

# 云下部正电荷区与负地闪预击穿过程<sup>\* 1</sup>

张义军<sup>1,2</sup> 孟青<sup>1,2</sup> 吕伟涛<sup>1,2</sup> 马明<sup>1,2</sup> 郑栋<sup>1,2</sup> Paul R. Krehbiel<sup>3</sup>  
ZHANG Yijun<sup>1,2</sup> MENG Qing<sup>1,2</sup> LU Weitao<sup>1,2</sup> MA Ming<sup>1,2</sup> ZHENG Dong<sup>1,2</sup> PAUL R Krehbiel<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. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081
  3. New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, New Mexico, USA
1. *Laboratory of Lightning Physics and Protection, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*  
2. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*  
3. *New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, New Mexico, USA*
- 2007-01-31 收稿, 2007-04-06 改回.

**Zhang Yijun, Meng Qing, Lu Weitao, Ma Ming, Zheng Dong and Paul R Krehbiel. 2008. Positive charge region in lower part of thunderstorm and preliminary breakdown process of negative cloud-to-ground lightning. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(2):274–282**

**Abstract** A new lightning locating technology, called Lightning Mapping Array (LMA), has been developed. The system takes the advantage of GPS technology to measure the times of arrival (TOA) of lightning impulsive VHF radiation events at each remote location. The temporal and 3-D spatial development processes of lightning are described by measurements of the system with high time resolution (50 ns) and space precision (50–100 m). The charge structures in thunderstorms and the relationship between the charge structure and lightning discharge processes are revealed. The temporal and spatial characteristics of preliminary breakdown process in negative cloud-to-ground (CG) lightning discharges are analyzed based on the data of lightning VHF radiation events. The effect of the positive charge region in the lower part of thunderstorms on the occurrence of negative CG lightning discharge is discussed. The results indicate that the preliminary breakdown process with longer lasting time of negative CG lightning discharges is an intracloud discharge process between the negative and positive charge regions located in the lower and middle parts of thunderstorms respectively. It initiated from the negative charge region in the middle part and propagated downward. After entered the positive charge region in the lower part, the lightning channel developed horizontally. The characteristics of preliminary breakdown process are consistent with that of inverted intracloud lightning discharges. The stepped leaders were initiated by the K type breakdown which occurred in the last stage of the preliminary breakdown process and penetrated downward through the positive charge region. The existence of positive charge region in the lower part of thunderstorms is the reason why there is a preliminary breakdown process with longer lasting time in thunderstorms before the first return stroke of negative CG lightning discharges take place.

**Key words** Cloud-to-ground lightning, Positive charge region, Preliminary breakdown process

**摘要** 三维雷电观测系统 LMA (Lightning Mapping Array) 是最近发展起来的基于 GPS 时钟同步的闪电 VHF 辐射源到达时间差 (TOA) 定位技术, 能以很高的时间分辨率 (50 ns) 和空间定位精度 (50–100 m) 展现闪电放电发展过程的三维时空分布, 揭示雷暴中电荷结构及其与放电过程的关系。文中利用三维雷电 VHF 辐射源观测资料分析了负地闪预击穿过程的时空分布特征, 讨论了云下部正电荷区对负地闪发生的影响, 其结果表明在首次回击之前存在长时间预击穿过程的负地闪中, 预击穿过程是云中部负电荷区与下部正电荷区之间的一种云内放电过程, 闪电起始于云中部负电荷区, 然后向下发展传输, 进入正电荷区后闪电通道在云下部正电荷区水平发展, 其放电特征与反极性云闪放电一致, 云内放电过程最后阶段的 K 型击穿激发了地闪的梯级先导, 梯级先导穿过云下部正电荷区向下发展传输。云下部正电荷的存在是导致负地闪首次回击之前存

\* 资助课题: 国家自然科学基金项目 (40475002) 和国家重大基础研究项目课题 (2004CB418306)。

作者简介: 张义军, 主要从事大气电学研究。E-mail: zhangyj@cma.gov.cn

在长时间云内预击穿过程的主要原因。

**关键词** 地闪, 正电荷区, 预击穿过程

**中图法分类号** P427.3

## 1 引言

Clarence (1957) 最早利用单站地面电场变化的观测将负地闪分为初始击穿过程、中间阶段以及先导和回击过程等几部分,但随后的地面电场变化观测发现符合这种分类的只是负地闪中的一部分,特别是还发现有些负地闪梯级先导前具有较长时间的电场变化过程(Krehbiel, 1979; Proctor, 1988),因此目前将负地闪梯级先导之前的云内过程一般统称为预击穿过程。由于这一过程发生在云内,受云体的遮挡,对这一过程的观测主要通过地面电场变化的测量和反演以及对闪电击穿过程产生的 VHF 电磁辐射的定位等观测手段。观测结果发现负地闪的预击穿过程持续时间分布在一个很大的范围,从几毫秒到几百毫秒,一般为几十毫秒。Clarence 和 Malan(1957)的观测发现负地闪的首次回击之前的电场变化持续时间可达 200 ms,有 50% 超过 30 ms,10% 超过 120 ms。Kitagawa 和 Brook(1960)在美国新墨西哥的观测发现这一过程的持续时间为 10—200 ms,一般为 30 ms。而 Thomson(1980)的观测结果表明负地闪首次回击之前的电场变化具有较长的持续时间,平均持续时间为 240 ms,有 68% 超过 100 ms。Beasley 等(1982)对不同雷暴的负地闪梯级先导前的电场变化进行了研究并得到统计结果,发现在有些雷暴这一过程具有较长的持续时间,最长达到 484 ms,但在有些雷暴中负地闪首次回击之前则没有表现出明显的电场变化,闪电以梯级先导过程的激发和发展为起始。这些观测说明在不同地区或不同雷暴甚至在雷暴的不同发展阶段产生的负地闪,其云内预击穿过程特性存在一定的差异,这可能与雷暴的电荷分布有关。邵选民、刘欣生(1987)及 Liu Xinsheng 等(1989)观测表明,在中国甘肃地区雷暴云下部经常存在一个大范围的正电荷区,云闪放电主要在中部主负电荷区与其下部的正电荷区之间发生,并通过地面多站电场变化的同步测量对云闪个例的电偶极矩大小及其中心高度进行了反演,其结果反映出雷暴的三极性电荷结构。长期观测还发现在中国甘肃地区大部分负地闪梯级先

导前具有较长的预击穿过程,持续时间可达几百毫秒(张义军等,1993; 邵秀书等,2001)。最近在青藏高原进行的雷电观测同样发现类似的结果(赵阳等,2004)。Krehbiel(1986)分析发现在美国 Florida、New Mexico 以及日本冬季雷暴中,尽管主负电荷区所处的相对高度不同,甚至相差很大,但它们均处于同一温度区。大量观测发现梯级先导的平均传播速度约为  $2 \times 10^5$  m/s (Rakov, et al., 2003),梯级先导的持续时间约为几到几十毫秒。Rakov 和 Uman(1990)的研究结果发现梯级先导持续时间的几何平均值为 35 ms。因此预击穿过程的持续时间应在 100 ms 左右。从快电场变化记录可见在这一过程中有两次较大幅度的电场变化发生。Clarence 和 Malan(1957)分析认为首次回击之前较长时间的预击穿过程发生在云中主负电荷区与云下部正电荷区之间,垂直向下运动,并为首次回击前的梯级先导过程做准备。Krehbiel 等(1979)利用多站地面电场变化观测资料计算了两个具有长时间预击穿过程的负地闪,他们发现在预击穿过程的起始阶段负电荷垂直向下运动,但很快转为水平运动。那么负地闪首次回击前持续时间较长的预击穿过程是否与雷暴云下部正电荷区的存在有关? 目前都还尚未有明确的结论。本文将利用三维雷电观测系统 LMA(Lightning Mapping Array)的观测,对负地闪梯级先导前的长时间预击穿过程的发生、发展时空分布特征进行简要分析,并讨论与云下部正电荷区的关系。

三维雷电观测系统 LMA 是由美国 New Mexico Institute of Mining and Technology 最近发展起来的基于 GPS 时钟同步的闪电 VHF 辐射源到达时间差(TOA)定位技术 LMA(Lightning Mapping Array),能以很高的时间分辨率(50 ns)和空间定位精度(50—100 m)展现闪电放电发展过程的三维时空分布。该系统的主要原理是利用 GPS 系统和时差技术定位雷电的 VHF 辐射源,系统的中心频率为 63 MHz,带宽为 6 MHz。利用这一观测系统,在美国中西部地区对夏季雷暴和雷电进行了综合观测(Krehbiel, 2000),在 2000 年夏季的 STEPS(Severe Thunderstorm Electrification and Precipitation Study) 实验

中, LMA 闪电观测系统共设有 13 个测站, 可以探测 300 km 以内的闪电活动。同时, 利用国家雷电定位系统 NLDN (National Lightning Detection Network) 的资料给出了地闪发生的时间和位置。

## 2 资料及分析

### 2.1 负地闪通道的三维结构

图 1 是 LMA 在 2000 年 6 月 12 日 00:01 (UTC) 观测到的一次负地闪。图中颜色随时间由蓝、绿、黄到红色逐渐变化。图 1a、1b、1c、1d、和 1e 分别为闪电 VHF 辐射源高度随时间的变化(图 1a)、在南北方向上的垂直投影(图 1b)、辐射源数目随高度的直方图分布(图 1c)、平面投影(图 1d)和东西方向上的垂直投影(图 1e), 图中  $\Delta$  为负地闪回击发生的时间和位置, 是由美国国家闪电定位网 (NLDN) 资料得到的。

观测证实闪电 VHF 辐射主要由闪电激发和传输过程中的负极性击穿产生, 正极性击穿过程产生的 VHF 辐射由于非常弱而难以探测到, 因此 LMA 三维闪电观测系统主要探测和定位闪电的负极性击穿产生的 VHF 辐射源, 所以可以很好地描绘雷暴中的正极性电荷区的分布, 同时利用云闪 K 过程和地闪回击间过程的发展传输特性(此过程是在负电荷区从闪电通道的远端向闪电的起始点发展, 有时还穿过闪电起始点进入正电荷区, 并在负电荷区延伸闪电通道), 可以描绘雷暴中的负电荷区 (Shao, 1996; Hamlin, 2003)。因此根据闪电 VHF 辐射源的分布, 特别是单个闪电的时空分布, 可以反映出雷暴中参与闪电放电的电荷区, 进而描绘出雷暴的主要电荷结构。

从图 1 可见, 此次负地闪持续时间约 1.6 s, 共产生 3 次回击, 首次回击发生在距闪电开始之后约 500 ms, 具有较长时间的云内预击穿过程。闪电起始于 9 km 高度, 垂直向下发展到 4 km, 这与 Clarence 和 Malan (1957) 以及 Krehbiel 等 (1979) 利用地面电场变化观测得到的结果是一致的。随后在 4 km 高度上向西北方向水平发展了约 23 km, 这一阶段大约持续了 200 ms, 其传输速度约为  $1.1 \times 10^5$  m/s, 闪电辐射点主要分布在 4 km 高度, 在 8—9 km 高度只有少量的辐射点, 表明雷暴中负电荷分布在 8—9 km 高度, 而下部正电荷区位于 4 km 高度。但随后梯级先导从 8 km 高度开始, 沿以前的

通道穿过闪电的起始区域直接向下发展到地(图 1 中深绿色点), 产生了首次回击, 并在首次回击之后还有两次继后回击发生, 而在闪电的最后阶段还有一次先导过程向下发生, 但没有在 NLDN 的资料中发现记录, 这一方面可能是一次企图先导, 即先导过程没有接地产生回击, 另一方面可能是 NLDN 系统漏测了这一回击。在梯级先导之后的闪电特征与一般负地闪的特征是一致的。从时空发展特性来看, 梯级先导之前的云内过程与反极性云闪放电过程一致, 是发生在云中下部负电荷区与下部正电荷区之间的反极性的云闪放电。Zhang Yijun 等 (2002) 分析结果表明在具有三极性电荷结构的雷暴云中, 云内放电不仅发生于上部正电荷区与中部主负电荷区之间, 还存在着反极性放电过程。它起始于中部负电荷区, 向下传输到下部正电荷区后水平发展。除极性相反外, 其特性与发生在上部正电荷区与中部主负电荷区的闪电一致, 进一步证实雷暴下部正电荷区的存在并且参与放电过程。因此在负地闪预击穿过程中云下部正电荷部分被中和。值得注意的是在梯级先导之前, 闪电通道在下部正电荷区停止发展之后, 在负电荷区不断有闪电辐射点出现(图 1a 中在 42.5 s 之后与首次回击之间), 并向闪电的起始区发展传输, 延伸了闪电通道, 这是由 K 型击穿引起的, 但大部分 K 击穿都中止于闪电的起始区, 直到梯级先导激发。所以梯级先导应是由一次 K 型击穿所激发并沿原先的通道穿过闪电的起始区持续向下传输到地面。

图 2 是另外一次负地闪的观测结果。这一闪电发生在图 1 所示闪电 2 min 之前, 但它发生在另一个雷暴单体中。从图可见首次回击之前的云内放电过程持续了约 1 s。与图 1 一样, 闪电首先从 6—7 km 高度向下发展, 在回击之前闪电辐射点主要发生在 3—5 km 高度, 闪电通道在这一高度上不断地向各个方向水平发展, 根据闪电辐射源的分布特性可知正电荷区分布于这一高度上, 而负电荷位于 6—7 km 高度。负地闪中长时间的预击穿过程是与云下部正电荷区相联系的。同样梯级先导之前存在 K 型击穿过程, 梯级先导在预击穿过程之后, 从负电荷区激发沿以前的通道穿过闪电的起始区向下发展传输, 接地后产生首次回击, 首次回击之后还有一次继后回击发生。从整体来看闪电同样包含着两部分, 首次回击之前的预击穿过程是发生在云中下部负电荷区与下部正电荷区之间的云内放电过程, 表现

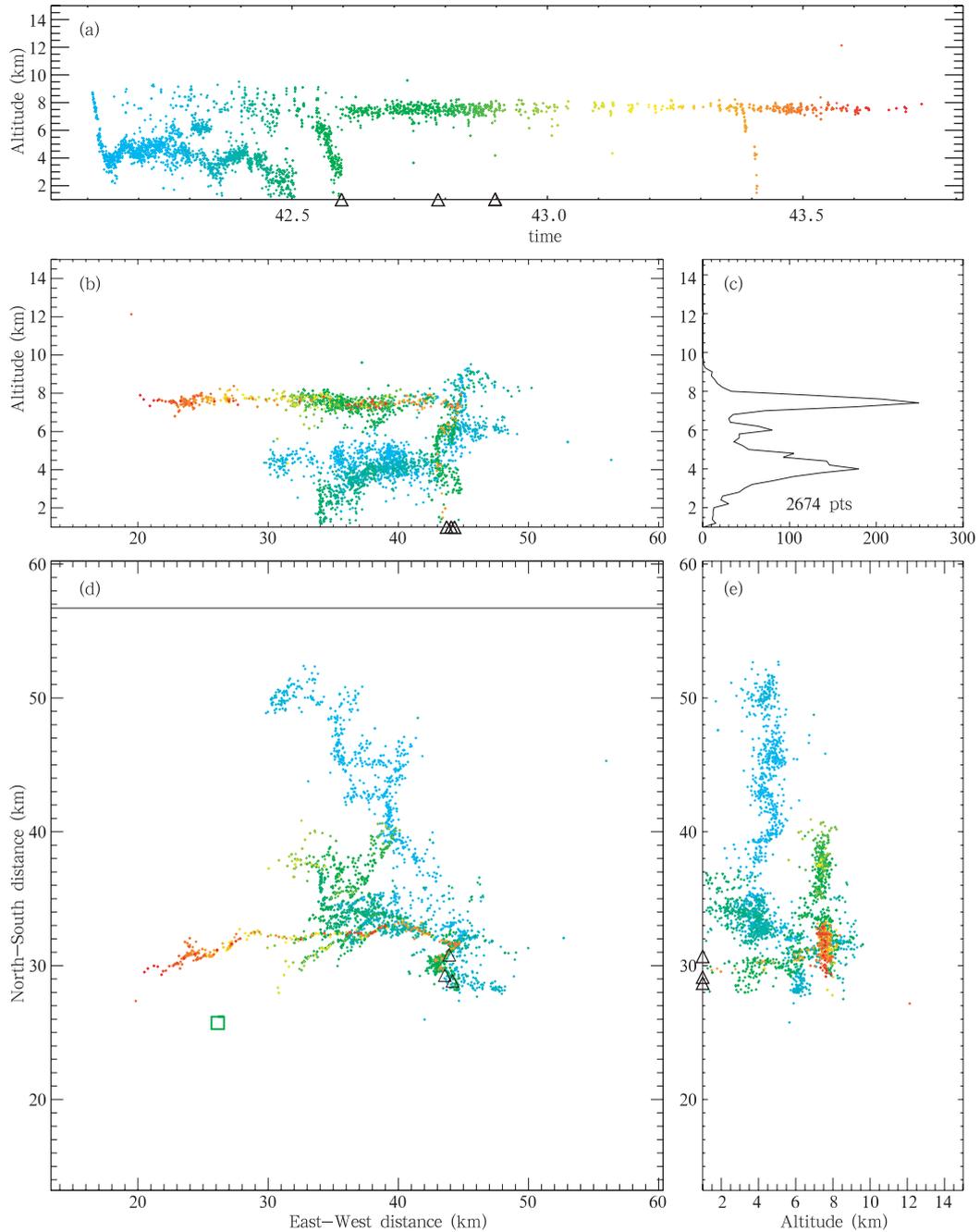


图 1 2000 年 6 月 12 日 00:01 UTC 一次负地闪三维结构分布

(颜色随时间由蓝、绿、黄到红色逐渐变化。a、b、c、d、和 e 分别表示闪电 VHF 辐射源高度随时间的变化(a)、在南北方向上的立面投影(b)、辐射源数目(N)随高度的直方图分布(c)、平面投影(d)和在东西方向上的立面投影(e)。图中小方块表示测站位置,△表示负地闪发生的时间和位置(下同))

Fig.1 3D distribution of radiation events of a negative CG lightning at 00:01 UTC June 12, 2000 (The changes of colors from blue, green, yellow to red in Figures indicate the variations of VHF radiation events with time. Different panels show (a) height-time plot, (b) north-south vertical projection, (c) height distribution of the number (N) of radiation events, (d) plan view, (e) east-west vertical projection of the lightning radiation sources, respectively. △ indicate the time and location of the occurrence of negative CG lightning. □ shows the location of measurement station)

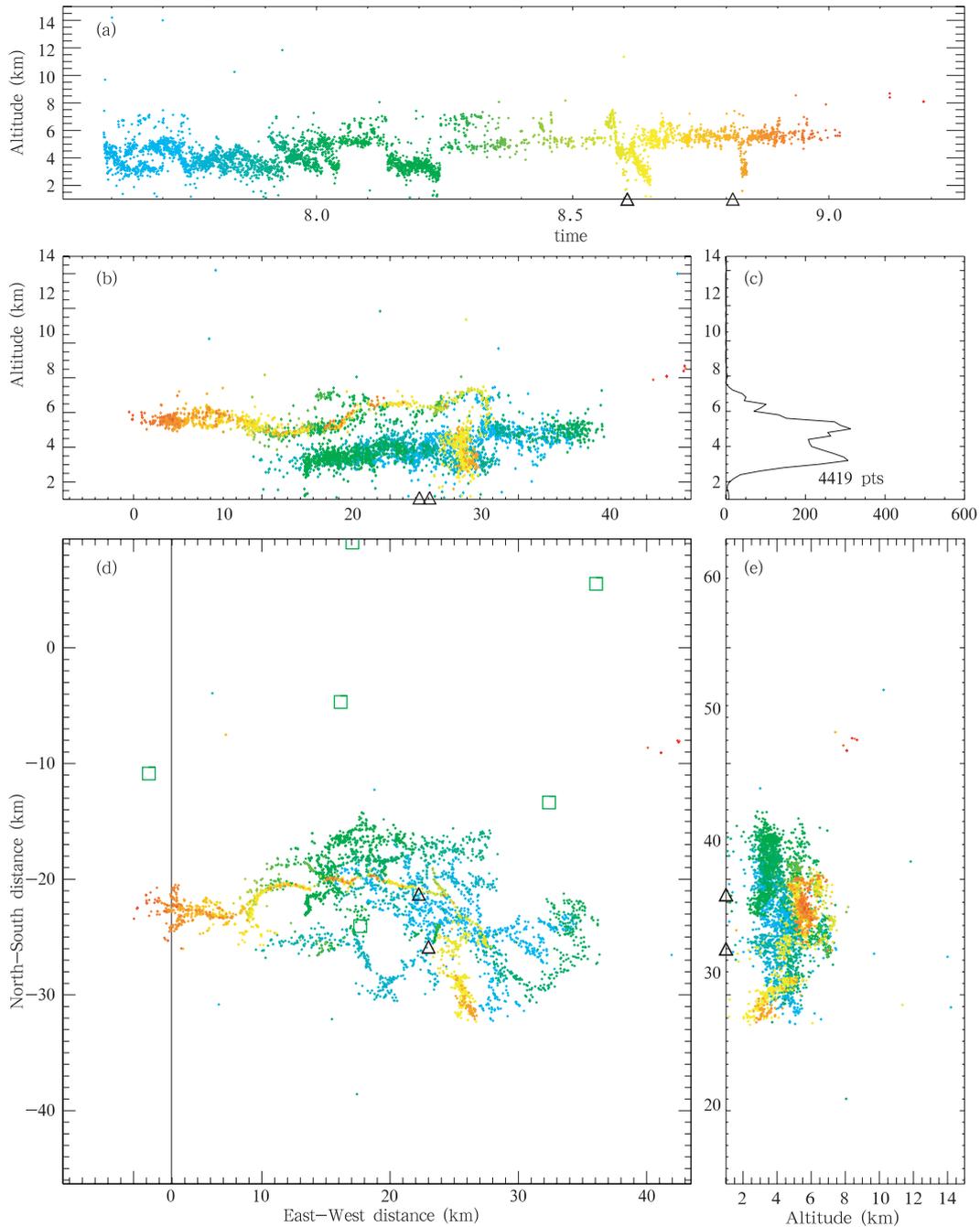


图2 2000年6月11日23:58 UTC一次负地闪三维结构分布(其他同图1)

Fig. 2 3D distribution of radiation events of a negative CG lightning at 23:58 UTC June 11, 2000, with the same convention as Fig. 1

出反极性云闪放电特征,而从梯级先导开始则表现为典型的负地闪特征。

## 2.2 云下部正电荷的影响

图3和图4分别是2000年7月10日两次负地闪的观测结果。这两次闪电发生在雷暴的同一区域,相隔约10 min。从图3可见闪电开始从6 km

高度激发并直接向下发展,尽管第1次企图先导没有接地,但向下发展到接近2 km高度,随后第2次先导重新开始从7 km高度向下发展并接地产生首次回击,整个闪电过程共发生了5次回击过程。在回击之间和闪电的最后阶段,通过K击穿过程闪电通道在负电荷区向西北方向水平延伸了约40 km,

同时也反映出云中负电荷区从闪电的起始区向西北逐渐有 8 km 高度降低到 5 km 左右。这种负地闪的发生发展过程在大部分雷暴中是典型的,特别是首次回击之前的预击穿过程的持续时间很短,闪电由负电荷区直接激发并向上传输。但由图 4 可见,10 min 之后,在同一区域发生的另一次负地闪其特征却不尽相同,但与图 1 和图 2 中的闪电特征一样。

这次负地闪共有两次回击发生,闪电开始从 6 km 高度垂直向下发展,到 5 km 高度之后水平向东发展了约 5 km,随后闪电通道一分为二并分别向北和南发展了约 15 和 5 km,这一阶段持续了约 150 ms,闪电辐射点多分布在 4—5 km 高度,之后是梯级先导在闪电的起始区域从 7 km 高度向下发展接地后产生首次回击,随后的过程与一般负地闪的发展特

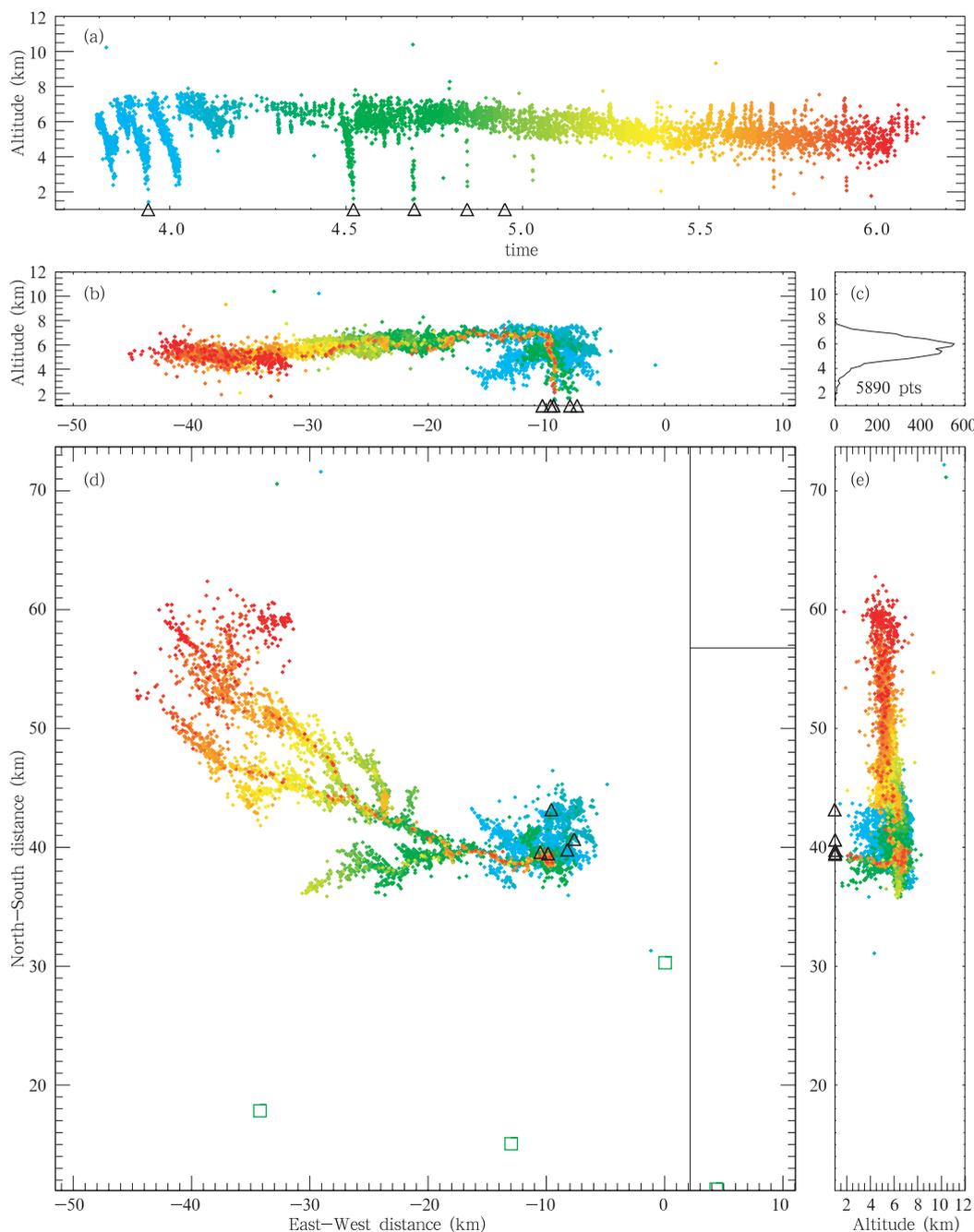


图 3 2000 年 7 月 10 日 09:21 UTC 负地闪三维结构分布(其他同图 1)  
 Fig. 3 3D distribution of radiation events of a negative CG lightning at 09:21 UTC  
 July 10, 2000, with the same convention as Fig. 1

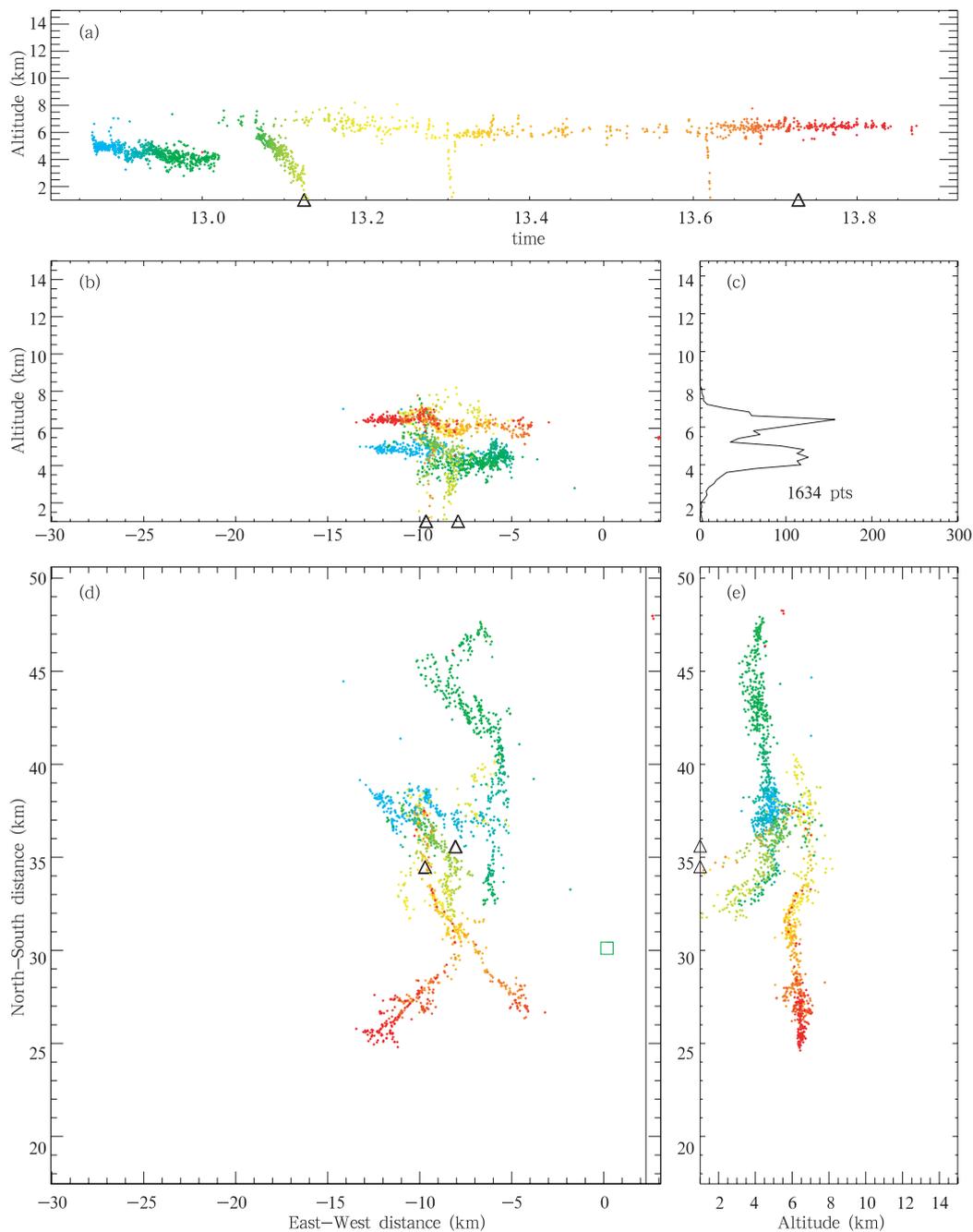


图4 2000年7月10日09:32(UT)一次负地闪三维结构分布(其他同图1)  
 Fig. 4 3D distribution of radiation events of a negative CG lightning at 09:32 UTC  
 July 10, 2000, with the same convention as Fig. 1

征一致,但首次回击之前闪电在云中发展了约 200 ms。比较图 3 和图 4 可知,这两次闪电特征的主要差异是首次回击之前的预击穿过程发展传输的不同,这可能主要是由于在 4—5 km 高度上存在的正电荷区所致。在图 3 所示的闪电发生时,闪电直接由云中负电荷区激发并传输,没有在云下部正电荷

区水平扩展,所以预击穿过程持续时间很短。但图 4 所示的闪电,在负电荷区激发后先垂直向下发展,到达云下部正电荷区之后转为水平发展,从而产生了较长时间的预击穿过程。这可能是随着雷暴的发展和起电的增强,云下部正电荷的浓度和分布范围逐渐增大,对云中闪电的发生发展的影响也逐渐增

大,从而影响了图 4 所示的闪电的发生发展特性。但要得到明确的结论还需要更多的观测资料和深入地分析。

### 3 结论和讨论

通过对负地闪三维时空分布特征的分析,可以得到以下结论:在首次回击之前具有长时间云内预击穿过程的负地闪中,预击穿过程是云中下部负电荷区与下部正电荷区之间的一种云内放电过程,其放电特征与反极性云闪放电一致,在此期间,闪电通道主要在云下部正电荷区水平发展,但并不是一次独立的云闪放电。梯级先路由 K 型击穿激发并沿原来的闪电通道穿过闪电的起始区向下发展。云下部正电荷的存在是导致负地闪长时间云内过程的主要原因。

大部分云闪放电是与地闪的发生没有直接关系的,但从以上的分析可见,对具有较长时间云内预击穿过程的负地闪,云内预击穿过程是与随后梯级先导的激发联系在一起的,从云内放电结束到梯级先导的激发仍有一些辐射点在负电荷区发生(图 1、2 和 4)。

Krehbiel 等(1979)利用 8 站的地面电场变化测量给出了两个负地闪梯级先超前云内过程的特性,结果发现这一过程是一些连续的击穿过程,并在水平方向上延伸,在两次闪电中分别有效地传输了 2 C 和 3.6 C 的负电荷。Rhodes 和 Krehbiel(1989)利用干涉仪观测发现,在一个单闪击地闪中,梯级先前的预击穿过程持续了约 100 ms,干涉仪的观测给出的这一期间闪电击穿图像表明先后有 3 个不同方向的水平击穿,而最后一个激发了梯级先导。Richard 等(1986)以及 Proctor 等(1988)的观测也发现有时地闪的发生仅是大云闪中一个小分支发展到了地面。由于观测手段的限制,这些观测尽管揭示了负地闪首次回击之前的云内放电过程,但没有揭示出云下部正电荷的影响,本文的分析结果进一步支持了这些观测结果,同时反映了云下部正电荷对负地闪放电特征的影响,但这种影响的详细物理过程还有待于进一步观测和理论研究。

值得注意的是在北京地区首次回击之前具有较长时间云内过程的负地闪的比例较少(大约 10%),但在中国西北地区和青藏高原地区由于电荷结构的独特性(张义军等, 2000),这种闪电的比例较高(鄒

秀书等, 2005),同时观测还发现在中国西北地区的负地闪中,不仅负地闪回击之前的预击穿过程较长,在回击之后有时也出现持续时间较长的云内放电过程。鄒秀书等(2003)利用地面电场变化测量,结合高速光学观测资料对一次个例进行了分析,发现回击后的云内放电过程发生于云中下部负电荷与下部正电荷区之间,是反极性云内放电过程。从高速摄像记录可见放电通道呈双层结构特征,放电从云中下部负电荷区和下部正电荷区之间始发,并同时向上、下两个方向双向传输。当传输到正、负电荷区时,便形成了近乎垂直的主放电通道,然后在下部正电荷区以多分叉的形式水平扩展通道,下部的水平扩展停止后,主通道的上部开始出现水平扩展,并同时伴随有向上的发展分量,与反极性云闪放电过程特性是一致的。这一放电过程从回击后 20 ms 开始发生,持续时间约为 136 ms,所以它应该是整个闪电过程的一部分,同时进一步说明云下部正电荷区的存在,并影响着雷暴中闪电的放电过程以及雷电特征。观测还发现这一负地闪回击之前的预击穿过程的持续时间也较长,约为 90 ms,高速摄像也记录到了明显的云内发光,但由于云体的遮挡,闪电通道的发展特征不能清楚地表现,所以回击之后的云内放电过程是否与回击之前的云内放电过程特性一致还有待于进一步分析研究。

尽管从以上分析说明了负地闪中较长时间预击穿过程是云中下部负电荷区与云下部正电荷区之间的放电过程,放电通道在正电荷区水平延伸,但云下部正电荷区对负地闪的发生是否具有一定的影响?张义军等(Zhang Yijun, et al., 2004)对青藏高原雷暴放电特征分析发现,在青藏高原云闪主要发生在云中下部负电荷区与云下部正电荷区之间,是反极性云闪,云下部存在较大范围的正电荷区,地闪较少发生且仅在雷暴发展的后期发生。这在一定程度上反映出云下部正电荷区对地闪的发生具有一定的影响,但仍需要进一步深入研究才能得到明确的结论。

### References

- Beasley W H, Uman M A, Rustan P L. 1982. Electric fields preceding cloud-to-ground lightning flashes, *J Geophys Res*, 87: 4883-4902
- Clarence N D, Malan D J. 1957. Preliminary discharge processes in lightning flashes to ground. *Q J R Meteorol Soc*, 83:161-172
- Hamlin T, Krehbiel P R, Thomas R J, et al. 2003. Electrical struc-

- ture and storm severity inferred by 3-D lightning mapping observations during STEPS//Proceedings of 12th International Conference on Atmospheric Electricity. Versailles, France, 189-192
- Kitagawa N, Brook M. 1960. A comparison of intracloud and cloud-to-ground lightning discharges. *J Geophys Res*, 65: 1189-1201
- Krehbiel P R, Brook M, McCrory R A. 1979. An analysis of the charge structure of lightning discharges to ground. *J Geophys Res*, 84: 2432-2456
- Krehbiel P R. 1986. The charge structure of thunderstorms// *The Earth's Electrical Environment*. Washington D C: National Acad. Press, 90-113
- Krehbiel P, Thomas R, Rison W, et al. 2000. Lightning mapping observations in central Oklahoma. *EOS*, 21-25
- Liu Xinsheng, Ye Zongxiu, Shao Xuanmin, et al. 1989. Intracloud lightning discharges in the lower part of thundercloud. *Acta Meteor Sinica*, 3: 212-2
- Proctor D E, Uytendogaardt R, Meredith B M. 1988. VHF radio pictures of lightning flashes to ground. *J Geophys Res*, 93: 12683-12727
- 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): 646-658
- Qie Xiushu, Yu Ye, Zhang Cuihua, et al. 2001. Statistical analysis of cloud-to-ground lightning in inland of China. *Plateau Meteor (in Chinese)*, 20(4): 395-401
- Qie Xiushu, Zhang Guangshu, Kong Xiangzhen, et al. 2003. Observation study on characteristics of lightning in east of Tibet. *Plateau Meteor (in Chinese)*, 22(3): 209-216
- Rakov V A, Uman M A. 1990. Waveforms of first and subsequent leaders in negative lightning flashes. *J Geophys Res*, 95: 16561-16577
- Rakov V A, Uman M A. 2003. *Lightning physics and effects*. Cambridge University Press, 123pp
- Rhodes C, Krehbiel P R. 1989. Interferometric observations of a single stroke cloud-to-ground flash. *Geophys Res Lett*, 16: 1169-1172
- Richard P, Delannoy A, Labaune G, et al. 1986. Results of spatial and temporal characterization of the VHF-UHF radiation of lightning. *J Geophys Res*, 91: 1248-1260
- Shao X M, Krehbiel P R. 1996. The spatial and temporal development of intracloud lightning. *J Geophys Res*, 101: 26641-26668
- Shao Xuanmin, Liu Xinsheng. 1987. Preliminary analysis of intracloud lightning and positive charge region in lower part of cloud. *Plateau Meteor (in Chinese)*, 6: 317-325
- Thomson E M. 1980. Characteristics of Port Moresby ground flashes. *J Geophys Res*, 85: 1027-1036
- Zhang Yijun, Dong Wansheng, Zhao Yang, et al. 2004. Study of charge structure and radiation characteristic of intracloud discharge in thunderstorms of Qinghai-Tibet. *Science in China (D)*, 47: 108-114
- Zhang Yijun, Krehbiel P R, Liu Xinsheng. 2002. Polarity inverted intracloud discharges and electric charge structure of thunderstorm. *Chinese Sci Bull*, 47(20): 1725-1729
- Zhang Yijun, Yan Muhong, Liu Xinsheng. 1993. Theoretics analysis of electrical field waveform produced by lightning discharge. *J Appl Meteor Sci (in Chinese)*, 4(2): 185-191
- Zhang Yijun, Yan Muhong, Zhang Cuihua, et al. 2000. Simulating calculation of charge structure in thunderstorm for different arrears. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 58(5): 617-627
- Zhao Yang, Zhang Yijun, Dong Wansheng, et al. 2004. Preliminary analysis of characteristics of lightning in Naqu of Tibet. *Chinese J Geophysics (in Chinese)*, 47(3): 405-410

#### 附中文参考文献

- 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: 317-325
- 鄯秀书, 余晔, 张翠华等. 2001. 中国内陆高原闪电特征的统计分析. *高原气象*, 20(4): 395-401
- 鄯秀书, 张广庶, 孔祥贞等. 2003. 青藏高原东北部地区夏季雷电特征的观测研究. *高原气象*, 22(3): 209-216
- 鄯秀书, 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
- 张义军, 言穆弘, 刘欣生. 1993. 闪电先导静电场波形理论分析. *应用气象学报*, 4(2): 185-191
- 张义军, 言穆弘, 张翠华等. 2000. 不同地区雷暴电荷结构的模式计算. *气象学报*, 58(5): 617-627
- 赵阳, 张义军, 董万胜等. 2004. 青藏高原那曲地区雷电特征初步分析. *地球物理学报*, 47(3): 405-410