

张志孝, 郑栋, 张义军, 等. 闪电初始阶段和尺度判别方法及其特征. 应用气象学报, 2017, 28(4): 414-426.

DOI: 10.11898/1001-7313.20170403

闪电初始阶段和尺度判别方法及其特征

张志孝¹⁾²⁾ 郑 栋^{1)2)*} 张义军¹⁾²⁾ 陆高鹏³⁾⁴⁾⁵⁾

¹⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

²⁾(中国气象科学研究院雷电物理和防护工程实验室, 北京 100081)

³⁾(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)

⁴⁾(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

⁵⁾(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要

基于 LMA 三维闪电定位数据, 对 2004 年 10 月 5 日发生于美国新墨西哥州的一次超级单体过程的闪电初始及其尺度特征进行研究, 提出闪电初始阶段自动判别及其特征参量提取方法, 并给出参量分布特征。结果显示: 闪电初始阶段上行负先导(下行负先导)的持续时间中值为 13.5 ms(7.5 ms), 三维位移中值为 1.4 km(1.0 km), 三维平均位移速度中值为 $9.2 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.2 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 上行负先导速度随时间递减, 下行反之, 二者与垂直方向夹角的中值分别为 40° 和 54° 。表征闪电尺度的闪电凸壳面积和闪电总长度的概率密度呈负幂函数分布, 在小值方向分布更为集中。闪电水平延展距离中值为 6.1 km, 垂直延展距离中值为 4.3 km, 约 83% 的闪电其水平延展距离大于垂直延展距离; 闪电的持续时间中值为 271.0 ms。分析发现, 以水平延展为主的闪电起始高度分布峰值位于 8.5 km, 以垂直延展为主的闪电起始高度分布峰值位于 11 km。闪电初始阶段位移方向越接近水平, 对应闪电垂直延展越小, 说明闪电初始段的传播方向对于闪电垂直延展具有重要影响。

关键词: 超级单体; 闪电起始; 闪电尺度

引 言

已有闪电活动特征研究主要集中在闪电的极性、频次和位置等方面^[1-5], 随着全闪三维探测技术的发展, 对闪电三维发展过程和形态进行描述成为可能^[6]。闪电的三维通道信息可以反映一些关于闪电活动的新特征, 如本研究所关注的闪电初始阶段和尺度特征。

闪电初始对应闪电激发及其后先导向电荷区传输的短暂过程, 通常认为是发生于异种电荷区之间强电场环境中前几毫秒到数十毫秒内的闪电预击穿过程, 在低频电场变化中通常表现出双极性特征^[7-9]。已有部分工作分析了闪电初始的传播速度、传播距离、起始位置以及不同参量间的关系。Shao

等^[10]基于二维干涉仪观测结果分析, 发现上行初始先导位移速度为 $1.5 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; Behnke 等^[11]基于 LMA(lightning mapping array)资料统计, 报道云闪初始先导速度中值为 $1.6 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; Wu 等^[12]基于低频闪电定位资料分析, 指出对于上行初始先导, 起始高度越高, 传播速度越小。闪电起始可能与雷暴动力和微物理结构有关。Zheng 等^[13]在超级单体分析中发现, 起始位置处对应霰、干雪、小雹和冰晶的闪电分别占总闪频数的 44.3%, 44.1%, 8.0% 和 3.0%; 闪电起始最频繁的位置出现在云内具有较强上升气流和气流切变的区域, 闪电起始位置的平均高度沿超级单体右侧到左侧、后侧到前侧的方向由大到小变化。Wu 等^[14]发现闪电初始阶段先导的发展方向与雷暴电荷结构密切相关。

2017-02-13 收到, 2017-05-16 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(41675005, 91537209), 中国气象科学研究院基本科研业务费重点项目(2016Z002)

* 通信作者, email: zhd@camsema.cn

闪电尺度是描述闪电空间发展特征的参量,有多种表征方法,如包含所有闪电辐射源的平面二维凸壳面积、通道总长度、延伸的最大水平和最大垂直距离等^[13,15-18]。多个研究发现,闪电尺度可能与雷暴活动强弱存在联系。Bruning 等^[15]、Calhoun 等^[19]和 Zheng 等^[13]指出在超级单体对流区附近闪电尺度小,而在远离对流区的区域,特别是前侧云砧区闪电尺度大。Chronis 等^[16]发现在闪电活动最为旺盛的下午,闪电的水平 and 垂直延展小,而在闪电活动较弱的时段,闪电水平和垂直延展大,闪电尺度的日变化与闪电频次的日变化呈反相关。

总体而言,闪电初始和闪电尺度是近期在闪电研究中引入的新特征参量,相关研究还处于起步阶段。已有关于闪电初始特征或尺度特征分布规律的工作主要依据闪电个例或手工挑选的闪电样本,对于一次完整雷暴过程中闪电初始和尺度的分布规律几乎未涉及。本文利用2004年10月5日发生于美国新墨西哥州的一次超级单体过程中的闪电三维探测数据,开展3个方面研究:发展自动提取闪电初始阶段特征参量的方法,研究闪电初始和闪电尺度特征参量在超级单体发展过程中的自身分布规律,探讨不同参量间的可能关系。

1 闪电数据

闪电数据来源于美国新墨西哥州 LMA 系统(图1),针对本文分析个例,共10个子站参与定位。

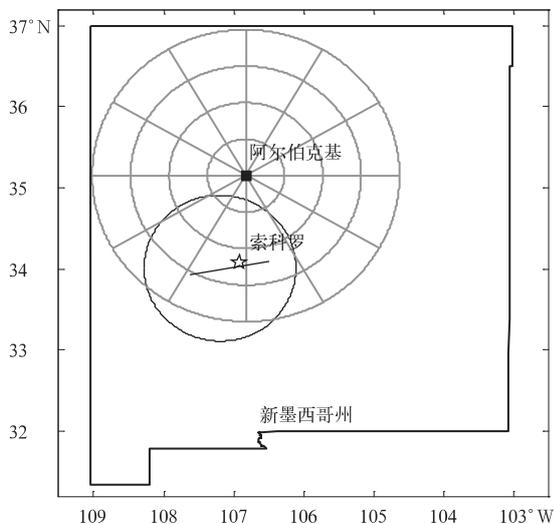


图1 阿尔伯克基 WSR-88D 雷达和 LMA 系统探测范围示意图

Fig. 1 The diagram of Albuquerque WSR-88D radar and LMA detection range

LMA 系统的中心频率为 63 MHz,带宽为 6 MHz,探测网内部水平定位误差为 6~12 m,垂直定位误差为 20~30 m^[20]。关于 LMA 的技术细节可参考文献^[21-23]。根据经验,距离站网中心 100 km 范围内,LMA 具有较为可靠的三维闪电辐射源定位结果^[22]。图1中黑色圆代表 LMA 100 km 探测范围,黑色直线代表该过程自西南向东北方向的移动路径,矩形点代表阿尔伯克基 WSR-88D 雷达位置,星形代表降雹位置,灰圆代表雷达 50 km,100 km,150 km,200 km 探测范围,本研究超级单体过程其主体位于 LMA 100 km 探测范围内。

2 数据处理

2.1 闪电算法

参考文献^[24],被选中的闪电辐射源数据需满足至少有7个子站参与定位,且卡方拟合优度小于2。在将辐射源数据转变为闪电数据时(一次闪电由满足一定条件的辐射源组成),参考了 MacGorman 等^[22]使用的算法:时间相邻辐射点间时间差小于 150 ms,新辐射点需与该次闪电内至少1个辐射点的时间差小于 500 ms,距离小于 3 km,且闪电持续时间不大于 3 s。Zheng 等^[13]在分析超级单体雷暴闪电特征时曾引入上述算法,并基于与手动识别结果对比,修改了相关参数阈值使其适合分析个例,选用的对应参数为 180 ms,300 ms,2 km 和 3 s。本研究测试了两组阈值,并与手动闪电判别的结果进行对比,最终选择了 Zheng 等^[13]的阈值。在挑选闪电时,参照 Lund 等^[24]和 Zheng 等^[13]工作,总辐射源数小于 10 的闪电被排除掉。

2.2 闪电初始阶段特征参量表征方法

闪电起始于正负电荷区间,发展出正、负先导,分别向与之极性相反的电荷区传播^[10,25]。根据闪电甚高频辐射源探测特点,负极性击穿的辐射强度通常强于正极性击穿^[10,23],因而甚高频探测系统更易于观测到闪电初始阶段负先导发展。Wu 等^[14]将闪电初始辐射源表征的闪电通道进入近似水平发展前以向上或向下发展为主的这部分定义为闪电初始预击穿过程,本研究闪电初始阶段与该定义相同。考虑闪电初始阶段的上述特征,提出闪电负先导初始段自动识别方法。

该方法分为4步:①确定闪电起始位置。以单次闪电连续点群(连续条件为时间相邻的辐射点间

高度差不大于 0.5 km)中时间最早的点为闪电起始位置,如图 2a 中黑色加号为 18:36:23(世界时,下同)时刻闪电个例的起始位置,以该位置所在高度为分界高度,将闪电辐射源分为上下两部分(只考虑最初 100 ms 内的辐射源),因为系统对负先导的探测效率更高,所以辐射源数量较大的一组作为负先导的定位结果。②求解对应一定时间段内的闪电通道的平均位置。对选定辐射源进行 3 ms 时间分段处理,每一时间段内不同辐射点位置平均值作为对应

该时间的先导发展平均位置,其高度平均位置即作为负先导当前发展高度,处理结果如图 2b 所示。③高度平滑。沿时间轴方向,依次相邻 5 点使用线性滑动平均,平滑后的效果如图 2c 所示。④闪电初始阶段结束位置判别。计算平滑后曲线的一阶导数(即对应时间段内负先导在垂直方向速度),如图 2d 所示,以导数首次小于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的近零点对应时刻作为初始阶段的终止时刻,如图 2d 中黑圈所示,该时刻对应图 2c 中竖线时刻,即闪电由偏垂直发展转

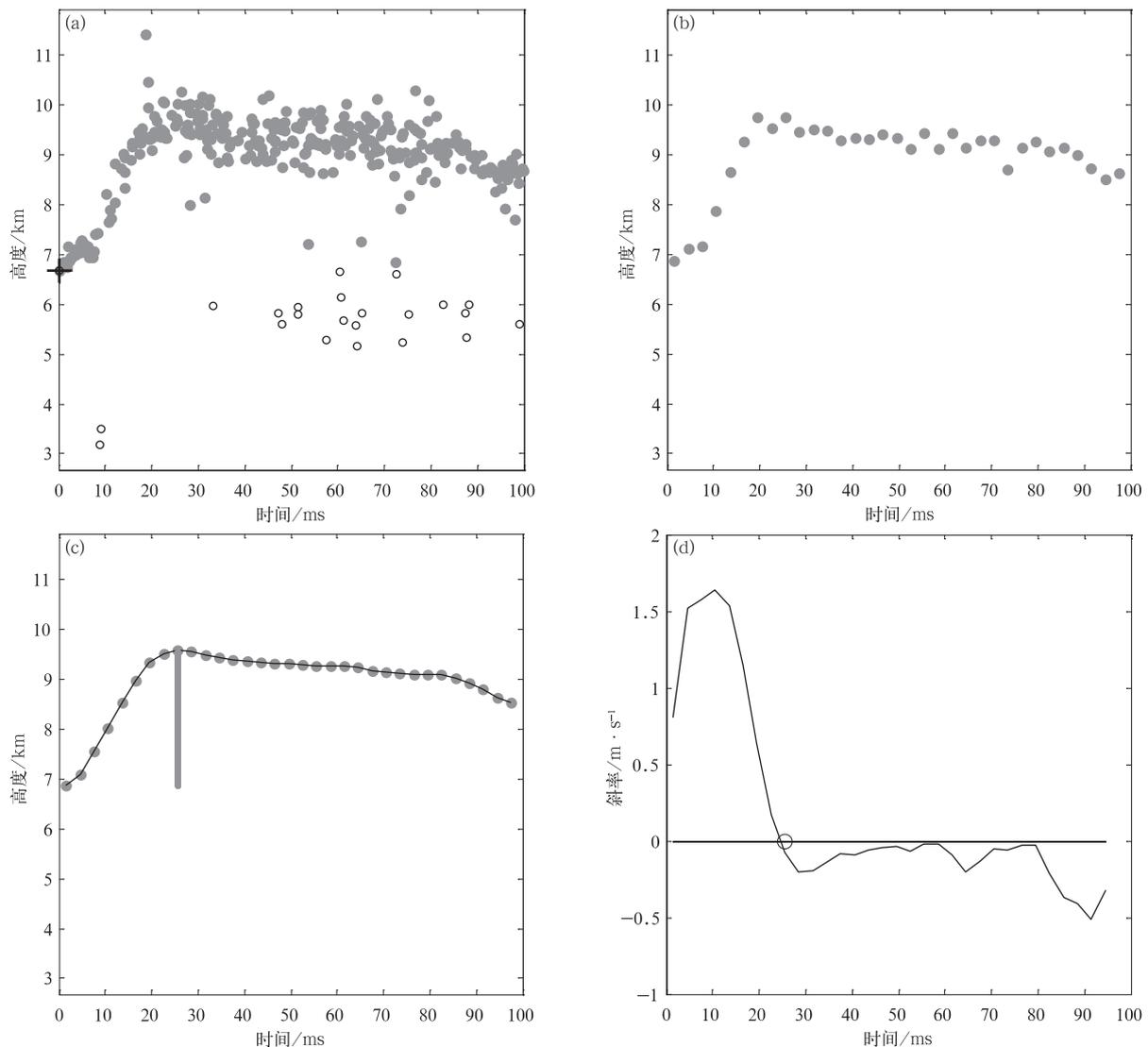


图 2 闪电初始阶段自动识别方法示例

(a) 闪电起始位置确定, (b) 3 ms 时间间隔内辐射源的平均高度求解,
(c) 相邻辐射源高度平滑, (d) 依据斜率特征判定初始阶段结束位置

Fig. 2 The diagram of flash initiation identification method

(a) the initial point determined, (b) average heights of sources in every 3 ms temporal span calculated, (c) the curve smoothed by every five adjacent points, (d) the end time of flash initiation determined based on the slope curve

向偏水平发展的拐点。上述计算方法,有如下假设支撑:闪电初始阶段相比之后电荷区内发展阶段,垂直发展特征偏明显;在闪电初始发展阶段,通道一般不分叉。这些假设并没有直接研究结果予以证明,但从闪电物理过程的已有研究经验认知出发,应当合理。

提取闪电初始阶段后,将计算如下 6 个特征参量:①持续时间,即初始段终止时刻与起始时刻的时间差,如图 2c 中竖线与起始时刻时间差。②起始高度,即被定义为闪电起始点的位置所在高度,如图 2a 中黑色加号对应高度。③三维位移,即闪电初始阶段起始位置和结束位置之间的三维直线距离。④垂直位移,闪电初始阶段起始位置和结束位置在垂直方向上的距离差。⑤三维平均位移速度,即闪电三维位移与闪电起始持续时间之商,注意其理论上小于通常使用的负先导发展速度。⑥垂直夹角,即在闪电初始阶段内,闪电位移方向与垂直方向的夹角,向上发展的负先导与垂直向上方向对比,向下发展的负先导与垂直向下方向对比,夹角范围始终处

于在 0° 至 90° 之间。

2.3 闪电尺度表征方法

采用以下 4 种方法表征闪电尺度:①平面视角下的二维凸壳面积。多个研究采用该方法^[13,15],每次闪电对应一个平面视角下包含所有闪电辐射点的最小外接多边形面积,如图 3a 中蓝色实线包围面积为 19:15:57 闪电对应的凸壳面积。②闪电通道总长度。参考 Zhang 等^[18]的方法将闪电辐射源对应到水平方向 $250\text{ m} \times 250\text{ m}$ 、垂直方向 400 m 的空间网格中,再使用迪杰斯特拉算法识别闪电通道(图 3)。Zhang 等^[18]通过模拟试验认为该方法的实际误差不超过 10%。计算通过上述方法识别的一次闪电过程中所有通道的长度总和,即得到闪电三维通道总长度。③闪电延展的最大水平距离。④闪电延展最大垂直距离。图 3a 中水平投影上最远两辐射点的距离代表该次闪电延伸的最大水平距离,图 3b 中垂直方向上相距最远的两辐射点距离代表延伸的最大垂直距离^[16]。

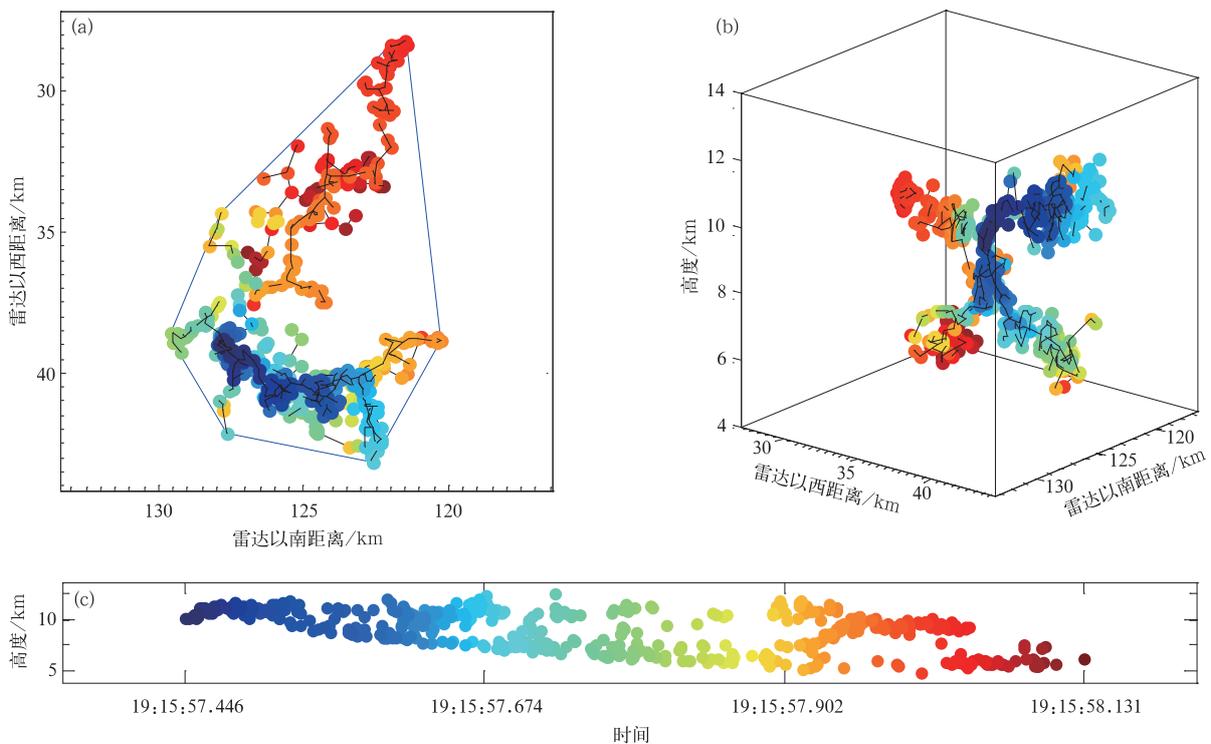


图 3 闪电尺度表征方法示例

(a)甚高频辐射源水平分布,(b)甚高频辐射源三维分布,(c)辐射源高度时间分布

Fig. 3 The diagram of methods describing flash size

(a)horizontal distribution of VHF sources,(b)three-dimensional distribution of VHF sources,(c)height-time distribution of VHF sources

2.4 过程闪电特征概述

本研究超级单体过程 20:02—20:22 产生冰雹, 冰雹直径为 2.23~7.62 cm。图 4 展示此次超级单体过程闪电活动的基本特征。闪电活动从 18:00 持

续到 21:07, 共探测到 4042 次闪电, 峰值出现在 20:09。闪电平均尺度(图 4c)在 18:30 和 19:30 分别出现两次峰值。注意闪电尺度与闪电活动频次存在反向的对应关系。

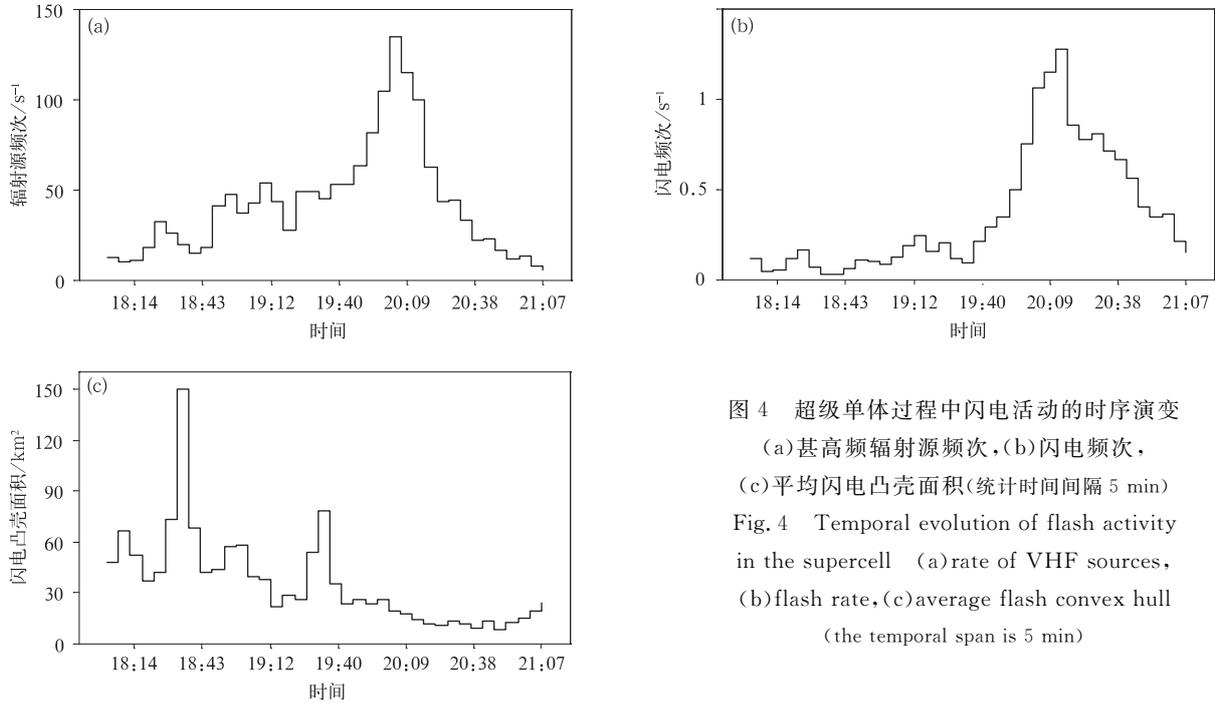


图4 超级单体过程中闪电活动的时序演变
(a)甚高频辐射源频次,(b)闪电频次,
(c)平均闪电凸壳面积(统计时间间隔 5 min)
Fig. 4 Temporal evolution of flash activity
in the supercell (a)rate of VHF sources,
(b)flash rate,(c)average flash convex hull
(the temporal span is 5 min)

3 闪电初始阶段特征参量

3.1 闪电初始特征参量概率密度分布

在超级单体过程中,基于初始阶段识别方法,并经过人工筛选后,选取了 1147 次初始过程较为清晰的闪电样本,包括 947 次上行负先导和 200 次下行负先导。它们的分布特征和统计结果参见图 5 和表

1。可以看到,上行负先导初始阶段持续时间中值为 13.5 ms,下行负先导初始阶段持续时间中值为 7.5 ms,它们各自的峰值分布集中于 10~15 ms 和 5~10 ms(图 5a)。上行和下行负先导在初始阶段的三维位移在 0.5~1 km 区间集中了最大样本(图 5b),其中值位移分别是 1.4 km 和 1.0 km。垂直位移上,上行负先导在 0.5~0.75 km 区间为峰值,下行负先导在 0.25~0.5 km 区间为峰值,它们

表 1 闪电初始阶段特征参量的参数统计

Table 1 Statistics of parameters in initiation stage of flashes

统计项目	平均值	中值	标准差	最大值	最小值
上行持续时间/ms	16.2	13.5	9.3	65.1	1.5
下行持续时间/ms	9.9	7.5	5.8	36.0	1.5
上行三维位移/km	1.6	1.4	1.0	5.9	0.1
下行三维位移/km	1.3	1.0	1.0	5.9	0.1
上行垂直位移/km	1.0	0.9	0.7	5.2	0.03
下行垂直位移/km	0.7	0.5	0.6	3.6	0.08
上行三维速度/(10 ⁵ m · s ⁻¹)	1.1	0.9	0.7	4.0	0.10
下行三维速度/(10 ⁵ m · s ⁻¹)	1.5	1.2	0.9	4.0	0.13
上行垂直夹角/(°)	40.3	40.2	17.5	85.5	1.3
下行垂直夹角/(°)	52.0	54.3	19.2	83.1	2.4

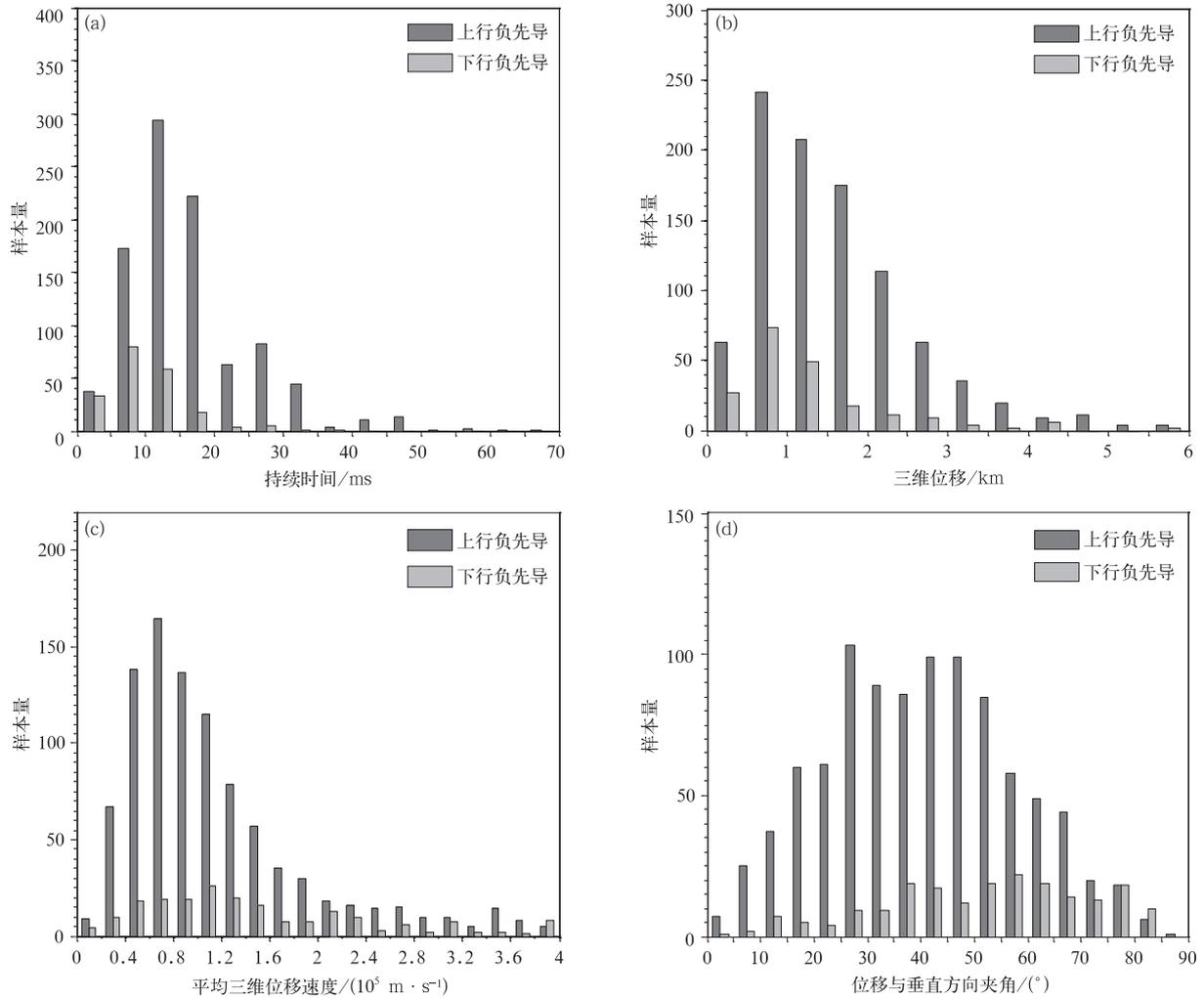


图 5 闪电初始阶段特征参量概率密度分布

(a)持续时间,(b)三维位移,(c)平均三维位移速度,(d)位移方向与垂直方向夹角

Fig. 5 Probability density distribution of characteristic parameters in initiation stage
(a) initiation duration time, (b) 3-D displacement, (c) average 3-D displacement velocity,
(d) angle between flash initiation displacement and vertical direction

对应的中值分别为 0.9 km 和 0.5 km,下行负先导初始的垂直位移小于上行负先导。闪电起始阶段负先导三维平均位移速度(图 5c)主要集中在 $10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级,与已有研究结论一致^[26-27]。其中,对应上行负先导的峰值区间为 $0.6 \times 10^5 \sim 0.8 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,下行负先导为 $1.0 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,它们各自的中值 $9.2 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.2 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 表明下行负先导速度更快。图 5d 显示了闪电初始位移方向与垂直方向的夹角,上行负先导在 30° 和 50° 附近表现出峰值,下行负先导集中于 40° 和 60° 附近,对应的中值分别约为 40° 和 54° ,可以看到,闪电初始阶段并非理想的垂直发展,

实际上倾斜发展是主要特征。

3.2 闪电初始位移速度时序演变

选取所有闪电初始阶段负先导样本,以 3 ms 为时间间隔,分析负先导平均三维位移速度随时间的变化,结果如图 6 所示。不同闪电初始样本对应的初始阶段持续时间不同,因此,对应时间间隔内的样本量是变化的,图 6 为了确保分析数据的可靠性,本文选定在分析时间间隔内,上行负先导的样本量不少于 100,而下行负先导的样本量不少于 50。可以看到,闪电初始阶段,上行负先导速度在控制样本后的前 24 ms 整体上随时间递减,这与 Behnke 等^[11]观测结果一致,他们报道云闪的初始上行先导在最

初的 10~15 ms 呈现速度递减趋势。由图 6 还可以看到,在控制样本后的前 12 ms,下行负先导的速度整体呈现上升趋势。Behnke 等^[11]讨论了引起闪电初始阶段负先导速度随时间变化的多种可能性认

为,上行负先导速度随时间的变化可能与环境气压的减小有关。因此,按照该解释,下行负先导的速度可能随时间呈现增加趋势。本研究从观测结果对这种可能性提供了支持。

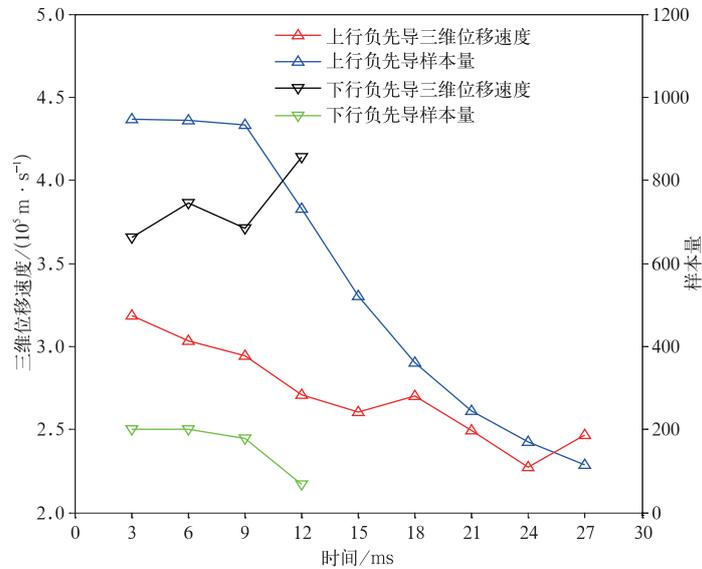


图 6 闪电初始阶段平均三维位移速度的时序演变

Fig. 6 Temporal evolution of 3-D displacement velocity in initiation stage of flashes

3.3 闪电初始阶段特征参量关系

图 7a 为闪电起始高度与闪电初始阶段平均三维位移速度对应的散点分布以及对应不同起始高度上的速度盒须图。由图 7a 中值看,在闪电活动主要发生的 6~11 km(保证足够样本条件下)闪电初始阶段平均三维位移速度随起始高度的增大而减小,

这与已有研究结果一致^[12]。图 7b 为闪电初始阶段三维位移和闪电初始阶段发展方向与垂直夹角的对应关系以及对应不同夹角的三维位移盒须图。由图 7b 中值看,闪电初始阶段三维位移随夹角的增大而增大,表现出闪电初始段越接近水平方向,闪电初始阶段的三维位移可能越大。

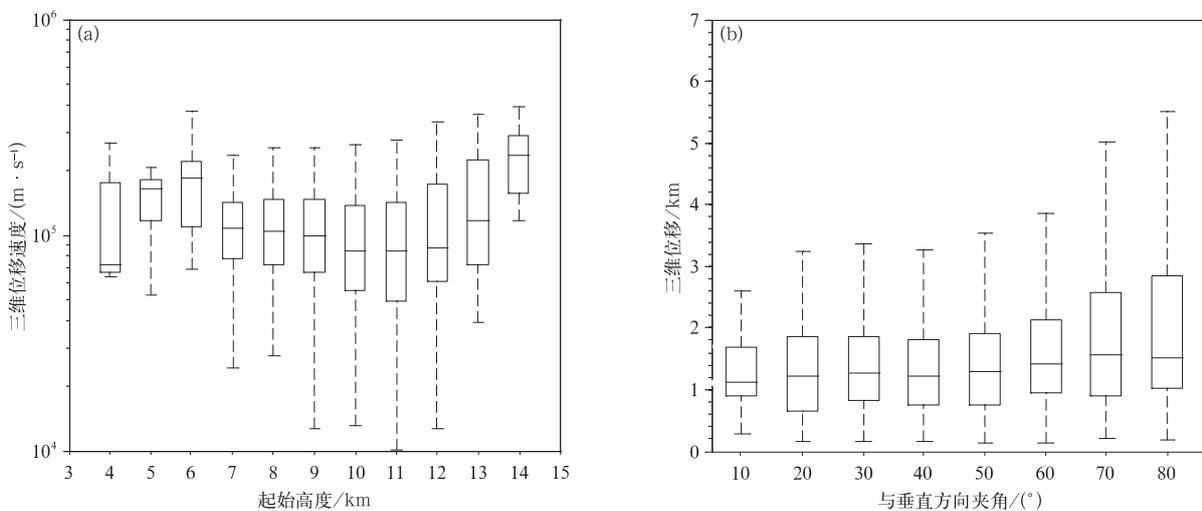


图 7 闪电初始特征参量间关系 (a)闪电起始高度与闪电初始三维位移速度,(b)垂直夹角与三维位移

Fig. 7 Relationship between parameters in flash initiation stage

(a)initiation height VS 3-D displacement velocity, (b)vertical angle VS 3-D displacement

4 闪电尺度特征

4.1 闪电尺度特征参量概率密度分布

图 8 和表 2 展示了超级单体过程闪电对应的凸壳面积、三维通道总长度、水平和垂直延展距离的分布。闪电凸壳面积概率分布(图 8a)可用负幂函数拟合: $N=582558 \times A_F^{-2.10}$,其中, N 代表闪电样本频数, A_F 代表闪电凸壳面积,拟合相关系数可达 -0.98 ;闪电通道总长度概率密度谱(图 8b)也可用负幂函数拟合: $N=4049283 \times L_F^{-2.28}$,公式中 L_F 代表闪电通道总长度,拟合相关系数可达 -0.97 。闪电凸壳面积和三维通道总长度都呈现负幂函数的分

布特征,大概率分布偏向小值,且描述两个特征参量分布趋势的幂函数指数比较接近,说明两种特征参量在表征闪电尺度分布特征上类似。由图 8c 和图 8d 可以看到,闪电水平延展距离在 4~6 km 区间、垂直延展距离在 3~4 km 区间拥有最多样本,对应的中值分别为 6.1 km 和 4.3 km。此外,本研究还统计了闪电持续时间分布特征,发现闪电持续时间中值为 271.0 ms,平均值为 329.1 ms。张荣等^[28]报道青藏高原东北部闪电平均持续时间云闪为 326 ms、负地闪为 453 ms、正地闪为 326 ms。从平均值看,本超级单体个例闪电持续的平均时间与青藏高原云闪较为接近。

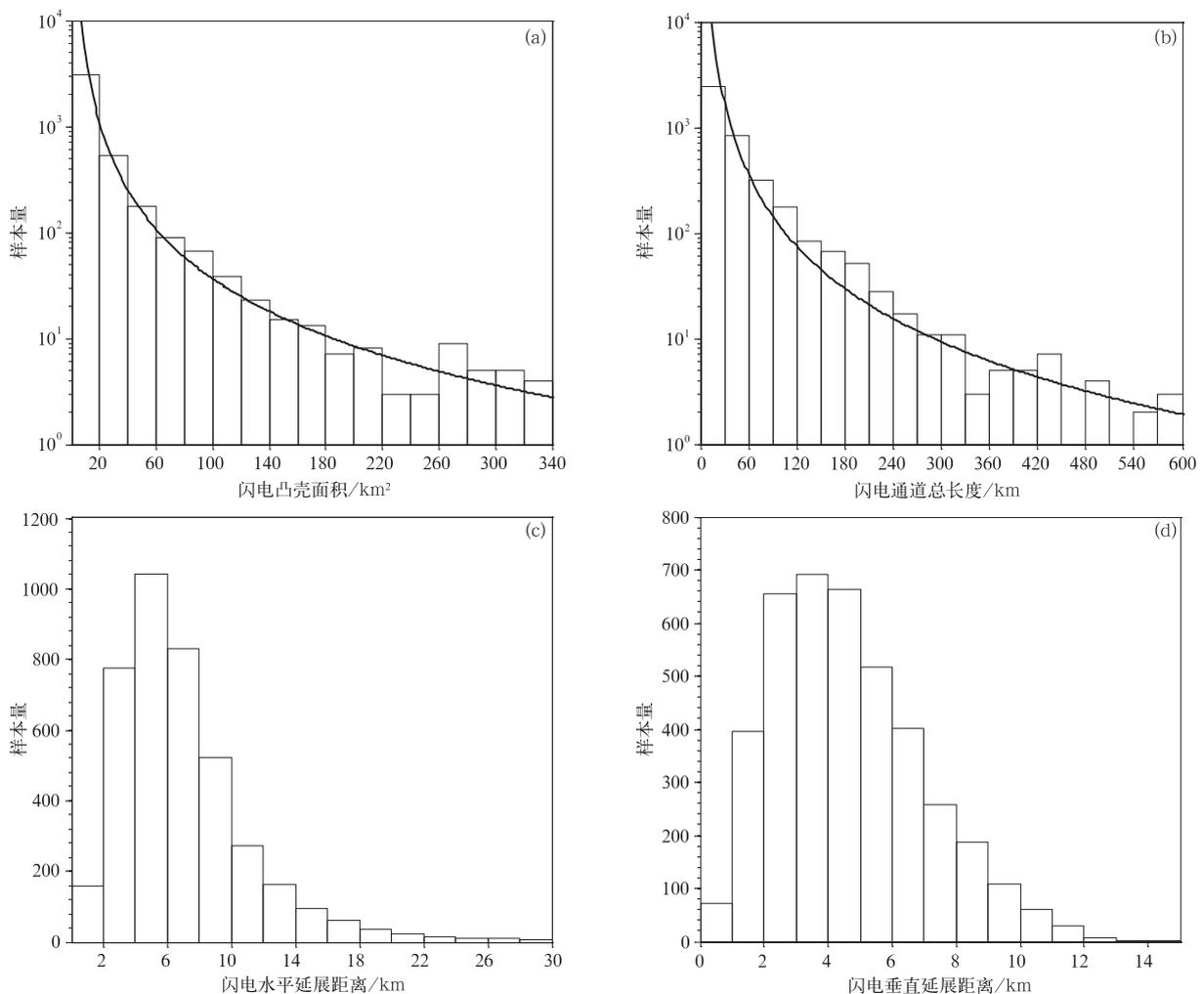


图 8 闪电尺度特征参数概率密度分布

(a)闪电凸壳面积,(b)闪电通道总长度,(c)闪电延展的最大水平距离,(d)闪电延展的最大垂直距离

Fig. 8 Probability density distribution of parameters describing flash size (a)area of flash convex hull, (b)total length of flash channels,(c)horizontal extent of flash,(d)vertical extent of flash

表2 闪电尺度特征参量的参数统计

Table 2 Statistics of parameters describing flash size

统计项目	平均值	中值	标准差	最大值	最小值
凸壳面积/km ²	20.3	8.2	39.4	522.8	0.01
通道总长度/km	43.4	22.3	61.4	695.4	0.7
延伸的最大水平距离/km	7.1	6.1	4.5	39.3	0.2
延伸的最大垂直距离/km	4.6	4.3	2.3	14.0	0.3
持续时间/ms	329.1	271.0	226.7	1798.8	4.2

4.2 闪电尺度不同特征参量对比

图9a给出所有闪电水平延展距离与垂直延展距离的样本密度分布,红线以下区域表示闪电水平延展大于垂直延展,红线以上反之。4042次闪电中有3352次闪电(83%)的水平延展距离大于垂直延展距离。图9b给出闪电凸壳面积与闪电通道总长度的对应关系,可以看到,二者之间表现出较好的线性拟合关系(图9b中黑线),公式为 $A_F = 0.4 \times L_F - 2.46$,相关系数为0.90,这与图8a和8b中两者分布上的变化趋势的一致性相对应。此外,本文分析了闪电凸壳面积和闪电持续时间的关系,持续时间凸壳面积也存在随闪电持续时间增大而增大的趋

势,但这个关系并不显著,样本分布比较离散;这可能是由于闪电凸壳面积能够体现闪电通道形状、分叉等特征,而闪电持续时间只是单纯体现闪电的开始和结束。最近,世界气象组织极端天气和气候委员会确认发生于2007年6月20日Oklahoma的一次闪电为目前世界上探测到的最长距离的闪电,水平延展距离为321 km;发生于2012年8月30日法国南部的一次闪电为持续时间最长的闪电过程,持续时间为7.74 s^[29]。可以看到,最大尺度的闪电并非最长持续时间的闪电,尺度和持续时间并不明显对应。

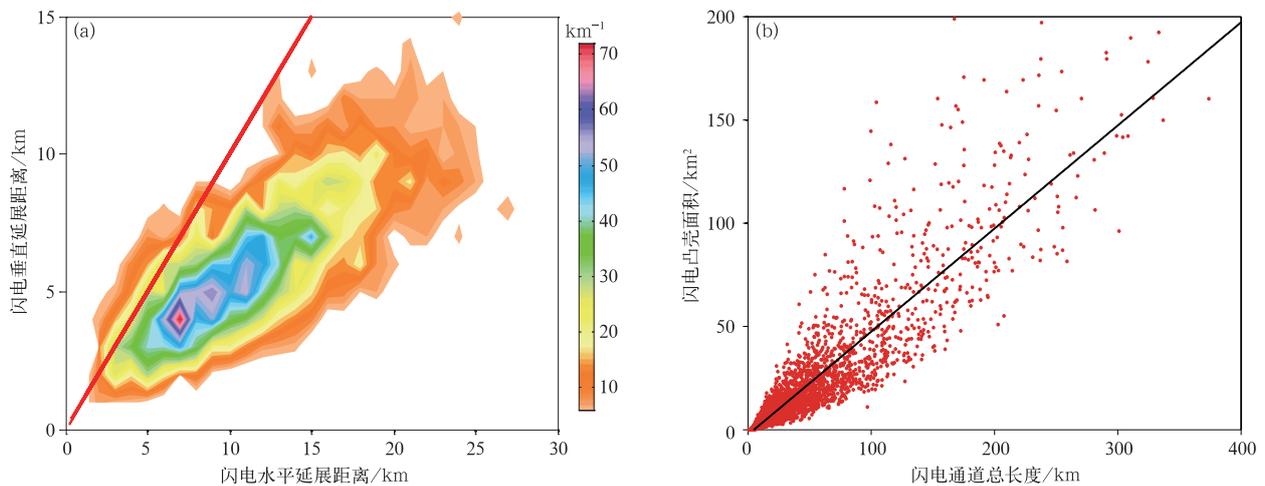


图9 闪电初始和尺度不同特征参量间关系

(a) 闪电水平延展距离与垂直延展距离散点密度分布(只显示每个格点闪电个数大于6的数据,格点大小为1 km×1 km), (b) 闪电通道总长度与闪电凸壳面积的散点分布

Fig. 9 Relationship between parameters of flash initiation and size

(a) flash horizontal extent and flash vertical extent (grids where flash number is larger than 6 are displayed, and the statistical grid size is 1 km×1 km), (b) distribution of total channel length and flash convex hull

5 闪电初始特征和尺度特征参量的联系

将1147次关于闪电初始阶段样本与其闪电尺

度的特征参量集合,分析闪电初始参量与闪电尺度的关系。将水平延展大于垂直延展的闪电定义为水平闪电(HF),样本量为918次;垂直延展大于水平延展的闪电定义为垂直闪电(VF),样本量为229

次。首先分析两种闪电对应起始高度的差异,结果如图 10a 所示,水平闪电的起始高度中心位于 8.5 km,明显低于垂直闪电中心位于 11 km 高度。从初始击穿的方向看,水平闪电中有 747 次闪电负先导向向上初始,171 次闪电负先导向下初始,负先导向下初始闪电占整个水平闪电样本的 19%;垂直闪电中有 200 次闪电负先导向向上初始,29 次闪电负先导向下初始,负先导向下初始闪电占整个垂直闪电样本

的 13%。

图 10b 统计了与垂直方向不同夹角的闪电对应的水平垂直延展距离。闪电垂直延展距离存在明显随初始垂直夹角增大而减小的趋势,即闪电初始方向越接近水平,对应闪电垂直延展越小,这意味着闪电初始段的传播对于闪电垂直延展的距离具有重要影响。而闪电水平延展随初始垂直夹角变化规律不明显。

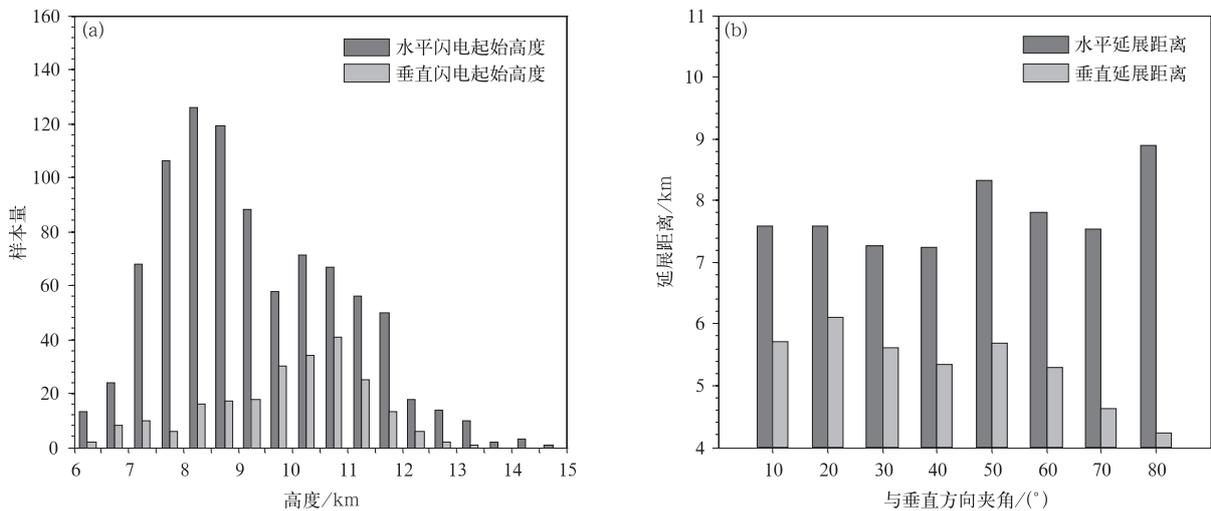


图 10 水平闪电和垂直闪电的分布特征

(a)水平和垂直闪电起始高度概率密度分布,(b)闪电初始段位移与垂直方向夹角与闪电延展距离关系

Fig. 10 Distribution of horizontal flash and vertical flash

(a)probability density distribution of initiation height of horizontal flash and vertical flash,

(b)relationship between initiation vertical angle and flash extent

6 结 论

本研究基于美国新墨西哥州 LMA 对 2004 年 10 月 5 日一次超级单体过程的三维闪电探测数据,提出并实现了闪电初始阶段特征参量自动提取方法,并对闪电初始阶段和闪电尺度特征参量的分布特征进行研究,主要结果如下:

1) 提出基于闪电辐射源数据判断负先导初始发展阶段开始和结束位置的方法,实现了闪电初始阶段负先导特征参量的批量、自动计算,这有利于研究的可重复性和结果的可对比性。

2) 给出闪电初始阶段特征参量分布规律以及相关参数统计。发现初始阶段的上行负先导持续时间中值(13.5 ms)大于下行先导持续时间中值

(7.5 ms);三维位移中值分别为 1.4 km 和 1.0 km,对应三维位移速度中值为 $9.2 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.2 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;上行负先导速度随时间递减,下行负先导速度随时间递增;先导以倾斜方向发展为主,初始阶段偏水平发展的闪电,垂直尺度更小。

3) 闪电凸壳面积和通道总长度分布呈现负幂函数变化,小值方向更为集中。闪电的水平延展距离中值为 6.1 km,垂直延展距离为 4.3 km,约 83% 的闪电其水平延展大于垂直延展。闪电的持续时间中值为 271.0 ms,但闪电持续时间与闪电凸壳面积的对应性不是非常明显。

4) 以水平延展为主的闪电(水平延展大于垂直延展)起始高度分布峰值位于 8.5 km,以垂直延展为主的闪电(垂直延展大于水平延展)起始高度分布峰值位于 11 km。闪电初始阶段位移方向越接近水

平,对应闪电垂直延展越小,说明闪电初始段的传播方向对于闪电垂直延展的距离具有影响或贡献。而闪电水平延展随初始垂直夹角变化规律不明显。

本文从雷暴过程的角度,分析闪电初始阶段和闪电尺度特征参量分布特点,这对于扩展对闪电活动基本特征的认识有意义。但闪电活动的初始阶段和尺度特征可能与雷暴类型有关系,本研究所分析的超级单体雷暴在动力和微物理特征上要强于一般雷暴,对于其他类型雷暴中闪电初始和尺度的特征还有待今后开展对比研究。

致谢:美国新墨西哥矿业技术学院 Langmuir 实验室为本研究提供了三维闪电定位数据,该观测数据是本文闪电初始和尺度特征研究的基础,感谢 Langmuir 实验室 Paul Krehbiel 教授和 Bill Rison 教授对 LMA 闪电定位数据的分享。

参考文献

- [1] 王艳,张义军,马明. 卫星观测的我国近海海域闪电分布特征. *应用气象学报*,2010,21(2):157-163.
- [2] 王婷波,郑栋,张义军,等. 基于大气层结和雷暴演变的闪电和降水关系. *应用气象学报*,2014,25(1):33-41.
- [3] 郑栋,孟青,吕伟涛,等. 北京及其周边地区夏季地闪活动时空特征分析. *应用气象学报*,2005,16(5):638-644.
- [4] 张阳,张义军,孟青,等. 北京地区正地闪时间分布及波形特征. *应用气象学报*,2010,21(4):442-449.
- [5] 郑栋,张义军,孟青,等. 北京地区雷暴过程闪电与地面降水的相关关系. *应用气象学报*,2010,21(3):287-297.
- [6] 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.
- [7] Karunarathne S,Marshall T C,Stolzenburg M,et al. Locating initial breakdown pulses using electric field change network. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 2013, 118(13):7129-7141.
- [8] Marshall T,Stolzenburg M,Karunarathne S,et al. Initial breakdown pulses in intracloud lightning flashes and their relation to terrestrial gamma ray flashes. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*,2013,118(19):10907-10925.
- [9] Stolzenburg M,Marshall T C,Karunarathne S,et al. Luminosity of initial breakdown in lightning. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*,2013,118(7):2918-2937.
- [10] Shao X M,Krehbiel P R. The spatial and temporal development of intracloud lightning. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*,1996,1012(21):26641-26668.
- [11] 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(10): 1187-1203.
- [12] Wu T,Yoshida S,Akiyama Y,et al. Preliminary breakdown of intracloud lightning: Initiation altitude, propagation speed, pulse train characteristics, and step length estimation. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*,2015,120(18):9071-9086.
- [13] Zheng D,MacGorman D R. Characteristics of flash initiations in a supercell cluster with tornadoes. *Atmospheric Research*, 2016,167:249-264.
- [14] Wu B,Zhang G,Wen J,et al. Correlation analysis between initial preliminary breakdown process,the characteristic of radiation pulse,and the charge structure on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 2016,121(20):12434-12460.
- [15] Bruning E C,MacGorman D R. Theory and observations of controls on lightning flash size spectra. *Journal of the Atmospheric Sciences*,2013,70(12):4012-4029.
- [16] Chronis T,Lang T,Koshak W,et al. Diurnal characteristics of lightning flashes detected over the Sao Paulo lightning mapping array. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 2015,120(23):11799-11808.
- [17] Koshak W,Peterson H,Biazar A,et al. The NASA Lightning Nitrogen Oxides Model (LNOM): Application to air quality modeling. *Atmospheric Research*, 2014,135:363-369.
- [18] Zhang R,Zhang G,Li Y,et al. Estimate of NOX production in the lightning channel based on three-dimensional lightning locating system. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(7): 1613-1625.
- [19] Calhoun K M,MacGorman D R,Ziegler C L,et al. Evolution of lightning activity and storm charge relative to dual-doppler analysis of a high-precipitation supercell storm. *Mon Wea Rev*,2013,141(7):2199-2223.
- [20] Thomas R J,Krehbiel P R,Rison W,et al. Accuracy of the Lightning Mapping Array. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*,2004,109(14):1149-1165.
- [21] Krehbiel P R,Thomas R J,Rison W,et al. GPS-based mapping system reveals lightning inside storms. *Eos Transactions American Geophysical Union*,2000,81(3):21-25.
- [22] MacGorman D R,Rust W D,Schuur T J,et al. TELEX—The Thunderstorm Electrification and Lightning Experiment. *Bull Amer Meteor Soc*,2008,89(7):997-1013.
- [23] Rison W,Thomas R J,Krehbiel P R,et al. A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in Central New Mexico. *Geophys Res Lett*, 1999, 26(23): 3573-3576.
- [24] Lund N R,MacGorman D R,Schuur T J,et al. Relationships between lightning location and polarimetric radar signatures in a small mesoscale convective system. *Mon Wea Rev*,2009, 137(12):4151-4170.
- [25] Coleman L M,Marshall T C,Stolzenburg M,et al. Effects of

- charge and electrostatic potential on lightning propagation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(9):1601-1612.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 张荣,张广庶,王彦辉,等. 青藏高原东北部地区闪电特征初步分析. *高原气象*, 2013, 32(3):673-681.
- [29] Lang T J, Pédeboy S, Rison W, et al. WMO world record lightning extremes: Longest reported flash distance and longest reported flash duration. *Bull Amer Meteor Soc*, 2016, DOI:10.1175/BAMS-D-16-0061.1.

Identification Method and Analysis on Lightning Flash Initiation Phase and Size

Zhang Zhixiao¹⁾²⁾ Zheng Dong¹⁾²⁾ Zhang Yijun¹⁾²⁾ Lu Gaopeng³⁾⁴⁾⁵⁾

¹⁾ (State Key Laboratory of Severe Weather,

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering,

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

³⁾ (Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation,

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

⁴⁾ (Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,

Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

⁵⁾ (State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences

and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

Based on the observation of lightning mapping array, the statistical distribution of characteristic parameters describing the lightning flash initiation and size in a supercell storm occurring in New Mexico, United States on 5 October 2004 is studied. A method automatically identifying the start and end of the negative leaders in initial stage (IS) of lightning is developed. And the flash convex hull, total channel length, horizontal and vertical extent are used to represent the scale characteristics. Distributions and characteristics of flash initiation and size in this storm are shown as follows.

Median values of the duration, three-dimensional displacement, vertical displacement and the average displacement velocity for the upward (downward) negative leaders during IS are 13.5 ms (7.5 ms), 1.4 km (1.0 km), 0.9 km (0.5 km), and $9.2 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.2 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), respectively. In addition, the average flash initiation velocity decreases with height from 6 km to 11 km. With time going on, the speed of upward negative leader in initial stage decreases before 24 ms (to ensure the samples is larger than 100), while that of the downward negative leader increases before 12 ms (to ensure the samples is larger than 50). Moreover, negative leaders are dominantly tilted in initial stage, considering that the median angles between the 3-D displacement direction and the vertical direction are 40° for upward leader and 54° for downward leader, respectively.

The probability density distribution of flash size described by flash convex hull and total channel

length can be well fitted by negative power function, also showing that the distribution and evolution of flash convex hull is consist with that of total channel length. The median of flash duration is 271.0 ms, and the mean of that is 329.1 ms. The flash duration time and size are not significantly correlated. The flash with long duration time is not necessarily large. Moreover, the median of flash horizontal extent is 6.1 km while the vertical extent is 4.3 km, and there are 83% of flashes whose horizontal extent is greater than vertical extent. Flashes with horizontal extent greater than vertical extent are mainly initiated at 8.5 km high, and those with vertical extent greater than horizontal extent are mainly initiated at 11 km high. Greater horizontal displacement of the leader during initial stage accompanies less vertical extent, which indicates that the leader displacement direction at initial stage has an important influence on flash vertical scale.

Key words: supercell; flash initiation; flash size