

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.
doi:10.11898/1001-7313.20160102

闪电起始过程时空特征的宽带干涉仪三维观测

刘恒毅^{1)2)*} 董万胜¹⁾ 徐良韬¹⁾³⁾ 张义军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⁾(中国人民解放军理工大学电磁环境效应与光电工程重点实验室,南京 211101)

³⁾(中国科学院大学地球科学学院,北京 100049)

摘 要

闪电的起始位置和起始阶段发展速度是闪电研究中的重要问题。2010 年夏季,使用架设在广州市从化区的两套甚高频(VHF)宽带干涉仪对闪电的起始阶段放电过程进行三维定位观测。对观测数据给出的地闪和云闪的起始高度分布特征以及起始阶段击穿过程的时空发展特征进行统计和对比分析,结果表明:闪电的起始高度分布呈双峰值特征,分别在 5.0 km 和 8.8 km 有两个明显的分布峰值,符合雷暴云三极性总体电荷结构的描述。对起始阶段闪电放电发展速度的计算表明,云闪和地闪在起始阶段的前 15 ms 内的平均发展速度均在 $10^4 \sim 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级之间;多数云闪、地闪起始阶段前 15 ms 内的平均发展速度表现出减速趋势,但云闪个例中起始阶段前 10 ms 存在减速趋势的比例更高,且其中在前 15 ms 一直保持减速趋势个例所占比例也大于地闪。云闪和地闪的起始阶段放电过程的发展方向有向上、向下和水平发展 3 种情形,可用于指示闪电始发位置的环境电场方向。

关键词: 闪电起始; 宽带干涉仪; 闪电定位; 闪电

引 言

闪电是自然界中的一种超强放电现象,也是一种严重的自然灾害^[1-4]。闪电始发的物理机制是闪电研究中的基本问题。作为理论研究的基础,试验观测在探索解决这些问题的过程中发挥着重要作用。人们通过多种观测手段给出一系列有关闪电起始位置和起始阶段发展速度的观测结果,揭示了闪电起始放电过程的形态特征,为闪电始发机制的理论研究提供了依据。这些观测按照出现时间顺序主要可以分为 3 类。第 1 类方法使用单站地面电场观测,根据偶极子放电高度与反号距离的关系确定闪电起始高度^[5],主要反映放电中和电荷源的高度,且仅给出粗略的估计结果。第 2 类方法同样将闪电起始击穿过程引起的电荷中和或重新分布看作偶极子,但使用 7 个以上的电场变化观测站,通过同步观

测得到闪电起始区域的电荷分布位置与电荷量^[6-9]。第 3 类方法使用甚高频(VHF)或更高频段的闪电定位系统给出闪电起始放电过程电磁辐射源的时空发展特征。按定位方法的不同,VHF 频段闪电定位系统可分为时差法定位系统和干涉测向系统两种。

VHF 和特高频(UHF)频段的时差法定位系统在 20 世纪 70 年代已开始被用于闪电研究^[10-11]。Proctor^[12]利用 UHF 时差法定位系统对闪电起始位置的观测表明,闪电起始高度在海拔 5.3 km 和 9.2 km 处存在两个分布峰值。但受到采集、记录设备的性能限制,当时的观测无法对闪电起始放电过程的发展特征进行研究。Proctor 还对发生在 7.4 km 高度以上闪电过程的发展特征与发生位置在 7.4 km 以下的闪电过程进行了对比,发现两个区域内闪电的发展速度存在差异^[13]。美国 LMA (lightning mapping array) 系统的定位结果中,地闪通常起始于下部正电荷区上方或中间,云闪一般起

2015-03-17 收到,2015-09-15 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),国家自然科学基金项目(41375037),中国气象科学研究院基本科研业务费(2013-Y001,2013Z006),电磁环境效应与光电工程重点实验室研究基金项目(FD2013005)

* email: liuhy@camscma.cn

始于负电荷区与上部正电荷区之间^[14-15],闪电辐射源的空间分布可反映雷暴的基本电荷结构^[14],闪电辐射源时空变化还能在一定程度上反映雷暴发展过程中电荷结构演变特征^[16]。

人们在使用定位观测揭示闪电放电时空发展特征的同时,也在对相关的物理机制进行研究。LMA 系统给出的闪电起始辐射源位置及起始辐射源的发展序列可被用于探测闪电起始电场阈值和起始位置电场方向^[17],给出的闪电起始放电发展速度特征也与闪电始发机制相关^[18]。Behnke 等^[18]根据 LMA 观测结果发现,云闪初始先导的平均速度为 $1.6 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且在放电开始的 10~15 ms 中处于减速状态,认为逃逸击穿机制可对该现象进行解释。但也有分析表明,闪电通道在开始的数百微秒越来越活跃,随后变得持续欠活跃^[19]。实际情况还有待使用高时间分辨率的定位观测进行验证。近年来,工作在甚低频到中频段(VLF~MF)的地面电场变化天线阵列组成的时差定位系统也被用来对闪电起始脉冲过程进行定位观测^[20-21],结合高速摄像观测进一步增进了人们对闪电起始阶段脉冲事件物理景象的认识^[22],为建立模型计算这类闪电事件的放电参数提供条件^[23]。但时差定位系统观测结果的时间分辨率一般在数十到上百微秒^[14,24-25],可对孤立性较好的脉冲辐射源进行定位,但很难区分连续的噪音状辐射源^[26]。

与时差法系统相比,VHF 干涉测向法闪电定位系统在定位结果的时间分辨率方面具有明显的优势,且对孤立脉冲型辐射和噪音状辐射均有很好的定位效果,观测能力也更为全面^[27]。早期的观测结果主要通过二维(方位角-仰角)定位结果推算闪电初始击穿发展速度等时空特征^[28-32]。董万胜等^[33-34]开发的宽带干涉仪系统也给出了很多类似的观测。随着三维定位技术的逐步完善,宽带干涉仪对闪电起始击穿的观测也已实现,但观测个例数量仍非常有限^[35-37]。这里使用改进的宽带干涉仪系统,对闪电起始放电过程进行观测,对地闪、云闪起始击穿过程的时空发展特征进行对比和分析。

1 试验与数据

1.1 宽带干涉仪观测系统

每套宽带干涉仪系统由 VHF 宽带信号采集、VLF/LF 宽带信号采集、GPS 接收机和控制器 4 个

部分构成^[38]。4 个宽带全向天线获取的闪电 VHF 信号经 LeCroy 7100 高速数字示波器采集转变为采样率 1 GHz、垂直精度 8 位的数字信号。快、慢电场变化仪用于测量闪电引起的地面电场变化,工作在 VLF/LF 频段,时间常数分别为 0.5 ms 和 8 s。系统使用 12 位数字采集卡以 1 MHz 的采样率记录电场变化信号。GPS 接收机作为示波器的外部时钟,授时精度可达 30 ns。计算机作为控制器通过 RJ45 网口实现对示波器的控制和 VHF 信号与地面电场变化信号的数据同步采集、传输,并结合 GPS 接收机为系统提供时间信息和精确触发时刻。

两套宽带干涉仪观测站分别被架设在广州市从化区气象局观测场(A 站,23.5684°N,113.6154°E)和人工引雷试验场(B 站,23.6394°N,113.5956°E)。A 站和 B 站海拔高度分别为 37 m 和 74 m,直线距离为 8.15 km。两站均使用正方形 VHF 宽带天线阵列,基线长度分别为 16 m 和 15 m。

1.2 数据处理与选取

数据处理程序分为二维定位与三维定位两部分。二维定位程序可提供闪电辐射源相对观测站的方位角、仰角信息^[38-39]。三维定位程序根据两个宽带干涉仪测站给出的仰角、方位角定位结果,结合触发时刻信息,利用双站交汇算法得出辐射源的空间位置^[38],定位结果的时间分辨率可达到 5 μs 。仿真计算得到的双站干涉仪三维定位精度,在观测站附近 10 km 的范围内总体优于 500 m,在观测站附近 20 km 的范围内优于 1 km。

试验在 2010 年 5 月 21 日—7 月 21 日进行。触发系统中添加了专用的触发器电路,提高了可从闪电起始阶段进行三维定位的记录数量。这里将闪电起始时刻定义为某次闪电快电场记录的第 1 个幅度大于本底噪声 2 倍的脉冲出现的时刻。如果某次闪电记录的起始时刻附近 2 ms 时间范围内有 VHF 三维定位结果,则认为该次闪电可从起始阶段进行三维定位。按照以上标准,本文选出了可从起始阶段进行三维定位的云闪 80 例,可从起始阶段进行定位的负地闪 61 例。其中,23 次云闪和 22 次地闪的起始阶段放电超过 10 ms 且定位结果较连续,适合分多个时间段进行速度计算获得闪电起始阶段的速度变化特征。

图 1 为发生在 2010 年 7 月 21 日 15:30:39(北京时,下同)的一次云闪起始阶段的部分快电场变化记录和前 15 ms 时间段内的 VHF 辐射源三维定位

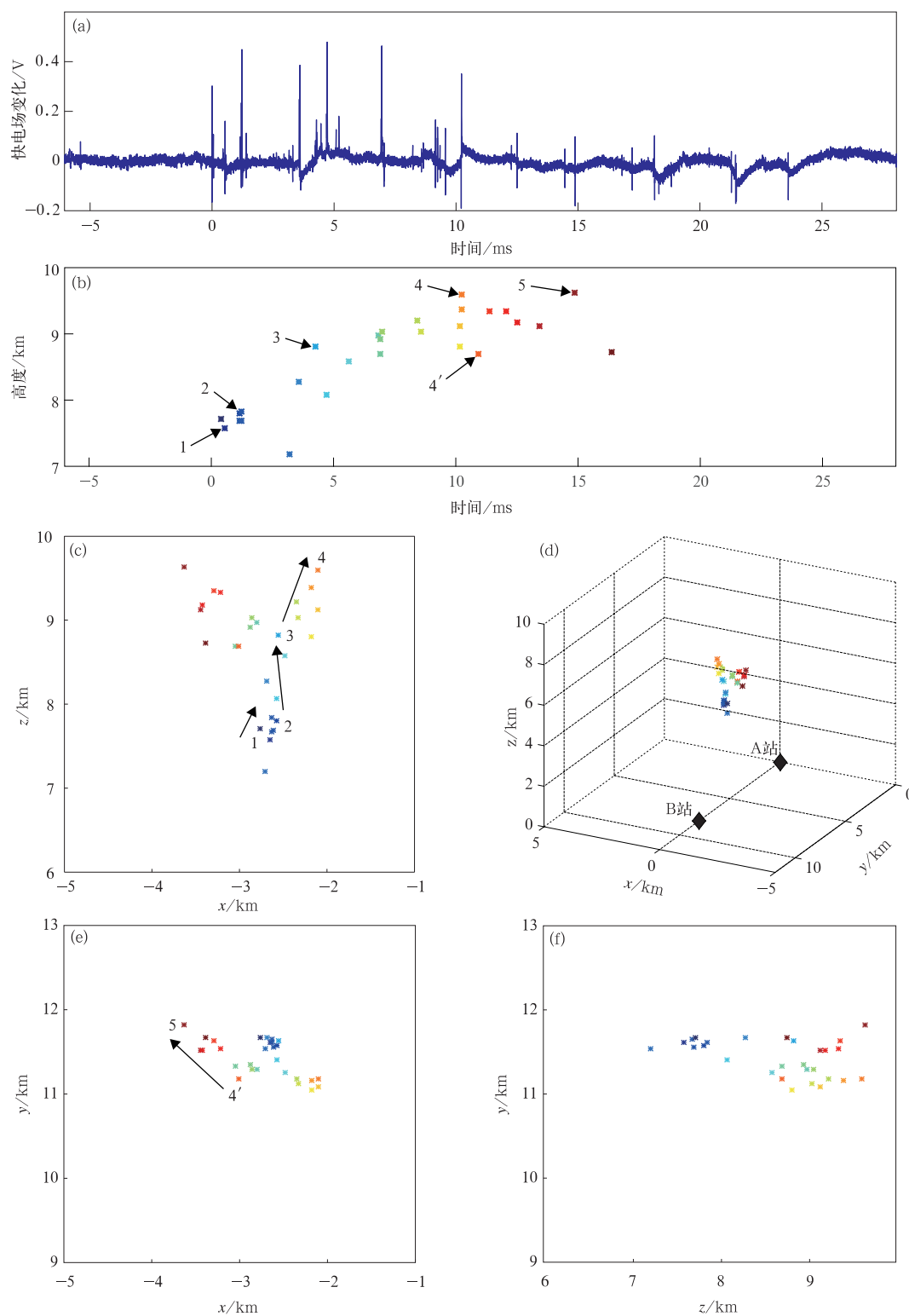


图1 数据处理标准示意图 (a)一次云闪起始阶段的地面快电场变化记录,(b)VHF辐射源高度随时间变化,(c)辐射源定位结果的 $x-z$ 面投影,(d)三维定位显示,(e)辐射源定位结果的 $x-y$ 面投影,(f)辐射源定位结果的 $y-z$ 面投影
 Fig.1 The standard of data processing (a)a fast electric field change record of the initial stage of an intracloud flash,(b)the height of VHF radiation sources versus time for this stage,(c) $x-z$ plane projection of 3D location results,(d)3D location results of this process,(e) $x-y$ plane projection of 3D location results,(f) $y-z$ plane projection of 3D location results

结果,图 1 中标明了闪电起始高度与起始放电过程发展速度的计算标准。图 1a 给出了这次闪电起始阶段的部分快电场变化记录。由于没有对快电场信号进行标定,这里使用信号输出幅度单位伏特表征闪电引起的地面电场变化值。图 1b 为这次云闪起始后 15 ms 的 VHF 辐射源高度随时间变化。其中辐射点颜色与发生时刻对应,黑色箭头标明了 0~2, 0~5, 5~10 ms 以及 10~15 ms 时间段内放电发展速度的计算起止点。图 1 中的黑色箭头 1 为闪电起始位置,同时也是速度计算起始位置。黑色箭头 2, 3, 4, 5 分别为距离起始位置 2 ms 附近、5 ms 附近、10 ms 附近和 15 ms 附近的辐射点位置。箭头 4' 是因为放电过程发生分叉而选取的计算 10~15 ms 时间段内放电发展速度的起始位置。图 1d, 1c, 1e, 1f 分别给出了闪电起始阶段放电的三维定位结果,以及定位结果在 $x-z$, $x-y$ 和 $y-z$ 平面的投影。图 1c, 1e 中黑色箭头标明了 0~2, 0~5, 5~10 ms 和 10~15 ms 4 个时段内的放电发展路径。计算时,位置 2、位置 3 辐射源距离起始位置 1 的三维直线距离除以各自时间间隔可分别得到闪电起始后大约 2 ms, 5 ms 两个时间段内的三维平均发展速度,记为 v_2, v_5 。由于使用的时间间隔短,计算 v_2 时的误差会大于计算另外 3 个使用 5 ms 时间间隔速度参数的误差。位置 4、位置 5 辐射源距离位置 3、位置 4' 辐射源的三维直线距离除以各自时间间隔分别得到闪电起始后 5~10 ms, 10~15 ms 时间段内的三维平均发展速度,记为 v_{10}, v_{15} 。起始位置 1 到位置

4 的发展方向可作为闪电起始放电过程定位结果的发展方向。为便于表达,这里将闪电起始放电过程的发展方向分为 3 类:当定位结果沿垂直地面方向向上单向发展超过 1 km 时,认为起始过程向上发展;当定位结果沿垂直地面方向向下单向发展超过 1 km 时,认为起始过程向下发展;当定位结果在垂直地面方向发展不超过 1 km 时,认为起始过程水平发展。这里以 1 km 作为发展方向判断标准是为了便于区分放电过程水平发展的情形而设立的,主要参考了已有的闪电起始阶段发展速度观测结果、电荷区分布特征和系统定位精度。

2 观测结果

按前文给出的标准,对 80 次云闪、61 次负地闪起始高度的计算得出云闪、负地闪起始高度的垂直分布特征。对选出的 23 次云闪、22 次负地闪的速度和发展方向的分析可展现闪电起始阶段放电过程的时空发展特征。

2.1 闪电起始高度分布

图 2a 和图 2b 分别给出了地闪和云闪的起始高度分布结果。图 2a 中地闪起始高度分布为 2.7~9.9 km, 在 5.0 km 高度存在峰值, 在 8.6 km 高度存在一个不明显的峰值。大多数地闪的起始高度低于 7 km。少量起始高度较高的地闪一般被归为起始击穿过程与云闪类似的混合型负地闪。云闪起始高度分布在 3.9~12.1 km, 在 8.5 km 高度存在峰

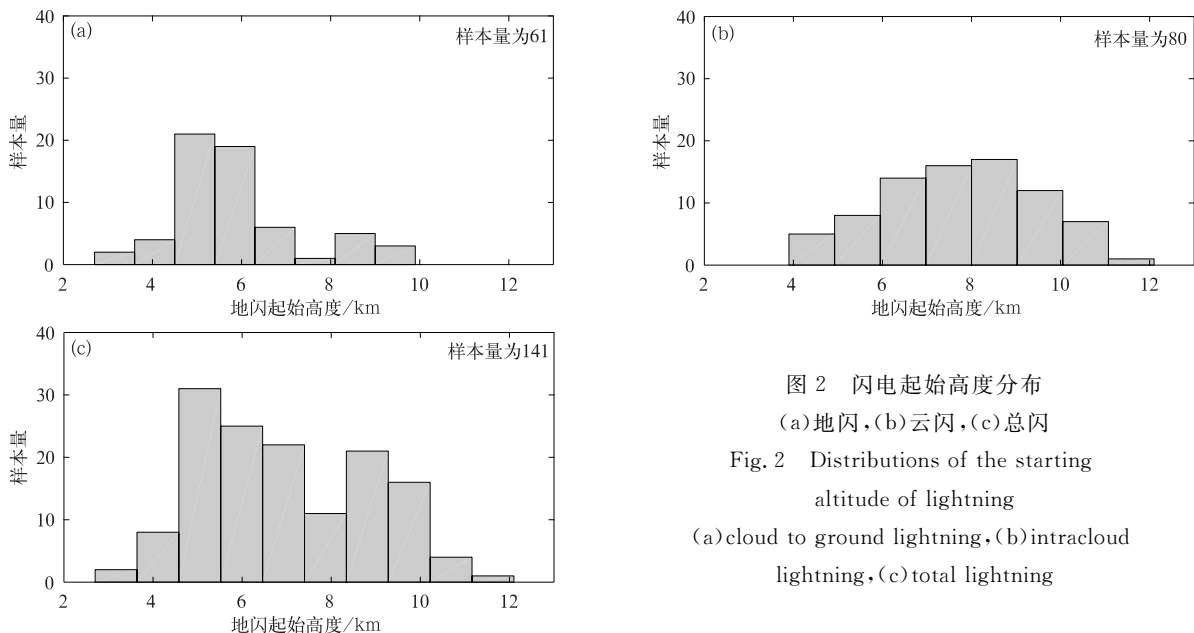


图 2 闪电起始高度分布
(a)地闪,(b)云闪,(c)总闪
Fig. 2 Distributions of the starting
altitude of lightning
(a)cloud to ground lightning, (b)intracloud
lightning, (c)total lightning

值。综合和云闪和地闪的分布特征(图 2c)可以看到,闪电的起始高度呈现出 5.0 km 和 8.8 km 两个明显的峰值。这种分布可以用目前被普遍接受的雷暴云的三极性总体电荷结构进行解释。

目前一般认为,雷暴的总体电荷结构可分为 3 层,即中部的主负电荷层(主要出现在 $-20\sim-10^{\circ}\text{C}$ 温度层结)、上部正电荷层和下部正电荷层^[40-41]。闪电起始于不同极性电荷层之间,在两个电荷区中同时发展。一般情况下,工作在 VHF 频段的闪电定位系统观测到的主要是辐射较强的向正电荷区发展并在其中传播的负极性击穿。因此,闪电起始位置集中分布的两个高度层基本对应着主负电荷区与上下正电荷区的两个交界区域。

此外,这里给出的结果与 Procter^[12-13] 在南非观测到的闪电的起始高度分布结果非常接近,与 Ri-son 等^[14]、Marshall 等^[15]、Maggio 等^[17] 以及 Behnke 等^[18] 的观测也一致。这种闪电发生位置海拔高度的一致也反映出闪电始发与所在温度层结密切相关。

2.2 闪电起始过程发展特征

表 1 给出了 23 次云闪和 22 次地闪记录 v_2, v_5, v_{10}, v_{15} 的最大值、最小值、平均值以及标准差。其中,云闪和地闪 v_2 参数的标准差都大于各自 v_5, v_{10}, v_{15} 的标准差。这种状况可能是 v_2 的计算误差相对较大引起的。23 次云闪 v_2, v_5, v_{10}, v_{15} 的平均值分别为 $3.7\times 10^5, 2.4\times 10^5, 1.8\times 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $2.0\times 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。其中, v_2 的平均值明显大于另外 3 个时段的速度均值; v_{15} 平均值在 v_2, v_5, v_{10} 平均值依次减小后相较 v_{10} 平均值又略有增大。云闪起始后 10 ms 内 3 个时段平均速度均值表现出减速趋势。22 次地闪 v_2, v_5, v_{10}, v_{15} 的平均值分别为 $3.9\times 10^5, 2.4\times 10^5, 2.5\times 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $2.4\times 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。其中, v_2 的平均值明显大于另外 3 个时段速度平均值; v_{10} 的平均值略大于 v_5, v_{15} 的平均值。与云闪的统计结果比,地闪除了 v_5 的平均值与云闪 v_5 的计算结果相等, v_2, v_{10}, v_{15} 的平均值均略大于对应云闪参量的平均值。且从平均速度变化趋势看,地闪与云闪也存在差异。

表 1 闪电起始阶段平均发展速度(单位: $10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Table 1 The average developing velocities of lightning initial stage(unit: $10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

统计参数	云闪(23次)				地闪(22次)			
	最小值	最大值	平均值	标准差	最小值	最大值	平均值	标准差
v_2	1.0	9.5	3.7	2.1	2.0	7.3	3.9	1.8
v_5	1.2	4.2	2.4	0.8	0.6	5.4	2.4	1.2
v_{10}	0.7	3.8	1.8	0.9	0.8	5.7	2.5	1.2
v_{15}	0.8	4.8	2.0	1.2	0.4	5.5	2.4	1.4

图 3 分别给出了 23 次云闪和 22 次地闪距离起始位置约 5, 10, 15 ms 时间段内的闪电放电平均发展速度 v_5, v_{10} 和 v_{15} 。图中将云闪、地闪的速度数据按照 v_5, v_{10}, v_{15} 的大小次序不同进行分组。由表 1 可知, v_2 的计算误差相对较大, 因此, 这里未将 v_2 用于比较。

图 3 给出的 23 次云闪记录中, 9 次记录 3 个时段的平均速度依次递减, 8 次记录的 v_{10} 小于 v_5 和 v_{15} , 3 次记录的 v_{10} 大于 v_5 和 v_{15} , 3 次记录的 v_5, v_{10}, v_{15} 依次递增。即云闪记录中, 15 ms 内 3 个时段速度呈单一变化趋势的有 12 个, 其中 8 个表现为递减趋势。如果只比较 v_5, v_{10} , 在前 10 ms 表现为减速趋势的云闪记录就达到 17 次, 约占全部个例的 74%。图 3 给出的 22 次地闪记录中, 4 次记录的 3 个时段平均速度依次递减, 8 次记录的 v_{10} 小于 v_5 和 v_{15} , 6 次记录的 v_{10} 大于 v_5 和 v_{15} , 4 次记录的 $v_5,$

v_{10}, v_{15} 依次递增。在地闪记录中, 3 个分段速度呈单一变化趋势的仅 8 个, 其中, 4 个表现为递减趋势。前 10 ms 表现为减速趋势的地闪记录为 12 次, 约占全部地闪个例的 55%。从结果看, 多数云闪和地闪在起始阶段前 10 ms 的发展速度表现出递减趋势, 但云闪和地闪起始阶段的速度发展特征又存在差异。该差异主要表现为云闪起始阶段前 10 ms 存在减速趋势的比例更高, 且在前 15 ms 一直保持减速趋势个例所占的比例也大于地闪。这样的结果可说明云闪与地闪的始发环境或始发过程本身存在差异。

表 2 还给出了用于速度计算的 23 次云闪和 22 次地闪的起始阶段发展方向的统计结果。云闪和地闪的起始阶段放电过程均有向上、向下和水平发展 3 种可能。宽带干涉仪观测到的 VHF 信号主要来自闪电中的负极性击穿过程, 即从负电荷区向正电

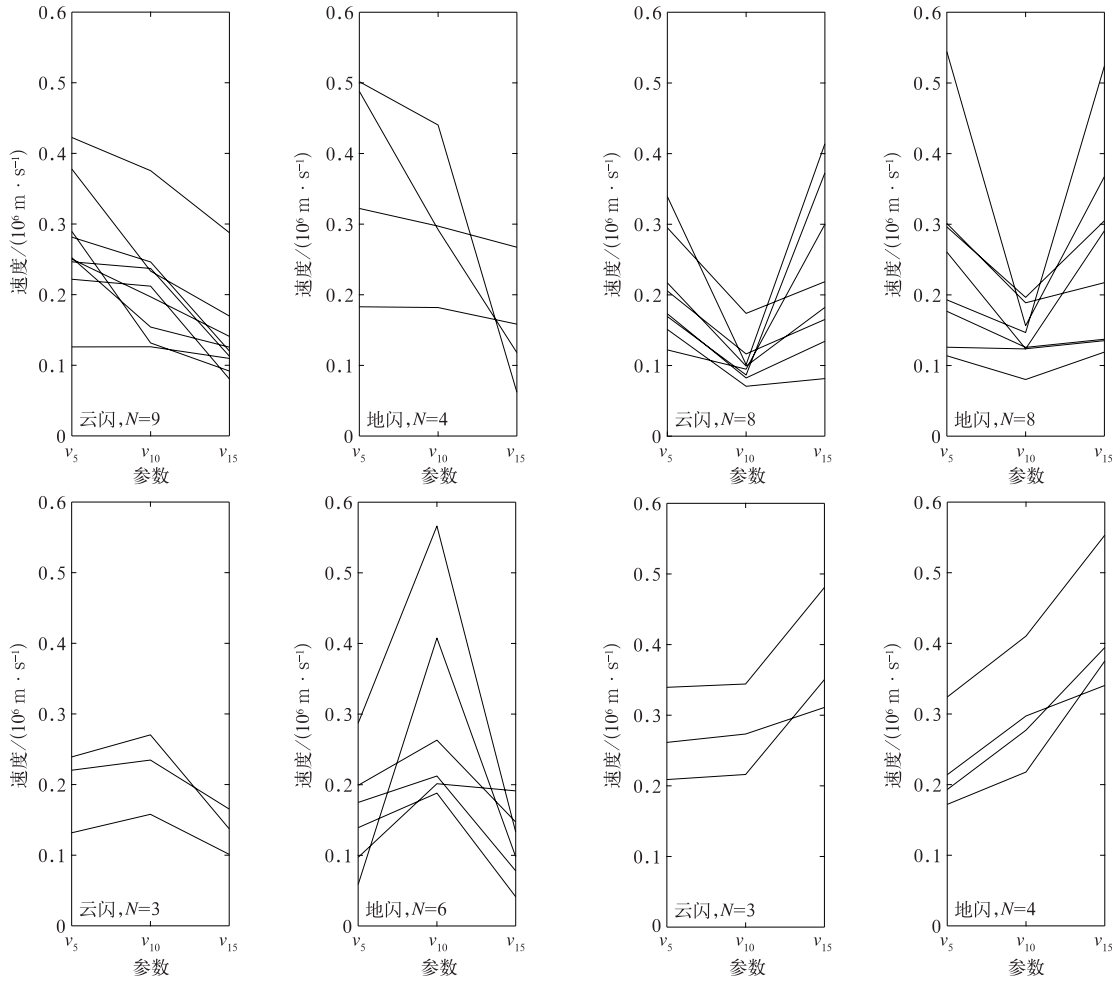


图 3 23 次云闪和 22 次地闪始发约 0~5, 5~10, 10~15 ms 时间段内的闪电放电平均发展速度 (分别对应依次减小、减小后增大、增大后减小和依次增大 4 种情况, N 为闪电样本量)

Fig. 3 The average developing velocities of lightning initial discharge for time intervals of 0-5, 5-10, 10-15 ms roughly of 23 intracloud lightnings and 22 cloud to ground lightnings (records classified into decrease, decrease and then increase, increase and then decrease and increase 4 groups by the order of value for v_5 , v_{10} and v_{15} ; N stands for the number of records in each panel)

荷区发展的放电过程。云闪起始阶段向上发展的个例占 92%, 地闪起始阶段向下发展的个例占 88%。这样的结果与前文中给出的闪电起始位置高度分布体现了相同的垂直方向宏观电荷结构, 相当于指示出闪电起始位置在垂直方向上的电场方向。因此, 观测中获取的闪电起始放电过程的三维发展方向反映闪电起始位区域的三维电场方向。

表 2 闪电起始阶段发展方向统计结果(单位:%)

发展方向	云闪(23 次)	地闪(22 次)
向上	92	4
向下	4	88
水平	4	8

3 结论与讨论

使用 2010 年夏季在广东省观测的三维 VHF 宽带干涉仪闪电定位资料, 对云闪、地闪的起始高度、发展方向和起始阶段的发展速度特征进行分析, 得到以下结论:

1) 闪电的起始高度呈现出 5 km 和 8.8 km 两个明显的分布峰值, 符合雷暴云三极性总体电荷结构的描述。

2) 云闪和地闪在始发后 15 ms 内的平均发展速度均为 $10^4 \sim 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级, 多数云闪和地闪起始后 15 ms 内的平均发展速度表现出减速趋势, 但

云闪个例中前 10 ms 存在减速趋势的比例更高,且其中在前 15 ms 一直保持减速趋势个例所占的比例也大于地闪,云闪起始阶段放电过程的速度发展特征与地闪存在一定差别。

3) 云闪和地闪的起始阶段放电过程在垂直方向均有向上、向下和水平发展 3 种可能,可用于指示闪电始发位置的环境电场方向。

有关闪电始发机制的问题,目前还需要通过不断发展观测技术增进人们对闪电起始放电特征及闪电起始环境特征的认知来解决。这里得到的闪电起始高度分布及闪电起始放电过程的发展方向与 VHF 到达时间差闪电定位系统的结果类似^[12,17],均能反映出雷暴云的三极性电荷结构特征。

本文给出的云闪起始过程发展速度特征与 Behnke 等^[18]给出的闪电起始放电发展速度特征类似,但文献^[18]中 24 次云闪在开始的 10~15 ms 内全部表现为减速趋势,而本文绝大多数云闪在开始的 10~15 ms 内放电过程发展速度表现为减速趋势,少数云闪在起始阶段表现为加速趋势。Behnke 等^[18]认为这种闪电起始阶段放电过程的减速趋势可由逃逸击穿^[42-43]闪电始发机制解释。如果这一解释成立,那么这里得到的结果可说明逃逸击穿机制确实在闪电始发过程中发挥作用,但有可能不是唯一起作用的机制。这种可能性在文中地闪起始阶段速度发展特征上也有体现。但地闪个例中前 15 ms 存在减速趋势的比例低于云闪,且大部分个例的减速趋势仅出现在开始的前 10 ms,说明地闪与云闪的起始放电过程存在差异。这种差异在云闪、地闪的辐射场观测中也有体现^[44],应当与闪电始发机制及雷暴云中云内微物理活动、云内电荷分布等环境因素的差异有关。但这些问题的最终确认还需要进一步发展探测技术和新的物理模型,对闪电放电过程和发生环境的多种物理量进行大量高时空分辨率的同步观测与分析。

参考文献

- [1] 郑栋,孟青,吕伟涛,等.北京及其周边地区夏季闪电活动时空特征分析.应用气象学报,2005,16(5):638-644.
- [2] 高燚,张义军,张文娟,等.我国雷击致人伤亡特征及易损度评估区划.应用气象学报,2012,23(3):294-303.
- [3] 李丹,张义军,吕伟涛,等.闪电先导三维自持发展模式的建立.应用气象学报,2015,26(2):203-210.
- [4] 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.
- [5] Clarence N D, Malan D J. Preliminary discharge processes in lightning flashes to ground. *Q J R Meteorol Soc*, 1957, 83(356): 161-172.
- [6] Krehbiel P, Brook M, Mccrory R. An analysis of the charge structure of lightning discharges to ground. *J Geophys Res*, 1979, 84(C5): 2432-2456.
- [7] Krehbiel P. An Analysis of the Electric Field Change Produced by Lightning. Manchester, UK: Univ of Manchester, 1981.
- [8] 崔海华, 鄒秀书, 张其林, 等. 甘肃中川地区云闪的多站同步观测及雷暴的等效电荷结构. 高原气象, 2009, 28(4): 808-815.
- [9] 武智君, 鄒秀书, 王东方, 等. 大兴安岭林区负地闪电电荷源的反演. 气象学报, 2013, 71(4): 783-796.
- [10] Proctor D E. A hyperbolic system for obtaining VHF radio pictures of lightning. *J Geophys Res*, 1971, 76(6): 1478-1489.
- [11] Proctor D E. VHF radio pictures of cloud flashes. *J Geophys Res*, 1981, 86(C5): 4041-4071.
- [12] Proctor D E. Regions where lightning flashes began. *J Geophys Res*, 1991, 96(D3): 5099-5112.
- [13] Proctor D E. Lightning flashes with high origins. *J Geophys Res*, 1997, 102(D2): 1693-1706.
- [14] Rison W, Thomas R, Krehbiel P, et al. A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico. *Geophys Res Lett*, 1999, 26(23): 3573-3576.
- [15] Marshall T C, Stolzenburg M, Maggio C R, et al. Observed electric fields associated with lightning initiation. *Geophys Res Lett*, 2005, 32(3): L3813.
- [16] Wiens K C, Rutledge S A, Tessoroff S A. The 29 June 2000 supercell observed during STEPS. Part II: Lightning and charge structure. *J Atmos Sci*, 2005, 62(12): 4151-4177.
- [17] Maggio C, Coleman L, Marshall T, et al. Lightning-initiation locations as a remote sensing tool of large thunderstorm electric field vectors. *J Atmos Ocean Technol*, 2005, 22(7): 1059-1068.
- [18] Behnke S A, Thomas R J, Krehbiel P R, et al. Initial leader velocities during intracloud lightning: Possible evidence for a runaway breakdown effect. *J Geophys Res*, 2005, 110(D10): D10207.
- [19] Shao X, Heavner M. On the VLF/LF Radiation Pulse Shapes at the Initial Milliseconds of Lightning Discharges, Singapore. IEEE, 2006.
- [20] Karunarathne S, Marshall T C, Stolzenburg M, et al. Locating initial breakdown pulses using electric field change network. *J Geophys Res*, 2013, 118(13): 7129-7141.
- [21] Wu T, Takayanagi Y, Funaki T, et al. Preliminary breakdown pulses of cloud-to-ground lightning in winter thunderstorms in Japan. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 2013, 102: 91-98.
- [22] Stolzenburg M, Marshall T C, Karunarathne S, et al. Luminosity of initial breakdown in lightning. *J Geophys Res*, 2013, 118(7): 2918-2937.

- [23] Karunarathne S, Marshall T C, Stolzenburg M, et al. Modeling initial breakdown pulses of CG lightning flashes. *J Geophys Res*, 2014, 119(14): 9003-9019.
- [24] 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. *Sci China: Earth Sci*, 2010, 53(4): 591-602.
- [25] Thomas R J, Krehbiel P R, Rison W, et al. Accuracy of the Lightning Mapping Array. *J Geophys Res*, 2004, 109(D14): D14207.
- [26] Mazur V, Williams E, Boldi R, et al. Initial comparison of lightning mapping with operational time-of-arrival and interferometric systems. *J Geophys Res*, 1997, 102(D10): 11071-11085.
- [27] 张义军, 孟青, 马明, 等. 闪电探测技术发展和资料应用. *应用气象学报*, 2006, 17(5): 611-620.
- [28] Shao X, Krehbiel P. The spatial and temporal development of intracloud lightning. *J Geophys Res*, 1996, 101(D21): 26641-26668.
- [29] Rhodes C, Krehbiel P. Interferometric observations of a single stroke cloud-to-ground flash. *Geophys Res Lett*, 1989, 16(10): 1169-1172.
- [30] Shao X. The Development and Structure of Lightning Discharges Observed by VHF Radio Interferometer, Socorro, New Mexico; New Mexico Inst of Mining and Technol, 1993.
- [31] 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.
- [32] 余会莲, 董万胜. 青藏高原云闪起始阶段放电特征分析. *高原气象*, 2007, 26(1): 55-61.
- [33] Dong W S, Wang J G, Zhang Y J. Observations on the Leader-return Stroke of Cloud-to-ground Lightning with the Broadband Interferometer // 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC2002), 2002.
- [34] 董万胜, 刘欣生, 陈慈萱, 等. 用宽带干涉仪观测云内闪电通道双向传输的特征. *地球物理学报*, 2003, 46(3): 317-321.
- [35] 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.
- [36] Akita M, Nakamura Y, Yoshida S, et al. What occurs in K process of cloud flashes? *J Geophys Res*, 2010, 115(D7): 1-7.
- [37] Yoshida S, Biagi C J, Rakov V A, et al. Three-dimensional imaging of upward positive leaders in triggered lightning using VHF broadband digital interferometers. *Geophys Res Lett*, 2010, 37(5): L5805.
- [38] 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.
- [39] Qiu S, Zhou B H, Shi L H, et al. An improved method for broadband interferometric lightning location using wavelet transforms. *J Geophys Res*, 2009, 114(D18): 1-9.
- [40] Williams E R. The tripole structure of thunderstorms. *J Geophys Res*, 1989, 94(D11): 13151-13167.
- [41] 张义军, 徐良韬, 郑栋, 等. 强风暴中反极性电荷结构研究进展. *应用气象学报*, 2014, 25(5): 513-526.
- [42] Gurevich A V, Milikh G M, Roussel-Dupre R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. *Phys Lett A*, 1992, 165(5-6): 463-468.
- [43] Milikh G, Roussel-Dupre R. Runaway breakdown and electrical discharges in thunderstorms. *J Geophys Res*, 2010, 115(A12): A60E.
- [44] 祝宝友, 马明, 陶善昌. 地闪和云闪初始击穿 VHF/VLF 辐射特征观测和比较. *高原气象*, 2003, 22(3): 239-245.

3D Spatial-temporal Characteristics of Initial Breakdown Process in Lightning Observed by Broadband Interferometer

Liu Hengyi¹⁾²⁾ Dong Wansheng¹⁾ Xu Liangtao¹⁾³⁾ Zhang Yijun¹⁾

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

²⁾ (*National Key Laboratory on Electromagnetic Environmental Effects and Electro-Optical Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101*)

³⁾ (*College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

Abstract

The location from where lightning initiate and the initial breakdown process of lightning are both important issues in research of lightning. In the summer of 2010, a series of 3D location data of lightning initial breakdown process are observed by two VHF broadband interferometers, which can provide the image of the development of lightning discharge with a time resolution of 5 μs and a space resolution better than 1 km. The initiation height distribution and 3D time-space characteristic of initial breakdown process in lightning are given by some statistical analysis on 80 intra-cloud lightning records and 61 negative cloud to ground lightning records. Results show that there are two obvious peak values, 5.0 km and 8.8 km above the ground, in the distribution of lightning initiation height. This two-peak feature can meet the picture described by the tripole gross charge structure of thunderstorms very well. The average velocities of 23 intra-cloud lightnings and 22 cloud-to-ground lightnings during the first 15 ms of initial breakdown process is calculated every 5 ms. The calculation indicates that the average velocities during the first 15 ms of initial breakdown process are in $10^4 - 10^5$ order of magnitude both in intra-cloud flash and cloud to ground flash. Most intra-cloud flash and cloud to ground flash decelerated during the first 10–15 ms of the initial discharge. This result is a little different from a previous study in which all of the 24 intra-cloud flash records present a deceleration phase in the first 10–15 ms. It also demonstrates a possibility that runaway breakdown mechanism is not the only effective lightning initiation mechanism. Proportions of the intra-cloud flash which decelerated during the first 10 ms and 15 ms are both higher than those of cloud to ground flash in this observation. This may indicate that there is some difference between initiation processes of intra-cloud flash and cloud to ground flash. At last, it is found that the initial stage of intra-cloud lightning and cloud to ground lightning both have three possible development tendencies: Upward, downward and horizontal in vertical direction. The development direction of lightning initial stage is related to the environment electric field, and that can be used to give information about the direction of the electric field at the initiation location of lightning.

Key words: lightning initiation; broadband interferometer; lightning locating; lightning