

LIAO Zedong, LIU Si, GAO Zhonglei, HE Qian, LI Tong, SHANG Xiongjun. Magnetospheric Multiscale Observation of Electromagnetic Ion Cyclotron Wave Modulated by ULF Wave in Outer Magnetosphere (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, 42(2): 206–215. DOI:10.11728/cjss2022.02.210204018

日侧外磁层 ULF 波调制 EMIC 波的 MMS 观测

廖泽冬 刘 斯 高中磊
何 茜 李 彤 商雄军

(长沙理工大学物理与电子科学学院 长沙 410114)

(湖南省普通高校重点实验室 近地空间电磁环境监测与建模实验室 长沙 410114)

摘 要 磁层多尺度卫星 (MMS-1) 在日侧 06:30 MLT (磁地方时, Magnetic Local Time) 外磁层大于 $2R_e$ (L 为 7.5~10.1) 的范围内观测到多达 21 个波包的准周期性电磁离子回旋波 (EMIC) 事件。超低频 (ULF) 波和能量质子温度各向异性准周期性增强也被同步观测到。频率分析显示, ULF 波的周期、质子各向异性周期和 EMIC 波包的周期非常接近。MMS-4 卫星在约 1 h 后经过附近空间区域, 研究发现随着 ULF 波的幅度减弱, EMIC 波包的准周期性也逐渐减弱。研究结果为 ULF 波在日侧外磁层调制质子各向异性从而产生周期性 EMIC 波包提供了完整的观测证据链。同时, 观测结果进一步证明, 这种 ULF 波调制的 EMIC 波包能够在大于 $2R_e$ 的空间尺度内发生, 且能够持续存在于几个小时以上的时间尺度。

关键词 周期性 EMIC 波, ULF 波, 温度各向异性, MMS 任务

中图分类号 P354

Magnetospheric Multiscale Observation of Electromagnetic Ion Cyclotron Wave Modulated by ULF Wave in Outer Magnetosphere

LIAO Zedong LIU Si GAO Zhonglei
HE Qian LI Tong SHANG Xiongjun

(School of Physics and Electronic Sciences, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114)

(College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410114)

Abstract A quasi-periodic Electromagnetic Ions Cyclotron (EMIC) wave event was reported. The event was observed by the Magnetospheric Multiscale (MMS-1) at dayside (06:30 MLT) in the outer

2021-02-04 收到原稿, 2021-10-28 收到修定稿

E-mail: zedliao@hotmail.com

magnetosphere. EMIC waves with more than 21 wave packets occurred within L value is from 7.5 to 10.1. Ultra-Low Frequency (ULF) waves and the quasi-periodic enhancement of energy protons temperature anisotropy are simultaneously observed. Frequency analysis shows that the period of the ULF wave, the proton anisotropy period and the period of the EMIC wave packet are very close. The MMS-4 satellite passed the very close region about an hour later and found that the quasi-periodicity of the EMIC wave packet decreased as the amplitude of the ULF wave decreased. The current results provide evidences that the ULF wave can modulate the energetic proton anisotropy in the outer magnetosphere at dayside and thus generate periodic EMIC wave packets. Moreover, correlated observations by MMS-1 and MMS-4 show that the ULF-modulation of EMIC waves can occur in a spatial scale that greater than $2 R_e$, and last for several hours.

Key words Quasi-periodic EMIC wave, ULF wave, Thermal anisotropy, Magnetospheric Multiscale mission (MMS)

0 引言

电磁离子回旋波(EMIC)是地球磁层中一种常见的电磁辐射,通常认为 EMIC 波由能量为 $10\sim 100$ keV 的质子的温度各向异性 ($T_{\perp} > T_{\parallel}$)产生的回旋共振激发^[1-5]。EMIC 波的频率被限制在源区内质子回旋频率以下^[6],一般位于 $0.1\sim 5$ Hz 或连续脉动 $1\sim 2$ 范围内。地球磁层中观测到的 EMIC 波通常分布在三个不同的频段:氢(H^+)带、氦(He^+)带和氧(O^+)带。 H^+ 带的 EMIC 波频率位于氢离子和氦离子的回旋频率之间, He^+ 带的 EMIC 波频率位于氦离子和氧离子的回旋频率之间,而 O^+ 带的 EMIC 波频率小于氧离子的回旋频率。在地球内磁层中,激发 EMIC 波的质子温度各向异性主要由在磁暴或亚暴期间注入的能量质子产生。在外磁层中,激发日侧 EMIC 波的质子温度各向异性主要由磁层压缩产生^[7-11]。在压缩磁场中,Betatron 加速会造成温度各向异性增加^[12],进而激发 EMIC 波;投掷角接近 90° 的粒子运动轨迹遵循磁场强度的等值线,具有更小投掷角的粒子轨道更圆,导致离子出现漂移壳分裂^[13],而漂移壳分裂会导致垂直温度升高至大于平行温度,使得粒子呈现各向异性分布,从而激发 EMIC 波。最近的研究工作还发现太阳风负压间断可以导致 EMIC 波动的消失^[14]。EMIC 波能够影响磁层内粒子的动力学演化过程,例如散射磁层中的相对论电子^[15-23]、加热磁层中的冷电子^[24-26]、加热磁层中的冷离子^[27,28]和造成环电流离子的损失^[29-31]。

ULF 波对多种磁层等离子体波动具有显著的调制作用^[32]。研究表明,EMIC 波经常与 Pc 5 波段的 ULF 波动同时出现^[33,34],且通过 Pc 4~5 ULF 波对 EMIC 波进行调制,这是产生 EMIC 准周期性的重要机制^[35,36]。Mursula 等^[37]发现在 L 为 $5.6\sim 6.6$ 区域观测的周期性 EMIC 波事件期间,地面上观察到强烈的 Pc 3~4 波,其周期与观察到的 EMIC 波的调制周期非常吻合。Loto'Aniu 等^[38]使用 CRRES 航天器测得的磁场数据,计算了位于 L 为 $5.2\sim 6.3$ 区域的周期性 Pc 1 EMIC 波与同时发生的 Pc 5 ULF 波之间的频率和相位关系,结果显示 Pc 1 EMIC 波和 Pc 5 ULF 波具有极好的频率一致性。Kakad 等^[39]通过对 Maitri(Indian Antarctic station)的强 EMIC 波的长周期($39\sim 69$ min)调制和短周期(约 2.4 min)调制的地面观测数据分析,发现长周期调制的 EMIC 波与环电流漂移离子有关,而短周期调制的 EMIC 波与磁场线振荡产生的 Pc 5 ULF 波与有关。Liu 等^[40]通过对 WIND 获得的高分辨率质子动压数据分析发现,太阳风压缩磁层的周期与 EMIC 波的调制周期基本一致,准周期太阳风增强压缩磁层并以快模波传播导致磁力线振荡,从而导致准周期磁场压缩和离散质子各向异性,这为调节 EMIC 波的不稳定性提供了条件。

此前的 ULF 波调制 EMIC 波通常在比较窄的磁壳范围内。本文报道了 MMS-1 和 MMS-4 卫星在 2017 年 2 月 23 日观测到的一个大范围(L 为 $7.5\sim 10.1$)准周期性 EMIC 波事件,通过计算 ULF 波、质

子各向异性与 EMIC 波包之间的周期性, 为 ULF 波在日侧外磁层调制质子各向异性从而产生周期性 EMIC 波包提供了完整的观测证据链, 并讨论了这一调制持续的时间尺度。

1 观测

MMS(Magnetospheric Multiscale)是美国宇航局的项目, 包含 4 颗搭载完全相同仪器的卫星^[41], 于 2015 年 3 月 12 日由一枚运载火箭将其送入预定轨道。卫星轨道可达日侧磁层顶和夜侧磁尾加速区, 最大可达 25 R_e (地球半径)。这 4 颗卫星携带的相同仪器包括磁强计(FGM)^[42,43]、等离子体分析仪(HPCA)^[44]、高能粒子探测器(EPD)、电场仪器以及防干扰设备, 用来全面测量地球磁层的带电粒子和电磁场, 获取的数据具有很好的时间一致性和很高的时空分辨率。本文使用 FGM 检测背景地磁场, FGM 可测量频率范围为 DC 至 64 Hz 的磁场; 通过 HPCA 获得高能粒子数据, HPCA 可准确测量 4 种离子(H^+ , He^{++} , He^+ , O^+)的速度分布。

图 1(a) 显示了来自 OMNI 网站^{*} 2017 年 2 月 23 日的地磁指数。图 1(b)~(f) 为 MMS-1 卫星于 2017 年 2 月 23 日 11:20–12:50 UT(对应于图 1a 中灰色阴影区域)在地球外磁层观测到的准周期性等离子体波动事件, 此时卫星位于日侧(06:00–06:54 MLT)外磁层(L 为 7.5~10.1)中纬度区域, 磁纬度(Magnetic Latitude, MLAT)为 -16° – -14.8° 。在 11:20–12:50 UT 期间, SYM- H 指数在 3~10 nT 之间, 而 AE 指数有一个从 10 nT 快速增长到约 400 nT 的过程, 这表明亚暴期间发生了能量粒子的注入。图 1(b) 给出了卫星上 FGM 观测到的地心–太阳黄道坐标系(GSE)下的背景磁场数据, 其中黑色实线表示背景磁场的总量(由左侧坐标轴标注), 蓝色实线、绿色实线和红色实线分别为提取出的 ULF 波的 x 分量、 y 分量和 z 分量(由右侧坐标轴标注)。磁场 ULF 波的 x 分量呈现出明显的正弦周期性振荡, 该磁场振幅峰值约为 4~8 nT, 周期约为 4 min, 这表明有 Pc 5 频段内的 ULF 波发生。图 1(c) 为 FGM 观测到的 0.1~2 Hz 的等离子体波动磁场功率谱密度(Power Spectral Density, PSD), 其中两条白色实线

分别为氢离子回旋频率和氦离子回旋频率。由图 1(c) 可以看出, 在 f_{cH^+} 和 f_{cHe^+} 之间有 21 个较强的(PSD 最大达到了 $0.1 \text{ nT}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$)等离子体波包出现, 呈现出非常明显的准周期性结构, 并且出现的范围超过了 2 R_e 的区域(L 为 7.5~10.1)。图 1(d)~(f) 给出了由 HPCA 探测的 9 keV, 19 keV 和 32 keV 能量质子在不同投掷角的通量, 其中 9 keV 和 19 keV 的质子在 90° 投掷角附近有明显的通量增强, 即具有明显的温度各向异性, 且这些质子的温度各向异性随着时间也呈准周期性增强。此外, 如图 1(b)~(f) 中的灰色阴影所示, 能量质子温度各向异性的增强对应了 Pc 1 频段波包的出现。

2 分析与讨论

为了进一步分析波包的性质, 利用奇异值分解法(SVD)^[45] 对波谱的性质进行了分析, 结果如图 2 所示。图 2(a) 给出了等离子体波磁场功率谱密度, 其中两条红色实线分别为氢离子回旋频率和氦离子回旋频率。为了让波包更明显, 仅显示了 $\text{PSD} > 0.01 \text{ nT}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$ 的部分, 可以明显看出在这段时间内有 21 个波包存在于 f_{cH^+} 与 f_{cHe^+} 之间。图 2(b)(c) 分别是通过 SVD 分析得到的波传播角和椭圆率, 其中传播角是波矢与地球磁场之间的夹角。由图 2(b) 可以看出, 这些波包的传播角集中在大于 60° 区域, 表明这段时间内波是斜传播。由图 2(c) 可以看出, 所有波包的椭圆率集中在 0° 附近, 表明这段时间内波以线性极化为主。该 Pc 1 波动的频率范围、传播角及极化特征与 Allen 等^[46] 在 2015 年使用 Cluster 卫星对 H^+ 带 EMIC 波在此区域进行的统计研究得到的结果一致。因此, 认为该 Pc 1 波动为 H^+ 带 EMIC 波。

通过 EMIC 波的色散关系和共振条件计算了此事件期间的最小共振能量。色散关系和共振条件如下:

$$k^2 \frac{c^2}{\omega^2} = 1 - \sum_i \frac{\omega_{pi}^2}{\omega^2} \left(\frac{\omega}{\omega - \epsilon_i \Omega_i} \right), \quad (1)$$

$$\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} = \Omega_{cp}. \quad (2)$$

其中: ω 为 EMIC 波频率, ω_{pi} 为带电粒子 i 的等离子体频率, Ω_i 为带电粒子 i 的回旋频率, ϵ_i 为带电粒子

* <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>

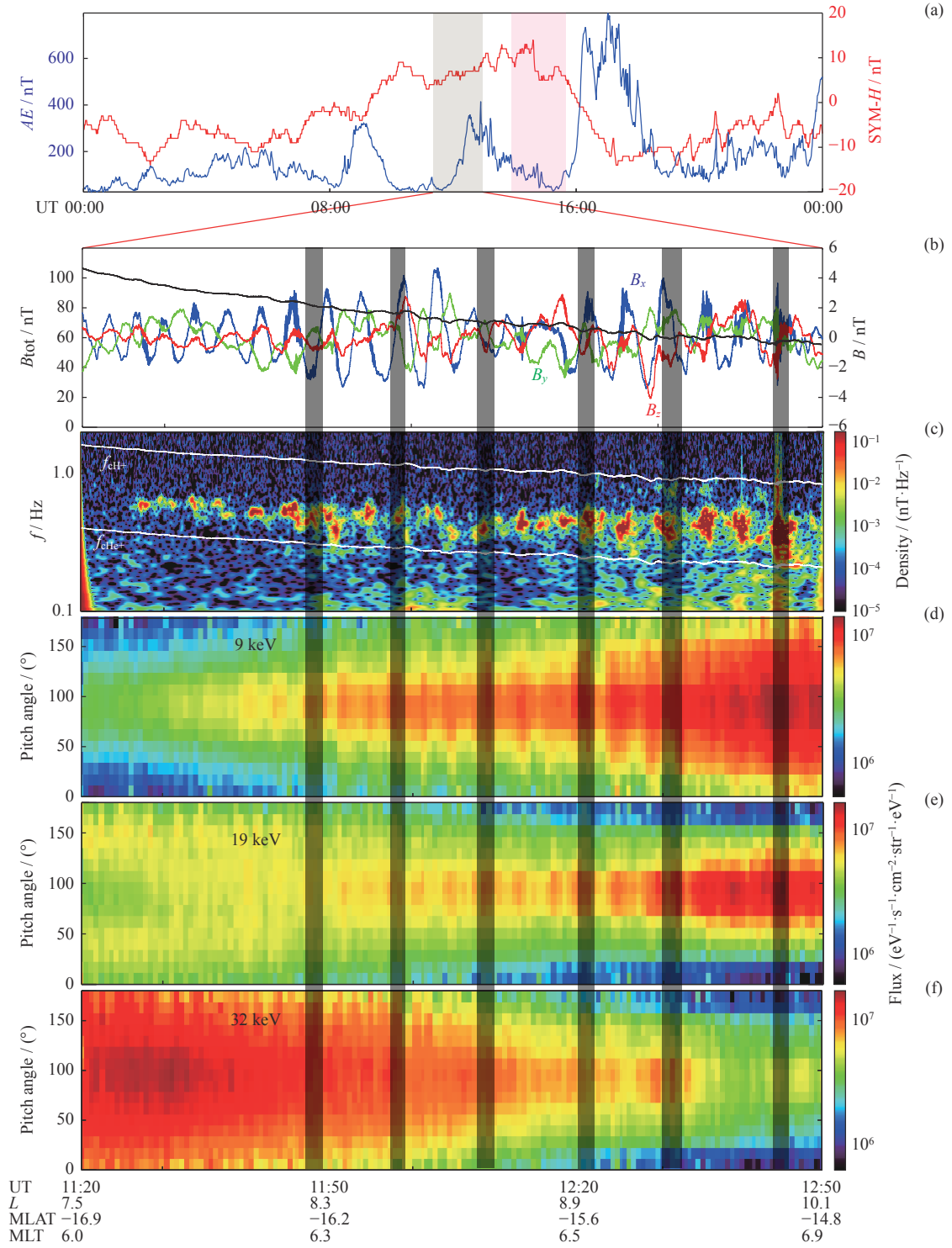


图 1 (a) 2017 年 2 月 23 日的 SYM-H 指数和 AE 指数, 灰色阴影区域为 MMS1 卫星观测时间, 粉色阴影区域为 MMS4 卫星观测时间。(b) GSE 坐标中的磁场波形。(c) 2017 年 2 月 23 日 11:20—12:50 UT 的波观测。

(d)~(f) HPCA 观测的能量质子 (9 keV, 19 keV 和 32 keV) 的投掷角分布

Fig. 1 (a) SYM-H index and AE index on 23 February 2017. The gray shaded area is the observation time of the MMS1 satellite, and the pink shaded area is the observation time of the MMS4 satellite. (b) Magnetic field waveforms in GSE coordinates. (c) Wave observation from 11:20 to 12:50 UT on 23 February 2017. (d)~(f) The pitch angle distributions of energetic protons (9 keV, 19 keV and 32 keV) measured by HPCA

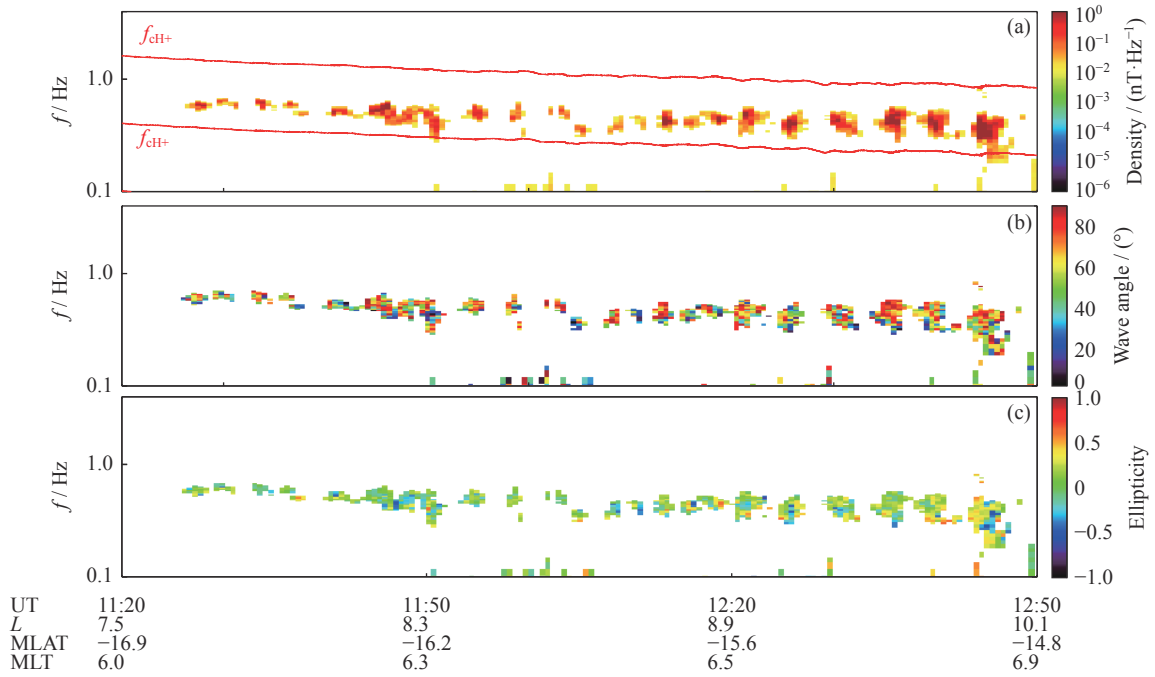


图2 (a) 磁场波功率谱密度, 两条红色实线分别为 H^+ 回旋频率和 He^+ 回旋频率。(b) 通过 SVD 方法得到的波传播角。(c) 通过 SVD 方法得出的波椭圆率

Fig. 2 (a) Magnetic field wave power spectral density. The two solid red lines are H^+ cyclotron frequency and He^+ cyclotron frequency. (b) Wave normal angle obtained by SVD method. (c) Wave ellipticity obtained by SVD method

i 的状态(电子为-1, 离子为+1)。为了简化, 将所有离子设定为质子。 k 为波矢, c 为光速, Ω_{cp} 为质子回旋频率, m 为质子质量。

在此事件期间, 背景磁场大小在 60~110 nT 之间, 如图 1(b) 所示。EMIC 波频率范围为 0.3~0.7 Hz, 如图 1(c) 所示。选取背景磁场 70 nT, EMIC 波中心频率 0.5 Hz(对应于约 12:15 UT 的观测)对最小共振能量进行估算。由于 MMS 卫星有电势控制, 在事件发生时间段内没有提供相关的背景密度数据, 而现有经验密度模型^[47,48] 在外磁层($L>7$)并不可靠, 因此根据 WIND 卫星在拉格朗日点所测得的质子密度, 假设背景等离子体密度为 7 cm^{-3} 。估算出 EMIC 波平行传播的最小共振能量约为 1.21 keV, 本文主要选取 9 keV 质子进行相关研究分析。

为了研究 ULF 波、EMIC 波和质子温度各向异性的周期性, 分别提取了背景的 ULF 波、EMIC 波的包络线和 9 keV 能量质子温度各向异性的变化曲线。提取出 ULF 波的 x 分量进行平滑处理, 得到图 3(a) 所示的 ULF 波。平滑算法如下:

$$R_i = \begin{cases} \frac{1}{w} \sum_{j=0}^{w-1} A_{i+j-w/2}, \\ \frac{(w-1)}{2} \leq i \leq N - \frac{(w+1)}{2}; \\ A_i, & \text{其他.} \end{cases} \quad (3)$$

其中, w 为平滑宽度, N 为 A 中的元素。本文中 ULF 波 x 分量和 EMIC 波包络线的数据个数分别为 43200 和 21600, 平滑宽度设置为 200, 质子各向异性数据中相对变化的数据个数为 155, 平滑宽度设置为 3。

图 3(b) 为 EMIC 波的磁场功率谱(仅显示了大于 $0.001 \text{ nT}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$ 的数据), 其中两条红色实线分别为氢离子回旋频率和氦离子回旋频率。提取出 EMIC 波事件出现时期 f_{cH^+} 和 f_{cHe^+} 之间的功率谱最大值, 再对提取出的最大值取对数得到 EMIC 波包的包络线, 如图 3(b) 中的黑色实线所示(由右侧坐标轴标注)。

图 3(c) 是 9 keV 能量质子的投掷角分布, 其中黑色实线为质子温度各向异性的相对变化(由右侧坐标轴标注)。该相对变化是利用 11:20—12:50 UT 期间投掷角为 87° 的质子通量数据减掉该时间段内整体质子通量变化的线性趋势得到的。图 3(d) 显示了 ULF

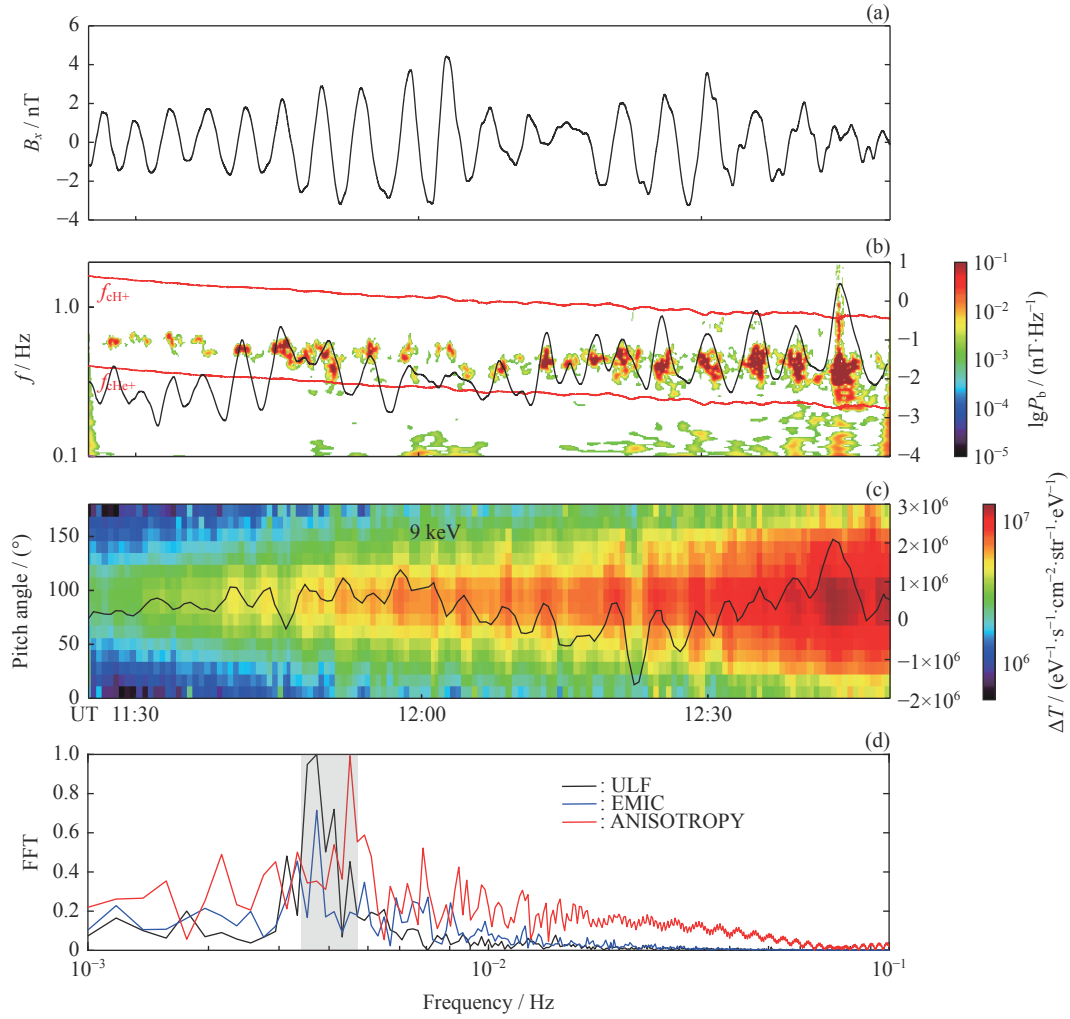


图 3 (a) GSE 坐标系下 ULF 的 x 分量。(b) EMIC 波功率谱密度, 黑线为提取的 EMIC 波的包络线。

(c) 9 keV 质子投掷角分布, 黑线为提取的 9 keV 能量质子温度各向异性的相对变化。(d) ULF 波, EMIC 波包和质子各向异性包络的 FFT 结果

Fig. 3 (a) x component of ULF in GSE coordinate system. (b) The power spectral density of EMIC wave, and the black line is the envelope of the EMIC wave. (c) Temperature anisotropy of 9 keV energy proton, and the black line is the relative change of the temperature anisotropy of the 9 keV energy protons. (d) FFT results for the ULF wave, EMIC wave packets and the proton anisotropy envelop

波(黑色实线)和 EMIC 波(蓝色实线)和质子各向异性(红色实线)经过快速傅里叶变换(FFT)分析后的频谱图。图 3(d) 的频谱分析结果表明, EMIC 波包的调制频率约为 3.8 mHz(周期约为 4.4 min)、ULF 波的频率约为 3.8 mHz(周期约为 4.4 min), 而质子各向异性的变化频率约为 4.4 mHz(周期约为 3.8 min)。频率分析结果显示 ULF 波的周期、质子各向异性周期和 EMIC 波包的周期非常接近, 如图 3(d) 中灰色阴影所示。由于 ULF 波能够调制能量质子, 从而调制 EMIC 波线性增长率。这三者之间的周期性分析

结果表明, 这一大范围的准周期性 EMIC 波包可能是由 ULF 波调制所产生。

图 4 显示了在 14:00–15:40 UT 时 MMS-4 卫星经过附近(L 为 7.5~9.8, MLT 为 6.0~6.7, MLAT 为 -20° – -19.3°)区域的观测结果, 对应于图 1(a) 中的红色阴影区域。此时 SYM- H 指数在 4~12 nT 之间, AE 指数也下降至约 100 nT, 这表明在此时间段内没有明显的磁场扰动。图 4(a) 给出了 FGM 观测到的 GSE 坐标系下的磁场数据。图 4(b) 为 0.1~2 Hz 的等离子体波动磁场功率谱密度, 其中两条白色实线分

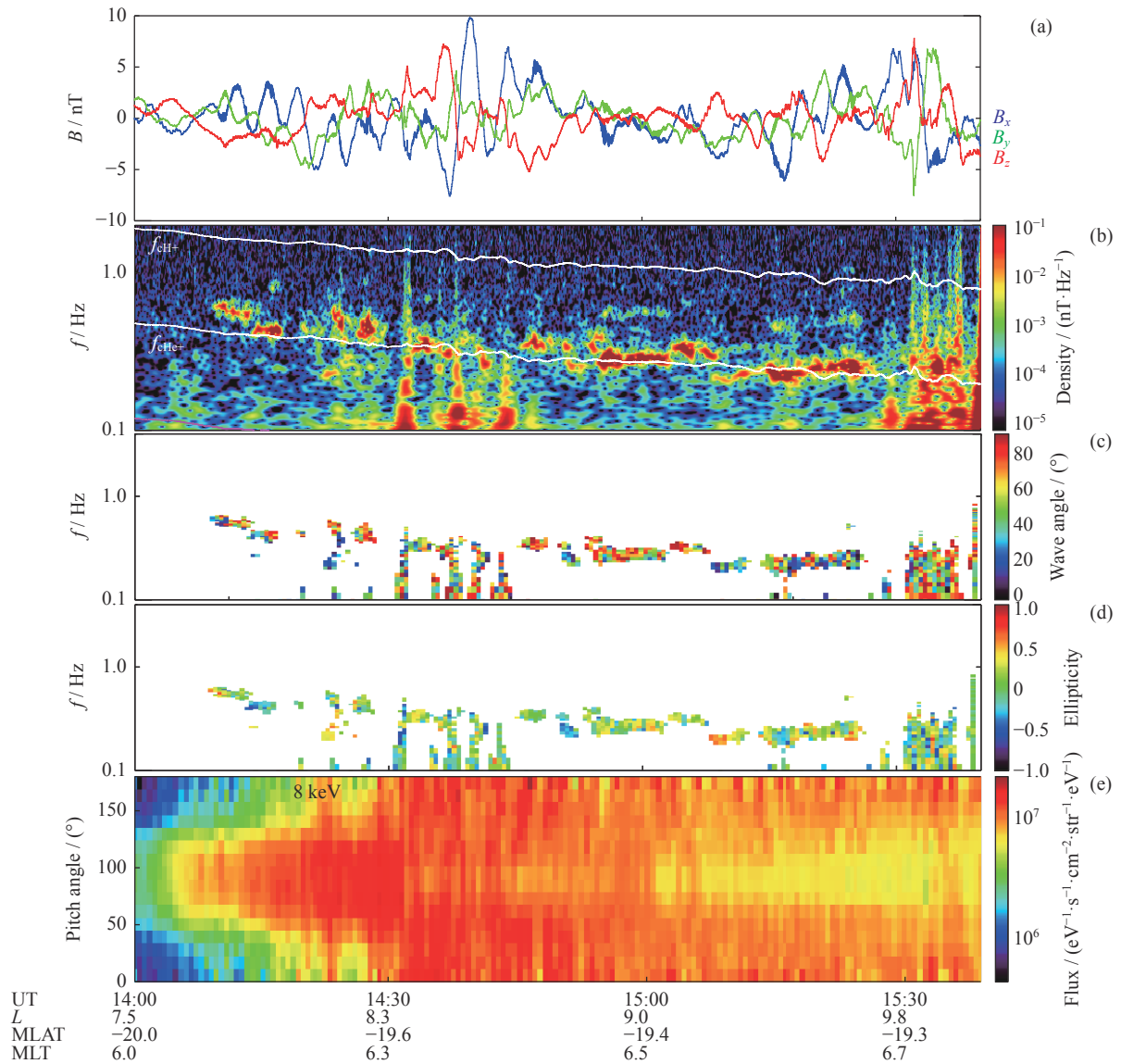


图 4 (a) GSE 坐标中的磁场波形, (b) 用磁通门磁强计测量的波磁场频谱密度, (c) 通过 SVD 方法得出的波传播角, (d) 通过 SVD 方法得出的波椭圆率, (e) 利用 HPCA 测量的能量质子 (8 keV) 的投掷角分布

Fig. 4 (a) Magnetic field waveforms in GSE coordinates. (b) The wave magnetic field spectral density measured by fluxgate magnetometer instrument. (c) Wave propagation angle obtained by SVD method. (d) Wave ellipticity obtained by SVD method. (e) The pitch angle distributions of energetic protons (8 keV) measured by HPCA

别为氢离子回旋频率和氦离子回旋频率。在 14:10—14:30 UT 期间, L 为 7.5~8.3 区域内 ULF 波的 x 分量仍有明显的周期性振荡, 且此时观测到的 Pc 1 波仍具有明显的独立波包; 而在 14:30—15:30 UT 期间, L 为 8.3~9.8 区域内磁场的周期性和正弦性减弱, Pc 1 波包的周期性也明显减弱。图 4(c)(d) 为基于 MMS-4 卫星在此区域观测到的等离子体波磁场功

率谱密度(仅显示了 $\text{PSD} > 0.01 \text{ nT}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$ 的部分), 通过 SVD 方法分析得到的传播角和椭圆率。Pc 1 波动的传播角集中在大于 60° 区域, 椭圆率集中在 0° 附近, 这表明该 Pc 1 波动以斜传播和线性极化为主, 仍符合 H^+ 带 EMIC 波在该区域的特征。图 4(e) 为 HPCA 观测到的 8 keV 质子的投掷角分布, 可以看出能量质子温度各向异性分布不再显著, 尤其在 14:30 UT 后

呈现出蝴蝶形分布。

为了探讨质子蝴蝶型分布的产生原因, 根据文献 [49] 估算了磁层顶的位置, 即

$$r = \begin{cases} (11.4 + 0.013B_z)(D_p)^{-\frac{1}{6.6}}, & B_z \geq 0; \\ (11.4 + 0.14B_z)(D_p)^{-\frac{1}{6.6}}, & B_z < 0. \end{cases} \quad (4)$$

其中 D_p 为太阳风动压, B_z 为行星际磁场。

根据 OMNI 卫星的数据, 2017 年 2 月 23 日 14:37–15:40 UT 的太阳风动压 D_p 主要在 4~5 nPa 之间, 取 $D_p=4.5$ nPa; 在此期间, 行星际磁场 B_z 近似从 10 nT 单调下降至 -8 nT, 其中 14:37 UT, 15:00 UT 和 15:40 UT 时刻的 B_z 分别为 10 nT, 2 nT 和 -3 nT。将 D_p 和三个时刻的 B_z 分别带入式 (4), 计算出 14:30 UT、15:00 UT 和 15:40 UT 三个时刻的日侧磁层顶位置分别为 $r_1=9.18$ 、 $r_2=9.09$ 和 $r_3=8.74$ 。因此, 14:37–15:00 UT 期间, MMS-4 卫星测得的质子漂移轨道可能仍处于磁层内, 蝴蝶型分布可能主要由 EMIC 波散射产生; 而 15:00–15:40 UT 期间, 蝴蝶型分布更加明显, 这可能是磁层顶阴影效应导致的。

MMS-1 和 MMS-4 的联合观测数据表明, ULF 波对 EMIC 波的调制作用能够持续小时量级的时间尺度。

3 结论

报道了 MMS 卫星在 2017 年 2 月 23 日观测到的准周期性 EMIC 波包事件, 通过对观测数据的分析计算, 得到以下结论。

(1) 在 SYM- H 指数为 3~10 nT、 AE 指数大于 400 nT 的地磁条件下, MMS-1 卫星在超过 $2R_e$ 的区域 (L 为 7.5~10.1) 观测到了呈准周期性结构的 21 个 EMIC 波包。

(2) 通过分析 ULF 波、质子各向异性及 EMIC 波的频率关系, 发现 ULF 波 (3.8 mHz)、质子温度各向异性调制 (4.4 mHz) 与周期性 EMIC 波包 (3.8 mHz) 的频率非常接近。对三者之间频率分析的结果表明, 此次大范围准周期性 EMIC 波包可能是由于 ULF 调制质子各向异性, 从而导致产生了周期性 EMIC 波。

(3) MMS-4 卫星 1 h 后在附近区域内的观测表明, 随着磁场振荡的周期性减弱和质子各向异性的减弱, EMIC 波包的周期性也减弱, 表明这种 EMIC 波的 ULF 波调制能够持续几小时以上的时间尺度。

本文为 ULF 波在日侧外磁层调制质子各向异性导致产生周期性 EMIC 波包提供了完整的观测证据链。研究结果进一步证明, 这种 ULF 波调制的 EMIC 波包能够在大于 $2R_e$ 的空间尺度内发生, 且能够持续存在于几个小时以上的时间尺度。

参考文献

- [1] ANDERSON B J, DENTON R E, HO G, *et al.* Observational test of local proton cyclotron instability in the Earth's magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, **101**(A10): 21527-21543
- [2] JORDANOVA V K, WELLING D T, ZAHARIA S G, *et al.* Modeling ring current ion and electron dynamics and plasma instabilities during a high-speed stream driven storm[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**(A9): A00L08
- [3] KENNEL C F, PETSCHKE H E. Limit on stably trapped particle fluxes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1966, **71**(1): 1-28
- [4] ZHANG J C, SAIKIN A A, KISTLER L M, *et al.* Excitation of EMIC waves detected by the Van Allen Probes on 28 April 2013[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(12): 4101-4108
- [5] ZHOU Q H, XIAO F L, SHI J K, *et al.* Excitation of electromagnetic ion cyclotron waves under different geomagnetic activities: THEMIS observation and modeling[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, **118**(1): 340-349
- [6] WANG D D, YUAN Z G, YU X D, *et al.* Statistical characteristics of EMIC waves: Van Allen Probe observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, **120**(6): 4400-4408
- [7] ANDERSON B J, HAMILTON D C. Electromagnetic ion cyclotron waves stimulated by modest magnetospheric compressions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, **98**(A7): 11369-11382
- [8] ENGBRETSON M J, PETERSON W K, POSCH J L, *et al.* Observations of two types of Pc 1-2 pulsations in the outer dayside magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107**(A12): 1451
- [9] ENGBRETSON M J, POSCH J L, CAPMAN N S S, *et al.* MMS, Van Allen Probes, GOES 13, and ground-based magnetometer observations of EMIC wave events before, during, and after a modest interplanetary shock[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2018, **123**(10): 8331-8357
- [10] USANOVA M E, MANN I R, BORTNIK J, *et al.* THEMIS observations of electromagnetic ion cyclotron wave occurrence: dependence on AE, SYMH, and solar wind dynamic pressure[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**(A10): A10218
- [11] USANOVA M E, MANN I R, KALE Z C, *et al.* Conjugate ground and multisatellite observations of compression-

- related EMIC Pc1 waves and associated proton precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**(A7): A07208
- [12] GRISON B, SANTOLÍK O, LUKAČEVIČ, *et al.* Occurrence of EMIC waves in the magnetosphere according to their distance to the magnetopause[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(3): e2020GL090921
- [13] USANOVA M E, MANN I R. Understanding the role of EMIC waves in radiation belt and ring current dynamics: recent advances[M]//BALASIS G, DAGLIS I A, MANN I R. *Waves, Particles, and Storms in Geospace: A Complex Interpla.* Oxford: Oxford University Press, 2016
- [14] LIU N G, SU Z P, GAO Z L, *et al.* Can solar wind compressive discontinuities suppress magnetospheric electromagnetic ion cyclotron waves associated with fresh proton injections?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(17): e2020GL090296
- [15] LIU K J, LEMONS D S, WINSKE D, *et al.* Relativistic electron scattering by electromagnetic ion cyclotron fluctuations: test particle simulations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**(A4): A04204
- [16] LIU K J, WINSKE D, GARY S P, *et al.* Relativistic electron scattering by large amplitude electromagnetic ion cyclotron waves: the role of phase bunching and trapping[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**(A6): A06218
- [17] LORENTZEN K R, MCCARTHY M P, PARKS G K, *et al.* Precipitation of relativistic electrons by interaction with electromagnetic ion cyclotron waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**(A3): 5381-5389
- [18] NI B B, CAO X, SHPRITS Y Y, *et al.* Hot plasma effects on the cyclotron-resonant pitch-angle scattering rates of radiation belt electrons due to EMIC waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(1): 21-30
- [19] SUMMERS D, THORNE R M. Relativistic electron pitch-angle scattering by electromagnetic ion cyclotron waves during geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(A4): 1143
- [20] SU Z P, ZHU H, XIAO F L, *et al.* Latitudinal dependence of nonlinear interaction between electromagnetic ion cyclotron wave and radiation belt relativistic electrons[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, **118**(6): 3188-3202
- [21] USANOVA M E, DROZDOV A, ORLOVA K, *et al.* Effect of EMIC waves on relativistic and ultrarelativistic electron populations: ground-based and Van Allen Probes observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(5): 1375-1381
- [22] WANG B, SU Z P, ZHANG Y, *et al.* Nonlinear Landau resonant scattering of near equatorially mirroring radiation belt electrons by oblique EMIC waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(8): 3628-3636
- [23] ZHANG X J, LI W, MA R M, *et al.* Direct evidence for EMIC wave scattering of relativistic electrons in space[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2016, **121**(7): 6620-6631
- [24] THORNE R M, HORNE R B. The contribution of ion-cyclotron waves to electron heating and SAR-arc excitation near the storm-time plasmapause[J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, **19**(4): 417-420
- [25] YUAN Z G, XIONG Y, HUANG S Y, *et al.* Cold electron heating by EMIC waves in the plasmaspheric plume with observations of the Cluster satellite[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(6): 1830-1837
- [26] ZHOU Q H, XIAO F L, YANG C, *et al.* Observation and modeling of magnetospheric cold electron heating by electromagnetic ion cyclotron waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, **118**(11): 6907-6914
- [27] THORNE R M, HORNE R B. Modulation of electromagnetic ion cyclotron instability due to interaction with ring current O^+ during magnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(A7): 14155-14163
- [28] ZHANG J C, KISTLER L M, MOUKIS C G, *et al.* A statistical study of EMIC wave-associated He^+ energization in the outer magnetosphere: Cluster/CODIF observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**(A11): A11201
- [29] JORDANOVA V K, FARRUGIA C J, THORNE R M, *et al.* Modeling ring current proton precipitation by electromagnetic ion cyclotron waves during the May 14-16, 1997, storm[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(A1): 7-22
- [30] XIAO F L, CHEN L X, HE Y H, *et al.* Modeling for precipitation loss of ring current protons by electromagnetic ion cyclotron waves[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, **73**(1): 106-111
- [31] XIAO F L, YANG C, ZHOU Q H, *et al.* Nonstorm time scattering of ring current protons by electromagnetic ion cyclotron waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**(A8): A08204
- [32] LIU N G, SU Z P, GAO Z L, *et al.* Magnetospheric chorus, exohiss, and magnetosonic emissions simultaneously modulated by fundamental toroidal standing Alfvén waves following solar wind dynamic pressure fluctuations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(4): 1900-1910
- [33] BARFIELD J N, MCPHERRON R L. Investigation of interaction between Pc 1 and 2 and Pc 5 micropulsations at the synchronous orbit during magnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, **77**(25): 4707-4719
- [34] MALTZEVA N, TROITSKAYA V A, SCHEPETNOV R, *et al.* PC 4-PC 1 magnetic pulsations at synchronous orbit and their relation to pulsations on the ground[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, **87**(A12): 10439-10448
- [35] PLYASOVA-BAKOUNINA T A, KANGAS J, MURSULA K, *et al.* Pc 1-2 and Pc 4-5 pulsations observed at a network of high-latitude stations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, **101**(A5): 10965-10973

- [36] MURSULA K, BRÄYSS T, NISKALA K, *et al.* Pc1 pearls revisited: Structured electromagnetic ion cyclotron waves on Polar satellite and on ground[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(A12): 29543-29553
- [37] MURSULA K, RASINKANGAS R, BÖSINGER T, *et al.* Nonbouncing Pc 1 wave bursts[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(A8): 17611-17624
- [38] LOTO'ANIU T M, FRASER B J, WATERS C L. The modulation of electromagnetic ion cyclotron waves by Pc 5 ULF waves[J]. *Annales Geophysicae*, 2009, **27**(1): 121-130
- [39] KAKAD A, KAKAD B, OMURA Y, *et al.* Modulation of electromagnetic ion cyclotron waves by Pc5 ULF waves and energetic ring current ions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2019, **124**(3): 1992-2009
- [40] LIU S, XIA Z Y, CHEN L J, *et al.* Magnetospheric Multiscale Observation of quasiperiodic EMIC waves associated with enhanced solar wind pressure[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(13): 7096-7104
- [41] BURCH J L, MOORE T E, TORBERT R B, *et al.* Magnetospheric multiscale overview and science objectives[J]. *Space Science Reviews*, 2016, **199**(1/2/3/4): 5-21
- [42] TORBERT R B, RUSSELL C T, MAGNES W, *et al.* The FIELDs instrument suite on MMS: scientific objectives, measurements, and data products[J]. *Space Science Reviews*, 2016, **199**(1/2/3/4): 105-135
- [43] 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
- [44] YOUNG D T, BURCH J L, GOMEZ R G, *et al.* Hot Plasma Composition Analyzer for the Magnetospheric Multiscale Mission[J]. *Space Science Reviews*, 2016, **199**(1/2/3/4): 407-470
- [45] SANTOLÍK O, PARROT M, LEFEUVRE F. Singular value decomposition methods for wave propagation analysis[J]. *Radio Science*, 2003, **38**(1): 1010
- [46] ALLEN R C, ZHANG J C, KISTLER L M, *et al.* A statistical study of EMIC waves observed by Cluster: 1. Wave properties[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, **120**(7): 5574-5592
- [47] SHEELEY B W, MOLDWIN M B, RASSOUL H K, *et al.* An empirical plasmasphere and trough density model: CRRES observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(A11): 25631-25641
- [48] CARPENTER D L, ANDERSON R R. An ISEE/Whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**(A2): 1097-1108
- [49] SHUE J H, SONG P, RUSSELL C T, *et al.* Magnetopause location under extreme solar wind conditions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(A8): 17691-17700

(责任编辑: 孙伟英)