



论文

基于时差法三维定位系统对闪电放电过程的观测研究

张广庶^{①*}, 王彦辉^①, 郝秀书^②, 张彤^①, 赵玉祥^{①③}, 李亚珺^①, 曹冬杰^①^① 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所西部气候环境与灾害实验室, 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;^③ 天水师范学院物理系, 天水 741001

* E-mail: zhanggs@lzb.ac.cn

收稿日期: 2009-04-30; 接受日期: 2009-11-22

国家自然科学基金(批准号: 40775004)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-YW-206-2)和公益性行业科研专项(编号: GYHY(QX)2007622)资助

摘要 系统介绍了自行研制的基于 GPS 同步和时差法定位技术的闪电 VHF 辐射源三维定位系统以及山东北部地区闪电过程同步观测分析, 成功获得了雷暴中闪电通道辐射源三维时空发展物理图像. 并结合地面的快电场变化资料, 对典型负地闪、正地闪和云闪放电通道的三维时空演变过程进行了分析, 结果表明, 正、负地闪激发传输过程不同, 典型负地闪的预击穿过程发展速度约为 5.2×10^4 m/s, 被初始负击穿引发的向下梯级先导传输过程发展速度约为 1.3×10^5 m/s; 正地闪初始阶段也是激发负流光传输, 以优势水平方向在正电荷区内传输, 并为始发点积累正电荷, 从而触发向下正流光传输. 重点分析了一次由双极性窄脉冲事件(NBP)引发的云内闪电三维放电过程, 该脉冲发生在约 10.5 km 的高度上即上部正电荷区域内, 同时引发云内放电通道水平向周围扩展, 产生大量击穿辐射源, 双极性窄脉冲辐射峰值强度值高达 16.7 kW, 而普通闪电辐射源功率一般在 100 mW~500 W 范围内. 与经典云闪完全不同, 此类新型云闪及其三维传输过程在国内第一次被发现. 文章还讨论了其可能的触发机制.

关键词时差法
闪电三维定位系统
放电过程
双极性窄脉冲
新型云闪

实现闪电辐射源三维高分辨率时空定位是精细研究闪电放电过程、雷暴电荷结构及其形成机理的新型手段. 闪电区分为地闪和云闪, 由于地闪常常引起严重灾害, 人们对地闪关注较多, 地闪定位系统和 VHF 干涉仪定位系统(二维)的应用, 在闪电定位技术以及地闪机理研究方面取得了很多有意义的结果^[1-3], 近年来雷电探测技术已向精细化方向进展, 在

LDAR^[4]基础上, 美国(New Mexico Institute of Mining and Technology)科学家发展了基于 GPS 系统的闪电 VHF 辐射源到达时间差(TOA)定位系统(LMA), 研究了闪电 VHF 辐射源的三维时空演变过程^[5-7], 张义军等^[8-11]也利用该 LMA 系统的资料, 揭示了雷暴正常三极性电荷结构特点并指出, 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. 祝保友和陶善昌等^[12]利用自行研制的观测系统对雷暴云中产生的双极性窄脉冲事件进行了统计分析. Shao等^[13]和郅秀书等^[14]利用闪电在低频频段的TOA组网观测对雷电放电特征进行了研究. 但迄今为止, 国内尚缺乏类似于LMA的定位系统. 从而无法对雷暴电荷结构及形成机理做更精细的研究. 本文介绍了我们自行研制的具有高时空分辨率的闪电VHF辐射源三维定位系统, 以及观测分析了我国雷暴的地闪和云闪放电的三维时空演变过程的全景图像, 并对其发展特征和闪电强放电的VHF辐射峰值强度进行了详细讨论, 初步揭示了闪电放电通道及云中电荷区分布的三维时空结构, 正、负地闪的不同放电机理, 尤其是讨论了具有起始双极性窄脉冲云闪的结构和可能机理.

1 野外实验场地及观测仪器

2007年6~8月期间在山东滨州地区进行了雷电综合观测实验, 以中心站(沾化横店)为原点, 在其辐射方向均匀分布建立了6个观测子站, 中心站西北方向550 m处建有人工引发雷电实验场(图1). 实验区域东靠渤海湾(约50 km), 海拔高度5~10 m, 半径80 km区域内地势比较平坦. 实验区处于南北天气系统的交汇处, 夏季常有十分强烈的雷暴系统过境. 每个测站安装有用于闪电辐射脉冲三维定位的闪电VHF

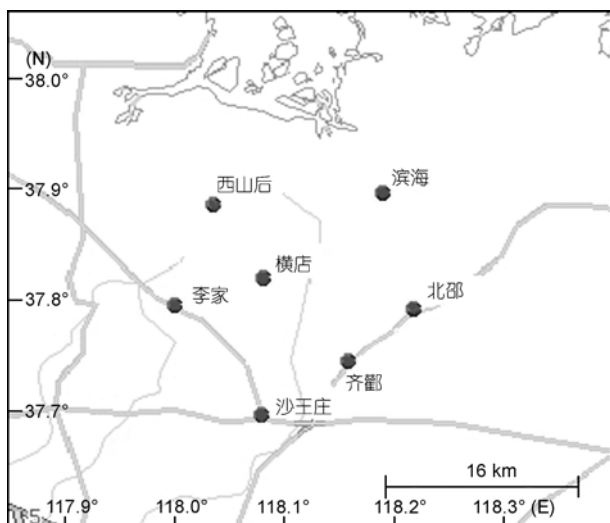


图1 测站分布示意图

中心站横店和相应的6个子站

辐射源到达时间差(TOA)定位系统(简称LLR)和GPS同步的高精度时钟(± 25 ns), 以及用于闪电快电场变化测量的宽带电场变化测量仪(带宽0~10 MHz, 时间常数100 μ s, 动态范围 ± 3.5 V)、快电场测量仪(带宽0~5 MHz, 时间常数1 ms, 动态范围 ± 10 V)、慢电场测量仪(带宽0~2 MHz, 时间常数6 s, 动态范围 ± 10 V)和大气平均电场仪(± 50 kV/m), 这些仪器获得模拟信号并通过数字化A/D板卡转换后送入PC微机同步记录. 中心站另安装有高速摄像机(100000 幅/s)、云向上放电拍摄装置、闪电VHF窄带干涉仪系统等. 7个LLR用无线宽带接入系统连接组成无线同步测量网络, 数据采集可由中心站控制或自动运行. 本文分析以电场负向变化时对应头顶正电荷减少的假定.

2 辐射源三维时空定位原理

2.1 系统硬件实现原理

闪电VHF辐射源三维定位系统由7个探测子站组成, 如图1所示. 每个站同步接收闪电放电时产生的VHF电磁辐射的脉冲峰值信号, 如图2所示. 接收机的中心频率270 MHz, 3 dB带宽6 MHz, 由于采用了对数放大器, 信号的动态范围达100 dB. 当辐射峰值超过噪音电平阈值时, 以25 μ s的时间间隔(窗口)获取最大峰值信号, 同时记录它的强度和时间, 峰值信号时间的分辨率为50 ns (20 MHz A/D转换器), 每个站的40 MHz高精度时钟和GPS接收机的1PPS脉冲上升沿同步并被校准, 经二分频输出的20 MHz基准信号作为A/D转换器的采样时钟. 利用7个子站同步确定的峰值到达的绝对时间, 对其闪电辐射源进行三维时空定位. 系统用25 μ s窗口处理一次峰值事件, 每秒最高能定位处理40000个辐射源(实际定位辐射源数目根据各测站可识别的孤立脉冲数多少而有所变化), 从而可以详细描绘闪电放电全过程的三维图像.

2.2 系统实现定位方法

闪电击穿产生的辐射脉冲峰到达子站*i*的时间 t_i 与测站间距离有以下关系式:

$$t_i = t + \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}}{c}, \quad (1)$$

其中 t 是辐射源在 (x, y, z) 位置的时间, (x_i, y_i, z_i) 是第*i*

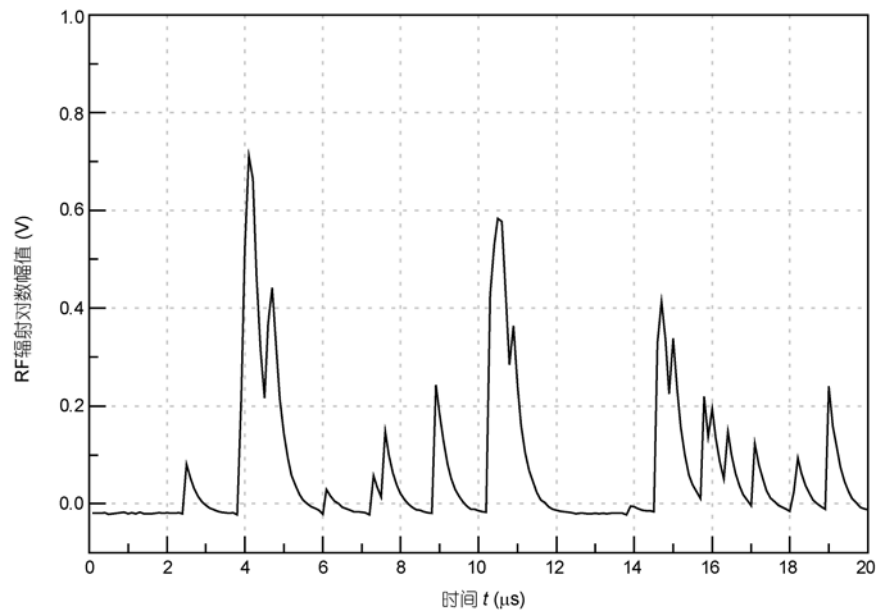


图2 LLR系统探测的闪电辐射脉冲波形扩展图

个测站的位置坐标, t_i 为辐射脉冲到达第 i 测站的时间, c 是光速, 如图3所示.

利用6个以上测站测量的到达时间 t_i 可以得到6个以上的形式如(1)式的方程, 组成非线性方程组. 求解 x, y, z, t 的值应当使测量值 t_i 和由方程 (1) 给出的值 $t_i = f(x_i, y_i, z_i)$ 之间的偏差极小, 这里采用非线性最小二乘拟合方法, 对该方程中参数 (x, y, z, t) 予以拟合, 确定函数 t_i 的参数 (x, y, z, t) 的数值, 使 x^2 取极小值,

$$x^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(t_i^{\text{obs}} - t_i^{\text{fit}})^2}{\Delta t_{\text{rms}}^2}, \quad (2)$$

x^2 为拟合优度, 用于衡量所求的解与实际测量的到达时间的近似程度, 通过不断的迭代求解出一组 $(x, y, z,$

$t)$, 并使其最接近于测量结果, 就可以得到辐射源的三维空间位置.

2.3 误差估计

我们采用简单几何方法^[15]估计误差, 假定辐射源在两测站之间的基线上, 辐射源平面距离的定位误差相当于到达时间差值标准偏差的一半所对应的距离误差, 高度误差同辐射源与测站间的距离有关, 当辐射源位于测站正上方时高度误差最小, 高度误差随辐射源远离测站而增大, 可分为网内和网外来估算本系统的误差, 网内及网络附近有

$$\Delta d \approx \frac{1}{\sqrt{2}} c \Delta t, \quad \Delta z \approx c \Delta t \left(\frac{d+r}{z} \right), \quad (3)$$

其中 Δd 是平面误差, Δt 是每个测站的时间均方根误差, d 是最近测站到辐射源正下方的平面距离, r 是最近测站到辐射源的距离, z 是辐射源相对网络平面的高度, Δz 是高度误差.

由于系统采用高精度 GPS 的 1PPS 脉冲同步 40 MHz 时钟, 存在同步误差, 即 GPS 的 1PPS 定时误差 (精度小于 12 ns, 6σ 平均), 单个测站总合均方根误差约为 18 ns. A/D 采样周期为 50 ns, 因为 A/D 在转换过程中存在量化误差^[16], 所以有 $50/\sqrt{12} \approx 14.1$ ns 的均方根误差, 再加上触发等误差等, 估计系统最大时间误差约为 50 ns, 用公式(3)计算得出, 网内及网络

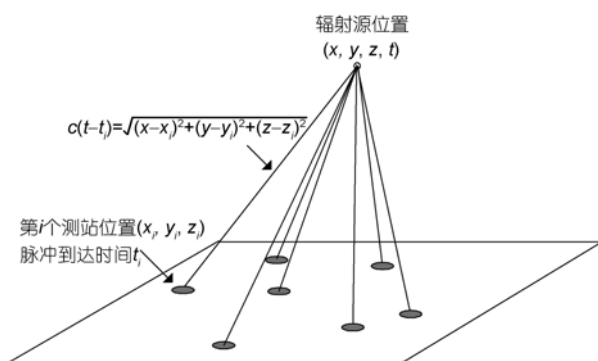


图3 时差定位(TOA)原理图

附近(公式适用于距测站网络以外 10 km 左右的范围内), 在闪电通常发生高度 4~15 km 范围内, 水平误差不超过 11 m, 高度误差一般是水平误差的 2~3 倍. 随着辐射源高度的降低, 高度误差会有细微的增大. 同时网外有

$$\Delta r = \begin{cases} 8\left(\frac{r}{D}\right)\Delta y, & \Delta y = \left(\frac{r}{D}\right)c\Delta T, \\ 8\left(\frac{z}{D}\right)\Delta z, & \Delta z = \left(\frac{r^2}{Dz}\right)c\Delta T, \end{cases} \quad \Delta T \approx \sqrt{2}\Delta t. \quad (4)$$

这里 r 是中心测站到辐射源的距离, D 是网络模型的直径, z 是辐射源相对网络平面的高度, ΔT 是两个测站之间的接收时间误差, Δt 是每个测站的时间均方根误差. 计算表明, 在约 100 km 范围内水平误差典型值为 100 m, 垂直误差在 300 m 以下, 随着距离增加误差增大.

根据实验室内系统同步接收脉冲信号标定测试, 采用分辨率 25 ns 时钟计数, 按统计结果来看, 到达时间误差一般也在 50 ns. 按照光速传播速度, 辐射脉冲信号到达各接收天线的误差一般在 50 m 以下(平面). 进一步的野外时空标定实验及详尽的误差分析将另文撰述.

3 资料分析

3.1 负极性地闪

图 4(A)是 2007 年 7 月 9 日 23: 55: 40 时刻(北京时)一次负地闪放电过程的三维时空结构, 图中绿色正方形是测站位置, 辐射源的颜色从蓝色到紫色逐步变化指示闪电辐射源随时间演变过程. 此次地闪发生在距探测网络中心东南约 30 km 处, 由图 4(B)快电场变化波形显示, 这次负地闪只有一次回击, 持续时间约 250 ms. 分析图 4(A)可见, 闪电在云内 4.5 km 高度处开始激发, 电场呈现正向变化并伴随大幅度的正极性脉冲发生, 表明初始激发是向下发展负极性击穿过程, 闪电辐射源先在起始区以倾斜方向向下向周围传播, 辐射点比较密集, 当击穿过程发展到 3.5 km 高度以下, 辐射源开始快速垂直向下发展, 引发了梯级先导过程, 先导接地点时间为 23:55:40.5269(与山东地闪定位系统(DF)的记录结果一致). 图 4 中还可以看到梯级先导向地面行进期间, 同时在闪电初始激发区还有新的辐射源不断发生,

回击发生后在通道的顶端和始发区周围引发了新的闪电通道向远处发展. 以辐射源快速垂直向下传输为负先导的开始点, 本次负地闪先导前的预击穿过程持续时间约 19 ms(3.5 km 高度以上), 梯级先导过程持续时间约 26 ms(3.5 km 高度以下), 预击穿过程发展速度约为 5.2×10^4 m/s, 梯级先导过程发展速度约为 1.3×10^5 m/s, 与 Shao 等^[1~3]观测结果基本一致. 这次负地闪的预击穿过程主要以负极性击穿为主, 这个阶段的电场变化波形也以正极性脉冲居多, 但也可以看到一些负极性的脉冲发生, 由此表明在以负极性击穿为主的预击穿过程中, 也可能同时存在正击穿过程.

3.2 正极性地闪

图 5(A)是一次正极性地闪放电过程的三维时空结构图, 它只有一次回击, 发生在 2007 年 7 月 11 日 11 时 01 分 49 秒(北京时), 根据地面电场记录, 可以确定该雷暴为三极性电荷结构. 由东西立面图和平面投影看出, 闪电起始于 4 km 高度负电荷区域, 先朝南偏西方向发展, 10 ms 后向上发展到 6 km 高度, 深入到正电荷区域, 产生大量负击穿过程, 又经过 11 ms 后辐射源降低到 4 km 高度, 并停止传输. 结合图 5(B)可见, 此时段电场为负向变化, 且波形上叠加了密集的正负极性脉冲, 说明在传输路径上产生大量雪崩的负电荷并向正电荷区域内传输, 消耗区域内正电荷量, 相反, 由雪崩过程产生的正电荷向初始击穿点传输, 在传输过程中产生大量正、负脉冲(图 5(B)). 此后, 在 4.4 km 高度上, 又发生大量负击穿过程, 向水平方向延伸约 16 km. 上述大量的云内负击穿过程, 在消耗区域内正电荷量的同时, 在初始激发点积聚了大量正电荷, 大大地提高了该点的正电位, 最后触发向下的正地闪过程. 根据这次正地闪电场变化波形的回击发生时间和正先导位置, 接地点发生的绝对时间为 11:01:49.453896, 与山东地区地闪定位网(DF)测量的一致. 回击发生后在回击点的上方初始击穿区引发了新的闪电通道, 并向上相反的西北方向水平发展, 传输距离约 35 km. 这次正地闪持续时间约 600 ms, 闪电通道以开始区为中心向对称方向发展. 回击前主要在 4.4 km 的高度上传输, 平均速度约为 1.6×10^5 m/s, 辐射源比较集中. 回击后在 7.2 km 的高度上传输, 平均速度为 1.4×10^5 m/s, 辐射点比较弥散, 从初始触发点向下的正先导过程, 由于

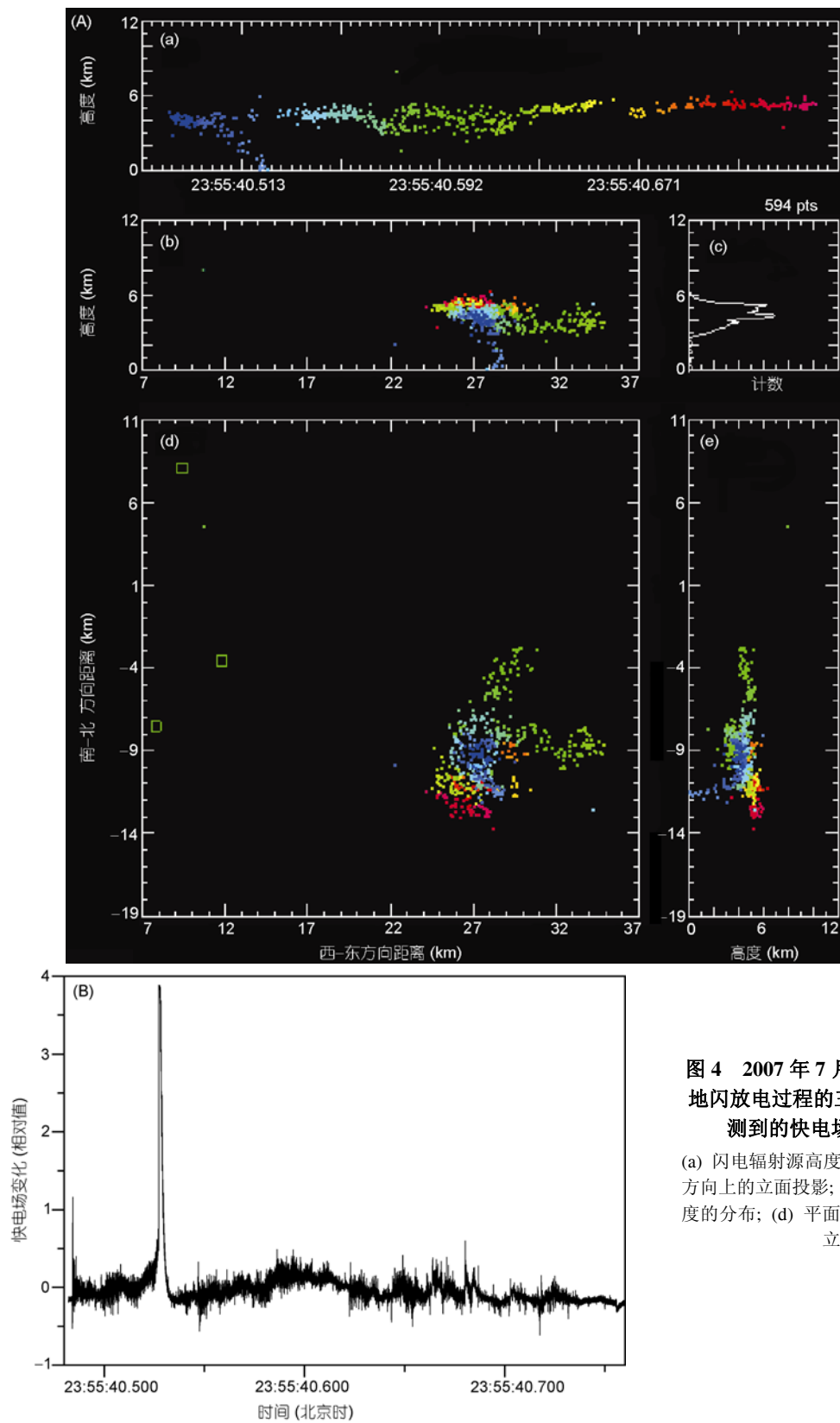


图 4 2007 年 7 月 9 日(北京时)典型负地闪放电过程的三维结构(A)和北郡站测到的快电场变化波形图(B)

(a) 闪电辐射源高度随时间的变化; (b) 南北方向上的立面投影; (c) 辐射源发生数目随高度的分布; (d) 平面投影; (e) 东西方向上的立面投影

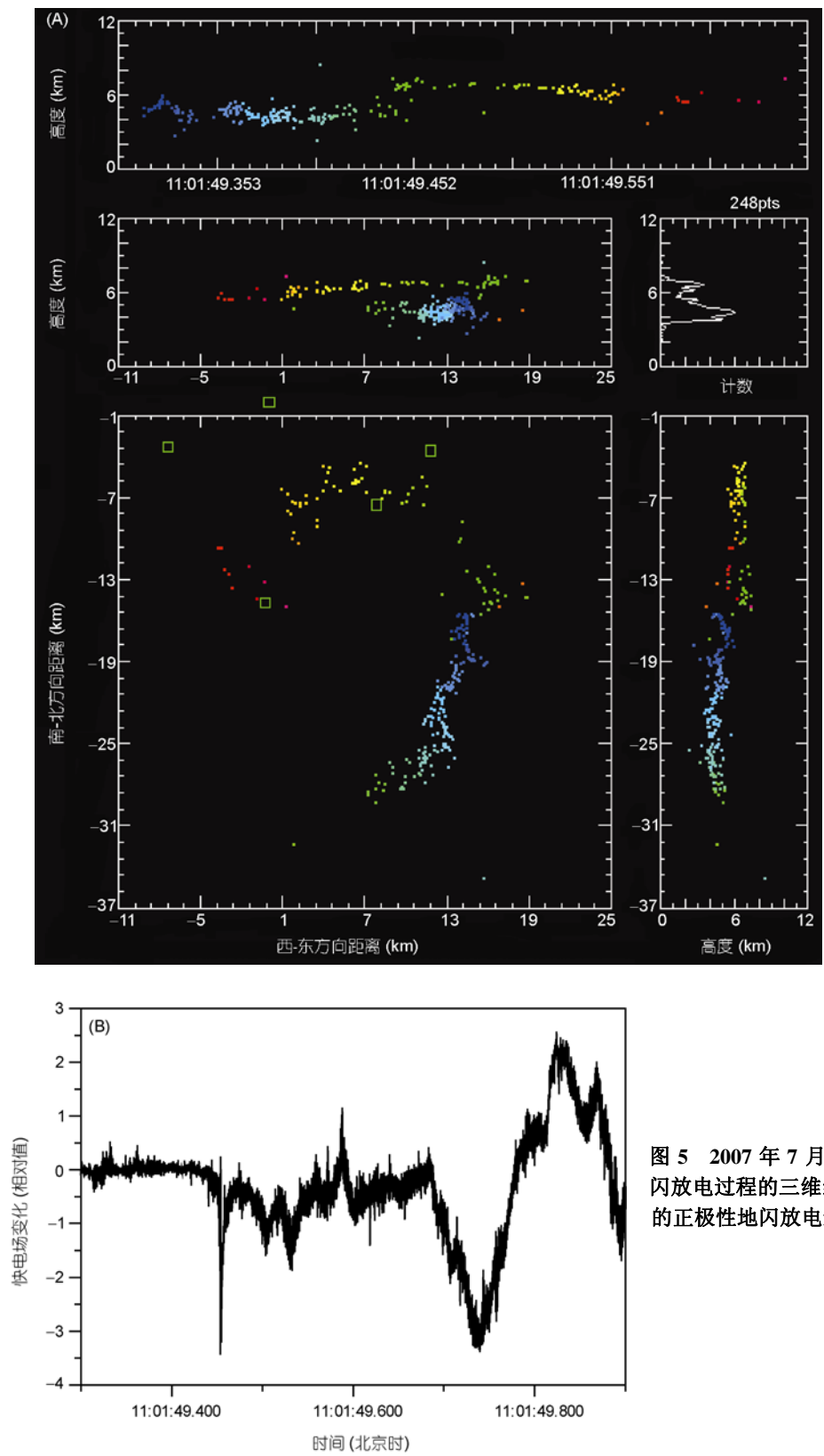


图 5 2007 年 7 月 11 日(北京时)正极性地
闪放电过程的三维结构图(A)和滨海站测到
的正极性地闪放电过程的快电场波形图(B)

其辐射较弱, 未能被探测到, 与张义军等^[11]的结果基本一致. 综合分析得知这次正地闪电荷区由低到高倾斜分布, 呈现出不均匀形态特征.

从上分析可见, 正、负地闪的触发过程是不同的; 负地闪是在负电场环境下空气被击穿产生负流光传输, 离开负电荷区域向下以梯级先导形式传输, 没有或很少云内放电过程. 正地闪是在正电场环境下空气被击穿, 由于正电荷迁移太小, 主要也是负流光传输, 但其方向是进入正电荷区, 产生大量的云内放电过程, 中和云内正电荷, 同时在始发点积累正电荷提高正电位, 直到足以产生向下正流光传输. 因此, 云内放电是产生正地闪的重要条件, 它为始发点提供能量, 产生正地闪.

3.3 云闪

图 6(A)是两次云内闪电, 均表现出了双层结构, 它们发生在大约 2007 年 8 月 1 日 2 时 7 分 48 秒(北京时), 图中的上、中、下 3 层分别对应雷暴云中部的主负电荷区(8~9 km 高度)上部的正电荷区(11~13 km 高度)和下部次正电荷区(3~6 km 高度), 图 6(B)是横店站测到的云内放电的快电场变化波形图. 初始击穿开始在 8.7 km 高度负电荷区, 闪电负流光(由电场变化确定)垂直向上进入上部正电荷区, 转向朝西南方向水平传输, 闪电通道停止传输后紧接着在负电荷区有少量辐射点发生, 并引发了第二次向上传输过程, 从开始区 7.9 km 高度垂直向上进入上部正电荷区 11.5 km 高度开辟了新的水平通道, 转向朝相反的东北方向水平传输, 用约 205 ms 时间结束了主负电荷区与上部正电荷的放电过程, 从投影图可见辐射点比较离散. 第二次云闪始发于 185 ms 后, 发生在主负电荷区与下部正电荷区之间, 这次云闪的负流光从 6.5 km 高度的负电荷区向下部正电荷区传输, 与下部正电荷区形成新的垂直连接通道, 并发生了多次向下传输过程, 有的是沿先前形成的水平通道传输, 从投影图看到辐射源以上下垂直连接通道为中心向四周发展, 辐射点比较弥散. 一个云闪由中部主负电荷区负流光向上部正电荷区传输, 传输速度约为 1.8×10^5 m/s, 另一个云闪由中部负流光向下部正电荷区传输, 传输速度约为 2.9×10^5 m/s. 在这两次云闪中一共有 1083 个辐射源, 如图 6(A)中的(c)图所示, 下部正电荷区辐射点密集, 上部正电荷区次之, 主负电荷区最少. 从上分析可见, 云闪始发点都发生

在负电荷区域中, 开始以垂直方向向上(或向下)传输, 在逐渐接近上部(或下部)正电荷区时, 受正电荷区的正电荷分布影响, 使负流光倾斜, 在进入正电荷区后, 与正电荷的碰撞中和, 将会产生更多的击穿过程且会形成水平通道. 辐射点的密集度和电荷的密集度相对应. 上述结果说明, 下部正电荷区的电荷浓度高于上部正电荷区. 此外, 从二次云闪传输过程来看, 云中电荷宏观结构是明显分层的. 根据云闪传输的经典概念, 可以判断这次雷暴是典型的三极性电荷分层结构^[10].

3.4 双极性窄脉冲

双极性窄脉冲(NBP)是一种云内放电过程中伴随产生的具有强烈的高频辐射脉冲, 近代观测发现, NBP 会孤立出现, 也会出现在放电初期, 其辐射强度比常规闪电高一个量级. 根据经典概念, 云闪始发于负电荷区或接近负电荷区域. 然后沿倾斜垂直方向传输. 在进入正电荷区域之后才出现水平通道. 近代一些观测还发现, 有些云内放电过程初始触发点在正电荷区, 开始就有很长的水平通道, 而无明显的垂直通道. 此外, 经典云闪在始发阶段通常是幅度较小的脉冲, 而这类云闪在始发阶段出现的首发脉冲就是幅度很大的双极性窄脉冲 NBP, 同时伴有强烈的 RF 辐射, 然后才出现水平通道传输. 似乎云闪是被双极性窄脉冲所触发, 很多学者注意研究它的机制尚无明确结论^[5]. 本节从一次 NBP 观测个例予以讨论.

图 7(A)是一次新型云闪过程三维时空结构图. 发生在 2007 年 8 月 1 日 2 时 11 分 02.712716 秒时刻(北京时), 这次云闪在触发初期出现很强的双极性窄脉冲并伴有强烈的 RF 辐射(中心频率 270 MHz, 3 dB 带宽 6 MHz). 图 7(B)所示, 其辐射功率比常规闪电高一个量级以上, 图 7(A)中红色叉号是该脉冲出现的时空位置, 图 7(C)是这次云闪的快电场变化波形. 从图可见, 初始阶段有很强的双极性窄脉冲(峰值已进入放大器非线性区), 其起始脉冲是负极性, 峰值大于随后的正脉冲峰值(图 7(D)是扩展波形). 在产生双极性脉冲同时, 产生相当强烈的 RF 辐射(图 7(E)是扩展波形). RF 辐射通常来源于新通道的空气击穿, 而不是原通道. 图 7(F)是 2007 年 8 月 1 日 2 时 12 分(北京时)雷暴过程的雷达回波图(11 km 高度 CAPPI 扫描), 图 7(G)是出现 NBP(红色叉符号)的回波区剖

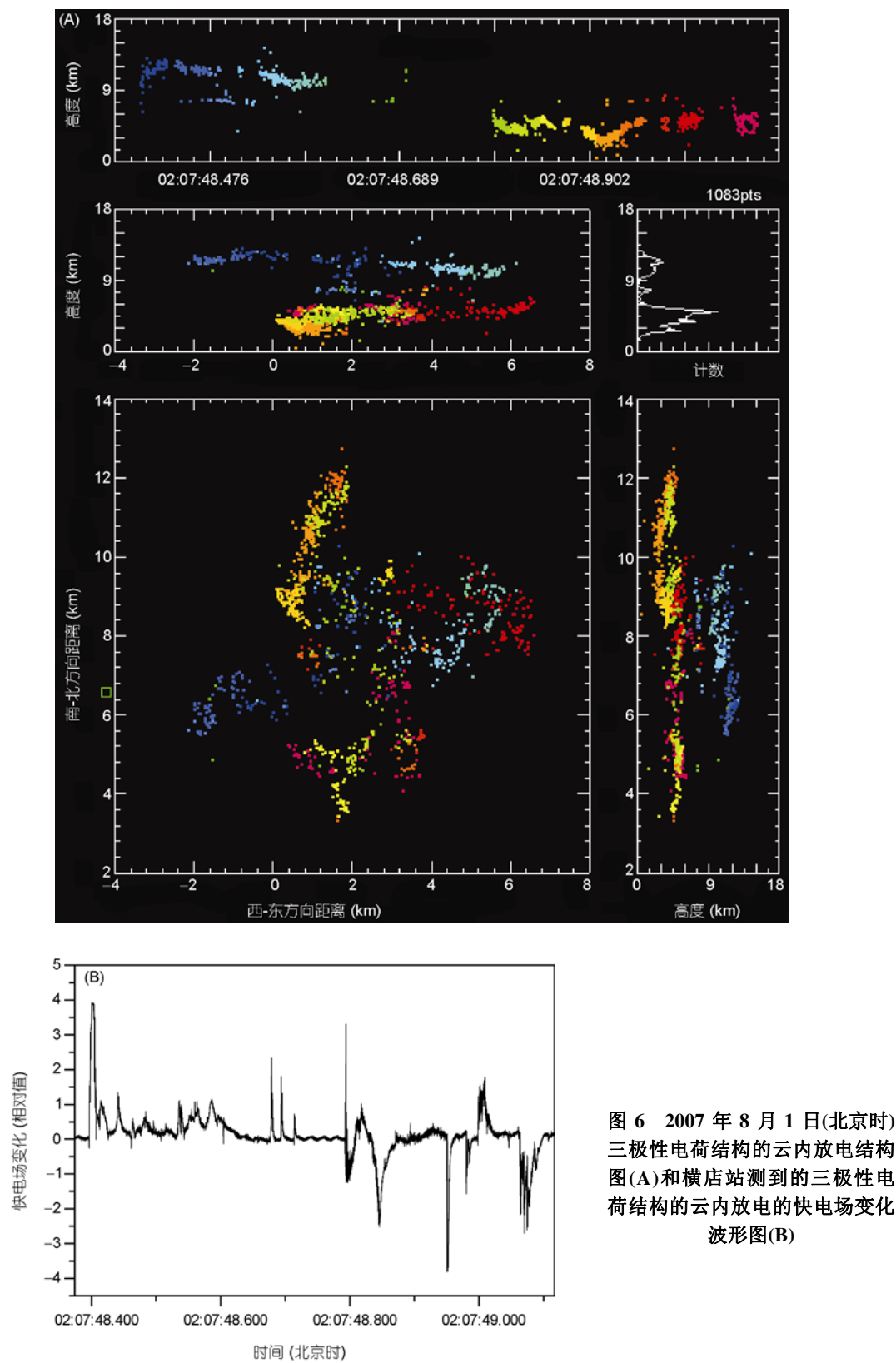
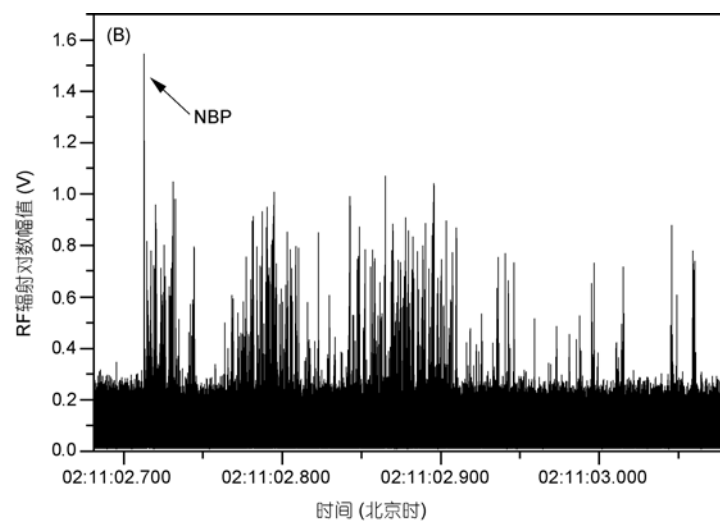
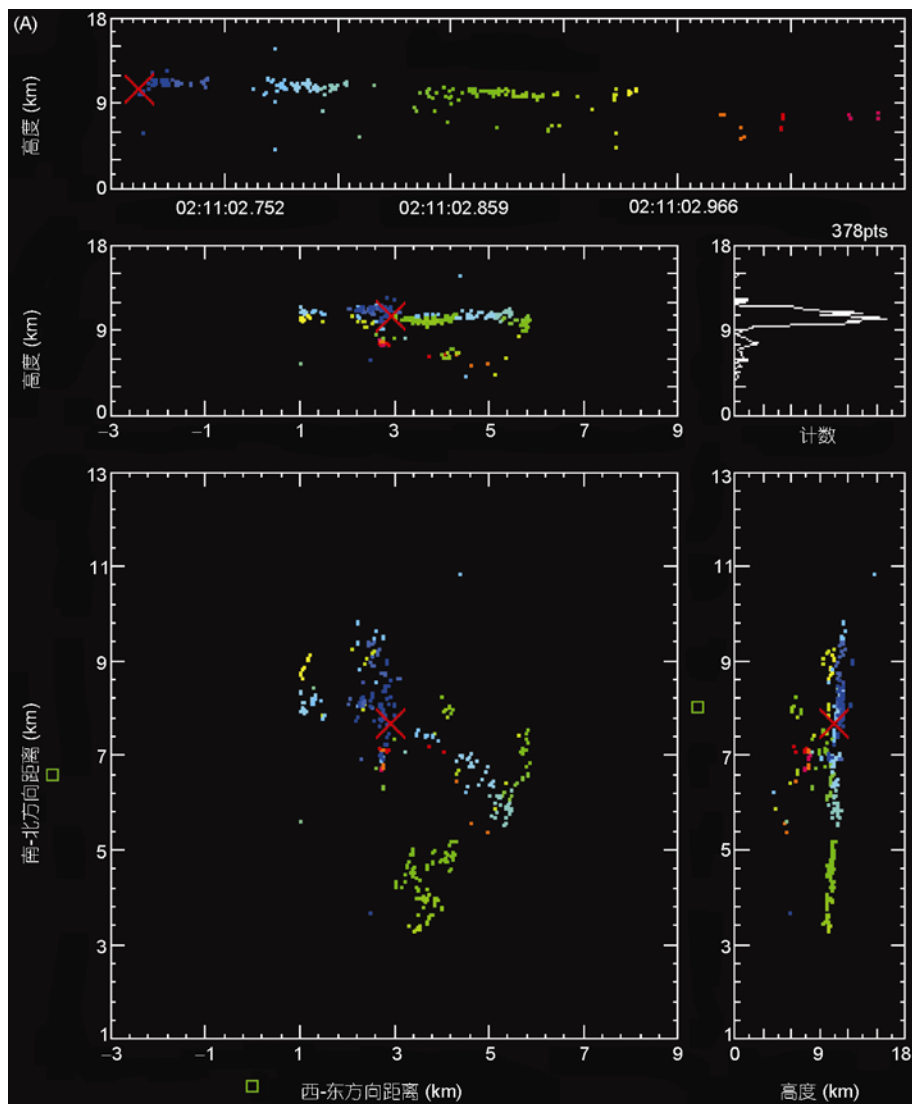


图 6 2007 年 8 月 1 日(北京时)三极性电荷结构的云内放电结构图(A)和横店站测到的三极性电荷结构的云内放电的快电场变化波形图(B)



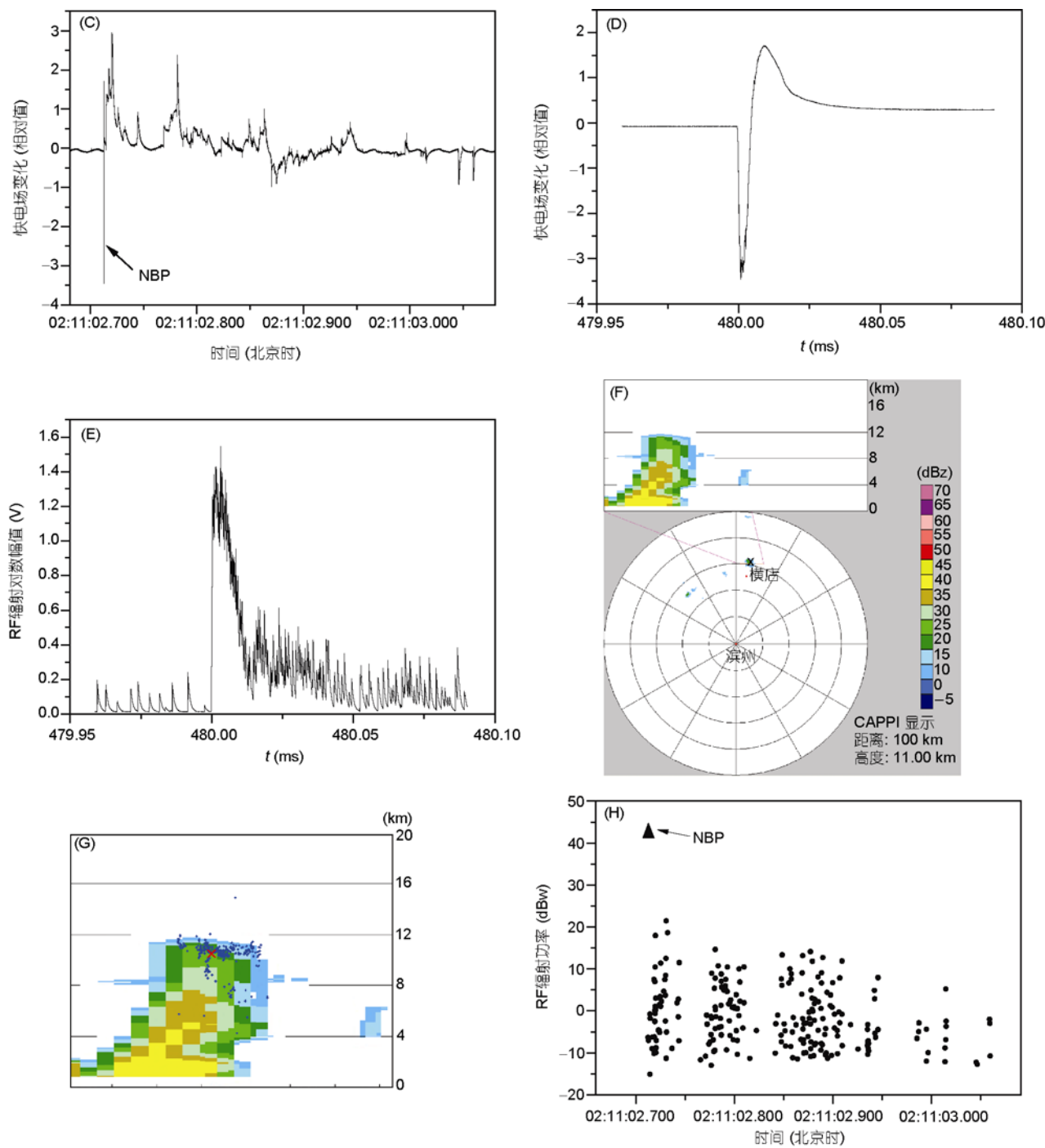


图 7

2007 年 8 月 1 日 02 时 11 分 02 秒(北京时)一次双极性窄脉冲(NBP)事件引发的云内闪电放电三维时空分布(A)、横店站测到的双极性窄脉冲(NBP)事件引发云闪的 RF 辐射波形图(B)和快电场变化波形(C)、横店站测到的双极性窄脉冲(NBP)的快电场变化扩展波形(D)和 RF 辐射扩展波形(E)、2007 年 8 月 1 日 02 时 12 分(北京时)雷暴过程的雷达回波图 11 km 高度 CAPPI 扫描(F)及(F)指示的回波剖面(RHI)与闪电辐射源叠加的扩展图(G)和横店站测到的双极性窄脉冲(NBP)引发闪电的辐射源功率分布图(H)

面(RHI 扫描)和闪电辐射源的叠加扩展图,从图 7(F)可见,该 NBP 出现于离中心站(横店)约 8.2 km 距离,高度约 10.5 km 上,回波强度 15~25 dBz(图中叉符号),结合图 7(G)可见,在 9~12 km 范围有大量辐射源点(图中蓝色圆点)尤其在 NBP 附近,不同回波区域都有发生,但 NBP 是出现在回波强度 15~25 dBz 回波区域中。

对于经典云闪,一般是在云闪的活跃时期才可能出现幅度大的双极性脉冲,近代观测发现,云闪触发初期也会出现一些双极性脉冲,但其幅度一般较小。也就是说,幅度很大的双极性窄脉冲可能是云闪发展的一种结果,而不是云闪触发的原因。但本次云闪个例似乎是“原因”,问题是双极性窄脉冲如何产生?

从图 7(A)可见,该脉冲发生在约 10.5 km 的高度附近,处于云内正电荷区域中,然后沿水平方向向四周发展,由内向外呈 X 形状,形成很长的水平放电通道。从图 7(A)可见,产生非常密集的水平击穿过程。在垂直方向上也有少量向下辐射点,是垂直方向的击穿过程。上述触发传输过程,说明该次云闪过程初始触发是发生在正电荷区域中,是被初始为负极性的双极性窄脉冲触发,且立即进入活跃阶段,没有一般云闪的初始预击穿过程,其传输过程以水平通道为主,无明显的垂直通道。也就是说,云闪通道是在正电荷区域中传输,其触发过程和正地闪的初始云内过程有点相似。近代观测发现,正地闪的触发点也能发生在云上部正电荷区内(例如日本冬季雷暴),初始局地高电位触发正击穿,负流光传输,同时使触发点正电位提高,产生正击穿,若触发点高正电位还不能产生正击穿,则云内负流光逐渐消失。但是,如果在某些正电荷特别密集区,开始就产生了相当高的正电位,已能产生正击穿并直接导致正流光传输,且在传输过程中遇到“局部负电荷密集区”,正负电荷发生强烈中和,产生很强的双极性窄脉冲,由于大量正流光的正电荷被中和,原来的负流光被加强,产生图 7(A)中非常密集的辐射源,类似于一般云闪传输过程。因此,我们认为,这种云闪似是被双极性窄脉冲所触发,它源于正电荷区中局部极高电位区。

由于来自宇宙空间的高能宇宙射线对大气的电离作用,会在大气中产生不同极性的电荷堆,尤其是自由电子堆,且较多出现于大气上层^[17]。我们认为,上述上层正电荷区域中的“反极性电荷密集区”正是

这些自由电子堆积而成。由于大量自由电子游离于空气中,使这些区域的空气击穿电场阈值被大大地降低,可以低一个量级以上,自由电子被电场加速,易形成电子雪崩过程和正流光传输过程,且在正流光传输途中遇到“自由电子堆”,产生强烈中和形成 NBP。因此 NBP 产生于“反极性电荷密集区”密切相关,且该区域的回波强度也不大,这和图 7(F)的结论一致,深入研究需要大量 NBP 观测资料分析,并作“逃逸击穿”的理论计算。

根据闪电脉冲辐射功率估算算法^[17,18],我们对此次闪电进行了脉冲辐射功率的估算,如图 7(H)所示,双极性窄脉冲(三角形符号)辐射强度远大于其他 VHF 辐射源,整个闪电脉冲辐射功率在 100 mW~500 W 功率范围,而接收的双极性窄脉冲辐射功率值则高达 16.7 kW,要高出一个量级以上,是典型的 NBP 脉冲。此值比 Thomas 等^[18]的计算结果相对偏小,可能是因为我们采用的接收频率(中心频率 270 MHz 3 dB 带宽 6 MHz)与他们采用的频率(63 MHz)不同有关。

4 结论

本文介绍了作者自行研制的闪电三维定位测量系统(LLR)以及得到的观测资料,同时结合闪电电场变化观测资料,分析了负地闪、正地闪、云闪以及双极性窄脉冲引发的新型云闪过程三维时空结构,得到以下结论:

(1) 负地闪初始激发对应向下发展负极性击穿过程,开始时闪电辐射源在起始区向周围传播,辐射点比较密集以梯级先导形式离开云区向下传输,根据本次地闪放电通道三维时空结构图像对预击穿和首次梯级先导过程做了简单划分,得到预击穿过程发展速度约为 5.2×10^4 m/s,梯级先导过程发展速度约为 1.3×10^5 m/s,先导发展速度明显高于预击穿过程。

(2) 正地闪初始激发也是负流光传输。但方向是在正电荷区域内,有较长水平通道,在负流光传输过程中,同时为初始激发点积累正电荷,提高该点正电位,直至激发向下正先导传输,与负地闪有所不同。

(3) 云闪大部分始发于负电荷区,以垂直取向上或向下传输,进入正电荷区后呈现较长的水平通道。雷暴电荷结构明显分层多为三极性结构,中部的主负电荷区(8~9 km 高度)上部的正电荷区(11~13 km 高

度)和下部正电荷区(3~6 km 高度).

(4) 少数云闪始发于上部正电荷区被双极性窄脉冲(NBP)激发, 在正电荷区域内以优势水平方向传输, 不进入负电荷区域. 此类云闪及其三维传输过程在国内被首次发现, 其产生机理有待深入研究.

(5) 对闪电活动中闪电辐射源进行了功率计算, 得到闪电辐射源功率一般在 100 mW~500 W 范围内, 双极性窄脉冲辐射强度高达 16.7 kW, 远高于其他辐射脉冲(用中心频率 270 MHz, 3 dB 带宽 6 MHz).

(6) 新研制的闪电 VHF 辐射源三维定位系统, 可以高时间分辨率和空间分辨率对云闪及地闪进行三维时空定位, 为深入研究云内放电通道机理及双极性窄脉冲提供了非常有效的观测手段.

闪电 VHF 辐射源三维定位系统是基于时差定位原理的高精度定位系统, 对于连续辐射脉冲定位尚有不足, 作者认为通过缩小基线距离增加测站空间密度可在一定程度上改善此问题, 此类工作还有待于今后进一步详细研究.

致谢 感谢 2007 年参加山东雷电观测实验的全体人员和山东省气象局; 滨州市气象局在野外实验中给予支持, 审稿人提出建设性意见, 一并致谢.

参考文献

- 1 Shao X M, Krehbiel P R, Thomas R J, et al. Radio interferometric observations of cloud-to-ground lightning phenomena in Florida. *J Geophys Res*, 1995, 100(D2): 2749—2783
- 2 董万胜, 刘欣生, 张义军, 等. 利用闪电宽带干涉仪系统对地闪先导-回击过程的观测研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32: 81—88
- 3 张广庶, 赵玉祥, 郗秀书, 等. 利用无线电窄带干涉仪定位系统对地闪全过程的观测与研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38: 1167—1180
- 4 Boccippio D J, Heckman S, Goodman S J. A diagnostic analysis of the Kennedy Space Center LDAR network 1. Data characteristics. *J Geophys Res*, 2001, 106(D5): 4769—4786
- 5 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: 3573—3576
- 6 Krehbiel P R, Thomas R J, Rison W, et al. Lightning mapping observations in central Oklahoma. *EOS*, 2000, 81: 21—25
- 7 Hamlin T D. The New Mexico Tech lightning mapping array. Doctoral Dissertation. Socorro: New Mexico Institute of Mining and Technology, 2004. 31—32
- 8 张义军, Krehbiel P R, 刘欣生. 雷暴中的反极性放电和电荷结构. *科学通报*, 2002, 47: 1192—1195
- 9 张义军, 孟青, Krehbiel P R, 等. 超级单体雷暴中闪电 VHF 辐射源的时空分布特征. *科学通报*, 2004, 49: 499—505
- 10 张义军, 孟青, 吕伟涛, 等. 两次超级单体雷暴的电荷结构及其地闪特征. *科学通报*, 2005, 50: 2663—2675
- 11 张义军, 孟青, Krehbiel P R, 等. 正地闪发展的时空结构特征与闪电双向先导. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36: 98—108
- 12 祝宝友, 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, 66: 124—130
- 13 Shao X M, Stanley M, Regan A, et al. Total lightning observations with the new and improved Los Alamos Sferic Array (LASA). *J Atmos Ocean Technol*, 2006, 23: 1273—1288
- 14 郗秀书, 余晖, 张广庶, 等. 中川地区一次负地闪的起始过程研究. *高原气象*, 1998, 17: 34—43
- 15 Thomas R J, Krehbiel P R, Rison W, et al. Accuracy of the lightning mapping array. *J Geophys Res*, 2004, 109(D14207): 1—34
- 16 马明建, 周长城. 数据采集与处理技术. 西安: 西安交通大学出版社, 1998. 21—27
- 17 Gurevich A V, Medvedev Yu V, Zybin K P. New type discharge generated in thunderclouds by joint action of runaway breakdown and extensive atmospheric shower. *Phys Lett A*, 2004, 329: 348—361
- 18 Thomas R J, Krehbiel P R, Rison W, et al. Observations of VHF source power radiated by lightning. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 143—146