

武斌, 吕伟涛, 齐奇, 等. 双向先导正端突然延展现象的高速摄像观测. 应用气象学报, 2020, 31(2): 146-155.

DOI: 10.11898/1001-7313.20200202

双向先导正端突然延展现象的高速摄像观测

武斌¹⁾ 吕伟涛^{1)*} 齐奇¹⁾ 马颖¹⁾ 陈绿文²⁾ 姜睿娇¹⁾

¹⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室/雷电物理和防护工程实验室, 北京 100081)

²⁾(中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080)

摘 要

基于广州高建筑物雷电观测站的观测设备, 于 2016 年 6 月 4 日在广州塔上发生的一次上行闪电过程中观测到双向发展的直窜先导正端在回击前、后突然延展的现象。利用高时间分辨率的光学和电场变化同步数据, 分析双向先导正端突然延展现象的细节特征。结果表明: 回击前直窜先导双向发展时正端可能会出现多次突然延展的现象; 突然延展现象有时由双向先导的正端与已有的悬空先导序列相连而引发, 并促使双向先导正端传输至未击穿空气中; 在一次继后回击后, 通道正端头部也观测到两次突然延展现象, 但未沿回击前正端伸展通道传输, 而是通过开辟新通道进入了未击穿空气; 回击前直窜先导正端三次突然伸展的二维平均速率约为 $2.3 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 伸展长度平均值约为 115 m; 回击后通道头部两次突然伸展的二维平均速率约为 $4.3 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 伸展长度平均值约为 212 m。

关键词: 上行闪电; 双向先导; 突然延展; 高速摄像

引 言

早在 1960 年 Kasemir^[1] 基于静电学原理就提出了双向先导发展理论, 即极性相反的先导始发于同一位置后沿相反方向发展, 整个先导通道保持电中性, 但一直未引起重视。直至 NASA 拍摄到一架飞机被闪电击中的图像后^[2-3], 双向先导传输概念才逐渐被人们接受。此后许多自然闪电、实验室长间隙放电和人工引雷试验的观测结果均证实了该理论的正确性^[4-10], 并利用该理论建立了先导模式解释闪电始发和传输的物理机制^[11-12]。

光学观测是研究闪电放电特征的直观手段。近年随着光电技术快速发展, 商业化的高时间分辨率摄像系统在闪电放电过程的观测中得到了越来越多的应用。高速摄像系统不仅为证实先导双向发展提供了直接证据^[7-9], 还能给出双向先导正、负端传输的细节特征。Jiang 等^[13] 利用 10000 帧/s 的高速摄像机观测到在已击穿的通道上传输的直窜先导双向

发展。Qie 等^[14] 在人工触发闪电中发现了沿已击穿正极性通道双向传输的负极性反冲先导。Wu 等^[15] 利用高速摄像和电场变化数据分析发现双向直窜先导的正端大部分时间是不活跃的(静止的), 或沿前一次企图先导通道的正端间歇性地伸展至未击穿的空气中。

以往观测表明: 负先导以梯级方式发展^[16-19], 梯级的形成主要依靠空间先导和在新先导尖端前部的电晕流光^[20-22]。正先导则以连续或梯级的方式传输^[23-25], 但并未在正先导尖端前部发现类似的空间先导。迄今为止, 人们对正先导的传输特征和机制仍不清楚。一些研究观测到正先导突然延展行为, 如 Tran 等^[9] 观测到双向先导正端, Wang 等^[26] 报道的上行正先导以及 Kostinskiy 等^[27] 在长间隙放电试验中观测到的正先导等, 这可能与正先导的传输机制密切相关, 值得进一步探究。

本文利用广州高建筑物雷电观测站获取的高建筑物上的雷电高速摄像和电场变化同步数据, 对比了在一次广州塔上行闪电放电过程中双向发展的直

2019-10-15 收到, 2020-01-15 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划(2017YFC1501504), 国家自然科学基金面上项目(41805005, 41775010), 中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2018Z003)

* 通信作者, 邮箱: lyuwt@foxmail.com

窜先导在回击前、后正端突然延展现象的细节特征,统计了双向先导正、负端传输时的二维速率参量。

1 观测与数据

广州高建筑物雷电观测站(Tall-Object Lightning Observatory in Guangzhou, TOLOG^[28-35])作为中国气象局雷电场科学试验基地(CMA_FEELS)的重要组成部分,目前由1个主站(站点1)和多个光学观测子站组成,主要针对高建筑物雷电开展观测,站点1位于广东省气象局一栋高约100 m的建筑物的顶部,架设的光电同步观测设备包括多台高速摄像系统、闪电通道成像系统、全视野闪电通道成像系统^[36](Total-sky Lightning Channel Imager, TL-CI)、快、慢电场变化天线、宽带磁场测量仪、大气平均电场仪和闪电连接过程观测系统^[37](Lightning Attachment Process Observation System, LAPOS)。采用数字示波记录仪采集 LAPOS 和电磁场变化信号,利用 LAPOS(8 通道)的1个通道作为所有观测设备的触发源。每个触发事件由高精度GPS时钟授时,时间精度为30 ns。本研究只利用了站点1的观测数据,并由以下设备获取:①2台 Photron FASTCAM 高速摄像系统:1台 SAZ 摄像机(设备编号 HC-1),帧率为20000 帧/s,镜头焦距14 mm,像素数量为1024×1024;1台 SA3 摄像机

(设备编号 HC-3),帧率为1000 帧/s,镜头焦距8 mm,像素数量为1024×1024。②1套快、慢天线(FA和SA),时间常数分别为1 ms和6 s,采样率10 MHz,记录时间长度1 s。

文中使用的闪电定位数据由粤港澳闪电定位系统(GHMILLS)提供,包括地闪回击接地点位置、发生时间、雷电流幅值和极性物理特征参数。该系统的闪电探测效率和回击探测效率均为93%,对下行闪电首次回击、下行闪电继后回击及上行闪电回击的定位误差平均值(中值)分别为361 m(188 m),252 m(167 m)以及294 m(173 m)^[38]。

本文分析的闪电个例为2016年6月4日广州塔(高600 m)上发生的一次上行闪电(F2016048),该上行闪电过程包含有7次回击。为便于数据分析,将F2016048的第1次回击开始时刻定义为零时刻。文中采用大气电学符号规定,向下的电场为正,正极性的电场变化对应正电荷向上传输,或者等效为负电荷向下传输,负地闪回击对应正极性的电场变化^[39]。涉及的所有长度均为二维值。

2 结果分析

图1是F2016048的快、慢电场变化同步记录。由图1a可知,在F2016048始发前附近出现1次正地闪过程。正地闪回击发生在F2016048始发前约

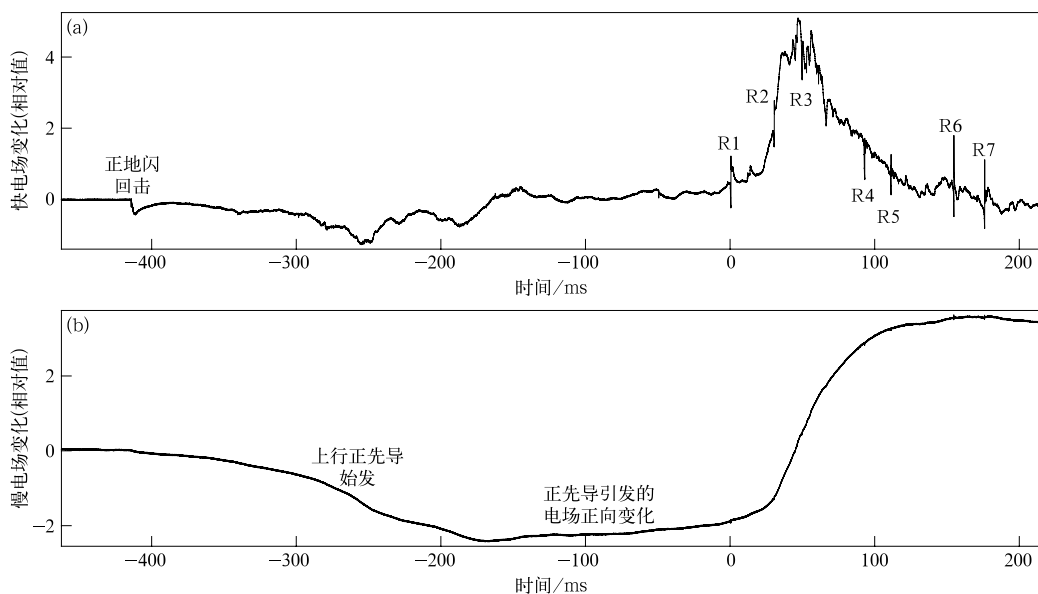


图1 广州塔上行闪电快电场(a)、慢电场(b)变化波形

(记录时间窗口为-462.4~215 ms,R1~R7代表上行闪电的7次回击)

Fig.1 Synchronized fast(a) and slow(b) electric field change records of the Canton Tower upward flash (within -462.4 to 215 ms time window, R1-R7 refer to 7 return strokes of the upward flash)

200 ms,对应的定位结果显示该正回击的接地点位于广州塔的西北方向,距广州塔约 59 km,回击峰值电流约 +87 kA。Saba 等^[40]观测认为如果正地闪距高建筑物不超过 80 km,上行闪电始发前或后的 1 s 内,则可认为正地闪与上行闪电的始发相关。因此,F2016048 可认为是 1 次触发型上行闪电^[41]。

基于连续发展的上行先导在慢电场变化记录上表现为电场正向变化(图 1b),可以确定上行先导的

极性为正。正先导持续向上传输造成电场正向变化,相当于将正电荷从地面向上抬升。这里推测正地闪回击后的电场缓慢负向变化可能是由在正地闪连续电流阶段云底水平发展的负先导向塔顶靠近引发的。

图 2 为基于 HC-3 连续帧图像获取的通道亮度、快电场和慢电场变化波形图。由图 2b 可知,F2016048 发生了 7 次直窜先导-继后回击过程。7 个直窜先导

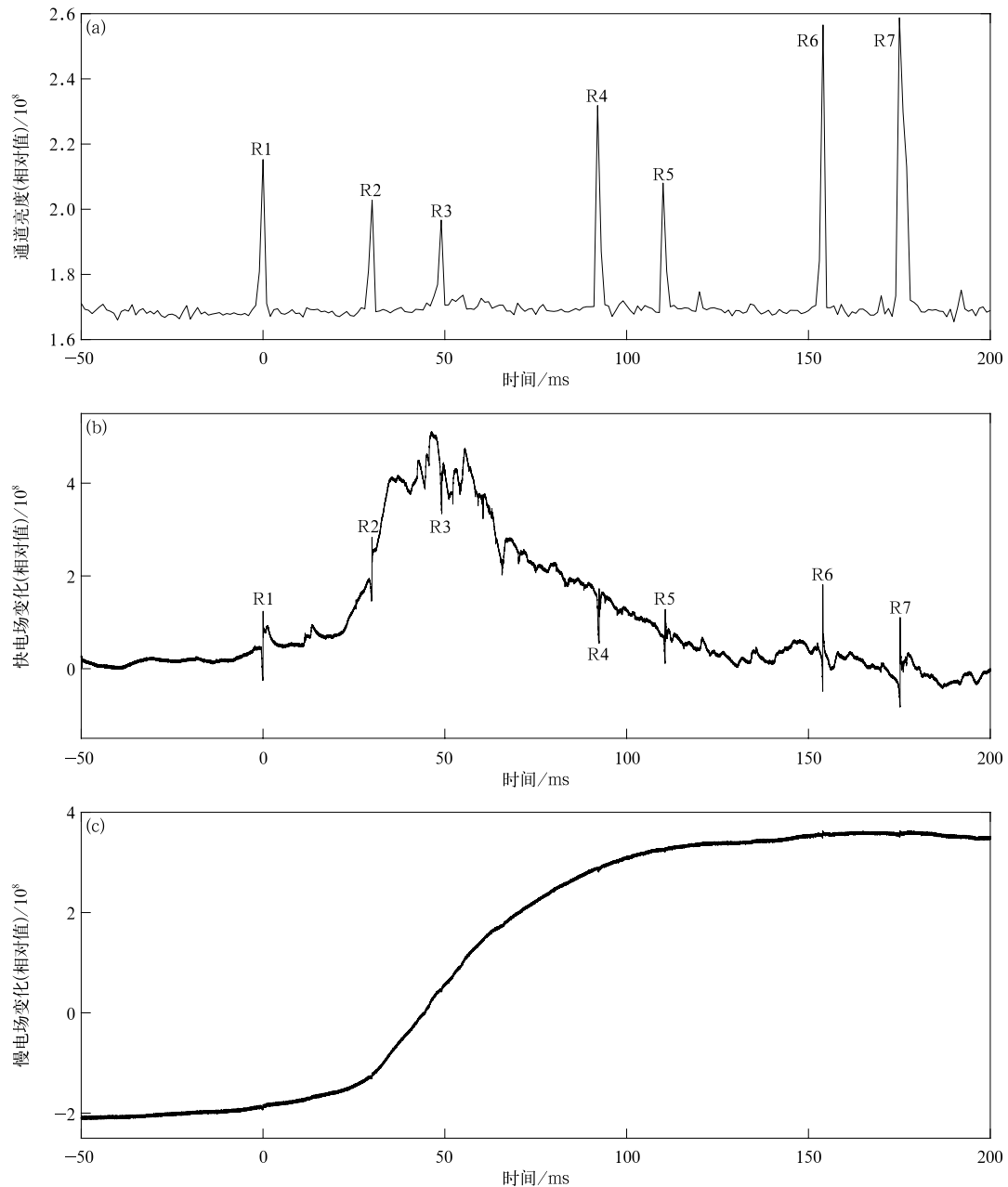


图 2 广州塔上行闪电的通道亮度(HC-3 拍摄的图像所有像素点灰度值之和,记录时间窗口为 -50~200 ms)(a)、快电场变化(b)、慢电场变化(c)(R1~R7 代表 7 次回击)

Fig. 2 Synchronized image brightness(sum of the gray values of all pixels in each image, based on HC-3 images, within -50 to 200 ms time window)(a), fast(b) and slow(c) electric field change records of the Canton Tower upward flash(R1-R7 refer to 7 return strokes)

均沿着之前的已冷却的上行正先导通道回退至广州塔顶引发回击,7次回击(标注为R1~R7)均为负回击,回击时间间隔的平均值约为29 ms,回击峰值电流的最大值为-31 kA,最小值为-10 kA,平均值约为-18 kA。

图3为1000帧/s的高速摄像(HC-3)拍摄的正先导30帧选定图像的合成图。选择这30帧图像是为了呈现上行正先导的几何形状。本文在分析闪电通道发展特征时均简单以广州塔距

观测站的距离(3.3 km)估算图像中所有通道位置的图像分辨率。由图3可见,上行正先导从广州塔顶始发,上升至1.8 km的高度时出现两个分叉(分叉1和分叉2),分别朝图像的左右两侧伸展,之后分叉2又出现了两个明显的二级分叉。HC-3获取的7次直窜先导-继后回击过程的连续帧图像显示7次先导-回击序列均发生在上行正先导的分叉1通道中。

20000帧/s的高速摄像(HC-1)的观测视野如

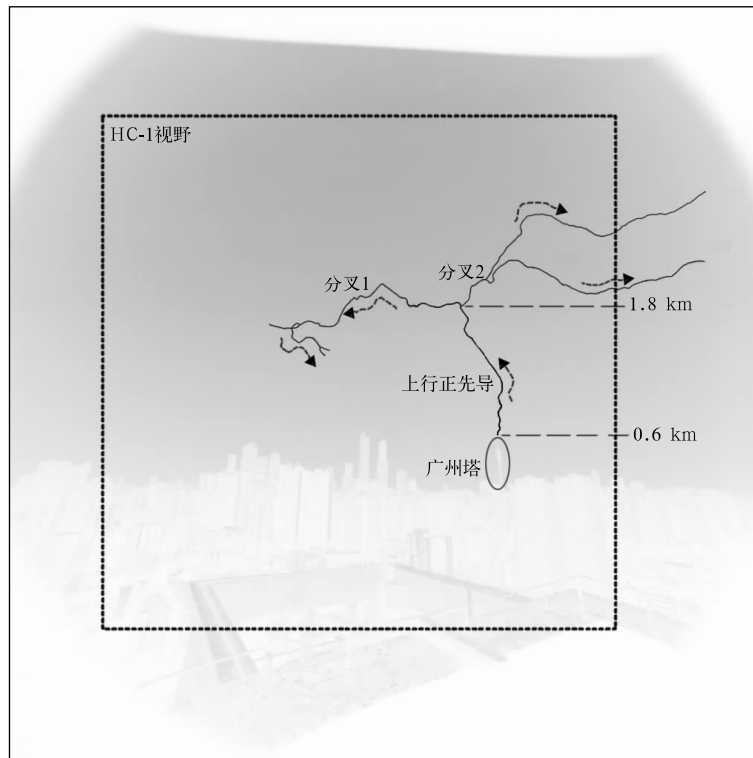


图3 1000帧/s高速摄像(HC-3)拍摄的上行正先导30帧选定图像合成图
(图像进行对比度增强和反相处理,图中虚线方框区域为HC-1视野范围)

Fig. 3 Composite image of 30 selected frames(from -150 to -40 ms)
obtained by HC-3(1000 fps) showing the upward positive leader

(image is inverted and contrast enhanced, the dashed rectangular box denotes the field of view of HC-1)

图3中虚线框区域所示。图4为HC-1拍摄的第2次直窜先导始发位置区域的连续16帧图像。由图4可见,直窜先导始发后双向传输,负端沿已冷却的上行正先导通道连续回退,到达广州塔顶引发继后回击。正端在向前传输时出现了3次突然向前延展现象。第1次正端突然延展发生在直窜先导始发后约0.1 ms,正端近似水平地向前伸展约160 m,进入未击穿空气中,之后一个新的分叉从直窜先导的始发位置伸出(29.40 ms),向前传输短暂时间后停止

(29.45 ms)。

第2次正端突然延展发生在29.60 ms。在第2次延展前,正端已停止向前传输。在正端前部出现了1个悬空先导段,长度约34 m,其距离正端头部约45 m(29.50 ms)。之后第2个悬空先导段出现(29.55 ms),长约46 m,距离正端头部更近,约28 m。第2个悬空先导段与正端连接,导致正端突然向前延展了约91 m(29.60 ms)。约0.05 ms后又发生了第3次正端突然延展现象,伸长约94 m(29.65 ms)。

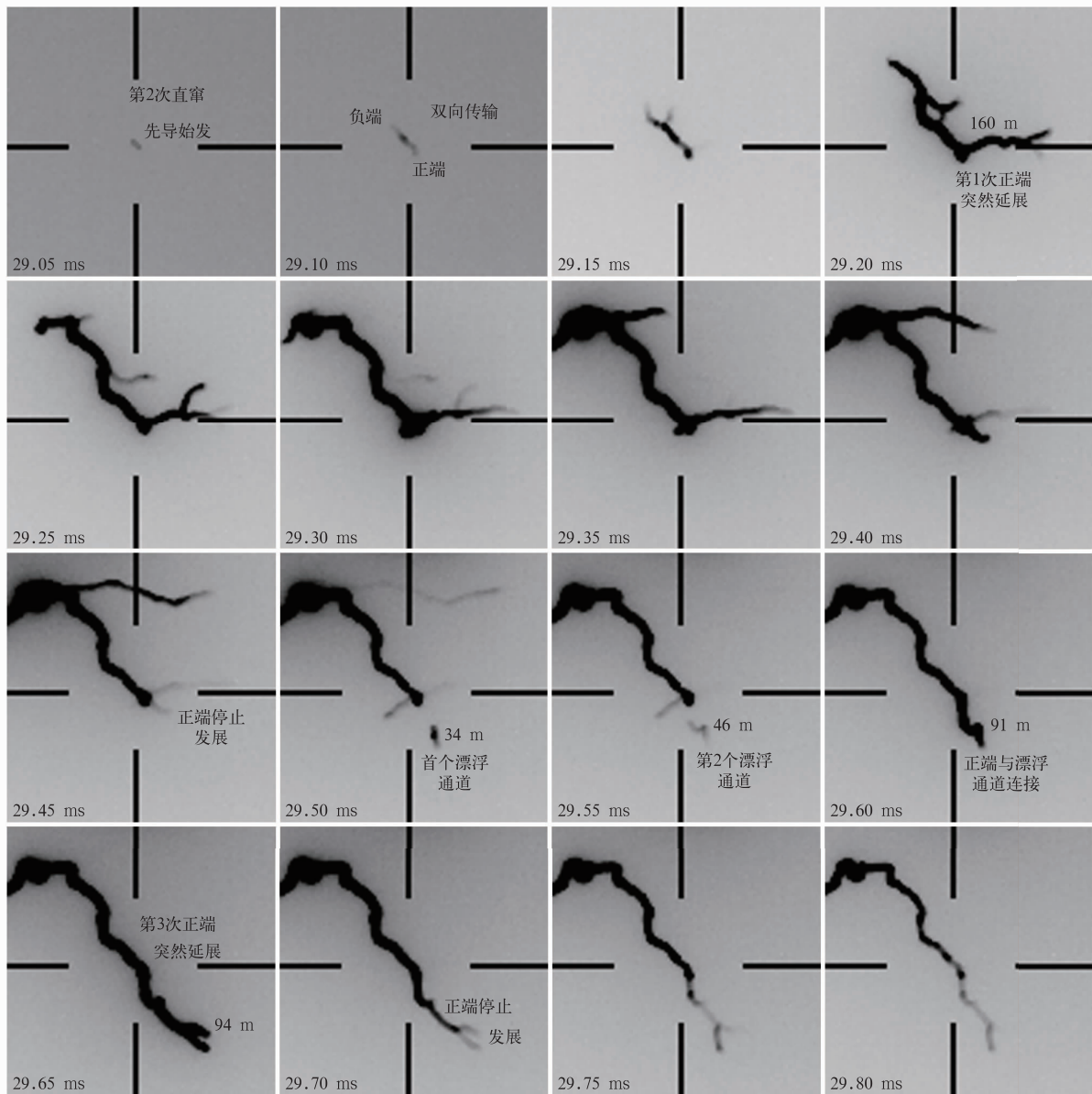


图 4 20000 帧/s 高速摄像(HC-1)拍摄的第 2 次直窜先导的 16 帧连续图像
(图像进行裁剪、对比度增强和反相处理,图像上时间为曝光结束时间)

Fig. 4 Sixteen consecutive images of the second dart leader obtained by the high-speed video camera 1
(HC-1, 20000 fps)(images are cropped, inverted and contrast-enhanced,
time on each image is the end of the exposure time)

第 1 次和第 3 次正端突然向前延展仅出现在 1 帧图像上,但悬空先导段出现并与直窜先导连接过程持续了约 0.15 ms(3 帧图像),因此,呈现了正端突然延展的详细过程。正端在第 2 次向前延展前已停止发展,且第 2 个悬空先导段比第 1 个更接近与正端头部,推测是悬空先导段朝正端方向伸展,并与正端相连。这与之前在负先导尖端头部观测到的空间先导行为相似,但尺度(平均值约 115 m)比空间先导偏大

(平均长度约为几米^[20])。整个直窜先导过程中,正端向前传输的平均速率约为 $1.1 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 3 次正端突然向前延展的二维速率分别为 3.2×10^6 , $1.8 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.9 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 比以往观测到的正先导在未击穿空气中传输的二维速率($10^4 \sim 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)偏大。

图 5 为 20000 帧/s 的高速摄像拍摄第 2 次回击后的 12 帧连续图像。由图 5 可见,回击开始后,

电流沿着直窜先导通道向上传播至先导始发位置附近(30.35 ms),然后通道逐渐冷却。发现通道冷却过程中头部出现亮度很弱的流光(30.35 ms 和 30.40 ms),之后头部突然向前延展,且延展通道后侧的局部通道的亮度增大(30.45 ms)。对比回击前双向先导正端伸展的路径和回击通道头部到达的位置后发现,回击通道仅到达之前双向(直窜)先导的

起始位置后就停止发展,并未进入直窜先导的正端通道中。因此,推测回击后原直窜先导正端通道的极性未发生变化,仍可称为正端。值得注意的是,连续电流阶段通道的突然延展并未沿着之前直窜先导正端传输的通道,而是开辟了新的通道,发展至未击穿空气中。

第1次延展通道头部以 $4.1 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的二

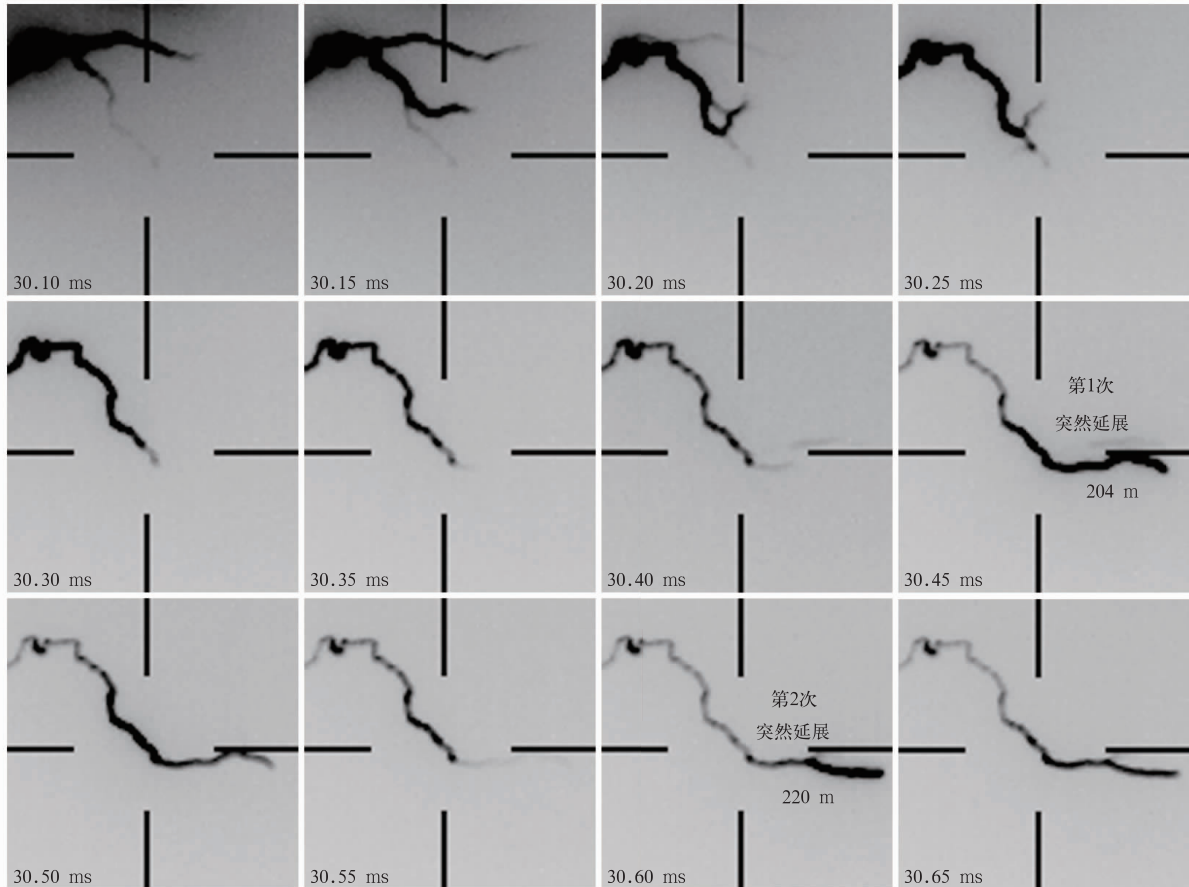


图 5 20000 帧/s 高速摄像(HC-1)拍摄的第 2 次回击后 12 帧连续图像

(图像进行裁剪、对比度增强和反相处理,图像上时间为曝光结束时间)

Fig. 5 Twelve consecutive images after the second return stroke obtained by the high-speed video camera 1 (HC-1,20000 fps)(images are cropped, inverted and contrast-enhanced, time on each image is the end of the exposure time)

维速率向前发展了约 204 m。此后延展的通道快速暗淡(30.50~30.55 ms),但约 0.05 ms 后,头部出现了第 2 次突然延展(30.60 ms)。值得注意的是,第 2 次延展始发于第 1 次延展通道的中段,并点亮始发位置之后的第 1 次延展的部分通道。第 2 次延展以 $4.4 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的二维速率向前发展了约 220 m,之后通道再次变暗。

基于 HC-1 拍摄的第 2 次直窜先导连续帧图像,可获取第 2 次直窜先导正、负两端 17 个清晰二

维速率计算样本,速率随时间变化如图 6 所示。第 2 次直窜先导负端二维速率范围为 $1.0 \times 10^6 \sim 1.1 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。去除停顿,第 2 次直窜先导正端二维非零速率范围为 $2.1 \times 10^5 \sim 3.2 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均值为 $1.1 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。第 2 次直窜先导双向发展时的正端间歇性传输,速率在突然伸展时迅速增大。值得注意的是,第 2 次直窜先导始发后正、负端速率均先增大后减小,之后再增大(图 6 中 I 所示,时间为 29.10~29.40 ms),且正端再次向前发

展后的速率变化趋势与负端相同(图 6 中 II 所示, 时间为 29.55~29.80 ms)。由此可见,正、负两端

同时传输时,二者速率呈正相关,表明正、负端同时向前发展时可能有互相促进作用。

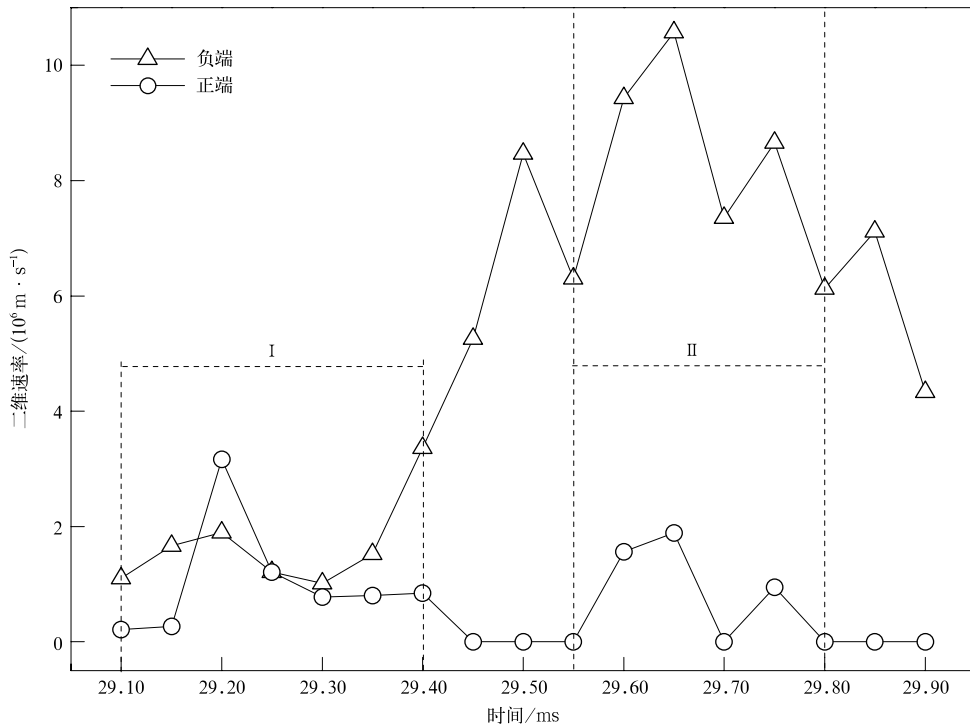


图 6 第 2 次直窜先导正、负端的二维速率

Fig. 6 The two-dimensional speed of the extending negative and positive ends of the second dart leader

3 结论和讨论

本文利用高速摄像系统获取的闪电通道图像和电场变化同步数据,分析了在一次广州塔上行闪电中观测到的双向发展的直窜先导回击前、后突然延展现象的细节特征。结论如下:

1) 上行闪电中双向发展的直窜先导的正端会间歇性地传输至未击穿空气中,在其头部可能发生多次突然伸展现象,这种突然延展现象可能是通过正端与出现在其头部附近的悬空先导序列相连所引发。

2) 第 2 次继后回击后,原直窜先导的正端发生 2 次突然延展现象,但并未沿回击前正端伸展的通道传输,而是建立了进入未击穿空气的新通道。

3) 回击前,正端 3 次突然伸展的二维平均速率约为 $2.3 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,伸展长度的平均值约为 115 m;回击后,通道头部 2 次突然伸展的二维平均速率约为 $4.3 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,约为回击前突然延展速

率的 2 倍,伸展长度的平均值约为 212 m。

在 Tran 等^[9]报道的悬浮通道正端、Wang 等^[26]观测到的上行正先导以及 Kostinskiy 等^[27]的长间隙放电试验中的正先导也发现头部存在突然延展行为,这种突然延展在光学上表现为梯级发展。本研究中的梯级发现是由在其头部前方出现的悬空先导段与正端相连引发的,这种短先导通道段可能是沿之前已存在的正先导通道发展的反冲先导,但未被光学设备探测到,也可能类似于在正先导通道侧面产生并与之连接的双向导^[42-46]。

Tran 等^[9]推测观测到的千米尺度的正梯级可能是由空间先导发展而来。此外 Kostinskiy 等^[24]在长间隙放电试验中观测到在正先导尖端前有疑似空间先导存在,但没有直接证据表明是正端头部附近存在的通常只在负先导头部出现的空间先导引发了梯级。与 Wang 等^[26]观测的正先导梯级步长(平均值约为 4.9 m)相比,文中回击前正端突然延展的长度(平均值约为 115 m)偏大,两个悬空先导段的尺度(约为 40 m)、直窜先导正端与悬空先导段尖端

间的距离(约为 42 m)远大于空间先导的长度(平均值约为 5 m^[24])和空间先导与负先导通道头部之间的距离(平均值约为 4 m^[24]),即就尺度而言,本研究在正端头部附近观测到的通道段与在负先导头部观测到的空间先导差异很大。但文中的悬空先导段形成于通道头部附近,主动靠近头部与主通道连接,这与出现在负先导头部的空间先导的行为相同,因此,仍无法排除悬空先导段是类似于空间先导的可能。

本研究发现回击前后正端延伸的路径不同,但发生的放电过程可能一致。先导双向传输阶段,正或负端向前击穿时会使另一端头部的电场增强,增大另一端头部与其附近的电势差,直至突破阈值向前击穿,因此,正、负两端在同时传输时速率表现为正相关。当然,本研究采用的高速摄像数据的时间分辨率约为 50 μs ,如果采用帧率更快的设备,可能会发现先导正、负端并非同时发展。而回击瞬间中和大量的负电荷,使更多的正电荷快速地涌入正端,迅速增大了正端与广州塔顶的电势差,这种增大的程度大于先导阶段,即回击后正端向前伸展的速度更快,延展的尺度更大。

回击后的连续电流阶段,原直窜先导正端发生突然延展现象,进入未击穿空气,延展二维速率也接近 $10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的量级。这与 Stock 等^[47]在闪电 K 过程观测到的从之前正先导头部附近向未击穿空气中伸展的快速正击穿非常相似,但仍需结合闪电多站辐射源定位系统获取上行闪电云内、云外放电通道三维时空演变特征和雷暴云电荷结构深入分析。

参 考 文 献

- [1] Kasemir H W. A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge. *J Geophys Res*, 1960, 65(7): 1873-1878, DOI:10.1029/JZ065i007p01873.
- [2] Mazur V, Fisher B D, Gerlach J C. Lightning strikes to an air-plane in a thunderstorm. *J Aircraft*, 1984, 21(8): 607-611, DOI:10.2514/3.45030.
- [3] Mazur V. Triggered lightning strikes to aircraft and natural intracloud discharges. *J Geophys Res*, 1989, 94(D3): 3311-3325, DOI:10.1029/JD094iD03p03311.
- [4] Castellani A, Bondiou-Clergerie A, Lalande P, et al. Laboratory study of the bi-leader process from an electrically floating conductor. I. General results, science, measurement and technology. *IEE Proceedings*, 1998, 145(5): 185-192, DOI: 10.1049/ip-smt:19982206.
- [5] Chen M L, Watanabe T, Takagi N, et al. Simultaneous observations of optical and electrical signals in altitude-triggered negative lightning flashes. *J Geophys Res*, 2003, 108(D8), DOI:10.1029/2002jd002676.
- [6] Rakov V A, Uman M A, Rambo K J, et al. New insights into lightning processes gained from triggered-lightning experiments in Florida and Alabama. *J Geophys Res*, 1998, 103(D12): 14117-14130, DOI:10.1029/97JD02149.
- [7] Saba M M F, Schumann C, Warner T A, et al. High-speed video and electric field observation of a negative upward leader connecting a downward positive leader in a positive cloud-to-ground flash. *Electric Power Systems Research*, 2015, 118(Suppl 1): 89-92, DOI:10.1016/j.epsr.2014.06.002.
- [8] Montanyà J, Oscar V D V, Williams E R. The start of lightning: evidence of bidirectional lightning initiation. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15180, DOI:10.1038/srep15180.
- [9] Tran M D, Rakov V A. Initiation and propagation of cloud-to-ground lightning observed with a high-speed video camera. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 39521, DOI:10.1038/srep39521.
- [10] 张义军, 周秀骥. 雷电研究的回顾和进展. *应用气象学报*, 2006, 17(6): 829-834.
- [11] Mazur V, Ruhnke L H. Model of electric charges in thunderstorms and associated lightning. *J Geophys Res Atmos*, 1998, 103(D18), DOI:10.1029/98JD02120.
- [12] Iudin D I, Rakov V A, Mareev E A, et al. Advanced numerical model of lightning development: Application to studying the role of lpcr in determining lightning type. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122: 6416-6430, DOI:10.1002/2016JD026261.
- [13] Jiang R, Wu Z, Qie X, et al. High-speed video evidence of a dart leader with bidirectional development. *Geophys Res Lett*, 2014, 41: 5246-5250, DOI:10.1002/2014GL060585.
- [14] Qie X, Pu Y, Jiang R, et al. Bidirectional leader development in a preexisting channel as observed in rocket-triggered lightning flashes. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122: 586-599, DOI: 10.1002/2016JD025224.
- [15] Wu B, Lyu W, Qi Q, et al. High-speed video observations of recoil leaders producing and not producing return strokes in a Canton-Tower upward flash. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 8546-8553, DOI:10.1029/2019GL083862.
- [16] Berger K. Novel observations on lightning discharges: Results of research on Mount San Salvatore. *Journal of the Franklin Institute*, 1967, 283: 478-525, DOI: 10.1016/0016-0032(67)90598-4.
- [17] Orville R E, Huffines G R. Lightning Ground Flash Measurements over the Contiguous United States; A Ten-year Summary 1989 - 1998 // Proc 11th Int Conf on Atmosph Elec, 1999: 412-415.
- [18] 李俊, 张义军, 吕伟涛, 等. 一次多回击自然闪电的高速摄像观测. *应用气象学报*, 2008, 19(4): 401-411.
- [19] 李俊, 吕伟涛, 张义军, 等. 一次多分叉多接地的空中触发闪电过程. *应用气象学报*, 2010, 21(1): 95-100.
- [20] Biagi C J, Jordan D M. High-speed video observations of rock-

- et-and-wire initiated lightning. *Geophys Res Lett*, 2009, 36, L15801, DOI: 10. 1029/2009GL038525.
- [21] Biagi C J, Uman M A. Negative leader step mechanisms observed in altitude triggered lightning. *J Geophys Res Atmos*, 2014, 119: 8160-8168, DOI: 10. 1002/2013JD020281.
- [22] Gamerota W R, Idone V P, Uman M A, et al. Dart-stepped-leader step formation in triggered lightning. *Geophys Res Lett*, 2014, 41: 2204-2211, DOI: 10. 1002/2014GL059627.
- [23] Hill J D, Uman M A, Jordan D M. High-speed video observations of a lightning stepped leader. *J Geophys Res*, 2011, 116, D16117, DOI: 10. 1029/2011JD015818.
- [24] Qi Q, Lu W, Ma Y, et al. High-speed video observations of the fine structure of a natural negative stepped leader at close distance. *Atmos Res*, 2016, 178/179, 260-267, DOI: 10. 1016/j. atmosres. 2016. 03. 027.
- [25] Berger K, Vogelsanger E. Photographische blitzuntersuchungen der jahre 1955—1965 auf dem Monte San Salvatore. *Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins*, 1966, 57(1): 599-620.
- [26] Wang Z, Qie X, Jiang R, et al. High-speed video observation of stepwise propagation of a natural upward positive leader. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121, DOI: 10. 1002/2016JD025605.
- [27] Kostinskiy A Y, Syssoev V S, Bogatov N A, et al. Abrupt elongation (stepping) of negative and positive leaders culminating in an intense corona streamer burst: Observations in long sparks and implications for lightning. *J Geophys Res Atmos*, 2018, 123: 5360-5375, DOI: 10. 1029/2017JD027997.
- [28] Lu W, Chen L, Ma Y, et al. Lightning attachment process involving connection of the downward negative leader to the lateral surface of the upward connecting leader. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 5531-5535, DOI: 10. 1002/2013GL058060.
- [29] Lu W, Chen L, Zhang Y, et al. Characteristics of unconnected upward leaders initiated from tall structures observed in Guangzhou. *J Geophys Res*, 2012, 117, D19211, DOI: 10. 1029/2012JD018035.
- [30] Qi Q, Lyu W, Wu B, et al. Three-dimensional optical observations of an upward lightning triggered by positive cloud-to-ground lightning. *Atmos Res*, 2018, 214: 275-283, DOI: 10. 1016/j. atmosres. 2018. 08. 003.
- [31] 王智敏, 吕伟涛, 陈绿文, 等. 2011—2012年广州高建筑物雷电磁场特征统计. *应用气象学报*, 2015, 26(1): 87-94.
- [32] 吴姗姗, 吕伟涛, 齐奇, 等. 基于光学资料的广州塔附近下行地闪特征. *应用气象学报*, 2019, 30(2): 203-210.
- [33] 武斌, 吕伟涛, 齐奇, 等. 一次正地闪触发两个并发上行闪电的光电观测. *应用气象学报*, 2019, 30(3): 3-12.
- [34] 吕伟涛, 陈绿文, 马颖, 等. 广州高建筑物雷电观测与研究 10年进站. *应用气象学报*, 2020, 31(2): 129-145.
- [35] 齐奇, 吕伟涛, 武斌, 等. 广州不同高建筑物上闪击距离的二维光学观测. *应用气象学报*, 2020, 31(2): 156-164.
- [36] Lv W, Ma Y, Zhang Y, et al. Total-sky Lightning Event Observation System and Method; US Patent. US8902312 B2. 2014-12-02.
- [37] Wang D, Takagi N, Gamerota W R, et al. Initiation processes of return strokes in rocket-triggered lightning. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118(17): 9880-9888, DOI: 10. 1002/jgrd. 50766.
- [38] 陈绿文, 吕伟涛, 马颖, 等. 粤港澳闪电定位系统对高建筑物雷电的探测结果分析. *应用气象学报*, 2020, 31(2): 165-174.
- [39] Rakov V A, Uman M A. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [40] Saba M M F, Schumann C, Warner T A, et al. Upward lightning flashes characteristics from high-speed videos. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121: 8493-8505, DOI: 10. 1002/2016JD025137.
- [41] Wang D, Takagi N, Watanabe T, et al. Observed characteristics of upward leaders that are initiated from a windmill and its lightning protection tower. *Geophys Res Lett*, 2008, 35, L02803, DOI: 10. 1029/2007GL032136.
- [42] Yoshida S, Biagi C J, Rakov V A, et al. The initial stage processes of rocket-wire triggered lightning as observed by VHF interferometry. *J Geophys Res Atmos*, 2012, 117, D09119, DOI: 10. 1029/2012JD 017657.
- [43] Pilkey J T. *The Physics of Lightning Studied Using Lightning Mapping Array, Electric Field, and Optical Measurements*. Florida: University of Florida, 2014.
- [44] Montanyà J, van der Velde O, Williams E R. The start of lightning: Evidence of bidirectional lightning initiation. *Scientific Reports*, 2015, 15180, DOI: 10. 1038/srep15180.
- [45] Warner T A, Saba M M F, Schumann C, et al. Observations of bidirectional lightning leader initiation and development near positive leader channels. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121: 9251-9260, DOI: 10. 1002/2016JD025365.
- [46] Yuan S, Jiang R, Qie X, et al. Development of side bidirectional leader and its effect on channel branching of the progressing positive leader of lightning. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 1746-1753, DOI: 10. 1029/2018GL08071.
- [47] Stock M G, Krehbiel P R, Lapiere J, et al. Fast positive breakdown in lightning. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122: 8135-8152, DOI: 10. 1002/2016jd025909.

High-speed Video Observations on Abrupt Elongations of the Positive End of Bidirectional Leader

Wu Bin¹⁾ Lü Weitao¹⁾ Qi Qi¹⁾ Ma Ying¹⁾ Chen Lüwen²⁾ Jiang Ruijiao¹⁾

¹⁾ (Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering / State Key Laboratory of Severe Weather,
Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080)

Abstract

One of the most important advances in lightning physics research in recent decades is the introduction of the bidirectional development of leaders and its observation and verification, but this theory is not paid much attention until more and more observation results of natural lightning, long gap spark discharge in laboratory and artificially triggered lightning have proved the correctness of the concept. The theory is used to establish the model of leader to interpretate the physical mechanism of lightning initiation and development. High-speed video camera observation not only provides direct evidence for the development of bidirectional leader, but also gives details of positive and negative ends. Previous observations show that the negative leader developed in a step-wise manner by relying on the space stem/leader and the corona streamer at the front of the new leader's tip. Positive leaders propagate in a continuous or step-wise manner, but to date, characteristics and mechanisms of the development of positive leaders are still unclear. In recent years, the abrupt elongations of the positive leader (or the positive end of bidirectional leader) are found in the high-speed video observation of the leader. This phenomenon might be closely related to the propagation mechanism of the positive leader and deserves further observation and analysis.

Based on synchronization data of high-speed video camera and electric field change of an upward flash at the Canton Tower, the abrupt elongations phenomenon of the positive end before and after the return stroke is analyzed in detail. Results show that the positive end of the second dart leader intermittently extends into the air. There are three abrupt elongations of the second dart leader of the positive end, and the second abrupt elongation is caused by the connection between the positive end and the floating channel in which the tip of the positive end appears. After the second subsequent return stroke, there are two abrupt elongations of the channel tip. The two-dimensional average speed of the three abrupt elongations of the positive end is approximately $2.3 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and the average length of the three abrupt elongations is approximately 115 m. After the return stroke, the two-dimensional average speed of the two abrupt elongations of the channel tip is approximately $4.3 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and the average length of the two abrupt elongations is approximately 212 m.

Key words: upward lightning flash; bidirectional leader; abrupt elongation; high-speed video observations