

王志超, 杨静, 陆高鹏, 等. 2015. 华北地区一次中尺度对流系统上方的 Sprite 放电现象及其对应的雷达回波和闪电特征 [J]. 大气科学, 39 (4): 839–848.
Wang Zhichao, Yang Jing, Lu Gaopeng, et al. 2015. Sprites over a mesoscale convective system in North China and the corresponding characteristics of radar echo and lightning [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (4): 839–848, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1412.14232.

华北地区一次中尺度对流系统上方的 Sprite 放电现象及其对应的雷达回波和闪电特征

王志超^{1,2} 杨静^{1,3} 陆高鹏¹ 刘冬霞¹ 王宇^{1,2} 肖现^{2,4} 郟秀书¹

1 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

4 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

摘 要 利用低光度相机首次观测到了 2013 年 7 月 31 日华北地区一次中尺度对流系统 (MCS) 上空产生的中高层 Sprite 放电现象。结合闪电定位、天气雷达成同步观测, 对一次 MCS 诱发的 Sprite 的形态学特征及其对应的母体闪电和雷暴系统的雷达回波特征等进行了详细分析。研究除发现了 2 例圆柱型、3 例胡萝卜型和 1 例舞蹈型 Sprite 外, 还发现了 2 例发光主体发育不完全的 Y 字型 Sprite。估算的 Sprite 的底部平均高度低于 61.8 ± 3.5 km, 顶部平均高度为 84.3 ± 6.8 km。Sprite 持续时间算术平均值为 25.7 ± 9.8 ms, 几何平均值为 24.4 ms。Sprite 的母体闪电均为正地闪, 峰值电流在 $+62.5 \sim +106.2$ kA 之间, 算术平均值为 $+77.1 \pm 22.2$ kA, 是本次 MCS 所有正地闪平均峰值电流的 1.4 倍。Sprite 母体闪电的脉冲电荷矩变化 (iCMC) 在 $+475 \sim +922$ C km 之间, 几何平均值为 $+571.0$ C km。Sprite 母体闪电发生在 MCS 雷达回波 25~35 dBZ 的层状云降水区, 弱回波 (<30 dBZ) 面积的突然增加对 Sprite 的产生有重要指示作用。Sprite 易发生在 MCS 成熟—消散阶段正地闪比例 (POP) 显著增加的时段。在本次 MCS 消散阶段中, 有两个时间段可能有利于产生 Sprite。在 Sprite 集中发生时间段, 北京闪电综合探测网 (BLNET) 探测到的正地闪比例为 54.2%, 正地闪连续电流比例 70.24%, 连续电流持续时间为 58.17 ± 50.31 ms, 有利于 Sprite 的产生。

关键词 红色精灵 (red Sprite) 中尺度对流系统 正地闪 电荷矩变化

文章编号 1006-9895(2015)04-0839-10

中图分类号 P427.3

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1412.14232

Sprites over a Mesoscale Convective System in North China and the Corresponding Characteristics of Radar Echo and Lightning

WANG Zhichao^{1,2}, YANG Jing^{1,3}, LU Gaopeng¹, LIU Dongxia¹, WANG Yu^{1,2},
XIAO Xian^{2,4} and QIE Xiushu¹

1 Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

4 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

Abstract Sprites were observed over a mesoscale convective system (MCS) on 31 July 2013 in North China using a

收稿日期 2014-07-25; 网络预出版日期 2014-12-23

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2014CB441405, 中国科学院百人计划项目 2013068

作者简介 王志超, 男, 1985 年出生, 博士研究生, 主要从事大气电学方面的研究。E-mail: wangzhichao@mail.iap.ac.cn

low-light video camera. The characteristics of sprite morphology, sprite parent lightning, and the corresponding radar echo in the MCS were analyzed based on coordinated Beijing Lightning NETWORK (BLNET) data and weather radar data. Among the eight sprites produced in this MCS, two were columnar sprites, three were carrot sprites, one was a dancing sprite, and two were wishbone sprites (underdeveloped carrot sprites). The estimated channel bottom of the sprites was lower than 61.8 ± 3.5 km, and the channel top was at 84.3 ± 6.8 km on average. The arithmetic mean (AM) and geometric mean (GM) of sprite duration were 25.7 ± 9.8 ms and 32.7 ms, respectively. All of the parent lightning strokes of these sprites were positive cloud-to-ground (+CG) strokes, with an AM peak current of +77.1 kA, ranging from +62.5 kA to +106.2 kA, which was 1.4 times larger than that of the total +CGs in this MCS. The estimated GM value of impulse charge moment change was +571.0 C km, ranging from +475 to +922 C km. In this MCS, sprites were produced above the trailing stratiform region of the MCS, where the radar echo was between 25 and 35 dBZ, and the burst of weak radar echo (<30 dBZ) was a key indicator of sprite production. Sprites tended to be produced early in the dissipation stage of the MCS, with an increasing percentage of the +CG flash (POP) rate. During the dissipation stage of the MCS, there were actually two stages that tended to produce sprites with increasing POP rates. During the period of sprite production, BLNET detected a POP rate as high as 54.2%. Meanwhile, 70.24% of the +CG strokes contained continuing currents, with an AM value of 58.17 ± 50.31 ms, making +CG strokes in this MCS favorable for sprite production.

Keywords Red Sprite, Mesoscale convective system, Positive cloud-to-ground stroke, Charge moment change

1 引言

Sprite 是发生在雷暴云上方的最常见的中高层大气放电现象,多发生于热带海洋和中低纬度地区,由于发生高度较高,地面观测中高层放电受到距离和视野等因素的限制,相对比较困难。Lyons (1994) 利用低光度相机观测到了大型中尺度对流系统上方发生的 248 个中高层放电事件,是人类首次有计划地针对中高层放电的科学观测活动。Sentman et al. (1995) 利用穿云飞机首次得到了关于 Sprite 的第一张彩色图像,并正式根据这种放电现象的颜色和其捉摸不定的特征,将其命名为“red Sprite”(又称“红色精灵”)。在世界各地的观测(Hardman et al., 2000; Takahashi et al., 2003; Neubert et al., 2005; 杨静等, 2008),证实了 Sprite 是全球性的中高层大气放电事件。

Sprite 作为中高层放电最常见的现象,具有多种的形态学特征,其最主要的两个分类是圆柱型 Sprite (Wescott et al., 1998) 和胡萝卜型 Sprite (Sentman et al., 1995)。最早的研究表明大部分的 Sprite 都与非常强烈的正地闪有关,Sprite 与其母体闪电的时间间隔约为几十毫秒。Boccippio et al. (1995) 分析了两次中尺度对流系统上方的 42 和 55 个 Sprite 事件,在这两天的观测中,约有 86% 和 82% 的 Sprite 都伴随了被美国国家地闪定位网(NLDN)探测到的正地闪。而 São Sabbas et al. (2003) 发现绝大部分的 Sprite 都能够找到与之相对应的正地闪,Sprite 落后于母体正地闪 10~20

ms,产生 Sprite 的母体正地闪的峰值电流主要集中在 +40~+50 kA,平均值为 +60 kA,因而他认为大于 +75 kA 的强正地闪并非是产生 Sprite 的必要条件。杨静等 (2008) 对位于山东南部的 17 例 Sprite 作统计发现其母体闪电都是正地闪,在 Sprite 发生时段,正地闪在总地闪中所占的比例约是没有产生 Sprite 时段所占比例的 7 倍,Sprite 对于母体闪电的延迟时间为 3.4~11.8 ms,并发现母体闪电并没有很强的峰值电流。Hu et al. (2002) 的研究表明,母体闪电较高的电荷矩变化(charge moment change, CMC)产生 Sprite 的概率较高。而 Cummer and Lyons (2005) 则认为当脉冲电荷矩变化(impulse charge moment change, iCMC)大于 +600 C km 时非常有可能产生 Sprite。此外, Lu et al. (2009) 研究结果表明,强烈正地闪中脉冲电荷矩变化主要是由回击前云内闪电通道中的电荷传输到地面引起的。

为了解中尺度对流系统产生 Sprite 及其与母体闪电的放电特征,以及 Sprite 集中发生时段雷达回波特征,特别是该时间段的正地闪的放电特征,本文利用 2013 年 7 月 31 日华北地区一次中尺度对流系统产生的 8 个 Sprite 事件,结合地面同步的地闪资料和雷达资料,分析了 Sprite 的形态学特征、与母体闪电的关系以及相关雷暴特征。

2 实验及资料

针对 Sprite 的微光探测,本文应用 Watec 902 微光相机,配合 Computar 4.5~12 mm 电动三可变镜头, Pinnacle usb-700 采集卡,以及 UFO-Capture

Ver.2.24 软件对中高层放电瞬态光学变化进行记录, 所用探测系统的高增益最低照度为 0.0003 Lux @1.4F, 在晴空夜间可以观测几百公里外雷暴上方的中高层放电事件。仪器设置参考(杨静等, 2008), 镜头焦距设置在 12 mm 长焦端, 光圈为 f/0.8。根据 Watec 相机型号, UFO 软件设置为 PAL 制式, 屏幕分辨率 720×576 像素, 采集软件设置采样率为 25 fps, 每一帧以交错方式记录, 因此每秒可以采 50 帧, 时间分辨率为 20 ms。预触发百分比设置为 50%, 记录时长为 2 s。视频图像由车载 GPS 同步, 时间精度为 1 s。本文应用的数据为 2013 年 7 月 31 日在山东 SHATLE 实验(Qie et al., 2009)基地(37°49'41.86"N, 118°6'53.25"E)观测到的华北地区中尺度对流系统过程产生的 Sprite, 观测仰角为 8°, 垂直方向视野范围为 20°。

地闪资料应用了北京地区闪电电场变化和辐射脉冲定位网络(Beijing Lightning NETWORK, BLNET)多站快、慢天线的资料(王宇等, 2015), 对北京地区过境的雷暴系统的正地闪特征进行具体分析。其中快天线时间常数为 0.1 ms, 可分析正地闪回击脉冲的上升时间; 慢天线时间常数 0.22 s, 经过补偿之后可以分析正地闪所产生的连续电流持续时间。此外, 对 Sprite 母体闪电的分析应用河北地闪定位网的资料。河北地闪定位网应用时间差与方位角综合定位技术(Advanced TOA and Direction system, ADTD), 在四站及以上探测到地闪回击的时候采用到达时间差的算法定位, 在二站以下探测到地闪回击的时候采用方位角估算的方法定位, 在三站探测到地闪回击的时候采用混合算法。如果相邻两次回击接地点位置相差小于 10 km, 时间间隔小于 200 ms, 则将其合并为一个事件。地闪资料可以给出地闪回击的位置, 时间(时间精度为 0.1 μs), 闪电极性和峰值电流强度。本文所应用资料时间如无特别说明均为北京时间(BJT); 另外, 应用京津冀地区 6 站 S 波段雷达逐 6 分钟基本反射率拼图对整个中尺度对流系统过程和 Sprite 发生时间段的雷达回波面积进行分析, 雷达数据采用 NetCDF 格点数据, 空间分辨率为 0.5 km×0.5 km。

3 结果及分析

3.1 Sprite 形态学及与母体闪电放电特征

本次中尺度对流系统过程的 Sprite 的发生从 20:58 开始, 到 21:50 结束, 共产生了 8 次 Sprite,

平均每 6.5 分钟产生一个 Sprite。杨静等(2008)观测的山东南部的中尺度对流系统过程中, 在 144 分钟内产生了 13 个 Sprite, 平均每 11 分钟产生一个, 与本文类似。而北美地区观测得到红色精灵的发生频率为 2~3 分钟一个(Winckler, 1995), 高于中国大陆地区观测的发生频率, 这可能与中尺度系统的地域性有关。

红色精灵经常成群出现, 单独出现的机会不多。图 1 为本文观测到的 8 组 Sprite 事件的叠加图, 对 Sprite 图像进行了红色加强处理。其中地平线上有观测点当地的灯光, 地平线的灯光并不影响对发生位置较高的 Sprite 观测。可以看到, 易于发生 Sprite 的区域集中出现在视野两侧, Sprite 有 7 例成群出现, 1 例单独出现。红色精灵一旦出现, 就会在几乎相同的位置反复出现, 而且出现的频率也较高。河北地闪定位网给出的母体闪电位置表明 8 次 Sprite 均发生在河北保定地区。

图 2 给出了 8 个 Sprite 的形态学特征。其中图 2b, d, f 中 Sprite 上部主体发光区较宽, 从上至下逐步变窄, 下部有卷须, 整个 Sprite 发光主体形态上与胡萝卜类型, 称为“胡萝卜型”Sprite (Sentman et al., 1995); 图 2g, h 中 Sprite 的主体发光区呈现垂直方向上较均匀的圆柱型, 两侧没有明显的分支, 称为“圆柱型”Sprite (Wescott et al., 1998)。圆柱型 Sprite 和胡萝卜型均属于大型的发光主体 Sprite, 也是最常见的 Sprite 类型。另外, 图 2a, e 中 Sprite 的主体发光区上部有明显的分叉现象, 而下部并没有分叉现象, 形如鸟胸的叉骨, 又如同字母 Y, 称为“Y 字型”Sprite (Moudry et al., 1998; Matsudo et al., 2007), 这一类 Sprite 应属于发光主体发育不完全的胡萝卜型 Sprite。图 2c 中 Sprite 在形态上类似胡萝卜型 Sprite, 然而其发光主体在位置上有偏移。经验证两次发光主体分别对应了河北地闪定位网探测到了两次正极性回击 21:09:50.392 和 21:09:50.633 (定位距离在 10 km 左右, 认为是同一次闪电的两次回击)。而图像上, 这次 Sprite 的两次发光主体的时间间隔为 240 ms, 小于 300 ms, 推测其应属于舞蹈型 Sprite (Lyons, 1994; Neubert et al., 2001; Lu et al., 2013)。Lu et al. (2013) 指出, 舞蹈型 Sprite 有两种产生方式, 一种是同一次闪电的不同回击产生; 第二种是同一次回击脉冲电流和连续电流中的 M 分量分别产生。本文的舞蹈型 Sprite 应该由同一次闪电的不同回击产生。8 次

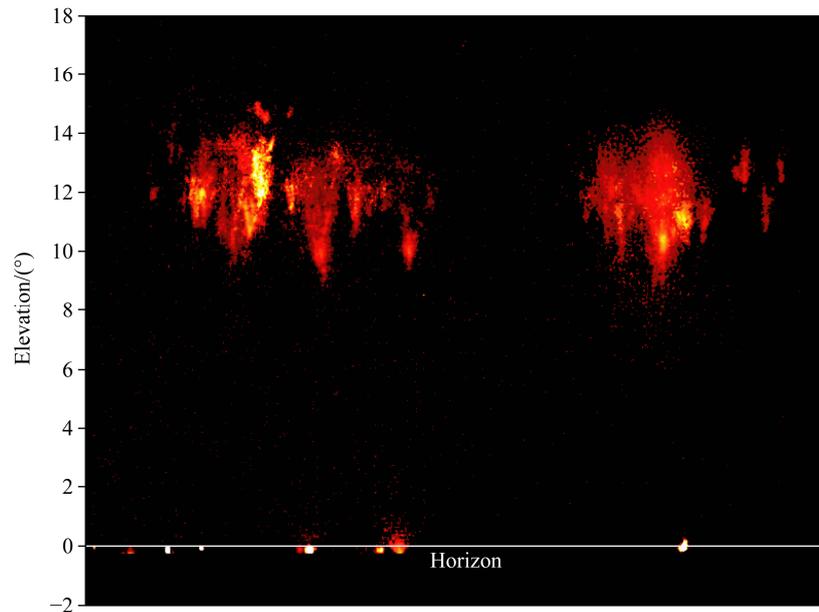


图 1 2013 年 7 月 31 日华北地区一次中尺度对流系统产生 Sprite 叠加图 (红色加强处理)

Fig. 1 Overlapping of sprites in the mesoscale convective system in North China on 31 July 2013 (red enhanced)

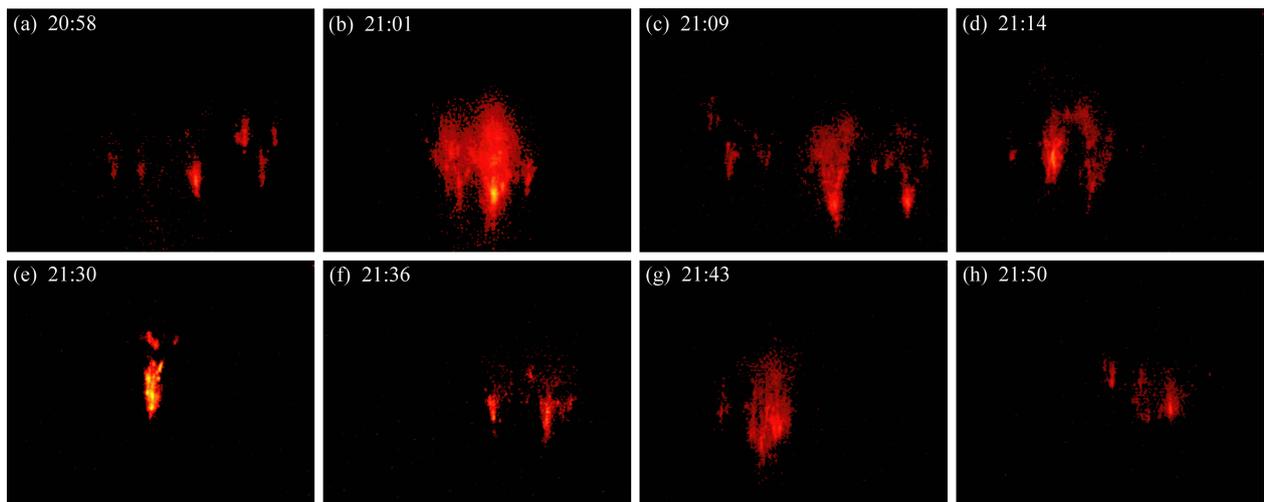


图 2 Sprite 形态学特征 [其中 (a) 和 (e) 为 Y 字型 Sprite, (b, d, f) 为胡萝卜型 Sprite, (c) 为舞蹈型 Sprite, (g, h) 为圆柱型 Sprite]

Fig. 2 Morphology of sprites: (a, e) Wishbone sprites; (b, d, f) carrot sprites; (c) dancing sprites; (g, h) columnar sprites

Sprite 均没有伴随有 halo 现象; 图 2b, d, e 中主体发光区还观测到非常亮的 Sprite “珠” (Stanley et al., 1999; Stenbaek-Nielsen et al., 2000)。Sprite 的形态一般与其母体闪电的电荷矩变化有关, 母体闪电电荷矩变化较大常常产生胡萝卜型 Sprite; 而母体闪电电荷矩变化较小, 则容易产生圆柱型 Sprite, 另外 Sprite 的具体形态学特征也可能与母体闪电的脉冲电流波形相关 (Qin et al., 2013)。

由于 Sprite 的发生位置天底点在母体闪电接地

点附近 50 km 范围内 (São Sabbas et al., 2003), 因此在 Sprite 发生高度的估计上, 采用 Hsu et al. (2003) 和杨静等 (2008) 的方法, 假设 Sprite 发生在母体闪电接地点 (正上方), 估计红色精灵的垂直高度。估算时考虑 Sprite 位置与母体闪电接地点最大偏差为 50 km, Sprite 图像测量偏差为 15%。由表 1 可知, 8 组 Sprite 的底部平均高度低于 61.8 ± 3.5 km, 顶部平均高度为 84.3 ± 6.8 km。Hsu et al. (2003) 得到的红色精灵底端在 40 ± 10 km, 顶端在 80 ± 10

表 1 Sprite 及母体闪电特征 (AM: 算术平均值; GM: 几何平均值; iCMC: 脉冲电荷矩变化)

Table 1 Characteristics of Sprites and their parent lightning (AM: arithmetic mean; GM: geometric mean; iCMC: impulse charge moment change)

编号	Sprite 时间	形态	高度 (MSL) /km		持续时间/ms	母体闪电		
			底部 (低于)	顶部		母体闪电时间	峰值电流/kA	iCMC/C km
1	20:58:25	Y 字型	61.7±9.3	80.6±12.1	20	20:58:25.341	+85.1	/
2	21:01:20	胡萝卜型	63.5±9.5	99.8±15.0	20	21:01:20.788	+64.4	+922
3	21:09:50	舞蹈型	54.8±8.2	80.8±12.1	260*	21:09:50.392	+73.1	+475
4	21:14:40	胡萝卜型	60.9±9.1	85.2±12.8	20	21:14:40.874	+58.5	+498
5	21:30:41	Y 字型	62.0±9.3	78.9±11.8	40	21:30:41.273	+53.9	/
6	21:36:31	胡萝卜型	63.6±9.5	81.4±12.2	40	21:36:30.877	+112.7	+497
7	21:43:16	圆柱型	61.1±9.2	86.8±13.0	20	21:43:16.666	+62.5	/
8	21:50:46	圆柱型	67.0±10.0	81.2±12.2	20	21:50:46.370	+106.2	+560
AM*	/	/	61.8±3.5	84.3±±6.8	25.7±9.8	/	+77.1±22.2	+590.4
GM*	/	/	61.7	84.1	24.4	/	+74.5	+571.0

*舞蹈型 Sprite 未参与持续时间计算

km, 与本文结果有一定出入, 这是由于本文用 Sprite 图像资料很难分辨 Sprite 底部卷须, 因此对 Sprite 底部的高度估值稍高, 这在一定程度上与能见度造成的成像模糊有关。

Sprite 持续时间在 1~2 帧左右, 只有唯一的舞蹈型 Sprite 两帧的时间间隔较长, 为 12 帧。鉴于所用数据为交错记录, 每一帧的实际分辨率为 20 ms。可见 Sprite 发光主体持续时间一般小于 40 ms。以 20 ms 的分辨率估算 Sprite 持续时间算术平均值为 25.7±9.8 ms, 几何平均值为 24.4 ms。

河北地闪定位网给出的本次中尺度对流系统所产生的正地闪平均电流为 +54.8±28.5 kA, 而 8 组 Sprite 的母体闪电的峰值电流在 +62.5~+106.2 kA 之间, 平均值为 +77.1±22.2 kA, 是本次 MCS 过程总正地闪平均电流峰值的 1.4 倍, 其结果也列于表 1。虽然峰值电流并非 Sprite 产生的重要条件 (São Sabbas et al., 2003), 但本次中尺度对流系统产生的 Sprite 的母体闪电峰值电流都比较强。

对电荷矩的变化计算采用美国杜克大学 (Duke University) 的脉冲电荷矩变化 (iCMC) 的计算方法 (Cummer and Inan, 1997), 利用美国海军开发的开源长波辐射传播算法 (Long Wave Propagation Capability code, LWPC) 计算闪电信号在地球—电离层波导空间中的传播函数, 并在此基础上对 Duke 大学附近测量到的超低频 (ultra low-frequency, ULF) 磁天线信号进行反卷积运算, 从而反演出母体闪电信号的电流矩时间波形, 进而对其积分得到正地闪回击后 2 ms 内产生的脉冲电荷矩。所观测的这 8 组 Sprite 母体闪电中, 有 5 组闪电被 Duke 天线探

测到, 所计算的 iCMC 在 +475~+922 C km 之间, 算术平均值为 +590.4 C km, 几何平均值为 +571.0 C km。Qie et al. (2013) 对大兴安岭地区 5 例正地闪所产生的电荷矩变化进行了估算, 发现正地闪回击和连续电流所产生的 CMC 分别为 +31.4±1.6 C km 和 +65.9±2.5 C km, 远小于本文的结果。本文所得 Sprite 母体正地闪可以产生较大的 iCMC, 有利于 Sprite 的产生。Lu et al. (2013) 发现对于甚高频闪电辐射源定位网 (Lightning Mapping Array, LMA) 附近的中尺度对流系统而言, 当 iCMC 大于 +300 C km 的正地闪产生时, 有 90% 的几率会产生 Sprite。本文计算的正地闪 iCMC 也证实了本次中尺度对流系统的正地闪有很强的产生 Sprite 的能力。

Lu et al. (2013) 认为 Sprite 与母体闪电的时间间隔有两类: 一类时间间隔小于 20 ms, 母体闪电与 Sprite 天底点的水平距离也小于 30 km, 产生的 Sprite 被称为即时 (prompt) Sprite; 另一类时间间隔一般大于 40 ms, 母体闪电与 Sprite 天底点的水平距离大于 30 km, 产生的 Sprite 被称为延时 (delayed) Sprite。母体闪电如果产生比较大的 iCMC, 一般会产生小时间间隔的 Sprite。由于仪器限制, 本文并未能给出 Sprite 与其母体闪电的时间间隔, 但由本文计算的 5 例母体闪电 iCMC 较大可以推测本次中尺度对流系统的 Sprite 与母体闪电时间间隔可能较短。

3.2 产生 Sprite 的中尺度对流系统雷达回波特征分析

图 3a 给出了 Sprite 出现时的 Sprite 母体闪电位

置与京津冀 6 站雷达回波拼图叠加, 其中黑色菱形表示 Sprite 母体闪电接地点的位置, 蓝色圆圈表示 Sprite 与母体闪电的水平位置偏移范围, 偏移半径估计为 20 km, Sprite 可能发生在蓝色圆圈的上方。此时中尺度对流系统的大于 20 dBZ 雷达回波面积达到了 $4.32 \times 10^4 \text{ km}^2$, 大于 30 dBZ 雷达回波面积达到 $2.74 \times 10^4 \text{ km}^2$, 而雷暴中心雷达回波达到 55 dBZ, 回波面积为 186.75 km^2 。Lyons (2006) 认为, 北美中尺度对流系统产生 Sprite 要满足两个条件: 10 dBZ 雷达回波面积要大于 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$, 另外雷暴中心的雷达反射率要在 55 dBZ 以上。而 Soula et al. (2009) 对欧洲两次各产生 27 例 Sprite 事件的中尺度对流系统研究中发现, 其最大的雷暴云最大覆盖面积为 $1.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。Yang et al. (2013) 指出弱的雷达回波与 Sprite 产生时期有较好的一致性, 并且层状云降水区的充分发展是中尺度对流系统产生中高层放电的必要条件。Lu et al. (2013) 认为即时 Sprite 母体闪电的产生一般是

源于中尺度对流系统对流区的云内初始放电, 发展至后部层状云降水区后形成的正地闪; 而延时 Sprite 母体闪电的产生则是直接源于层状云降水区云内正电荷对地面的放电, 这类正地闪需要产生足够长时间的连续电流以增加产生的电荷矩变化。本文所得 8 组 Sprite 母体闪电均发生在中尺度对流系统后部雷达回波为 25~35 dBZ 的层状云降水区, 推测其大部分母体闪电回击之前都存在持续时间较长的云内放电过程, 并且很有可能存在长时间的连续电流过程, 而且 Sprite 也有可能发生在中尺度对流系统的层状云降水区上方。

利用京津冀 6 站雷达逐 6 分钟基本反射拼图, 得到本次 MCS 过程从 12:00 到 24:00 雷达回波面积的变化曲线图, 如图 3b 所示。在 Sprite 发生时间段 (21:00~22:00), 20 dBZ 回波面积为 $4.32 \pm 0.19 \times 10^4 \text{ km}^2$, 30 dBZ 回波面积 $2.74 \pm 0.18 \times 10^4 \text{ km}^2$, 40 dBZ 回波面积 $0.70 \pm 0.19 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。回波面积在 21:11 出现极值, 20 dBZ 回波面积为 $4.41 \times 10^4 \text{ km}^2$,

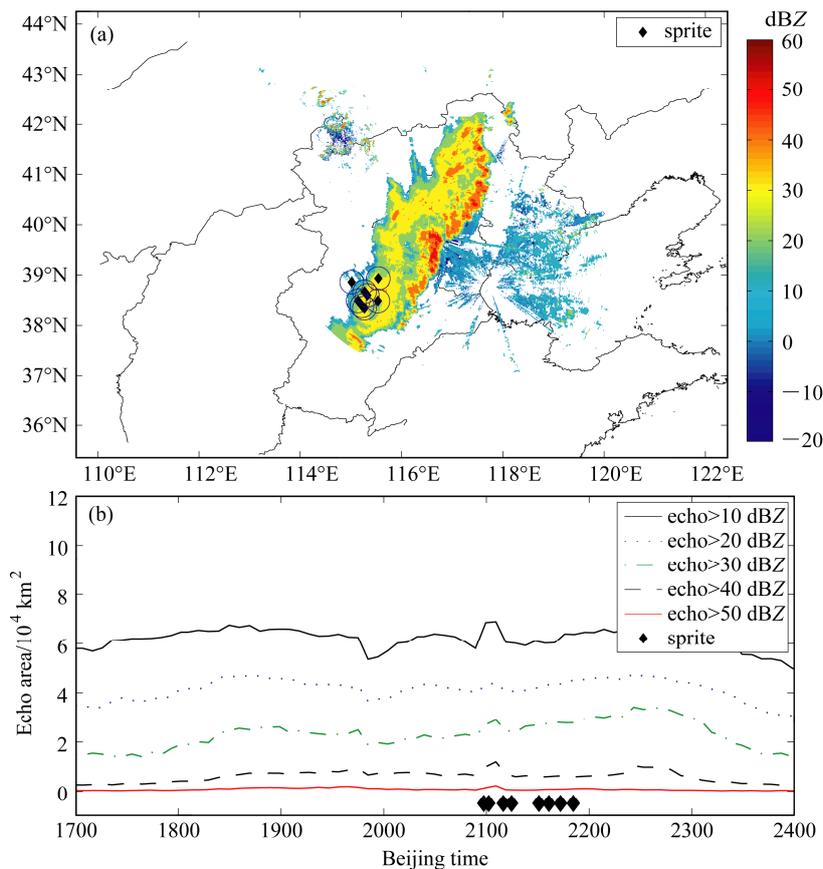


图 3 Sprite 发生时间段 (a) 雷达拼图与 Sprite 母体闪电叠加和 (b) 雷达回波面积变化图 (黑色菱形表示 Sprite 母体闪电位置, 蓝色圆圈表示 Sprite 与母体闪电的位置偏移范围)

Fig. 3 (a) Overlapping of radar reflectivity and sprite locations and (b) the changes in echo areas in North China during the period of sprite production (black diamonds indicate the sprite parent lightning locations; blue circles indicate the offset range of sprite and their parent lightning)

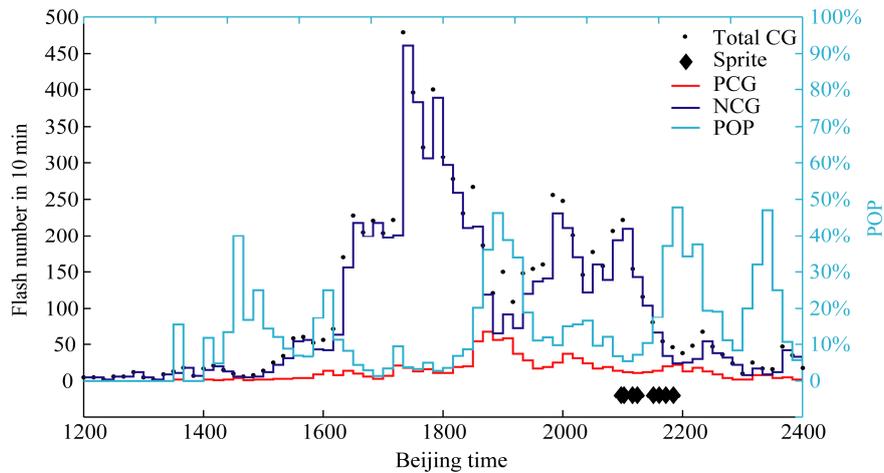


图 4 2013 年 7 月 31 日华北地区中尺度对流系统地闪频数逐 10 分钟变化 (total CG: 总地闪; PCG: 正地闪; NCG: 负地闪; POP: 正地闪占总地闪比例)

Fig. 4 Change in total CG flash rate in 10 min interval for the mesoscale convective system in North China on 31 July 2013 (total CG: total cloud-to-ground flashes; PCG: positive cloud-to-ground flashes; NCG: negative cloud-to-ground flashes; POP: percentage of positive CG to total CG)

30 dBZ 回波面积为 $2.90 \times 10^4 \text{ km}^2$, 40 dBZ 回波面积 $1.19 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。由图 3b 可以看出,在未发生 Sprite 时段强回波 ($>40 \text{ dBZ}$) 面积和弱回波 ($<30 \text{ dBZ}$) 面积的变化比较一致;而在 Sprite 发生时段雷达回波特点为:强回波 ($>40 \text{ dBZ}$) 面积趋于平稳,而弱回波 ($<30 \text{ dBZ}$) 面积迅速增加,并且在 Sprite 开始出现时存在雷达回波面积的突然增加。可见,弱雷达回波面积的迅速增加可以作为 Sprite 产生的重要指示因子。

3.3 产生 Sprite 中尺度对流系统的闪电演变特征

利用京津冀 6 站雷达基本反射率拼图可以看出,本次中尺度对流系统是比较典型的前部具有对流线,后部有大范围层状云降水区的中度尺度对流系统,也是华北地区最常发生的中尺度对流系统过程。刘冬霞等(2008)分析过这一类型的中尺度对流系统,其特点为在整个过程中以负地闪为主导,正地闪较不活跃,正地闪主要分布在前部云砧和后部层状云降水区域。

图 4 给出了本次中尺度对流系统过程的 10 分钟间隔的地闪变化曲线。其中黑点为地闪总数,红色曲线表示正地闪个数,蓝色曲线表示负地闪个数。可见本次 MCS 过程初期闪电活动并不活跃;16:00~18:00 闪电活动明显增加,MCS 进入成熟期这一时段以负地闪为主;18:00 以后闪电活动逐渐减少,闪电进入消散期,其中有几个时间段负地闪迅速减少,正地闪比例大幅度增加,在其中一

个时间段集中观测到大量 Sprite。

本文定义 POP (Percentage Of Positive CG to total CG) 为正地闪与总闪的比率,其同步的变化曲线也在图 4 中给出。整个中尺度对流系统生命史有四个明显的 POP 增加的时间段,由表 2 给出。本次中尺度对流系统的雷电活动从 13:00 开始就伴随着中尺度对流系统的成型而出现,在 14:30~15:00 时段有 10 次正闪,POP 达到第一次高峰,此时总闪频率并未达到最高,只是属于雷暴过程初期,正地闪的平均峰值电流为 $+29.4 \pm 6.7 \text{ kA}$;17:00 地闪总闪频数达到最大,最高时段达到 480 flash/10 min,中尺度对流系统达到成熟阶段,19:00 达到第二个 POP 最高的时段,正地闪平均峰值电流为 $+56.2 \pm 25.7 \text{ kA}$,这一时段并没有观测到 Sprite;其后负地闪频数又有回升 POP 减少,在 21:00~22:00 负地闪明显减少,正地闪略有增加,达到整个中尺度对流系统过程第三次 POP 的上升时段,这时中尺度对流系统处在成熟—消散阶段,正地闪平均峰值电流为 $+54.7 \pm 29.7 \text{ kA}$,在这一时段观测到了 8 组 Sprite;在 22:30~23:00 这一时段总闪频数在 $25 \text{ flash} (10 \text{ min})^{-1}$,已经进入了中尺度对流系统过程末期,POP 最后一次达到高值,最大值为 47.8%,正地闪平均峰值电流为 $+52.3 \pm 20.0 \text{ kA}$ 。由于雷暴已经发展至接近观测点,因此没有观测到 Sprite,但这并不代表这一时间段并不能够产生 Sprite,POP 的增加暗示了此时间段可能也是

Sprite 易于产生的时期。

表 2 中尺度对流系统生命史 4 个 POP 增加时期 (GM: 算数平均值; AM: 几何平均值; SD: 标准差)

Table 2 Four POP (increasing percentage of the +CG flash rate) increasing periods in the mesoscale convective system (GM: geometric mean; AM: arithmetic mean; SD: standard deviation)

时间段	持续时 间/min	最大地闪频 率/10 min ⁻¹	最大 POP	正地 闪数	正闪峰值电流/kA		
					GM	AM	SD
14:20~15:00	40	21	40%	10	+28.7	+29.4	+6.7
18:00~19:00	60	400	46.28%	243	+50.7	+56.2	+25.7
21:00~22:00	60	222	47.83%	88	+47.5	+54.7	+29.7
23:00~23:30	30	25	47.06%	18	+49.0	+52.3	+20.0

可见, Sprite 易发生在中尺度对流系统成熟—消散阶段 POP 有显著增加的时段, 持续至 POP 开始减少。POP 的上升对中尺度对流系统产生 Sprite 起到了重要的指示作用。Neubert et al. (2005) 认为 Sprite 产生在雷暴云消散阶段负闪活动迅速下降而正闪活动稳定上升的时期。Soula et al. (2009) 指出, 雷暴云系统产生 Sprite 的时期是其整个生命史 POP 最大的时期, 最高 POP 比例可达 50%。本次中尺度对流系统生命史消散期可能后两个时间段都非常适合产生 Sprite, 但最后一个 POP 上升时段雷暴已经距离观测点太近而无法开展 Sprite 观测, 因此, 这一时段雷暴是否产生了 Sprite 无法得知。

3.4 中尺度对流系统正地闪放电参量统计特征分析

本次中尺度对流系统在 13:00~23:00 内共持续了十个小时, 在 Sprite 集中发生的时间段前后 20:30~22:30 北京闪电综合探测网 (BLNET) 共探测到地闪 155 个, 由于这一时段 Sprite 主要发生区域和 BLNET 探测网均处于中尺度对流系统消散期后部尾随层状云降水区, 因此对此时段 BLNET 探测到的地闪分析有助于得到 Sprite 发生时段正地闪的放电特征。在 BLNET 所得正地闪样本中, 正地闪 84 个, 负地闪 71 个, 正地闪比例为 54.2%。其中单回击正地闪 78 例, 两回击正地闪 5 例, 三回击正地闪 1 例, 所占正地闪比例分别为 92.86%, 5.95%和 1.19%。平均每次正地闪的回击数为 1.08。对 91 例正回击的 0~100%上升时间进行统计, 时间为 $10.17 \pm 3.73 \mu\text{s}$, 图 5a 给出了 Sprite 集中发生时段正地闪 0~100%上升时间的分布图。另外, 正地闪样本中有 59 例产生了连续电流, 带连续电流的正地闪比例为 70.24%。正地闪的持续时间为 $58.17 \pm 50.31 \text{ ms}$, 图 5b 给出了 Sprite 集中发生时段

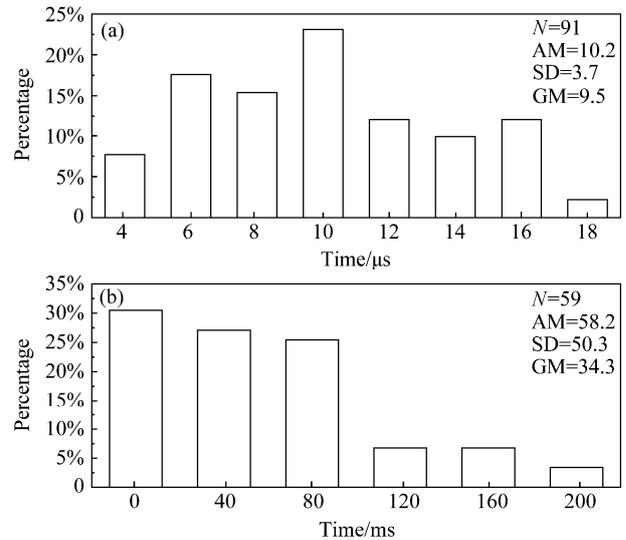


图 5 Sprite 集中发生时段正地闪 (a) 0~100%上升时间分布和 (b) 连续电流分布 (N , AM, SD, GM 分别代表样本数, 算数平均值, 标准差, 几何平均值)

Fig. 5 Distribution of (a) 0~100% rise time and (b) durations of continuing currents for positive CG flashes during the period of sprite production (N , AM, SD, GM indicate the sample number, arithmetic mean, standard deviation, and geometric mean, respectively)

正地闪连续电流持续时间的分布图。

Qie et al. (2013) 对中国大兴安岭地区的正地闪进行了详细的特征分析, 发现正地闪比例为 10.2%。在 185 个正地闪事件中, 单闪击比例为 94.59%, 0~100%上升时间为 $13.96 \pm 4.58 \mu\text{s}$, 连续电流持续时间为 $33.29 \pm 38.44 \text{ ms}$ 。本文与其结果相比, 在 Sprite 发生时间段, 正地闪比例较高, 连续电流的持续时间较长, 雷暴有利于 Sprite 的产生。

4 结论与讨论

本文利用微光相机首次观测到了华北地区发生的 Sprite 现象, 并为今后继续对华北地区中高层放电事件的观测提供了理论依据。利用光学观测、北京地区闪电电场变化和辐射脉冲定位网络 (BLNET)、河北地闪定位网, 并结合华北地区 6 站多普勒雷达拼图等多种观测数据, 对一次中尺度对流系统激发的 Sprite 及母体闪电和正地闪放电特征进行了详细分析, 得到如下结论:

(1) 观测到 8 例 Sprite 事件均发生于中尺度对流系统生命史中期, 平均 6.5 分钟发生一次。所观测 8 组 Sprite 中有 2 个圆柱型, 3 个胡萝卜型, 2 个 Y 字型, 1 个舞蹈型 Sprite。Sprite 的底部平均高

度低于 61.8 ± 3.5 km, 顶部平均高度为 84.3 ± 6.8 km。Sprite 持续时间算术平均值为 25.7 ± 9.8 ms, 几何平均值为 24.4 ms。所有 Sprite 的母体闪电均为正地闪, 峰值电流在 $+62.5 \sim +106.2$ kA 之间, 算术平均值为 $+77.1$ kA, 是总体正地闪平均峰值电流的 1.4 倍。估算得母体闪电的 iCMC 在 $+475 \sim +922$ C km 之间, 算术平均值为 $+590.4$ C km, 几何平均值为 $+571.0$ C km。

(2) Sprite 母体闪电发生在中尺度对流系统雷达回波 25~35 dBZ 的层状云降水区, 推断大部分母体闪电回击之前都存在比较长时间的云内放电过程, 并且很有可能产生持续时间很长的连续电流。在 Sprite 发生时间段, 20 dBZ 回波面积达到 $4.32 \pm 0.19 \times 10^4$ km², 雷暴中心雷达回波达到 55 dBZ, 回波面积为 186.75 km²。在 Sprite 发生时段强回波 (>40 dBZ) 面积趋于平稳, 而弱回波 (<30 dBZ) 面积迅速增加, 并且在 Sprite 开始出现时存在雷达回波面积的突然增加。弱雷达回波面积的迅速增加可以作为 Sprite 产生的指示因子。

(3) Sprite 易发生在中尺度对流系统成熟—消散阶段 POP 有显著增加的时段, 持续至 POP 开始减少。在本次中尺度对流系统整个生命史中, 有两个时间段是非常易于产生 Sprite, 本次观测在中尺度对流系统后期 POP 上升时期观测到了 8 个 Sprite 事件。POP 的上升对中尺度对流系统产生 Sprite 起到了重要的指示作用。

(4) 在 Sprite 集中发生时间段, BLNET 探测到的正地闪比例为 54.2%, 单闪击比例为 92.86%; 回击 0~100% 上升时间 10.17 ± 3.73 μ s; 连续电流比例 70.24%, 持续时间为 58.17 ± 50.31 ms。本次 Sprite 母体雷暴在 Sprite 发生时间段具有较高的正地闪比例和较长的连续电流持续时间, 有利于 Sprite 的产生。

本文所用的 Sprite 资料比较有限, 今后的研究将在进一步积累低光度资料的基础上, 着眼于 Sprite 的高速摄像资料和多站 Sprite 光学定位配合同步的地面低频磁场信号以讨论 Sprite 的形成机理以及其与母体闪电的关系。

致谢 感谢山东人工引雷实验 (SHATLE) 团队, 感谢河北地闪定位网提供的地闪定位资料, 感谢北京市气象局提供的雷达资料。

参考文献 (References)

Boccippio D J, Williams E R, Heckman S J, et al. 1995. Sprites, ELF

- transients, and positive ground strokes [J]. *Science*, 269 (5227): 1088–1091, doi:10.1126/science.269.5227.1088.
- Cummer S A, Inan U S. 1997. Measurement of charge transfer in sprite-producing lightning using ELF radio atmospherics [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 24 (14): 1731–1734, doi:10.1029/97GL51791.
- Cummer S A, Lyons W A. 2005. Implications of lightning charge moment changes for sprite initiation [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 110 (A4): A04304, doi:10.1029/2004JA010812.
- Hardman S F, Dowden R L, Brundell J B, et al. 2000. Sprite observations in the northern territory of Australia [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 105 (D4): 4689–4697, doi:10.1029/1999JD900325.
- Hsu R R, Su H T, Chen A B, et al. 2003. Transient luminous events in the vicinity of Taiwan [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 65(5): 561–566, doi:10.1016/S1364-6826(02)00320-6.
- Hu W, Cummer S A, Lyons W A, et al. 2002. Lightning charge moment changes for the initiation of sprites [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (8): 1201–1204, doi:10.1029/2001GL014593.
- 刘冬霞, 鄒秀书, 冯桂力, 等. 2008. 华北一次强对流天气系统的地闪时空演变特征分析 [J]. *高原气象*, 27 (2): 358–364. Liu Dongxia, Qie Xiushu, Feng Guili, et al. 2008. Analyses on lightning temporal and spatial characteristics in the severe convective weather in North China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (2): 358–364.
- Lu G P, Cummer S A, Li J B, et al. 2009. Charge transfer and in-cloud structure of large-charge-moment positive lightning strokes in a mesoscale convective system [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (15), doi:10.1029/2009GL038880.
- Lu G P, Cummer S A, Li J B, et al. 2013. Coordinated observations of sprites and in-cloud lightning flash structure [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 118 (12): 6607–6632, doi:10.1002/jgrd.50459.
- Lyons W A. 1994. Characteristics of luminous structures in the stratosphere above thunderstorms as imaged by low-light video [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 21 (10): 875–878, doi:10.1029/94GL00560.
- Lyons W A. 2006. The meteorology of transient luminous events—An introduction and overview [M]// Füllekrug M, Mareev E A, Rycroft M J. *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges*. Netherlands: Springer, 19–56.
- Matsudo Y, Suzuki T, Hayakawa M, et al. 2007. Characteristics of Japanese winter sprites and their parent lightning as estimated by VHF lightning and ELF transients [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 69 (12): 1431–1446, doi:10.1016/j.jastp.2007.05.002.
- Moudry D, Heavner M, Sentman D, et al. 1998. Morphology of sprites [J]. *EOS Suppl.*, 79 (45): F136.
- Neubert T, Allin T H, Stenbaek-Nielsen H, et al. 2001. Sprites over Europe [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (18): 3585–3588, doi:10.1029/2001GL013427.
- Neubert T, Allin T H, Blanc E, et al. 2005. Co-ordinated observations of transient luminous events during the EuroSprite 2003 campaign [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 67 (8–9): 807–820, doi:10.1016/j.jastp.2005.02.004.
- Qie X S, Zhao Y, Zhang Q L, et al. 2009. Characteristics of triggered lightning during Shandong artificial triggering lightning experiment (SHATLE) [J]. *Atmos. Res.*, 91 (2–4): 310–315, doi:10.1016/j.atmosres.

- 2008.08.007.
- Qie X S, Wang Z C, Wang D F, et al. 2013. Characteristics of positive cloud-to-ground lightning in Da Hinggan Ling forest region at relatively high latitude, northeastern China [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 118 (24): 13393–13404, doi:10.1002/2013JD020093.
- Qin J Q, Celestin S, Pasko V P. 2013. Dependence of positive and negative sprite morphology on lightning characteristics and upper atmospheric ambient conditions [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 118 (5): 2623–2638, doi:10.1029/2012JA017908.
- São Sabbas F T, Sentman D D, Wescott E M, et al. 2003. Statistical analysis of space-time relationships between sprites and lightning [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 65 (5): 525–535, doi:10.1016/S1364-6826(02)00326-7.
- Sentman D D, Wescott E M, Osborne D L, et al. 1995. Preliminary results from the Sprites94 Aircraft Campaign: 1. Red sprites [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 22 (10): 1205–1208, doi:10.1029/95GL00583.
- Soula S, van der Velde O, Montanya J, et al. 2009. Analysis of thunderstorm and lightning activity associated with sprites observed during the EuroSprite campaigns: Two case studies [J]. *Atmos. Res.*, 91 (2–4): 514–528, doi:10.1016/j.atmosres.2008.06.017.
- Stanley M, Krehbiel P, Brook M, et al. 1999. High speed video of initial sprite development [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (20): 3201–3204, doi:10.1029/1999GL010673.
- Stenbaek-Nielsen H C, Moudry D R, Wescott E M, et al. 2000. Sprites and possible mesospheric effects [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 27 (23): 3829–3832.
- Takahashi Y, Miyasato R, Adachi T, et al. 2003. Activities of sprites and elves in the winter season, Japan [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 65 (5): 551–560, doi:10.1016/S1364-6826(02)00330-9.
- 王宇, 郗秀书, 王东方, 等. 2015. 北京闪电综合探测网(BLNET) I: 网络构成与初步定位结果 [J]. *大气科学*, 39 (3): 571–582, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1407.14138. Wang Yu, Qie Xiushu, Wang Dongfang, et al. 2015. Beijing Lightning Network (BLNET). Part 1: Configuration and preliminary results of lightning location [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39 (3): 571–582.
- Wescott E M, Sentman D D, Heavner M J, et al. 1998. Observations of “Columniform” sprites [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 60 (7–9): 733–740, doi:10.1016/S1364-6826(98)00029-7.
- Winckler J R. 1995. Further observations of cloud-ionosphere electrical discharges above thunderstorms [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 100 (D7): 14335–14345, doi:10.1029/95JD00082.
- 杨静, 郗秀书, 张广庶, 等. 2008. 发生于山东沿海雷暴云上方的红色精灵 [J]. *科学通报*, 53 (4): 482–488. Yang Jing, Qie Xiushu, Zhang Guangshu, et al. 2008. Red sprites over thunderstorms in the coast of Shandong Province, China [J]. *Chin. Sci. Bull. (in Chinese)*, 53 (4): 482–488.
- Yang J, Qie X S, Feng G L. 2013. Characteristics of one sprite-producing summer thunderstorm [J]. *Atmos. Res.*, 127: 90–115, doi:10.1016/j.atmosres.2011.08.001.