0254-6124/2026/46(5)-0001-16 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

MA Jiarong, YUE Chao. Comparative Study of Super Substorms during Geomagnetic Storm Time and Non-storm Time (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1–16. CSTR:32142.14.cjss.2026–0009. DOI:10.11728/cjss2026.05.2026–0009

磁暴期间与非磁暴期间的超强亚暴对比研究*

马佳荣[1] 乐 超[1,2]

1(北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

2(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室 北京 100190)

摘 要 磁层亚暴作为太阳风–磁层–电离层耦合的一种基本模式, 对近地空间环境具有显著影响. 超强亚暴是指 *AE* 或 *SME* 指数最大值超过 2000 nT 的亚暴, 相较于一般强度的亚暴有着更强的能量注入过程和不同的响应模式. 本文基于现有的亚暴列表, 选取太阳风条件相近、分别发生于磁暴期间与非磁暴期间的两个超强亚暴案例, 利用地球同步轨道卫星 LANL 与 GOES 的实地观测数据、OMNI 与 SuperMAG 的极光电急流与环电流参数以及 CIMI 模型的模拟结果从空间环境、能量运输与环电流的角度对两案例进行了对比分析. 结果表明: 磁暴期间的超强亚暴信号传播可能比非磁暴期间的超强亚暴信号传播距离更短, 这主要是因为背景等离子体环境不同导致的; 非磁暴期间超强亚暴 *SME* 指数在地方时上出现明显的双峰结构; 磁暴的出现会造成氧离子的增强, 使得超强亚暴期间环电流更强. 通过对磁暴期间和非磁暴期间超强亚暴异同点的研究, 可以更深入地理解超强亚暴的作用过程和影响机制、超强亚暴与磁暴之间的联系, 进一步推动对空间天气与日地空间环境的认识.

关键词 超强亚暴, 磁暴, 极光电急流, 环电流

中图分类号 P353

Comparative Study of Super Substorms during Geomagnetic Storm Time and Non-storm Time

MA Jiarong[1] YUE Chao[1,2]

1(*School of Earth and Space Sciences*, *Peking University*, *Beijing* 100871)

2(*State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather*, *National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

Abstract As a fundamental coupling mode between the solar wind, magnetosphere, and ionosphere, substorms have profound impacts on the near-Earth space environment. Super substorms refer to those during which the maximum value of the *AE* or the *SME* index exceeds 2000 nT, featuring stronger ener-

* 国家科技部重点研发项目 (2023YFC2808900), 山东省自然科学基金项目 (ZR2023ZD36), 国家自然科学基金项目 (42274200, 42441809), 太阳活动与空间天气全国重点实验室专项基金资助项目共同资助

2026-01-11 收到原稿, 2026-04-06 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/)

gy injection processes and different response modes compared with normal substorms. In this study, based on an existing substorm list, we selected two cases of super substorms with similar solar wind conditions—one occurring during a geomagnetic storm and the other during a non-storm period. Using *in-situ* observation data from geosynchronous orbit satellites—the Los Alamos National Laboratory (LANL) and the Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES), auroral electrojet and ring current parameters from OMNI and SuperMAG, as well as numerical simulation results from the Comprehensive Inner Magnetosphere-Ionosphere (CIMI) model, we conduct a comparative analysis of these two cases from the perspectives of particle injection, energy input, and ring current dynamics. The results show that: During geomagnetic storms, the propagation distance of super substorm signals may be shorter than that during non-storm periods, primarily due to differences in the background plasma environment; During non-storm periods, the *SME* index of super substorms exhibits a distinct bimodal structure as a function of local time; the occurrence of geomagnetic storms leads to enhanced oxygen ion flux, thereby intensifying the ring current during super substorms. By studying the similarities and differences between super substorms during and outside of geomagnetic storms, this research can better serve future studies on the physical processes and impact mechanisms of super substorms, as well as the relationship between super substorms and geomagnetic storms, further promoting the understanding of space weather and the Earth-space environment.

Key words Super substorm, Geomagnetic storm, Auroral electrojet, Ring current

0 引言

空间天气是指太阳风与地球磁层相互作用所引发的一系列复杂物理过程. 磁层亚暴 (Magnetospheric Substorm), 简称亚暴, 作为空间天气研究中的核心课题之一, 是一种短暂的地磁扰动现象, 也是地球磁层能量加载、存储和突然释放的关键表现形式, 传统意义上认为其主要发生在高纬度地区, 始于地球的夜侧. 在此过程中, 太阳风–磁层相互作用释放大量能量到极光电离层与磁层[1], 并引起磁尾电流片的剧烈变化以及极光增亮等现象. 这些过程与现象对近地空间环境产生显著影响, 并直接关系到外层空间活动、地面通信以及人类生存环境的安全[2,3].

超强亚暴是指暴时 *AE* 或 *SME* 指数最大值大于 2000 nT 的亚暴, 较一般强度的亚暴具有更强的能量注入过程和独特的响应特征[4]. 对超强亚暴的关注源自于近十年来对于亚暴的进一步研究. 自 2015 年 Tsurutani 等[5] 首次将 *SML*<–2500 nT 的亚暴定义为超强亚暴 (SSS) 之后, 研究从统计层面对超强亚暴进行了分析. Tsurutani 等[5] 通过分析 2001 年和 2005 年 4 个超强亚暴事件后, 认为超强亚暴和超强磁暴并不存在一对一的因果关系, 超强亚暴可能随任意强度的磁暴发生, 也有可能在没有磁暴的平静期发生. Hajra 等[6] 通过研究发现, 超强亚暴可以在太阳活动周期的任何阶段被观测到, 但其最高频率出现在太阳活动下降阶段, 而最低频率则发生在太阳活动最弱期间. 同时, 其发生率、强度与相关地磁暴的强度并无明显的相关性. Despirak 等[7] 也得到与 Tsurutani 等[5] 相似的超强亚暴发生频率的结论. 也有研究认为, 与磁暴的半年周期特征类似, 超强亚暴也可能存在类似的变化周期, 这可能是由于 Russell-McPherron 效应 (简称 R-M 效应) 导致行星际磁场南向分量的极性增强, 使地磁活动更为活跃, 有利于产生亚暴[4]. 同时, Ma 等[8] 与 Fu 等[9] 均发现, 在太阳活动下降年, 强亚暴和超强亚暴会伴随更大的太阳风速度.

从触发机制角度, 此前的研究表明, 亚暴可由行星际激波触发[10–12]. 由行星际激波激发的强亚暴通常是在行星际磁场 (IMF) 南向和快速太阳风背景下形成的[13,14]. Kokubun 等[14] 发现大多数由行星际激波冲击触发的强亚暴, 在行星际激波冲击前较短时间内均伴随显著的地磁活动, 若先前的地磁活动较弱, 强亚暴几乎不会被触发. Tsurutani 和 Zhou[15] 发现北向 IMF 不会引起较强的地磁活动, 这也在一定程度上侧面印证了强亚暴的产生条件. 但 Lee 等[16] 却在北向 IMF 条件下也观测到强亚暴的发生, 这可能是由于在剧烈地磁活动后, 磁尾仍存在可观的能量, 足

以形成强亚暴. Despirak 等[7] 认为超强亚暴相关联的空间天气条件与其他类型的高纬度亚暴 (例如极区亚暴和扩展亚暴) 相比具有显著不同, 其主要是太阳风特定条件和南向行星际磁场的组合. 大多数超强亚暴 (77%) 与太阳风中的密度跃变和压力脉冲相关, 与冕洞几无关系, 但本质上超强亚暴只是在强度上大于一般的亚暴. Zong 等[4] 认为行星际激波的压缩比也是触发超强亚暴的一个非常重要的因素. 激波压缩比越高, 发生超强亚暴的概率越大. 高达 8 倍的压缩比使得在激波下游 (即激波与 CME 云之间的鞘区) 的南向 IMF 显著增强. 研究发现, ICME 鞘区的平均持续时间约为 7 h[17,18]. 这意味着若激波前存在南向 IMF 的先决条件, 经激波压缩增强的南向 IMF 在激波下游 (即鞘区内) 可维持至少 7 h. 这解释了为何超强亚暴往往发生在 CME 的鞘区[4].

超强亚暴的演化过程也与一般强度的亚暴不同. Hajra 和 Tsurutani[19] 在对 2005 年和 2010 年两个超强亚暴的研究中指出, 超强亚暴显示出与典型的 Akasofu 型亚暴不同的极光演化过程, 不存在标准的午夜起始及后续扩展特征, 最强极光出现在午夜前和午夜后而非正午夜. 同时还发现, 由磁重联带来的前驱能量输入, 不足以平衡超强亚暴期间电离层中巨大的能量耗散, Hajra 和 Tsurutani[19] 认为除了释放存储的磁尾能量外, 超强亚暴还通过日侧磁重联和太阳风动能的直接驱动获得额外能量输入. Adhikari 等[20] 研究了在三个不同的超强亚暴事件期间的极盖电位和电场, 并将其与一般强度亚暴、高强度长时间连续的 AE 活动事件 (HILDCAA) 进行对比, 发现在超级亚暴事件期间的极盖电位和电场, 均比 HILDCAA 事件期间形成的电位高出 20 倍. 超强亚暴和一般强度亚暴的不同还体现在亚暴电流楔的结构上. 除了在午夜侧存在电流楔结构外, 超强亚暴还在昏侧 (即 18:00 UT 处) 出现东向电急流 SMU 指数的极大值[4]. Fu 等[21] 与 Zhuang 等[22] 发现, 强亚暴与超强亚暴的等离子体流爆发中也存在大量氧离子, 甚至亚暴注入主要由氧离子主导. 因此在研究超强亚暴粒子注入的影响时, 不能忽略氧离子的贡献[23,24].

对于磁暴与亚暴之间的关联, 至今仍无定论. Baumjohann 等[25] 认为, 磁层亚暴期间, 近地磁尾的磁场偶极化和地向的对流在磁暴主相期间比非磁暴时的亚暴更为显著, 磁暴的发生可能会显著提高环电流能量注入效率. 同时, 磁暴期间的亚暴和非磁暴期间的亚暴尽管在电离层特征上相似, 但仍有可能因为长时间的南向 IMF 导致不同的物理过程主导, 使得亚暴类型有所不同. 此后, McPherron 等[26] 用更大规模的数据集进行了分析和验证, 认为不同类型的亚暴均由同一机制触发, 磁尾的响应也并无本质性的差异. Partamies 等[27] 研究了同一磁暴发生前、主相、恢复相的三个亚暴, 认为恢复相的亚暴在耗散磁暴残余能量方面起到关键作用, 因此可能产生与孤立亚暴事件不同的响应. 此外, Du 等[28] 的研究也表明, 特殊的太阳风条件 (例如北向 IMF 期间) 同样可能引发异常的磁暴主相过程, 这进一步表明, 有必要关注不同太阳风背景下的磁层响应. Jang 等[29] 利用范阿伦卫星统计研究了非磁暴期间的亚暴对环电流的影响, 结果显示, 超级亚暴期间环电流的等离子体压强和离子通量急剧上升, 而普通亚暴中则未观察到明显变化. 这表明非磁暴时期的超级亚暴也可能对环电流产生重要影响. He 等[30] 的统计工作证实, 磁暴期间的亚暴注入不再是局地的夜侧现象, 而是演化为宽尺度的全球性事件. 这种演化使得亚暴注入能够在大尺度对流的背景下, 成为环电流能量累积的关键. Dai 等[31] 对磁暴与亚暴的研究进展进行了系统的总结, 强调了二者耦合的复杂性.

目前关于超强亚暴现象的研究仍处于早期阶段, 且不同条件下的超强亚暴, 受地磁活动状态差异制约, 难以开展定量对比. 在以上研究之外, 对于驱动超强亚暴的机制 (如太阳风和行星际磁场的具体条件、驱动超强亚暴的能量来源是否统一等)、超强亚暴期间极光异常结构的形成与演化、超强亚暴与磁暴的联系 (如超强亚暴是否是磁暴的前兆、磁暴是否可以导致超强亚暴等) 以及比较行星学中的超强亚暴特征等, 上述问题仍有待进一步开展研究. 超强亚暴作为对日地空间环境产生巨大影响的空间天气事件, 对比其在磁暴期间与非磁暴期间的响应异同, 有助于揭示超强亚暴的作用过程、影响机制及其与磁暴之间的关联, 可为空间天气与日地空间环境研究提供参考.

本文根据 OMNI 的空间环境数据, 依据亚暴分类标准从已有亚暴事件列表中筛选超强亚暴事件, 选

取太阳风参数相近的磁暴期间和非磁暴期间的两个典型超强亚暴案例, 结合地球同步轨道卫星 LANL 与 GOES 的粒子、磁场观测数据进行对比分析, 利用 SuperMAG 数据比较极光电急流与环电流响应, 采用 CIMI 模型 (Comprehensive Inner Magnetosphere-Ionosphere model, 内磁层–电离层综合模型) 模拟亚暴过程中的压强与能量变化, 分析并归纳磁暴期间与非磁暴期间超强亚暴的异同.

1 数据

1.1 超强亚暴识别与典型案例筛选

研究采用的亚暴事件列表来自 Chu 等[32] 研究中 1982−2012 年共 31 年的亚暴事件列表. 该列表是基于 Chu 等[32] 和 McPherron 等[26] 提出的 *MPB*(Mid-latitude Positive Bay) 指数, 共筛选出 *MPB*>25 nT^2 的指数并根据磁场数据优化后的 40562 个亚暴事件. 基于此亚暴事件列表, 以亚暴起始时间为零点, 亚暴起始前 2 h 至亚暴起始后 3 h 为该亚暴的数据采集区间; 考虑极光电急流指数 (Auroral Electrojet Index, 即 *AE* 指数) 和对称水平分量指数 (Symmetric Horizontal Component Index, 即 SYM-*H* 指数) 时, 若两个亚暴发生时间间隔小于 2 h, 则取后一亚暴的起始时间作为前一亚暴数据采集区间的结束时刻, 根据上述规则对每个亚暴的数据范围进行规定, 提取每个亚暴的数据. 各亚暴对应的 1 min 时间分辨率参数, 包括 SYM-*H* 指数、*AE* 指数、行星际磁场 (IMF)、太阳风速度 (V_{sw})、太阳风动压强 (P_{sw}) 等, 均来自 OMNI 数据库*.

超强亚暴的划分标准: 在上述各亚暴的数据区间内, 取亚暴开始后 2 h 之内 *AE* 指数的最大值作为判据, 若 $AE_{max} > 2000$ nT, 则该亚暴为超强亚暴[4]. 根据该标准在 1982−2012 年共 40562 个亚暴事件中筛选出 208 个超强亚暴事件. 是否处在磁暴期间的判断标准为: 在上述超强亚暴的数据范围内, SYM-*H* 指数最小值是否<–30 nT[33,34]. 由此可继续对超强亚暴进行划分, 共划分出处在磁暴期间的超强亚暴共 199 例, 处在非磁暴期间的超强亚暴案例共 9 例.

为尽量削弱太阳风参数带来的空间环境差异干扰, 以太阳风速度、太阳风动压差异最小为筛选标准 (要求变化趋势相近、数据范围内极值接近), 对磁暴期间与非磁暴期间的超强亚暴案例进行对比较筛选, 最终确定本文对比案例. 1998 年 8 月 6 日 09:23 UT 磁暴期间的超强亚暴和 2006 年 8 月 19 日 14:14 UT 非磁暴期间的超强亚暴 (下文简称 1998 年、2006 年超强亚暴), 图 1 给出了 2 个超强亚暴对应的空间环境信息与太阳风参数. 值得注意的是, 虽然 2006 年 8 月 19 日晚些时段出现一次中等磁暴, 但本文所选超强亚暴发生于 14:14 UT, 在 17:00 UT 之前结束; 该时段内 SYM-*H*>-30 nT, 磁暴尚未开始, 因此将该事件归为非磁暴期间的亚暴.

由图 1 可以看出, 1998 年 8 月 6 日 09:23 UT 磁暴期间发生的超强亚暴与 2006 年 8 月 19 日 14:14 UT 非磁暴期间发生的超强亚暴, 在太阳风压强、粒子数密度等参数上较为接近, 可认为二者太阳风参数相近, 适合作为本文的对比分析案例.

1.2 超强亚暴观测数据提取

所用的观测数据主要包括来自 LANL、GOES 系列卫星的带电粒子通量数据和来自 OMNI 和 SuperMAG 的地磁指数与环电流指数, 以下将对所使用数据信息作简要介绍.

LANL 系列卫星 (洛斯阿拉莫斯国家实验室系列卫星) 是美国洛斯阿拉莫斯国家实验室为研究地球磁层和空间环境而设计的一系列卫星任务. 该系列卫星通常运行在地球同步轨道 (GEO) 上, 专注于测量地球磁层中的等离子体和高能粒子分布[35]. LANL 电子通量数据共两个能段: 50～225 keV 与 315～1500 keV. 质子通量数据共两个能段: 50～400 keV 与 1.2～5.0 MeV. 磁暴期间的超强亚暴案例 (1998 年 8 月 6 日 09:23 UT), 选用 LANL4 的电子和质子通量数据, 非磁暴期间的超强亚暴案例 (2006 年 8 月 19 日 14:14 UT), 选用 LANL4, LANL7, LANL9 的电子、质子通量数据. LANL 系列卫星的数据来自 NASA 的 SPDF 网站中的 CDAWeb 数据库**.

* https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/

** https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/

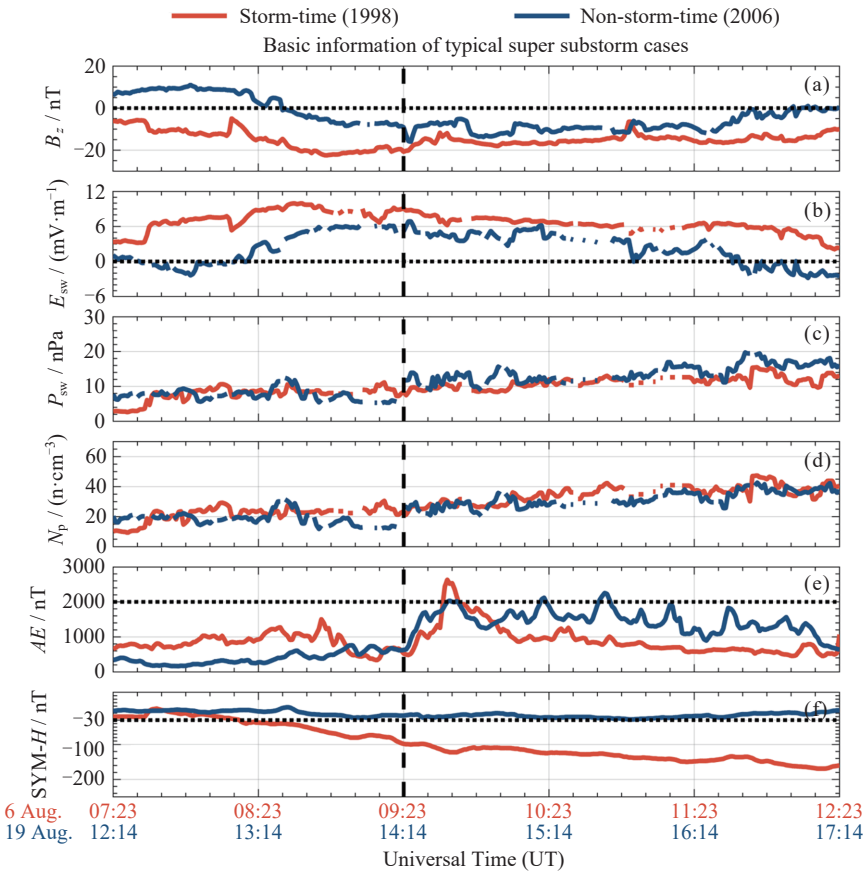


图 1 典型磁暴期间与非磁暴期间的超强亚暴空间环境基本信息与太阳风参数

Fig. 1 Basic information on the space environment and solar wind parameters during typical super substorms during storm time and non-storm period

GOES 系列卫星 (地球静止环境业务卫星) 是由美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 主导的卫星计划, 主要用于气象观测和空间环境监测. GOES 卫星运行在地球静止轨道 (GEO), 能够提供连续的天气和空间环境数据, 在天气预报、气候研究的基础上逐步添加了空间天气监测的仪器, 用于研究地球磁层和空间天气[36]. GOES 的电子通量共两个能段, 即 >0.6 MeV 和>2 MeV; 质子通量数据共两个能段, 即 >1 MeV 和 >5 MeV. 磁暴期间的超强亚暴案例 (1998 年 8 月 6 日 09:23 UT) 使用来自 GOES-8 和 GOES-10 的电子和质子通量数据、总磁场以及地心太阳磁层坐标系 (GSM) 下磁场分量的数据; 非磁暴期间的超强亚暴案例 (2006 年 8 月 19 日 14:14 UT) 使选用来自 GOES-11 和 GOES-12 的电子与质子的通量数据、总磁场以及磁场分量的数据. GOES 系列卫星的数据来自 NOAA 的 NCEI 数据库*.

SuperMAG 是一个国际合作项目, 整合了来自数百个地磁观测站和卫星的高时间分辨率数据, 旨在提供全球范围内的地磁数据. 其主要目标是监测和研究地球磁层和电离层中的动态过程, 特别是地磁暴和极光现象. 本文中两个超强亚暴案例采用的地磁参数 *SME* 指数 (包括 *SML*, *SMU*) 及其 MLT(Magnetic Local Time) 分布与环电流指数 *SMR* 数据, 均来自 SuperMag 网站**, 该数据集基于约 110 个地磁台站观测得到[37].

本文使用的所有数据的时间分辨率均为 1 min, 具有 MLT 分布的数据, 其 MLT 维度的时间分辨率为 1 h.

* https://www.ncei.noaa.gov/products/goes-1-15/space-weather-instruments

** https://supermag.jhuapl.edu/

2 模型模拟与计算参数

2.1 CIMI 模型

采用的 CIMI 模型为综合性内磁层–电离层模型, 融合了 Fok 等[38–40] 提出的综合环电流 (Comprehensive Ring Current Model, CRCM) 模型和辐射带环境 (Radiation Belt Environment, RBE) 模型. CRCM 模型用于研究环电流粒子的分布, 考虑了磁层与电离层之间电流闭合问题, 在嵌入的等离子体层模型中利用计算的电场对冷等离子体对流进行真实模拟, 已成功模拟出如亚极光区极化流以及环电流屏蔽与过屏蔽等现象. RBE 模型是求解漂移平均玻尔兹曼方程的动理学模型, 用于计算辐射带粒子通量并预测其在活跃时期的变化, 并考虑了与合声波之间的扩散相互作用. 该模型还被用于模拟磁场偶极化期间的亚暴注入, 并成功再现了亚暴期间的可观测特征, 例如无色散注入和漂移回声等现象[41].

CIMI 模型旨在获取能量范围在 0.1～400 keV 的高能离子和 1～4000 keV 的电子分布、场向电流、亚极光电离层电势以及等离子体层密度数据. CIMI 还覆盖了内磁层中其他许多关键物理量, 包括环电流对流电势以及电离层中的沉降情况, 以及哨声波模式下的合声和嘶声波在能量、投掷角和交叉项上对高能电子的扩散[41]. CIMI 模型求解粒子种类所采用的动力学方程与 RBE 模型一致, 仅增加了离子的电荷交换损失项. 另外, CIMI 在求解电离层电势时采用了 CRCM 模型.

CIMI 模型主要输入参数为模拟时段的 Kp 指数、Ap 指数、Dst 值 (Disturbance Storm Time Index, 扰动暴时指数)、太阳风质子密度、太阳风速度以及行星际磁场在 GSM 坐标系下沿 x, y, z 方向各分量的数据. 所有输入数据均来自 OMNI, 除太阳风与磁场数据的时间分辨率为 5 min 外, 其余数据时间分辨率均为 1 h. CIMI 模型中的基本参数设置见表 1.

2.2 参数计算

CIMI 模型模拟得到质子 (氢离子)、氧离子、电子通量空间分布随时间的变化, 进而通过计算对处于磁暴期间和非磁暴期间的超强亚暴进行对比分析, 相关对比参数见下文.

表 1 CIMI 模型主要基本参数设置

Table 1 Basic parameter settings in CIMI model

参数名称	具体设置
电离层极区边界纬度/(°)	70.299
模拟粒子成分	氢离子、氧离子、电子
损失锥高度/km	100
等离子体层设置	包含等离子体层
波动设置	包含合声波、嘶声波

2.2.1 亚暴能量输入

对于亚暴能量输入的分析, 采用 Perreault 等[42] 给出的 epsilon parameter, 具体计算公式为

$$\epsilon = \frac{4\pi}{\mu_0} v B^2 \sin^4\frac{\theta}{2} l_0^2. \tag{1}$$

其中, v 为太阳风速度; B 为行星际磁场; θ 是时钟角, 计算公式为 $\theta = \arccos\left(B_z/\sqrt{B_y^2+B_z^2}\right)$; l_0 为能量输入与预估能量耗散相等这一设定下的常数, 通常取 7 R_e (地球半径).

2.2.2 亚暴能量耗散

对于亚暴能量耗散, 本研究采用 Knipp 等[43] 和 Østgaard 等[44] 的计算公式, 耗散项包括焦耳加热和电子沉降, 焦耳加热导致的能量耗散为

$$U_j = a\,|PC| + b|PC|^2 + c\,|Dst| + d|Dst|^2. \tag{2}$$

其中, U_j 为焦耳加热带来的能量耗散, 单位为 10^9 J; PC 指数的单位为 mV·m^{-1}; Dst 为环电流指数, 此处采用时间分辨率更高的 SYM-H 指数 (1 min 时间分辨率) 替代, 单位为 nT. a, b, c, d 参数来自 Knipp 等[40], 这里分别取为 29.27, 8.18, –0.04, 0.0126 nT, 对应夏季 (4 月 21 日至 8 月 20 日).

电子沉降导致的能量耗散为

$$U_a = 4.6\sqrt{AE} - 23. \tag{3}$$

其中, U_a 为电子沉降造成的能量耗散, 单位为 10^9 J; AE 为极光电急流指数, 单位 nT, 此处选择用 SME 指数替代.

2.2.3 等离子体压强与能量密度

对于 CIMI 模型模拟得出的粒子通量可以结合模拟时的粒子能量范围数据计算粒子产生的压强, 计算方法由 De Michelis 等[45] 给出, 即

$$P_{\perp}=\pi\sqrt{2m}\int\sqrt{E}\mathrm{d}E\left(E,\alpha\right)\sin^{3}\alpha\,\mathrm{d}\alpha, \tag{4}$$

$$P_{\parallel}=2\pi\sqrt{2m}\int\sqrt{E}\mathrm{d}E\left(E,\alpha\right)\cos^{2}\alpha\sin\alpha\,\mathrm{d}\alpha. \tag{5}$$

其中, m 为粒子质量, E 为粒子能量, J 为粒子通量分布, α 为粒子投掷角.

通过垂直分量和平行分量可以计算总压强以及能量密度, 有

$$P=\left(2P_{\perp}+P_{\parallel}\right)/3, \tag{6}$$

$$\epsilon=\left(2P_{\perp}+P_{\parallel}\right)/2. \tag{7}$$

2.2.4 环电流能量

对于地球同步轨道内的环电流等离子体的总能量的计算, 具体公式参考 Zhao 等[46] 中的研究结果, 有

$$E_{\mathrm{total}}=\int\epsilon\mathrm{d}x=\sum_{L_{\mathrm{min}}}^{L_{\mathrm{max}}}\epsilon\left(L\right)\Delta V\left(L\right). \tag{8}$$

其中, ε 为偶极子 L 层粒子对应的能量密度, V 为地球表面和偶极子 L 层之间的体积, 其计算公式为

$$\begin{aligned}V\left(L\right)=&V_{\mathrm{e}}\left[L^{3}\left(1-\frac{1}{L}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{1}{7L^{3}}+\frac{6}{35L^{2}}+\right.\right.\\&\left.\left.\frac{8}{35L}+\frac{16}{35}\right)-\left(1-\frac{1}{L}\right)^{\frac{1}{2}}\right].\end{aligned} \tag{9}$$

V_{e} 为地球体积, 此处将地球视为球体, 可直接利用球体体积公式计算, 有

$$V_{\mathrm{e}}=\frac{4}{3}\pi{R_{\mathrm{e}}}^{3}. \tag{10}$$

地球平均半径此处取 R_{e}=6372 km.

3 结果与讨论

3.1 空间环境观测数据

3.1.1 带电粒子通量

图 2 和图 3 给出了 1998 年和 2006 年案例对应超强亚暴前后的电子与质子通量变化情况. 图中不同颜色表示不同能段的质子、电子, 黑色虚线表示亚暴的起始时刻. 图 2 中 LANL 系列卫星探测 50～225 keV 电子通量为蓝色线, 315～1500 keV 电子通量为橙色线; GOES 系列卫星探测>0.6 MeV 电子通量为黄色线, >2 MeV 电子通量为紫色线. 图 3 中 LANL 系列卫星探测 50～400 keV 质子通量为蓝色线, 1.2～5.0 MeV 质子通量为紫色线; GOES 系列卫星探测>1 MeV 质子通量为绿色线, >2 MeV 质子通量为粉色线. 对于电子通量变化, 1998 年案例中 LANL 卫星观测的 50～225 keV 与 315～1500 keV 能段在亚暴开始前 1 h 恢复平静, 在亚暴起始后再次分别出现了约两个和一个数量级的增大, 且能在约 1 h 内恢复. GOES 卫星观测的>0.6 MeV 能段电子也出现了类似的增强现象, 恢复速度在 1 h 左右, >2 MeV 能段电子并无显著增强. 而在 2006 年超强亚暴案例电子通量变化中, 在亚暴开始时, 电子通量出现显著增大 (LANL 卫星观测: 50～225 keV 能段约两个数量级, 315～1500 keV 能段约一个数量级. GOES 卫星观测: >0.6 MeV 能段和>2 MeV 能段约两个数量级), 并保持稳定至亚暴发生后 3 h 左右. 与电子通量不同的是, 1998 年磁暴期间超强亚暴案例前后 LANL 卫星观测的 50～400 keV 与 1.2～5.0 MeV 能段的质子通量几乎没有变化, 而 GOES-11 卫星观测到>1 MeV 能段的质子通量在亚暴开始后约 50 min 出现了两个数量级的脉冲式增强, 恢复速度较快, >5 MeV 能段的质子通量变化不大. 但整体而言, 质子通量增强趋势不明显. 而 2006 年非磁暴期间, 各能量段质子通量均出现显著增大, 且增大时刻均发生在亚暴开始后不久, 并随亚暴演化维持较长时间的高值, 该变化特征与电子通量的变化情况存在相似之处. 考虑到 2006 年案例中 GOES-12 卫星在该时间段位于晨侧至正午侧, 因此并未观测到粒子通量的增强. 就粒子通量而言, 磁暴期间的超强亚暴粒子通量增强不如非磁暴期间明显, 且非磁暴期间粒子通量增强的持续时间更长.

3.1.2 地球同步轨道磁场

图 4 给出了 1998 年和 2006 年案例对应超强亚暴前后地球同步轨道磁场及其在 GSM 坐标系下分量的变化情况. 图 4(a)～(d) 为磁暴期间 GOES 卫星探测地球同步轨道磁场变化情况, 其中 GOES-8 数据为橙色线, GOES-10 为蓝色线; 图 4(e)～(h) 为非磁暴期间 GOES 卫星探测地球同步轨道磁场变化情况, 其中 GOES-11 数据为黄色线, GOES-12 为绿色线. 处于磁暴期间的 1998 年超强亚暴案例中, 磁场扰动较明显, 主要与磁暴期间剧烈的能量注入有关, 同时

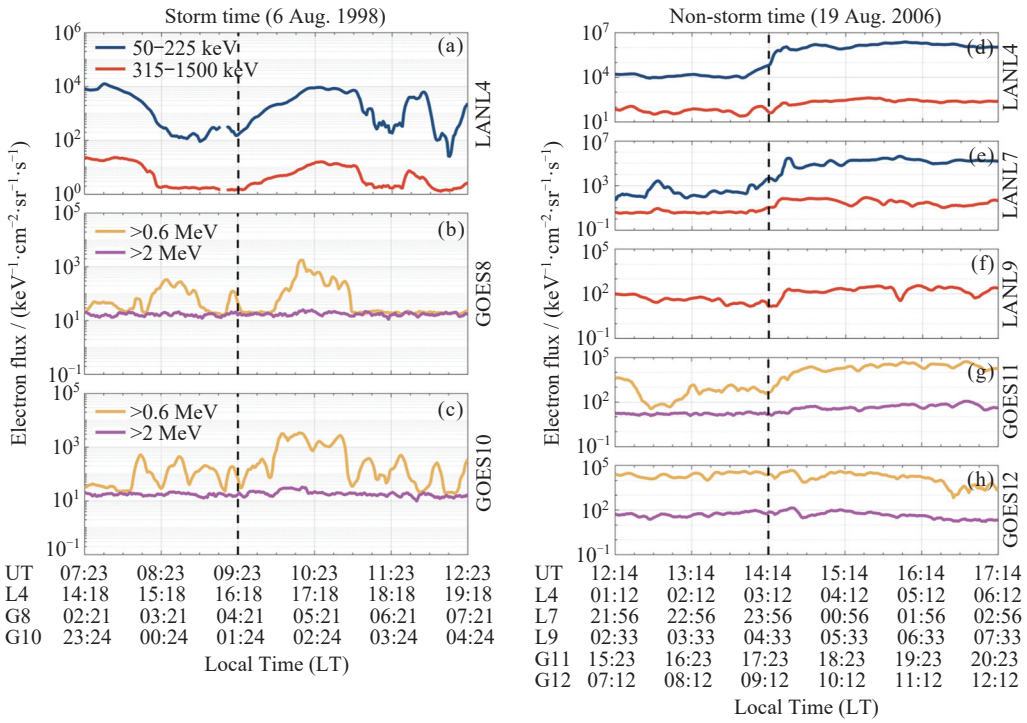


图 2 典型磁暴期间与非磁暴期间的超强亚暴时期电子通量变化情况

Fig. 2 Electron flux variations at the GEO for a typical super substorms during storm time and non-storm time

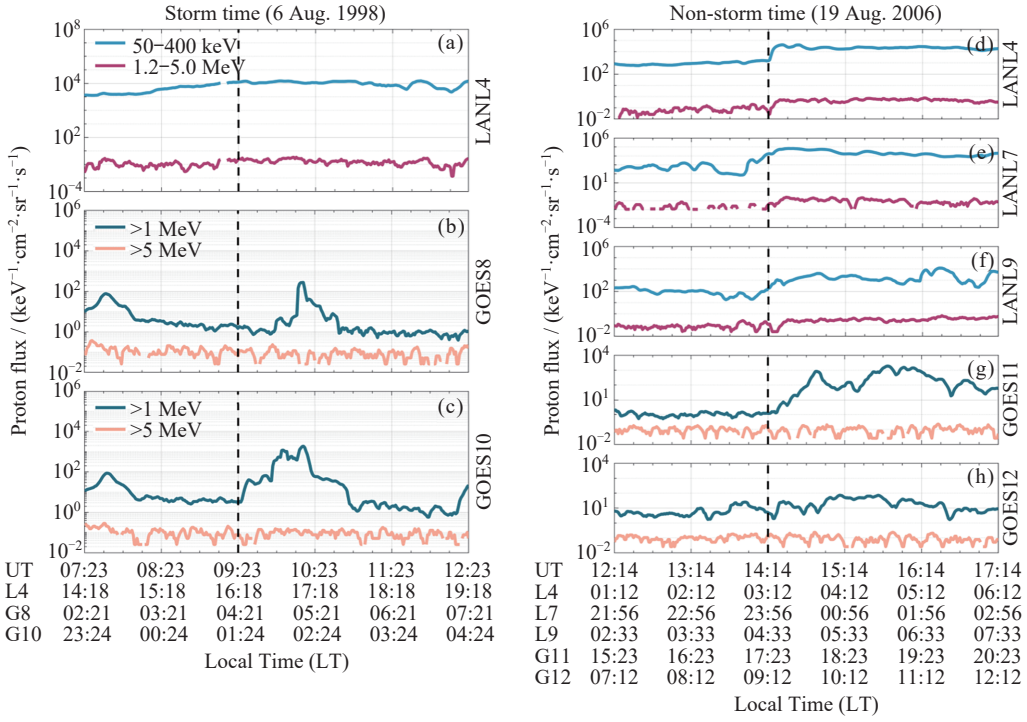


图 3 典型磁暴期间与非磁暴期间的超强亚暴时期质子通量变化情况

Fig. 3 Proton flux variations at the Geosynchronous Orbit (GEO) for a typical super substorms during storm time and non-storm time

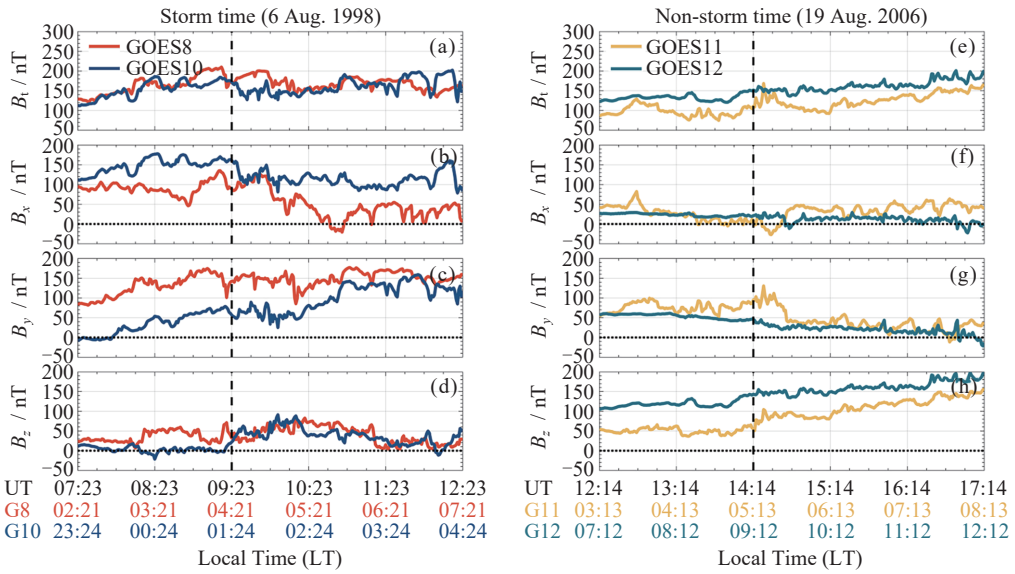


图 4 典型磁暴期间与非磁暴期间的超强亚暴地球同步轨道磁场变化情况

Fig. 4 Geomagnetic field variations at GEO for a typical super substorms during storm time and non-storm time

在超强亚暴发生后, B_z 分量增大, 对应磁场偶极化过程, 该分量在持续 2 h 后基本恢复. 而在 2006 年案例中, 磁场的总强度呈增大趋势, 但 B_y 分量呈持续减小趋势, B_x 分量相对平静. 处于晨侧的 GOES-11 和 GOES-12 均出现了 B_z 分量增大的现象, 这表明亚暴发生过程中, 磁场的偶极化过程十分显著, 且相对于磁暴期间的 1998 年案例, 偶极化过程持续时间更长, 自亚暴起始可持续至少 3 h. 这与此前观测的质子、电子通量变化趋势一致.

从图 2 和图 3 的图 (a)～(c) 可以看出, 在 1998 年磁暴期间超强亚暴爆发 (09:23 UT) 之前的增长相阶段, LANL4, GOES-8 和 GOES-10 的粒子通量均出现典型的通量下降现象. 这表明, 磁暴期间等离子体片变薄, 地球同步轨道卫星相对进入了等离子体片边界层甚至尾瓣区域, 从而导致通量观测值显著低于中心等离子体片内的水平. 与此同时, 图 4(a)～(d) 显示, 亚暴期间 GOES 系列卫星观测到地球磁场的 B_z 分量长期维持在相对较低的水平 (图 4d), 该时段磁场主要由水平分量主导. 这种磁场构型进一步证实, 卫星此时并未位于磁场偶极化最剧烈的中心区域, 而是处于磁力线极度拉伸的边缘区域, 因此无法看到明显的亚暴期间磁场偶极化特征. 同时, 这也可以解释为何更靠近晨侧的 GOES-8 观测到的粒子注入信号较 GOES-10 出现时间更晚、强度更微弱. 考虑到 1998 年案例中的 GOES-8 与 2006 年案例中的 GOES-11 两颗地球同步轨道卫星观测位置相近, 但二者的磁场偶极化现象却存在差异, 这表明磁暴环境可通过改变磁场与等离子体片结构, 对亚暴信号的传播产生屏蔽作用.

整体上, 相比于磁暴期间的超强亚暴, 非磁暴期间的超强亚暴在地球同步轨道处的粒子与磁场响应更为明显, 具有典型的亚暴响应特征, 且持续时间更长. 本文认为, 该现象源于磁暴背景下等离子体片变薄, 地球同步轨道卫星处于等离子体片边缘, 亚暴信号因此未被明显捕捉到.

3.2 极光电急流与环电流响应

图 5(白色虚线表示亚暴起始时刻) 给出了 1998 年和 2006 年案例对应超强亚暴前后极光电急流在不同 MLT 下的分布变化情况, 包括 *SME* 指数 (SuperMAG Electrojet Index)、SMU 指数 (SuperMAG Upper Index) 和 *SML* 指数 (SuperMAG Lower Index). 两个案例对应的 *SME* 极大值均出现在午夜侧 (00:00 MLT 至 06:00 MLT 区域) 并向晨侧延展. 2006 年案例在亚暴触发后, 可同时在午夜侧与下午侧出现 *SME* 双极值峰, 该双峰值特征在 1998 年案例中并未明显观测到[9]. 对比 *SMU* 和 *SML* 的结果, 2006 年案例在 18:00 MLT 处出现的第二个 *SME* 极值峰是由 *SMU* 贡献的. 对于 *SML* 指数, 与 *SME* 情况类

似, 1998 年案例的 *SML* 极小值相较于 2006 年案例也向 00:00 MLT 前偏移, 这表明磁暴期间的超强亚暴发生后, 西向电急流的影响区域更大, 且随着时间的推移, 电流结构整体向东偏移.

图 6 给出了 1998 年磁暴期间与 2006 年非磁暴期间超强亚暴案例 *SMR* 指数 (SuperMAG Ring Current Index) 在不同 MLT 下的变化情况. 黑色实线代表 *SMR* 指数; 彩色线为不同磁地方时下的 *SMR* 指数, 其中蓝色为 00:00 MLT, 橙色为 06:00 MLT, 黄色为 12:00 MLT, 紫色为 18:00 MLT; 黑色虚线代表亚暴起始时刻. 在 1998 年的案例中, 00 MLT 处对应的 *SMR* 指数在亚暴触发后出现显著上升, 同时 18:00 MLT 处 *SMR* 相比其他地方时出现显著下降. 在 2006 年案例中, 除 18:00 MLT 处 *SMR* 显著下降之外, 06:00 MLT 处对应的 *SMR* 指数相比其他地方时出现显著上升. 午夜至晨侧的 *SMR* 指数上升主要由于亚暴电流楔引起. 1998 年事件 *SMR* 上升出现在 00:00 MLT 处, 而 2006 年事件出现在 06:00 MLT 处, 该上升位置与 SME 的峰值位置一一对应. 对于亚暴触发后 18:00 MLT 处环电流指数的下降, 非磁暴期间的超强亚暴对部分环电流的影响更大, 下降幅度接近 100 nT, 而磁暴期间仅为 50 nT, 这表明非磁暴

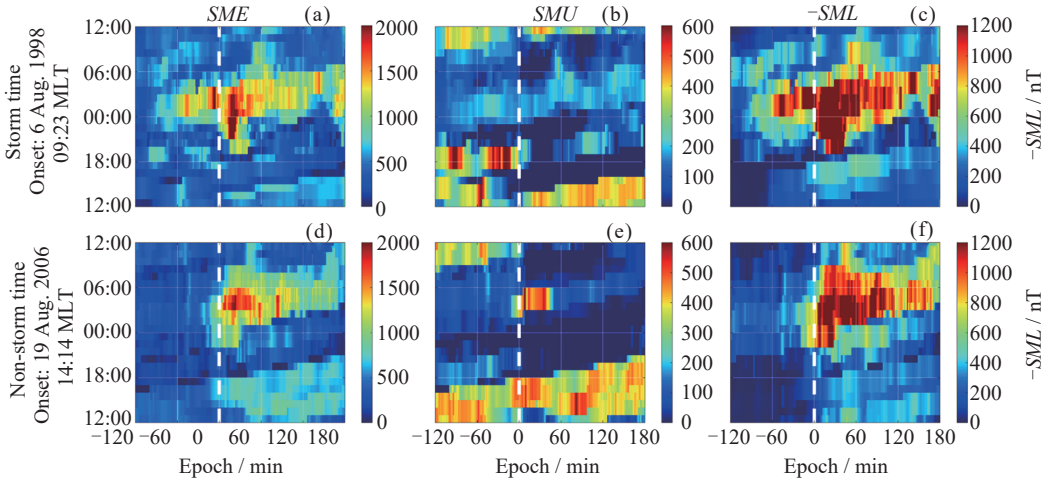


图 5 典型磁暴期间与非磁暴期间的超强亚暴极光电急流演化情况

Fig. 5 Evolution of auroral electrojet for a typical super substorms duringstorm time and non-storm time

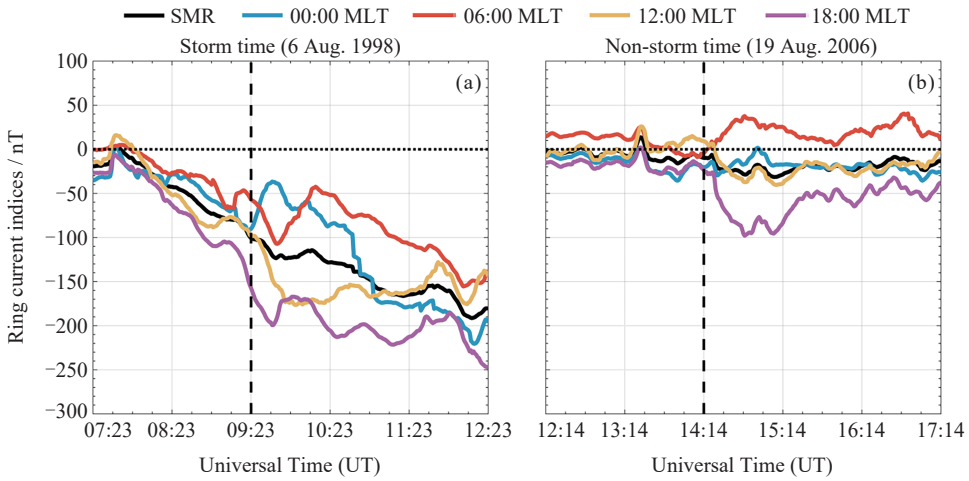


图 6 典型磁暴期间与磁暴期间的超强亚暴环电流指数 (*SMR*) 变化情况

Fig. 6 Variations of ring current indices (*SMR*) for a typical supers substorms duringstorm time and non-storm time

期间超强亚暴对环电流同样具有明显贡献.

3.3 超强亚暴能量分析

图 7 给出了 1998 年和 2006 年案例在超强亚暴发生后能量的输入与耗散情况, 计算方法见式 (2) 与式 (3). 图中蓝色线表示注入能量, 黄色线表示耗散能量, 紫色线表示 *PC* 指数, 黑色虚线表示亚暴起始时刻. 由图可知, 超强亚暴发生后, 代表地球极盖区地磁活动极盖指数 (Polar Cap Index, *PC* Index, 该指数可作为太阳风–磁层耦合过程中输入磁层的太阳风能量的代理指数) 增幅不低于 100%. 结合前文中的太阳风与空间环境信息, 1998 年案例中亚暴发生前出现的指数增强可认为是由磁暴导致的. 对比 1998 年案例与 2006 年案例可知, 在磁暴影响下, 超强亚暴的能量注入和焦耳加热与粒子沉降造成的能量耗散高于非磁暴期间, 两类指标增幅均约为 30%.

利用 CIMI 模型模拟 (见式 8), 可以对不同时刻的环电流能量进行计算. 图 8(a) (b) 分别展示了 1998 年与 2006 年案例环电流能量及其各组分的变化情况. 图中黑色线为环电流总能量, 橙色、黄色、蓝色线分别为质子、氧离子、电子对应环电流能量, 绿色线为非磁暴期间与磁暴期间环电流总能量比值. 从图中可以看出, 磁暴期间的超强亚暴较非磁暴期间环电流能量更强, 且该部分能量增强主要由氧离子引起, 这表明在超强亚暴发生时, 磁暴背景下伴随的剧烈氧离子 (O^+) 注入对环电流强度的增强起到重要作用. 对图 8(a) 与 8(b) 中的环电流总能量求取比值, 即可得到图 8(c), 同样可以得到一致的结论. He 等[47] 指出, 亚暴注入对 SYM-*H* 的下降存在直接且显著的贡献, 这与本文模拟显示的超强亚暴期间环电流能量显著增强 (见图 8) 的结果是一致的.

3.4 等离子体压强模拟

利用 CIMI 模型模拟得到的粒子通量结果, 亦可计算得到质子 (氢离子)、氧离子和电子产生的等离子体压强, 结果如图 9 和图 10 所示. 图中红色虚线表示亚暴起始时刻, 蓝色虚线表示平静期、增长相、亚暴起始、膨胀相和恢复相时刻. 图中给出了每个案例的 SYM-H 指数与 SME 指数的变化情况, 由此选择了 5 个时间节点: 平静期 t_0(Quiet Time, QT)、增长相 t_1 (Growth Phase, GP)、亚暴起始 t_2(Onset)、膨胀相 t_3 (Expansion Phase, EP) 和恢复相 t_4(Recovery Phase, RP). 各节点在图中标示为蓝色虚线, 并给出每个时间节点的氢离子压强、氧离子压强、总等离子体压强以及氧离子压强所占比重.

由图 9 和图 10 可知, 磁暴影响下超强亚暴期间总压强明显大于非磁暴期间, 且相比之下随亚暴发展, 其增长更迅速, 恢复更缓慢. 在结构上, 磁暴期间超强亚暴的压强增强极值在夜侧关于 00:00 MLT 呈对称分布; 非磁暴期间, 18:00−24:00 MLT(00:00 MLT) 出现明显峰值, 而 00:00−06:00 MLT 之间并无同等强度的增强. 进一步考察靠近 18:00 MLT 的夜侧压强极值部分, 无论是否处于磁暴期间, 其整体结构均会随超强亚暴的发展逐渐向西移动, 直至越过

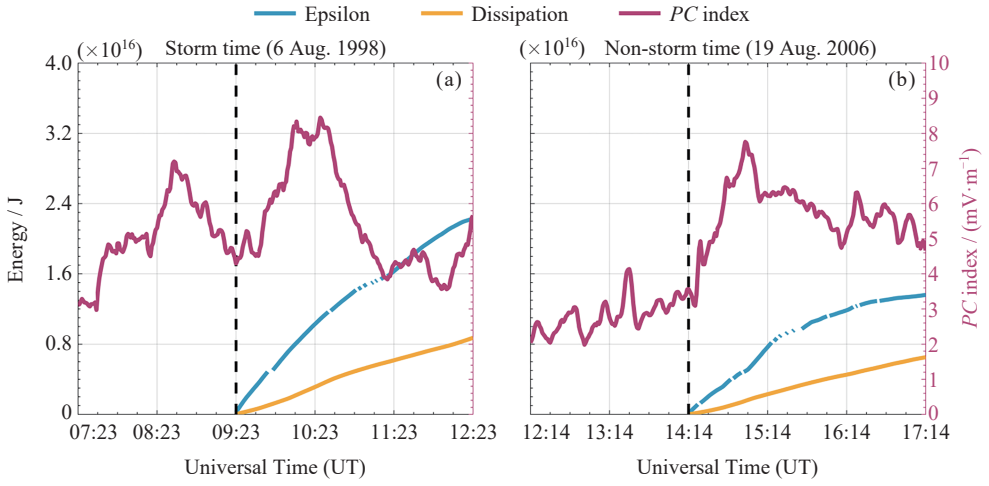


图 7 典型磁暴期间与非磁暴期间的超强亚暴能量注入与耗散情况

Fig. 7 Energy injection and dissipation for a typical super substorms during storm time and non-storm time

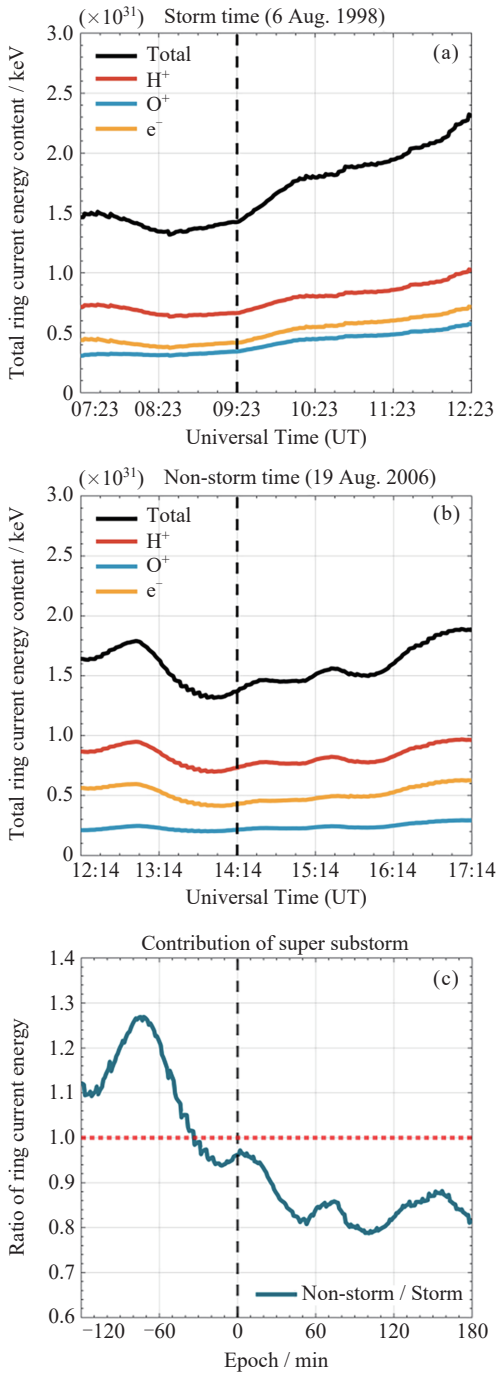


图 8 典型磁暴期间 (a) 与非磁暴期间 (b) 的超强亚暴环电流总能量模拟演化情况, 非磁暴期间与磁暴期间环电流总能量比值演化 (c)

Fig. 8 Simulated evolution of ring current for a typical super substorms duringstorm time (a) and non-storm time (b), and ratio of total ring current energy between non-storm time and storm time (c)

18:00 MLT 的昏线. 从不同成分的等离子体压强看, 磁暴期间的超强暴所产生的压强中, 氧离子的占比在多数区域大于 20%, 甚至在 L= 3 处达到 40%; 反观非磁暴期间的超强亚暴, 氧离子动压占比基本小于 15%. 这表明在超强亚暴的发生过程中, 磁暴所带来的氧离子注入可对环电流压强产生显著影响.

4 讨论与结论

重点分析了磁暴期间与非磁暴期间超强亚暴的地磁与环电流响应, 采用来自地球同步轨道卫星 LANL 与 GOES 的实测数据、OMNI 与 SuperMAG 的地磁、极光与环电流参数等观测数据进行分析, 并依次计算相应的能量输入与耗散; 使用 CIMI 模型进行数值模拟, 基于模拟的粒子通量分布随时间的变化对超强亚暴产生的环电流能量与等离子体压强进行计算和分析. 通过在相似的太阳风条件下的案例对比探究, 总结出了磁暴期间与非磁暴期间超强亚暴的异同点. 通过同步轨道卫星的粒子通量和磁场的观测分析, 发现磁暴期间的超强亚暴触发后并未观测到典型的伴随剧烈粒子注入的强磁场偶极化过程, 结合粒子通量的变化可以推断, 磁暴期间等离子片收缩更显著, 使得卫星脱离等离子体片, 进而无法观测到被屏蔽的亚暴期间显著的磁偶极化信号. 另外, 非磁暴期间的超强亚暴在地球同步轨道出现典型的亚暴注入特征, 包括能量电子和离子的注入和磁场的偶极化过程. 磁暴期间的超强亚暴触发后产生的信号, 在靠近晨侧的地球同步轨道上难以被明显观测到, 这可能与背景等离子体环境有关. 本文认为磁暴期间地球同步轨道卫星未观测到典型亚暴信号的原因可能有下面几方面: 与非磁暴期间不同, 磁暴期间增强的越尾电流使得磁尾磁力线高度拉伸, 导致等离子体片显著变薄[48]. 这种系统性的结构改变可能使地球同步轨道卫星处于等离子体片的边界层, 甚至暂时进入波瓣区域, 从而脱离了亚暴注入和磁场偶极化发生的核心区域 (等离子体片中心), 因此卫星仅能观测到微弱的边缘信号, 而无法捕捉到典型的强注入特征; 磁暴期间, 局地等离子体热压升高, 产生显著的抗磁效应, 从而抑制局地磁场强度的增加; 磁暴期间磁层处于强太阳风驱动之下, 极强的对流电场和增强的越尾电流使磁尾磁力线倾向于保持高度拉伸的状态, 因此即使亚暴

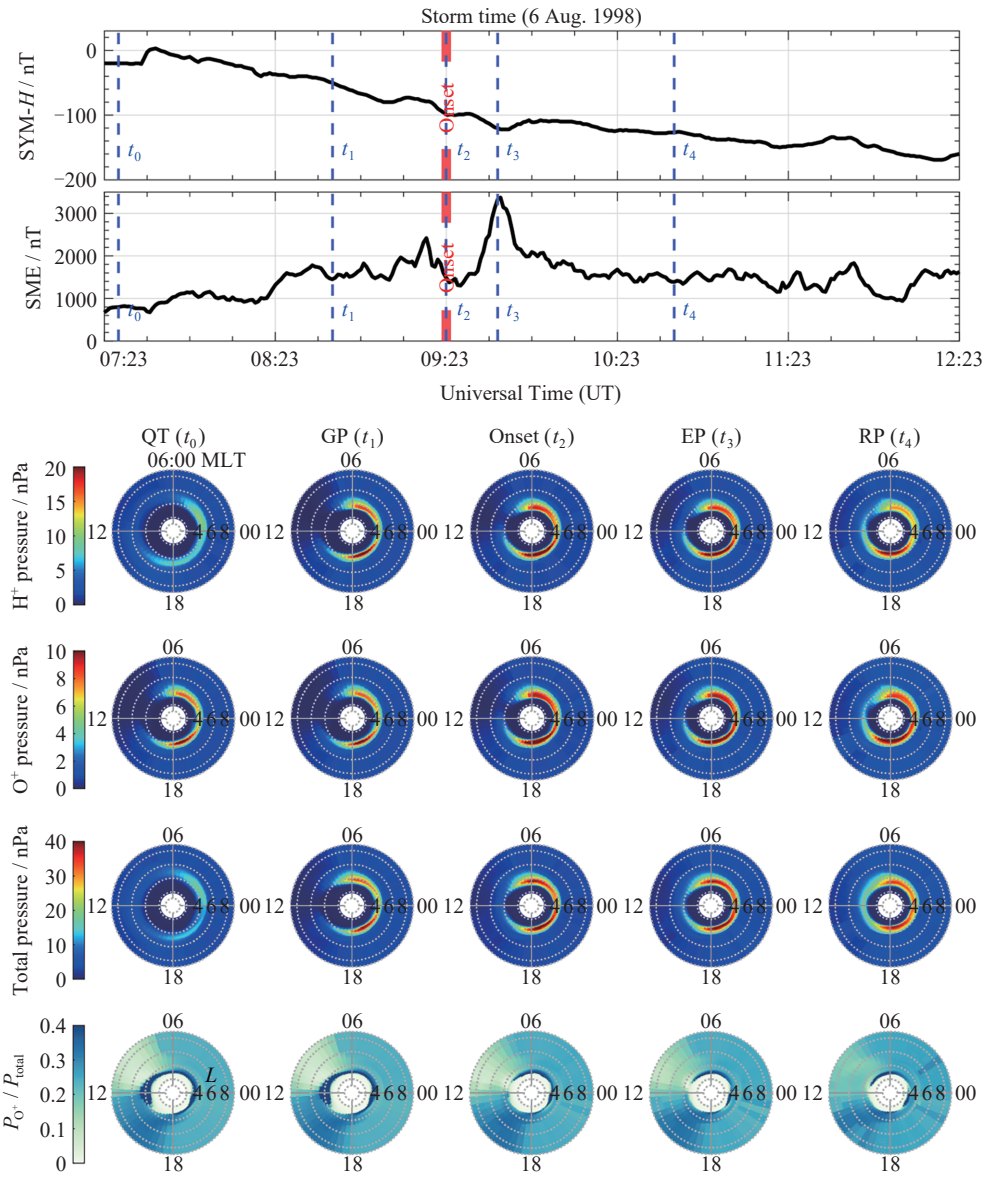


图 9 典型磁暴期间超强亚暴等离子体压强模拟演化

Fig. 9 Simulated evolution of plasma pressure for a typical super substorm during storm time

注入暂时引起磁场偶极化, 强烈的背景驱动力也会迫使磁力线迅速恢复至拉伸状态.

另外, 非磁暴期间超强亚暴 SME 指数在亚暴触发后地方时上出现明显的午夜和下午侧双峰结构, 这与 Fu 等[9] 之前的统计结果一致. 然而磁暴期间的超强亚暴只有午夜侧单峰结构, 尽管磁暴期间的超强亚暴 SME 指数更大. 从 SMU 和 SML 的地方时分布可以看出, 非磁暴期间的超强亚暴触发后, 昏侧的峰值是 SMU 和 SML 共同作用的结果. 这表明非磁暴期间的超强亚暴在昏侧存在涡旋电流结构. 进一步从能量输入与耗散来看, 磁暴期间的超强亚暴有更强的能量注入与耗散, 同时磁暴期间的超强亚暴氧离子有显著增加. Yue 等[49,50] 的研究表明, 氧离子显著增强主要出现在磁暴期间, 这直接导致磁暴期间超强亚暴的环电流压强更强.

在太阳风条件类似的情况下, 对比分析磁暴期间与非磁暴期间的超强亚暴案例, 可以得到以下结论. 磁暴期间的超强亚暴信号传播可能比非磁暴期间的超强亚暴信号传播距离短, 这主要是背景等离子体环境不同导致的; 非磁暴期间超强亚暴 SME 指数在地

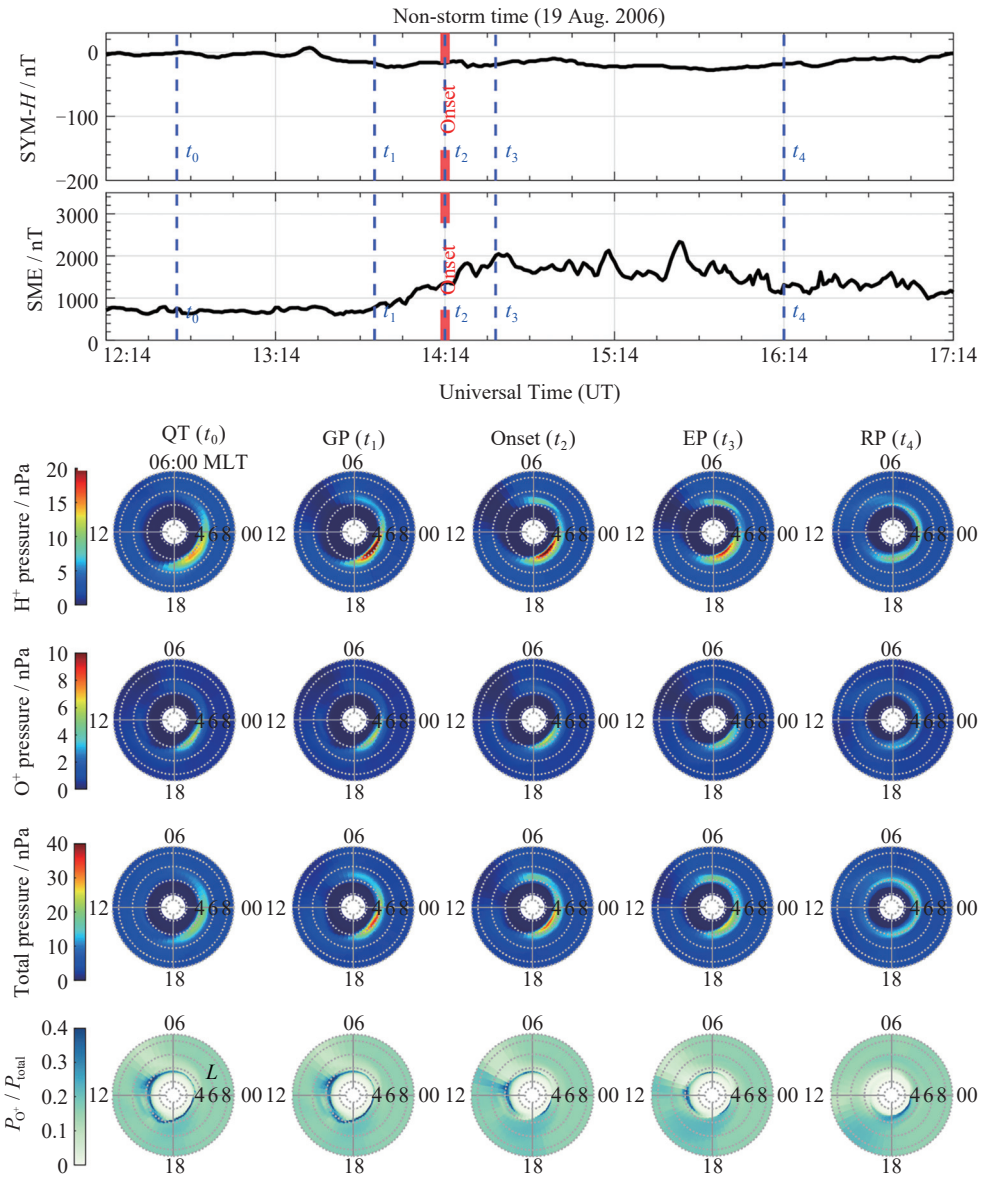


图 10 典型非磁暴期间超强亚暴等离子体压强演化情况

Fig. 10 Simulated evolution of plasma pressure for a typical super substorm during non-storm time. (a) SYM-*H* index, (b) *SME* index, (c) proton plasma pressure, (d) oxygen ion plasma pressure, (e) total plasma pressure, (f) proportion of oxygen ion plasma pressure

方时上出现明显的双峰结构; 磁暴的出现会造成氧离子的增强, 使得磁暴条件下超强亚暴的环电流更强. 上述对比分析结果, 对进一步认识超强亚暴的作用机制, 厘清磁暴与超强亚暴之间的联系具有一定参考价值.

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] ROSTOKER G, AKASOFU S I, FOSTER J, *et al*. Magnetospheric substorms—Definition and signatures[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1980, **85**(A4): 1663-1668

[2] PULKKINEN A, BERNABEU E, EICHNER J, *et al*. Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios[J]. *Space Weather*, 2012, **10**(4): S04003

[3] EASTWOOD J P, NAKAMURA R, TURC L, *et al*. The scientific foundations of forecasting magnetospheric space weather[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **212**(3): 1221-1252

[4] ZONG Q G, YUE C, FU S Y. Shock induced strong substorms and super substorms: preconditions and associated oxygen ion dynamics[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(2): 33

[5] TSURUTANI B T, HAJRA R, ECHER E, *et al*. Extremely intense (SML≤–2500 nT) substorms: isolated events that are externally triggered?[J]. *Annales Geophysicae*, 2015, **33**(5): 519-524

[6] HAJRA R, TSURUTANI B T, ECHER E, *et al*. Supersubstorms (SML < –2500 nT): Magnetic storm and solar cycle dependences[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(8): 7805-7816

[7] DESPIRAK I V, LYUBCHICH A A, KLEIMENOVA N G. Supersubstorms and conditions in the solar wind[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2019, **59**(2): 170-176

[8] MA X H, ZONG Q G, LIU Y. The intense substorm incidence in response to interplanetary shock impacts and influence on energetic electron fluxes at geosynchronous orbit[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(5): 3210-3221

[9] FU H B, YUE C, ZONG Q G, *et al*. Statistical characteristics of substorms with different intensity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(8): e2021JA029318

[10] LYONS L R, LEE D Y, WANG C P, *et al*. Global auroral responses to abrupt solar wind changes: dynamic pressure, substorm, and null events[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A8): A08208

[11] YUE C, ZONG Q G, ZHANG H, *et al*. Geomagnetic activity triggered by interplanetary shocks[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A5): A00I05

[12] XU S G, YUE C, ZONG Q G, *et al*. Solar wind energy budget dilemma during substorms induced by interplanetary shocks[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(8): e2022JA031192

[13] BURCH J L. Preconditions for the triggering of polar magnetic substorms by storm sudden commencements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1972, **77**(28): 5629-5632

[14] KOKUBUN S, MCPHERRON R L, RUSSELL C T. Triggering of substorms by solar wind discontinuities[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1977, **82**(1): 74-86

[15] TSURUTANI B T, ZHOU X Y. Interplanetary shock triggering of substorms: WIND and Polar[J]. *Advances in Space Research*, 2003, **31**(4): 1063-1067

[16] LEE D Y, CHOI K C, OHTANI S, *et al*. Can intense substorms occur under northward IMF conditions?[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A1): A01211

[17] YUE C, ZONG Q G. Solar wind parameters and geomagnetic indices for four different interplanetary shock/ICME structures[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A12): A12201

[18] LUGAZ N, FARRUGIA C J, WINSLOW R M, *et al*. Factors affecting the geoeffectiveness of shocks and sheaths at 1 AU[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(11): 10861-10879

[19] HAJRA R, TSURUTANI B T. Interplanetary shocks inducing magnetospheric supersubstorms (SML<– 2500 nT): Unusual auroral morphologies and energy flow[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, **858**(2): 123

[20] ADHIKARI B, BARUWAL P, CHAPAGAIN N P. Analysis of supersubstorm events with reference to polar cap potential and polar cap index[J]. *Earth and Space Science*, 2017, **4**(1): 2-15

[21] FU H B, Yue C, ZONG Q G, *et al*. Substorm influences on plasma pressure and current densities inside the geosynchronous orbit[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(3): e2022JA031099

[22] ZHUANG Y, YUE C, ZONG Q G, *et al*. The effect of energetic ion dispersionless injections on the ring current dynamics[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(2): e2022JA030914

[23] SHAY M A, SWISDAK M. Three-species collisionless reconnection: effect of O^+ on magnetotail reconnection[J]. *Physical Review Letters*, 2004, **93**(17): 175001

[24] FU S Y, ZONG Q G, WILKEN B, *et al*. Temporal and spatial variation of the ion composition in the ring current[J]. *Space Science Reviews*, 2001, **95**(1): 539-554

[25] BAUMJOHANN W, KAMIDE Y, NAKAMURA R. Substorms, storms, and the near-Earth tail[J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 1996, **48**(2): 177-185

[26] MCPHERRON R L, HSU T S. A comparison of substorms occurring during magnetic storms with those occurring during quiet times[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A9): 1259

[27] PARTAMIES N, JUUSOLA L, TANSKANEN E, *et al*. Substorms during different storm phases[J]. *Annales Geophysicae*, 2011, **29**(11): 2031-2043

[28] DU A M, TSURUTANI B T, SUN W. Anomalous geomagnetic storm of 21-22 January 2005: A storm main phase during northward IMFs[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A10): A10214

[29] JANG E, YUE C, ZONG Q G, *et al*. The effect of non-storm time substorms on the ring current dynamics[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2021, **5**(3): 251-258

[30] HE Z H, DAI L, WANG C, *et al*. Contributions of substorm injections to SYM-H depressions in the main phase of storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(12): 11729-11736

[31] DAI Lei, WANG Chi, REN Yong, *et al*. Geomagnetic storms and substorms: progress and perspectives[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2025, **70**(27): 4759-4774 (戴磊, 王赤, 任勇, 等. 磁暴和亚暴研究进展与展望 [J]. 科学通报, 2025, **70**(27): 4759-4774)

[32] CHU X N, MCPHERRON R L, HSU T S, *et al*. Solar cycle dependence of substorm occurrence and duration: implications for onset[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(4): 2808-2818

[33] GONZALEZ W D, JOSELYN J A, KAMIDE Y, *et al*. What is a geomagnetic storm?[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1994, **99**(A4): 5771-5792

[34] LOEWE C A, PRÖLSS G W. Classification and mean behavior of magnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997, **102**(A7): 14209-14213

[35] BELIAN R D, GISLER G R, CAYTON T, *et al*. High-Z energetic particles at geosynchronous orbit during the great solar proton event series of October 1989[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1992, **97**(A11): 16897-16906

[36] KRESS B T, RODRIGUEZ J V, ONSAGER T G. The GOES-R space environment in situ suite (SEISS): measurement of energetic particles in geospace[M]//GOODMAN S J, SCHMIT T J, DANIELS J, *et al*. The GOES-R Series. Amsterdam: Elsevier, 2020: 243-250

[37] NEWELL P T, GJERLOEV J W. Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A12): A12211

[38] FOK M C, WOLF R A, SPIRO R W, *et al*. Comprehensive computational model of Earth's ring current[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, **106**(A5): 8417-8424

[39] FOK M C, HORNE R B, MEREDITH N P, *et al*. Radiation Belt Environment model: application to space weather nowcasting[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A3): A03S08

[40] FOK M C, GLOCER A, ZHENG Q, *et al*. Recent developments in the radiation belt environment model[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, **73**(11/12): 1435-1443

[41] FOK M C, BUZULUKOVA N Y, CHEN S H, *et al*. The comprehensive inner magnetosphere-ionosphere model[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(9): 7522-7540

[42] PERREAULT P, AKASOFU S I. A study of geomagnetic storms[J]. *Geophysical Journal International*, 1978, **54**(3): 547-573

[43] KNIPP D J, WELLIVER T, MCHARG M G, *et al*. Climatology of extreme upper atmospheric heating events[J]. *Advances in Space Research*, 2005, **36**(12): 2506-2510

[44] ØSTGAARD N, VONDRAK R R, GJERLOEV J W, *et al*. A relation between the energy deposition by electron precipitation and geomagnetic indices during substorms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A9): 1246

[45] DE MICHELIS P, DAGLIS I A, CONSOLINI G. Average terrestrial ring current derived from AMPTE/CCE-CHEM measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997, **102**(A7): 14103-14111

[46] ZHAO H, LI X, BAKER D N, *et al*. The evolution of ring current ion energy density and energy content during geomagnetic storms based on Van Allen Probes measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(9): 7493-7511

[47] HE Z H, DAI L, WANG C, *et al*. Characteristics of isolated and storm-time ion injections[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(3): e2022JA030745

[48] MCPHERRON R L. Substorm related changes in the geomagnetic tail: the growth phase[J]. *Planetary and Space Science*, 1972, **20**(9): 1521-1539

[49] YUE C, BORTNIK J, LI W, *et al*. The composition of plasma inside geostationary orbit based on Van Allen Probes observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(8): 6478-6493

[50] YUE C, BORTNIK J, LI W, *et al*. Oxygen ion dynamics in the Earth's ring current: van allen probes observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(10): 7786-7798

作者简介



马佳荣 男, 北京大学地球与空间科学学院博士研究生, 主要研究方向为天体与小行星物理.
E-mail: jrma25@stu.pku.edu.cn



乐 超（通信作者） 女, 北京大学地球与空间科学学院研究员、长聘副教授、博士生导师. 主要研究方向为行星磁层物理, 包括地球与其他行星磁层中环电流粒子的动力学过程、波粒相互作用以及机器学习在行星磁层物理的应用等.
E-mail: yuechao@pku.edu.cn