王子健, 陆高鹏, 王庸平, 等. 2020. ISUAL 探测器在青藏高原南麓地区对于红色精灵现象的观测分析 [J]. 大气科学, 44(1): 93−104. WANG Zijian, LU Gaopeng, WANG Yongping, et al. 2020. Observational Analysis of Red Sprites by ISUAL Instrument over the Southern Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(1): 93−104. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1909.18232

ISUAL 探测器在青藏高原南麓地区对于红色精灵现象的观测分析

王子健[1] 陆高鹏[2, 3] 王庸平[3] 黄安晶[2, 4] 张鸿波[2]

1 成都信息工程大学，成都 610225
2 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
3 中国科学技术大学地球和空间科学学院/中国科学院近地空间环境重点实验室，合肥 230026
4 中国科学院大学，北京 100049

摘　要　本文利用福卫二号卫星（FORMOSAT-2）搭载的高空大气闪电影像仪（Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightnings, ISUAL）于 2004～2015 年期间获得的数据，分析了青藏高原南麓地区（22°～30°N, 86°～98°E）观测到的多例红色精灵事件。通过与全球闪电定位网（World Wide Lightning Location Network，WWLLN）的观测资料进行对比，在分析了 17 次个例后发现对于大部分红色精灵事件，ISUAL 给出的定位效果较好，与 WWLLN 的闪电定位结果偏差一般小于 50 km，这与在北美及其邻近地区得到的结果一致。在此基础上，我们结合风云二号卫星的云顶亮温数据分析了青藏高原南麓地区红色精灵的母体雷暴特征，发现在青藏高原南麓地区除了中尺度对流系统外，小尺度对流系统也是这个地区产生红色精灵的主要天气系统。

关键词　瞬态发光事件　红色精灵　卫星观测　青藏高原　深对流

文章编号　1006-9895(2020)01-0093-12　　**中图分类号**　P446　　**文献标识码**　A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1909.18232

Observational Analysis of Red Sprites by ISUAL Instrument over the Southern Tibetan Plateau

WANG Zijian[1], LU Gaopeng[2, 3], WANG Yongping[3], HUANG Anjing[2, 4], and ZHANG Hongbo[2]

1 *Chengdu University of Information Technology*, *Chengdu* 610225
2 *Key Laboratory for Atmosphere and Global Environment Observation*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Science*, *Beijing* 100029
3 *Key Laboratory of Geospace Environment*, *Chinese Academy of Sciences/School of Earth and Space Sciences*, *University of Science and Technology of China*, *Hefei* 230026
4 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049

Abstract　In this paper, the authors examined the sprite phenomenon over the southern Tibetan Plateau (22°−30°N, 86°−

收稿日期　2018-09-16；**网络预出版日期**　2019-06-25
作者简介　王子健，男，1994 年出生，硕士研究生，主要从事中高层放电现象研究。E-mail: wzj19940703@sina.com
通讯作者　陆高鹏，E-mail: gaopenglu@mail.iap.ac.cn
资助项目　国家重点研发计划项目 2017YFC1501501，中国科学院“百人计划”项目 2013068，国家自然科学基金项目 41305005、41622501、41875006，中国科学院近地空间环境重点实验室开放课题（GE2015-01）

Funded by　National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFC1501501), One Hundred Talent Program of Chinese Academy of Sciences (Grant 2013068), National Natural Science Foundation of China (Grants 41305005, 41622501, 41875006), Opening Fund of Key Laboratory of Geospace Environment, Chinese Academy of Sciences (Grant GE2015-01)

98° E) by comparing the lightning detection data from the World-Wide Lightning Location Network (WWLLN) and observations from the Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightning (ISUAL) instrument aboard the FORMOSAT-2 satellite during 2004–2015. It was found that most of the location accuracy of ISUAL was sound after analysis of 17 samples, and the deviations from WWLLN were < 50 km. It was consistent with the results obtained in North America and its vicinity. Based on these results, the authors analyzed the characteristics of the parent lightning strokes of the sprites combined with the cloud-top brightness temperature data from the FY 2 satellite. The authors found that sprites over the southern Tibetan Plateau formed not only from mesoscale convective systems, but also from smaller-scale convective systems.

Keywords TLEs (Transient Luminous Events), Red sprites, Satellite observation, Tibetan Plateau, Deep convection

1 引言

中高层大气瞬态发光事件（Transient Luminous Events, TLEs）是发生于雷暴云顶平流层以及中间层（50～95 km）的一种大尺度的瞬态发光事件（祝宝友等, 2006; Qie et al., 2009）。由于其与对流层雷暴活动的密切联系而引起了各国学者的广泛关注。根据光辐射的特征和其发生形态位置的不同，Pasko（2003）曾将已发现的中高层大气放电现象归为四类：（1）激发于大约70 km的高度（Pasko et al., 2002），由电离层快速向下发展的红色精灵（red sprite）（Sentman et al., 1995）；（2）由闪电激发的，发生于低电离层85～95 km高度，水平扩展可以达到200～600 km的淘气精灵（Emissio of Light and Very Low Frequency perturbatios due to Electromagnetic Pulse Sources, Elves）（Boeck et al., 1992; Fukunishi et al.,1996）；（3）速度相对较慢，约为100 km s^{-1}，发展的最大高度约在40～50 km，由雷暴云顶部向上发展的蓝色喷流（blue jet）（Westcott et al., 1995）；（4）由强烈的雷暴云顶部一直延伸到大约70～90 km的高度，由云顶向电离层快速向上发展的巨大喷流（gigantic jet）（Pasko et al., 2002）。其中，最早也是最容易观测到的中高层大气放电现象则是红色精灵。红色精灵由Franz et al.（1990）使用微光摄像机首次意外拍摄到（Cummer et al., 2006）。

根据大量的观测发现，红色精灵的亮度可达几百兆瑞利，持续时间从几毫秒到几十毫秒，红色精灵根据发光位置以及形态的差异可以被分为几种不同的种类，其中以圆柱状（Wescott et al., 1998）和胡萝卜状（Sentman et al., 1995）最为常见。圆柱型红色精灵整体上呈圆柱体，其全体颜色差异并不明显，只在顶部与底部有些许卷须；而胡萝卜型红色精灵的中部有一个明显的发光中心，顶部有分叉且底部卷须显著。另外，Y型（Matsudo et al., 2007）、焰火状（Su et al., 2002）等红色精灵也被发现（王志超等，2015），有时还会出现所谓的舞蹈状红色精灵（Lyons, 1994）。

红色精灵现象在世界各地都已有被观测到的记录（Boccippio et al., 1995; Neubert et al., 2001; Su et al., 2002; Soula et al., 2009），因此可以被视为一个全球性的自然现象。在目前开展的地面观测中，绝大多数红色精灵由正极性的云地回击过程产生（Cummer and Lyons, 2005; Williams et al., 2007），而基于卫星平台的观测则表明，在海洋性雷暴上空则有一定比率的红色精灵由负极性的地闪过程产生（Lu et al., 2017）。在国内，祝宝友等（2006）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；杨静等（2008）和王志超等（2015）也分别分析了2007年山东沿海地区和2013年华北地区的红色精灵现象；吴明亮和徐寄遥（2005）利用三维准静电场模式较好地解释了红色精灵的时空特征；Lu et al.（2017）分析了2004～2015年间北美地区的红色精灵分布状况，并证实了美国中部的红色精灵母体雷暴以中尺度对流系统为主；Sato et al.（2015）则利用日本全球闪电和红色精灵测量项目（Global Lightning and Sprite Measurements mission, GLIMS）中获得的对地观测数据分析了红色精灵的全球分布特征。

虽然红色精灵在世界范围内的研究已经不胜枚举，但是对于青藏高原地区红色精灵的研究却是稀缺的，而青藏高原地区作为一个地形条件极其特殊的区域，平均海拔在4000 m以上，其对流和闪电活动如何受到地形影响值得深入研究。青藏高原地区年平均闪电密度为2.6 flashes km^{-1}，从季节分布来看，整个青藏高原地区，闪电主要分布在5～8月，即闪电主要在春夏季，秋冬季节很少；而高原南部地区由于其背靠喜马拉雅山脉，其闪电主要分

布在4～9月，且闪电活动中心随着季节变化而移动（史东东等，2017；齐鹏程等，2016），特殊的地理条件和气候使得该地区的闪电密度明显小于中国同纬度其他地区。

目前，少数研究已经表明，青藏高原上空同样可以发生红色精灵事件，Chou et al.（2016）在分析2014年4月27日于青藏高原南麓记录到的重力波事件时，捕捉到了红色精灵事件并提及在该地区也曾有红色精灵事件的记录，而Sato et al.（2015）基于日本实验舱全球闪电及红色精灵观测试验计划（Global Lightning and Sprite Measurements on Japanese Experiment Module, JEM-GLIMS）的分析也表明青藏高原南麓已获得少量的红色精灵记录。由于青藏高原南麓地区视野开阔，城市光污染较少，能见度较高，可以满足地基观测设备对于红色精灵的捕捉条件，因此，青藏高原地区进一步开展夏季地面观测实验是很有必要的。在本文研究中，我们针对青藏高原地区红色精灵及其母体雷暴是否因为地形环境因素而具有不同特征这一问题，聚焦于青藏高原南麓地区（22°～30°N，86°～98°E），探究该区域红色精灵的分布以及各母体雷暴的类型等情况，希望对青藏高原地区红色精灵的现状形成一个基本的了解。

与红色精灵现象类似，光晕（Sprite halo）现象也是由地闪在中高层大气中产生的电场扰动所引发的介质击穿发光现象，但因为缺少垂直方向发展的流光结构，持续时间较短且光度一般较低。根据是否伴随红色精灵事件，光晕现象可分为纯光晕和光晕+红色精灵。Lu et al.（2018）根据ISUAL平台在北美地区观测的分析表明，多数光晕现象为纯光晕事件，且多由负极性地闪所引发。许多从脉冲电荷矩强度角度考虑能够触发红色精灵的负地闪，因为其电荷传输时间尺度较短，只能产生光晕现象。本文将在第四部分介绍青藏高原地区的光晕现象作为对红色精灵现象的补充说明。

2 观测和数据

台湾福卫二号卫星（FORMOSAT-2）搭载的高空大气闪电影像仪（Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightnings, ISUAL）是专用于观测中高层放电现象的星载仪器（福卫二号卫星2004年开始工作，2015年终止服役）。其观测方式为临边观测，包含了三种观测口径的传感器：增强型CCD成像仪；用于测量在6个预选波段的光子通量的六通道分光光度计；提供不同垂直高度的光变化的16阳极阵列光度计。福卫二号卫星沿着距地890 km的太阳同步轨道运行，而ISUAL沿着向东的视角进行观测工作。ISUAL的定位工作是根据其携带的图像框架推导完成的：假设某次红色精灵事件发生于某雷暴的正上方某处，如果母体雷暴可见，测量被照亮的云顶的中心或最亮像素的位置，并以15 km（Smith et al., 2005）作为雷云顶的高度；如果母体雷暴不可见，则认为红色精灵事件发生于85～90 km的高度。随后人工读取事件图像坐标并对不同个体进行比较，结果表明红色精灵定位的平均偏移小于2个像素点（Chen et al., 2008; Chern et al., 2015）。ISUAL的定位精度与距事件发生的距离有着直接的关系，平均来说精度优于50 km/pixel，利用大城市区域的城市光线进行验证表明，对于距航天器2800 km以内的事件，ISUAL的地理定位精度优于0.5°（Chen，2004）。ISUAL星载探测器全年在青藏高原地区所累计的观测时间足够长，并可依此分析红色精灵现象于高原地区的分布以及概率密度，较为适合本次研究。

本文同时使用了全球闪电定位网（World Wide Lightning Location Network，WWLLN）的观测资料用于和ISUAL结果进行对比。WWLLN是由50多个站点组成的甚低频定位网，其中心位于华盛顿大学。由于WWLLN数据不能给出闪电的峰值信息，且其探测云闪和地闪的精度及探测效率较低（Hutchins et al., 2012），因此本文需结合风云二号卫星提供的卫星资料补充使用。尽管如此，WWLLN资料也能一定程度上反应雷暴发生的大体位置和范围。

表1给出了从2004年至2015年福卫二号卫星

表1　2004～2015年ISUAL所观测的红色精灵及光晕事件总览

Table 1　Sprites and halos observed by ISUAL (Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightnings) during 2004−2015

事件类别	观测的事件总数量	青藏高原地区观测到的事件数量	青藏高原地区观测到的事件中能与WWLLN所匹配的数量
红色精灵	2543	24	17
光晕	2159	20	8

工作的12年间，ISUAL星载探测器观测到的红色精灵及光晕事件总数量、发生于青藏高原的红色精灵及光晕事件数量，以及这些事件能够与WWLLN所匹配的数量，其中包含了多个TLEs现象的事件也被统计，表2给出了每个事件的具体信息。

图1给出了红色精灵在中国区域的分布情况。由于闪电活动分布的纬度相关性以及ISUAL观测条件的限制（ISUAL探测器的观测受光学影响较大，只能在夜间进行观测；福卫二号卫星为极轨卫星，观测方式为临边观测，观测纬度范围约为50°S～50°N，且低纬地区ISUAL累计的观测时间要显著高于中高纬地区（Chen et al., 2008）），因此ISUAL观测到的位于我国的红色精灵主要分布于秦岭淮河线以南，在辽宁地区也有零星分布。青藏高原地区也是我国红色精灵分布的一个大值区，从2004年到2015年期间共观测到红色精灵事件24次（有3次伴随有光晕现象），其中能与WWLLN资料所匹配的事件有17次（约71%）（如表2所示）。

表2 2004～2015年ISUAL和WWLLN记录的在青藏高原南麓地区24次红色精灵事件的时间及定位信息

Table 2 Time and location information of 24 sprite events recorded by ISUAL and WWLLN (World Wide Lightning Location Network) over the southern Qinghai-Tibet Plateau during 2004–2015

	ISUAL			WWLLN			
日期	时间（UTC）	纬度	经度	时间（UTC）	纬度	经度	定位偏移/km
2006年4月8日	16:46:42.379	23.86°N	94.01°E	/	/	/	
2006年5月31日	16:48:25.907	24.20°N	91.89°E	/	/	/	
2007年4月6日	16:52:28.714	23.52°N	91.80°E	/	/	/	
2007年4月8日	16:52:58.841	24.76°N	92.73°E	/	/	/	
2007年4月24日	16:54:38.033	23.85°N	92.72°E	16:54:37.994090	24.3711°N	92.4320°E	64.8887
2008年5月18日	16:54:31.585	23.54°N	92.28°E	16:54:31.765067	23.1460°N	91.9538°E	55.0228
2008年9月20日	**16:49:15.055**	**24.68°N**	**92.27°E**	**16:49:15.021263**	**24.9828°N**	**92.8638°E**	**68.7236**
2009年4月17日	16:35:55.248	26.55°N	90.81°E	16:35:55.211157	26.7018°N	90.9829°E	24.0856
2009年6月6日	16:31:52.897	25.44°N	93.41°E	16:31:52.856565	25.7535°N	93.5905°E	39.2727
2010年3月31日	16:36:54.776	24.81°N	94.26°E	16:36:54.740887	25.0804°N	94.2714°E	30.0843
2010年3月31日	16:38:24.342	24.85°N	94.79°E	16:38:24.266981	25.1087°N	94.3432°E	53.4294
2010年4月10日	16:37:50.969	24.89°N	92.70°E	/	/	/	
2010年4月17日	16:39:02.722	25.71°N	92.68°E	16:39:02.684968	25.9668°N	92.5735°E	30.4744
2011年3月26日	16:50:47.647	27.20°N	90.08°E	/	/	/	
2011年4月10日	16:49:12.557	27.93°N	93.27°E	/	/	/	
2011年5月1日	16:49:00.239	26.62°N	90.48°E	16:49:02.358183	26.6745°N	90.0364°E	44.4944
2013年3月21日	16:41:13.743	27.01°N	92.79°E	16:41:13.743796	27.2775°N	92.8838°E	31.1542
2013年8月18日	16:41:57.152	25.22°N	90.45°E	16:41:57.123593	25.4789°N	90.0040°E	53.2589
2013年8月22日	**16:42:01.384**	**25.09°N**	**92.56°E**	**16:42:01.355292**	**25.4567°N**	**92.8001°E**	**47.3789**
2013年10月2日	16:44:15.178	23.33°N	92.02°E	16:44:15.158931	23.6459°N	91.7213°E	46.4878
2014年3月19日	16:48:31.242	25.40°N	93.46°E	16:48:31.208110	25.5920°N	93.7396°E	35.2549
2014年4月8日	16:50:01.674	25.06°N	92.84°E	16:50:01.612082	25.1381°N	92.3427°E	50.8153
2014年8月23日	**16:54:46.708**	**29.06°N**	**89.32°E**	**16:54:46.677815**	**24.7565°N**	**88.8450°E**	**480.7623**
2015年6月21日	16:51:27.350	26.38°N	94.98°E	16:51:27.316517	26.7367°N	95.2112°E	45.8400

注：“/”表示缺测，黑体表示光晕事件伴随红色精灵发生。

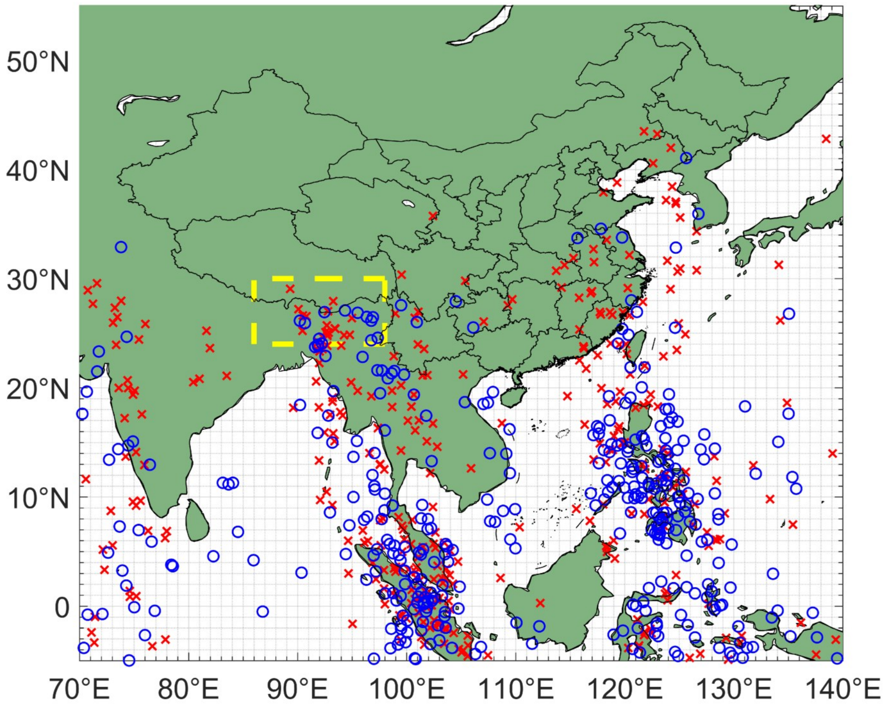

图1　2004～2015 年 ISUAL 观测的中国周边区域红色精灵（红色×）及光晕现象（蓝色○）的分布状况。黄色虚线框区表示青藏高原南麓地区

Fig. 1　Distribution of sprites (red ×) and halos (blue ○) observed by ISUAL around China during 2004–2015. The dashed yellow box represents the southern Tibetan Plateau

3　青藏高原南麓地区红色精灵母体雷暴分析

ISUAL 观测到的红色精灵位置与 WWLLN 的闪电定位偏移结果如图 2a 所示，17 例观测结果表明 ISUAL 绝大多数的定位结果与 WWLLN 吻合得很好，前者对红色精灵的母体雷暴定位与后者对其母体雷暴定位的位置偏移约为 50 km。上述有关 WWLLN 在该地区对红色精灵母体闪电探测效率和定位精度的结果与 Huang et al.（2018）对山东地区一次产生数十例红色精灵的中尺度对流系统分析结果较为一致，只有一处个例的偏移较大，达到了 480 km。另外结合图 2a、b 可以发现红色精灵分布也是相对集中的，且大部分均分布于喜马拉雅山脉以南，这与青藏高原独特的地形条件有着密切关系。高大的喜马拉雅山脉阻断了来自南边湿润的水汽输送，导致雷暴活动的分布主要位于山脉南侧，使得红色精灵的分布也表现出这样一个特点。表 2 给出的 17 例观测结果的具体时间及定位信息可以看出，具有较大定位偏移的个例发生于 2014 年 8 月 23 日。

本文关于青藏高原南麓红色精灵的母体雷暴特征主要由风云二号卫星（FY2C、FY2D、FY2E、FY2F、FY2G）VISSR 仪器的 9210 格式 1 小时平均相当黑体亮度温度（temperature of black body, 即云顶亮温资料）产品所提供。风云二号卫星的空间分辨率达到 0.1°×0.1°，观测范围为（60°S～60°N, 45°E～165°E）（Yang et al., 2015），其中 FY2C 卫星（发射于 2008 年 12 月 23 日）是风云二号卫星中最先观测到的相当黑体亮度温度数据的卫星。在此基础上选择能够与 WWLLN 数据所匹配的红色精灵的 17 例事件作为研究对象，由 WWLLN 记录红色精灵事件发生前后一小时内临近区域的闪电活动的散点，用以模拟该次红色精灵所在雷暴的大致尺度及分布，因此可以和该次事件的云顶亮温图进行比较从而较为准确地确定红色精灵母体雷暴的尺度。

3.1　青藏高原南麓地区产生红色精灵的中尺度母体雷暴特征

接下来以 2008 年 5 月 18 日 16 时 54 分（协调世界时，下同）ISUAL 观测到的一次红色精灵为例进行分析。图 3a 表示 2008 年 5 月 18 日 15 时 54 分至 17 时 54 分 WWLLN 在青藏高原南麓地区所记录到

闪电事件分布，图3b表示FY2C卫星于2008年5月18日17时观测的云顶亮温，而红色精灵发生于16时54分左右，二者观测存在6分钟时间差，因此定位结果也存在细微误差。可以发现红色精灵母体雷暴由西向东移动，其尺度较大，雷暴云范围超过100 km，中心云顶亮温低于−80°C，属于典型的中尺度对流系统。红色精灵发生位置大约位于云顶亮温的低值中心。结合二者可以发现，WWLLN数据所描述的红色精灵母体雷暴的尺度范围与云顶亮温数据给出的结果较为吻合，可以较好地反映出当时的母体雷暴的尺度特征。在17例事件中，此类红色精灵的母体雷暴所占比重较大，共有13例（约76%）。因此，在青藏高原南麓地区，中尺度对流系统可能仍然是产生红色精灵的主要天气系统，这与北美及欧洲等地的研究结果一致（Boccippio et al., 1995; Lyons, 1994）。

3.2 青藏高原南麓地区产生红色精灵的小尺度母体雷暴特征

图4a是2015年6月21日15时51分至17时51分WWLLN在青藏高原南麓地区所记录到闪电事件，图4b是由FY2G卫星于当日17时观测得到的云顶亮温数据，而红色精灵发生于16时51分左右，因此存在着一定的误差。以本事件为例，该次事件发生于印度阿萨姆与缅甸的边界地区，母体雷

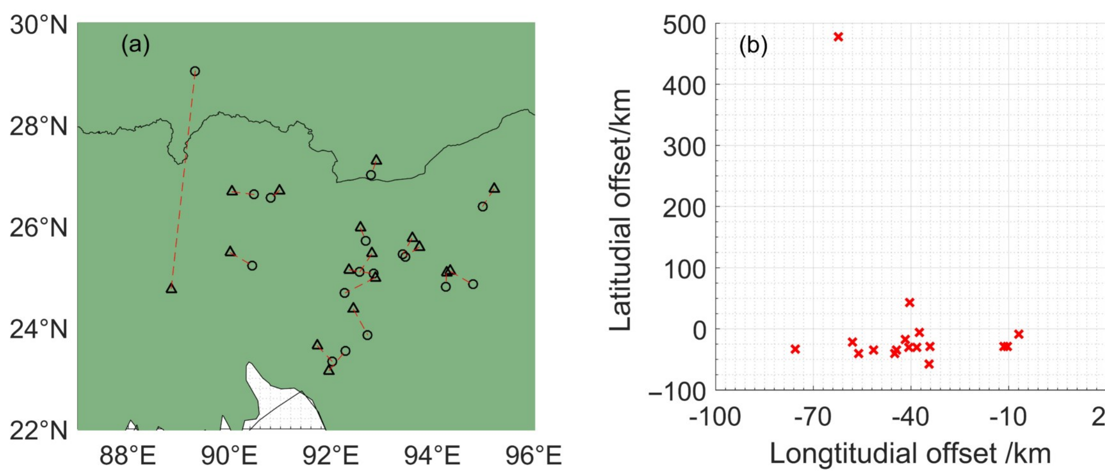

图2 2004～2015年青藏高原南麓地区红色精灵的（a）ISUAL资料（△）与WWLLN资料（○）定位的结果对比以及（b）ISUAL资料相对于WWLLN资料的经、纬向定位偏移（单位：km）

Fig. 2 (a) Comparative locations of the red sprites from ISUAL data (△) and WWLLN data (○) and (b) the longitudinal and latitudinal offset (units: km) of ISUAL data relative to WWLLN data over the southern Qinghai-Tibet Plateau during 2004−2015

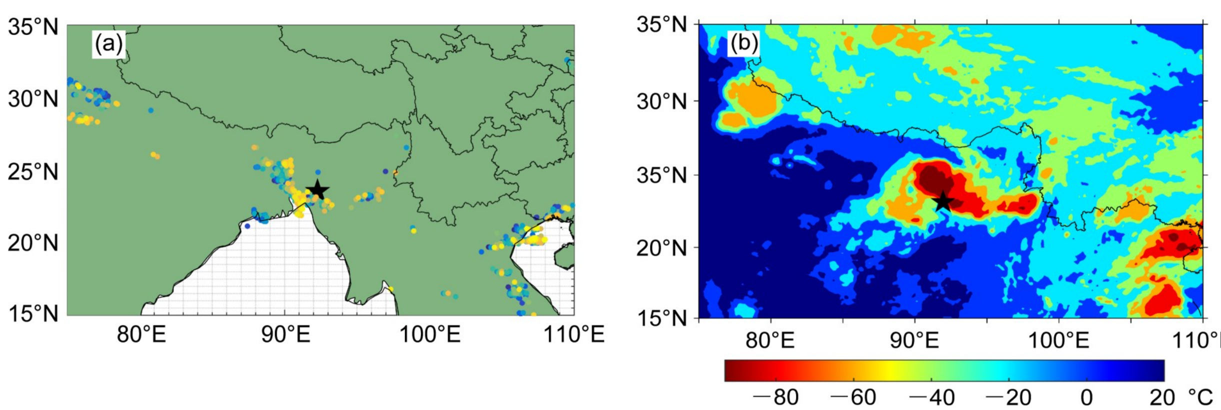

图3 （a）2008年5月18日15时54分至17时54分WWLLN所记录的在青藏高原南麓地区的闪电事件分布（散点颜色由蓝变黄表示时间由前至后）；（b）2008年5月18日17时FY2C卫星观测的红色精灵母体雷暴的云顶亮温（单位：°C）。黑色☆表示红色精灵发生位置

Fig. 3 (a) Distribution of lightning events recorded by WWLLN over the southern Tibetan Plateau from 1554 UTC to 1754 UTC 18 May 2008, colors of scatter points transition from blue to yellow with time; (b) cloud-top brightness temperature (units: °C) of parent lightning stroke of sprite observed by FY2C satellite at 1700 UTC 18 May 2008. The black ☆ represents location of the sprite

暴云由西向东移动至缅甸，其尺度也相当小，直径大约有数公里。从15时45分开始，青藏高原南麓地区上空已经有许多离散的小尺度的对流云团旺盛发展，缓慢东移，不断长大并有合并形成为一个大的雷暴云团的趋势。比较WWLLN数据所模拟的红色精灵母体雷暴与云顶亮温数据所描述的雷暴活动，可以发现二者吻合得较好，WWLLN数据较后者偏西1～1.5个经距，此时小尺度对流云团的云顶亮温为−60～−70°C，对流发展十分旺盛。即使是小尺度的对流单体，其云顶亮温在达到一定强度的情况下，也会产生红色精灵现象。在17例个例中有3例的母体雷暴与此类似，属非典型的小尺度对流系统。由此可以说明发生于青藏高原南麓地区的红色精灵的母体雷暴其类型不仅有典型的中尺度对流系统，也存在小尺度雷暴云，这与欧洲EuroSprite实验中Pinto et al.（2004）在热带地区的观测结果“较小尺度的雷暴单体也是红色精灵事件的产生源”较为接近。

3.3 青藏高原南麓地区产生大偏移红色精灵的母体雷暴特征

图5a是2014年8月23日15时54分至17时54分WWLLN在青藏高原南麓地区所记录到闪电事

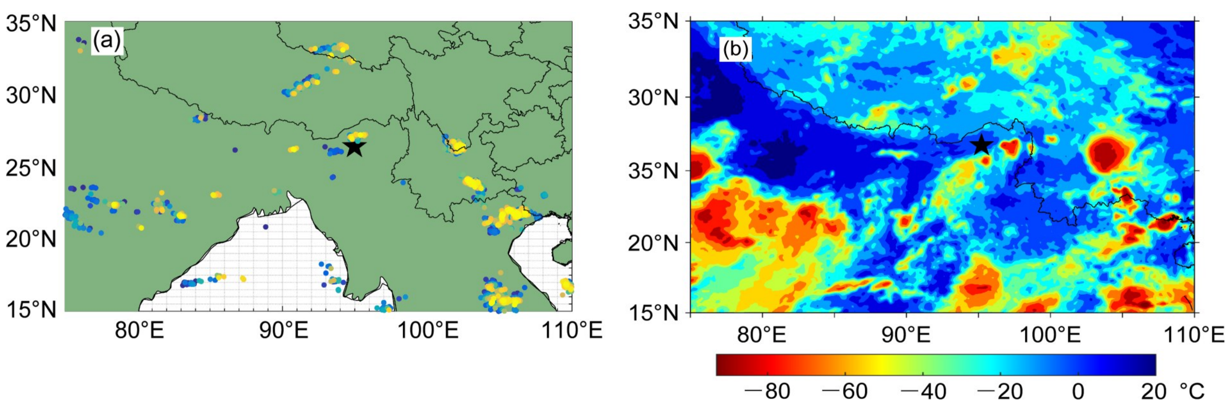

图4 （a）2015年6月21日15时51分至17时51分WWLLN所记录的在青藏高原南麓地区的闪电事件分布（散点颜色由蓝变黄表示时间由前至后）；（b）2015年6月21日17时FY2G卫星观测的红色精灵母体雷暴的云顶亮温（单位：°C）。黑色☆表示红色精灵发生位置

Fig. 4 (a) Distribution of lightning events recorded by WWLLN over the southern Tibetan Plateau from 1551 UTC to 1751 UTC 21 June 2015, colors of scatter points transition from blue to yellow with time; (b) cloud-top brightness temperature (units: °C) of parent lightning stroke of sprite observed by FY2G satellite on 1700 UTC 21 June 2015. The black ☆ represents location of the sprite

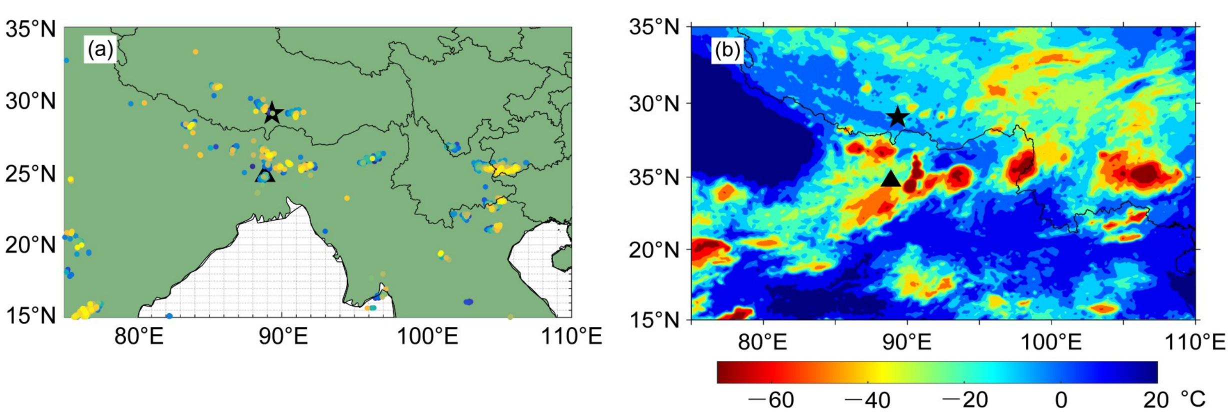

图5 （a）2014年8月23日15时24分至17时24分WWLLN所记录的在青藏高原南麓地区的闪电事件分布（散点颜色由蓝变黄表示时间由前至后）；（b）2014年8月23日16时30分FY2D卫星观测的红色精灵母体雷暴的云顶亮温（单位：°C）。黑色☆表示ISUAL定位的红色精灵位置，黑色△符号表示WWLLN定位的红色精灵位置

Fig. 5 (a) Distribution of lightning events recorded by WWLLN over the southern Tibetan Plateau from 1524 UTC to 1724 UTC 23 August 2014, colors of scatter points transition from blue to yellow with time; (b) cloud-top brightness temperature (units: °C) of parent lightning stroke of sprite observed by FY2D satellite on 1630 UTC 23 August 2014. The black ☆ and black △ represent sprite location observed by ISUAL and WWLLN, respectively

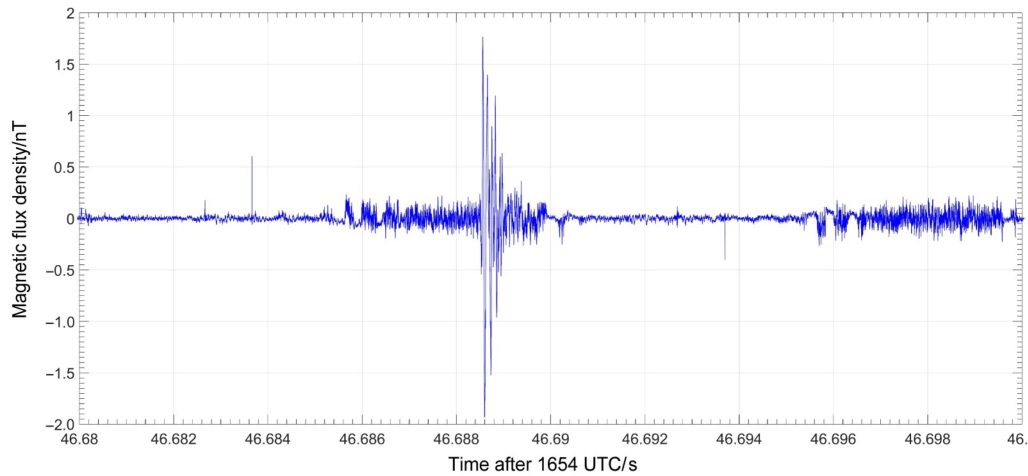

图6 2014年8月23日ISUAL观测的一例红色精灵的低频磁场信号

Fig. 6 Low-frequency magnetic field signal of the causative stroke of the sprite observed by ISUAL on 23 August 2014

件，图5b是由FY2D卫星于当日16时30分观测得到的云顶亮温图数据，而红色精灵发生于16时54分左右，因此存在着一定的时间偏差。由图5可以发现WWLLN定位的红色精灵位于雷暴云发展较旺盛的地区，也就是云顶亮温颜色较红的地区，而ISUAL给出的结果则位于前者的北偏东方向，偏移距离达到了480 km，此次个例为17例红色精灵事件中偏移最大的一例。北美地区ISUAL给出的一部分定位结果也与美国国家闪电定位网（Nation Lightning Detection Network，NLDN）存在着较大的偏移（Lu et al., 2017），其研究结果认为此类较大的定位偏移是由ISUAL探测器把地平线后面不可见的雷暴云当作一个可见的例子来处理造成的，能够比较好地解释东西方向上较大的定位偏移，但是并不能够解释本次个例中的南北方向上的大范围偏移现象，因此产生偏移的具体原因需日后更加深入的研究。

对于该次ISUAL定位的事件，在2800 km距离外的江苏盐城低频磁场站点记录到了该事件母体闪电的低频磁场信号（如图6所示）。该磁场脉冲对应的地闪回击为正极性。根据张廷龙等（2010）的研究，高原发生的雷暴可以分为两类：第一类雷暴在其当顶阶段地面电场呈正极性，且在雷暴整个电场演变过程中主要以正电场为主，称为特殊型雷暴，具有典型的高原雷暴电学特征；第二类雷暴过程在当顶阶段地面电场呈负极性，即地面电场受雷暴云内负电荷控制，从地面电场演变来看，第二类雷暴与低海拔地区具有常规性电结构的夏季雷暴特征基本一致。根据Li et al.（2012）的研究，在目前大陆地区开展的地基观测中，正极性红色精灵的发现数量要远高于负极性红色精灵，其主要原因之一是负极性红色精灵的产生需要更大的脉冲电荷距（iCMCs），负地闪在全部地闪事件中所占比例远大于正地闪，但高脉冲电荷距的地闪中负地闪的比例却小于正地闪（Cummer et al., 2005）。此外，红色精灵的产生需要有比较充分的流光过程发展，这需要母体闪电的电荷传输持续时间较长（>2 ms），而负极性地闪放电的持续时间一般较短（<1280 ms），因此不利于流光的形成（Qin et al., 2013），正极性的红色精灵更易产生。随着海拔高度的提升，特殊类型雷暴所占比例也随之增加。因此，该次红色精灵事件的母体雷暴也很有可能为特殊型雷暴。由于资料的缺乏，目前还无法验证位于青藏高原南麓地区的红色精灵事件其母体雷暴是否大多数均为特殊型，需要日后地面观测资料的补充。

4 青藏高原南麓光晕现象母体雷暴分析

作为对高原红色精灵现象的补充及比较，这一部分讨论光晕现象在青藏高原南麓地区分布的基本情况。表3列出观测到的17例纯光晕事件的具体信息。图7给出了5例纯光晕事件的个例，其中有3例偏移结果吻合的较好，其偏移在50 km左右，有一例偏移较大，达到140 km以上。

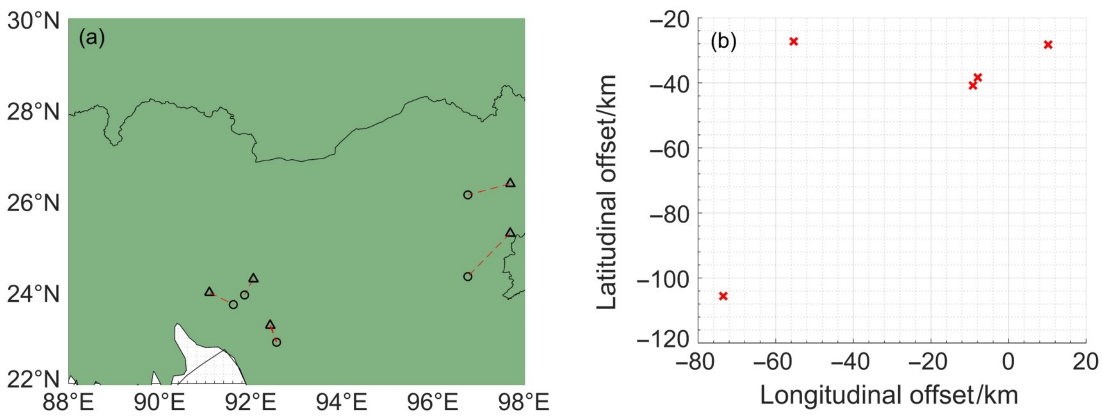

图7 2004～2015年青藏高原南麓地区光晕现象的（a）ISUAL资料（△）与WWLLN资料（○）定位的结果对比以及（b）ISUAL资料相对于WWLLN资料的经、纬向定位偏移（单位：km）

Fig. 7 (a) Comparative locations of the halos from ISUAL data (△) and WWLLN data (○) and (b) the longitudinal and latitudinal offset (units: km) of ISUAL data relative to WWLLN data over the southern Qinghai-Tibet Plateau during 2004–2015

表3 ISUAL和WWLLN于青藏高原南麓记录的17次纯光晕事件的时间及定位信息

Table 3 Time and location information of 17 pure halo events over the Southern Tibetan Plateau recorded by ISUAL and WWLLN

日期	ISUAL			WWLLN			定位偏移/km
	时间(UTC)	纬度	经度	时间(UTC)	纬度	经度	
2004年8月16日	16:28:49.628	26.87°N	95.51°E	/	/	/	/
2004年8月21月	16:28:28.389	24.06°N	92.23°E	/	/	/	/
2004年8月25月	16:28:59.947	24.58°N	97.35°E	/	/	/	/
2005年3月3月	16:35:59.092	26.14°N	96.76°E	16:35:59.057419	26.3860°N	97.6954 °E	97.1875
2006年8月7月	16:48:02.466	26.46°N	96.91°E	/	/	/	/
2008年8月1月	16:50:42.492	23.81°N	91.88°E	/	/	/	/
2008年8月11月	16:50:03.432	26.14°N	90.21°E	/	/	/	/
2008年8月20月	16:50:27.755	26.93°N	92.46°E	/	/	/	/
2009年8月7月	16:30:33.920	27.08°N	94.35°E	/	/	/	/
2009年9月16月	16:32:30.669	26.49°N	96.35°E	/	/	/	/
2010年6月18月	16:39:42.811	24.35°N	96.76°E	16:39:42.769833	25.3015°N	97.6932°E	141.6222
2010年9月9月	16:43:46.732	24.48°N	91.98°E	/	/	/	/
2010年9月27月	16:46:26.578	23.74°N	91.61°E	16:46:26.543096	23.9952°N	91.0906°E	59.9467
2011年8月1月	16:48:13.267	22.82°N	95.96°E	/	/	/	/
2011年8月6月	16:48:23.628	25.92°N	90.67°E	/	/	/	/
2011年8月28月	16:47:46.048	22.91°N	92.56°E	16:47:46.011447	23.2767°N	92.4251°E	43.0398
2012年5月27月	16:44:39.260	23.95°N	91.86°E	16:44:39.220255	24.2951°N	92.0468°E	42.7939

注："/" 表示缺测。

图8为发生于2013年8月22日16时42分的一次光晕事件，选取光晕现象发生前后一小时以内的WWLLN在青藏高原南麓地区所记录到闪电事件，画出散点图用以模拟该次光晕现象母体雷暴的尺度特征，并佐以当日16时30分的云顶亮温为对照，由云顶亮温图可以看出在16时30分光晕现象的发生位置只有几个尺度约为几公里的对流单体正融合为中尺度对流系统。在5次相互匹配的个例当中光晕产生的过程与之类似，但是由于风云卫星的观测时间是固定的，且与光晕现象发生时间存在十分钟

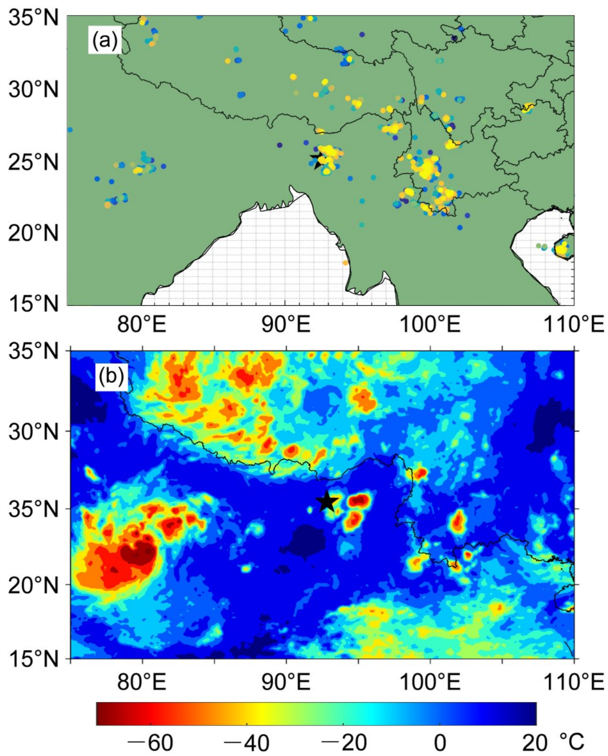

图8　（a）2013年8月22日15时42分至17时42分WWLLN在青藏高原南麓地区所记录到闪电事件分布（散点颜色由蓝变黄表示时间由前至后）；（b）2013年8月22日16时30分FY2E卫星观测的红色精灵母体雷暴的云顶亮温（单位：°C）。黑色☆表示红色精灵发生位置

Fig. 8　(a) Distribution of lightning events recorded by WWLLN over the southern Tibetan Plateau from 1542 UTC to 1742 UTC 22 August 2013, colors of scatter points transition from blue to yellow with time; (b) cloud-top brightness temperature (units: ℃) of parent lightning stroke of sprite observed by FY2E satellite on 1630 UTC 22 August 2013. The black ☆ represents location of the sprite

以上的误差，因此暂时无法判断光晕现象是发生于对流单体阶段还是已经形成中尺度对流系统阶段，需要日后更精确的卫星资料补充佐证。

5　总结

为了了解高海拔地区红色精灵母体雷暴的特征，本文聚焦于青藏高原南麓地区，利用台湾福卫二号ISUAL星载探测器及其他资料分析青藏高原南麓地区的红色精灵现象。从2004年至2015年ISUAL星载探测器的服役期间，ISUAL星载探测器共观察到中高层放电事件数量39655次，其中包含的红色精灵事件2543次，发生于青藏高原的红色精灵事件24次，能够与WWLLN所匹配的事件17次，本文针对性研究了17次能够与WWLLN所匹配的事件，发现青藏高原南麓的红色精灵其母体雷暴不仅有典型的中尺度对流系统，也存在着非典型的小尺度对流系统。以2015年6月21日发生的红色精灵事件为例，本文将该次事件前后一小时内青藏高原南麓地区WWLLN所记录到的闪电事件散点用于模拟该次红色精灵母体雷暴的大致尺度，与风云二号卫星所提供的云顶亮温图对比发现吻合的较好。另外，在17例个例当中，发现2014年8月23日的事件的ISUAL和WWLLN所定位的结果偏差较大，达到了480 km，这与其他大部分事件偏移小于50 km的结果并不吻合，其具体原因还需要日后相关的工作来进一步研究；同时分析了青藏高原的光晕现象，发现有3例纯光晕现象（共5例）偏移较小，约为50 km，有一例偏移较大，达到140 km。

由于本文缺少地面磁天线观测数据，因此无法清楚地知道红色精灵的极性如何，目前台湾福卫二号卫星现在已经终止服役，因此无法依靠其继续开展针对青藏高原南麓的观测工作。根据表2给出的信息可以发现红色精灵多发于3～8月的春、夏时节，未来有必要加强在青藏高原地区红色精灵的夏季地面观测，进而替代卫星观测，获得更多的观测资料，对青藏高原南麓地区红色精灵活动特征开展进一步的研究。目前我们已经在西藏羊八井地区架设地面低光度观测设备，将为青藏高原地区及其他高海拔地区红色精灵及其母体雷暴特性提供观测数据，并为探讨全球不同地区红色精灵产生条件和其发生机制奠定基础。

红色精灵这种典型的中高层放电现象在所有类型的瞬态发光事件中占比十分稳定，在福卫二号工作期间其发生数量占瞬态发光事件总量的百分比并没有显著的变化，有趣的是，从2004年至2015年期间，光晕现象的占比从9%下降到4%左右（Chern et al., 2015），而光晕现象被大部分学者认为是红色精灵产生过程当中的中间产物，其泾渭分明变化趋势的具体原因也是今后值得探讨的一个问题。

致谢　感谢成都信息工程大学、中国科学院大气物理研究所提供的大力支持。本文中分析所采用的ISUAL卫星资料由台湾省成功大学空间和等离子体科学学院陈炳志教授提供。

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

Boeck W L, Vaughan O H Jr, Blakeslee R, et al. 1992. Lightning induced brightening in the air glow layer [J]. Geophys. Res. Lett., 19: 99−102.

Chen A B. 2004. ISUAL calibration and optimal ground coverage for detecting transient luminous events [C], IN Eos Trans. AGU, Fall Meet. Suppl., Abstract AE31B-0164.

Chen A B, Kuo C L, Lee Y J. 2008. Global distributions and occurrence rates of transient luminous events [J]. Journal of Geophysical Research, 113, A08306. doi:10.1029/2008JA013101

Chern R J, Lin S, Wu A. 2015. Ten-year transient luminous events and Earth observations of FORMASAT-2 [J]. Acta Astronautica, 112: 37−47.

Chou C C, Dai J, Kuo C L, et al. 2016. Simultaneous observations of storm-generated sprite and gravity wave over Bangladesh [J]. Journal of Geophysical Research Space Physics, 121(9): 9222−9233. doi:10.1002/2016JA022554

Cummer S A, Lyons W A. 2005. Implication of lightning charge moment changes for sprite initiation [J]. Journal of Geophysical Research Space Physics, 110, A04304. doi:10.1029/2004JA010812

Cummer S A, Jaugey N, Li J, et al. 2006. Submillisecond imaging of sprite development and structure [J]. Geophys. Res. Lett., 33, L04104. doi:10.1029/2005GL024969

Franz R C, Nemzek R J, Winckler J R. 1990. Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system [J]. Science, 249(4964): 48−51. doi:10.1126/science.249.4964.48

Fukunishi H, Takahashi Y, Kubota M. 1996. Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere [J]. Geophys. Res. Lett., 23: 2157−2160. doi:10.1029/96GL01979

Huang A J, Lu G P, Zhang H B, et al. 2018. Locating parent lightning strokes of sprites observed over a mesoscale convective system in Shandong Province, China [J]. Advances in Atmospheric Science, 35 (11): 1396−1414. doi:10.1007/s00376-018-7306-4

Hutchins M L, Holzworth R H, Rodger C J, et al. 2012. Far-field power of lightning strokes as measured by the World Wide Lightning Location Network [J]. J. Atmos. Oceanic. Technol. 29: 1102−1109.

Li J B, Cummer S, Lu G P, et al. 2012. Charge moment change and lightning-driven electric fields associated with negative sprites and halos [J]. J. Geophys. Res., 117, A09310. doi:10.1029/2012JA017731

Lu G P, Cummer S A, Chen A B, et al. 2017. Analysis of lightning strokes associated with sprites observed by ISUAL in the vicinity of North America [J]. Terr. Atmos. Ocean. Sci, 28(4): 583−595. doi:10.3319/TAO.2017.03.31.01

Lu G P, Yu B, Cummer S A, et al. 2018. On the causative strokes of halos observed by ISUAL in the vicinity of North America [J]. Geophysical Research Letters, 45: 10781−10789. doi: 10.1029/2018GL079594

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.

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]. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 69 (12): 1431−1446. doi:10.1016/j.jastp. 2007.05.002

Neubert T, Allin T H, Stenbaek H, et al. 2001. Sprites over Europe [J]. Geophys. Res. Lett., 28: 3585−3588. doi:10.1029/2001GL013427

Pasko V P. 2003. Electric jets [J]. Nature. 423(6943): 927−929. doi:10.1038/423927a

Pasko V P, Stanley M A, Mathews J D. 2002. Electrical discharge from a thunder cloud top to the lower ionosphere [J]. Nature, 416: 152−154.

Pinto O Jr, Saba M M F, Pinto I R C A, et al. 2004. Thunderstorm and lightning characteristics associated with sprites in Brazil [J]. Geophysical Research Letters, 31(13), L13103. doi: 10.1029/2004GL020264

齐鹏程, 郑栋, 张义军. 2016 青藏高原闪电和降水气候特征及时空对应关系 [J]. 应用气象学报. 27(4):489−496.　Qi P C, Zheng D, Zhang Y J. 2016. Climatological characteristics and spatio-temporal correspondence of lightning and precipitation over the Tibetan Plateau [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 27(4): 488−497. doi:10.11898/1001-7313.20160412

Qie X S, Zhang T L, Zhang G S, et al. 2009. Electrical characteristics of thunderstorms in different plateau regions of China [J]. Atmospheric Research, 91(2−4): 244−249. doi: 10.1016/j. atmosres. 2008.04.014

Qin J, Celestin S, and Pasko V P. 2013. Dependence of positive and negative sprite morphology on lightning characteristics and upper atmospheric ambient conditions [J]. J. Geophys. Res. Space Physics, 118: 2623−2638. doi:10.1029/2012JA017908

Sato M, Ushio T, Morimoto T, et al. 2015. Overview and early results of the global lightning and sprite measurements mission [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 120: 3822−3851. doi:10.1002/2014JD022428

Sentman D D, Wescott E M, Osborne D L, et al. 1995. Preliminary results from sprites 94 aircraft campaign: 1. Red sprites [J]. Geophysical Research Letters, 22: 1205−1208. doi: 10.1029/95GL00583

史东东, 杨仲江, 杨虎. 2017. 近20年青藏高原闪电活动特征及其与对流不稳定能量的相关性分析 [J]. 电瓷避雷器, 140(4): 50−55. Shi D D, Yang Z J, Yang H. 2017. Characteristics of lightning activity in Tibetan Plateau over last 20 years and its correlation with convective available potential energy [J]. Insulators and Surge Arresters (in Chinese), 140(4): 50−55. doi:10.16188/j.isa.1003-8337.2017.04.009

Smith D M, Lopez L I, Lin R P, et al. 2005. Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV [J]. Science, 307: 1085−1087.

Soula S, Velde O, Montanyà 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

Su H T, Hsu R R, Chen A B, et al. 2002. Observation of sprites over the Asian continent and over oceans around Taiwan [J]. Geophysical Research Letters, 29(4), 1044. doi:10.1029/2001GL013737

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): 840−848. Yang J, Wang Z C, Lu G P, 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): 840−848. doi:10.3878/j.issn. 1006-9895.1414.14232.

Wescott E M, Sentman D D, Heavner M J, et al. 1998. Observations of columniform sprites [J]. Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics, 60: 733−740.

Westcott E M, Sentman D D, Osborne D, et al. 1995. Preliminary results from the sprites 94 aircraft campaign: II. Blue jets [J]. Geophys Res Lett, 22: 1209−1212.

Williams E, Downes E, Boldi R, et al. 2007. Polarity asymmetry of sprite-producing lightning: A paradox [J]. Radio Science, 42, RS2S17. doi:10.1029/2006RS003488

吴明亮, 徐寄遥. 2005. 时变的准三维“红闪”电场模式研究 [J]. 地球物理学报. 48(3): 480−486. Wu M L, Xu J Y. 2005. A time-dependent quasi-three-dimensional QEF model of red sprites [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 48(3): 480−486. doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2005.03.003

杨静, 郄秀书, 张广庶. 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 J, Qie X S, Zhang G S. 2008. Red sprites over thunderstorms in the coast of Shandong Province [J]. Chinese Science Bulletin, 53(4): 482−488.

Yang Y, Fei J F, Huang X G. 2015. Characteristics of mesoscale convective systems over China and its vicinity using geostationary satellite FY2 [J]. Journal of Climate, 28(12): 4890−4907. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00491.1

张廷龙, 言穆弘, 张彤, 等. 2010. 利用地面电场对中川地区一次雷暴过程电荷结构的研究 [J]. 高原气象, 29(6): 1524−1532. Zhang Tinglong, Yan Muhong, Zhang Tong, et al. 2010. Study of charge structure in a thunderstorm case of Zhongchuan area by the observation of surface electrical field [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29(6): 1524−1532.

祝宝友, 陶善昌, 谭涌波. 2006. 雷暴云顶之上的大气放电研究进展 [J]. 高原气象, 25(3): 549−555. Zhu B Y, Tao S C, Tan Y B. 2006. Review of high altitude air discharges above thunderstorms [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25(3): 549−555. doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2006.03.025