

刘恒毅,董万胜,张义军. 云闪 K 过程的三维时空特征. 应用气象学报, 2017, 28(6): 700-713.

DOI: 10.11898/1001-7313.20170606

云闪 K 过程的三维时空特征

刘恒毅* 董万胜 张义军

(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)

摘 要

K 过程是闪电放电过程中的一种放电事件。该文使用两套 VHF 宽带干涉仪 2010 年夏季在广州从化地区获取的 3 次云闪三维闪电辐射源定位数据, 分析其中的 K 过程时空发展特征与地面电场特征。结果表明: 宽带干涉仪观测到的 K 过程主要由快速发展的负极性放电事件组成, 按定位结果的分布可划分为 3 个阶段: 负极性反冲先导发生在云闪起始区域下方, 沿正先导一端已有路径向闪电起始区域传播; 部分反冲先导能进入之前负先导建立的通道并快速发展; 反冲先导将原有通道激活后进一步促进负先导继续发展。同时使用辐射源三维定位数据计算了 8 次反冲先导的平均发展速度, 反冲先导的发展速度为 $10^6 \sim 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级, 与负地闪中的负极性直窜先导相似, 但均小于回击速度。

关键词: K 过程; K 变化; 反冲先导; 宽带干涉仪; 闪电

引 言

闪电是自然界中的一种超强放电现象, 在人眼看来瞬间发生, 但实际上由多个复杂的放电过程组成^[1-4]。通过各种观测和研究手段, 人们对这些放电过程的认识逐渐丰富, K 过程就是其中之一^[5]。K 过程引起的地面电场变化经时间常数较长的电场变化测量仪观测会表现为小幅度的阶梯状变化, 即 K 变化, 并叠加有微秒尺度的小脉冲。该现象最早由 Malan 和 Schonland 在地面电场和光学观测中发现, 他们认为这类阶梯状电场变化在发生时并没有可探测到的云底发光现象, 可能由未接地的先导产生^[6]。随后 Kitagawa 将这种地面电场变化命名为 K 变化, 认为叠加在 K 变化上的微秒尺度脉冲可能说明导致 K 变化的放电过程与直窜先导类似, 并猜测小的 K 变化是类似直窜先导的流光引起的, 而一些大幅度的 K 变化可能由快速反冲流光引起^[5]。Ogawa 和 Brook 也对 K 变化进行了观测, 认为 K

过程是正击穿引发的负反冲流光^[7]。通过对 K 过程引起的地面电场变化以及甚高频到超高频 (VHF ~ UHF) 频段电磁辐射观测, 人们总结了 K 过程的 3 个特点: 阶梯状地面电场变化波形, 叠加着微秒时间尺度脉冲, 伴随 VHF ~ UHF 频段电磁辐射^[8-14]。

随着闪电探测技术的发展, 人们通过 VHF 闪电定位系统对 K 变化发生时的放电事件时空发展情况有了更为直观的了解, 对 K 过程的形成机制也有了更清晰的认识。较早的时差法 VHF 定位观测发现, 伴随 K 变化的 VHF 信号发生在闪电起始区域附近可能与反冲流光有关^[15]。由于 K 过程的 VHF 辐射持续时间一般为数百微秒, 拥有较高时间分辨率的干涉法定位系统更适合描绘 K 过程的发展细节。随后的二维干涉法闪电定位系统的观测认为, K 过程可能是正极性击穿引起的快速负极性击穿过程^[16-17], 与直窜先导、企图先导这类快速负极性击穿属于同一类放电过程^[18-19]。自 Kesmir 提出闪电双向先导发展理论之后^[20], 很多观测证明其正确性, 同时观测也发现在 VHF 频段正极性击穿的辐射

2017-06-02 收到, 2017-09-30 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41405005), 中国气象科学研究院基本科研业务费 (2016Y002), 国家自然科学基金项目 (41375037)

* email: liuhy@camsma.cn

强度要小于负极性击穿。特别是最近的 VHF 频段三维定位观测以及能捕获较弱放电事件的连续宽带干涉仪的闪电定位观测也都支持 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先导这种观点,并被当作双向先导过程存在的证据^[21-24]。

但到目前为止,人们对 K 过程形成和发展机制的细节尚不完全清楚,对 K 过程的细致定位观测也主要以给出方位角-仰角的二维观测为主。已有的三维宽带干涉仪观测个例对这类事件的描绘也并不全面。文中使用的宽带干涉仪系统能提供时间分辨率达微秒量级的三维闪电定位结果和两个站的地面电场变化观测,有助于分辨持续时间较短的闪电放电事件的时空发展特征和极性。本文将给出 2010 年广州野外观测试验中记录的 3 次云闪的三维 VHF 辐射源定位结果,对其中的 K 过程进行分析。

1 试验与数据

观测试验于 2010 年夏季在广东省从化地区开展,将两套 VHF 宽带闪电干涉仪分别架设在水平相距 8.14 km 的从化区气象局和人工引雷试验场。试验使用的两套宽带干涉仪由 VHF 及 VLF/LF 宽带信号采集、GPS 授时和控制器 3 部分构成,能以微秒量级的时间分辨率和优于 500 m 的空间定位精度对两个观测站点上空的闪电放电事件进行描绘^[25]。本文根据系统给出的快电场变化特征和三

维定位数据中放电通道的发展特征选取了 3 次典型的含有 K 过程的云闪,按照发生时间分别记为 20100721152617, 20100623145514 和 20100623145953,依次标记为云闪个例 1~3。观测中,LeCroy7100 的采样频率设为 $1 \text{ GS} \cdot \text{s}^{-1}$,使用顺序采样功能将每通道 10 Mb 的存储空间分成 5000 段,每段 2000 个采样;同时,利用 A/D 数据采集卡以 $1 \text{ MS} \cdot \text{s}^{-1}$ 的采样频率对快、慢地面电场变化信号进行记录,采样长度设置为 1 s。从化市气象局和人工引雷试验场观测站的采集卡观测量程分别为 $\pm 10 \text{ V}$ 和 $\pm 5 \text{ V}$ 。两个站使用的快、慢天线传感器电路的时间常数分别为 1 ms 和 8 s。其中慢天线受防雨结构影响其时间常数有一定程度减小。文中的电场变化信号极性按照物理学定义给出,即负向变化对应观测站上方负电荷减少。3 次云闪个例均有较为完整的 VHF 辐射源三维定位结果,其中 K 过程的认定以 VHF 辐射源定位结果作为依据,即以 K 过程的放电事件为研究对象。

2 观测结果

图 1 中给出的是云闪个例 1 在从化市气象局观测站的地面电场变化波形和 VHF 辐射源三维定位结果。这次云闪发生在 2010 年 7 月 21 日 15:26:17 (北京时,下同),起始于 8.4 km 高度。辐射源高度分布呈现出明显的分层结构。如图 1c 所示,该云闪

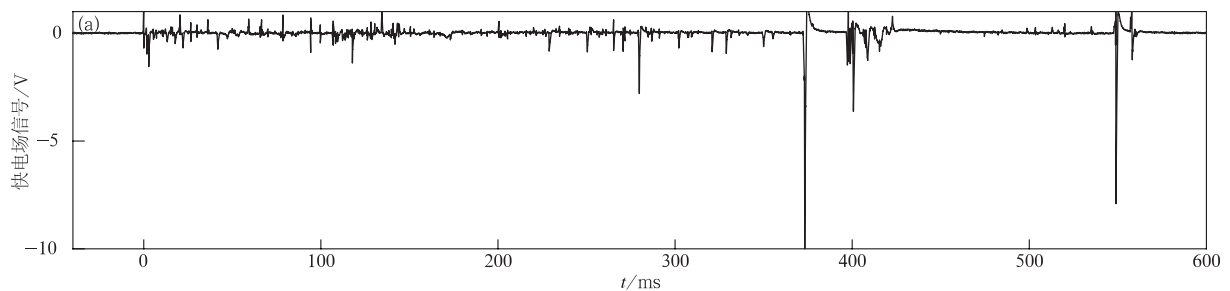


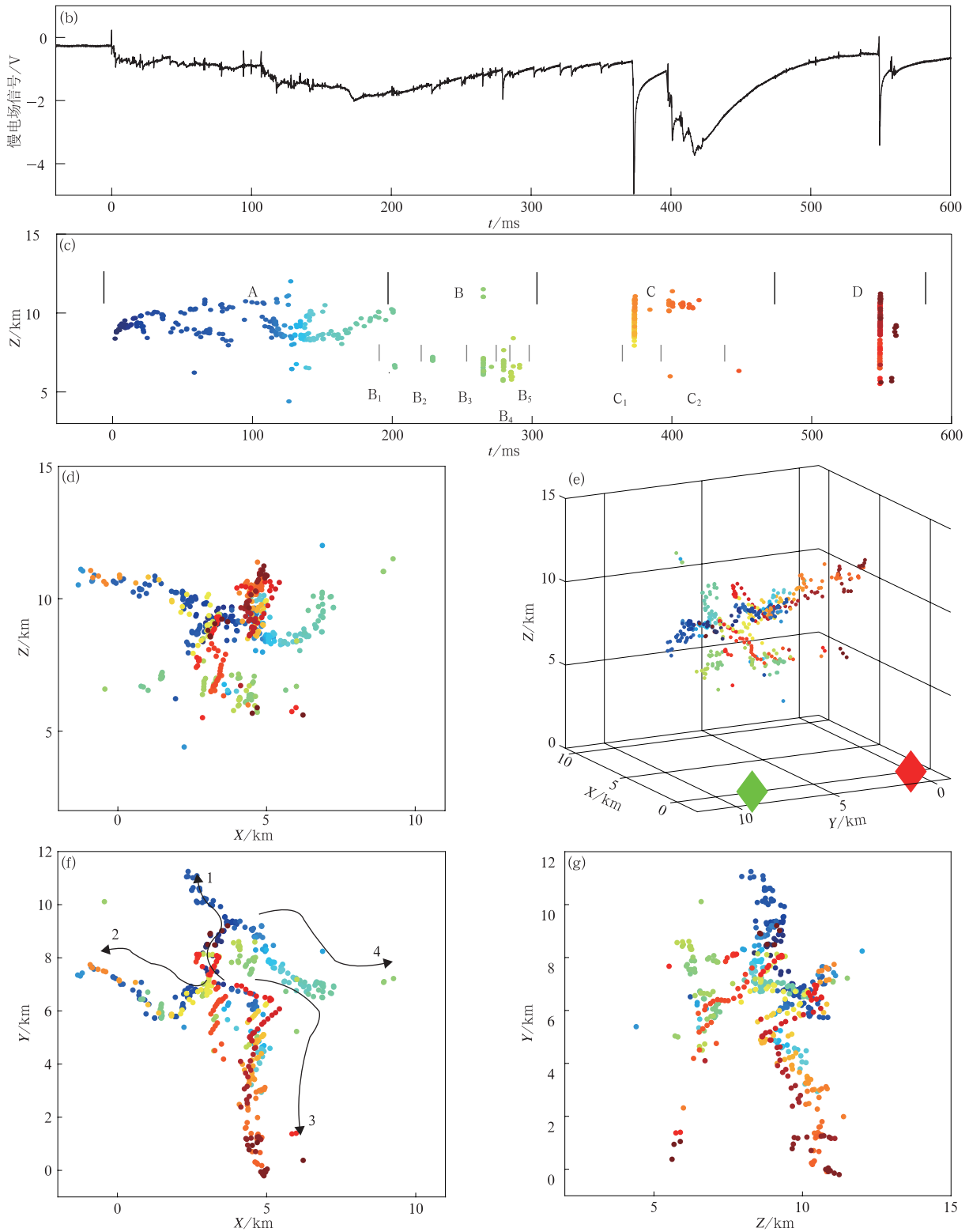
图 1 云闪个例 1 的地面电场变化波形和三维定位结果

(a)快电场变化波形,(b)慢电场变化波形,(c)VHF 辐射源高度随时间的演变,(d)闪电辐射源在 X-Z 平面投影,(e)闪电辐射源三维显示,(f)辐射源 X-Y 平面投影,(g)辐射源 Y-Z 平面投影

(图 1f 中用箭头曲线标出了图 1c 中 A 时段 4 条分叉发展的放电路径;图中辐射源定位结果使用颜色代表时间,图中红、绿两菱形分别代表从化市气象局和人工引雷试验场观测站位置,地面电场波形为从化市气象局观测站记录)

Fig. 1 The ground electric field change waveforms and 3D location results of intra-cloud flash case 1

(a)fast ground field change waveform,(b)slow ground field change waveform,(c)heights of VHF radiation sources versus time,(d)the projection of 3D location result on X-Z plane,(e)3D layout of this cloud flash,(f)the projection on X-Y plane,(g)the projection on Y-Z plane (4 paths of discharges in stage A are marked in Fig. 1f, color of dots denote time, red and green diamonds signify locations of two observation sites, field change waveforms recorded at Conghua)



续图 1

记录的持续时间约 600 ms, 为方便描述闪电被划分为 A, B, C, D 4 个时段。图 1a、图 1b 分别给出了相应的快、慢地面电场变化。图 1f 给出了这次云闪

VHF 辐射源三维定位结果在水平面的投影。在 A 时段, VHF 辐射源先沿图 1f 中箭头曲线描绘的路径 1, 2 同时发展。路径 1 在持续约 82 ms 后停止,

平均发展速度约为 $5.3 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。路径 2 持续约 116 ms, 平均发展速度约为 $1.5 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当路径 2 接近停止时, 新的放电过程开始从闪电起始位置附近和路径 1 中间部分同时沿 3, 4 两条路径发展。路径 3 持续约 58 ms, 平均速度为 $8.4 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。路径 4 持续约 63 ms, 平均速度为 $7.0 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 1d、图 1g 分别给出了这次云闪三维定位结果在 X-Z 平面与 Y-Z 平面的投影。图 1e 给出了定位结果的三维空间视图以及两个观测站的空间位置。

如图 1b、图 2a 所示, B 时段中绝大多数闪电 VHF 辐射源零星出现在闪电起始区域下方, 被划分为 $B_1 \sim B_5$ 5 次放电事件。其中, 由于辐射源定位过少这里不对 B_1 事件单独描述。 B_2 事件持续约 120 μs , 距离闪电起始位置约 3.2 km, 伴随负向阶梯状电场变化并伴有簇状脉冲。 B_2 起始、结束位置距离从化市气象局观测站约 9.2 km 和 9.7 km, 即远离从化市气象局观测站。 B_3 持续约 100 μs , 距离闪电起始位置约 2.8 km, 伴有微小的负向阶梯状电

场变化并叠加幅度较大的微秒尺度。 B_3 事件起始、结束位置距离从化市气象局观测站约 10.6 km 和 11.2 km。 B_4 持续约 100 μs , 距离闪电起始位置约 3.0 km, 伴有负向阶梯状电场变化。 B_4 起始、结束位置距离从化市气象局观测站约 9.4, 10.8 km。 B_4 辐射源消失后, 地面电场变化波形出现微秒尺度脉冲。 B_5 持续约 400 μs , 距离闪电起始位置约 2.5 km, 伴有簇状地面电场变化波形。总体上, B 时段的 VHF 辐射源均发生在云闪下层, 分散在起始位置下方的多个方向。其中辐射源相对连续的 $B_2 \sim B_4$ 过程的发展均远离从化市气象局观测站, 同时从化局观测站观测到的电场变化极性为负极性。类比负地闪回击的极性判断, 这种情况意味着从化市气象局观测站上空的负电荷减少, 因此, 认为 $B_2 \sim B_4$ 为负极性击穿。 B_1 事件只定位到 3 个辐射源, 而 B_5 事件的辐射源较为零散不适合使用传统的方法判断放电极性。但从图中标注出的发展方向趋势看, 5 次放电事件都趋向于向闪电起始区域汇聚。结合 $B_2 \sim B_4$ 的极性判断与 Mazur 等描绘的反冲性击穿

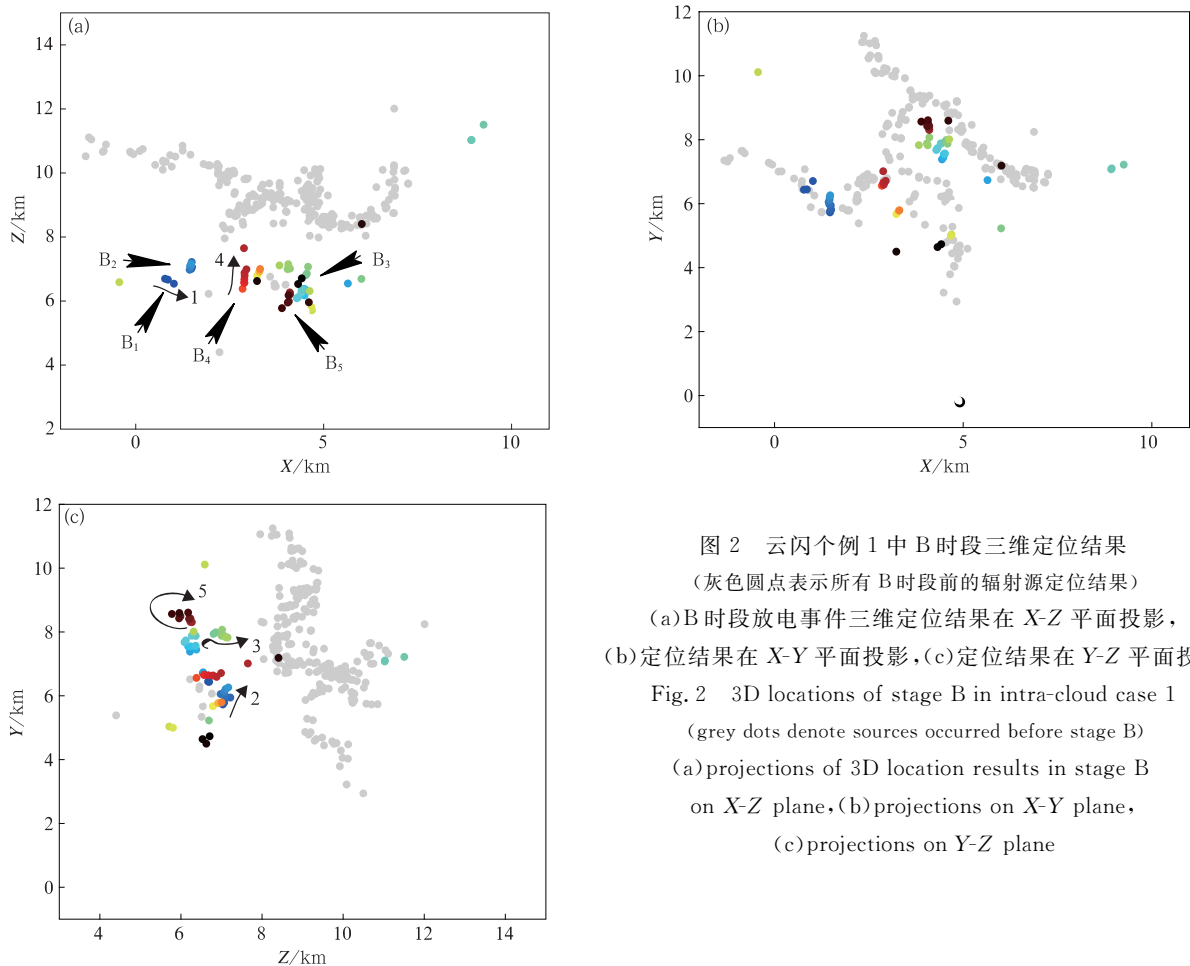


图 2 云闪个例 1 中 B 时段三维定位结果
 (灰色圆点表示所有 B 时段前的辐射源定位结果)
 (a) B 时段放电事件三维定位结果在 X-Z 平面投影,
 (b) 定位结果在 X-Y 平面投影, (c) 定位结果在 Y-Z 平面投影
 Fig. 2 3D locations of stage B in intra-cloud case 1
 (grey dots denote sources occurred before stage B)
 (a) projections of 3D location results in stage B
 on X-Z plane, (b) projections on X-Y plane,
 (c) projections on Y-Z plane

过程的模型^[21], 本文认为辐射源的发展趋势主要反映了负极性反冲过程的景象。

C时段定位结果被划分为 C_1 和 C_2 两个阶段。图3给出了云闪个例1在C时段闪电VHF辐射源三维定位结果。 C_1 起始于闪电起始位置下方(图3c中 C_1 箭头指向位置), 起点距离闪电起始位置约0.5 km, 持续约800 μs 。如图3c所示, C_1 辐射源先向上方发展了一段时间, 然后分别沿箭头曲线标出的1, 2路径发展, 记为 C_1 路径1和 C_1 路径2, 与A时段分支路径2, 3重叠。 C_1 路径1的持续时间约

800 μs , 平均速度为 $3.1 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 C_1 路径2持续约450 μs , 平均速度约 $2.6 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 C_1 起点距从化市气象局观测站约12.4 km, 路径1, 2终点距离该站约13.5 km和11.7 km。从 C_1 对应的地面电场变化波形中能看到, C_1 发生时地面电场出现快速负向电场变化并且叠加有簇状微秒尺度脉冲。 C_1 结束后约100 μs , C_2 从 C_1 路径2的末端(图3c中 C_2 箭头所指位置)开始离散地向外发展并远离起始位置, 平均发展速度为 $1.8 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

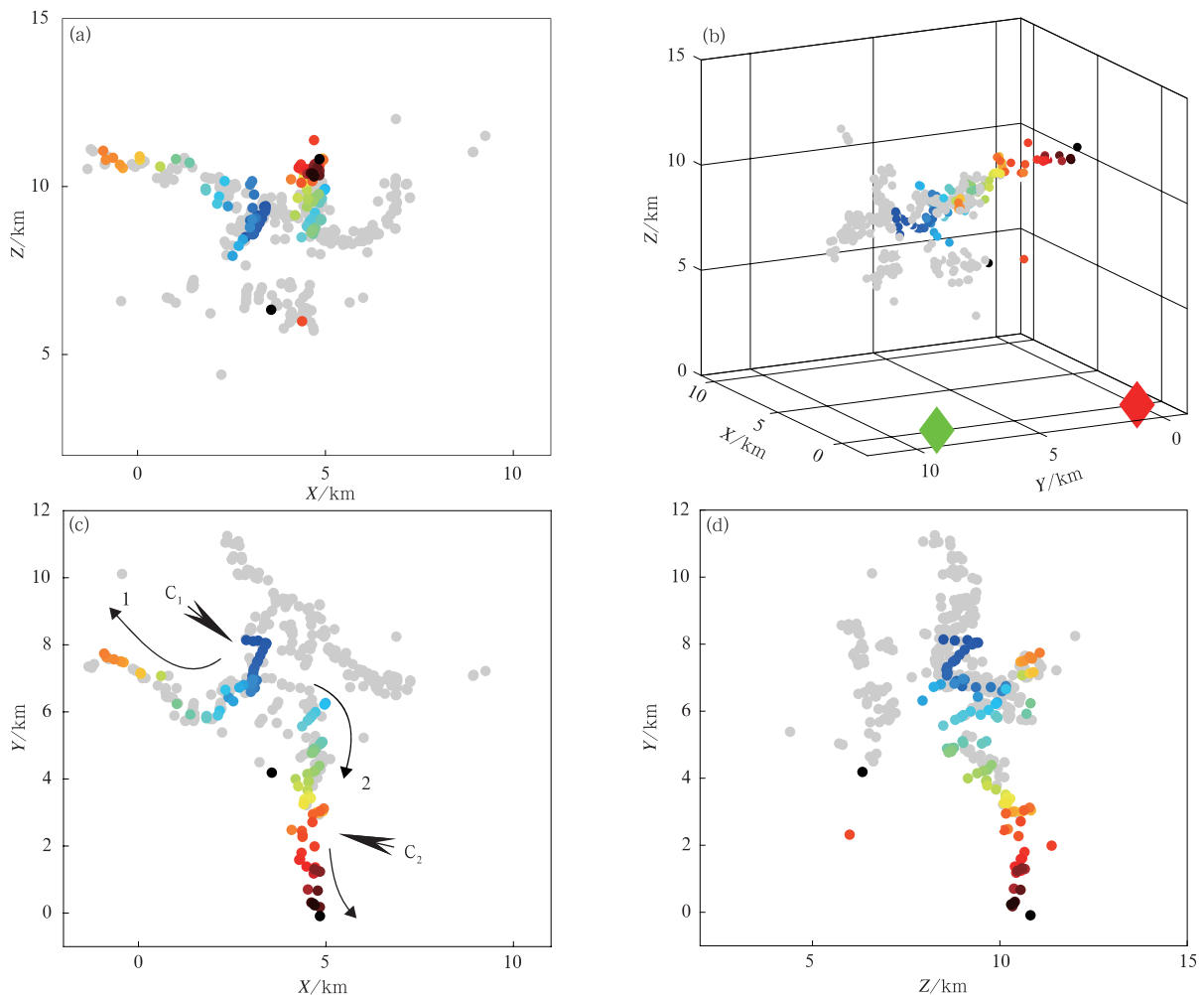


图3 云闪个例1在C时段闪电三维定位结果

(灰色圆点表示所有C时段以前的辐射源定位结果, 图3c中箭头指向对应事件起始位置)

(a) C时段放电事件三维定位结果在X-Z平面投影, (b) 闪电辐射源三维显示,

(c) 定位结果在X-Y平面投影, (d) 定位结果在Y-Z平面投影

Fig. 3 Ground electric field changes and 3D locations of stage C in intra-cloud flash case 1

(grey dots denote sources occurred before stage C, the black arrow points to the initiation position of corresponding event)

(a) the projection of 3D location results in stage B on X-Z plane, (b) 3D layout of lightning

radiation sources, (c) the projection on X-Y plane, (d) the projection on Y-Z plane

如图 4 所示,云闪个例 1 D 时段中出现一次快速击穿过程,为方便描述将其分为 $D_1 \sim D_4$ (图 4c)。图 4c~图 4g 中给出了 D 时段的三维辐射源定位结果。首先, D_1 从闪电下方向起始位置方向发展,距

离闪电起始位置约 4.2 km,持续约 $140 \mu\text{s}$,平均发展速度约 $3.1 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 D_1 事件起、止位置距离从化市气象局观测站约 8.6 km 和 11.7 km,同时地面电场变化为负向,这说明 D_1 为负极性击穿。随

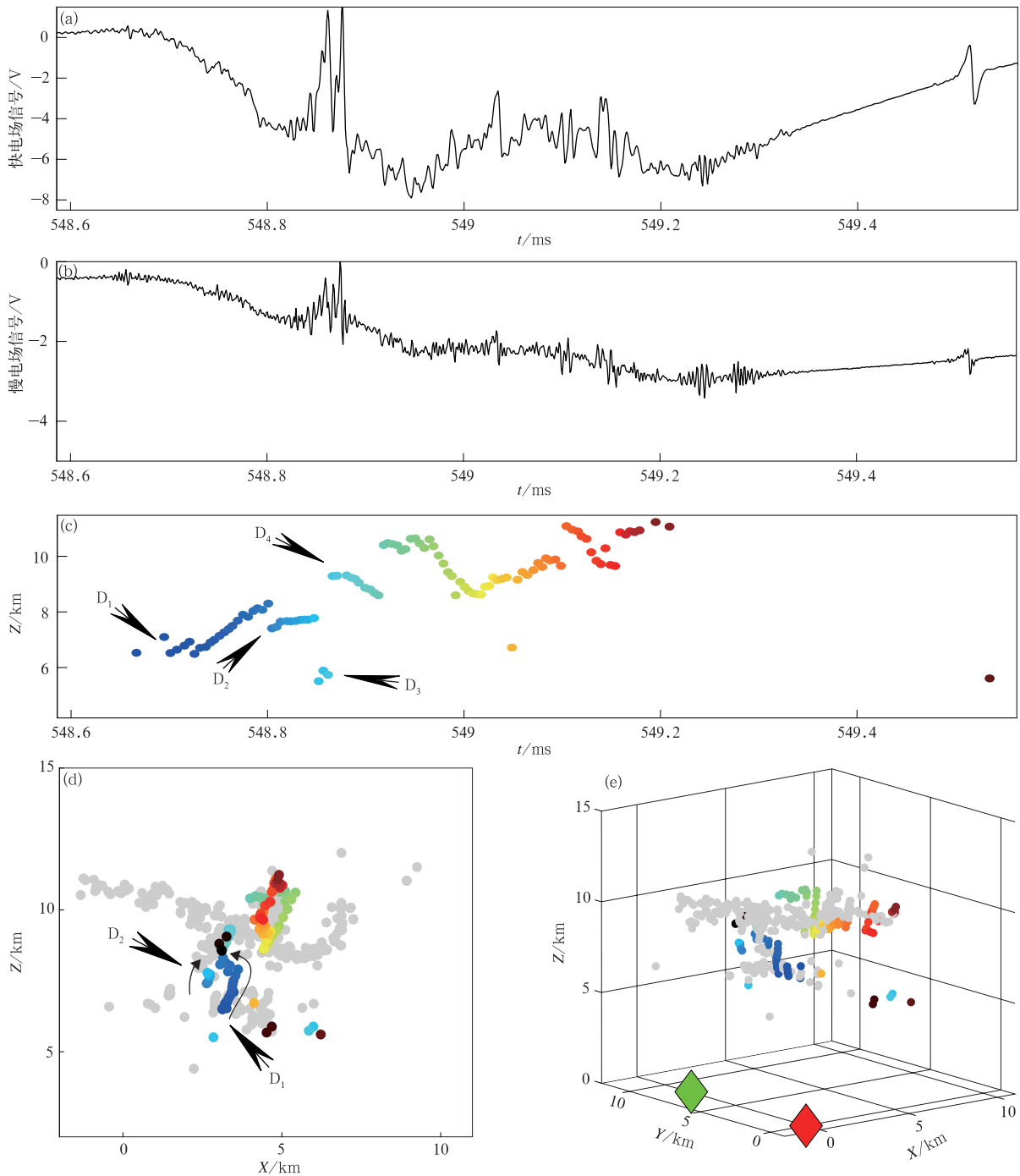
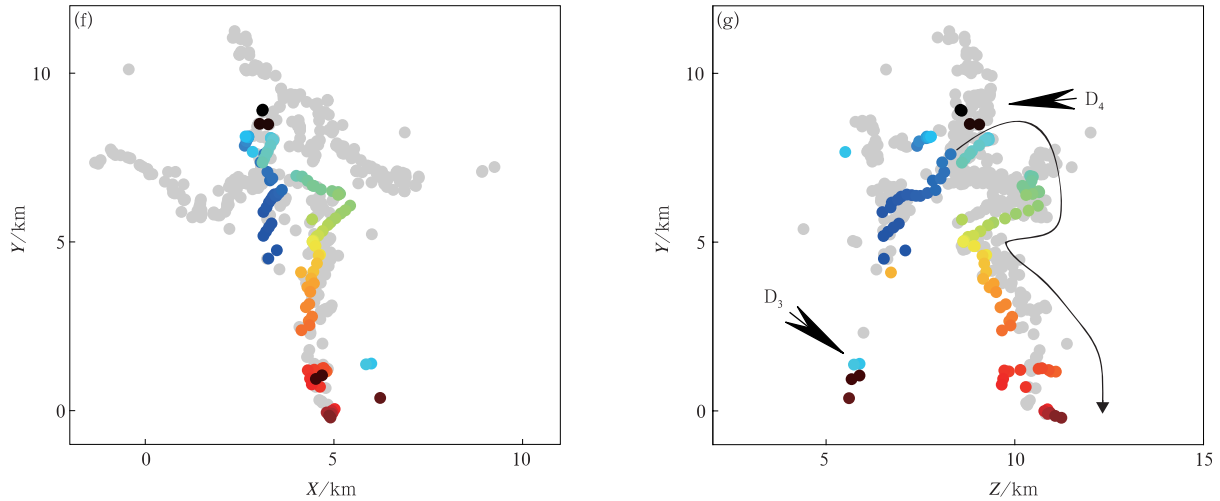


图 4 同图 1, 但为云闪个例 1 中 D 时段辐射源电场变化波形和三维定位结果 (灰色圆点表示 D 时段以前所有辐射源定位结果)

Fig. 4 The same as in Fig. 1, but for ground electric field changes and 3D locations of stage D in intra-cloud flash case 1 (grey dots denote sources occurred before stage D)



续图 4

后,在 D_1 的附近又出现一次类似的过程 D_2 ,持续约 $70 \mu s$ 。 D_2 事件结束后,在远离闪电起始位置的区域出现类似 B 时段放电事件的 D_3 。 D_3 结束后约 $5 \mu s$,在原来 D_1, D_2 发生区域上方出现 D_4 。放电事件 D_4 的平均发展速度为 $2.2 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,应该是 D_3 沿 D_1 或 D_2 的发展路径激发的反冲流光过程。至此,此次闪电定位记录结束。

云闪个例 2 于 2010 年 6 月 23 日 14:55:14 发

生,起始于 8.8 km 高度。起始位置分别距离从化市气象局观测站和人工引雷试验场测站约 11.1 km 和 9.8 km。图 5 给出了在从化市气象局观测到的云闪个例 2 的地面电场变化波形和这次闪电 VHF 辐射源的三维定位结果。由图 5a~图 5c 可知,这次云闪持续约 400 ms,可被分为 A, B, C 3 段。其中, A 时段辐射源先向上发展约 13 ms 后开始沿两条分支路径同时发展(图 5f)。路径 1 发展了约 60 ms

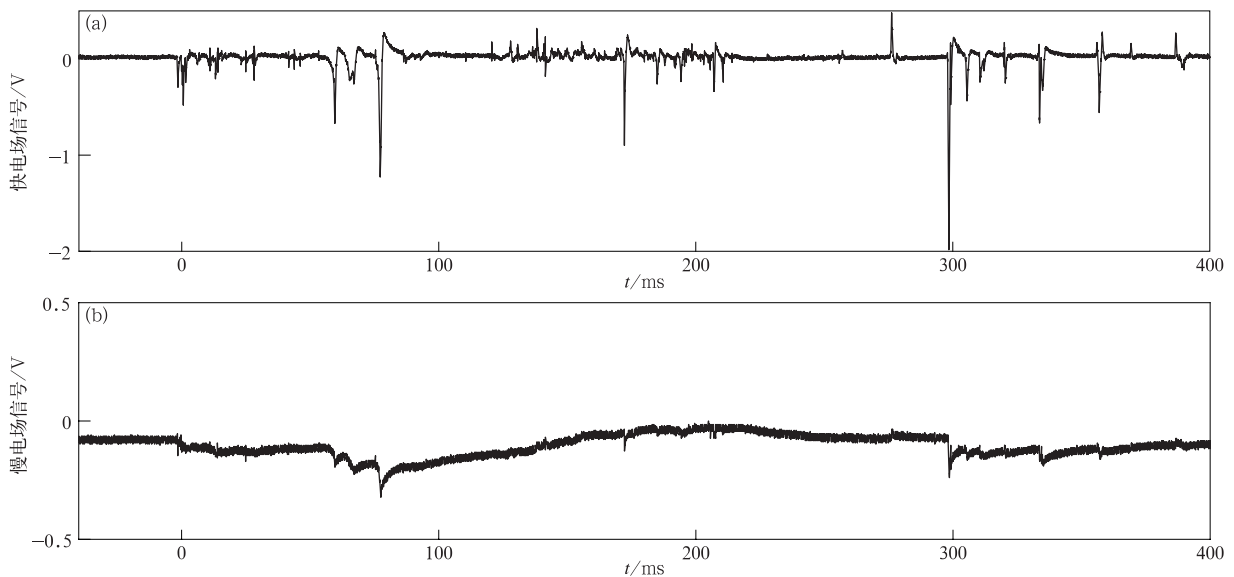
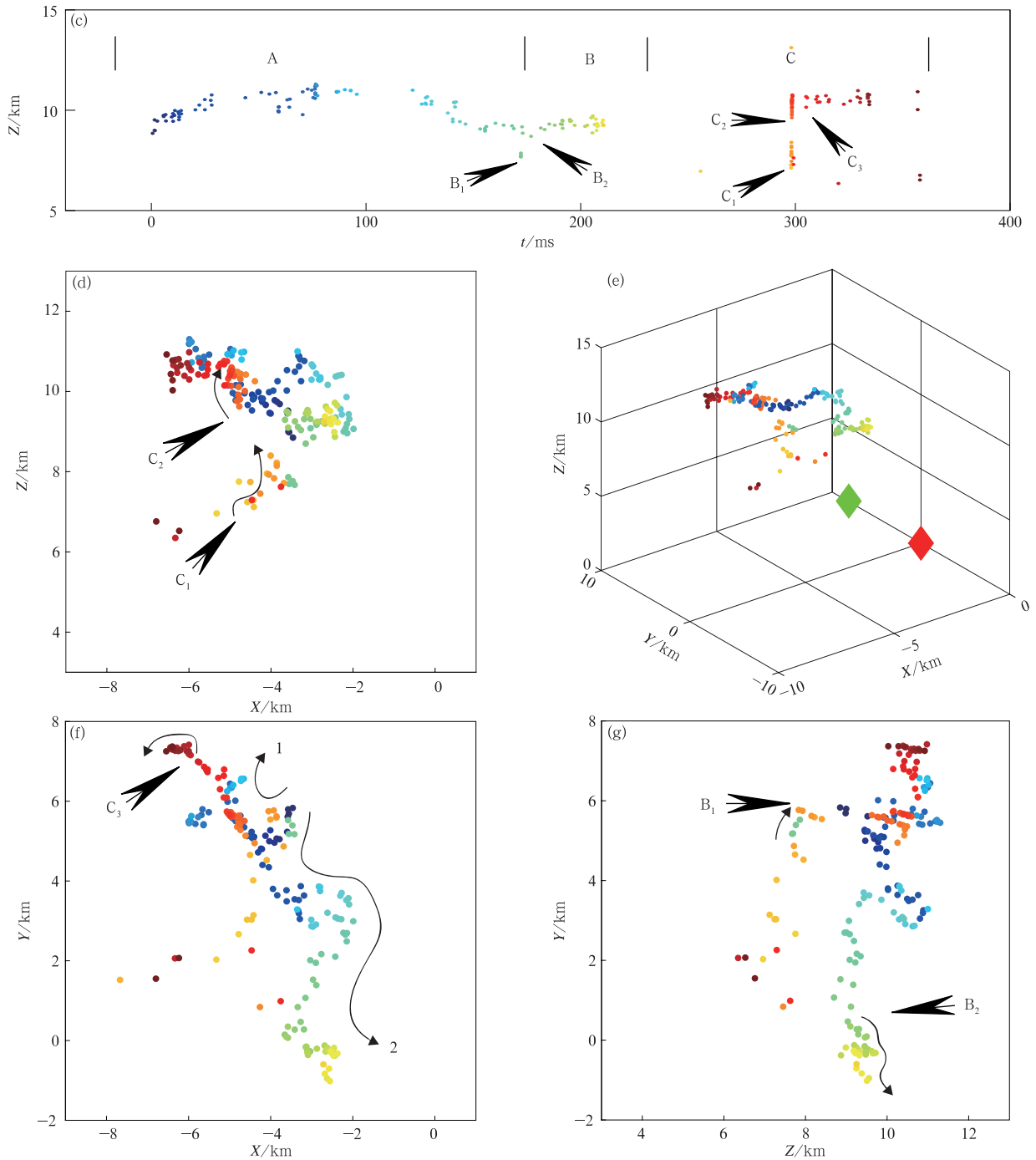


图 5 同图 1,但为云闪个例 2 的地面电场变化波形和三维定位结果
(地面电场波形为从化市气象局观测站记录;图 5f 中箭头曲线 1,2 标记出 A 时段
2 条分支发展的路径,图中箭头指向对应事件起始位置)

Fig. 5 The same as in Fig. 1, but for the ground electric filed change waveforms and 3D locations of intra-cloud flash case 2
(filed change waveforms are recorded at Conghua, two paths of discharges in stage A are marked in Fig. 5f, black arrow points to the initiation position of corresponding event)



续图 5

后产生新分叉但随即停止,平均发展速度为 $5.5 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。路径 1 停止后,路径 2 继续发展,平均速度为 $2.6 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图 5c、图 5g 中 B 时段标记出 B₁, B₂ 两个放电事件。B₁ 出现在闪电起始位置下方,直线距离约 1.3 km。其起始和结束位置距离从化市气象局观测站分别为 9.9 km 和 10.3 km,距离人工引雷试验

场观测站分别约为 9.0 km 和 9.1 km。B₁ 结束后,在 A 时段路径 2 的结束位置,出现新的放电活动 B₂ 向外发展了约 38 ms,平均速度约 $8.9 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在 B₁ 出现前约 100 μs,从化市气象局观测站和人工引雷试验场观测站的电场变化信号分别处于负向和正向变化的过程中。B₁ 出现时,两个观测站的地面电场变化波形都出现了快速反向变化。通

常,这种快速的电场变化与雷暴云中的快速电荷输运过程有关。因此,放电事件 B_1 可能属于或引发了一次反冲放电过程。文中使用的干涉仪双站观测在 10 km 左右范围的定位精度可优于 $0.2 \text{ km}^{[26]}$ 。从 B_1 辐射源起始、结束位置相对两观测站距离的变化和两个观测站的地面电场变化极性来看, B_1 是负极性击穿,沿远离从化市气象局观测站方向发展。

图 5c、图 5d 中标记了 C 时段 C_1, C_2 放电事件的发生时刻和位置。 C_1 起始于约 7.2 km 高度,持续约 $120 \mu\text{s}$,从下至上向闪电起始位置附近发展,平均发展速度为 $1.8 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其起始和结束位置与从化市气象局观测站的距离分别约为 9.1 km 和 9.8 km,与人工引雷试验场测站的距离分别约为 10.1 km 和 9.2 km。并且, C_1 在从化市气象局观测站引起负向地面电场变化。因此,可以认定 C_1 是负极性击穿,沿远离从化市气象局观测站并接近人工引雷试验场观测站的路径发展。 C_2 在 C_1 结束约 $100 \mu\text{s}$ 后出现,沿原来 A 时段路径 1 快速发展,持续约 $160 \mu\text{s}$,平均发展速度为 $1.5 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。最后, C_3 事件出现在原 A 时段路径 1 的末端,并向外扩展,平均发展速度约为 $1.6 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,持续约 58.5 ms。

云闪个例 3 于 2010 年 6 月 23 日 14:59:53 发

生,起始于约 8.7 km 高度,持续时间约 500 ms,在垂直方向表现出明显的分层结构。闪电起始位置分别距离从化市气象局和人工引雷试验场观测站约 13.7 km 和 11.0 km。图 6 给出了这次云闪在人工引雷试验场引发的地面电场变化和闪电 VHF 辐射源的三维定位结果。如图 6c 所示,这次云闪被分为 A, B, C, D 4 段。如图 6f 所示,在 A 时段,辐射源首先沿箭头曲线标注的路径 1, 2 同时发展。路径 1 的放电活动持续约 37 ms,平均发展速度约 $9.4 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其后,又经过约 36 ms,路径 2 中的放电活动也停止发展,平均发展速度约为 $9.2 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。路径 2 停止后,新的击穿过程开始在闪电起始位置附近产生,沿路径 3 发展,持续约 28 ms,平均发展速度约为 $8.2 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。路径 3 中放电活动结束后约 15 ms,放电过程又从路径 2 的中间部分产生,沿路径 4 发展,持续约 93 ms,平均发展速度约为 $6.4 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

B_1 发生在闪电起始区域下方,起始于约 7.1 km 高度,向闪电起始位置发展。其平均发展速度约为 $1.9 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 B_1 起始、结束位置与人工引雷试验场观测站的距离约为 10.4 km 和 10.2 km,即发展趋势为接近人工引雷试验场观测站。

C_1 发生在闪电起始区域下方,起始于约 6.9 km

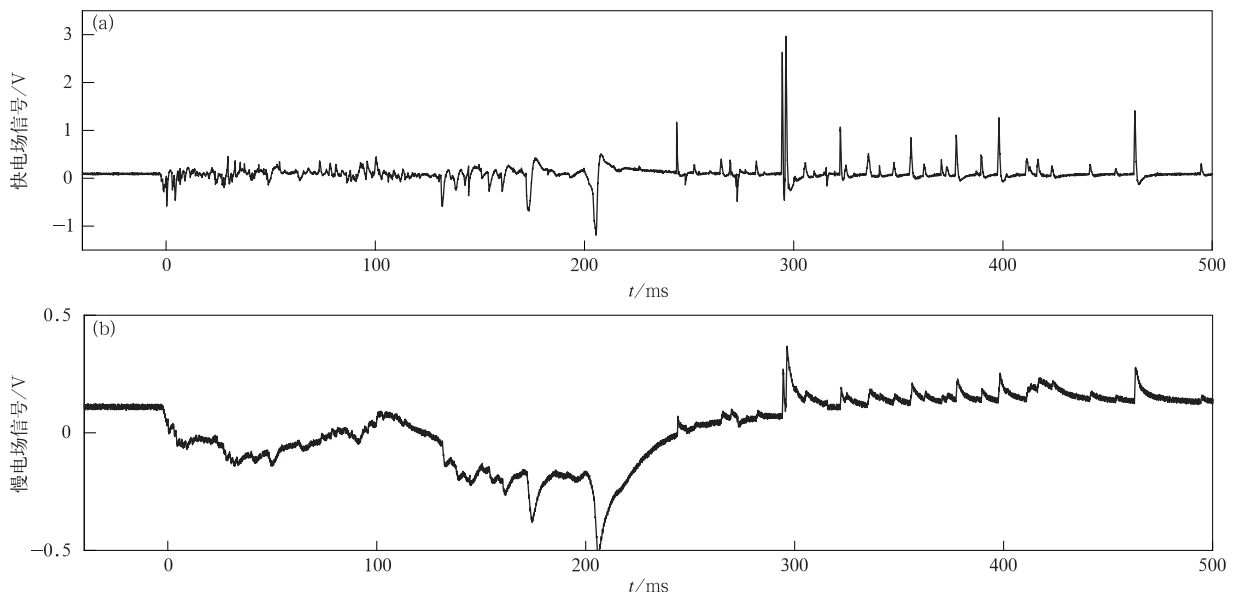
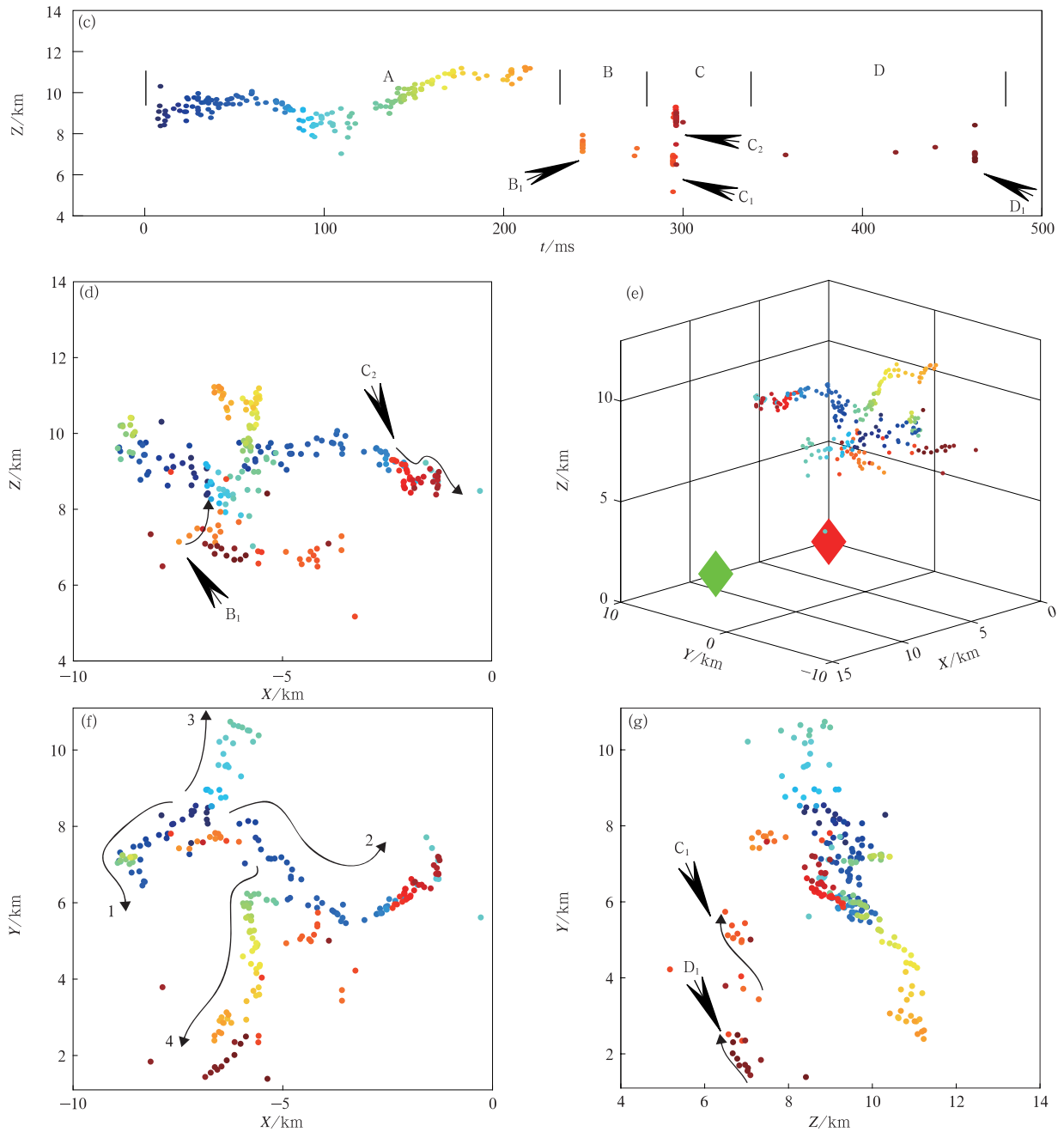


图 6 同图 1, 但为云闪个例 3 的地面电场变化波形和三维定位结果
(地面电场波形为人工引雷试验场观测站记录, 图 6f 中用箭头曲线标出 A 时段 4 条发展路径)

Fig. 6 The same as in Fig. 1, but for ground electric filed change waveforms and
3D locations of intra-cloud flash case 3

(field change waveforms are recorded at triggered-lightning experiment site,
four paths of discharges in stage A are marked in Fig. 6f)



续图 6

高度,向起始位置发展,持续约 $50 \mu\text{s}$ 。其平均发展速度约为 $2.2 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 C_1 的起始、结束位置与引雷试验场测站间的距离分别约为 9.1 km 和 8.7 km 。 C_1 在人工引雷试验场观测站引起的地面电场变化为正向,说明 C_1 是负极性击穿,沿接近人工引雷试验场观测站的路径发展。 C_1 结束后,人工引雷试验场地面电场的正向变化仍持续了约 $50 \mu\text{s}$,这说明此时放电过程仍在持续发展但电磁辐射已经减弱。这种现象可能说明放电过程已进入导电条件

较好的路径中发展。 C_1 终止后约 1.5 ms , C_2 开始沿 A 时段路径 2 发展。 C_2 起始、结束位置距人工引雷试验场观测站约 9.9 km 和 8.7 km ,即发展趋势为接近人工引雷试验场观测站,平均速度约为 $8.2 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 C_2 发展时,人工引雷试验场观测站的地面电场出现快速正向变化,因此 C_2 也是负极性击穿。

如图 6 所示,D 时段的 D_1 起始于约 7.1 km 高度,距离闪电起始位置约 6.9 km 。 D_1 的起始、结束

位置距人工引雷试验场观测站约 12.0 km 和 10.7 km。 D_1 发生时人工引雷试验场测站的电场变化为正向,因此, D_1 是负极性击穿过程,向人工引雷试验场方向发展,平均速度约 $2.5 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

通常认为,闪电中 VHF~UHF 频段的电磁辐射由空气击穿过程产生^[27]。空气击穿过程会引起沿放电通道方向的电荷运输,从而引发微秒尺度的脉冲型地面电场变化^[28]。同时,如果放电过程空间发展速度较快就会在较短时间内产生显著的电荷运输,产生阶梯状的地面电场变化波形。这样就可以将 K 过程的 3 个特征:VHF~UHF 频段电磁辐射、微秒尺度的地面电场变化脉冲和阶梯状地面电场变化波形较好的统一起来^[11]。从这里给出的观测资料来看,K 过程的阶梯状电场变化与快速负极性击穿同时出现,K 变化的各个阶段均可观测到明显的微秒尺度脉冲。这与祝宝友等^[14]给出的结论相符,微秒尺度的电场变化脉冲并不是只出现在部分 K 变化的起始阶段。

在前文给出的所有云闪个例中,闪电辐射源在垂直方向的分布都呈现出不同程度的双层结构。通常认为,这种双层分布特征对应雷暴云中上正下负的电荷结构,即上部辐射源较多的区域对应发生负极性击穿的正电荷区,下部辐射源稀疏的区域对应发生正极性击穿的负电荷区。如图 7 所示,根据辐射源定位结果的分布,理想状况下一次云闪 K 过程的时空发展可以分为 3 个阶段,分别位于图 7 中的 3 个区域。第 1 阶段发生于闪电起始位置下方,定位到的辐射源发生在云闪下层。如云闪个例 1 中的 $B_1 \sim B_5, D_1, D_3$, 云闪个例 2 中的 B_1, C_1 和云闪个例 3 中的 B_1, C_1 和 D_1 。这个阶段在图 7 中用红色线上的黑箭头表示。第 2 阶段开始于闪电起始位置附近,能观测到闪电辐射源发展到闪电起始区域并沿先前击穿过程的通道进一步发展。如云闪个例 1 中的 C_1, D_2, D_4 和云闪个例 2 中的 C_2 。这一阶段在图 7 中用起始于蓝色线下方末端并沿蓝色线条行进的黑箭头表示。第 3 阶段起始于前期负先导发展区域已建立通道的末端,原有的放电通道被激活后继续向外扩展,放电过程的发展速度降至 $10^4 \sim 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级与闪电起始阶段的放电过程发展速度相当,如云闪个例 1 中的 C_2 和云闪个例 2 中的 B_2, C_3 , 图 7 中用起始于蓝色线上部末端并向外延伸的黑箭头表示。即一次 K 过程或称之为反冲先导应当包含正先导区、负先导区和负先导外延区域 3 个阶段

的放电。但从定位观测的角度看,由于 3 个阶段放电过程辐射强弱存在差异,K 过程的宽带干涉仪定位结果往往只是图 7 中理想状况的一部分片段,如云闪个例 1 中的 D 时段和个例 2 中的 C 时段放电过程。

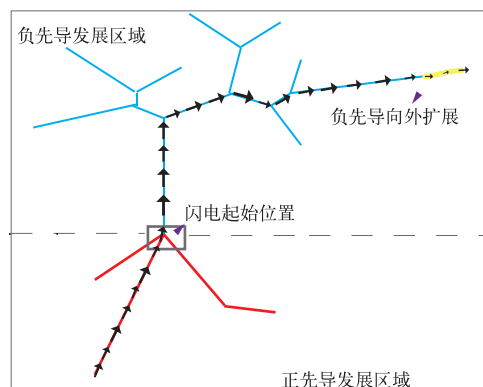


图 7 K 过程的 3 个发展阶段

(红色线和蓝色线分别表示闪电起始后已经发生过的正、负先导路径,黄色线表示新建立负极性击穿路径,黑色箭头为反冲先导的发生路径,灰色方框标示出闪电起始位置)

Fig. 7 Three stages of K process

(red and blue lines denote the pre-existing paths of positive and negative leaders occurred after the initiation of lightning, the yellow line denotes the path establishing by new negative breakdown, black arrows denote the path of recoil leader, the black box denotes the initiation position of lightning)

以上云闪 K 过程时空分布特征的阶段划分可以用双向先导模型解释^[21]。云闪始发后正、负极性先导从起始位置开始沿相反方向发展。该阶段工作在 VHF 频段的闪电探测系统大多只能观测到负极性击穿的电磁辐射。活跃期结束后,负极性先导停止发展而正先导一端则不断有负极性反冲先导发生,并且不断沿正极性先导的路径向闪电起始位置发展,也可能进入到原来负先导的发展路径上^[21]。云闪个例 1 比较完整地展示了以上描绘的情景。其中 $B_1 \sim B_5$ 发生位置分散在云闪起始区域下方多个方向,即前面提到的第 1 阶段正先导一端多个分叉路径上发生的反冲先导; C_1 是包含第 1 和第 2 阶段从正先导路径发展到原有负极性击穿路径上的快速负极性击穿,激活原有通道后进入第 3 阶段 C_2 继续向外扩展; D 时段既包含了正先导通道中的反冲先导 D_1, D_2 , 也出现了类似 B 时段的零星的反冲先导 D_3 以及被 D_3 激活的在原有负极性击穿路径上发展

的快速负极性击穿 D_4 。云闪个例 2, 3 中也都是相似的情形。云闪个例 2 中, B_1, C_1 是发生在正先导一端的反冲先导过程, C_2 是发展在原有负击穿路径上的快速负极性击穿, C_3 是原有通道被激活后继续向外发展的负极性击穿过程。云闪个例 3 中的 B_1, C_1, D_1 是发生在正先导一端的反冲先导过程, 但出现的位置距离闪电起始位置越来越远, 而且还可以看到 D_1 的发展方向是朝向闪电起始位置附近的, 这一方面说明正先导也在空间中不断拓展, 另一方面可能也描绘了正先导通过不断激发负极性反冲先导向外发展的情形。

闪电击穿过程的平均发展速度是区分不同放电事件类型的重要物理量。其中, 通过二维定位结果估算得到的直窜先导速度分布范围较广, 为 $10^6 \sim 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级^[18]。刘恒毅等^[29]使用双站宽带干涉仪给出的不规则先导三维速度均值为 $1.02 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 与直窜先导没有明显差别。负地闪回击过程发展速度的典型值约 $10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[30], 也有观测表明, 正地闪的回击速度能达到 $9 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[31]均大于地闪直窜先导速度。表 1 给出了文中 K 过程 8 次反冲先导事件的平均发展速度和定位结果的持续时间, 其中速度最大值、最小值和平均值分别为 $3.1 \times 10^7, 3.1 \times 10^6, 1.8 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。计算结果与 Akita 等^[23]计算的 3 次 K 过程的平均发展速度($1.5 \times 10^7, 8.3 \times 10^6, 4.6 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)基本一致。总的来说, 文中 K 过程的发展速度与直窜先导类似, 但小于回击速度。K 过程与直窜先导相比, 两者的发生发展方式非常相似, 差别仅在于放电环境是云内区域还是云地之间。与回击过程相比, 两者的共性在于都是发生在原有电离通道中的放电事件, 差异主要是放电环境与通道电离程度的不同。在今后的研究工作中可以借鉴闪电先导模式^[32-35]的研究方法对这类放电过程进行更深入的研究。

表 1 8 次 K 过程反冲先导事件的持续时间和发展速度

Table 1 Durations and velocities of 8 recoil leaders

个例	编号	持续时间/ μs	速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	C_1 路径 1	800	3.1×10^6
1	C_1 路径 2	450	2.6×10^7
1	D_1	140	3.1×10^7
1	D_4	291	2.2×10^7
2	D_2	160	1.5×10^7
3	B_1	100	1.9×10^7
3	C_1	50	2.2×10^7
3	C_2	270	8.2×10^6

3 结 论

本文使用双站宽带干涉仪三维闪电定位数据对闪电 K 过程的时空发展特征以及引起的地面电场变化特征进行了描述和分析。根据文中对观测数据的分析, 共得出以下结论:

1) 观测到的 K 过程由快速发展的负极性击穿组成。

2) 每次 K 过程大致可分为 3 个阶段: 第 1 阶段定位到的辐射源发生在云闪下层, 反冲先导沿着正先导的路径向闪电起始区域传播; 第 2 阶段负极性反冲先导入之前负先导的发展路径; 第 3 阶段反冲先导将原有通道激活后进一步促进负先导继续发展。

3) 8 次 K 过程平均发展速度的最大值、最小值和平均值分别为 $3.1 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, 3.1 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.6 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。K 过程的发展速度与直窜先导类似, 小于地闪回击速度。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 张义军, 言穆弘, 刘欣生. 闪电先导静电场波形理论分析. 应用气象学报, 1993, 4(2): 185-191.
- [3] 谢盟, 张阳, 张义军, 等. 两种类型 M 分量物理特征和机制对比. 应用气象学报, 2015, 26(4): 451-459.
- [4] 李婵, 张阳, 吕伟涛, 等. 地闪不规则先导的多尺度熵特征. 应用气象学报, 2014, 25(3): 347-353.
- [5] Kitagawa N. On the mechanism of cloud flash and junction or final process in flash to ground. *Pap Meteorol Geophys*, 1957, 4(7): 415-424.
- [6] Malan D J, Schonland B F J. Progressive lightning. VII. Directly-correlated photographic and electrical studies of lightning from near thunderstorms. *Proc R Soc Lond A*, 1947, 191: 485-503.
- [7] Ogawa T, Brook M. The mechanism of the intracloud lightning discharge. *J Geophys Res*, 1964, 69(24): 5141-5150.
- [8] Bils J R, Thomson E M, Uman M A, et al. Electric field pulses in close lightning cloud flashes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1988, 93(D12): 15933-15940.
- [9] Brook M, Kitagawa N. Radiation from lightning discharges in the frequency range 400 to 1000 Mc/s. *J Geophys Res*, 1964, 69(12): 2431-2434.
- [10] Krider E P, Radda G J, Noggle R C. Regular radiation field pulses produced by intracloud lightning discharges. *J Geophys Res*, 1975, 80(27): 3801-3804.

- [11] Rakov V A, Thottappillil R, Uman M A. Electric field pulses in K and M changes of lightning ground flashes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, 97 (D9): 9935-9950.
- [12] Thottappillil R, Rakov V A, Uman M A. K and M changes in close lightning ground flashes in Florida. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1990, 95 (D11): 18631-18640.
- [13] 郗秀书, 余晔, 张广庶, 等. 高原负地闪前云闪 K-型击穿过程的观测研究. *自然科学进展*, 2000, 10(4): 47-51.
- [14] 祝宝友, 吕凡超, 马明, 等. 微秒时间尺度脉冲活动是 K 过程的一个必要特征吗? *高原气象*, 2010, 29(3): 688-695.
- [15] Proctor D E. VHF radio pictures of cloud flashes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1981, 86(C5): 4041-4071.
- [16] Mazur V. Triggered lightning strikes to aircraft and natural intracloud discharges. *J Geophys Res*, 1989, 94 (D3): 3311-3325.
- [17] 董万胜, 刘欣生, 张义军, 等. 云闪放电通道发展及其辐射特征. *高原气象*, 2003, 22(3): 221-225.
- [18] Shao X, Krehbiel P, Thomas R, et al. Radio interferometric observations of cloud-to-ground lightning phenomena in Florida. *J Geophys Res*, 1995, 100(D2): 2749-2783.
- [19] Shao X, Krehbiel P. The spatial and temporal development of intracloud lightning. *J Geophys Res*, 1996, 101 (D21): 26641-26668.
- [20] Kasemir H W. A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge. *J Geophys Res*, 1960, 65(7): 1873-1878.
- [21] Mazur V. Physical processes during development of lightning flashes. *Comptes Rendus Physique*, 2002, 3(10): 1393-1409.
- [22] Zhang G, Wang Y, Qie X, et al. Using lightning locating system based on time-of-arrival technique to study three-dimensional lightning discharge processes. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(4): 591-602.
- [23] Akita M, Nakamura Y, Yoshida S, et al. What occurs in K process of cloud flashes? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D7): D7106.
- [24] Stock M G, Akita M, Krehbiel P R, et al. Continuous broadband digital interferometry of lightning using a generalized cross-correlation algorithm. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(6): 3134-3165.
- [25] 刘恒毅, 董万胜, 徐良韬, 等. 闪电起始过程时空特征的宽带干涉仪三维观测. *应用气象学报*, 2016, 27(1): 16-24.
- [26] 邱实. 闪电宽带干涉仪辐射源定位技术及其初步观测研究. 南京: 中国人民解放军理工大学, 2008.
- [27] Brook M, Kitagawa N. Radiation from lightning discharges in the frequency range 400 to 1000 s. *J Geophys Res*, 1964, 69 (12): 2431-2434.
- [28] Proctor D E, Uytenbogaardt R, Meredith B M. VHF radio pictures of lightning flashes to ground. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1988, 93(D10): 12683-12727.
- [29] 刘恒毅, 董万胜, 张义军, 等. 负地闪不规则脉冲簇事件的宽带干涉仪三维观测. *高原气象*, 2013, 32(4): 1186-1194.
- [30] 王道洪, 郗秀书, 郭昌明. 雷电与人工引雷(第一版). 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
- [31] 甘泉, 张广庶, 李亚珺, 等. 一种正地闪触发过程观测和分析. *高原气象*, 2010, 29(4): 1005-1014.
- [32] 任晓毓, 张义军, 吕伟涛, 等. 闪电先导随机模式的建立与应用. *应用气象学报*, 2011, 22(2): 194-202.
- [33] 任晓毓, 张义军, 吕伟涛, 等. 雷击建筑物的先导连接过程模拟. *应用气象学报*, 2010, 21(4): 450-457.
- [34] 李丹, 张义军, 吕伟涛. 风力发电机叶片姿态与雷击概率关系模拟分析. *应用气象学报*, 2013, 24(5): 585-594.
- [35] 廖义慧, 吕伟涛, 齐奇, 等. 基于闪电先导随机模式对不同连接形态的模拟. *应用气象学报*, 2016, 27(3): 361-369.

The 3D Spatial and Temporal Evolution of K Process in Intra-cloud Flash

Liu Hengyi Dong Wansheng Zhang Yijun

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

Abstract

K process is a kind of discharge event in lightning. The study on evolution features of this event helps to increase understanding on the mechanism of lightning initiation and developing. 3D lightning imaging data of 3 intra-cloud flashes are used to describe and analyze spatial and temporal characteristics of K events and corresponding electric field's changing waveforms. These 3D location data are recorded by 2 VHF broadband interferometers at Conghua, Guangdong Province, in the summer of 2010, providing the developing image of lightning discharges with a temporal resolution of $5 \mu\text{s}$ and a spatial resolution better than 500 m. The VHF radiation of lightning is recorded by a high-speed oscilloscope with a sample rate of $1 \text{ GS} \cdot \text{s}^{-1}$. Both fast and slow filed change antennas are employed in two broadband interferometer systems. Their decade time constants are 1 ms and 8 s, respectively. Changing waveforms of the electric field are record by an A/D card working synchronously with the oscilloscope used to record the VHF signal of lightning.

Results show that K process is a kind of fast negative breakdown discharge and can be divided into 3 stages according to the distribution of VHF radiation sources located by broadband interferometers. In the first stage, negative recoil leaders occur under the initiation position of intra-cloud lightning, progress along the path of pre-existing positive leader, heading to the initiation region of lightning. In the second stage, some negative recoil leader can progress fast in the channel established by the previous negative leader of lightning initiation stage and induce a relatively large variation of electric field on the ground. In the last stage, the negative recoil leader reactivates the channel of negative leader in lightning initiation stage and facilitates the negative breakdown at the end of existing path. Speeds of the new air breakdown processes happen at the end of existing path are generally reduced to an order of $10^4 \sim 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The evolution speeds of 8 recoil leaders in the 3 intra-cloud lightning records are also calculated. The maximum, minimum and average value of the developing speeds of 8 recoil leaders are 3.1×10^7 , $3.1 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and $1.6 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. The range of K process speeds is similar with that of dart leader but slower than return stroke.

Key words: K process; K change; recoil leader; broadband interferometer; lightning