

孙竹玲, 鄢秀书, 刘明远. 2015. 一次多回击负地闪放电过程的甚高频辐射和传输特征分析 [J]. 大气科学, 39 (4): 667–676. Sun Zhuling, Qie Xiushu, Liu Mingyuan. 2015. Analysis on very high frequency radiation and development characteristics of a negative cloud-to-ground lightning discharge with multiple return strokes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (4): 667–676, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14106.

一次多回击负地闪放电过程的甚高频辐射和传输特征分析

孙竹玲^{1,2} 鄢秀书¹ 刘明远¹

¹ 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 利用短基线时间差甚高频 (VHF) 辐射源定位系统对一次多回击负地闪放电过程进行详细研究发现, 负地闪的预击穿、梯级先导、直窜先导及回击后云内放电过程伴随有较强烈的 VHF 辐射。结合同步观测的闪电快、慢电场变化资料, 分析 VHF 辐射源时空发展特征发现, 预击穿阶段辐射源在云中的放电通道为双向发展, 平均速度均在 10^4 m s^{-1} 量级, 预击穿下行分支直接转化为梯级先导, 并产生多个分支通道同时向地面发展, 先导平均速度在 10^5 m s^{-1} 量级。继后回击之前先导过程均产生多个分支通道, 直窜先导平均速度在 $10^5 \sim 10^6 \text{ m s}^{-1}$ 量级, 新开辟的梯级先导速度在 10^5 m s^{-1} 量级。闪击间及地闪后期云内放电活动较为复杂, 主要表现为辐射源从闪电起始区域发展, 进一步延伸云内闪电通道。地闪后期多次负极性 K 变化过程 (Kitagawa and Kobayashi, 1958) 主要表现为负极性流光沿之前的正极性电离通道快速发展, 平均速度在 10^6 m s^{-1} 量级。

关键词 短基线 甚高频辐射源 负地闪 预击穿 K 过程

文章编号 1006-9895(2015)04-0667-10

中图分类号 P401

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14106

Analysis on Very High Frequency Radiation and Development Characteristics of a Negative Cloud-to-Ground Lightning Discharge with Multiple Return Strokes

SUN Zhuling^{1,2}, QIE Xiushu¹, and LIU Mingyuan¹

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

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract A negative cloud-to-ground lightning flash with multiple return strokes was observed using a short-baseline time-of-arrival lighting VHF (Very High Frequency) radiation location system. Combining the synchronous data of electric field change, the discharge processes of the preliminary breakdown, stepped leaders, dart leaders, and discharges after the last return stroke inside the cloud are analyzed. The results suggest that the preliminary breakdown depicts bi-directional propagations, with the magnitude of the average speeds of two concurrent channels of 10^4 m s^{-1} in opposite directions. The stepped leaders developed from the downwards channels of preliminary breakdown and split into two

收稿日期 2014-01-06; **网络预出版日期** 2014-11-19

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2014CB441405, 中国科学院科研装备研制项目 YZ201206, 国家自然科学基金重点项目 40930949

作者简介 孙竹玲, 女, 1986 年出生, 博士研究生, 主要从事大气电学方面研究。E-mail: sunzhuling@mail.iap.ac.cn

downward channels, only one off which contacted the ground. The propagation speeds of the two leader channels were about 10^5 m s^{-1} . Dart leaders appeared to initiate the return stroke along the first return stroke discharge channel, at a speed of about $10^5\text{--}10^6 \text{ m s}^{-1}$. They were accompanied by several branches developing to the ground simultaneously at a speed of about 10^5 m s^{-1} . The discharge processes were notably complex and intensive. VHF radiation was produced during the intermission between return strokes and after the last return stroke. During the discharge between the return strokes and the last return stroke, the radiation started from the source region of preliminary breakdown and extended the discharge channels in cloud. After the last return stroke, several K processes (Kitagawa and Kobayashi, 1958) were found to be caused by the negative streamers propagating backwards along the positive electrified channel. The propagation speeds of the K process were about 10^6 m s^{-1} .

Keywords Short baseline, VHF radiation source, Negative CG lightning, Preliminary breakdown, K process

1 引言

雷电是自然界中频繁发生的一种强烈放电现象,在其放电过程中辐射出很宽频谱范围的电磁波,覆盖从几赫兹到几千赫兹乃至光波、高能辐射等波段(郗秀书等, 1988, 1990)。利用闪电击穿放电过程产生的甚高频(VHF)电磁辐射信号确定辐射源位置(Rhodes et al., 1994),可以用来在小范围内较精细的刻画闪电通道的时空演变特征,同时克服了光学观测中云体遮挡的限制,是监测云闪、地闪放电中的各种放电过程发生发展、探究其物理机制的一个重要手段。

一次典型的负极性地闪放电包括预击穿、梯级先导—首次回击、多次直窜先导—继后回击及各种回击间放电等子过程。目前,对于一些用光学手段可以观测到的云外放电过程,如先导、回击等已经有了较多的认识(王彩霞等, 2012),但由于云层的遮挡,对于地闪预击穿、击间过程等云内放电过程的通道发展特征的认识有很大的限制,对其物理机制仍存在多种不同看法。张义军等(2003)利用LMA(Lightning Mapping Array)三维VHF辐射源定位资料分析认为负地闪预击穿过程起始于云中部负电荷区,后向下发展并在云下部正电荷区水平发展。Mazur and Ruhnke(1993)利用VHF宽带闪电干涉仪发现在闪电预击穿过程期间,存在正、负先导双向传输。而董万胜等(2003)首次发现地闪初始击穿过程出现通道两端同时发展的特征,结合同步电场变化观测,认为通道发展期间两端都伴随着有效负电荷的定向传输。张广庶等(2010)对负地闪预击穿过程分析认为对应辐射源从起始放电区域向周围传播,并在向下发展到一定高度后引发梯级先导向地面发展。

在地闪回击之间及最后一次回击过程后,慢

电场变化波形常观测到较快的阶梯状变化, Kitagawa and Kobayashi(1958)将其命名为K变化(源于德语 *Kleine veränderung*, 意思为小变化),其对应的云内放电过程称为K过程。Shao et al.(1995)认为其与直窜先导、企图先导是同一类放电现象,都是水平或垂直向地面传播的。Mazur(1989)认为K过程是在云闪和地闪中均可能发生的负极性流光,它在前进的过程中不断将远端的负电荷传输到起始区域,并认为K过程是沿双向先导正极性一端路径反向发展的负极性反冲流光(Mazur, 2002)。而Akita et al.(2010)利用VHF宽带辐射源定位发现,K过程在有些情况下表现为正流光沿之前负极性击穿电离通道反向传输,遇到负电荷区后,再次引发沿相同通道反向传输的负反冲流光。对于地闪预击穿阶段放电先导的产生和双向传播、K过程与先导放电的联系与区别仍然需要更多闪电定位资料的分析和支持。

2009年中国科学院大气物理研究所自行研制了基于时间差法的高时空分辨率短基线VHF辐射源定位系统,并在时间差定位算法上进行改进(Sun et al., 2013),实现了对闪电放电通道的精确重构,对孤立的短脉冲信号和持续时间较长的连续脉冲辐射信号均有较好的定位结果。本文利用该系统对2010年在山东观测到的一次具有较长云内放电过程的多回击负地闪定位结果进行分析,探究预击穿、先导过程以及回击后期放电过程的行为特征和放电机理。

2 实验观测系统

2010年7~8月期间在山东省沾化县开展了山东雷电观测实验,测站所在区域地势平坦,距离渤海湾约50 km,夏季易产生强烈的对流过程,雷电活动较为活跃。实验中采用短基线时间差定位

系统获取闪电的辐射源定位结果。系统利用辐射源到达不同测量天线的时间差别确定辐射源对于测站的仰角和方位角的二维位置信息。在数据处理中,对捕获到的 VHF 同步信号采用基于小波变换的广义相关时延估计算法及连续抛物线插值算法,削弱噪声对信号的干扰,提高时间差的计算精度和准确性,从而获得具有较高时间空间分辨率的辐射源定位结果。

系统硬件构成与 Sun et al. (2013) 类似,系统利用布置在边长 10 m 的正方形顶点的四个宽带平板天线接收闪电击穿放电产生的 VHF 辐射信号,信号依次通过前置放大器、带通滤波器及相同长度和频响特性的同轴电缆接入 LeCroy 104xi 示波器进行数据采集与记录,具体系统构架如图 1 所示。其中,带通滤波器通带宽度为 125~200 MHz;示波器采用 1 GS s^{-1} 的采样频率,8 bits 的垂直分辨率,选取分段记录模式,各通道最大可采集段数为 4000 段,每段 2002 个采样点。实验中用于记录电场变化的快、慢电场变化测量仪的带宽为 5 MHz 和 2 MHz,时间常数分别为 1 ms 和 3 s,记录采样率为 5 MHz,实际观测中设置预触发百分比为 20%,可记录触发之前 200 ms 和触发之后 800 ms 的快、慢电场变化数据。同时,利用高精度 GPS 时钟来同步 VHF 辐射信号及快、慢电场变化波形时间信息,绝对时间精度达到 50 ns。本文中,规定电场的正变化对应与雷暴云中负电荷被中和或负电荷向远离测站的方向发展,并利用闪电快、慢电场变化资料辅助短基线定位结果,判断闪电放电不

同阶段辐射源发展特征。

3 观测结果

此次负地闪发生于 2010 年 7 月 19 日 18:29:14 (协调世界时,下同),图 2 为其放电全过程的快、慢电场变化和对应的 VHF 辐射源定位结果。其中,图 2a 中电场变化幅值为归一化后的相对值,时间零点对应首次回击时刻。可以看出,此次负地闪放电总持续时间约为 860 ms,共包含 3 次回击过程(R1、R2 及 R3)及回击结束后长时间的云内放电过程。声光差记录为 9 s,估计负地闪发生位置距测站的水平距离约为 3 km。图 2a 下方的小短线表示短基线定位系统探测到 VHF 辐射信号的对应时间点,可以看出本次负地闪 VHF 辐射分布疏密不均,主要集中在回击之前的先导阶段和回击后的云内放电过程中,这表明在不同的闪电放电阶段 VHF 辐射强度及连续性上存在明显差异。

图 2b 为整个闪电放电过程的 VHF 辐射源定位结果,其中,方位角 0° 对应于测站的正北方向,并以顺时针方向为正方向。整个放电辐射源分布极广,方位角主要集中在 $105^\circ\sim 50^\circ$ 的范围内,仰角在 $0^\circ\sim 85^\circ$ 的范围内。在先导—回击阶段,闪电通道主要为向地面发展,并形成多个分支通道,地闪回击位置位于测站的西南方向;在回击间及地闪后期的云内放电过程中,闪电通道主要表现为在较高仰角位置处水平发展。下面主要针对 VHF 辐射较为集中的先导—回击阶段及回击后长时间的云内放电阶段进行分析。

3.1 先导—回击阶段 VHF 辐射发展特征

图 3 为负地闪预击穿及先导—首次回击过程的快、慢电场变化和辐射源定位结果。从图 3a 电场变化波形来看,首次回击时刻前快、慢电场变化均较弱,且没有观测到预击穿过程所对应的微秒量级脉冲波形,因此并不能直接从快、慢电场变化波形上区分预击穿阶段及梯级先导阶段。而从图 3a 中辐射源信号触发时刻分布可以看出,回击前的整个预击穿及梯级先导阶段 VHF 辐射持续时间约为 63 ms,并具有一定时间间歇性。

从图 3d 中 VHF 辐射源方位角—仰角的二维定位结果的时空分布为依据,分析认为 VHF 辐射起始的 10 ms 时间为预击穿阶段,该阶段辐射源从距地面约 2.6 km 高度的位置 S 处同时向仰角增大和降低的两个方向发展,如图 3d 中箭头 P1 及 P2 所示。

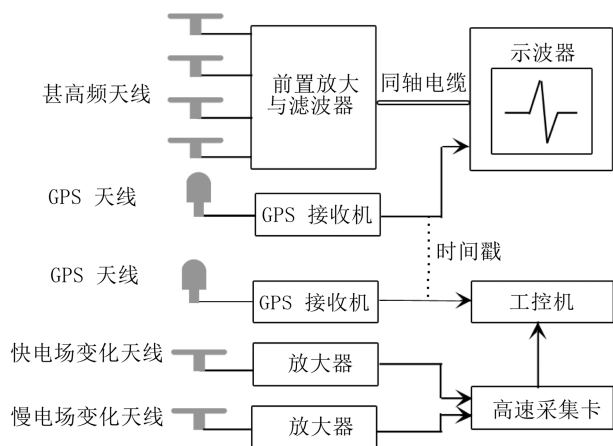


图 1 短基线时间差甚高频 (VHF) 辐射源定位系统构架

Fig. 1 Block diagram of the short base-line time difference of arrive VHF (Very High Frequency) radiation location system components

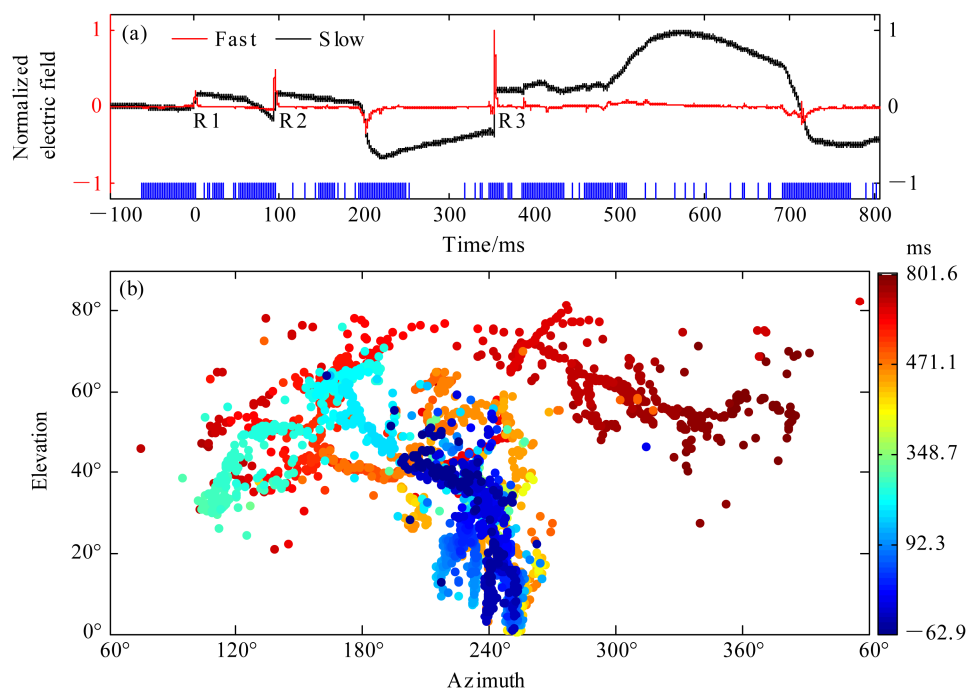


图2 2010年7月19日18:29:14(协调世界时,下同)负地闪全过程快、慢电场变化和辐射源定位结果:(a)快、慢电场变化波形;(b)闪电 VHF 辐射源二维定位结果。辐射源颜色由蓝色到红色的变化表示辐射源位置随时间的演变,下同

Fig. 2 Fast and slow electric field changes and radiation sources location of the whole cloud-to-ground lightning flash at 18:29:14 UTC 19 Jul 2010: (a) The fast and slow electric field changes; (b) 2-D VHF radiation sources location. Color of radiation sources changes from blue to red with time, the same below

两个分支通道的发展速度分别为 $5.9 \times 10^4 \text{ m s}^{-1}$ 和 $7.5 \times 10^4 \text{ m s}^{-1}$ 。对比两分支通道 VHF 辐射信号认为二者波形具有一定相似性,分析认为预击穿起始于云层主负电荷区及下部正电荷区之间,产生两个负极性击穿通道在下部正电荷区内沿不同方向同时发展,这与董万胜等(2003)的观测结果较为一致。

预击穿下行放电通道倾斜延伸一段距离后,垂直向下发展并在仰角约 21° 位置处分裂为同时向地面发展的两个梯级先导分支通道 L1 与 L2,其定位结果较为弥散,表明先导在向下发展过程中可能存在较多细小分支通道。两先导通道平均发展速度分别为 $3.0 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$ 和 $1.9 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$,与 Shao et al. (1995) 及张广庶等(2010)的观测结果较为一致。最终,先导通道 L2 发展到地并引发首次回击 R1 过程。从梯级先导 VHF 辐射时空发展来看,本次负地闪个例中梯级先导可能由预击穿向下发展的击穿放电转换而来,并以更快的发展速度向地面方向发展。由于首次回击前整体电场变化较弱,对于预击穿及梯级先导的转换条件及物理机制的异同仍有待讨论。

图4为第二次先导—回击过程的快、慢电场变化和辐射源定位结果。从图4a中可以看出,第二次回击过程 R2 之前有较长时间的先导过程,快电场变化幅值较弱,而慢电场变化随时间逐渐负向增大,VHF 辐射源持续时间约为 25 ms,并随时间逐渐变得密集和连续,并在回击后仍存在持续时间约 1 ms 的辐射源放电。从图4d中 VHF 辐射源定位结果可以看出,先导放电起始于预击穿初始放电位置 S 处,并产生三个明显的先导分支 L3、L4 及 L5 同时向地面发展,其中,先导 L3 与 L4 是新开辟的放电通道,而先导 L5 沿首次回击前先导 L2 的通道向地面发展并最终引发继后回击过程 R2。VHF 辐射源不仅出现在各先导分支头部位,在通道内部均有探测到,估算三个先导平均发展速度分别为 1.6×10^5 、 2.1×10^5 和 $9.6 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$ 。可以看出,先导 L5 以直窜先导形式沿之前先导路径向地面发展,而先导 L3 及 L4 为梯级先导形式沿新开辟的先导通道发展,直窜先导速度明显高于其他两个梯级先导发展速度,表明二者电离程度存在明显差异,先导的负电荷更易在已击穿通道内向下传播。

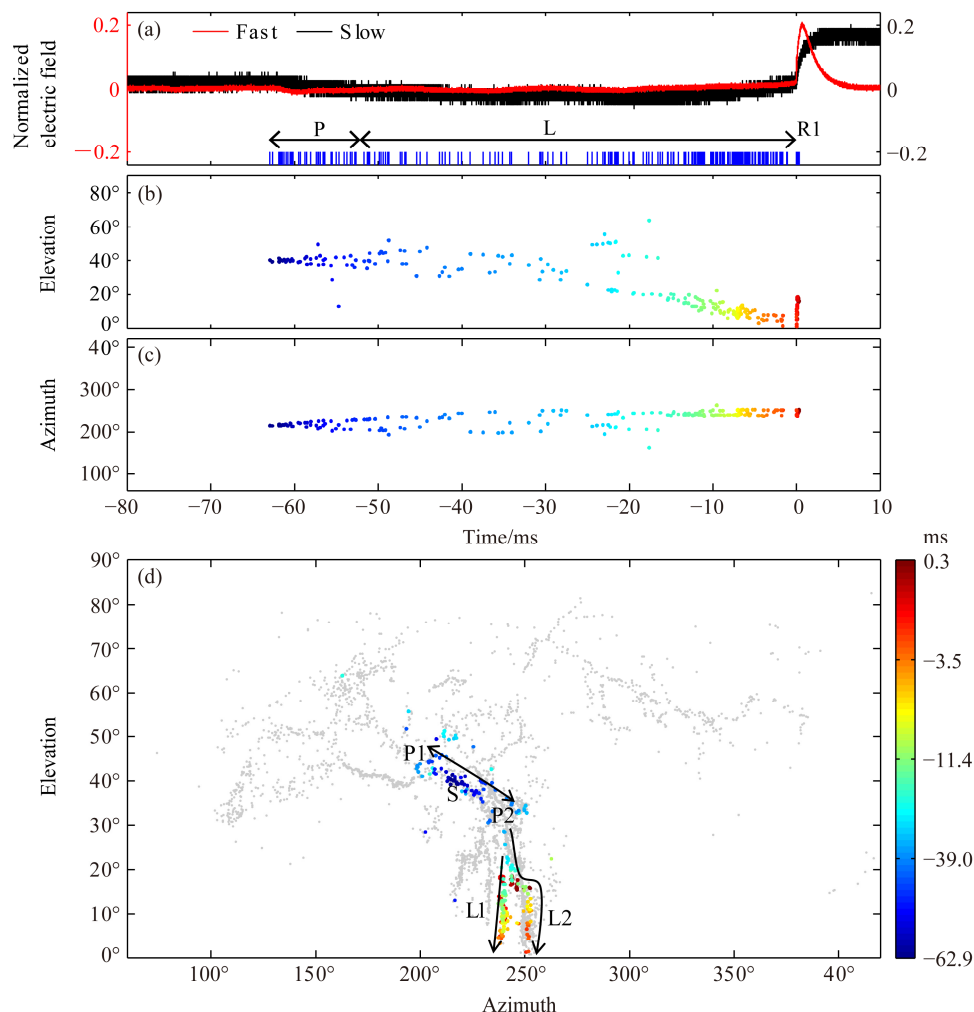


图3 负地闪预击穿及先导—首次回击过程快、慢电场变化和辐射源定位结果：(a) 快、慢电场变化波形；(b) 辐射源仰角随时间变化；(c) 辐射源方位角随时间变化；(d) 闪电辐射源二维定位结果

Fig. 3 Fast and slow electric field changes and radiation sources location of the discharge before the first return stroke in the cloud-to-ground lightning flash: (a) Electric field changes recorded by the fast and slow antennas; (b) elevation versus time; (c) azimuth versus time; (d) 2-D VHF radiation sources location

第三次先导—回击过程中也观测到类似的多分支梯级通道发展现象。图5为第三次先导—回击过程的快、慢电场变化及VHF辐射源定位结果。相比于前两次先导—回击过程，此次先导—回击过程先导持续时间较短，约为6 ms，并且具有较为复杂的电场变化波形。从VHF辐射源定位结果中可以看出，在前期约0.7 ms的时间里，先导L6起始于闪电起始放电位置S处，并沿先前预击穿P2通道快速向下发展到仰角约30°的位置处，速度约为 $1.3 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$ ，其后在较高仰角处探测到零星辐射源。对应快、慢电场变化波形缓慢正向变化，并在快电场变化上叠加有约0.1 ms的负向脉冲。由此推断，先导L6是发生下部正电荷区域内的负极性击

穿放电，并向远离测站的方向水平发展。

先导通道L6截止后，从位置S周围区域先后产生向地面发展的先导L7、L8，其中，先导L7沿之前的先导通道倾斜着向地面发展，在接近地面时产生强烈的辐射并触发回击过程R3。估算先导L7发展速度约为 $2.2 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$ 。先导L8通道弯曲发展到仰角约23°的位置通道截止，由于辐射源定位结果为方位角及仰角的二维信息，因此推测先导L8通道路径存在被先导L7通道遮挡的可能性。在先导L7发展前期，VHF辐射源通道收敛，且快、慢电场变化波形主要表现为负向变化，表明先导L7是向靠近地面方向发展的负极性击穿放电。随后，在先导L7及L8的共同作用下，快电场变化波形呈

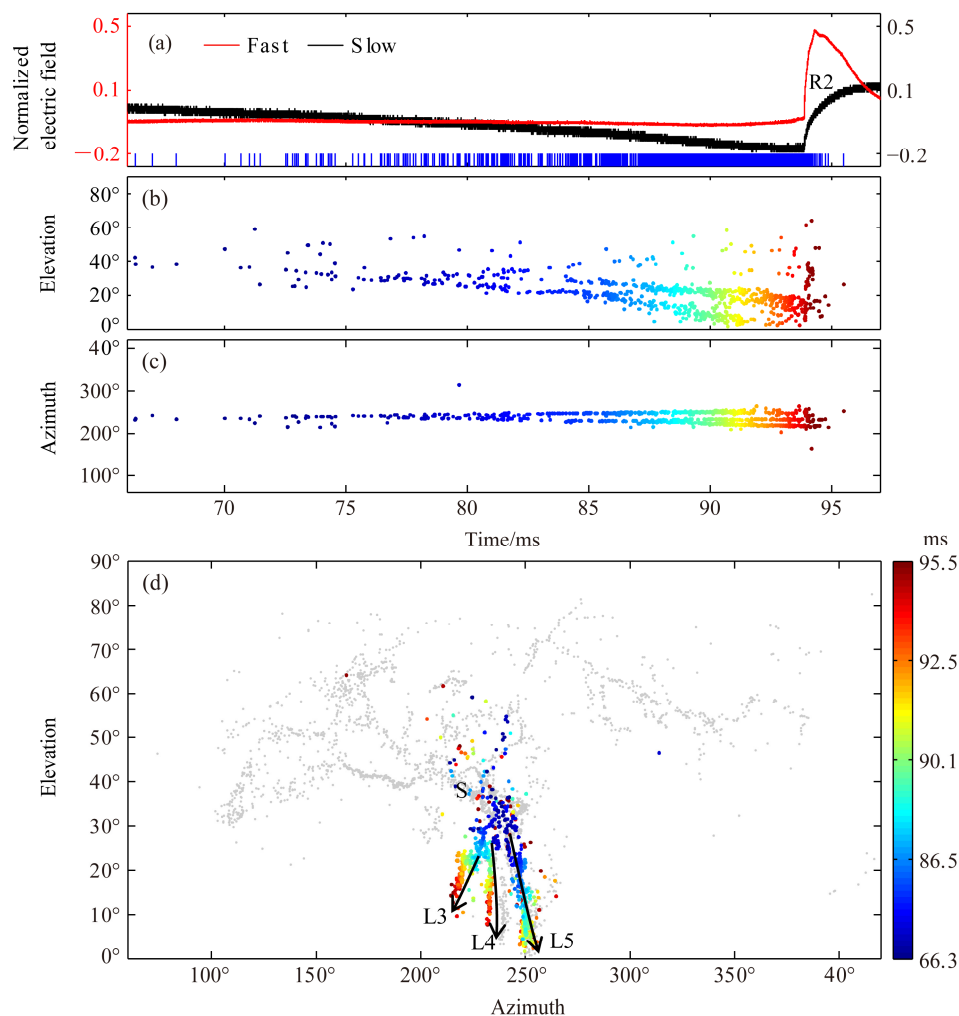


图4 同图3, 但为第二次先导—回击过程

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the leader discharge before the 2th subsequent return stroke

现正向变化, 并叠加有密集的双极性小脉冲, 表明可能存在强烈的远离测站发展的负先导, 因此推断先导 L8 为水平远离测站发展。

一般, 负地闪首次回击后的直窜先导沿着回击的残留通道快速向地面发展, 通常没有分叉。而在本次负地闪个例中, 在后两次先导过程发展阶段, 均探测到在仰角较高的起始放电位置处, 存在多个梯级先导分支与直窜先导同时发展的现象。分析认为, 起始放电位置 S 处可能具有较高的云内电荷密度, 从而产生较强的环境电场, 并为多个分支通道的发展提供电荷; 在距离上次回击时刻较长时间间隔后, 原有回击路径导电性变差, 从而在起始位置处发生新的空气击穿并重新开辟向下发展的梯级先导通道。值得注意的是, 本例中直窜先导的发展速度略小于张广庶等 (2008) 中的直窜先导平均速

度 $4.1 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$, 分析认为, 一方面由于较长时间间隔, 通道导电性减弱; 另一方面, 新开辟的梯级先导分支通道的发展可能在一定程度上削弱了直窜先导电荷供给, 因此, 使得直窜先导发展速度偏小。文中多个先导分支通道时空发展也表明试验中采用的短基线时间差 VHF 辐射定位系统可以对同时发生的多个辐射源通道进行有效的定位分析。

3.2 最后一次回击后云内放电阶段 VHF 辐射发展特征

第三次先导—回击过程结束后, 仍存在持续时间约为 450 ms 的云内放电过程, 电场变化较为复杂并包含多次 K 变化过程。从图 2a 中 VHF 信号时间分布可以看出, 整个时间段 VHF 辐射源的发生是不连续的, 主要集中发生在前期 380~520 ms 和后期 680~780 ms 两个时间段内。

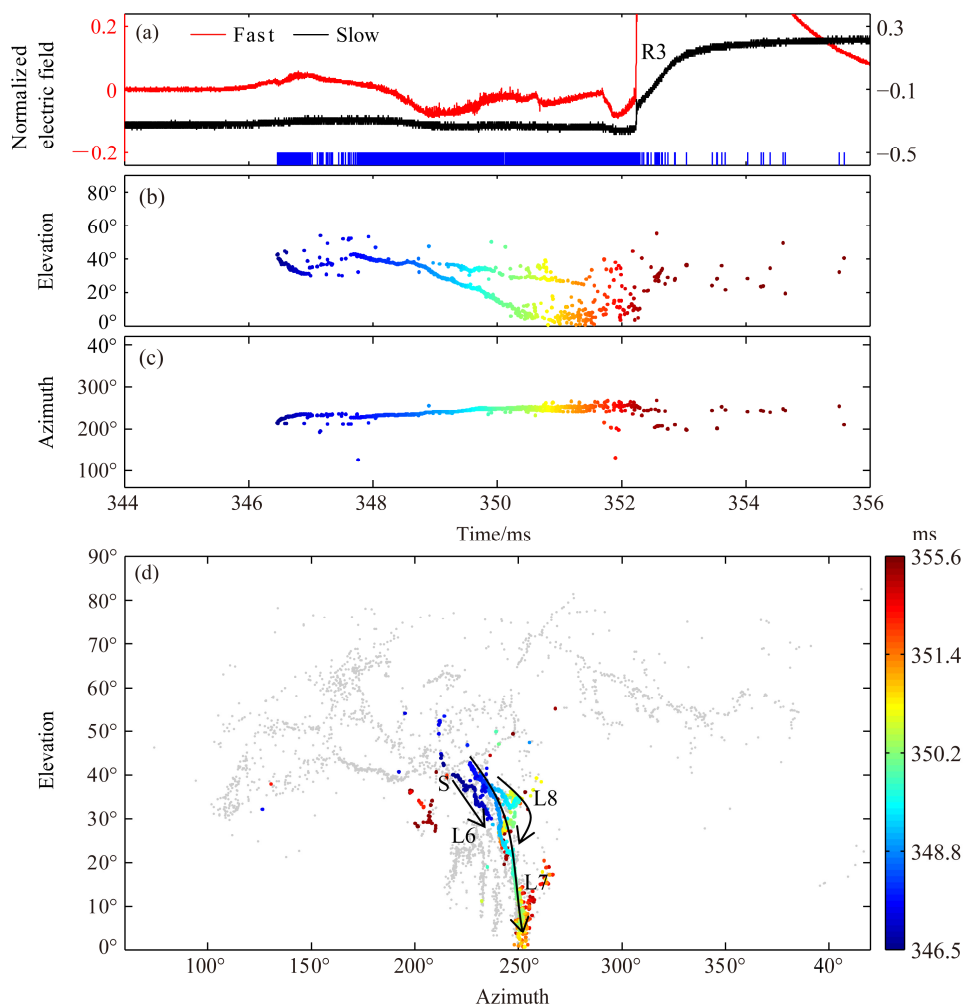


图 5 同图 3, 但为第三次先导—回击过程

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for the leader discharge before the 3th subsequent return stroke

图 6 为最后一次回击后云内放电阶段前期 380~520 ms 的快、慢电场变化和 VHF 辐射源定位结果。先后探测到两段双向发展的云内通道 C1 及 C2。通道 C1 起始于先导 L8 通道内部, 同时向仰角增大和减小的两个方向发展, 如图中箭头 C1a 及 C1b 所示, 整体上辐射源通道存在多次弯曲且通道较为弥散, 表明云内的电荷分布十分不均匀。随后, 在起始放电位置 S 附近, 观测到同时向方位角增大和减小的两个方向发展的通道 C2a 及 C2b, 估算两通道发展速度均在 10^5 m s^{-1} 量级。通道 C2b 截止后, 慢电场变化波形呈现明显的正向变化, 表明该阶段通道 C2a 有效的将负电荷向远离测站的方向传输, 扩展闪电放电通道。通道 C2 发展结束后, 慢电场变化持续正向增大, 表明该阶段云内可能存在长时间的电荷转移过程, 而对应云内辐射源的发生比较

稀疏, 由此推测此时通道具有较好导电性, 且以大尺度的电流传输为主, 小尺度击穿放电不明显, 因此探测到的 VHF 辐射源较少。

图 7 为最后一次回击后云内放电阶段后期 680~780 ms 的快、慢电场变化和 VHF 辐射源定位结果。从约 691 ms 时刻开始, 探测到持续时间约 80 ms 的较为密集的 VHF 辐射信号。整个阶段慢电场变化波形先快速负向变化后缓慢负向变化, 对应时刻 VHF 辐射分别表现为云内放电通道 C3 及 C4 较大空间范围内的发展。期间, 快电场变化波形上叠加两次较为典型的 K 变化电场波形, 表现为幅值较大的正极性脉冲, 对应 VHF 辐射表现为通道 K1 及 K2 的快速发展。

从辐射源定位结果中可以看出, C3 通道主要沿先前的 C2a 通道快速继续发展, 速度约为

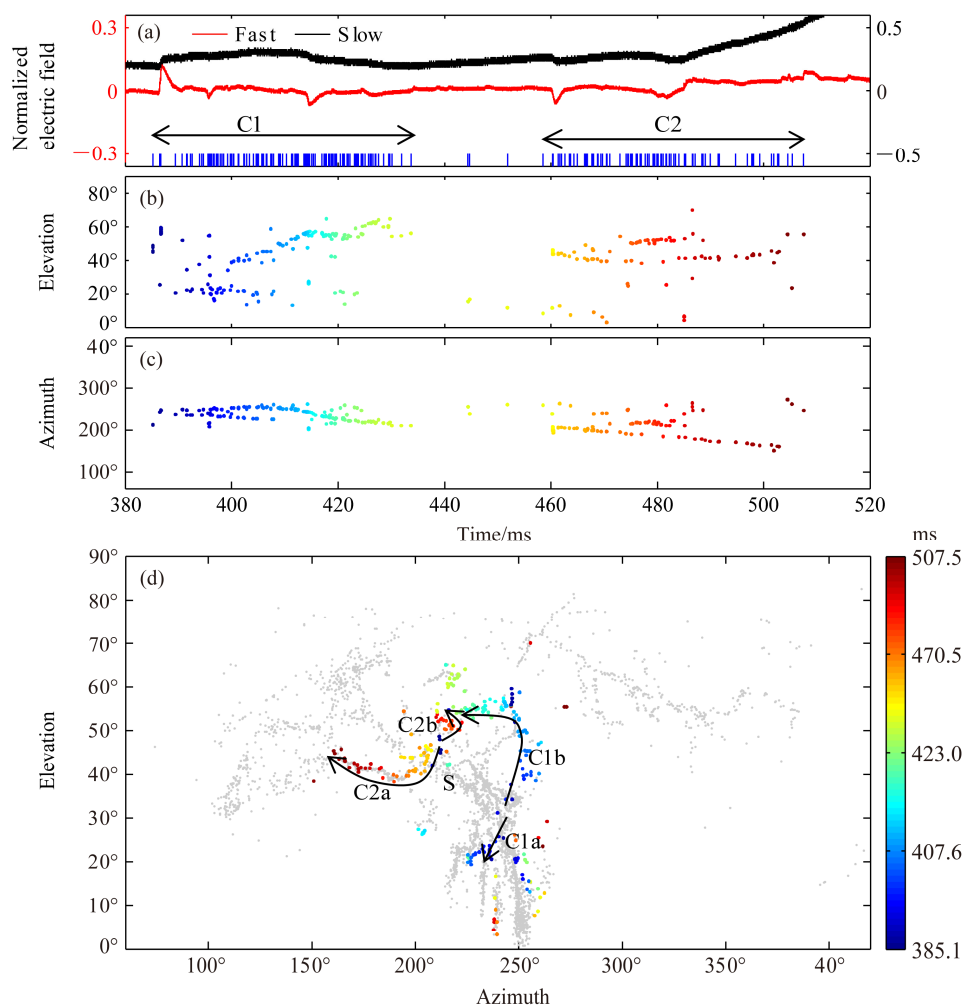


图6 同图3, 但为后期 380~520 ms 内云内放电过程

Fig. 6 Same as Fig. 3, but for the intracloud discharge from 380 ms to 520 ms in the late stage of the lightning flash

$6.8 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$, 辐射源定位结果较为收敛。通道发展到方位角 160° , 仰角 45° 位置处发生分叉, 形成 3 路通道分别沿箭头 C3a、C3b 及 C3c 所示方向同时发展。C3 通道发展期间, 快慢电场变化波形均负向变化, 对应负电荷向靠近测站的方向发展, 推断 C3 通道具有较大水平发展分量, 在下部正电荷区域内进一步延伸闪电通道。C4 通道起始于 C3a 通道末端, 继续向方位角增大的方向发展, 仰角逐渐降低, 对应慢电场变化转变为缓慢的负向变化, 快电场变化上叠加若干双极性脉冲, 表明负电荷沿通道向靠近测站方向运动。可以看出, 回击后期, 在通道 C1 至 C4 的发展过程中, 闪电通道不断向空间扩展, 辐射放电在较大方位角范围内出现, 但 VHF 辐射源离散并不收敛, 表明在发展过程中产生大量细小分支。

云内放电发展过程中, 电场波形上的两次连续 K 过程的正极性脉冲时间间隔约为 1.5 ms, 脉冲宽度均约为 0.8 ms。其中, K 过程 K1 对应通道表现为从空间向放电起始位置 S 的快速发展, 如图 7d 中箭头 K1 所示。通道最终越过位置 S 并沿着 C3 通道继续发展, 估计通道平均发展速度约为 $3.6 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$ 。根据正向电场变化并对应通道仰角逐渐降低, 推断通道 K1 为负极性击穿放电, 沿着之前未探测到的正极性击穿通道向起始放电区域发展, 并在下部正电荷区内将负电荷向水平远离测站方向输送, 实际速度应大于估算速度。

K 过程 K2 对应通道起始于通道 K1 上方仰角约 65° 的位置处并向仰角逐渐增大的方向发展, 如图 7d 中箭头 K2 所示, 平均速度约为 $9.6 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$ 。根据电场变化分析认为, 通道 K2 为倾斜向

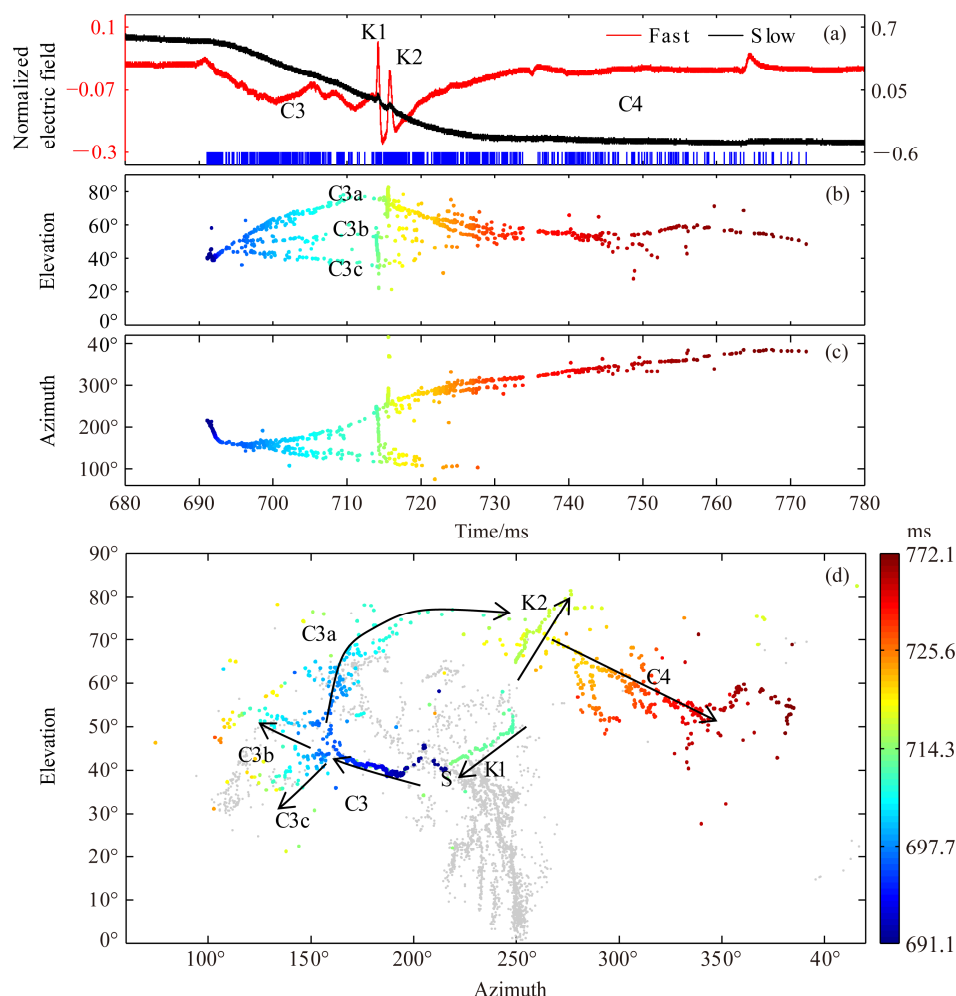


图7 同图3, 但为后期680~780 ms内云内放电过程

Fig. 7 Same as Fig. 3, but for the intracloud discharge from 680 ms to 780 ms in the late stage of the lightning flash

上发展。与通道 K1 类似, 通道 K2 也是沿已有正极性通道继续向远端传输负电荷。两次 K 过程对应 VHF 辐射放电短暂且较为强烈, 其通道定位结果连续且均较为收敛, 辐射均仅出现在先导头部, 说明通道具有较高的导电性, 在先导沿着已有正极性放电通道反向发展过程中, 先导头部负电荷不断与沉积在通道内的正电荷发生击穿放电。

4 结论

基于短基线时间差甚高频 (VHF) 辐射源定位结果, 并结合快、慢电场变化等观测资料, 对一次具有较长时间的云内放电过程的多回击负地闪放电过程进行了详细分析, 探讨了不同放电阶段 VHF 辐射和传输特征, 得到如下结论:

(1) 不同的放电阶段 VHF 辐射具有间歇性, VHF 辐射放电主要集中在预击穿阶段、先导过程及回击后的云内击穿放电过程。

(2) 负地闪预击穿阶段辐射源在通道两端同时出现, 双向发展的通道具有相似的辐射强度及发展速度, 推测均为负极性的击穿放电过程。梯级先导由预击穿过程转化而来, 分析认为二者具有相似的辐射传播特性, 推断梯级先导是预击穿过程发展到云外后的继续发展。

(3) 一般认为直窜先导沿前一次回击的残留通道向下运动, 基本没有分叉, 并具有较快的传播速度, 而此次个例中后两次回击过程前的先导向地面发展过程中出现多个分支通道同时向不同方向发展, 直窜先导速度在 $10^5 \sim 10^6 \text{ m s}^{-1}$ 量级, 新开辟的分支通道速度在 10^5 m s^{-1} 量级。分支通道的

产生可能是由于分支位置处的云内电荷密度较高,且首次回击后分支位置处通道导电性变差的缘故。这也表明短基线时间差定位系统能够对同时发生的多个辐射源进行有效定位。

(4) 地闪后期有持续时间较长的云内放电过程,并伴有多次负极性 K 变化过程。发展速度较慢的云内放电过程通常在负极性先导初始建立通道的情况下发生,对应辐射通道极为复杂,具有较多分叉且较弥散。而速度较快的 K 过程对应辐射源强烈,通道没有分叉也较为收敛,分析认为 K 过程是负极性先导沿之前具有较好导电性的通道的快速发展,二维发展速度在 10^6 m s^{-1} 量级。分析认为 K 过程将云内的负电荷传输到起始放电区域,并激发负电荷在已有先导通道内继续传输,最终中止于云内的正电荷区域。

继后回击前先导多分支同时发展及地闪后期长时间云闪电电荷运动表明,雷暴云层下部可能存在较强的正电荷区域,影响放电起始区域电场分布情况,存在抑制下行先导发展及促进通道云内水平发展的可能性。由于闪电放电及云内电荷分布的复杂性,为了更进一步理解其各阶段放电过程的物理机制、电荷分布特征及其对放电过程的影响仍然需要更多的观测事实和理论研究。

参考文献 (References)

- Akita M, Nakamura Y, Yoshida S, et al. 2010. What occurs in K process of cloud flashes? [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D7), doi:10.1029/2009JD012016.
- 董万胜, 刘欣生, 陈慈萱, 等. 2003. 用宽带干涉仪观测云内闪电通道双向传输的特征 [J]. *地球物理学报*, 46 (3): 317–321. Dong Wansheng, Liu Xinsheng, Chen Cixuan, et al. 2003. Broadband interferometer observations of the bidirectional breakdown process in natural lightning [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 46 (3): 317–231.
- Kitagawa N and Kobayashi M. 1958. Distribution of negative charge in the cloud taking part in a flash to ground [J]. *Papers Meteorol. Geophys. (Tokyo)*, 9: 99–105.
- Mazur V. 1989. Triggered lightning strikes to aircraft and natural intracloud discharges [J]. *J. Geophys. Res.*, 94 (D3): 3311–3325.
- Mazur V. 2002. Physical processes during development of lightning flashes [J]. *Comptes Rendus Physique*, 3 (10): 1393–1409.
- Mazur V, Ruhnke L H. 1993. Common physical processes in natural and artificially triggered lightning [J]. *J. Geophys. Res.*, 98 (D7): 12913–12930.
- 鄯秀书, 郭昌明, 张广庶. 1988. 闪电辐射场的宽带频谱测量及地闪首次回击放电参数的估算 [J]. *高原气象*, 7 (4): 312–320. Qie Xiushu, Guo Changming, Zhang Guangshu. 1988. The measurements of amplitude spectral distribution of lightning radiation field and the estimation of first return stroke parameters [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 7 (4): 312–320.
- 鄯秀书, 刘欣生, 王怀斌. 1990. 闪电的 20 MHz 辐射与放电过程 [J]. *高原气象*, 9 (1): 93–97. Qie Xiushu, Liu Xinsheng, Wang Huaibing. 1990. Lightning radiation at 20 MHz and discharge process [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 9 (1): 93–97.
- Rhodes C T, Shao X M, Krehbiel P R, et al. 1994. Observations of lightning phenomena using radio interferometry [J]. *J. Geophys. Res.*, 99 (D6): 13059–13082.
- Shao X M, Krehbiel P R, Thomas R J, et al. 1995. Radio interferometric observations of cloud-to-ground lightning phenomena in Florida [J]. *J. Geophys. Res.*, 100 (D2): 2749–2783.
- Sun Z L, Qie X S, Liu M Y, et al. 2013. Lightning VHF radiation location system based on short-baseline TDOA technique—Validation in rocket-triggered lightning [J]. *Atmospheric Research*, 129: 58–66.
- 王彩霞, 鄯秀书, 蒋如斌, 等. 2012. 一次人工触发闪电上行正先导的传输特征 [J]. *物理学报*, 61 (3): 039203, doi:10.7498/aps.61.039203. Wang Caixia, Qie Xiushu, Jiang Rubin, et al. 2012. Propagating properties of an upward positive leader in a negative triggered lightning [J]. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 61 (3): 039203.
- 张广庶, 王彦辉, 鄯秀书, 等. 2010. 基于时差法三维定位系统对闪电放电过程的观测研究 [J]. *中国科学: 地球科学*, 40 (4): 523–534. Zhang Guangshu, Wang Yanhui, Qie Xiushu, et al. 2010. Using lightning locating system based on time-of-arrival technique to study three-dimensional lightning discharge processes [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 53: 591–602, doi: 10.1007/s11430-009-0116-x.
- 张义军, Krehbiel P R, 刘欣生, 等. 2003. 闪电放电通道的三维结构特征 [J]. *高原气象*, 22 (3): 217–225. Zhang Yijun, Krehbiel P R, Liu Xinsheng, et al., 2003. Three dimensions structure of lightning discharge channel [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 22 (3): 217–225.