0254-6124/2026/46(5)-1338-19 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

TANG Chaoling. Impact of Magnetospheric Substorm Evolution of a Multi-event on the Earth's Outer Radiation Belt (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1338–1356. CSTR:32142.14.cjss.2025–0225. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025–0225

多事件磁层亚暴演化对地球外辐射带的影响*

汤朝灵

(山东省太空环境与探测技术重点实验室 威海 264209)

(山东大学空间科学研究院 威海 264209)

(山东大学空间科学与技术学院 威海 264209)

摘 要 磁层亚暴对地球外辐射带的动力学过程十分重要. 然而, 亚暴演化过程对外辐射带的影响尚不明确. 利用 THEMIS 卫星和范艾伦探测器的联合观测, 研究不同磁层亚暴事件对外辐射带的影响 (源电子或合声波、种子电子的增强). 研究发现: 亚暴膨胀相触发的近地磁场偶极化是驱动能量电子向地球方向注入并最终影响外辐射带的关键环节; 外辐射带合声波的活动水平受到亚暴注入电子特性 (注入电子通量、持续时间和投掷角分布) 的显著调制, 并存在一定的事件依赖性; 亚暴的时序结构 (脉冲式或连续式) 会显著影响外辐射带的响应模式 (一次响应或多阶段响应). 上述结果有助于进一步理解外辐射带动力学过程.

关键词 亚暴, 地球辐射带, 能量电子, 相对论电子, 哨声模合声波

中图分类号 P354

Impact of Magnetospheric Substorm Evolution of a Multi-event on the Earth's Outer Radiation Belt

TANG Chaoling

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

(*Institute of Space Sciences*, *Shandong University*, *Weihai* 264209)

(*School of Space Science and Technology*, *Shandong University*, *Weihai* 264209)

Abstract The magnetospheric substorms play a crucial role in the dynamic processes of the Earth's outer radiation belt. However, the specific influence of substorm evolution on the outer radiation belt remains insufficiently understood. This study investigates the effects of different substorm events on the outer radiation belt—specifically focusing on the enhancements of the source electrons (or chorus waves) and seed populations—by using joint observations from the THEMIS satellites and Van Allen Probes. Our analysis reveals the following key findings: The magnetic field dipolarization in the near-Earth tail, triggered by the substorm expansion phase, is a key process that facilitates the earthward injections of energetic electrons and ultimately affects the dynamics of the outer radiation belt. The activity level of

* 国家重点研发计划项目资助 (2025YFF0512104)

2025-12-23 收到原稿, 2026-06-01 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/)

chorus waves in the outer radiation belt is significantly modulated by the characteristics of substorm-injected electrons (the injected electron fluxes, durations, and pitch angle distributions) and shows a certain event dependence. The temporal structure of substorms (pulsed or continuous) significantly affects the response patterns of the outer radiation belt (single response or multi-stage response). These findings provide valuable insights for advancing our understanding of the dynamic processes of the outer radiation belt.

Key words Substorms, Earth's radiation belts, Energetic electrons, Relativistic electrons, Whistler-mode chorus waves

0 引言

地球外辐射带 ($3 \leqslant L \leqslant 7$, L 为磁壳数) 是地球空间最严重的辐射环境之一. 在太阳爆发或地磁暴期间, 相对论电子 (能量 >1 MeV) 通量的增强会对在轨卫星的正常工作、运行和宇航员安全等造成较大威胁, 甚至可能会导致航天器和卫星毁坏失效. 因此, 地磁活动 (磁暴和磁层亚暴) 对外辐射带的影响是空间物理学和空间天气学研究的热点之一. 磁层亚暴是地球空间能量输入、耦合与耗散的关键环节[1], 也是驱动外辐射带相对论电子动态演化的重要驱动源之一[2–10].

哨声模合声波驱动的局地电子加速是外辐射带相对论电子增强的重要机制之一[11–17]. 已有研究表明, 磁层亚暴期间电子注入不仅可以提供源电子 (几十 keV), 而且还可以提供加速过程所需要的种子电子 (200～300 keV)[2,18–23]. 在亚暴期间, 低能的等离子体片电子 (几十 keV) 较容易被注入到外辐射带区域. 由于这些电子投掷角的各向异性可以激发低频的哨声模合声波[24,25]. 同时, 激发的合声波可以与亚暴注入的种子电子发生回旋共振, 从而将这些电子加速到相对论电子能段[8,17,26–32]. 已有研究还表明, 当磁层亚暴增强时, 局部加速区内的合声波强度会更强[33–36].

已有研究表明, 合声波驱动的电子加速过程一般需要大于 12 h[5,12,13,37]. 但是, 近年来研究也表明, 亚暴电子的直接注入可导致相对论电子通量快速增强[38–44]. Tang 等[4] 对 2013 年 8 月 16 日的亚暴电子注入事件进行了多点观测研究. 研究发现, 在亚暴期间, 在近地磁尾区域, THEMIS 卫星首先观测到 300 keV 电子被强电场 (30 mV·m^{-1}) 捕获并快速向地球方向输运. 同时, 在同步卫星轨道区域也观测到较强的电子注入现象. 而位于外辐射带外侧的范艾伦探测器 A 观测到, 1.8 MeV 电子的相空间密度在 1 h 内增长了一个数量级, 该电子的能谱形状与磁尾观测到的电子谱高度相似. 该现象可由亚暴电子的直接注入解释. Tang 等[42] 利用范艾伦探测器的数据, 对外辐射带中的 600 keV 电子注入进行了统计研究. 基于不同注入特征, 该研究将外辐射带中的 600 keV 电子注入分为脉冲式与非脉冲式电子注入. 最近, Xiong 等[45] 对 27 个快速相对论电子增强事件进行了统计研究. 研究发现, 所有事件均伴随显著的脉冲式种子电子、亚相对论电子和相对论电子注入信号, 且注入的电子含量与辐射带增强的电子含量高度相关 (相关系数达 0.82～0.88). 这从统计上进一步证明, 亚暴偶极化注入是快速电子增强过程中普遍且关键的环节.

磁层超低频 (ULF) 波诱发的向内径向扩散也是相对论电子加速的重要机制之一[46–49]. 已有研究表明, 磁层亚暴活动是激发磁层超低频波的重要驱动源之一[50,51]. Chu 等[52] 基于范艾伦探测器 (VAP) 在 2013－2019 年间的大量观测数据, 筛选出 177 个 2.1 MeV 相对论电子通量振荡事件, 并根据事件发生的磁地方时 (MLT)、亚暴强度等进行了详细分类. 该研究发现, 夜侧振荡事件是由磁层亚暴与太阳风共同主导的 ULF 波引起的.

综上所述, 强亚暴 ($AE_{\max}$≥800 nT) 在地球外辐射带动力学过程中起重要作用[6,29]. 但是, 对于中等强度的亚暴 ($AE_{\max}$<800 nT), 其演化过程对外辐射带的影响尚不明确. 本研究基于 THEMIS 卫星和范艾伦探测器的联合观测数据, 分析不同磁层亚暴事件对外辐射带的影响 (源电子或合声波、种子电子的增强). 本研究选取 4 个典型事件, 其满足以下条件.

(1) THEMIS 卫星位于内磁层或近地磁尾 ($|X| = 5.5$～$12\ R_e$), 且范艾伦探测器同时位于晨侧 (MLT= 4～8) 的外辐射带区域 (L' =5.0～6.0). L'值

是计算出的罗德里格斯壳层参数 (以地球半径为单位).

(2) 事件 AE 指数明显上升 (ΔAE >300 nT), 且伴随明显的磁尾偶极化现象 (由 THEMIS 卫星观测确认), 事件持续时间不超过 1 h.

(3) 选取的事件在亚暴的时序结构 (例如是否连续发生)、AE 指数形态以及外辐射带响应 (电子注入模式、合声波强度) 方面均具有代表性差异.

1 多事件的联合分析

1.1 2018 年 2 月 24 日事件

图 1 给出了 2018 年 2 月 24 日 THEMIS-A 在近地磁尾处观测到的磁场扰动、偶极化期间的磁场以及等离子体特征. THEMIS-A 在约 00:08 UT (图 1 中第一条垂直虚线所示) 观测到明显的磁场扰动 (图 1a, b), 且伴随地向流 v_{i} 的偏转 (图 1c), 相似的偏转流已被 Tang 等[53] 观测到. 在磁场扰动期间, 观测到局地电子数密度 N_{e} 扰动 (图 1d)、电子温度 T_{e} (图 1e) 以及总压强 P_{t} (图 1f) 升高. 但是, THEMIS-A 并未观测到明显的能量电子通量的增强 (图 1g). 在大约 00:21 UT (图 1 中第二条垂直虚线所示), THEMIS-A 观测到总磁场 B_{t} 和磁场 B_z 分量明显增强 (图 1a, b). 此时, 局地电子数密度 N_{e} 开始下降 (图 1d), 而电子温度 T_{e} (图 1e) 和总压强 P_{t} (图 1f) 明显升高. 随后, 局地磁场的倾角增加 (图 1 中未显示), 近地磁尾的磁场位形进一步趋于偶极化. 以上均为磁层亚暴偶极化的典型特征[20,21]. 图 1(g)(h) 分别表示由 SST 和 ESA 仪器观测得到的电子能谱. 在磁场偶极化期间, THEMIS-A 观测到能量电子通量明显增强 (图 1g). 图 1(g)(h) 的能谱图显示以 eV·cm^{-2}· s^{-1}· sr^{-1}· eV^{-1} 为单位的全向微分能通量. 磁场和离子速度采用 GSM 坐标系. 垂直虚线表示 THEMIS-A 观测到的磁场扰动和亚暴偶极化开始的时间.

图 2 给出了 THEMIS-A 在 2018 年 2 月 14 日 00:00－00:40 UT 期间 SST 能量范围 (30～300 keV) 内的电子观测结果 (包括电子投掷角分布), 图中垂直虚线表示 THEMIS-A 观测到的磁场扰动和亚暴偶极化开始的时间. 在磁场扰动期间 (图 2 中第一条垂直虚线所示), THEMIS-A 观测到能量>31 keV 电子通量的增强 (图 2a). 其中 30～50 keV 电子投掷角呈现各向同性分布 (图 2b), 而 50～300 keV 电子投掷角主要呈现场向分布 (约 0°和 180°)(图 2c～f). 在磁场偶极化期间 (图 2 中第二条垂直虚线所示), THEMIS-A 观测到>31 keV 电子通量进一步增强 (图 2a). 其中, 30～50 keV 电子投掷角主要呈现各向同性分布 (图 2b), 而 50～300 keV 电子在 0°, 90°和 180°投掷角方向均明显增强 (图 2c～f). 上述电子的准垂直方向的电子通量增强 (投掷角接近 90°) 主要是betatron 加速的结果, 由增强的磁场引起的[54]. 而准平行方向的电子通量增强 (投掷角接近 0°和 180°) 主要是费米加速的结果, 可能与磁力线长度的缩短有关[22,23,55,56].

图 3 给出了范艾伦探测器 B 在 2018 年 2 月 24 日 00:00－01:30 UT 期间观测到的电子注入事件, 垂直蓝色虚线表示电子注入发生的时间. 此次注入事件, 亚暴膨胀相的起始时间为 00:08 UT, AL 指数缓慢下降 (图 3b), AE 指数在 00:28 UT 达到最大值 624 nT(图 3a). 同时, 磁电子离子谱仪 (MagEIS)[57] 先观测到 246 keV 电子通量增加 (图 3 中垂直虚线所示), 随后较低能量电子 (168, 132, 108, 75 keV) 通量也相继增加 (图 3c). 这是典型的色散式电子注入事件. 如图 3(d)～(g) 所示, 注入电子的投掷角分布峰值在 90°附近, 这也是电子注入的一个特征. 对于 54 keV 电子来说, 注入持续时间约为 60 min, 属于非脉冲式电子注入. 这些注入电子 (约几十 keV) 能够促进磁赤道附近哨声模合声波的增强[24,25]. 在 00:30 UT 之后,108～143 keV 电子投掷角分布先在 90°附近增强, 持续 3～5 min, 随后迅速扩展至 0°～180°. 在 00:35－00:45 UT (对于 143 keV 电子) 和 00:38－00:48 UT (对于 108 keV 电子), 电子在 90°投掷角附近出现明显增强, 随后电子通量逐渐减小. 在 00:30－00:38 UT, 235 keV 电子投掷角分布在约 90°附近增强. 可以看出, 对于 108～235 keV 电子, 其注入持续时间约为 10 min, 属于脉冲式电子注入. 这些电子投掷角分布表明, 电子在注入过程中经历了回旋加速[22,23,54–56]. 在 00:30－01:30 UT 期间, 范艾伦探测器 B 位于磁赤道附近 (磁纬度 MLat 为–3.0°～–4.7°)、晨侧 (MLT 为 4.71～5.54) 的外辐射带区域 (L^*为 5.2～5.4). 在这期间, 范艾伦探测器 B 上的电场和磁场仪器套件和集成科学套件 (EMFISIS)[58] 观测到较强的合声波, 如图 4 所示. 图 4 中白色点线和虚线分别代表 0.5 倍电子回旋频率 (0.5 f_{ce}) 和 0.1 倍电子回旋频率 (0.1 f_{ce}).

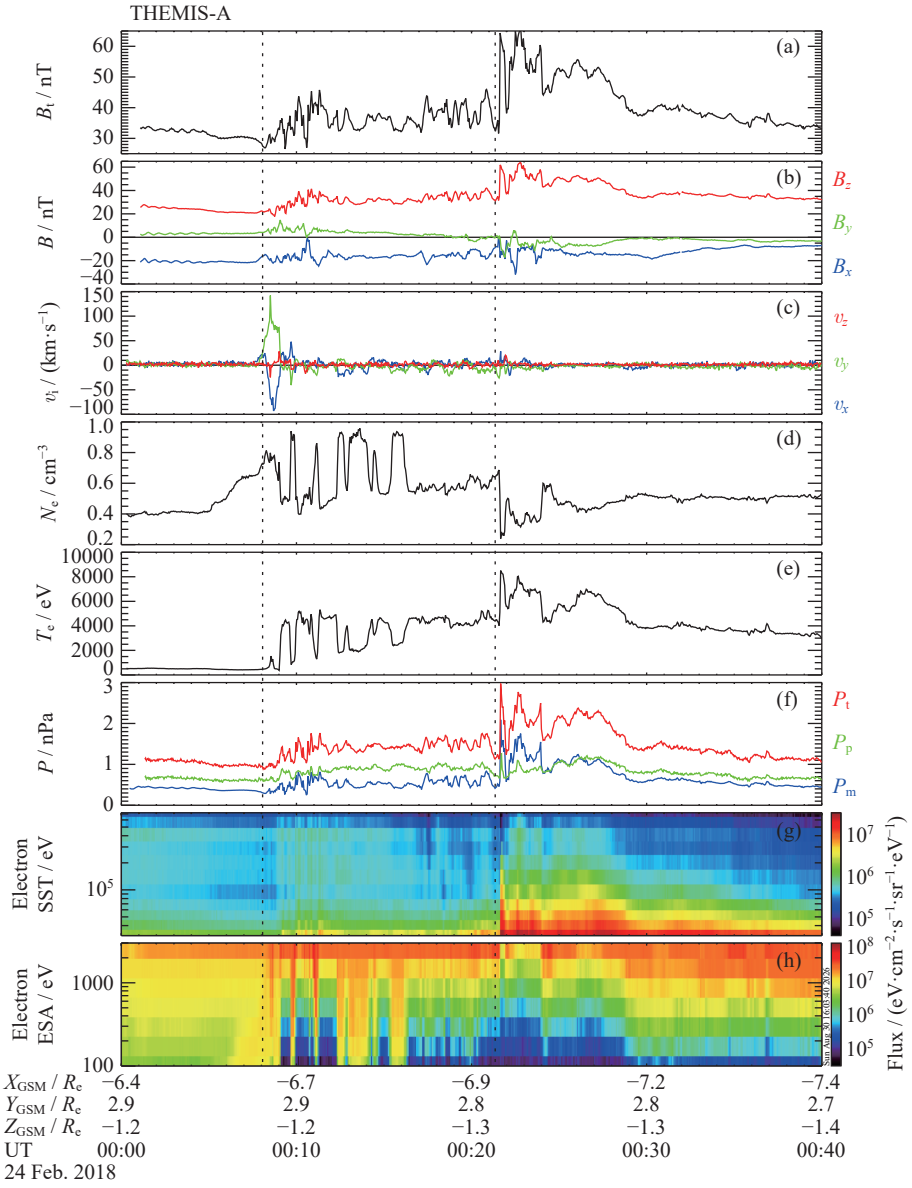


图 1　2018 年 2 月 24 日 00:00—00:40 UT 期间 THEMIS-A 的观测结果. (a)(b) 由磁通门磁力计 (FGM) 测量的总磁场 (B_t) 和磁场 (B), (c)～(e) 由静电分析仪 (ESA) 和固态望远镜 (SST) 测量的离子速度 (v_i)、电子密度 (N_e) 和温度 (T_e), (f) 磁场压强 P_m (蓝线)、等离子体压强 (离子与电子之和)P_p (绿线) 和总压强 P_t (红线), (g)(h) 由 SST 和 ESA 仪器观测得到的 0.1～700 keV 电子能谱

Fig. 1　Observations from THEMIS-A during 00:00—00:40 UT on 24 February 2018. (a)(b) Total magnetic field (B_t) and magnetic field (B) measured by the Flux Gate Magnetometer (FGM) instrument; (c)–(e) ion velocity (v_i), electron density (N_e) and temperature (T_e) measured by the Electrostatic Analyzer (ESA) and Solid State Telescope (SST) instruments; (f) magnetic pressure P_m (the blue line), plasma pressure (ions plus electrons) P_p (the green line), and the total pressure P_t (the red line); (g)(h) tenergy spectra of 0.1–700 keV electrons observed by the SST and ESA instruments

1.2　2018 年 3 月 26 日事件

图 5 给出了 2018 年 3 月 26 日 THEMIS-E 在近地磁尾处观测到的磁场偶极化期间磁场和等离子体特征. THEMIS-E 在大约 08:57 UT (图 5 中第一条垂直虚线所示) 观测到明显的磁场偶极化 (图 5a, b), 且伴随地向流 v_i 的扰动 (图 5c). 在偶极化期间, 均观

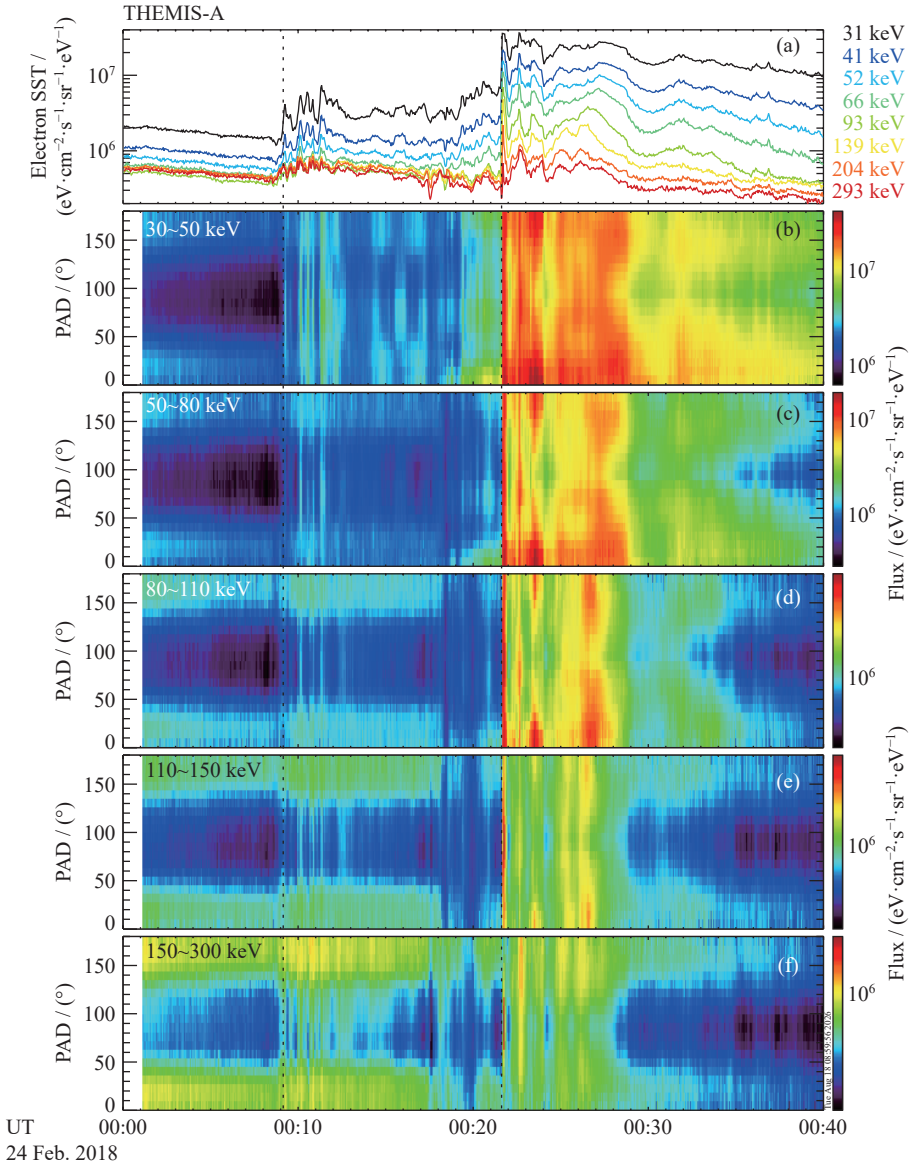


图 2 2018 年 2 月 24 日 00:00—00:40 UT THEMIS-A 电子观测结果. (a) SST 测量的电子全向微分通量, (b)～(f) SST 能量范围 (30～300 keV) 内电子通量随投掷角的变化

Fig. 2 Observations from THEMIS-A during 00:00—00:40 UT on 24 February 2018. (a) Electron omnidirectional differential energy flux from SST instrument, (b)–(f) electron flux variations in the SST energy range (30–300 keV) as a function of pitch angle

测到局地电子数密度 N_e 下降 (图 5d) 以及电子温度 T_e 升高 (图 5e). 同时, 磁场压强 P_m 增强, 而等离子体压强 P_{th} 和总压强 P_t 减小 (图 5f). 但是, 在这期间, THEMIS-E 仅观测到能量电子通量的脉冲式增强 (图 5g). THEMIS-E 在大约 09:19 UT (图 5 中第二条垂直虚线所示) 观测到总磁场 B_t 和磁场 B_z 分量增强 (图 5a, b). 同时, 局地电子数密度 N_e 缓慢下降 (图 5d), 而电子温度 T_e 明显上升 (图 5e), 磁场压强 P_m 和总压强 P_t 也开始上升 (图 5f). 在第二次磁场偶极化期间, THEMIS-E 观测到能量电子通量明显增强 (图 5g).

图 6 给出 THEMIS-E 在 2018 年 3 月 26 日 08:50—09:40 UT 期间对 30～300 keV 电子的观测结果. 在第一次磁场偶极化期间 (图 6 中第一条垂直虚线所示), THEMIS-E 观测到能量>31 keV 电子通量的脉冲式增强 (图 6a). 同时, 30～300 keV 电子在 0°,

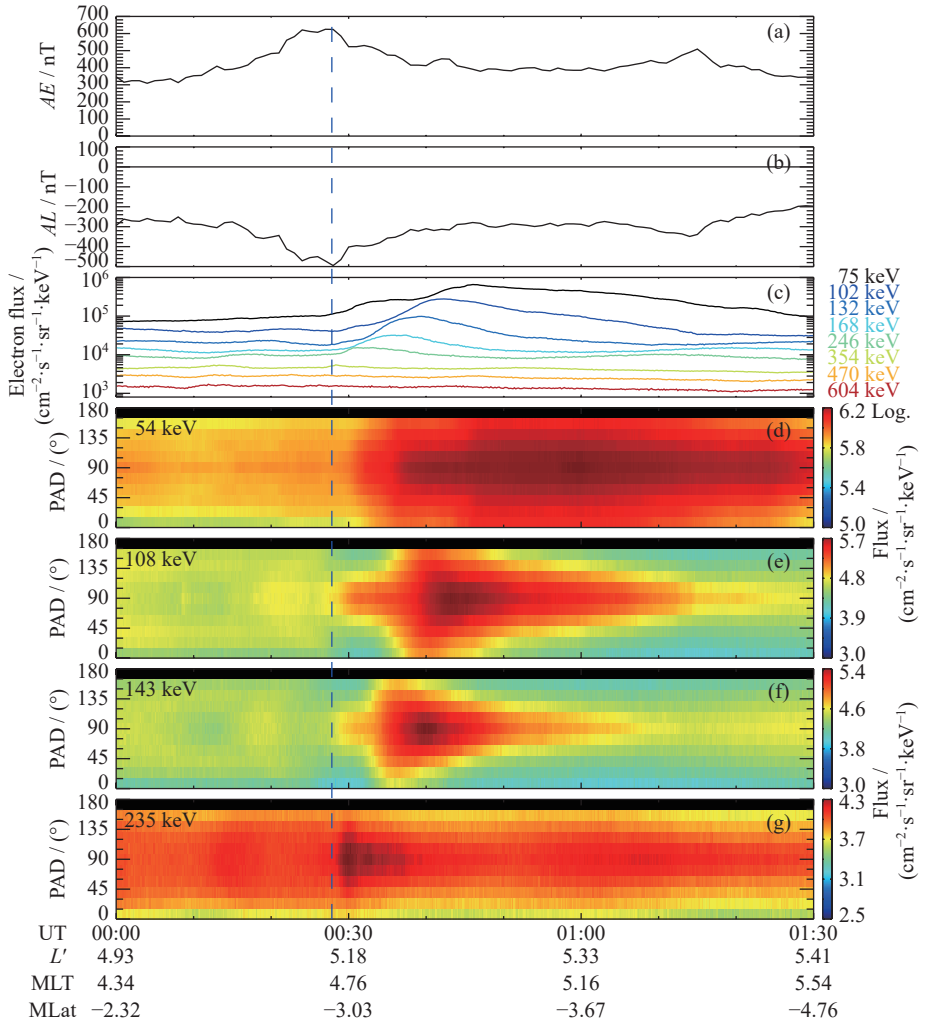


图 3　2018 年 2 月 24 日 00:00—01:30 UT 期间范艾伦探测器 B 的观测结果. (a)(b) 地磁指数 (AE 与 AL); (c)～(g) MagEIS 测量的能量电子微分通量、不同能量 (54～235 keV) 电子的投掷角分布

Fig. 3　Observations from Van Allen Probe B during 00:00—01:30 UT on 24 February 2018. (a)(b) Geomagnetic indices (AE and AL). (c)–(g) Differential fluxes of energetic electrons, the Pitch Angle Distributions (PAD) of different electrons (54–235 keV) from the MagEIS instrument

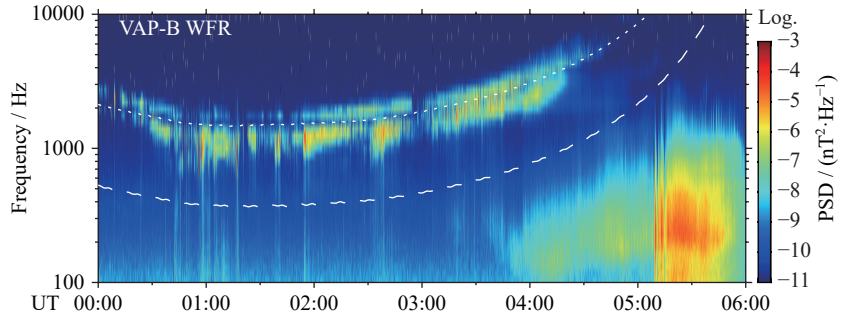


图 4　2018 年 2 月 24 日 00:00—06:00 UT 期间范艾伦探测器 B 上 EMFISIS 测量的磁场谱

Fig. 4　Magnetic-field spectra measured by EMFISIS on Van Allen Probe B during 00:00—06:00 UT on 24 February 2018

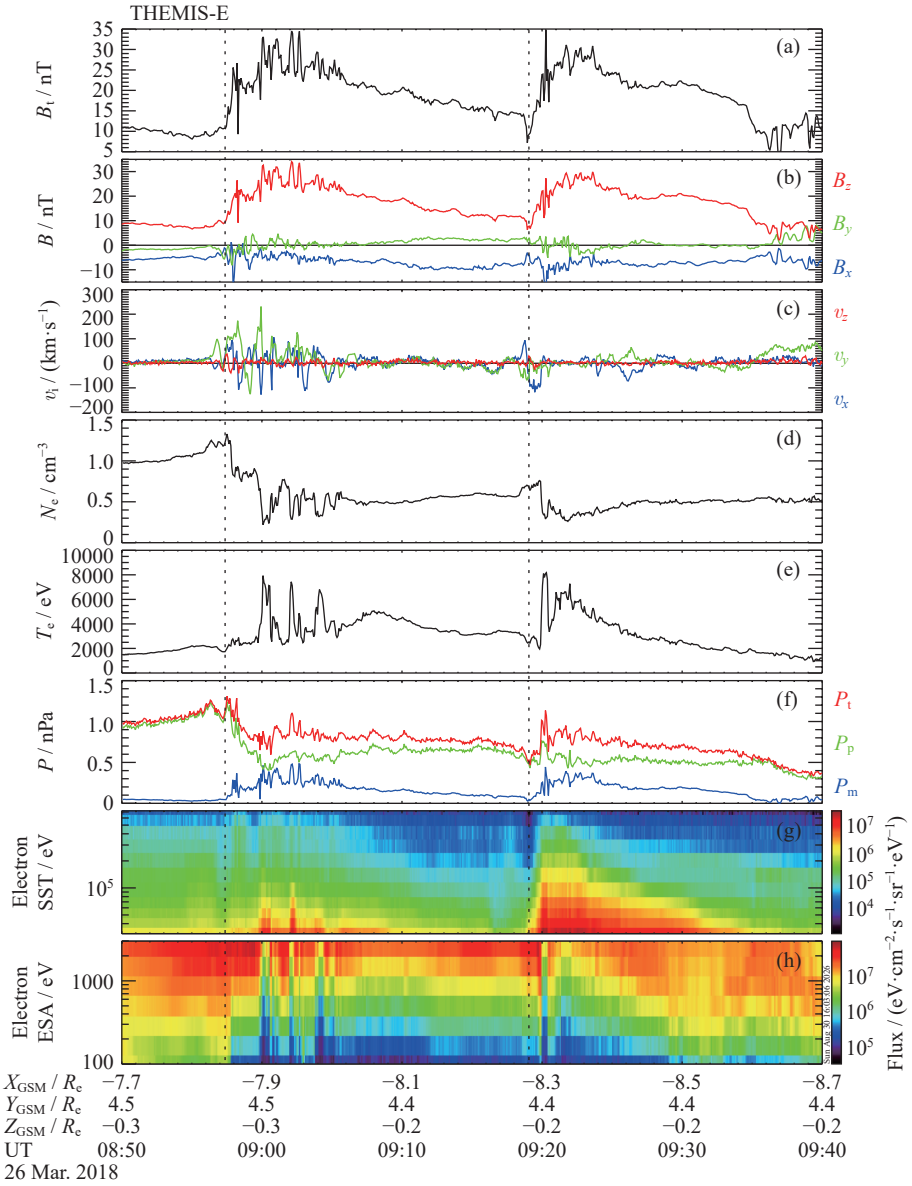


图 5 2018 年 3 月 26 日 08:50—09:40 UT 期间 THEMIS-E 的观测结果

Fig. 5 Observations from THEMIS-E during 08:50—09:40 UT on 26 March 2018

90°和 180°投掷角方向均出现电子通量增强 (图 6b～f). 在第二次磁场偶极化期间 (图 6 中第二条垂直虚线所示), THEMIS-E 首先观测到能量>31 keV 的电子通量快速增强, 随后电子通量缓慢减小 (图 6a). 对于 30～300 keV 电子, 首先在 0°, 90°和 180°投掷角方向的电子通量均明显增强, 随后准平行方向 (投掷角接近 0°和 180°) 的电子通量进一步增强. 上述电子投掷角的变化主要与磁场偶极化过程中的回旋加速和费米加速有关[22,23].

图 7 给出范艾伦探测器 A 在 2018 年 3 月 26 日 08:30—10:30 UT 期间观测到的电子注入事件. 对于此次注入事件, 亚暴膨胀相的起始时间为 09:00 UT (图 7b). *AE* 指数在大约 09:24 UT 达到最大值 591 nT (图 7a). 在大约 09:06 UT (图 7 中第一条垂直虚线所示), 范艾伦探测器 A 首先观测到 226 keV 电子通量增加, 随后较低能量电子 (184 keV, 143 keV, 108 keV 和 80 keV) 通量也相继增加. 此次事件为典型的色散式电子注入事件 (图 7c). 如图 7(d)～(g) 所示, 注入电子的投掷角分布峰值在大约 90°附近, 这是电子注入的特征之一. 在大约 09:30 UT (图 7 中第二条垂直虚线所示), 范艾伦探测器 A 观测到 184 keV 电子通量增加. 随后, 较低能量电

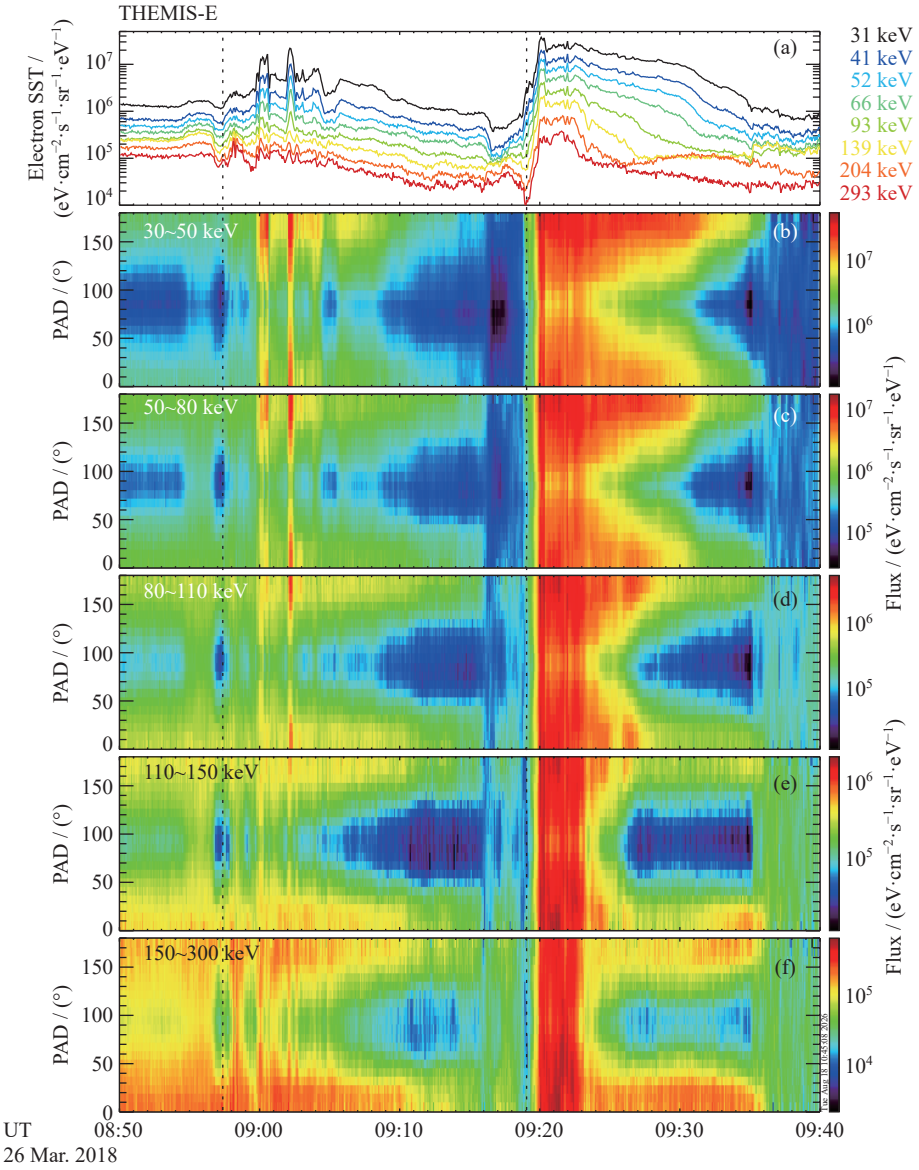


图 6 2018 年 3 月 26 日 08:50—09:40 UT 期间 THEMIS-E 的电子观测结果

Fig. 6 Observations from THEMIS-E during 08:50—09:40 UT on 26 March 2018

子 (143, 108 和 80 keV) 通量也相继增加. 如图 7(d)～(g) 所示, 注入电子的投掷角分布峰值在大约 90°附近. 对于 54～143 keV 电子来说, 注入持续时间约为 10 min, 属于脉冲式电子注入. 电子投掷角分布表明, 这些电子在注入过程中主要经历了 betatron 加速. 在 09:00–10:30 UT 期间, 范艾伦探测器 A 位于磁赤道附近 (Mlat 为 4.1°～2.1°) 晨侧 (MLT 为 5.76～6.76) 的外辐射带区域 (L'为 5.5～5.3). 期间, 范艾伦探测器 A 上的 EMFISIS 观测到较弱的合声波 (图 8). 这些磁赤道附近的合声波与约几十 keV 电子注入 (图 7d) 有关.

1.3 2018 年 3 月 25 日事件

图 9 给出了 2018 年 3 月 25 日 THEMIS-E 在近地磁尾处观测到的磁场扰动和偶极化期间的磁场和等离子体特征. THEMIS-E 在大约 02:06 UT (图 9 中第一条垂直虚线所示) 观测到明显的磁场扰动 (图 9a, b), 且伴随地向流 V_i 的扰动 (图 9c). 在磁场扰动期间, 观测到局地电子数密度 N_e 扰动 (图 9d) 和电子温度 T_e 缓慢升高 (图 9e). 同时, 磁场压强 P_m、等离子体压强 P_{th} 和总压强 P_t 均有一些扰动 (图 9f). 期间, THEMIS-E 观测到能量电子通量增强较小 (图 9g). 在大约 02:23 UT (图 9 中第二条垂直

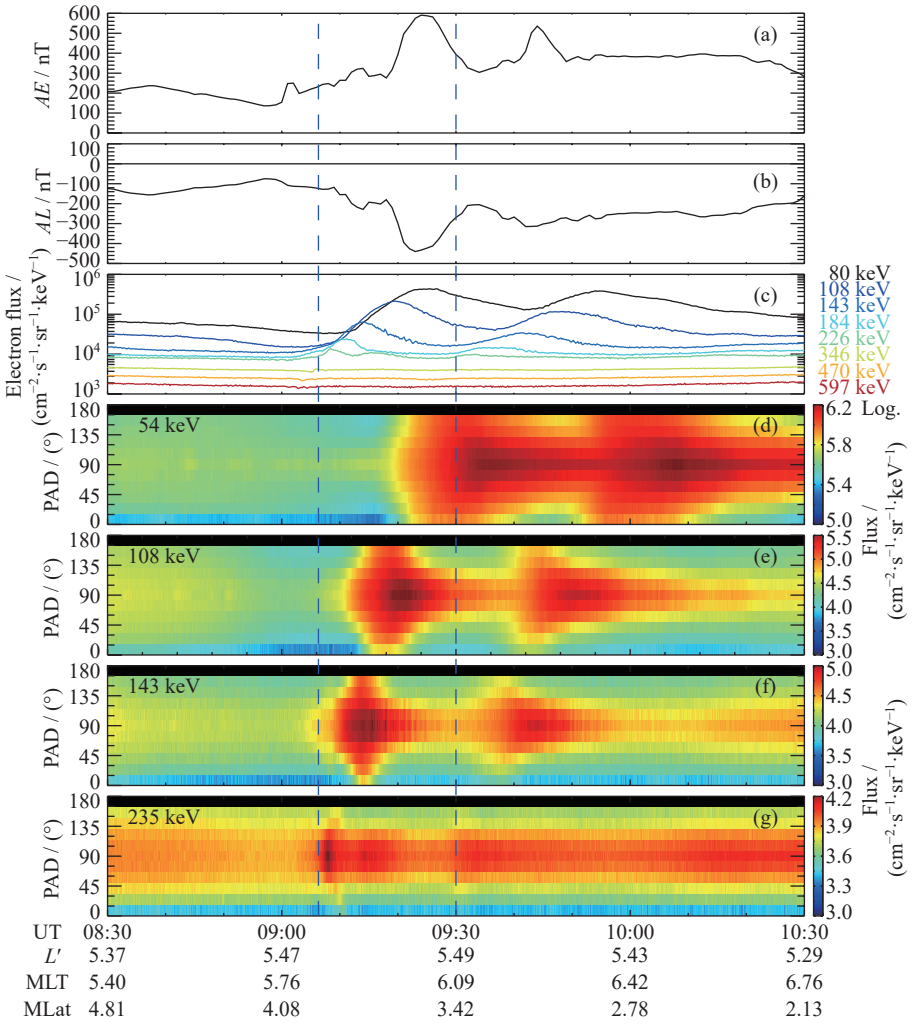


图 7 2018 年 3 月 26 日 08:30—10:30 UT 期间范艾伦探测器 A 的观测结果

Fig. 7 Observations from Van Allen Probe A during 08:30—10:30 UT on 26 March 2018

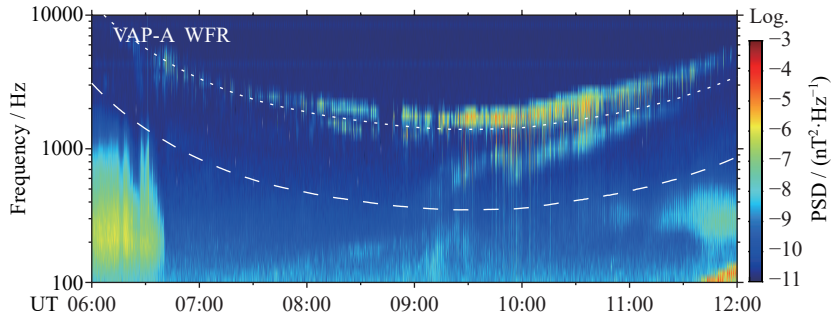


图 8 2018 年 3 月 26 日 06:00—12:00 UT 范艾伦探测器 A 上 EMFISIS 测量的磁场谱

Fig. 8 Magnetic-field spectra measured by EMFISIS on Van Allen Probe A during 06:00—12:00 UT on 26 March 2018

虚线所示), THEMIS-E 观测到总磁场 B_t 的扰动和磁场 B_z 分量迅速增强 (图 9a, b), 并伴随脉冲式离子流 v_i(图 9c). 同时, 局地电子数密度 N_e 开始下降 (图 9d), 电子温度 T_e 显著上升 (图 9e), 而磁场压强 P_m 和总压强 P_t 有些扰动 (图 9f). 在第二次磁场扰动期间, THEMIS-E 观测到能量电子增强 (图 9g).

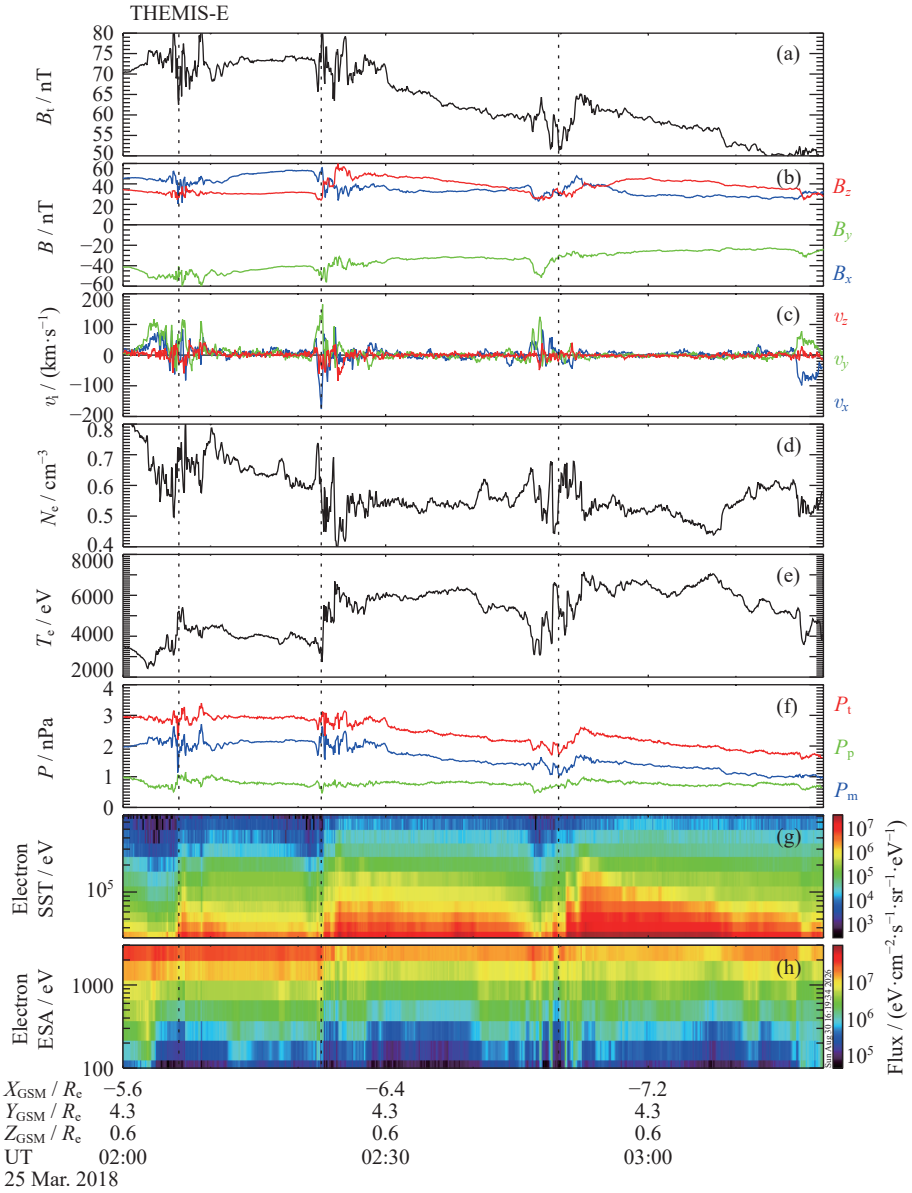


图 9 2018 年 3 月 25 日 02:00－03:20 UT 期间 THEMIS-E 的观测结果

Fig. 9 Observations of THEMIS-E during 02:00－03:20 UT on 25 March 2018

THEMIS-E 在大约 02:50 UT (图 9 中第三条垂直虚线所示), 观测到总磁场 B_t 和磁场 B_z 分量增强 (图 9a, b). 同时, 局地电子数密度 N_e、电子温度 T_e、磁场压强 P_m 和总压强 P_t 也开始上升 (图 9d～f). 在磁场偶极化期间, 观测到能量电子通量显著增强 (图 9g).

图 10 给出了 2018 年 3 月 25 日 02:00－03:20 UT 期间 THEMIS-E 对 30～300 keV 电子的观测结果. 在第一次磁场扰动期间 (图 10 中第一条垂直虚线所示), THEMIS-E 观测到能量>31 keV 的电子通量增强 (图 10a). 同时, 30～300 keV 电子在准平行方向出现通量增强 (图 10b～f). 在第二次磁场扰动期间 (图 10 中第二条垂直虚线所示), 对于 30～300 keV 电子, 首先在 0°, 90°和 180°投掷角方向上出现通量增强, 随后在准平行方向上也出现通量增强 (图 10b～f). 在磁场偶极化期间 (图 10 中第三条垂直虚线所示), THEMIS-E 观测到能量>31 keV 的电子通量快速增强 (图 10a). 对于 30～300 keV 电子, 观测到准平行方向通量增强. 同时 90°投掷角方向也有所增强 (图 10b～f). 这些电子投掷角的变化主要与磁

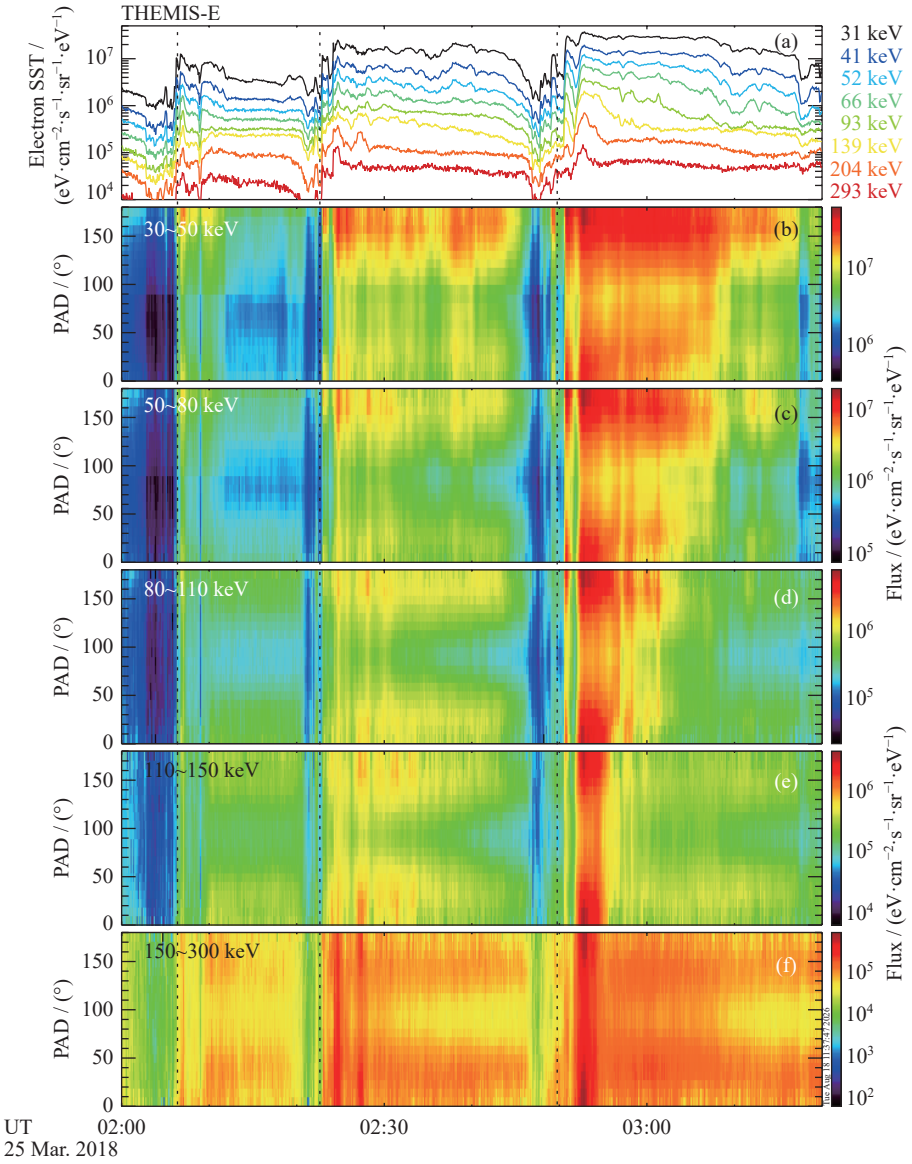


图 10 2018 年 3 月 25 日 02:00－03:20 UT 期间 THEMIS-E 的电子观测结果

Fig. 10 Observations from THEMIS-E during 02:00－03:20 UT on 25 March 2018

场扰动和偶极化过程中的 betatron 和费米加速有关.

图 11 给出了范艾伦探测器 B 在 2018 年 3 月 25 日 02:00－03:30 UT 期间观测到的电子注入事件. 对于此次事件, 亚暴膨胀相的起始时间为 02:08 UT (图 11b). *AE* 指数在约 02:34 UT 达到局部峰值 640 nT, 而在 03:07 UT 达到最大值 776 nT (图 11a). 在约 02:31 UT (图 11 中第一条垂直虚线所示), 范艾伦探测器 B 首先观测到 246 keV 电子通量增加, 随后较低能量电子 (168, 132, 102 和 75 keV) 通量也相继增加 (图 11c). 如图 11(d)～(g) 所示, 注入电子的投掷角分布峰值在 90°附近. 在约 02:59 UT (图 11 中第二条垂直虚线所示), 范艾伦探测器 B 先观测到 168 keV 电子通量增加, 随后较低能量电子 (132, 102 和 75 keV) 通量也相继增加 (图 11c). 这些注入电子的投掷角分布峰值在约 90°附近 (图 11d～g). 对于 54～235 keV 电子来说, 注入持续时间>60 min, 属于连续电子注入. 电子投掷角分布表明, 电子在注入过程中经历了 betatron 加速. 在 02:00－03:30 UT 期间, 范艾伦探测器 B 位于磁赤道附近 (MLAT 为–3.8°～–5.4°) 晨侧 (MLT 为 4.4～5.5) 的外辐射带区域 (*L*'为 5.4～5.5). 在此期间, 范艾伦探测器 B 上的 EMFISIS 观测到较强的合声波 (图 12).

1.4 2014 年 9 月 24 日事件

图 13 给出了 2014 年 9 月 24 日 THEMIS-A 在外辐射带区域观测到的电子注入和偶极化期间的磁场和等离子体特征. 在大约 02:48 UT (图 13 中第一条垂直虚线所示), THEMIS-A 观测到明显的电子注入 (图 13g), 且电子温度 T_e 缓慢升高 (图 13e). 在此

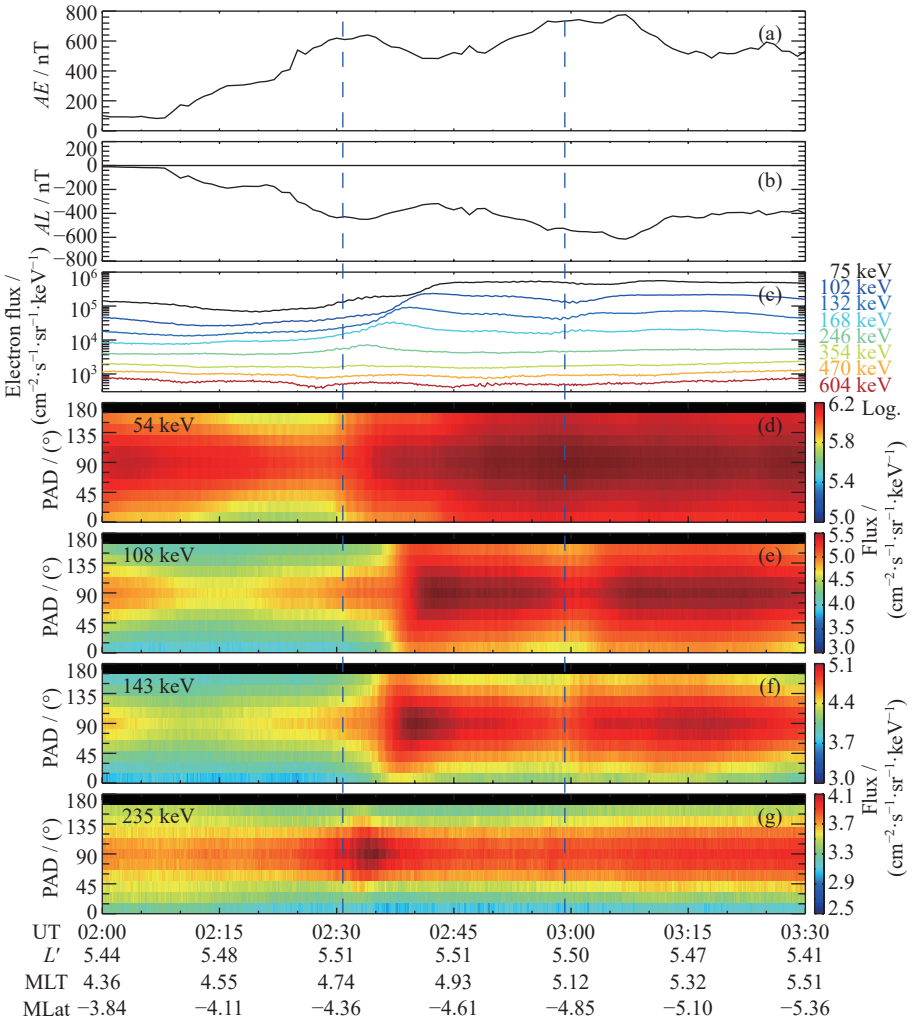


图 11 2018 年 3 月 25 日 02:00—03:30 UT 期间范艾伦探测器 B 的观测结果

Fig. 11 Observations from Van Allen Probe B during 02:00—03:30 UT on 25 March 2018

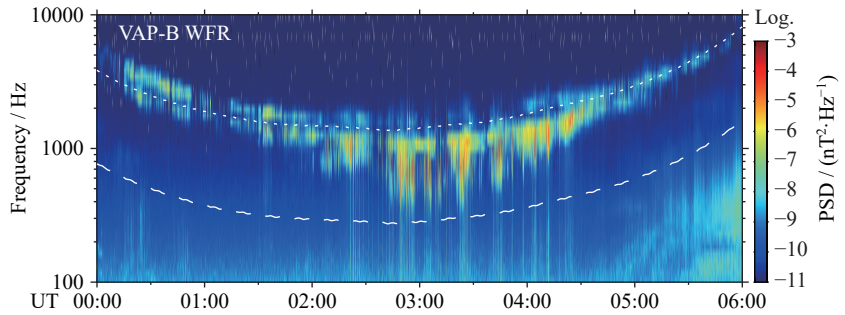


图 12 2018 年 3 月 25 日 00:00—06:00 UT 范艾伦探测器 B 上 EMFISIS 仪器测量的磁场谱

Fig. 12 Magnetic-field spectra measured by EMFISIS on Van Allen Probe B during 00:00—06:00 UT on 25 March 2018

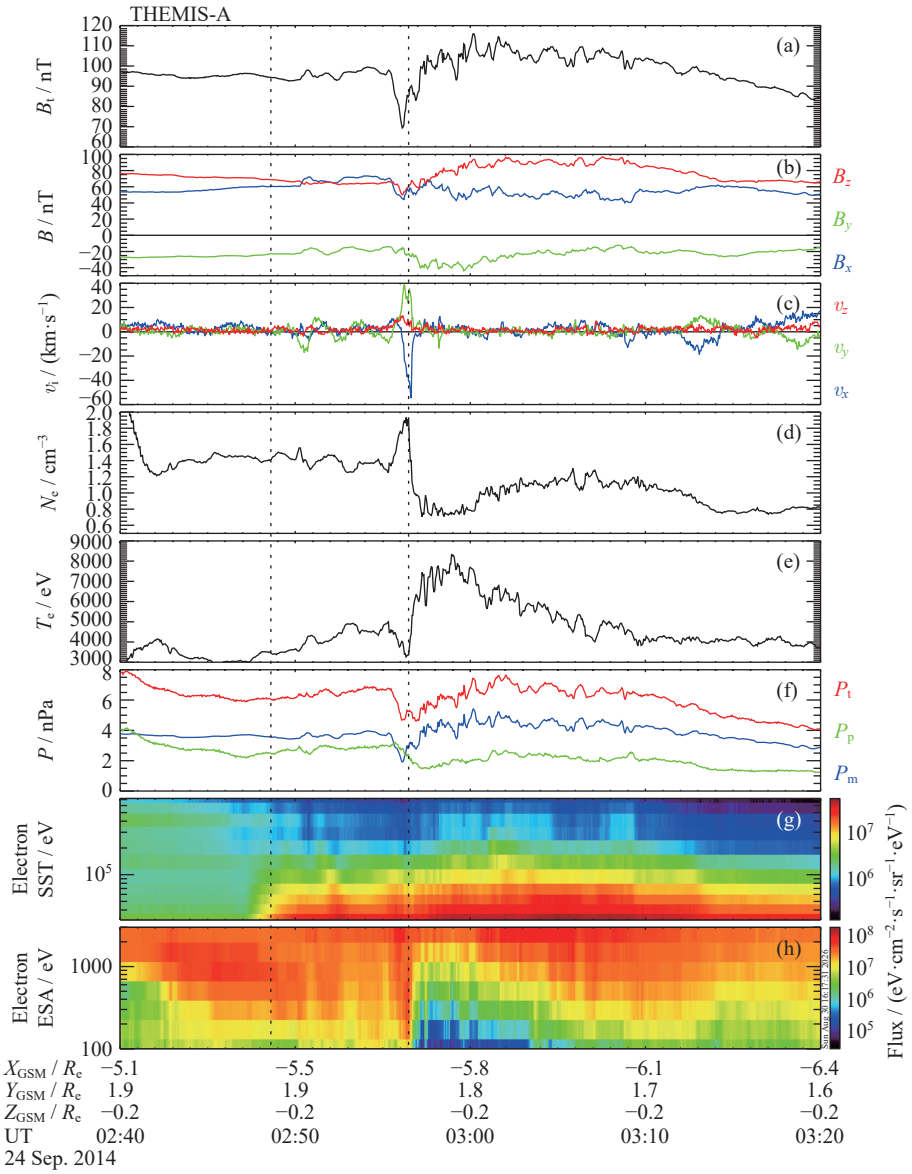


图 13 2014 年 9 月 24 日 02:40—03:20 UT 期间 THEMIS-A 的观测结果

Fig. 13 Observations from THEMIS-A during 02:40—03:20 UT on 24 September 2014

期间, 磁场、离子流速 V_i 和局地电子数密度 N_e 等并未发生显著变化 (图 13a～d). 这可能是由于 THEMIS-A 位于外辐射带区域 (X≈ –5.5 R_e) 的原因. THEMIS-A 在大约 02:56 UT (图 13 中第二条垂直虚线所示), 观测到总磁场 B_t 和磁场 B_z 分量逐渐增强 (图 13a, b), 且伴随脉冲式的高速流 V_i (图 13c). 同时, 局地电子数密度 N_e 开始明显下降 (图 13d), 电子温度 T_e 急剧上升 (图 13e), 磁场压强 P_m 和总压强 P_t 也逐渐增强 (图 13f). 这些均是亚暴偶极化的典型特征[20,21]. 在偶极化期间, THEMIS-A 观测到高能电子通量明显增强 (图 13g).

图 14 给出了 THEMIS-A 在 2014 年 9 月 24 日 02:40—03:20 UT 期间对 30～300 keV 电子的观测结果. 在大约 02:48 UT 之后 (图 14 中第一条垂直虚线所示), THEMIS-E 观测到>31 keV 的电子通量显著增强 (图 14a). 同时, 30～300 keV 电子在准平行方向出现通量增强. 而 90°投掷角方向也出现通量增强 (图 14b～f). 在磁场偶极化期间 (图 14 中第二条垂直虚线所示), 30～300 keV 的电子通量也逐渐增强 (图 14a). 其中, 30～50 keV 电子主要呈现各向同性分布 (图 14a), 而 50～300 keV 电子主要在 90°投掷角方向上出现电子通量增强 (图 14c～f). 这些电子投掷角的

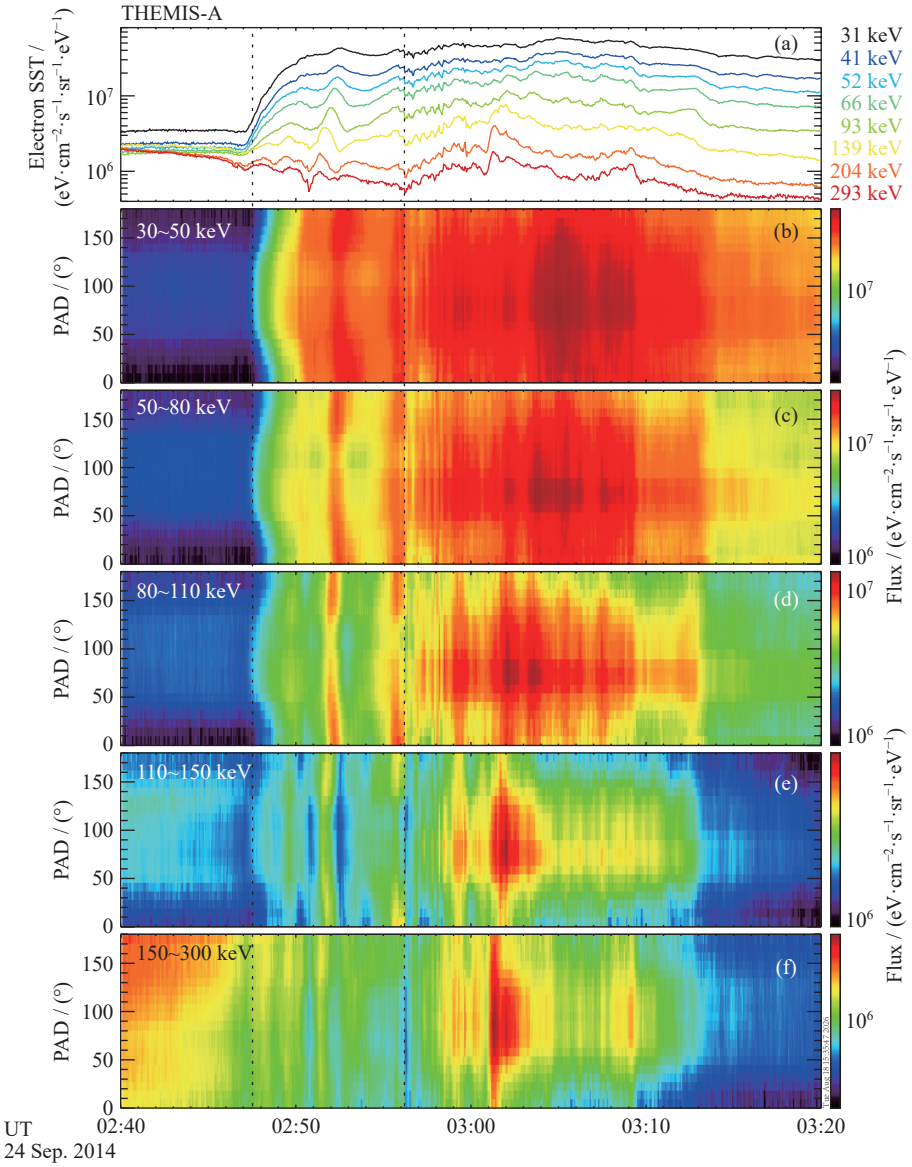


图 14 2014 年 9 月 24 日 02:40－03:20 UT 期间 THEMIS-E 的电子观测结果

Fig. 14 Observations from THEMIS-E during 02:40－03:20 UT on 24 September 2014

变化主要与磁场偶极化过程中的 betatron 加速有关.

图 15 给出了范艾伦探测器 A 在 2014 年 9 月 24 日 02:30－04:00 UT 期间观测到的电子注入事件. 对于此次事件, 亚暴膨胀相的起始时间为 02:51 UT. 由于 AL 指数快速下降, 其在约 03:00 UT 达到最大负值–423 nT (图 15b). 在 02:53 UT (图 15 中垂直虚线所示),范艾伦探测器 A 先观测到 226 keV 电子通量增加, 随后较低能量电子 (184 keV, 143 keV, 108 和 80 keV) 通量也相继增加 (图 15c). 同时, 范艾伦探测器 A 观测到磁场 B_z 分量增加 (未显示). 如图 15(d)～(g) 所示, 注入电子的投掷角分布峰值在大约 90°附近. 对于 54～235 keV 电子来说, 注入持续时间 >20 min, 属于非脉冲式电子注入. 投掷角分布表明, 这些电子在注入过程中经历了 betatron 加速. 在 02:30－04:00 UT 期间, 范艾伦探测器 A 位于磁赤道附近 (MLAT: 6.5°～5.8°) 晨侧 (MLT: 4.1～5.3) 的外辐射带区域 (L': 5.35～5.50). 在此期间, 范艾伦探测器 B 上的 EMFISIS 观测到较强的合声波 (图 16).

2 讨论与结论

色散式电子注入是磁层亚暴过程中的典型现

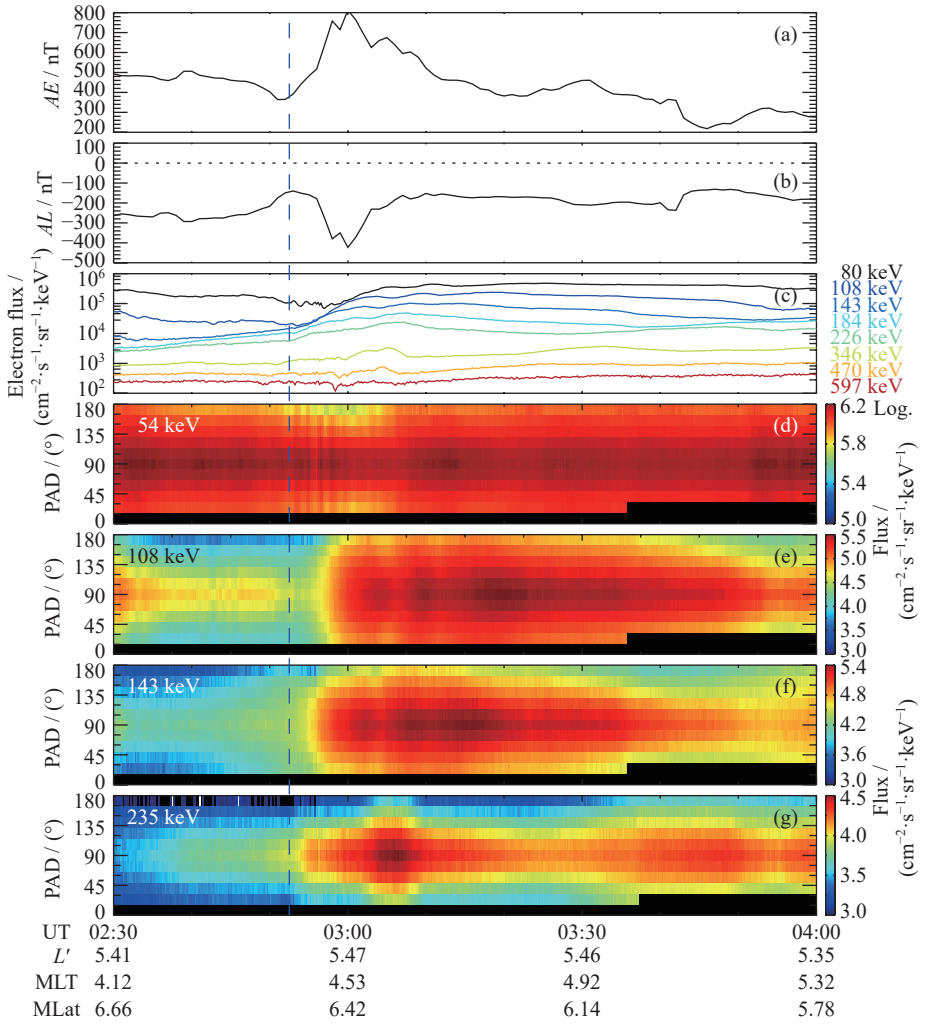


图 15 2014 年 9 月 24 日 02:30－04:00 UT 期间范艾伦探测器 A 的观测结果

Fig. 15 Observations from Van Allen Probe A during 02:30－04:00 UT on 24 September 2014

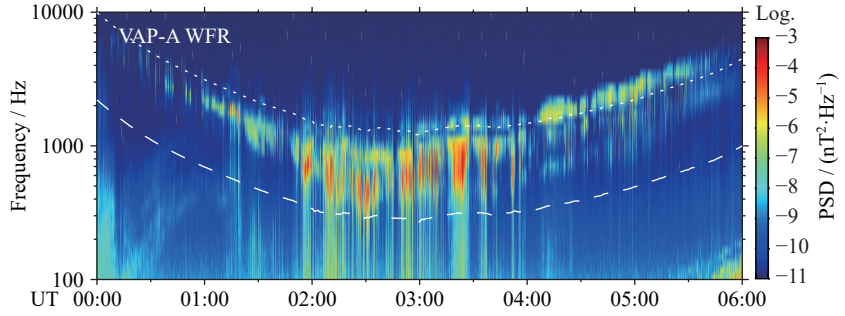


图 16 2014 年 9 月 24 日 00:00－06:00 UT 范艾伦探测器 B 上 EMFISIS 测量的磁场谱

Fig. 16 Magnetic-field spectra measured by EMFISIS on Van Allen Probe B during 00:00－06:00 UT on 24 September 2014

象[20–23]. 在 2018 年 2 月 24 日事件中, 54 keV 电子通量呈现出两个上升过程: 第一个上升过程要早于 108～143 keV 电子通量, 这可能与电子注入之前局部电场对低能电子加速有关; 第二个上升过程发生在 108 keV 电子增强之后, 体现了色散式电子注入的特征 (图 3d～g). 相比之下, 该特征在 2018 年 3

月 25 日事件中较为微弱 (图 11d～g), 而且在 2018 年 3 月 26 日 (图 7d～g) 和 2014 年 9 月 24 日事件 (图 15d～g) 中并未明显出现. 这可能与电子注入之前局部电场较弱有关. 上述 4 个事件中, 接近 180°或 0°投掷角的电子通量缺失, 可能由范艾伦探测器上粒子探测器的朝向导致, 但并不影响其他投掷角电子通量的分布.

通常, 哨声模合声波分布在晨侧等离子体层顶之外[59,60]. 合声波的强度随亚暴强度增强而增大[29,31,35,36,59]. 亚暴注入电子是种子电子主要来源之一, 亚暴强度也是影响种子电子通量的重要因素之一[5].

2018 年 2 月 24 日事件是一个非孤立的亚暴事件, 其 AE 峰值为 624 nT (图 3a). 在本文中, 非孤立亚暴是指事件发生于已有一定水平地磁活动背景下, 或与其他亚暴活动间隔时间较短 (通常<1 h), 且 AE 指数大于 200 nT. 在亚暴膨胀相开始时, THEMIS-A 观测到近地磁场扰动, 并伴随能量电子的场向分布 (图 2c～f). 而位于晨侧外辐射带的范艾伦探测器 B 并未观测到能量电子通量的增强. 在亚暴膨胀相期间, THEMIS-A 观测到近地磁场偶极化, 并观测到能量电子在 0°, 90°和 180°投掷角方向的通量增强 (图 2c～f). 在亚暴峰值后, 范艾伦探测器 B 观测到能量电子通量的增强 (图 3d～g) 和较强的合声波 (图 4). 这些增强的合声波和能量电子的相互作用有助于外辐射带相对论电子的加速.

2018 年 3 月 26 日事件也是一个非孤立的连续亚暴事件, 其 AE 峰值大约为 600 nT (图 7a). 在第一次亚暴膨胀相开始时, THEMIS-A 在近地观测到第一次磁场偶极化, 并伴随能量电子脉冲式的增强 (图 6b～f). 随后, 位于晨侧外辐射带的范艾伦探测器 A 也观测到能量电子脉冲式的增强 (图 7d～g). 在第一次亚暴峰值附近, THEMIS-A 在近地观测到第二次磁场偶极化, 并伴随能量电子在 0°, 90°和 180°投掷角方向的通量增强 (图 6b～f). 在第二次亚暴膨胀相开始时, 范艾伦探测器 B 观测到能量电子通量的增强 (图 7d～f). 在此次事件中, 范艾伦探测器 B 观测到较弱的合声波 (图 8). 在该事件中, 第一次磁场偶极化伴随明显的地向流扰动; 而第二次偶极化受背景磁场差异影响, 并未观测到地向流信号. 同时, 两次偶极化对应的等离子体状态存在差异, 表现为电子温度、电子密度以及低能电子能谱的响应各不相同. 这种等离子体特征差异可能与地向流有关.

2018 年 3 月 25 日事件是一个连续的孤立亚暴事件, 其 AE 峰值大约为 800 nT (图 11a). 本文中孤立亚暴是指: 事件发生前 1 h 地磁活动较为平静 (AE 指数持续低于 200 nT), 且事件本身具有清晰的膨胀相开始、峰值和恢复相的特点. 在第一个亚暴膨胀相开始时, THEMIS-E 在近地观测到地磁场扰动, 并伴随能量电子的场向分布 (图 10b～f). 而位于晨侧外辐射带的范艾伦探测器 B 并未观测到能量电子通量的增强. 在第一个亚暴膨胀相期间, THEMIS-E 观测到第一次磁场偶极化并伴随能量电子在 0°, 90°和 180°投掷角方向的通量增强 (图 10b～10f). 范艾伦探测器 B 在亚暴局部峰值时观测到连续的能量电子注入 (图 11d～g). 在第二个亚暴膨胀相期间, THEMIS-E 观测到第二次磁场偶极化, 并伴随能量电子在 0°, 90°和 180°投掷角方向的通量进一步增强 (图 10b～f). 随后, 范艾伦探测器 B 也观测到连续的能量电子注入 (图 11d～f). 在此次事件中, 范艾伦探测器 B 观测到较强的合声波 (图 12).

2014 年 9 月 24 日事件是一个非孤立的亚暴事件, 其膨胀相的持续时间较短, AE 峰值大约为 800 nT (图 15a). 在亚暴膨胀相的开始前, 位于外辐射带的 THEMIS-A 先观测到能量电子的注入. 随后, 观测到磁场偶极化和电子注入增强 (图 14b～f). 从亚暴膨胀相开始时, 范艾伦探测器 A 观测到连续的能量电子注入 (图 15d～g) 和较强的合声波 (图 16). 在此次事件中, 位于外部的 THEMIS-A (L≈5.7) 观测到的磁场偶极化时间稍迟于范艾伦探测器 A (L≈5.45) 观测到的电子注入时间. 这可能与磁场偶极化的尾向传播有关[22].

基于以上讨论与对比, 发现孤立与非孤立亚暴在外辐射带响应上存在明显差异. 其一, 孤立亚暴 (例如 2018 年 3 月 25 日事件) 往往能引发外辐射带更为持续、更为显著的种子电子注入和合声波的增强. 这可能是因为平静期的磁层背景为亚暴能量输入和粒子积累提供了更“干净”的初始条件. 其二, 而非孤立的连续亚暴 (例如 2018 年 3 月 26 日事件), 其多次磁场偶极化可产生叠加乃至相互干扰的效应, 导致注入电子特性更为复杂, 合声波响应也可能因背景等离子体状态的改变而有所不同 (例如波的强度相对较弱或

更分散). 该问题有待后续进一步研究.

基于上述 4 个典型事件的分析, 进一步讨论亚暴注入电子特性对外辐射带合声波的调制作用. 对于 2018 年 2 月 24 日与 2014 年 9 月 24 日事件, 范艾伦探测器均观测到了较强且持续的合声波活动 (图 4, 图 16). 对应的电子注入特征为: 源电子 (约为 54 keV) 通量增强显著且持续时间长 (非脉冲式); 这些低能电子在注入后表现出较强的各向同性或弱各向异性分布 (图 3d, 图 15d), 这表明有充足的、投掷角分布较宽的粒子源; 这种“强通量、长时间、宽 PAD”的源电子群体, 为合声波的增长提供了充足而持久的自由能, 从而导致合声波强度较高. 对于 2018 年 3 月 26 日事件, 合声波活动较弱 (图 8). 对应的电子注入特征为: 源电子 (约为 54 keV) 的注入呈现短暂的脉冲式增强, 通量峰值相对较低且回落较快 (图 7d). 这种短暂脉冲式的注入, 虽然能因各向异性而激发合声波, 但由于源电子通量水平较低或持续时间较短, 难以产生较强的合声波. 对于 2018 年 3 月 25 日事件, 合声波强度中等偏强 (图 12). 其电子注入介于上述两类之间, 表现为连续多次注入, 使源电子通量维持在较高水平 (图 11d), 为合声波提供了较持续的激发条件. 由此可见, 合声波的活动水平不是由亚暴强度 (AE 指数) 唯一决定, 而是依赖于亚暴注入电子特性 (注入电子通量、持续时间和投掷角分布). 本研究中的多事件对比也清晰地体现出二者之间的依赖关系.

利用 THEMIS 卫星和范艾伦探测器的联合观测研究不同磁层亚暴事件对外辐射带的影响 (源电子、种子电子的增强), 得出以下结论.

(1) 亚暴膨胀相触发的近地磁场偶极化是驱动能量电子向地球方向注入并最终影响外辐射带的关键环节.

(2) 外辐射带合声波的活动水平受亚暴注入电子特性 (注入电子通量、持续时间和投掷角分布) 的显著调制, 并存在一定的依赖关系.

(3) 亚暴的时序结构 (脉冲式或连续式) 显著影响外辐射带响应的模式 (一次响应或多阶段响应).

上述结果表明, 不同磁层亚暴的演化过程对外辐射带的影响存在差异. 统计并研究不同磁层亚暴事件对外辐射带的影响 (源电子或合声波、种子电子的增强), 有待后续进一步开展相关研究工作.

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] DAI L, WANG C, REN Y, *et al*. Geomagnetic storms and substorms: progress and perspectives[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2025, **70**(27): 4769-4774

[2] LI L Y, CAO J B, ZHOU G C, *et al*. Statistical roles of storms and substorms in changing the entire outer zone relativistic electron population[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A12): A12214

[3] SU Z P, ZHU H, XIAO F L, *et al*. Intense duskside lower band chorus waves observed by Van Allen Probes: generation and potential acceleration effect on radiation belt electrons[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(6): 4266-4273

[4] TANG C L, ZHANG J-C, REEVES G D, *et al*. Prompt enhancement of the Earth's outer radiation belt due to substorm electron injections[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(12): 11826-11838

[5] TANG C L, WANG Y X, NI B, *et al*. Radiation belt seed population and its association with the relativistic electron dynamics: a statistical study[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(5): 5261-5276

[6] TANG C L, WANG Y X, NI B, *et al*. The effects of magnetospheric processes on relativistic electron dynamics in the Earth's outer radiation belt[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(10): 9952-9968

[7] TANG C L, XIE X J, NI B, *et al*. Rapid enhancements of the seed populations in the heart of the Earth's outer radiation belt: a multicase study[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(6): 4895-4907

[8] HUA M, BORTNIK J, MA Q L. Upper limit of outer radiation belt electron acceleration driven by whistler-mode chorus waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(15): e2022GL099618

[9] WANG X, TANG C L, NI B B, *et al*. The seed populations in the Earth's outer radiation belt during the main phase of magnetic storms: a statistical study[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(3): e2021JA030193

[10] WANG X, TANG C L, NI B B, *et al*. The evolutions of the seed and relativistic electrons in the Earth's outer radiation belt during the geomagnetic storms: a statistical study[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(5): e2023JA031284

[11] REEVES G D, SPENCE H E, HENDERSON M G, *et al*. Electron acceleration in the heart of the Van Allen radiation belts[J]. *Science*, 2013, **341**(6149): 991-994

[12] THORNE R M, LI W, NI B, *et al*. Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus[J]. *Nature*, 2013, **504**(7480): 411-414

[13] LI W, THORNE R M, MA Q, *et al*. Radiation belt electron acceleration by chorus waves during the 17 March 2013 storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(6): 4681-4693

[14] BOYD A J, TURNER D L, REEVES G D, *et al*. What causes radiation belt enhancements: a survey of the van Allen probes era[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(11): 5253-5259

[15] YANG C, XIAO F L, HE Y H, *et al*. Storm time evolution of outer radiation belt relativistic electrons by a nearly continuous distribution of chorus[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(5): 2159-2167

[16] ALLISON H J, SHPRITS Y Y. Local heating of radiation belt electrons to ultra-relativistic energies[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): 4533

[17] CHEN J R, TANG C L, CHU X X, *et al*. A statistical study on the acceleration conditions of ultrarelativistic electrons in the Earth's outer radiation belt during geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(10): e2023JA032024

[18] BOYD A J, SPENCE H E, CLAUDEPIERRE S G, *et al*. Quantifying the radiation belt seed population in the 17 March 2013 electron acceleration event[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(7): 2275-2281

[19] JAYNES A N, BAKER D N, SINGER H J, *et al*. Source and seed populations for relativistic electrons: their roles in radiation belt changes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(9): 7240-7254

[20] TANG C L, LI Z Y, ANGELOPOULOS V, *et al*. THEMIS observations of the near-Earth plasma sheet during a substorm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A9): A09211

[21] TANG C L, ANGELOPOULOS V, RUNOV A, *et al*. Precursor activation and substorm expansion associated with observations of a dipolarization front by Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms (THEMIS)[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A7): A07215

[22] TANG C L, LU L, ZHOU M, *et al*. THEMIS observations of electron acceleration associated with the evolution of substorm dipolarization in the near-Earth tail[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(7): 4237-4247

[23] TANG C L, ZHOU M, YAO Z H, *et al*. Electron acceleration associated with the magnetic flux pileup regions in the near-Earth plasma sheet: a multicase study[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(5): 4331-4342

[24] OMURA Y, KATOH Y, SUMMERS D. Theory and simulation of the generation of whistler-mode chorus[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A4): A04223

[25] TSURUTANI B T, SMITH E J. Two types of magnetospheric ELF chorus and their substorm dependences[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, **82**(32): 5112-5128

[26] HE Tian, LIU Siqing, ZHENG Jinlei, *et al*. Study on high energy electron flux enhancement events and whistler chorus wave[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2013, **33**(2): 170-175 (何甜, 刘四清, 郑金磊, 等. 哨声模合声波与地球同步轨道高能电子通量增强事件事例研究 [J]. 空间科学学报, 2013, **33**(2): 170-175)

[27] XIAO F L, YANG C, HE Z G, *et al*. Chorus acceleration of radiation belt relativistic electrons during March 2013 geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(5): 3325-3332

[28] OMURA Y, MIYASHITA Y, YOSHIKAWA M, *et al*. Formation process of relativistic electron flux through interaction with chorus emissions in the Earth's inner magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(11): 9545-9562

[29] TANG C L, YANG C, CHEN J R, *et al*. Rapid enhancements of relativistic electrons in the Earth's outer radiation belt caused by the intense substorms: a statistical study[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(2): e2022JA031089

[30] TANG C L, SU Z P, NI B B, *et al*. The effects of geomagnetic activities on acceleration regions of radiation belt electrons[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(6): e2022JA031229

[31] WANG D D, SHPRITS Y Y, ZHELAVSKAYA I S, *et al*. Analytical chorus wave model derived from van Allen probe observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(2): 1063-1084

[32] ZHAO H, BAKER D N, LI X, *et al*. On the acceleration mechanism of ultrarelativistic electrons in the center of the outer radiation belt: a statistical study[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(11): 8590-8599

[33] BINGHAM S T, MOUIKIS C G, KISTLER L M, *et al*. The storm time development of source electrons and chorus wave activity during CME-and CIR-driven storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(8): 6438-6452

[34] LI W, THORNE R M, ANGELOPOULOS V, *et al*. Global distribution of whistler-mode chorus waves observed on the THEMIS spacecraft[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(9): L09104

[35] MEREDITH N P, HORNE R B, ANDERSON R R. Substorm dependence of chorus amplitudes: implications for the acceleration of electrons to relativistic energies[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, **106**(A7): 13165-13178

[36] MEREDITH N P, HORNE R B, SICARD-PIET A, *et al*. Global model of lower band and upper band chorus from multiple satellite observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A10): A10225

[37] HORNE R B, THORNE R M, GLAUERT S A, *et al*. Timescale for radiation belt electron acceleration by whistler mode chorus waves[J]. *Journal of Geophysical Research:*

Space Physics, 2005, **110**(A3): A03225

[38] LI X L, BAKER D N, TEMERIN M, *et al*. Simulation of dispersionless injections and drift echoes of energetic electrons associated with substorms[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, **25**(20): 3763-3766

[39] GANUSHKINA N Y, AMARIUTEI O A, SHPRITS Y Y, *et al*. Transport of the plasma sheet electrons to the geostationary distances[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(1): 82-98

[40] SU Z P, ZHU H, XIAO F L, *et al*. Quantifying the relative contributions of substorm injections and chorus waves to the rapid outward extension of electron radiation belt[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(12): 10023-10040

[41] DAI L, WANG C, DUAN S P, *et al*. Near-Earth injection of MeV electrons associated with intense dipolarization electric fields: van Allen Probes observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(15): 6170-6179

[42] TANG C L, WANG X, NI B B, *et al*. The 600 keV electron injections in the Earth's outer radiation belt: a statistical study[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2022, **6**(2): 149-160

[43] KIM H J, LEE D Y, WOLF R, *et al*. Rapid injections of MeV electrons and extremely fast step like outer radiation belt enhancements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(9): e2021GL093151

[44] XIONG S L, DAI L, WANG C, *et al*. Relativistic electron enhancements through successive dipolarizations during a CIR-driven storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(3): e2021JA030088

[45] XIONG S L, DAI L, WANG C, *et al*. Rapid relativistic electron enhancements and associated particle injections: a multi-spacecraft statistical study[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(1): e2023JA032095

[46] ZONG Q G, ZHOU X Z, WANG Y F, *et al*. Energetic electron response to ULF waves induced by interplanetary shocks in the outer radiation belt[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A10): A10204

[47] SU Z P, ZHU H, XIAO F L, *et al*. Ultra-low-frequency wave-driven diffusion of radiation belt relativistic electrons[J]. *Nature Communications*, 2015, **6**: 10096

[48] GU X D, XIA S J, FU S, *et al*. Dynamic responses of radiation belt electron fluxes to magnetic storms and their correlations with magnetospheric plasma wave activities[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **891**(2): 127

[49] TANG C L, CHU X X, SU Z P, *et al*. Three-step acceleration of the radiation belt relativistic electrons by interplanetary shocks[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2025, **281**(1): 15

[50] NOSÉ M, IYEMORI T, NAKABE S, *et al*. ULF pulsations observed by the ETS-Vi satellite: substorm associated azimuthal Pc 4 pulsations on the nightside[J]. *Earth, Planets and Space*, 1998, **50**(1): 63-80

[51] HAO Y X, ZONG Q G, WANG Y F, *et al*. Interactions of energetic electrons with ULF waves triggered by interplanetary shock: van Allen Probes observations in the magnetotail[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(10): 8262-8273

[52] CHU X X, TANG C L, SU Z P, *et al*. Relativistic electron flux oscillations in the Earth's outer radiation belt: a statistical study[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(10): e2025JA034359

[53] TANG C L. A plasma flow vortex in the magnetotail and its related ionospheric signatures[J]. *Annales Geophysicae*, 2012, **30**(3): 537-544

[54] TANG C L, WANG X, ZHOU M. Electron pitch angle distributions around dipolarization fronts at the off magnetic equator[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(2): e2020JA028787

[55] FU H S, KHOTYAINTSEV Y V, ANDRÉ M, *et al*. Fermi and betatron acceleration of suprathermal electrons behind dipolarization fronts[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38**(16): L16104

[56] ZHOU M, DENG X H, ASHOUR-ABDALLA M, *et al*. Cluster observations of kinetic structures and electron acceleration within a dynamic plasma bubble[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(2): 674-684

[57] BLAKE J B, CARRANZA P A, CLAUDEPIERRE S G, *et al*. The Magnetic Electron Ion Spectrometer (MagEIS) instruments aboard the Radiation Belt Storm Probes (RBSP) spacecraft[J]. *Space Science Reviews*, 2013, **179**(1/4): 383-421

[58] KLETZING C A, BORTNIK J, HOSPODARSKY G, *et al*. The Electric and Magnetic Fields Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS): science, data, and usage best practices[J]. *Space Science Reviews*, 2023, **219**(4): 28

[59] AGAPITOV O, ARTEMYEV A, KRASNOSELSKIKH V, *et al*. Statistics of whistler mode waves in the outer radiation belt: cluster STAFF-SA measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(6): 3407-3420

[60] ARYAN H, YEARBY K, BALIKHIN M, *et al*. Statistical study of chorus wave distributions in the inner magnetosphere using *Ae* and solar wind parameters[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(8): 6131-6144

作者简介



汤朝灵 男, 1979 年 7 月出生于安徽省黟县, 现为山东大学教授, 硕士生导师, 主要研究方向为空间天气学, 包括地球外辐射带、磁层亚暴、磁暴等数据分析和模拟等.

E-mail: tcl@sdu.edu.cn