地球磁尾高速流锋面附近静电孤立波研究

张函语[1] 刘成明[1#] 曹晋滨[1]

1(北京航空航天大学空间与地球科学学院 北京 100191)

摘　要 地球磁尾高速流是磁层空间中重要的能量和物质载体，其锋面与周围等离子体发生相互作用，会激发诸多类型的静电波动。本研究旨在对高速流锋附近处静电孤立波的物理特性进行统计分析。利用 Magnetospheric Multiscale 任务提供的高分辨率数据，我们计算了静电孤立波的传播速度，时空尺度和电势，发现：1）静电孤立波的传播速度跨越较大的范围，从几百公里每秒到几万公里每秒，意味着锋面处静电孤立波的产生机制有诸多类型，包括离子-电子束流（布努曼）不稳定性和电子束流不稳定性；2）静电孤立波的周期和传播速度成反比，即其空间尺度通常在数十个德拜半径；3）静电孤立波的电势与波动的空间尺度成正比；4）波动主要出现在锋面后的通量堆积区内，且波动电势与局地电子温度成正相关，意味着静电孤立波-电子相互作用有助于当地电子加热。本研究的结论将帮助推进对磁尾波动-粒子相互作用的理解。

关键词　地球磁尾，高速流，静电孤立波，波粒相互作用

中图分类号　空间等离子体物理 P354

Electrostatic Solitary Waves in the Plasma Jet Fronts in the Earth's Magnetotail

Zhang Hanyu[1]　Liu Chengming[1]　Cao Jinbin[1]

1 (*Beihang University School of Space and Earth Sciences Beijing* 100191)

Abstract Plasma jets in the magnetotail are important carriers of energy and mass in the magnetospheric space. The energy and mass transport processes

＊ 基金项目：国家自然科学基金青年科学基金 B 类（42522409）

投稿日期：2026-02-05

[#]E-mail: cmliu@buaa.edu.cn

最新录用

driven by them play a decisive role in the evolution of geomagnetic substorms and auroras. Therefore, plasma jet dynamics has attracted intense interests and been studied for decades. Plasma jets are highly dynamical structures. During their earthward propagation, the leading edges of these jets interact with the surrounding plasmas, exciting various types of electromagnetic and electrostatic waves. In this this study, we aim to conduct a detailed statistical analysis of the physical characteristics of electrostatic solitary waves (ESWs) near the plasma jet fronts. Using high-resolution data from NASA's Magnetospheric Multiscale (MMS) mission, we calculated propagation velocity, temporal scale, spatial scale, and electric potential of the ESWs. The results show that: 1) The propagation speeds of ESWs span a wide range, from several hundred kilometers per second (close to local ion thermal speed) to tens of thousands of kilometers per second (close to local electron thermal speed), indicating that multiple generation mechanisms operate at the plasma jet fronts, such as ion-electron beam (Buneman) instability and electron beam instability; 2) The period of the ESWs is inversely proportional to their propagation speed, meaning that their spatial scales vary within a relatively narrow range, typically on the order of tens of local Debye lengths; 3) The electric potential of ESWs is proportional to their spatial scale. Correlation analysis with local physical parameters reveals that these waves predominantly occur in regions of strong magnetic field behind the leading edge, i.e., within flux pileup regions. Moreover, the wave potential is positively correlated with the local electron temperature, suggesting that wave-electron interactions may contribute to local electron heating. The findings of this study will help advance the understanding of wave-particle interactions in magnetospheric space.

Key words Earth’s magnetotail, Plasma jets, Electrostatic Solitary Waves, Wave-particle interactions

最新录用

0 引言

地球磁尾高速流，是传播速度在几百公里每秒的等离子体团（又称为爆发性整体流），其时间尺度通常在几分钟，空间尺度（比如晨昏方向长度）约为几个地球半径[1]。高速流通常由中远磁尾处的磁场重联过程产生，内部包含被堆积的磁场和被加速加热的带电粒子，其通过大尺度地向运动（通常跨越数十个地球半径的距离），将重联释放的大量能量和物质输运到近地空间，是磁尾

最重要的能量和物质载体之一[2-3]。高速流传播至近地空间后，会发生减速，将所携带的能量和物质注入到内磁层，进而引发磁层亚暴和极光增强等空间天气现象。因此，高速流对磁层能量传输和空间天气演化具有重要作用，一直以来是空间物理的研究重点[4-6]。

高速流在地向传播过程中，会与环境等离子体（主要是磁尾等离子片中，温度相对较低，密度相对较高的等离子体）发生相互作用，引发一系列能量和物质交换。高速流—环境等离子体相互作用主要发生在高速流前段，即高速流锋面（也被称为偶极化锋面，基于高速流锋面前段的磁场南北分量的陡增）[7-9]。高速流锋面将高速流内高温低密度等离子体和环境中低温高密度等离子体相隔，锋面处因此存在较强的等离子体压强和磁场梯度，使得锋面处于高度不稳定状态。由此，锋面处通常会发生一系列能量和物质交换过程[10-16]，往往体现为带电粒子加速和加热，各种不同类型的不稳定性（如交换模不稳定性和开尔文赫姆霍兹不稳定性等）增长，以及诸多类型电磁和静电波动的激发。

锋面处存在丰富多样的静电和电磁波动，比如磁声波，动理学阿尔芬波，低混杂波，哨声波，朗缪尔波，高混杂波，和静电孤立波等等[17-23]。这些波动在高速流—环境等离子体相互作用中扮演重要角色，其与当地等离子体相互作用，驱动能量转化和传输，进而释放高速流锋面处不断累积的自由能。在这些波动中，静电孤立波（electrostatic solitary wave）[24]，作为一个静电非线性波动（以平行于背景磁场的电场分量双极反转为主要特征），尤其受到重视，一是因为静电孤立波在锋面附近经常被观测到，并和高速电子束流存在时空关联；二是因为静电孤立波的相速度可能接近当地离子热速度，进而为离子-电子能量耦合提供载体。

虽然以往观测研究对高速流锋面处的静电孤立波开展了比较详细的分析，如揭示静电孤立波和离子、电子束流的时空关联，发现双流不稳定性和布努曼不稳定性对波动激发的驱动作用，但是这些研究工作通常是基于单个事例，而不同的事例中，波动的性质和激发机制有较大差异，限制了我们对锋面处静电孤立波的进一步认识。因此，有必要对锋面处静电孤立波开展统计分析，详细揭示锋面处静电孤立波的物理特性，以及其与当地磁场和等离子体参量的关联进而帮助我们更深入理解锋面处静电孤立波的产生和演化，以及其在高速流动力学中的作用。本研究即是利用美国宇航局的磁层多尺度 Magnetospheric Multiscale (MMS)卫星计划[25]，利用 MMS 卫星的多点测量优势，对高速流锋面处的静电孤立波进行统计分析。

1 研究方法

本研究利用了 MMS 卫星提供的高分辨率数据。MMS 任务由四颗相同的卫星组成，它们以准四面体构型部署，能够在电子尺度上进行多点测量，为解析磁层空间中的小尺度动理学结构提供了极佳的技术条件。这些卫星装备了多种仪器，用于测量地球磁层中的磁场、电场和等离子体参数。在本研究中，我们使用的仪器包括：磁通门磁强计（Fluxgate Magnetometer, FGM）[26]，用于测量地球磁层中的磁场变化，能够捕捉到磁场的微小变化；快速等离子体调查（Fast Plasma Investigation, FPI）仪器[27]：用于测量电子和离子的三维速度分布函数，可以进而得到等离子体的密度、速度和温度等参数；轴向双探针（Axial Double Probes）和自旋平面双探针（Spin-plane Double Probes）[28]：这些电场探针能够提供关于电场的详细信息，对于分析静电波和电场对粒子行为的影响至关重要。

本研究是分析高速流锋面附近的静电孤立波特性。我们首先需要建立高速流锋面数据库。参考以往统计研究揭示出的高速流锋面统计特征[8]，本研究根据类似的标准筛选了高速流锋面事件，主要包括磁场南北（地心-太阳磁层坐标系）分量 Bz 增加超过 4 nT，磁场 Z 方向倾角大于 45 度（即 $B_z \geq \sqrt{(B_x^2+B_y^2)}$），以及局部离子流速度超过 150 km/s。通过对 MMS 任务在 2017 年 5 月至 2018 年 8 月期间的高分辨率数据进行调查，识别出了一系列符合这些标准的高速流锋面事件库。在此基础上，我们进一步寻找锋面附近处的静电孤立波。本文所研究的静电孤立波不仅包括完全发展的、单波“孤立”的静电波，也包括不同波包融合前的、具有连续子波的静电孤立波。为了后续准确分析静电孤立波的物理特性，我们只筛选出 MMS 四颗卫星都观测到相同或相似波形的波动事件。这样便可以采用时序分析法来求解波动的相速度，即通过比较不同卫星间的信号时间延迟，来确定波动的相速度。基于这些条件，在高速流锋面附近，我们一共筛选出 58 个静电孤立波事件。

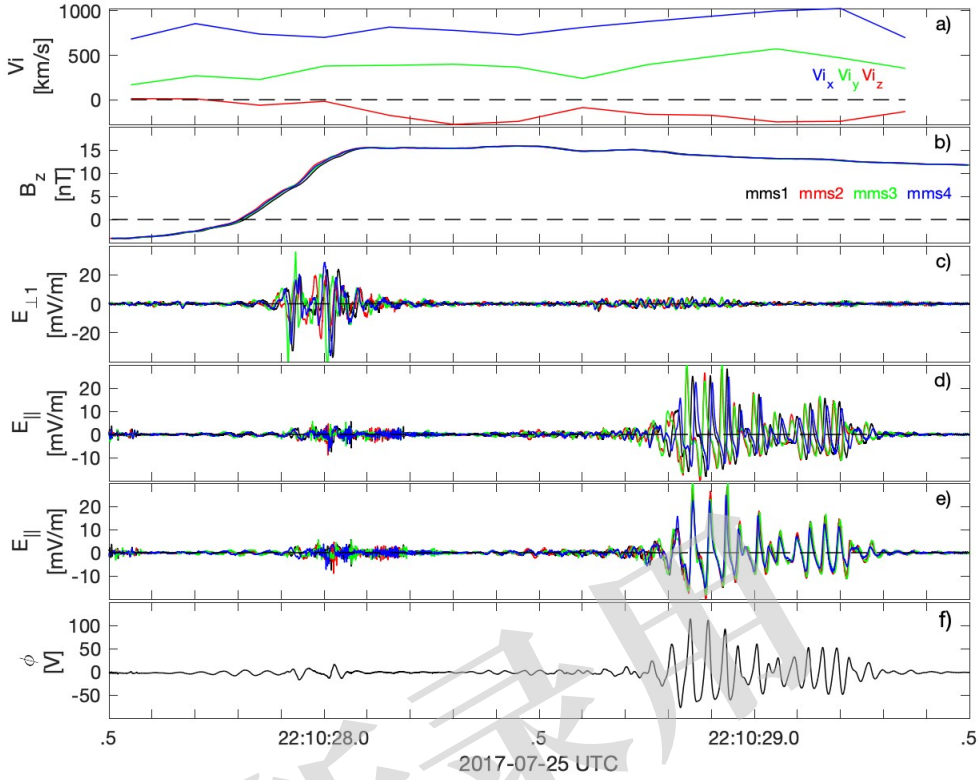


图 1 高速流锋面后的静电孤立波观测

Fig. 1 Observations of electrostatic solitary waves behind a jet front

为了详细说明如何分析波动性质，我们展示一个具体事例，如图 1 所示。这个事件是 MMS 卫星在 2017 年 7 月 25 日 22:10:29.0 UT 左右探测到，MMS 此时处在一个地向高速流中，其地向速度峰值接近 1000 km/s（图 1a 所示）。MMS 在 22:10:28.0 UT 左右穿过高速流锋面，观测到磁场 Bz 分量的突然增强（从约-5 nT 陡增到 15 nT，如图 1b 所示）。在高速流锋面后段的强磁场区域（即通量堆积区）中，4 颗 MMS 卫星都探测到了平行电场的大幅值双极变化（最显著变化表现为平行电场在 22 mV/m 和-18mV/m 间发生反转），即卫星簇穿过一个静电孤立波。这里的静电孤立波具有多个连续的子波，表明此时波动依旧处于初期发展阶段，尚未通过波包融合发展为完全独立的波动形态[29]。4 颗 MMS 卫星观测到的波动形态基本类似，当将四颗卫星探测到的波形进行特定的前后时序移动（相对于 MMS1，MMS2-4 的时序移动分别为+13.3ms，+13.4ms，和-6.9ms），可以发现四个波形几乎重叠在一起（如图 1d 所示）。基

最新录用

于此，我们可以利用时序分析法计算波动的相速度大小，得出 Vph = 820 km/s，接近当地离子热速度。基于得出的波动相速度，我们计算出波动的波长约为 9.5 个德拜半径（当地德拜长度是 1.5 km，电子回旋半径是 14.3 km，离子回旋半径是 681.2 km）。我们进而通过对波动电场进行路径积分，算出波动电势（如图 1e 所示）：我们发现波动内电势差最大接近 200V，对于当地电子而言，其波动势能接近当地电子热能的 7%，说明该波动有可能影响当地电子动力学。

2 统计结果

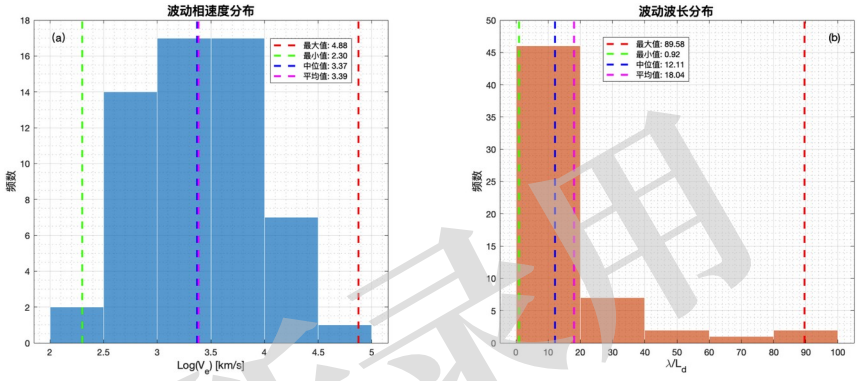


图 2 静电孤立波的统计特性：(a) 波动相速度；(b) 波动波长（德拜长度约化）。

Fig. 2 Statistical properties of electrostatic solitary waves

基于上述研究方法，我们对高速流锋面附近 58 个静电孤立波做了细致分析。我们发现静电孤立波的相速度大小处在一个较宽的范围（如图 2a 所示），从几百公里每秒（接近当地离子热速度），到几万公里每秒（接近当地电子热速度）。这一较宽的速度范围，表明锋面处静电孤立波的产生有诸多不同机制。对于低速（几百公里每秒）静电孤立波，它们往往是由离子-电子束流不稳定性产生；对于高速（几万公里每秒）静电孤立波，它们的产生则不涉及离子，只和电子束流不稳定性有关。同时，我们发现波动的波长长度主要集中在 10-20 个德拜长度（L_d），其约化波长的中位值为 12.11。这与磁层其他区域，如磁鞘中的静电孤立波的典型波长接近[30]。这表明高速流锋面附近的静电孤立波也基本处于较为稳定的相干状态。

针对波动的内禀性质，我们进一步分析波动的相速度，电势，和周期之间的关系。我们发现波动相速度与波动周期大致成反相关，其相关系数为-0.74

最新录用

（图 3a）。这点与波动波长集中于 10-20 个德拜长度的特性一致。同时我们发现波动的电势和其尺度大致成正相关，相关系数达到 0.68（图 3b）。这意味锋面附近的静电孤立波的电场幅值大致相同，大体处在 10-30 mV/m。波动电势和波动速度之间没有呈现明显的相关性（相关系数低于 0.4），但呈现微弱的趋势：较高电势波动倾向于具有较大的相速度。

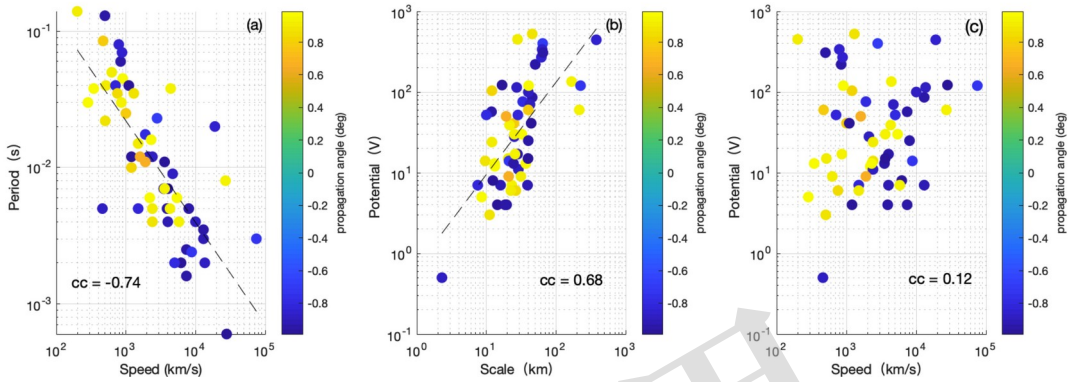


图 3 波动相速度，周期，和电势的关系。(a) 波动周期和相速度的相关性（相关系数 cc = -0.74）；(b) 波动电势和相速度的相关性（相关系数 cc = 0.68）；(c) 波动电势和相速度的相关性（无明显相关性）；色标代表的是波动传播方向和背景磁场夹角的余弦值，接近 1 代表波动传播方向与磁力线平行，接近-1 代表波动传播方向与磁力线反平行。

Fig. 3 Relation between wave phase speed, period, and potential

我们进一步分析波动性质（电势和相速度）与局地等离子体参量（如粒子温度和密度等）的关系，如图 4 所示。我们发现波动电势与局地电子温度呈现一定的正相关，相关系数达到 0.62（图 4a）。这表明波动电势能够对当地电子实现局地加热。而波动电势与离子温度没有呈现清晰的相关性（图 4b），即波动对局地离子加热没有显著贡献，这一点也符合静电孤立波的尺度与离子惯性尺度有极大差距的事实。我们发现波动电势与当地电子密度呈现清晰的反相关关系（图 4c），相关性系数达到-0.44，意味着在低密度区域波动的电势会更高。电势-密度的相关性可以从波动尺度理解：由于波动波长基本维持在 10-20 个德拜半径，密度越低，德拜半径会越大，因而由波动电场路径积分而来的波动电势也会越高。波动电势与局地磁场强度没有明显的相关性（图 4d），但是我们发现，波动事例大部分出现在磁场较强的区域，也就是波动倾向于出现在高速流锋面后的通量堆积区，而出现在锋面前段和锋面上的比例较低。这表明电子束流更容易在锋面后形成，与以往研究的结论和推测一致。

录用录用

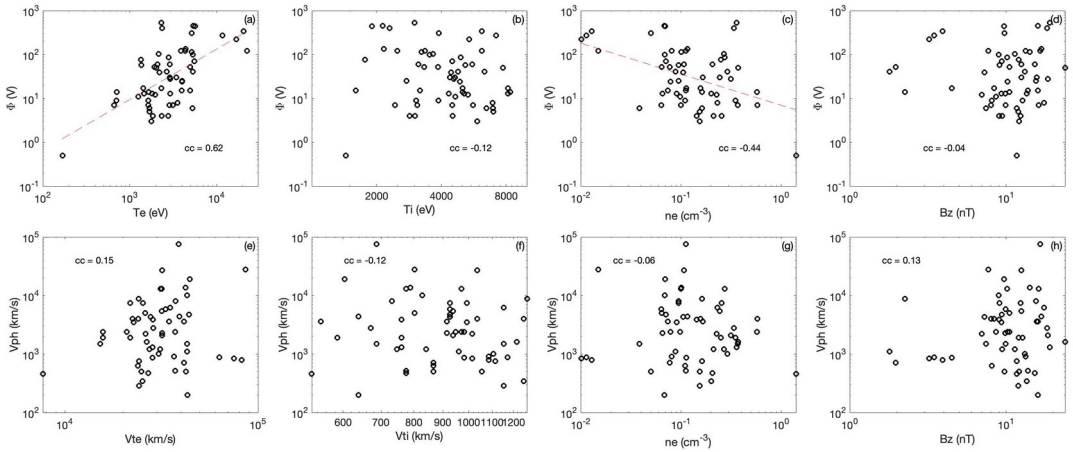


图 4 波动性质与局地等离子体参数的相关性。(a) 波动电势和电子温度的相关性（相关系数 cc = 0.62）；(b) 波动电势和离子温度的相关性（无明显相关性）；(c) 波动电势和电子密度的相关性（相关系数 cc = -0.44）；(d) 波动电势和磁场 Bz 分量的相关性（无明显相关性）；(e) 波动相速度和电子热速度的相关性（无明显相关性）；(f) 波动相速度和离子热速度的相关性（无明显相关性）；(g) 波动电势和电子数密度的相关性（无明显相关性）；(h) 波动电势和磁场 *Bz* 的相关性（无明显相关性）。

Fig. 4 Correlation between wave properties and local plasma parameters

我们发现波动相速度与当地电子热速度没有明显相关性（图 4e），这与上面揭示的波动相速度-电势不相关和电势-温度弱相关这一特征一致。波动相速度基本都小于局地电子热速度，只有极少波动事例中出现波动相速度超过电子热速度的情况。在高速流内，由于通常只有单电子束流不稳定性可以产生相速度超过局地电子热速度的静电孤立波，所以锋面附近静电孤立波的相速度-电子热速度比较关系表明：静电孤立波的产生通常不是源于单电子束流不稳定性，而更多源于电子-离子束流或电子对流不稳定性。波动相速度与离子热速度也没有呈现明显的相关性（图 4f）。最后，波动相速度与当地电子密度和磁场强度都没有明显的相关性（图 4g 和 4h）。

3 结论与展望

本研究基于 MMS 卫星任务提供的高时间分辨率数据，对地球磁尾高速流中的静电孤立波进行了深入分析。通过时序分析法，精确测量了波动的相速度以及电势，并探讨了波动性质与等离子体参数之间的关联性。我们发现：1）静电孤立波的传播速度跨越较大的范围，从几百公里每秒（接近离子热速度）到几万公里每秒（接近电子热速度）；2）静电孤立波的周期和传播速度成反比，即

其空间尺度变化范围较小，通常在 10-20 个德拜半径；3）静电孤立波的电势与波动的空间尺度成正比。同时，局地物理参量相关性揭示，波动主要出现在锋面后的强磁场区域，即通量堆积区内，说明锋面后的强磁场区域更容易形成电子束流；最后我们发现，波动电势与局地电子温度成正相关，意味着静电孤立波-电子相互作用有助于当地电子加热，而对当地离子加热没有显著影响。

本研究所揭示出的波动性质为理解高速流锋面处静电孤立波的形成和演化提供了重要依据。特别是，波动相速度的分布特征意味着锋面处静电孤立波的产生机制有诸多类型，比如离子-电子双流（布努曼）不稳定性和电子束流不稳定性；且电子单束流不稳定性贡献的比例较低。这为理解高速流锋面处场向电子束流的形成和发展提供了重要参考。同时，我们发现高速流锋面附近的静电孤立波的尺度与磁层其他区域，如磁鞘中的静电孤立波的典型波长接近，这表明高速流锋面附近的静电孤立波也基本处于较为稳定的相干状态，进而可以伴随锋面传播至近地空间，影响近地空间电子动力学。因此后续需要进一步结合数值模拟和卫星观测探究这些波动对近地空间环境的影响。

最新录用

参考文献

[1] CAO J B, MA Y D, PARKS G, *et al*. Joint observations by Cluster satellites of bursty bulk flows in the magnetotail[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A4): A04206. DOI: 10.1029/2005JA011322

[2] CAO J B, MA Y D, PARKS G, *et al*. Kinetic analysis of the energy transport of bursty bulk flows in the plasma sheet[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(1): 313-320. DOI: 10.1029/2012JA018351

[3] CAO J B, REN G M, MA Y D. Kinetic analysis of the energy transport of two-flow components in the plasma sheet[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(8): 6730-6739. DOI: 10.1029/2019JA026681

[4] CAO J B, YAN C X, DUNLOP M, *et al*. Geomagnetic signatures of current wedge produced by fast flows in a plasma sheet[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A8): A08205. DOI: 10.1029/2009JA014891

[5] YU Y Q, CAO J B, FU H S, *et al*. The effects of bursty bulk flows on global-scale current systems[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(6): 6139-6149. DOI: 10.1002/2017JA024168

[6] ZHENG H, FU S Y, ZONG Q G, *et al*. Observations of ionospheric electron beams in the plasma sheet[J]. *Physical Review Letters*, 2012, **109**(20): 205001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.205001

[7] RUNOV A, ANGELOPOULOS V, SITNOV M I, *et al*. THEMIS observations of an earthward-propagating dipolarization front[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(14): L14106. DOI: 10.1029/2009GL038980

[8] LIU C M, CAO J B, POLLOCK C J. Energy partition and balance at dipolarization fronts[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(20): e2022GL100239. DOI: 10.1029/2022GL100239

[9] SUN W J, FU S Y, PARKS G K, *et al*. Field-aligned currents associated with dipolarization fronts[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, **40**(17): 4503-4508. DOI: 10.1002/grl.50902

[10] BIRN J, HESSE M, NAKAMURA R, *et al*. Particle acceleration in dipolarization events[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(5): 1960-1971. DOI: 10.1002/JGRA.50132

[11] LIU C M, FU H S, XU Y, *et al*. Electron-scale measurements of dipolarization front[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(10): 4628-4638. DOI: 10.1029/2018GL077928

[12] ZHONG Z H, DENG X H, ZHOU M, *et al*. Energy conversion and dissipation at dipolarization fronts: a statistical overview[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(22): 12693-12701. DOI: 10.1029/2019GL085409

[13] YAO Z H, RAE I J, GUO R L, *et al*. A direct examination of the dynamics of dipolarization fronts using MMS[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(4): 4335-4347. DOI: 10.1002/2016JA023401

[14] ZHOU X Z, RUNOV A, ANGELOPOULOS V, *et al*. On the acceleration and anisotropy of ions within magnetotail dipolarizing flux bundles[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(1): 429-442. DOI: 10.1002/2017JA024901

[15] LIU C M, VAIVADS A, KHOTYAINTSEV Y V, *et al*. Cross-scale dynamics driven by plasma jet braking in space[J]. *The Astrophysical Journal*, 2022, **926**(2): 198. DOI: 10.3847/1538-4357/ac4979

[16] WANG L, HUANG C, CAO X, *et al*. Magnetic energy conversion and transport in the terrestrial magnetotail due to dipolarization fronts[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(10): e2020JA028568. DOI: 10.1029/2020JA028568

[17] LIU C M, FU H S, LIU Y Y, *et al*. Kinetics of magnetic hole behind dipolarization front[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(10): e2021GL093174. DOI: 10.1029/2021GL093174

[18] LIU C M, VAIVADS A, GRAHAM D B, *et al*. Ion-beam-driven intense electrostatic solitary waves in reconnection jet[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(22): 12702-12710. DOI: 10.1029/2019GL085419

[19] HUANG S Y, ZHOU M, DENG X H, *et al*. Kinetic structure and wave properties associated with sharp dipolarization front observed by Cluster[J]. *Annales Geophysicae*, 2012, **30**(1): 97-107. DOI: 10.5194/ANGEO-30-97-2012

[20] DENG X H, ASHOUR-ABDALLA M, ZHOU M, *et al*. Wave and particle characteristics of earthward electron injections associated with dipolarization fronts[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A9): A09225. DOI: 10.1029/2009JA015107

最新录用

[21] ZHOU M, ASHOUR-ABDALLA M, DENG X H, *et al*. THEMIS observation of multiple dipolarization fronts and associated wave characteristics in the near-Earth magnetotail[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(20): L20107. DOI: 10.1029/2009GL040663

[22] GE Y S, MCFADDEN J P, RAEDER J, *et al*. Case studies of mirror-mode structures observed by THEMIS in the near-Earth tail during substorms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A1): A01209. DOI: 10.1029/2010JA015546

[23] ZHOU M, NI B B, HUANG S Y, *et al*. Observation of large-amplitude magnetosonic waves at dipolarization fronts[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(6): 4335-4347. DOI: 10.1002/2014JA019796

[24] WU M Y, LU Q M, HUANG C, *et al*. Transverse instability and perpendicular electric field in two-dimensional electron phase-space holes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A10): A10245. DOI: 10.1029/2009JA015235

[25] 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

[26] RUSSELL C T, ANDERSON B J, BAUMJOHANN W, *et al*. The Magnetospheric Multiscale magnetometers[J]. *Space Science Reviews*, 2016, **199**(1/2/3/4): 189-256. DOI: 10.1007/S11214-014-0057-3

[27] POLLOCK C, MOORE T, JACQUES A, *et al*. Fast plasma investigation for Magnetospheric Multiscale[J]. *Space Science Reviews*, 2016, **199**(1/2/3/4): 331-406. DOI: 10.1007/S11214-016-0245-4

[28] 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**(1/2/3/4): 167-188. DOI: 10.1007/S11214-014-0115-X

[29] OMURA Y, KOJIMA H, MATSUMOTO H. Computer simulation of electrostatic solitary waves: a nonlinear model of broadband electrostatic noise[J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, **21**(25): 2923-2926. DOI: 10.1029/94GL01605

[30] GRAHAM D B, KHOTYAINTSEV Y V, VAIVADS A, *et al*. Electrostatic solitary waves and electrostatic waves at the magnetopause[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(4): 3069-3092. DOI: 10.1002/2015JA021527

最新录用