

张骁,张阳,张义军,等. NBE 和 IBP 始发的闪电初始特征. 应用气象学报,2018,29(3):364-373.

DOI: 10.11898/1001-7313.20180310

NBE 和 IBP 始发的闪电初始特征

张 骁¹⁾²⁾ 张 阳^{1)*} 张义军¹⁾ 郑 栋¹⁾ 吕伟涛¹⁾

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⁾(成都信息工程大学,成都 610103)

摘 要

基于闪电低频电场探测阵列(LFEDA)所获得的全闪三维定位数据,研究了 2015 年 8 月 15 日 14:30—16:10 广州一次雷暴过程中具有明显始发脉冲的闪电初始放电特征及放电规律。结果表明:212 例近距离云闪和地闪中,32 例闪电由窄偶极性放电事件(NBE)始发,占 15%;180 例闪电由初始击穿脉冲(定义初始击穿脉冲簇的首个脉冲为 FIBP)始发,占 85%。作为始发的窄偶极性放电事件(INBE),其相对孤立且具有较大的相对幅度,INBE 与后续闪电的第 1 个脉冲的时间间隔为 7 ms,幅度比为 3.5,远大于 FIBP 相对应的时间间隔 0.6 ms 和幅度比 0.8,INBE 后多跟随传统的 IBP 脉冲。多数正极性 INBE 与 FIBP 对应初始向上发展的闪电,而负极性对应初始向下发展的闪电。INBE 始发闪电前 15 ms 的平均发展速度随始发高度的增大而减小,快于 FIBP,这与 INBE 具有更快的速度相关。估计的 INBE 速度为 $4.7 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,FIBP 速度为 $1.5 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,两者速度差异也体现在脉冲上升时间方面,INBE 具有更快的上升沿。

关键词: NBE; IBP; 闪电始发

引 言

闪电的始发过程是一个重要的、基础的雷电物理过程^[1-3]。目前,闪电如何始发是雷电物理研究的热点问题,已经开展了许多相关研究^[4-5]。闪电初始击穿过程作为闪电始发放电过程的重要标志,在低频电场波形上通常表现为一系列宽度为微量量级的双极性脉冲或单极性脉冲。很多研究对初始击穿进行观测^[6-14],认为初始击穿脉冲簇的第 1 个脉冲是一次云闪或地闪放电开始的标志,发生在梯级先导之前,初始击穿脉冲极性与后续回击脉冲极性相同^[15]。Kitagawa^[6]及 Clarence 等^[7]发现初始击穿脉冲发生取决于雷暴类别或雷暴所处发展阶段,也会影响到初始击穿的探测效率。他们还发现无论是云闪还是地闪,都存在明显的初始击穿脉冲簇(IBP),云闪初始击穿脉冲簇表现为较孤立的形式,

持续时间几十毫秒,地闪初始击穿脉冲簇表现为较连续的形式,持续时间为几毫秒。Nag 等^[16]发现初始击穿出现概率与所在纬度有关。武斌等^[17]拟合了发生在不同距离上不同类型闪电初始击穿过程的波形结构。

近些年,窄偶极性脉冲事件(NBE)被发现会出现在一次闪电过程的开始位置。Nag 等^[18]观测到 157 例正极性 NBE,其中 73%孤立发生,24%出现在常规云地闪的起始、之后及过程中。Betz 等^[19]也得到了相似的结果。Wu 等^[20]对包括 638 例正极性 NBE 和 189 例负极性 NBE 在内的 827 例 NBE 进行分析,发现闪电第 1 个放电事件为 NBE 的占 10%。研究也发现 NBE 较一般闪电放电事件具有更高的放电高度^[21-23]。然而,也有研究结果认为,绝大多数云闪始发均开始于类似 NBE 的事件。2016 年 Rison 等^[24]通过对 3 例近距离 NBE 伴随的闪电观测研究发现,NBE 作为一种快的正击穿事件,导

2017-11-22 收到,2018-01-29 收到再改稿。

资助项目:国家自然科学基金项目(41775009,91537209),中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2015Z006)

* 通信作者,邮箱:zhangyang@cma.gov.cn

致了局域电场的增强,始发了这3次云闪放电,其进一步统计表明这种始发具有普遍性。

以上研究结果表明,IBP 和 NBE 均可引发云闪或地闪放电过程。针对两者是否为同样的事件, Silva 等^[25]构建了 NBE 和 IBP 的物理模型,模拟了 NBE 和 IBP 的电场波形,模拟结果显示两者在特征上没有明显区别。而本文将从 IBP 和 NBE 观测数据着手,研究两者在闪电始发中的作用以及两者之间的特征和过程的异同。

1 试验和数据

本文所用数据来自 2015 年中国气象科学研究

院雷电团队自主研发的闪电低频电场探测阵列(LFEDA)的观测结果。该 LFEDA 阵列架设在广东省广州市从化区,站点分布如图 1 所示,位于 $23^{\circ} \sim 24^{\circ} \text{N}$, $113^{\circ} \sim 114^{\circ} \text{E}$,基线范围为 $6 \sim 74 \text{ km}$ 。LFEDA 系统每个子站采用快天线探测电场变化波形^[26],闪电信号经滤波后获得 $160 \text{ Hz} \sim 600 \text{ kHz}$ 的宽带信号,传送到高性能计算机的数据采集卡,通过浮动电平的方式触发记录、无死时间分段存储 1 ms 闪电波形,预触发位置为 20% ;通过高精度 GPS 时钟标记精度 100 ns 的触发时间戳。多个子站数据经后处理方式在中心站基于到达时间差(TOA)方法进行定位,给出包括经度、纬度、高度、闪电放电类型识别等闪电定位结果。

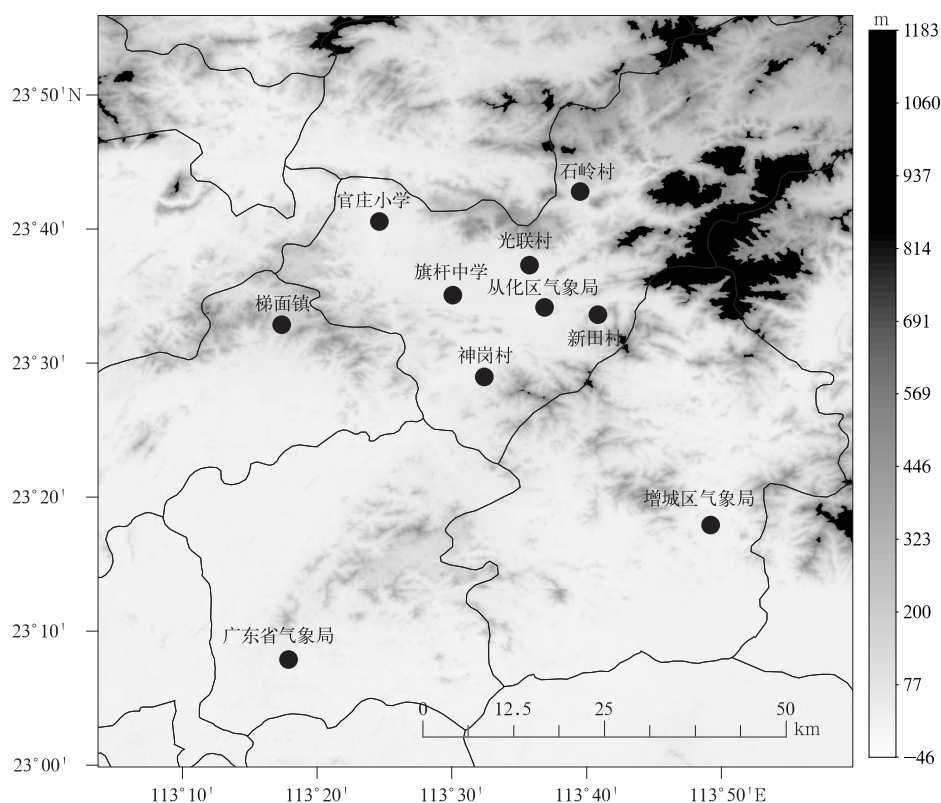


图 1 LFEDA 站网子站分布(阴影表示地形高度)

Fig. 1 Substation distribution of LFEDA network
(the shaded denotes the topography)

本研究选取 2015 年 8 月 15 日 14:30—16:10 (北京时,下同)广州一次经过 LFEDA 站网中心的强雷暴且具有明显始发脉冲放电过程进行分析。首先将所获得的脉冲定位结果归为闪电,将时间间隔小于 500 ms 、空间间隔小于 10 km 的放电事件认为是同一次闪电中的放电事件。基于每次闪电数据,

挑选 NBE 事件以及 IBP 事件。使用物理学定义 NBE 和 IBP 极性,即电场正向变化对应正电荷向下发展、对应负电荷向上发展。

NBE 事件具有 $10 \sim 20 \mu\text{s}$ 短的持续时间^[27],窄的双极性电场波形^[21],较高的放电高度^[21,23],远距离观测有明显的电离层反射脉冲对(TIPPs)^[28-30],

非对称的正向和负向幅度^[31]、宽频的信号导致的低频电场上的高信噪比^[27,32-34]。将信噪比大于10 dB、上升沿时间小于5 μs 、脉冲宽度小于15 μs 且脉冲负向与正向幅度比小于0.5的脉冲作为NBE事件,典型NBE电场波形如图2a所示。另外,根据以往

的认识,IBP脉冲多出现在闪电的最开始位置,多为双极性,并以脉冲簇的形式出现。根据上面的特征,挑选出180例IBP始发的闪电。典型IBP如图2b和图2c所示,本文所讨论的IBP始发脉冲为脉冲簇的首个脉冲(FIBP)。

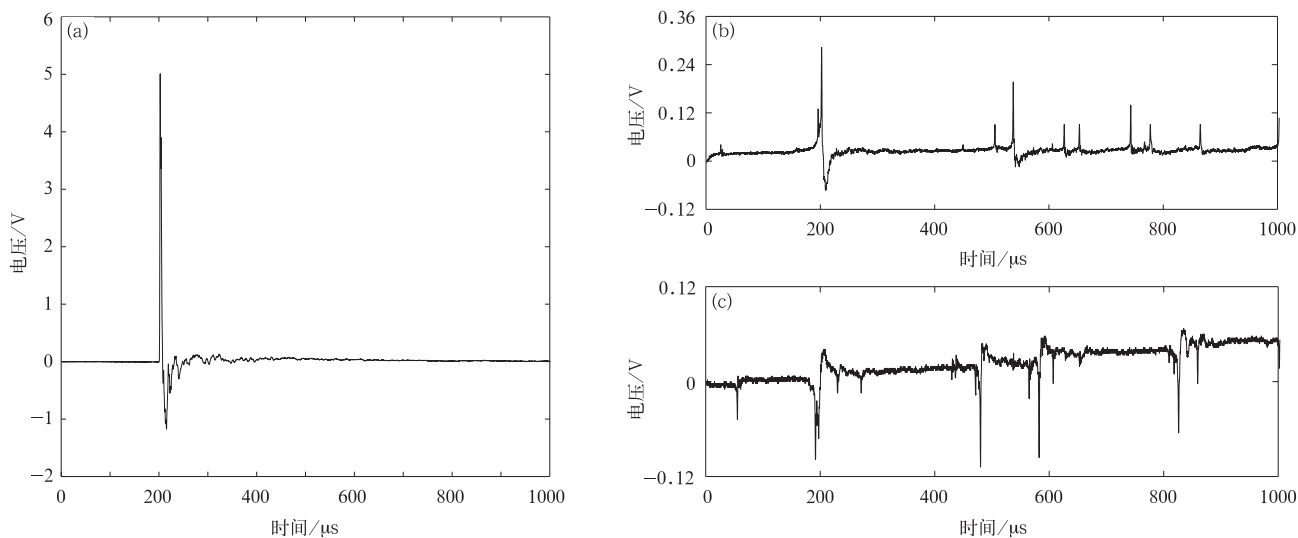


图2 典型闪电始发放电事件 (a)NBE,(b)云闪IBP,(c)地闪IBP

Fig. 2 Typical lightning initial discharge events

(a)NBE,(b)IBP waveform during intracloud lightning,

(c)IBP waveform during and cloud-to-ground lightning flash

2 结果分析

2.1 闪电始发类型统计

表1给出了闪电始发放电类型的统计结果。50 km以内有明显始发脉冲的云闪和地闪共212例,由NBE始发的闪电32例,由IBP始发的闪电180例。其中202次云闪放电过程中,IBP始发173例(约占14%),NBE始发29例(约占86%),10次

地闪放电过程中,NBE始发3例(占30%),IBP始发7例(占70%)。由INBE和FIBP的极性分布可知,云闪中正极性FIBP和INBE占绝大多数,比例分别为83%和72%;地闪中情况相反,正极性FIBP和INBE的比例分别为28%和33%。这是由FIBP和INBE发生位置决定的,云闪初始击穿常常发生在主负电荷区和上部正电荷区之间,而地闪初始击穿主要发生在主负电荷区和下部正电荷区。

表1 闪电始发放电事件类型

Table 1 Types of initial lightning discharge events

样本极性	云闪 INBE	云闪 FIBP	地闪 INBE	地闪 FIBP
正极性	21	144	1	2
负极性	8	29	2	5

对于NBE本身而言,根据不同的发生位置,可以分为始发NBE(INBE)、过程中NBE(NBE处于一次定位连续闪电过程非首个放电事件位置)和孤立NBE(NBE处于一次定位不连续闪电过程非首个放电事件位置)。统计的闪电中,共发现孤立

NBE 93例,始发闪电的INBE 32例,闪电过程中NBE 50例,INBE占总NBE比例为18%。

图3a~图3d均为2015年8月15日闪电初始10 ms放电过程。图3a中正极性NBE为此次闪电过程的首个放电事件,该事件距离中心测站(光联

村, 23. 62° N, 113. 60° E) 30. 0 km, 始发高度为 8. 9 km, 经 10 ms 高度上升至 12. 5 km, 向上平均发展速度为 $3. 6 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 3b 中负极性 NBE 为此次放电过程的首个放电事件, 该事件距离中心测站 38. 3 km, 始发高度为 7. 8 km, 经 4 ms 高度下降至 5. 2 km, 向下平均发展速度为 $6. 5 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 3c 中正极性 IBP 为此次放电过程的首个放

电事件, 该放电事件距离中心测站 24. 1 km, 始发高度为 8. 0 km, 经 10 ms 上升至 10. 9 km, 向上平均发展速度为 $2. 9 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 3d 中负极性 IBP 为此次放电过程的首个放电事件, 该放电事件距离中心测站 28. 6 km, 始发高度 7. 7 km, 经 4. 6 ms 下降至 5. 2 km, 向上平均发展速度为 $4. 3 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

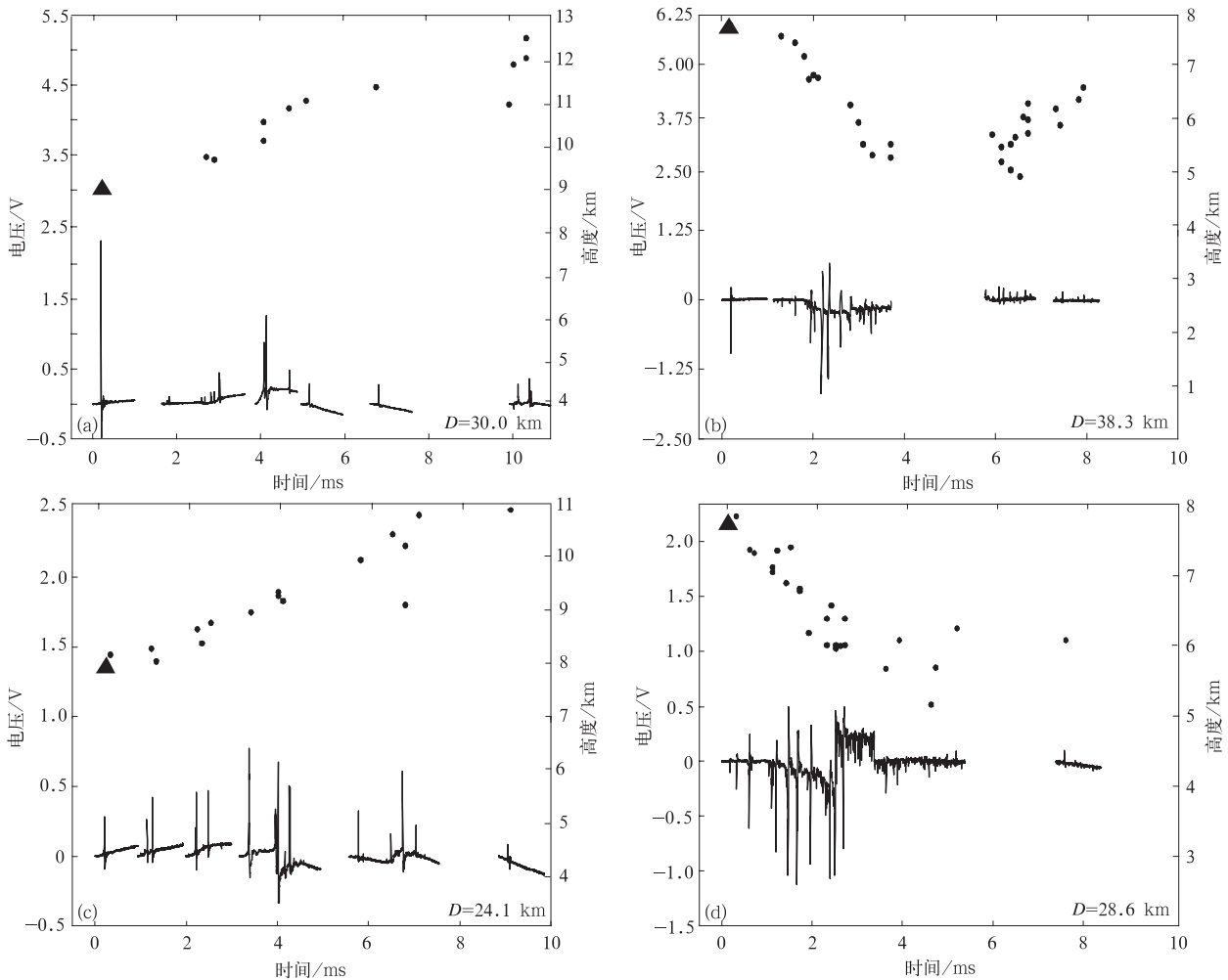


图 3 闪电始发过程个例(▲表示始发放电事件)

(a)正极性 NBE 始发过程,(b)负极性 NBE 始发过程,

(c)正极性 IBP 始发过程,(d)负极性 IBP 始发过程

Fig. 3 Lightning initial progress(▲ denotes initial discharge events)

(a)positive NBE initial progress,(b)negative NBE initial progress,

(c)positive IBP initial progress,(d)negative IBP initial progress

2. 2 始发脉冲与后续放电

分析 FIBP,INBE 脉冲和后续放电脉冲的相关性,结果表明:32 例 NBE 始发闪电中 INBE 脉冲后 15 ms 内存在放电脉冲的共 24 例(占 75%)。INBE 脉冲与其后的第 1 个明显可见的闪电放电脉冲的平

均时间间隔为 7. 0 ms,中值为 3. 9 ms。而 180 例 IBP 始发的闪电中 FIBP 脉冲后 15 ms 内均存在放电事件。FIBP 脉冲与其后第 1 个明显可见的闪电放电脉冲的平均时间间隔为 0. 6 ms,中值为 0. 2 ms。由此可见,INBE 在始发阶段较 FIBP 更孤

立,其与后续第 1 个放电事件间隔大于 FIBP。

在 NBE 始发的闪电中,相比于后续第 1 个脉冲,INBE 脉冲具有相对大的强度,INBE 脉冲与后续首个脉冲平均幅值比为 3.5。而 IBP 始发闪电中,相比于后续第 1 个脉冲,FIBP 幅值较小,FIBP 脉冲与后续首个脉冲平均幅值比为 0.8。同时,IBP 始发的闪电中,FIBP 始发脉冲多为单脉冲,但后续脉冲多为叠加脉冲,而 INBE 之后的放电波形均为典型的 IBP 脉冲簇。

2.3 闪电初始放电高度

图 4a 给出了 NBE 和 IBP 始发闪电的初始高度,并与闪电过程中 NBE 进行对比。INBE 脉冲、FIBP 脉冲、过程中 NBE 平均高度分别为 9.9 km, 8.1 km, 13 km;高度中值分别为 9.9 km, 8.2 km,

13 km。INBE 高度明显低于过程中 NBE 的高度。过程中 NBE 高度主要分布在 11~14 km,高于 11 km 的共 45 例(占 90%);而 INBE 初始高度主要集中在 7~11 km,低于 11 km 的共 29 例(占 90.6%)。INBE 高度明显低于过程中 NBE 的高度,Wu 等^[20]也得到相似结果,其统计的负极性 NBE、正极性 NBE 和 INBE 平均高度分别为 15.9 km, 13.4 km, 7.9 km。FIBP 始发闪电初始高度主要集中于 6~9 km,与 INBE 分布范围较一致,整体略低于 INBE。

图 4b 为 146 例正极性 FIBP 和 34 例负极性 FIBP 的高度分布。正、负极性 FIBP 始发高度主要集中于 6~9 km,平均初始高度分别为 8.1 km, 7.8 km,初始高度中值分别为 8.4 km, 7.8 km。正

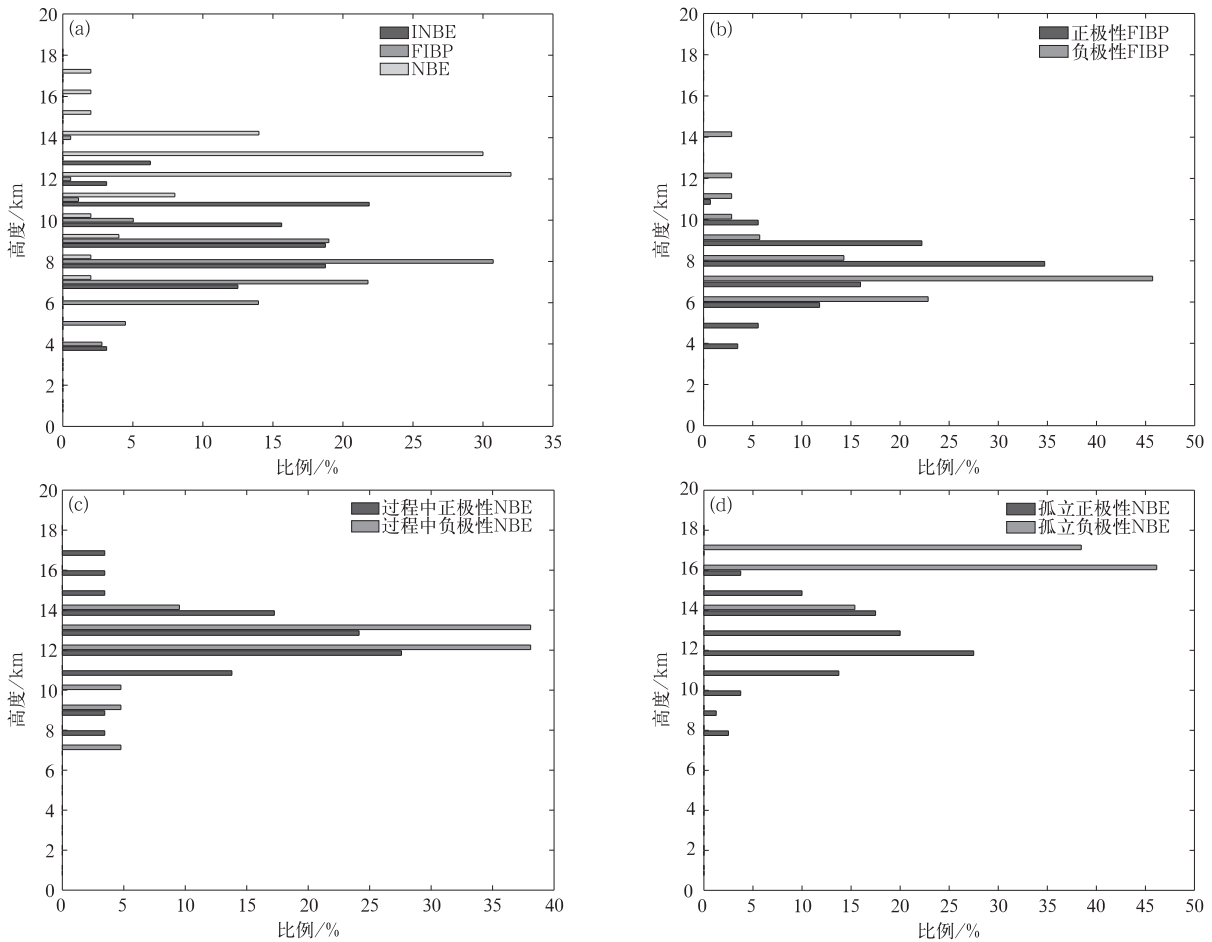


图 4 各类型闪电初始高度分布特征

(a)INBE,FIBP,过程中 NBE,(b)正极性 FIBP 和负极性 FIBP,
(c)过程中正极性 NBE 和过程中负极性 NBE,(d)孤立正极性 NBE 和孤立负极性 NBE

Fig. 4 Distribution characteristics of initial altitude for all-type lightning

(a)initial NBE,initial IBP,intra-NBE,(b)positive and negative initial IBP,

(c)positive and negative intra-NBE,(d)positive and negative isolated NBE

极性 FIBP 高度分布高值区为 8~9 km,而负极性 FIBP 高度分布高值区为 6~7 km。正极性 FIBP 初始高度整体略高于负极性 FIBP,两者初始高度差别并不显著。

图 4c 为 29 例过程中正极性 NBE 和 21 例过程中负极性 NBE 高度分布,两者放电高度分布并无明显差异,均集中于 11~14 km。

图 4d 为 93 例孤立正、负极性 NBE 放电高度分布情况。孤立的正、负极性 NBE 之间放电高度存在明显差别,负极性 NBE 放电高度主要集中于 16~17 km,孤立的正极性 NBE 放电高度主要集中于 11~15 km,孤立负极性 NBE 放电高度高于孤立正极性 NBE,且二者所在高度以 15 km 分界。这与 Wu 等^[23]提出的孤立负极性 NBE 发生高度在 16~19 km 一致,该种 NBE 可能发生在上部正电荷区和屏蔽层之间,与中高层大气放电关系密切。

2.4 闪电始发脉冲与始发阶段发展形式

NBE 和 IBP 始发闪电放电初始发展方向如表 2 所示,正极性 IBP 始发的云闪 143 例,其中向上发

展的占闪电的 96%,负极性 IBP 始发的云闪 30 例,其中向下发展的比例为 77%;正极性 NBE 始发的云闪 21 例,始发向上发展的占 95%,负极性 NBE 始发的云闪 8 例始发阶段均向下发展。正、负极性 NBE 始发闪电初始发展方向的差异性和 Wu 等^[20]的研究结果类似,他们发现 103 例正极性 NBE 始发闪电均向上发展。因 Wu 等^[35]利用大气电学符号定义 NBE,IBP 极性,故本文结论与之相反。发现负极性 NBE 在始发阶段多向下发展。同样,正极性 IBP 始发闪电发展方向多向上发展、负极性 IBP 多向下发展,考虑极性定义的不同,这与 Wu^[30]研究结论一致。可以认为,无论是正极性 NBE 还是正极性 IBP,大多数始发了开始向上的闪电,而对应的负极性 NBE 和 IBP 则大多数始发了开始向下发展的闪电。对于 IBP 和 NBE 始发的地闪,其规律和上面的云闪结果相似。考虑到闪电起始阶段具有很大的垂直发展阶段,可以认为 INBE 和 FIBP 反映出闪电始发方向的不同和始发位置密切相关。

表 2 闪电始发闪电事件发展方向统计

Table 2 Initial propagation direction of lightning discharge events

闪电类型	始发类型	个例数量	向上发展	向下发展
云闪	正极性 INBE	21	20	1
	负极性 INBE	8	0	8
	正极性 FIBP	143	137	6
	负极性 FIBP	30	7	23
地闪	正极性 INBE	1	1	0
	负极性 INBE	2	0	2
	正极性 FIBP	2	2	0
	负极性 FIBP	5	1	4

2.5 闪电初始放电速度

在 32 例 INBE 中选取始发阶段定位较连续的个例,计算其始发 15 ms 内平均传输速度。结果表明:NBE 始发闪电初始阶段平均发展速度为 $3.1 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中值为 $3.0 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,INBE 最低初始高度为 4.7 km,对应的最大平均发展速度为 $7 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最高初始高度为 13.7 km,对应最小平均发展速度为 $1.2 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。本文 NBE 始发闪电初始阶段平均速度与刘恒毅等^[36]及 Wu 等^[20]结果一致。刘恒毅等^[36]给出闪电始发后 15 ms 内的平均发展速度为 $10^4 \sim 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级。Wu 等^[20]统计 INBE 后向上平均传播速度为 $3.3 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中值为 $2.9 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。INBE 初始高度与

初始阶段平均速度的关系如图 5 所示,NBE 始发闪电初始阶段平均速度随始发高度增大而减小,这与已有研究结果一致^[37]。而始发平均速度 V 随着始发高度 H 的变化呈指数衰减,拟合关系是 $V = ae^{bH}$,其中, $a=14.3$, $b=-0.1$ 。在 IBP 始发的 180 例闪电条件中,选取始发阶段定位较连续的 61 例,计算其始发 15 ms 内的平均传输速度。结果表明:IBP 始发闪电初始阶段发展速度平均值为 $2.6 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中值为 $2.3 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。IBP 始发的闪电初始阶段平均速度略小于 NBE 始发闪电初始阶段平均速度。对于 NBE 始发闪电,去除第 1 个脉冲 INBE 计算始发闪电初始阶段平均速度为 $2.4 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,这与 IBP 始发闪电初始阶段发展速度

平均值相近,这也印证了前文 INBE 始发脉冲之后的放电波形均为典型 IBP 脉冲簇的结果。

上面的速度主要反映初始阶段的平均速度,为更好揭示始发闪电第 1 个放电事件(INBE, FIBP)的不同,分析更接近始发放电事件的速度。研究认为闪电低频放电脉冲对应闪电空间上的发展,假设始发放电事件(INBE 或 FIBP)与其后跟随的第 1

个脉冲之间距离变化对应两个脉冲放电事件的上升过程,从而得到一个能更好反映 INBE 或 FIBP 的速度。结果表明:INBE 脉冲平均速度为 $4.7 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,与 Rison 等^[24]提出的始发 INBE 是一种快的正击穿结果类似,而 FIBP 脉冲平均速度为 $1.5 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,这也符合传统认识。

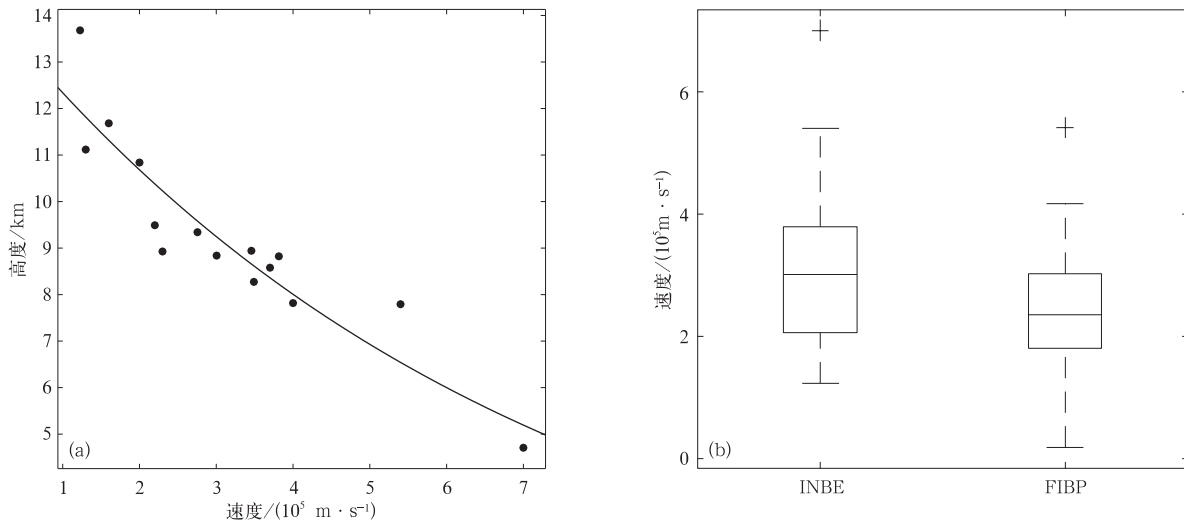


图 5 闪电初始放电速度

- (a)INBE 初始高度与 15 ms 始发平均速度的关系,
- (b)INBE 与 FIBP 始发闪电初始阶段速度分布对比

Fig. 5 Initial discharge speed of lightning

- (a)relationship between INBE altitude and speed during initial 15 ms stage,
- (b)comparison for initial velocity distribution of initial stage by INBE and FIBP

2.6 始发脉冲特征

统计 INBE 和 FIBP 的脉冲参量,包括上升时间、半峰宽、脉冲宽度。上升时间定义为上升沿 10%峰值点到上升沿 90%峰值点的时间,半峰宽定义为上升沿 50%峰值点到下降沿 50%峰值点的时

间,脉冲宽度定义为上升沿 10%峰值点到下降沿过零点的时间。

闪电初始阶段 180 例 FIBP 中 73 例为单脉冲波形,与同为单脉冲波形的 32 例 INBE 进行比较。统计结果如表 3 所示, FIBP 和 INBE 的半峰宽、脉

表 3 INBE 与 FIBP 脉冲参数对比

Table 3 Parameters comparing between INBE and FIBP

参数	特征量	INBE		FIBP	
		正极性	负极性	正极性	负极性
上升时间/ μs	平均值	1.3	1.2	3.9	4.0
	最大值	3.7	2.2	12.4	11.3
	标准差	0.8	0.5	2.9	3.0
半峰宽/ μs	平均值	3.0	1.6	2.3	2.9
	最大值	7.8	3.2	9.0	8.2
	标准差	2.0	0.8	1.8	1.8
脉冲宽度/ μs	平均值	4.6	4.0	6.5	6.3
	最大值	8.1	6.3	8.1	8.1
	标准差	1.8	1.4	1.1	1.3

冲宽度结果相近,这与 Silva 等^[25]提及的 NBE 的宽带波形在持续时间上与典型 FIBP 相似的结论一致;但与 FIBP 相比,INBE 有更快的上升时间。INBE 上升时间平均值为 $1.3 \mu\text{s}$,最大值为 $3.7 \mu\text{s}$;FIBP 上升时间平均值为 $3.9 \mu\text{s}$,最大值为 $12.4 \mu\text{s}$ 。FIBP 与 INBE 脉冲宽度差异主要集中在上升时间,这个差异一定程度上表明 FIBP 和 INBE 速度的差异,INBE 具有更大的速度,而定位结果也证实了这一点(INBE 脉冲平均速度为 $4.7 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,

FIBP 脉冲平均速度为 $1.5 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

为了了解 INBE 和其他 NBE 的区别,也统计了所有 3 种类型 NBE 的波形特征,如表 4 所示。INBE、过程中 NBE、孤立 NBE 平均脉冲宽度分别为 $4.4 \mu\text{s}$, $4.1 \mu\text{s}$, $4.1 \mu\text{s}$, Wu 等^[20]对不同 NBE 研究也得到类似结果,INBE、正极性 NBE 和负极性 NBE 平均脉冲宽度为 $5.8 \mu\text{s}$, $4.5 \mu\text{s}$, $4.6 \mu\text{s}$ 。三者其他参量上升沿时间和半峰宽也没有明显差异,INBE 和其他 NBE 在从脉冲宽度上很难区别。

表 4 不同 NBE 脉冲波形参数对比

Table 4 Pulse waveform parameters comparing among different NBE

统计参数	特征量	INBE		NBE		孤立 NBE	
		正极性	负极性	正极性	负极性	正极性	负极性
上升时间/ μs	平均值	1.3	1.2	1.4	1.3	1.4	1.1
	最大值	3.7	2.2	4.0	3.1	7.2	2.1
	标准差	0.8	0.5	1.0	0.6	1.2	0.4
半峰宽/ μs	平均值	3.0	1.6	2.0	1.8	2.0	2.1
	最大值	7.8	3.2	5.3	3.7	5.3	3.9
	标准差	2.0	0.8	1.2	0.8	1.1	1.0
脉冲宽度/ μs	平均值	4.6	4.0	4.1	4.2	4.2	3.9
	最大值	8.1	6.3	8.1	6.7	8.1	5.5
	标准差	1.8	1.4	1.6	1.1	1.4	1.0

3 结 论

基于对一次近距离雷暴过程中的具有明显始发脉冲的闪电放电事件分析,给出了 NBE 始发闪电放电事件和 IBP 始发闪电放电事件的特征,讨论两者差异,结果表明:

1) NBE 和 IBP 均能够始发闪电放电。其中 NBE 始发的云闪比例约为 14%,地闪比例约为 30%;IBP 始发的云闪比例约为 86%,地闪比例约为 70%。INBE 作为闪电始发放电事件,相比于 FIBP,具有相对的孤立性,且具有相对较大的幅度。INBE 和后续第 1 个脉冲间的时间间隔为 6.9 ms ,幅度比例 3.5;FIBP 与后续第 1 个脉冲间的时间间隔 0.4 ms ,幅度比例 0.8。INBE 后常跟随传统的 IBP 脉冲。

2) 云闪中正极性 IBP,NBE 多始发向上发展的闪电,负极性 IBP,NBE 多引起开始向下发展的闪电。INBE 作为闪电始发事件,其平均高度为 9.9 km ,而孤立 NBE 的放电平均高度为 13.6 km ,明显大于 INBE。IBP 作为始发事件的平均高度为 8.1 km ,与作为始发的 INBE 无明显差别。

3) NBE 作为始发事件的闪电始发过程平均速度随初始高度的增大而减小,且平均速度相较于 IBP 作为始发事件的脉冲平均速度略快。这与 INBE 具有更快的速度相关。本文估计的始发 NBE 脉冲的速度为 $4.7 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,始发 IBP 脉冲速度为 $1.5 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

4) INBE、过程中 NBE、孤立 NBE 的上升沿时间、半峰宽和脉冲宽度没有明显差异,INBE 和其他 NBE 在从脉冲宽度上很难区别。而 INBE 始发脉冲的上升沿时间明显小于始发 IBP 脉冲,这也与两者之间速度的明显差异吻合。

参 考 文 献

- [1] 钱勇,张阳,张义军,等.人工触发闪电先驱电流脉冲波形特征及模拟.应用气象学报,2016,27(6):716-724.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 张义军,杨少杰,吕伟涛,等.2006—2011年广州人工触发闪电观测试验和应用.应用气象学报,2012,23(5):513-522.
- [5] 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.
- [6] Kitagawa N. On the Electric Field-change due to the leader

- processes and some of their discharge mechanism. *Papers in Meteorology & Geophysics*, 1957, 7(4): 400-414.
- [7] Clarence N D, Malan D J. Preliminary discharge processes in lightning flashes to ground. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1957, 83(356): 161-172.
- [8] Kitagawa N, Kobayashi M. Distribution of negative charge in the cloud taking part in a flash to ground. *Pap Meteor Geophys*, 1958, 9(2): 99-105.
- [9] Kitagawa N, Brook M. A comparison of intracloud and cloud-to-ground lightning discharges. *J Geophys Res*, 1960, 65(4): 1189-1201.
- [10] Krider E P, Radda G J. Radiation field wave forms produced by lightning stepped leaders. *J Geophys Res*, 1975, 80(18): 2653-2657.
- [11] Beasley W, Uman M A, Rustan P L. Electric fields preceding cloud-to-ground lightning flashes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1982, 87(C7): 4883-4902.
- [12] Zhang Y, Zhang Y J, Lu W T, et al. Analysis and comparison of initial breakdown pulses for positive cloud-to-ground flashes observed in Beijing and Guangzhou. *Atmos Res*, 2013, 129-130(Suppl): 34-41.
- [13] Zhang Y, Zhang Y, Zheng D, et al. Preliminary breakdown, following lightning discharge processes and lower positive charge region. *Atmos Res*, 2015, 161-162: 52-56.
- [14] Zhang Y, Krehbiel P R, Zhang Y, et al. Observations of the initial stage of a rocket-and-wire-triggered lightning discharge. *Geophys Res Lett*, 2017, 44(9): 4332-4340.
- [15] Rakov V A, Uman M A. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [16] Nag A, Rakov V A. Some inferences on the role of lower positive charge region in facilitating different types of lightning. *Geophys Res Lett*, 2009, 36(5): 126-127.
- [17] 武斌, 张广庶, 文军, 等. 闪电初始预击穿过程辐射脉冲特征及电流模型. *应用气象学报*, 2017, 28(5): 555-567.
- [18] Nag A, Rakov V A, Tsalikis D, et al. On phenomenology of compact intracloud lightning discharges. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D14): 1307-1314.
- [19] Betz R D, Marshall T C, Stolzenburg M, et al. Detection of in-cloud lightning with VLF/LF and VHF networks for studies of the initial discharge phase. *Geophys Res Lett*, 2008, 35(23): 186-203.
- [20] Wu T, Yoshida S, Ushio T, et al. Lightning-initiator type of narrow bipolar events and their subsequent pulse trains. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(12): 7425-7438.
- [21] Smith D A, Shao X M, Holden D N, et al. A distinct class of isolated intracloud lightning discharges and their associated radio emissions. *J Geophys Res Atmos*, 1999, 104(D4): 4189-4212.
- [22] Smith D A, Heavner M J, Jacobson A R, et al. A method for determining intracloud lightning and ionospheric heights from VLF/LF electric field records. *Radio Science*, 2004, 39(1): 1-11.
- [23] Wu T, Dong W, Zhang Y, et al. Discharge height of lightning narrow bipolar events. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D5): 214-221.
- [24] Rison W, Krehbiel P R, Stock M G, et al. Observations of narrow bipolar events reveal how lightning is initiated in thunderstorms. *Nature Communications*, 2016, 7: 10721.
- [25] Silva C L, Pasko V P. Physical mechanism of initial breakdown pulses and narrow bipolar events in lightning discharges. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(10): 4989-5009.
- [26] 张阳, 张义军, 吕伟涛. 闪电电场变化信号测量系统及方法. CN ZL 201210143572. 6. 2014.
- [27] Le V, David M. Sources of the strongest RF radiation from lightning. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1979, 85(C7): 4091-4095.
- [28] Holden D N, Munson C P, Devenport J C. Satellite observations of transionospheric pulse pairs. *Geophys Res Lett*, 2013, 22(8): 889-892.
- [29] Massey R S, Holden D N, Shao X M. Phenomenology of transionospheric pulse pairs: Further observations. *Radio Science*, 2016, 33(6): 1755-1761.
- [30] Wu H. Origin of trans-ionospheric pulse pairs. *Geophys Res Lett*, 2017, 44(5): 2597-2603.
- [31] 刘恒毅, 董万胜, 王涛, 等. 闪电电场变化波形时域特征分析及放电类型识别. *气象*, 2009, 35(3): 49-59.
- [32] Jacobson A R. How do the strongest radio pulses from thunderstorms relate to lightning flashes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D24): 4778.
- [33] Willett J C, Bailey J C, Krider E P. A class of unusual lightning electric field waveforms with very strong high-frequency radiation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1989, 94(D13): 16255-16267.
- [34] 吴亭, 董万胜, 刘恒毅. 双极性窄脉冲电场波形特征. *高原气象*, 2011, 30(3): 823-830.
- [35] 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. *J Geophys Res*, 2016, 121(20): 12434-12459.
- [36] 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.
- [37] 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.

Initial Stage of Lightning Discharges Initiated by NBE and IBP

Zhang Xiao¹⁾²⁾ Zhang Yang¹⁾ Zhang Yijun¹⁾ Zheng Dong¹⁾ Lü Weitao¹⁾

¹⁾ (State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610103)

Abstract

Lightning initial stage is an important and fundamental physical process. How lightning initiates is a hot topics in the research of lightning physics. Initial breakdown is observed by many researchers, and the first pulse of IBP is regarded as the starting marker of intracloud lightning or cloud-to-ground lightning. Lightning discharge characteristics and laws during initial stage in a thunderstorm progress are researched based on Low-frequency E-field Detection Array (LFEDA). In 212 intracloud lightnings and cloud-to-ground lightnings of short range, 32 lightnings are initiated by NBE, accounting for 15%, and 180 lightnings are initiated by IBP, accounting for 85%. As an initial NBE (INBE), it is more isolated and larger than the first pulse of initial IBP (FIBP). The average time interval from INBE to subsequent first pulse is 7 ms, with a mid-value of 3.9 ms. The amplitude ratio between INBE and the subsequent pulse is 3.5. The above values are larger than those of FIBP with the corresponding values of 0.6 ms, 0.2 ms and 0.8. Most of the positive INBE and FIBP corresponds to an upward discharge in the initial stage while negative correspond to a downward one. The average height of INBE is 9.9 km, which is less than isolated NBE of 13.6 km. There is also a sensible difference in discharge height between isolated positive NBE and the negative one. The isolated negative NBE is much higher than the positive one. It may occur between upper positive charge region and shielding layer, which is related to the middle and upper atmosphere discharge. The average height of FIBP is 8.1 km. There are no obvious differences in discharge height between INBE and FIBP. The average speed during the first 15 ms of the lightning initiated by NBE is $3.1 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, with a mid-value of $3.0 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, which decreases with the initial altitude. The maximum and minimum average speed is $7 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and $1.2 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. To better reveal the difference in INBE and FIBP, an estimated velocity is calculated based on the hypothesis of low-frequency pulse corresponding to a channel extending. The estimated speed of INBE is $4.7 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, which is faster than FIBP with a velocity of $1.5 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The shorter rising time for INBE also indicates a faster velocity. There are no apparent differences in rising time, half-peak width and pulse width for INBE, NBE in process and isolated NBE. It is difficult to distinguish INBE from other NBE by pulse property.

Key words: NBE; IBP; lightning initiation