

发生于山东沿海雷暴云上方的红色精灵

杨静^{①②}, 郅秀书^{①*}, 张广庶^②, 赵阳^②, 张彤^②

① 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(LAGEO), 北京 100029;

② 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(LCEDWC), 兰州 730000

* 联系人, E-mail: qiex@mail.iap.ac.cn

2007-09-20 收稿, 2008-01-02 接受

中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KZCX2-YW-206)、国家杰出青年科学基金项目(批准号: 40325013)和国家自然科学基金项目(批准号: 40774083)资助

摘要 红色精灵(red sprite)不同于发生在对流层中的雷电, 它一般发生在雷暴云上方 40~90 km 之间, 通常认为是由强烈的雷电引起的. 2007 年夏季, 在山东沾化首次观测到 17 次红色精灵, 一次发生在 7 月 28 日, 雷暴中心位于山东省冠县, 与观测站的距离约为 272 km, 另外 16 次红色精灵发生在 8 月 1 日深夜至 8 月 2 日凌晨, 雷暴中心与观测站的距离约为 315 km. 记录到的所有红色精灵均成簇(cluster)出现, 而且, 红色精灵呈现出多种形态, 有柱状, 带有天使状翅膀的柱状、胡萝卜状和跳舞状等. 红色精灵持续的时间范围为 40~160 ms, 几何平均值约为 61 ms. 红色精灵与母体雷电的时间差范围在 3.4~11.8 ms 之间, 几何平均值为 7.1 ms. 在红色精灵发生时, 正地闪在总地闪中所占的比例约是没有产生红色精灵时段所占比例的 7 倍. 红色精灵并不常出现在对流发展较旺盛阶段, 而是在雷暴系统开始减弱阶段频繁出现.

关键词
红色精灵
雷电
雷暴云

1989 年, Franz 等人^[1]用微光摄像机意外的捕捉到了一个发生在 250 km 之外的雷暴云上空的巨大放电图像, 其持续时间小于 30 ms. 在此之前, 最早可以追溯到 20 世纪初期就有许多关于此类放电现象的报道, 但 Franz 的这张图像为中高层放电的存在提供了第一个科学证据. 随后, Lyons^[2]从地面, Sentman 等人^[3]从空中对这种放电进行了许多观测, 并在美国 Sprites94 实验中拍摄到了这种放电的第一张彩色图像^[3], 发现颜色为红色. Sentman 等人^[3]根据放电现象的颜色和捉摸不定的特征, 于 1995 年正式将这种放电命名为 red sprite (红色精灵). 而且, 在 Sprites94 实验中还发现了另一种中高层大气放电现象, 其特征是从雷暴云向上发展, 称之为蓝色喷流(blue jet)^[4]. 同时, 除北美之外, 世界上其他地区, 如南非, 澳大利亚, 日本, 欧洲和中国台湾等都观测到了红色精灵. 迄今为止, 发现的中高层大气放电现象有四种, 分别是: 红色精灵、淘气精灵(Elves, Emissions of Light and VLF perturbation due to EMP Sources)、蓝色喷流和巨大喷流(gigantic jet)^[5], 这几种放电现象统称为

瞬态发光事件(transient luminous events, TLEs).

在瞬态发光事件中, 最常观测到的就是红色精灵. 研究表明, 红色精灵有多种形态, 但以圆柱状(columniform)和胡萝卜状(carrot)为主. 圆柱状红色精灵的主要特征是呈垂直的圆柱状, 有时在圆柱的顶部和底部有向上和向下延伸的微弱散射状头发(hair)和卷须(tendrils)^[6]. 而胡萝卜状红色精灵有一个很强的亮中心区域, 在较低的高度上变细, 在发光体上方有漫射状的“头发”区域, 而在胡萝卜状红色精灵的底端常常伴随着细丝状的放电或者卷须^[3]. 另外, 还有焰火(firework)状红色精灵^[7]和跳舞状(dancing)红色精灵等^[2].

世界各地的观测表明, 红色精灵似乎是一个全球现象. 国内, 祝宝友等人^[8]对中高层放电的观测和理论研究进展进行了详细全面的回顾, 吴明亮和徐寄遥^[9~11]利用三维准静电场模式较好的解释了红色精灵(他们称之为“红闪”)的时空特征. 但至今未见我国大陆地区对中高层放电的观测研究报道. 为对我国上空的中高层大气放电现象进行研究, 并了

解他们与雷电和雷暴的关系, 2007 年夏季, 我们进行了首次红色精灵的观测实验, 并成功地在 2 次雷暴过程上方观测到 17 次红色精灵, 本文是对观测结果的首次报道.

1 观测设备和实验简介

2007 年红色精灵观测实验(Chinese Red Sprite Observation Campaign, CRSOC)选在山东滨州沾化县的一个农场($37^{\circ}49'42''\text{N}$, $118^{\circ}05'06''\text{E}$), 灯光污染很小, 周围没有高大建筑, 视野开阔, 非常适合观测. 实验中摄像系统(图 1)采用 Watec902H 和焦距为 12 mm 光圈为 $f/0.8$ 的镜头, 观测系统视野(field of view, FOV)为 $31.1^{\circ}(\text{H}) \times 21.2^{\circ}(\text{V})$. 所得数据通过采集卡实时传输到电脑硬盘, 系统通过 GPS 与世界时间保持同步. 观测过程中, 利用卫星云图得到雷暴的大致方位和距离, 同时, 结合地面地闪定位网得到的雷电分布实况, 及时调整摄像系统对准雷暴的活动的中心.



图 1 实验中所用摄像系统

观测站所处地理位置的经纬度分别为 $118^{\circ}05'06''\text{E}$ 和 $37^{\circ}49'42''\text{N}$. 观测站的海拔高度为 10.2 m, 东、南、西 3 个方向没有建筑物遮挡, 北面较低的建筑物只占摄像系统视野的十分之一.

红色精灵观测期间, 有时测站上空有雷暴发生, 有时测站周围几百公里范围内都没有雷暴发生, 这些情况都无法进行观测. 在 2 个月实验期间, 只有 9 个晚上适合观测. 尽管如此, 我们还是成功地记录到 17 次红色精灵, 1 次发生在 7 月 28 日凌晨(当地时间 00:36:39), 雷暴在观测站西南, 范围约为 $325 \text{ km} \times 278 \text{ km}$, 雷暴中心大致位于山东省冠县, 地处山东、河南、河北三省交界附近. 根据雷暴中心和观测站所在经纬度, 估算得到雷暴中心与观测站的距离约为 272 km. 假定在红外云图上所选的雷暴中心与实际雷暴中心的经纬度分别差 0.1° , 那么估算得到的距离约差 14 km, 对于 272 km 而言, 估算误差小于等于 5.14%(下文的距离估算采用类似的方法). 另外 16 次

红色精灵发生在 8 月 1 日晚至 8 月 2 日凌晨, 雷暴在观测站东南, 范围约为 $395 \text{ km} \times 360 \text{ km}$, 雷暴中心在临沂上空, 与测站的距离约为 315 km.

2 资料分析

图 2 给出了 8 月 1 日晚至 8 月 2 日凌晨雷暴上方出现的红色精灵的静态图像及风云二号卫星给出的云图. 图 2(a)中的“2”图像是典型的圆柱状红色精灵, 而“1”和“3”则是带有天使状翅膀的柱状红色精灵, “1”图像的天使状翅膀尤为明显. 图 2(b)则是典型的成簇胡萝卜状红色精灵. 虽然图 2(d)和(e)所示的红色精灵有云层遮挡, 但由于云比较薄, 红色精灵的亮中心和向下的卷须(与北美观测到的非常类似)仍清晰可见, 从而判断它们属于典型的胡萝卜状红色精灵. 另外, 分析视频文件发现, 17 次红色精灵中, 有 2 次红色精灵的水平位置发生了变化, Lyons^[2]将这种红色精灵命名为跳舞状红色精灵. 表 1 列出了记录到的所有红色精灵及地面地闪定位得到的母体雷电相关信息. 因为有些红色精灵发光较暗, 且视野中有云, 所以无法判断这些红色精灵的具体形态, 在表中以“未知”表示.

8 月 1 日晚的卫星云图显示, 这次雷暴过程自 8 月 1 日下午 15:00(当地时间)开始发展, 到 17:30 发展到最强, 然后开始减弱. 到 20:00 时, 云开始分裂为两块, 随后变得更弱. 从 21:00 开始, 在云的西南边缘, 又有小单体生成, 并和原来减弱的雷暴云合并在一起, 整体向东南方向移动. 记录到的第一个红色精灵(图 2(a))发生在 21:30:10. 第二个红色精灵(图 2(b))发生在 22:02:48, 然后过了近一个小时, 在 22:58:42 记录到第三个红色精灵. 自 8 月 1 日 23:19:50 起, 至 8 月 2 日 01:43:04 结束的 144 min 时间内, 共观测到 13 个红色精灵, 平均每 11 min 产生一个. 同时, 红色精灵一旦发生, 就会在几乎相同的位置重复出现, 而且出现频率也比较高, 这与北美观测结果类似(北美曾观测到红色精灵的发生频率为每 2~3 min 一个)^[12].

红色精灵发生在雷暴云上方, 它离地面究竟有多高, 空间延伸如何? 要获得这些信息, 需知道观测站与红色精灵的距离, 由于实验中观测站只有一个, 因此, 无法精确确定红色精灵的发生位置. 但是, 根据 Fernanda 等人^[13]的观测结果, 红色精灵通常发生波在以母体雷电为中心的 50 km 范围内. 虽然这次雷暴过程的范围约为 $395 \text{ km} \times 360 \text{ km}$, 而红外云图显示,

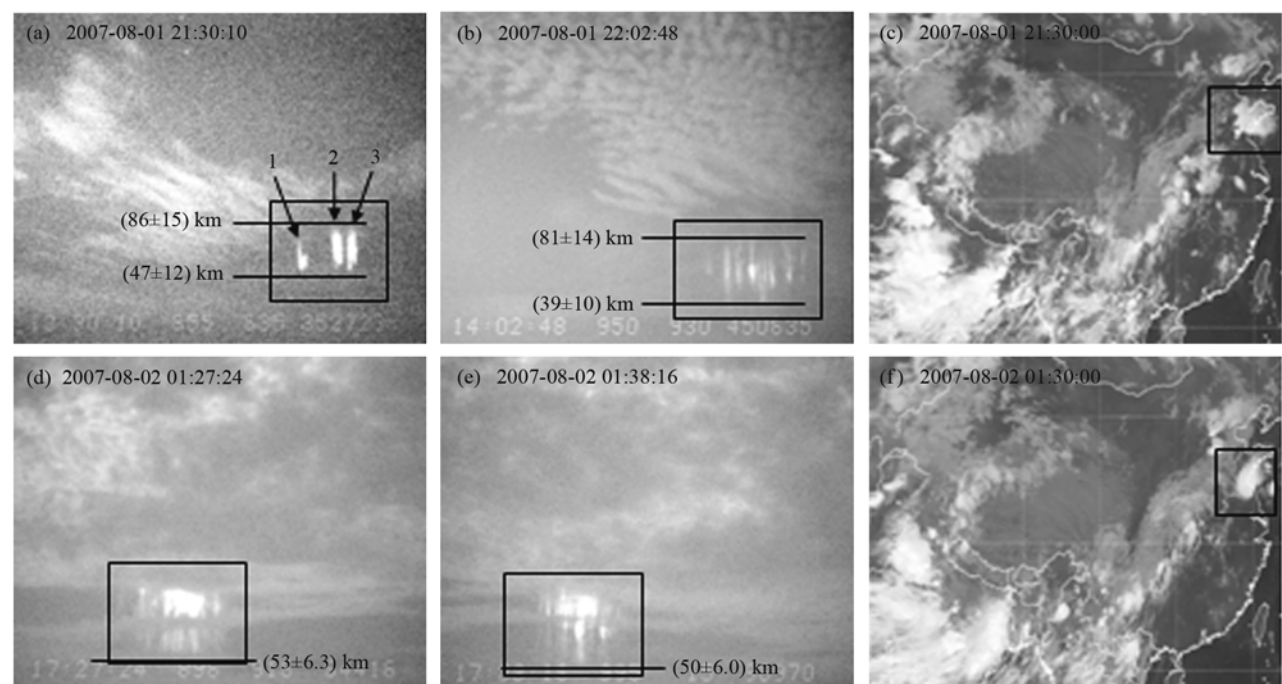


图 2 红色精灵静态图像((a), (b), (d)和(e)中方框部分)

(d)和(e)中红色精灵底部的卷须结构发展非常充分, 产生这两次红色精灵的母体雷电与观测站的距离分别为 353.2 和 341.7 km.
(c)和(f)中的方框部分标出了产生红色精灵的雷暴云, 方位在观测站的东南

表 1 观测到的红色精灵及母体雷电的相关信息

序号	红色精灵发生时间 ^{a)}		雷电(地闪) 发生时间 ^{a)}	红色精灵 形态特征	红色精灵持续 时间/ms	红色精灵与雷电的 时间差/ms	雷电与观测站的 距离/km
	LT	UT	LT				
1	2007-07-28	2007-07-27	2007-07-28	圆柱状	80	3.5	232.9
	00:36:39 710	16:36:39 710	00:36:39 7065				
2	2007-08-01	2007-08-01	2007-08-01	圆柱状	120	7.5	215.7
3	21:30:10 645	13:30:10 645		胡萝卜状	40		
4	22:02:48 940	14:02:48 940		胡萝卜状	80		
5	22:58:42 934	14:58:42 934		胡萝卜状	40		
6	2007-08-02	2007-08-01	2007-08-02	未知	80	4.7	245.8
7	00:04:18 346	16:04:18 346		胡萝卜状	120		
8	00:23:07 737	16:23:07 737	00:23:07 7323	胡萝卜状	40		
9	00:47:45 219	16:47:45 219	00:47:45 2101	胡萝卜状	40		
10	00:56:37 674	16:56:37 674	00:56:37 6631	胡萝卜状	40	10.9	353.2
11	01:10:42 738	17:10:42 738		胡萝卜状	40		
12	01:12:31 601	17:12:31 601	01:12:31 5976	未知	40	3.4	345.2
13	01:18:27 31	17:18:27 31		胡萝卜状	40		
14	01:22:40 998	17:22:39 998		跳舞状	160	5.8	353.2
15	01:27:24 906	17:27:24 906	01:27:24 9002	未知	40		
16	01:33:21 816	17:33:21 816		胡萝卜状	80		
17	01:38:16 005	17:38:16 005	01:38:15 9932	胡萝卜状	40		
17	01:43:04 693	17:43:04 693		跳舞状	80	11.8	341.7
平均值					61		

a) LT 为北京时间, UT 为世界时间

雷暴云中云顶温度较低的区域面积仅有 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ ，所以，可以假定产生红色精灵的雷电位于这个区域中心附近，这样，可以得到母体雷电与测站的距离。同时，摄像系统的视野也是已知的。根据这些条件，采用Hsu等人^[14]的方法，可以粗略地估计红色精灵的空间延伸。为使读者对这一方法有所了解，下面对此方法做一简单介绍。

如图3所示，假定红色精灵与观测站的距离为 L km，观测站的海拔高度为 a km，地球半径 R 为 6378 km，那么长度 L 对应的地球中心角 θ 可以表示为

$$\theta = \left(\frac{L}{R} \right) \times \frac{180}{\pi}, \quad (1)$$

对于观测站而言，在红色精灵发生处，最低的水平可视高度为

$$h_0 = \frac{(R+a)}{\cos \theta} - R, \quad (2)$$

红色精灵与测站的直线距离 x 为

$$x = (R+a) \times \tan \theta, \quad (3)$$

由于摄像系统的视野、观测站的海拔高度、红色精灵与测站的距离是已知的，因此，可得到红色精灵底端和顶端与水平面的夹角 δ_1 和 δ_2 ，进一步可得到红色精灵底端和顶端距离水平面的高度 h_1 和 h_2 ：

$$h_1 = \frac{x}{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \delta_1 - \theta \right)} \times \sin \delta_1, \quad (4)$$

$$h_2 = \frac{x}{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \delta_2 - \theta \right)} \times \sin \delta_2, \quad (5)$$

因此，发光体长度为 $h_2 - h_1$ ，红色精灵底端和顶端距离地球表面的高度分别为 $h_1 + h_0$ 和 $h_2 + h_0$ 。

利用上述方法，估算得到红色精灵的高度和空间延伸如图2中横线所示。图2(a)中红色精灵簇的底端约在 $(47 \pm 12) \text{ km}$ ，顶端达到了 $(86 \pm 15) \text{ km}$ ，垂直延伸约为 39 km ，与Hsu等人^[14]得到的结果(红色精灵底端在 $(40 \pm 10) \text{ km}$ ，顶端在 $(80 \pm 10) \text{ km}$ 附近。图2(b)中红色精灵簇的底端约在 $(39 \pm 10) \text{ km}$ ，顶端位于 $(81 \pm 14) \text{ km}$ ，垂直延伸约为 42 km 。同时，图像(a)和(b)中红色精灵簇的水平宽度大于垂直延伸高度。

上文假定产生红色精灵的母体雷电位于云顶温度较低的区域中心附近，得到母体雷电与观测站的距离，从而估算红色精灵的高度。然而，由表1可知(表1最后一列)，产生图2(d)和(e)红色精灵的母体雷

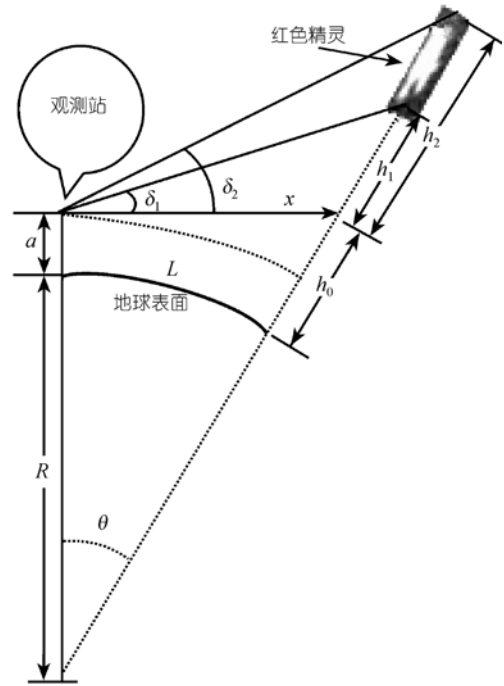


图3 红色精灵与观测站的距离(L)、观测站的海拔高度(a)、红色精灵距离地球表面的高度(h_1+h_0 和 h_2+h_0)之间的关系
已知红色精灵与观测站的距离，可估算红色精灵的高度和发光体的长度(h_2-h_1)

电与测站的距离是已知的，且这两次红色精灵底端并没有被云层遮挡。因此，可以采用类似方法^[14]，对图2(d)和(e)中红色精灵底端的离地高度进行估算，结果分别为 (53 ± 6.3) 和 $(50 \pm 6.0) \text{ km}$ ，与利用三角方法测量得到的红色精灵底端高度 $(40 \sim 60 \text{ km})$ 一致。由于图2(d)和(e)中红色精灵顶端均有云层遮挡，因此，没有对顶端的离地高度进行估算。对于底端和顶端都有浓云遮挡的红色精灵，这里没有进行估算。红色精灵的立体形态怎样？回答这个问题需要GPS同步的多站观测相结合。

17次红色精灵持续时间变化范围为 $40 \sim 160 \text{ ms}$ ，几何平均值约为 61 ms (参见表1)。正如前面所述，由于摄像系统视野中有微薄的云，所以，红色精灵发展变化过程中较微弱的发光可能因为云遮挡而看不到，而红色精灵的持续时间是根据图像显示的帧数来计算的，因此，得到的结果可能比实际的持续时间偏小，即使如此，我们得到的红色精灵持续时间范围与Lyons^[2]的观测结果(持续时间范围为 $33 \sim 283 \text{ ms}$ ，平均值为 98 ms)也是类似的。

现在理论一般认为，红色精灵是地闪(称为产生红色精灵的母体雷电)放电之后，空间暂时存在的准

静电场导致低电离层中能量较低电子加热、中性分子的电离,进而产生光辐射的结果^[15]。红色精灵与母体雷电的时间差范围在 3.4~11.8 ms之间,平均值为 7.1 ms(表 1)。Winckler^[16]研究发现,红色精灵总是在地闪发生后几毫秒时间内产生,与本文观测结果一致。同时,由图 4 给出的整个雷暴过程中每 30 min 的地闪频数随时间的演变可以看出,总地闪(CG)频数在红色精灵发生之前整体呈下降趋势。在红色精灵发生时段,总地闪(CG)频数达到谷值 17 个/30 min,而正地闪频数则达到最高值 37 个/30 min,正地闪在总地闪中所占比例达到 69.70%。同时,研究还发现,产生红色精灵的雷电全部为正地闪。Winckler^[16]研究也发现,在 38 次红色精灵中,35 次与正地闪相关。所有这些都表明,红色精灵常常伴随正地闪而产生,但至今未找到红色精灵倾向于正地闪的物理机制。

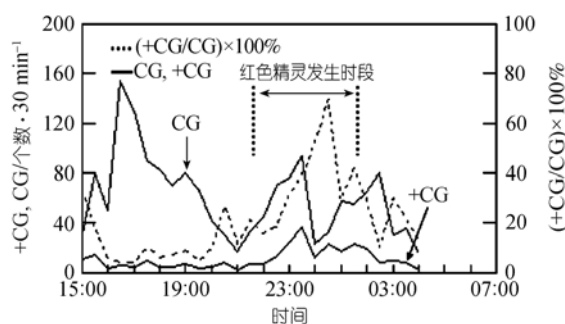


图 4

实线给出了每 30 min 地闪频数(+CG 表示每 30 min 发生正地闪的个数,CG 表示每 30 min 发生总地闪的个数)随时间的演变。在红色精灵发生时段,正地闪频数出现峰值并达到 37 个/30 min,而总地闪频数出现谷值为 17 个/30 min。图中虚线给出了正地闪在总地闪中所占比例随时间的演变,最大值为 69.70%。

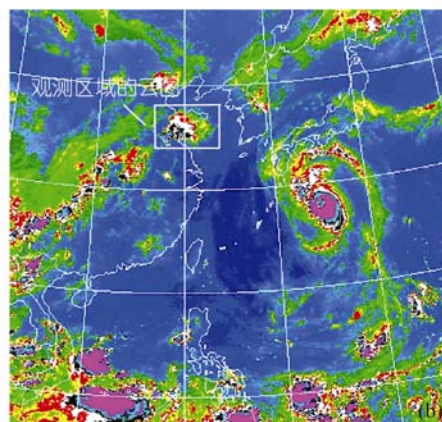
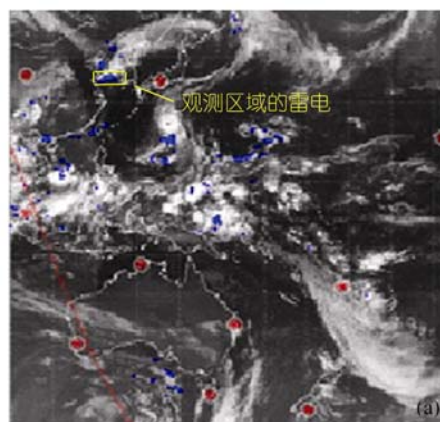


图 5

当地时间 21:10~22:10 时段内,全球雷电甚低频定位系统给出的雷电分布(蓝色区域)与卫星云图(白色区域)的叠加(a)。(a)中红色圆点表示 VLF 观测站的分布;(b)是 MTSAT 卫星给出的红外云图(色调强化图)。图(a)和(b)中的方框分别标出了观测区域内的雷电和雷暴云

图 5(a)给出了 8 月 1 日当地时间 21:10~22:10 时段内,全球雷电甚低频定位系统^[17](World Wide Lightning Location Network, WWLLN)给出的观测区域及其周围的雷电分布与卫星云图的叠加。WWLLN 通过覆盖全球的 30 个传感器对发生于全球的雷电活动进行实时监测和定位,探测效率约为 50%,传感器的工作频率范围为 3~30 kHz。图 5(a)中红色圆点表示 VLF 观测站的分布,蓝色区域表示 21:10~22:10 时段内的雷电分布。图 5 中的方框标出了摄像系统对准的雷暴云,可知在观测系统视野内有大量雷电发生。图 5(b)是 MTSAT 卫星给出的红外云图。放大云图可以发现,图中出现了紫红色、浅蓝色、黑色和白色等区域(细看图 5(b)也可以看出),而这些区域对应的云顶温度分别达到了 $-64.2^{\circ}\text{C} \sim -80.2^{\circ}\text{C}$, $-60.2^{\circ}\text{C} \sim -63.2^{\circ}\text{C}$, $-54.2^{\circ}\text{C} \sim -59.2^{\circ}\text{C}$ 和 $-43.2^{\circ}\text{C} \sim -53.2^{\circ}\text{C}$,且白色区域占较大范围。

为了对产生红色精灵的雷暴云性质有一个较深入的了解,我们利用多普勒雷达资料,对 8 月 1 日晚至 8 月 2 日凌晨的雷暴过程进行了详细分析。图 6 给出了红色精灵发生频率较低时段(图 6(a)和(c))和发生频率较高时段(图 6(b)和(d))的雷达回波。在红色精灵较少时段,也就是在 22:00 前后 1 h 左右的时间内,仅产生了 4 个红色精灵,平均每 27 min 产生一个(1 个/27 min)。而由图 6(a)可知,强对流中心的回波强度却达到了 60~65 dBZ,回波强度在 50~60 dBZ 的也占较大范围,此时,强对流中心的回波顶高也达到了 12 km(图 6(c)),这表明,在红色精灵发生频率较低时段,对流发展非常旺盛。而在红色精灵较多时段,也就是

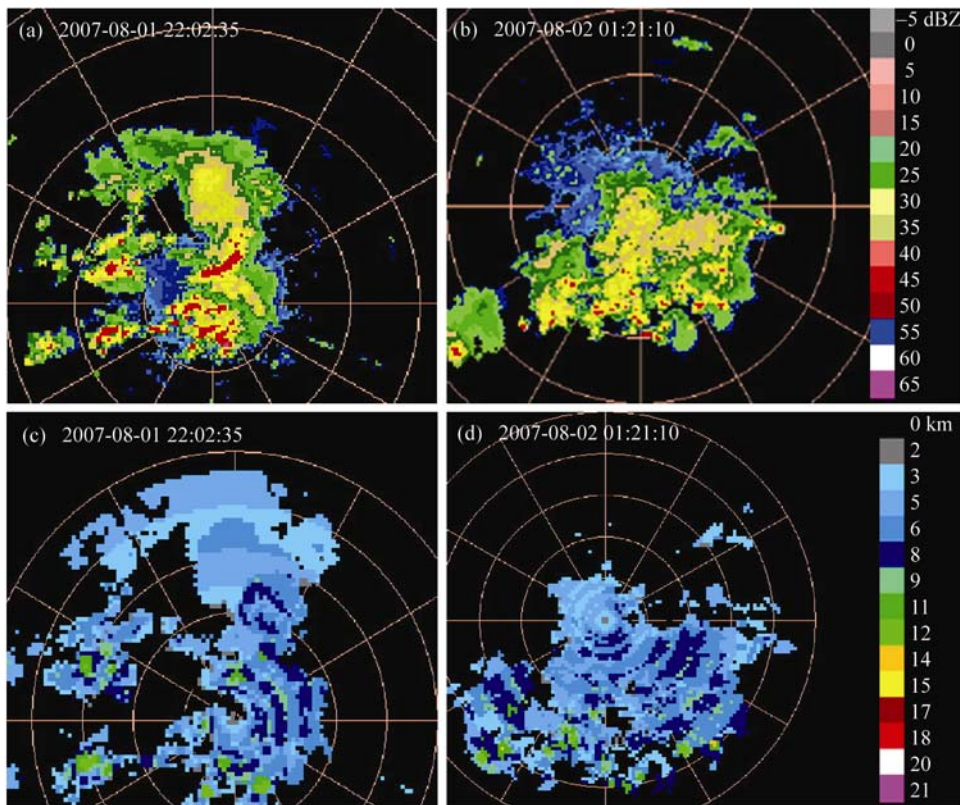


图 6

红色精灵发生频率较低时段(单位: 个/27 min)的组合反射率(a)和回波顶高(c), 回波强度在 50~60 dBZ 的在雷暴云中占较大面积. 红色精灵发生频率较高时段(单位: 个/9 min)的组合反射率(b)和回波顶高(d), 与图(a)相比, 回波强度在 50~55 dBZ 的只占了雷暴云面积的一小部分

在 01:20 前后, 平均每 9 min 产生一个红色精灵(1 个/9 min), 但最大回波强度仅为 50~55 dBZ(图 6(b)), 小于图 6(a)中的 60~65 dBZ, 而且分布较散, 所占范围较小. 上述对比分析表明, 红色精灵在对流发展较旺盛阶段出现较少, 而在雷暴系统减弱阶段频繁出现. Lyons^[18]也发现, 大多数红色精灵发生在大范围的层状云降水区, 而不是中尺度对流系统的高反射率对流中心. 由于实验中观测站数目的限制(只有一个测站), 本文无法精确确定红色精灵的发生位置, 但是, 根据红色精灵发生频率较高时段处于雷暴开始减弱的事实推测, 本文所得结论与 Lyons^[18]的研究结果是类似的.

3 结果与讨论

2007 年夏季红色精灵观测实验期间, 共成功记录到红色精灵 17 次. 红色精灵持续的时间范围为 40~160 ms, 平均值约为 61 ms, 与 Lyons^[2]观测结果类似. 红色精灵垂直延伸约为 40 km, 底端位于 40 km 左右, 顶端位于 85 km 左右, 与 Hsu 等人^[14]的结果

类似, 也与北美的观测结果类似^[3]. 观测到的 17 次红色精灵均成簇出现, 而且形态多样, 有柱状、带有天使状翅膀的柱状、胡萝卜状和跳舞状等. 对于红色精灵成簇出现的原因, 至今未能进行较好的解释, 虽然 Valdivia 等人^[19]曾将云层间的闪电假定为一个分形天线(fractal antenna)模拟出了红色精灵群, 但每一个红色精灵的结构却未能呈现出来.

在 7 月 28 日雷暴过程中, 只记录到一次红色精灵, 而 8 月 1 日晚至 8 月 2 日凌晨的雷暴过程中共记录到 16 次红色精灵. 可见, 有些雷暴过程产生的红色精灵很少, 而有些产生的较多, 这与 Winckler^[16]的观测结果类似, 他曾观测了十几次雷暴过程, 但只有 2 次雷暴过程产生了较多的红色精灵. 出现这种情况的原因, 是否与雷暴的性质、强弱、雷暴的电荷结构和局地的环境条件等因素有关? 虽然, 国外已有的观测结果和我们的观测结果都表明, 红色精灵常和大的中尺度对流系统相联系, 而且 Lyons^[2]和本文观测的都是由夏季雷暴产生的红色精灵. 然而, 日本的

冬季雷暴和地中海东部地区的冬季雷暴也都有产生红色精灵的研究报道^[20,21], 热带地区的雷暴上空也曾观测到红色精灵^[22]. 因此, 产生红色精灵的雷暴与没有产生红色精灵的雷暴究竟有什么不同, 产生红色精灵的雷暴共性是什么? 这些问题还有待于进一步研究. 本文得到产生红色精灵的雷电全部是正极性的, 国外也得到绝大多数红色精灵与正地闪相关, 但并非所有的正地闪都产生红色精灵. 这些结论是否具有普遍性, 还需要进一步的观测和理论研究.

实验过程中, 所用摄像系统的分辨率为 25 幅/s,

而红色精灵的发展变化很快(持续时间仅为几十到几百毫秒), 目前尚无法由动态图像得到红色精灵发展变化的更精细特征, 因此, 需要采用高分辨率的观测设备. 红色精灵三维形态特征的获得则需要 GPS 同步的地面或空间多站光学观测相结合. 总之, 由于红色精灵自发现至今才短短十多年时间, 目前还处在研究的初步阶段, 尚有许多科学问题等待澄清, 特别是对其机理的研究还很不足. 下一步工作中, 我们将采用高分辨率观测设备对红色精灵进行观测研究, 同时对其产生的物理机制进行探讨.

参考文献

- 1 Franz R C, Nemzek R J, Winckler J R. Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system. *Science*, 1990, 249(4964): 48—51[[doi](#)]
- 2 Lyons W A. Characteristics of luminous structures in the stratosphere above thunderstorms as imaged by low-light video. *Geophys Res Lett*, 1994, 21(10): 875—878[[doi](#)]
- 3 Sentman D D, Wescott E M, Osborne D L, et al. Preliminary results from Sprites94 campaign: 1. Red sprites. *Geophys Res Lett*, 1995, 22(10): 1205—1208[[doi](#)]
- 4 Westcott 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(10): 1209—1212[[doi](#)]
- 5 Pasko V P, Stanley M A, Mathews J D, et al. Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere. *Nature*, 2002, 416(6877): 152—154[[doi](#)]
- 6 Wescott E M, Sentman D D, Heavner M J, et al. Observations of 'Columniform' sprites. *J Atmos Sol Terr Phys*, 1998, 60(7-9): 733—740[[doi](#)]
- 7 Su H T, Hsu R R, Chen A B, et al. Observation of sprites over the Asian continent and over oceans around Taiwan. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(4), doi:10.1029/2001GL013737
- 8 祝宝友, 陶善昌, 谭涌波. 雷暴云顶之上的大气放电研究进展. *高原气象*, 2006, 25(3): 549—555
- 9 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(3): 480—486
- 10 吴明亮, 徐寄遥, 马瑞平. 闪电引起的天电和红闪现象的模拟研究. *物理学报*, 2006, 55(10): 5007—5013
- 11 吴明亮, 徐寄遥. “闪晕”的电场结构和光辐射的时变模拟. *空间科学学报*, 2005, 25(6): 510—515
- 12 Winckler J R. Further observations of cloud-ionosphere electrical discharges above thunderstorms. *J Geophys Res*, 1995, 100(D7): 14335—14345[[doi](#)]
- 13 Fernanda T, Sabbas S, Sentman D D, et al. Statistical analysis of space-time relationships between sprites and lightning. *J Atmos Solar Terr Phys*, 2003, 65(5): 525—535[[doi](#)]
- 14 Hsu R R, Su H T, Chen A B, et al. Transient luminous events in the vicinity of Taiwan. *J Atmos Solar Terr Phys*, 2003, 65(5): 561—566[[doi](#)]
- 15 Pasko V P, Inan U S, Bell T F, et al. Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere. *J Geophys Res*, 1997, 102(A3): 4529—4561[[doi](#)]
- 16 Winckler J R. Optical and VLF radio observations of sprites over a frontal storm viewed from O'Brien Observatory of the University of Minnesota. *J Atmos Solar Terr Phys*, 1998, 60(7-9): 679—688[[doi](#)]
- 17 Price C, Yair Y, Asfur M. East African lightning as a precursor of Atlantic hurricane activity. *Geophys Res Lett*, 2007, 34(L09805), doi:10.1029/2006GL028884
- 18 Lyons W A. Sprite observations above the U.S. High Plains in relation to their parent thunderstorm systems. *J Geophys Res*, 1996, 101(23): 29641—29652[[doi](#)]
- 19 Valdivia J A, Milikh G, Papadopoulos K. Red sprites: Lightning as a fractal antenna. *Geophys Res Lett*, 1997, 24(24): 3169—3172[[doi](#)]
- 20 Suzuki T, Hayakawa M, Matsudo Y, et al. How do winter thunderstorm systems generate sprite-inducing lightning in the Hokuriku area of Japan? *Geophys Res Lett*, 2006, 33, L10806, doi:10.1029/2005GL025433
- 21 Ganot M, Yair Y, Price C, et al. First detection of transient luminous events associated with winter thunderstorms in the eastern Mediterranean. *Geophys Res Lett*, 2007, 34, L12801, doi:10.1029/2007GL029258
- 22 Pinto O J, Saba M M F, Pinto R C A, et al. Thunderstorm and lightning characteristics associated with sprites in Brazil. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L13103, doi:10.1029/2004GL020264