中国科学: 地球科学 2025 年 第 55 卷 第 1 期: 1 ~ 9
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

澳门科学一号卫星对闪电诱发电子沉降现象的首次观测结果

王庸平[1], 孙翌馨[2], 宗秋刚[2,3*], 陆高鹏[4], 顾旭东[5], 胡泽骏[1], 李斌[1]

1. 中国极地研究中心(中国极地研究所)自然资源部极地科学重点实验室, 上海 200136
2. 北京大学空间物理与应用技术研究所, 北京 100871
3. 澳门科技大学月球与行星科学国家重点实验室, 澳门 999078
4. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026
5. 武汉大学电子信息学院, 武汉 430072
* 通讯作者, E-mail: qgzong@pku.edu.cn

收稿日期: 2024-02-18; 收修改稿日期: 2024-08-03; 接受日期: 2024-08-19; 网络版发表日期: 2024-09-12
国家自然科学基金项目(42230202、42130210)、国家重点研发计划项目(2021YFA0718600、2023YFC808905)和中国科学院空间科学先导专项项目(XDA15350202)资助

摘要 中能电子探测器(Medium-energy Electron Spectrometers, MES)是澳门科学一号卫星(Macao Science Satellite-1, MSS-1)上载荷的探测仪器, 专门用于监测卫星轨道上的典型带电粒子辐射特征及其发生和发展过程, 包括闪电诱发电子沉降现象(Lightning-Induced Electron Precipitation, LEP). 本文介绍了MSS-1卫星对LEP的首次观测结果. 在初期3个月的运行中, MSS-1卫星共识别出47次LEP事件, 全部位于1.5<L<3.0(其中L为McIlwain L参数)的范围内, 并且还确定了LEP事件的诱发闪电的地理定位. LEP事件发生在诱发闪电后1s的时间内, 包含40~300keV的能量电子. 初步观测结果表明, 通过中能电子探测器, MSS-1卫星可以对大区域增强的背景粒子沉降进行原位观测, 并揭示其细微的时空分布和能谱特征. 南极长城站的VLF地基协同测量也与MSS-1的LEP观测结果有良好的对应. 观测结果还表明, 闪电活动对高能电子的能量-空间结构具有调制作用.

关键词 闪电诱发电子沉降, 内辐射带, 高能电子, 澳门科学一号卫星(MSS-1)

1 引言

闪电放电作为范艾伦辐射带中高能电子损失机制的概念最早由Dungey(1963)提出, 此后通过S81-1/SEEP卫星的直接测量得到了证实(Voss等, 1984). 闪电发出极低频段的电磁辐射, 电磁波在地球-电离层波导中传播, 并沿地球磁场线以哨声波模式逃逸至磁层(Bortnik等, 2006a, 2006b), 哨声波与辐射带内电子通过回旋共振相互作用, 导致能量范围从几keV到约1MeV的电子的投掷角散射. 投掷角定义为电子速度矢量与局部磁场之间的角度. 投掷角的变化会降低电子在跨越半球时的反射点, 使其进入损失锥, 最终导

中文引用格式: 王庸平, 孙翌馨, 宗秋刚, 陆高鹏, 顾旭东, 胡泽骏, 李斌. 2025. 澳门科学一号卫星对闪电诱发电子沉降现象的首次观测结果. 中国科学: 地球科学, 55(1): 1–9, doi: 10.1360/N072024-0056
英文引用格式: Wang Y, Sun Y, Zong Q, Lu G, Gu X, Hu Z J, Li B. 2025. First observation results of Macao Science Satellite-1 on lightning-induced electron precipitation. Science China Earth Sciences, 68(1): 1–10, https://doi.org/10.1007/s11430-024-1411-x

© 2024 《中国科学》杂志社

致其沉降到上层大气中(Bortnik等, 2006c). 这种现象通常被称为闪电诱发电子沉降(Lightning-Induced Electron Precipitation, LEP).

自20世纪80年代首次观测到LEP以来, 多个空间载荷已被应用于其研究工作中, 如S81-1/SEEP(Voss等, 1998)、SAMPEX(Blake等, 2001)、DEMETER(Inan等, 2007)、RBSP(Martinez-Calderon等, 2020)和NOAA-15(Chowdhury等, 2021). 此外, 在首次航天器测量之前, LEP已通过无线电探测(Rycroft, 1973; Pailoor和Cohen, 2022; Peter和Inan, 2007)、气球探测(Rosenberg等, 1971)和火箭探测(Rycroft, 1973)进行了研究. 作为地球大气层和磁层之间的强耦合现象, LEP在过去几十年中一直是各种观测研究的重点.

尽管闪电活动对辐射带内高能电子的影响已被广泛研究(Horne等, 2005; Thorne, 2010), 但导致电子损失的主要机制仍在讨论中. 研究工作聚焦于准确量化闪电放电直接引发的电子损失, 并评估偶发沉降事件对辐射带通量的影响(Colman和Starks, 2013; Ripoll等, 2015). Rodger(2003)通过对全球闪电分布的外推估算了LEP对辐射带的全球影响. 然而, 基于全球闪电模式的这些广泛假设需要通过更具体的LEP事件原位测量来进行验证比较.

这些研究工作通常由卫星观测开展, 如DEMETER卫星等(Inan等, 2007). 科学家基于DEMETER卫星2006~2008年的数据分析了126keV电子通量变化与年均夜间闪电活动强度之间的相关性(Gemelos等, 2009). Martinez-Calderon等(2020)使用来自范艾伦探测器的数据与国家闪电探测网(National Lightning Detection Network, NLDN)数据集进行比较, 指出了闪电发生率与探测到的电子通量变化之间的相关性. 然而, 卫星测量具有显著的随机性, 需要航天器、闪电活动和辐射带通量沉降区之间的偶然结合. 因此, 通过不同轨道倾角和高度的低轨道卫星对LEP事件的直接探测能够提供高分辨率的高能电子数据, 用于空间环境研究和建模, 这有望识别现有理论模型的不足之处.

本文介绍了澳门科学一号卫星(Macao Science Satellite-1, MSS-1)在过去3个月中的观测结果. 通过分析在此期间检测到的LEP事件的能量和时间结构, 得到了MSS-1的首次LEP观测结果. MSS-1对LEP的能谱测量提供了有关LEP过程和与地球闪电相关的辐射带损失过程的更全面精细的数据. 同时, MSS-1的数据也表明闪电活动对高能电子的能量-空间结构具有调制作用.

2 数据与方法

MSS-1卫星于2023年5月21日开始运行, 轨道高度450km, 轨道倾角41°. MSS-1卫星由两颗微卫星组成, 即MSS-1A和MSS-1B, 每颗微卫星都配备了高能电子光谱仪(Ye等, 2023). 这一科学任务提供了对地球局部磁场以及空间天气的持续探测, 以提高我们对地球内部和近地空间环境的了解.

本工作使用MSS-1卫星上的有效载荷中能电子探测器(Medium-energy Electron Spectrometers, MES)的观测数据. 中能电子探测器采用针孔成像技术, 覆盖了30~600keV的电子能量范围, 从9个方向以2s分辨率进行测量, 几何因子约为$2.0\times10^{-3}cm^2$ sr(九个方向的平均值). 中能电子探测器将30~600keV的能量电子分配到每个方向的八个指数分布的能量通道中, 以获取电子能量谱. 该仪器具有约12°的角分辨率, 覆盖了180°×30°的视场. 我们还使用来自中国南极长城站(GWS; 62.22°S, 58.96°W)的VLF(最高50kHz)数据, 以及来自全球闪电探测网络(Earth Networks Total Lightning Network, ENTLN)的闪电数据, 包含闪电位置、时间和峰值电流等信息. ENTLN用于匹配MSS-1卫星所观测到的LEP事件的诱发闪电. 同时, 南极长城站也接收到了相应的VLF数据.

ENTLN是一个全球闪电的探测网络, 自2009年开始运行. ENTLN探测器为宽带电场传感器, 能够有效地区分检测云闪(intra-cloud, IC)和地闪(cloud-to-ground, CG), 并提供每个闪电事件的时间、位置(纬度、经度和高度)、分类(IC或CG)和峰值电流等信息. ENTLN利用峰值脉冲时间差和完整的电场波形来定位闪电并区分IC和CG闪电, 其传感器目前有1800多个, 并分布在100多个国家. 自初次部署以来, ENTLN经过多次改进, 以提升其探测性能. 显著的改进包括每年增加许多新的传感器以提高检测效率及扩展全球覆盖范围, 同时也进行了固件升级以进一步提高灵敏度. ENTLN平均每秒可检测出约50次全球闪电事件. 如果地闪回击在700ms和10km范围内, 则将其统计成一次闪电事件. 尽管ENTLN为全球布设, 但其高密度网络覆盖主要位于美国大陆、阿拉斯加、夏威夷、加勒比

盆地、澳大利亚和巴西等地区. 2014年ENTLN的探测效率值在北美、中美洲和南美洲范围为85%~100%; 在欧洲和澳大利亚也为相近的探测效率; 在南非和南亚为70%~88%; 在北非和中亚为10%~63%. 在太平洋、大西洋和北印度洋, ENTLN的探测效率值范围为50%~100%(Bui等, 2015).

长城站位于南极半岛的亚极光带, 大约距离帕尔默(Peninsula)站370km, L值为2.32. VLF接收系统使用16位模数转换器, 采样率为250kHz, 能够接收频率范围为1~50kHz的人工和自然VLF信号, 动态范围灵敏度为110dB, 时间精度为100ns. 探测系统主要包括磁场天线、低噪声模拟前端、数字接收器、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)接收器和主计算机(Gu等, 2022). 在LEP探测点或其对称点距离南极长城站的VLF接收器1000km范围内时, 通常可以识别出哨声波和触发闪电(Voss等, 1998; Zheng等, 2016). 因此, 由于闪电位置距离较远或缺乏哨声模式波, 一些LEP事件未能在长城站观测到.

3　观测结果

自2023年5月21日开始运行以来, MSS-1卫星在夏季高闪电活动期间记录了47例LEP事件, 这些事件都位于1.5<L<3.0的范围内(其中L代表McIlwain L参数). 这种明显的纬度效应与Dungey(1963)的报道一致, 即哨声能量的频率范围限制了能够发生电子回旋共振的L值范围. Chang和Inan(1985)研究了哨声波引起的沉降L范围表明2<L<3为首选沉降区. 根据电子回旋共振理论, 沉降电子能谱随着L值的增加减弱. 然而, 电子通量的变化被证明是由不同过程的复杂混合所导致, 如径向扩散、ULF波(Elkington等, 2003)和哨声模式波(Horne等, 2005)加速, 以及由库仑碰撞和不同等离子体波的相互作用造成的回旋角扩散(Abel和Thorne, 1998), 这些不同的过程在闪电引起的电子沉降过程中起作用. 沉降电子的能量谱与L值的关系受到各种参数的影响, 即便沉降区域很大程度取决于径向距离和当地时间, 但仍存在许多不确定性(Friedel等, 2002; Green等, 2005).

LEP事件的电子能谱在约40~300keV的能量范围内具有明显的窄峰. 电子通量的包络线在几秒钟内相对缓慢地衰减到背景水平. 我们以2023年6月1日和9日的两个LEP事件为例. 图1a和图1b显示了这两个事件及相关闪电的地理位置. LEP事件的基本特征表现为宽能量范围内的短暂沉降电子通量爆发, 并伴随有强烈的哨声波信号或VLF数据中的强闪电信号. VLF时频谱中的垂直线是地闪回击产生的电磁波, 水平线则由人工源VLF发射器产生(见图1e~1h). 同时, VLF数据也显示了闪电活动的时间变化. 闪电信号与LEP事件之间的时间延迟等于从大气到相互作用区(接近赤道平面)的哨声波传播时间加上俘获电子从相互作用区到MSS-1卫星的传播时间. 闪电信号的峰值时间比LEP事件的峰值时间早约0.4~0.6s. LEP相对于闪电位置的偏移主要受地球磁场控制, 但通常会偏向极区方向(Peter和Inan, 2007).

由图1可见, MSS-1卫星的MEED电子能谱图显示了LEP事件的基本特征, 与已有报道基本一致(Voss等, 1998; Inan等, 2007). 图1i~1l显示, MEED能谱图和积分通量图随时间的变化显示出宽能量背景下的通量爆发. 沉降电子的能谱呈现为从约40keV到300keV的宽分布. 这种能量分布符合电子回旋共振理论的预估, 因为涉及到范围广泛的波频率和电子回旋频率. Inan等(1989)利用回旋共振模型表明沉降电子通量为约90~300keV的能量分布. 然而, 这些计算基于假设哨声波的能量低于6kHz的频率. 6kHz以上的哨声波成分将使沉降电子的能量降低到90keV以下. Voss等(1998)也指出闪电回击与较低能量(45keV)的沉降电子有关. 我们在观测结果中也确认了这一观点, 即闪电放电过程发射的高频电磁波也会影响电子沉降过程.

图2a展示了2023年6月7日MSS-1卫星探测到的LEP事件(彩色条带)和触发闪电的地理位置(红色叉号). 强雷暴位于南非东南部, 在MSS-1卫星经过期间共检测到约950次闪电, 并在雷暴北侧观测到一个电子通量增强区域. 随着MSS-1向雷暴东南移动, LEP通量的强度增加, 同时GWS和ENTLN的数据显示出稳定的闪电活动. 图2h和2i显示了在南极长城站接收到的宽带VLF数据的同步时频图, 以及峰值电流的时间变化. 图2j和2k为电子通量能谱和积分通量(40~300keV). 电子通量和积分通量的峰值与图2中的三组箭头序列所标注的正地闪回击相吻合. 图2b~2d和2e~2g分别为上述三个正地闪回击的波形和时频图. 电子通量能谱的强度似乎与VLF时频图的强度无关, 而是与触发闪电在L值的位置有关. 这与LEP事件的沉降通量和发生

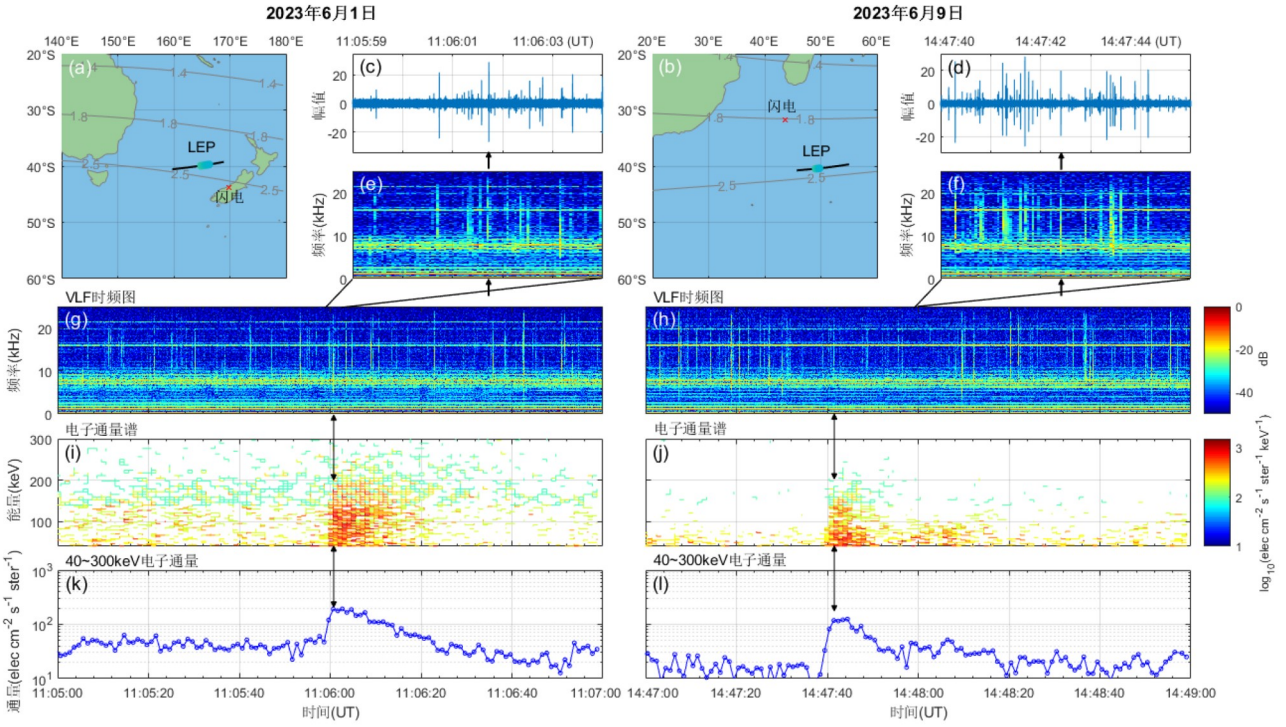


图 1　MSS-1于2023年6月1日和9日记录的LEP事件

(a)和(b)示意LEP位置和触发闪电位置, 以及MSS-1卫星的轨迹. 黑色粗线表示卫星轨迹, 彩色条带表示电子沉降通量. (c)和(d)为长城站VLF数据波形图; (e)~(h)为长城站VLF数据时频图; (i)和(j)为MSS-1卫星上的中能电子探测器的沉降电子能量谱; (k)和(l)为40~300keV能量电子的积分通量

还受多种因素影响有关, 这些影响因素包括母体闪电强度、局地地磁条件和雷暴强度等. 此外, 闪电引起的电子沉降通量变化与亚暴活动相关的电子通量变化是同一个量级的, 即使在低L值情况下也是如此.

17:34:00UT之前的电子通量水平代表了在卫星通过期间通常观测到的背景通量水平. 根据VLF时频图, 两个由闪电触发的LEP事件发生在17:34:10.46和17:34:17.56UT, 并且没有明显的离散回波结构(见图2j), 这可能是由于两个相邻LEP事件的重叠. 这可能与地闪回击之间的距离约为40km, 而在卫星高度下, 波导宽度或有效相互作用区的间距至少为80km有关. Clilverd等(2002)使用Trimpi特征计算了LEP事件的空间范围, 发现LEP区域的长度约为1500km, 宽度为600km, 长轴方向为东西向. 图2i显示更强的地闪首次回击并没有产生更强的LEP事件, 相比之下, 较弱的后续回击却产生了强度相近的LEP. 我们认为这可能与闪电向辐射带注入的能量的"加热"效应有关. 值得注意的是, 在17:33:18.37和17:33:24.60UT(见图2a和2i中的蓝色叉号和蓝色峰值电流)周围也发生了一系列相对强烈的闪电, 但未观测到相应的LEP事件, 这可能是由于当时MSS-1卫星距离沉降区域过远.

如上文所述, 在局部雷暴中的高闪电频率可能会增强并维持广泛区域的电子沉降. 此外, 由于更频繁闪电活动产生的磁层反射哨声波(通常在700km以上)也可能有助于大范围的持久电子沉降(Bortnik等, 2006c). 因此, 我们还检查了存在电子沉降时雷暴的特征. 以2023年5月30日位于南非东部的雷暴为例, 纬度范围24.5°~36.0°S, 经度范围25°~30°E. 图3a为从18:00至18:30UT的局地闪电活动(颜色随时间变化从蓝色变为红色)以及LEP发生位置. 白色十字表示LEP的诱发闪电. ENTLN表明在18:00~18:30UT时间内研究区域共产生720次地闪, 地闪回击频率约为每分钟24次(见图3b), 并且大多数为负云对地闪电(见图3c). 闪电峰值电流的平均值约为16.2kA, 约23.2%(167次闪电)的峰值电流大于20kA. 在720次闪电中, 有4次峰值

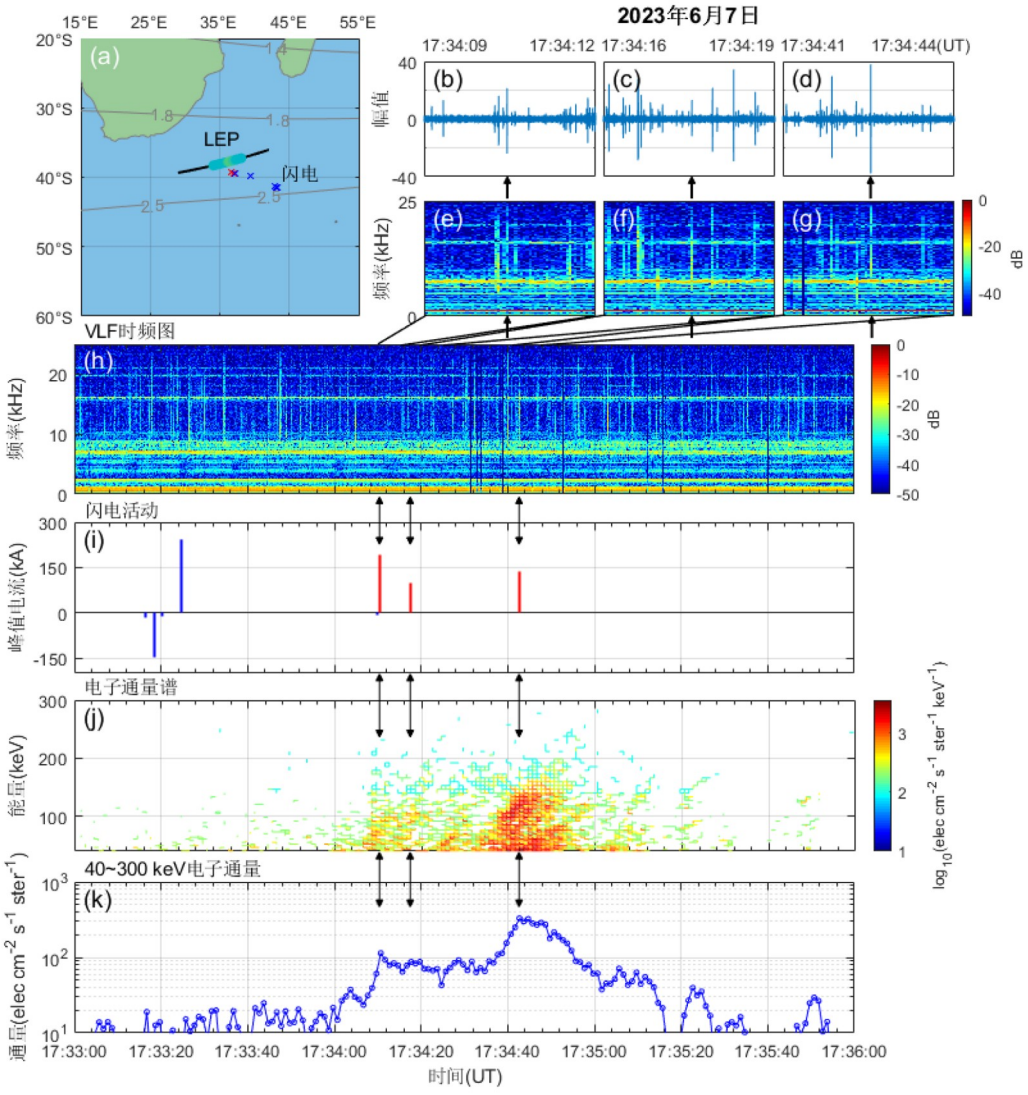


图 2　MSS-1于2023年6月7日和9日记录的LEP事件

(a) LEP位置和诱发闪电位置, 以及MSS-1卫星的轨迹. 随着卫星向东移动进入沉降区域, 电子通量强度增强. 黑色粗线表示卫星轨迹, 彩色条带表示电子沉降通量. (b)~(d) 南极长城站的VLF数据波形; (e)~(h) 南极长城站的VLF数据的时频图; (i) 全球闪电探测网络(Earth Networks Total Lightning Network, ENTLN)探测到的闪电活动; (j) MSS-1卫星载荷中能电子探测器的电子通量谱; (k) 40~300keV能量电子的积分通量

电流大于70kA, 最大峰值电流为94.6kA. 图3d和3e为沉降电子通量和积分通量(40~300keV). 沉降电子通量的峰值与正地闪回击相关, 如图中箭头所示. 为了更好地比较电子通量与雷暴过程随时间的关系, 我们使用了更大的时间窗口. 可以观测到, 尽管雷暴中的闪电活动频繁, 但并不是总能触发电子沉降. 这表明电子沉降的发生与闪电的位置有关. 图3f~3h分别表示了诱发闪电的时频图、磁场波形图和触发闪电峰值电流强度.

与Martinez-Calderon等(2020)的报道一致, 沉降电子通量与闪电活动频率以及闪电放电强度之间的关系相对较弱. 然而, 值得注意的是, LEP似乎更倾向于由正云地闪产生, 我们认为这与正地闪的放电持续时间比负地闪更长有关(Berger等, 1975; Chowdhuri等, 2005; Zhu等, 2015). 较长时间的放电过程可以使哨声波有更多的能量维持更长时间的电子回旋共振作用, 从而导致辐射带俘获电子的投掷角散射增加. 由于目前可用的观测数据有限, 还需进一步积累, 相关研究

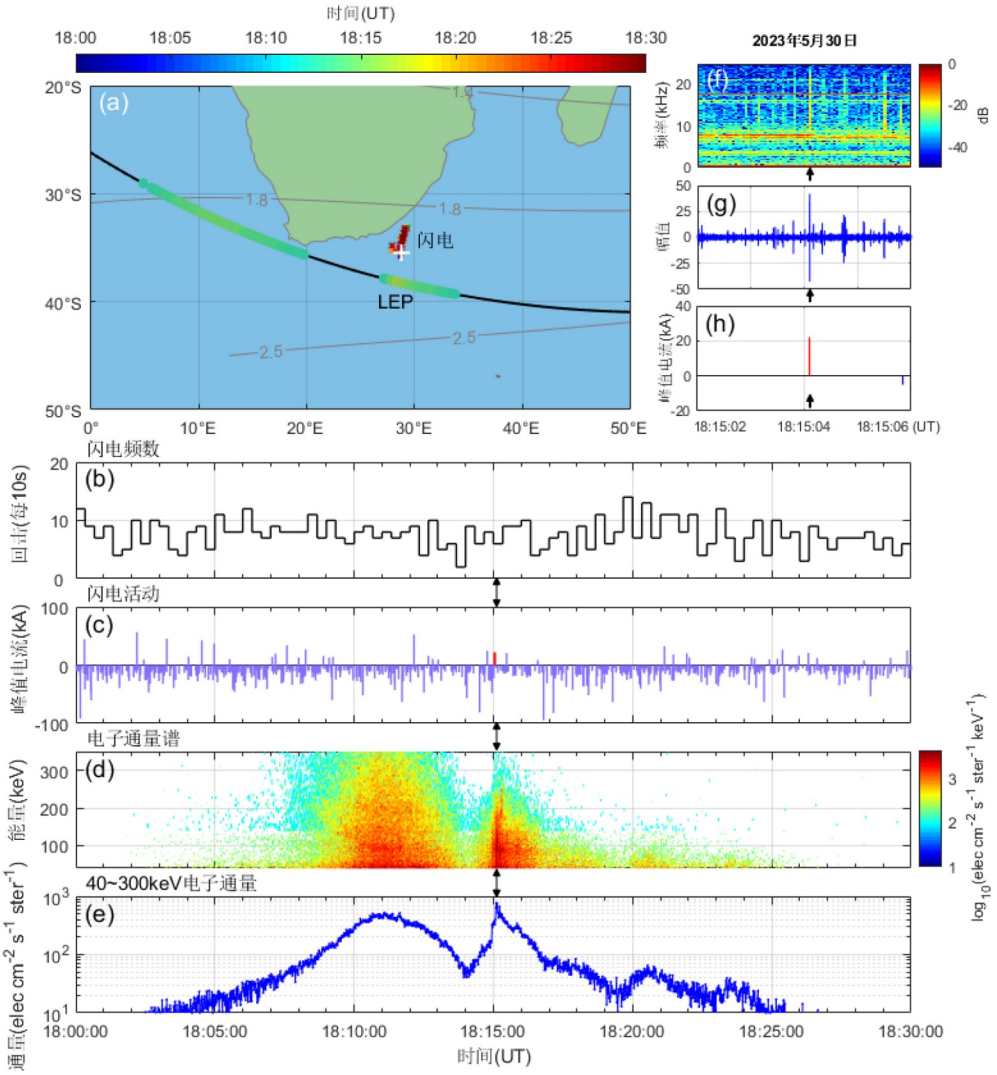


图 3　MSS-1于2023年5月30日记录的LEP事件

(a) 2023年5月30日18:00~18:30UT局地雷暴中的闪电活动, 颜色随时间从蓝色到红色. 白色十字表示LEP的诱发闪电, 粗黑色线表示卫星轨迹, 彩色条带表示电子沉降通量. (b) 10s间隔的地闪频次; (c) ENTLN探测到的闪电活动; (d) MSS-1卫星载荷中能电子探测器的电子通量谱; (e) 40~300keV能量电子的积分通量; (f) 长城站VLF数据时频图; (g) 长城站VLF数据波形图; (h) 诱发闪电的峰值电流强度

将在后续工作中进行.

4　闪电对高能电子能量-空间结构的扰动

由于南大西洋异常区(South Atlantic Anomaly, SAA)地磁场极其微弱, 使其成为了磁层中高能粒子更容易进入的区域. 闪电引起的沉降电子也更容易从这个区域进入地球大气层. SAA的较低反射高度导致更多的俘获电子与大气相遇, 强烈的大气散射使俘获电子的投掷角分布变宽. 此外, 一些电子会在南北半球之间磁反射和反向散射, 这可能产生一个持续时间长达20s或更长时间的强度递减的脉冲列(Marshall等, 2019). 因此, 当MSS-1卫星通过SAA时, 可以在MEED数据中识别出持续时间较长的LEP事件. 此外, MSS-1卫星还观测到了SAA中高能电子的显著“斑马条纹(zebra stripe)”结构. “斑马条纹”是指内辐射带中, 能量在几十到几百keV范围内分布的高能电子能量-空间分布结构. 由于地球磁场几乎为偶极型的梯度和曲率效应,

俘获电子围绕地球进行的缓慢经向漂移运动. 漂移频率取决于电子能量和L值. 电子能量谱中单个斑马条纹的能量取决于径向距离, 这意味着每条斑马条纹上的电子漂移频率是恒定的.

有趣的是, 在闪电活动期间我们观测到斑马条纹结构发生变化(见图4). Liu等(2016)表明斑马条纹结构是由电子在单一单色或静态方位电场下的运动产生的. 这个电场由地球自转引起的共转区域(大约4R_E或更小)中的电场和太阳风与行星磁场相互作用在共转区域外部产生的电场组成. 由于磁偶极轴和行星自转轴之间约11°的偏移, 整个共转区域相对于外部磁层以24小时的周期发生振荡. 这种相对运动导致了整个共转区域的全球日变化磁场扰动. 由于内辐射带电子嵌入在共转区域内, 它们围绕地球的漂移运动受到这些日变化扰动产生的感应电场的影响(Ukhorskiy等, 2014). 在共转区域外部, 尽管太阳风与地球磁场相互作用生成的大规模黎明到黄昏的对流电场可以被内磁层中粒子漂移产生的黄昏到黎明的极化电场屏蔽, 但磁层对流的快速变化仍然可以在屏蔽机制的基础上导致电场穿透内磁层和低纬度电离层(Liu等, 2016). 闪电活动是一种全球机制, 独立于太阳风活动和地球磁场变化, 且与闪电活动相关的电子通量变化与亚暴活动的变化量级相当, 即使在低L值情况下也是如此(Martinez-Calderon等, 2020). 因此, 可以推断内辐射带高能粒子与闪电产生的哨声波的漂移共振相互作用也能调节高能电子能量-空间分布结构.

在雷暴期间, 内辐射带受到闪电活动驱动的额外扰动影响. 闪电能量注入增加了内辐射带中电子的能量, 导致更多的场向电子散射. 如图4的左侧所示, 2023年5月28日(L>2)的闪电活动增强了电子沉降通量, 且沉降电子通量仍然显示出明显的斑马条纹模式. 同时, 由于形成条纹的电场扰动的存在, 电子能量不再守恒, 电子不会在由其能量定义的恒定频率下做圆形轨道漂移. 因漂移频率依赖于赤道投掷角, 小L值内的被困电子会导致电子能量谱中条纹位置的变化. 图4的右侧显示, 在低L值区域, 闪电引起的扰动可以改变

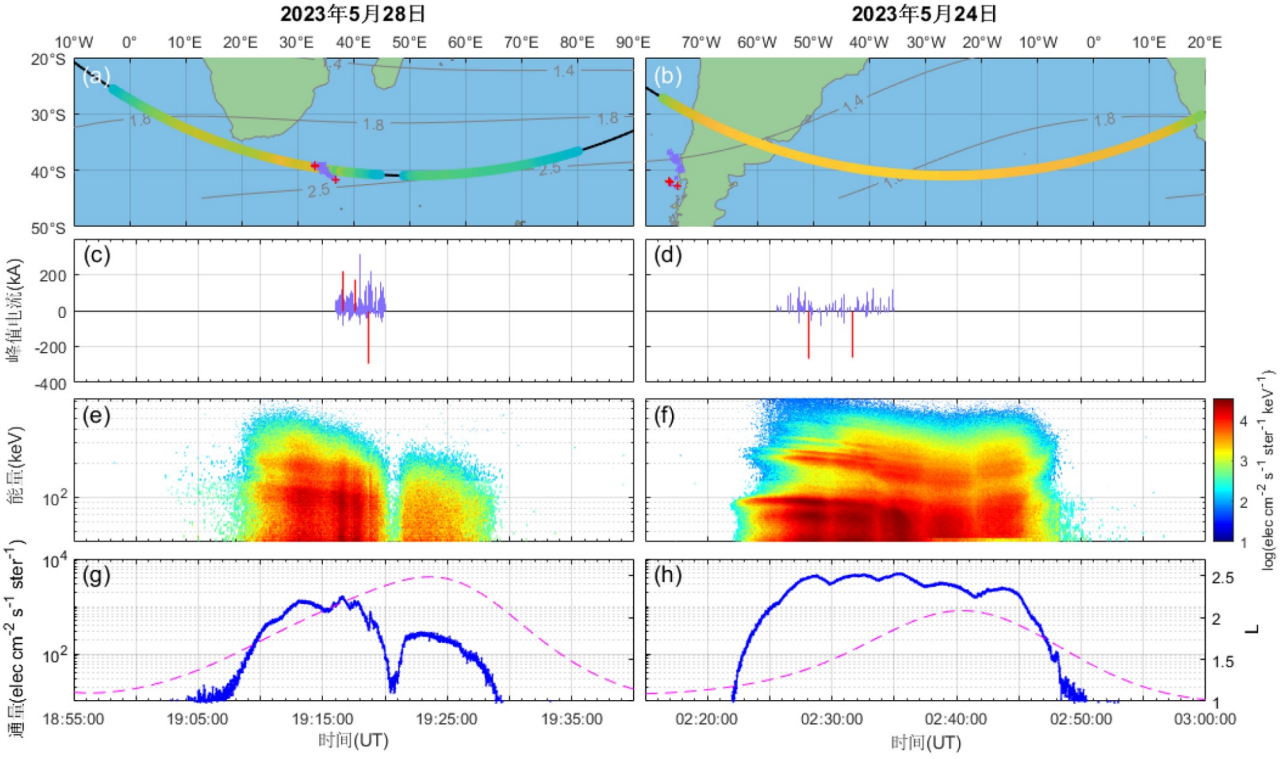


图 4　MSS-1卫星分别于2023年5月28日和24日记录的高能电子沉降事件

(a)和(b) 示意电子沉降和触发闪电的位置, 以及MSS-1卫星的轨迹. 黑色粗线表示卫星轨迹, 彩色条带表示电子沉降通量. (c)和(d) ENTLN探测到的闪电活动; (e)和(f) MSS-1卫星载荷中能电子探测器的电子通量谱; (g)和(h) 40~300keV能量电子的积分通量

2023年5月24日(L<2)高能电子的斑马纹结构. 两个LEP事件及其相关闪电的地理位置见图4a和4b. 图4c和4d显示了两例触发闪电的峰值电流强度. 图4e~4h分别显示了两个示例的电子通量能谱和积分通量(40~300keV). 因此, 可以猜测尽管闪电活动不能显著扰乱地球俘获电子的斑马条纹模式, 但在特定位置的强烈闪电活动可以影响这些结构. 还需要相关工作以了解闪电活动期间哨声波在扰动斑马条纹中的潜在作用. 此外, 由于闪电放电是脉冲放电过程, 其所产生的哨声波并不持久, 因此我们没有观测到高能电子能谱中回旋共振电子的显著能量分散. 然而, 目前对闪电和LEP的研究仍主要集中在定量确定闪电诱发电子沉降的时空特征和能谱特征方面, 以及VLF信号扰动与LEP之间的量化关系(Cotts等, 2011; Gołkowski等, 2014; Bourriez等, 2016; Chowdhury等, 2021). 对闪电与斑马条纹结构增强之间的相关性研究有限. 由于当前可用数据有限, 我们将在未来工作中对S81-1/SEEP、DEMETER、POES和RBSP等卫星的数据进行更深入的分析, 以更好地理解它们之间的相互关系.

5 结论

本文报道了MSS-1卫星对闪电诱发的电子沉降的首次观测结果. 自MSS-1卫星发射以来, MSS-1卫星已经收集了过去3个月的数据, 并记录了可靠的高能沉降粒子研究数据. 在3个月的观测数据中, 共识别出47例LEP事件, 所有事件均在1.5<L<3.0的范围内. 沉降区域相对于触发闪电的极向位移与以往观测结果一致. LEP事件主要由40~300keV能量的电子组成, 这些电子在诱发闪电注入的哨声波到达辐射带后不到1s内沉降到观测点. 观测结果还表明闪电活动对高能电子的能量-空间结构具有调制作用. 这些测量可以帮助更好地理解LEP过程在辐射带电子损失中的作用, 为监测空间天气事件提供了独特的机会, 并有助于更好地理解近地空间中的空间物理过程.

致谢 感谢MSS任务及所有参与MES仪器开发的科研人员. ENTLN提供了雷电数据, Steve PRINZIVALLI博士和Jeff LAPIERRE博士给予有益帮助, 中国子午工程二期和中国南极长城站对VLF波探测项目提供支持, 吕凡超教授和李伟博士为本研究提供闪电验证数据并进行有益讨论, 两位审稿人和责任编委的评审意见帮助文章提升了质量, 在此一并致谢.

参考文献

Abel B, Thorne R M. 1998. Electron scattering loss in Earth's inner magnetosphere: 1. Dominant physical processes. J Geophys Res, 103: 2385–2396

Berger K. 1975. Parameters of lightning flashes. Electra, 80: 223–237

Blake J B, Inan U S, Walt M, Bell T F, Bortnik J, Chenette D L, Christian H J. 2001. Lightning-induced energetic electron flux enhancements in the drift loss cone. J Geophys Res, 106: 29733–29744

Bortnik J, Inan U S, Bell T F. 2006a. Temporal signatures of radiation belt electron precipitation induced by lightning-generated MR whistler waves: 1. Methodology. J Geophys Res, 111: A02204

Bortnik J, Inan U S, Bell T F. 2006b. Temporal signatures of radiation belt electron precipitation induced by lightning-generated MR whistler waves: 2. Global signatures. J Geophys Res, 111: A02205

Bortnik J, Thorne R M, O'Brien T P, Green J C, Strangeway R J, Shprits Y Y, Baker D N. 2006c. Observation of two distinct, rapid loss mechanisms during the 20 November 2003 radiation belt dropout event. J Geophys Res, 111: A12216

Bourriez F, Sauvaud J A, Pinçon J L, Berthelier J J, Parrot M. 2016. A statistical study over Europe of the relative locations of lightning and associated energetic burst of electrons from the radiation belt. Ann Geophys, 34: 157–164

Bui V Y, Chang L C, Heckman S. 2015. A performance study of earth networks total lighting network (ENTLN) and worldwide lightning location network (WWLLN). In 2015 international conference on computational science and computational intelligence (CSCI). 386–391

Chang H C, Inan U S. 1985. Lightning-induced electron precipitation from the magnetosphere. J Geophys Res, 90: 1531–1541

Chowdhuri P, Anderson J G, Chisholm W A, Field T E, Ishii M, Martinez J A, Marz M B, McDaniel J, McDermott T E, Mousa A M, Narita T, Nichols D K, Short T A. 2005. Parameters of lightning strokes: A review. IEEE Trans Power Deliver, 20: 346–358

Chowdhury S, Sasmal S, Brundell J, Chakraborty S, Bhattacharjee A, Chakrabarti S K. 2021. Energetic electron precipitation during lightning activities over Indian landmass as observed from WWLLN and NOAA-15 satellite. Adv Space Res, 68: 4205–4216

Clilverd M A, Nunn D, Lev-Tov S J, Inan U S, Dowden R L, Rodger C J, Smith A J. 2002. Determining the size of lightning-induced electron precipitation patches. J Geophys Res, 107: 1168

Colman J J, Starks M J. 2013. VLF wave intensity in the plasmasphere due to tropospheric lightning. J Geophys Res Space Phys, 118:

4471–4482

Cotts B R T, Inan U S, Lehtinen N G. 2011. Longitudinal dependence of lightning-induced electron precipitation. J Geophys Res, 116: A10206

Dungey J W. 1963. Loss of van allen electrons due to whistlers. Planet Space Sci, 11: 591–595

Elkington S R, Hudson M K, Chan A A. 2003. Resonant acceleration and diffusion of outer zone electrons in an asymmetric geomagnetic field. J Geophys Res, 108: 1116

Friedel R H W, Reeves G D, Obara T. 2002. Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere—A review. J Atmos Sol-Terrestrial Phys, 64: 265–282

Gemelos E S, Inan U S, Walt M, Parrot M, Sauvaud J A. 2009. Seasonal dependence of energetic electron precipitation: Evidence for a global role of lightning. Geophys Res Lett, 36: L21107

Gołkowski M, Gross N C, Moore R C, Cotts B R T, Mitchell M. 2014. Observation of local and conjugate ionospheric perturbations from individual oceanic lightning flashes. Geophys Res Lett, 41: 273–279

Green J L, Boardsen S, Garcia L, Taylor W W L, Fung S F, Reinisch B W. 2005. On the origin of whistler mode radiation in the plasmasphere. J Geophys Res, 110: A03201

Gu X, Wang Q, Ni B, Xu W, Wang S, Yi J, Hu Z J, Li B, He F, Chen X C, Hu H Q. 2022. First results of the wave measurements by the WHU VLF Wave Detection System at the Chinese great wall station in antarctica. J Geophys Res Space Phys, 127: e2022JA030784

Horne R B, Thorne R M, Shprits Y Y, Meredith N P, Glauert S A, Smith A J, Kanekal S G, Baker D N, Engebretson M J, Posch J L, Spasojevic M, Inan U S, Pickett J S, Decreau P M E. 2005. Wave acceleration of electrons in the Van Allen radiation belts. Nature, 437: 227–230

Inan U S, Piddyachiy D, Peter W B, Sauvaud J A, Parrot M. 2007. DEMETER satellite observations of lightning-induced electron precipitation. Geophys Res Lett, 34: L07103

Inan U S, Walt M, Voss H D, Imhof W L. 1989. Energy spectra and pitch angle distributions of lightning-induced electron Precipitation: Analysis of an event observed on the S81-1(SEEP) satellite. J Geophys Res, 94: 1379–1401

Liu Y, Zong Q G, Zhou X Z, Foster J C, Rankin R. 2016. Structure and evolution of electron “zebra stripes” in the inner radiation belt. J Geophys Res Space Phys, 121: 4145–4157

Marshall R A, Xu W, Sousa A, McCarthy M, Millan R. 2019. X-ray signatures of lightning-induced electron precipitation. J Geophys Res Space Phys, 124: 10230–10245

Martinez-Calderon C, Bortnik J, Li W, Spence H, Claudepierre S G, Douma E, Rodger C J. 2020. Comparison of long-term lightning activity and inner radiation belt electron flux perturbations. J Geophys Res Space Phys, 125: e2019JA027763

Pailoor N, Cohen M. 2022. A large database of lightning-induced electron precipitation events. J Geophys Res Space Phys, 127: e2022JA030683

Peter W B, Inan U S. 2007. A quantitative comparison of lightning-induced electron precipitation and VLF signal perturbations. J Geophys Res, 112: A12212

Ripoll J F, Chen Y, Fennell J F, Friedel R H W. 2015. On long decays of electrons in the vicinity of the slot region observed by HEO3. J Geophys Res Space Phys, 120: 460–478

Rodger C J. 2003. Subionospheric VLF perturbations associated with lightning discharges. J Atmos Sol-Terrestrial Phys, 65: 591–606

Rosenberg T J, Helliwell R A, Katsufrakis J P. 1971. Electron precipitation associated with discrete very-low-frequency emissions. J Geophys Res, 76: 8445–8452

Rycroft M J. 1973. Enhanced energetic electron intensities at 100 km altitude and a whistler propagating through the plasmasphere. Planet Space Sci, 21: 239–251

Thorne R M. 2010. Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle interactions. Geophys Res Lett, 37: L22107

Ukhorskiy A Y, Sitnov M I, Mitchell D G, Takahashi K, Lanzerotti L J, Mauk B H. 2014. Rotationally driven ‘zebra stripes’ in Earth’s inner radiation belt. Nature, 507: 338–340

Voss H D, Imhof W L, Walt M, Mobilia J, Gaines E E, Reagan J B, Inan U S, Helliwell R A, Carpenter D L, Katsufrakis J P, Chang H C. 1984. Lightning-induced electron precipitation. Nature, 312: 740–742

Voss H D, Walt M, Imhof W L, Mobilia J, Inan U S. 1998. Satellite observations of lightning-induced electron precipitation. J Geophys Res, 103: 11725–11744

Ye Y G, Li J W, Huang C, Zou H, Zong Q G, Zhang X X, Wang J S, Liu Y, Wang Y F, Yu X Q, Shi W H, Chen H F, Zou J Q, Zhong W Y, Chen J L, Jia X H, Wang B, Shao S P. 2023. Medium-energy electron detector onboard the FY-3E Satellite. Space Weather, 21: e2022SW003241

Zheng H, Holzworth R H, Brundell J B, Jacobson A R, Wygant J R, Hospodarsky G B, Mozer F S, Bonnell J. 2016. A statistical study of whistler waves observed by Van Allen Probes (RBSP) and lightning detected by WWLLN. J Geophys Res Space Phys, 121: 2067–2079

Zhu Y, Rakov V A, Mallick S, Tran M D. 2015. Characterization of negative cloud-to-ground lightning in Florida. J Atmos Sol-Terrestrial Phys, 136: 8–15

(责任编委: 傅绥燕)