

木星磁盘磁重联产生的涟漪状电流片

郭瑞龙^{1*}, 赵金燕¹, 肖雨辰¹, Denis GRODENT², 尧中华³, Bertrand BONFOND², 史全岐¹

1. 山东省太空环境与探测技术重点实验室, 山东大学空间科学研究院, 山东大学空间科学与技术学院, 威海 264209

2. Laboratory for Planetary and Atmospheric Physics, Space Science, Technologies and Astrophysical Research Institute, University of Liège, Liège B-4000, Belgium

3. 香港大学地球与行星科学系, 香港 999077

* 通讯作者, E-mail: grl@sdu.edu.cn

2025-09-19收稿, 2025-12-29修回, 2026-02-06接受, 2026-08-05网络版发表

国家自然科学基金项目(W2421025、42274220、42374212)和山东省自然科学基金项目(ZR2023JQ016)资助

摘要 木星磁盘偏离木星地理赤道平面, 其分布区域靠近磁赤道。磁盘的位置与运动是研究磁层动力学及其与电离层耦合关系的关键因素。磁盘的主要运动形式表现为与木星一起旋转, 而木星倾斜的磁偶极轴绕行星自转轴转动。此外, 磁盘中还观测到小尺度的摆动运动, 但其形成机制尚不明确。本研究发现, 当磁重联发生时, 磁盘电流片在穿越航天器时会呈现出类似扭折波的形态。在一个旋转周期内, 航天器能够多次穿越电流片, 并记录到多个磁重联信号。这些观测结果表明, 多磁重联点破坏了磁盘的磁力线, 导致电流片形成类似涟漪状的结构, 并与磁层同步旋转。

关键词 木星, 磁盘, 磁重联, 电流片, 磁层

1 引言

在磁层中, 由于太阳风的压缩作用, 在磁层顶和磁尾处会形成电流片。木星因其快速自转, 以及木卫一火山喷发在内磁层释放的粒子源, 在磁层内形成了环绕行星的环电流片——即磁盘。在离心力、磁应力、热压与太阳风压缩等作用下, 该环电流片所在的纬度随径向距离变化(Khurana和Kivelson, 1989; Khurana和Schwarzl, 2005; Arridge和Martin, 2018)。磁盘与磁赤道以类似铰链的形式相连, 这使得在木星磁层旋转时, 磁赤道与电流片之间会产生相位延迟(Khurana和Kivelson, 1989)。在约10小时的自转周期内, 磁盘的摇摆运动使位于赤道附近的航天器能够穿越电流片两次。

除了旋转引发的摇摆形式的摆动(flapping)运动外, 磁盘还会呈现约10分钟周期的短时摆动特征(Russell等, 1999; Arridge和Martin, 2018)。木星磁层中观测到的摆动特征通常表现为磁场径向分量 B_r 的准周期性变化。这种摆动特征可能源于垂直于电流片方向的非传播的上下

运动, 也可能是类似表面波的可沿电流片传播的扭折(kink)运动。这两种运动在地球、水星和火星磁尾中都被研究过(Rong等, 2010; Zhang等, 2020, 2023)。磁重联会扰动电流片, 导致运动从磁尾中心向两侧传播(Gao等, 2018; Palmroth等, 2023)。然而, 木星磁盘摆动特征的产生机制尚未完全明确。

电流片的运动与其释放能量的动力学过程密切相关。磁盘电流片位置的变化还会影响木星磁层与电离层之间的耦合过程。磁盘内的热等离子体注入、磁重联等动力学现象, 可在木星所有地方时(Local time, LT)被观测到(Mauk等, 1999; Dumont等, 2014; Chen等, 2024; Zhao等, 2024)。磁重联对于磁盘动力学过程至关重要(Vasyliunas, 1983; Vogt等, 2010; Kronberg等, 2012), 可呈现‘细雨’状特征(Bagenal, 2007; Delamere等, 2015; Guo等, 2019)。磁盘内多个磁重联点离散地分布在全地方时, 并随土星和木星的磁层共同旋转(Guo等, 2018a, 2018b, 2019; Yao等, 2017, 2018, 2024; Zhao等, 2024)。高能粒子在环电流片上也呈现出离散分布结

中文引用格式: 郭瑞龙, 赵金燕, 肖雨辰, Grodent D, 尧中华, Bonfond B, 史全岐. 2026. 木星磁盘磁重联产生的涟漪状电流片. 中国科学: 地球科学, 56(10): 3648–3654, doi: 10.1360/N072025-0549

英文引用格式: Guo R, Zhao J, Xiao Y, Grodent D, Yao Z, Bonfond B, Shi Q. 2026. Rippling current sheet generated by magnetodisk reconnection on Jupiter. Science China Earth Sciences, 69(10): 3619–3625, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1870-9>

构, 从而在土星形成多场向电流系统和斑状极光, 且这些现象均同步旋转(Guo等, 2021a)。这些多重结构同样可能出现在木星, 并与磁重联现象密切相关(Guo等, 2021b)。多个磁重联点会在不同地方时扰动电流片(Guo等, 2019; Guo和Yao, 2024), 使电流片的运动变得复杂。

本研究聚焦于磁盘事件(如磁重联)对木星磁盘电流片的调制作用。基于朱诺号(Juno)航天器的观测数据, 我们识别出航天器多次穿越电流片时的磁重联特征, 并证实磁盘电流片会因离散分布的小尺度磁盘磁重联过程形成涟漪状结构。

2 数据与方法

在本研究中, 我们使用了来自朱诺号(Juno)磁场探测器(MAG, Magnetic Field investigation)(Connerney等, 2017)的磁场数据, 以及来自木星高能粒子探测器(JEDI, Jupiter Energetic-Particle Detector Instrument)的离子和电子能谱数据(Mauk等, 2017)。此外, 利用Khurana(1992)提出的基于伽利略号(Galileo)航天器数据的磁盘经验模型计算航天器相对于未受扰动的电流片的位置。本文使用的Rabia等(2023)开发的程序将JRM33内禀磁场模型(Connerney等, 2022)应用于Khurana模型中。本文中观测和模型得到的磁场均采用RTP(r - θ - ϕ)球坐标系。

在上下摆动过程中, 电流片法线方向几乎保持不变; 但对于扭折状运动, 电流片法线方向会发生摆动(Rong等, 2015)。为区分这两种电流片运动类型, 即垂直于电流片方向的非传播性上下摆动以及类似表面波的电流片扭折状运动, 我们采用最小方差分析(MVA, Minimum Variance Analysis)方法(Sonnerup和Scheible, 1998)计算电流片的法线方向。该方法基于磁场矢量数据的特性: 理论上, 垂直于电流片的磁场分量保持不变, 即法线方向的方差为最小值。从数学上讲, 寻找最小变化方向的问题可以转化为寻找矩阵 $M_{\mu\nu} = \langle B_\mu B_\nu \rangle - \langle B_\mu \rangle \langle B_\nu \rangle$ 的特征值和特征向量的问题, 其中下标 μ 和 ν 表示笛卡儿坐标中的 x 、 y 和 z 分量(Sonnerup和Scheible, 1998)。MVA方法给出三个特征向量, 即三个方向(L 、 M 、 N), 分别对应三个特征值 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$)。法线方向(N)对应最小特征值 λ_3 。如果各个特征值大小相近, 特征向量则无法准确表征电流片的特征方向。要获得较准确的法线方向, 比值 λ_2/λ_3 需远大于1。Lepping和Behannon(1980)提出, $\lambda_2/\lambda_3 \geq 1.8$ 这个比值下限可作为判定间断面法线方向的可用标准。在实际应用中, 比值 λ_2/λ_3 接近3的MVA结果常用于空间等离子体分析(如Sergeev等, 2006; Forsyth等,

2009; DiBraccio等, 2017; Poh等, 2020)。在本研究中, 我们列出了各个MVA结果对应的 λ_2/λ_3 比值, 并用不同颜色标注了 $\lambda_2/\lambda_3 < 3$ 的法线方向。

3 结果

在图1所示的事件中, 朱诺号记录到磁场 B_r 和 B_θ 分量的极性发生了变化(图1A), 这表明该航天器多次穿越了磁盘电流片。在此期间, 显著的负 B_θ 信号(图1B)表明磁盘中存在多个磁重联点。若磁层未受干扰, 朱诺号应两次穿越电流片, 也即从磁层南侧到北侧再返回南侧, 如图1C中Khurana的磁场模型结果所示。在 B_r 极性反转期间, 能量高达数千电子伏(keV)的电子和离子的通量保持在很高的水平(图1D和1E), 表明磁盘中充满了加速粒子。图1G展示了 Y - Z 平面内的电流片法线方向。指向相反 Y 方向的法线方向表明电流片在大多数穿越点处呈现扭折状运动。

在三个小时的时间内, 多次增强的负 B_θ 和正 B_θ 特征表明, 航天器频繁地多次穿越了与磁重联相关的结构(磁通量绳、等离子体团、偶极化锋面、扩散区等)(Chen等, 2008; Guo等, 2019; Zhong等, 2023)。由于磁层的旋转, 航天器会遇到不同的磁重联事件。如图1D和1E中高能电子和离子的高通量所示, 由于磁重联过程在随木星旋转的System III坐标系中广泛分布在约 100° 的经度范围内, 即使在电流片穿越事件之间的区域也能探测到高能带电粒子。第二次至第四次穿越的电流片显示出类似上下摆动的运动, 表明磁盘是高度动态变化的。

图2展示了另外两个分别发生在地方时LT=3和5.6的事件, 其电流片显示出类似扭折的运动。在多次穿越电流片过程中, 航天器记录到了磁重联的特征: 大的负 B_θ 值和增强的正 B_θ 值。图2A和2E上方绘制了 Y - Z 平面上的电流片法线方向, 它们普遍显示出扭折运动。扭折结构的时间尺度通常在1小时以内。最短的时间尺度仅为几分钟, 如图2A所示, 在16:00 UT到16:10 UT之间, 航天器在10分钟内四次穿越电流片。 B_r 分量的急剧变化表明电流片很薄, 这也是磁重联过程的典型特征。

在快速旋转的木星磁层中, 磁结构的运动应是磁层内部物质输运与磁层共转的共同作用结果。在地球磁层中, 电流片的扭折型运动表现为横跨磁尾传播的波动结构。对于木星而言, 必须考虑其自转运动的影响。这种类似扭折的运动可能与可传播的行波相关, 也可能是由旋转的涟漪状电流片产生, 或是两者的共同作用。图3展示了被磁重联过程扰动的电流片的形态特征: 电流片呈现涟漪状形态, 偏离未受扰动时的电流片中心位置, 但仍保持与磁赤道的平行趋势。由于航天器与磁层间的源

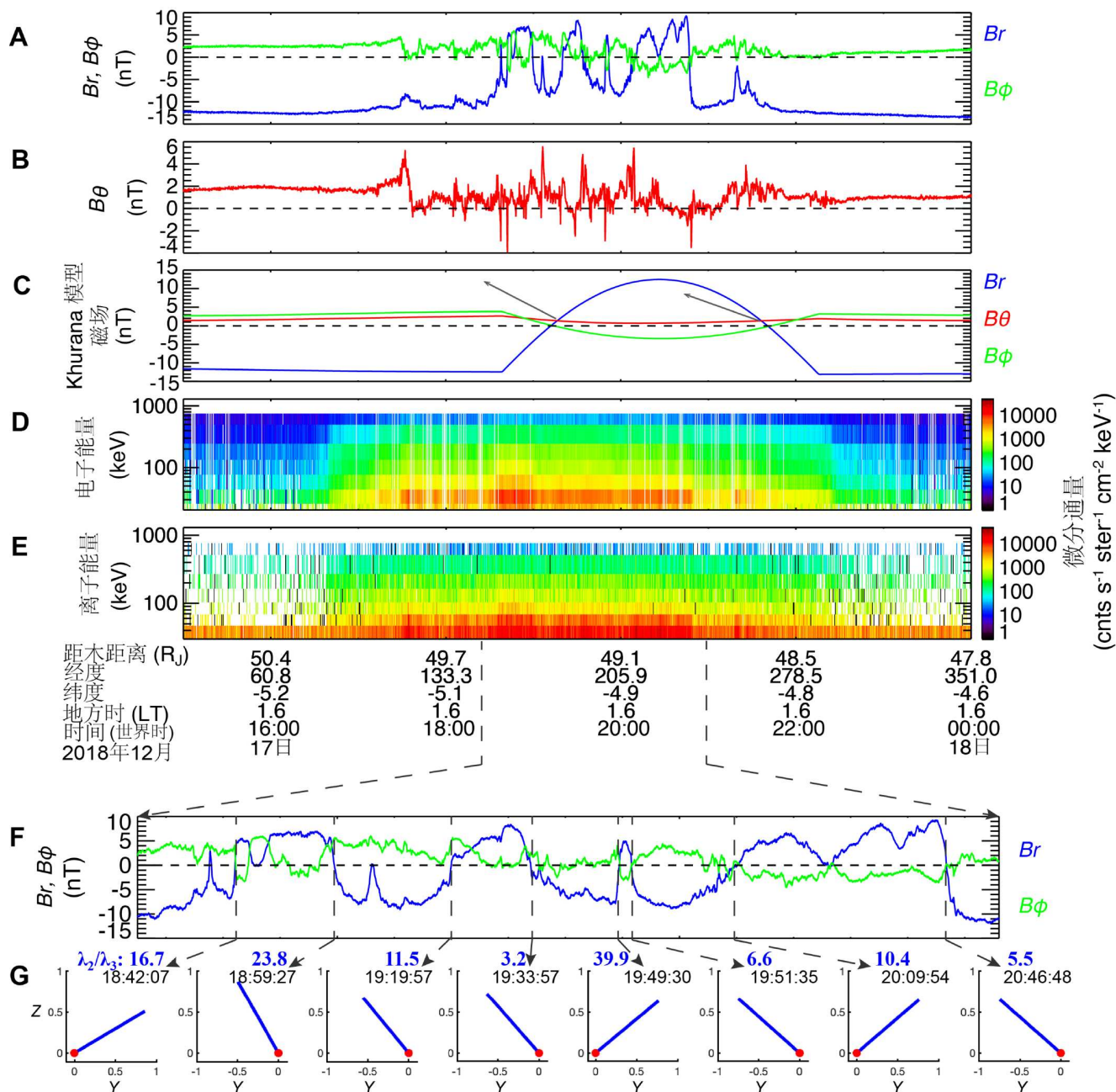


图1 朱诺号航天器记录到磁重联和多个电流片穿越过程。(A、B) RTP(r - θ - ϕ)球坐标系中磁场的 B_r 、 B_θ 和 B_ϕ 分量。(C) Khurana模型的磁场三分量。(D、E) JEDI仪器记录的和离子能谱。(F) 是(A)栏的放大图。(G) 使用MVA方法计算得到的在木星-消旋-太阳(Jupiter-De-Spun-Sun, JSS)坐标系中Y-Z平面上的电流片法线方向。JSS坐标系的Z轴与木星自转轴平行, X轴位于由Z轴和从木星指向太阳的向量定义的平面中, Y轴符合右手坐标系。每个子图顶部显示了法线方向对应的比值 λ_2/λ_3 。作为对比, 对Khurana模型磁场数据进行MVA分析确定的Y-Z平面上的法线方向在(C)栏中由灰色箭头标出

于自转的相对运动, 朱诺号航天器得以观测到 B_r 分量的多次反转。

涟漪状电流片的影响和特征也可以在传统的“尾瓣”(lobe)区观测到。图3B中的黄色虚线显示, 即使航天器距离未受扰动的电流片有一定距离, 当形成涟漪状结构时, 其运动轨迹可以接近电流片的中心。图4A显示了

当朱诺号航天器远离磁赤道时(可由图4C中Khurana模型给出的大 $|B_r|$ 值所预期得到), 仍可以接近电流片甚至穿过电流片中心。双极性的 B_θ 和负 B_θ 等磁重联特征(图4B)以及增强的高能粒子通量(图4D)出现在电流片附近。图4E-4L提供了另外两个事件, 航天器分别在大约11.4°和-34.4°的纬度区域接近电流片并探测到磁重联特征。在如

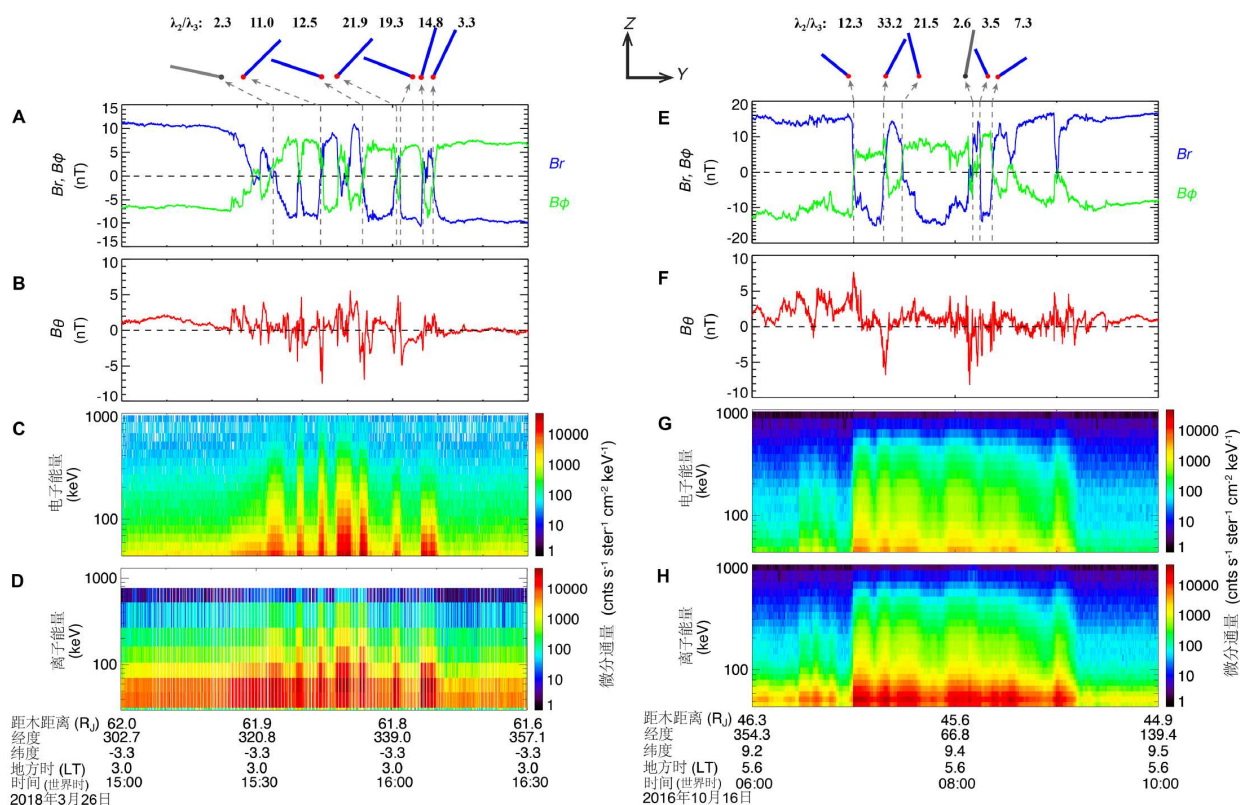


图2 子夜后和黎明区域的事件。(A、E) 磁场的 B_r 和 B_ϕ 分量。(B、F) 磁场的 B_θ 分量。(C、G) 电子能谱。(D、H) 离子能谱。电流片在Y-Z平面的法线方向绘制于(A)栏和(E)栏上方。每个法线方向的顶部标出了对应的 λ_2/λ_3 比值。灰色的两个法线方向对应 $\lambda_2/\lambda_3 < 3$ 的情况

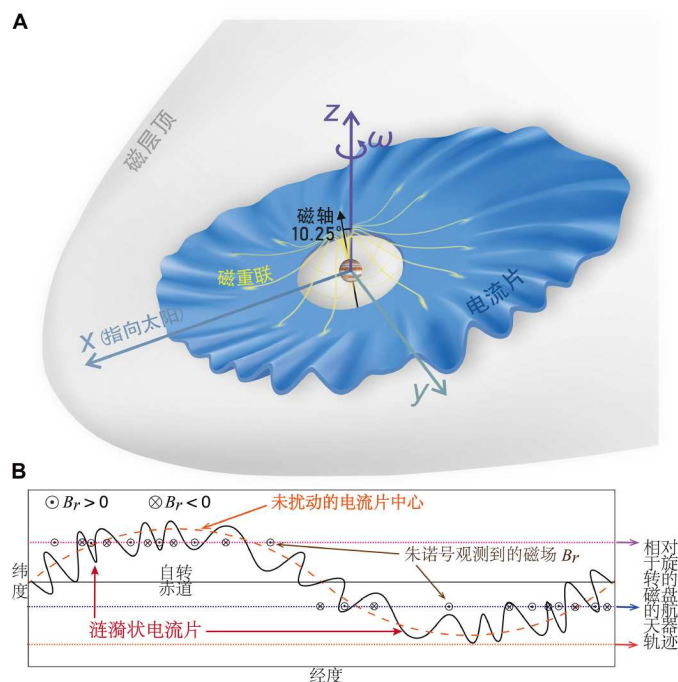


图3 磁盘电流片涟漪状结构示意图。(A) 蓝色表面展示了被磁重联扰动的磁盘电流片。蓝色表面的黄色斑点标出了磁重联区域。黄色曲线是连接磁重联与电离层的磁力线。(B) 黑色实线表示涟漪状电流片中心在System III坐标系中经纬度平面的位置。黄色虚线代表未受扰动电流片的中心，该中心靠近磁赤道。水平黑色线条表示木星的自转赤道。三条水平虚线给出了航天器相对于旋转磁盘电流片的三条运动轨迹。当航天器位于涟漪状结构上方/下方时，将记录正/负 B_r 值

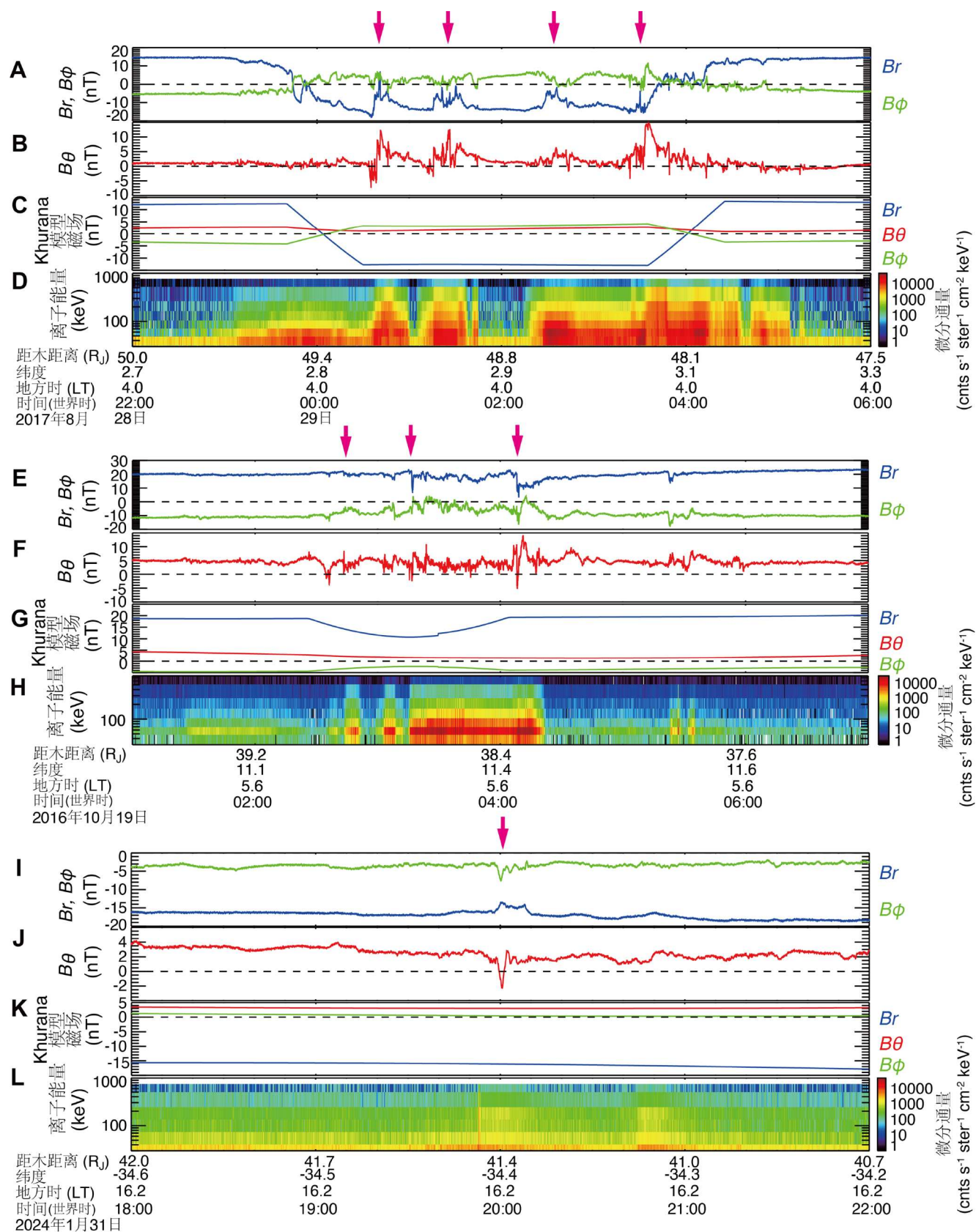


图4 “尾瓣”区域的事件。每个事件的四栏分别是 B_r 和 B_ϕ 、 B_θ 、Khurana模型中的三个磁场分量以及电子能谱。品红色箭头标记了链滴状电流片及其对应的磁重联特征

此高的纬度，航天器在磁层旋转过程中一直位于磁赤道之上(或之下)。 $|B_r|$ 的减少和高能粒子通量的增强表明电流片向航天器弯曲。此外，图4I–4L的事件表明，传统“尾瓣”区域中可观测到的涟漪状磁盘电流片和磁重联同样可以在日侧磁层中观测到。这一现象已被伽利略号航天器探测到，如Zhao等(2024)报道的事件3、4和12。

4 讨论与结论

涟漪状电流片揭示了磁层活动期间磁盘的高度结构化特征。在平静磁层状态下，磁盘电流片基本呈现出连接到磁赤道的平面形态，通常更靠近磁赤道而非自转赤道(Khurana和Kivelson, 1989)。磁重联过程会破坏磁力线，同时打破力平衡，导致电流片偏离原始位置，向磁赤道或自转赤道方向移动。图1和2显示被磁重联扰动的磁盘的位置可能比平静时期更接近自转赤道。图4的第二和第三个事件表明，电流片可以位于比磁赤道更高的纬度。当穿过电流片时，扭折运动与摆动运动共存，这可能是由于磁重联导致的磁力线断裂和高速等离子体流的共同作用造成的。

在地球空间，磁尾磁重联可在越尾电流片中产生扭折波，这些波沿晨昏方向从磁重联点向外传播(Palmroth等, 2023)。在本研究涉及的木星事例中，磁重联特征几乎出现在所有电流片穿越时间段中，表明这并非像地球那样简单的波动传输现象。此外，木星磁盘的扭折运动并不呈现准周期性特征，即两次电流片穿越的时间间隔从几分钟到半小时以上不等(见图1)。我们认为，观测到的扭折运动是旋转运动与涟漪状电流片结构共同作用的结果。这种涟漪状结构可能像地球上的扭折波那样可以传播，但也可能与相同地方时的磁重联点存在关联。土星磁盘中磁重联点可离散地分布于磁盘各个地方时(Guo等, 2019)，该现象亦可能出现在木星。多个磁盘磁重联区域成为扭折波的多重源。若每个磁重联点都能产生波动，这些波动将相互竞争，从而在局部影响电流片的形态，但很难主导涟漪状电流片的运动。

沿方位角方向分布的磁重联点不仅影响局部电流系统，还会共同影响它们之间的区域。例如，电流片的扰动会沿方位角方向传播至相邻的磁重联点。在两个磁重联点之间的电流片区域可能受到来自磁重联点的波动的影响。此外，磁重联线并不一定沿方位角方向延伸(Yao等, 2017)，因此重联出流并非完全沿径向，而是可能具有沿方位角方向的分量。因此，多个磁重联点对磁盘具有全局性的影响。在磁重联扰动的电流片中观测到的磁场表现出小尺度波动，这可能表明电流片已演化至类似湍动的状态，这种状态可能是由沿方位角方向分布的多

磁重联过程所导致的。如图1D和1E所示，这种类似湍动状态的电流片可能使得高能粒子填充整个电流片。

多磁盘磁重联与扰动电流片使得源自木卫一的粒子的传输不仅受离心力和热压主导，还受到磁重联加速过程的影响。与此同时，磁盘磁重联会向电流片注入高能粒子。这些高能粒子可能被注入至内磁层，或沿磁力线进入电离层产生极光。涟漪状电流片使电离层与磁盘的连接更为复杂。一个关键因素是磁重联线的长度及相邻磁重联点之间的间距。在图1B和2B中，磁重联信号仅相隔数分钟的短暂时间间隔，而且难以判断其中磁重联点的数量。由于航天器主要因磁层旋转而穿越磁盘，这些信号主要沿方位角方向分布，它们可能源自一条长磁重联线，或由多个紧密相邻的小尺度磁重联组成。我们也在图4B中看到了清晰分离的磁重联点(它们间隔约一小时)。磁重联线的长度及其演化仍是未解之谜，且在地球空间环境中研究它们颇具挑战性，但木星的快速自转为研究这一问题提供了良好的机会。

致谢 B. BONFOND是由比利时法语区科研基金会(Fonds de la Recherche Scientifique - FNRS)支持的研究助理。本研究中使用的数据来自美国国家航空航天局的行星数据系统网站，包括<https://pds-ppi.igpp.ucla.edu/search/view/?f=yes&id=pds://PPI/JNO-J-3-FGM-CAL-V1.0>(FGM仪器的磁场数据)和<https://pds-ppi.igpp.ucla.edu/search/view/?f=yes&id=pds://PPI/JNO-J-JED-3-CDR-V1.0>(JEDI仪器的粒子数据)。JRM33+KK2005木星磁场模式的Python程序可从<https://doi.org/10.5281/zenodo.10102741>获取。

参考文献

- Arridge C S, Martin C J. 2018. Current sheets at the giant planets. In: Keiling A, Marghito O, Wheatland M, eds. *Electric Currents in Geospace and Beyond*. Washington D. C.: American Geophysical Union. 191–205
- Bagenal F. 2007. The magnetosphere of Jupiter: Coupling the equator to the poles. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 69: 387–402
- Chen J, Zhang B, Delamere P A, et al. 2024. The dynamic response of Jovian magnetotail reconnection to enhanced solar wind ram pressure. *Astrophys J*, 969: 137
- Chen L J, Bhattacharjee A, Puhl-Quinn P A, et al. 2008. Observation of energetic electrons within magnetic islands. *Nat Phys*, 4: 19–23
- Connerney J E P, Benn M, Bjarno J B, et al. 2017. The Juno Magnetic Field investigation. *Space Sci Rev*, 213: 39–138
- Connerney J E P, Timmins S, Oliverson R J, et al. 2022. A new model of Jupiter's magnetic field at the completion of Juno's prime mission. *J Geophys Res-Planets*, 127: e2021JE007055
- Delamere P A, Otto A, Ma X, et al. 2015. Magnetic flux circulation in the rotationally driven giant magnetospheres. *J Geophys Res-Space Phys*, 120: 4229–4245
- DiBaccio G A, Dann J, Espley J R, et al. 2017. MAVEN observations of tail current sheet flapping at Mars. *J Geophys Res-Space Phys*, 122: 4308–

4324

- Dumont M, Grodent D, Radioti A, et al. 2014. Jupiter's equatorward auroral features: Possible signatures of magnetospheric injections. *J Geophys Res-Space Phys*, 119: 10068
- Forsyth C, Lester M, Fear R C, et al. 2009. Solar wind and substorm excitation of the wavy current sheet. *Ann Geophys*, 27: 2457–2474
- Gao J W, Rong Z J, Cai Y H, et al. 2018. The distribution of two flapping types of magnetotail current sheet: Implication for the flapping mechanism. *J Geophys Res-Space Phys*, 123: 7413–7423
- Guo R L, Yao Z H, Sergis N, et al. 2018a. Reconnection acceleration in Saturn's dayside magnetodisk: A multicase study with Cassini. *Astrophys J Lett*, 868: L23
- Guo R L, Yao Z H, Wei Y, et al. 2018b. Rotationally driven magnetic reconnection in Saturn's dayside. *Nat Astron*, 2: 640–645
- Guo R L, Yao Z H, Sergis N, et al. 2019. Long-standing small-scale reconnection processes at Saturn revealed by Cassini. *Astrophys J Lett*, 884: L14
- Guo R L, Yao Z H, Dunn W R, et al. 2021a. A rotating azimuthally distributed auroral current system on Saturn revealed by the cassini spacecraft. *Astrophys J Lett*, 919: L25
- Guo R L, Yao Z H, Grodent D, et al. 2021b. Jupiter's double-arc aurora as a signature of magnetic reconnection: Simultaneous observations from HST and Juno. *Geophys Res Lett*, 48: e2021GL093964
- Guo R L, Yao Z. 2024. Magnetic reconnection in the magnetodisk of centrifugally dominated giant planets. *Rev Mod Plasma Phys*, 8: 12
- Khurana K K. 1992. A generalized hinged-magnetodisk model of Jupiter's nightside current sheet. *J Geophys Res*, 97: 6269–6276
- Khurana K K, Kivelson M G. 1989. On Jovian plasma sheet structure. *J Geophys Res*, 94: 11791–11803
- Khurana K K, Schwarzl H K. 2005. Global structure of Jupiter's magnetospheric current sheet. *J Geophys Res*, 110: 2004JA010757
- Kronberg E A, Kasahara S, Krupp N, et al. 2012. Field-aligned beams and reconnection in the jovian magnetotail. *Icarus*, 217: 55–65
- Lepping R P, Behannon K W. 1980. Magnetic field directional discontinuities: 1. Minimum variance errors. *J Geophys Res*, 85: 4695–4703
- Mauk B H, Williams D J, McEntire R W, et al. 1999. Storm-like dynamics of Jupiter's inner and middle magnetosphere. *J Geophys Res*, 104: 22759–22778
- Mauk B H, Haggerty D K, Jaskulek S E, et al. 2017. The Jupiter energetic particle detector instrument (JEDI) investigation for the Juno mission. *Space Sci Rev*, 213: 289–346
- Palmroth M, Pulkkinen T I, Ganse U, et al. 2023. Magnetotail plasma eruptions driven by magnetic reconnection and kinetic instabilities. *Nat Geosci*, 16: 570–576
- Poh G, Sun W, Clink K M, et al. 2020. Large-amplitude oscillatory motion of Mercury's cross-tail current sheet. *J Geophys Res-Space Phys*, 125: e2020JA027783
- Rabia J, N  non Q, André N, et al. 2023. Jupiter magnetic field model-JRM33+KK2005, Zenodo
- Rong Z J, Shen C, Petrukovich A A, et al. 2010. The analytic properties of the flapping current sheets in the earth magnetotail. *Planet Space Sci*, 58: 1215–1229
- Rong Z J, Barabash S, Stenberg G, et al. 2015. Technique for diagnosing the flapping motion of magnetotail current sheets based on single-point magnetic field analysis. *J Geophys Res-Space Phys*, 120: 3462–3474
- Russell C T, Huddleston D, Khurana K K, et al. 1999. Structure of the Jovian magnetodisk current sheet: Initial Galileo observations. *Planet Space Sci*, 47: 1101–1109
- Sergeev V A, Sormakov D A, Apatenkov S V, et al. 2006. Survey of large-amplitude flapping motions in the midtail current sheet. *Ann Geophys*, 24: 2015–2024
- Sonnerup B U, Scheible M. 1998. Minimum and maximum variance analysis. In: Paschmann G, Daly P W, eds. *Analysis Methods for Multi-spacecraft Data*. Bern: International Space Science Institute. 185–220
- Vasyliunas V. 1983. Plasma distribution and flow. In: Dessler A J, ed. *Physics of the Jovian Magnetosphere*. Cambridge: Cambridge University Press. 395–453
- Vogt M F, Kivelson M G, Khurana K K, et al. 2010. Reconnection and flows in the Jovian magnetotail as inferred from magnetometer observations. *J Geophys Res*, 115: 2009JA015098
- Yao Z H, Coates A J, Ray L C, et al. 2017. Corotating magnetic reconnection site in Saturn's magnetosphere. *Astrophys J Lett*, 846: L25
- Yao Z H, Radioti A, Grodent D, et al. 2018. Recurrent magnetic dipolarization at Saturn: Revealed by Cassini. *J Geophys Res-Space Phys*, 123: 8502–8517
- Yao Z H, Guo R L, Wei Y, et al. 2024. Recent advances in the magnetic reconnection, dipolarization, and auroral processes at giant planets from the perspective of comparative planetology. *Earth Planet Phys*, 8: 659–672
- Zhang C, Rong Z J, Gao J W, et al. 2020. The flapping motion of Mercury's magnetotail current sheet: MESSENGER observations. *Geophys Res Lett*, 47: e2019GL086011
- Zhang C, Rong Z, Zhang L, et al. 2023. Properties of flapping current sheet of the Martian magnetotail. *J Geophys Res-Space Phys*, 128: e2022JA031232
- Zhao J, Guo R, Shi Q, et al. 2024. Dayside magnetodisk reconnection in Jovian system: Galileo and voyager observation. *J Geophys Res-Planets*, 129: e2023JE008240
- Zhong J, Lee L C, Slavin J A, et al. 2023. MESSENGER observations of reconnection in Mercury's magnetotail under strong IMF forcing. *J Geophys Res-Space Phys*, 128: e2022JA031134

(责任编辑: 魏勇)