

钟丽华, 杨静, 陆高鹏, 等. 2020. 北美地区一次冬季中尺度对流系统上空红色精灵现象的空间观测及其母体雷暴分析 [J]. 大气科学, 44(5): 997–1012. ZHONG Lihua, YANG Jing, LU Gaopeng, et al. 2020. Spatial Observation of Red Sprites over a Winter Mesoscale Convective System in North America and the Analysis of Its Parent Thunderstorm [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(5): 997–1012. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.19169

北美地区一次冬季中尺度对流系统上空红色精灵现象的空间观测及其母体雷暴分析

钟丽华^{1,2} 杨静^{2,3} 陆高鹏^{2,3} 王庸平⁴ 何其佳^{1,2} 郅秀书^{2,3}

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与全球环境探测重点实验室, 北京 100029

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 中国科学技术大学, 合肥 230026

摘要 红色精灵是发生在雷暴云上空的一种大尺度瞬态放电发光现象, 它们通常出现在地面上空 40~90 km 之间, 是由地闪回击和随后可能存在的连续电流产生的。目前, 由于综合同步观测资料较少, 与夏季红色精灵相比, 全世界对冬季红色精灵的研究屈指可数。2008 年 12 月 27~28 日, 受高空槽及低层暖湿气流的影响, 北美阿肯色州地区爆发了一次冬季雷暴天气过程, 搭载于 FORMOSAT-2 卫星上的 ISUAL (Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightning) 探测器有幸在这次雷暴上空记录到了两例红色精灵事件。本文利用 ISUAL 获取的红色精灵观测资料、多普勒天气雷达资料、美国国家闪电定位资料、超低频磁场数据、美国国家环境中心/气候预测中心提供的云顶亮温和探空数据等综合观测数据, 对产生红色精灵的这次冬季雷暴特征和相关闪电活动规律进行了详细研究。结果表明, 在两例红色精灵中, ISUAL 均未观测到伴随的“光晕 (halo)”现象, 第一例为“圆柱状”红色精灵, 第二例红色精灵由于发光较暗, 无法判断其具体形态。产生红色精灵的母体雷暴是一次中尺度对流系统, 该系统于 27 日 15:00 (协调世界时, 下同) 左右出现在阿肯色州北部附近, 并自西向东移动。23:59 系统发展到最强, 最大雷达反射率因子 (55~60 dBZ) 的面积达到 339 km², 之后开始减弱。03:03 雷暴强度有所增加, 随后云体便逐渐扩散, 雷暴开始减弱, 并在 11:00 完全消散。两例红色精灵发生分别在 04:46:05 和 04:47:14, 此时雷暴处于消散阶段, 正负地闪频数均处于一个较低水平且正地闪比例显著增加, 并且多位于云顶亮温 -40°C~-50°C 的层状云区上空。红色精灵的出现伴随着 30~35 dBZ 回波面积的增加。在红色精灵发生期间, 雷达反射率大于 40 dBZ 的面积减少, 10~40 dBZ 的面积增加, 表明红色精灵的产生与雷暴对流的减弱和层状云区的发展有关, 这与已有的夏季红色精灵的研究结果类似。红色精灵的母体闪电为正地闪单回击, 位于中尺度对流系统雷达反射率为 25~35 dBZ 的层状云降水区, 对应的雷达回波顶高分别为 2.5 km 和 5 km, 峰值电流分别为 +183 kA 和 +45 kA。根据超低频磁场数据估算两个母体闪电的脉冲电荷矩变化 (iCMC) 分别为 +394 C km 和 +117 C km。超低频磁天线记录到了第一例红色精灵内部的电流信号, 表明这例红色精灵放电很强。

关键词 红色精灵 冬季中尺度对流系统 正地闪

文章编号 1006-9895(2020)05-0997-16

中图分类号 P401

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.19169

Spatial Observation of Red Sprites over a Winter Mesoscale Convective System in North America and the Analysis of Its Parent Thunderstorm

收稿日期 2019-11-03; 网络预出版日期 2020-07-08

作者简介 钟丽华, 女, 1995 年出生, 硕士研究生, 主要从事中高层大气放电现象的研究。E-mail: zhonglihua29@163.com

通讯作者 杨静, E-mail: yangj@mail.iap.ac.cn

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 XDA17010101, 国家自然科学基金项目 41574141

Funded by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant XDA17010101), National Natural Science Foundation of China (Grant 41574141)

ZHONG Lihua^{1,2}, YANG Jing^{2,3}, LU Gaopeng^{2,3}, WANG Yongping⁴,
HE Qijia^{1,2}, and QIE Xiushu^{2,3}

1 *Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225*

2 *Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

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

4 *University of Science and Technology of China, Hefei 230026*

Abstract Red sprites are large-scale transient luminous events (TLEs) that usually occur between about 40 and 90 km altitudes above thunderstorms, and they are caused by cloud-to-ground (CG) lightning strokes and subsequent continuous current. Compared with studies that focus on sprites that occur in summer, those focusing on winter sprites are fewer due to limited comprehensive synchronous observation data. Influenced by the upper trough and warm, moist airflow at low level, a thunderstorm occurred in Arkansas, North America, on December 27–28, 2008. The Imager for Sprites and Upper Atmospheric Lightning (ISUAL) aboard the FORMOSAT-2 satellite could record two red sprite events. Using the red sprites optical observation data obtained by ISUAL, Doppler weather radar data, National Lightning Location data, ultra-low frequency magnetic field data, and cloud-top brightness temperature data provided by the National Environmental Center/Climate Prediction Center of the United States and the sounding data, this paper presents a detailed study of the characteristics of the winter thunderstorm that produced the red sprites and the related lightning activity. The results show that ISUAL did not record the halo that accompanied the two red sprites. The first was a columnar sprite, and the specific morphology of the second could not be determined because of its dim light. The parent thunderstorm of the red sprites was a mesoscale convective system (MCS), which appeared around 1500 UTC on the 27th near northern Arkansas and moved from west to east. The thunderstorm became stronger at about 2359 UTC, and the area of maximum radar reflectivity (55–60 dBZ) reached 339 km² and then began to weaken. At 0303 UTC, the thunderstorm intensity increased, then the cloud gradually spread, and the thunderstorm began to weaken and completely dissipated at 1100 UTC. The first recorded sprite occurred at 0446:05 UTC, and the second at 0447:17 UTC. They tended to be produced in the dissipation stage of the MCS, when the frequency of the positive and negative CG lightning was low and the Percentage Of Positive CG to total CG (POP) increased significantly, and they were mostly over the stratiform cloud area with a brightness temperature of –40°C–50°C. The sprite production was accompanied by an increase in the echo area of 30–35 dBZ. The area of radar reflectivity larger than 40 dBZ decreased, and the area of 10–40 dBZ increased during the sprite time window, suggesting that the sprite production was the decay of the thunderstorm and that the area of the stratiform region developed, which is consistent with the results of previous studies on summer sprites. The parent CG flash of red sprites was positive and with a single return stroke, and it was located in the trailing stratiform region of the MCS, where the radar reflectivity ranged from 25 to 35 dBZ. The corresponding radar echo top heights were 2.5 km and 5 km, and the peak currents were +183 kA and +45 kA, respectively. Based on the ultra-low frequency magnetic field data, the impulse charge moment changes (iCMCs) of two parent lightning discharges were estimated to be +394 C km and +117 C km. The ultra-low frequency magnetic antenna recorded the internal current signal of the first red sprite, indicating that the red sprite was strongly discharged.

Keywords Red sprite, Winter mesoscale convection system, Positive cloud-to-ground lightning

1 引言

在雷暴云顶和低电离层之间存在一类大气放电现象, 由于它们的发光持续时间较短, 所以又被称为瞬态发光事件 (Transient Luminous Events, 简称 TLEs)。到目前为止, 已经被证实的 TLEs 包

括红色精灵 (Red sprites; Sentman et al., 1995; Winckler et al., 1996; Suzuki et al., 2011; Lang et al., 2016; Peng et al., 2017)、淘气精灵 (Emissions of Light and VLF perturbation due to EMP Sources, 简称 Elves; Barrington - Leigh and Inan, 1999; Kuo et al., 2007)、巨大喷流 (Gigantic jets, 简称 GJ;

Singh et al., 2017; Kuo et al., 2009; Cummer et al., 2009; Lu et al., 2011; Yang et al., 2018)、蓝色喷流 (Blue jets, 简称 BJ; Wescott et al., 1995, 2001; Pasko et al., 2003; Chou et al., 2011)、蓝色启辉器 (Blue starters; Wescott et al., 1996, 2001) 和光晕 (Halos; Moudry et al., 2003; Ren et al., 2019)。有学者又将红色精灵和光晕统称为 “sprite-halo” 事件 (Barrington-Leigh et al., 2001; Zhang et al., 2019)。“sprite-halo” 事件是由 Barrington-Leigh et al. (2001) 首次提出, 是闪电将电荷转移到地面的瞬间, 空间诱导电荷产生的强电场加速自由电子, 被加速的自由电子与空气分子发生碰撞电离, 被电离的空气分子由激发态回到基态时产生的光辐射。红色精灵, 又称为红闪, 是 TLEs 地基观测中最容易被观测到且研究较充分的一种放电现象。这种现象主要与正极性的云地闪有关 (Lyons et al., 1994; Boccippio et al., 1995)。到目前为止, 已报道的红色精灵大多数是由夏季雷暴产生的 (Sentman et al., 1995; Wescott et al., 1998; São Sabbas et al., 2003; Soula et al., 2009; Lu et al., 2013, 2016; Yang et al., 2013; Wang et al., 2019)。

与夏季红色精灵相比, 对冬季红色精灵的研究相对较少。据了解, 早期对冬季红色精灵的研究主要是在日本开展。Fukunishi et al. (1999) 在 1998 年首次记录到了发生在日本 Hokuriku 地区冬季雷暴上方的红色精灵。进一步研究表明大多数冬季红色精灵由正地闪诱发 (Hobara et al., 2001; Adachi et al., 2005), 与之前夏季红色精灵的研究结果一致 (Lyons, 1994; Sentman et al., 1995)。Hayakawa et al. (2004) 基于雷达资料指出产生红色精灵冬季雷暴的水平尺度约为 30 km, 产生红色精灵的冬季雷暴远小于 Mohr and Zipser (1996) 定义的中尺度对流系统 (mesoscale convective system, 简称 MCS), 因此他们认为冬季其他雷暴类型 (非 MCSs) 也能产生红色精灵。Adachi et al. (2005) 利用地球同步气象卫星 (GMS-5) 研究了日本地区四种产生红色精灵冬季雷暴的大小, 得到冬季雷暴的平均云顶温度为 $-25^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$, -20°C 的平均水平 8500~40500 km^2 , 表明日本冬季红色精灵母体雷暴要比美国中西部地区夏季的 MCSs 要小, 这一结论也被其他研究者证实 (Takahashi et al., 2003; Hayakawa et al., 2005; Suzuki et al., 2006a, 2006b)。Ganot et al. (2007) 发现地中海东部地区四种产生红色精灵

的冬季雷暴与日本的冬季雷暴有相似的结构。São Sabbas et al. (2010) 利用地球静止环境卫星 (GEOS) 对阿根廷地区产生红色精灵的冬季中尺度对流系统做了研究, 发现冬季中尺度对流系统的最大面积为 430000 km^2 , 云顶温度比美国中西部地区和南美洲夏季 MCSs 的云顶亮温高 $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 。

综上所述可以看出, 与产生红色精灵的夏季雷暴相比, 全世界对冬季雷暴产生红色精灵的研究较少, 而且研究仅集中在日本、阿根廷和地中海地区。此外, 由于综合同步观测资料的缺乏, 前人的研究绝大多数是对产生红色精灵冬季母体雷暴的研究, 对与其相关的闪电活动规律尤其是产生红色精灵的母体闪电特性研究较少。本文利用中国台湾省福卫二号卫星 (FORMOSAT-2) 搭载的高空大气闪电成像仪 (Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightning, 简称 ISUAL) 获取的光学观测数据, 地基多普勒天气雷达资料 (NEXRAD)、美国国家闪电定位资料 (National Lightning Detection Network, 简称 NLDN)、杜克大学获取的超低频 (Ultra low frequency, 简称 ULF) 磁场数据、美国国家环境中心/气候预测中心 (National Centers for Environmental Prediction/Climate Prediction Center, 简称 NECP/CPC) 提供的云顶亮温和美国怀俄明大学的探空资料等综合观测数据, 对 2008 年 12 月 28 日在北美地区发生的一次冬季中尺度对流系统上空捕捉到的两例红色精灵及其母体雷暴和闪电进行了详细研究, 这也是首次对北美地区冬季雷暴产生的红色精灵开展研究, 研究结果丰富了对冬季红色精灵的认识。

2 数据和方法

红色精灵的图像来自于高空大气闪电成像仪 ISUAL。ISUAL 是世界上第一个专门从卫星上观测 TLEs 的科学仪器。从卫星上对 TLEs 进行观测研究有着非常独特的优势, 可以很好的避免光在大气中的衰减, 从而更加准确的测量 TLEs 的特性。此外, 也有助于对 TLEs 进行全球观测。ISUAL 在夏季的覆盖范围是 $45^{\circ}\text{S} \sim 25^{\circ}\text{N}$, 而冬季则是 $25^{\circ}\text{S} \sim 45^{\circ}\text{N}$ (Chen et al., 2008)。ISUAL 系统主要包括一个增强型 CCD 成像仪 (用于拍摄 TLEs 的图像并记录它的动态发展过程), 一个六通道分光光度计和两个阵列光度计 (分析 TLEs 的垂直空间分布

随时间的变化情况); CCD 成像仪以每秒 100 帧的速度连续拍摄图像, 分光光度计以 10 kHz 的速率连续采样, 阵列光度计以 2 kHz 或 20 kHz 的频率连续采样, 所有的数据都被写入一系列循环存储器中 (Chern et al., 2003)。ISUAL 是中国台湾省一颗具有高分辨率的遥感卫星“福卫二号”卫星 (FORMOSAT-2) 上的有效荷载, FORMOSAT-2 沿着距地 890 km 的太阳同步轨道运行, 每天绕地球 14 圈, 即轨道周期为 103 min (Chern et al., 2008)。当进入夜间时, 卫星从南向北飞行, 此时 ISUAL 以向东的视角进行观测。ISUAL 对红色精灵的定位工作是根据其携带的成像仪获取的图像得到的, 更详细的信息可参见 Chern et al (2008)。ISUAL 的定位精度与其距事件发生的距离有关, 平均而言精度优于每单位像素 50 km。自 2004 年 5 月 21 日发射升空到 2015 年 FORMOSAT-2 终止服役, 在其 11 年的寿命中, 成功的记录到了将近 40000 例瞬态发光事件, 其中包括约 2600 例红色精灵。

在杜克大学附近的 Duke Forest (35.971°N, 79.094°W), 两个传感器记录了产生红色精灵母体闪电的磁场信号, 两个传感器的工作频段分别为超低频 (Ultra-low frequency, ULF, <1~40 Hz) 和极低频 (Very low frequency, VLF, 50 Hz~30 kHz), 采样率分别为 2.5 kHz 和 100 kHz。我们的分析主要利用 ULF 磁场信号并根据 Cummer and Inan (1997) 发展的方法估计产生红色精灵母体闪电的脉冲电荷矩变化 (impulse charge moment change, 简称 iCMC; 定义为回击发生之后前 2 ms 的总电荷矩改变量)。利用 NLDN 提供的闪电定位资料分析与红色精灵和母体雷暴相关的闪电活动。自 1989 年来, NLDN 一直在探测闪电产生的电磁辐射, 并且为整个美国大陆提供详细的闪电数据 (Cummins et al., 1998)。NLDN 可以同时探测云闪和地闪, 数据信息包括闪电放电发生的时间、位置 (经纬度)、极性和峰值电流。NLDN 对于地闪回击的探测效率为 90%~95%, 定位精度优于 0.5 km, 而对云闪的探测效率约为 25%~30% (Cummins and Murphy, 2009)。通过对比 NLDN 闪电定位数据的时间和红色精灵发生的时间可以寻找红色精灵的母体闪电 (Lyons et al., 2008)。

本文分析中使用的雷达数据为 NEXRAD 的二级产品 (Level II), NEXRAD 的最大扫描范围

是 230 公里, 每 3~5 min 提供一次数据 (<https://www.ncdc.noaa.gov/nexradinv/> [2019-05-20])。同时我们也使用了由美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, 简称 NOAA) 下的国家环境中心 (NECP) /气候预测中心 (CPC) 提供的云顶温度数据, 这些数据是在有记录期间由欧洲、日本和美国的地球同步卫星 (GOES-8/9/10/11/12/13/14/15/16, METEOSAT-5/7/8/9/10, 以及 GMS-5/M) 数据融合而来。该数据集的覆盖范围为 (60°S~60°N, 180°E~180°W), 时间分辨率是 30 min, 空间分辨率为 4 km×4 km。Level II 雷达数据和云顶温度数据用来描述雷暴的结构和演变。另外, 我们还利用 NECP 再分析资料和怀俄明大学的探空资料来分析雷暴发生的天气背景和大尺度环境条件。

3 雷暴形成的天气背景和大气环境条件

图 1 给出了 2008 年 12 月 27 日 12:00 (协调世界时, 下同) 的天气形势图, 由图可知, 500 hPa 上科罗拉多州到新墨西哥州有一槽区存在, 阿肯色州、田纳西州一带受槽前西南气流的影响, 对流发生在高空槽前, 槽后偏北气流带来强烈的干冷空气; 850 hPa 上槽前低层有明显的水汽输送带, 水汽通量大值中心受偏西气流控制, 低层暖湿气流与南下的干冷空气在阿肯色州西北偏北部交汇, 暖湿气流被迫抬升, 构成了这次雷暴天气发生的有利因素。

图 2 给出了阿肯色州小石城站 12:00 的探空曲线, 探空显示低层风呈顺时针旋转, 700 hPa 以下西南气流带来的水汽不断积聚导致温度露点差比较小, 相对湿度较大, 水汽充足, 抬升凝结高度为 953 hPa; 700 hPa 以上, 温度露点差明显增大, 水汽含量较低, 水汽形成了典型的上干下湿的垂直分布, 为这个雷暴过程的发生提供了充足的水汽条件。根据小石城探空站的探空数据可知, 对流有效位能 (CAPE) 为 362.63 J kg^{-1} , 对流抑制能量 (CIN) 为 -15.65 J kg^{-1} , 抬升指数 (LI) 为 -1.9°C , K 指数为 38.5°C , 整个探空站的降水量高达 40.23 mm, 表明大气为雷暴的发生提供了有利的环境条件。综合以上的分析来看, 低层水汽的输入和高层槽后干冷空气的侵入造成了阿肯色州上空存在水汽上干下湿的垂直结构, 不稳定能量的积聚以及良好的动力条件, 触发了此次雷暴过程。

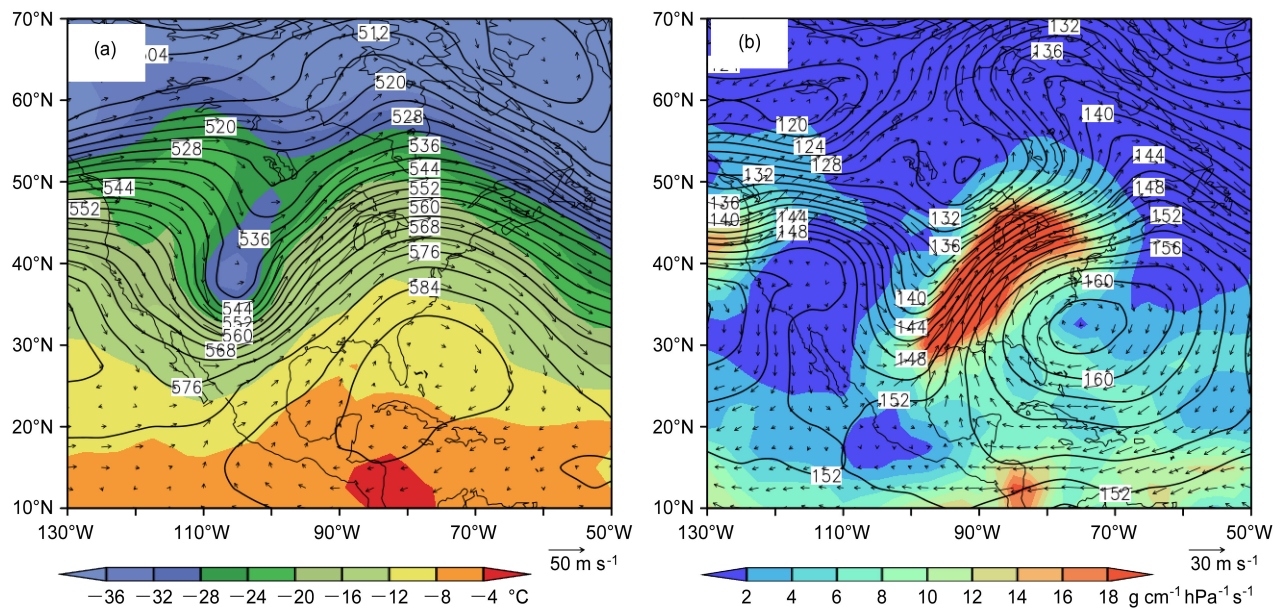


图1 2008年12月27日12:00 (a) 500 hPa 位势高度场(黑色等值线, 单位: dagpm)、风矢量(单位: m s^{-1})和温度(填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$)分布以及 (b) 800 hPa 位势高度场(黑色等值线, 单位: dagpm)、水汽通量(填色, 单位: $\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$)和风矢量(单位: m s^{-1})分布
Fig. 1 Distributions of (a) 500-hPa geopotential height (black contours, units: dagpm), wind vectors (arrows, units: m s^{-1}), and temperature (shaded, unit: $^{\circ}\text{C}$); and (b) 850-hPa geopotential height (black contours, units: dagpm), vapor flux (shaded, units: $\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$), and wind vectors (arrows, units: m s^{-1}) at 1200 UTC on December 27, 2008

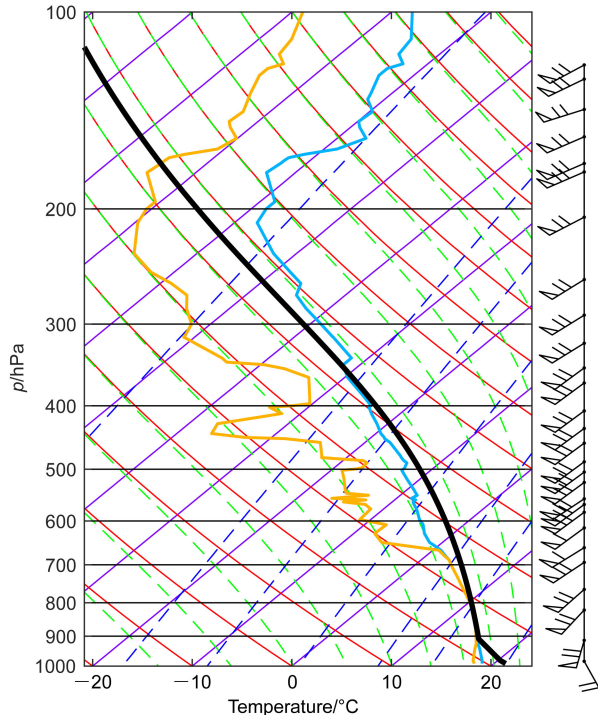


图2 2008年12月27日12:00小石城站(LZK)探空图。黑色表示状态曲线, 绿色表示环境温度曲线(层结曲线), 黄色表示环境露点温度曲线

Fig. 2 Skew T -log p diagram for LZK at 1200 UTC on December 27, 2008. The black, green, and yellow solid lines represent parcel adiabatic lapse rate, temperature, and dew point, respectively

4 母体雷暴特征分析

4.1 云顶亮温

图3为由NCEP/CPC提供的不同时刻云顶亮温, 可以从宏观上揭示产生红色精灵雷暴的特征, 图中还显示了以图中所示时间为中心半小时内(图中时刻前后15 min)闪电的位置。由图3可以清楚的看出雷暴是自西向东发展。在雷暴发展过程中, 地闪都主要集中在云顶亮温低值区并且分布在对流线附近。雷暴大约在27日15:00开始出现, 之后快速发展并在00:00达到云顶亮温的最低值, 大约为 -63°C , 表明此时云内有较强的上升气流。在01:00, 云顶亮温较上一时刻逐渐升高(-62°C), 云区变大, 雷暴开始逐渐减弱, 闪电活动也随之减弱。在01:00之后, 云顶亮温大幅度的升高, 表明雷暴变得更弱。本文中红色精灵发生在04:46和04:47时刻, 由图3f可知, 在05:00(距离红色精灵发生最近的时刻), 与前几个时刻相比闪电活动大幅度降低, 云顶亮温较高, 表明雷暴处于消散阶段。红色精灵位于云顶亮温大致在 $-40^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$ 的区域内, 这与São Sabbas et al. (2010)的研究结果一致, 他们发现阿根廷冬季雷暴上空的红色精灵

发生在云顶亮温 $-45^{\circ}\text{C}\sim-53^{\circ}\text{C}$ 的层状区。Lyons (2006) 研究发现美国中部产生红色精灵的夏季雷暴, 最低云顶亮温在 $-70^{\circ}\text{C}\sim-75^{\circ}\text{C}$ 范围内, 大多数红色精灵发生在亮温低于 -65°C 的区域。Soula et al. (2009) 对欧洲两个产生了 27 例红色精灵夏季 MCS 的研究发现红色精灵发生在云顶亮温

$-50^{\circ}\text{C}\sim-55^{\circ}\text{C}$ 的区域。结合本文的研究结果发现, 与有些夏季雷暴相比 (Lyons, 2006), 冬季红色精灵可能更容易出现在云顶亮温相对较高的区域。

由气象卫星图像确定的云顶亮温可以估计云顶高度和雷暴云内的相关垂直对流的发展情况。云顶亮温越低, 云顶高度越高, 雷暴内对流发展越旺盛

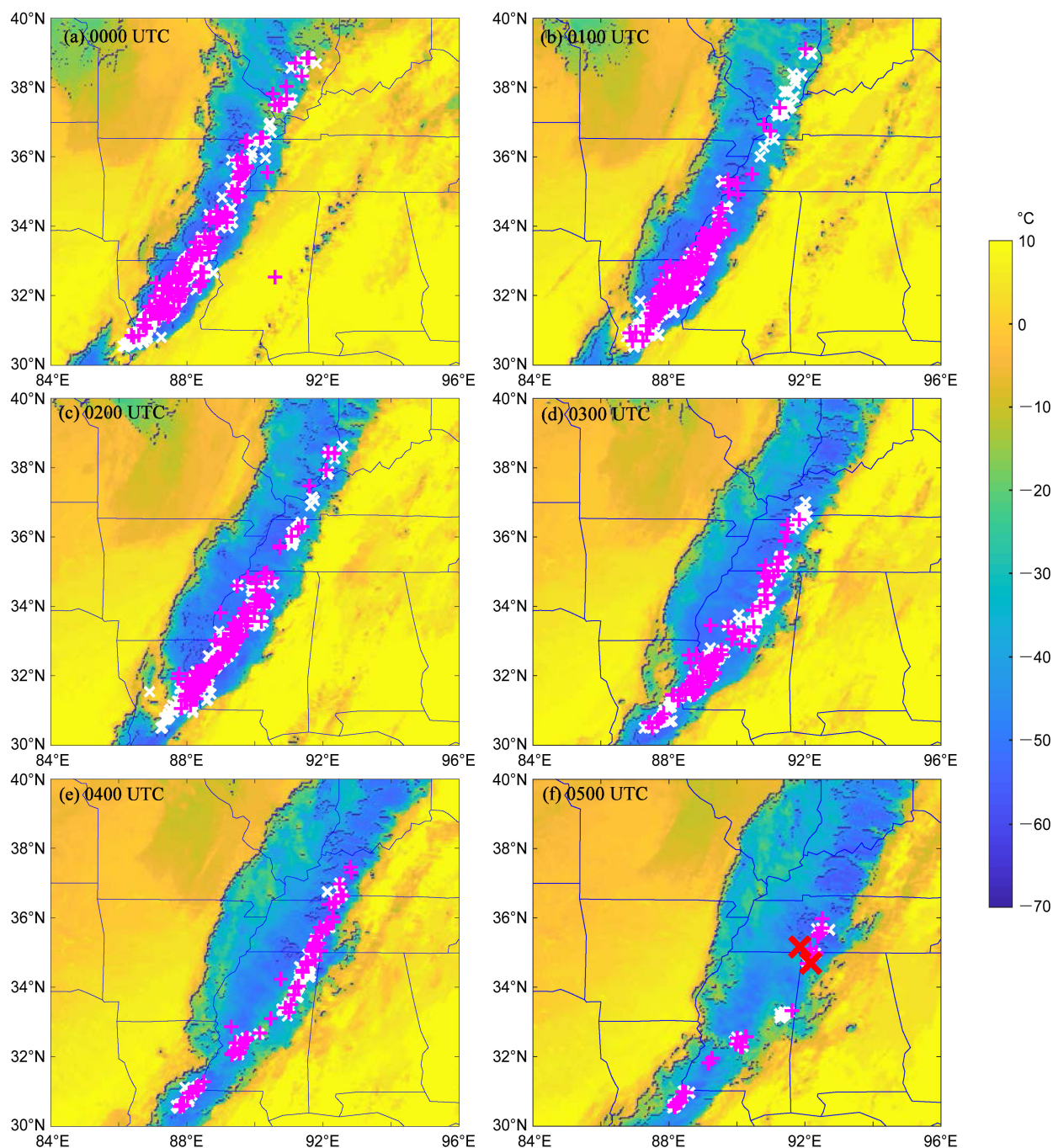


图3 2008年12月28日(a-f) 00:00~05:00不同时刻云顶亮温与闪电(图中所示时刻前后15 min)的叠加(白色“X”表示负地闪, 玫红色“+”表示正地闪, 红色大“X”表示红色精灵)

Fig. 3 Cloud-top brightness temperature from (a-f) 0000 UTC to 0500 UTC on December 28, 2008, with flashes within 15 min centered at the time shown in the figure (the white “X,” rose red “+” and red plus “X” denote -CG flash, +CG flashes, and red sprites, respectively).

(Soula et al., 2009)。前面的分析表明, 冬季红色精灵与低云顶相联系(温度越高, 对流越弱, 云顶高度越低)。为了进一步研究两者之间的关系, 图 4 给出了 2008 年 12 月 27 日 23:00 至 28 日 05:00 雷暴云顶亮温不同温度面积的变化情况。我们的分析中也结合了探空数据, 根据温度垂直递减率(抬升凝结高度以下平均每升高 100 米温度下降 0.8°C , 抬升凝结高度以上平均每升高 100 米温度下降 0.6°C)来粗略判断云顶的发展高度。根据杰克逊站(JAN) 0000 UTC 的探空资料, 温度为 -55°C 所在高度大约为 12 km。

从图 4 可以看出, 云顶亮温低于 -55°C (云顶高度在 12 km 以上) 的面积在 23:00 开始显著增加并在 01:00 达到最大值, 直到 02:00 几乎保持不变, 之后开始快速的下降。此外, 最大的云顶高度(云顶亮温低于 -60°C) 出现在 00:00, 表明雷暴有很强的垂直发展。在 00:00 之后, 云顶温度低于 -60°C 的面积几乎为 0。大约在 4 h 后观测到了红色精灵, 05:00 (距离红色精灵发生最近的时刻) 雷暴云顶亮温相对较高(大于 -55°C , 云顶高度低于 12 km), 此时雷暴处于消散阶段。综合以上的分析可知, 本文中的冬季红色精灵发生在雷暴的消散阶段, 此时雷暴云云顶亮温较高, 云顶高度较低。

然而, Adachi et al. (2005) 利用气象卫星云图对日本 Hokuriku 地区产生红色精灵的冬季雷暴做研究发现红色精灵发生在云顶亮温降低时即雷暴的发展到成熟阶段, 而在雷暴的消散阶段没有观测到任何的红色精灵。但是, 我们的结果与之前发生在北美、欧洲、中国台湾省和中国大陆等地区夏季红色精灵的研究成果一致(Lyons, 1996; 杨静等, 2008; Soula et al., 2009)。

4.2 雷暴结构特征研究

由于 NOAA/NCEP 提供的云顶亮温数据时空分辨率相对较低, 有关雷暴的详细信息从雷达数据中获取。为了更清楚的了解本文中雷暴的整个演变过程, 我们在分析的过程中使用了多个站点(孟菲斯站、哥伦布站)的 NEXRAD 雷达资料, 在图 5 所示的雷达反射率图上会表现出一些差异, 这是由于不同雷达体扫的采样空间不一致, 当目标物对于两部雷达的距离不同时, 即使使用同一仰角观测时, 观测到的云也不是同一高度的云。本次产生红色精灵的雷暴是一个中尺度对流系统(MCS), 持续时间超过了 16 h。图 5 显示了产生红色精灵的雷暴在不同时间的雷达组合反射率。在雷暴的演变过程中, 雷暴主要分布在阿肯色州、田纳西州和杰克逊县一带。雷达组合反射率表明在 12 月 27 日 15:00

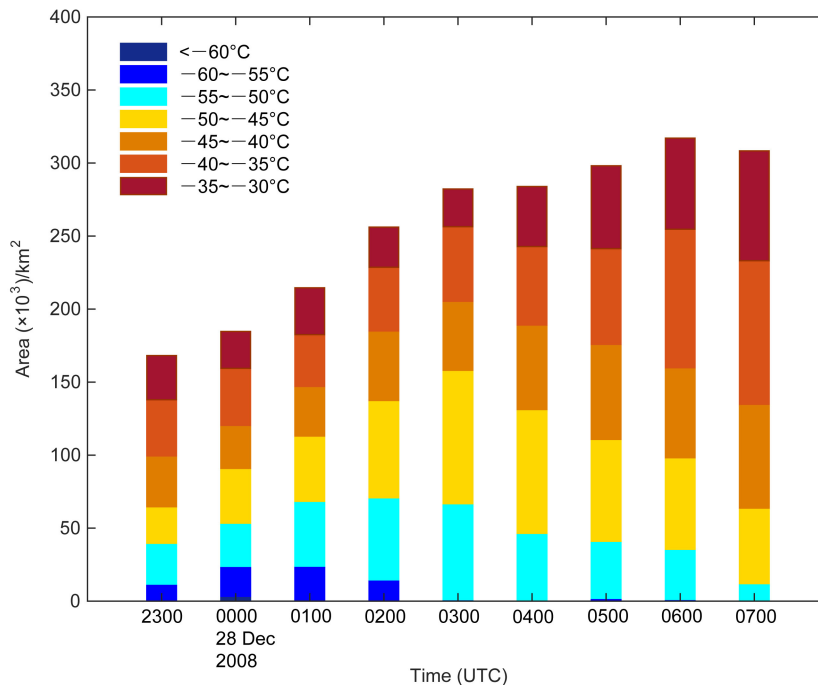


图 4 2008 年 12 月母体雷暴不同云顶亮温面积的演变

Fig. 4 Evolution of cloud-top brightness temperature area of different temperature intervals on December, 2008

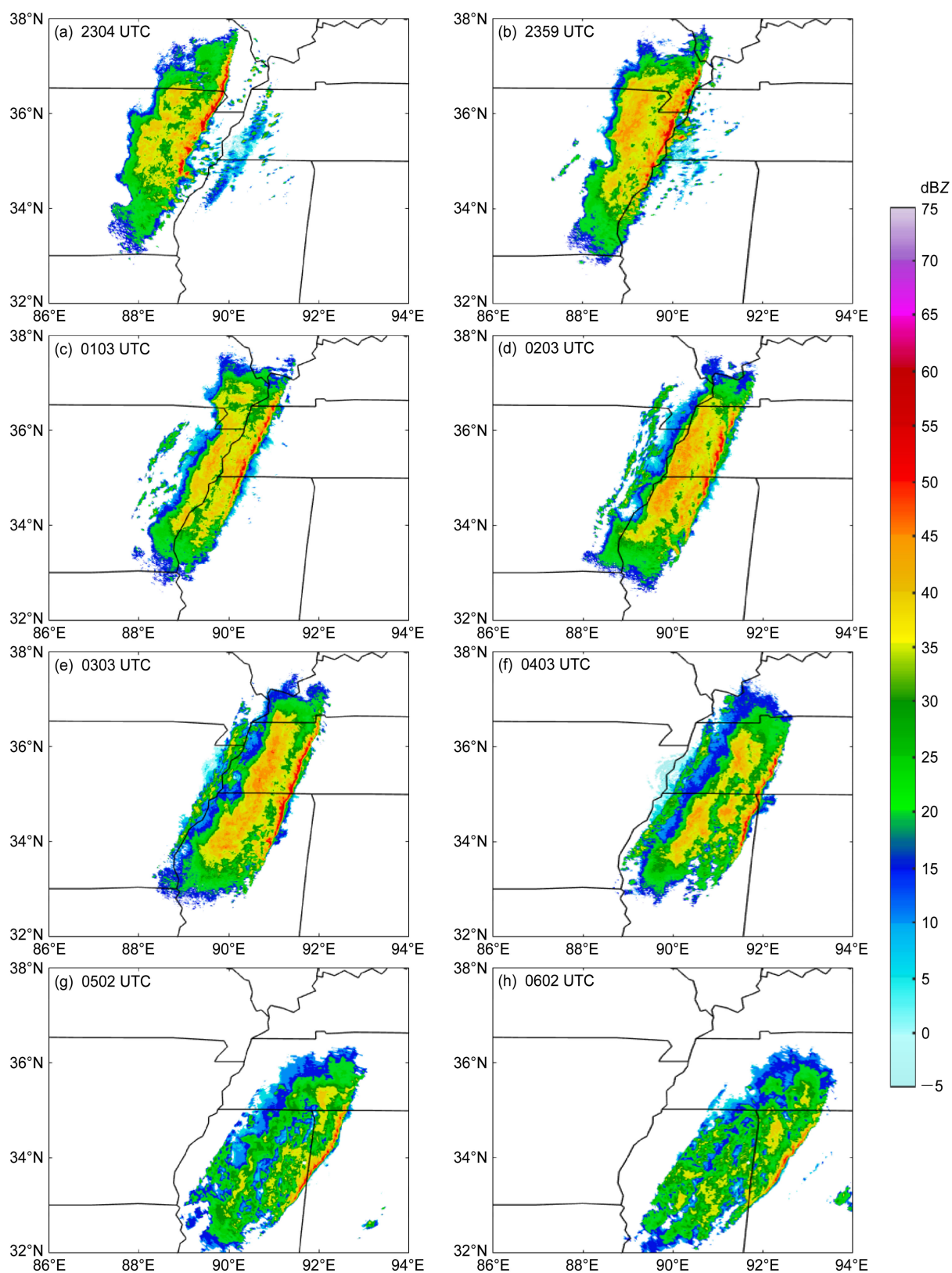


图5 2008年12月红色精灵母体雷暴在不同时间的组合反射率演变: 27日(a) 23:04、(b) 23:59、28日(c) 01:03、(d) 02:03、(e) 03:03、(f) 04:03、(g) 05:02、(h) 06:02

Fig. 5 Evolution of composite radar reflectivity of the sprite-producing thunderstorm at (a) 2304 UTC, (b) 2359 UTC December 27, (c) 0103 UTC, (d) 0203 UTC, (e) 0303 UTC, (f) 0403 UTC, (g) 0502 UTC, (h) 0602 UTC December 28, 2008

左右(图略), 一些小的对流单体开始出现在阿肯色州北部, 然后这些对流单体逐渐发展, 并合并形成一条长对流线。随着雷暴向东演变, 前部对流线逐渐增强, 对流区后部以层状云降水区为主。大约在 23:59, 雷暴发展更强, 最大雷达反射率因子(55~60 dBZ)的面积达到 339 km²。由于一部分雷达资料的缺失, 我们无法得知 00:00~00:59 期间雷暴的具体发展情况。由图中可以看到在 01:03 时刻雷暴是减弱的。在 03:03 左右, 雷暴的强度有所增强, 体现在图 6a 中雷达反射率大于 30 dBZ 的面积有所增加。在 03:03 之后, 云体便开始逐渐扩散、反射率开始减弱, 表明雷暴开始衰减消散。在 11:00 左右, 产生红色精灵的雷暴完全消散。

我们分析中的冬季雷暴是一个 MCS, MCS 被认为是较容易产生红色精灵的天气系统(Lyons, 1994), ISUAL 有幸在这次 MCS 上空记录到两例红色精灵事件, 为了对产生红色精灵的雷暴特征有一个详细的了解, 我们对红色精灵发生前后的雷达反射率特征进行细致研究。我们利用离 MCS 最近的两部雷达的组合反射率图, 得到本次 MCS 过程从 23:04~06:02 雷达反射率面积的变化, 图 6 给出了不同雷达反射率面积的演变曲线图(00:00~00:59 由于雷达失效没有数据)。如图 6a 所示, 雷达反射率大于 40 dBZ 的面积和雷达反射率小于 30 dBZ 的面积在没有产生红色精灵的时间段内的变化较一致, 在红色精灵发生期间反射率大于 40 dBZ 的面积变化较为平稳, 而雷达反射率小于 30 dBZ 的面积增加, 与王志超等(2015)对华北地区产生红色精灵夏季 MCS 的研究结果一致。雷暴的 10 dBZ 反射率面积大约在红色精灵发生前 1 小时 38 分钟(03:08)达到最大值约为 89592 km²(图 6b), 小于 Lyons(1996)报道的结果(约为 10⁵ km²), 但大于 Soula et al.(2009)的结果, 其对欧洲两次产生红色精灵的 MCS 研究中发现, 雷暴的最大面积为 1.2×10⁴ km²。在 04:45(红色精灵发生前约 2 min), 雷暴的 10 dBZ 反射率面积约为 84007 km², 远大于 Lyons et al.(2003)的研究结果(1.5×10⁴ km²~2×10⁴ km²)。Lyons(2006)指出北美夏季 MCS 产生红色精灵除了满足 Lyons et al.(2003)提出的产生红色精灵 MCS 的 10 dBZ 雷达反射率面积须达到 2×10⁴ km²的条件外, 还需要满足的条件是 MCS 的最大雷达反射率要大于 55 dBZ。如图 6a 所示, 在红色精灵发生时, MCS 的最大雷达

反射率达到了 55 dBZ, 面积约为 48 km²。

由图 6b 可知, 30~35 dBZ 的雷达反射率面积在红色精灵发生前后是增加的, 而 35~40 dBZ 和 40~45 dBZ 的面积在红色精灵发生前减少, 在红色精灵发生后 35~40 dBZ 又迅速的增加, 40~45 dBZ 的面积趋于平稳。先前的研究表明, 日本冬季红色精灵的发生与对流增强有关。然而在本文中, 如图 6c 所示, 在红色精灵发生期间, 雷达反射率 10~40 dBZ 的面积增加, 而大于 40 dBZ 的面积减少。红色精灵的发生与强回波区的减弱有很好的一致性。由以上的分析可知, 红色精灵发生时雷暴处于消散阶段, 红色精灵的产生与对流的减弱和层状云降水区的发展有关, 这与已有的夏季红色精灵的研究结果类似。一般在雷暴发展的后期, 层状云降水区逐渐扩大, 有利于正电荷区的水平扩展, 正地闪往地面传输的电荷增多。

为了进一步探讨产生红色精灵的雷暴特征, 图 7 给出了 04:45(距离红色精灵发生最近时刻)雷达组合反射率与前后 15 min 内地闪的叠加及雷达反射率的垂直剖面, 其中黑色和红色“×”分别代表负地闪和正地闪, 两个母体闪电分别被标为 CG1 和 CG2, 蓝色大“+”表示红色精灵。如图 7a 所示, 两个红色精灵的母体闪电位于雷达反射率大约为 25~35 dBZ 的层状云降水区, 与 Adachi et al.(2005)的结果相反, 其发现日本冬季红色精灵的母体闪电发生在强对流区, 而不是传统的层状云区, 但与之之前对发生在北美地区的夏季红色精灵的研究结果一致(Lyons, 1996, 2006; Lyons et al., 2003)。红色精灵和其母体闪电的水平偏移距离分别为 62 km 和 25 km。Lyons(1996)分析了发生在北美的 7 例夏季红色精灵事件, 发现其中 5 例红色精灵与其母体闪电之间的偏移距离在 50 km 内。São Sabbas et al.(2003)对 34 个夏季红色精灵进行分析得出大约有三分之二的红色精灵与其母体闪电的偏移距离在 50 km 内, 最大的偏移距离为 82 km。我们分析的两个冬季红色精灵与其母体闪电的水平偏移距离最大为 62 km。应该注意的是, 本文中对红色精灵的观测采用的是卫星(ISUAL)观测方式。Lu et al.(2017)利用 ISUAL 观测得到的 113 例红色精灵位置与其母体闪电的位置做比较发现红色精灵和其母体闪电的偏移距离在 100 km 内。

两个母体闪电的位置相对较分散, 同一雷暴中, 其他地闪大多也都发生在层状云降水区, 而对流区

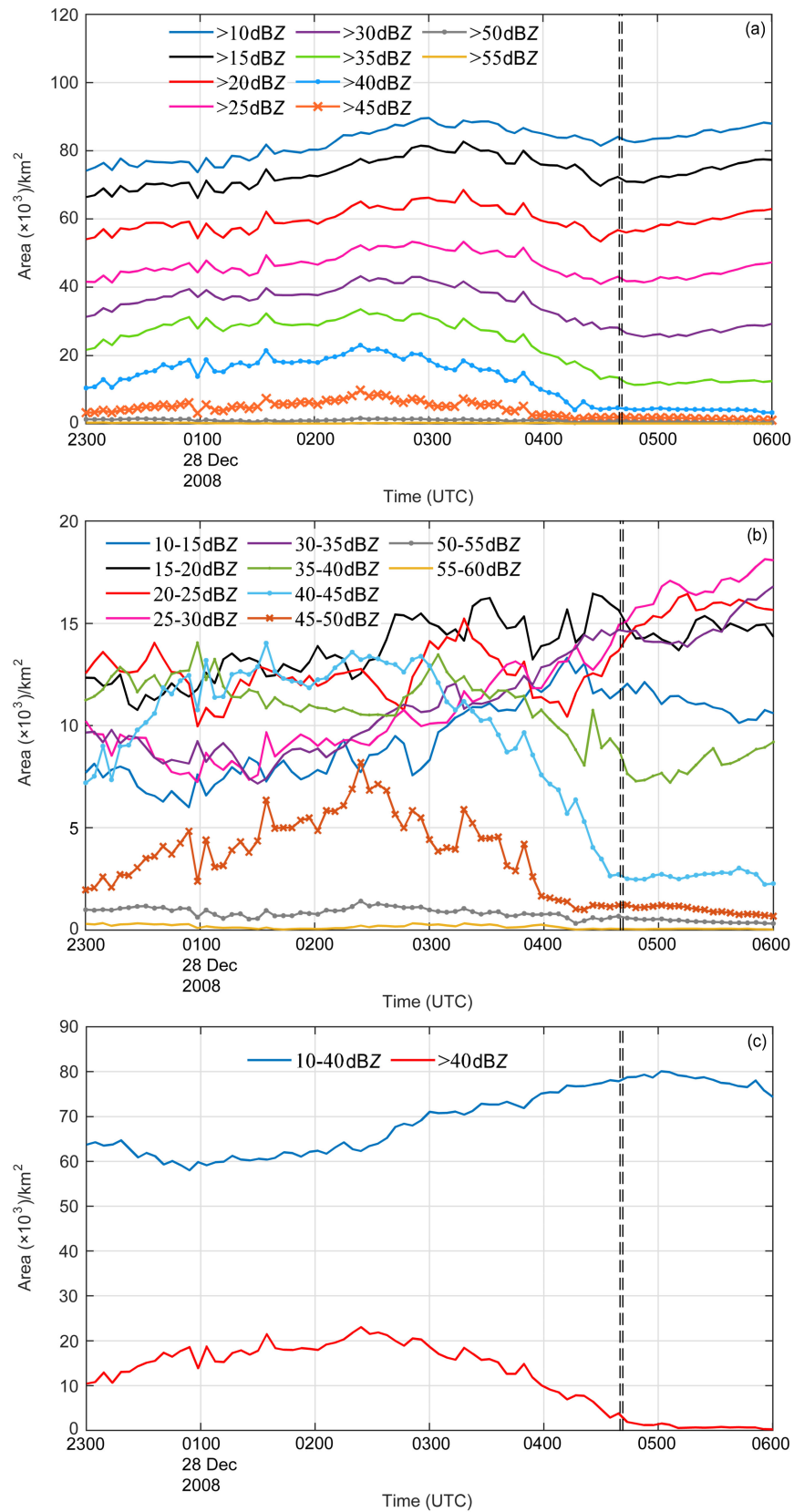


图6 2008年12月红色精灵母体雷暴的不同雷达反射率面积演变(图中虚线为红色精灵发生时间)

Fig. 6 Areal evolution of different radar reflectivities during the sprite-producing thunderstorm on December, 2008 (the dotted line in the picture shows the occurrence time of the red sprites).

产生的地闪数量较少。垂直截面可以更清楚的显示母体雷暴的结构, 图 7b 为沿图 7a 中 AB 线(穿过母体闪电)做的垂直剖面。如图所示, CG1 和 CG2 分别位于回波顶高大约为 2.5 km 和 5 km 的雷暴区域, 对流区中有相对较强的上升气流(如 >35 dBZ 的雷达反射率显示那样), 雷暴的最大回波顶高低于 10 km。沿图 7a 中 CD 线的垂直剖面显示了相似的雷暴结构(图 7c)。应该注意的是, 由于缺少 VHF 资料, 这里并不能知道 CG 传输的源电荷位置。Lu et al. (2013) 利用 VHF 技术对正极性红色精灵进行了详细的分析, 得出红色精灵的母体闪电通常起始于对流区, 之后沿着一条倾斜的路

径传播到层状区并将大量电荷转移到地面从而产生红色精灵。

5 超低频磁场揭示红色精灵母体闪电特征

闪电的 iCMC 被认为是红色精灵产生与否的关键因素 (Hu et al., 2002; Cummer et al., 2013), 虽然它不一定能代表红色发精灵的母体闪电电荷转移的确切程度, 因为产生红色精灵的母体闪电的强度阈值会因夜间电离层状态的不同而有所差别 (Qin et al., 2013)。例如, Cummer and Lyons (2005) 发现在两个不同的夜晚, 产生红色精灵正地闪

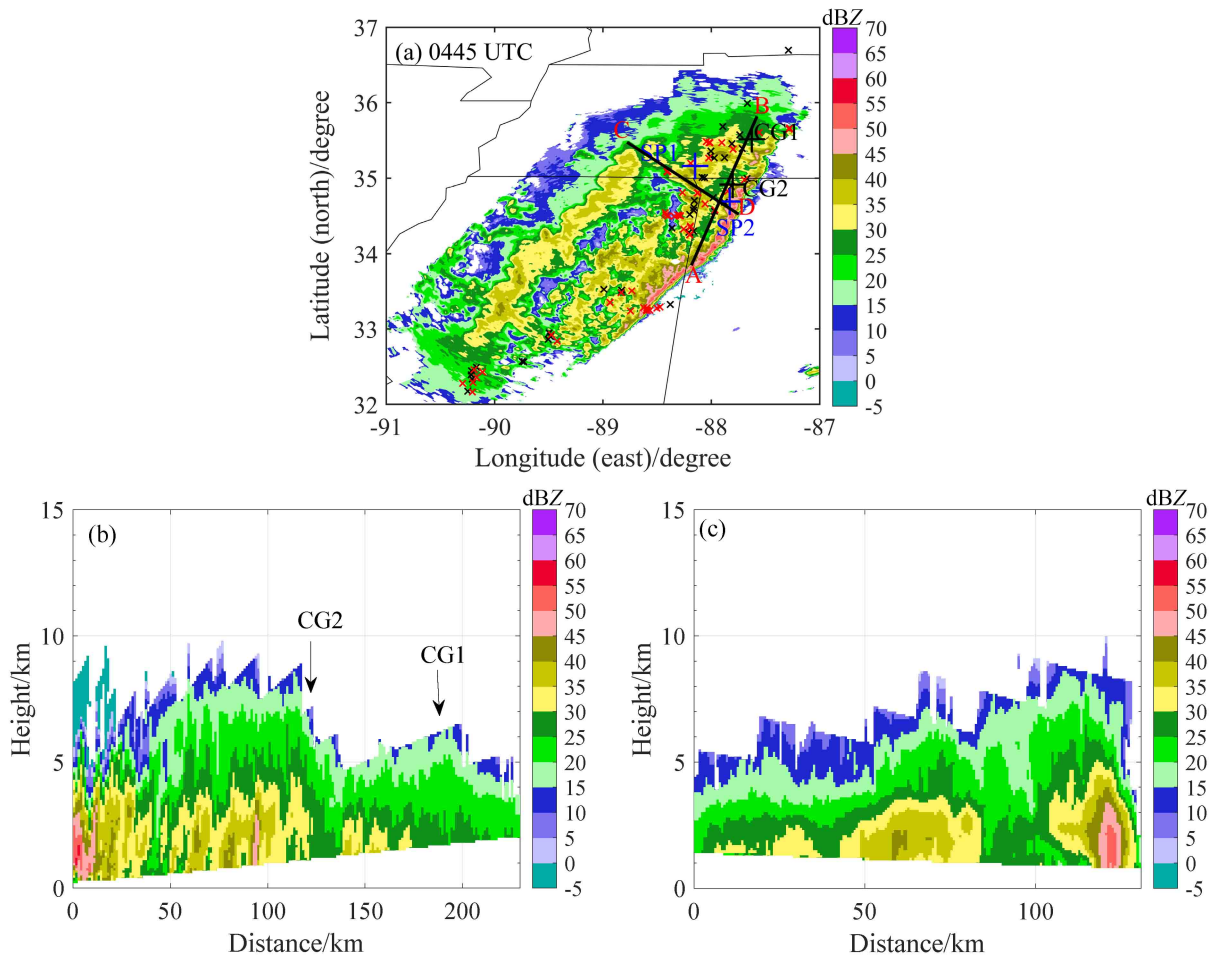


图 7 (a) 2008 年 12 月 28 日 04:45 雷达组合反射率图与该时刻前后 15 min 内地闪的叠加(黑色大“+”表示母体闪电, 蓝色大“+”表示红色精灵, 黑色“×”表示正地闪, 红色“×”表示负地闪, CG1 和 CG2 分别表示两个母体闪电, SP1 和 SP2 分别表示两个红色精灵)。

(b) 和 (c) 分别为沿 (a) 中 AB 线(穿过母体闪电)和 CD 线所做的垂直剖面

Fig. 7 (a) Overlap of composite radar reflectivity at 0445 UTC December 28, 2008 with CG flashes within 15 min centered at the time shown on the figure (the black plus “+”, blue plus “+”, black “×”, and red “×” represent the parent strokes, sprites, +CG, and -CG flashes, respectively; CG1 and CG2 represent parent strokes; and SP1 and SP2 represent red sprites). (b) and (c) show the vertical cross section along line AB (passing through the parent strokes) and line CD, respectively

iCMC 的阈值分别为+350 C km 和+600 C km。图 8 为 2008 年 12 月 28 日 ISUAL 捕捉到的两例红色精灵事件和由 Duke Forest 记录到的相关 ULF 磁场信号。结果表明, ISUAL 未观测到伴随的“光晕(halo)”现象, 产生两例红色精灵的母体闪电均为单回击正地闪。图 8a 显示了由 NLDN 记录到的峰值电流为+183 kA 的正回击产生的红色精灵, 该红色精灵是一个“圆柱状”红色精灵, 主体发光区在垂直方向上比较均匀, 两侧没有明显的分支。据估计, 产生红色精灵正地闪的 iCMC 约为+394 C km。如图 8a 所示, 红色精灵足够明亮, 可以产生所谓的“精灵电流(sprite current)”信号(图 8c)。图 8b 为由峰值电流为+45 kA 的正回击产生的红色精灵, 由于红色精灵发光相对较暗, 无法判断它的具体形态。其母体闪电有一个较小的 iCMC (+117 C km), 母体闪电的发展相对简单, ULF 磁场上没有看到可分辨的精灵电流信号(图 8d)。一般来说, 母体闪电的 iCMC 与红色精灵的光学亮度有着很好的对应关系, iCMC 越小, 红色精灵的亮度越暗, 反之, iCMC 越大, 红色精灵的亮度越亮。本文的结果较好的验证了前人的结论。

6 闪电活动规律

闪电活动特征是雷暴发生发展过程中的一个重

要信息, 我们利用由美国国家闪电定位网提供的闪电定位数据分析产生红色精灵冬季 MCS 的电活动特征。图 9 为 12 月 27 日 22:00 至次日 06:00 期间美国国家闪电探测网获得的闪电频数和地闪峰值电流的变化。图 9a 中给出了正负地闪频数的变化, 可见, 雷暴发展过程中负地闪占主导地位, 而相比于负地闪, 正地闪数量少得多; 负地闪频数较大时, 正地闪则减少。23:00~00:00 之间地闪活动明显增加, 表明 MCS 处于成熟阶段, 这一时期主要以负地闪为主, 而正地闪频数较低。00:00 之后负闪活动逐渐减少, 负地闪进入消散期, 而正地闪大幅度的增加。我们定义 POP (Percentage Of Positive CG to total CG) 为正地闪与总闪的比率, 在图 9a 中也给出了相应的变化曲线。王志超等(2015)认为 POP 的增加可能对雷暴系统产生红色精灵起到了很好的指示作用。由图 9a 可知, POP 整体呈上升趋势并在 01:30~02:30 这一时段出现峰值, 之后负地闪频数略有增加 POP 减少; 在 04:00~05:00 负地闪减少, 正地闪频数略有回升, POP 再一次出现峰值, 这一时段 MCS 处于消散阶段, ISUAL 记录到了两例红色精灵。从图 9b 中可以看到, 在红色精灵发生时, 正负地闪频数均处于一个较低的水平, 大约为 1、2 flashes min⁻¹。红色精灵发生后, 正地闪频数略有回升, 负地闪频数减少。

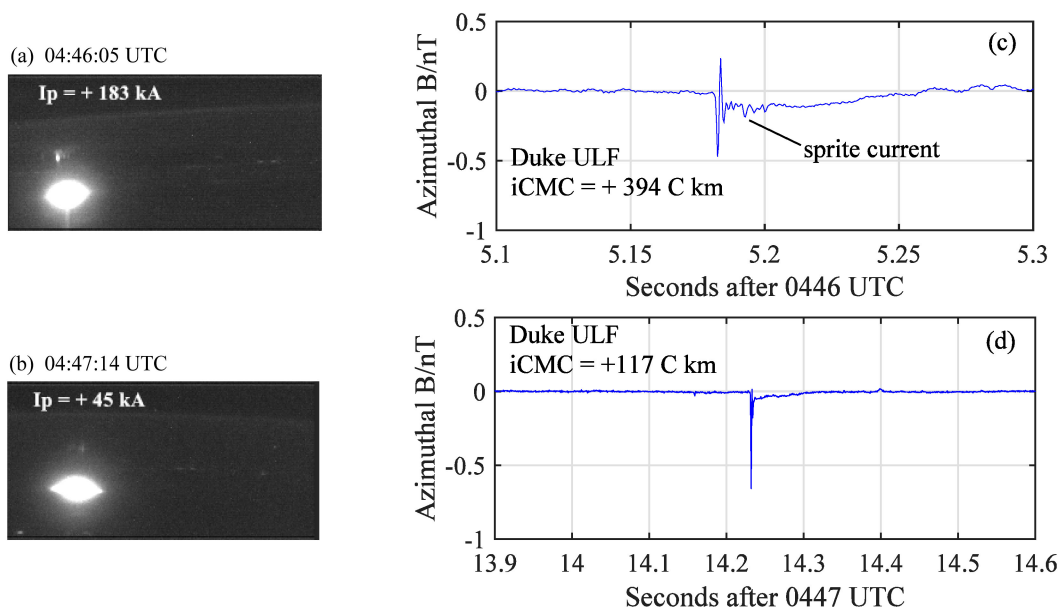


图 8 2008 年 12 月 28 日 ISUAL 探测器捕捉到的 (a、b) 两例红色精灵事件和 (c、d) 由 Duke Forest 记录到的相关超低频 ULF 磁场信号
Fig. 8 (a, b) Two red sprites observed by ISUAL (Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightning) on December 28, 2008, and (c, d) the associated ULF (Ultra Low Frequency) signals in Duke Forest

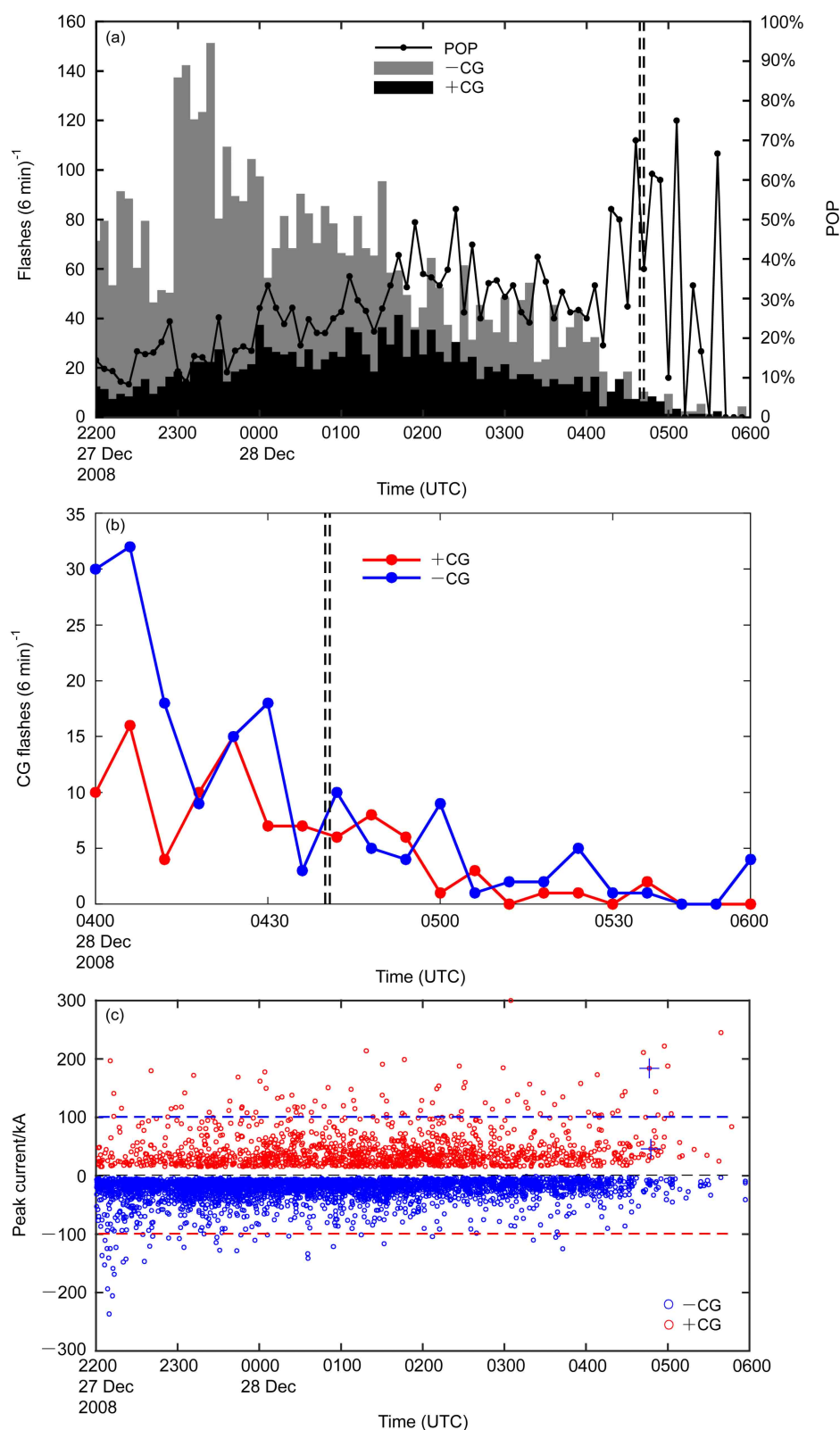


图9 2008年12月(a)母体雷暴中每6 min地闪频数、(b)红色精灵发生前后约两小时内每6 min地闪频数和(c)地闪峰值电流随时间的演变。(a)和(b)中的黑色虚线表示红色精灵发生的时间,(c)中蓝色“+”为红色精灵的母体闪电,峰值电流分别为+183 kA和+45 kA
Fig. 9 (a) Evolution of CG flashes per six minutes in the parent thunderstorm; (b) CG flashes per six minutes about two hours before and after the sprite; and (c) peak current of CG flashes in the parent thunderstorm on December, 2008. The black dotted line in (a) and (b) represents the sprite occurrence time, and the blue “+” in (c) represents the parent flashes of the red sprites and the peak currents are +183 kA and +45 kA, respectively

图 9c 的统计分析显示, 在图中所示时间内 NLDN 共探测到 5550 次地闪, 其中正地闪占 24%, 峰值电流范围在 +15 kA~+299 kA 之间; 负地闪占 76%, 峰值电流范围在 -237 kA~-2 kA 之间; 正负地闪峰值电流的平均值分别为 +43.5 kA 和 -23 kA。虽然在整个时间段负地闪占主导地位, 但高峰值电流的地闪回击大多数是正地闪回击。此外, 在两例红色精灵发生前 NLDN 探测到了正负地闪回击峰值电流的最大值, 分别是 +299 kA 和 -237 kA。回击峰值电流的大于或等于 100 kA 的正地闪回击的数量为 90, 占总正地闪回击的 6.6%; 而峰值电流绝对值大于或等于 100 kA 的负地闪回击数只有 40, 仅占负地闪回击 0.9%。

7 结论

本文综合利用中国台湾省 ISUAL 观测资料, 美国 NEXRAD 雷达资料、NLDN 闪电定位资料、ULF 磁场数据和由 NECP/CPC 提供的云顶亮温、NECP 再分析资料和美国怀俄明大学的探空资料等, 对北美地区一次冬季中尺度对流系统上空出现的红色精灵放电现象、母体雷暴和相关的闪电活动以及母体闪电磁场特征等进行了详细的分析。得到以下结论:

(1) 本次雷暴过程受高空槽的影响, 槽后西北气流带来强烈的干冷空气与槽前暖湿气流在阿肯色州北部交汇, 暖湿气流被迫抬升, 为这次雷暴过程的爆发提供了有利的天气背景。

(2) 两例红色精灵中, ISUAL 均未观测到伴随的“光晕(halo)”现象。第一例为“圆柱状”红色精灵, 主体发光区在垂直方向上比较均匀, 两侧没有明显的分支。第二例红色精灵由于发光较暗, 无法判断它的具体形态。

(3) 红色精灵的母体雷暴(MCS)于 27 日 15:00 左右出现在阿肯色州北部附近, 并自西向东移动。23:59 系统发展到最强, 最大雷达反射率因子(55~60 dBZ)的面积达到 339 km², 之后开始减弱。03:03 雷暴强度有所增加, 随后云体便逐渐扩散, 雷暴开始减弱, 并在 11:00 完全消散。天气雷达的详细分析表明 MCS(雷达反射率≥10 dBZ)的最大面积较大。红色精灵的出现伴随着 30~35 dBZ 反射率面积的增加。在红色精灵发生期间, MCS 的最大雷达回波反射率因子达到了 55 dBZ, 面积为 48 km²; 雷达反射率 10~40 dBZ 的面积增

加, 大于 40 dBZ 的面积减少, 表明红色精灵发生在雷暴的消散阶段, 红色精灵的产生与雷暴对流区的减弱和层状云区的发展有关。

(4) 在 MCS 的发展过程中地闪活动主要以负地闪为主, 但高峰值电流的地闪绝大多数是正地闪, 相比于负地闪, 正地闪数量少得多。负地闪在 MCS 的成熟阶段达到峰值, 而此时正地闪频数较低。当 MCS 开始减弱时, 负地闪活动逐渐减少, 而正地闪大幅度的增加。红色精灵发生时, 正负地闪频数均处于一个较低水平且 POP 有明显的增加趋势。在两例红色精灵发生前 NLDN 探测到了正负地闪峰值电流的最大值。

(5) 红色精灵与其母体闪电之间的水平偏移距离分别是 25 km 和 62 km。红色精灵的母体闪电为正地闪单回击, 位于中尺度对流系统雷达反射率为 25~35 dBZ 的层状云降水区, 对应的雷达回波顶高分别为 2.5 km 和 2.5 km, 峰值电流分别为 +183 kA 和 +45 kA。根据超低频磁场数据估算两个母体闪电的 iCMC 分别为 +394 C km 和 +117 C km, 超低频磁场记录到了第一个红色精灵内容的放电电流, 表明这例红色精灵放电很强。

以上的研究结果丰富了我们对于冬季红色精灵及其母体雷暴和相关闪电特征的认识。由于冬季红色精灵的观测个例较少, 本文利用的资料有限, 并且在实际情况中, 雷暴云内电荷结构更复杂, 有关母体雷暴特征及冬季红色精灵相关的闪电形态和电荷转移的细节还需进一步研究。

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。感谢中国台湾省成功大学陈炳志提供 ISUAL 观测数据。

参考文献 (References)

- Adachi T, Fukunishi H, Takahashi Y, et al. 2005. Characteristics of thunderstorm systems producing winter sprites in Japan [J]. *J. Geophys. Res.*, 110(D11): D11203. doi:10.1029/2004JD005012
- Barrington-Leigh C P, Inan U S. 1999. Elves triggered by positive and negative lightning discharges [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26(6): 683-686. doi:10.1029/1999GL900059
- Barrington-Leigh C P, Inan U S, Stanley M. 2001. Identification of sprites and elves with intensified video and broadband array photometry [J]. *J. Geophys. Res.*, 106(A2): 1741-1750. doi:10.1029/2000JA000073
- 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
- Chern A B, Kuo C L, Lee Y J, et al. 2008. Global distributions and occurrence rates of transient luminous events [J]. *J. Geophys. Res.*, 113(A8): A08306. doi:10.1029/2008JA013101
- Chern J L, Hsu R R, Su H T, et al. 2003. Global survey of upper atmospheric transient luminous events on the ROCSAT-2 satellite [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 65(5): 647–659. doi:10.1016/S1364-6826(02)00317-6
- Chou J K, Tsai L Y, Kuo C L, et al. 2011. Optical emissions and behaviors of the blue starters, blue jets, and gigantic jets observed in the Taiwan transient luminous event ground campaign [J]. *J. Geophys. Res.*, 116(A7). doi:10.1029/2010JA016162
- 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.*, 110(A4): A04304. doi:10.1029/2004JA010812
- Cummer S A, Li J B, Han F, et al. 2009. Quantification of the troposphere-to-ionosphere charge transfer in a gigantic jet [J]. *Nat. Geosci.*, 2(9): 617–620. doi:10.1038/ngeo607
- Cummer S A, Lyons W A, Stanley M A. 2013. Three years of lightning impulse charge moment change measurements in the United States [J]. *J. Geophys. Res.*, 118(11): 5176–5189. doi:10.1002/jgrd.50442
- Cummins K L, Krider E P, Malone M D. 1998. The US national lightning detection network/sup TM/and applications of cloud-to-ground lightning data by electric power utilities [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 40(4): 465–480. doi:10.1109/15.736207
- Cummins K L, Murphy M J. 2009. An overview of lightning locating systems: History, techniques, and data uses, with an in-depth look at the U.S. NLDN [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 51(3): 499–518. doi:10.1109/TEM.2009.2023450
- Fukunishi H, Takahashi Y, Uchida A, et al. 1999. Occurrences of sprites and elves above the Sea of Japan near Hokuriku in winter [J]. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 80(46): F217.
- Ganot M, Yair Y, Price C, et al. 2007. First detection of transient luminous events associated with winter thunderstorms in the eastern Mediterranean [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34(12). doi:10.1029/2007GL029258
- Hayakawa M, Nakamura T, Hobara Y, et al. 2004. Observation of sprites over the Sea of Japan and conditions for lightning-induced sprites in winter [J]. *J. Geophys. Res.*, 109(A1): A01312. doi:10.1029/2003JA009905
- Hayakawa M, Nakamura T, Iudin D, et al. 2005. On the fine structure of thunderstorms leading to the generation of sprites and elves: Fractal analysis [J]. *J. Geophys. Res.*, 110(D6): D06104. doi:10.1029/2004JD004545
- Hobara Y, Iwasaki N, Hayashida T, et al. 2001. Interrelation between ELF transients and ionospheric disturbances in association with sprites and elves [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28(5): 935–938. doi:10.1029/2000GL003795
- Hu W Y, Cummer S A, Lyons W A, et al. 2002. Lightning charge moment changes for the initiation of sprites [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29(8): 1279. doi:10.1029/2001GL014593
- Kuo C L, Chen A B, Lee Y J, et al. 2007. Modeling elves observed by FORMOSAT-2 satellite [J]. *J. Geophys. Res.*, 112(A11): A11312. doi:10.1029/2007JA012407
- Kuo C L, Chou J K, Tsai L Y, et al. 2009. Discharge processes, electric field, and electron energy in ISUAL-recorded gigantic jets [J]. *J. Geophys. Res.*, 114(A4): A04314. doi:10.1029/2008JA013791
- Lang T J, Lyons W A, Cummer S A, et al. 2016. Observations of two sprite-producing storms in Colorado [J]. *J. Geophys. Res.*, 121(16): 9675–9695. doi:10.1002/2016JD025299
- Lu G, 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, Cummer S A, Lyons W A, et al. 2011. Lightning development associated with two negative gigantic jets [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38(12): L12801. doi:10.1029/2011GL047662
- Lu G P, Cummer S A, Li J B, et al. 2013. Coordinated observations of sprites and in-cloud lightning flash structure [J]. *J. f Geophys. Res.*, 118(12): 6607–6632. doi:10.1002/jgrd.50459
- Lu G P, Cummer S A, Tian Y, et al. 2016. Sprite produced by consecutive impulse charge transfers following a negative stroke: Observation and simulation [J]. *J. Geophys. Res.*, 121(8): 4082–4092. doi:10.1002/2015JD024644
- 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. 1996. Sprite observations above the U.S. High Plains in relation to their parent thunderstorm systems [J]. *J. Geophys. Res.*, 101(D23): 29641–29652. doi:10.1029/96JD01866
- 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*. Dordrecht: Springer, 19–56. doi:10.1007/1-4020-4629-4_2.
- Lyons W A, Cummer S A, Stanley M A, et al. 2008. Supercells and sprites [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 89(8): 1165–1174. doi:10.1175/2008BAMS2439.1
- Lyons W A, Nelson T E, Williams E R, et al. 2003. Characteristics of sprite-producing positive cloud-to-ground lightning during the 19 July 2000 STEPS mesoscale convective systems [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131(10): 2417. doi:10.1175/1520-0493(2003)131<2417:COSPCL>2.0.CO;2
- Mohr K I, Zipser E J. 1996. Mesoscale convective systems defined by their 85-GHz ice scattering signature: Size and intensity comparison over tropical oceans and continents [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124(11): 2417–2437. doi:10.1175/1520-0493(1996)124<2417:MCSDBT>2.0.CO;2
- Moudry D, Stenbaek-Nielsen H, Sentman D, et al. 2003. Imaging of elves, halos and sprite initiation at 1ms time resolution [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 65(5): 509–518. doi:10.1016/S1364-6826(02)

- 00323-1
- Pasko V P. 2003. Electrical jets [J]. *Nature*, 423: 927–929. doi:10.1038/423927a
- Peng K M, Hsu R R, Su H T, et al. 2017. Transient luminous event coordinated observations using FORMOSAT-2 satellite and Taiwan sprites campaign [J]. *Terr., Atmos. Ocean. Sci.*, 28(4): 597–608. doi:10.3319/TAO.2016.09.21.03
- 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.*, 118(5): 2623–2638. doi:10.1029/2012JA017908
- Ren H, Tian Y, Lu G P, et al. 2019. Examining the influence of current waveform on the lightning electromagnetic field at the altitude of halo formation [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 189: 114–122. doi:10.1016/j.jastp.2019.04.010
- 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. Solar-Terr. Phys.*, 65(5): 525–535. doi:10.1016/S1364-6826(02)00326-7
- São Sabbas F T, Taylor M J, Pautet P D, et al. 2010. Observations of prolific transient luminous event production above a mesoscale convective system in Argentina during the Sprite2006 Campaign in Brazil [J]. *J. Geophys. Res.*, 115(A11): A00E58. doi:10.1029/2009JA014857
- 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
- Singh R, Maurya A K, Chanrion O, et al. 2017. Assessment of unusual gigantic jets observed during the monsoon season: First observations from Indian subcontinent [J]. *Sci. Rep.*, 7(1): 16436. doi:10.1038/s41598-017-16696-5
- Soula S, van der 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
- Suzuki T, Hayakawa M, Hobara Y, et al. 2006a. Characteristics of the sprite parent winter thundercloud with positive single flash in Hokuriku, Japan (A case study on 14th December 2001) [J]. *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials*, 126(2): 78–83. doi:10.1541/ieejfms.126.78
- Suzuki T, Hayakawa M, Matsudo Y, et al. 2006b. How do winter thundercloud systems generate sprite-inducing lightning in the Hokuriku area of Japan? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33(10): L10806. doi:10.1029/2005GL025433
- Suzuki T, Matsudo Y, Asano T, et al. 2011. Meteorological and electrical aspects of several winter thunderstorms with sprites in the Hokuriku area of Japan [J]. *J. Geophys. Res.*, 116(D6). doi:10.1029/2009JD013358
- Takahashi Y, Miyasato R, Adachi T, et al. 2003. Activities of sprites and elves in the winter season, Japan [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 65(5): 551–560. doi:10.1016/S1364-6826(02)00330-9
- Wang Y P, Lu G P, Ma M, et al. 2019. Triangulation of red sprites observed above a mesoscale convective system in North China [J]. *Earth and Planetary Physics*, 3(2): 111–125. doi:10.26464/ep2019015
- 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 Z C, Yang J, 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): 839–848. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1412.14232
- Wescott E M, Sentman D, Osborne D, et al. 1995. Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 2. Blue jets [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 22(10): 1209–1212. doi:10.1029/95GL00582
- Wescott E M, Sentman D D, Heavner M J, et al. 1996. Blue starters: Brief upward discharges from an intense Arkansas thunderstorm [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 23(16): 2153–2156. doi:10.1029/96GL01969
- Wescott E M, Sentman D D, Heavner M J, et al. 1998. Blue jets: Their relationship to lightning and very large hailfall, and their physical mechanisms for their production [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 60(7-9): 713–724. doi:10.1016/S1364-6826(98)00018-2
- Wescott E M, Sentman D D, Stenback-Nielsen H C, et al. 2001. New evidence for the brightness and ionization of blue starters and blue jets [J]. *J. Geophys. Res.*, 106(A10): 21549–21554. doi:10.1029/2000JA000429
- Winckler J R, Lyons W A, Nelson T E, et al. 1996. New high-resolution ground-based studies of sprites [J]. *J. Geophys. Res.*, 101(D3): 6997–7004. doi:10.1029/95JD03443
- 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(7): 1079–1086. Yang J, Qie X S, Zhang G S, et al. 2008. Red sprites over thunderstorms in the coast of Shandong province, China [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 53(7): 1079–1086. doi:10.1007/s11434-008-0141-8
- Yang J, Yang M R, Liu C, et al. 2013. Case studies of sprite-producing and non-sprite-producing summer thunderstorms [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30(6): 1786–1808. doi:10.1007/s00376-013-2120-5
- Yang J, Sato M, Liu N Y, et al. 2018. A gigantic jet observed over an mesoscale convective system in midlatitude region [J]. *J. Geophys. Res.*, 123(2): 977–996. doi:10.1002/2017JD026878
- Zhang J B, Zhang Q L, Guo X F, et al. 2019. Simulated impacts of atmospheric gravity waves on the initiation and optical emissions of sprite halos in the mesosphere [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 62(4): 631–642. doi:10.1007/s11430-018-9311-y