4.42 | 1/传统 | 257 | 2.44 | 622 | — | — | — |
| | 1902 | 4.81 | 1/传统 | 425 | 1.62 | 288 | — | — | — |
| | 1903 | 4.96 | 1/传统 | 473 | 1.45 | 355 | — | — | — |
| | 1904 | 10.37 | 2/空中 | — | — | — | — | — | — |
| | 1905 | 13.18 | 2/空中 | 668 | — | 148 | — | — | — |
| 2019/07/14 | 1906 | 7.46 | 1/传统 | — | — | — | — | — | |
| 2019/07/29 | 1907 | 5.64 | 1/传统 | 339 | 2.01 | 208 | 121.4 | 1613 | 569 |
| | 1908 | 5.37 | 1/传统 | 399 | 1.50 | 166 | 84.9 | 1187 | 503 |
| | 1909 | 5.12 | 1/传统 | 555 | 2.10 | 210 | 68.4 | 883 | 320 |
| 2019/08/07 | 1910 | 5.38 | 1/空中 | >536 | — | — | — | — | |

*注: 表中平台指火箭发射平台, 1代表地面传统平台, 2代表信号塔平台; 传统触发指引雷导线良好接地的方式, 引雷时导线顶端始发单向的上行先导; 空中触发指引雷导线不接地的方式, 导线底部距地面几十米, 引雷时始发双向先导, 上端向雷暴云发展, 下端向地面发展.

的脉冲放电, 放电强度和上升沿陡度与通常的继后回击过程相当. 此外, 需要说明的是, 闪电 1910 对应地面传统平台的空中触发方式, 引雷时导线底端距离地面 286 m, 下行正先导接地时将产生一个“小回击”过程, 其与一般由云内起始的先导接地后诱发的回击并不相同; 而 1904 和 1905 则对应信号塔平台的空中触发方式^[29], 引雷时导线底端与信号塔顶的距离在 10 m 左右, 二者之间会发生一次由不同极性先导连接所导致的脉冲放电, 但相应的电流及电磁辐射强度均较弱, 不视为回击过程.

从表 1 中可以看到, 引发正极性闪电所需的地面大气电场强度相对较高, 平均达到约 5 kV/m, 最高超过 13 kV/m, 这比一般的负极性人工引雷所需的地面大气电场强度更高, 通常, 当地面大气电场强度为 -2—4 kV/m 时, 即可引发负极性闪电, 甚至在 -1 kV/m 量级时也有成功个例. 正极性引雷需要较高的电场强度, 可能与负先导击穿空气所需的电场阈值比正先导更高有关系^[30]. 根据 Bazelyan 和 Raizer^[31], 维持负极性流光发展的电场强度是正极性流光的大约 2 倍, 而强发光的电

离先导, 是由弱电离的冷流光发展而成.

图 1 给出了 2019 年 7 月 29 日开展引雷实验对应的天气雷达回波演变和地面大气电场强度演变, 其中“+”代表引雷点的位置. 当日雷暴系统在引雷点西侧 200 km 外形成, 主体由西南(偏西)向东北(偏东)发展; 发展过程中, 随着旧单体的消散和新单体的不断生成, 整个雷暴系统逐渐完成组织化增强, 于 17:00 左右发展成为成熟的飏线系统. 系统前部对流区于 18:10 左右开始影响引雷场地, 活跃发生的近距离闪电放电事件导致电磁场传感器频繁触发, 地面大气电场快速波动, 一直未能累积至较大值; 18:45 之后, 系统的强对流回波主体开始移出测站, 引雷场地处于雷暴系统的前部强对流区向后部层状云区的过渡区域, 测站电磁场传感器测量的闪电活动频数逐渐下降, 闪电放电发生前地面大气电场达到 4—6 kV/m, 引雷时机比较成熟. 分别于 18:54, 18:56 和 18:59 发射火箭, 以地面平台传统方式成功引发三次闪电, 引发时地面大气电场强度分别为 5.64, 5.37 和 5.12 kV/m. 之后, 雷暴系统整体继续偏东发展, 离开测站.

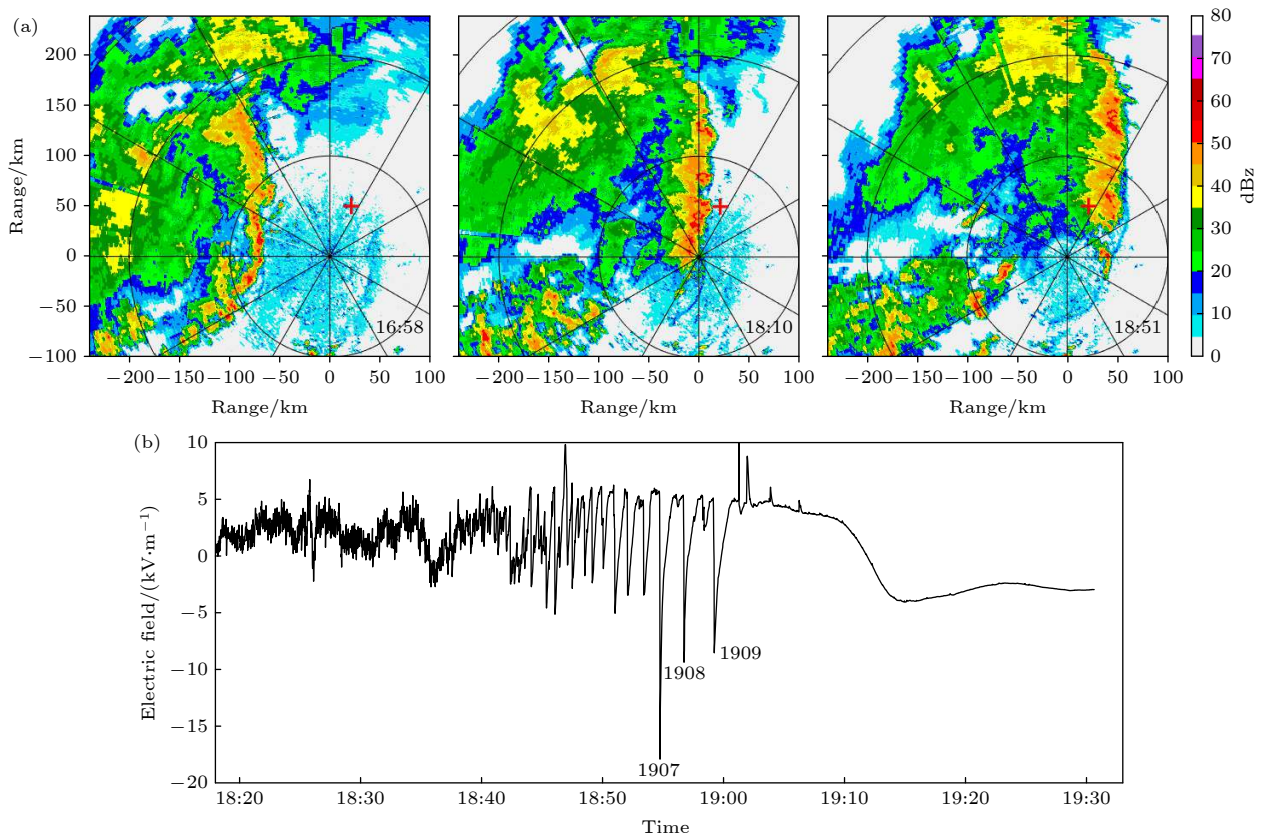


图 1 2019 年 7 月 29 日雷暴过程雷达回波及地面大气电场随时间的演变

Fig. 1. The evolution of radar echo and atmospheric electric field during the thunderstorm on July 29, 2019.

图 2 给出了闪电 1909 的通道底部电流、60 m 处快电场变化和 970 m 处磁场变化的同步波形。该次闪电的持续时间为 210 ms, 起始时间定义为上行负先导从引雷导线顶端起始时刻 (对应于图中的 0 时刻), 先导向上传输产生正极性的初始连续电流, 结束时间定义为放电电流衰减为零、通道熄灭的时刻。图 2 中, 0 时刻之前, 电场变化和磁场变化均呈现一定的脉冲特征, 这是由火箭拉升引雷导线上升的过程中, 顶端在强电场作用下“尝试”建立先导通道的先驱脉冲放电所导致的。先导向上传输并自持向上传输后, 通道底部测量到的放电电流持续增强, 于 28 ms 时达到峰值强度 883 A。在此过程中, 测量到的电磁场变化强度和脉冲密集程度最大, 这一方面表明相应的上行负先导发展活跃、放电和辐射较强; 另一方面, 这也与此时先导与电磁场传感器的距离相对较小有关, 随着先导发展, 探测距离增大, 信号的传输衰减也会相应增大。在此之后, 通道底部测量到的闪电放电电流波形表现出两个次峰过程, 可能与先导发展到云体后, 延伸至不同的电荷聚集区域或强电场区域有关。此外, 在电流下降至零值后, 电磁场变化波形中仍出现一些零散分布的弱脉冲, 这可能与发生于云内的零星击穿有关, 由于此时所引发闪电的对地放电过程已经结束 (电流为零), 其接地电流理论上已经截止, 所以可以认为这些击穿并不贡献于所引发闪电的对地放电过程。

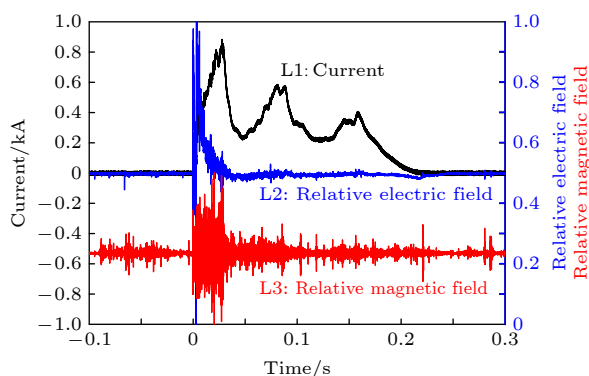


图 2 人工引发闪电 1909 的通道底部电流 (L1), 60 米处地面电场变化 (L2) 以及 970 处磁场变化 (L3) 同步波形

Fig. 2. Synchronous channel base current, electric field change at distance of 60 m, and magnetic field change at distance 970 m, for the triggered lightning 1909.

3.2 上行负先导初始阶段的发展传输特征

图 3(a) 给出了 V711 高速相机拍摄的闪电

1901 其中一帧图像, 图中下方笔直的发光部分为引雷导线通道, 较强的发光亮度是因引雷导线被电流加热熔化/气化所致, 该笔直通道的顶部距离地面的高度即本次引雷的触发高度, 亦即自持发展的上行负先导的起始高度, 为 257 m。其上方弯曲、分叉的部分对应上行负先导击穿空气建立的自然放电通道, 其中较粗的一支为上行先导发展和闪电放电的主通道。从表 1 中可以看到, 正极性引雷的触发高度总体上相对较高, 对于具有光学图像记录的 11 次个例, 超过半数 (6 次) 的触发高度在 400 m 以上, 最高大于 600 m。一般而言, 金属导线拉伸的长度越长, 导致的电场畸变将越大, 正极性引雷具有相对较高的触发高度, 与前面提到的负先导始发需要较高的电场强度阈值是一致的。不过, 表 1 中也可以看到, 引雷的触发高度, 与地面大气电场并没有明显的正相关或负相关关系。

图 3(b) 给出了基于高速摄像机 V711 捕获的闪电通道动态发展图像, 估算的六次人工引发正极性闪电上行负先导主通道的二维局部速度随高度的变化。图 3(b) 中一并标出了各次引雷时地面大气电场强度。从图 3(b) 中可以看到, 单个上行先导在高速摄像视野内发展的过程中, 局部速度的变化、波动幅度是较大的, 呈现出比较明显的来回震荡特点。例如: 闪电 1901 的上行负先导二维局部速度最小值和最大值分别为 1.11×10^5 和 4.19×10^5 m/s, 而对于闪电 1907, 相应值分别为 1.32×10^5 和 4.03×10^5 m/s。先导主通道的连续帧光学图像显示, 主通道二维速度在某一帧加速发展后, 下一帧的速度可能会明显变小, 甚至可能因为其他分叉的影响, 降至接近于零。对于这六次闪电的上行负先导的主通道二维速度, 1901, 1902 和 1907 整体上呈现随高度的微弱增加趋势, 而另外三次闪电上行先导的速度则未表现出随高度的明显增减趋势。对六次闪电先导的二维局部速度所有样本求平均值, 结果为 1.85×10^5 m/s, 由于闪电 1901 的先导速度相对较大, 剔除它之后, 其他五次闪电先导的局部速度平均值为 1.74×10^5 m/s。本文中人工引雷上行负先导二维发展速度结果, 比已有研究中自然闪电的负极性梯级先导发展速度略小但量级相当 [32–35]。

总体上, 人工引发正极性闪电中上行负先导的发展速度, 比引发负极性闪电中上行正先导的发展速度大。Biagi 等 [8] 观测得到一次引雷上行正先导

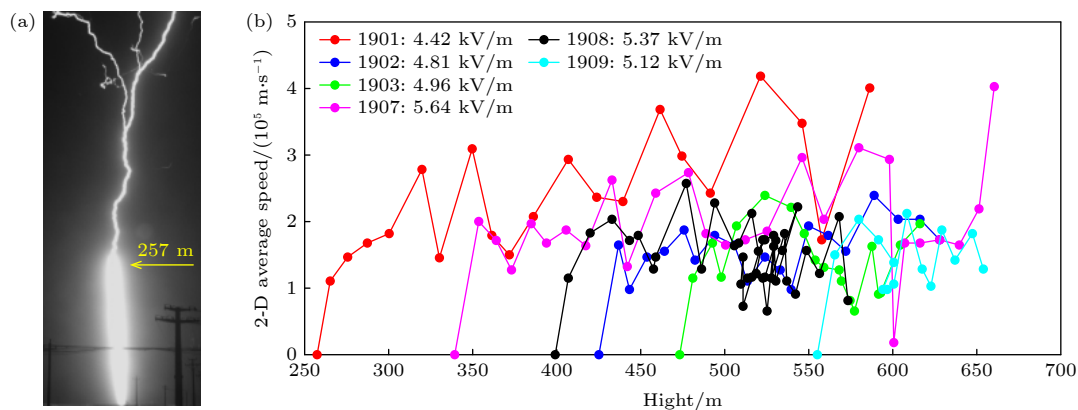


图 3 (a) V711 高速相机拍摄的闪电 1901 其中一帧图像; (b) 2019 年 6 次上行负先导发展二维局部速度随高度的演变, 其中, 各闪电的第一个数据点所对应高度表示先导从引雷导线顶端起始时的高度. 注: 图中黑色点出现高度重叠特征, 是因为闪电 1908 的上行先导在 510—540 m 高度范围内转为横向水平发展, 并出现通道头部调转向下发展的情况

Fig. 3. (a) A still image of the triggered lightning 1901, as captured by the V711 high-speed camera; (b) evolution of the two-dimensional partial speeds of 6 upward negative leaders. The first points of the curves in the figure indicate the initiating heights of the associated upward negative leaders. Note that the overlapping characteristics of the black curve at the 500–540 m height are due to the leader's horizontal and even downward propagation there.

在初始 100 m 高度内以相对恒定的 5.6×10^4 m/s 速度传输; 王彩霞等^[15] 计算得到上行正先导在 340 到 705 m 高度间的平均发展速度为 9.8×10^4 m/s; Jiang 等^[28] 给出上行正先导在 130 到 730 m 高度间的平均速度为 1.0×10^5 m/s; 最近, Jiang 等^[36] 的分析亦得到上行正先导 1.0×10^5 m/s 的发展速度. 实际上, 研究发现, 击穿空气的自然正先导, 速度多在 10^4 m/s 量级^[32]. Wu 等^[37] 对 553 次云闪和 220 次地闪的正先导进行辐射源定位, 得到绝大多数样本的速度在 1×10^4 — 3×10^4 m/s 范围内. 上述对比得到的正负先导传输速度差异: 一方面与不同极性先导发展传输所需的电场强度不同有关系 (如前所述); 另一方面, 也受到先导发展的微观物理机制所影响, 负先导头部聚集负电子而正先导头部则聚集正离子, 二者的质量差别导致迁移速率差别^[30], 进一步导致先导发展速度的差异.

3.3 上行负先导的梯级与分叉特征

由于发生迅速, 自然负先导的梯级发展特征一般难以被光学手段很好的拍摄下来, 山东引雷实验设置的 V1612, 尽管以 $11.1 \mu\text{s}$ 时间分辨率尚不能详尽地刻画负先导的精细特征, 但还是得到了在已有研究中并不多见、具有启示意义的先导发展图像. 图 4 给出了闪电 1901 上行负先导发展过程中连续 6 帧图像. 一般认为, 真实先导通道的宽度在几到十几厘米量级^[38,39], 由于像素分辨及光散色等因素的影响, 光学图像中的通道宽度实际上要明显

大于真实先导通道, 因此, 我们在图中添加了线条进行更好的标识, 其中, 蓝色实线表示已有通道, 红色实线段表示当前最新发展的梯级通道, 红色虚线段表示先导在下一帧图像中将发展形成的梯级通道. 图 4 中, 第二、第六帧显示了先导在各自的前一帧完成梯级跳跃之后的停顿、间歇, 相应的, 先导主通道及头部的光强较前一帧明显减弱. 在第二帧中, 减弱暗淡的主先导头部前方, 出现了两个发光段, 其发光强度较先导通道明显偏低但可以从背景光强中分辨出来, 在反色图中用 1 和 2 标记. 二者与先导的主通道之间存在光亮度更弱的间隙, 因此, 它们属于先导头部前方的空间茎/空间先导 (注: 这里对空间茎/空间先导不做严格区分). 从图 4 的第三帧中可以看到, 新发生的梯级是指向了空间茎/空间先导 1 的方向, 表明它与原先导头部发生了连接, 从而导致了相应的梯级过程. 而空间茎/空间先导 2 则未能完成连接, 且发生熄灭. Jiang 等^[11] 曾指出, 负先导梯级过程中, 先导头部前方可出现成簇的空间茎/空间先导, 这是先导发生分叉的根源. 不过, 如图 4 第二帧所示, 空间茎/空间先导的发展有强有弱, 它们的后向端往主通道发展亦有先有后, 因此, 当某一空间茎/空间先导率先与主通道发生连接, 则环境电场将瞬间发生改变, 原本先导头部周围的强电场发生骤降, 这使得其他的空间茎/空间先导失去发展条件或能量, 导致熄灭, 类似于图 4 第二帧的空间茎/空间先导 2.

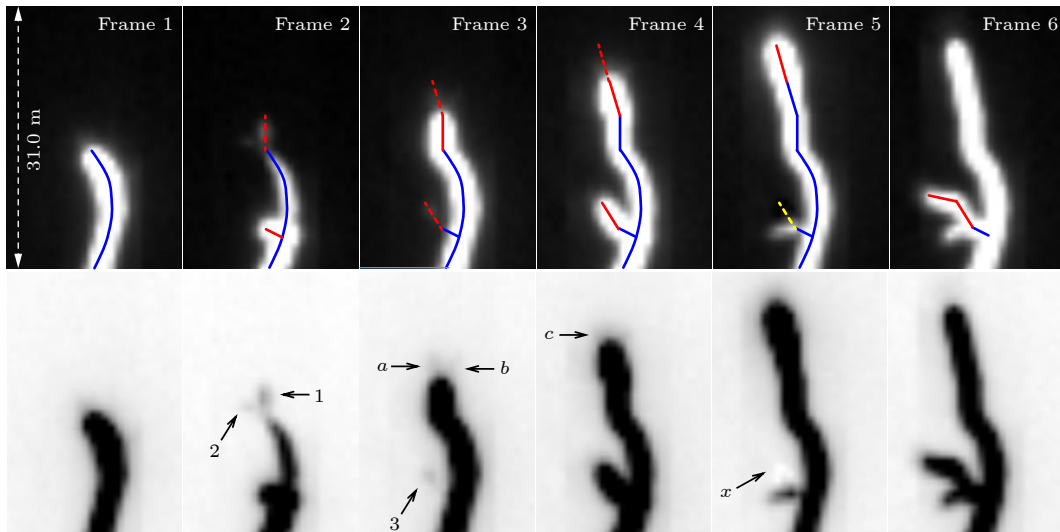


图 4 引发正极性闪电的上行负先导连续 6 帧光学图像, 时间分辨率为 $11.1 \mu\text{s}$. 注: 上图为原始图像, 下图为反色显示
 Fig. 4. Six consecutive optical images of the upward negative leader in rocket-triggered positive lightning flash, with a temporal resolution of $11.1 \mu\text{s}$. Note that the top panel gives the original images, and the bottom panel gives the reverse color version of the images.

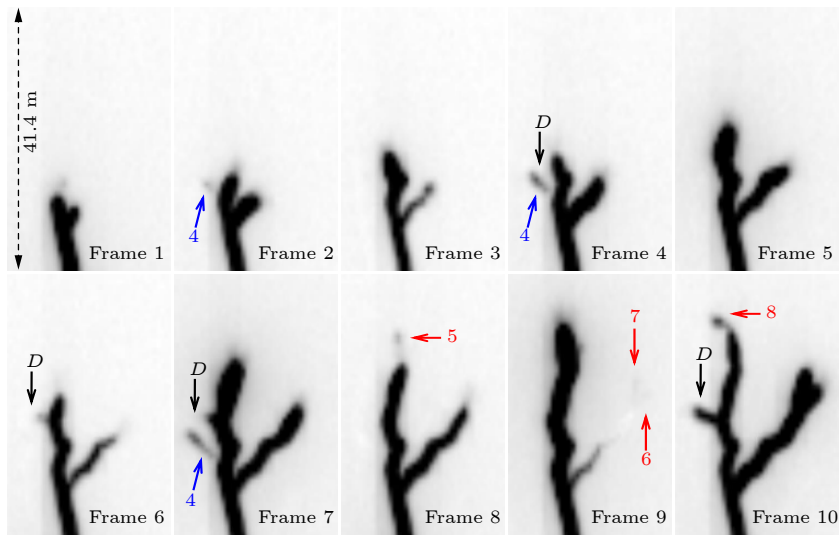


图 5 引发正极性闪电的上行负先导连续 10 帧光学图像 (反色), 时间分辨率为 $11.1 \mu\text{s}$

Fig. 5. Ten consecutive optical images (reverse color) of upward negative leader in rocket-triggered positive lightning flash, with a temporal resolution of $11.1 \mu\text{s}$.

图 5 给出了同一次上行负先导过程的另外连续十帧图像, 其第九帧, 也记录到发生于同一先导头部前方的两个空间茎/空间先导 6 和 7, 与前面例子不同的是, 在其下一帧中, 这两个空间茎/空间先导均与原先导头部发生了连接, 从而导致先导的分叉. 两次个例的不同, 表明成簇出现的空间茎/空间先导之间的“竞争”性发展, 可能会导致差异性的先导发展行为, 当空间茎/空间先导之间“竞争”的优、劣势区别显著, 则优势的空间茎/空间先导将主导完成接下来的梯级发展过程, 以单通道方

式延伸. 当“竞争”相对均势, 即不同指向的空间茎/空间先导强度相当, 它们几乎同时与主通道的头部发生连接, 则会使得先导于相应梯级过程后形成分叉.

上述分析的空间茎/空间先导均发生于先导通道的头部前方, 进一步分析可以看到, 图 4 第三帧的空间茎/空间先导 3、以及图 5 第二帧 (第四帧、第七帧重复出现) 的空间茎/空间先导 4 则出现在已经延伸的先导通道的侧向. 在 Qi 等^[10]和 Jiang 等^[11]的研究中, 均发现先导通道侧向的空间茎/空

间先导与通道之间发生连接,是先导头部随梯级过程发生直接分叉以外的另一种通道分叉方式.从图5可以看到,空间茎/空间先导4实际上是第一帧到第二帧发生梯级过程时,未能成功完成连接的其中一个空间茎/空间先导.在第三帧、第五到第六帧,其发光强度无法从图像的背景光强中分辨出来,表明其经历了明显的减弱过程.而第四帧、第七帧,空间茎/空间先导发生了在减弱甚至熄灭之后的多次重燃(重新在光学频段中可探测、活跃增强),并且,相应发光段发生了延伸,发光强度也变强.不过,其最终未能与先导通道完成连接,因此没有导致通道沿着其位置分叉和后续发展.相较而言,图5中标示的D,则实现了空间茎/空间先导重燃后与主通道连接形成侧向的分叉通道,其重燃发生在第九至第十帧之间.

图6给出了闪电1901,1907和1908的上行负先导各自在距离地面257—421 m,339—518 m和399—513 m的发展过程中,光学图像记录到梯级步长分布图,所对应样本是根据图像可以分辨并确认为单次梯级过程的全部样本,共计132个.统计得到,梯级步长的最小值为0.8 m,最大为8.7 m,算数平均值为3.9 m,几何平均值为3.6 m.该结果相较于近年来通过直观的高速摄像图像得到的结果略微偏小,但总体上保持基本一致.Hill等^[9]利用300 kfps的高速相机获得自然下行负先导82次梯级样本的平均步长为5.2 m.Jiang等^[11]根据180 kfps分辨率的高速摄像图像得到96次样本的梯级步长在1.3—8.6 m范围,算数平均值为4.6 m,几何平均值4.4 m.最近,Qi等^[40]设置525 kfps的高帧率拍摄,捕捉到先导主通道的33次梯级过程,平均梯级长度为5.6 m.

如上所述,近年来通过高速相机拍摄所揭示的先导梯级步长,实际上都比早期通过条纹相机或光纤阵列等设备探测得到的梯级步长偏小,例如:最早Schonland等^[5]给出的梯级步长达10—200 m,Berger^[6]所获结果的梯级步长上限也达到十几米,而Chen等^[41]利用光纤阵列系统ALPS探测到两次负梯级先导,梯级步长分别在7.9—19.8 m范围和约8.5 m.随着研究的推进,负先导梯级步长的这种“减小趋势”,可能与研究手段的差异存在一定关系,实际上,条纹相机或光纤阵列等探测设备可能会缺测某些发光强度较弱的梯级过程,从而漏掉相对较小的梯级样本.而高速光学设备,在近距离

观测时,则更好的记录了接近真实下限的梯级步长.当然,包括本文及上述回顾的结果,最小梯级步长都对应于所记录光学图像的1个像素,因此仍存在高估下限的可能,未来,随着光学探测的空间分辨率进一步精细化,或许会发现负先导更短、更小的梯级过程.

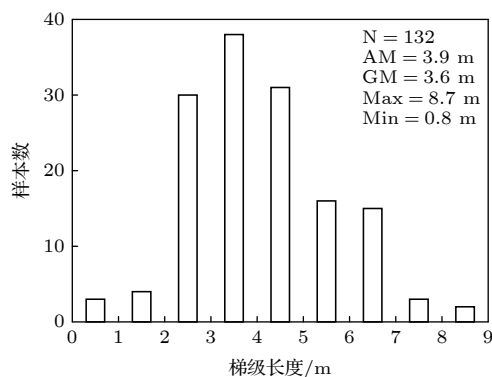


图6 闪电1901,1907和1908中的上行负先导共132次梯级过程的步长分布图

Fig. 6. The step length distribution diagram of a total of 132 steps in the upward negative leaders of lightning flashes 1901, 1907, and 1908.

图7和图8分别给出了闪电1907和1908上行负先导初始阶段的同步电流、电场变化、磁场变化及通道发展图像.该阶段中,负先导的通道分叉相对较少,且背景电流较弱,梯级过程与电流、电磁场脉冲信号的对应关系比较明确,因此可以较为客观地计算单次梯级过程的相关物理参量,这是自然闪电观测难以实现的.需要说明的是,两次先导电流波形的最初几个脉冲,表现出一定的特殊性,即先呈相反极性,之后又出现阻尼震荡波形,目前尚不清楚这是由于接地阻抗不匹配所导致还是由于物理过程本身所导致,因此暂不对其进行详细分析.

从图7和图8所标示的P脉冲和光学图像对比可以看到,伴随先导的梯级过程,电流和电磁场表现出显著的脉冲特征,且随着先导在梯级完成后的停顿、减弱,电流也逐渐减小到接近于零.由于电流信号的时间分辨率优于光学测量,可以看到脉冲之间的时间间隔大多在15—20 μs 范围,且由于该阶段内先导尚未形成多个分叉,不存在多个通道上同时或交替出现梯级过程的情况,因此,15—20 μs 可以认为是比较典型的单次梯级发展演化周期.图7中还可以看到,随着先导的发展及其击穿

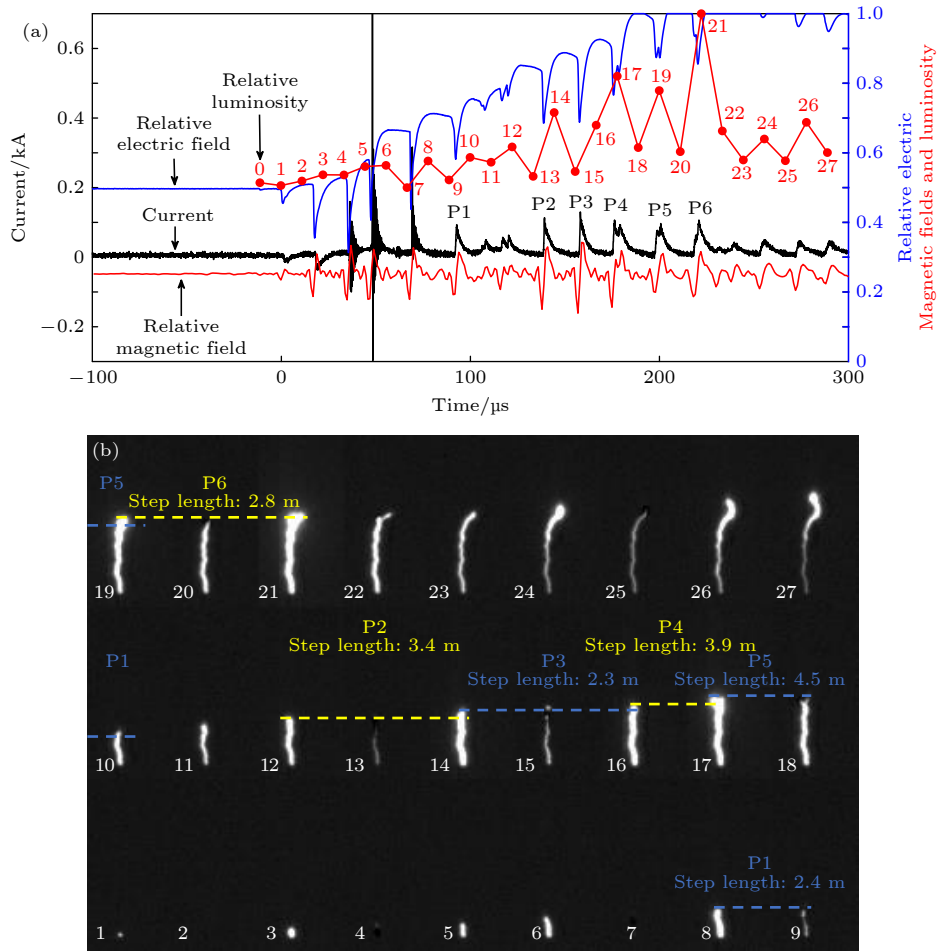


图 7 (a) 闪电 1907 上行负先导初始阶段的电流、电场变化、磁场变化和通道光强演变; (b) 高速相机拍摄的通道发展图像 (逐帧时间间隔为 11.11 μs)。注: 图 (a) 和图 (b) 中 1—27 代表相机帧数

Fig. 7. (a) The synchronous channel base current, electric field change, magnetic field change and channel luminosity, for the upward negative leader in the triggered lightning flash 1907; (b) the channel evolution of the leader, as captured by the high speed video camera with temporal resolution of 11.11 μs . Note: 1–27 in Figure (a) and Figure (b) represent the number of camera frames.

空气所形成的通道逐渐增长, 通道底部记录到的背景电流 (脉冲结束后的电流强度, 亦即下一次脉冲开始前的电流强度) 逐渐增大, 与此同时, 相应的“脉冲”特征则逐渐变得不那么显著. Lu 等^[42] 曾将特征存在差异的两类脉冲分别命名为“脉冲型”脉冲和“波纹型”脉冲, 之后, 樊艳峰等^[43] 和 Fan 等^[44] 对它们的电流波形参数进行了统计并做了模拟, 认为先导通道具备一定长度后, 由于通道相对高阻抗的特点, 将影响对先导头部梯级过程所产生脉冲信号的探测.

表 2 具体给出了闪电 1907 和 1908 上行负先导在图 7 和图 8 所展示初始阶段中梯级过程的脉冲电流和通道发展特征参量. 为了使结果具有较好的代表性, 所选的样本为“脉冲型”脉冲. 如表 2 中所列, 17 次梯级过程对应的电流脉冲间隔范围为 10.3—24.4 μs 、脉冲峰值电流范围为 43—130 A、

脉冲转移电荷量 233—681 μC 、半峰值宽度 0.4—6.3 μs 、电流从 10% 峰值上升到 90% 峰值的上升时间 $T_{10\%—90\%}$ 在 0.1—2.4 μs , 这些电流波形参量的算数平均值分别为 17.9 μs , 81 A, 364 μC , 3.1 μs 和 0.9 μs . 根据先导梯级的通道延伸长度和脉冲电流的积分电荷量, 可以计算单次梯级过程的等效线电荷密度, 范围在 49.9—196.8 $\mu\text{C}/\text{m}$, 算数平均值为 118.5 $\mu\text{C}/\text{m}$.

4 讨论

由于各方面条件的限制, 如闪电放电本身的危险性和破坏性, 及其伴随着的强降水、大风等, 对自然大气条件下闪电的光学观测, 一般很难开展类似于实验室长间隙放电那样的极近距离成像, 因此对其中一些弱发光的流光结构, 探测能力比较有

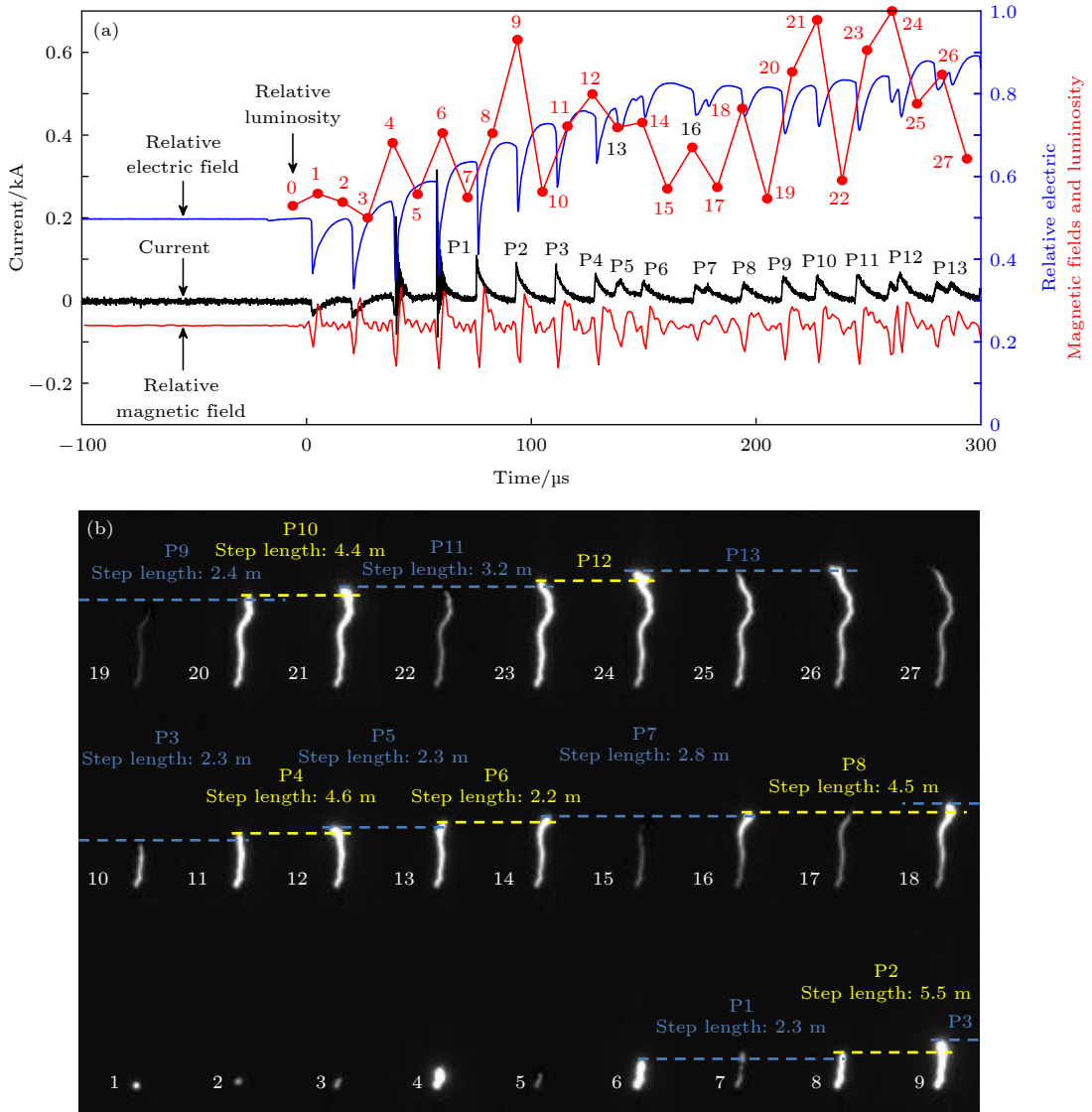


图 8 (a) 闪电 1908 上行负先导初始阶段的电流、电场变化、磁场变化和通道光强演变; (b) 高速相机拍摄的通道发展图像 (逐帧时间间隔为 11.11 μs)。注: 图 (a) 和图 (b) 中 1—27 代表相机帧数

Fig. 8. (a) The synchronous channel base current, electric field change, magnetic field change and channel luminosity, for the upward negative leader in the triggered lightning flash 1908; (b) the channel evolution of the leader, as captured by the high speed video camera with temporal resolution of 11.11 μs . Note: 1–27 in Figure (a) and Figure (b) represent the number of camera frames.

表 2 闪电 1907 和 1908 上行负先导初始阶段梯级过程的脉冲电流和通道发展特征参量

Table 2. The parameters of impulsive current waveform and the channel evolution during initial stepwise development of the upward negative leaders in triggered lightning flashes 1907 and 1908.

| 闪电号 | 1907 | | | | | | 1908 | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| 脉冲序列号 | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P1 | P2 | P3 | P14 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 | P11 |
| 脉冲间隔/ μs | — | — | 18.9 | 18.1 | 24.4 | 20.2 | — | 17.7 | 17.7 | 17.4 | 11.4 | 10.3 | 22.7 | 21.6 | 17.5 | 15.3 | 17.6 |
| 峰值电流/A | 93 | 113 | 130 | 106 | 96 | 106 | 110 | 93 | 90 | 66 | 53 | 50 | 43 | 46 | 60 | 63 | 63 |
| 脉冲电荷量/ μC | 324 | 396 | 441 | 681 | 470 | 553 | 373 | 359 | 327 | 233 | 240 | 249 | 327 | 241 | 316 | 307 | 352 |
| 半峰值宽度/ μs | 2.5 | 2.2 | 1.9 | 6.3 | 4.6 | 4.9 | 1.5 | 2.2 | 2.2 | 2.3 | 4.6 | 3.2 | 0.4 | 3.3 | 3.8 | 3.6 | 4.1 |
| $T_{10\% - 90\%}/\mu\text{s}$ | 0.9 | 0.6 | 0.9 | 0.9 | 2.4 | 2.4 | 0.1 | 0.6 | 0.4 | 0.6 | 1.8 | 1.1 | 1.0 | 1.2 | 0.5 | 0.9 | 0.6 |
| 梯级长度/m | 2.4 | 3.4 | 2.3 | 3.9 | 4.5 | 2.8 | 2.3 | 5.5 | 2.3 | 4.6 | 2.3 | 2.2 | 2.8 | 4.5 | 2.4 | 4.4 | 3.2 |
| 梯级的等效线电荷密度/ $(\mu\text{C}\cdot\text{m}^{-1})$ | 131.5 | 113.7 | 188.5 | 174.7 | 103.3 | 196.8 | 159.5 | 65 | 139.9 | 49.9 | 102.9 | 112.8 | 116.7 | 53 | 128 | 69.8 | 109.5 |

限. 实际上, 一些基于实验室长间隙放电的研究比较细致地刻画了负先导头部的流光系统, 既有空间茎, 空间先导, 还有空间茎向空间先导转化的中间产物“pilot”, 而先导头部前方丰富的流光丝, 则连接了空间先导、pilot、空间茎所组成的多层次结构^[45]. 本文中, 在图 4 的 x 所标示的位置, 发生了两次梯级过程, 第三帧到第四帧, 空间茎/空间先导 3 与先导通道连接完成一次梯级跳跃, 第四到第五帧, 这一梯级所形成的通道在光学上变得不可见, 似乎已经熄灭, 而第五到第六帧, 先导在之前梯级通道的基础上, 发生了进一步的延伸. 可以推测, 第一次梯级后的停顿过程中, 刚形成的热先导通道冷却、减弱至不发光, 退化为类似于流光结构的性质, 其前方的空间茎或 pilot 结构与其发生连接, 导致整个分叉通道再次被“点亮”. 尽管这种情况在本文中并不多见, 但其发生的物理机制是合理的, 今后对负先导形成丰富分叉的发展阶段开展进一步观测, 有可能会得到更多类似的结果.

近年来的研究已经表明, 先导头部的流光系统及其发展形成的成簇空间茎, 是负先导发生分叉的根源^[11,46]. 多个空间茎/空间先导在同一个梯级周期中同时发展, 并都实现与先导头部的连接, 是负先导发生分叉的最主要方式. 由于不同指向的空间茎/空间先导之间存在天然的竞争性, 优势发展、率先完成连接的空间茎/空间先导往往支配了它们发展所需的主要能量, 并瞬时、动态地改变着环境的电场分布等条件. 因此, 不同空间茎/空间先导的“均势发展”对于先导通道的直接分叉行为而言, 是非常关键的条件之一. 相应地, 它们各自与先导头部之间的连接理应发生在比较短的时间差以内, 否则, 如前文分析所述, 弱势空间茎/空间先导可能会难以维持而熄灭. 目前, 不管是在自然闪电观测中, 还是在实验室长间隙放电实验的观测中, 光学观测手段都难以实现足够高时间分辨率的精细成像, 无法分辨多个空间茎/空间先导同时发展以及它们与先导头部先后发生连接的细节. 所以, 对这一问题的探讨需要借助于电流、电磁场的探测结果. 在图 7 和图 8 中可以看到, 闪电 1907 的 P4, P5 和 P6 脉冲, 以及闪电 1908 的 P5, P12 和 P13 脉冲对应的先导梯级, 都发生了分叉. 这些脉冲的共同特点是它们均具有双峰特征, 峰值点之间的时间间隔一定程度上可以表征不同空间茎/空间先导连接至先导头部的时间差. 分析发现, 闪电 1907

的 P4, P5, P6 脉冲双峰时间间隔分别为 2.85, 2.10 和 2.25 μs , 闪电 1908 的 P5, P12, P13 脉冲双峰时间间隔分别为 2.15, 4.30 和 6.45 μs . 可以推测, 先导在同一梯级周期内, 因不同空间茎/空间先导先后与先导头部实现连接而发生分叉, 所允许的时间差上限可达 6—7 μs , 并多处于 2—3 μs 范围, 在相应时间差内, 不同空间茎尽管存在非均势发展, 但弱势的空间茎没有被熄灭, 这可能与其中流光系统的自持发展条件有关. 当然, 目前所给出这些量值的样本数还非常有限, 未来需要更多的观测予以进一步确认. 此外, 从图 8 还可以看到, 脉冲 P7 出现了双峰, 但光学图像中难以辨认其对应的梯级过程是否引起了通道分叉, 假如该过程为单通道发展, 则脉冲的双峰结构可能是由于同一方向上前后形成的空间茎/空间先导导致了两次连接过程, 实际上, 前面提到, 空间先导、pilot、空间茎在先导头部前方可组成相对复杂的多层级结构.

一些弱势发展的空间茎/空间先导可以在熄灭之后又发生重燃, 这是负先导通道发生分叉的另一种方式. Qi 等^[10] 和 Jiang 等^[11] 都观测到了单次重燃后, 空间茎/空间先导与通道发生连接的现象, 而本文观测则发现, 减弱熄灭的空间茎/空间先导可以发生多次重燃, 而且重燃后其空间尺度变长. 不过, 本文中图 5 的空间茎/空间先导尽管发生了重燃, 但并未能与通道实现连接, 而是最终再次熄灭. 总体上, 不管是单次重燃还是多次重燃, 相应的物理机制、驱动条件仍然不是十分清楚. 此外, 一些其他研究还表明, 当负先导头部已经发展较远之后, 一些熄灭的分叉通道也可能被再次点亮, 这些过程被命名为“spark”或“transient”^[47,48], 它们与空间茎/空间先导的“熄灭-重燃”的现象学特点具有一定的相似性, 但二者是否具有类似的物理机制, 也还是未知, 值得在今后开展更为精细的观测或模拟予以澄清.

5 结 论

本文详细研究了山东人工引发雷电实验于 2015 年和 2019 年在正极性大气电场条件下成功引发的 12 次罕见闪电过程、以及这些引发闪电初始过程中上行负梯级先导的发展传输特征与机理, 得到如下结论.

除其中一次闪电的放电过程发生了从正极性向负极性的反转并出现多次负极性回击以外, 其他 11 次引发闪电均没有产生继后回击, 其正极性的初始连续电流强度在几百安培量级, 持续时间最短不足 100 ms, 最长超过 600 ms. 引发闪电时地面大气电场强度约 5 kV/m, 最高超过 13 kV/m, 总体触发高度在 400 m 左右, 闪电触发高度与地面大气电场强度无明显的相关关系.

对具有光学探测资料的其中 6 次闪电的上行负先导进行分析, 得到其二维平均发展速度为 1.85×10^5 m/s, 在光学图像视野内, 先导的二维发展速度随高度没有明显的变化趋势. 上行负先导以梯级方式发展传输, 对从光学图像中可分辨的 132 次梯级过程统计分析得到其梯级步长在 0.8—8.7 m 范围, 算数平均值为 3.9 m, 几何平均值为 3.6 m. 先导的初始发展阶段中, 单次梯级过程产生显著的“脉冲型”电流和电磁场脉冲, 统计了电流脉冲波形的时间间隔、电流峰值、转移电荷量、半峰值宽度、电流从 10% 峰值上升到 90% 峰值的时间等波形参量, 平均值分别为 17.9 μ s, 81 A, 364 μ C, 3.1 μ s, 0.9 μ s, 根据先导梯级的通道延伸长度和脉冲电流的积分电荷量, 获得单次梯级过程的等效线电荷密度参量, 其范围为 49.9—196.8 μ C/m, 算数平均值为 118.5 μ C/m.

高速光学图像记录到了先导发生梯级并导致通道分叉的一些细节特征, 捕捉到梯级间歇过程中, 先导头部前方表现为弱发光段的空间茎/空间先导, 且不同指向的空间茎/空间先导可出现于同一先导头部前方. 分析揭示了负先导通道伴随梯级过程导致分叉的两种方式: 1) 先导头部前方成簇的空间茎/空间先导在同一梯级周期内先后与先导头部发生连接; 2) 之前曾熄灭的空间茎/空间先导发生重燃, 并与先导通道发生侧向连接. 光学和电流同步资料分析表明, 当两个空间茎/空间先导在同一梯级周期内与先导头部发生连接进而导致分叉时, 产生了双峰结构的脉冲电流波形, 峰值点之间的时间间隔一定程度上表征了先后完成的两次连接之间的时间差, 多在 2—3 μ s 范围, 最长可达 6—7 μ s.

感谢山东省气象局、滨州市气象局、沾化区气象局对人工引雷实验的大力支持, 感谢所有参与人工引雷外场综合观测的实验人员.

参考文献

- [1] Gou X, Zhang Y, Li Y, Chen M 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 205201 (in Chinese) [苟学强, 张义军, 李亚珺, 陈明理 2018 物理学报 **67** 205201]
- [2] Qie X, Yuan S, Chen Z, Wang D, Liu D, Sun M, Sun Z, et.al 2021 *Sci. Sin. Terr.* **51** 46 (in Chinese) [鄒秀书, 袁善锋, 陈志雄, 王东方, 刘冬霞, 孙萌宇, 孙竹玲, 等 2021 中国科学: 地球科学 **51** 46]
- [3] Lu W, Gao Y, Chen L, Qi Q, Ma Y, Zhang Y, Chen S, Yan X, Chen C, Zhang Y 2015 *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **136** 23
- [4] Qie X, Yuan S, Chen Z, Wang D, Liu D, Sun M, Sun Z, Srivastava A, Zhang H, Lu J 2020 *Sci. China Earth Sci.* **64** 10
- [5] Schonland B F J, Malan D, Collens H 1935 *Proc. R. Soc. London, Ser. A* **152** 595
- [6] Berger K 1967 *J. Franklin Inst.* **283** 478
- [7] Gorin B, Levitov V, Shkilev A 1976 4th *International Conference on Gas Discharges*, Swansea, UK, September 7–10, 1976 p274
- [8] Biagi C J, Uman M A, Hill J D, Jordan D M 2011 *Geophys. Res. Lett.* **38** L24809
- [9] Hill J D, Uman M A, Jordan D M 2011 *J. Geophys. Res. Atmos.* **116** D16117
- [10] Qi Q, Lu W, Ma Y, Chen L, Zhang Y, Rakov V A 2016 *Atmos. Res.* **178** 260
- [11] Jiang R, Qie X, Zhang H, Liu M, Sun Z, Lu G, Wang Z, Wang Y 2017 *Sci. Rep.* **7** 3457
- [12] Wang X J, Yuan P, Cen J Y, Zhang T L, Xue S M, Zhao J C, Xu H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 109201 (in Chinese) [王雪娟, 袁萍, 岑建勇, 张廷龙, 薛思敏, 赵金翠, 许鹤 2013 物理学报 **62** 109201]
- [13] Jiang R B, Qie X S, Wang C X, Yang J, Zhang Q L, Liu M T, Wang J F, Liu D X, Pan L X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 079201 (in Chinese) [蒋如斌, 鄒秀书, 王彩霞, 杨静, 张其林, 刘明远, 王俊芳, 刘冬霞, 潘伦湘 2011 物理学报 **60** 079201]
- [14] Tang G Y, Sun Z L, Jiang R B, Li F Q, Liu M Y, Liu K, Qie X S 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 189201 (in Chinese) [唐国瑛, 孙竹玲, 蒋如斌, 李丰全, 刘明远, 刘昆, 鄒秀书 2020 物理学报 **69** 189201]
- [15] Wang C X, Qie X S, Jiang R B, Yang J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 553 (in Chinese) [王彩霞, 鄒秀书, 蒋如斌, 杨静 2012 物理学报 **61** 553]
- [16] Warner T A, Helsdon Jr J H, Bunkers M J, Saba M M, Orville R E 2013 *B. Am. Meteorol. Soc.* **94** 631
- [17] Berger K, Anderson R B, Kroninger H 1975 *Electra* **41** 23
- [18] Heidler F H, Manhardt M, Stimpfer K 2014 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **57** 102
- [19] Liu X, Wang C, Zhang Y, Xiao Q, Wang D, Zhou Z, Guo C 1994 *J. Geophys. Res. Atmos.* **99** 10727
- [20] Azadifar M, Rachidi F, Rubinstein M, Paolone M, Rakov V A, Pavanello D, Metz S, Romero C 2015 *International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA)* Balneario Camboriu, Brazil, Sept.28–Oct. 2, 2015 p32
- [21] Zhou H, Diendorfer G, Thottappillil R, Pichler H, Mair M 2012 *J. Geophys. Res. Atmos.* **117** D06110
- [22] Miki M, Miki T, Asakawa A, Shindo T 2014 *XV International Conference on Atmospheric Electricity* Norman, Oklahoma, U.S.A, June 15–20, 2014
- [23] Pu Y, Jiang R, Qie X, Liu M, Zhang H, Fan Y, Xueke W 2017 *Geophys. Res. Lett.* **44** 7029
- [24] Ma Z, Jiang R, Qie X, Xing H, Liu M, Sun Z, Qin Z, Zhang H, Li X 2021 *Atmos. Res.* **249** 105314
- [25] Sun Z, Qie X, Jiang R, Liu M, Wu X, Wang Z, Lu G, Zhang

- H 2014 *J. Geophys. Res. Atmos.* **119** 13
- [26] Sun Z, Qie X, Liu M, Cao D, Wang D 2013 *Atmos. Res.* **129** 58
- [27] Qie X, Jiang R, Wang C, Yang J, Wang J, Liu D 2011 *J. Geophys. Research: Atmos.* **116** D10102
- [28] Jiang R, Qie X, Wang C, Yang J 2013 *Atmos. Res.* **129** 90
- [29] Liu M, Jiang R, Li Z, Qie X, Zheng T, Tan Y, Li X, Zhang H, Liu M, Sun Z, Wang Y, Ma Z, Lu J, Feng R, Liu Y 2020 *Atmos. Res.* **244** 105049
- [30] Williams E R 2006 *Plasma Sources Sci. Technol.* **15** S91
- [31] Bazelyan E, Raizer Y 2000 *Lightning Physics and Lightning Protection* (Florida: CRC Press) p325
- [32] van der Velde O A, Montanyà J 2013 *J. Geophys. Res. Atmos.* **118** 13
- [33] Campos L Z, Saba M M, Warner T A, Pinto Jr O, Krider E P, Orville R E 2014 *Atmos. Res.* **135** 285
- [34] Shao X, Krehbiel P 1996 *J. Geophys. Res. Atmos.* **101** 26641
- [35] Wu T, Yoshida S, Akiyama Y, Stock M, Ushio T, Kawasaki Z 2015 *J. Geophys. Res. Atmos.* **120** 9071
- [36] Jiang R, Qie X, Li Z, Zhang H, Li X, Yuan S, Liu M, Sun Z, Srivastava A, Liu M 2020 *Geophys. Res. Lett.* **47** e2020GL088107
- [37] Wu T, Wang D, Takagi N 2019 *J. Geophys. Res. Atmos.* **124** 9983
- [38] Orville R E, Helsdon Jr J H, Evans W H 1974 *J. Geophys. Res.* **79** 4059
- [39] Uman M A 1964 *J. Geophys. Res.* **69** 583
- [40] Qi Q, Lyu W, Ma Y, Wu B, Chen L, Jiang R, Zhu Y, Rakov V A 2019 *Geophys. Res. Lett.* **46** 12580
- [41] Chen M, Takagi N, Watanabe T, Wang D, Liu X 1999 *J. Geophys. Res.* **1042** 27573
- [42] Lu G, Zhang H, Jiang R, Fan Y, Qie X, Liu M, Sun Z, Wang Z, Tian Y, Liu K 2016 *Radio Sci.* **51** 1432
- [43] Fan Y, Lu G, Zhang H, Jiang R, Liu M, Qie X 2017 *High Voltage Eng.* **43** 987 (in Chinese) [樊艳峰, 陆高鹏, 张鸿波, 蒋如斌, 刘明远, 郗秀书 2017 *高电压技术* **43** 987]
- [44] Fan Y, Lu G, Jiang R, Zhang H, Li X, Liu M, Qie X, Zheng D, Lyu W, Zhang Y, Zhang Y 2018 *J. Geophys. Res. Atmos.* **123** 11
- [45] Petersen D, Bailey M, Beasley W H, Hallett J 2008 *J. Geophys. Res. Atmos.* **113** D17205
- [46] Huang H, Wang D, Wu T, Takagi N 2018 *J. Geophys. Res. Atmos.* **123** 12597
- [47] Ding Z, Rakov V, Zhu Y, Tran M 2020 *J. Geophys. Res. Atmos.* **125** e2020JD033305
- [48] Stolzenburg M, Marshall T C, Karunarathne S, Karunarathna N, Orville R E 2015 *J. Geophys. Res. Atmos.* **120** 3408

Characteristics of rocket-triggered positive lightning flashes and propagation properties of their initial upward negative leaders^{*}

Li Zong-Xiang¹⁾²⁾ Jiang Ru-Bin^{2)†} Lü Guan-Lin¹⁾²⁾ Liu Ming-Yuan²⁾³⁾
 Sun Zhu-Ling²⁾ Zhang Hong-Bo²⁾ Liu Kun¹⁾
 Li Xiao-Qiang⁴⁾ Zhang Xiong⁴⁾

1) (*College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China*)

2) (*Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

4) (*State Key Laboratory of Nuclear Biological and Chemical Protection for Civilian, Beijing 102205, China*)

(Received 6 February 2021; revised manuscript received 23 April 2021)

Abstract

Twelve lightning flashes are successfully triggered under the positive atmospheric electric field condition. The discharge properties of the flashes, and the propagation characteristics and mechanism of the involving upward negative leaders are investigated. When lightning flashes are triggered, the average ground atmospheric electric field is around 5 kV/m, with a maximum value exceeding 13 kV/m. Except for one special event showing a discharge polarity reversal (from positive to negative) and producing multiple negative return strokes, none of the remaining 11 triggered lightning flashes involves the subsequent return stroke process. The discharge currents of these flashes are generally of the order of several hundred amperes. The successfully triggered lightning flashes start with the initiation and the upward propagation of negative stepped leaders, of which the average two-dimensional velocity is 1.85×10^5 m/s. For a total of 132 steps captured by the high-speed video camera, the step lengths range from 0.8 m to 8.7 m, with an average of 3.9 m. During the initial stage of the upward negative stepped leader, the current and electromagnetic field present a significant impulsive feature. The mean value of pulse interval, current peak, charge transfer, half-peak-width and current rise time $T_{10\%-90\%}$ are 17.9 μ s, 81A, 364 μ C, 3.1 μ s, and 0.9 μ s, respectively. The equivalent linear charge density of a single step is 118.5 μ C/m. The branching of the leader channel generally takes place together with the stepping process in two ways: the first way is to implement the multiple connections of clustering space stems/space leaders to the leader head within an individual step cycle, and the corresponding current waveform presents a multi-peak structure, with a peak interval of about 2–3 μ s (up to 6–7 μ s); the second way is to reactivate those previously extinguished space stems/space leaders and to connect them to the lateral surface of the channel.

Keywords: rocket-triggered lightning, positive flash, upward negative leader, stepping, branching

PACS: 92.60.Pw, 42.68.Ay

DOI: 10.7498/aps.70.20210283

^{*} Project supported by National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFC1501502), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41775012, 41630425), the Key R&D Projects of Sichuan Province, China (Grant No. 2019YFG0104), and the Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences.

[†] Corresponding author. E-mail: jiangrubin@mail.iap.ac.cn