0254-6124/2026/46(5)-1327-11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Jinghan, LI Shuhan, LIU Jing, LIU Shanbin. Multi-Instrument Observations of STEVE Evolution under Weak Substorm Conditions (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1327–1337. CSTR:32142.14.cjss.2025–0201. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025–0201

弱亚暴期 STEVE 演化的多源观测*

王镜涵[1] 李书翰[2] 刘 晶[2] 刘善彬[3]

1(山东大学澳国立联合理学院 威海 264209)

2(山东省太空环境与探测技术重点实验室 威海 264209)

3(山东大学集成电路学院 济南 250101)

摘 要 STEVE 是亚极光电离层的白紫色光弧结构, 其形态演化能反映电离层–磁层–热层之间的耦合作用. 通过对 2021 年 4 月 16 日的 STEVE 事件的多源观测分析, 探究了弱亚暴条件下 STEVE 的形态演化与能量来源. 综合 THEMIS 全天空相机和 GNSS, Swarm, AMPERE, NOAA POSE 以及 Arase (ERG) 电离层与磁层卫星的多源观测, 确定该 STEVE 事件持续约 1.5 h, 并演化出 Picket Fence 结构, STEVE 局地表现出高电子温度、低电子密度、高速西向离子流和下行场向电流的典型特征. 局地较高的西向流速度 (约 4 km·s^{-1}) 与相对较高的电子温度 (约 8000 K) 表明在 SAID 的摩擦加热之外还存在额外潜在热源. 磁层卫星观测显示, 以低能为主的电子沉降可能在 STEVE 形成过程中提供了额外能量. 在弱亚暴期间, SAID 与低能电子沉降的联合作用会显著提升亚极光区电离层的电子温度, 进而促进 STEVE 和 Picket Fence 结构的形成.

关键词 STEVE, Picket Fence, SAID, 电离层, 粒子沉降

中图分类号 P352

Multi-Instrument Observations of STEVE Evolution under Weak Substorm Conditions

WANG Jinghan[1] LI Shuhan[2] LIU Jing[2] LIU Shanbin[3]

1(*SDU-ANU Joint Science College*, *Weihai* 264209)

2(*Shandong Key Laboratory of Space Environment and Exploration Technology*, *Weihai* 264209)

3(*School of Integrated Circuits*, *Shandong University*, *Jinan* 250101)

Abstract STEVE (Strong Thermal Emission Velocity Enhancement) is a white/mauve optical arc in the subauroral region ionosphere that reflects the coupling among the ionosphere, magnetosphere, and thermosphere. A STEVE event on 16 April 2021 is analyzed using multi-instrument observations to investigate its morphological evolution and energy sources under relatively quiet solar wind and weak substorm conditions. By integrating optical observations from THEMIS all-sky imagers with ionospheric and magnetospheric measurements from GNSS TEC, the Swarm satellites, AMPERE field-aligned currents,

* 国家自然科学基金项目资助 (42304168)

2025-11-26 收到原稿, 2026-01-20 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

NOAA POSE, and the Arase (ERG) spacecraft, we find that this STEVE event lasted for approximately 1.5 hours and evolved into Picket Fence structures. The STEVE region exhibited typical localized signatures of electron heating, electron density depletion, fast westward ion flow, and downward field-aligned currents. The elevated westward plasma velocity (about 4 km·s^{-1}), together with the unusually high electron temperatures (about 8000 K during STEVE), suggests that frictional heating associated with Subauroral Ion Drifts (SAIDs) alone cannot account for the observed thermal enhancement. Magnetospheric observations reveal broadband electron energy flux enhancements (dominated by <10 keV electrons), indicating that low-energy electron precipitation likely supplied additional energy to the STEVE region. This study demonstrates that, even during weak substorm periods, the combined effects of SAID and low-energy electron precipitation can substantially elevate electron temperatures in the subauroral ionosphere, thereby facilitating the formation of STEVE and Picket Fence structures.

Key words Strong Thermal Emission Velocity Enhancement (STEVE), Picket Fence, Subauroral Ion Drift (SAID), Ionosphere, Particle precipitation

0 引言

STEVE (Strong Thermal Emission Velocity Enhancement) 是位于从极光椭圆分离的亚极光区电离层的光学现象, 通常表现为白紫色光弧, 有时会伴随被称为 Picket Fence 的绿色栅栏状光学结构[1–4]. STEVE 通常出现在午夜前扇区, 靠近极光椭圆赤道边界 (约 60°磁纬) 的位置[5,6]. 基于加拿大 TREx 光谱仪的观测研究表明, STEVE 呈现出连续谱特征, 即表现为全可见光谱的辐射增强, 表明 STEVE 可能与当地电离层中西向高速等离子体流——亚极光离子漂移 (SAID)[5,7,8] 与大气的摩擦加热密切相关[9]. 因此, STEVE 被认为是一种大气辉光而非传统极光.

SAID 和 STEVE 均倾向于在地磁扰动条件下发生, 尤其在亚暴的恢复阶段[4]. 其中 SAID 在亚暴恢复阶段更为常见, 而 STEVE 的发生频率远低于亚暴[2,9], 表明 SAID 与 STEVE 并非完全的因果关系. 统计研究表明, 与 STEVE 相关的 SAID 具有离子速度超过约 3 km·s^{-1} 和电子温度超过约 4000 K 的典型特征[7], 并伴随 TEC 耗尽和下行场向电流 (FACs)[4].

除 SAID 之外, 亚极光纬度的粒子沉降也可能对 STEVE 辐射有贡献. 2021 年 Liang 等[10] 的模拟显示 SAID 区域的离子–中性粒子碰撞提供的能量不足以激发 STEVE, 需要如沉降、热通量、反常电子加热等额外能量来源[11]. Gallardo-Lacourt 等[2] 在 2018 年观测到 STEVE 区域存在 50～1000 eV 的低能电子沉降, 但认为仅此也不足以激发 STEVE. 除了电离层的 SAID 与磁层粒子沉降外, 有些研究认为还存在其他加热机制. Chu 等[12] 在 2019 年发现 STEVE 的多波段连续谱辐射可能由电子沉降与热传导联合驱动. Gasque 等[13] 在 2023 年通过数值模拟发现, 平行电场可以驱动电子激发 STEVE 连续光谱. 因此, STEVE 的形成被认为与电离层过程、磁层能量注入等多种机制有关, 其能量来源在不同类型的事件中可能不同.

STEVE 和 SAID 通常在地磁扰动时期出现, 但在地磁微扰动期间也存在 STEVE 的观测[14,15]. 考虑到地磁微扰条件下通常 SAID 也较弱, 该强度不足以驱动 STEVE, 因此, 目前对地磁微扰期 STEVE 产生机制的理解仍面临挑战. Nishimura 等[15] 在 2024 年研究发现, 平静期 STEVE 表现出不同特征, 更短的持续时间 (约几分钟), 更高的纬度 (约 70°磁纬). 他们认为由磁层特定的粒子运动和电流系统驱动的 SAID 是平静期 STEVE 的能量来源. 本研究通过多源联合观测, 呈现了弱亚暴期间的 STEVE 演化过程, 讨论该类 STEVE 的演化特征与能量来源.

1 研究方法

通过 THEMIS (Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms) 和 REGO (Redline Emission Geospace Observatory) 全天空相机来识别 STEVE 事件. THEMIS 系列仪器采用白光电荷耦合器件 (CCD) 成像技术, 每幅图像覆盖约 9°纬度范围, 磁地方时 (MLT) 覆盖约 2.5 h, 时间分辨率达 3 s. 21 台 THEMIS 仪器覆盖了北美洲大部分极光椭圆区域, 可提供高时空分辨率的二维观测数

据[16,17]. REGO 成像仪专为测量红线光学辐射设计, 具备高灵敏度与高时间分辨率, 工作周期为 3 s, 曝光时间为 2 s. REGO 阵列由 9 台全天候相机组成, 同样覆盖北美洲大部分区域. REGO 对 628～632 nm 波长范围内的辐射敏感, 主要提供 630 nm 的信息[18].

基于北美洲的 ASI 观测, 在 2018－2022 年间共识别出 13 个 STEVE 事件 (见表 1). 其中 2021 年 4 月 16 日的 STEVE 事件观测较为全面, 且处于太阳风平静和弱亚暴的条件下 (见图 1). 在 05:35－07:10 UT 的事件周期内, IMF 分量与太阳风动压稳定在 B_x≈3.5 nT, B_y≈–5.0 nT, B_z≈–2.6 nT, $P_{\rm dyn}$≈1.6 nPa. 该 STEVE 期间太阳风速约为 410 km·s^{-1}, 明显低于其它 STEVE 时期的平均太阳风速 500～550 km·s^{-1}[3]. SYM-H 指数在 STEVE 期间相对稳定, 约为–10 nT. 在 STEVE 产生前存在较弱的亚暴 (AE<500 nT), 且该亚暴恢复相较长, STEVE 期间的 AE 指数保持在约 300 nT.

通过 GNSS TEC 数据与 Swarm 卫星的电离层观测数据, 对 STEVE 区域的电离层状态进行了表征. 5 min 分辨率的 TEC 数据来源于 Madrigal 数据库[19]. Swarm 卫星由 3 颗卫星组成[20], 其中 Swarm A 和 Swarm C 的轨道高度约为 440 km, Swarm B 的轨道高度超过 500 km. Swarm 卫星轨道要高于 STEVE 约 230 km 的典型高度[1].

FAC 数据源自 AMPERE 科学数据中心的铱星卫星系统. 该卫星系统由 66 颗卫星及轨道备用部件组成, 分布在 6 个等距轨道平面上, 运行于 780 km 的极地轨道[21]. 卫星携带的磁力计数据通过星历数据形式从铱星网络运营中心传输至 AMPERE 科学数据中心, 经处理后可提取与 FAC 相关的磁扰动特征[22].

磁层粒子数据由美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的 POES 卫星[23] 和 Arase(ERG) 卫星[24] 提供. 采用 POES 卫星的总能量探测器 (TED, 1～20 keV) 和中能探测器 (MEPED, 30～800 keV) 的质子与电子数据, 以及源自 Arase 卫星的极高能电子探测器 (XEP, 0.4～20 MeV)[25]、高能电子探测器 (HEP, 70～2000 keV)[26]、中能粒子探测器 (MEP-e, 10～180 keV)[27] 和低能粒子探测器 (LEP-e, <25 keV)[28] 的电子数据.

2 观测结果

图 2 给出了 THEMIS ATHA 台站在 2021 年 4 月 16 日观测到的 STEVE 事件演化 (05:35－07:10 UT). 图 2(g) 为该事件的全天空相机中央视野的

表 1 2018－2022 年全天空相机记录的 STEVE 事件

Table 1 STEVE events from 2018 to 2022

Event	Date	UT		B_z/nT		$P_{\rm dyn}$/nPa		Station
		start	end	max	min	max	min	
1	2018/4/10	5:09	5:37	4.03	–4.64	3.64	2.27	THEMIS-PINA
2	2018/5/6	4:09	5:02	0.12	–1.86	2.43	1.90	REGO-LUCK
3	2019/2/15	8:10	8:43	1.39	–0.22	1.05	0.63	THEMIS-ATHA
4	2019/5/2	4:48	5:40	2.27	1.22	2.06	1.38	THEMIS-ATHA
5	2019/8/31	6:10	6:45	2.08	–4.06	5.06	3.73	REGO-LUCK
6	2019/9/6	5:20	6:22	1.71	–0.38	1.73	1.44	THEMIS-ATHA
7	2019/10/10	5:50	6:21	3.09	1.00	1.00	2.31	THEMIS-ATHA
8	2020/8/31	3:50	4:45	0.91	–4.10	2.13	1.70	THEMIS-ATHA
9	2021/4/16	5:35	7:10	–0.92	–4.25	1.90	1.40	THEMIS-ATHA
10	2022/4/10	5:05	6:12	–2.66	–14.18	10.99	3.26	REGO-LUCK
11	2022/8/8	6:05	6:48	–1.00	–7.53	3.44	2.43	REGO-LUCK
12	2022/8/30	4:05	4:54	–2.04	–9.54	4.76	2.98	THEMIS-ATHA
13	2022/9/27	2:08	3:00	21.16	6.54	18.50	17.37	REGO-LUCK

注 粗黑体标出的是本次研究的事件.

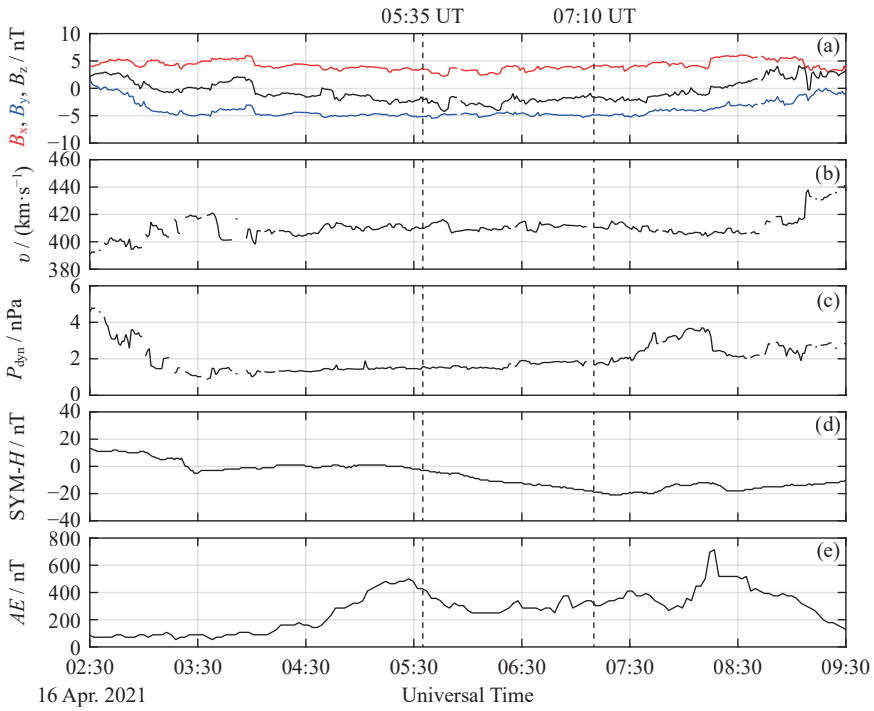


图 1 2021 年 4 月 16 日 02:30—09:30 UT 太阳风与地磁条件

Fig. 1 Solar wind and geomagnetic conditions from 02:30 to 09:30 UT on 16 April 2021

时间剖面图, 其中, STEVE 于 05:35 UT 在地理纬度 56°处从极光椭圆分离出现, 此时 STEVE 亮度较弱且十分狭窄. 此后 STEVE 向赤道方向发展变亮, 在 05:50 UT 后稳定在地理纬度约 55°处. STEVE 从极光椭圆的分离过程可能与亚暴恢复相期间极光椭圆的收缩有关. 在 06:11 UT, STEVE 完整的狭窄亮弧已经形成 (见图 2c). 此后, STEVE 在 06:39 UT 演化出精细的栅栏状周期结构, 即 Picket Fence(见图 2d). 在 07:00 UT, Picket Fence 周期结构消失, 仅有东西不均匀的弱 STEVE 光弧 (见图 2e). STEVE 于 07:10 UT 基本在全天空相机视野中消失 (见图 2f). 仅由 THEMIS ATHA 全天空相机观测判断, 该 STEVE 事件共持续了 1.5 h, 较其他 STEVE 尤其是平静期 STEVE 更持久. 图 2(a)～(f) 给出了电离层卫星 Swarm A, B, C 和磁层卫星 NOAA 15、18 的轨迹. 如图 2(d) 所示, Swarm B 卫星在约 06:39 UT 的 Picket Fence 期穿过了 STEVE 区域, Swarm A, C 在约 07:00 UT 的弱 STEVE 期穿过. 此外, NOAA 15 卫星在约 06:11 UT 的 STEVE 期穿过. NOAA 18 卫星则在 STEVE 形成之前 (约 04:43 UT) 穿过该区域.

图 3 给出了 Swarm A, B, C 卫星观测的电子密度、电子温度、场向电流和垂直轨道离子速度的观测结果. 图 3(a)～(d) 为 Swarm B 的卫星数据, Swarm B 于约 06:39 UT 穿越了 STEVE 区域. 此时, 全天空相机观测指示 STEVE 从弧形结构演化出栅栏状的空间周期结构 (图 3d). 图 3(e)～3(h) 和图 3(i)～3(l) 则分别给出了 Swarm A, Swarm C 的数据, Swarm A, Swarm C 于约 07:00 UT 穿过 STEVE 区域, 轨道经过较弱的 STEVE 弧 (图 3e). 图 3(d), 3(h) 和 3(i) 显示在 STEVE 区域存在强烈的西向水平离子流, 表明 SAID 与 STEVE 存在较强的空间相关性, 暗示 SAID 与中性大气的碰撞摩擦加热可能是 STEVE 的直接热源之一. 此外, 三颗卫星均在 STEVE 区域观察到显著的电子密度 (N_e) 损耗和电子温度 (T_e) 增强, 这与电离层中纬度槽[29] 和亚极光极化流 (SAPS)[30] 的特征一致. 电子密度 (N_e) 在 Picket Fence 持续期间降低至约 $10^{2.8}$ cm^{-3}, 低于弱 STEVE 持续期间的约 $10^{3.0}$～$10^{3.5}$ cm^{-3}.

卫星显示电子温度在 Picket Fence 期间约超过 20000 K, 在弱 STEVE 期间峰值约为 8000 K. 需要注意的是, Knudsen 等[31] 在 2017 年说明, 电子密度较低 (N_e<10^{10} m^{-3}) 时 Swarm B 基于朗缪尔探针反演得到的电子温度 (T_e) 的结果具有较大的系统不确定性. 因此, 在 Picket Fence 持续期间出现的局部异

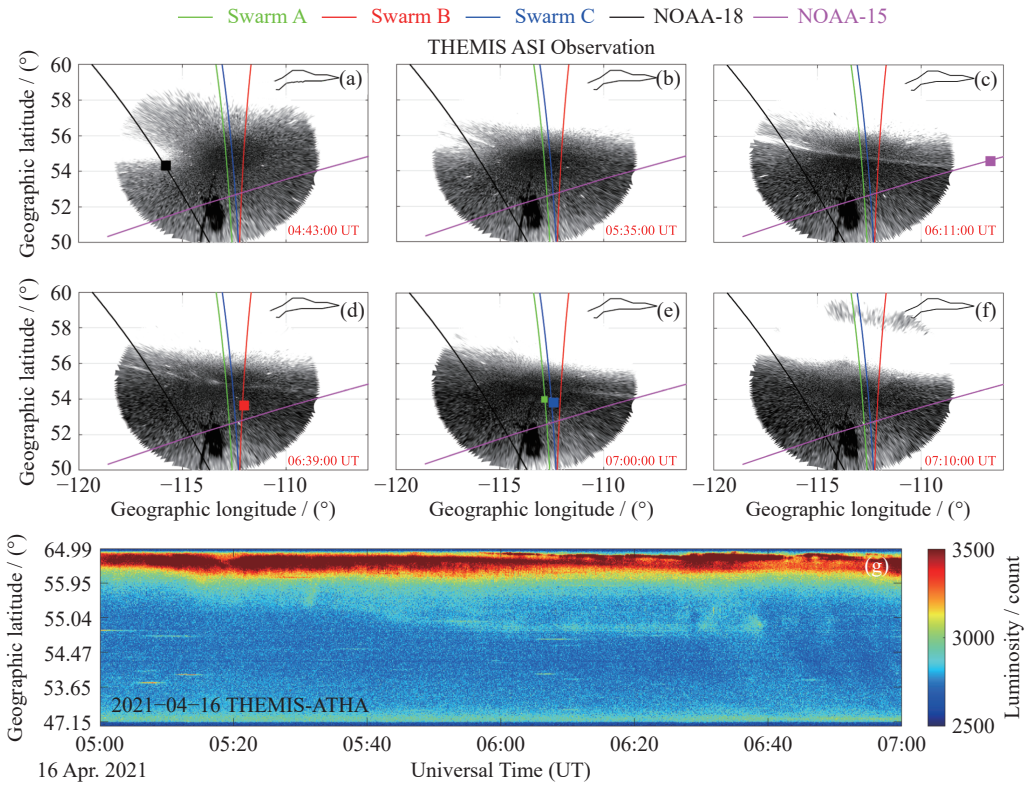


图 2　2021 年 4 月 16 日 THEMIS- ATHA 台站的 STEVE 观测结果. (a)～(f) STEVE 事件随时间演变的轨迹, 叠加了 Swarm A, B, C 卫星及 NOAA 15, 18 卫星的足点数据, (g) 事件的时间剖面

Fig. 2　Observations of the STEVE event from THEMIS-ATHA ASI on 16 April 2021. (a)～(f) Temporal evolution of STEVE overlapped by the foot points of Swarm A, B, C and NOAA 15, 18, (g) Keogram summarizing the event

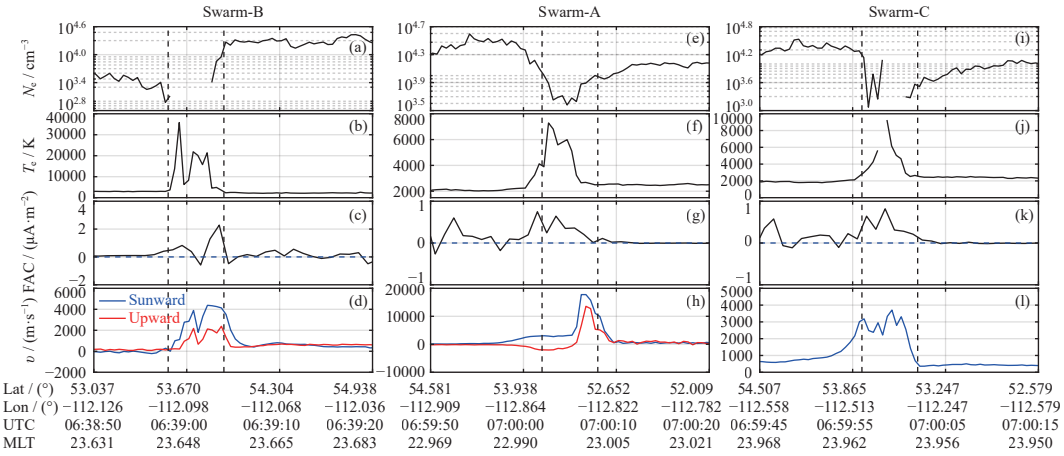


图 3　2021 年 4 月 16 日 STEVE 期间 Swarm A, B, C 卫星的观测数据. (a)(e)(i) 电子密度 N_e, (b)(f)(j) 电子温度 T_e, (c)(g)(k) 场向电流 (正向向下), (d)(h)(l) 离子在水平方向 (蓝色, 正向朝向太阳) 和垂直方向 (红色, 正向朝上) 的跨轨速度

Fig. 3　Swarm A, B and C data during the STEVE event on 16 April 2021. (a)(e)(i) Electron density N_e. (b)(f)(j) Electron temperature T_e. (c)(g)(k) FAC (positive downward). (d)(h)(l) Ion cross-track velocity in horizontal (in blue, positive sunward) and vertical direction (in red, positive upward)

常高电子温度值 (>20000 K) 不作定量物理解释, 并在后续分析中予以剔除. 尽管如此, Swarm 观测仍可反映电子温度变化的相对趋势, 本文的分析重点在于不同阶段 T_e 的相对变化而非其绝对值. 总体而言, Picket Fence 持续期间的 T_e 高于弱 STEVE 持续阶段.

在弱 STEVE 阶段, Swarm A 测得离子流速度接近 20 km·s^{-1}(图 3h), 该数值更可能为仪器测量异常. Knudsen 等[31] 在 2017 年表明, TII 仪器在低密度条件下可能产生 km·s^{-1} 量级的系统偏差. 同时, 本研究基于数据质量标志将该速度尖峰视为不可靠测量结果. 结合 Swarm A 与 Swarm C 的交叉对比, 两阶段中与 SAID 相关的离子漂移速度均约为 4 km·s^{-1}(图 3d 和 3l). 在 SAID 速度接近的情况下, Picket Fence 阶段表现出显著更高的电子温度, 暗示 STEVE 向 Picket Fence 的演化过程需要额外的能量输入. 图 3(c) 中观测到的下行 FAC(约 2 μA·m^{-2}) 比图 3(g) 和 3(k) 中的 (约 1 μA·m^{-2}) 更强, 表明 STEVE 向 Picket Fence 的发展过程中确实存在磁层能量注入的增强. 图 3 中两条垂直虚线标示了根据全天空相机观测确定的 STEVE 发生区域的地理纬度范围.

此外, Swarm 卫星观测结果与地面 ASI 光学观测之间存在<2°的地理纬度偏差. 该偏差可能由多种因素共同造成. 一方面, 所使用的 ASI 数据被映射至约 110 km 的发光高度, 明显低于 STEVE 及 Swarm 卫星所在的高度; 另一方面, Swarm 卫星足点位置在高度映射过程中依赖磁场模型, 而磁场模型本身难以完全刻画真实磁场结构, 尤其在扰动条件下, 可能引入额外的系统偏差. 另外, 卫星轨道精度及观测几何差异亦可能对足点位置产生一定影响. 但基于先前对 STEVE 区域的电离层特征参数的研究 (例如低电子密度、高电子温度、高离子速度等), 仍可以较为准确地在卫星观测中定位 STEVE 的位置.

图 4 给出了 STEVE 演变过程中的 GNSS TEC 观测, 图中 THEMIS ATHA 全天空相机的视场标记为品红色圆圈. 在 06:00 UT, THEMIS AHTA 在全天空相机的地方时 (LT) 接近 22:30, 观测到的 STEVE 区域位于电离层电子密度低谷 (图 4a), 此时其光学结构开始演变为细窄的弧形结构 (图 2g). 当 STEVE 在 06:40 UT 转变为栅栏状结构时, 全天空相机已移动至更晚的地方时 (约 22:30 LT), 形成的 Picket

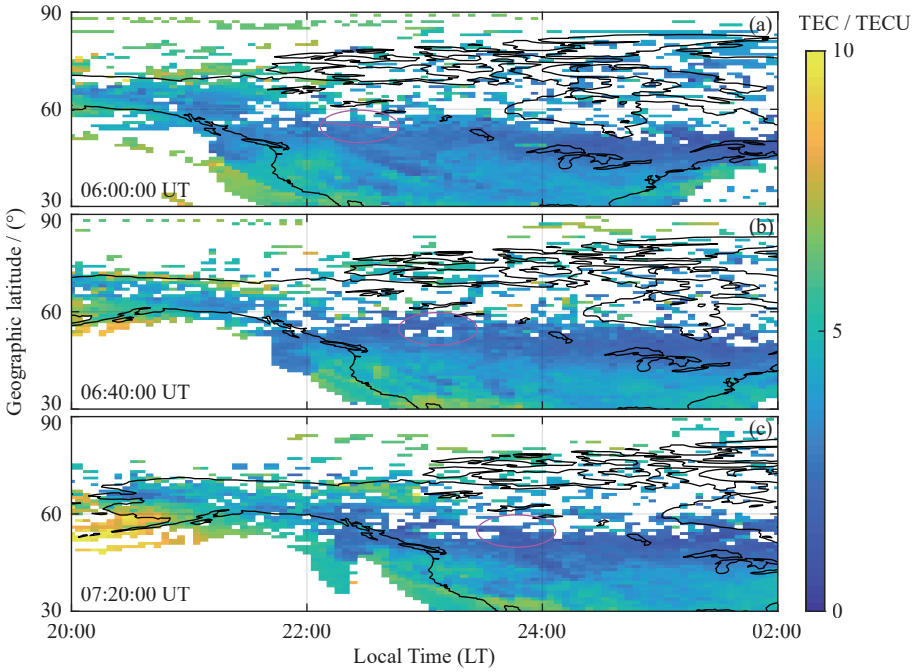


图 4 2021 年 4 月 16 日地理纬度 GLAT(北纬 30°—90°) 在 06:00—07:20 UT 下当地时间的 GNSS TEC 图序列

Fig. 4 Sequences of GNSS TEC maps in the coordinates of GLAT (30°—90°N) and Local Time (LT) at 06:00—07:20 UT on 16 April 2021

Fence 栅栏状结构同样位于电子密度低谷区域 (图 4b), 这与 Swarm B 卫星的观测结果一致 (图 3a). 最终, 当全天空相机接近当地时间 24:00 LT 时 (图 4c), STEVE 在其视场中几乎完全消失 (图 2f). 由于事件期间, THEMIS AHTA 的全天空相机移动了约 1.5 h, 难以根据单个台站的观测完全确定 STEVE 向 Picket Fence 结构的转变是时间上的还是空间上的. 因此图 2(e) 观测到的不均匀弱 STEVE 可能是完整 STEVE 的东侧边缘. 基于同样的原因, 据此推断该 STEVE 事件的总持续时间可能超过 1.5 h.

图 5 给出了北半球在 STEVE 事件期间由 AMPERE 卫星观测到的场向电流 (FAC) 变化过程. 图中绿色区域表示 THEMIS ATHA 中 STEVE 的位置. 在 STEVE 形成初期 (05:30−06:00 UT), 当 STEVE 从极光椭圆分离并向南偏移约 1°时, STEVE 位于二区场向电流 (R2 FAC) 边缘, FAC 约为 0.5 μA·m^{-2} (图 5a～5c). 随后在 06:00−06:30 UT, 稳定的 STEVE 形成并逐渐增强, 此时 R2 FAC 在午夜前区域保持稳定 (约 0.5 μA·m^{-2}) 并开始向东扩展 (图 5d～5f), 表明磁层注入范围增大, 此时形成了完整且较为明亮的 STEVE. 在 06:30−06:50 UT 期间, 午夜扇区的 R2 FAC 增强 (约 1 μA·m^{-2}), 甚至延伸至地方时约 02:00 LT 处 (图 5g～5h). FAC 的增强从侧面证明, 在 06:39 UT 时 STEVE 演化出的 Picket Fence 栅栏状结构与磁层能量注入的增强密切相关. AMPERE 卫星观测到的场向电流与 Swarm 卫星探测的场向电流基本一致. 因此, 推测磁层能量的注入可能是弱亚暴期 STEVE/Picket Fence 持续演化的重要能量源.

3 分析讨论

研究报道了在相对平静的太阳风与弱亚暴条件下发生的一次 STEVE 事件. 事件期间太阳风速度低于典型亚极光活动水平, 仅约为 410 km·s^{-1}, IMF 稳

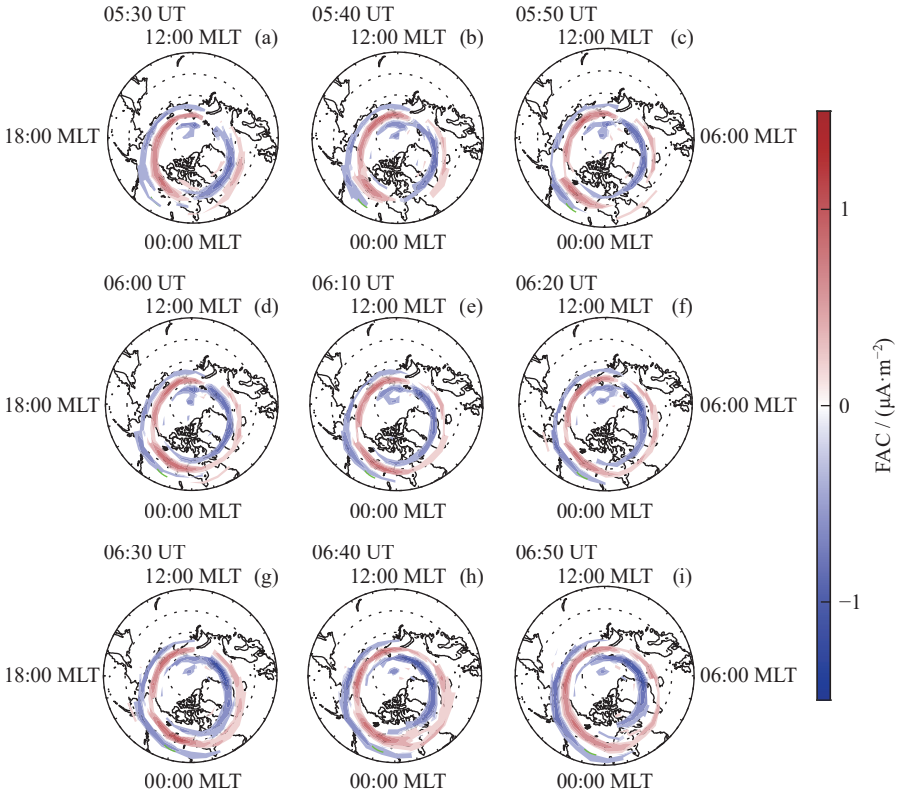


图 5 STEVE 事件期间北半球地理坐标下的 AMPERE 场向电流的分布 (时间范围为 05:30−06:50 UT, 以 10 min 为间隔, 正向为向上)

Fig. 5 AMPERE field-aligned currents in a geographic coordinate system during the STEVE event (from 05:30 to 06:50 UT at 10 min intervals, positive upward)

定并略微偏南 (约–2.6 nT). STEVE 出现在亚暴后期恢复阶段, 但恢复过程异常缓慢, *AE* 指数在整个事件期间保持在约 300 nT(图 1), 反映出先前弱亚暴注入的轻微扰动持续存在. 亚暴恢复相的典型特征是等离子体层的快速扩张与增厚, 同时极光椭圆的赤道边界持续向高纬收缩[32], 该特征可为 STEVE 从极光椭圆赤道侧边界分离提供有利条件.

在该事件中, Swarm 卫星在 STEVE 区域观测到向西的高速 SAID 流. SAID 通道中的快速离子流会通过离子–中性摩擦导致显著的碰撞加热, 因此, 该加热过程被认为是 STEVE 连续谱辐射增强的主要能量来源之一. 值得注意的是, 统计研究表明, 约 3 km·s^{-1} 的 SAID 可将电子温度加热至约 4000 K[7], 模拟显示 4 km·s^{-1} 的流速触发的电子温度一般低于 5000 K[33]. 此外, SAID 通道内的低电子密度 (由 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 漂移导致的输运效应以及高温条件下离子复合率升高共同导致[34–36]) 会削弱电子–中性碰撞冷却效果, 使电子能够在较长时间内维持高温. 然而, 与上述预估相比, 本事件中 Swarm 观测到的电子温度显著偏高 (弱 STEVE 阶段约 8000 K, Picket Fence 阶段可能超过 20000 K). 如此高的电子温度难以依靠 SAID(约 4 km·s^{-1}) 产生的摩擦加热单独解释, 这表明该事件中必然存在额外的能量输入.

Swarm 与 AMPERE 观测到的增强 FAC 暗示存在粒子沉降的可能性. 为验证该观点, 比较分析了 NOAA POSE 卫星在事件期间测得的质子与电子能通量, 并与参考日及事件前期观测结果进行对比 (图 6 和图 7). 事件期间 NOAA 15 卫星刚好位于 STEVE 区域的地磁共轭点. 图 6 显示, 在 STEVE 阶段, 30～240 keV 的质子能通量相较无 STEVE 时有明显增强. 图中垂直的红色虚线标示了卫星穿越 STEVE 区域或其地磁共轭区域的时刻. 类似地, 图 7 中高能段电子 (>130 keV) 在 STEVE 前后亦出现轻微增强 (图 7e～ 7g, 7l～ 7n, 7s～ 7u), 在 40～ 130 keV 范围未出现明显变化. 除此之外, 低能电子 (< 40 keV, 主要为<7890 eV) 在 STEVE 期间较参考日显著增强, 该电子通量在参考日时几乎为零. 图 8 表明, 50～20000 eV 的电子积分能通量在 STEVE 阶段存在明显增强.

此外, 在该事件中, Arase 卫星的观测范围位于 THEMIS ATHA 全天空相机的东侧, 其足点移动范围较小, 可作为时序观测提供参考. Arase 探测器捕获的电子能谱如图 9 所示. 图 9(c) 和 9(d) 中观测到能量低于 20 keV 的电子沉降的增强, 该结果与图 7 观测结果一致. 其余能段未出现明显增强. 在 05:30－06:10 UT, 能量低于约 1 keV 的电子沉降占据主导地位. 该时间段 STEVE 亮度较弱且发展不完整 (图 2b). 自约 06:10 UT 开始, 能量低于 10 keV 的电子沉降较此前显著增强. 该时段 STEVE 已完整形成, 且亮度显著增强; 于约 06:39 UT 演化出 Picket Fence 结构 (图 2c, 2d), 同时电离层电子温度升至 20000 K 以上 (图 3b).

4 结论

利用多仪器观测数据, 分析了在相对平静的太阳风与弱亚暴恢复期条件下发生的 STEVE 事件, 并探讨其可能的能量来源. 该事件区域的电离层表现出典

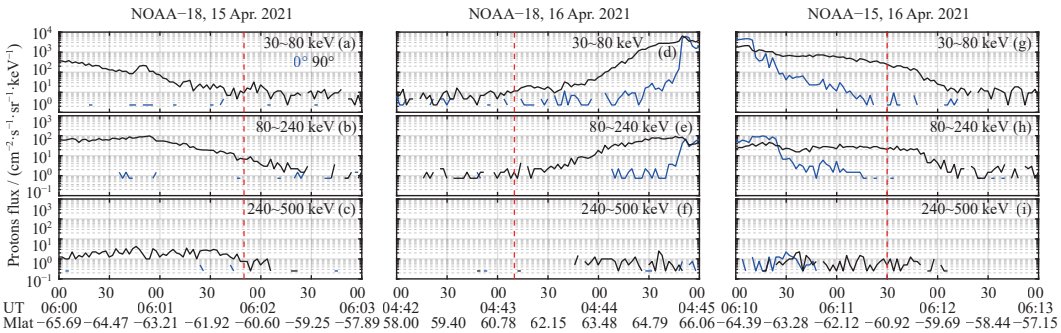


图 6 NOAA 15 和 NOAA 18 卫星的质子能量通量数据. (a)～(c) NOAA 18 卫星在参考日的观测数据, (d)～(f) STEVE 事件前的观测数据, (g)～(i) STEVE 事件期间 NOAA 15 的观测数据

Fig. 6 Proton energy flux from NOAA 15 and 18. (a)-(c) NOAA-18 observations on the refence day, (d)-(f) NOAA 18 observations before the STEVE event, and (g)-(i) NOAA 15 during the STEVE event

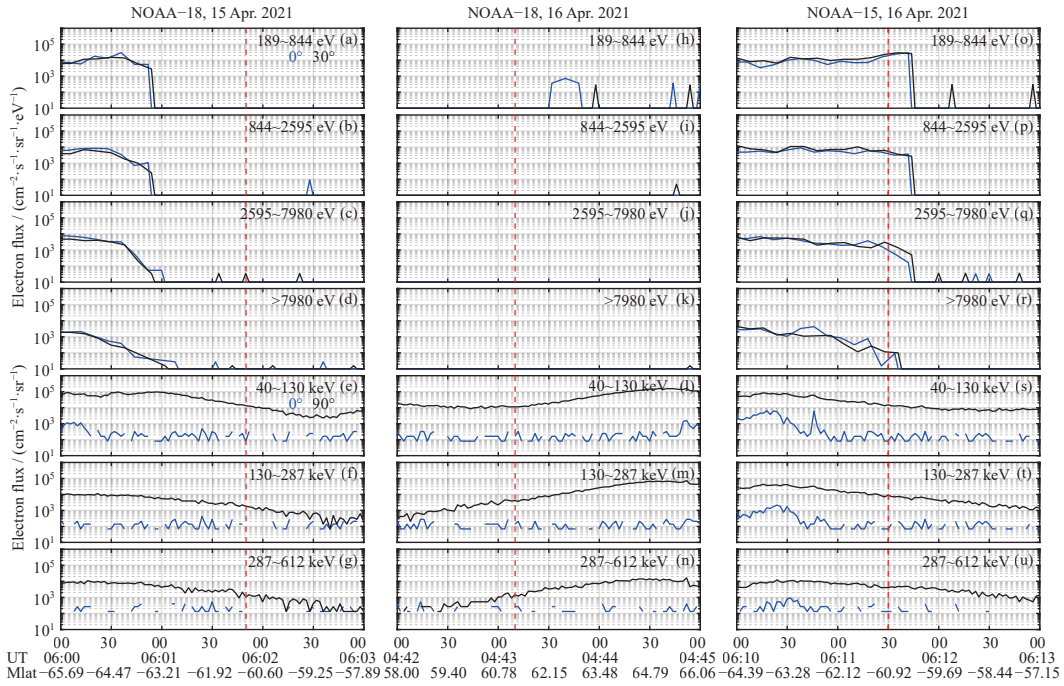


图 7 NOAA 15 和 NOAA 18 卫星的电子能量通量数据. (a)～(g) NOAA 18 卫星在参考日的观测数据, (h)～(n) STEVE 事件前的观测数据, (o)～(u) STEVE 事件期间 NOAA 15 的观测数据

Fig. 7 Electron energy flux from NOAA 15 and 18. (a)～(g) NOAA-18 observations on the refence day, (h) ～(n) NOAA 18 observations before the STEVE event, and (o) ～(u) NOAA 15 during the STEVE event

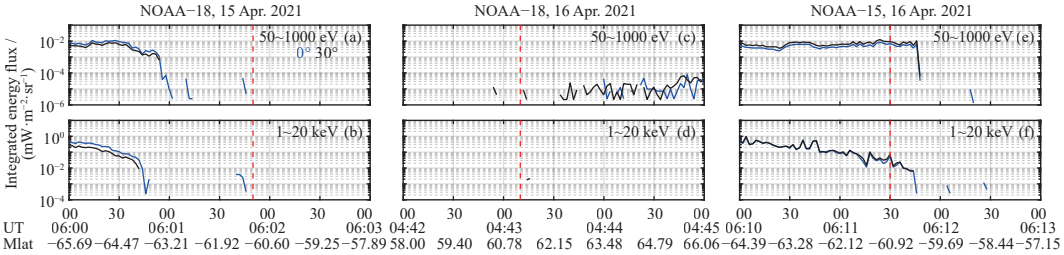


图 8 NOAA 15 和 NOAA 18 卫星的电子积分能量通量数据. (a)(b) NOAA 18 卫星在参考日的观测数据, (c)(d) STEVE 事件前的观测数据, (e)(f) STEVE 事件期间 NOAA 15 的观测数据

Fig. 8 Integrated electron energy flux from NOAA 15 and 18. (a)(b) NOAA-18 observations on the refence day, (c)(d) NOAA 18 observations before the STEVE event, and (e)(f) NOAA 15 during the STEVE event

型的 STEVE 事件特征, 包括电子温度升高、电子密度耗尽、高速西向离子流 (SAID)、以及与光弧位置对应的二区下行场向电流, 进一步强化了 STEVE 与 SAID 的关联性, 暗示 SAID 引起的碰撞摩擦加热可为 STEVE 提供部分能量. 此次 STEVE 持续时间较长, 仅在初始阶段出现短暂的赤道向漂移, 其后位置迅速稳定并出现亮度增强, 随后演化出 Picket Fence 结构; 在 Picket Fence 消失后, 仍残留不均匀、较弱的 STEVE 辐射. Swarm 卫星测得的电子温度峰值较为极端 (弱 STEVE 时约 8000 K, Picket Fence 期间超过 20000 K). 因此, 即便存在速度约 4 km·s^{-1} 的 SAID, 在地磁微扰的条件下, 仅依靠摩擦加热难以解释观察到的高温, 暗示其存在额外的能量来源. 来自 NOAA POSE 和 Arase (ERG) 卫星的粒子观测显示, 在 STEVE 增强阶段 (06:10 UT 以后) 低能电子 (主要为<10 keV) 能通量显著增强, 表明磁层能量可能通过粒子沉降 (主要为低能电子) 向 STEVE 区域输入热能. 综合来看, 在地磁微弱扰动时期, SAID 与磁层低能电子沉降的联合作用能够显著提高电离层电子温度, 产生较亮的 STEVE, 同时推动

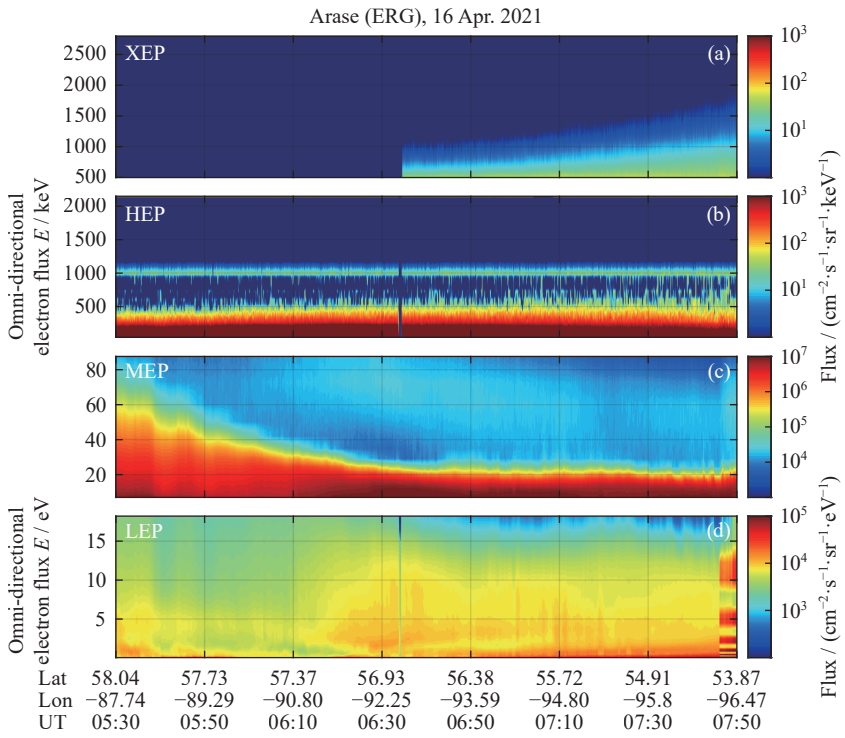


图 9 STEVE 事件期间来自 Arase (ERG) 卫星的电子能量通量

Fig. 9 Electron energy flux from Arase (ERG) during the STEVE event

STEVE 向 Picket Fence 结构演化.

医学伦理 研究不涉及人体或动物实验.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] ARCHER W E, MAURICE J P, GALLARDO-LACOURT B, *et al*. The vertical distribution of the optical emissions of a Steve and picket fence event[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(19): 10719-10725

[2] GALLARDO-LACOURT B, LIANG J, NISHIMURA Y, *et al*. On the origin of STEVE: particle precipitation or Ionospheric Skyglow?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(16): 7968-7973

[3] GALLARDO-LACOURT B, NISHIMURA Y, DONOVAN E, *et al*. A statistical analysis of STEVE[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(11): 9893-9905

[4] NISHIMURA Y, DYER A, KANGAS L, *et al*. Unsolved problems in Strong Thermal Emission Velocity Enhancement (STEVE) and the picket fence[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2023, **10**: 1087974

[5] MACDONALD E A, DONOVAN E, NISHIMURA Y, *et al*. New science in plain sight: citizen scientists lead to the discovery of optical structure in the upper atmosphere[J]. *Science Advances*, 2018, **4**(3): eaaq0030

[6] NISHIMURA Y, DONOVAN E F, ANGELOPOULOS V, *et al*. Dynamics of auroral precipitation boundaries associated with STEVE and SAID[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(8): e2020JA028067

[7] ARCHER W E, GALLARDO-LACOURT B, PERRY G W, *et al*. Steve: the optical signature of intense subauroral ion drifts[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(12): 6279-6286

[8] NISHIMURA Y, GALLARDO-LACOURT B, ZOU Y, *et al*. Magnetospheric signatures of STEVE: implications for the magnetospheric energy source and interhemispheric conjugacy[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(11): 5637-5644

[9] ANDERSON P C, HANSON W B, HEELIS R A, *et al*. A proposed production model of rapid subauroral ion drifts and their relationship to substorm evolution[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1993, **98**(A4): 6069-6078

[10] LIANG J, ST-MAURICE J P, DONOVAN E. A time-dependent two-dimensional model simulation of lower ionospheric variations under intense SAID[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(12): e2021JA029756

[11] LIU J, WANG W B, OPPENHEIM M, *et al*. Anomalous electron heating effects on the E region ionosphere in TIEGCM[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(6): 2351-2358

[12] CHU X N, MALASPINA D, GALLARDO-LACOURT B, *et al*. Identifying STEVE's magnetospheric driver using conjugate observations in the magnetosphere and on the ground[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(22): 12665-12674

[13] GASQUE L C, JANALIZADEH R, HARDING B J, *et al*. It's not easy being green: kinetic modeling of the emission spectrum observed in STEVE's picket fence[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, **50**(21): e2023GL106073
[14] GALLARDO-LACOURT B, NISHIMURA Y, KEPKO L, *et al*. Unexpected STEVE Observations at high latitude during quiet geomagnetic conditions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(19): e2024GL110568
[15] NISHIMURA Y, GALLARDO-LACOURT B, DONOVAN E F, *et al*. Auroral and magnetotail dynamics during quiet-time STEVE and SAID[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(11): e2024JA032941
[16] MENDE S B, HARRIS S E, FREY H U, *et al*. The THEMIS array of ground-based observatories for the study of Auroral Substorms[J]. *Space Science Reviews*, 2008, **141**(1/2/3/4): 357-387
[17] DONOVAN E, MENDE S, JACKEL B, *et al*. The THEMIS all-sky imaging array—system design and initial results from the prototype imager[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, **68**(13): 1472-1487
[18] LIANG J, DONOVAN E, JACKEL B, *et al*. On the 630 nm red-line pulsating aurora: red-line emission geospace observatory observations and model simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(8): 7988-8012
[19] RIDEOUT W, COSTER A. Automated GPS processing for global total electron content data[J]. *GPS Solutions*, 2006, **10**(3): 219-228
[20] OLSEN N, FRIIS-CHRISTENSEN E, FLOBERGHAGEN R, *et al*. The swarm Satellite Constellation Application and Research Facility (SCARF) and swarm data products[J]. *Earth, Planets and Space*, 2013, **65**(11): 1189-1200
[21] KNIPP D J, MATSUO T, KILCOMMONS L, *et al*. Comparison of magnetic perturbation data from LEO satellite constellations: statistics of DMSP and AMPERE[J]. *Space Weather*, 2014, **12**(1): 2-23
[22] KORTH H, ANDERSON B J, WATERS C L. Statistical analysis of the dependence of large-scale Birkeland currents on solar wind parameters[J]. *Annales Geophysicae*, 2010, **28**(2): 515-530
[23] EVANS D S, GREER M S. Polar Orbiting Environmental Satellite Space Environment Monitor - 2 : Instrument Descriptions and Archive Data Documentation[EB/OL]. (2000)
[24] MIYOSHI Y, SHINOHARA I, TAKASHIMA T, *et al*. Geospace exploration project ERG[J]. *Earth, Planets and Space*, 2018, **70**(1): 101
[25] HIGASHIO N, TAKASHIMA T, SHINOHARA I, *et al*. The extremely high-energy electron experiment (XEP) onboard the Arase (ERG) satellite[J]. *Earth, Planets and Space*, 2018, **70**(1): 134
[26] MITANI T, TAKASHIMA T, KASAHARA S, *et al*. High-energy electron experiments (HEP) aboard the ERG (Arase) satellite[J]. *Earth, Planets and Space*, 2018, **70**(1): 77
[27] KASAHARA S, YOKOTA S, MITANI T, *et al*. Medium-energy particle experiments—electron analyzer (MEP-e) for the exploration of energization and radiation in geospace (ERG) mission[J]. *Earth, Planets and Space*, 2018, **70**(1): 69
[28] ASAMURA K, KAZAMA Y, YOKOTA S, *et al*. Low-Energy Particle experiments–ion mass analyzer (LEPi) onboard the ERG (Arase) satellite[J]. *Earth, Planets and Space*, 2018, **70**(1): 70
[29] MOFFETT R J, QUEGAN S. The mid-latitude trough in the electron concentration of the ionospheric F-layer: a review of observations and modelling[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1983, **45**(5): 315-343
[30] FOSTER J C, VO H B. Average characteristics and activity dependence of the subauroral polarization stream[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A12): SIA 16-1-SIA 16-10
[31] KNUDSEN D J, BURCHILL J K, BUCHERT S C, *et al*. Thermal ion imagers and Langmuir probes in the Swarm electric field instruments[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(2): 2655-2673
[32] TAKAGI Y, SHIOKAWA K, OTSUKA Y, *et al*. Statistical analysis of SAR ARC detachment from the main oval based on 11-Year, All-Sky Imaging observation at Athabasca, Canada[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(21): 11539-11546
[33] MOFFETT R J, ENNIS A E, BAILEY G J, *et al*. Electron temperatures during rapid subauroral ion drift events[J]. *Annales Geophysicae*, 1998, **16**(4): 450-459
[34] WANG W B, TALAAT E R, BURNS A G, *et al*. Thermosphere and ionosphere response to Subauroral Polarization Streams (SAPS): Model simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A7): A07301
[35] LIU J, WANG W B, BURNS A, *et al*. Relative importance of horizontal and vertical transports to the formation of ionospheric storm-enhanced density and polar tongue of ionization[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(8): 8121-8133
[36] LI S H, LIU J, WANG W B, *et al*. Impacts of subauroral polarization streams on Storm-Enhanced density plume and consequently on polar tongue of ionization[J]. *Earth and Space Science*, 2023, **10**(9): e2023EA002827

作者简介



王镜涵 男, 2005 年 3 月出生于山东省淄博市, 现为山东大学澳国立联合理学院物理专业学生. 当前主要参与空间物理与空间环境相关研究工作, 研究方向包括亚极光区电离层卫星观测数据分析及空间等离子体物理过程等.
E-mail: wangjinghan0101@163.com



李书翰（通信作者） 男, 1989 年 11 月出生于辽宁省辽阳市, 现为山东大学空间科学与技术学院助理研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为亚极光区电离层、电离层理论及人工智能建模等.
E-mail: lishuhan@sdu.edu.cn