

地球磁尾电子扩散区电流片特征研究

刘会杰^{1,2}, 李文亚¹, 唐斌斌¹, 王赤^{1,2}

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 (中国科学院大学地球与行星科学学院 北京 100049)

摘要 理论与数值模拟研究表明, 对称磁场重联中电流片由单峰 Harris 型向双峰分叉型演化, 而受限于卫星探测精度, 尚无观测验证。基于磁层多尺度任务卫星的高精度观测, 现已在地球磁尾报道了十余例电子扩散区。本文利用 Harris 电流片模型, 对 Wang 等^[1]给出的 13 个磁尾电子扩散区事例开展系统研究。其中 9 个事例的电流片结构符合 Harris 型, 电流片厚度较薄, 最薄达 0.67 个电子惯性长度; 随厚度变薄, 电子出流速度增大, 这是由于电子能更长时间被束缚在薄电流片内并获得更多加速。剩余 4 个事例呈分叉电流片特征, 其电子出流速度更小、电流片厚度更厚, 最厚可达约 20 个电子惯性尺度, 表明其距离重联 X 点较远。本研究统计确定了 13 个电子扩散区事例距离 X 点的相对空间分布, 有助于理解电子扩散区内电子动力学过程。

关键词 电子扩散区、Harris 电流片、分叉电流片、磁场重联

中图分类号 P354

Properties of the current sheets in the Earth's magnetotail electron diffusion regions

LIU Huijie^{1,2}, LI Wenya¹, TANG Binbin¹, WANG Chi^{1,2}

1 (State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, CAS, Beijing 100190)

2 (College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Theoretical analysis and numerical simulation results demonstrate that significant structural evolution occurs to the current sheet in the course of symmetric magnetic reconnection. Specifically, the current sheet gradually evolves from a single-peaked Harris-type form into a double-peaked bifurcated structure. However, restricted by the technical constraints of satellite detection accuracy, this theoretical evolution has not yet acquired solid observational confirmation in practical space detection. With the continuous improvement of space exploration technology, the

* 基金项目: 国家自然科学基金 (42522410, 42188101, 42574232, 42122032, 42274211, 41974170, 42374184)、科技部重点研发计划 (2021YFA0718600)

投稿日期: 2026/02/12

E-mail: wyli@spaceweather.ac.cn

Magnetospheric Multiscale mission can deliver high time resolution in-situ measurements. Relying on such high-quality observational data, researchers have successfully discovered and recorded more than ten electron diffusion region (EDR) events in the Earth's magnetotail in recent years. In this study, we take advantage of the mature Harris current sheet model to carry out comprehensive and systematic research targeting 13 typical magnetotail EDR events summarized by Wang et al^[1]. The statistical research results show that nine EDR events are well described by a Harris-type current sheet. These cases feature thin current sheet thickness, with a minimum thickness of 0.67 electron inertial lengths. Meanwhile, the compression of current sheet thickness brings obvious growth of electron outflow velocity. The core reason lies in that thinner current sheet structure can prolong the confinement time of electrons inside the EDR, allowing particles to obtain adequate acceleration effect. The remaining four events exhibit clear bifurcated current sheet features, with double-peaked current density profiles. They possess lower electron outflow velocity and thicker current sheet structure, with the maximum thickness reaching approximately 20 electron inertial lengths. Such structural properties imply that these events are situated at positions far away from the reconnection X point. This study statistically identifies the relative spatial distribution of the 13 EDR events with respect to the reconnection X point. The obtained findings can greatly facilitate the exploration and in-depth comprehension of intrinsic electron kinetic behaviors evolving within the EDR.

Key words Electron diffusion region, Harris current sheet, Bifurcated current sheet, Magnetic reconnection

0 引言

磁场重联 (Magnetic reconnection) 是空间无碰撞等离子体中能量快速释放与转化的重要物理过程, 在太阳、行星际空间、地球磁层、地面装置等离子体等多种等离子体环境中普遍存在^[2]。不同空间环境中的磁场重联过程在背景磁场、等离子体参数以及几何结构等方面存在显著差异。在地球磁尾, 电流片结构相对简单、两侧入流等离子体参数近似对称, 是研究对称磁场重联物理过程的理想天然实验室。因此, 对磁尾重联的研究对于揭示磁场重联的基本物理机制具有重要意义^[3]。

在磁尾对称重联过程中, 离子和电子依次与磁场发生解耦, 形成不同尺度的扩散区结构^[2]。在离子惯性尺度附近, 离子首先与磁场解耦, 形成离子扩散区 (Ion Diffusion Region, IDR), 其主要特征为霍尔电流体系和非理想磁流体效应的出现; 而在更小的电子尺度上, 电子进一步与磁场解耦, 形成电子扩散区 (Electron Diffusion Region, EDR)。电子扩散区是重联中磁力线拓扑结构发生断裂和重联的关键区域, 被认为是重联触发的核心区域^[4-5]。由于电子扩散区具有极小的空间尺度, 其内部电子动力学过程和精细结构长期以来难以通过原位

观测加以刻画。

理论分析和数值模拟研究表明，在对称重联过程中，在重联 X 点附近，电流结构通常可由单峰 Harris 电流片模型较好描述^[6-7]。如图 1 所示，随着电子沿重联出流方向逐渐远离 X 点，其运动轨迹在非理想电场和磁场结构的共同作用下逐渐偏离中心电流片。由于电流主要由电子携带，从而在中性面两侧形成电流密度双峰结构，即分叉电流片，这在观测上得到了广泛的证实^[8]。使用 Cluster 卫星的观测数据，Thompson 等^[9]统计研究发现，大多数磁尾电流片显著偏离 Harris 电流片，呈现出分叉电流片的特征。因此，电子运动特征及其主导的电流片形态与其相对于重联 X 点的空间位置密切相关。电流片结构由单峰 Harris 型向双峰分叉型的转变反映了电子动力学从 X 点附近向外演化的过程，可作为诊断电子扩散区内外空间结构的重要物理判据。

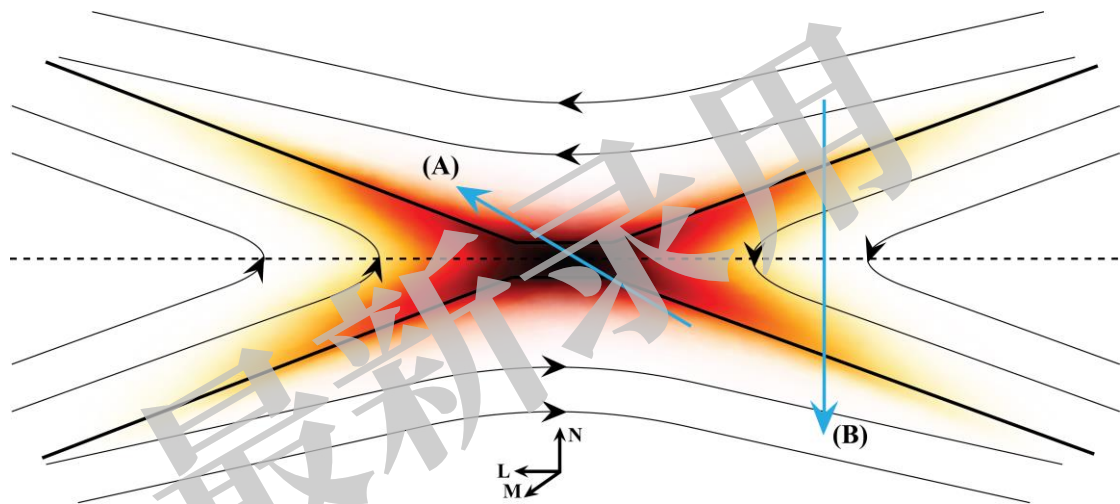


图 1 磁场重联电流分布示意图。颜色代表 M 方向电子电流。

Fig.1 Schematic diagram of the current distribution during magnetic reconnection. The color represents the M component of the electron current.

2015 年，NASA 发射了磁层多尺度任务（Magnetospheric Multiscale mission, MMS）^[10]，由四颗完全相同的卫星在空间组成近似正四面体构型飞行，卫星间距可在约 7–160 km 范围内调节。MMS 卫星搭载了高时间分辨率的等离子体与电磁场探测载荷^[11-13]，能够同时测量三维电子速度分布函数、电场和磁场，首次实现了对空间等离子体中电子尺度物理过程的直接三维观测^[14]，为研究重联的微观物理机制提供了关键观测条件。目前，基于 MMS 卫星的高分辨率观测数据，在地球磁尾报道了十余个电子扩散区穿越事例^[15-24]，揭示了电子扩散区内显著的非理想电场和复杂的电子动力学特征。其中，Li 等人^[16]报道的电子扩散区穿越过程中，结合等离子体和电磁场观测，并伴随回旋异性电子速度分布函数，表明 MMS 穿越了磁尾 X 线，其电流片符合 Harris 电流片构型，Waters 等^[19]使用递归

神经网络的时间序列分类方法重构了 MMS 卫星的穿越轨迹，进一步证实了 MMS 穿越了重联 X 点。Tang 等人^[20]报道的电子扩散区穿越过程中，其穿越位置在电子出流区中，并且呈现出显著的分叉电流片构型。目前为止，现有研究多侧重于个例分析，对电子扩散区内电流片结构的系统区分及其相对于重联 X 线的空间分布特征，仍缺乏基于观测的统计研究。

基于上述研究背景，本文选取 Wang 等^[1]系统报道的磁尾电子扩散区事例列表作为本研究事例列表。利用 Harris 电流片模型对各电子扩散区事例对应的电流片结构进行拟合分析，根据其 Harris 电流片模型的符合程度，将电流片结构区分为 Harris 型和分叉型两类。结合理论和数值模拟中电子运动特征随其相对于重联 X 点位置变化的认识，进一步分析不同类型电流片在电子扩散区内的空间分布特征。通过上述分析，本文首次从观测角度给出了磁尾电子扩散区事例在重联 X 线附近的统计分布特征，并揭示了电子扩散区内靠近 X 点的电流片以 Harris 型为主、而在远离 X 点的电流片逐渐向分叉型电流片过渡的结构特征。在确定这些电子扩散区穿越事件距离 X 点的相对位置之后，基于在距离 X 点不同位置的穿越过程中的电子观测特征，未来将有助于进一步厘清电子扩散区内电子的运动规律。

1 电子扩散区观测特征

图 2 展示了两个磁尾电子扩散区的穿越事例，其中(A) 事例已由 Li 等^[18]最先报道并进行了详细分析，(B) 事例已由 Wang 等^[1]报道。下面将分别简要描述这两个电子扩散区事例的主要观测特征，并进行对比分析。由于四颗 MMS 卫星在两次事件中的观测结果高度一致，本文统一采用 MMS1 的观测数据进行分析。首先，基于磁场数据采用最小变量分析法 (Minimum Variance Analysis, MVA) 分别确定了两个事例的局地磁场坐标系。对于电子扩散区 (A) : $L=[0.97, -0.17, -0.17]$, $M=[0.20, 0.96, 0.19]$, $N=[0.14, 0.22, 0.97]$; 对于电子扩散区 (B) : $L=[-0.94, -0.28, -0.17]$, $M=[-0.29, 0.49, 0.82]$, $N=[-0.15, 0.83, -0.54]$ 。

以下首先介绍电子扩散区事例(A) 的观测特征。图 2(A)-a 显示，磁场 B_L 分量从负到正的反转，表明 MMS 穿越了磁尾电流片，在电流片穿越时刻（红色竖线所示）， B_M 分量为 1.4 nT，表明存在引导场。图 2(A)-b 显示，在电流片穿越的过程中，MMS1 持续观测到了高能离子（能量高于 1 keV）。如图 2(A)-c 所示，在 B_L 反转的同时，离子体速度 V_{iL} 也从负到正发生反转，说明 MMS 穿越了重联电流片。在重联电流片穿越的过程中，MMS 持续观测到了高能电子，其电子温度达到 1 keV，平均电子数密度为 0.05 cm^{-3} ，对应的电子惯性尺度为 $d_e^A=24.6 \text{ km}$ 。图 2(A)-f 展示了，MMS 同时观测到了电子体速度 V_{eL} 的反转和一个 -M

方向的高速电子流，其速度能够达到 $12,300 \text{ km s}^{-1}$ ，并贡献了 100 nA m^{-2} 的强电流。对应的电子速度分布函数展示在图 2(A)-k-2(A)-l 中。图 2(A)-k 展示了呈现出整体性反平行漂移的特征，图 2(A)-l 展示了在 $V_{E \times B} - V_E$ 平面内呈现出回旋各向同性特征。以上特征均说明该高速电子流与重联产生的出流特征一致。如图 2(A)-h 所示，MMS 观测到了 E_N 分量从正到负的反转，与霍尔电场一致。图 2(A)-i 展示了非理想电场，可以看到其在 N 方向上具有显著分量，表明在该电流片穿越过程中电子已与磁场发生解耦。并且从其投掷角分布（图 2(A)-j）可以看出，在电流片的两侧均观测到了双向的入流电子，并伴随着显著的温度各向异性特征，其中 $T_{e\parallel}/T_{e\perp}$ 能达到 2.5；在中心电流片附近，观测到了反平行回旋各向同性的电子。综合以上观测特征，说明 MMS 卫星穿越了磁尾的电子扩散区，其穿越轨迹展示在图 1 中。同时，在 B_L 反转时刻附近， J_M 达到最大值，与 Harris 电流片预测基本一致。为了估算电流片的厚度，我们对 B_L 进行四颗卫星时序分析法，获得了电流片的法向速度为 $V_N^A = 21.6^{\circ}[-0.02, 0.53, -0.85] \text{ km s}^{-1}$ （在地心太阳磁层坐标系下），这个方向与使用 MVA 得到的 N 方向夹角为 20° ，说明二者一致。在黄色阴影部分时间段内，其法向空间尺度为 $75.6 \text{ km} \sim 3 d_e^A$ ，可以得到电流片半厚度 $D_{NI}^A \sim 1.5 d_e^A$ 。

下面描述电子扩散区事例(B)的观测特征。图 2(B)-a 显示，磁场 B_L 分量由正向负发生反转，表明 MMS 穿越了磁尾电流片。在电流片穿越时刻（红色竖线所示）， B_M 分量为 1.4 nT ，同时观测到了 B_M 从负到正的反转，与霍尔磁场特征一致。图 2(B)-b 显示，在电流片穿越过程中，MMS1 持续观测到能量高于 1 keV 的高能离子分布。与此同时，如图 2(B)-c 所示，MMS 在电流片穿越过程中观测到了一个沿 -L 方向的离子流，其体速度可达 200 km s^{-1} ，表明 MMS 穿越了 -L 一侧的重联电流片。图 2(B)-d 显示，在电流片穿越期间，MMS 观测到持续存在的高能电子，其电子温度达到 1 keV ，平均电子数密度约为 0.1 cm^{-3} ，对应的电子惯性尺度约为 $d_e^B = 17.0 \text{ km}$ 。进一步分析电子体速度（图 2(B)-f），在正 B_L 一侧，MMS 观测到 V_{eL} 从正向负发生反转，同时伴随着一个沿 -M 方向的高速电子流，该电子流贡献了约 50 nA m^{-2} 的强电流。对应地，在负 B_L 一侧， V_{eL} 从负到正反转，并且也观测到沿 -M 方向的高速电子流，也贡献了约 50 nA m^{-2} 的电流。然而，在电流片中心区域，电子体速度整体较小。图 2(B)-g 显示，电流密度 J_M 在电流片两侧分别出现两个明显峰值，而在电流片中心区域电流强度显著减小，表明该事件中电流主要集中在电流片两侧，与事例(A) 显著不同。在图 2(B)-h 中，MMS 观测到了 E_N 分量从正到负的反转，与霍尔电场一致。进一步地，图 2(B)-i 给出的非理想电场显示，在电流片 + B_L 一侧和中心电流片区域，非理想电场约为 6 mV m^{-1} ，说明电子几乎是冻结的，而在电流片 - B_L 一侧，非理想电场 E_N 分布达到最大值（ $\sim -25 \text{ mV}$

m^{-1}), 说明电子是解耦的。图 2(B)-j 展示了在电流片穿越过程中的电子投掷角分布, 其中在电流片的两侧, MMS 均观测到了双向的电子流, 并伴随着显著的温度各向异性特征, 其中 $T_{e\parallel}/T_{e\perp}$ 能达到 2。而在电流片穿越过程中, 其投掷角分布呈现出各向同性分布特征。在 B_L 反转时刻的 2 维电子速度分布函数展示在图 2(B)-k-2(B)-l 中, 可以看到在 $V_{E\times B} - V_B$ 以及 $V_{E\times B} - V_E$ 平面内, 电子速度分布函数均呈现出麦克斯韦分布特征。综合以上观测特征可以看出, MMS 穿越了磁尾一个电子尺度的重联电流片, 但是相较于事例(A), MMS 穿越的位置偏离重联 X 点 (其穿越轨迹展示在图 1 中), 并且观测到了电流双峰结构, 与分叉电流片特征一致。同样的, 我们也使用四颗卫星时序分析法获得了该电流片的法向速度为 $V_N^B = 121 * [-0.02, 0.92, -0.40] \text{ km s}^{-1}$ (在地心太阳磁层坐标系下), 其与 N 方向夹角为 11° , 说明也是一致的。在黄色阴影部分时间段内, 其法向空间尺度为 $665.5 \text{ km} \sim 40 d_e^B$, 可以得到电流片半厚度 $D_{NI}^B \sim 20 d_e^B$, 远大于事例(A) 的电流片厚度。

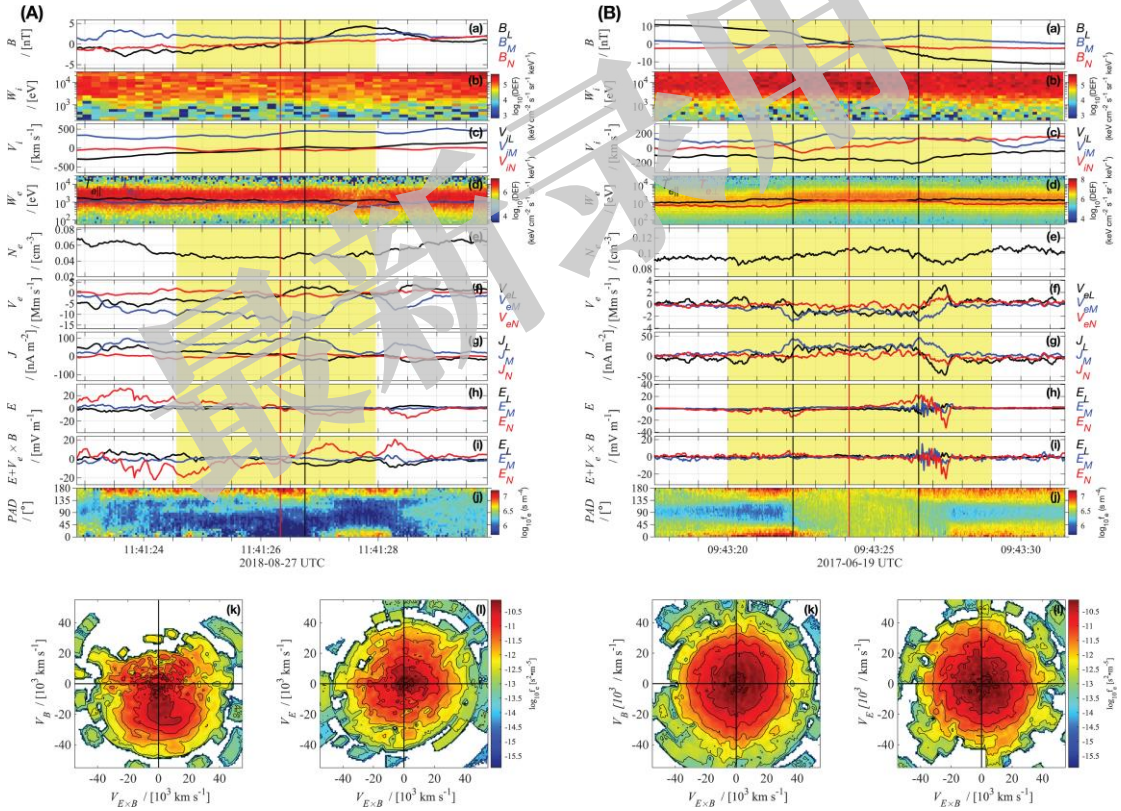


图 2 两个磁尾电子扩散区的观测特征: (A) Li 等^[16]报道的电子扩散区事例; (B) Wang 等^[11]报道的电子扩散区事例。 (a) 磁场 B ; (b) 离子微分能通量 W_i ; (c) 离子体速度 V_i ; (d) 电子微分能通量 W_e ; (e) 电子数密度 N_e ; (f) 电子体速度 V_e ; (g) 电流密度 J ; (h) 电场数据降采样至 30 毫秒 E ; (i) 非理想电场 $E + V_e \times B$; (j) 电子投掷角分布。(a-i) 中黄色阴影表示电子扩散区穿越时间段。图 (A) 和 (B) 中红色和黑色竖线分别对应电流片穿越和 J_m 峰值时刻。(k) $V_{E \times B} - V_B$ 平面和 (l) $V_{E \times B} - V_E$ 平面中电流片穿越时刻对应的电子速度分布函数。图中矢量均为局地坐标系观测结果, 黑色、蓝色和绿色曲线分别表示 L 、 M 和 N 方向分量

Fig.2 Observational features of two magnetotail electron diffusion regions: (A) An EDR event reported by Li et al.

[16]; (B) An EDR event reported by Wang et al.^[11]. (a) Magnetic field; (b) Ion differential energy flux; (c) Ion bulk velocity; (d) Electron differential energy flux; (e) Electron number density; (f) Electron bulk velocity; (g) Current density; (h) Electric field down-sampled to 30 ms; (i) Non-ideal electric field; (j) Electron pitch-angle distribution. In panels (a–i), the yellow shaded region indicates the EDR crossing interval. The red and black vertical lines in (a–j) correspond to the current sheet crossing and the time of the J_M peak, respectively. (k) Electron velocity distribution functions at the current sheet crossing time in the $V_{E \times B} - V_B$ and (l) $V_{E \times B} - V_E$ planes. Vectors in the figures are in the local coordinate system, and the black, blue, and green curves represent the L, M, and N components, respectively.

2 Harris 电流片拟合

2.1 Harris 电流片模型

Harris 电流片模型^[7]被广泛应用于对称重联电流片的理论描述和数值模拟研究中 (Birn 等, 2001^[25]) :

$$B_L = B_{L0} \tanh\left(\frac{D_N}{D_{N0}}\right) \quad (1)$$

其中 B_{L0} 为外磁场强度, D_{N0} 为电流片厚度, D_N 为垂直于电流片平面的距离。基于安培定律, 电流密度可通过磁场旋度求得:

$$J_M = \frac{B_{L0}}{\mu_0 D_{N0}} \operatorname{sech}^2\left(\frac{D_N}{D_{N0}}\right) \quad (2)$$

$$J_M = -\frac{1}{\mu_0 D_{N0} B_{L0}} B_L^2 + \frac{B_{L0}}{\mu_0 D_{N0}} \quad (3)$$

其中为 μ_0 真空磁导率。接着, 我们分别对图 2 展示的两个电子扩散区事件进行 Harris 电流片模型拟合, 其结果展示在图 3 中。

2.2 拟合结果

图 3-a 和 3-b 展示了图 2(A) 所示电子扩散区事例的 Harris 电流片拟合结果。需要指出的是, 自 2018 年 7 月 15 日起, 由于 MMS4 电子探测器中部分探头发生异常并被关闭, 该卫星的高精度电子矩数据无法继续获取。因此, 在该事例的分析中, 仅采用 MMS1–3 的观测数据进行拟合。图 3-a 展示了 MMS1–3 在 B_L^2 - J_M 平面内的散点分布, 所用数据均选自图 2(A) 中黄色阴影标示的电子扩散区穿越时间段。可以看到, B_L^2 和 J_M 呈现出很好的线性关系, 其相关系数达到 0.9, 进一步表明该电流片结构可由 Harris 电流片模型较好描述。根据公式 (3) 我们可以得到 $B_{L0}^A = 4.75$ nT 和 $D_{N0}^A = 44.8$ km ~ 1.8 d_e^A, 由此可以得到电流片的总厚度为 3.6 d_e^A, 与基于多卫星时序分析法计算得到的结果一致。图 3-b 展示了在 $\operatorname{Sign}(B_L) * B_L^2$ - J_M 平面内的散点分布, 我们发现 J_M 的峰值在 $B_L \sim 0$ nT 时刻达到, 并且在电流片两侧 B_L^2 和 J_M 仍保持着良好的线性关系, 其相关系数分别为 0.98 和 0.73, 因此我们可以分别计算得到电流片两侧的 B_{L0}^A 分别为 5.22 nT 和 6.52 nT, D_{N0}^A 分别为 40.3 km (~ 1.64 d_e^A) 和 61.9 km (~ 2.52

d_e^A)。上述结果表明，该电子扩散区内的电流片整体上符合 Harris 电流片的基本特征。

图 3-c 和 3-d 展示了图 2(B)所示电子扩散区事例的 Harris 电流片拟合结果。图 3-c 展示了 J_M 的峰值主要分布在 $B_L^2 \approx 20 \sim 40 \text{ nT}^2$ 之间，二者未呈现出明显的线性关系，其相关系数仅为 0.59。图 3-d 展示了在 $\text{Sign}(B_L) * B_L^2 - J_M$ 平面内的散点分布，可以看到， J_M 在电流片两侧呈现出显著的双峰特征，而在电流片中心显著减小，说明该电流片结构显著偏离 Harris 电流片，这一特征与分叉电流片的典型结构一致。同时，在电流片两侧的 B_L^2 和 J_M 也未呈现出良好的线性关系，进一步表明该电子尺度电流片不符合 Harris 型结构，且 MMS 穿越位置距离重联 X 点较远。

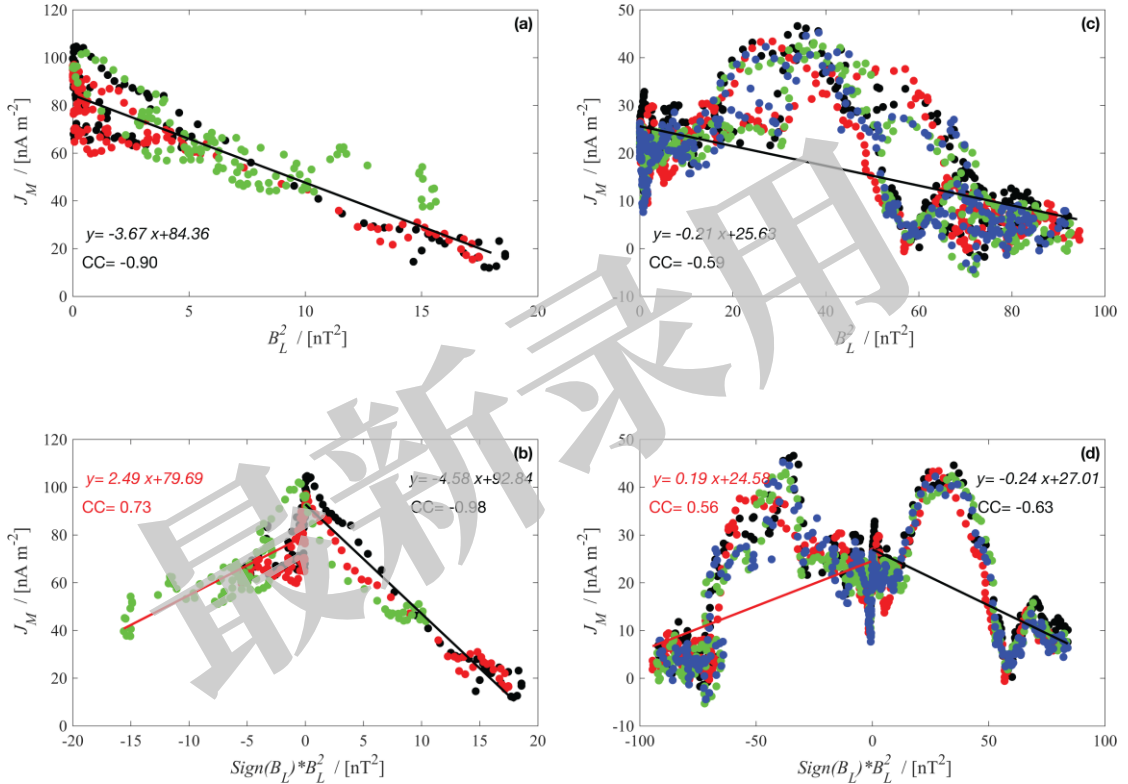


图 3 Harris 电流片拟合结果：(a) 和(c) 分别展示了图 2(A) 和 2(B) 中黄色阴影时间段内，MMS 卫星数据在 $B_L^2 - J_M$ 平面上的散点分布。其中，黑色、红色、绿色和蓝色点分别对应 MMS1–4 的结果。黑色实线表示线性拟合结果，其拟合函数标注于图的左下角。(b) 和 (d) 分别展示了图 2(A) 和 2(B) 中黄色阴影时间段内，MMS 卫星数据在 $\text{Sign}(B_L) * B_L^2 - J_M$ 平面上的散点分布，其中红色和黑色实线分别表示位于 $-B_L$ 和 $+B_L$ 一侧的线性拟合结果，其对应的拟合函数分别标注于左上角和右上角

Fig.3 Harris current sheet fitting results: Panels (a) and (c) show the scatter distributions of MMS data in the $B_L^2 - J_M$ plane during the yellow-shaded intervals in Figures 2(A) and 2(B), respectively. The black, red, green, and blue dots correspond to the results from MMS1–4. The black solid line represents the linear fitting result, with the fitting function indicated in the lower-right corner of each panel. Panels (b) and (d) show the scatter distributions of MMS data in the $\text{Sign}(B_L) * B_L^2 - J_M$ plane during the same intervals in Figures 2(A) and 2(B), respectively. The red and black solid lines denote the linear fitting results on the $-B_L$ and $+B_L$ sides, with the corresponding fitting functions shown in the upper-left and upper-right corners, respectively.

3 统计结果

接下来, 本文将对 Wang 等^[1]提供的磁尾电子扩散区事例列表开展统计研究。针对每一个电子扩散区事例, 分别对其电流片穿越过程进行 Harris 电流片模型拟合。图 4-a 给出了在 $CC-D_N/d_e$ 平面内的统计结果, 可以看出, 这些电子扩散区事例可以分为两类。在红色阴影部分区域内的电子扩散区事例, 电流片统计结果展示在图 4-c 中, 可以看出 $J_M/\max(J_M)$ 与 $B_L^2/\max(B_L^2)$ 呈现出很好的线性递减趋势, 并且 J_M 的峰值主要在 $B_L^2/\max(B_L^2)$ 趋于 0 处达到, 说明这些电流片符合 Harris 电流片构型, 并且它们的 Harris 电流片模型拟合相关系数 CC 集中分布在 0.6~0.9 之间。根据 Harris 电流片拟合结果可以确定这些电流片的厚度, 它们的电流片厚度主要分布在 $0.67\sim 7 d_e$ 之间。相比之下, 在蓝色阴影部分内的电子扩散区事例, 其电流片统计结果展示在图 4-d 中, 可以看出 $J_M/\max(J_M)$ 与 $B_L^2/\max(B_L^2)$ 显著偏离线性关系, 并且 J_M 的峰值主要在 $B_L^2/\max(B_L^2)$ 位于 $0.2\sim 0.5$ 之间达到, 说明它们符合分叉电流片构型, 并且 Harris 电流片模型拟合相关系数 CC 均低于 0.6。这些分叉电流片的厚度是通过多卫星时序分析方法计算得到。相比之下, 这些电子扩散区事例的电流片厚度呈现出较为离散的分布, 能够从 $\sim 5 d_e$ 延伸到 $\sim 20 d_e$, 说明这些电流片事例距离 X 点更远。各电子扩散区事例的电流片类型及其相关物理参数汇总列于表 1 中。

表 1 电子扩散区事例列表

Table 1 List of electron diffusion region events

时间	斜率	截距	CC	D_{N0} /(d_e)	B_{L0} /(nT)	D_{N1} /(d_e)	$\frac{V_{eL}}{V_{Ae}}$
20170617/202405.9-202408.9	1.29	204.52	0.90	6.53	12.59	7.30	0.12
20170619/094320.0-094329.0	0.21	25.63	0.59	\	\	20.00	0.11
20170703/052650.4-052651.6	0.93	180.46	0.76	6.32	13.93	5.42	0.19
20170703/052706.6-052707.6	0.46	197.77	0.43	\	\	8.79	0.19
20170711/223402.0-223403.0	17.25	93.56	0.80	0.67	2.33	1.00	0.45
20170726/000353.8-0003.59	0.69	81.95	0.83	7.12	10.90	6.52	0.18
20170810/121831.8-121833.6	2.96	175.99	0.76	2.49	7.71	2.00	0.15
20180821/110103.0-110105.5	1.52	48.39	0.71	4.48	5.64	6.20	0.17
20180827/114124.6-114128.0	3.74	84.39	0.90	1.82	4.75	1.54	0.27
20180827/121543.2-121545.5	0.33	91.70	0.24	\	\	4.70	0.18

20190906/043858.4-043859.7	0.29	59.64	0.25	\	\	9.80	0.22
20200803/010643.7-010645.4	1.16	134.23	0.66	2.96	10.76	4.10	0.22
20200826/230043.1-230043.9	1.33	35.31	0.90	2.80	5.15	3.20	0.28

注: V_{Ae} 为入流区电子 Alfvén 速度, 计算公式为 $V_{Ae} = B/\sqrt{\mu_0 m_e n_e}$, 其中 μ_0 为真空磁导率。这里 B 和 n_e 分别选取的为入流区平均磁场强度和平均电子数密度, 其中入流区的判定依据为: 非理想电场项可忽略, 电子投掷角分布呈现出双向分布特征。最后选取入流区磁场强度和方向以及电子数密度几乎平稳的一秒内的平均值, 作为入流区磁场强度和电子数密度。

图 4-b 展示了它们在 $V_{eL}/V_{Ae}-D_N/d_e$ 平面内的散点分布, 其中散点颜色表示 CC。可以看出, 电流片的厚度 D_N/d_e 与 V_{eL}/V_{Ae} 呈现出显著的反相关关系。尤其是对于满足 Harris 电流片的电子扩散区事例, 随着电流片厚度变薄, 重联出流速度 V_{eL} 从 $0.12 V_{Ae}$ 增加到 $0.45 V_{Ae}$ 。这是由于随着电流片变薄, 在电子扩散区内部的局地静电势显著增强, 能够捕获更多的电子, 这些电子将受到重联电场的持续加速, 获得更大的重联出流速度^[26,27]。然而, 对于满足分叉电流片的事例来说(对应空心点), 其重联出流速度集中分布在 $0.1\sim 0.2 V_{Ae}$ 范围内, 并且随着电流片厚度更厚, 其重联出流速度减小, 这与在外电子扩散区, 随着远离 X 点出流电子被减速一致^[28]。

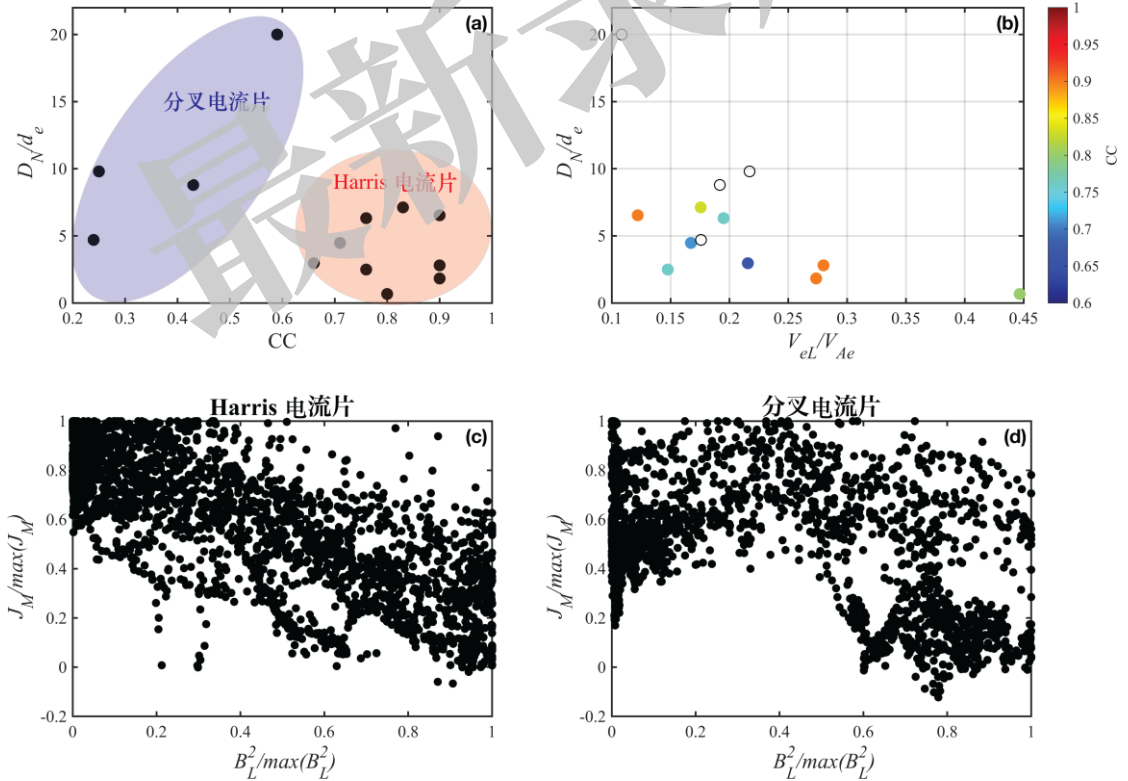


图 4 统计结果: (a) 展示了 13 个电子扩散区事例在 $CC-D_N/d_e$ 平面内的散点分布, 它们可以分为两类, 红色区域内的电子扩散区事例可以较好地由 Harris 电流片模型进行拟合; 蓝色区域内的事例显著偏离 Harris 电流片模型, 对应于分叉电流片结构。(b) 展示了 13 个电子扩散区事例在 $V_{eL}/V_{Ae}-D_N/d_e$ 平面内的散点分布, 其中散点的颜色表示对应的 CC 值, 空心点代表符合分叉电流片的事例。(c) 和 (d)

分别展示了图 (a) 中符合 Harris 电流片构型和分叉电流片构型的电子扩散区事例在 $B_L^2/\max(B_L^2)-$

$J_M/\max(J_M)$ 平面上的统计结果

Fig.4 Statistical results: Panel (a) shows the scatter distribution of 13 EDR events in the $CC-D_N/d_e$ plane. They can be divided into two categories: EDR events in the red region can be well fitted by the Harris current sheet model, corresponding to Harris-type current sheets, whereas events in the blue region deviate significantly from the Harris model and correspond to bifurcated current sheet structures. Panel (b) shows the scatter distribution of the same 13 EDR events in the $V_{eL}/V_{Ae}-D_N/d_e$ plane, where the color of the data points represents the corresponding CC value. The open circles represent events consistent with bifurcated current sheets. The statistical results of EDR events with the (c) Harris and (d) bifurcated current sheet configurations in panel (a), respectively, in $B_L^2/\max(B_L^2)-J_M/\max(J_M)$ planes.

4 结论与讨论

本文基于 Wang 等^[1]报道的 13 个磁尾电子扩散区事例，对其电流片的特征进行了系统的研究，使用 Harris 电流片模型分别对它们进行拟合，将它们分为 Harris 电流片和分叉电流片，用来衡量其距离重联 X 点的距离。

研究结果表明，其中 9 个电子扩散区事例满足 Harris 电流片构型，其电流片厚度较薄，最小能达到 $0.67 d_e$ 。随着电流片厚度变小，重联出流的速度呈现出一个增加的趋势，最高能达到 $0.45 V_{Ae}$ ，这是由于电流片厚度越薄，电子能够更长时间被束缚在电子扩散区内，获得更多的加速。剩余 4 个电子扩散区事例满足分叉电流片构型，电流 J_M 呈现出双峰的特征，其电流片厚度有很广泛的分布，从 $5 d_e$ 能够延伸到 $20 d_e$ ，说明这些电子扩散区穿越位置更加远离 X 点，其重联的出流速度集中分布在 $0.1\sim 0.2 V_{Ae}$ ，同时随着距离 X 点越远，电子出流速度减小，以上特征与磁场重联理论预期和模拟研究结果一致^[6,28]。

Wang 等^[1]在这些电子扩散区内观测到大振幅的低混杂波动，并指出它们可以与电子发生相互作用，加热电子。进一步地，Zhong 等^[24]研究表明，电磁低混杂波动与电子的相互作用可以产生电磁异常电阻，贡献主要的异常电场，最高可达到重联电场的 20%，增大了重联率，而静电项的贡献几乎可以忽略。数值模拟研究发现^[29]，电磁低混杂波动主要在靠近中性片附近被激发。因而，下一步我们将探讨随着逐渐远离 X 点，从单峰 Harris 电流片向双峰分叉电流片演化的过程中，低混杂波动的静电和电磁属性的变化，以及波粒相互作用对于重联电场的贡献。此外，根据这些电子扩散区事例穿越过程中距离 X 点的相对远近之后，后续将进一步分析在距离重联 X 点不同位置处的电子动力学特征，厘清重联电子扩散区内的电子运动以及加速规律，从而加深对磁场重联过程中的微观电子行为的理解，获得对磁场重联整体物理机制的深入认识。

参考文献

- [1] WANG S, CHEN L J, BESSHO N, *et al.* Lower-hybrid wave structures and interactions with electrons observed in magnetotail reconnection diffusion regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(5): e2021JA030109. DOI: 10.1029/2021JA030109
- [2] BISKAMP D. Magnetic reconnection in plasmas[J]. *Astrophysics and Space Science*, 1996, **242**(1): 165–207. DOI: 10.1007/BF00645113
- [3] SHARMA A S, NAKAMURA R, RUNOV A, *et al.* Transient and localized processes in the magnetotail: a review[J]. *Annales Geophysicae*, 2008, **26**(4): 955–1006. DOI: 10.5194/angeo-26-955-2008
- [4] WANG R S, LU Q M, NAKAMURA R, *et al.* An electron-scale current sheet without bursty reconnection signatures observed in the near-earth tail[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(10): 4542–4549. DOI: 10.1002/2017GL076330
- [5] LU S, WANG R, LU Q, *et al.* Magnetotail reconnection onset caused by electron kinetics with a strong external driver[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): 5049. DOI: 10.1038/s41467-020-18787-w
- [6] EGEDAL J. The adiabatic 1D kinetic equilibrium of the electron diffusion region during anti-parallel magnetic reconnection[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(10): e2024GL108895. DOI: 10.1029/2024GL108895
- [7] HARRIS E G. On a plasma sheath separating regions of oppositely directed magnetic field[J]. *Il Nuovo Cimento(1955-1965)*, 1962, **23**(1): 115–121. DOI: 10.1007/BF02733547
- [8] NAKAMURA R, BAUMJOHANN W, RUNOV A, *et al.* Fast flow during current sheet thinning[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**(23): 2140. DOI: 10.1029/2002GL016200
- [9] THOMPSON S M, KIVELSON M G, EL-ALAOUI M, *et al.* Bifurcated current sheets: statistics from cluster magnetometer measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A3): A03212. DOI: 10.1029/2005JA011009
- [10] BURCH J L, MOORE T E, TORBERT R B, *et al.* Magnetospheric multiscale overview and science objectives[J]. *Space Science Reviews*, 2016, **199**(1): 5–21. DOI: 10.1007/s11214-015-0164-9
- [11] POLLOCK C, MOORE T, JACQUES A, *et al.* Fast plasma investigation for magnetospheric multiscale[J]. *Space Science Reviews*, 2016, **199**(1–4): 331–406. DOI: 10.1007/s11214-016-0245-4
- [12] ERGUN R E, TUCKER S, WESTFALL J, *et al.* The axial double probe and fields signal processing for the MMS mission[J]. *Space Science Reviews*, 2016, **199**(1–4): 167–188. DOI: 10.1007/s11214-014-0115-x
- [13] RUSSELL C T, ANDERSON B J, BAUMJOHANN W, *et al.* The magnetospheric multiscale magnetometers[J]. *Space Science Reviews*, 2016, **199**(1): 189–256. DOI: 10.1007/s11214-014-0057-3
- [14] BURCH J L, TORBERT R B, PHAN T D, *et al.* Electron-scale measurements of magnetic reconnection in space[J]. *Science*, 2016, **352**(6290): aaf2939. DOI: 10.1126/science.aaf2939
- [15] TORBERT R B, BURCH J L, PHAN T D, *et al.* Electron-scale dynamics of the diffusion region during symmetric magnetic reconnection in space[J]. *Science*, 2018, **362**(6421): 1391–1395. DOI: 10.1126/science.aat2998
- [16] CHEN L J, WANG S, HESSE M, *et al.* Electron diffusion regions in magnetotail reconnection under varying guide fields[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(12): 6230–6238. DOI: 10.1029/2019GL082393
- [17] ZHOU M, DENG X H, ZHONG Z H, *et al.* Observations of an electron diffusion region in symmetric reconnection with weak guide field[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **870**(1): 34. DOI: 10.3847/1538-4357/aaf16f
- [18] LI W Y, KHOTYAINTEV Y V, TANG B B, *et al.* Upper-hybrid waves driven by meandering electrons around magnetic reconnection X line[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(16): e2021GL093164. DOI: 10.1029/2021GL093164
- [19] WATERS C L, EASTWOOD J P, FARGETTE N, *et al.* Bridging in situ satellite measurements and simulations of magnetic reconnection using recurrent neural networks[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(10): e2025JA034383. DOI: 10.1029/2025JA034383
- [20] TANG B B, LI W Y, KHOTYAINTEV Y V, *et al.* Fine structures of the electron current sheet in magnetotail guide-field reconnection[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(9): e2021GL097573. DOI: 10.1029/2021GL097573

- [21] QI Y, ERGUN R, PATHAK N, *et al.* Investigation of a magnetic reconnection event with extraordinarily high particle energization in magnetotail turbulence[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2024, **962**(2): L39. DOI: 10.3847/2041-8213/AD24EB
- [22] LIU H J, LI W Y, TANG B B, *et al.* High-speed electron flows in the earth magnetotail[J]. *AGU Advances*, 2025, **6**(2): e2024AV001549. DOI: 10.1029/2024AV001549
- [23] ZHANG X, ARTEMYEV A, ANGELOPOULOS V, *et al.* Resonant scattering of sub-keV electrons by beam-driven electron cyclotron harmonic waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(1): e2024JA033118. DOI: 10.1029/2024JA033118
- [24] ZHONG Z H, ZHOU M, GRAHAM D B, *et al.* Electromagnetic viscosity supported anomalous electric field in the electron diffusion region of collisionless magnetic reconnection[J]. *Nature Communications*, 2025, **16**(1): 10519. DOI: 10.1038/s41467-025-65535-z
- [25] BIRN J, DRAKE J F, SHAY M A, *et al.* Geospace environmental modeling (GEM) magnetic reconnection challenge[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, **106**(A3): 3715–3719. DOI: 10.1029/1999JA900449
- [26] KARIMABADI H, DAUGHTON W, SCUDDER J. Multi-scale structure of the electron diffusion region[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(13): L13104. DOI: 10.1029/2007gl030306
- [27] SHAY M A, DRAKE J F, ROGERS B N, *et al.* The scaling of collisionless, magnetic reconnection for large systems[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, **26**(14): 2163–2166. DOI: 10.1029/1999gl900481
- [28] XIONG Q Y, HUANG S Y, YUAN Z G, *et al.* Electron backflow motions in the outer electron diffusion region during magnetic reconnection[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, **50**(21), e2023GL105300. DOI: 10.1029/2023GL105300
- [29] DAUGHTON W. Electromagnetic properties of the Lower-hybrid drift instability in a thin current sheet[J]. *Physics of Plasmas*, 2003, **10**(8), 3103–3119. DOI:10.1063/1.1594724

作者简介:



刘会杰 女，1998 年 7 月出生于河南省商丘市，现为中国科学院国家空间科学中心博士研究生，主要研究方向为地球磁尾高速电子流、等离子波动、波粒相互作用



李文亚（通信作者）男，1987 年 11 月出生于江苏省盐城市，现为中国科学院国家空间科学中心研究员，博士生导师，主要研究方向为地球磁层磁场重联多尺度过程、天问一号数据定标、火星能量中性原子等