多接地闪电的发展特征

樊斌¹, 袁萍^{1*}, 王雪娟^{1,2}, 赵阳², 岑建勇³, 苏延玲¹

1. 西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃省原子分子物理与功能材料重点实验室, 兰州 730070;

2. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044;

3. 山西师范大学物理与信息工程学院, 临汾 041004

* 通讯作者, E-mail: yuanp@nwnu.edu.cn

收稿日期: 2017-02-21; 收修改稿日期: 2018-02-02; 接受日期: 2018-04-11; 网络发表日期: 2018-05-07

国家自然科学基金项目(批准号: 11475139、11365019)和甘肃省自然科学基金项目(编号: 1506RJZA119)资助

摘要 依据高速摄像系统记录的一次多接地点云对地闪电过程的光学图像和同步的辐射电场变化资料, 分析了其先导的传输和电场变化特征、接地行为, 估算了先导发展的速度, 并探讨了它与相应的回击间隔时间、峰值电流之间的关系. 结果表明: 该多接地闪电首次回击3个明显接地点间的平均距离约为512.7m, 相应电场快变化脉冲的平均间隔为3.8 μ s. 梯级先导脉冲间的平均间隔比普通单接地闪电的相应值小. 从光学图片上看, 该闪电有左右两个主通道, 左通道在首次回击强放电之后有明显的直窜先到达地面附近, 但没有形成回击; 而右通道出现了更为少见的现象, 继后回击R2与相应直窜先导的时间间隔很长, 在先导到达地面约2.1ms后才发生回击. 这一现象应该与首次回击放电较强, 接地点附近的电荷没能及时补充有关. 左右通道梯级先导的发展速度分别约为 1.23×10^5 和 1.16×10^5 m s⁻¹. 左通道梯级先导一个次分支未能接地、发展为企图先导, 这与连接它的主通道分支太多有关; 另外, 该次分支的发展方向与大气电场方向接近垂直, 不利于电荷的传输. 5次继后回击均发生在右通道, 其直窜先导的二维速度均在常见的数值范围内. 直窜先导发展速度与相应继后回击的峰值电流正相关.

关键词 多接地闪电, 高速摄像, 电场变化, 先导

1 引言

负地闪首次回击通常有许多下行分支, 回击时, 如果分支能够在主通道电荷完全中和之前到达地面, 就会形成多接地点回击(孔祥贞等, 2005). 多接地点回击现象比较少见. 由于多接地闪电对地面设施的危害更大, 其形成和传输过程的特征也一直是雷电防护和研究领域关注的课题. 关于多接地闪电的研究资料比较少. 孔祥贞等(2003)利用1000fps的高速摄像系统和时

间分辨率为1 μ s的快、慢天线闪电电场变化测量仪研究了首次回击具有多个接地点的地闪先导过程的光学和电学特性. Guo和Kridner(1982)利用时间分辨率为1 μ s的光电观测系统获得的资料推测: 首次回击具有双接地点的闪电是由同一个梯级先导引发的两个接地分支引起的. Valine和Kridner(2002)依据视频图像和电场变化资料的统计分析发现: 多分支接地一般发生在第二个回击中. Wang等(2000)报道的多接地点闪电回击通道的发展速度为 $1.3 \times 10^8 \sim 1.5 \times 10^8$ m s⁻¹. 最近, 武斌等

中文引用格式: 樊斌, 袁萍, 王雪娟, 赵阳, 岑建勇, 苏延玲. 2018. 多接地闪电的发展特征. 中国科学: 地球科学, 48: 938–946, doi: 10.1360/N072017-00061
英文引用格式: Fan B, Yuan P, Wang X J, Zhao Y, Cen J Y, Su Y L. 2018. Development characteristics of cloud-to-ground lightning with multiple grounding points. Science China Earth Sciences, 61: 1127–1135, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9204-4>

(2013)结合二维光学摄像与闪电VHF辐射源三维定位系统观测,研究了双接地负地闪通道的发展过程,发现:主通道内的电流比分叉通道的强。Sun等(2016)依据短基线VHF定位,反演了一次多接地点闪电的发展过程,并探讨了其产生的原因。

本文利用高速摄像系统和快、慢天线电场变化测量仪得到多接地点闪电的光学图像和相应的电场变化资料,分析了其先导的传播、接地行为以及相应的电场变化等特征,讨论了先导发展速度与相应回击的时间间隔、峰值电流的相关性。为进一步探讨多接地点闪电的发展机理和雷电防护研究提供了参考数据。

2 试验设备

2015年夏季在青海省西宁市大通县塔尔镇进行了野外雷电观测实验。观测点东、西面都是连绵的山脉,山上有较多自然尖端,夏季容易形成闪电。8月29日17:35:06,高速摄像系统和快慢天线电场变化测量仪同时记录到一次多接地点闪电过程。摄像机参数设置为9060fps、物镜焦距20mm、图像分辨率为896×400。快、慢天线电场变化测量仪的频率响应范围分别为100Hz~3.2MHz和0.18Hz~3.2MHz,时间常数分别为2ms和5.6s。输出动态范围均为±3V。天线接收的信号由采样率为10MS s⁻¹、幅值分辨率12bit的数据采集卡采样并存入微机。快、慢天线电场变化测量仪和高速摄像系统通过GPS实现同步。

得到电场变化波形后,依据天线标定参数,将输出电压转换为电场变化值。基于传输线模式(Rakov和Uman, 2003; 郗秀书等, 1998),由回击辐射电场初始峰值 $E_{\max}$ (Haddad等, 2012; 黎勋等, 2017)、并考虑电磁波沿地表传输衰减效应(Cooray等, 2000)估算得到回击通道峰值电流 $I_{\max}$ 。

3 资料分析

从快电场变化波形(图1b)可以看出,整个闪电放电持续约501.2ms,共发生了6次负极性回击。用R1表示首次回击,R2~R6表示相应的继后回击。由于该闪电放电很强,慢电场在第五个回击时饱和。由声光差估算,闪电距离观测站约10.5km。

从光学图片上看到,该闪电有左右两个主通道,首

次回击有五个分支到达地面附近,回击R2~R6只在右通道发生(图2)。

3.1 接地行为

3.1.1 首次回击

规定首次回击发生的时刻为0ms。左右通道的梯级先导同时向下发展,头部的发光较亮(图3),这与梯级先导发展过程中头部具有较高电位有关(孔祥贞等, 2005)。云底到左侧地面的垂直高度约1.5km,不幸的是主分支起始点被云层遮挡未能记录到。高速摄像在首次回击发生前16.225ms开始拍到该闪电的梯级先导。它在刚穿出云底时有两个主分支d和e,其中左分支d发展到离地面约500、290和200m时分别出现次分支a~c;右分支e发展到离右侧地面约220m时出现次分支f。首次回击发生前0.110ms时,仅有两个主分支在发光。从0ms的图像看到,回击时,b~f五个分支均到达地面附近。从梯级先导到回击,通道d、e一直都在发光(图3),它们是首次回击放电的主要通道;再从0、0.111、78.035和78.146ms的图片可以看到,在首次回击和继后回击时,分支e、f在地面附近都有发光,说明它们也是接地的。分支b、c只在0ms时可以看到接近地面,所以难以肯定它们是否接地。由于高速摄像机的时间分辨率仅为1/9060s,无法分辨三个分支接地的顺序。从图3山的轮廓可以清晰地看出:右侧地势相对较高,-1.876ms时的图片显示,右通道先于左通道接近地面,并且,它的次分支f最先接近地面。结合通道发光强度推断(Idone和Orville, 1985; Wang等, 2005),右通道e对应的放电应该弱于左通道d。慢电场放大波形(图1c)显示:首次回击初始阶段出现了多个明显的小峰,应该与多分支接地有关(孔祥贞等, 2003)。最先出现的电场变化值R11较小,R12和R11的时间间隔仅有0.9μs,且R12的峰值大于R11、小于R15。由此推断,电场变化R12和R15应该分别对应右通道e和左通道d放电,R11对应次分支f放电。而R12和R15之间小的电场变化脉冲应该与次分支b、c接近地面有关,但它们的对应关系难以确定。f、e、d三个明显接地分支引起的电场变化脉冲R11、R12、R15的时间间隔分别约为0.9、6.8μs,平均时间间隔为3.8μs,小于孔祥贞等(2003, 2005)得到的平均间隔8.6、10μs。这与该闪电接地点之间的距离相对较近有关。

由图2首次回击(0ms)通道接地点连线上的像素点

图1 闪电引起的地面快、慢电场变化波形

(a) 慢电场变化波形; (b) 快电场变化波形; (c) 首次回击电场慢变化初始峰值的放大波形

图2 六个回击通道的高速摄像照片

数目, 依据物像比例关系估算的三个接地点的二维间距分别约为 $L_{de}=670.5\text{m}$, $L_{ef}=355.0\text{m}$, 平均距离为 512.7m . Thottappillil等(1992)报道的距离在 $0.3\sim 7.3\text{km}$ 内. 次分支a未能接地, 最终发展成为企图先导. 其原因之一是与其相连的主通道分支太多, 导致该分支先导与地面间的电势差瞬时下降(Jiang等, 2015); 另外, 由于次分支a的发展方向与大气电场方向接近垂直, 不利于电荷的传输, 导致先导头部电荷供应量相对较少,

不足以支持先导继续向前传播. 从理论上解释: 先导传输过程中, 将云中的负电荷向下运输且储存在先导通道中. 由于大气电场的方向近似垂直于地面, 负电荷传输过程中, 如果先导分支通道的发展方向与大气电场方向的夹角越小, 通道中负电荷受到的电场力越大, 越有利于电荷运动, 使先导头部的负电荷量增多、先导头部与地面间的电场变大, 更容易向下传输. 当次分支a传播到离左侧地面约 280m 时, 与其相连的左通道d已发生回击, 致使其储存的负电荷被中和, 最终发展成为企图先导.

出现多个接地点的原因与闪电发生区域的地形也有关. 该闪电发生的山上地势起伏不平、并且有较多灌木和草丛等自然尖端. 雷暴条件下, 尖端的强电晕放电会向周围释放大量的电晕离子, 使得云与地面之间形成多个口袋电荷区(郗秀书等, 2003), 从而容易产生多接地放电现象.

3.1.2 继后回击

与梯级先导的发展类似, 继后回击R2的直窜先导也是左右通道同时向下发展, 但发光明显比梯级先导的亮(图4). 孔祥贞等(2003)认为: 直窜先导能否到达地

图 3 首次回击前后放电通道发展的高速摄像照片

面形成接地通道与先导的发展速度有关, 发展速度较快的通道可能会“抢先”到达地面. 右通道e的发展速度较快, 因此, 成为继后回击的接地通道. 在大多数情况下, 负地闪的回击在先导之后紧接着发生(孙景群, 1982). 但是, 该闪电继后回击R2出现了比较少见的现象. 约75.718ms时, 右通道e的直窜先导到达地面附近, 但没有紧接着形成回击; 75.938ms时, 左通道d的直窜先导也到达地面附近; 之后, 两个通道停止发光, 左通道中始终没有再形成回击, 而右通道e直到78.035ms左右才发生回击. 从电场变化波形得到: 先导到达地面与回击发生的时间间隔约为2.1ms. 在先导到达地面到回击发生之前的这一段不发光阶段内, 没有记录到任何电场变化信息. 另外, 在右通道回击期间, 78.146~78.256ms阶段, 左通道中再次有先导接近地面, 但仍然没有发生回击(图5). 上述特征与首次回击时左通道放电过强有关. 从图4可以看出, 先导能够传到地面附近, 说明云中负电荷是充足的, 但没能紧接着发生回击, 主要原因是接地点附近电荷量不足. 首次回击时, 左通道放电很强, 接地点附近的大量正电荷被中和, 电荷再次积累到足够量需要一定的时间. 相对而言, 右通道首次回击放电较弱, 且左右通道接地点间

有一定的距离, 所以, 回击才能够在右通道发生. 另外, 从首次回击和直窜先导的发展图片中都可以看到, 左通道d上部有一个发光非常强的结点, 也会消耗大量电荷.

3.2 发展特性

依据每一帧图片上先导头部新增长度的像素点数目、利用物像比例关系, 估算得到左、右通道梯级先导发展的二维速度分别约为 1.23×10^5 和 $1.16 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$. 这与文献(李俊等, 2010; Qie等, 2002; 王道洪等, 2000)报道的普通单接地闪电梯级先导的二维速度 $1 \times 10^5 \sim 3.8 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$ 一致. 继后回击R2相应的直窜先导左、右通道的二维速度分别约为 0.61×10^6 和 $1.17 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$. 文献(Jordan等, 1992; Mach和Rust, 1997; Kong等, 2008)报道的自然闪电直窜先导的平均速度为 $5.5 \times 10^6 \sim 1.9 \times 10^7 \text{ m s}^{-1}$. Wang等(1999)得到的人工触发闪电直窜先导平均速度为 $2 \times 10^6 \sim 1.3 \times 10^7 \text{ m s}^{-1}$. 最近Saba等(2008)和张广庶等(2008)计算得到直窜先导的速度为 $1.3 \times 10^6 \sim 4.1 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$. 本文报道的闪电5次继后回击的直窜先导二维速度在常见的数值范围内. 表明多接地闪电的先导发展速度与单接地点闪电的相应数

图4 R2相应直窜先导通道发展的照片

图5 继后回击R2高速摄像照片

值没有量级上的差异(王道洪等, 2000; Wang等, 1999). 直窜先导传输过程中, 左右通道的速度变化趋势基本一致, 随着直窜先导向下发展, 其速度逐渐减小(图6). 这与文献(Campos等, 2014)所得结论一致.

强闪电放电过程的特征参数一直是雷电防护研究最为关注的问题. 表1列出了此次地闪各回击对应的特征参数. t_i 为回击之间的时间间隔(以回击电场初始峰对应的时间计算)、 t_p 为回击通道发光持续时间(近似看作回击电流的持续时间). 其中, 回击R1的左、右通道发光持续时间分别约为3.41ms和0.55ms; $E_{\max}$ 为归一化到100km的回击初始电场变化峰值(Haddad等, 2012; 黎勋等, 2017)、 $I_{\max}$ 是估算得到的回击电流峰值、 v_{2D} 为先导发展的平均二维速度.

该闪电回击峰值电流为8.9~19.9kA, 平均值为16.0kA(表1). 郗秀书等(2012)对36次人工引发雷电实测回击电流的统计分析发现, 峰值电流在4.4~41.6kA范围, 平均值为12.1kA. 王道洪等(2000)认为负地闪首次回击的峰值电流平均为20~40kA, 继后回击的峰值电流一般约为首次回击的一半. 黎勋等(2017)对421次

图6 继后回击R2相应直窜先导左右通道的发展速度变化

负地闪首次回击和789次继后回击电场变化峰值进行了统计分析, 得到其归一化到100km的平均值分别为7.2和5.0V m^{-1} .

图7显示, 该多接地闪电的直窜先导传输速度与相应继后回击峰值电流正相关. 这与Idone等(1984)从人工触发闪电得到的结论一致. 从理论上解释, 较多的云中电荷产生的强场会使先导发展速度加快. 直窜先导向下发展过程中, 通道速度越快, 存储的电荷量越多, 相应回击峰值电流也越大.

先导与前一次回击间的时间间隔越长, 先导的速度越小(如R2、R4); 反之则反(图8). 这与孔祥贞等(2003)报道的单接地闪电的特征一致. 从理论上解释: 长时间间隔会使通道的导电性降低, 直窜先导的速度减小.

3.3 先导电场变化

3.3.1 梯级先导电场变化

波形分析表明: 该闪电梯级先导持续约23ms, 其电场变化波形上叠加有脉冲式变化, 脉冲的极性与回击极性一致, 脉冲间隔为1.5~29.9 μs , 平均间隔11.4 μs . 这些脉冲是梯级过程产生的(Beasley等, 1982). Qi等(2016)利用电磁场变化记录仪得到单接地负地闪梯级先导脉冲间隔为13.9~23.9 μs , 平均间隔17.4 μs . Hill等(2011)利用高速摄像记录的资料得到单接地负地闪梯级先导梯级间平均间隔为16.4 μs . Cooray和Lundquist(1982)和Krider等(1977)报道的数据分别为16和14 μs . 本文得到的多接地闪电的梯级先导脉冲平均间隔比大

图7 闪电直窜先导发展速度与继后回击峰值电流的相关性

图8 闪电先导发展速度与回击间隔时间的关系

多数文献报道的单接地负地闪的数值小。该闪电的先导从云端开始就有两个主通道同时以梯级形式传播,接近地面时,又出现了4个分支,这些分支也以梯级的形式传播;电场观测设备会同时记录到两个主通道及其分支的梯级脉冲但又无法分辨辐射源的位置(图9)。

3.3.2 直窜先导电场变化

L2为相应的直窜先导过程(图10a)。先导持续时间 T_{L2} 约2.67ms, 这比高速摄像观测所得数据1.766ms略大, 主要原因是电场变化记录仪的时间分辨率比高速摄像的高, 且远距离光学观测难以记录到先导通道的弱发光阶段。 T 为直窜先导接地与回击发生的时间间隔, 约为2.1ms。从直窜先导电场脉冲变化结束到回击R2发生, 电场平缓下降, 没有明显脉冲出现(图10a), 电场值从19.75下降到8.92V m⁻¹, 变化量为10.83V m⁻¹。由R2相应直窜先导接地前300μs内的电场变化放大波形(图10b)可以看出, 直窜先导电场波形上也叠加有脉冲式变化, 脉冲间隔为1.6~20μs, 平均间隔5.3μs, 脉冲

的极性与回击极性一致。另外, 与光学图像反映的特性一致, 在75.938ms附近, 即: 左通道d的直窜先导到达地面后没有形成回击, 电场波形也没有明显的强脉冲出现。

继后回击R3~R6相应的直窜先导电场变化资料分析发现: 与普通单接地闪电的特征一致, 波形上也叠加有若干小的脉冲。直窜先导离地面越近, 先导脉冲越对称, 脉冲间隔越大。

表2列出了闪电各回击相应先导的部分参数, Δt_{Li} 为先导脉冲的时间间隔、 Δt_L 为先导脉冲平均时间间隔、 Δt_{LR} 为最后一个先导脉冲与回击的时间间隔。可以看出, 直窜先导脉冲的平均间隔为2.7~5.3μs。Wang等(1999)利用ALPS在佛罗里达对普通单接地闪电所得到的结果为1.7~7.2μs。多接地闪电继后回击直窜先导脉冲的平均间隔与普通单接地闪电的值接近。直窜先导脉冲的平均间隔小于梯级先导的相应值。随着闪电的发展, 通道导电能力增强, 先导脉冲间的平均间隔逐渐减小。

表1 闪电各回击和相应先导的特征参数

回击序列	t_i (ms)	t_p (ms)	$E_{\max}$ (V m ⁻¹)	$I_{\max}$ (kA)	v_{2D} (10 ⁶ m s ⁻¹)
R1		3.410	5.96	19.9	0.12
R2	78.119	3.774	2.67	8.9	0.89
R3	62.817	3.201	5.56	18.5	9.22
R4	71.955	3.422	4.86	16.2	4.13
R5	35.534	3.104	5.25	17.5	8.66
R6	53.321	4.525	4.43	14.8	5.51

图 9 闪电梯级先导电场变化波形整个梯级先导电场变化(a)和回击发生前0.3ms(b)内梯级先导电场变化的放大波形

图 10 继后回击R2之前的电场变化波形

表 2 闪电各回击对应先导的特征参数

先导顺序	$\Delta t_{L1}(\mu\text{s})$	$\Delta t_L(\mu\text{s})$	$\Delta t_{LR}(\mu\text{s})$	$t_i(\text{ms})$
L1	1.5~29.9	11.4	10	
L2	1.6~20	5.3	2100	78.119
L3	1~20.3	3.2	1.7	62.817
L4	1.5~14.6	3.6	9.6	71.955
L5	0.5~12.7	3.7	1.3	35.534
L6	1~8.9	2.7	2.4	53.321

4 结论

多接地闪电的梯级先导脉冲间的平均时间间隔小于普通单接地闪电的值。该多接地闪电梯级先导左右通道的发展速度分别约为 1.23×10^5 和 $1.16 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$ 。首次回击3个明显接地点间的平均距离约为512.7m, 相应电场快变化脉冲的平均间隔为 $3.8 \mu\text{s}$ 。闪电梯级先导次分支a未能接地、发展为企图先导与其主通道分支太多有关; 另外, 次分支a的发展方向与大气电场方向接近垂直, 不利于电荷的传输也是主要因素之一。继后回击R2与相应直窜先导的时间间隔较长, 应该与首次回击放电较强, 接地点附近的电荷没能及时补充有关。5次继后回击直窜先导的二维速度均在常见的数值范围内。多接地闪电的直窜先导发展速度与相应继后回击峰值电流呈正相关。

致谢 感谢青海省大通县教育局、大通县回族女子完全中学对野外观测试验的大力支持和帮助。

参考文献

- 孔祥贞, 鄯秀书, 张广庶, 张彤. 2005. 多接地点闪电的梯级先导与回击过程的研究. 中国电机工程学报, 25: 142–147
- 孔祥贞, 鄯秀书, 王才伟, 张义军, 王怀斌, 张翠华. 2003. 首次回击具有多个接地点的地闪光学和电学特征的个例分析. 高原气象, 22: 259–267
- 黎勋, 鄯秀书, 刘昆, 王宇, 王东方, 刘明远, 孙竹玲, 张鸿波. 2017. 基于高时间分辨率电场变化资料的北京地区地闪回击统计特征. 气候与环境研究, 22: 231–241
- 李俊, 吕伟涛, 张义军, 董万胜, 郑栋, 陈绍东, 邱实, 王涛, 刘恒毅, 陈绿文. 2010. 一次多分支多接地的空中触发闪电过程. 应用气象学报, 21: 95–100
- 鄯秀书, 杨静, 蒋如斌, 王彩霞, 冯桂力, 吴书君, 张广庶. 2012. 山东人工引发雷电综合观测实验及回击电流特征. 大气科学, 36: 77–

88

- 鄯秀书, 张广庶, 孔祥贞, 张义军, 王怀斌, 周筠珺, 张彤, 王素举. 2003. 青藏高原东北部夏季雷电特征的观测研究. 高原气象, 22: 209–216
- 鄯秀书, 郭昌明, 张翠华, 刘欣生. 1998. 地闪回击的微秒级辐射场特征及近地面连接过程分析. 高原气象, 17: 44–54
- 孙景群. 1982. 雷电. 北京: 电力工业出版社. 74
- 王道洪, 鄯秀书, 郭昌明. 2000. 雷电与人工引雷. 上海: 上海交通大学出版社. 121
- 武斌, 张广庶, 王彦辉, 李亚珺, 张彤, 范祥鹏, 吕伟涛. 2013. 双接地负地闪VHF辐射源放电通道和光学通道的对比分析. 高原气象, 32: 519–529
- 张广庶, 赵玉祥, 鄯秀书, 张彤, 王彦辉, 陈成品. 2008. 利用无线电窄带干涉仪定位系统对地闪全过程的观测与研究. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 1167–1180
- Beasley W, Uman M A, Rustan Jr. P L. 1982. Electric fields preceding cloud-to-ground lightning flashes. *J Geophys Res*, 87: 4883–4902
- Campos L Z S, Saba M M F, Warner T A, Pinto Jr O, Krider E P, Orville R E. 2014. High-speed video observations of natural cloud-to-ground lightning leaders—A statistical analysis. *Atmos Res*, 135–136: 285–305
- Cooray V, Fernando M, Sørensen T, Götschl T, Pedersen A. 2000. Propagation of lightning generated transient electromagnetic fields over finitely conducting ground. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 62: 583–600
- Cooray V, Lundquist S. 1982. On the characteristics of some radiation fields from lightning and their possible origin in positive ground flashes. *J Geophys Res*, 87: 11203–11214
- Guo C M, Krider E P. 1982. The optical and radiation field signatures produced by lightning return strokes. *J Geophys Res*, 87: 8913–8922
- Haddad M A, Rakov V A, Cummer S A. 2012. New measurements of lightning electric fields in Florida: Waveform characteristics, interaction with the ionosphere, and peak current estimates. *J Geophys Res*, 117: D10101–26
- Hill J D, Uman M A, Jordan D M. 2011. High-speed video observations

- of a lightning stepped leader. *J Geophys Res*, 116: D16117
- Idone V P, Orville R E. 1985. Correlated peak relative light intensity and peak current in triggered lightning subsequent return strokes. *J Geophys Res*, 90: 6159–6164
- Idone V P, Orville R E, Hubert P, Barret L, Eybert-Berard A. 1984. Correlated observations of three triggered lightning flashes. *J Geophys Res*, 89: 1385–1394
- Jiang R B, Qie X S, Wang Z C, Zhang H B, Lu G P, Sun Z L, Liu M Y, Li X. 2015. Characteristics of lightning leader propagation and ground attachment. *J Geophys Res-Atmos*, 120: 11988–12002
- Jordan D M, Idone V P, Rakov V A, Uman M A, Beasley W H, Jurenka H. 1992. Observed dart leader speed in natural and triggered lightning. *J Geophys Res*, 97: 9951–9957
- Kong X Z, 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. *Geophys Res Lett*, 35: L05816
- Krider E P, Weidman C D, Noggle R C. 1977. The electric fields produced by lightning stepped leaders. *J Geophys Res*, 82: 951–960
- Mach D M, Rust W D. 1997. Two-dimensional speed and optical risetime estimates for natural and triggered dart leaders. *J Geophys Res*, 102: 13673–13684
- Qi Q, Lu W T, Ma Y, Chen L, Zhang Y, Rakov V A. 2016. High-speed video observations of the fine structure of a natural negative stepped leader at close distance. *Atmos Res*, 178-179: 260–267
- Qie X S, Yu Y, Guo C M, Laroche P, Zhang G S, Zhang Q L. 2002. Some features of stepped and dart-stepped leaders near the ground in natural negative cloud-to-ground lightning discharges. *Ann Geophys*, 20: 863–870
- Rakov V A, Uman M A. 2003. *Lightning: Physics and Effects*. New York: Cambridge University Press. 410
- Saba M M F, Cummins K L, Warner T A, Krider E P, Campos L Z S, Ballarotti M G, Pinto Jr O, Fleenor S A. 2008. Positive leader characteristics from high-speed video observations. *Geophys Res Lett*, 35: L07802
- Sun Z L, Qie X S, Liu M Y, Jiang R B, Wang Z C, Zhang H B. 2016. Characteristics of a negative lightning with multiple-ground terminations observed by a VHF lightning location system. *J Geophys Res-Atmos*, 121: 413–426
- Thottappillil R, Rakov V A, Uman M A, Beasley W H, Master M J, Shelukhin D V. 1992. Lightning subsequent-stroke electric field peak greater than the first stroke peak and multiple ground terminations. *J Geophys Res*, 97: 7503–7509
- Valine W C, Krider E P. 2002. Statistics and characteristics of cloud-to-ground lightning with multiple ground contacts. *J Geophys Res*, 107: 4441
- Wang D, Takagi N, Watanabe T, Rakov V A, Uman M A, Rambo K J, Stapleton M V. 2005. A comparison of channel-base currents and optical signals for rocket-triggered lightning strokes. *Atmos Res*, 76: 412–422
- Wang D, Takagi N, Watanabe T. 2000. Luminosity waves in branched channels of two negative lightning flashes. *J Atmos Elec*, 20: 91–97
- Wang D, Takagi N, Watanabe T, Rakov V A, Uman M A. 1999. Observed leader and return-stroke propagation characteristics in the bottom 400 m of a rocket-triggered lightning channel. *J Geophys Res*, 104: 14369–14376

(责任编辑: 黄建平)