雷暴中的反极性放电和电荷结构

张义军① P. R. Krehbiel② 刘欣生①

(①中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; ②New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, NM 87801, USA. E-mail: zhangyj@ns.lzb.ac.cn)

摘要 通过对闪电 VHF 辐射源高时空分辨率的三维观测资料的分析, 揭示了在具有正常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, 并且这一正电荷区参与放电过程. 同时还发现, 某些雷暴云中或雷暴云发展的某些阶段可以呈现出与正常极性相反的电荷结构, 即在雷暴云中部是主正电荷区, 而上部为负电荷区, 在它们之间有反极性放电过程发生, 表明雷暴云中存在反极性起电机制, 以及雷暴电荷结构的复杂性.

关键词 云内闪电 雷暴电荷结构 反极性闪电

雷电特性与雷暴电荷结构密切相关, 因此雷暴电荷结构的研究一直是大气电学领域的重要内容. 早在 20 世纪 30 年代, 人们就根据地面电场及闪电引起的电场变化测量推断出雷暴云的偶极性电荷结构, 即云的中部(5~8 km, 海拔高度, 下同)为负电荷, 而在其上部为正电荷. 随后的大量研究结果也都表明在雷暴云发展的起始及活跃阶段(这时云内往往存在有强的上升气流区), 云闪放电多起始于云中部主负电荷区并向上部正电荷区发展; 而占云对地放电大多数的负地闪也起始于云中主负电荷区, 并向地面发展. 这种闪电放电的激发和传输特征是和雷暴云的正偶极电结构相一致的. 尽管这个结果得到大量观测的支持, 但仍有一些地面电场测量, 尤其是一些正地闪的观测结果却与这种偶极性电荷结构不一致[1,2]. 气球探空及更多的地面测量还进一步揭示出在雷暴中部主负电荷区下部, 有时还存在另一个小的正电荷区, 称为 LPCC (lower positive charge center), 这种电荷分布结构称为三极性电荷结构[3]. 20 世纪 80 年代邵选民等人[4]及 Liu Xinsheng 等人[5]观测发现, 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反演出几个云闪个例的电偶极矩大小及其中心高度, 其结果反映出雷暴的三极性电荷结构. 由于雷暴云下部正电荷区的存在使中国北方的人工触发闪电也表现出独特的放电特征[6~8]. 1996 和 1997 年中日两国学者在该地区进行了联合观测实验, 进一步证实和扩展了中国学者在 20 世纪 80 年代的观测研究结果[9,10]. 后来更多的云内外测量表明, 雷暴云电荷结构更为复杂, 并随着雷暴云类型及其发展阶段而变化, 不能用简单的偶极或三极性模型来代表, 例如 Stolzenburg[11]通过对探空电场的测量发现偶极性或三极性电荷结构仅适合于雷暴对流区, 在远离对流区存在多层不同极性的电荷区, 最高可达到 6 层. 不同学者对正、负电荷量及其所在高度的估计差别很大, 但还是有一些共同的特征, 即无论偶极性还是三极性电荷结构, 其主要的负电荷区处于雷暴中部–10~25℃环境温度之间, 云的边界处一般有屏蔽电荷层存在等[1]. Krehbiel[2]分析发现在美国 Florida 和 New Mexico 以及日本冬季雷暴中, 尽管主负电荷区所处的高度不同, 甚至相差很大, 但它们均处于同一温度区.

在雷暴电荷结构研究中, 对闪电尤其是云内闪电的观测是揭示雷暴电荷结构的有效手段, 但由于云内闪电通道常被云体阻挡, 对云内闪电的研究受到很大限制. 近年来, 闪电 VHF 电磁脉冲辐射源定位技术有了很大发展, 如闪电干涉仪能以微秒时间采样率描绘闪电放电的二维(仰角和方位角)结构[12,13]. Shao 等人[13]利用闪电干涉仪对云内闪电的观测结果表明, 云内闪电呈双层结构, 在闪电发展的最初十几毫秒内, 闪电由中部负电荷区向上部正电荷区发展, 进一步证实雷暴的偶极性电荷结构. 而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)展现闪电放电的三维时空演变过程, 并明确揭示出雷暴云偶极性和三极性电荷结构, 同时还揭示出反偶极电结构(即主负电荷区在主正电荷区的上面)的存在及反极性的放电特征以及其他一些新的放电现象[14~16], 极大地丰富了对雷暴电荷结构的认识. 本文将对此进行简要分析和讨论.

1 资料及分析

三维雷电观测系统 LMA 是由美国 New Mexico Institute of Mining and Technology 发展起来的, 其主要原理是利用GPS系统和时差技术定位雷电的VHF辐射源, 从而得到雷电发生发展过程的三维时空分布特征. 这一系统的中心频率为 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[6], 尤其 2000 年夏季的 STEPS (severe thunderstorm electrification and precipitation study) 实验, 得到了许多有意义的新结果. 在这次实验中, 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, 并在测站网中心设有闪电电场变化测量仪, 其位置为平面投影图中的坐标原点.

1.1 典型的正常极性的云内放电

图版 Ⅰ (附本刊后, 下同)是一次典型的正常极性的云内放电过程, 图中颜色随时间由蓝、绿、黄到红色逐渐变化. 这一闪电发生在 2000 年 6 月 12 日 00∶03(UT). 图版 Ⅰ-1~5 分别表示闪电 VHF 辐射源高度随时间的变化、在南北方向上的立面投影、辐射源数目随高度的直方图分布、平面投影和东西方向上的立面投影. 这种闪电的特性已由云闪初始流光研究[17]和窄带干涉仪的观测结果[13]得到明确的认识. 闪电发生在云上部正电荷区与中部负电荷区之间. 从图版 Ⅰ 可见, 整个闪电持续时间约 1 s, 闪电呈双层结构, 分别处于 9~11 和 6~8 km, 对应于上部正电荷区和中部负电荷区. 闪电起始于 8 km 高度的负电荷区, 垂直向上发展到 11 km 的正电荷区, 其传输速度为 2.3×10^5 m/s. 之后, 在 11 km 高度的正电荷区闪电转向水平发展, 并传输了 50 多公里, 高度逐渐降低. 同时在 7~8 km 高度的负电荷区也有少量的辐射点发生, 大约 600 ms 之后, 在 11 km 高度闪电发展结束; 而 6~7 km 高度辐射点开始增多, 并从闪电的起始位置向四周水平延伸了闪电通道, 但辐射点比较弥散, 并不时有向上的辐射发生, 这主要由向上的 K 型击穿形成. 发生在云闪中的 K 过程是一些微秒时间尺度的快过程, 它沿先前已经电离的通道继续将下部负电荷区的电荷传输到上部正电荷区, 其传输速度约为 10^6~10^7 m/s. 但由于闪电通道冷却使 K 过程产生一些少量的辐射点, 这些 K 过程在雷暴负电荷区水平延伸了闪电通道, 辐射源由远处向闪电的起始位置发展. 具有 1 μs 采样率的闪电干涉仪观测结果也表明, 这种在雷暴负电荷区的闪电辐射源是从远离闪电起始位置开始以一种倒退的方式水平延伸了闪电通道, 辐射击穿点较少, 强度也较弱, 并通过与雷达资料的对比分析, 发现这个负电荷区与雷暴偶极性电荷结构的负电荷区相对应[13]. Thomas[18]对 LMA 测得的辐射强度的分析也表明, 在云闪放电辐射源的双层结构中, 上部正电荷区的辐射源(对应于负极性击穿)的功率要比下部负电荷区击穿大 1~2 个量级.

1.2 反极性的云内放电

图版 Ⅱ 是一次反极性的云内放电过程, 它发生在 2000 年 6 月 11 日 22∶37(UT). 这一闪电整个持续约 800 ms, 同样呈双层结构, 分别处于 7~8 和 11 km 高度. 但与图版 Ⅰ 所示的闪电特性相反, 它起始于 10.5 km 高度, 并垂直向下发展, 其传输速度约为 2×10^5 m/s, 到 8 km 高度后开始水平延伸, 通道结构清晰, 有多个分叉形成, 而在 11 km 高度辐射点较少. 比较图版 Ⅰ 和 Ⅱ, 并考虑到辐射强度资料得知这类闪电相对于图版 Ⅰ 来说是一种反极性闪电, 闪电发生在上部负电荷区与中部正电荷区之间. 此时雷暴的中部(7~8 km)分布着正电荷, 而上部(11 km)为负电荷区, 即在雷暴中部为主正电荷区, 而上部为负电荷区. 从雷电、地闪定位资料可知, 雷暴在这一阶段发生的地闪均为正极性, 这与以前普遍接受的正偶极电荷结构不同, 这一雷暴此时的电荷结构是反极性的. 由图版 Ⅱ 可见这种反极性闪电除极性相反之外, 其特性与图版 Ⅰ 所示的正常极性的闪电是一致的. 整个闪电放电过程分为初始阶段、活跃阶段和最后阶段三部分. 在初始阶段闪电负流光由上部负电荷区垂直向下发展, 在正负电荷区之间建立了一个垂直向下的连接通道, 将负电荷区的负电荷向下传输到中部主正电荷区, 并在这一电荷区建立了一个水平发展的通道; 在活跃阶段闪电击穿的辐射主要发生在中部正电荷区, 水平延伸了闪电通道; 而在最后阶段, 闪电通道主要以 K 过程的方式将上部负电

荷区的负电荷传输到中部正电荷区, 并在负电荷区水平延伸了闪电通道. 在这个闪电中还有一个 K 过程在中部正电荷区触发了新的闪电通道.

1.3 正、反极性云内放电和三极性电荷结构

图版Ⅲ是两次云内放电过程, 它们发生在 2000 年 7 月 12 日 04∶54 (UT)左右, 相隔 3.3 s. 图版Ⅲ-1~4 分别是这两个闪电 VHF 辐射源高度随时间的变化、在南北方向上的立面投影、在东西方向上的立面投影和闪电引起的电场变化记录. 这两次闪电发生在同一位置, 且都为双层结构, 但高度不同, 是两个极性相反的闪电. 第 1 个闪电是正极性(蓝色), 起始高度为 8 km, 向上传输到 10 km; 而第 2 个闪电是反极性闪电(红色), 起始高度 7.8 km, 向下传输到 4 km 高度附近. 从这两个闪电可推测此时雷暴电荷结构呈正常三极性电荷结构, 在 10 km 高度为正电荷区, 在 8 km 高度为主负电荷区, 而在 4 km 高度为下部正电荷区. 在上部正电荷与中部负电荷区之间可发生通常的正极性云内放电, 而在中部负电荷区与下部正电荷区之间则发生了反极性云内闪电. 从图版Ⅲ-4 可见, 两个闪电均远离坐标原点, 即电场变化仪放置处, 因而处于反号距离以外, 第 1 个闪电的电场变化为正变化, 而第 2 个闪电的电场变化为负变化(定义测站头顶正电荷向上移动引起地面电场的正变化). 由此进一步证实两个闪电的极性是相反的. 它们从同一个中部主负电荷区开始分别向上部正电荷区和下部正电荷区发展, 除极性相反外, 其特性是相同的. Liu Xinsheng 等人[5]利用多站地面电场变化测量发现, 在我国北方地区, 雷暴中存在下部正电荷区, 且参与大部分放电过程. 图 1 显示了这一结果, 其中箭头所指系放电中和的电偶极矩方向, 即正电荷移动(或负电荷反向移动)方向. 从图 1 可见, 在所分析的 7 个闪电中, 有 6 个闪电是发生在云中部负电荷区与下部正电荷区之间的; 而另一个闪电则发生在上部正电荷与中部负电荷区之间, 这与图版Ⅲ的结果是一致的, 即高分辨率的 LMA 观测系统的观测结果进一步证实雷暴下部正电荷区的存在, 并参与雷暴的放电过程, 这一结果是具有普遍意义的.

2 讨论和结论

由以上对高时空分辨率三维闪电资料的特征分析可以得到以下结论: (ⅰ)闪电的时空分布特性可大致表明雷暴中电荷的分布特征. 雷暴电荷结构呈多

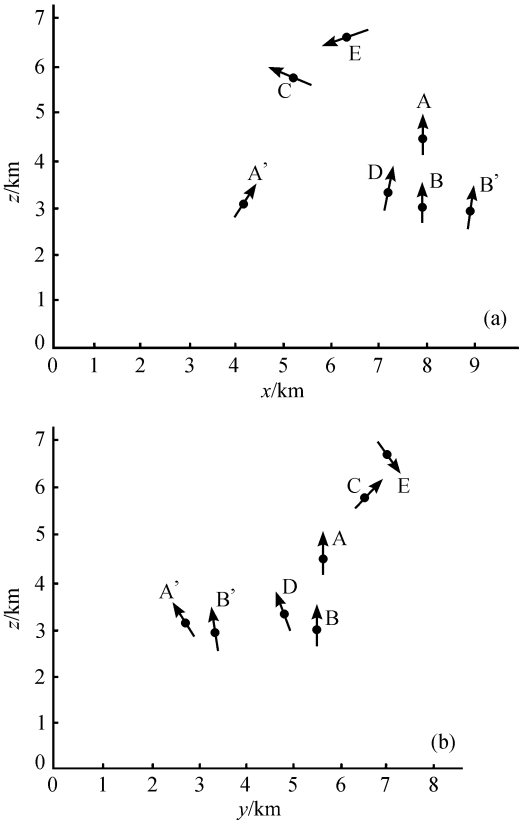


图 1 闪电电偶极矩的位置分布

(a) *x*-*z* 平面投影; (b) *y*-*z* 平面投影. 其中箭头所指系放电中和的电偶极矩方向, 即正电荷移动(或负电荷反向移动)方向[5]

样性, 有偶极性、三极性, 有时是反极性. 它们可单独或同时存在于雷暴的某些发展阶段. (ⅱ)在具有正常三极性电荷结构的雷暴中, 云内放电不仅发生在上部正电荷区与中部主负电荷区之间, 也同样会在中部主负电荷区与下部正电荷区之间发生, 但极性相反. (ⅲ)在具有反极性电荷结构的雷暴中, 云内放电起始于上部负电荷区(其高度处于通常正偶极结构雷暴中上部正电荷区所在位置), 以 10^5 m/s 量级的速度向下传输到中部正电荷区后水平发展, 并将上部负电荷输送到中部正电荷区, 其 K 过程也同样将上部负电荷向下输送到正电荷区, 除极性相反外, 其特性与发生在具有正常偶极性或三极性电荷结构的雷暴中上部正电荷区与中部负电荷区的正常极性的闪电一致. (ⅳ) 雷暴中的任一电荷区在一定条件下都可以参与放电过程.

从以上分析的几个闪电可见, 在正电荷区闪电辐射事件远多于负电荷区, 且时空分布特征也有很大的差异. Thomas[18]对闪电辐射强度的分析表明, 在

负电荷区闪电辐射源的功率一般在 10~100 W 的范围, 而在正电荷区可达 10 kW 以上. 因为在正电荷区的辐射源对应于负击穿, 一般产生的辐射都比较强, 很容易被探测到, 而在负电荷区辐射源发生在一系列 K 过程中. K 过程将负电荷传输到闪电起始区或进入正电荷区, 有时还在正电荷区触发新的闪电通道, K 过程的传输速度一般为 10^7 m/s, 是沿着以前已电离的闪电通道以倒退的方式传输负电荷, 是一种反冲负流光. 由此可推断, 随着在正电荷区负击穿的发生, 可能在负电荷区有正击穿同时发生, 但由于正击穿的辐射强度很弱而不易被探测到[19]. 但董万胜等人[12]对人工引发雷电的观测曾发现, 在近距离内正击穿的辐射也是可以被探测到的. 对这一问题仍需要进一步观测才能得到明确的结论.

对于图版Ⅰ中正常极性的云内闪电所反映出的正偶极电荷结构, 在许多理论分析和模式研究中, 利用感应和非感应起电机制在一定程度上给予了比较好的解释[1]. 而非感应起电机制可以对三极性电荷结构尤其是对雷暴云下部正电荷的存在给予比较好的解释[20](可能主要是软雹与冰晶粒子之间碰撞的结果). 但对图版Ⅱ中的反极性电荷结构利用感应起电机制和非感应起电机制是难以解释的. 因为在雷暴中 11 km 高度一般只有小的冰晶存在, 根据非感应起电理论, 考虑到反转温度, 在这一高度上冰晶应该是携带正电荷. 也有学者观测到云上部的闪电并认为是发生于正常雷暴云上部的正电荷和负的屏蔽电荷之间[1], 用对流起电机制似乎可以对此进行解释, 但图版Ⅱ所示的闪电是否属于这一类, 还需要进一步的观测研究确定. 更大的可能是在这种雷暴中存在着其他的起电过程, 从而形成了这种反极性的雷暴电荷结构, 这也进一步反映出雷暴电荷结构和雷暴起电过程的复杂性. 有意义的是正常极性的闪电和反极性闪电都起始于负电荷区. 反偶极结构中负电荷所处的环境温度应在–30℃以下, 荷电体应为小冰晶, 为什么两类闪电都从负电荷区激发, 它们所涉及的微观激发机制有什么不同, 都是值得进一步研究的问题.

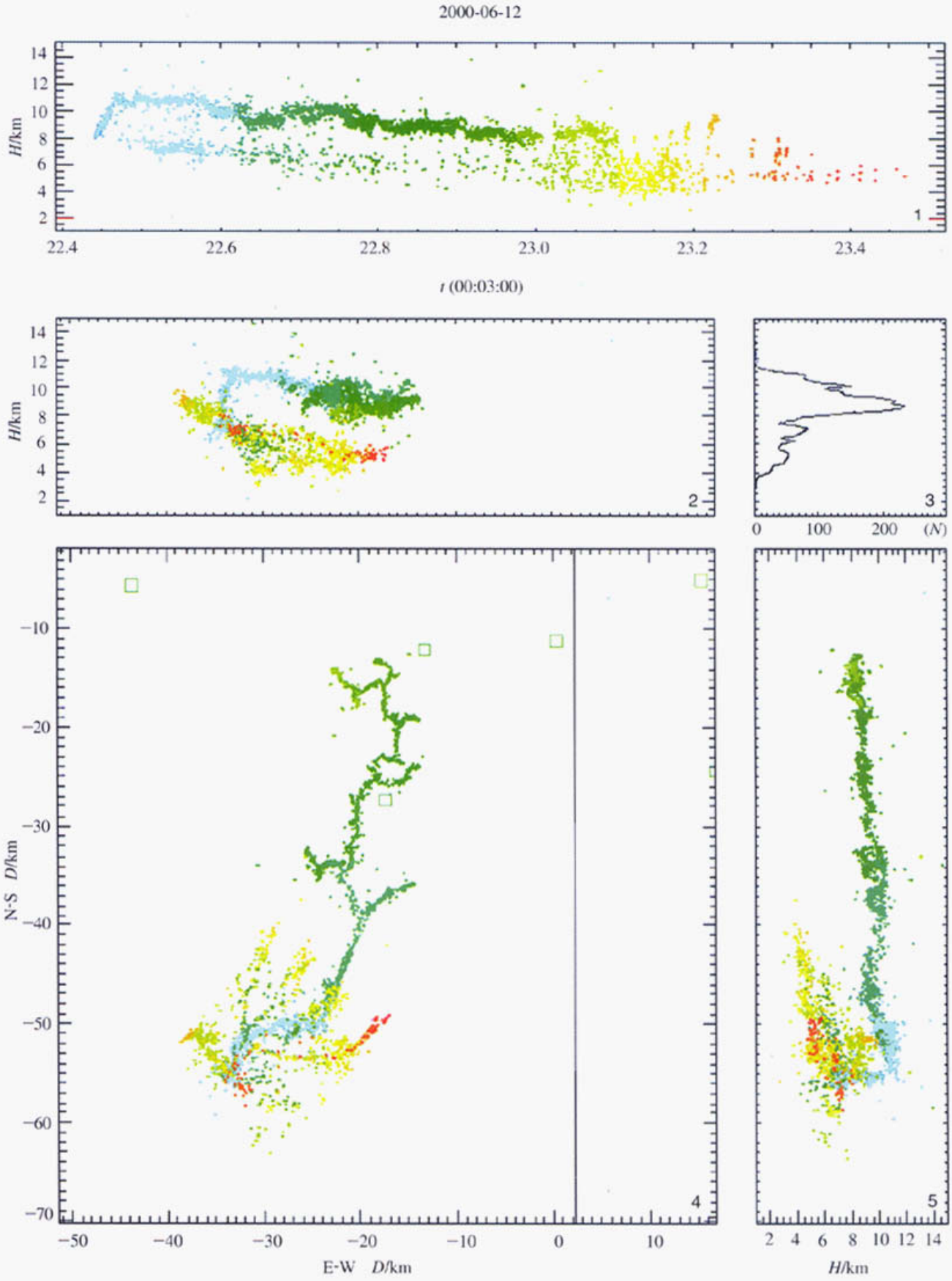
尽管以上分析的几个不同类型的云内放电个例, 清楚地反映了雷暴内的电荷区分布特征, 但它们仅仅反映雷暴内参与了放电的一些电荷区的分布特征, 这只能推测雷暴的基本电荷结构. 事实上, 根据探空测量得到的结果, 雷暴内电荷结构是十分复杂的. 这些雷暴内可能还存在其他没有参与放电的电荷区.

致谢 本工作受国家自然科学基金(批准号: 49975003, 40135010)和中国科学院资源环境领域知识创新工程重要方向(KZCX2-201)项目资助.

参 考 文 献

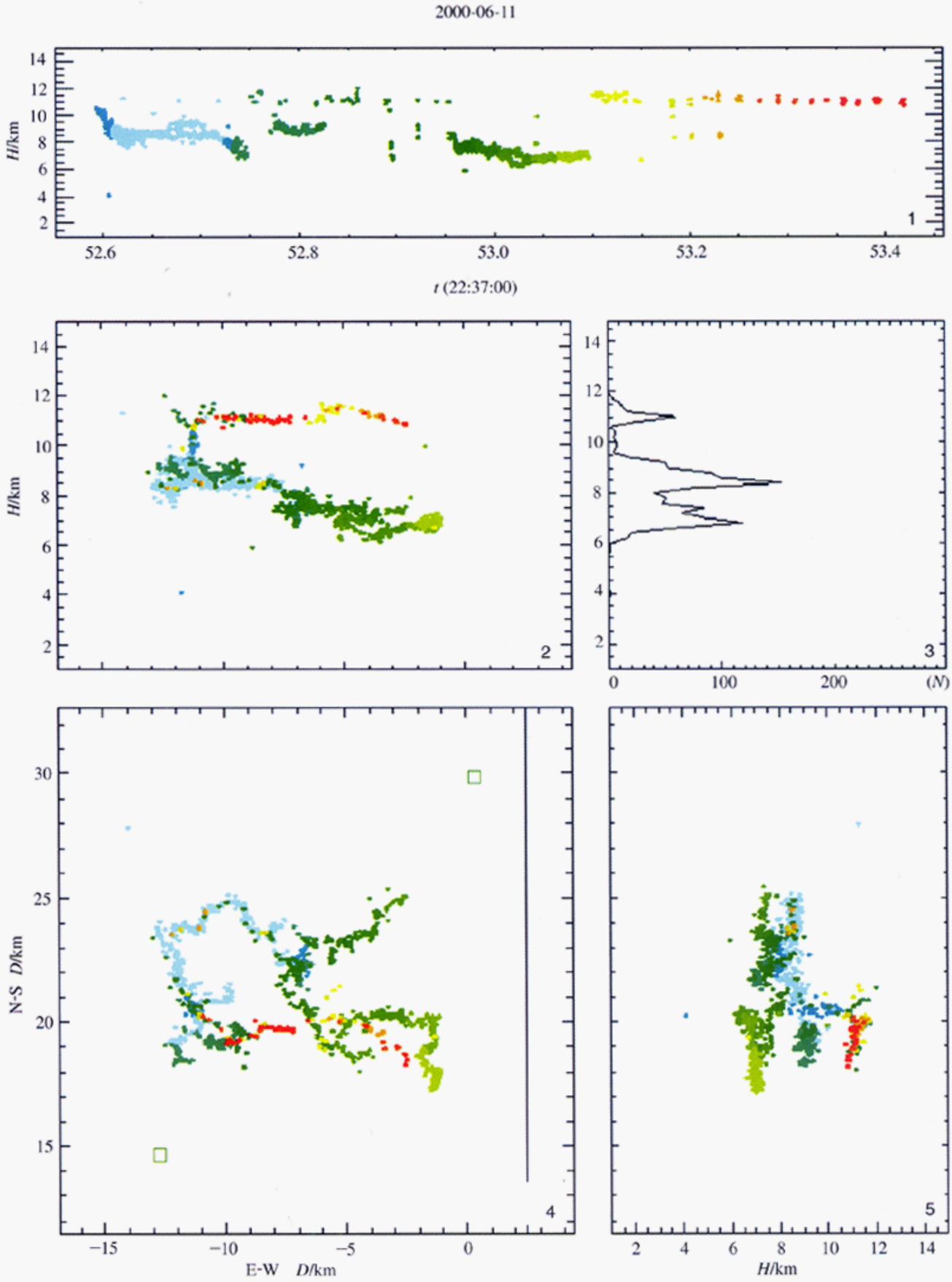
1 MacGorman D R, Rust W D. The electrical nature of storms. New York: Oxford University Press, 1998. 49~75
2 Krehbiel P R. The charge structure of thunderstorms. In: The Earth's Electrical Environment. Washington, D C: National Acad Press, 1986. 90~113
3 Williams E R. The tripole structure of thunderstorms. J Geophys Res, 1989, 94: 13151~13167
4 邵选民, 刘欣生. 云中闪电及云下部正电荷的初步分析. 高原气象, 1987, 6: 317~325
5 Liu Xinsheng, Ye Zongxiu, Shao Xuanmin, et al. Intracloud lightning discharges in the lower part of thundercloud. ACTA Meteorologica Sinica, 1989, 3: 212~219
6 Liu Xinsheng, Wang Caiwei, Zhang Yijun, et al. Experiment of artificially triggering lightning in China. J Geophys Res, 1994, 99: 10727~10731
7 刘欣生, 郄秀书, 张义军, 等. 中国内陆高原正极性雷电的观测实验研究. 高原气象, 1998, 17: 1~9
8 王才伟, 言穆弘, 刘欣生, 等. 论闪电先导的双向传输. 科学通报, 1998, 43(11): 1198~1201
9 Qie X, Yu Y, Liu X, et al. Charge analysis on lightning discharges to the ground in Chinese inland plateau. Ann Geophysics, 2000, 18: 1340~1348
10 Qie X, Yu Y, Liu X, et al. K-type breakdown process of intracloud discharge in Chinese inland plateau. Progress in Nature Science, 2000, 10(8): 607~611
11 Stolzenburg, M. An observational study of electrical structure in convective regions of mesoscale convective systems, PhD Diss. Norman: Univ of Oklahoma, 1996. 137
12 董万胜, 刘欣生, 张义军. 一次人工触发闪电的宽带干涉仪观测. 科学通报, 2001, 46(5): 427~432
13 Shao X M, Krehbiel P R. The spatial and temporal development of intracloud lightning. J Geophys Res, 1996, 101: 641~626, 668
14 Krehbiel P, Thomas R, Rison W, et al. Lightning mapping observations in central Oklahoma. EOS, 2000, 21~25
15 Rison W, Thomas R J, Krehbiel P, et al. A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico. Geophys Res Lett, 1999, 26: 3573~3576
16 Thomas R J, Krehbiel P R, Rison W, et al. Comparison of ground-based 3-dimensional lightning mapping observations with satellite-based LIS observations in Oklahoma. Geophys Res Lett, 2000, 27: 1703~1706
17 Liu X S, Krehbiel P R. The initial streamer of intracloud lightning flashes. J Geophys Res, 1996. 90: 6211~6218
18 Thomas R J, Krehbiel P R, Rison W, et al. Observations of VHF source powers radiated by lightning. Geophys Res Lett, 2001, 28: 143~146
19 Shao X M, Rhodes C T, Holden D N. RF radiation observations of positive cloud-to-ground flashes. J Geophys Res, 1999, 104: 9601~9608
20 张义军, 言穆弘, 刘欣生. 雷暴中放电过程的模式研究. 科学通报, 1999, 44(12): 1322~1325

(2002-03-01 收稿, 2002-05-10 收修改稿)



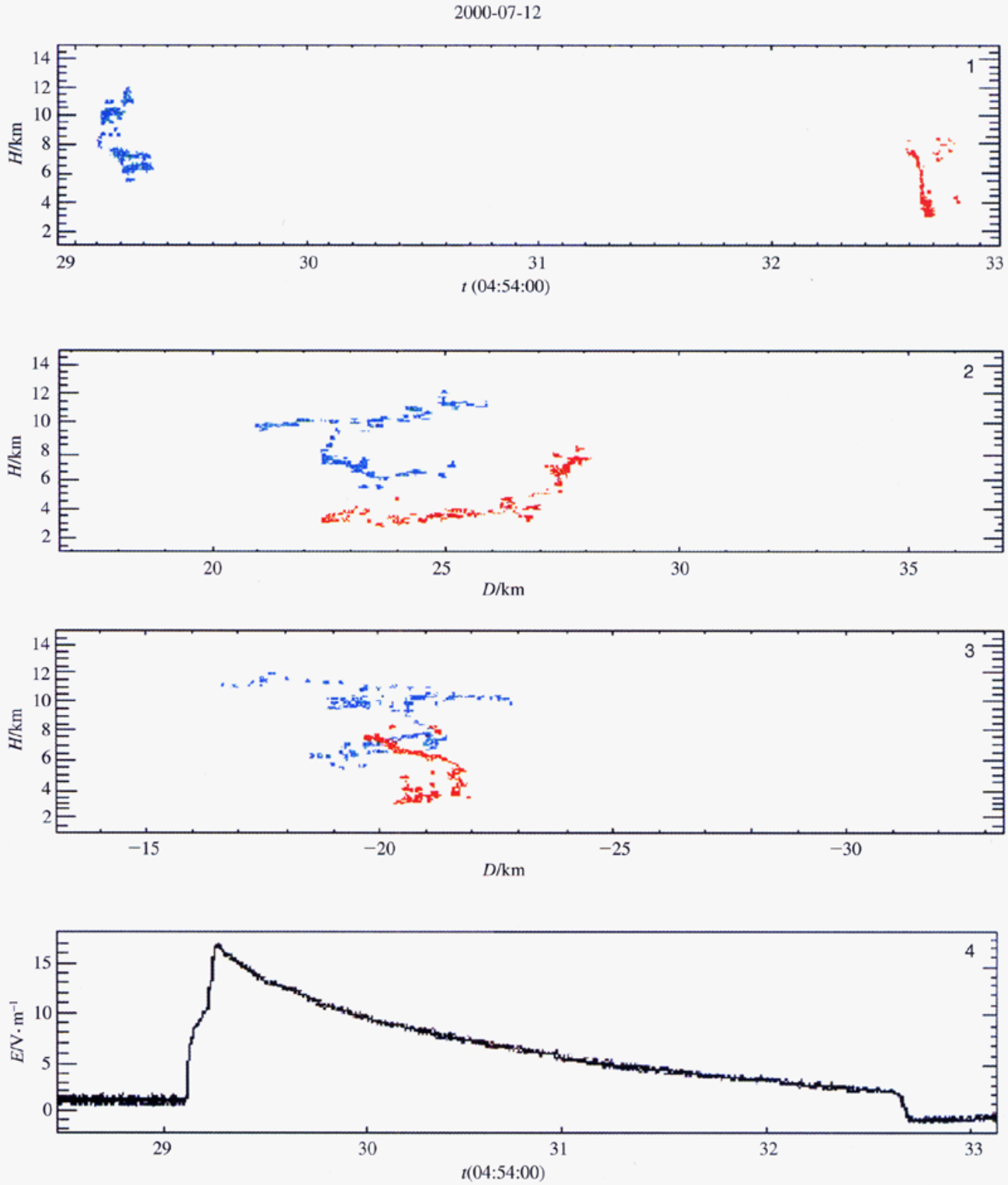
2000 年 6 月 12 日 00：03(UT)一次典型的正常极性的云内放电

1. 闪电 VHF 辐射源高度随时间的变化；2. 在南北方向上的立面投影；3. 辐射源数目(*N*)随高度的直方图分布；4. 平面投影；5. 在东西方向上的立面投影. 图中颜色随时间由蓝、绿、黄到红色逐渐变化. 图中小方块表示测站位置，*D* 为距坐标原点的距离



2000 年 6 月 11 日 22：37(UT)一次反极性云内闪电

说明同图版 I



2000 年 7 月 12 日 04：54(UT)两次云内放电

1. 闪电 VHF 辐射源高度随时间的变化; 2. 在南北方向上的立面投影; 3. 在东西方向上的立面投影; 4. 闪电引起的电场变化记录