

黄欣, 陆高鹏, 黄海亮, 程征伟. 2026. 电离层底部“绿闪”现象的地基观测和激发背景研究[J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 57(1): 108-117. doi: 10.19975/j.dqyxx.2025-001.
Huang X, Lu G P, Huang H L, Cheng Z W. 2026. Ground-based observations of ghost green emissions and analyses of their excitation background[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 57(1): 108-117 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2025-001.

电离层底部“绿闪”现象的地基观测和激发背景研究

黄欣¹, 陆高鹏^{1*}, 黄海亮¹, 程征伟²

1 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

2 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100021

摘要:“绿闪”(ghost)是最新发现的一种中高层瞬态发光事件(transient luminescence events, TLEs)类型, 由于其拍摄条件要求较高, 可分析的观测数据较少且均为单站地基光学观测. 基于现有资料可查的 7 次 ghost 事件的地基观测, 本文利用单站地基观测并结合星场定位估算 ghost 高度的方法, 计算得到其中 5 次 ghost 事件(其中有 2 个 ghost 事件为同一母体雷暴)发生高度范围在 90 到 100 km. 目前所知 ghost 事件伴随两种不同的 TLEs 现象, 即“红色精灵”(red sprite)或者“巨大喷流”(gigantic jet). 通过 ghost 事件与这两种 TLEs 现象的伴随关系表明, ghost 事件的发生可能与背景条件及雷暴放电过程中的强电场和能量释放密切相关. 本文进一步分析了上述 7 次 ghost 事件发生时的大气环境背景条件(如中性粒子密度、离子浓度和电子密度等), 通过 MSIS-E-90 标准大气模型和国际参考电离层(IRI)模型得到中性粒子(O 、 N_2 、 O_2)密度廓线、离子(O_2^+ 和 NO^+)密度廓线和电子密度的分布情况, 发现 N_2 、 O_2 和电子密度的突变对ghost的发生有关键作用. 这些突变可能为ghost发生提供了必要介质条件. 本文还通过计算ghost发光区域空间范围的变化速率, 发现其远远低于流光放电时的扩散率, 因此推测ghost发光可能是辉光放电的一种形式. 最后, 本文分析ghost的母体雷暴发展特征, 发现ghost事件通常发生在对流活动开始减弱的阶段, 这一现象表明, ghost的产生可能与雷暴放电过程中的总体能量释放强度有关. 在雷暴活动减弱阶段, 虽然对流活动下降, 但雷暴云顶的电场可能仍然较强, 从而为ghost事件的发生提供了必要的能量条件.

关键词:“绿闪”; 闪电; 雷暴; 中高层瞬态发光事件

doi: 10.19975/j.dqyxx.2025-001

中图分类号: P412.4

文献标识码: A

Ground-based observations of ghost green emissions and analyses of their excitation background

Huang Xin¹, Lu Gaopeng^{1*}, Huang Hailiang¹, Cheng Zhengwei²

1 School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100021, China

Abstract: Ghosts are a newly discovered category of transient luminescence events (TLEs) occurring in the middle and upper atmospheres above energetic thunderstorms. Due to the high requirements of optical shooting, the observation data that can be investigated are very scarce and are all obtained from the ground-based observations at single station. Based on the ground-based observation of seven ghost events with original optical data, in this paper

收稿日期: 2025-01-01; 录用日期: 2025-03-20

基金项目: 中国科学院基础研究领域青年团队稳定支持资助项目 (YSRR-018); 国家自然科学基金资助项目 (42394122); 国家重点研发计划 (2023YFC3007700); 中国子午工程、中国科学院国际合作计划资助项目 (183311KYSB20200003)

Supported by the CAS Project of Stable Support for Youth Team in Basic Research Field (Grant No. YSRR-018), National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42394122), National Key R&D Program of China (Grant No. 2023YFC3007700), the Chinese Meridian Project, and the International Partnership Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. 183311KYSB20200003)

第一作者: 黄欣 (1995-), 女, 在读博士研究生, 主要从事中高层放电现象的研究. E-mail: huangxin0624@mail.ustc.edu.cn

*通信作者: 陆高鹏 (1979-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事雷电物理和中高层放电现象的研究. E-mail: gaopengl@gmail.com



we present a methodology to estimate the altitude of ghosts from single-station observation in conjunction with star-field background, and determine the altitude range of five ghosts (two of which are at the same place and time) to be 90 to 100 km. So far, ghost events are known to be accompanied by two different types of TLEs, namely "red sprite" or "gigantic jet". The accompanying relationship between ghost events and these two TLEs phenomena shows that the occurrence of ghost events may be closely related to the altitude and the strong electric field and energy release during the thunderstorm. This paper further examined the atmospheric background conditions (i.e., neutral particle density, ion concentration and electron density, etc.) upon the observations of the aforementioned seven ghost events. The density profile of neutral particles (O , N_2 , O_2), ion (O_2^+ and NO^+) and electron density were obtained by means of the MSIS-E-90 model and the IRI model. It was found that the mutation of N_2 , O_2 and electron density played a key role in the occurrence of ghosts. These mutations of density may provide necessary medium conditions for the occurrence of ghosts. In this paper, by calculating the diffusivity of ghosts, it is found that the diffusivity of ghost is much lower than that of streamer discharge, which confirms that ghost emission is a form of glow discharge. Finally, the characteristics of the parent thunderstorms of ghosts are analyzed, and it is found that ghosts occur in the phase of weakening convective activity, which implies that the formation of ghost might require the existence of lightning flashes with relatively high energy release. In the weakening stage of thunderstorm activity, although the convective activity decreases, the electric field of the thunderstorm cloud top may still be strong, thus providing the necessary energy conditions for the occurrence of ghost events.

Keywords: ghost; lightning; thunderstorms; transient luminous events (TLEs)

0 引 言

瞬态发光事件 (transient luminous events, TLEs) 是发生在雷暴上空的巨大而短暂的放电现象, 常常发生在强闪电活动之后. 根据光辐射的形态特征和发光位置的不同, 常见的可以分为红色精灵 (red sprites)、光晕 (halos)、淘气精灵 (elves)、蓝色喷流 (blue jets) 和巨大喷流 (gigantic jets, GJ; Gordillo-Vázquez and Pérez-Invernón, 2021). 1989 年, 在一次夜间测试低光度光学观测设备性能的实验中, 人们第一次在地基观测中偶尔记录到了 TLEs (Franz et al., 1990). 近年来, 全球各地越来越多的星空摄影师和气象爱好者热衷于拍摄这些在星空背景下发生的壮观而神秘的自然现象. 红色精灵是最常见的 TLEs 形式之一, 通常与正极性云对地 (cloud-to-ground, CG) 闪击放电相关, 偶尔也与负极性 CG 闪击相关 (Boggs et al., 2016; Füllekrug et al., 2001; Lu et al., 2013, 2016), 云内或云间闪电产生的精灵也有文献报道 (Neubert et al., 2005). 这些现象如红色精灵、淘气精灵、蓝色喷流、巨大喷流和光晕通常与雷暴上空大约 15 至 100 km 范围内的闪电活动相关 (Liu et al., 2015; Lu et al., 2011; Pasko et al., 2013).

红色精灵的高度通常在 45 至 95 km 范围内, 其高度的测量通常采用三角测量法 (Li et al., 2012),

其跨度大约为 50 至 90 km (Sentman et al., 1995; Stenbaek-Nielsen et al., 2010; Wang et al., 2019; Wescott et al., 2001), 最高记录可达 96 km (Stenbaek-Nielsen et al., 2010). 对于不同形状的红色精灵, 柱状精灵的最高观测点在 81.3 至 88.9 km 之间 (Wescott et al., 1998). 对于光晕的顶部高度在 73.5 至 85.3 km 之间 (Wescott et al., 2001). 由于红色精灵拍摄环境的特殊性, 其中可见恒星的数量、局地云状况、观测方向、角分辨率、大气散射、光污染、相机增益设置及选择精灵特征时的模糊性等均会影响精灵的高度测量 (Mlynarczyk et al., 2015). 由于 ghost 现象观测数据稀少且均为单站点光学数据, 目前对于 ghost 观测还不够完善和成体系化记录. 因此对于单站点定位对此类现象的研究尤为关键 (Stenbaek-Nielsen et al., 2020). 本文介绍利用单站点观测数据对中高层放电现象的高度测量, 并分析 ghost 的发生高度.

在 2019 年 5 月发生令人震惊的事件, 公民科学家 Hank Schyma 和 Paul Smith 在记录俄克拉何马州上空的精灵风暴时, 发现在大型精灵群上方出现绿光, 并持续了几百毫秒 (Lyons, 2022). 这种新现象当时是以受激氧的绿色辐射的首字母缩略词命名的 (Oxygen in Sprite Tops, ghost), 并提出假设 ghost 为绿色的原因主要是受激原子氧 1S 到 1D 跃迁时释放 557.73 nm 波段的绿光, 这是极光和气辉中

众所周知的发射线 (Jehl et al., 2013; Omholt, 1971; Stenbaek-Nielsen et al., 2020). 自从这一发现被上传到网络媒体平台之后, TLEs 社区开始关注这些罕见的绿色辐射 (Stenbaek-Nielsen et al., 2020). 直到 Passas-Varo 等 (2023) 报导 ghost 的光谱观测, 其波段为 500 nm 和 600 nm 随时间的演化, 在此波段发现与 ghost 亮度逐渐减弱的四种主要物质: 原子铁 (FeI)、镍 (NiI) 和氮 (NI)、分子氮 (N_2) 和离子分子氧 (O), 此外还存在原子钠 (NaI) 和离子硅 (SiII) 对应的特征谱线, 并发现 ghost 的发生可能与流星有关, 这些观测结果与之前对中间层和低层热层大气金属密度分布的直接测量一致.

现已记录 ghost 事件都发生在 TLEs 的上空, 主要以伴随红色精灵为主. 红色精灵通常发生在约 50 至 90 km 的高度, 位于电离层的 D 层, 因此 85 至 120 km 范围是本研究的重点关注区域. D 层的电子密度随高度呈指数增长, 并且电子密度不是恒定的. 白天和夜间电离层电子密度存在显著差异, 白天的电离主要来自于太阳辐射 (如莱曼 α 辐射、X 射线辐射等), 而夜间则主要由宇宙辐射造成 (Chum et al., 2018; Schunr and Nagy, 2000; 张金波等, 2019). 此外, 电离层 D 层的电子密度可能存在局部不均匀分布, 这种分布可能影响精灵的起始过程和空间结构特征, 其原因还可能包括流星/陨石的影响 (Wescott et al., 2001; Zabolotin and Wright, 2001)、大气重力波上传 (Sentman et al., 2003) 以及云内闪电产生的电磁脉冲扰动等 (Valdivia et al., 1997). Qin 等 (2014) 使用二维等离子体流体模型模拟了精灵流光, 结果表明局部电子密度的增加有助于形成局部的强电场, 为精灵流光的形成提供了有利背景条件, 并指出电离层电子密度的局部不均匀分布可能是产生精灵的必要条件. 通过现在已记录到的 ghost 光学数据, 可以看到 ghost 主要

发生在红色精灵或者巨大喷流的顶部区域, 已经达到电离层 D 层, 因此分析 ghost 产生的背景条件对理解其生成机制至关重要.

1 观测数据

早期的 TLEs 光学观测一般采用黑白成像的设备, 因此无法区分事件的光谱颜色信息, 图像像素和拍摄帧率也较低, 而能够进行光谱观测的设备通常又无法给出事件的空间影像信息. 但近十年来, 随着越来越多的天象爱好者加入到夜空观测的行列, 不少高品质成像的彩色相机被用于捕捉 TLEs 事件. 由于 ghost 事件的拍摄条件极为苛刻 (例如一般要求极低的无线电干扰和几乎可以忽略的光污染), 目前记录到的 ghost 事件数量非常有限. 根据掌握的资料, 国内外的天文爱好者至今意外共记录了 7 个 ghost 事件, 本文将这些事件分别标记为事件 A~G 分别进行分析, 其中 Events E、F 为同一视频数据, 时间间隔 166.5 ms. 表 1 为目前收集到 ghost 事件的观测信息数据.

为了便于后续讨论, 本文将包含红色精灵图像的第一帧定义为 0 ms, 第二帧则作为 ghost 事件出现的起始时间. 因此, Events A、B、E 和 F 中的 ghost 起始时间为 33.3 ms, Events C、D、G 的起始时间为 41.7 ms. 如图 1 所示, Event A 是伴随 GJ 发生, GJ 是由发展旺盛的雷暴云顶部一直延伸到大约 70~90 km 的高度, 直达电离层下部, 是发生于雷暴云顶和电离层之间的快速放电事件. 巨大喷流通常被认为是由于雷暴内部的电荷屏蔽效应导致云对地闪电 (CG) 放电被抑制, 从而促使电荷直接通过云顶向上放电 (Krehbiel et al., 2008). 如果原本应该发生的 CG 闪电未能形成, 而转变为向上传输的巨大喷流, 则传统的闪电探测方法无法检测到母体 CG 闪电的位置, 因此 Event A 没有对应的

表 1 Ghost 事件的观测信息数据

Table 1 Data information of ghost observations examined in this study

事件	拍摄日期和UTC时间	拍摄经纬度	母体闪电经纬度	拍摄帧率/FPS	拍摄者
Event A	2021-09-20 02:41:40	18.048°N, 67.1136°W	无	30	Frankie Lucena
Event B	2020-05-25 03:55:19	35.5°N, 105.89°W	34.0804°N, 100.0996°W	30	Thomas Ashcraft
Event C	2022-04-30 07:33:41	38.275°N, 97.3108°W	38.4786°N, 93.3271°W	24	Paul Smith
Event D	2019-09-25 02:47:29	35.459°N, 97.374°W	37.7182°N, 97.37394°W	24	Paul Smith
Event E	2019-05-18 大约 05:05	大约 30.94°N, 101.09°W	无法确定	30	Hank Schyma
Event F	2019-05-18 大约 05:05	大约 30.94°N, 101.09°W	无法确定	30	Hank Schyma
Event G	2022-05-19 14:35:06	28.55°N, 90.4°E	25.5497°N, 88.1442°E	未知	安久、董书畅

母体闪电的经纬度. 红色精灵是一种发生在雷暴云上方中层大气 (约 50~90 km 高度) 的瞬态发光现象, 通常呈现红色. 其发生原理是雷暴中强地闪在中高层大气中的电场扰动引起的. 因此 Events B~G 均有对应的母体闪电, 其中 Events E、F 为发生同一母体雷暴, 由于没有发生 ghost 的具体时间和方位, 所以并没有找到对应的母体闪电, 其余事件对应母体闪电的经纬度如表 1 所示.

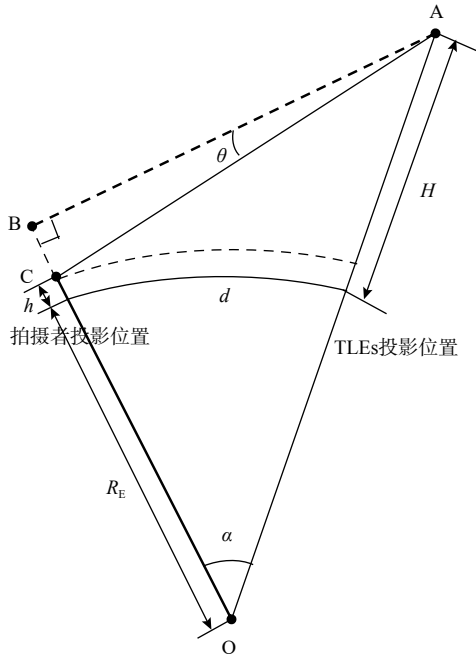


图 1 单站点和 TLEs 在地球表面上的角度定义和位置

Fig. 1 Angle definition and location of a single station on the earth

2 分析和结果

2.1 Ghost 的高度

为实现对 TLEs 的高度精确定位, 首先利用商用流星轨迹分析仪 UFO Analyzer, 这一工具可以根据星场对图像的中心方位角和仰角进行精确校正. 根据图像质量, 星星可以通过 UFO Analyzer 手动或自动识别. 软件反馈图像校正, 包括视场、像素长宽比、图像倾斜角、方位角和中心仰角. 模拟的恒星拟合到地对空卫星背景图像上的真实恒星上, 确定地对空卫星图像上每个像素点的方位角和仰角.

假设 TLEs 发生在其母体闪电的正上方, 通过闪电定位网确定闪电经纬度, 然后在水平面和垂直平面分别进行球面和平面三角函数来估算目标 TLEs 的高度. 如图 1 所示, R_E 为地球半径, h 为拍

摄者的高度, d 为拍摄点到 TLEs 发生的距离, H 为 TLEs 的高度, θ 为拍摄者获得 TLEs 时对应的仰角, α 是观测点与 TLEs 之间的地心角. 拍摄者投影位置为 (λ_1, φ_1) , TLEs 投影位置为 (λ_2, φ_2) . 在本文中, 所有计算均采用国际单位制.

$$d = R_E \times \cos^{-1} [\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos (\lambda_2 - \lambda_1) + \sin \varphi_1 \sin \varphi_2] \quad (1)$$

$$OB = (R_E + H) \times \cos \alpha \quad (2)$$

$$AB = (R_E + H) \times \sin \alpha \quad (3)$$

$$BC = (R_E + H) \times \sin \alpha \times \tan \theta \quad (4)$$

$$R_E + h = OB - BC = (R_E + H) \times \cos \alpha - (R_E + H) \times \sin \alpha \times \tan \theta \quad (5)$$

其中:

$$\alpha = \frac{d}{R_E} \quad (6)$$

进一步整理可得:

$$H = \frac{h + R_E}{\sin \left(\frac{d}{R_E} \right) \times \tan (-\theta) + \cos \left(\frac{d}{R_E} \right)} - R_E \quad (7)$$

利用计算得到的仰角及方位角在 UFO Analyzer 上进行星场定位, 可以求出每个像素的仰角. 利用公式 (7) 推导出 TLEs 的发生高度, 通过此方法可以计算得到 ghost 的高度.

本文利用此方法来估算 ghost 的高度. 由于事件与观测者之间的距离在 300~500 km 之间, 需要考虑地球曲率的影响. 如图 2 所示, 对于 Event A, 计算出 ghost 发生范围为 88~96 km, 最大值为 90 km; Event B 发生范围为 90~100 km, 最大值为 95 km; Event C 发生范围为 89~96 km, 最大值为 93 km; Event D 发生范围为 88~94 km, 最大值为 91 km; Event G 发生范围为 73~86 km, 最大值为 80 km. Ghost 的发生高度在 73~100 km 之间.

2.2 Ghost 发生的大气环境背景条件

对流层雷暴闪电是触发 TLEs 的主要激励源, 但并不是唯一因素, TLEs 的始发高度受背景大气参数 (如电子密度和中性空气密度) 的空间分布影响, 此外, 大气重力波、流星/陨石碎片以及闪电产生的电磁脉冲也会引起大气密度扰动, 对 TLEs 的生成过程具有显著影响 (Passas-Varo et al., 2023; 郗秀书等, 2009; 张金波等, 2019). 为分析大气环境对 ghost 的影响, 本文利用 MSIS-E-90 模型计算了不同高度的氧原子、氮气和氧气随高度的变

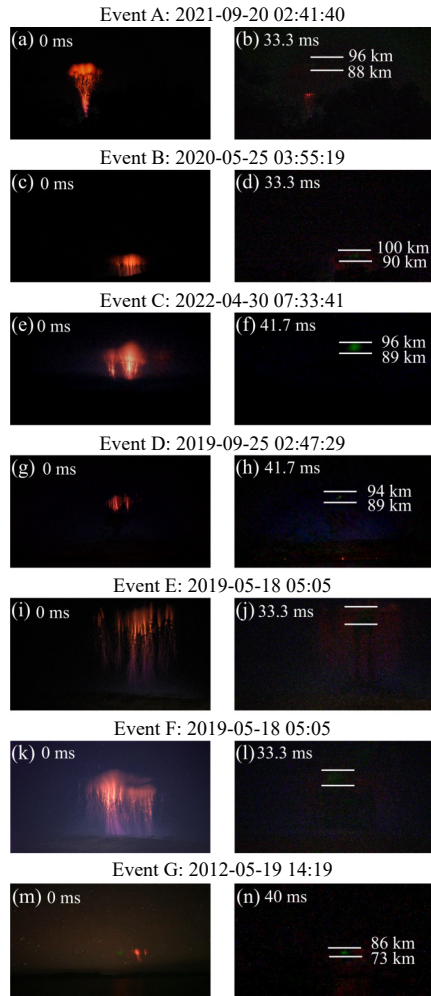


图 2 Ghost 及其伴随 TLEs 事件的原始图像

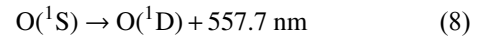
Fig. 2 Original image of ghost and associated TLEs

化梯度. 同时, 通过国际参考电离层 (IRI) 模型计算各个高度上电子密度 (N_e)、离子密度 (NO^+ 、 O_2^+) 的变化梯度. IRI 是由空间研究委员会 (COSPAR) 和国际无线电科学联盟 (URSI) 共同建立, 旨在为地球电离层等离子体参数提供标准化表示.

从图 3a 可以看出, 在 91 km 高度, 中性粒子的密度存在明显变化, 其中 O、 N_2 和 O_2 的变化梯度顺序为 $C > B > D > G > A$, 图 3b 为 N_e 、 N_2^+ 和 O_2^+ 随高度的变化, 其变化梯度为 $G > C > A > B > D$. Ghost 的观测高度主要集中在 88~100 km 之间, 其中最明显的亮度大约在 93 km 高度, 其中 Event G 发生的高度在 73~86 km, 相对低于其他事件, 但是对应的 N_e 却是变化最大的, 这表明背景 N_e 变化梯度对 ghost 的发生具有重要影响, ghost 通常出现在 N_2 、 O_2 和 N_e 的密度变化最显著的区域.

在 91 km 高度, 电子密度和粒子密度 (O 、 O_2^+) 急剧增加, 这意味着此高度具有大量的电子、O 和 O_2^+ . 从而增加了电子与这些粒子碰撞的可能性, 使

得电子更容易激发氧原子. 高能电子能够引发包括 TLEs、解离、附着和脱离在内的多种动力学过程 (Gordillo-Vázquez and Pérez-Invernón, 2021). O (557.7 nm) 的光学发射通过电子冲击分解 O_2 并通过与 N_2 ($C^3\Pi_u$) 的碰撞失活产生 (Gordillo-Vázquez and Pérez-Invernón, 2021; Zhang and Shepherd, 1999). 然后, O (1S) 通过与分子氧的碰撞去激发, 逐渐返回至其背景密度 (Parra-Rojas et al., 2015). 尽管存在其他氧发射线 (616.8 nm、630.0 nm), 但由于这些发射线的光强度仅为 557.7 nm 的 1/1000, 因此可以忽略其他氧发射线 (Kuo et al., 2012). 可以推测 ghost 现象的绿色可能源自 557.7 nm 的辐射发光, 这一波长也是极光和气辉中常见的发射线 (Parra-Rojas et al., 2015).



从公式 (8) 中可以看出, O (1S) 到 O (1D) 跃迁时伴随 557.7 nm 的辐射. Ghost 现象的持续时间少于 0.5 s, 这比 O (1D) 的理论持续时间 (0.7 s) 短 (Parra-Rojas et al., 2015). 比理论值小的原因可能由大气中对绿色波段 (557.7 nm) 的吸收和摄像机的有限灵敏度造成. 因此我们推测, 绿色光辐射主要是由 O (557.7 nm) 跃迁引起的 (Huang et al., 2024).

图 3 显示在 91 km 高度处, 存在大量活跃电子与电离的氧原子不断发生碰撞. 此高度下红色精灵的扩散区也存在大量活跃电子 (Pasko and Stenbaek-Nielsen, 2002), 这些电子可能生成新的电场, 促进更多的电子碰撞, 并导致 557.7 nm 波段的光学辐射. 基于这些观察, 我们推测在该高度, 绿色波段 (557.7 nm) 的产生受到大量活跃电子的影响, 这也间接表明红色精灵对绿色光谱线发射可能具有促进作用. 在红色精灵和巨大喷流的上空观察到 ghost 现象表明了 ghost 的发生机制可能具有一致性. 在 91 km 的高度, 还得到离子密度 (NO^+ 、 O_2^+) 的显著变化, ghost 的发生可能与 TLEs 的种类无关, 可能是该区域存在较多的电子和粒子. 当发生红色精灵和巨大喷流之后, 在它们顶部存在新的电场, 使得 O (1S - 1D) 跃迁更容易发生, 我们推测 ghost 的出现可能还与 NO^+ 、 O_2^+ 、 N_e 的密度廓线有关, 其密度变化最大所对应的高度可能是发生 ghost 的关键因素. 依据 IRI 模型得到的大气温度在 90 km 达到 185 K, 气压大约为 0.1 Pa, 一般来说在大气温度为 185 K 下比较难发生产生 O (1S - 1D) 的跃迁并

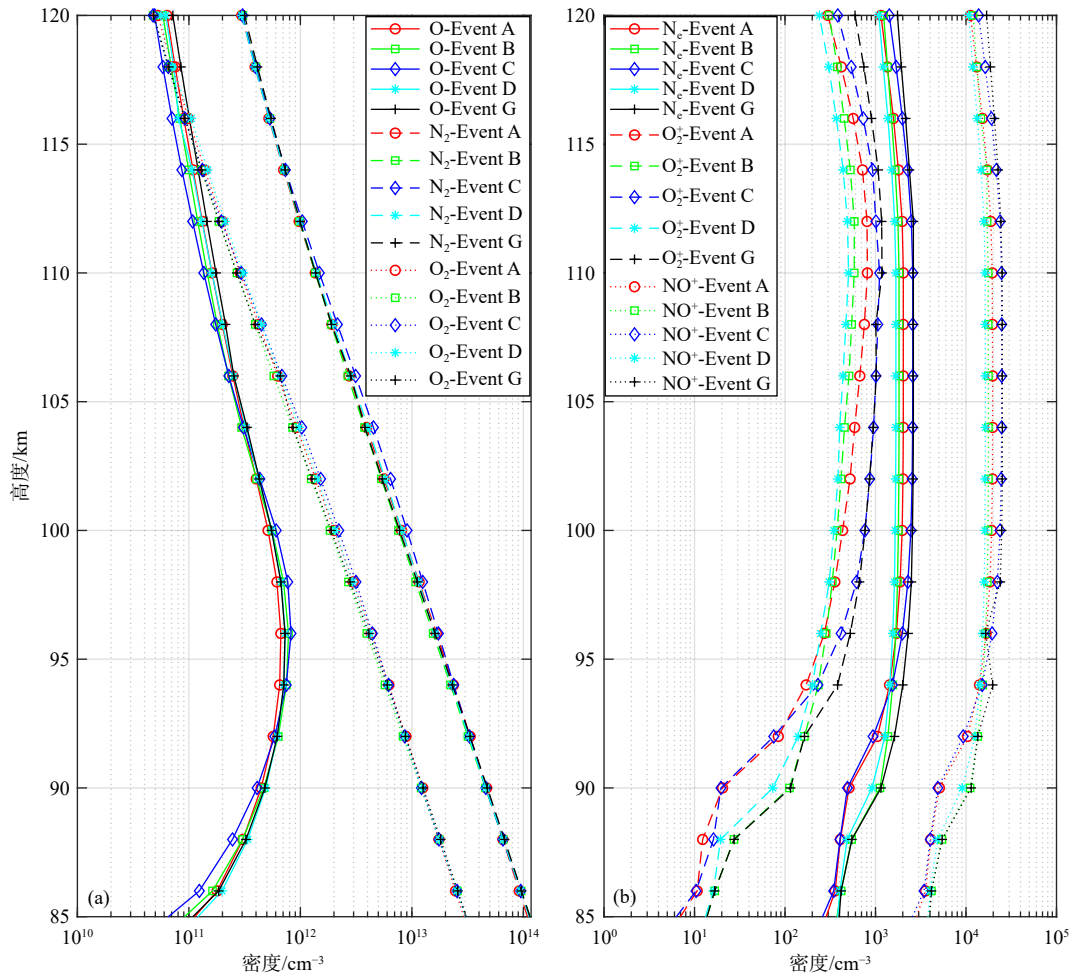


图 3 背景密度高度廓线. (a) MSIS-E-90 模型的中性粒子密度分布, 包括大气成分 (O 、 N_2 、 O_2). (b) IRI 模型的带电粒子密度分布 (N_e 、 O_2^+ 、 NO^+)

Fig. 3 Gradient of background density. (a) Neutral density profiles, including atmospheric constituents (O , N_2 , O_2) from the MSIS-E-90 model. (b) Charged particle density distribution (N_e , O_2^+ , NO^+) from the IRI model

放出 557.7 nm 波段, 因此红色精灵和巨大喷流顶部产生新的电场和粒子密度变大可能是 ghost 发生的条件之二.

2.3 Ghost 亮度变化速率分析

本文深入研究了六个事件随时间的演变. 通过采用 McHarg 等 (2007) 的方法, 对每个 ghost 事件计算每个时间 (列) 内的像素数, 而不考虑高度 (行). 将信号强度归一化为矩阵中最大的信号, 选择相同的事件列, 将所有 ghost 的像素数求和, 再将该数字除以高于阈值的总像素数 (McHarg et al., 2002). 如图 4a 所示, ghost 辐射强度迅速上升, 然后呈指数形式下降.

图 4b 给出 ghost 发光范围的变化 (包括扩展或收缩) 速率, 可见平均变化速率范围为 $(2 \sim 6) \times 10^{-3}$ m/s, 然后在第三帧迅速减小到几乎为零. 这一观测结果强调了这些辐射的短暂性. 为了综合

所有 ghost 事件的数据, 本文使用最大亮度列将单个分布对齐到一组统一的高度带中. 从图 4c 所示的合成数据中, 计算出扩散速率范围为 $(0.4 \sim 2) \times 10^4$ m/s, 到第三帧时明显减小. 计算得到 ghost 的扩散速度测量比 Raizer 等 (1998) 慢, 他们预测精灵流光的最大速度约为 2×10^7 m/s. Ghost 事件扩散率大大低于在流光放电中观察到的扩散率, 推测 ghost 可能是辉光放电的一种.

3 讨 论

作为最新发现的中高层放电现象类型, 本文对产生 ghost 的母体雷暴发展特征进行了分析, 这里以 Events B 和 C 为例进行分析. 图 5 为 NEXRAD Level II 雷达组合反射率因子图 (Event B 在 ALTUS AFB, Event C 在 KANSAS 城市, 对应仰角为 0.48°), 其中黑色点标记红色精灵母体闪电的位置, 图 5b、

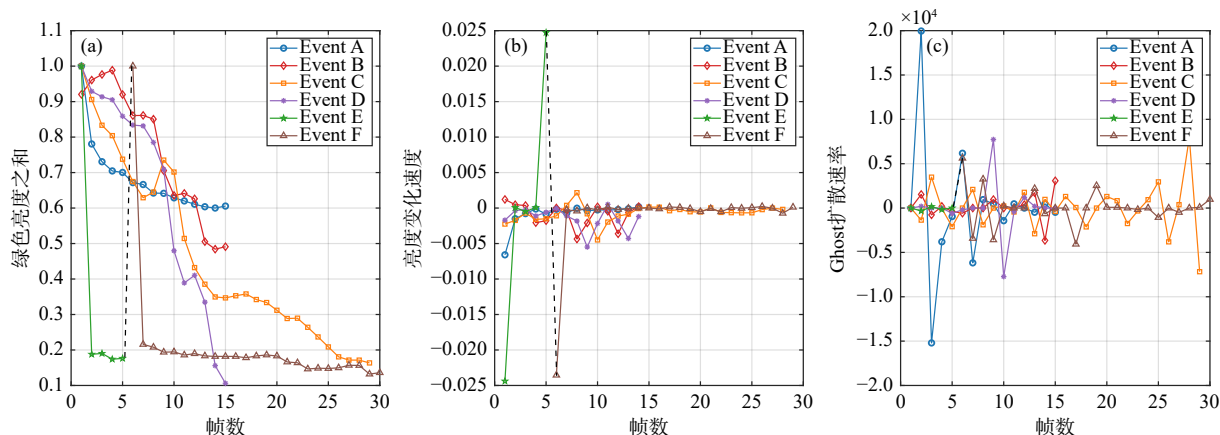


图4 Ghost事件亮度随时间的变化。(a) 绿色亮度之和; (b) 亮度变化速度; (c) 扩散速率

Fig. 4 Variation in the ghost intensity along time. (a) The sum of green brightness; (b) Velocities of brightness; (c) Diffusion rate of ghost

5e为最接近ghost发生时间的雷达图, 图5a、5d为ghost发生30 min前的雷达图, 图5c、5f为ghost发生30 min后的雷达图。图5显示ghost下方红色精灵对应母体闪电的位置与中尺度对流系统(mesoscale convective system, MCS)发展情况进行了对比。

从图5中可以看出, Event B的降水带呈现出向东方向移动, 随着中尺度对流系统的东移演化,

主体对流线在东侧逐渐转变为弧形回波结构, 而西侧以层状云区为主, 中尺度对流系统整体结构呈现显著的不对称结构, 直至04:23 UTC时中尺度对流系统逐渐消散。Event C的降水带呈现出向东南方向移动, 随着中尺度对流系统的东南方向移动, 主体对流线在北侧逐渐转变为弧形回波结构, 而北侧以层状云区为主, 中尺度对流系统整体结构呈现显著的不对称结构, 直至07:32 UTC时中尺度对流系统

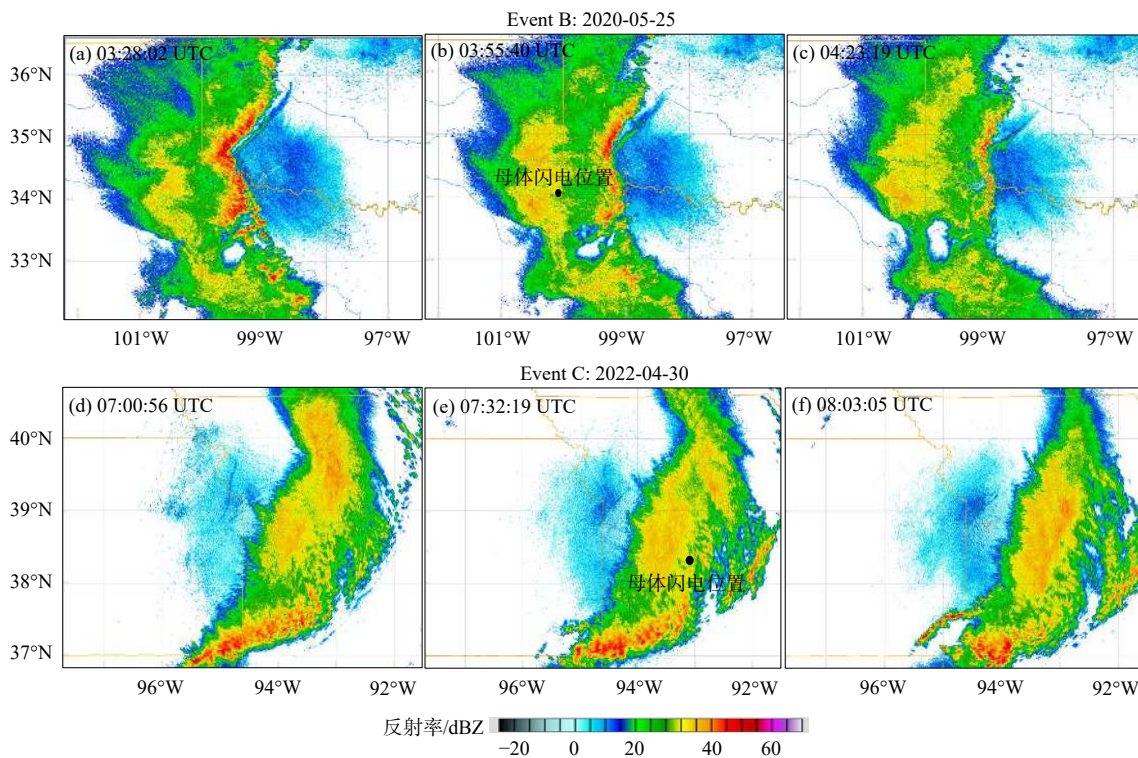


图5 Ghost事件相关的母体雷暴对应的NEXRAD LEVEL-II雷达组合反射率因子图(仰角为 0.48°)。黑点为ghost伴随红色精灵对应母体闪电的位置。Event B: (b) Ghost发生时; (a)和(c)分别为ghost发生前后30 min。Event C: (e) Ghost发生时; (d)和(f)分别为ghost发生前后30 min

Fig. 5 NEXRAD Level-II radar scan (elevation angle is 0.48°) of base reflectivity for the parent thunderstorm of ghost. The black dot marks the location of the parent stroke of the red sprite associated with ghost. Event B: (b) is when ghost occurred; (a) and (c) are 30 minutes before and after ghost. Event C: (e) is when ghost occurred; (d) and (f) are 30 minutes before and after ghost

逐渐消散. Ghost 发生在反射率 35~40 dBZ 的云区之上,并位于弧形深对流区后部.从青藏高原观测到的南亚地区雷暴产生的 ghost (Event G)也是发生在层状云区上空,且雷暴相对活跃(Huang et al., 2025).对比 ghost、红色精灵与母体闪电的空间位置可知,ghost 由层状云区边缘向雷暴内闪电活跃区传播,这可能与闪电活动所引起的电离层扰动有关.

进一步分析雷暴云的发展变化,通过与 ghost 发生前后的雷达组合反射率因子图进行对比,可以看出 ghost 发生时(Event B 对应时间为 03:55 UTC; Event C 对应时间为 07:32 UTC),中尺度对流系统处于减弱阶段,层状云区明显扩大. Ghost 发生于母体雷暴的消亡阶段,且位于对流区附近,这与红色精灵母体雷暴的发展特征一致(Lu et al., 2013). Ghost 发生在对流区附近可能是由于在较强的对流活动区,电荷在生长壮大的过程中极易被强上升气流冲散,因而很难形成电荷量充足的电荷又去触发大型红色精灵.与此同时,在弱降水区,通常认为是中尺度对流系统的层状云区,该区域的电荷区受强对流区不断的电荷供给可以存储大量电荷,并稳定发展,使得该区域的闪电在击中地面后可持续向地面输送电荷,同时向中高层持续输送能量从而触发红色精灵(Lu et al., 2013, 2022).因此,只要雷暴云内存在超大容量的电荷区,就有可能触发红色精灵,只要雷暴系统足够大,持续时间长,就有可能触发红色精灵群,从而触发 ghost 现象.综上所述,ghost 发生可能是该地区成熟雷暴对流活动减弱的一个信号.未来的研究可以结合其他观测数据(例如闪电定位数据、卫星观测等),对该事件进行更全面的分析.这种分析有助于改进对强对流天气和高空放电现象的预测和预警能力.

4 结 论

由于雷暴上空中高层放电现象的地基观测拍摄条件要求较高,较易受低云或前景云层遮挡的影响,获得高质量光学观测数据的难度较大,目前还没有形成完善的三维观测网.国内中高层放电现象的拍摄目前以天象爱好者为主体,通常只有单站观测数据,且一般缺少准确的时间和地点信息.针对目前有限 ghost 事件的地基观测,本文提出一种利用单站点并结合星场定位估算中高层大气瞬态发光事件高度的方法得到 ghost 的发生高度在 73~100 km

之间.

由于其产生机制的独特性,目前 ghost 现象较难被观测到,并且发生高度较高,普遍在 90 km 左右,研究该高度下的背景条件显得尤为重要.由于中高层大气是对流层到电离层之间的区域,且 ghost 的发生高度已经达到电离层 D 层,背景环境在此范围内有较大梯度变化,因此研究此背景条件对研究 ghost 具有十分重要的意义.本文利用 MSIS-E-90 大气模型和 IRI 电离层模型分析了这七个事件发生时的背景条件,包括中性粒子、离子和电子的密度.通过分析 O 、 N_2 、 O_2 、 N_e 、 O_2^+ 和 NO^+ 的密度廓线,发现 N_2 、 O_2 和 N_e 对 ghost 现象的发生具有显著影响,尤其是 N_e 的变化可以降低 ghost 的发生高度.这些分析可以更深入地理解了不同类型 TLEs 的发生机制及其与周围大气环境的关系. Ghost 的扩散率大大低于在流光放电中观察到的扩散率,证实 ghost 是辉光放电的一种形式.除此之外,还对母体雷暴系统进行分析,ghost 发生于母体雷暴成熟期的减弱阶段,位于具有较高降水反射率(35~40 dBZ)的对流区域上空,说明 ghost 现象的产生需要有较强能量释放的强地闪放电过程.

数据与来源

我们感谢华盛顿大学(University of Washington)提供全球闪电定位网 WWLLN (<https://data.ucar.edu/en/dataset/wwlln-lightning-data>)的闪电位置数据,感谢维萨拉公司(Vaisala Inc.)为所分析的事件提供 GLD360 (<https://www.vaisala.com/en/products/systems/lightning/gld360>)雷电探测数据.

致谢

感谢中高层放电现象爱好者 Frankie Lucena、Thomas Ashcraft、Paul Smith、Hank Schyma 和安久、董书畅无偿提供本文研究所需要的光学观测资料.

References

- Boggs L D, Liu N, Splitt M, et al. 2016. An analysis of five negative sprite-parent discharges and their associated thunderstorm charge structures[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(2): 759-784.
- Chum J, Urbář J, Laštovička J, et al. 2018. Continuous doppler sounding of the ionosphere during solar flares[J]. *Earth Planets and Space*, 70(1): 198.
- Franz R, Nemzek R, Winckler J. 1990. Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system[J]. *Science*, 249: 48-51.

- Füllekrug M, Moudry D R, Dawes G, et al. 2001. Mesospheric sprite current triangulation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D17): 20189-20194.
- Gordillo-Vázquez F J, Pérez-Invernón F J. 2021. A review of the impact of transient luminous events on the atmospheric chemistry: Past, present, and future[J]. *Atmospheric Research*, 252: 105432.
- Huang H L, Lu G P, An A, et al. 2025. Massive outbreak of red sprites in South Asia observed from the Tibetan Plateau[J]. *Advances In Atmospheric Sciences*, 42(6): 1247-1260.
- Huang X, Lu G, Liu F, et al. 2024. Enhancement of green ghosts due to recurrence of sprite element[J]. *Geophysical Research Letters*, 51: e2024GL108397.
- Jehl A, Farges T, Blanc E. 2013. Color pictures of sprites from non-dedicated observation on board the International Space Station[J]. *Journal of Geophysical Research*, 118: 454-461.
- Krehbiel P R, Riousset J A, Pasko, et al. 2008. Upward electrical discharges from thunderstorms[J]. *Nature Geoscience*, 1(4): 233-7.
- Kuo C L, Huang T Y, Chang S C, et al. 2012. Full-kinetic elve model simulations and their comparisons with the ISUAL observed events[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117 (A7): A07320.
- Li J, Cummer S, Lu G, Zigoneanu L. 2012. Charge moment change and lightning-driven electric fields associated with negative sprites and halos[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117 (A9): A09310.
- Liu N, McHarg M G, Stenbaek-Nielsen H C. 2015. High-altitude electrical discharges associated with thunderstorms and lightning[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 136: 98-118.
- Lu G, Cummer S A, Lyons W A, Krehbiel P R, et al. 2011. Lightning development associated with two negative gigantic jets[J]. *Geophysical Research Letters*, 38: L12801.
- Lu G, Cummer S A, Li J, Zigoneanu L, et al. 2013. Coordinated observations of sprites and in-cloud lightning flash structure[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(12): 6607-32.
- Lu G, Cummer S A, Tian Y, et al. 2016. Sprite produced by consecutive impulse charge transfers in a negative stroke: Observation and simulation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(8): 4082-4092.
- Lu G, Peng K M, Xian T, et al. 2022. Contrast between continental and oceanic thunderstorms in producing red sprites and halos[J]. *Frontiers of Earth Science*, 10: 961566.
- Lyons W. 2022. Inside the world of sprite chasing[J]. *Weatherwise*, 75: 14-23.
- McHarg M G, Haaland R K, Moudry D, Stenbaek-Nielsen H C. 2002. Altitude-time development of sprites[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 107(A11): SIA 9-1.
- McHarg M G, Stenbaek-Nielsen H C, Kammer T. 2007. Observations of streamer formation in sprites[J]. *Geophysical Research Letters*, 34: L06804.
- Mlynarczyk J, Bór J, Kulak A, et al. 2015. An unusual sequence of sprites followed by a secondary TLE: An analysis of ELF radio measurements and optical observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(3): 2241-2254.
- Neubert T, Allin T H, Blanc E, et al. 2005. Coordinated observations of transient luminous events during the EuroSprite2003 campaign[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67(8-9): 807-820.
- Omholt. 1971. The Optical Spectrum of Aurora [M]// The Optical Aurora. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 79-104.
- Parra-Rojas F C, Luque A, and Gordillo-Vázquez F J. 2015. Chemical and thermal impacts of sprite streamers in the Earth's mesosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(10): 8899-8933.
- Pasko V P, Stenbaek-Nielsen H C. 2002. Diffuse and streamer regions of sprites[J]. *Geophysical Research Letters*, 29(10): 82-1-82-4.
- Pasko V P, Qin J, Celestin S. 2013. Toward better understanding of sprite streamers: Initiation, morphology, and polarity asymmetry[J]. *Surveys in Geophysics*, 34(6): 797-830.
- Passas-Varo M, Van der Velde O, Gordillo-Vázquez F J, et al. 2023. Spectroscopy of a mesospheric ghost reveals iron emissions[J]. *Nature Communications*, 14: 7810.
- Qie X S, Lv D R, Bian J C, Yang J. 2009. Transient luminous events (TLEs) at high altitudes above thunderstorms and their possible effects[J]. *Advances in Earth Science*, 24(3): 286-296 (in Chinese).
- Qin J, Pasko V P, Mcharg M G. 2014. Plasma irregularities in the D-region ionosphere in association with sprite streamer initiation[J]. *Nature Communications*, 5(1): 3740.
- Raizer Y P, Milikh G M, Shneider M N, Novakovski S V. 1998. Long streamers in the upper atmosphere above thunderstorms[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31: 3255-3264.
- Schunr R W, Nagy A F. 2000. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry[M]. New York: Cambridge University Press.
- Sentman D, Wescott E, Osborne D, et al. 1995. Preliminary results from the Sprites94 Aircraft Campaign: 1. Red sprites[J]. *Geophysical Research Letters*, 22(10): 1205-1208.
- Sentman D D, Wescott E M, Picard R H, et al. 2003. Simultaneous observations of mesospheric gravity waves and sprites generated by a midwestern thunderstorm[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65(5): 537-550.
- Stenbaek-Nielsen H C, Haaland R, McHarg M G, et al. 2010. Sprite initiation altitude measured by triangulation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A3): A00E12.
- Stenbaek-Nielsen H, Ashcraft T, McHarg M, et al. 2020. Analysis and modeling of sprite green ghosts[R]. AGU 2020 Poster Draft.
- Valdivia J A, Milikh G, Papadopoulos K. 1997. Red sprites: Lightning as a fractal antenna[J]. *Geophysical Research Letters*, 24(24): 3169-3172.
- Wang Y, Lu G, 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.
- 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(7-9): 733-740.
- Wescott E M, Stenbaek-Nielsen H C, Sentman D D, et al. 2001. Tri-

- gulation of sprites, associated halos and their possible relation to causative lightning and micrometeors[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106(A6): 10467-10477.
- Zabotin N A, Wright J W. 2001. Role of meteoric dust in sprite formation[J]. *Geophysical Research Letters*, 28(13): 2593-2596.
- 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]. *Science China Earth Sciences*, 62: 631-642 (in Chinese).
- Zhang S P, Shepherd G G. 1999. The influence of the diurnal tide on the O (¹S) and OH emission rates observed by WINDII on UARS[J]. *Geophysical Research Letters*, 26(4): 529-532.

附中文参考文献

- 郑秀书, 吕达仁, 卞建春, 杨静. 2009. 中高层大气瞬态发光事件 (TLEs) 及可能的影响[J]. *地球科学进展*, 24(3): 286-296.
- 张金波, 张其林, 郭秀峰, 等. 2019. 大气重力波影响中高层 sprite halos 始发位置和光辐射形态的模拟研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 62: 631-642.