



磁暴和亚暴研究进展与展望

戴磊^{1*}, 王赤¹, 任勇¹, 朱明惠¹, 王旭¹, 王彤辉¹, 王开来¹, 段素平¹, 杨晓超¹, 张永存¹, 何兆海¹, 郭孝城¹, 李晖¹, 唐斌斌¹, 孙天然¹, 张佼佼¹, 杨忠炜¹, 何茂盛¹, 符慧山², 於益群², 周煦之³, 乐超³, 汪珊³, 何飞⁴, 陶鑫⁵, 汤朝灵⁶, 刘建军⁷

1. 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

2. 北京航空航天大学空间与地球科学学院, 北京 100191

3. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 地球与行星物理学科中心, 北京 100029

5. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

6. 山东大学空间科学与技术学院, 威海 264209

7. 中国极地研究中心极区空间物理与天文研究所, 上海 200136

* 联系人, E-mail: ldai@spaceweather.ac.cn

2025-03-04 收稿, 2025-04-23 修回, 2025-05-23 接受, 2025-06-12 网络版发表

国家自然科学基金(42425404, 42188101)和中国科学院战略先导专项空间科学(二期)项目(XDA15350201, XDA15052500)资助

摘要 2024年5月10日, 地球空间暴发了近20年来最强的磁暴, 伴随多次超强亚暴, 北京、阿勒泰等地出现罕见极光。磁暴和亚暴是典型的太阳风-磁层耦合暴发模式, 是空间天气预报背后的关键科学问题。本文回顾了磁暴和亚暴研究的最新进展, 涵盖磁层对流、磁重联、电流体系、极光活动和高能粒子等主要过程, 指出这些过程的跨区域耦合机制及磁暴-亚暴之间的内在联系仍是未解的前沿难题。借鉴地幔对流驱动板块运动、大气对流引发极端天气等类比, 本文提出以“磁层对流演化”为核心的未来研究框架。核心假说认为: 磁力线在磁层对流驱动下重构空间电流体系, 进而主导磁暴与亚暴的发生与演化。该框架目标是统一磁暴-亚暴的内在物理过程, 揭示两者的内在联系。围绕该假说, 本文提出三个关键科学问题: (1) 亚暴期间磁层对流演化特征及其电流体系响应; (2) 磁暴期间磁层对流演化特征及其电流体系的响应; (3) 磁暴-亚暴对流间的内在联系。在此框架下, 本文初步探讨了2024年5月极端磁暴中低纬极光的可能成因, 认为其或源于超强磁层对流驱动下的场向电流系统在电离层向赤道大幅度扩展。目前, 磁层对流演化的系统研究仍处于初级阶段。即将开展的SMILE(Solar wind Magnetosphere Ionosphere Link Explorer, 太阳风-磁层相互作用全景成像卫星)任务与未来的多尺度磁层星座探测计划(self-Adaptive Magnetic reconnection Explorer, AME)将为该方向提供关键观测支撑, 推动磁暴-亚暴理论的发展。

关键词 磁暴, 亚暴, 太阳风-磁层相互作用, 磁层对流, SMILE任务, AME任务

1 太阳风-磁层耦合与空间天气

1.1 空间天气

除了地球的固体、海洋和大气环境外, 地球100 km以上的日地空间环境同样对人类的生存和发展

至关重要。在这一空间环境中, 包含了地球磁层、电离层、中高层大气及行星际空间, 充满了带电等离子体。太阳活动及太阳风的变化, 常常引发空间环境的剧烈波动, 这些变化通常发生在短时间尺度内, 被称为空间天气^[1,2]。空间天气对地球表面及空间的各类技术系统

引用格式: 戴磊, 王赤, 任勇, 等. 磁暴和亚暴研究进展与展望. 科学通报, 2025, 70: 4759–4774

Dai L, Wang C, Ren Y, et al. Geomagnetic storms and substorms: progress and perspectives (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 4759–4774, doi: [10.1360/CSB-2025-0235](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0235)

具有深远影响,尤其随着人类活动向太空领域的扩展,空间天气的研究与预测在保障航天器安全、通信导航系统稳定性以及地面电力网络运行中变得愈加重要。例如,太阳风暴通过扰动地球磁层和电离层,可能导致卫星轨道异常、无线电通信中断及电力设施损毁等问题。自20世纪50年代国际地球物理年(International Geophysical Year, IGY)开始,全球范围内开始广泛关注极光、地磁扰动及其与太阳活动的关系,太阳风和地球磁层的相互作用逐渐成为研究的重点。磁暴和亚暴,作为太阳风-地球磁层耦合的暴发模式,是这一研究领域的核心科学问题。

1.2 太阳风-磁层耦合中的磁暴和亚暴

太阳风与地球磁层的相互作用机制,对于理解空间天气的演化至关重要。太阳风是由太阳外层日冕释放的超音速等离子体流,它携带着磁场、动能和能量。当太阳风抵达地球时,与地球磁层发生复杂的交互作用。太阳风大部分被磁层阻挡绕流,但携带的一部分的磁能和动能,通过磁场重联或者黏滞类型的效应进入地球磁层。太阳风能量的输入和转化,驱动了磁层的全球对流过程以及地磁暴和亚暴。

从能量传输的角度来看,太阳风-磁层耦合过程中,能量从太阳风进入磁层,在磁层内部积累并最终释放,从而引发磁暴和亚暴等暴发现象。磁暴和亚暴通常用全球范围内的地磁扰动强度来度量,通常伴随着极光等现象。磁暴通常由太阳风中的CME, CIR等结构触发^[3,4]。磁暴和亚暴期间,地面的磁场扰动大小可达几百至几千nT,这些全球范围内的地磁扰动代表着太阳风-磁层作用导致的全球空间电流的变化。

从圈层耦合的角度分析,磁暴和亚暴是地球磁层、电离层与太阳风多圈层之间相互作用的基本模式^[5],这些相互作用造成全球范围内的磁场扰动。磁暴强度通常用全球低纬度(10~30°之间)台站测量的Dst地磁分量的下降进行度量,其变化通常反映了磁层环电流的增强,且磁尾越尾电流,磁层顶电流、和其他电流亦有贡献^[6];而亚暴则由高纬台站(60~70°)AU/AL地磁指数的扰动表征,反映了极光带电流体系的演化。

从基本物理过程的角度看,太阳风-磁层相互作用引发磁暴和亚暴包括多尺度的物理过程,共同影响地球空间环境。磁暴和亚暴相关的物理过程包括:日侧和夜侧的磁场重联、磁层对流、电流系统的变化、环电流、亚暴电流及极光等活动,并影响地球辐射带的演

化。这些过程体现了跨区域的能量传输和耦合。

磁暴和亚暴的研究内容广泛,本文重点综述磁暴和亚暴包含的具体物理过程的研究进展,而非对整个领域进行详尽回顾。我们尝试尽可能涵盖磁暴亚暴过程的进展,但未必包含所有重要贡献,更全面的进展请参考空间物理的相关综述。

2 磁暴和亚暴的内禀物理过程

2.1 磁层对流和对流电场(magnetosphere convection flow and convection electric fields)

磁层对流在观测上可通过多种方式直接测量。例如,利用在轨卫星对磁层等离子体整体流速场的就地探测,或通过观测对流电场。此外,磁层对流与电离层对流之间通过磁力线耦合,电离层对流速度场的测量可反映磁层对流的分布,跨极盖电位差的观测则可反映磁层-电离层系统整体对流强度。

在磁层和电离层的宏观尺度上,对流在空间上通常表现为双涡旋结构。这一现象在早期的经典研究中就已被提出^[7,8],并在后续的观测中得到了验证。尽管如此,磁层对流在时间上如何响应太阳风的输入,仍然是一个值得深入探讨的问题。

现有的观测研究表明,磁层对流对太阳风的响应可能存在多个时间尺度。例如,Bargatze等人^[9]首次发现,AL指数对太阳风变化的响应存在20和60 min的两个峰值。He等人^[10]进一步揭示了昼夜场向电流对太阳风变化的响应,表明不同地方时段对应不同的响应时间尺度。

在Dai等人^[11]的研究中,针对磁层对流的10~20 min响应机制进行了深入探讨。他们认为,10~20 min的响应主要反映了日侧磁重联速率变化引起的磁层对流调整,这可能是太阳风对磁层的直接驱动模式,并可能产生直接驱动型的亚暴。

Dai等人^[12]通过全球模拟和观测进一步研究了日侧重联驱动的磁层对流,发现增强的对流信号以波动的形式从日侧向夜侧传播,伴随1区和2区场向电流的增强,最终导致全球对流增强。日侧重联可单独驱动磁层对流,这一发现与先前的研究的推测一致^[13]。Zhu等人^[14]通过全球磁流体动力学(magnetohydrodynamics, MHD)模拟,进一步探讨了日侧磁层对流的驱动机制及其与电离层电导率的关系。实验表明,电离层电导率对磁层对流的时间和空间模式的影响较小。虽然电导率

较高时, 1区的场向电流和Pedersen电流有所增强, 但并未影响太阳风驱动的磁层对流响应时间。

Sun等人^[15]研究了磁暴急始期地面磁场扰动与行星际激波作用下的夜侧磁层对流之间的联系。基于全球MHD模拟, 发现行星际激波作用下, 夜侧磁层会短时增强涡旋状流动和等离子体地向流动, 这些流动增强了磁层大尺度电流, 并进一步驱动电离层电流, 造成地面磁场扰动。地向流动的产生会在磁尾形成一个局部磁场减弱的区域^[16,17], 该过程有可能会引起亚暴的触发。

磁层对流与高纬电离层的对流通过磁力线耦合^[18,19]。国际超级双极光雷达网(SuperDARN)和中国的双子极光雷达网^[20]为研究电离层对流提供了重要观测数据。子午工程建设的中国双子极光雷达网由三站六部高频雷达组成, 它有效地填补SuperDARN在欧亚扇区的探测空白区域, 实现电离层对流完整演化的观测。

Li等人^[21]研究了磁尾等离子体片中的高速流事件, 并发现短时高速流(持续时间小于2 min)与亚暴活动的强相关性, 而长时高速流(>4 min)则不显著相关, 表明短时高速流可能与非平衡力引发的偶极化区域有关, 这些特征支持了柯林电流回路亚暴模型(CECL)和越尾电流中断模型(CD)。尽管长时高速流拥有更大的地向磁通传输能力, 却并没有明显的亚暴活动与之对应, 这并不符合NENL亚暴模型的预测。

在地球内磁层, 等离子体对流对应着对流电场。磁暴期间, 随着磁层对流的增强, 等离子体层被剥蚀, 等离子体层顶向地球方向收缩, 而磁暴恢复期间, 对流电场减弱, 等离子体层逐渐填充^[22]。磁暴期间的等离子体层形态变化和对流电场的全球分布对于理解太阳风和磁层的相互作用至关重要。近期研究表明, 等离子体层形态还受到磁暴和亚暴期间等离子体注入的影响, 形成等离子体层顶表面波(PSW), 导致等离子体层顶在环向变成锯齿状结构, 伴随的弥散极光边界同样变成锯齿状^[23-25]。磁暴期间等离子体层的全局形态可以指示内磁层对流电场的全球分布, 虽然已有一些光学成像仪进行过全部拍摄^[26], 但目前还未有覆盖磁暴全阶段(起始相-主相-恢复相)的完整连续观测数据, 很难完整描绘太阳风磁层相互作用过程中对流电场增强到减弱、等离子体层剥蚀到填充的完整过程。

一个值得深入探讨的议题是: 磁层对流驱动空间电流体系的假说, 是否与既有的观测与理论模型相一致。对于磁暴电流体系, 主要影响Dst指数的是环电流。

CRRES卫星观测提供了对流电场与由环电流引发的磁场扰动的就地证据^[27]。在数值模拟中, 对流驱动环电流的形成也被认为是几种可行的图像之一^[28]。

相比之下, 亚暴电流体系更为复杂。电离层中的部分电流通常包括与直接双涡旋对流(two-cell convection)结构相关的DP2电流, 以及与亚暴暴发密切关联的DP1电流^[29]。其中, DP2电流被普遍认为直接源于大尺度磁层对流, DP1电流则嵌套于连接磁层与电离层的亚暴电流楔结构中, 包含两部分: 其一是场向电流, 作为磁层对流与电离层耦合的直接通道^[30]; 其二是越尾电流, 与磁尾电流片的演化密切相关, 一般认为是由参与对流的电流片间接驱动形成。

综上, 磁层对流驱动空间电流体系的机制, 与现有的观测资料和理论模型整体上是互相兼容的。

2.2 日侧和夜侧磁层磁重联(dayside and nightside magnetic reconnection)

日侧磁层顶重联和夜侧磁尾重联是经典Dungey循环中的关键驱动源, 在太阳风-磁层-电离层耦合中起着至关重要的作用。研究磁重联的局地过程以及它如何在全球尺度上影响磁层, 一直是空间物理学中的一个重要研究方向。

在宏观层面, 磁重联的发生与太阳风输入参数密切相关, 如磁场在GSM-YZ平面的分量强度、时钟角、太阳风速度等。此外, 磁层反馈也对重联过程产生影响, 尤其是在磁暴和亚暴期间。例如, 电离层逃逸的重离子和等离子体层中的冷等离子体, 能够为磁重联过程提供额外的质量加载, 从而改变重联率^[31]。磁尾压缩也会改变重联电流片上游磁场的强度和特征。日侧磁重联的发生位置可通过一些模型进行预测^[32], 但太阳风和磁鞘的变化、弓激波等效效应使得局地磁层顶的特征更加复杂, 增加了重联位置的不可预测性。在磁暴期间, 内磁层与电离层的变化也加剧了这一不确定性^[33]。夜侧磁尾的磁重联则表现出晨昏不对称性, 与离子、电子在动理学尺度上的分离和极化电场产生的漂移运输密切相关^[34]。此外, 磁尾重联的时机、位置及机制一直存在争议。日侧磁重联的电流体系通过磁鞘的耦合, 影响磁层顶的受力^[35]。研究还发现, 磁层顶重联出流区的等离子体特征与上游太阳风的磁鞘参数呈线性相关^[36]。这表明, 磁层顶的重联过程对太阳风的响应在局地尺度上与磁鞘的等离子体条件紧密相关。

在微观层面, 磁重联的结构和过程研究得到了显

著的进展^[37~40]。尤其是通过MMS卫星的高分辨率观测和动力学数值模拟,研究揭示了重联作为薄电流片中的基本电磁场特征和相应的加速加热行为^[41],揭示了磁重联区霍尔电磁场的动力学阿尔芬波特特性^[42~46]。此外,研究也发现重联过程中存在大量波动和湍流^[47~53]。

磁重联发生后,可以通过重联出流区产生的高速流^[54,55]驱动磁层的对流。由于冻结条件,重联产生的高速流与磁场一同对流,进而影响磁层中的电流体系、偶极化等过程。

Duan等人^[56]利用双星(TC-1)和Cluster卫星在日侧外磁层的协同观测数据,发现日侧低纬边界层中磁场重联产生了间隔约3 min的系列磁绳结构。这些磁绳从低纬磁层顶对流传输到高纬外极尖区,耗时大约5 min。并在此区域形成高能氧离子的双向流(10 keV量级)。Duan等人^[57]进一步利用Cluster卫星观测数据,首次在夜侧高纬磁鞘中发现了聚集高能量氧离子的磁绳结构。这些磁绳结构源自日侧磁层顶或极尖区的磁场重联。此类磁绳结构在强磁暴和亚暴期间成为磁层内氧离子大规模输运的重要模式。Hou等人^[58]利用MMS卫星数据研究了磁尾电流片中的小尺度重联过程。结果表明,在扭曲的磁尾电流片中,非对称的小尺度重联过程会导致重联出流方向与传统的对称重联不同,进而增强了电流片的拍动振幅。

在向阳面磁层顶,Zhang等人^[59]通过Cluster、TC-1和SuperDARN卫星联合观测分析了磁层顶的重联事件,首次提出磁重联触发的内禀时间。研究发现,当南向的行星际磁场到达磁层顶后,重联将在2 min内触发,4 min后产生瞬时重联(通量传输事件)。这一发现表明,磁重联的触发时间与太阳风的变化息息相关。Zhang^[60]进一步指出,非对称环境下的磁重联比对称重联更为复杂,非对称度可达20倍。Zhang等人还研究了磁尾中的重联过程,表明重联产生的高速流与等离子体团共同作用,能够在磁层内部引发强烈的地磁扰动和高能粒子通量波动,从而为近地空间的电流体系提供新的源区^[61]。具体机制高速等离子体团携带的动能可在磁层内引起偶极场的压缩和爆发性碰撞,诱发电流的产生。

2.3 全球尺度的1区和2区场向电流(region 1 and region 2 FAC)

磁层存在全球尺度的场向电流,也称为Birkland电流,这些电流在磁层与电离层的耦合中起着桥梁作用。

1区和2区场向电流在电离层的投影呈现出围绕极区的圆弧状分布。1区场向电流主要分布在高纬度(约70°),从晨侧流入电离层,昏侧流出;而2区场向电流则位于1区场向电流的低纬度边界下方,电流方向与1区相反,即从昏侧流入电离层,晨侧流出。

1区场向电流主要由磁层电场驱动,与极光电流密切相关^[62,63]。在日侧,1区场向电流主要起源于低纬边界层(low-latitude boundary layer, LLBL)的向阳侧和晨昏侧区域。1区场向电流的变化受多个因素的影响,包括行星际磁场(interplanetary magnetic field, IMF)方向、太阳风条件以及电离层电导率。例如,强南向IMF时,弓激波可能显著增强1区场向电流^[64]。此外,1区场向电流与磁暴和亚暴活动密切相关^[10,63]。

相比之下,2区场向电流位于较低纬度,通常位于极光卵的赤道侧。2区场向电流的电流从黄昏一侧流入电离层,黎明一侧流出,方向与1区场向电流相反。2区场向电流的强度通常低于1区场向电流,并且受不同驱动机制的影响。2区场向电流主要与环电流的动力学以及等离子体层中电子的沉降有关,环电流的变化直接影响2区场向电流的强度与分布^[63]。2区场向电流的形成通常与内磁层的压力梯度密切相关,尤其是纬圈向的压力梯度,这些梯度在特定地磁条件下推动电流流入电离层。当IMF为南向时,磁层对流增强,可能导致流剪切和压力梯度的增加,从而增强2区场向电流。

1和2区场向电流在电离层中通过佩德森电流(Pedersen currents)和霍尔电流(Hall currents)闭合^[65]。佩德森电流是1和2区场向电流的主要闭合路径,沿电场方向流动,连接电离层中的,形成1区和2区之间的上下行电流闭合通道。由于1区场向电流强于2区场向电流,佩德森电流无法完全闭合1区场向电流。剩余的1区场向电流通过跨极盖的佩德森电流闭合其余电流。霍尔电流垂直于电场和磁场,在电离层中形成横向电流分布,尽管它对电流体系的侧向分布有帮助,但不是场向电流闭合的主要路径。电离层电导率的变化显著影响场向电流的闭合过程和电流强度^[66]。1区场向电流相关的电子沉降释放能量并产生极光辐射,极光辐射的峰值区域通常与1区场向电流的闭合区域重合,表明场向电流的闭合过程与可观测的极光活动直接相关。

Yu和Ridley^[67]模拟了太阳风密度突增后的场向电流演化,发现日侧电离层首先在约70°纬度,MLT~12附近出现了中尺度的2区场向电流,这对电流在2 min后退化,随后出现一对新区场向电流,并逐渐向夜侧移动,

最终与原1区场向电流汇合, 增强了后者. 第一对2区场向电流的出现与日侧太阳风压缩磁层时的快磁声波有关, 而第二对1区场向电流则与磁声波引发的尾向对流和漩涡活动相关.

Yu等人^[68]进一步模拟发现, 磁尾发生亚暴后, 对流携带大量等离子体向地球方向运动, 并在过渡区遭遇强烈偶极化磁场, 导致“刹车”现象并使磁尾电流中断, 形成1区场向电流流向电离层, 形成亚暴电流楔结构. 该研究还发现, 地向高速对流停止后, 磁层内仍然存在对流漩涡, 触发了一对新的1区场向电流, 并与中纬度电离层连接. 这个电流导致环电流中断, 与亚暴电流楔的内外分布或低高纬度分布相关, 更新了传统的磁尾电流模型. 这些变化对电离层对流产生影响, 使亚暴期间的电流体系和对流模式更加复杂.

2.4 越尾电流和磁层偶极化(cross-tail current and magnetosphere dipolarization)

磁尾和内磁层过渡区, 位于地球夜侧6~8 RE处, 是亚暴暴发的关键区域. 该区域的越尾电流演化和磁场偶极化过程, 尤其在亚暴暴发时刻, 通常作为关键的指示性过程. 亚暴暴发前, 越尾电流片会变薄; 而在亚暴暴发时, 过渡区通常伴随着磁场偶极化现象.

磁场偶极化表现为磁场南北z分量随时间的增加而增强. 过渡区的磁场偶极化可分为大尺度和小尺度两种类型. 大尺度偶极化的时间尺度为几十分钟, 伴随全球尺度磁力线的变化; 小尺度偶极化封面则通常发生在几十秒内^[69-71]. 研究表明, 大尺度和小尺度偶极化相关, 但是不同的过程^[72]. 在偶极化过程中, 热离子和电子在过渡区会经历刹车效应, 形成磁通量堆积区^[72], 并激发波动和强烈的不稳定性^[71]. 刹车后的超热离子在梯度漂移和曲率漂移的作用下, 会沿顺时针方向运动(从北极视角来看), 并成为环电流的主要成分; 而刹车后的超热电子则沿逆时针方向漂移, 形成辐射带的种子电子. 作为磁场从尾状向偶极状过渡的区域, 磁场形状的快速变化在此引发了部分环电流. 这些环电流与2区场向电流共同构成回路, 成为磁层与电离层之间的耦合桥梁.

Duan等人^[73]利用Cluster卫星数据研究了强亚暴偶极化期间, 低能氧离子从磁尾尾瓣区对流进入近地等离子体片的过程. 研究表明, 在强亚暴偶极化期间, 尾瓣区的低能氧离子被动力学阿尔文波(KAWs)携带的强垂直单极电场(约-20 mV/m)加速至大于1 keV, 并呈

现准垂直投掷角分布. 这些高能氧离子与尾瓣区中的低能氧离子有所不同, 表明在亚暴偶极化过程中, 来自电离层的氧离子通过KAWs的垂直加速作用, 迅速改变其运动方向, 并进入近地磁尾等离子体片中.

2.5 亚暴电流(substorm current system)

亚暴期间的电流体系是理解亚暴的重要基础. 这些电流体系的演化活动为研究磁层-电离层电动力学耦合过程提供了重要线索. 根据AL/AE指数的演化, 亚暴可分为增长相、扩张和消退四个阶段. 每个阶段中电流体系如何演化以及与磁层对流的关系, 都是值得深入探讨的问题.

亚暴电流楔模型是经典的亚暴电流体系模型之一. 该模型提出, 在亚暴暴发后, 中断的越尾电流通过1区场向电流分别在晨侧和夜侧流入或流出电离层, 并通过夜侧的西向电集流闭合电流回路^[74]. 这一电流体系可以解释近地磁尾的磁场偶极化及地面磁扰. 然而, 随着卫星观测的深入, 研究发现单一的电流楔模型无法准确预测地磁尾的磁场偶极化程度. 因此, 需要在近地偶极化区域内增加一个新的西向部分环电流, 以更好地符合观测结果. 尽管亚暴过程中的西向部分环电流强度通常低于越尾中断电流, 但两者的相对强度及其闭合路径的变化对于理解亚暴电流体系至关重要.

Tang和Wang^[75]利用全球磁流体力学模拟全面分析了亚暴电流体系, 发现亚暴过程中存在三种电流体系: 除了经典的越尾电流和1区场向电流外, 还有一种新的电流体系, 沿晨侧和昏侧的磁层径向流动, 最终直接连接1区/2区场向电流的子午面电流. 虽然这些电流体系在磁层中的表现不同, 但它们都通过1区/2区场向电流闭合, 因此在全局电流体系中存在内在联系. 通过对1区/2区场向电流强度在亚暴过程中的变化进行分析, 可以为从全局视角理解亚暴电流体系提供重要参考.

Li等人^[76]揭示了太阳风条件对亚暴增长相持续时间和强度的影响. 对1995~2011年的379次IMF南转事件进行了统计显示, 亚暴增长相持续时间从几分钟到2~3 h不等, 主要受太阳风条件控制. 日侧重联电场和太阳风速度越大, 增长相持续时间越短. 研究还发现, 发生亚暴的太阳风重联电场和速度下限分别为0.6 mV/m和280 km/s. 同样, 亚暴强度与日侧重联电场呈正相关, 而与增长相期间日侧重联的磁通量总量以及进入磁层的太阳风能量无关.

Fu等人^[77]利用OMNI、SuperMag网站提供的数据,研究了地磁亚暴的SME、SMU和SML指数的时空分布.结果表明,SME指数在强亚暴期间极光电集流存在峰值位于午夜和黄昏的双峰分布,这表明对于这些亚暴而言东向与西向电集流的大小是可比的.因而,研究人员认为,在强亚暴的昏侧存在一个额外的亚暴电流楔.

2.6 环电流(ring current)

环电流通常被认为是磁暴期间Dst指数的主要贡献源,它是由磁暴期间全球对流增强所引起的.环电流的时空演化特征、组成成分及其与全球对流和亚暴的关系,仍存在许多值得探讨的问题.在数值模拟中,对流驱动环电流的是可行的机制之一^[28].

2001年,Jordanova等人^[78]提出,大尺度磁层电场是环电流形成的关键机制,电场向地球传输离子,增加环电流强度并推动其演化.随着对流携带离子进入内磁层,离子通量的增加导致环电流强度上升,从而引起Dst指数的下降.

Li等人^[79]通过对1996~2006年间299次磁暴事件的地磁扰动数据分析,揭示了部分环电流在磁暴过程中的重要性,并获得了不同强度磁暴期间部分环电流的位置、时间演变和定量贡献.研究表明,部分环电流在磁暴主相阶段早期形成,并在SYM-H指数达到最小值前逐渐增大,随后在恢复阶段迅速减小.随着磁暴强度的增加,部分环电流的贡献逐渐减弱.例如,在中等磁暴期间,部分环电流贡献占主导地位,而在超级磁暴期间,对称环电流则成为主导.

亚暴对内磁层等离子体的分布也可能影响环电流的密度和分布.Yue等人^[80]基于RBSP卫星的观测表明,在高AE指数下,不同等离子体成分的总压和分压显著增加,其中氢离子压强在等离子体层中占主导地位.重离子和电子的压强在等离子体层顶外增加,并形成晨-昏不对称性.10~50 keV的氧和0.1~40 keV的电子在亚暴活动期间的午夜扇区贡献了25%和20%以上,而氦的贡献通常很小.进一步地,Yue等人^[81]定量研究了大量氧离子的存在对于环电流动力学的影响.其结果表明,在SYM-H指数<-60 nT的较强磁暴期间,氧离子始终大量存在.同时,压强各向异性随着SYM-H的减小和L值的增大而减小.此外,氧离子和氢离子的压强比在磁暴主相增加,然后在磁暴恢复相降低,这表明与氢离子相比,氧离子压强的建立和衰减更快.

高能粒子注入是环电流增强的主要机制之一,表现为带电粒子(通常在几十至几百keV范围)突然增加.在Zhuang等人^[82]的研究中,统计了无色散注入对地球环电流的影响.其结果表明无色散质子注入事件主要发生在午夜前区域,并会随着SME指数的增加而进一步延伸到更低的L值内.同时,氢和氧离子的注入几乎和质子注入同时发生.时序叠加结果表明,随着SME_max的增加,氢、氦、氧离子的环电流能量密度都在增加,而在超级亚暴期间,O⁺离子对环电流的贡献变得更加显著.

在注入等诸多因素的影响下,环电流密度就会在亚暴期间出现进一步变化.Fu等人^[83]的结果表明,等离子体压强在强亚暴期间显著提升,并能够导致大约每小时3 nT的地球磁场下降的环电流增强.此外,等离子体压强的上升主要分布在黄昏至午夜侧,从而导致了非对称环电流和连接到电离层的II区场向电流密度的增加,使得亚暴期间电流体系更为复杂.

磁暴期间等离子体的注入对环电流的演化有重要影响.He等人^[84]发现,能量离子通量在注入前后的增加率随着粒子能量的增加而增加,而能量电子呈现相反趋势.通过分析Kappa分布特征,研究验证了Kappa指数与特征能量之间的线性关系.He等人^[85]发现注入离子(50~400 keV)的通量增加与注入期间SYM-H指数的急剧下降成正比.基于典型事件分析和95次磁暴期间注入事件统计结果,识别无色散和色散的注入信号,估计亚暴注入的方位角范围.结果发现,磁暴期间的亚暴注入都拥有方位角方向大于90度的注入区的特征.因此至少部分亚暴注入可能模拟类似大尺度对流增强,在磁暴主相期间导致Dst指数的急剧下降.He等人^[86]进一步利用LANL卫星数据深入分析孤立亚暴注入和磁暴注入的异同,主要包括注入区的大小、注入前后通量变化,以及能谱特征.研究发现磁暴期间注入区比孤立亚暴注入要宽得多,甚至可以在向阳面观测到.磁暴亚暴期间等离子体注入通常伴随着波动现象.

2.7 辐射带高能粒子(radiation belt energetic particles)

地球辐射带(也被称为Van Allen辐射带)是大量被地磁场捕获的高能电子和质子形成的空间辐射区域.外辐射带内则充斥着大量高能电子,其能量可达数MeV以上,其通量强度的变化幅度可达3~4个数量级^[87-91].磁暴和亚暴可以通过磁层对流引发的一系列

效应,显著影响辐射带的高能带电粒子。

在磁暴和亚暴引发的辐射带电子加速进程方面,主要涉及绝热加速、波动加速以及MeV电子的直接注入机制。当行星际条件促使地球磁层产生强对流活动时,对流电场会驱动高能电子自外磁层向内磁层快速对流输运,由此引发强烈的绝热加速效应,导致辐射带电子通量迅速增加。注入内磁层的能量电子,能够激发哨声模式合声波。通过波粒相互作用,这些合声波可使辐射带电子加速,进而引起通量上升^[92,93]。非磁暴时段辐射带电子通量的增加现象,也被认为和该过程紧密相关。Rodger等人^[94]通过观测数据探究磁层对流与辐射带之间的联系,研究发现,亚暴重复发生时,磁层对流得以增强,进而激发哨声模合声波,最终促成辐射带电子通量的提升。此外,超低频(ULF)波动亦被认为可通过回旋共振引起辐射带电子的加速^[95]。最新的卫星数据分析还显示,亚暴期间还可能出现MeV电子的直接注入情况,同样会促使辐射带电子通量增加^[96-99]。波动加速与直接注入这两种加速方式的相对重要程度仍需进一步研究。

早期的观测研究认为,外辐射带高能电子的增长事件通常与磁暴事件相关,倾向于发生在磁暴的恢复阶段。然而,后续的研究发现,对于某些太阳活动周的地磁暴事件,外辐射带的高能电子通量并不一定会增加,部分磁暴事件中外辐射带的高能电子通量出现下降或没有显著变化^[100,101]。统计分析表明,高能电子的加速与亚暴及磁层对流的关系更为紧密^[102,103]。

磁暴与亚暴现象能够致使内磁层中辐射带的高能电子通量发生剧烈变动。过往研究显示,磁暴进入主相时,外辐射带的电子通量通常会在短时间内迅速降低,此现象被称作“dropout”,而在磁暴恢复阶段,电子通量又会逐步回升。传统认知中,多数磁暴事件结束后,辐射带的高能电子通量会恢复至磁暴前水平,甚至超越该水平^[104]。但统计分析发现,磁暴对地球辐射带电子通量的影响复杂^[100]。因此,研究磁暴与亚暴引起的辐射带电子增加或损失机制,成为辐射带物理研究中的一个关键问题。

Tang等人^[105]研究表明,亚暴电子注入和磁暴期间的对流是种子电子增强的主要机制。Wang等人^[106]进一步统计研究了磁暴期间地球外辐射带种子电子和相对论电子的演化特征。Tang等人^[107]对地磁活动对辐射带电子加速区的影响进行了研究,他们发现地磁暴的演化及其亚暴活动对相对论电子加速区的位置和动力学

过程都是非常重要。Chen等人^[108]对地球外辐射带不同能量的超相对论电子(>3 MeV)的加速条件进行了统计研究,他们发现恢复阶段不同的亚暴活动可以引起不同能量的超相对论电子(3.4、5.2、6.3和7.7 MeV)的增强。

亚暴注入可导致粒子密度与压强的局地上升。在抗磁效应的作用下,该区域磁场有所下降,使得总压强(磁压与热压之和)保持不变。这一局地磁场下降的区域被称为磁场凹陷。随着离子在地球磁场中的西向漂移,这种磁场凹陷结构也将向西运动,以维持总压强的平衡。在真实观测中,有相当部分的磁场凹陷结构可维持很长的时间,且其对应的离子通量上升几乎是无色散的。为了解释这种观测现象,Yin等人^[109]提出,当注入粒子所携带的热压足够高时,其对应的磁场凹陷结构将足够深,使得其场强的径向剖面存在极小值。这些足够深的磁场凹陷结构可被视为一种投掷角过滤器,使得投掷角接近 90° 的粒子被积聚在凹陷结构附近,而其他粒子近乎不受影响地呈现出能量色散的特征^[110]。

2.8 极光活动(aurora)

极光反应了磁暴亚暴的磁层活动在电离层上的投影,对理解磁暴亚暴的演化非常关键。太阳风-磁层耦合沿着磁力线映射到极区电离层,表现为极光活动、电离层对流、高纬焦耳加热等。磁暴和亚暴的发生是太阳风-磁层耦合的重要体现,亚暴的发展过程与磁层大尺度的对流模式有着密切的联系。磁层对流受到太阳活动的影响,一般不会稳定地持续进行,亚暴是磁层稳定对流被破坏的直接观测现象。

针对太阳风扰动(行星际激波)相关的极光响应,Liu等人^[111]利用我国南极中山站和北极黄河站的观测资料,发现激波与地球相互作用之后,极光演化呈现两类观测结果:极光暴发和静态事件。其中极光暴发包括激波触发极光亚暴或极光持续增强,静态事件有极光无显著响应和极光伪暴发。深入分析18个事件对应的行星际太阳风和地磁参数,发现太阳风能量注入的效率(ϵ 函数)和磁层空间的储能状态决定了极光响应的类型。

亚暴的发生通常伴随极区电离层对流和电流体系的显著改变,在亚暴增长相期间,极区双涡旋状的扰动电流系(DP2)逐渐形成,极光卵晨昏两次的西向和东向电急流逐渐增强。而在膨胀相开始后,极区子夜侧迅速形成单涡旋状的电流系(DP1),该电流系为西向流,这个西向电急流在子夜前后转向为场向电流并与磁尾相

连,形成了亚暴电流楔的电离层重要部分.基于地基极光成像仪和高频相干散射雷达大尺度范围的极区电离层对流的观测数据, Liu等人^[112]针对行进中的磁层亚暴的发展过程开展事例研究.地基极光成像仪观测到行星际激波撞击地球后,极光卵高纬侧缓慢出现极向运动极光结构,极向移动的极光同时向西扩展,即形成了极光西行浪涌.与此同时,飞跃中山站上空的IMAGE卫星正好捕捉了此次极光亚暴事件.卫星全域观测显示,此次极光亚暴在激波达到之前已经处于增长相阶段,之后的极光序列图像显示激波撞击磁层导致极光亚暴活动持续增强.夜侧极光卵的极向和赤道向边缘均出现亮度增强的大尺度极光结构.大尺度极光序列图显示此次行星际激波并未显著改变极光亚暴的发展.超级双子极光雷达网(SuperDARN)的全域对流图显示此次行星际激波事件导致了极区电离层对流强度增加,即DP2电流系增强,这也从对流的角度证实了此次行星际激波并未影响亚暴的发展,仅使极光活动持续增强和对流进一步增强.

2.9 磁暴与亚暴研究的前沿问题

经过多年研究,磁暴和亚暴的研究取得了显著进展,但仍然有很多问题需要探索.磁暴亚暴内在的物理过程,包括磁层对流、磁重联、电流体系、极光活动和高能电子行为等,已经各自有了比较清楚的研究.但这些过程在磁暴亚暴中如何跨区域耦合,如何在全球尺度上联系起来,仍然有待探索.在系统层面,磁暴和亚暴两种基本模式的关系仍然知之甚少(“The storm-substorm relationship is poorly understood”)^[113].磁暴和亚暴的关系是一个经典问题,但长久以来研究一直处于争议.早期有研究人员提出,亚暴是磁暴的组成成分(building block),即多个亚暴累积形成磁暴.然而,观测结果否定了这一观点.后续研究表明,一些亚暴的粒子注入可能对环电流的形成有贡献,因此亚暴与磁暴之间并非完全无关.一个关键的问题是理清楚驱动磁暴的全球对流和亚暴对流之间的联系^[113].从基础理论层面理解磁暴和亚暴之间的关系,是空间天气研究中的一个关键科学问题.

对于磁暴,磁层电流体系对磁暴指数Dst的贡献仍需进一步解析.许多研究认为,磁层环电流对Dst指数的贡献为主,但也有研究指出,磁尾越尾电流对这些指数的贡献不可忽视,可能占比约25%^[113].另外,某些研究提出,在卡灵顿级别的大磁暴期间,电离层的电极电

流向低纬度移动,可能对Dst指数的变化产生主要作用^[114].从磁流体动力学层面,太阳风的南向磁场,动压,速度,等因素哪些是磁暴的关键驱动因素,各个因素及其组合的贡献如何,还正在深入研究.比较明确的是,太阳风携带的南向磁场是一个驱动磁暴的关键因素. Burton关系为太阳风南向磁场与环电流Dst指数的关系提供了经验描述.然而,也有研究表明,太阳风的速度、密度和动压等参数对磁暴的影响同样重要,这些因素也可能影响磁层对流以及磁暴电流的形成.

亚暴的机制仍然存在较大不确定性.类似磁暴,亚暴的能量来源同样来自太阳风,而太阳风的南向磁场被认为是触发亚暴的关键因素.大多数亚暴发生在行星际磁场由北向南转变后.然而,亚暴的时空演化过程、演化的因果链条、触发机制及消退机制仍缺乏公认的答案.虽然亚暴期间电离层的极光和电流观测较为丰富,演化模式较为清晰,但磁层物理过程与这些现象之间的关系仍是亟待解决的难题.

3 对流视角中的亚暴和磁暴

深入研究磁暴和亚暴的机制,关键是理解磁暴和亚暴的电流体系.从磁流体力学的角度来看,宏观尺度上通常磁力线和等离子体流体是冻结在一起对流的,因此对流过程必然会驱动磁力线的演化.在磁流体力学框架内,对流几乎是造成磁流体电流系统变化、积累电流并形成薄电流片的唯一途径^[115].基于以上的思考,一个自然而然的初始假说:冻结的磁力线通过磁层对流运动形成新的电流体系,进而引发磁暴和亚暴.磁层对流可通过拉动磁力线直接增强电流,或通过对流附带的高能粒子注入来增强电流.

从能量传输的角度,太阳风是驱动磁暴和亚暴的源头.太阳风对磁层驱动一个明显的效应就是驱动对流.太阳风驱动磁层对流的机制主要有两种:一种是通过类似“黏滞效应”的机制直接驱动磁层对流,通常对应于太阳风与磁层的直接耦合;另一种是太阳风首先在磁尾区域积累磁力线,通过磁层内部的磁尾重联驱动对流,这对应的是加载-卸载类型的太阳风-磁层耦合.传统观点认为,当行星际磁场(IMF)Bz为北向时,类似黏滞效应机制是对流的主要驱动源;而当IMF Bz为南向时,磁力线先通过日侧磁层顶重联形成半开放磁力线在磁尾堆积,然后磁层内的磁尾重联过程则成为驱动磁力线闭合与对流的主要源头.

对流视角中,亚暴的初始假说:亚暴是太阳风驱动

的磁层外层对流演化过程的暴发。磁层外层大致对应等离子层外部(磁纬度大于 65° , 距离地球表面超过5~6个地球半径)。图1中磁层内的非阴影部分代表这1区域。磁层对流增强了磁尾的越尾电流, 越尾电流的暴发和后续的中断导致形成新的亚暴电流楔(type 1或type 2)体系, 并通过平行电流传递至电离层, 进而引发高纬度($60^\circ\sim 70^\circ$)AU/AL地磁指数的暴发。

对流视角中, 磁暴的初始假说: 磁暴是太阳风驱动的磁层对流过程的持续极端增强阶段。这一阶段与行星自转主导的共转对流系统产生强相互作用, 表现为对磁层内层的等离子体层的侵蚀与剥离。全球范围内对流的持续极端增强将显著增强环电流, 并导致磁尾等离子体片和环电流靠近行星, 从而导致低纬度的Dst指数的暴发。

对流演化视角中, 磁暴和亚暴关系的初始假说: 亚暴和磁暴分别代表太阳风驱动的磁层对流在不同强度与阶段的演化。亚暴的条件是磁层对流在磁层外层演化, 并引发越尾电流的暴发演化; 而磁暴的条件是极大且持续的磁层对流入侵磁层内层, 导致此区域的环电流的暴发。

Kp指数由Bartels根据中纬度(约 50°)台站的局地3 h磁扰动指数构造并发展而来^[116]。Kp指数并非专门针对某个特定电流系统而设计, 而是大致反映了磁层对流的强度^[117]。当行星际磁场Bz为南向时, 日侧磁层的重联过程大于夜侧重联, 导致闭合磁力线的边界不断向赤道移动, 同时等离子体片的内边界在对流过程中向

地球靠近。随着对流的持续增强, 电离层的电极流电流的纬度也会随之降低, 电极流电流的增强与两个效应的叠加最终引发中纬度(约 50°)的Kp指数暴发。

对流演化视角中, 磁暴和Kp指数关系的初始假说: 磁暴对应的是侵入磁层内层、极大增强并持续的磁层对流, 因此必然满足Kp指数暴发的对流条件。由此, 强磁暴通常伴随Kp指数的暴发。

2024年5月超强磁暴事件期间我国多地发生罕见极光, 背后的物理原因还未有定论。基于磁暴亚暴的对流演化的框架, 以下尝试对相关动力学过程和物理成因进行初步探讨。

此次超强磁暴过程中伴随了一系列强烈的亚暴活动。从亚暴对流的视角来看, 这些亚暴很可能对映着太阳风直接驱动下, 磁层外层区域发生的剧烈对流过程。磁层外层通常位于等离子体层以外, 该区域的强对流首先驱动了显著增强的1区和2区场向电流系统。同时, 该区域的对流也强烈影响越尾电流的积聚、增强与断裂, 进而形成典型的亚暴电流楔结构。这一结构将磁层中暴发的电流部分传递至电离层, 引发剧烈的电离层电流, 对映着中高纬度亚暴极光。通常情况下, 亚暴极光位于磁层闭合磁力线区域, 其典型分布范围为磁纬 $60^\circ\sim 70^\circ$, 难以覆盖我国的磁纬范围。

从磁暴对流的角度分析, 极光带在超强磁暴期间显著向低纬移动, 反映出磁层对流的整体增强以及对内层磁层的深入侵入。一方面, 从电离层视角, 太阳风与磁层顶的持续磁重联不断打开闭合磁力线, 推动电

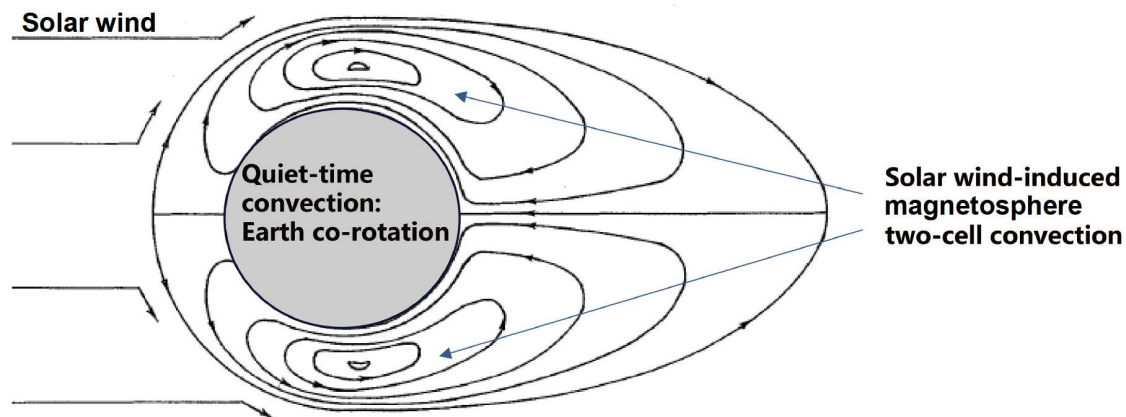


图1 磁层的对流系统在磁赤道面示意图(参考并改编自Axford和Hines, 1961)。图中箭头代表磁流体在赤道面的对流方向, 包含了太阳风驱动的大尺度双涡旋对流, 以及内磁层的随地球共转的对流

Figure 1 Schematic of magnetospheric convection in the magnetic equatorial plane. Adapted from Axford and Hines (1961). This illustration depicts the large-scale two-cell convection driven by solar wind-magnetosphere interaction, along with Earth's corotation-driven convection in the inner magnetosphere

离层中开闭磁力线边界向赤道移动, 导致中高纬电流系统整体向赤道移动. 另一方面, 从磁层内部视角, 增强的对流电场引发等离子体层剥蚀, 并通过对流驱动的环电流及场向电流影响至更低的L-shell(磁壳)区; 伴随场向电流, 极光相关的沉降电子也向低L-shell区域移动, 并通过磁力线映射影响电离层低纬区域.

一定程度上, 全球尺度的场向电流分布可作为极光活动位置的间接指征. 因此, 从磁层与电离层两个角度来看, 超强磁暴中的对流驱动的场向电流系统在电离层显著向赤道延伸, 是我国低纬度地区罕见极光现象背后可能的物理解释.

4 未来研究展望

从磁层对流演化的角度, 系统研究磁暴、亚暴及其相互关系, 可以概括为一个核心假说、三个科学问题和八个物理过程. 核心假说是: 太阳风通过驱动磁层对流, 进而扰动激发磁层电流体系, 最终引发磁暴和亚暴. 三个科学问题为: 亚暴相关的磁层对流及电流体系的关键特征、磁暴相关的磁层对流及电流体系的关键

特征, 以及磁暴对流与亚暴对流的关系. 围绕以上三个问题, 聚焦研究磁暴和亚暴所涉及的八个物理过程, 即: (1) 磁层对流和对流电场, (2) 日侧和夜侧磁层磁重联, (3) 1区和2区场向电流, (4) 越尾电流和磁场偶极化, (5) 亚暴电流, (6) 环电流, (7) 辐射带高能粒子, (8) 极光. 这一系统研究框架包含的磁暴-亚暴物理过程在图2中展示. 基于该框架, 本文对2024年5月超强磁暴事件进行了初步探讨. 强对流驱动下, 场向电流系统在磁层中显著向低L-shell区域迁移, 并在电离层中向赤道方向扩展, 这一过程可能构成我国多地出现罕见低纬极光的主要物理原因.

磁暴和亚暴的8个关键物理过程并非相互独立, 而是高度耦合的. 因此, 仅对单个过程进行孤立研究难以全面理解磁暴和亚暴的整体演化. 鉴于这些物理过程在不同程度上都与磁层对流密切相关, 磁层对流演化可为它们提供一个自然的统一框架, 使各个过程能够在跨区域耦合机制下被系统性研究. 未来研究可聚焦于这些物理过程之间的相互作用, 特别是在不同空间区域和尺度上的能量传输与相互影响. 在研究方法上,

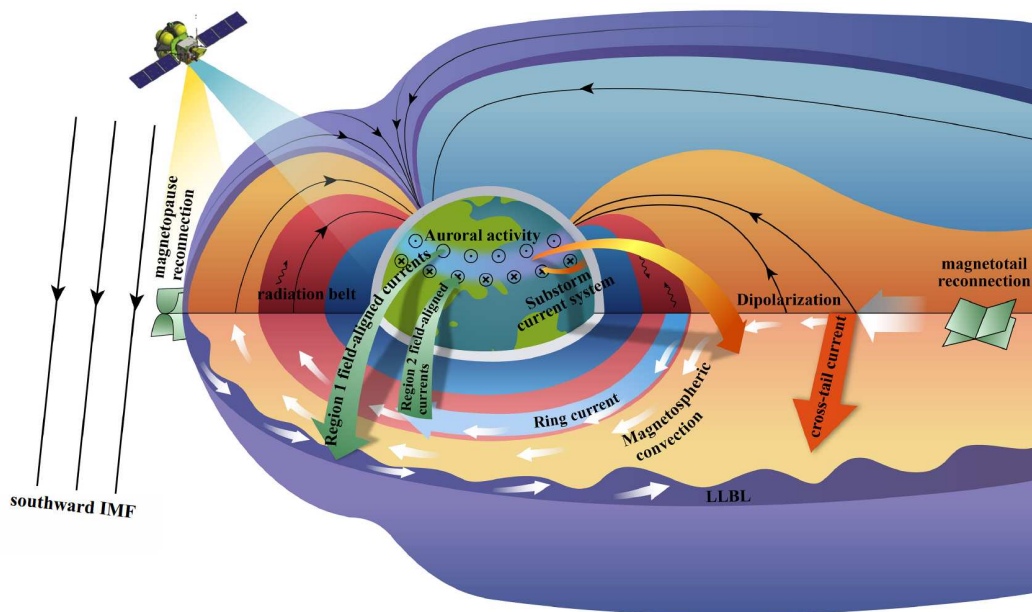


图2 太阳风驱动下磁暴-亚暴的典型物理过程及SMILE(Solar wind Magnetosphere Ionosphere Link Explorer)卫星观测示意图. 图中展示了太阳风驱动的磁重联、磁层对流、各种空间电流体系、极光活动以及能量粒子活动等. 同时示意了即将发射的SMILE卫星, 其目标是从全球视角捕捉太阳风-磁层-电离层之间的动态耦合过程, 推进磁暴-亚暴机制研究

Figure 2 Schematic illustration of solar wind-driven storm-substorm processes and the SMILE (Solar wind Magnetosphere Ionosphere Link Explorer) satellite. The diagram shows storm and substorm-related processes such as magnetic reconnection, magnetosphere convection, magnetospheric current systems, auroral activity, and energetic particle acceleration. Also illustrated is the upcoming SMILE satellite mission, designed to capture the dynamic coupling between the solar wind, magnetosphere, and ionosphere from a global perspective, aiming to advance our understanding of storm-substorm mechanisms

建议采用多任务、多点联合观测, 结合宏观成像(如极光成像和磁层X射线成像)与多点就地探测(如磁场、等离子体参数测量), 以捕捉磁暴和亚暴过程中不同区域的耦合特征. 在数值模拟方面, 可采用宏观尺度的磁流体力学(MHD)模拟与微观尺度的PIC(Particle-in-Cell)或弗拉索夫(Vlasov)模拟相结合的方法, 以兼顾大尺度电磁环境演化和微观粒子动力学过程. 此外, 未来研究应更加注重观测与模拟的紧密结合.

随着人工智能技术的进步, 利用AI工具从对流演化机制层面研究磁暴和亚暴, 是值得探索的方向. 初步研究思路可以是结合深度学习与物理模型, 通过数据驱动的方式提升对磁暴和亚暴事件中复杂物理现象的理解与预测能力. 具体而言, 深度学习技术可以从观测数据和模拟结果中提取特征, 捕捉对流过程中的动态变化模式. 在建模过程中, 必须确保深度学习模型的输出符合物理规律. 因此, 磁流体力学理论可以作为约束嵌入神经网络, 还可以加入弗拉索夫模型和PIC模型捕捉高能粒子和磁重联的过程, 通过调整损失函数来修正数据驱动模型可能出现的物理偏差. 对于数据稀疏或缺失的情况, 可以通过生成对抗网络(GAN)结合经验模型与MHD模型进行数据扩充, 增强模型对稀疏事件建模的鲁棒性. 最后, 通过注意力分析与消融实验提取关键变量, 量化不同驱动因素对模型预测的贡献, 进而揭示亚暴与磁暴之间的关系.

为实现这一系统研究目标, 依托空间科学的重大任务至关重要, 特别是宏观尺度的探测任务^[118]. 例如,

SMILE卫星专为研究太阳风与磁层相互作用而设计, 预计2025年发射, 是该领域的核心任务之一. SMILE卫星将搭载紫外极光成像仪(UVI), 在极轨大椭圆轨道上对极光椭圆区进行连续监测, 时间分辨率为1 min, 空间分辨率为20~80 km, 连续监测时间可达40 h. 这将极大促进我们对极光演化以及其源头磁层对流机制的理解. 此外, SMILE卫星还将搭载磁强计和离子探测器, 精准测量上游太阳风和磁鞘结构进入磁层的时间, 为太阳风、磁层和电离层的耦合提供重要数据输入. 软X射线成像仪将为磁层顶重联和大尺度结构的诊断提供有力支持, 从而为磁暴和亚暴机制的研究提供更加全面的视角.

另外, 鹊桥二号中继卫星也为本研究提供了重要的支持. 该卫星搭载的极紫外相机(EUC), 自发射以来已在轨工作并预计可维持8年的运行周期, 提供了对地球等离子体层的连续全景成像. EUC的连续成像时间达到18天, 时间分辨率为10 min, 将完整地捕捉太阳风事件到达地球后, 磁层对流的整体响应及其时空特性. 这为我们理解太阳风与磁层耦合的全局/区域物质和能量输运规律, 及其在地球空间天气预测中的应用具有极为重要的意义.

此外, 中国空间科学中长期规划中的“磁层多尺度星座计划”也将为系统研究提供有力支持^[119]. 该计划通过多卫星协同的多尺度就地观测, 能够实现对磁层对流的全方位检测, 为进一步研究磁暴和亚暴的对流演化提供直接测量数据.

参考文献

- 1 Wang C. Prospects of global space science breakthroughs and China's contributions (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2022, 37: 1050–1065 [王赤. 空间科学突破的前瞻和中国的贡献. 中国科学院院刊, 2022, 37: 1050–1065]
- 2 Cao J. Space Weather Research (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2005, 20: 277–282 [曹晋滨. 空间天气学研究进展. 中国科学院院刊, 2005, 20: 277–282]
- 3 Gonzalez W D, Joselyn J A, Kamide Y, et al. What is a geomagnetic storm? *J Geophys Res*, 1994, 99: 5771–5792
- 4 Wang Y M, Ye P Z, Wang S, et al. A statistical study on the geoeffectiveness of Earth-directed coronal mass ejections from March 1997 to December 2000. *J Geophys Res*, 2002, 107: 1340
- 5 Lei J, Wang W, Burns A G, et al. Observations and simulations of the ionospheric and thermospheric response to the December 2006 geomagnetic storm: initial phase. *J Geophys Res*, 2008, 113: 2007JA012807
- 6 Ohtani S, Nosé M, Rostoker G, et al. Storm-substorm relationship: contribution of the tail current to *Dst*. *J Geophys Res*, 2001, 106: 21199–21209
- 7 Dungey J W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones. *Phys Rev Lett*, 1961, 6: 47–48
- 8 Axford W I, Hines C O. A unifying theory of high-latitude geophysical phenomena and geomagnetic storms. *Can J Phys*, 1961, 39: 1433–1464
- 9 Bargatze L F, Baker D N, McPherron R L, et al. Magnetospheric impulse response for many levels of geomagnetic activity. *J Geophys Res*, 1985, 90: 6387–6394
- 10 He M, Vogt J, Lühr H, et al. Local time resolved dynamics of field-aligned currents and their response to solar wind variability. *JGR Space Phys*, 2014, 119: 5305–5315

- 11 Dai L, Han Y, Wang C, et al. Geoeffectiveness of interplanetary Alfvén waves. I. Magnetopause magnetic reconnection and directly driven substorms. *Astrophys J*, 2023, 945: 47
- 12 Dai L, Zhu M, Ren Y, et al. Global-scale magnetosphere convection driven by dayside magnetic reconnection. *Nat Commun*, 2024, 15: 639
- 13 Coroniti F V, Kennel C F. Can the ionosphere regulate magnetospheric convection? *J Geophys Res*, 1973, 78: 2837–2851
- 14 Zhu M, Dai L, Wang C, et al. The influence of ionospheric conductance on magnetospheric convection during the southward IMF. *JGR Space Phys*, 2024, 129: e2024JA032607
- 15 Sun T R, Wang C, Zhang J J, et al. The chain response of the magnetospheric and ground magnetic field to interplanetary shocks. *JGR Space Phys*, 2015, 120: 157–165
- 16 Sun T R, Wang C, Li H, et al. Nightside geosynchronous magnetic field response to interplanetary shocks: model results. *J Geophys Res*, 2011, 116: A04216
- 17 Sun T R, Wang C, Wang Y. Different B_z response regions in the nightside magnetosphere after the arrival of an interplanetary shock: Multipoint observations compared with MHD simulations. *J Geophys Res*, 2012, 117: 2011JA017303
- 18 Nishimura Y, Lyons L, Zou S, et al. Substorm triggering by new plasma intrusion: THEMIS all-sky imager observations. *J Geophys Res*, 2010, 115: 2009JA015166
- 19 Frey H U. Comment on “Substorm triggering by new plasma intrusion: THEMIS all-sky imager observations” by Y. Nishimura et al. *J Geophys Res*, 2010, 115: 2010JA016113
- 20 Zhang J, Lan A, Yan J, et al. Development of the chinese dual auroral radar network and preliminary results. *Space Weather*, 2024, 22: e2024SW004131
- 21 Li H, Wang C, Fu S Y. Classification of fast flows in central plasma sheet: superposed epoch analysis based on THEMIS observations. *JGR Space Phys*, 2014, 119: 7199–7213
- 22 He F, Zhang X, Chen B, et al. Moon-based EUV imaging of the Earth’s Plasmasphere: model simulations. *JGR Space Phys*, 2013, 118: 7085–7103
- 23 He F, Guo R L, Dunn W R, et al. Plasmopause surface wave oscillates the magnetosphere and diffuse aurora. *Nat Commun*, 2020, 11: 1668
- 24 Zhou Y, He F, Archer M O, et al. Spatial evolution characteristics of plasmopause surface wave during a geomagnetic storm on 16 July 2017. *Geophys Res Lett*, 2024, 51: e2024GL109371
- 25 Zhou Y, He F, Zhang X, et al. special particle precipitation signatures over giant auroral undulations during the 7 september 2015 geomagnetic storm. *Geophys Res Lett*, 2024, 51: e2024GL109849
- 26 He F, Zhang X, Chen B, et al. Determination of the Earth’s plasmopause location from the CE-3 EUVC images. *JGR Space Phys*, 2016, 121: 296–304
- 27 Wygant J, Rowland D, Singer H J, et al. Experimental evidence on the role of the large spatial scale electric field in creating the ring current. *J Geophys Res*, 1998, 103: 29527–29544
- 28 Ebihara Y. Numerical simulation of the ring current: review. *Space Sci Rev*, 2003, 105: 377–452
- 29 Kamide Y, Kokubun S. Two-component auroral electrojet: importance for substorm studies. *J Geophys Res*, 1996, 101: 13027–13046
- 30 Vasyliunas V M. Mathematical models of magnetospheric convection and its coupling to the ionosphere. In: McCormac B M. ed. *Particles and Fields in the Magnetosphere*. Dordrecht: Springer, 1970. 60–71
- 31 Wang S, Kistler L M, Mouikis C G, et al. Dependence of the dayside magnetopause reconnection rate on local conditions. *JGR Space Phys*, 2015, 120: 6386–6408
- 32 Trattner K J, Mulcock J S, Petrinc S M, et al. Location of the reconnection line at the magnetopause during southward IMF conditions. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L03108
- 33 Zhang B, Brambles O J, Cassak P A, et al. Transition from global to local control of dayside reconnection from ionospheric-sourced mass loading. *JGR Space Phys*, 2017, 122: 9474–9488
- 34 Lu S, Lin Y, Angelopoulos V, et al. Hall effect control of magnetotail dawn-dusk asymmetry: a three-dimensional global hybrid simulation. *JGR Space Phys*, 2016, 121: 11882–11895
- 35 Yang Z W, Jarvinen R K, Guo X C, et al. Deformations at Earth’s dayside magnetopause during quasi-radial IMF conditions: global kinetic simulations and Soft X-ray Imaging. *Earth Planet Phys*, 2024, 8: 59–69
- 36 Han Y, Dai L, Ren Y, et al. Correlations of plasma properties between the upstream magnetosheath and the downstream outflow region of magnetopause reconnection. *JGR Space Phys*, 2024, 129: e2024JA032817
- 37 Deng X H, Matsumoto H. Rapid magnetic reconnection in the Earth’s magnetosphere mediated by whistler waves. *Nature*, 2001, 410: 557–560
- 38 Lu Q, Fu H, Wang R, et al. Collisionless magnetic reconnection in the magnetosphere. *Chin Phys B*, 2022, 31: 089401
- 39 Zhou M, Zhong Z, Deng X. Kinetic properties of collisionless magnetic reconnection in space plasma: *in situ* observations. *Rev Mod Plasma Phys*, 2022, 6: 15

- 40 Wang R, Lu S, Wang S, et al. Recent progress on magnetic reconnection by *in situ* measurements. [Rev Mod Plasma Phys](#), 2023, 7: 27
- 41 Wang S, Chen L, Hesse M, et al. Ion demagnetization in the magnetopause current layer observed by MMS. [Geophys Res Lett](#), 2016, 43: 4850–4857
- 42 Dai L. Collisionless magnetic reconnection via Alfvén eigenmodes. [Phys Rev Lett](#), 2009, 102: 245003
- 43 Dai L, Wang C, Zhang Y, et al. Kinetic Alfvén wave explanation of the Hall fields in magnetic reconnection. [Geophys Res Lett](#), 2017, 44: 634–640
- 44 Dai L, Wang C, Lavraud B. Kinetic imprints of ion acceleration in collisionless magnetic reconnection. [Astrophys J](#), 2021, 919: 15
- 45 Duan S P, Dai L, Wang C, et al. Evidence of kinetic Alfvén eigenmode in the near-Earth magnetotail during substorm expansion phase. [JGR Space Phys](#), 2016, 121: 4316–4330
- 46 Huang H, Yu Y, Dai L, et al. Kinetic Alfvén waves excited in two-dimensional magnetic reconnection. [JGR Space Phys](#), 2018, 123: 6655–6669
- 47 Khotyaintsev Y V, Graham D B, Norgren C, et al. Collisionless magnetic reconnection and waves: progress review. [Front Astron Space Sci](#), 2019, 6: 1–20
- 48 Wang S, Chen L, Hesse M, et al. Parallel electron heating in the magnetospheric inflow region. [Geophys Res Lett](#), 2017, 44: 4384–4392
- 49 Wang S, Graham D B, An X, et al. Electrostatic waves around a magnetopause reconnection secondary electron diffusion region modulated by whistler and lower-hybrid waves. [Geophys Res Lett](#), 2023, 50: e2023GL104905
- 50 Ren Y, Dai L, Li W, et al. Whistler waves driven by field-aligned streaming electrons in the near-earth magnetotail reconnection. [Geophys Res Lett](#), 2019, 46: 5045–5054
- 51 Ren Y, Dai L, Wang C, et al. Statistical characteristics in the spectrum of whistler waves near the diffusion region of dayside magnetopause reconnection. [Geophys Res Lett](#), 2021, 48: e2020GL090816
- 52 Ren Y, Dai L, Wang C, et al. Parallel electron heating through landau resonance with lower hybrid waves at the edge of reconnection ion jets. [Astrophys J](#), 2022, 928: 5
- 53 Ren Y, Dai L, Wang C, et al. Capsule electron distributions near the diffusion region of magnetic reconnection. [Geophys Res Lett](#), 2024, 51: e2024GL112074
- 54 Angelopoulos V, Baumjohann W, Kennel C F, et al. Bursty bulk flows in the inner central plasma sheet. [J Geophys Res](#), 1992, 97: 4027–4039
- 55 Cao J B, Ma Y D, Parks G, et al. Joint observations by Cluster satellites of bursty bulk flows in the magnetotail. [J Geophys Res](#), 2006, 111: 2005JA011322
- 56 Duan S, Dai L, Wang C, et al. Conjunction observations of energetic oxygen ions O^+ accumulated in the sequential flux ropes in the high-altitude cusp. [JGR Space Phys](#), 2019, 124: 7912–7922
- 57 Duan S, Dai L, Wang C, et al. Cluster observations of unusually high concentration of energetic O^+ carried by flux ropes in the nightside high-latitude magnetosheath during a storm initial phase. [JGR Space Phys](#), 2015, 120: 8317–8326
- 58 Hou Y T, Duan S P, Dai L, et al. Evidence of guide field magnetic reconnection in flapping current sheets. [Earth Planet Phys](#), 2024, 8: 650–658
- 59 Zhang Y C, Shen C, Liu Z X, et al. Magnetopause response to variations in the solar wind: conjunction observations between Cluster, TC-1, and SuperDARN. [J Geophys Res](#), 2011, 116: A08209
- 60 Zhang Y C. Distinct characteristics of asymmetric magnetic reconnections: observational results from the exhaust region at the dayside magnetopause. [Sci Rep](#), 2016, 6: 27592
- 61 Zhang Y C, Shen C, Liu Z X, et al. Two different types of plasmoids in the plasma sheet: cluster multisatellite analysis application. [JGR Space Phys](#), 2013, 118: 5437–5444
- 62 Iijima T, Potemra T A. The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by Triad. [J Geophys Res](#), 1976, 81: 2165–2174
- 63 Iijima T, Potemra T A. Large-scale characteristics of field-aligned currents associated with substorms. [J Geophys Res](#), 1978, 83: 599–615
- 64 Guo X C, Wang C, Hu Y Q, et al. Bow shock contributions to region 1 field-aligned current: a new result from global MHD simulations. [Geophys Res Lett](#), 2008, 35: L03108
- 65 Gjerloev J W, Ohtani S, Iijima T, et al. Characteristics of the terrestrial field-aligned current system. [Ann Geophys](#), 2011, 29: 1713–1729
- 66 He M, Vogt J, Lühr H, et al. A high-resolution model of field-aligned currents through empirical orthogonal functions analysis (MFACE). [Geophys Res Lett](#), 2012, 39: L18105
- 67 Yu Y, Ridley A J. The response of the magnetosphere-ionosphere system to a sudden dynamic pressure enhancement under southward IMF conditions. [Ann Geophys](#), 2009, 27: 4391–4407
- 68 Yu Y, Cao J, Fu H, et al. The effects of bursty bulk flows on global-scale current systems. [JGR Space Phys](#), 2017, 122: 6139–6149
- 69 Fu H S, Khotyaintsev Y V, Vaivads A, et al. Occurrence rate of earthward-propagating dipolarization fronts. [Geophys Res Lett](#), 2012, 39: 2012GL051784
- 70 Fu H S, Khotyaintsev Y V, Vaivads A, et al. Electric structure of dipolarization front at sub-proton scale. [Geophys Res Lett](#), 2012, 39:

2012GL051274

- 71 Fu H S, Cao J B, Cully C M, et al. Whistler-mode waves inside flux pileup region: structured or unstructured? *JGR Space Phys*, 2014, 119: 9089–9100
- 72 Nakamura R, Baumjohann W, Panov E, et al. Flux transport, dipolarization, and current sheet evolution during a double-onset substorm. *J Geophys Res*, 2011, 116: Flux transport, dipolarization, and current sheet evolution during a double-onset substorm
- 73 Duan S, Dai L, Wang C, et al. Oxygen ions O^+ energized by kinetic alfvén eigenmode during dipolarizations of intense substorms. *JGR Space Phys*, 2017, 122: 11256
- 74 McPherron R L, Russell C T, Aubry M P. Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968: 9. Phenomenological model for substorms. *J Geophys Res*, 1973, 78: 3131–3149
- 75 Tang B B, Wang C. Large scale current systems developed from substorm onset: global MHD results. *Sci China Technol Sci*, 2018, 61: 389–396
- 76 Li H, Wang C, Peng Z. Solar wind impacts on growth phase duration and substorm intensity: a statistical approach. *JGR Space Phys*, 2013, 118: 4270–4278
- 77 Fu H, Yue C, Zong Q, et al. Statistical characteristics of substorms with different intensity. *JGR Space Phys*, 2021, 126: e2021JA029318
- 78 Jordanova V K, Thorne R M, Farrugia C J, et al. Ring current dynamics during the 13–18 July 2000 storm period. *Sol Phys*, 2001, 204: 361–375
- 79 Li H, Wang C, Kan J R. Contribution of the partial ring current to the SYMH index during magnetic storms. *J Geophys Res*, 2011, 116: A11222
- 80 Yue C, Bortnik J, Li W, et al. The composition of plasma inside geostationary orbit based on Van Allen probes observations. *JGR Space Phys*, 2018, 123: 6478–6493
- 81 Yue C, Bortnik J, Li W, et al. Oxygen ion dynamics in the Earth’s ring current: Van Allen probes observations. *JGR Space Phys*, 2019, 124: 7786–7798
- 82 Zhuang Y, Yue C, Zong Q, et al. The effect of energetic ion dispersionless injections on the ring current dynamics. *JGR Space Phys*, 2023, 128: e2022JA030914
- 83 Fu H, Yue C, Zong Q, et al. Substorm influences on plasma pressure and current densities inside the geosynchronous orbit. *JGR Space Phys*, 2023, 128: e2022JA031099
- 84 He Z H, Chen T, Liu Z X, et al. Spectral characteristics of the plasma dispersionless injection during the storm recovery phase on 11 March 1998. *J Geophys Res*, 2012, 117: 2012JA017760
- 85 He Z, Dai L, Wang C, et al. Contributions of substorm injections to *SYM-H* depressions in the main phase of storms. *JGR Space Phys*, 2016, 121: 11729–11736
- 86 He Z, Dai L, Wang C, et al. Characteristics of isolated and storm-time ion injections. *JGR Space Phys*, 2023, 128: e2022JA030745
- 87 Baker D N, Pulkkinen T I, Li X, et al. A strong CME-related magnetic cloud interaction with the Earth’s Magnetosphere: iSTP observations of rapid relativistic electron acceleration on May 15, 1997. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 2975–2978
- 88 Yang X C, Wang S J. Observation results of relativistic electrons detected by Fengyun-1 satellite and analysis of relativistic electron enhancement (REE) events. *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2008, 51: 1947–1956
- 89 Yang X C, Zhu G W, Zhang X X, et al. An unusual long-lived relativistic electron enhancement event excited by sequential CMEs. *JGR Space Phys*, 2014, 119: 9038–9050
- 90 Yang X, Ni B, Yu J, et al. Unusual refilling of the slot region between the Van Allen radiation belts from November 2004 to January 2005. *JGR Space Phys*, 2017, 122: 6255–6270
- 91 Ni B, Zou Z, Gu X, et al. Variability of the pitch angle distribution of radiation belt ultrarelativistic electrons during and following intense geomagnetic storms: Van Allen probes observations. *JGR Space Phys*, 2015, 120: 4863–4876
- 92 Horne R B, Thorne R M, Glauert S A, et al. Timescale for radiation belt electron acceleration by whistler mode chorus waves. *J Geophys Res*, 2005, 110: 2004JA010811
- 93 Xiao F, Su Z, Zheng H, et al. Modeling of outer radiation belt electrons by multidimensional diffusion process. *J Geophys Res*, 2009, 114: 2008JA013580
- 94 Rodger C J, Cresswell-Moorcock K, Clilverd M A. Nature’s Grand Experiment: linkage between magnetospheric convection and the radiation belts. *JGR Space Phys*, 2016, 121: 171–189
- 95 Zong Q, Zhou X, Wang Y F, et al. Energetic electron response to ULF waves induced by interplanetary shocks in the outer radiation belt. *J Geophys Res*, 2009, 114: 2009JA014393
- 96 Dai L, Wygant J R, Cattell C A, et al. Evidence for injection of relativistic electrons into the Earth’s outer radiation belt via intense substorm electric fields. *Geophys Res Lett*, 2014, 41: 1133–1141
- 97 Dai L, Wang C, Duan S, et al. Near-Earth injection of MeV electrons associated with intense dipolarization electric fields: van Allen Probes observations. *Geophys Res Lett*, 2015, 42: 6170–6179
- 98 Kim H, Lee D, Wolf R, et al. Rapid injections of MeV electrons and extremely fast step-like outer radiation belt enhancements. *geophys res lett*,

- 2021, 48: e2021gl093151
- 99 Xiong S, Dai L, Wang C, et al. Relativistic electron enhancements through successive dipolarizations during a CIR-driven storm. *JGR Space Phys*, 2022, 127: e2021JA030088
 - 100 Reeves G D, McAdams K L, Friedel R H W, et al. Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1529
 - 101 Wang X, Dai L, Yong R, et al. The evolution of Earth's outer radiation belt over geomagnetic storm phase in Van Allen probe era. *JGR Space Phys*, 2024, 129: e2024JA032674
 - 102 Xiong S, Dai L, Wang X, et al. Rapid relativistic electron enhancements during Van Allen probes era. *JGR Space Phys*, 2024, 129: e2024JA032618
 - 103 Xiong S, Dai L, Wang C, et al. Rapid relativistic electron enhancements and associated particle injections: a multi-spacecraft statistical study. *JGR Space Phys*, 2024, 129: e2023JA032095
 - 104 Kim H, Chan A A. Fully adiabatic changes in storm time relativistic electron fluxes. *J Geophys Res*, 1997, 102: 22107–22116
 - 105 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. *JGR Space Phys*, 2018, 123: 4895–4907
 - 106 Wang X, Tang C, Ni 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. *JGR Space Phys*, 2023, 128: e2023JA031284
 - 107 Tang C L, Su Z P, Ni B B, et al. The effects of geomagnetic activities on acceleration regions of radiation belt electrons. *JGR Space Phys*, 2023, 128: e2022JA031229
 - 108 Chen J, Tang X, Chu X, et al. A statistical study on the acceleration conditions of ultrarelativistic electrons in the Earth's outer radiation belt during geomagnetic storm. *J Geophys Res-Space phys*, 2013, 128: e2023JA032024
 - 109 Yin Z, Zhou X, Zong Q, et al. Inner magnetospheric magnetic dips and energetic protons trapped therein: multi-spacecraft observations and simulations. *Geophys Res Lett*, 2021, 48: e2021GL092567
 - 110 Yin Z, Zhou X, Hu Z, et al. Localized excitation of electromagnetic ion cyclotron waves from anisotropic protons filtered by magnetic dips. *JGR Space Phys*, 2022, 127: e2022JA030531
 - 111 Liu J J, Hu H Q, Han D S, et al. Response nightside aurora to interplanetary shock from ground optical observation (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2013, 56: 1785–1796 [刘建军, 胡红桥, 韩德胜, 等. 地基观测的夜侧极光对行星际激波的响应. *地球物理学报*, 2013, 56: 1785–1796]
 - 112 Liu J J, Chen X C, Wang Z Q, et al. Effect of interplanetary shock on an ongoing substorm: simultaneous satellite-ground auroral observations. *Sci China Technol Sci*, 2023, 66: 654–662
 - 113 Kamide Y, Baumjohann W, Daglis I A, et al. Current understanding of magnetic storms: storm-substorm relationships. *J Geophys Res*, 1998, 103: 17705–17728
 - 114 Ohtani S. New insights from the 2003 Halloween storm into the colaba 1600 nT magnetic depression during the 1859 Carrington storm. *JGR Space Phys*, 2022, 127: e2022JA030596
 - 115 Parker E N. *Spontaneous Current Sheets in Magnetic Fields: With Applications to Stellar X-rays*. Oxford: Oxford University Press, 1994
 - 116 Bartels J. The standardized index, Ks, and the planetary index, Kp. *IATME Bull*, 1949, 12b: 97–2010
 - 117 Thomsen M F. Why Kp is such a good measure of magnetospheric convection. *Space Weather*, 2004, 2: S11004
 - 118 Wang C, Branduardi-Raymont G, Escoubet C P, et al. Solar wind Magnetosphere Ionosphere Link Explorer (SMILE): science and mission overview. *Space Sci Rev*, 2025, 221: 9
 - 119 Dai L, Wang C, Cai Z, et al. AME: a cross-scale constellation of cubesats to explore magnetic reconnection in the solar–terrestrial relation. *Front Phys*, 2020, 8: 89

Summary for “磁暴和亚暴研究进展与展望”

Geomagnetic storms and substorms: progress and perspectives

Lei Dai^{1*}, Chi Wang¹, Yong Ren¹, Minghui Zhu¹, Xu Wang¹, Tonghui Wang¹, Kailai Wang¹, Suping Duan¹, Xiaochao Yang¹, Yongcun Zhang¹, Zhaohai He¹, Xiaocheng Guo¹, Hui Li¹, Binbin Tang¹, Tiannan Sun¹, Jiaojiao Zhang¹, Zhongwei Yang¹, Maosheng He¹, Huishan Fu², Yiqun Yu², Xuzhi Zhou³, Chao Yue³, Shan Wang³, Fei He⁴, Xin Tao⁵, Chaoling Tang⁶ & Jianjun Liu⁷

¹ State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

² School of Space and Earth Science, Beihang University, Beijing 100191, China

³ School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

⁴ Center for Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

⁵ School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

⁶ School of Space Science and Physics, Shandong University, Weihai 264209, China

⁷ Polar Space Physics and Astronomy Division, Chinese Polar Research Institute, Shanghai 200136, China

* Corresponding author, E-mail: ldai@spaceweather.ac.cn

On 10 May 2024, near-Earth space experienced the most intense geomagnetic storm in nearly two decades, accompanied by extreme substorms and rare low-latitude auroral displays observed in regions such as Beijing and Altay. Geomagnetic storms and substorms are explosive manifestations of solar wind–magnetosphere coupling and are key drivers of space weather. Understanding these phenomena remains a fundamental challenge for space weather forecasting. This article reviews recent progress in storm–substorm research, focusing on internal processes of storm–substorm such as magnetospheric convection, magnetic reconnection, electric current systems, auroras, and energetic particles. Despite significant progress, the way these physical processes are connected across different regions—and the intrinsic relationship between storms and substorms—remains unclear.

Inspired by Earth system analogies, such as mantle convection driving plate movement and atmospheric convection causing extreme weather, we propose a new conceptual framework centered on the evolution of magnetospheric convection for future studies of storm–substorms. The core hypothesis is that magnetospheric convection, through the motion of frozen-in magnetic field lines, reorganizes large-scale current systems and ultimately governs the development of storms and substorms. This main hypothesis is mainly motivated by following considerations. From the perspective of magnetohydrodynamics (MHD), magnetic field lines and plasma are frozen together and convect as a single entity on macroscopic scales, with only a few exceptions at small scales, e.g., diffusion region of magnetic reconnection. As a result, convection inherently drives the global-scale evolution of magnetic field lines. Within the MHD framework, convection is the primary mechanism capable of restructuring magnetic fields, forming thin current sheets, and building up current systems in the magnetosphere. This can occur directly through the stretching of field lines, or indirectly through the injection of energetic particles that enhance current intensity. The framework in which magnetospheric convection drives the space current system is broadly consistent with existing observations and theoretical models. For example, both cross-tail currents and ring currents—key components of substorm and storm current systems—are influenced by magnetospheric convection. This perspective offers a possible way to connect various physical processes involved in storms and substorms, helping to reveal the relation between them within a unified framework.

Based on this framework, we outline three key scientific questions: (1) how does magnetospheric convection evolve during substorms, and how do the electric current systems respond? (2) What happens to magnetospheric convection and the corresponding current system during storms? (3) What is the intrinsic link between storm-time and substorm-time convection? This framework can be summarized as “one core hypothesis, three key scientific questions, and eight physical processes of storm–substorm”. As an initial application of this framework, we discuss the possible cause of the unusual low-latitude auroras during the May 2024 storm, suggesting that they may result from extreme magnetospheric convection driving large-scale field-aligned currents that expand equatorward in the ionosphere. From the perspective of storm-time convection, the significant equatorward expansion of the auroral oval during the extreme May 2024 geomagnetic storm reflects an overall intensification of magnetospheric convection and its deeper penetration into the inner magnetosphere. Within the magnetosphere, the enhanced convection electric field leads to plasmasphere erosion and drives field-aligned currents deeper into lower L-shell regions. From the ionospheric viewpoint, continuous dayside magnetic reconnection opens previously closed magnetic field lines, pushing the open-closed boundary equatorward. This process causes the entire high-latitude current system to shift toward lower latitudes. Accompanied by these field-aligned currents, aurora-related precipitating electrons also reach lower L-shells, and through magnetic field line mapping, affect the low-latitude ionosphere.

Comprehensive studies on the storm and substorm from perspectives of magnetospheric convection are still in an early stage. Forthcoming missions like SMILE (Solar-wind-Magnetosphere-ionosphere Link Explorer) and future multi-scale magnetosphere CubeSat constellation missions like AME (self-Adaptive Multi-scale magnetosphere cubeSat constellation) will provide valuable observations to test this framework. These will help us improve our understanding of how storm and substorm develop.

magnetic storm, substorm, solar wind-magnetosphere interactions, magnetosphere convection, SMILE mission, AME mission

doi: [10.1360/CSB-2025-0235](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0235)