科学通报 2012 年 第 57 卷 第 34 期：3301 ~ 3311
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

中国大陆地区雷暴上方的巨大喷流

杨静[①], 冯桂力[②]

① 中国科学院大气物理研究所, 中国科学院中层大气和全球环境探测重点实验室(LAGEO), 北京 100029;
② 山东省气象科学研究所, 济南 250031
E-mail: yangj@mail.iap.ac.cn

2012-06-06 收稿, 2012-07-23 接受
公益性行业气象科研专项(GYHY201006005-07)、国家自然科学基金(40930949, 41175002)和国家科技支撑计划(2008BAC36B03)资助

摘要 巨大喷流(gigantic jet)是发生在雷暴云上方的一类大尺度瞬态放电现象, 将雷暴云和电离层直接电连接起来. 与发生在雷暴云上方的其他放电现象相比, 巨大喷流很难在地面观测到. 2010 年 8 月 12 日晚, 在我国大陆地区黄海附近雷暴上方(雷暴中心位于 35.6°N, 119.8°E)观测到一例巨大喷流放电事件, 这是迄今为止观测到的距离赤道最远的发生在夏季雷暴上方的巨大喷流. 研究结果表明, 观测到的巨大喷流放电顶端约位于地面上方 89 km. 产生巨大喷流的雷暴是一个多单体雷暴, 巨大喷流出现在雷暴发展阶段, 云顶最低亮温约为–73℃, 最大回波顶高为 17 km, 45 dBZ 雷达回波顶高位于 12~14 km. 与已有研究结果巨大喷流产生前后正地闪占主导不同, 本文得到在巨大喷流产生前后负地闪占主导, 而且负地闪在整个雷暴过程中占主导, 表明产生巨大喷流雷暴的雷电活动特征存在多样性. 另外, 本文观测结果是两个雷暴过程产生了两类不同的放电事件, 产生巨大喷流的雷暴仅产生了这次巨大喷流, 而另外一次雷暴则只产生了 5 次红色精灵. 这一研究结果丰富了对已有产生巨大喷流的雷暴的认识. 此外, 由于本文观测到的巨大喷流处在台湾 FORMOSAT II 卫星搭载的 ISUAL(Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightnings)观测设备的有效探测范围(30°S~30°N)之外, 因此, 本文也是对台湾卫星观测结果的有益补充.

关键词
巨大喷流
闪电
雷暴
红色精灵

提到雷电, 人们脑海中很自然地就会浮现伴随雷暴而出现的形状多样的放电图像, 这些雷电都发生在对流层内, 而且已经有很多研究者对这类雷电进行了研究[1~11]. 然而, 有一类放电现象却发生在雷暴云上方, 其放电高度甚至可以达到电离层. 目前已经发现的发生在雷暴云上方的放电现象有 sprite(称为红闪或红色精灵)[12~14]、elves(Emissions of Light and VLF perturbation due to EMP Sources, Elves)(淘气精灵)[15]、blue jet(蓝色喷流)[16]和 gigantic jet(巨大喷流)[17]. 由于这几种放电现象的持续时间都很短(毫秒量级), 因此, 又统称为瞬态发光事件(Transient Luminous Events, TLEs).

Pasko 等人[17]于 2001 年 9 月 15 日在波多黎各雷暴上方记录到一例巨大喷流放电事件, 此放电从雷暴云顶部开始一直达到 70~90 km 高度, 发光以蓝色为主, 当时 Pasko 等人[17]并没有将这类放电称作巨大喷流(gigantic jet), 而是将其称为发生在雷暴云顶和低电离层之间的放电. 2002 年 7 月 22 日晚, 台湾成功大学在吕宋岛(Luzon)区域的一次雷暴上方, 拍摄到 5 例类似的放电事件, Su 等人[18]首次明确地将这类放电称为巨大喷流(gigantic jet). 随后, Van der Velde 等人[19], Cummer 等人[20]和 Chou 等人[21]也相继各自报道了一例巨大喷流, 而 Soula 等人[22]则在一次孤立雷暴上方记录到 5 例巨大喷流.

Van der Velde 等人[19]的研究结果表明, 他们观测到的巨大喷流较低的亮的部分的高度约为 50~59 km,

英文版见: Yang J, Feng G L. A gigantic jet event observed over a thunderstorm in mainland China. Chin Sci Bull, 2012, 57, doi: 10.1007/s11434-012-5486-3

这部分的顶部是分叉的形状, 而巨大喷流最上部非常暗的分叉则达到了 69~80 km 的高度, 在包含巨大喷流的时间窗中, 在 70 ms 内有 520 C km 的缓慢的大电荷矩转移. Cummer 等人[20]基于巨大喷流的微光观测和低频磁场测量, 发现在假定通道长度是 75 km 的前提下, 巨大喷流转移的电荷量达到 144 C, 同时, 他们的结果证明巨大喷流是负极性的放电. Chou 等人[21]则报道了发生在福建上空的一例巨大喷流, 这次巨大喷流起始于 blue starter(蓝色启辉器), 100 ms 之后有一个蓝色喷流(blue jet)出现在相同的雷暴云顶, 并在 50 ms 的时候最终发展为巨大喷流, 这是在地面观测到的首例第二种类型的巨大喷流(巨大喷流的其他类型将在文章第二部分进行介绍). Soula 等人[22]则在 50 km 的近距离上记录到 5 例巨大喷流, 其中 3 次巨大喷流出现在雷暴云顶温度达到最低(–81℃)之前, 而其余 2 次出现在雷暴云扩散阶段. 极低频辐射数据表明, 这 5 次巨大喷流也是负极性放电.

综上所述, 前人报道的巨大喷流都发生在热带或者亚热带地区. Van der Velde 等人[23]分析了发生在欧洲冬季雷暴上方的一例巨大喷流. 可见, 到目前为止, 全球地面观测到的发生在夏季雷暴和冬季雷暴上方的巨大喷流放电事件屈指可数. 同时, 这些研究结果表明, 与 sprite 和 elves 等放电事件相比, 巨大喷流的发生概率是很低的, 几乎可以说是零星出现. 根据台湾 FORMOSAT II 卫星上搭载的 ISUAL(Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightnings)探测设备的观测结果, 该设备在 2004 年 7 月到 2007 年 6 月期间共探测到 5434 例淘气精灵, 633 例红色精灵, 但对于巨大喷流, 仅观测到 13 例[24]. 这一结果也说明巨大喷流的发生概率是非常低的. 因此, 基于非常有限的个例, 对巨大喷流以及产生巨大喷流母体雷暴的认识是很有限的.

本文将对 2010 年 8 月 12 日 20:16:22(北京时间)发生在山东地区雷暴上方的一例巨大喷流进行报道, 这同时也是我国大陆地区对巨大喷流这类放电事件的首次报道. 正如前文所提到的, 已有的巨大喷流观测个例基本都在热带、亚热带或者冬季雷暴上空, 而我们观测的巨大喷流位于中纬度地区, 这次巨大喷流也是迄今为止观测到的距离赤道最远的发生在夏季雷暴(35.6°N, 119.8°E)上方的巨大喷流. 因此, 这一巨大喷流放电事件丰富了已有的巨大喷流观测个例. 同时, 由于观测到的巨大喷流处在台湾 FORMOSAT II 卫星搭载的 ISUAL 观测设备的有效探测范围(30°S~30°N)之外, 因此, 本文结果也是对台湾卫星观测结果的有益补充. 另外, 本文还得到了一些有趣的、与国外已有观测结果不同的结论, 因此, 本文丰富了对巨大喷流这类放电事件、产生巨大喷流的雷暴以及雷电活动的已有认识.

1 观测实验和数据

观测实验设在山东滨州(37°49′42″N, 118°05′06″E), 距离黄海大约 40 km. 所用光学观测系统由高灵敏度 Watec902H 黑白摄像机、12 mm f/0.8 镜头构成, 观测系统视野为 31.1°×21.2°[14], 时间分辨率为 25 幅/秒. 观测过程中, 利用红外卫星云图得到可能产生 TLEs 事件的雷暴大致方位和距离, 同时, 根据全球雷电定位网得到的雷电分布情况(每 10 分钟更新一次), 及时调整摄像系统的指向, 使其对准雷暴的电活动中心. 全球雷电定位网(World Wide Lightning Location Network, WWLLN)是一个甚低频全球雷电定位网络, 由分布在全球的 40 多个探测站组成, 网络中心位于美国华盛顿大学. 目前在中国共有 4 个探测子站, 分别位于北京、兰州、南京和香港. 北京探测子站的探测设备安装于大气物理所实验楼顶. 由于全球雷电定位网不能提供闪电放电回击电流信息, 这一信息将由地面雷电定位网给出, 该数据由山东省气象局提供.

MTSAT(Multi-Function Transport Satellite)卫星给出产生巨大喷流雷暴云的云顶亮温信息, 像素点越亮, 表明温度越低, 云顶越高. 此数据可以网上下载 (http://weather.is.kochi-u.ac.jp/archive-e.html), 每小时更新一次, 空间分辨率为 0.05°×0.05°. 更详细的雷暴信息由多普勒雷达给出. 多普勒雷达是研究中尺度对流系统的有效工具, 本文所用的多普勒雷达是 S 波段 WSR-98D 全相干多普勒天气雷达, 它是美国 WSR-88D 的升级版, 具有先进的电脑控制、24 小时运行能力、实时监控、实时标定、较高的精确度和稳定性等特点. 所用多普勒天气雷达有 230 和 460 km 两种扫描范围, 扫描范围为 230 km 时, 分辨率为 1 km, 每 6 分钟更新一次数据. 多普勒雷达数据亦由山东省气象局提供. 探空数据由怀俄明大学提供 (weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html), 所用到的探空站为青岛站(35°59′16″N, 120°13′44″E), 编号为 54857.

2 巨大喷流特征

图 1(a)为观测到的巨大喷流放电图像, 此次巨大喷流发生在北京时间 2010 年 8 月 12 日 20:16:22. Chou 等人[25]利用台湾 ISUAL 的观测数据, 将巨大喷流分为 3 种类型: 第一种类型的巨大喷流与 Pasko 等人[17]和 Su 等人[18]报道的巨大喷流类似, 这种巨大喷流的形态特征演变分为 3 个阶段: 先导喷流(leading jet, LJ)、发展完整的喷流(fully developed jet, FDJ)和尾随喷流(trailing Jet, TJ). 巨大喷流中的先导喷流扮演着类似地闪中梯级先导的角色, 而发展完整的喷流也与地闪中的回击类似, 但尾随喷流却无法像地闪中的直窜先导那样再次建立雷暴云与电离层之间的完整通路. 极低频电磁辐射观测数据表明, 第一种类型的巨大喷流是负极性的放电. 第二种类型的巨大喷流起始阶段与蓝色喷流(蓝色喷流放电也是起始于雷暴云顶, 但其放电的顶端高度一般在地面上方 40~50 km, 低于巨大喷流放电的顶端高度)类似, 然后向上发展并到达低电离层高度, 这种类型的巨大喷流发光较弱, 目前倾向于认为这类放电是正极性放电. 第三种类型的巨大喷流紧随闪电发生并出现在闪电附近, 其亮度介于第一种类型和第二种类型之间. 图 1(b)和(c)为其他作者得到的巨大喷流放电图像. 对比可以看出, 我们观测到的放电图像仅记录到了巨大喷流的上半部分, 而且与 Su 等人[18]和 Chou 等人[25]得到的放电图像非常类似, 因此, 推测记录到的巨大喷流应该属于第一种类型. 另外, 根据 Chou 等人[25]的研究结果, 第一种类型巨大喷流的发光亮度约为第二种类型的 3.4 倍, 而本文巨大喷流是地面观测的结果, 说明巨大喷流发出的光在经过大气散射、吸收后仍能够在地面被记录到, 表明此巨大喷流的发光很强, 这也进一步说明观测到的巨大喷流属于第一种类型.

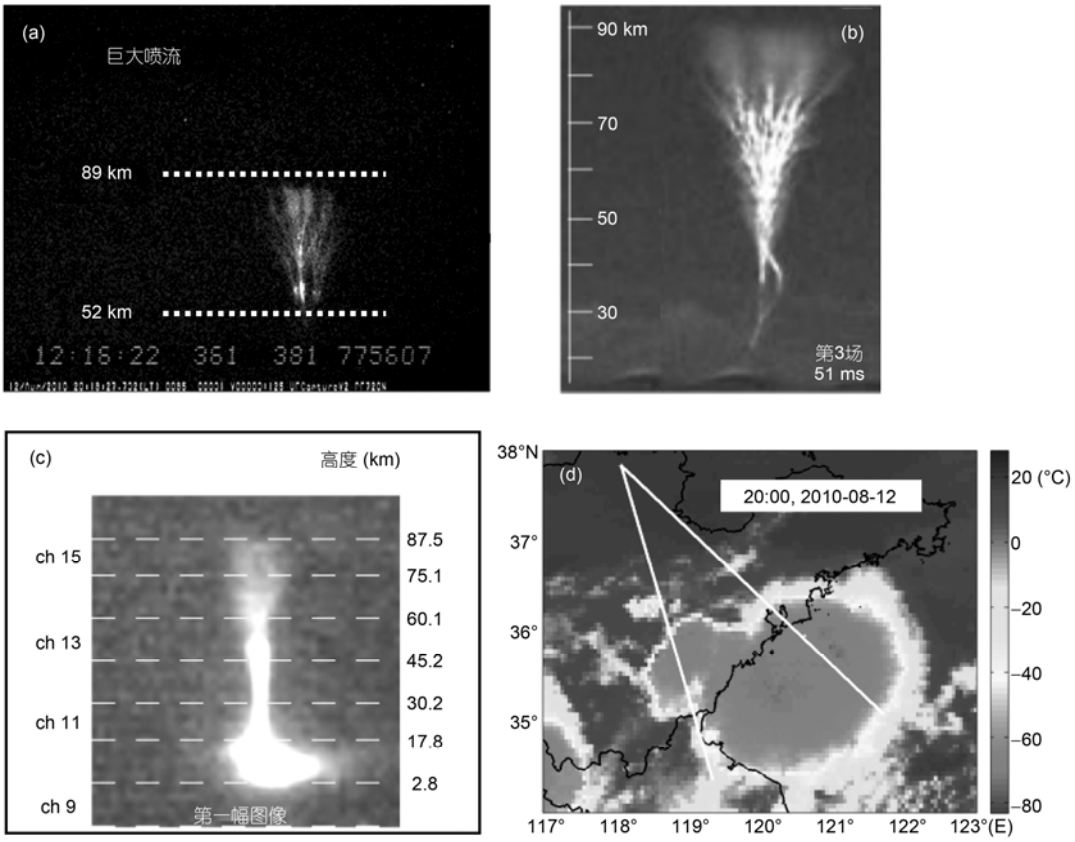


图 1 巨大喷流放电图像以及产生巨大喷流的雷暴云

(a) 本文观测到的巨大喷流; (b) 第一种类型的巨大喷流图像(引自 Su 等人[18]); (c) 第一种类型的巨大喷流图像(引自 Chou 等人[25]); (d) MTSAT 卫星得到的产生这次巨大喷流雷暴的云顶亮温, 最低云顶亮温为–73℃. (d)中的两条白线表示从观测站延伸的观测系统的视野范围

3 产生巨大喷流和红色精灵雷暴的特征分析

图 2 给出了由红外卫星云图得到的云顶亮温与闪电的叠加, 黑色圆点表示负地闪, 玫红色圆点表示正地闪. 由图可以看出, 雷暴过程中产生的正地闪很少, 绝大部分为负地闪, 且位于云顶亮温较低的区域, 虽然有些负地闪从云图中看位于云顶亮温较高的区域("24∶00"时刻白色圆圈内的负地闪), 但通过与多普勒雷达数据的仔细对比分析发现, 这些负地闪位于雷暴的强回波区(为了清晰地看出雷暴的结构, 没有将闪电信息叠加在雷达回波上). 另外, 图 2 中"19∶00"和"20∶00"时刻的闪电分布表明, 闪电明显地分布在两个区域, 利用多普勒雷达数据进一步分析发现在观测系统视野范围内有两个雷暴(图 3 中的雷暴"A"和"B"). 由于红外卫星云图的空间分辨率较低(5 km 左右), 因此不能看出雷暴的详细信息.

既然观测系统视野范围内同时存在两个雷暴, 那么, 究竟是哪个雷暴产生了巨大喷流, 哪个雷暴产生了红色精灵, 还是某个雷暴既产生了巨大喷流又产生了红色精灵? 由于观测系统的视野是已知的, 我们将观测系统的视野叠加在雷达回波上, 得到图 3 中"20∶19"时刻的雷达回波与摄像机观测视野的叠加图. 同时, 由于巨大喷流在视野中的位置也是已知的, 因此将巨大喷流所在的方位角也叠加在图 3"20∶19"中. 由图可以看出, 巨大喷流的方位角主要经过雷暴"A"的强中心, 而仅经过雷暴"B"的边缘, 说明巨大喷流很可能是由雷暴"A"产生的. 假设巨大喷流是由雷暴"B"产生的, 那么巨大喷流应该出现在观测系统视野的中央或者左侧. 综上所述可见, 巨大喷流是由雷暴"A"产生的. 图 3"20∶19"表明, 雷暴"A"由南、北两部分构成, 南部的中心比北部更强一些, 巨大喷流由南部中心产生的可能性更大一些, 但究竟是由哪个强中心产生的呢? 首先假定巨大喷流是由雷暴"A"南部的强中心产生的. 由于观测站的位置、观测系统的视野、方位角和仰角都是已知的, 因此可以确定观测系统与雷暴中心的水平距离, 这个距离可以看作是观测系统与巨大喷流的水平距离, 在上述条件已知的前提下, 采用杨静等人[14]的方法, 可以估计图 1(a)中巨大喷流所在的高度. 结果表明, 在假定巨大

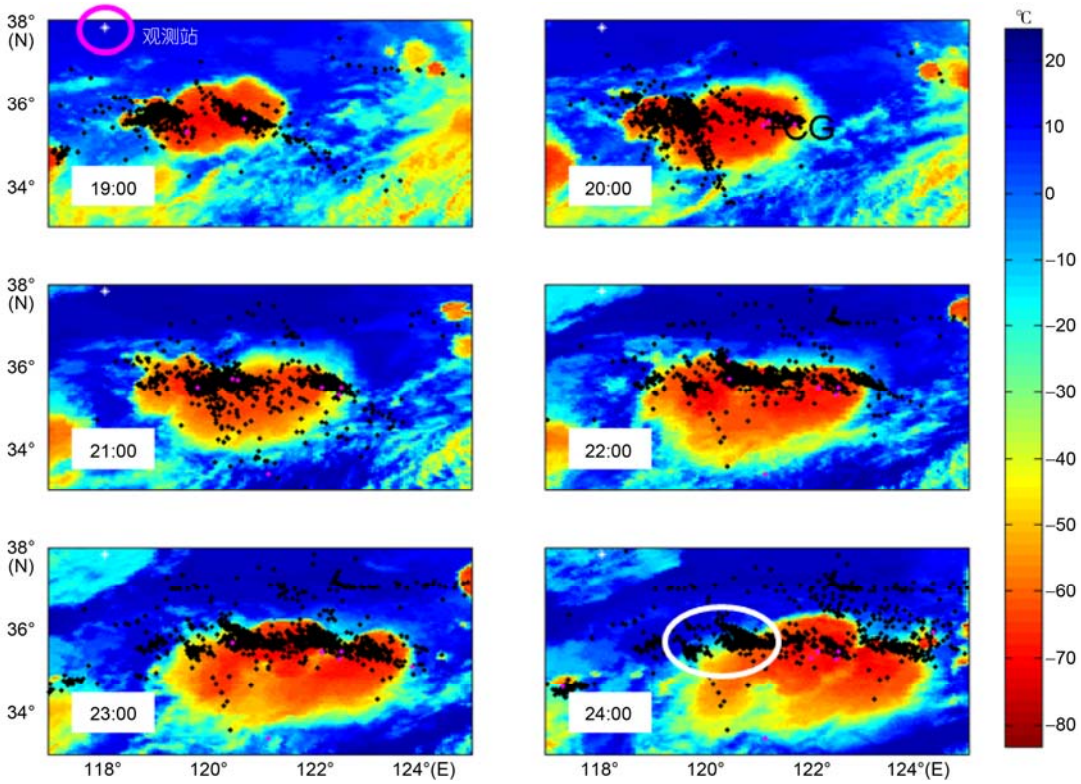


图 2 2010 年 8 月 12 日晚云顶亮温与一小时内(图中所示时刻前后 30 分钟)闪电的叠加

黑色和玫红色"·"分别表示负地闪和正地闪. "19∶00"时刻图中白色星号表示观测站位置

喷流是由南部强中心产生的前提下, 估算得到的巨大喷流的顶端约位于 89 km, 图像底端约位于 52 km, 与国外已有研究结果[17~20]有较好的一致性. 另外, 虽然雷暴“A”北部的中心与南部中心相比要弱, 但它是否有产生巨大喷流的可能性呢? 为了澄清这个问题, 我们采用类似的方法, 估算得到图 1(a)中巨大喷流图像的底端约在 38 km, 顶端约在 74 km, 明显低于国外已有结果[17~20]. 说明巨大喷流是由雷暴“A”南部的中心产生的. 采用类似方法分析发现, 观测过程中记录到的 5 例红色精灵是由雷暴“B”产生的, 它们出现在 19:42~19:57之间, 相邻两次红色精灵出现的平均时间间隔约为 4 分钟. 产生 19:51:15 和 19:56:18 时刻红色精灵的母体雷电位于云顶亮温约为–70℃的区域. 图 2“20:00”时刻图中的“+”表示母体雷电的位置. 巨大喷流和 5 次红色精灵的特征如表 1 所示, 5 次红色精灵的静态图像如图 4 所示.

Van der Velde 等人[19]研究结果表明, 巨大喷流和红色精灵出现在同一次雷暴过程上方, 而本文发现两次不同的雷暴过程产生了两类不同的放电事件. 产生巨大喷流的雷暴“A”和产生红色精灵的雷暴“B”有无区别? 对雷暴云顶亮温的分析表明, 在巨大喷流出现时段, 雷暴“A”的最低云顶亮温约为–73℃. 雷暴“A”的云顶亮温在 21:00 之后升高, 在 22:00 之后又降低, 这可能是由于雷暴向黄海方向移动, 海洋上的暖湿空气导致雷暴对流加强从而导致云顶亮温降低. 在红色精灵出现时段, 雷暴“B”的最低云顶亮温约为–75℃, 比已有研究结果[14~26]略低. 图 3 给出了产生巨大喷流的雷暴“A”和产生红色精灵的雷暴“B”的多普勒雷达回波特征. 为了清晰地表明雷暴特征, 在产生巨大喷流和红色精灵时段(8 月 12 日 19:25 到 20:31), 给出了每 6 分钟的雷达回波图像, 在随后时段给出了整点附近的雷达回波图(8 月 12 日地 21:00, 21:58, 23:03, 8 月 13 日的 00:02, 01:02). 为了清晰地看出雷达回波特征, 本文同时给出了两个扫描范围(230 和 460 km)的雷达回波图. 图 3 中标有“460 km”的表示此雷达回波是由 460 km 扫描范围得到的, 其他未标的表示是由 230 km 扫描范围得到的. 图 3 表明, 产生巨大喷流的雷暴“A”是由迅速演变的多个对流单体构成的, 45 dBZ 的雷达回波顶高达到了 12~14 km(限于文章篇幅, 这里没有将图给出), 最大回波顶高在 20:19 时刻达到了 17 km, 比 Su 等人[18]得到的对流中心的回波顶高达到 16 km 略高, 表明产生巨大喷流前后雷暴内存在很强的对流活动, 与已有的研究结果[17,18]一致. 另外, 青岛探空数据表明(青岛站与雷暴的距离约为 100 km, 这是能找到的最近的探空站), 2010 年 8 月 12 日 20:00 时的对流有效位能(Convective Available Potential Energy, CAPE)为 1294 J/kg, 而 8 月 13 日 08:00 时的对流有效位能为 363 J/kg, 表明雷暴发展过程中消耗了较多能量, 也说明对流较强.

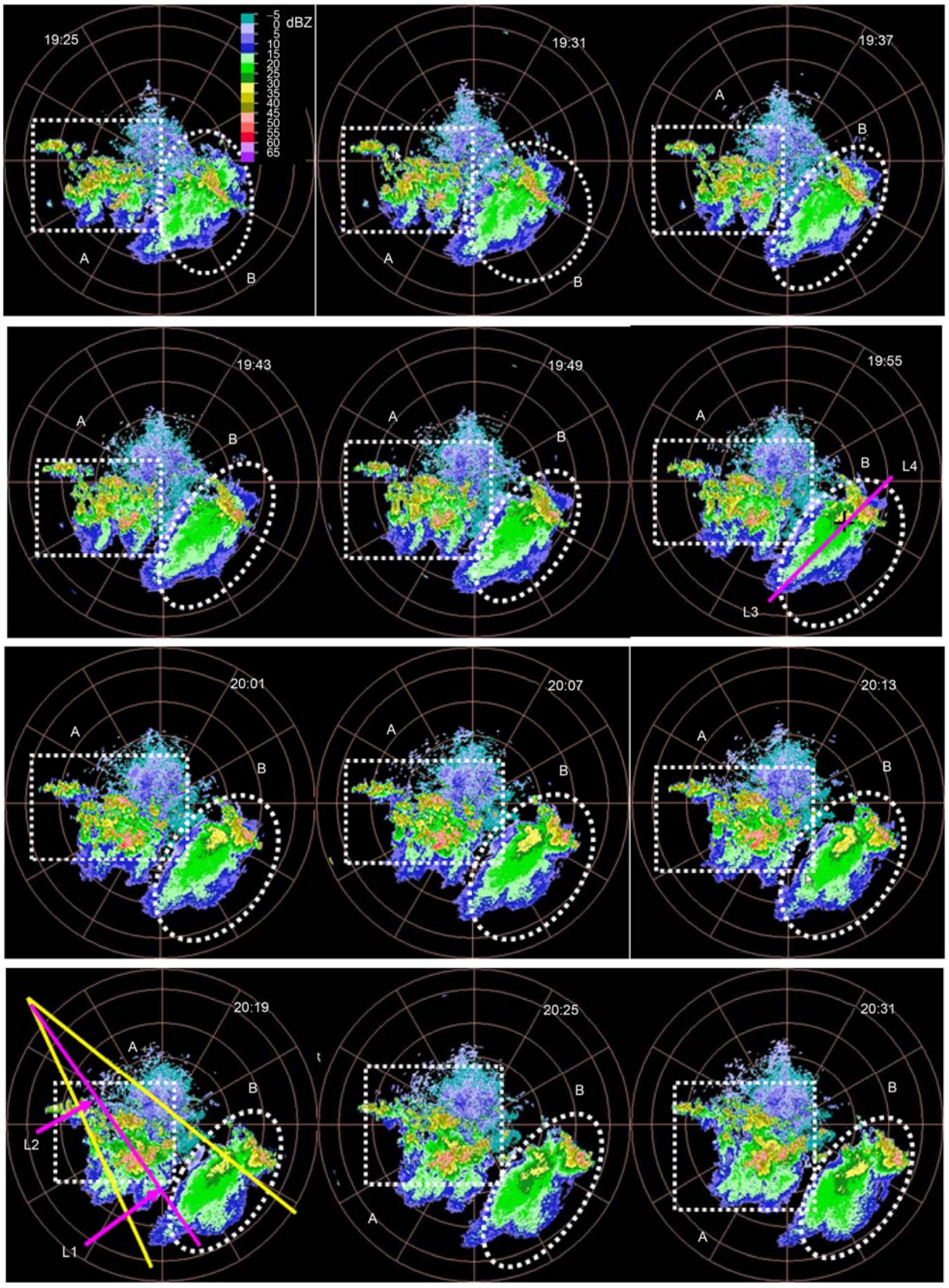
表 1　巨大喷流和红色精灵特征

编号	放电类型	北京时间	形态特征
1	巨大喷流	20:16:22	第一种类型
2	红色精灵	19:42:38	胡萝卜状
3	红色精灵	19:46:25	胡萝卜状
4	红色精灵	19: 49:05	未知
5	红色精灵	19:51:15	胡萝卜状
6	红色精灵	19:56:18	胡萝卜状

进一步的分析表明, 巨大喷流出现在雷暴发展阶段. 为了看清产生巨大喷流雷暴的垂直结构, 我们沿巨大喷流所在方位角(图 3 中直线 L1, L2)对雷暴做了纵切面, 结果如图 3 所示. 由图可以看出, 产生巨大喷流前后, 雷暴“A”内存在很强的对流. 对产生红色精灵的雷暴“B”进行分析表明, 红色精灵出现在雷暴的成熟-消散阶段, 与这一地区已有的红色精灵观测结果一致[14]. 通过详细对比红色精灵的出现时间和地面雷电定位网得到的雷电信息发现, 产生 19:51:15 和 19:56:18 时刻两次红色精灵的母体雷电位于回波强度约为 25~30 dBZ 的层状云降水区(图 3 中 19:55 时刻图中的“+”号表示母体雷电位置), 也与这一地区已有的红色精灵观测结果一致[14]. 类似地, 沿通过母体雷电位置的直线 L3 和 L4 做了纵切面, 结果如图 3 所示. 与产生巨大喷流的雷暴区域相比, 产生红色精灵的层状云降水区内没有明显对流活动.

4　产生巨大喷流和红色精灵的雷暴电活动特征

雷电活动特征是雷暴发生发展过程中的一个重要信息, 本节将利用山东省气象局提供的雷电定位网数据, 分析产生巨大喷流和红色精灵两个雷暴的雷电活动特征. 由于两次不同的雷暴过程产生了两类不同的


19:25
dBZ
-5
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
65
A
B
19:31
19:37
19:43
19:49
19:55
L4
L3
20:01
20:07
20:13
20:19
L2
L1
20:25
20:31

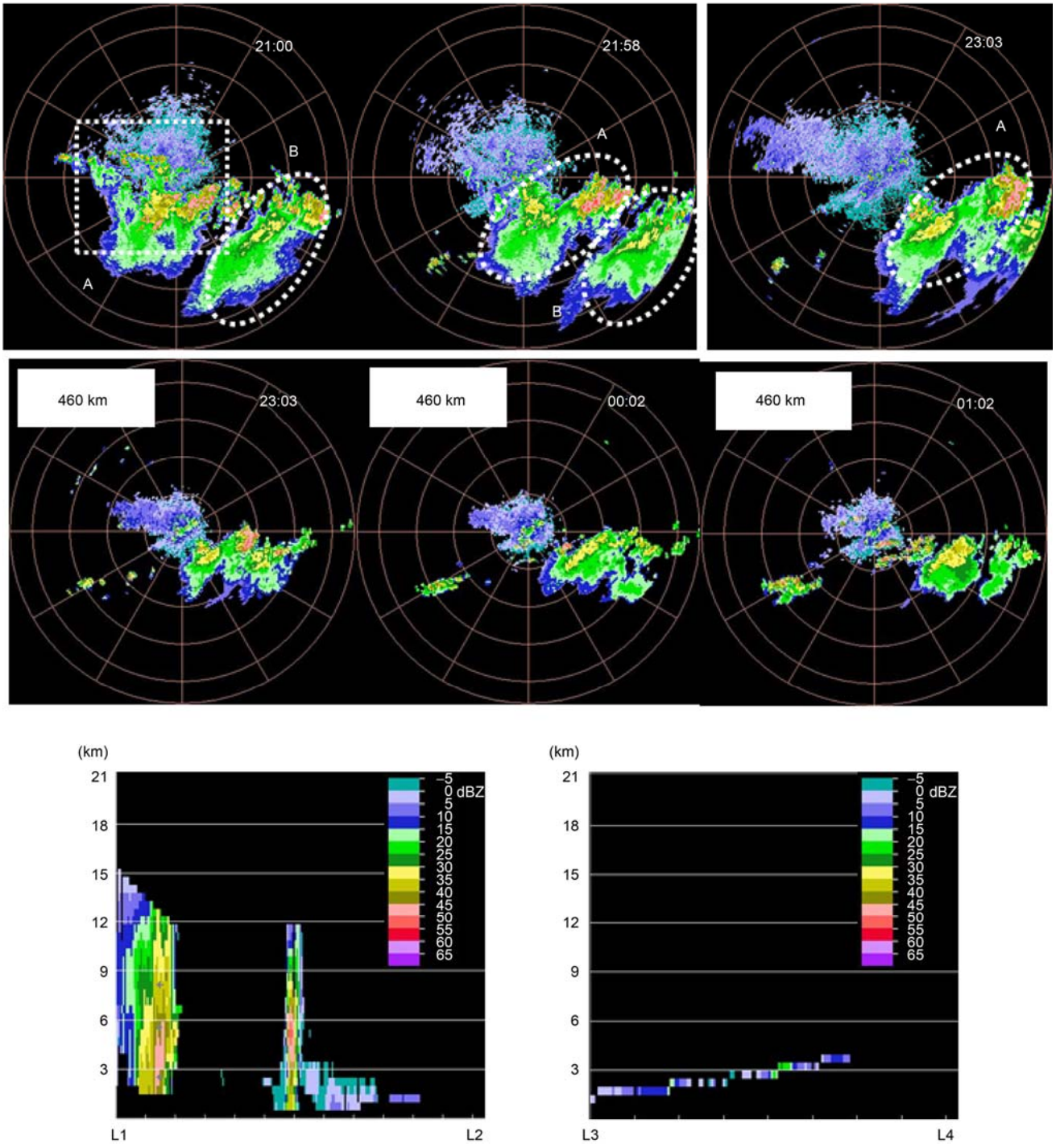


图 3　雷暴结构随时间演变图

图中所有色标都与第一张图(19∶25 时刻)一样. 最后两张图表示沿图“20∶19”中直线(L1, L2)和沿图“19∶55”中直线(L3, L4)做的纵切面. 图“20∶19”(巨大喷流发生后的 3 分钟)中的两条黄线表示由观测站延伸的观测系统的视野, 而由观测站延伸的玫红色线则表示巨大喷流所在的方位角

放电事件, 因此, 这里将对雷暴“A”和雷暴“B”分别进行分析. 另外, 为了与国外作者[19]得到的研究结果进行对比, 这里将相邻两次回击之间的距离小于 10 km, 时间间隔小于 1 s 归为同一次闪电的不同闪击. 图 5(a)和(b)分别给出了产生巨大喷流的雷暴“A”和产生红色精灵的雷暴“B”在 19∶00 到 21∶00 之间每 5 分钟内正、

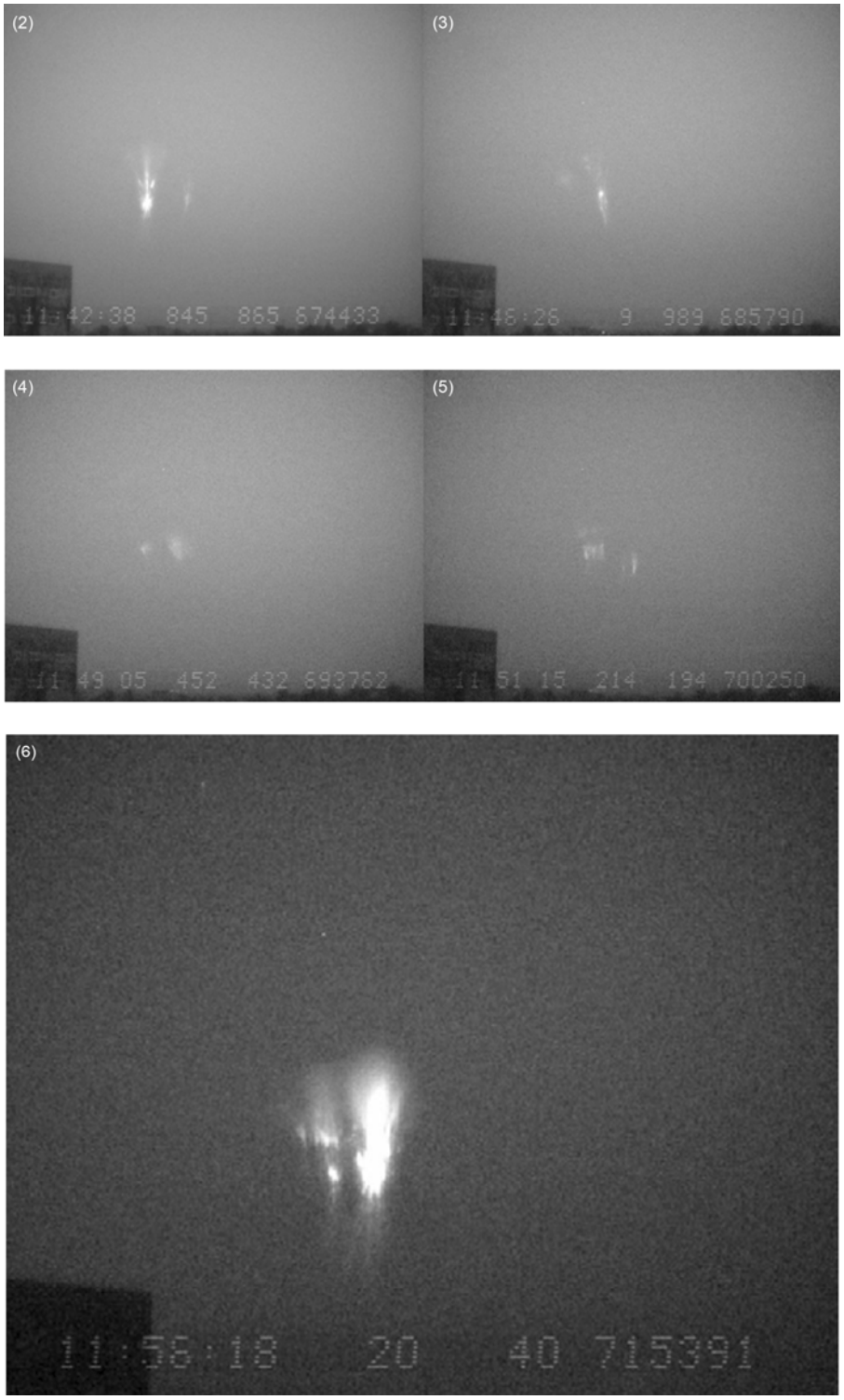


图 4 5 次红色精灵的静态图像

5 次红色精灵的编号与表 1 中相同

负地闪频数随时间的演变, 红线表示正地闪, 蓝线表示负地闪, 图 5 中同时还标出了巨大喷流发生时刻(图中 GJ 所指时刻)和红色精灵(图中 Sprites 表示的时间段)产生时段. 图 5 表明, 在巨大喷流产生前, 正地闪频数略

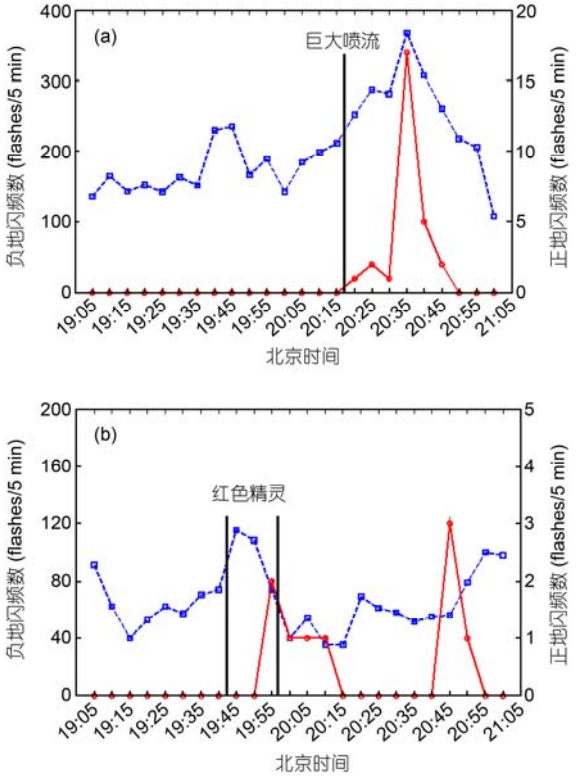


图 5　雷暴过程中 19∶00~21∶00 期间每 5 分钟内正、负地闪频数随时间的演变

红线表示正地闪、蓝线表示负地闪. (a) 雷暴“A”闪电频数随时间的演变; (b) 雷暴“B”闪电频数随时间的演变. 图中标出了巨大喷流出现时刻和红色精灵发生时段

有增加, 与 Van der Velde 等人[19]得到的结论一致. 但是, 负地闪与正地闪之间的比例远高于 Van der Velde 等人[19]的结果. 同时图 5(a)表明在巨大喷流产生前后, 负地闪占主导, 而 Van der Velde 等人[19]得到在巨大喷流产生前后正地闪占主导. Van der Velde 等人[19]对峰值电流小于 10 kA 的正地闪和峰值电流大于 10 kA 的正地闪分别进行了分析, 并得到了几乎相同的正、负地闪频数(参见该文中的图 7). 因此, 可以推断: 如果 Van der Velde 等人[19]不对峰值电流大于或小于 10 kA 的正地闪分别进行分析, 他们将得到更大的正地闪频数. 因此, Van der Velde 等人[19]得到产生巨大喷流的雷暴中巨大喷流产生前后正地闪占主导, 与本文结论有一定差异. 上述分析结果表明, 产生巨大喷流雷暴的雷电活动特征存在多样性.

图 6 给出了巨大喷流发生前后的 10 分钟内(20∶11~20∶21)正负地闪的分布, 结果表明雷暴在此期间共产生了 690 个负地闪, 但仅产生了 2 个正地闪. 考虑到将距离小于 10 km、时间小于 1 s 的相邻两次回击归为同一次闪电可能存在一定主观性, 本文又对回击(不是闪电)进行了分析, 同样发现在此时间段内仅有两次正的回击. 进一步的分析表明, 在巨大喷流发生前的 5 分钟内, 没有正地闪发生, 与 Van der Velde 等人[19]得到在巨大喷流发生前 4 分钟内正地闪增加、负地闪停止的结论有一定差异. 峰值电流小于 10 kA 的正地闪很可能是云闪, 而地闪定位网误将其认作地闪[27], 类似的问题在本文中应该同样存在. 也就是说, 本文可能将某些云闪也认为是正地闪了, 但即使如此, 本文得到的正地闪频数与 Van der Velde 等人[19]相比仍然很低. Soula 等人[22]的研究结果表明, 在巨大喷流发生前的几十秒内, 没有地闪发生, 他们推测巨大喷流主要是由云闪引起的, 与 Krehbiel[28]发表在 *Nature GeoScience* 上的文章结论相一致. 但仔细分析本文的雷电定位数据发现, 在巨

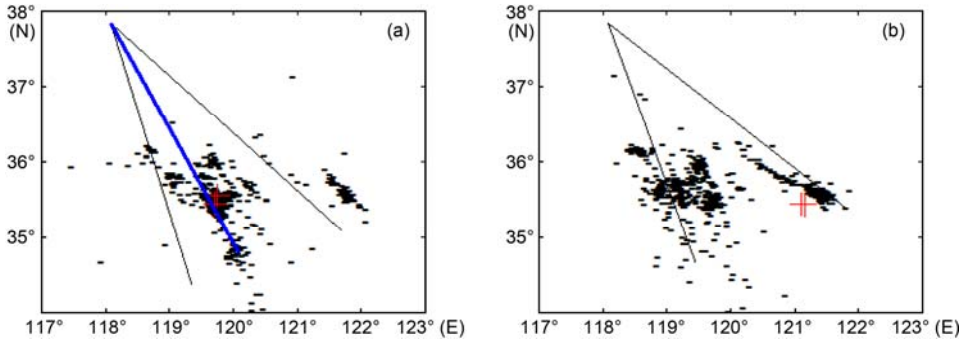


图 6　巨大喷流和红色精灵期间正负地闪的分布

(a) 巨大喷流发生前后的 10 分钟内正、负地闪的分布; (b) 红色精灵产生时段(19∶42~19∶57)内正、负地闪的分布. 图中红色“+”表示正地闪、黑色点表示负地闪. 图中两条黑线表示从观测站延伸的观测系统的视野, (a)中蓝线表示巨大喷流在视野中所在的方位

大喷流发生前的 20 秒内, 发生了 25 次负极性地闪. 上述结果再次说明, 产生巨大喷流的雷暴可能存在较大差异, 需要开展进一步的研究. 图 5(a)中 20:35 时刻, 正负地闪都达到了峰值, 由雷达回波看出, 这是由于雷暴加强导致的. 图 5(b)表明, 产生红色精灵时段对应负地闪频数的降低和正地闪频数的增加, 与已有研究结果[14,26]相一致.

5 结果与讨论

本文对我国大陆地区雷暴上空出现的巨大喷流放电事件进行了首次报道, 这也是迄今为止观测到的距离赤道最远的发生在夏季雷暴(雷暴中心位于 35.6°N, 119.8°E)上方的巨大喷流. 研究结果表明, 观测到的巨大喷流属于第一种类型, 放电顶端的高度达到了 89 km. 产生巨大喷流的雷暴是一个多单体雷暴, 45 dBZ 的雷达回波顶高达到了 12~14 km, 最大回波顶高在巨大喷流出现的 3 分钟后达到了 17 km, 表明在巨大喷流发生前后, 雷暴内存在很强的对流活动.

与已有研究结果巨大喷流产生前后正地闪占主导不同, 本文得到在巨大喷流产生前后负地闪占主导, 而且负地闪在整个雷暴过程中占主导, 表明产生巨大喷流雷暴的雷电活动特征存在多样性. 与已有研究结果同一个雷暴既产生了巨大喷流又产生了红色精灵不同, 本文观测结果是两个雷暴过程产生了两类不同的放电事件, 一个雷暴产生了巨大喷流, 而另外一个雷暴则产生了 5 次红色精灵. 这一研究结果丰富了对已有产生巨大喷流雷暴的认识. 另外, 已有的巨大喷流观测个例基本都在热带、亚热带或者冬季雷暴上空, 而本文观测到的巨大喷流位于中纬度地区, 而且处在台湾 FORMOSAT II 卫星搭载的 ISUAL 观测设备的有效探测范围(30°S~30°N)之外, 因此, 本文也是对台湾卫星观测结果的有益补充.

巨大喷流这类放电事件在雷暴云和电离层之间建立了直接电连接, 并将几十甚至上百库仑的电荷从雷暴云转移到电离层, 远大于普通地闪向地面转移的电荷量, 对电离层电位有直接影响, 因此, 研究巨大喷流这类放电事件将为全球大气电路模型提供必要的输入参量. 另外, 一次巨大喷流释放的能量有几十兆焦耳, 将对飞行在临近空间内的飞行器构成严重威胁; 同时, 这一能量将导致巨大喷流区域内的大气产生剧烈的化学反应、进而导致该区域内大气物理环境的很大改变. 巨大喷流作为刚发现不久的一类放电事件, 由于目前观测个例较少, 人们对与其相关的许多科学问题还未有清晰的认识, 比如巨大喷流区域大气的电离程度如何? 该区域电子的能量有多高? 3 类巨大喷流的形成条件是什么? 巨大喷流 3 个不同阶段的成因是什么? 为何巨大喷流还有树状和葡萄状等不同形态, 不同形态形成的原因是什么? 这些都是重要的尚未解决的基本科学问题. 今后, 将通过观测数据分析和理论研究相结合的方法, 对发生在雷暴云上方的这类放电现象开展深入研究.

致谢 感谢日本高知大学、美国怀俄明大学提供的卫星和探空数据.

参考文献

1 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: 427–432
2 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
3 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
4 赵中阔, 郄秀书, 张廷龙, 等. 一次单体雷暴云的穿云电场探测及云内电荷结构. 科学通报, 2010, 54: 3532–3536
5 马明, 陶善昌, 祝宝友, 等. 全球闪电活动对气候变化的响应. 科学通报, 2005, 50: 1643–1647
6 郄秀书, Toumi R, 周筠珺. 青藏高原中部地区闪电活动特征及其对对流最大不稳定能量的响应. 科学通报, 2003, 48: 87–90
7 Yang J, Qie X S, Zhang G S, et al. Magnetic field measuring system and current retrieval in artificially triggering lightning experiment. Radio Sci, 2008, 43, doi: 10.1029/2007RS003753
8 Qie X S, Jiang R B, Wang C X, et al. Simultaneously measured current, luminosity, and electric field pulses in a rocket-triggered lightning flash. J Geophys Res, 2011, 116, doi: 10.1029/2010JD015331
9 Kong X Z, Qie X S, Zhao Y. Characteristics of downward leader in a positive cloud-to-ground lightning flash observed by high-speed video camera and electric field changes. Geophys Res Lett, 2008, 35, doi: 10.1029/2007GL032764

10 Yuan T, Qie X. Study on lightning activity and precipitation characteristics before and after the onset of the South China Sea summer monsoon, J Geophys Res, 2008, 113, doi: 10.1029/2007JD009382
11 Qie X S, Zhang T L, Zhang G S, et al. Electrical characteristics of thunderstorms in different plateau regions of China. Atmos Res, 2009, 91: 244–249
12 Franz R C, Nemzek R J, Winckler J R. Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system. Science, 1990, 249: 48–51
13 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: 480–486
14 杨静, 郄秀书, 张广庶, 等. 发生于山东沿海雷暴云上方的红色精灵. 科学通报, 2008, 53: 482–488
15 Boeck W L, Vaughan O H Jr, Blakeslee R, et al. Lightning induced brightening in the airglow layer. Geophys Res Lett, 1992, 19: 99–102
16 Wescott E M, Sentman D D, Osborne D L, et al. Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 2. Blue jets. Geophys Res Lett, 1995, 22: 1209–1212
17 Pasko V P, Stanley M A, Mathews J D, et al. Electrical discharge from a thunderstorm top to the lower ionosphere. Nature, 2002, 416: 152–154
18 Su H T, Hsu R R, Chen A B, et al. Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere. Nature, 2003, 423: 974–976
19 Van der Velde O A, Lyons W A, Nelson T E, et al. Analysis of the first gigantic jet recorded over continental North America. J Geophys Res, 2007, 112, doi: 10.1029/2007JD008575
20 Cummer S A, Li J, Han F, et al. Quantification of the troposphere-to-ionosphere charge transfer in a gigantic jet. Nature Geosci, 2009, 2: 617–620
21 Chou J K, Tsai L Y, Kuo C L, et al. Optical emissions and behaviors of the blue starters, blue jets, and gigantic jets observed in the Taiwan transient luminous event ground campaign. J Geophys Res, 2011, 116, doi: 10.1029/2010JA016162
22 Soula S, Van der Velde O A, Montanya J, et al. Gigantic jets produced by an isolated tropical thunderstorm near Réunion Island. J Geophys Res, 2011, 116, doi: 10.1029/2010JD015581
23 Van der Velde O A, József B, Li J B, et al. Multi-instrumental observations of a positive gigantic jet produced by a winter thunderstorm in Europe. J Geophys Res, 2010, 115, doi: 10.1029/2010JD014442
24 Chen A B, Kuo C L, Lee Y J, et al. Global distributions and occurrence rates of transient luminous events. J Geophys Res, 2008, 113, doi: 10.1029/2008JA013101
25 Chou J K, Kuo C L, Tsai L Y, et al. Gigantic jets with negative and positive polarity streamers. J Geophys Res, 2010, 115, doi: 10.1029/2009JA014831
26 Soula S, Van der Velde O A, Montanya J, et al. Analysis of thunderstorm and lightning activity associated with sprites observed during the EuroSprite campaigns: Two case studies. Atmos Res, 2009, 91: 514–528
27 Cummins K L, Murphy M J, Bardo E A, et al. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network. J Geophys Res, 1998, 103: 9035–9044
28 Krehbiel P R, Riousset J A, Pasko V P, et al. Upward electrical discharges from thunderstorms. Nature Geosci, 2008, 1: 233–237