

利用快电场变化脉冲定位进行云闪 初始放电过程的研究^{* 1}

王东方¹ 郅秀书² 袁 铁¹ 张广庶¹ 张 彤¹ 张廷龙¹ 张其林¹

WANG Dongfang¹ QIE Xiushu² YUAN Tie¹ ZHANG Guangshu¹ ZHANG Tong¹ ZHANG Tinglong¹ ZHANG Qilin¹

1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州, 730000

2. 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京, 100029

1. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*

2. *LAGEO, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2007-11-16 收稿, 2008-03-09 改回.

Wang Dongfang, Qie Xiushu, Yuan Tie, Zhang Guangshu, Zhang Tong, Zhang Tinglong, Zhang Qilin. 2009. An analysis on the initial stage of intracloud lightning with the location technique of fast electric field change pulses. *Acta Meteorologica Sinica*, 67 (1): 165–174

Abstract Multi-station observation on lightning flashes in the Chinese Inland Plateau area was conducted in the summer of 2004 by using fast electric field change, slow electric field change and field mill. The high time-resolution GPS (its absolute timing accuracy was 50 ns) was used to synchronize the signals from each station. Based on the data obtained from multi-station lightning observations, characteristics of the lightning activities in the thunderstorms and pulses in the lightning flashes were analyzed. By using the technique of differential time of arrival (DTOA), a lightning radiation location technique, based on the fast electric field changes, was developed. Radiation pulses in the initial stages of five intracloud (IC) lightning discharges which occurred on Aug 20, 2004 were located with the developed technique. The results indicate that the location technique could effectively locate the lightning radiation sources. The lightning sources were found to be nicely associated with the storm activity. When the storm was at mature stage, with echo top of 9 km, the lightning sources were located from 3.3 to 6.4 km above ground; when the storm gradually became weak, with echo top of 6 km, the lightning sources were located from 1.1 to 4.0 km. Especially, one of IC lightning discharges were located from 1.1 to 3.0 km during the weaken stage of the storm. Compared with the Doppler radar echo, the location of the radiation sources were found to be nicely associated with the high reflectivity storm regional, and the echo intensity was between 25 dBz and 50 dBz. It is not only conformed the reliability of the location results to some extent but also showed that the fast electric field change detection system can be used to monitor the overall storm development with the height and rate of the sources. In addition, the results and the location error were also analyzed with the Doppler radar data and the simulated location results. The results show that the location error is small when the radiation sources near the detect net, and the error increases steadily for more distant sources. It is found that the modeled result can effectively reflect the location errors by compared with the limited experimental observations.

Key words Thunderstorm, Intracloud, Fast electric field change pulses, Doppler radar, Location error

摘 要 利用高时间精度 GPS 同步的雷电快天线电场变化测量仪等设备, 在 2004 年夏季对甘肃中川地区雷暴的闪电放电特征进行了 7 站同步观测。在此基础上, 发展了一种基于到达时间差的快天线电场变化脉冲定位方法, 对 8 月 20 日一次强雷暴

^{*} 资助课题: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-206), 国家杰出青年科学基金 (40325013), 国家自然科学基金 (40675008)。

作者简介: 王东方, 主要从事大气电学研究。E-mail: fangdongwang08@yahoo.com.cn

过程的 5 次云闪初始阶段产生的快天线电场变化脉冲进行了三维定位分析。结果表明:基于辐射源到达不同测站的时间差,能够对云闪产生的辐射源进行较好的定位,闪电的放电区域与雷暴的不同发展阶段密切相关。在雷暴发展的比较旺盛阶段,闪电的放电区域相对较高,对应的离地高度为 3.3—6.4 km(此时对应的雷达回波顶高约 9 km,回波强度在 35 dBz 以上的回波顶高约 7 km);在雷暴处于减弱和消散阶段,闪电的放电高度降低,所分析的该阶段的其中 1 个云闪对应的离地高度为 1.1—3.0 km(此时对应的雷达回波顶高约 6 km,回波强度在 35 dBz 以上的回波顶高约 3 km)。与雷达回波的对比分析发现,云闪初始阶段的辐射脉冲源位置与强回波区具有较好的空间一致性,辐射脉冲源位置分别与 25—50 dBz 的回波区域相对应。这不仅在一定程度上表明了定位结果的可靠性,而且说明利用快天线电场变化测量仪组网观测对闪电进行定位跟踪有可能反映雷暴强中心的发展变化过程,同时也表明了利用快天线电场变化测量仪组网观测在强对流的监测和预警中有一定的应用潜力。另外,定位误差的模拟试验表明,当雷电距观测网络较近时,定位误差较小,雷电距观测网络中心越远,定位误差越大。5 次云闪的实际定位误差对比表明,模拟试验的定位结果在很大程度上能够有效地反映实际定位误差。这说明了该定位系统对位于探测网络上空或附近的雷电可以进行云内放电过程的较好的三维定位。

关键词 雷暴,云闪,快电场变化脉冲,多普勒雷达,定位误差

中图法分类号 P427.32⁺¹ P415.3⁺⁵

1 引言

由于闪电的发生具有随机性、瞬时性等特点,常规的观测手段受到一定的限制,到目前为止,人们对闪电物理的认识和理解还远落后于对其灾害进行防治的实际需求。与云-地闪电相比,对云闪放电的研究相对较少。发生于云内的放电过程因击穿空气而产生高频辐射脉冲,Weidman 等(1979)利用快电场变化仪研究发现,云闪初始击穿脉冲主要有两种类型:一种上升相对较慢、宽的双极性波形,在初始半周期上叠加有几个小脉冲;另一种则是相对窄而平滑的单峰(窄双极性脉冲)或多峰双极性脉冲波形,他们认为,快速的小脉冲是闪电通道在以梯级方式形成过程中所产生的,而双极性成分则是慢电流浪涌所致。Smith 等(1999)的研究结果表明,窄双极性脉冲通常发生在雷暴云中最活跃的区域,可能标志着云闪放电的开始。Jacobson 等(2005)、Suszcynsky 等(2003)的研究更是发现,窄双极性脉冲事件可以作为雷暴中对流活动强度的指示器。除了研究闪电放电产生的辐射脉冲的形态特征外,近年来发展起来的各种闪电辐射脉冲定位技术,在很大程度上促进了对闪电放电过程及其物理机制和雷暴电荷结构方面的认识。同时,闪电定位技术的快速发展使得人们已能够跟踪到闪电发生、发展过程中的预击穿、先导、回击等一些子过程(祝宝友等,2004;郗秀书等,2005),特别是对于发生在云内的放电过程而言,由于光学观测的困难,因此对云内放电辐射脉冲的三维定位成了一种研究闪电云内发生、发展过程非常重要的手段。在辐射脉冲定位方面,目前

比较有代表性的定位系统分别是 LMA(Lightning Mapping Array)系统和 LASA(Los Alamos Sferic Array)系统。LMA 系统是由美国新墨西哥矿业技术学院发展起来的基于 GPS 时钟同步的闪电 VHF 辐射源到达时间差(TOA)定位技术(Krehbiel, et al, 2000),对于一个孤立的闪电 LMA 系统一般可以探测到几百到几千个辐射事件。为了配合 FORTE(Fast Onboard Recording of Transient Events)卫星的观测以提供地基标定,1998 年在新墨西哥州建立了一套 LASA 系统,该系统实际上是一套工作在 VLF 频段的快电场变化定位系统。经过多年的观测,事实证明了 LASA 系统能够有效地反演雷暴的发展变化过程。Heavner 等(2000),Smith 等(2002)的研究结果表明,当闪电发生在观测网络附近时,近一半以上的闪电事件定位误差在 2 km 以下。Shao 等(2006)的研究结果表明,升级后的 LASA 系统不仅定位误差明显改善(闪电发生在网络范围内时,定位误差小于 500 m),而且其灵敏度也比以前提高了 10 倍,在一次雷暴日中可以捕捉到数百万个放电事件。由于工作频段的不同,LASA 系统能识别的脉冲比较有限,尽管它不能像 LMA 系统那样得到闪电发展的详细图像,且定位误差相对较大,但是 LASA 系统有其自身的一些优势:其一,由于该系统的工作频段范围在 VLF/LF,主要探测的是尺度相对较大的电流传输过程中产生的电场变化,因此可以反映相对较强的放电过程,能够很好地反演雷暴的发生、发展变化情况;其二,该系统所用的仪器具有观测简单、场地要求不高及资料处理速度快等特点,具有较强的灵活性和实用性;其三,该系统可以克服甚高

频定位系统视距传输的不足,对较远距离的闪电,也能够给出合理的二维位置信息。

20世纪80年代以来,许多观测结果表明,处于中国内陆高原地区夏季雷暴云呈现特殊的电特征,即雷暴云下部有较大范围的正电荷区(王才伟等,1987;叶宗秀等,1987;刘欣生等,1987;Qie等,2006)。Shao等(1987)利用3站同步观测资料分析表明,云中放电多发生在该正电荷区与中部的负电荷区。张义军等(1997)在观测基础上指出中国南北方雷暴电荷结构的差异:南方多偶极性电荷结构,北方多三极性电荷结构。郗秀书等(1998)利用GPS同步的多站慢天线资料对一次负地闪起始过程的分析发现,该过程由数量不等的 K 变化组成,并应用时间差方法对 K 变化过程中的一系列脉冲进行了定位,发现 K 变化以负流光的形式起于云中的负电荷区并向下部正电荷区发展。当时根据电场的推断正好相反。郗秀书等(1998)、冯桂力等(2006)结合雷达资料对不同地区的地闪放电分析结果表明,负电荷源与强回波具有较好的相关性,但是关于云闪放电与雷达回波的对比分析方面的工作相对较少。

为了深入了解高原雷暴的电荷结构和闪电放电特征,2004年夏季,利用快、慢电场仪及场磨式电场仪等观测仪器对甘肃中川地区的雷暴进行了一次较大规模的多站同步观测,取得了一批完整的雷电资料。本文采用与LASA相似的分析方法,利用所取得的高时间精度GPS同步的闪电快电场多站同步资料,对云闪初始阶段的放电特征进行了分析,并结合多普勒雷达资料,探讨了利用快电场组网观测进行雷电监测预警的可行性。

2 观测与仪器设备介绍

2004年夏季在甘肃中川地区进行了雷暴及闪电的多站观测实验,站点的布局如图1所示。主观测点设在山子墩A(36.52°N 、 103.72°E ,海拔高度为1901 m)。站网覆盖区域内无高大建筑或树木,地势平坦、视野开阔,周围环境对雷电电场变化测量结果的影响很小。距主观测点东南方向约60 km处的多普勒雷达也配合进行同步观测,其位于海拔高度2189 m的皋兰山顶。7个测站均配备场磨式电场仪以及由GPS同步的快、慢电场变化仪。场磨式电场仪用来探测地面大气平均电场强度,测量范围为 $\pm 50\text{ kV/m}$,采样率10 Hz。快、慢电场变化仪

用来探测闪电引起的地面电场变化大小和极性,时间常数分别为2 ms和6 s,带宽分别为1 kHz—5 MHz和10 Hz—3 MHz,采样率均为2.5 MHz,输出动态范围为 $\pm 15\text{ V}$,可探测范围约为25 km,各个测站的信号由GPS同步,GPS时间精度为50 ns。

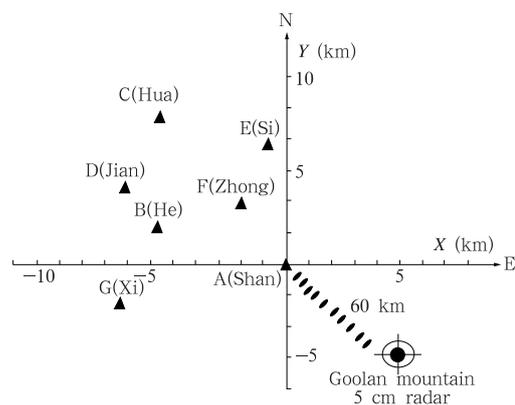


图1 观测站点分布

Fig. 1 Observation stations

本文所使用的资料主要来自闪电快电场变化探测仪,由于设备具有较宽的带宽和足够高的灵敏度,以及记录设备较高的时间分辨率,不但可以客观真实地反映闪电放电波形,而且能精确测量闪电放电产生的快速变化辐射场强。

3 分析方法

假设空间有一辐射源位于 (x, y, z) 到达第 i 个接收站 (a_i, b_i, e_i) 的距离为 d_i ,传播时间为 t_i ,其中 $i = 0, 1, \dots, m$ 。通常选 $i = 0$ 为中心站,则

$$d_i = \sqrt{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 + (z - e_i)^2}$$

$$d_i - d_0 = c(t_i - t_0) \quad i = 0, 1, \dots, m$$

其中 $c \approx 3.0 \times 10^8\text{ m/s}$ 为光速,令 $\Delta t = t_i - t_0, i = 0, 1, \dots, m$,可得

$$\sqrt{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 + (z - e_i)^2} -$$

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = c\Delta t \quad i = 1, 2, \dots, m。$$

若至少有5个测站的数据,以其中一站为基准得到其余站点与它的4组 Δt ,则利用时差法可确定脉冲源的位置参数 (x, y, z) ,当测站数超过未知量个数时,利用最小二乘法对非线性函数拟合求解的结果有较高的可信度(Krehbiel, et al, 1979)。

本文利用多站快电场变化脉冲对云闪初始阶段的辐射源进行定位,在定位过程中关键是识别不同

测站中的同一闪电事件及挑选对应的快电场变化脉冲,因为这直接关系到后续计算能否继续进行。首先根据信号学理论,利用波形相关原理确定不同测站的同一次闪电事件。显然,一次闪电事件包含一系列脉冲,为了准确地挑选不同测站的脉冲峰值,首先将原始波形变换成功率波的形式(如图2所示),然后运用自动软件寻找能量峰值的时间序列。由图2对应的数字可知,转化后的波形没有改变原波形的脉冲峰值的时间序列。同时,为了确保所挑选的脉冲来自于同一个辐射源,辐射源到达两个测站时间差的绝对值应小于或等于两个测站之间的距离与光速的比值。在一个测站中,如果在预先给定的时间窗口,有两个或者两个以上的连续脉冲,则最大的脉冲就认为是这个时段的脉冲。脉冲峰值挑出来以后会标上它的幅值及其精确的时间。为了比较两个测站的同一脉冲峰值,我们将比较这两者峰值的时间序列,找出幅值和时间最符合的系列,重合的脉冲被认为是到达这两个测站的同一个辐射源。这种寻找时间差的方法运用在所有的测站中,如果同一个脉冲峰值能在4个或者4个以上的测站中找到,则它到达测站的时间将通过最小二乘法拟合其空间参量。

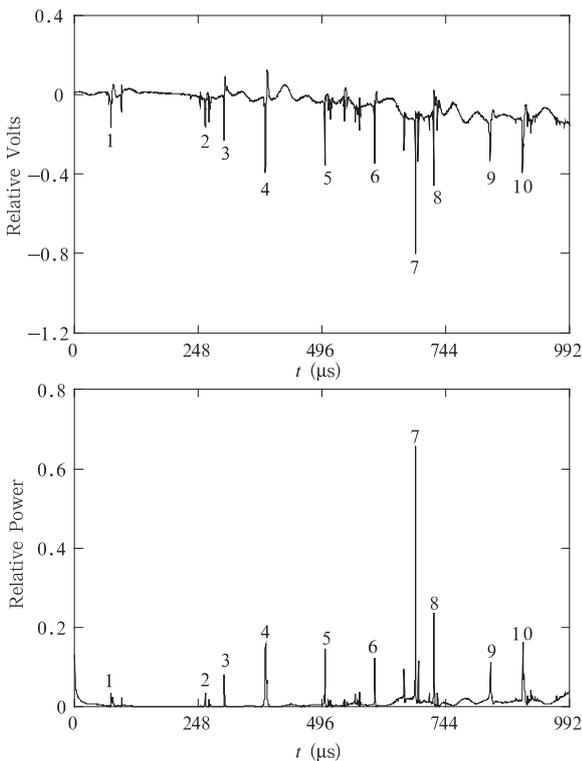


图2 波形转换
Fig. 2 Original field change waveform

4 资料分析与结果

在2004年夏季连续45 d观测期间,共观测到11次雷暴过程。这些雷暴过程多发生于13:00—22:00(北京时间),本文对8月20日一次距观测网较近、且有多站同步观测资料的雷暴过程进行详细分析。此次雷暴过程主要以云闪放电为主,约占总闪的96%,地闪仅占4%。图3给出了该雷暴过程在测站C引起的地面电场记录及闪电频数的演变特征(约定:当地面电场受雷暴云内正电荷控制时,地面电场为正)。由图3b可知,整个雷暴过程的闪电频数很低,平均为1 fl/min,最高值仅为8 fl/min,远小于同纬度低海拔地区雷暴的闪电频数。

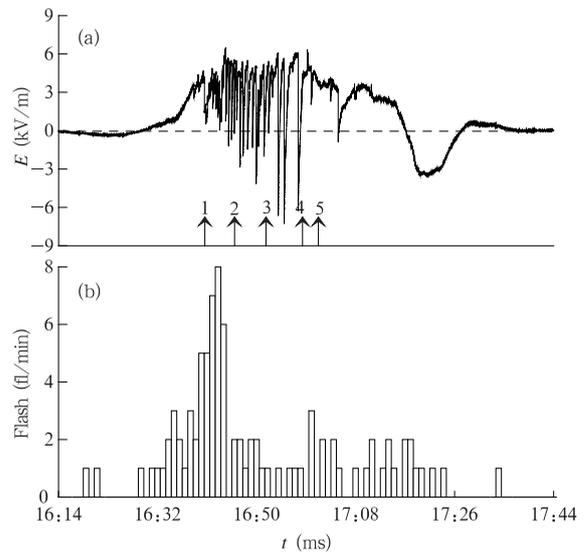


图3 (a) 8月20日雷暴过程在测站C产生的地面电场,(b) 闪电频数随时间的演变过程

Fig. 3 (a) Evolution of surface E field under thunderstorm and (b) flash rate at station C

4.1 雷暴及地面电场特征

由当天的雷达资料可知,该雷暴于15:03在观测区域的西北方向开始发展并逐渐向测站网络方向移动,16:48移到测站C上空后,改变方向开始朝东南方向移动,于18:27移出测网探测范围,该雷暴共持续时间约3.5 h。16:27以前雷达回波范围较小、强度较弱,雷暴处于初始发展阶段。16:39以后,30 dBz的回波范围不断扩大,回波中心强度在45 dBz以上,闪电开始连续发生且闪电频数迅速增加。16:42—16:48回波强度在35 dBz以上的回波

范围最大,回波中心强度最大达到了 50 dBz,这说明雷暴到达测站附近时已经处于成熟阶段;17:40以后强回波范围逐渐减弱并远离测站网络。

图 3a 中的快速变化脉冲由闪电放电引起,整个雷暴过程中两次闪电间的地面电场主要为正电场,特别是雷暴当顶时,两次闪电间的地面电场达到 4—6 kV/m。开始阶段地面电场为小的负值,16:29 电场开始变正并迅速增大,相应的闪电明显增多,持续了约 48 min 后电场又变为负值,17:27 电场转为正电场,此后电场恢复到晴天电场。

本文选择有 5 个测站以上观测资料的 5 次闪电进行分析,闪电均发生在雷暴闪电活动相对较强期,发生时间为 16:39:00、16:45:25、16:52:10、16:59:12及 17:01:34,分别记为 IC1、IC2、IC3、IC4 及 IC5(如图 3a 中箭头所示),此时闪电间的地面平均电场均为正。由雷达资料可知,16:42 以后雷暴

云中等强度的回波区已经到达测站 C 上空,强回波中心强度由 32 dBz 增大到 45 dBz。根据声光差,粗略估计 16:48 左右闪电距测站 C 约 2 km;之后随着雷暴远离测站,地面电场逐渐减小并转变为负电场。从当地地面各站的电场记录来看,当雷暴靠近测站网络时,距离雷暴最近的 4 个测站 C—F 持续较长时间的正电场,而距离雷暴云最远的测站 A 和 G 为负电场,特别是雷暴云过顶的测站 C,其地面维持较长时间的强正电场,说明雷暴云下部确实存在一个分布范围很宽的正电荷区,与已有的研究结果一致(张义军等,1997;郗秀书等,1998,2005)。

4.2 云闪初始阶段辐射源的定位结果

图 4a 是云闪 IC3 在 A—F 6 个测站产生的电场变化波形。显然,这次云闪过程在 6 个测站有较好的同步波形。闪电发生在距离中心站(A)约 13 km 的地方,持续时间约 648 ms。关于云闪放电过程,

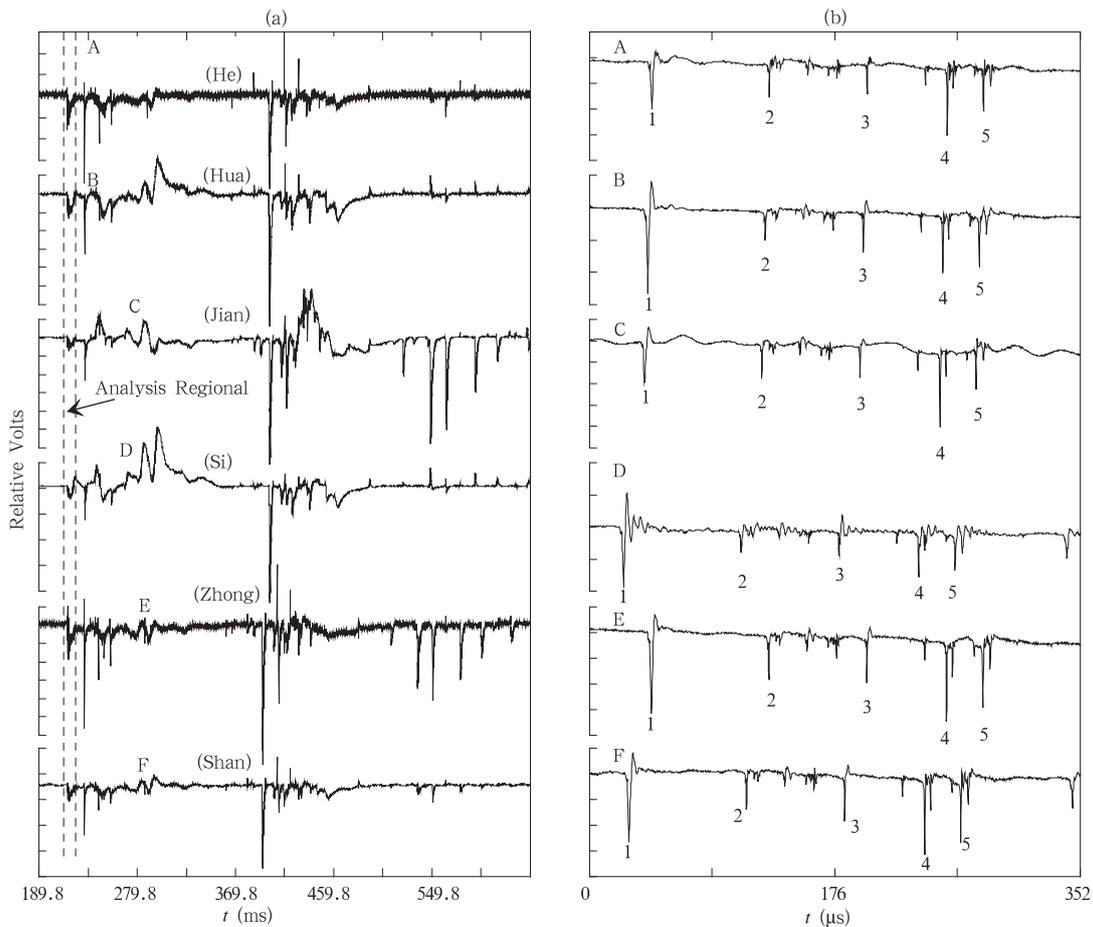


图 4 云闪 IC3 快电场同步波形(a)和分析区域的局部展开(b)

Fig. 4 Fast electric field change waveforms of IC3 discharges (a), and matched peaks among six stations (b) (Each matched peak is marked by the same)

不同的作者可能会有不同的分法(Kitagawa, et al, 1960; Villanueva, et al, 1994), 这里沿用 Kitagawa 等的分法, 也将云闪分为初始、活跃以及结束 3 个阶段。由于在初始阶段, 各个测站的快电场波形都有相对较多的辐射脉冲, 因此这里只对初始过程进行分析, 5 次云闪对应的持续时间分别约 3—10 ms。

为了对快电场脉冲波形特征有一个清晰的认识, 我们把图 4a 虚线之间的区域做了扩展处理(如图 4b 所示)。由扩展波形可知, 6 个测站的脉冲具有较好的一致性。将同时在 A—F 6 个测站清晰可辨、且能很好同步的脉冲按发生先后顺序进行编号, 分别记为 1、2...N, 图 4b 中相同数字代表不同测站测到的来源可能相同的脉冲。利用 5 个以上测站的数据, 以其中一站为基准得到其余站点与其差的 4 组 Δt 可对上述系列脉冲进行三维拟合定位, 与雷达资料进行对比分析, 便可得到辐射源的位置对应的回波区域(见表 1)。图 5 更直观给出了辐射源的高度随时间的变化。

由表 1 及图 5 可知, 5 次闪电的放电区域分布在两个不同的区域, 其中云闪 IC1、IC2 的放电区域较高, 为 3.3—6.4 km, 而其余 3 次云闪的放电区域较低, 基本在 1.1—4.0 km。显然, 云闪 IC1 和 IC2 的辐射源相对离散, 这可能是闪电在行进过程中不断产生分叉造成的。由雷达资料可知, 雷暴发展最旺盛的时刻大概在 16:48, 此时 35 dBz 以上的强回波范围最大, 回波顶最高, 约为 7 km, 最大中心回波强度达到了 50 dBz, 整个雷暴的回波顶高达到

9 km。在此期间发生的闪电(IC1、IC2)其相应的放电区域也较高, 对应的离地高度为 3.3—6.4 km。此后, 雷暴开始减弱, 35 dBz 以上的强回波范围不断缩小, 回波顶高降低, 相应的闪电放电高度也随着降低, 放电区域基本发生在 1.1—4.0 km(如 IC3—IC5)。在所分析的 5 次闪电中, 发生时间最晚的云闪 IC5 对应的离地高度最低, 为 1.1—3.0 km, 此时雷暴已经明显减弱, 雷达回波顶高为 6 km, 35 dBz 顶高为 3 km。这说明闪电发生的区域与雷暴的发展过程关系密切。另外, 表 1 的结果也表明, 在雷暴的不同发展阶段, 闪电放电区域在垂直方向的变化明显不同: 当雷暴处于发展最旺盛时, 不仅闪电的放电区域较高, 而且放电区域的垂直范围较大, 约为 3.0 km; 当雷暴较弱时, 闪电的放电区域明显偏低, 放电区域垂直范围变薄, 约为 1.6—2.0 km。

4.3 辐射源定位结果与雷达回波的对比

为了进一步检验本文定位结果的可靠性, 我们将辐射源的定位结果与相近时刻观测的多普勒雷达资料进行了对比分析, 发现 5 次闪电的辐射源都落在强回波附近或者强回波中心周围中等强度的回波区, 即雷暴对流活动比较活跃的区域(如表 1 所示)。由图 6a 可以看出, 雷暴云的强回波中心位于站网上空西北偏北方向, 闪电发生在测站网络正北偏西方向, 基本在测站 C 上空, 在站网观测范围内。与雷达回波的叠加结果表明, 云闪初始阶段的辐射源都处在雷暴云的回波区。

由于本文所用雷达资料不能给出 RHI 的显示

表 1 云闪初始阶段电场脉冲的拟合定位结果及所处的雷达回波区域
Table 1 The location results for cloud lightning flashes and the data of Doppler radar

云闪编号	IC1	IC2	IC3	IC4	IC5
发生时间	16:39:00	16:45:25	16:52:10	16:59:12	17:01:34
x (km)	-10.10—-7.48	-6.89—-4.99	-9.02—-7.20	-12.78—-10.05	-2.66—-1.83
y (km)	13.90—19.54	9.37—14.99	7.96—10.35	7.12—10.51	2.63—3.34
z (km)	3.38—6.08	3.33—6.37	1.81—3.93	1.97—3.57	1.13—3.04
χ^2	0.012—2.5	0.0001—1.78	0.0028—2.06	0.376—3.10	0.11—2.52
脉冲数	44	133	142	302	78
持续时间(ms)	6.2	3.7	4.1	9.7	2.6
站点数	6	5	6	7	6
回波区域(dBz)	20—35	35—50	20—45	25—45	25—40

注: (1) 表中 x 、 y 、 z 均以测站 A(山子墩)为中心(0,0,0); (2) χ^2 表示拟合优度的范围; (3) 脉冲数指所分析时间段内拟合的同步脉冲个数; (4) 持续时间指所分析的时间范围; (5) 站点数指参加拟合的测站数; (6) 回波区域表示辐射源所分布的回波强度范围。

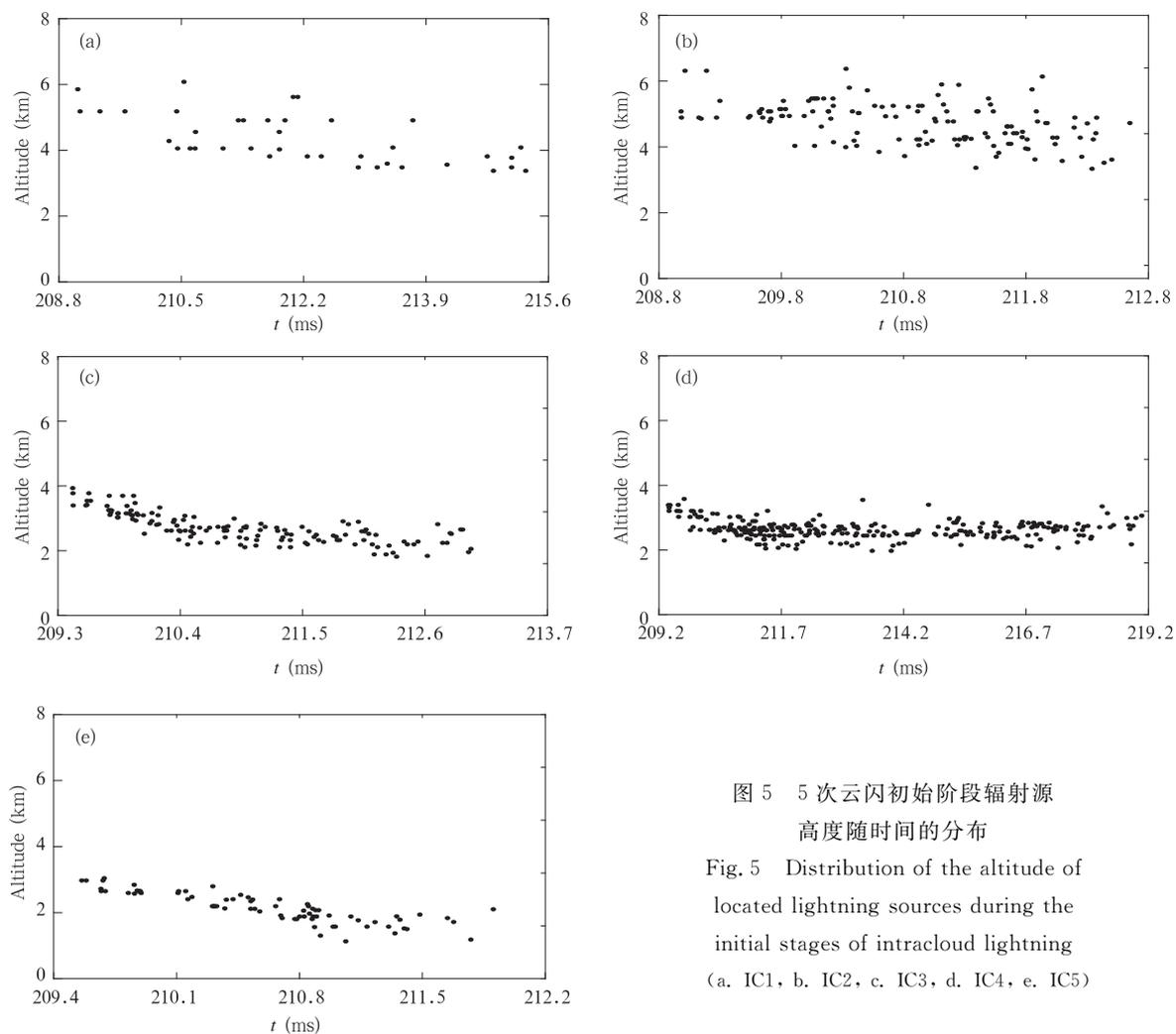


图5 5次云闪初始阶段辐射源高度随时间的分布
 Fig. 5 Distribution of the altitude of located lightning sources during the initial stages of intracloud lightning (a. IC1, b. IC2, c. IC3, d. IC4, e. IC5)

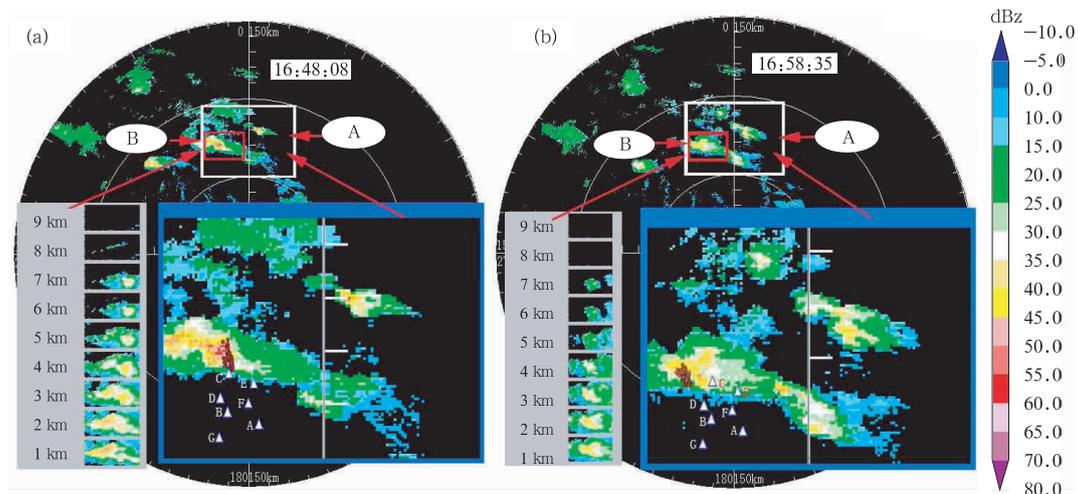


图6 云闪 IC2(a)、IC4(b)的辐射源与雷达回波的叠加及局部9个高度层上的CAPPI回波图(红圈和三角形分别表示辐射源及测站的位置)

Fig. 6 Comparison between radar echo and the radiation sources of IC2 (a) and IC4 (b) (Red circles represent located lightning sources and white triangles mark the stations)

图,为了对辐射源与雷达回波进行仔细的对比,我们将体扫资料处理成多普勒雷达的局部多层 CAPPI 回波图。图 6a、6b 分别给出了区域 B 在 9 个不同高度层上的 CAPPI 回波图。由图 6a 可知,35 dBz 以上的大范围强回波区高达 7 km,雷暴云的回波顶高为 9 km。从图 6b 可知,35 dBz 以上的强回波区范围有所减小,高层的云体开始出现断裂减弱的趋势。将每个脉冲源与对应的图 6a、b 中各相应高度层仔细对比发现,辐射源不仅处在回波区,而且分别与 35—50、25—45 dBz 的强回波区域相对应。从雷达资料可知,16:48:08 以后,35 dBz 的强回波范围明显减弱,回波顶高降低,这说明了雷暴开始由成熟阶段逐渐过渡到减弱阶段,对应时刻发生的闪电事件其放电区域也明显降低。以上分析不仅证实了定位结果的合理性,而且揭示了闪电活动与雷暴云发展的对应关系。

4.4 误差讨论

以上分析表明,快电场定位的闪电活动与雷暴的发展过程密切相关。显然,时间到达法的定位精度关键取决于信号的时间精度。尽管 GPS 的时间精度达到了 50 ns,但是有效的时间精度同样与信号采集系统的采样带宽有关。Jackson 等(1975)的研究结果表明,时间的不确定与带宽基本符合这样的关系式: $\Delta t \Delta f \geq 1/4\pi$ 。上面已经提到,仪器的带宽为 5 MHz,如果是一个理想的脉冲,则时间不确定约是 0.2 μs 。实际上,闪电信号并没有理想的脉冲,它们的振幅会随着信号本身的传输衰减和频率的增加而减弱。因此,对实际的闪电信号,它的时间不确定会大于 0.2 μs 。快电场的采样频率是 2.5 MHz,每个采样点的分辨率是 0.4 μs 。另外,由于观测网络相对较小,在站间距离只有几千米,站点高度值有较大差别(最大相对高度约为 98 m)的情况下,站点位置的误差对定位精度的影响是不能忽略的。为了确定这种站点设置对定位误差的影响,以下分两种情况对 5 次云闪进行对比分析:其一,假定所有测站都在一个平面上,忽略地球曲率及相对高度的影响;其二,考虑测站的相对高度。拟合的结果表明,这两种假定下导致的最大误差约为 0.6 μs 。为了尽可能地消除这种场地误差,在实际的定位过程中,我们将站点的相对高度也考虑进去。因此,在实际定位过程中,综合考虑了各种因素对信号传播的影响,在拟合过程中给定的时间不确定是 0.8 μs 。这对于发生

在测站网络或者附近的闪电,计算得到的误差可能偏大,但对发生在较远距离的闪电,得到的误差可能偏小。

为了更好地了解辐射源定位结果的误差分布情况,我们进行了一个模拟试验。在这个试验中,给定一个辐射源的位置,则其到各个测站的时间可准确知道,然后将服从均方差为 0.8 μs 的高斯分布的随机误差加到精确时间里,利用得到的时间则可以计算得到一个新的辐射点的位置,则计算出来的辐射点与预先给定的辐射点之间的误差可认为是定位误差。这种试验对每个给定的样点至少做 1000 次计算,其平均误差则认为是该样点的误差。模拟试验从测站网络中心开始取样,在东西为 -28 km—28 km,南北为 -20 km—36 km 的区域内进行,取样点之间相差 1 km,并假设 7 个测站都对测量有影响,图 7 为模拟试验的误差分布以及与 5 次云闪定位结果的叠加。由图可知,当闪电发生在测站网络上空或附近时,辐射源的定位误差小于 100 m,辐射源距离测站网络越远,定位误差也越大。从云闪定位结果与模拟试验结果的叠加可知,云闪 IC1 的误差在 1000 m 以下,IC2 的误差在 500 m 以下,其他 3 次云闪的定位误差均小于 100 m。实际的定位误差结果表明,5 次云闪辐射脉冲的平均定位误差分别为 816、223、149、231 和 286 m。从模拟试验与实际定位误差的对比来看,后 3 次云闪的实际定位误

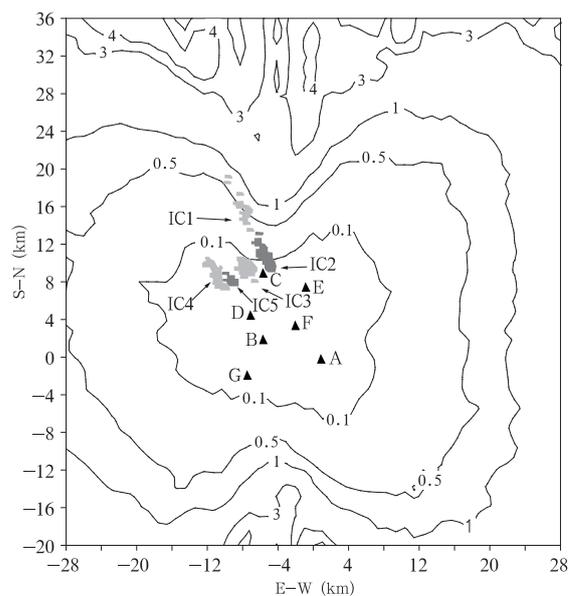


图 7 模拟定位误差与云闪定位结果的叠加

Fig. 7 Simulated location accuracy

差相对偏大,但是差别不是很大。这说明了模拟试验的定位结果在很大程度上能够有效地反映实际定位误差。

5 结论与讨论

本文利用 GPS 同步的多站快电场变化脉冲资料,对甘肃中川地区 2004 年 8 月 20 日一次雷暴过程的 5 次云闪初始阶段的放电特征进行了分析,得到如下初步结论:

(1) 利用多站同步的快电场变化可以对云闪产生的辐射脉冲源进行较好的定位,所得到的闪电放电区域与雷暴的不同发展阶段密切相关。在雷暴发展的比较旺盛阶段,闪电的放电区域较高,对应的离地高度为 3.3—6.4 km(此时对应的雷达回波顶高约 9 km, 35 dBz 回波顶高 7 km);在雷暴开始减弱和消散阶段,闪电的放电高度降低,所分析的最后一个云闪对应的离地高度为 1.1—3.0 km(此时对应的雷达回波顶高 6 km, 35 dBz 回波顶高 3 km)。

(2) 与雷达回波的对比分析发现,云闪初始阶段的辐射脉冲源位置与强回波区具有较好的空间一致性,辐射脉冲源位置分别与 25—50 dBz 的强回波区域相对应。这不仅在一定程度上表明了定位结果的可靠性,而且说明利用快电场组网对闪电进行定位跟踪有可能反映雷暴强中心的发展变化过程,同时也表明了利用快电场组网观测在强对流的监测和预警中有一定的应用潜力。

(3) 定位误差的模拟试验表明:当雷暴距网络较近时,定位误差较小,雷暴距网络中心越远,误差越大。与 5 次云闪的实际定位误差对比表明,模拟试验的定位结果在很大程度上能够有效地反映实际定位误差。这说明了该定位系统对位于探测网络上空或附近的雷电可以进行云内放电过程的较精确的三维定位。

在测站足够多的情况下,利用时差法确定闪电放电源的位置是较好的方法,本文得到的辐射源定位结果与雷达回波有较好的吻合,这不仅证实了定位结果的合理性,而且也说明利用 GPS 同步的快电场变化组网观测对云闪进行探测定位的可行性。然而,本文用来定位的快电场信号属于 VLF/LF 频段,与工作在 VHF 频段的甚高频辐射脉冲系统有所不同,由于两者的工作频段不一样,它不可能像甚高频时间差系统或干涉仪系统那样详细刻画闪电的

放电通道结构,而且利用快电场脉冲定位的误差也要大一些。甚高频定位系统探测的甚高频信号来源于雷电的击穿过程,对应放电的空间尺度较小,而快电场工作频段在几 MHz 以下,所探测的辐射脉冲包含有尺度相对较大的电流传输过程产生的电场变化,可能对应具有一定强度的放电过程。也正由于此,该系统可以克服甚高频定位系统视距传输的不足,对较远距离的闪电,也能够给出合理的二维位置信息。同时,与工作于 VLF/LF 频段的地闪定位系统相比,快电场观测系统不但可以对地闪回击的落地点进行定位,也可以对发生于云内的放电过程的多个辐射脉冲源进行定位,而且所用的仪器具有观测简单、场地要求不高等优点。

值得指出的是,由于本文个例较少,所得到的云闪初始放电特征的广泛代表性还有待于进一步的证实。今后将在提高系统探测灵敏度和分辨率的基础上,对该探测定位网进行进一步的完善和实际误差订正;通过与工作在甚高频频段的时间差定位系统的同步观测,定量研究两种定位系统所反映的雷电物理过程的差异,并结合双偏振多普勒雷达资料,研究雷电与云中动力、微物理和降水结构的相关性,以及利用该网络进行雷电监测预警的可能性。

致谢:感谢所有参加资料收集工作的同志,感谢刘欣生老师、郭昌明老师、王金成、赵中阔和赵阳等,他们提供了非常宝贵的意见和建议。

References

- Feng G, Qie X, Yuan T, et al. 2006. A case study of cloud-to-ground lightning activities in hailstorms under clod eddy synoptic situation. *Acta Meteor Sinica*, 20(4):489-499
- Heavner M J, Harlin J, et al. 2000. Current Los Alamos Sferic Array Studies. Global Atmospherics International Conference, Lighting Detection Conference 2000, Tucson, AZ, 7-8 Nov 2000
- Jackson J D. 1975. *Classical Electrodynamics* (2rd ed). John Wiley & Sons, 848 pp
- Jacobson A R, Heavner M J. 2005. Comparison of narrow bipolar events with ordinary lightning as proxies for severe convection. *Mon Wea Rev*, 133:1144-1154
- Kitagawa N, Brook M. 1960. Acomparision of intracloud and cloud-to-ground discharges. *J Geophys Res*, 65:1189-1201
- Krehbiel P R, Brook M, McCrog R A. 1979. Analysis of the charge structure of lightning discharge to ground. *J Geophys Res*, 82: 2432-2456
- Krehbiel P R, Thomas R J, Rison W, et al. 2000. Lightning mapping

- observations in central Oklahoma. EOS, 21-25
- Liu X, Guo C, Wang C, et al. 1987. The positive electric field under thunderclouds and the change of ground electric field caused by flashes. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 45(4): 500-504
- Qie X, Yu Y, Zhang G, et al. 1998. Initial process during one negative ground lightning discharge in Zhongchuan Area. Plateau Meteor (in Chinese), 17(1): 34-43
- Qie X, Zhang G, Yu Y, et al. 1998. Analysis of the structure of cloud to ground lightning discharge in Zhongchuan Area. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 56(3): 312-322
- Qie X, Zhang Y, Zhang Q. 2006. Characteristics of lightning discharges and electric structure of thunderstorm. Acta Meteor Sinica, 20(2): 244-257
- Qie Xiushu, Zhang Yijun, Zhang Qilin. 2005. Study on the characteristics of lightning discharges and the electric structure of thunderstorm. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 63(5): 498-503
- Shao X, Liu X. 1987. A preliminary analysis of intracloud lightning flashes and lower positive charge of thunderclouds. Plateau Meteor (in Chinese), 6(4): 317-325
- Smith D A, Shao X M, et al. 1999. A distinct class of isolated intracloud lightning discharges and their associated radio emissions. J Geophys Res, 104: 4189-4212
- Smith D A, Eack K B, et al. 2002. The Los Alamos Sferic Array: A research tool for lightning investigations. J Geophys Res, 107: 5-1-5-14
- Suszczynsky D M, Heavner, M J. 2003. Narrow bipolar events as indicators of thunderstorm convective strength. Geophysical Res Lett, 30(17), 1879, doi:10.1029/2003GL017834
- Shao X, Stanley M, Regan A, et al. 2006. Total lightning observations with the new and improved los alamos sferic array (LASA). J Atmos Oceanic Techn, 23(10): 1273-1287
- Weidman C D, Krider E P. 1979. The fine structures of lightning return stroke waveforms. J Geophys Res, 84(C10): 6307-6314
- Wang C, Chen Q, Liu X, et al. 1987. The electric field which produce by positive charge center under the thunderclouds. Plateau Meteor (in Chinese), 6(1): 65-74
- Villanueva Y, Rakov V A, et al. 1994. Microsecond-scale electric field pulses in cloud lightning discharges. J Geophys Res, 99: 14353-14360
- Ye Z, Shao X, Liu X. 1987. The charge distribution and electric field of thunderclouds. Plateau Meteor (in Chinese), 6(3): 234-243
- Zhang Y, Liu X, Xiao Q. 1997. A analysis of characteristics of thunderstorm and artificially triggered lightning in the north and south of China. Plateau Meteor (in Chinese), 16(2): 113-121
- Zhu Baoyou, Tao Shanchang, Ma Ming, et al. 2004. Evaluation of in-cloud lightning discharge parameters from remote electromagnetic fields. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 62(4): 499-503

附中文参考文献

- 刘欣生, 郭昌明, 王才伟等. 1987. 闪电引起的地面电场变化与雷暴云下部的正电荷层. 气象学报, 45(4): 500-504
- 郗秀书, 余晔, 张广庶等. 1998. 中川地区一次负地闪的起始过程研究. 高原气象, 17(1): 34-43
- 郗秀书, 张广庶, 余晔等. 1998. 中川地区云地闪电电结构分析. 气象学报, 56(3): 312-322
- 郗秀书, 张义军, 张其林. 2005. 闪电放电特征和雷暴电荷结构研究. 气象学报, 63(5): 646-658
- 邵选民, 刘欣生. 1987. 云中闪电及云下部正电荷的初步分析. 高原气象, 6(4): 317-325
- 王才伟, 陈倩, 刘欣生等. 1987. 雷暴云下部的正电荷中心产生的电场. 高原气象, 6(1): 65-74
- 叶宗秀, 邵选民, 刘欣生. 1987. 雷暴云的电场及电荷分布. 高原气象, 6(3): 234-243
- 张义军, 刘欣生, 肖庆复. 1997. 中国南北方雷暴及人工触发闪电特性的对比分析. 高原气象, 16(2): 113-121
- 祝宝友, 陶善昌, 马明等. 2004. 用远场辐射场反演云闪放电参数. 气象学报, 62(4): 499-503