

吴亭,董万胜,李良福等. 基于电离层反射的袖珍云闪(CID)三维定位研究. 地球物理学报, 2012, 55(4): 1095-1103, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.004.

Wu T, Dong W S, Li L F, et al. 3D location of compact intracloud discharge based on its ionospheric reflection pair. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(4): 1095-1103, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.004.

## 基于电离层反射的袖珍云闪(CID)三维定位研究

吴 亭<sup>1</sup>, 董万胜<sup>1</sup>, 李良福<sup>2</sup>, 覃彬全<sup>3</sup>

1 中国气象科学研究院雷电物理与防护工程实验室, 北京 100081

2 重庆市气象局, 重庆 401147

3 重庆市防雷中心, 重庆 401147

**摘 要** 袖珍云闪是一类区别于常规闪电放电过程的特殊放电现象, 能够同时产生极强的高频和低频辐射信号, 其低频辐射信号在电离层与地面之间反射后能够在电场变化波形上形成电离层反射脉冲对. 电离层反射信号与原信号的时间差包含着放电三维位置和电离层高度的信息, 而借助于多站闪电探测网络的同步观测就能够反演这些信息. 基于这一规律, 本文发展了一种对袖珍云闪实现三维定位的新方法. 这种方法不仅能够对大范围内的袖珍云闪实现准确的三维定位, 同时还能够反演电离层的高度, 是一种潜在的研究电离层相关性质的有效手段. 通过将定位结果与雷达回波比较, 证明这种方法具有较高的精度. 利用这种方法, 计算了 5489 例正极性袖珍云闪和 1400 例负极性袖珍云闪的放电高度, 发现正极性袖珍云闪主要集中在 7~14 km, 而负极性袖珍云闪达到了 15~18 km. 负极性袖珍云闪的放电高度总体上与对流层顶高度相当, 其数量相比于正极性袖珍云闪明显偏少, 因此很可能产生于较为罕见的极旺盛的雷暴过程中.

**关键词** 袖珍云闪, 双极性窄脉冲, 电离层, 云内放电, 三维定位

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.004

中图分类号 P427

收稿日期 2010-12-27, 2012-03-21 收修定稿

### 3D location of compact intracloud discharge based on its ionospheric reflection pair

WU Ting<sup>1</sup>, DONG Wan-Sheng<sup>1</sup>, LI Liang-Fu<sup>2</sup>, QIN Bin-Quan<sup>3</sup>

1 Laboratory of Lightning Physics and Protection, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2 Chongqing Meteorological Bureau, Chongqing 401147, China

3 Chongqing Lightning Protection Center, Chongqing 401147, China

**Abstract** Compact intracloud discharge (CID) is a special type of lightning discharge event that is different from regular lightning discharge processes. CIDs can produce powerful radiation on both HF and LF bands. The LF radiation signals can produce ionospheric reflection pairs on electric field change waveforms by propagating between the ionosphere and the ground. The time differences between reflection signals and the direct signal are determined by the 3D location of the CID and the height of the ionosphere, so these values can be retrieved by simultaneous observations of lightning detection network. Based on this relationship, a new method for determining 3D locations of CIDs is developed. This method can not only accurately determine 3D locations of CIDs but also calculate the virtual height of the ionosphere, which is potentially an effective way to study the characteristics of the ionosphere. By comparing locations of CIDs with radar echoes, this method proves to have high accuracy. Discharge heights of thousands of both

positive and negative polarity CIDs are computed, and it is found that positive CIDs mostly occur at the height of 7~14 km, while negative CIDs are much higher, mostly in the range of 15~18 km. Discharge heights of negative CIDs are generally comparable to the height of the tropopause, and they are much fewer than positive CIDs, which indicate that negative CIDs are probably produced in extremely vigorous, though relatively rare, thunderstorm processes.

**Keywords** Compact intracloud discharge, Narrow bipolar event, Ionosphere, Intracloud discharge, 3D location

## 1 引言

袖珍云闪是一类较为特殊的云内放电过程,由于其放电通道的空间尺度一般仅为几百米<sup>[1-2]</sup>,相比于常规的放电过程明显偏小<sup>[3-4]</sup>,故将其称为“袖珍云闪”(Compact Intracloud Discharge)<sup>[1,5]</sup>.根据其辐射场的波形特征,它有时也被称为“双极性窄脉冲”(Narrow Bipolar Pulses)<sup>[6-7]</sup>.相比于各种熟知的云闪和地闪过程<sup>[8-9]</sup>,袖珍云闪在最近几年才开始被人们广泛关注,对其最早的观测是在三十年前,当时 Le Vine 观测到了一类产生最强 HF/VHF 辐射的放电事件<sup>[10]</sup>,但当时他认为这仅仅是一种较为特殊的云闪 K 过程.一直到 1989 年, Willett 等<sup>[11]</sup>才意识到这类放电事件的特殊性,将其与常规的放电过程区分开来.1999 年, Smith 等<sup>[1]</sup>首次对袖珍云闪进行了较为系统的研究,发现袖珍云闪产生宽度极小的辐射场脉冲,一般仅为 10  $\mu\text{s}$  左右,而其产生的电场变化峰值却与地闪回击相当,同时,袖珍云闪的一个显著特征是其通常孤立地发生, Smith 等<sup>[1]</sup>猜测袖珍云闪本身就可以看作是一个完整的放电过程.另外, Smith 等<sup>[1]</sup>首次利用电场变化观测研究了袖珍云闪产生的电离层反射脉冲对,并利用其特征估算了袖珍云闪的放电高度.袖珍云闪产生的高频辐射能够穿过电离层被卫星探测到<sup>[12]</sup>,而近些年大量的研究证明袖珍云闪与对流系统之间存在一定的联系<sup>[7,13-14]</sup>,因此其有望成为从太空监测对流系统的一种有效手段.国内对袖珍云闪的研究还很缺乏,祝宝友等<sup>[6]</sup>根据在上海地区观测到的 78 例袖珍云闪计算了脉冲宽度、幅度、放电高度、放电电流等基本参数,吴亭等<sup>[15]</sup>利用在广州从化地区的多站探测网络观测到了上万例袖珍云闪,并对比分析了正、负极性袖珍云闪的电场脉冲波形的特征,吴亭等<sup>[16]</sup>进一步对比了正、负极性袖珍云闪多方面的特征,并证明负极性袖珍云闪具有更为特殊的性质.

对于袖珍云闪一个颇具争议的问题是其发生的

高度,由于这方面的研究大多开展于美国中部和南部,对其他地区袖珍云闪放电高度的观测和计算还很少,因此还存在很多的疑问. Smith 等<sup>[17]</sup>计算了数万例袖珍云闪的放电高度,发现正极性袖珍云闪主要发生在 7~15 km,而负极性袖珍云闪主要发生在 15~20 km,少数负极性袖珍云闪甚至高达 30 km, Nag 等<sup>[18]</sup>也计算得到多例袖珍云闪的放电高度在 20 km 以上.由于通常情况下赤道附近的对流层顶高度在 16 km 左右,高纬地区对流层顶更低,因此对流系统很难发展到 20 km 以上的高度,那么这个高度上的袖珍云闪是如何产生的就很难解释. Jacobson 等<sup>[13]</sup>认为有部分结果可能是因为计算误差造成的,但仍然有一部分袖珍云闪可能发生于对流层顶之上,这些袖珍云闪可能与高空放电<sup>[19-20]</sup>有关,也可能是在对流云顶暂时地冲破对流层顶时产生的.为了进一步研究这个问题,我们利用多站闪电探测网络在重庆地区对正、负极性袖珍云闪进行了大量观测,并且发展了一种利用其产生的电离层反射脉冲对实现三维定位的方法,这种方法能够大大提高对袖珍云闪的定位精度,同时也可以利用此方法来反演电离层高度.以此定位结果为基础,我们对比分析了正、负极性袖珍云闪放电高度的特征.

对袖珍云闪的判定通常基于其电场变化波形的脉宽及信噪比两个条件<sup>[16,21]</sup>,但由于本文中讨论的袖珍云闪波形均带有反射脉冲对,其信噪比会明显偏小,因此本研究中首先自动识别脉宽小于 10  $\mu\text{s}$  的波形,再从中手动挑选带有反射脉冲对的袖珍云闪.

## 2 观测数据

2010 年夏季,包含 9 个子站的 VLF/LF 闪电探测系统在重庆地区建成并投入运行,各子站的分布如图 1 所示.各子站的传感器运行在 200 Hz~500 kHz 频段,能够探测各种闪电放电过程产生的瞬态电场变化,探测到的电场变化信号经过数据采集器以 2 Msps 的采样速率数字化后存入计算机.为了避免

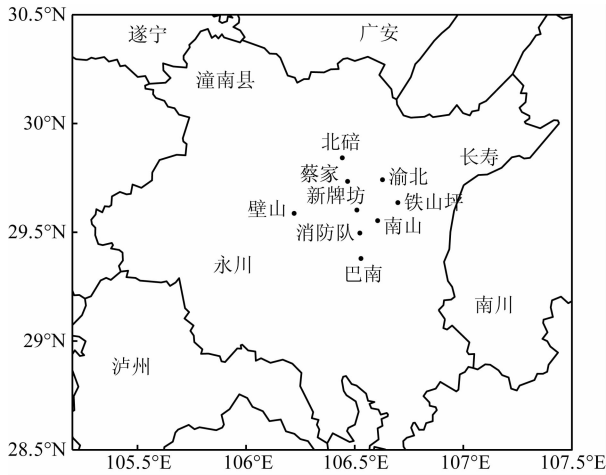


图 1 重庆 VLF/LF 多站闪电定位系统  
各子站分布(黑点代表各子站)

Fig. 1 Distribution of observation stations of Chongqing VLF/LF lightning location network (black point represents each station)

背景噪声的干扰,采用基于软件的浮动触发算法,实现随背景干扰信号浮动的双极性触发功能,同时,借助于从采集卡至计算机内存的连续数据传输的能力,该系统能够捕获每一个触发信号而没有任何死时间.记录的脉冲波形时间长度可调,本次实验中均设为 1 ms(考虑到计算效率的问题,实际每段数据记录 2048 个点,即 1.024 ms).各站记录到的触发信号由高精度 GPS 时钟提供一个时间戳,并利用到达时间差法计算辐射源的三维位置.同时,通过波形识别,系统可自动识别云闪、地闪及袖珍云闪<sup>[22]</sup>.

整个探测网络覆盖半径约 30 km 的区域,而实际

观测表明其对袖珍云闪的有效探测距离达到 300 km,对于一些极强的袖珍云闪,其探测距离可达 400 km 以上.本次实验从 2010 年 6 月 27 日起至 8 月 23 日,共探测到 36442 例正极性袖珍云闪及 7893 例负极性袖珍云闪.本文中电场极性采用“物理学定义”,即头顶负电荷的减少产生负向的电场变化.

### 3 电离层反射的基本特征

袖珍云闪产生的低频辐射在电离层 D 层<sup>[23]</sup>和地面之间会部分地发生反射,虽然在传输和反射过程中会有一部分能量的损耗,但可以将其简单地理解为镜面反射,如图 2 所示.图 3 为两例在不同距离探测到的负极性袖珍云闪的脉冲波形及其电离层反射脉冲对,袖珍云闪产生的低频辐射直接被测站记录到形成脉冲 0,其经过一次电离层反射再被记录到则形成脉冲 1a,先经过一次地面反射再经过电离

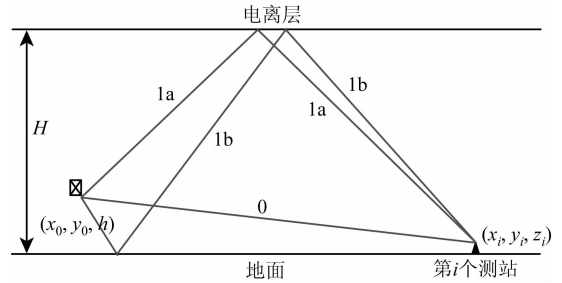


图 2 袖珍云闪脉冲信号的电离层反射示意图  
Fig. 2 Illustration of ionospheric reflection of radiation signals of CIDs

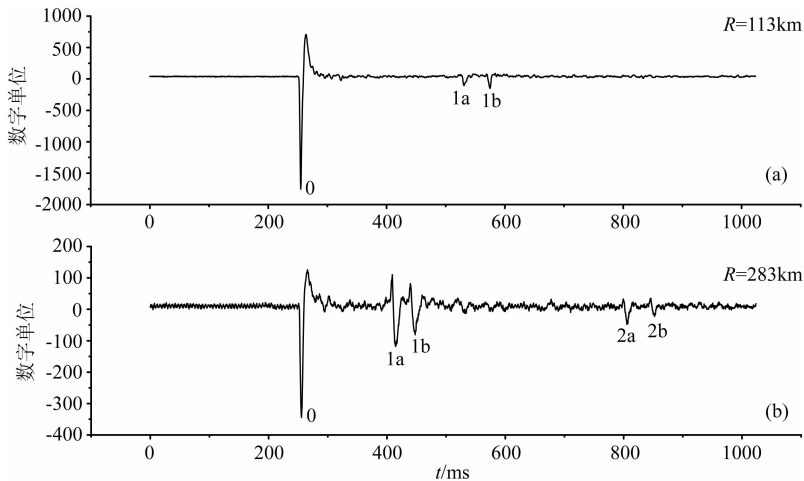


图 3 两例负极性袖珍云闪的脉冲波形

可以清楚地看到电离层反射脉冲对, R 值代表放电位置与测站的水平距离.

Fig. 3 Electric field waveforms of two negative CIDs

Ionospheric reflection pairs are obvious. R represents the distance between the CID and the observation station.

层反射而被记录到则形成脉冲 1b, 脉冲 1a 和 1b 形成一组电离层反射脉冲对. 图 3b 中出现了两组电离层反射脉冲对, 这是因为当距离较大时, 辐射信号在电离层与地面之间经过了二轮反射而被记录到.

比较图 3 中两例袖珍云闪产生的电离层反射脉冲对的特征, 首先较为明显的差异在于距离较远处的袖珍云闪(图 3b)产生相对更大的反射脉冲. 令  $A_0$  为袖珍云闪产生的直达脉冲的幅度,  $A_1$  为反射脉冲 1a、1b 的平均幅度, 令两者比值为

$$r = \frac{A_0}{A_1}, \quad (1)$$

则从图 3 中看,  $r$  值有随距离变大而减小的趋势, 为了验证这一点, 我们对观测到的每一例伴有电离层反射脉冲对的袖珍云闪计算其  $r$  值, 结果如图 4 所示. 由图可见, 随着距离变大,  $r$  值整体上呈现减小的趋势. 这是因为当距离变大时, 电离层反射时的入射角变大, 反射率也随之变大, 这样反射脉冲的幅度  $A_1$  也相对地变大, 致使  $r$  值随距离的增大而减小, 直到距离足够大时, 袖珍云闪产生的脉冲本身(脉冲 0)无法被探测到. 另外注意到图 4 中只有极少的点出现在距离小于 65 km 的区域, 这是因为当距离较小时, 电离层反射时的入射角也较小, 这种情况下大部分辐射能量都被电离层吸收, 因而无法产生明显的电离层反射信号.  $r$  值的变化特点实际上就表征了一个测站能够探测到伴有电离层反射脉冲对的袖

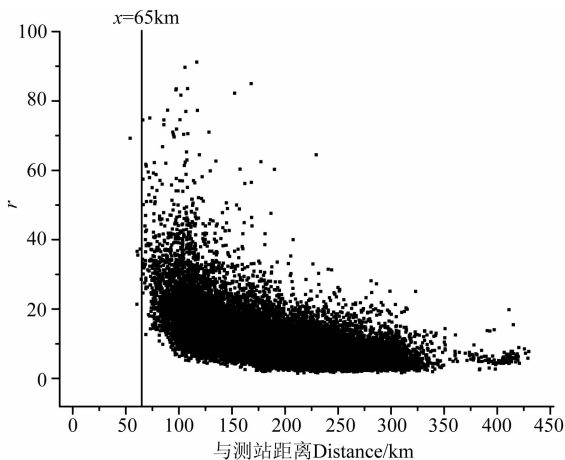


图 4 探测到的每一例伴有电离层反射脉冲对的袖珍云闪的  $r$  值及其与测站的距离  
每例袖珍云闪一般由多个测站同时观测到, 图中每个点代表一个测站的观测,  $r$  值定义见(1)式.

Fig. 4 Scatterplot of the value  $r$  and the distance between the CID and the observation station for each CID

Every CID is observed by multiple stations, so each point represents the observation of one station. The definition of  $r$  is in Eq. (1).

珍云闪的距离范围, 由图 4 可见, 本实验中此距离范围大约为 65~350 km, 少数极强的袖珍云闪在距离 400 km 左右处被探测到.

另外从图 3 中可以观察到的一个特征是脉冲 0、1a、1b 之间的时间差变化的关系, 可以看到脉冲 0 和 1a 之间的时间差明显在图 3b 中更小, 而脉冲 1a 和 1b 之间的时间差在图 3b 中也要稍小. 这些关系也可以简单地从图 2 中三条传播路径的几何关系定性地看出来. 事实上, 根据图 2 中的关系, 脉冲 0、1a、1b 三者之间的时间差决定于袖珍云闪的高度、与测站的距离以及电离层的高度, 而通过多个测站对袖珍云闪的同步观测, 就可以利用三个脉冲之间的时间差的关系反演袖珍云闪的三维位置以及电离层高度. 基于这一规律, 下文具体分析了脉冲 0、1a、1b 之间的时间差与袖珍云闪三维位置及电离层高度之间的关系并进行了计算.

## 4 袖珍云闪三维位置及电离层高度的计算

### 4.1 计算方法

Smith 等<sup>[1]</sup>曾提出一种利用电离层反射的性质计算袖珍云闪放电高度的方法, 利用这种方法, 在已知袖珍云闪的放电高度、水平距离和电离层高度三个量中的任一个量时, 即可求出其余两个量, 他们进而在已知袖珍云闪的水平距离的条件下计算了放电高度和电离层高度. 祝宝友等<sup>[6]</sup>利用类似的方法在假定电离层高度的条件下计算了袖珍云闪的放电高度和水平距离. 但这些计算仅能给出两个未知量, 无法确定袖珍云闪的三维位置, 而借助于多站同步观测, 该方法可以发展为能够同时计算袖珍云闪的三维位置及电离层高度四个量, 不仅可以有效定位袖珍云闪, 同时可以反演电离层高度.

参照图 2, 令  $t_{ia}$  为第  $i$  号测站接收到的反射脉冲 1a 与直达脉冲 0 之间的时间差,  $t_{ib}$  为脉冲 1b 与 0 之间的时间差, 则根据图 2 中的几何关系, 在忽略地球曲率的条件下, 可以得到如下两个关系式:

$$ct_{ia} = \sqrt{(2H - h - z_i)^2 + r_i^2} - \sqrt{(h - z_i)^2 + r_i^2}, \quad (2)$$

$$ct_{ib} = \sqrt{(2H + h - z_i)^2 + r_i^2} - \sqrt{(h - z_i)^2 + r_i^2}, \quad (3)$$

其中  $c$  为光速,  $H$  为电离层高度,  $z_i$  为第  $i$  号测站的高度,  $h$  为袖珍云闪的放电高度,  $r_i$  为袖珍云闪与第

$i$  号测站的距离.  $r_i$  可由(4)式给出:

$$r_i = R \arccos \left[ \sin x_0 \sin x_i + \cos x_0 \cos x_i \cos(y_0 - y_i) \right], \quad (4)$$

其中  $R$  为地球半径,  $x_0, y_0$  分别为袖珍云闪放电位置的纬度和经度,  $x_i, y_i$  分别为第  $i$  号测站的纬度和经度.

将(4)式代入(2)、(3)式,则两式中共有四个未知量,分别是袖珍云闪的三维位置  $x_0, y_0, h$  及电离层高度  $H$ ,而每个测站都可以给出这样两个方程,那么理论上最少只要有二个测站的同步观测就可求出一组解.而在实际观测中,通常有 5 至 9 个测站同时观测到一次放电事件,这种情况下,根据(2)、(3)式构造以下函数:

$$f(H, h, x_0, y_0) = \sum_{i=1}^n \left[ ct_{ia} - \sqrt{(2H - h - z_i)^2 + r_i^2} + \sqrt{(h - z_i)^2 + r_i^2} \right]^2 + \left[ ct_{ib} - \sqrt{(2H + h - z_i)^2 + r_i^2} + \sqrt{(h - z_i)^2 + r_i^2} \right]^2, \quad (5)$$

其中  $n$  为同时观测到某次放电事件的测站个数.利用最优化方法<sup>[24]</sup>求出函数(5)的最小值,即可得到一组解,也可借助于 MATLAB 的函数库直接进行求解.虽然理论上只需二个测站的同步观测就可求解,但由于采用最优化方法时需要给出初值,当只有二个测站的观测时(即四个方程求解四个未知量),最终收敛的结果受初值影响极大,因此在实际计算中只考虑  $n \geq 3$  的情况.

注意到(2)、(3)式是在忽略地球曲率的条件下成立,由于在 400 km 距离内忽略地球曲率造成的误差不超过 300 m<sup>[1]</sup>,而本实验中观测到的袖珍云闪绝大多数在 350 km 距离内,因此忽略地球曲率是一个合理的假定,这能够极大地简化计算.另外注意到两轮反射形成的脉冲 2a、2b(图 3b)没有利用到上述的计算中,这是因为这类反射脉冲只在很少的情况下观测到,同时因为经历了两轮反射,其传播距离更长,受到各种环境因素的影响更大,脉冲波形容易发生畸变而不易于识别.

#### 4.2 计算结果

利用上述方法,首先计算了一部分袖珍云闪的三维位置及电离层高度,图 5 是 7 月 15 日一次雷暴过程中某一时刻的雷达组合反射率并叠加了 6 min 内发生的袖珍云闪,袖珍云闪的经纬度坐标即根据上述方法利用电离层反射计算得到.此时雷暴距离探测网络约 150 km,由图可见,袖珍云闪的位置与

雷达回波总体上对应得较好,证明上述方法是有效可行的.当然,有少数定位点明显偏离了雷达回波中心,说明以上方法的计算也存在一定的不稳定性.为了控制计算过程中出现的误差,在下文对袖珍云闪的放电高度和电离层高度进行统计时,首先将其定位位置与雷达回波对比,并排除那些明显偏离雷达回波中心的定位点,如图 5 中定位于白色和深蓝色区域的袖珍云闪明显包含有较大的误差,因此不会被用于统计放电高度和电离层高度的分布.

根据以上标准,共挑选出 447 例正极性袖珍云闪和 5 例负极性袖珍云闪,其放电高度与相应的电离层高度如图 6 所示.由图可见,5 例负极性袖珍云闪的放电高度比绝大多数正极性袖珍云闪都要高,大多在 16~18 km,而正极性袖珍云闪的放电高度大多在 7~14 km,这一结论与 Smith 等<sup>[17]</sup>的计算符合得较好.计算得到的电离层高度主要在 88~95 km 范围内,由于在本次实验中,伴有电离层反射脉冲对的袖珍云闪都是在夜间观测到的,这一结果与 Smith 等<sup>[17]</sup>的计算以及与电离层相关的研究结果<sup>[25]</sup>也较为一致.这也证明此方法可以用于反演电离层的高度,如果能够结合反射脉冲幅度的变化特征,则有望成为一种研究电磁波在电离层反射的规律及能量变化特征的方法.

#### 4.3 电离层高度设为定值时的计算

以上方法虽然可以得出较为合理的结果,但从图 5 中的定位结果可以看到该方法仍然存在一定的不稳定性.在实际的研究中,电离层高度通常可以看作一个定值,并且通过许多非常成熟的研究,我们已

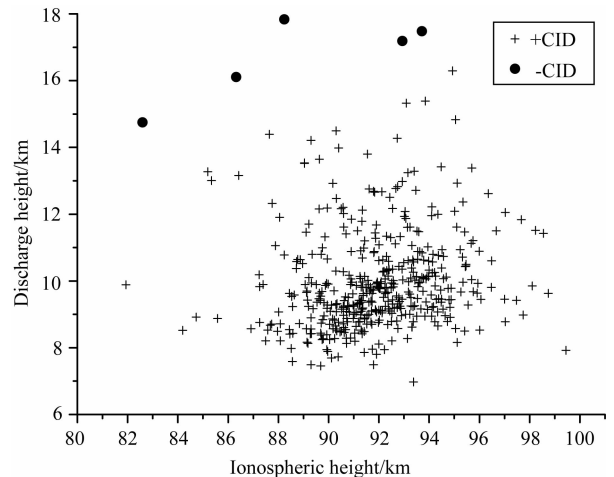


图 6 447 例正极性袖珍云闪和 5 例负极性袖珍云闪的放电高度及对应的电离层高度

Fig. 6 Scatterplot of discharge height and corresponding ionospheric height of 447 positive CIDs and 5 negative CIDs

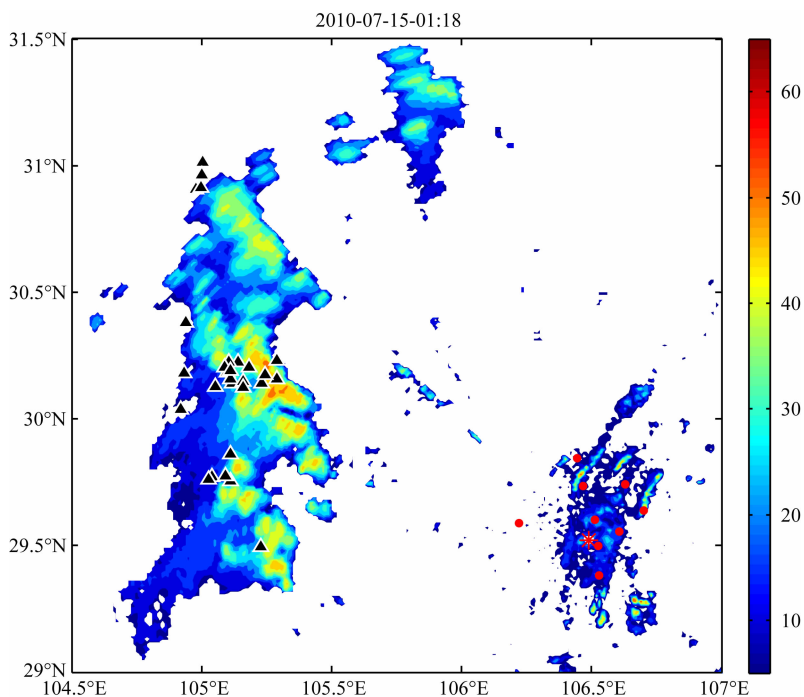


图 5 7 月 15 日一次雷暴过程中雷达组合反射率与 6 min 内袖珍云闪定位点的叠加图  
袖珍云闪的位置根据其电离层反射脉冲对计算得出, 黑色三角代表袖珍云闪的定位点,  
红色圆点代表探测网络各子站, 红色“\*”代表雷达站。

Fig. 5 Composite radar reflectivity with locations of CIDs within six minutes in a thunderstorm on July 15  
Locations of CIDs are computed using their ionospheric reflection pairs. Black triangles represent locations of CIDs.  
Red dots represent observation stations of the location network. Red “\*” represents the radar station.

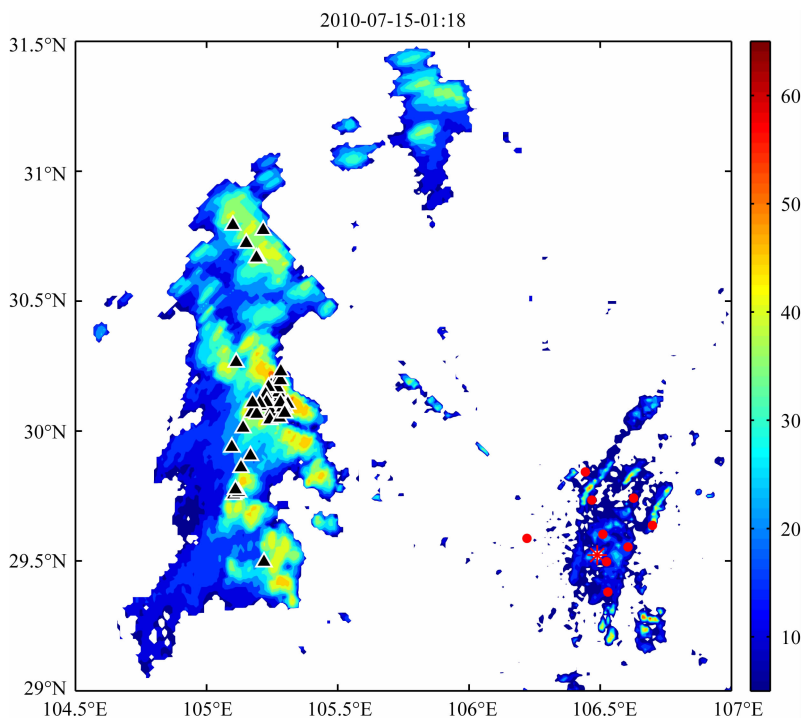


图 7 同图 5, 袖珍云闪的位置由 4.3 节中的计算方法得出

Fig. 7 As in Fig. 5, but locations of CIDs are computed by the method in Section 4.3

经知道电离层对不同波段电磁波的反射高度<sup>[25]</sup>.在上述计算中,得出的电离层高度与相关研究的结果相符,证明了上述方法的合理性.而在具体的针对于袖珍云闪的研究中,我们只需要对袖珍云闪进行三维定位,并不关心电离层高度,因此可以根据以往的

研究结果将其设为一个定值,这样只用求解三个未知量,定位精度能够得到显著提高.

本研究中,伴有电离层反射脉冲对的袖珍云闪只在夜间观测到,在夜间,电离层高度变化不大,为 90 km 左右<sup>[17,25]</sup>,因此,令(5)式中  $H=90$ ,则

$$f(h, x_0, y_0) = \sum_{i=1}^n [ct_{ia} - \sqrt{(180 - h - z_i)^2 + r_i^2} + \sqrt{(h - z_i)^2 + r_i^2}]^2 + [ct_{ib} - \sqrt{(180 + h - z_i)^2 + r_i^2} + \sqrt{(h - z_i)^2 + r_i^2}]^2. \quad (6)$$

式(6)中只有三个未知量,即袖珍云闪的三维位置,与 4.1 节中类似,利用最优化方法即可通过多站的同步观测解出三个未知量.为了保证计算精度,同样只考虑  $n \geq 3$  的情况.

为了与 4.1 节中的计算进行比较,这里计算了与图 5 同一时刻的袖珍云闪位置并与雷达组合反射率叠加,结果如图 7 所示.由图可见,定位效果明显比图 5 更优,几乎所有定位点都与雷达回波较好地对应,原来明显偏离雷达回波中心的定位点也都定位于更为合理的位置,说明将电离层高度设为定值后的计算明显具有较高的精度和稳定性.

利用此计算方法,计算了实验期间观测到的所有伴有电离层反射脉冲对的袖珍云闪的三维位置,并同样通过类似于 4.2 节中与雷达回波对比的方法剔除误差较大的结果,最后挑选出 5489 例正极性袖珍云闪和 1400 例负极性袖珍云闪,放电高度分布如图 8 所示.由图可见,正、负极性袖珍云闪明显发生

于两个不同的高度上,正极性袖珍云闪主要集中在 7~14 km,几何平均值为 9.9 km,而负极性袖珍云闪主要集中在 15~18 km,几何平均值为 17.5 km.这进一步证实了 Smith 等<sup>[17]</sup>的结论,即正、负极性袖珍云闪发生于明显不同的两个高度上.

值得注意的是 1400 例负极性袖珍云闪的最大高度为 20.0 km,而之前的一些研究得出少量袖珍云闪的高度远超过 20 km 甚至达到 30 km 这样难以解释的结果<sup>[17-18]</sup>,从本研究中对大量的袖珍云闪的计算结果来看,放电高度远大于 20 km 的结果很可能是由计算误差造成的,而本文的计算中未出现这样的结果则是因为我们对计算误差进行了严格的控制,即通过对比雷达回波来挑选定位点,这能够保证较高的定位精度,同时,多站的同步观测提供了至少 6 个约束方程来计算袖珍云闪的三维位置,这也保证了计算结果不出现大的误差.

## 5 讨论和结论

利用袖珍云闪的低频辐射在地面与电离层之间传播能够产生电离层反射脉冲对这一特性,本文提出了一种对袖珍云闪实现三维定位的新方法,利用这种方法,能够对很大范围内的袖珍云闪实现较为精确的三维定位.4.1 节中提出的方法不仅可以定位袖珍云闪,还可以计算电离层的高度,其潜在的应用就是将袖珍云闪作为一个强大的辐射源来遥测电离层对电磁波的反射特征,国际上也已经有类似的研究<sup>[26]</sup>.而当电离层的高度设为定值后利用 4.3 节中的方法进行计算时,由于需要求解的只有袖珍云闪的三维位置这三个量,而我们的探测网络通常有 5 个以上测站同时探测到同一放电事件,也就提供了 10 个以上方程,这就保证了计算结果的精确性和稳定性,这一点从图 7 中的定位效果可以明显地反映出来.

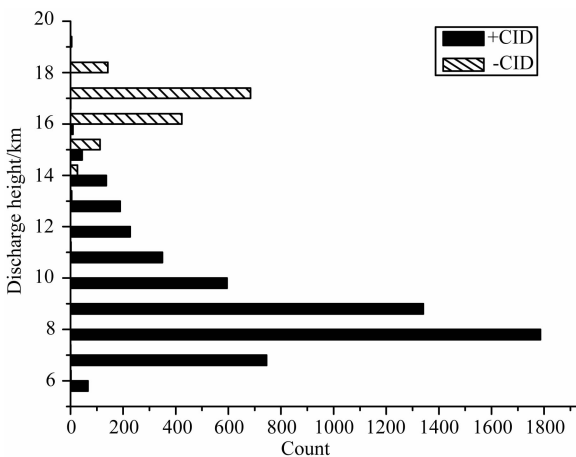


图 8 在电离层高度设为定值的情况下计算得到的 5489 例正极性袖珍云闪和 1400 例负极性袖珍云闪的放电高度分布

Fig. 8 Distribution of discharge heights of 5489 positive CIDs and 1400 negative CIDs computed when the ionospheric height is set as a constant

本文提出的定位方法的另一个优点在于其有效定位范围非常大,通常在距离测站 80 km 与 330 km 之间都能对袖珍云闪准确地定位,距离过近时,辐射信号无法在电离层有效反射形成反射信号(图 4),而当距离过远时,袖珍云闪本身也就无法被有效探测到.传统的到达时间差法只能对产生于站网以内及附近的放电事件准确定位,对于本实验的探测系统而言,当放电事件距离站网超过 100 km 时,定位误差会非常显著.因此,本文提出的定位方法与传统的到达时间差法互为补充,利用这一方法,可以在半径约 300 km 的范围内准确定位袖珍云闪,这为进一步细致研究袖珍云闪各方面的特征提供了一个基础.

基于以上方法,我们计算并统计了数千例正、负极性袖珍云闪的放电高度,发现负极性袖珍云闪放电高度显著地高于正极性袖珍云闪,主要在 15~18 km 范围内,很可能对应于雷暴云内上部正电荷区和云顶屏蔽层之间的区域,而正极性袖珍云闪的放电高度主要在 7~14 km 范围内,很可能对应于主负电荷区与上部正电荷区之间.负极性袖珍云闪的放电高度总体上与对流层顶高度相当,而其数量比正极性袖珍云闪要少得多,那么可以猜想负极性袖珍云闪是当雷暴发展得极其旺盛,其云顶暂时地接近甚至冲过对流层顶时产生的. Zipser 等<sup>[27]</sup>总结了 TRMM 卫星七年的观测,发现 40 dBz 反射率高度少数情况下可达 16 km 以上,那么云顶高度肯定更高,因此负极性袖珍云闪放电高度在 17 km 左右也就是合理的,而之前的研究计算得到少量袖珍云闪的放电高度甚至达到 30 km<sup>[17-18]</sup>,这就没有办法将其认为是雷暴云内的放电事件,而只能将其与高空放电联系起来,但如果袖珍云闪与高空放电有关的话,其绝大多数应位于对流层顶之上<sup>[28]</sup>. 本文的大量计算发现高度最高的袖珍云闪也仅为 20.0 km,因此之前的研究得到的高度接近 30 km 的袖珍云闪很可能只是由于计算误差造成的.综合以上分析,可以认为正、负极性袖珍云闪均为产生于雷暴云内的放电事件,但负极性袖珍云闪放电高度更高,很可能只产生于发展极其旺盛的雷暴过程中,这种极强的雷暴过程相对不易形成并长时间维持,因此负极性袖珍云闪的数量也相应地明显少于正极性袖珍云闪.

## 参考文献(References)

[1] 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.*, 1999, 104(D4): 4189-4212.

- [2] Nag A, Rakov V A. Compact intracloud lightning discharges: 2. Estimation of electrical parameters. *J. Geophys. Res.*, 2010, 115: D20103, doi: 10.1029/2010JD014237.
- [3] 张义军, Krehbiel P R, 刘欣生等. 闪电放电通道的三维结构特征. *高原气象*, 2003, 22(3): 217-220.  
Zhang Y J, Krehbiel P R, Liu X S, et al. Three dimensions structure of lightning discharge channel. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, 22(3): 217-220.
- [4] 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.  
Dong W S, Liu X S, Chen C X, et al. Broadband Interferometer observations of the bi-directional breakdown process in natural lightning. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(3): 317-321.
- [5] Nag A, Rakov V A. Compact intracloud lightning discharge: 1. Mechanism of electromagnetic radiation and modeling. *J. Geophys. Res.*, 2010, 115: D20102, doi: 10.1029/2010JD014235.
- [6] 祝友友, 陶善昌, 谭涌波. 伴随超强 VHF 辐射的闪电双极性窄脉冲初步观测. *气象学报*, 2007, 65(1): 124-130.  
Zhu B Y, Tao S C, Tan Y B. Initial observations of the lightning narrow bipolar pulses with very powerful VHF radiation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2007, 65(1): 124-130.
- [7] Suszcynsky D M, Heavner M J. Narrow Bipolar Events as indicators of thunderstorm convective strength. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, 30(17): 1879, doi: 10.1029/2003GL017834.
- [8] 张义军, 董万胜, 张广庶等. 空中人工引发雷电先导过程的特征分析. *地球物理学报*, 2003, 46(4): 446-449.  
Zhang Y J, Dong W S, Zhang G S, et al. Characteristics of the leading processes to the artificial induced lightning in the air. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(4): 446-449.
- [9] 孔祥贞, 郗秀书, 赵阳等. 青藏高原一次地闪放电过程的分析. *地球物理学报*, 2006, 49(4): 993-1000.  
Kong X Z, Qie X S, Zhao Y, et al. An analysis of discharge processes of one cloud-to-ground lightning flash on the Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(4): 993-1000.
- [10] Le Vine D M. Sources of the strongest RF radiation from lightning. *J. Geophys. Res.*, 1980, 85(C7): 4091-4095.
- [11] Willett J C, Bailey J C, Krider E P. A class of unusual lightning electric field waveforms with very strong high-frequency radiation. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94 (D13): 16255-16267.
- [12] Holden D N, Munson C P, Devenport J C. Satellite observations of transionospheric pulse pairs. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, 22(8): 889-892.
- [13] Jacobson A R, Heavner M J. Comparison of narrow bipolar events with ordinary lightning as proxies for severe convection. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, 133: 1144-1154.



- [14] Wiens K C, Hamlin T, Harlin J, et al. Relationships among Narrow Bipolar Events, "total" lightning, and radar-inferred convective strength in Great Plains thunderstorms. *J. Geophys. Res.*, 2008, 113: D05201, doi: 10.1029/2007JD009400.
- [15] 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.  
Wu T, Dong W S, Liu H Y. Characteristics of electrical waveform of narrow bipolar event. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2011, 30(3): 823-830.
- [16] Wu T, Dong W S, Zhang Y J, et al. Comparison of positive and negative compact intracloud discharges. *J. Geophys. Res.*, 2011, 116: D03111, doi: 10.1029/2010JD015233.
- [17] 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 Sci.*, 2004, 39: RS1010, doi:10.1029/2002RS002790.
- [18] Nag A, Rakov V A, Tsalikis D, et al. On phenomenology of compact intracloud lightning discharges. *J. Geophys. Res.*, 2010, 115: D14115, doi: 10.1029/2009JD012957.
- [19] Wescott E M, Sentman D, Osborne D, et al. Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 2. Blue jets. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, 22(10): 1209-1212.
- [20] 吴明亮, 徐寄遥. 时变的准三维“红闪”电场模式研究. 地球物理学报, 2005, 48(3): 480-486.  
Wu M L, Xu J Y. A time-dependent quasi-three-dimensional QEF model of red sprites. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(3): 480-486.
- [21] Hamlin T, Light T E, Shao X M, et al. Estimating lightning channel characteristics of positive narrow bipolar events using intrachannel current reflection signatures. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112: D14108, doi: 10.1029/2007JD008471.
- [22] 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.  
Liu H Y, Dong W S, Wang T, et al. A time-domain analysis on waveform change of lightning electric field and identification of discharge types. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2009, 35(3): 49-59.
- [23] 黄文耿, 古士芬. 雷暴云准静电场对夜间电离层 D 区的影响. 地球物理学报, 2003, 46(2): 162-166.  
Huang W G, Gu S F. The effect of thunderstorm cloud quasi-electrostatic (QE) field on the nighttime ionospheric D-region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(2): 162-166.
- [24] Nocedal J, Wright S J. *Numerical Optimization* (Second Edition). Springer, 2006.
- [25] Bracewell R N, Budden K G, Ratcliffe J A, et al. The ionospheric propagation of low- and very low-frequency radio waves over distances less than 1000 km. *Proc. Inst. Electr. Eng.*, 1951, 98(53): 221-236.
- [26] Jacobson A R, Holzworth R, Shao X M. Low-frequency ionospheric sounding with Narrow Bipolar Event lightning radio emissions: energy-reflectivity spectrum. *Ann. Geophys.*, 2008, 26(7): 1793-1803.
- [27] Zipser E J, Cecil D J, Liu C T, et al. Where are the most intense thunderstorms on earth? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2006, 87: 1057-1071.
- [28] Pasko V P. Recent advances in theory of transient luminous events. *J. Geophys. Res.*, 2010, 115: A00E35, doi: 10.1029/2009JA014860.

(本文编辑 何燕)