TC-2/中性原子成像仪观测到等离子体片纵向振荡

路立 S. McKenna-Lawlor S. Barabash^③ 刘振兴 曹晋滨 J. Balaz
K. Kudela T. L. Zhang C. M. Carr

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080; Space Technology Ireland, National University of Ireland, Maynooth, Co. Kildare, Ireland; Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden; ④ Institute of Experimental Physics, Kosice, Slovakia; Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Graz, Austria; Imperial College of Science, London, United Kingdom.

*E-mail: luli@cssar.ac.cn

摘要 2005年8月24日磁暴期间($Dst = -219$ nT), TC-2卫星上的中性原子成像仪(NUADU)观测到了绕近地等离子体片磁力线作螺旋运动的全空间 4π 立体角离子通量分布. 在TC-2卫星历时34 min的多次穿越等离子体片过程中, 多个能量离子束事件均具有绕磁力线呈现两个对称环状离子通量分布特征. 在每一次穿越等离子体片过程中低频波探测器(LFEW/TC-2)都探测到了频率略高于低混杂波模的哨声波模合声的增强. 比较离子投掷角分布与磁场, 我们发现场向能量离子通量增强总伴随有等离子体片磁力线的尾向拉伸; 垂直磁力线方向的能量离子通量增强却伴随有等离子体片磁力线的地向压缩, 并出现总磁场强度的峰值. 由于平行和垂直磁力线的离子通量增强是间歇性地交替出现, 探测数据揭示了一种近地等离子体片磁力线的纵向振荡(磁力线的尾向拉伸和地向收缩)过程, 这有助于在近地等离子体片区域形成离子与场的相互作用区, 从而触发磁暴期间的连续极光亚暴.

关键词 近地等离子体片 投掷角分布 能量离子通量 哨声波模合声

许多工作表明地磁活动期间在磁尾经常可以观测到能量离子通量增强. 这种各向异性的能量离子通常具有明显的束流特性, 观测特征为地、尾向、或横越磁尾的能量离子流^[1~4]. 本文中我们报道的是2005年8月24日磁暴期间TC-2卫星在午夜晨侧, 约 $-7R_E$, 近地等离子体片区穿越等离子体片过程中中性原子成像仪^[5]记录的约34 min的能量离子束流的 4π 立体角通量分布和演化过程.

当TC-2卫星穿越近地等离子体片时, 平行和垂直磁场的能量离子通量交替处于主导地位. 我们比较同一卫星上其它载荷(如磁强计和低频波探测器)的探测数据发现当平行磁场的离子通量占主导地位时伴随有总磁场强度的减小和磁场的 X 分量增强. 这意味着等离子体片区的磁力线尾向拉伸. 另一方面, 当垂直磁场的离子通量占主导地位时伴随有磁场的 Y 和 Z 分量增加, 并产生的总磁场强度峰值, 这可以判断为等离子体片磁力线的地向压缩过程.

1 仪器和观测

TC-2卫星上的中性原子成像仪^[5]装有16个固体

半导体探测器, 它们均匀分布在 180° 仰角平面内, 并利用卫星自旋把 360° 方位角平面分成128个数据采集扇区. 因此, 每个卫星自旋周(周期为4 s)中性原子成像仪可以扫描全空间 4π 立体角, 并获得一幅 16×128 像素的粒子通量分布图. 探测分布的每个像素对应 $11.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的相同空间视场. 为了得到更好的统计效果仪器允许选择1~32个卫星自旋周的积分通量作为一幅粒子通量分布图记录.

由于中性原子成像仪采用了6 kV的离子偏转高压, 仪器的第4能道可以记录能量大于180 keV带电粒子的局地通量分布.

2005年8月24日世界时11:45:03到12:19:30, 在卫星穿越等离子体片过程中中性原子成像仪的第四能道记录了251幅离子通量分布图. 这些图中带电粒子通量绕磁力线的环状立体角分布和变化特征给出了离子束流的时间演化过程.

我们选择其中代表演化过程的10幅, 如图1. 每幅图的采集积分时间为8 s. 图象采集过程中地磁活动的 Dst 指数为 -219 nT. TC-2卫星在午夜晨侧穿越等离子体片的具体轨道位置(GSM坐标)用图2表示.

2007-01-10 收稿, 2007-01-23 接受

国家自然科学基金(批准号: 40674083, 40390150)、国家重点实验室研究基金(批准号: 40523006)和斯洛伐克研究发展基金(批准号: APVV-51-053805)资助项目
<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/CSB2007-52-5-502>

图 1 2005 年 8 月 24 日 TC-2 卫星上的中性原子成像仪第 4 能道记录的离子通量分布演化系列图

每幅图的横坐标有 128 个格点(表示 128 个像素), 每个格点对应 2.8125° 方位角; 纵坐标有 16 个格点(表示 16 个像素), 每个格点对应 11.25° 仰角. 红色箭头表示方位角向阳位置. $\odot$ 和 $\otimes$ 示局地磁场的方向. 离子通量分布图象的采集 UT 时间标注在每幅图的左下角. 离子通量计数用最上方的彩色标尺表示

图 2 2005 年 8 月 24 日 TC-2 卫星第 827 轨的轨道

(a) X-Y 平面; (b) X-Z 平面, 采用 GSE 坐标, 蓝色粗线示 11:45:03 到 12:19:30 UT 时段, 红色箭头示卫星的运行方向

对称的环状立体角分布位形随等离子体片中磁场变化在 4π 立体角空间的移动使我们确认主要探测成分为带电粒子。

离子投掷角的演化过程用图 3(a) 表示, 其中平行磁场的离子通量 ($0^\circ < \text{投掷角} < 45^\circ$ 和 $135^\circ < \text{投掷角} < 180^\circ$) 与垂直磁场的离子通量 ($45^\circ < \text{投掷角} < 135^\circ$) 有着明显的边界, 很容易区分。为了比较平行磁场的能量离子通量, 垂直磁场的能量离子通量, 磁场和低频波的演化过程, 我们选取相同时段, 并采用时标上下对齐的方式, 把能量离子通量的时间演化曲线、磁场及低频波能谱分别用图 3(b)~(d) 表示, 其中图 3(d) 的颜色代表波能谱密度 (S_D) 的大小, 由其右端的彩色标尺给出。仪器的探测时间 (UT 为世界时) 和卫星位置 (距离为 $R(\text{Re})$, 磁地方时为 $MLT(\text{h})$, 磁纬度为 $Mlat(\text{deg})$, 磁经度为 $L(^\circ)$ 和磁壳指数为 L) 标注在图 3 的下方。图 3 中粉红色竖线穿越等离子体片中心 ($B_x=0$), 橙色竖线穿越磁场 X 分量 (B_x) 的正、负峰值, 代表了时间演化的特征点。这些特征点的能量离子通量分布被选出来代表能量离子投掷角演化过程按时序画在图 1 中。

2 观测数据分析

在观测时段内磁场的 Y 分量始终为负值并在大多数时间里占有主导地位。这表示卫星在晨侧观测到等离子体片向晨侧的偏移和扭曲^[6], 它并不影响我们用磁场的 X 分量来判断卫星在等离子体片中的位置。磁场的 X 分量符号变换意味着卫星相对等离子体片的穿越。

在 8 s 的数据采集周期里我们没有发现一幅图中的能量离子投掷角分布呈现单环结构, 这说明沿磁力线作螺旋运动的平行于磁场的能量离子以约 6000 km/s 的速度在靠近地球两极的两个磁镜点之间往复反跳。

从图 3(a) 和 (b) 可以看出平行磁场的能量离子通量在大部分观测时间里占主导地位, 仅在 11:55 UT 前后约 100 s 时间内垂直磁场的能量离子通量大于平行磁场的能量离子通量, 但在磁场的 X 分量符号变换前 (或后) 都有垂直磁场的能量离子通量增强的现象。

在多数平行磁场的能量离子通量极大时段 (例如: 11:45 到 11:54 UT 和 11:56 到 11:59 UT) 总是对应着总磁场强度 (B_T) 的谷值。在此期间磁场的 Y 和

Z 分量 (B_y 和 B_z) 的绝对值出现持续减小。这表示等离子体片中的磁力线向磁尾方向拉伸。沿磁力线方向运动的能量离子流的惯性力可能对磁力线的尾向拉伸有贡献。另一方面, 磁力线的拉伸也会增加离子的投掷角从高向低扩散, 这也有助于形成平行磁场的能量离子通量的峰值。

垂直磁场的能量离子通量占主导地位期间 (11:54 UT 前后), B_y 和 B_z 的绝对值都增大形成了 B_T 的峰值。此时, 在外力的作用下等离子体片中的磁场被地向压缩, 磁力线由尾向形态向偶极场形态变化, 并伴随有晨向扭转。依据第一绝热不变量守恒, 离子的投掷角从低向高扩散形成了垂直磁场的能量离子通量的峰值。

当 TC-2 卫星接近等离子体片的北边界时, 平行磁场的能量离子通量出现了下一个峰值 (11:59 到 12:04 UT), 伴随着 B_y 和 B_z 的绝对值及 B_T 的持续减小, B_x 的增大, 意味着等离子体片中的磁场再一次被尾向拉伸。而 B_y 绝对值的增大, 以及 B_T 和垂直磁场的能量离子通量极大 (12:06 UT), 出现了又一次等离子体片的压缩。

TC-2 卫星上的低频电磁波探测器^[7] (LFEW) 在等离子体片中心附近探测到频率高于局地低混杂波的哨声波摸合声增强 (图 3(d))。哨声波摸合声增强发生在等离子体片磁场被压缩前后, 并与总磁场强度的谷值出现的区域十分一致 (见图 3 的灰色阴影区域)。此时, 离子的投掷角从高向低扩散增加。当平行磁场的能量离子运动快于离子回旋波传播速度时, 即 $kv_{\parallel} > \omega$, 将会产生离子回旋共振并激发哨声波摸的合声增强。离子的投掷角从高向低扩散可以从图 3(a) 中、3(b) 和 (c) 的阴影部分清楚地看出来。

3 结论

离子投掷角分布演化图展示了地磁活动期间在近地等离子体片区平行与垂直磁场的能量离子通量交替增强, 变换周期在分钟的量级。多仪器联合探测揭示了等离子体片磁场被纵向拉伸和压缩的动力学过程。等离子体片的磁力线振荡 (拉伸和压缩) 伴随着场向能量离子流变化, 有助于在近地等离子体片区建立一个场和离子的相互作用区, 从而支持系列极光亚暴的直接触发。这里提到的等离子体片纵向振荡还需要将来多卫星联合探测进一步证实。

图 3

(a) 投掷角时间演化图, 每个像素离子通量的积分时间为 62.5 ms, 颜色表示通量的大小, 用最上端的彩色标尺表示; (b) 平行磁场离子通量(黑色曲线)和垂直磁场离子通量(红色曲线); (c) 磁场(GSM 坐标系), 黑色曲线为总磁场强度, B_x 为红色曲线, B_y 为绿色曲线, B_z 为蓝色曲线; (d) 低频波能谱, 颜色表示波能谱密度 S_D 的大小, 由其右端的彩色标尺给出, 黄色曲线是当地的离子混杂波频率, 标注为世界时和卫星的位置($R(Re)$ 为距离, $MLT(h)$ 为磁地方时, $Mlat(deg)$ 为磁纬度, $IL(deg)$ 为磁经度, L 为磁壳指数). 粉红色竖线穿越 $B_z=0$, 橙色竖线穿越 B_x 的正负峰值, 它们对应的探测离子分布由图 1 给出. 哨声波模合声增强区域用灰色阴影表示

在上面讨论的观测时段, 由于等离子体片的横向摆动, TC-2 卫星多次穿越等离子体片. 在每次穿越等离子体片中心区我们都探测到高于离子混杂波频率的哨声波模合声增强. 哨声波模合声增强发生在

强离子各向异性区, 并伴随有离子投掷角从高向低扩散, 很可能是离子回旋共振的结果. 哨声波模合声增强也可能与较低能量的离子相关, 有待于进一步的研究论证.

致谢 本文第二作者 S. McKenna-Lawlor 在此感谢爱尔兰工商业对本项研究的支持.

参 考 文 献

- 1 Krimigis S M, Sarris E T. Energetic particle bursts in the earth's magnetotail. In: Akasofu S I, ed. Dynamics of the Magnetosphere. Dordrecht: D Reidel Publishing Co, 1980. 599
- 2 Rouquette S, Jacquey C, Le Contel O, et al. Fast tailward stream observed in the distant tail associated with substorm: A multi-instrument study. Geophys Res Lett, 2000, 27: 3571—3574 [\[DOI\]](#)
- 3 Zong Q G, Fritz T A, Pu Z Y, et al. Cluster observations of earthward flowing plasmoid in the tail. Geophys Res Lett, 2004, 31: L18803 [\[DOI\]](#)
- 4 Slivka M, Kudela K. Anisotropy of proton fluxes in neutral sheet region measured by DOK2 on interball-1. Planet Space Sci, 2005, 53: 217—227 [\[DOI\]](#)
- 5 McKenna-Lawlor S, Balaz J, Barabash S, et al. The energetic NeUtral atom detector unit (NUADU) for China's Double Star mission and its calibration. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A, 2004, 503: 311—322 [\[DOI\]](#)
- 6 Zhang T L, Baumjohann W, Nakamura R. A wavy twisted neutral sheet observed by CLUSTER. Geophys Res Lett, 2002, 29: L1899
- 7 Cao J B, Liu Z X, Yang J Y, et al. First results of low frequency electromagnetic wave detector of TC-2/Double Star Program. Ann Geophysicae, 2005, 23: 2803—2811