0254-6124/2012/32(6)-793–11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Sheng Cheng, Fu Suiyan, Zheng Hao, Bai Xi, Yang Biao, Wang Yongfu. Variation of the B_z component of magnetic field during the front of bursty bulk flows. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(6): 793-803

高速流前端磁场 B_z 分量的变化*

盛 程 傅绥燕 郑 昊 白 曦 杨 彪 王永福

(北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

摘 要 等离子体片高速流在磁层活动中起着重要作用, 其形成机制以及与背景等离子体的相互作用日益引起关注. 本文利用搭载于 Cluster 四颗卫星上的磁场和等离子体观测仪器, 对 2001 和 2002 两年发生在磁尾等离子体片中高速流事件期间的磁场变化进行了统计研究. 结果表明, 在高速流前端, 伴随着等离子体整体速度的增加, 绝大多数高速流前端磁场的 B_z 分量经常出现先短暂减小然后剧烈增大的现象, 符合以往利用 Geotail 卫星观测数据获得的统计特性. 然而个例研究发现 B_z 的下降与上升常常是不对称的, 且 B_z 分量下降的程度并不是总能达到反向的程度, 说明这种变化特征并不一定是存在磁结构的表现. 我们认为更多时候这种磁场的变化特征是高速流挤压背景等离子体磁场造成的, 是相互作用的结果. 当偶极化锋面形成后, 由类似间断面的磁场界面反射的热离子产生抗磁效应, 可能对 B_z 下降形成部分贡献, 而 B_z 增加则是高速流携带磁通量堆积的效果.

关键词 等离子体片, 高速流, 背景等离子体, 磁结构

中图法分类号 P 353

Variation of the B_z Component of Magnetic Field During the Front of Bursty Bulk Flows

SHENG Cheng FU Suiyan ZHENG Hao BAI Xi
YANG Biao WANG Yongfu

(*School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing* 100871)

Abstract Bursty Bulk Flows (BBFs) play an important role in the magnetotail activities. The formation mechanism of BBFs and the interaction between BBFs and the ambient plasma have become important research subjects recently. Based on the observations made by Cluster during the periods from July to October 2001 and 2002, the variations of magnetic field during the passage of BBFs are statistically analyzed. Superposed epoch analyses show that there is a sharp change in the B_z component as the bulk speed of the flow begins to increase at the front of BBFs: a sharp increase preceded by a transient decrease. This signature in B_z component was found in most of the BBFs events observed by Cluster, which is generally agreed with the result reported based on Geotail observations. However, the change of B_z component is not always symmetry, and the decease of B_z is usually not strong enough to lead to a negative value. This implied that magnetic structure does not always occur together with BBFs. The interaction between BBFs and ambient plasma is

* 国家自然科学基金项目资助 (40874086, 41031065)
2011-05-26 收到原稿, 2012-04-28 收到修定稿
E-mail: suiyanfu@pku.edu.cn

responsible for the change in B_z. After the dipolarization front is formed, the diamagnetic effect due to the hot ions bouncing back from the boundary might contribute to the decrease in B_z. The pile-up of the magnetic flux carried by BBFs may be the reason for the increase.

Key words Plasma sheet, Bursty bulk flows, Ambient plasma, Magnetic structure

0 引言

磁尾等离子体片中的等离子体对流过程对磁尾的质量、能量和磁通量传输具有非常重要的作用. 研究发现这种对流的过程常常以不定常的形式出现, 即以短时间的爆发性为其特征. Angelopoulos 等 [1] 最早利用 AMPTE/IRM 的数据对磁尾等离子体片中快速等离子体流进行了研究, 发现这些高速流动常常以 10 min 左右的连续出现为特征, 进而提出了爆发性整体流 (Bursty Bulk Flows, BBFs) 的概念, 同时提出了高速流事件的选取标准, 即在 $|y_{\rm GSM}| < 15\,R_{\rm e}$, $x_{\rm GSM} < -9\,R_{\rm e}$ 的区域内, 等离子体流整体速度的峰值大于 $400\,{\rm km\cdot s^{-1}}$. 通过对发生在不同区域内高速流事件的对比分析, Angelopoulos 等 [2] 发现对于速度峰值小于 $600\,{\rm km\cdot s^{-1}}$ 的高速流, 在等离子体片边界层、外等离子体片和内等离子体片发生的比率是 4:1:2, 对于速度峰值大于 $800\,{\rm km\cdot s^{-1}}$ 的事件, 发生的比率是 1:0:1. 通过利用多颗卫星的研究, Angelopoulos 等 [2] 发现在特定的一次亚暴事件中, 由重联产生的地向高速流能够从中远磁尾向近地片中输运大量的磁通量, 这些能量在近地磁尾会以偶极化的方式爆发出来. 目前认为有关高速流产生的两种主要的机制包括重联机制和交换模不稳定性等, 这些过程中都伴随有磁场的扰动和变化. 伴随着高速流的形成、传输和演化, 背景等离子体片也会产生相应的扰动过程, 不可避免地造成磁场的扰动. 因此, 了解高速流中磁场扰动结果及其变化规律对于认识高速流的形成机制和演化都十分重要.

Ohtani 等 [3] 曾用 Geotail 数据对 $x > -31\,R_{\rm e}$ 区域内的快速对流事件进行统计研究, 其中一个重要结论就是在快速流前端发现了磁场 B_z 分量的剧烈变化. 在快速流前端能观测到 B_z 的剧烈增加, 在此之前 B_z 会出现短暂时间的减小, 也就是说高速流事件伴随着类似磁场偶极化的过程. Ohtani 等认为 B_z 这种变化特征可能是局地电流变化导致的, 或者是伴随着快速流的磁结构所表现的特征. 由多点重联产生的磁结构在往地向传播时, 地向侧的磁场方向为由北向南, 正好与地球磁场的位形相反, 这一特点可能导致磁结构与地球磁场发生重联, 剩余磁场的特征可能与在快速流前端所观测到的磁场特征一致, 也就是较弱的 B_z 下降之后为较强的 B_z 增加.

Slavin 等 [4] 用 Geotail 的观测数据对磁尾等离子体片中的磁结构进行了统计研究, 发现在等离子体片中 $x > -30\,R_{\rm e}$ 的磁结构大都与 BBFs 关联在一起, 出现在 BBFs 的前端. 这一结论从侧面证实了 Ohtani 等对于在快速流前端观测到的磁场特征的解释, 即这些磁场变化来源于磁绳结构.

随着对 BBFs 越来越细致深入的研究, Runov 等认为等离子体片中地向高速流与背景等离子体相互作用, 在高速流前端形成了一个薄的边界层 (偶极化锋面, dipolarization front). 磁场 B_z 分量的剧烈增大以及 B_x 分量的减小即是偶极化锋面的一大特征, 也就是所谓磁场从更为尾向变为更加接近偶极场的特征. 利用 THEMIS 的观测, Runov 等 [5−6] 对偶极化锋面进行了一系列研究, 证实了偶极化锋面的相对稳定性并计算了其向地向传播的速度等.

近年来, 通过对 Geotail 及 Cluster 等卫星观测数据的研究 [8−12], 人们对 BBFs 的产生, 以及与磁层中其他物理现象, 例如亚暴等过程的关联进行了大量研究, 但对于其形成机制和演化过程依然不是十分清楚, 特别是对于高速流与背景等离子体相互作用的研究才刚刚起步. 究竟是磁结构还是高速流与背景等离子体的相互作用造成高速流前端磁场的扰动特征仍然不十分明确. 由于两者的形成过程不同, Sormakov 等 [7] 从电子通量的角度分析, 得出区分传统意义上磁结构和相互作用界面的方法. 地向运动磁结构的观测特征是磁场 B_z 分量由负到正的反转, 磁结构是封闭的, 两侧是同源的, 所以在观测到 B_z 反转的同时, 高能电子通量应该基本相等. 而偶极化锋面的一侧是背景等离子体, 一侧是高速流, 高能电子通量是不一致的. 然而这种方法并没有被用于分析实际观测到的伴随着高速流的磁结构.

本文利用 Cluster 四颗卫星在 2001 年 7 月至 10 月和 2002 年 7 月至 10 月共 8 个月的观测数据, 对磁尾高速流前端的特性进行了统计研究, 分析高速流前端磁场 B_z 分量剧烈变化的原因, 同时对比分析了两个特例. 研究表明 B_z 分量的这种变化特征并不总是存在磁结构的表现, 更多时候是高速流与背景等离子体相互作用造成的.

1　数据和高速流事件选取标准

Cluster 卫星是欧空局发射的用于研究地球磁层中小尺度结构的卫星, 由四颗完全相同的卫星组成. 在 2001 年 7 月至 10 月和 2002 年 7 月至 10 月间, Cluster 卫星的轨道穿越地球磁尾等离子体片. Cluster 卫星上搭载有离子谱仪 [13] (Cluster Ion Spectrometry, CIS)、粒子成像质谱仪 [14] (Research with Adaptive Particle Imaging Detectors, RAPID) 和磁通门磁强计 [15] (Flux Gate of Magnetic Field, FGM). CIS 和 RAPID 以及 FGM 分别提供时间分辨率为 4s 的等离子体参数、能量粒子通量以及磁场的观测.

参照以往对高速流的研究工作 [1,8], 这里将选取高速流的标准确定如下.

(1) $v_x \geqslant 300\,\mathrm{km{\cdot}s^{-1}}$ 的快速流至少在等离子体片 (β 大于等于 0.5) 中出现一次, 时间间隔小于 10 min 的快速流作为同一个高速流事件, v_x 表示等离子体速度在 GSM 坐标系下 x 方向的分量.

(2) $x_{\mathrm{GSM}} \leqslant -10\,R_{\mathrm{e}}$.

(3) $|y_{\mathrm{GSM}}| \leqslant 15\,R_{\mathrm{e}}$.

以 v_x 开始大于 $100\,\mathrm{km{\cdot}s^{-1}}$ 的时刻作为高速流事件的开始, 小于 $100\,\mathrm{km{\cdot}s^{-1}}$ 的时刻作为高速流事件的结束, 间隔即为高速流的持续时间. 利用 Cluster 卫星 2001 年 7 月至 10 月和 2002 年 7 月至 10 月的观测数据, 共确定了 219 个高速流事件.

图 1 为发生在 2001 年 9 月 7 日 22:25 UT−22:40 UT 的一个典型高速流事件. 图 1 给出了 C1 对这个高速流事件的观测数据, 显示此事件开始于 22:28:13 UT, 结束于 22:34:51 UT, 持续 400 s 左右. 分析图 1 可以看出, 高速流期间等离子体的流速主要在 x 方向, v_x 的峰值在 $600\,\mathrm{km{\cdot}s^{-1}}$ 左右; 伴随着流速增加, 磁场出现了扰动, 在流速剧烈增长前可以清楚看到 B_z 先减小后增加的特征; 等离子体参数也出现相应的变化, 离子密度随着等离子体流速的开始增加而逐渐减小, 离子温度逐渐上升. 等离子体 β 值大部分时间内都大于 0.5, 有一小段时间小于 0.5, 与此同时等离子体的流速也下降至比较低的水平, 应当是卫星短暂穿越至等离子体片边界层造成的.

2　统计研究

根据文献 [3], 对 Cluster 卫星观测到的 219 个高速流事件进行了统计研究, 结果如图 2 所示. 图 2(a) 和图 2(b) 选择了不同的统计时间零点进行时间叠加平均, 图 2(a) 的时间零点选在 T_{v0}, 图 2(b) 的时间零点选在 T_{B0}. 这里将 T_{v0} 定义为 v_x 在上升到 $300\,\mathrm{km{\cdot}s^{-1}}$ 以上的过程中最后一次低于 $200\,\mathrm{km{\cdot}s^{-1}}$ 的时刻, T_{B0} 定义为 T_{v0} 前后各 2 min 内 B_z 变化最剧烈的时刻 (统计值均取中位数).

图 2(a) 中 v_x 的峰值稍大于 $300\,\mathrm{km{\cdot}s^{-1}}$. 在 T_{v0} 前几分钟, 等离子体和磁场数据开始出现变化. 随着等离子体流速的逐渐升高, B_z 缓慢增加然后稳定于一个高于高速流之前的 B_z 值, 离子密度缓慢下降, 温度缓慢升高, 最后都趋于稳定.

图 2(b) 与图 2(a) 最大的不同是 B_z 在 T_{B0} 时刻出现剧烈扰动, 表现为 B_z 先减小然后剧烈增加的趋势, 这一结果与文献 [3] 的工作基本一致. v_x 的峰值稍小于 $300\,\mathrm{km{\cdot}s^{-1}}$, 说明 B_z 的剧烈变化发生在高速流刚开始的阶段, 即等离子体流速比较低的时候.

值得指出的是, 对比图 2(a) 和 (b) 可以发现, 等离子体参数在图 2(a) 中的变化较图 2(b) 中的变化更为快速. 与文献 [3] 中结果不一致的是, 等离子体数据的变化开始于 T_{B0} 前几分钟, 并不是发生在 T_{B0} 时刻. 说明等离子体参数的变化源于高速流的到来, 而与磁场偶极化的界面关联不强, 尽管偶极化过程前后也恰好分别对应着背景等离子体和高速流等离子体的区域.

此外还应该注意到, 虽然使用磁场剧烈变化为时间零点的统计结果增强了磁场偶极化的现象, B_z 先减小后增大的特征更为明显, 但是 B_z 的减小并没有使其方向发生改变, 也就是不能使得 B_z 成为负值. 同时, 磁场 B_z 变化时, B_x 并没有明显变化的特征.

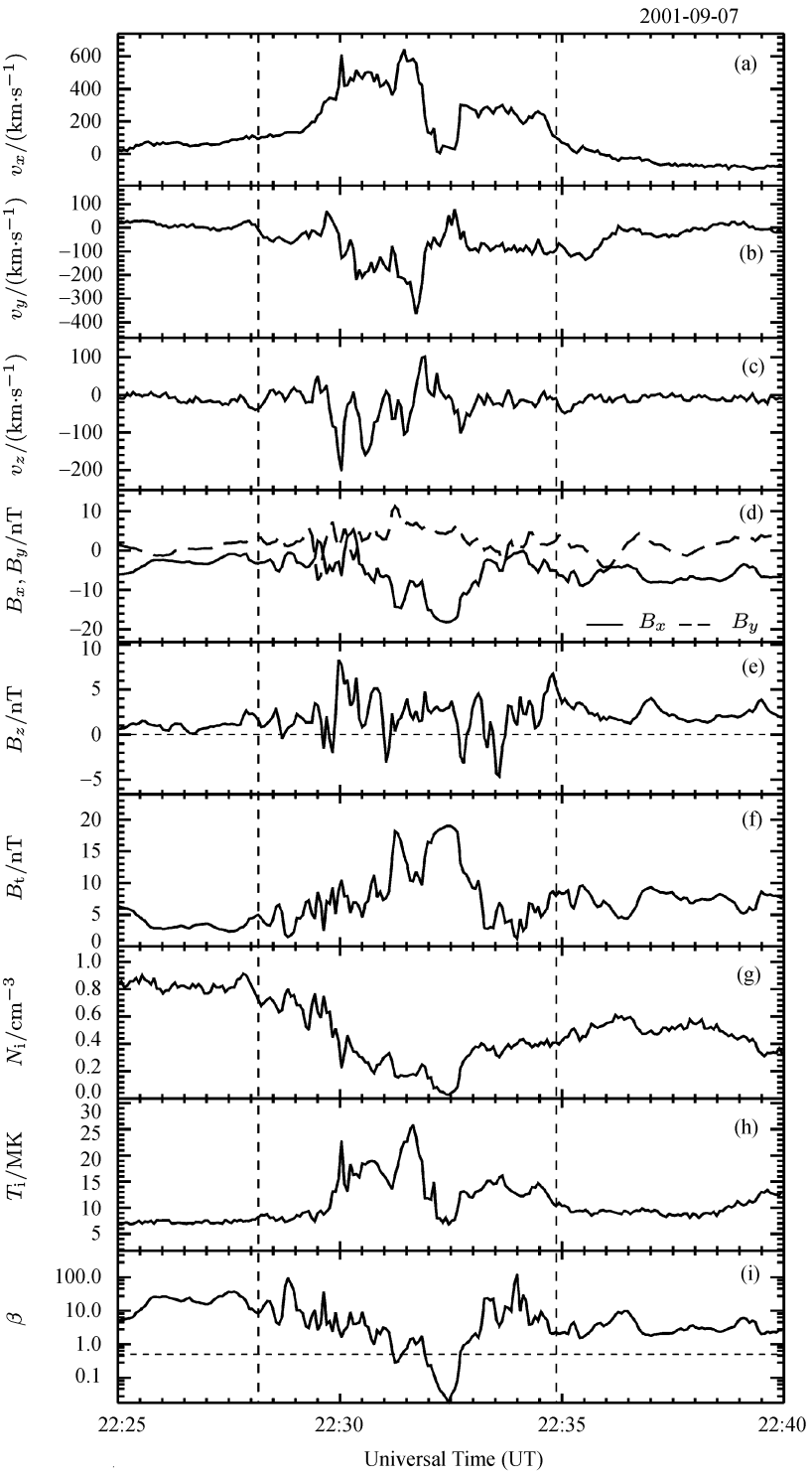

图 1 2001 年 9 月 7 日 22:25 UT—22:40 UT Cluster C1 卫星的观测数据. 两条垂直虚线分别标识出了事件的开始和结束时刻. 由上到下分别为 GSM 坐标系下等离子体整体速度的三个分量 v_x, v_y, v_z; 磁场三分量 B_x (实线), B_y (虚线), B_z, 总磁场 B_t; 离子密度 N_i, 温度 T_i 和等离子体 β 值

Fig. 1 High speed flow event measured by Cluster C1 from 22:25 UT—22:40 UT on 7 September 2001. The two vertical dash lines mark the start and end time respectively. From top to bottom are the bulk velocity v_x, v_y, v_z; magnetic field B_x (solid line), B_y (dashed line), B_z, total magnetic field B_t; ion density N_i, ion temperature T_i and plasma β, respectively

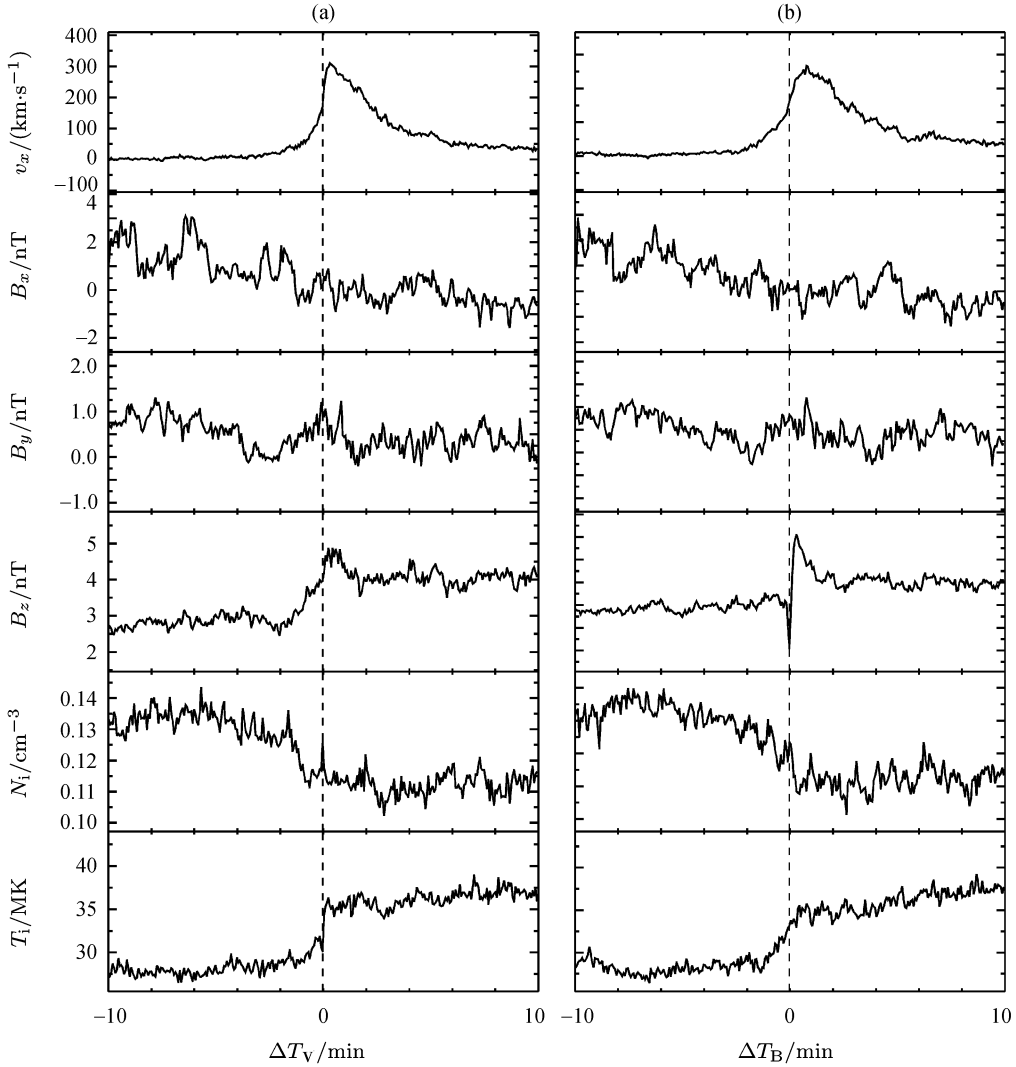

图 2　Cluster 卫星观测到的 219 个高速流事件统计 ($\Delta T_v = T - T_{v0}$, $\Delta T_B = T - T_{B0}$, T_{v0} 和 T_{B0} 的定义见文中. 从上至下分别为 GSM 坐标系下等离子体整体速度 x 方向分量 v_x, 磁场三分量 B_x, B_y, B_z, 离子密度和温度 N_i, T_i. 两条竖线分别代表统计研究中的时间零点)

Fig. 2　Superposed magnetic field and plasma parameters over the 219 BBF events observed by Cluster ($\Delta T_v = T - T_{v0}$, $\Delta T_B = T - T_{B0}$. T_{v0} and T_{B0} are defined in the text. From top to bottom are the x component of plasma bulk velocity v_x, three components of magnetic field B_x, B_y, B_z, ion density N_i, ion temperature T_i. Two vertical lines represent the zero epoch for the superposed epoch analysis)

3　典型个例事件分析

由以上关于高速流前端磁场分量 B_z 变化的统计工作, 得到与文献 [3] 相类似的结果. 尽管绝大多数高速流前端都可以观测到 B_z 先减小后增大的特征, 但是由于 B_z 减小并不能达到负值, 显然并非所有的高速流中都会有磁结构的存在. 通过对观测到的 219 个高速流事件的逐一辨认, 结果表明, 2/3 的高速流前端虽然有偶极化的特征, 但并非磁结构, 更多可能是由高速流与背景等离子体相互作用造成的.

3.1　事件 A(2001 年 7 月 22 日)

图 3 给出的是 Cluster C1 卫星在 2001 年 7 月 22 日 11:30 UT−11:40 UT 观测到的高速流事件.

根据 Cluster C1 卫星的观测, 高速流事件开始于 11:35:09 UT, 结束于 11:36:49 UT, 持续大约 100 s 左右, 等离子体整体流速主要是 x 分量的贡献, v_x 峰

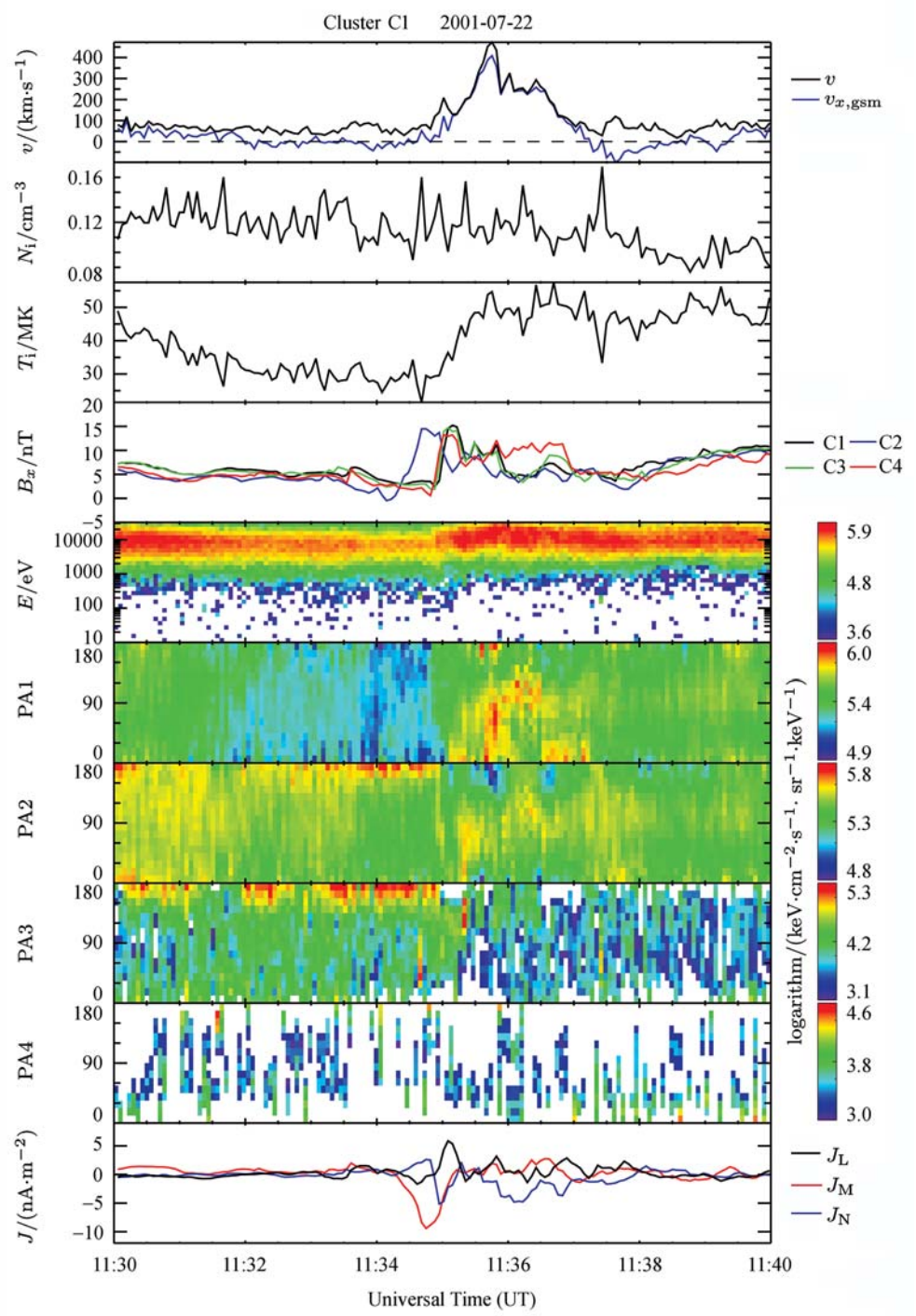

图 3 Cluster C1 卫星在 2001 年 7 月 22 日 11:30 UT—11:40 UT 的观测. 由上至下分别为等离子体整体流速及 x 分量, 离子密度, 离子温度, 磁场 B_z 分量, 离子微分能通量及投掷角分布 (能档范围为 <100 eV, 100∼1000 eV, 1∼10 keV, 10∼30 keV) 和电流密度

Fig. 3 Observations made by Cluster C1 within the interval 11:30 UT—11:40 UT on 22 July 2001. Panels from top to bottom are plasma bulk velocity and its x component, ion density, ion temperature, magnetic field B_z component, ion differential energy flux and its pitch angle distributions (energy channels: <100 eV, 100∼1000 eV, 1∼10 keV, 10∼30 keV), and current density, respectively

值在 500 km·s^{-1} 左右. 伴随着高速流事件, 离子密度出现扰动, 离子温度有一明显抬升过程. 在高速流前端, 四颗卫星均观测到了磁场 B_z 分量先减小后增大的特征, C2 卫星最先观测到, C1 卫星最后观测到, B_z 平均变化幅度为 12 nT 左右. 由于四颗卫星先后观测到类似的变化, 并且进入顺序和穿越出来的顺序相同, 可以认为这是一个相对稳定的结构. 假设这是一个近似平面的结构, 先后通过四颗卫星. 利用时间分析方法 (Timing Method), 可以计算得到该界面的总速度在 40 km·s^{-1} 左右, 三分量分别为 (26.2, −29.1, −20.9) km·s^{-1}. 根据该事件观测的位置, 发现卫星观测到了高速流前端的晨侧一面, 且随高速流地向运动, 其与背景等离子体的交界面也朝着地向晨向发展.

从图 3 中 $T_{\rm i}$ 的离子能谱变化可以看出, 高速流内部离子通量较背景等离子体没有明显变化, 但等离子体温度略有增加. 背景等离子体中离子的投掷角主要集中在 180°, 高速流内部离子的投掷角主要集中在 0° ∼ 90°, 观测到的界面正好作为这个变化的过渡区, 界面前端离子的投掷角与背景等离子体相一致, 后端与高速流内部的离子数据相一致. 可将离子能段细分为四部分: <100 eV, 100∼1000 eV, 1∼10 keV, 10∼30 keV, 分别对应图 3 中的 PA1∼PA4, 可以看出, 投掷角为 180° 的离子主要为能量相对较低的离子, 投掷角为 0° ∼ 90° 的离子主要为能量相对较高的离子. 结合磁场的三分量 (这里没有给出), 可以知道在交界面附近出现了流的偏转, 主要是因为离子在电流片中的回旋和在电流片边界上的偏转所致.

利用最小变量分析法 (Minimum Variance Analysis, MVA), 对由高速流和背景等离子体相互作用在高速流前端所形成的磁场结构进行分析, 确定界面的 L, M, N 方向. 利用 Cluster 四颗卫星的磁场观测数据, 可以计算出区域电流密度在 L, M, N 三个方向上的分量 $J_{\rm L}$, $J_{\rm M}$, $J_{\rm N}$, 可以发现界面的电流主要集中在 M 方向, 即电流主要分布在界面上, $J_{\rm M}$ 的峰值大约为 10 nA·m^{-2}. 符合一个简单电流片的假设.

3.2 事件 B (2001 年 10 月 8 日)

图 4 所示是 Cluster C1 卫星在 2001 年 10 月 8 日 13:20 UT−14:00 UT 间观测到的高速流事件.

根据 Cluster C1 卫星的观测, 高速流事件开始于 13:24:19 UT, 结束于 13:51:12 UT, 持续约 30 min, v_x 峰值在 700 km·s^{-1} 左右. 图 4 中虚线标识出了高速流前端 B_z 变化最剧烈的时间段. 图 5 给出的是 Cluster 四颗卫星的磁场观测数据, 四颗卫星依次观测到了 B_z 由负到正的反转. 利用 MVA 方法对 Cluster C1 卫星观测到 B_z 反转期间的磁场进行了分析, $B_{\rm L}$, $B_{\rm M}$, $B_{\rm N}$ 的矢端图如图 6 所示, 这是一个典型的磁结构, 持续时间约 30 min. 在整个高速流的持续时间内, 磁场 B_z 分量多次出现由负到正的反转, 这个高速流事件可能携带了多个磁结构.

高速流内部高能离子的通量相对于背景等离子体同样有明显的增加, 但是在磁结构内部两侧, 离子通量和投掷角并没有太大的变化, 特征与事件 A 明显不同.

3.3 事件 A 与 B 中高能电子的观测

文献 [7] 从电子通量的角度分析, 得出区分传统意义上的磁结构和相互作用界面的方法. 本文利用这种方法对所研究的两个事件进行判断. 图 7 给出了高速流事件 A 和事件 B 前端高能电子 (> 40 keV) 的观测数据, 虚线标识出了 B_z 变化最剧烈的时间段.

在事件 A 相应的时间段内, C1 卫星 RAPID 仪器没有观测数据, C2, C3 和 C4 卫星观测到相类似的特征, 即在结构内部各能档的高能电子通量是逐渐增加的. 在事件 B 的磁结构内部两侧, 高能电子各能档的电子通量基本没有太大变化, 这一特征与事件 A 前端的观测不完全相同. 事件 A 中观测到的 B_z 剧烈变化正是由高速流与背景等离子体相互作用挤压背景磁场造成的, 事件 B 的观测具有典型磁结构的特征. 高能电子来源的不同决定了两类事件中高能电子行为的不同. 但也应该看到, 这个特征在一些能档并不十分清晰, 也并不是所有卫星都能看到明显的区别, 这可能是因为一方面不同能档电子起源不同, 另一方面高速流到达观测位置所经历的演化过程也可能对高能电子的行为有一定影响. 在所研究的两个事件中, 40 keV 左右的电子较好地反映了两类结构的差别.

4 讨论与总结

利用 Cluster 卫星 2001 年 7 月至 10 月和 2002 年 7 月至 10 月 8 个月的观测数据, 对地球磁尾等离子体片中观测到的 219 个高速流事件进行了统计研

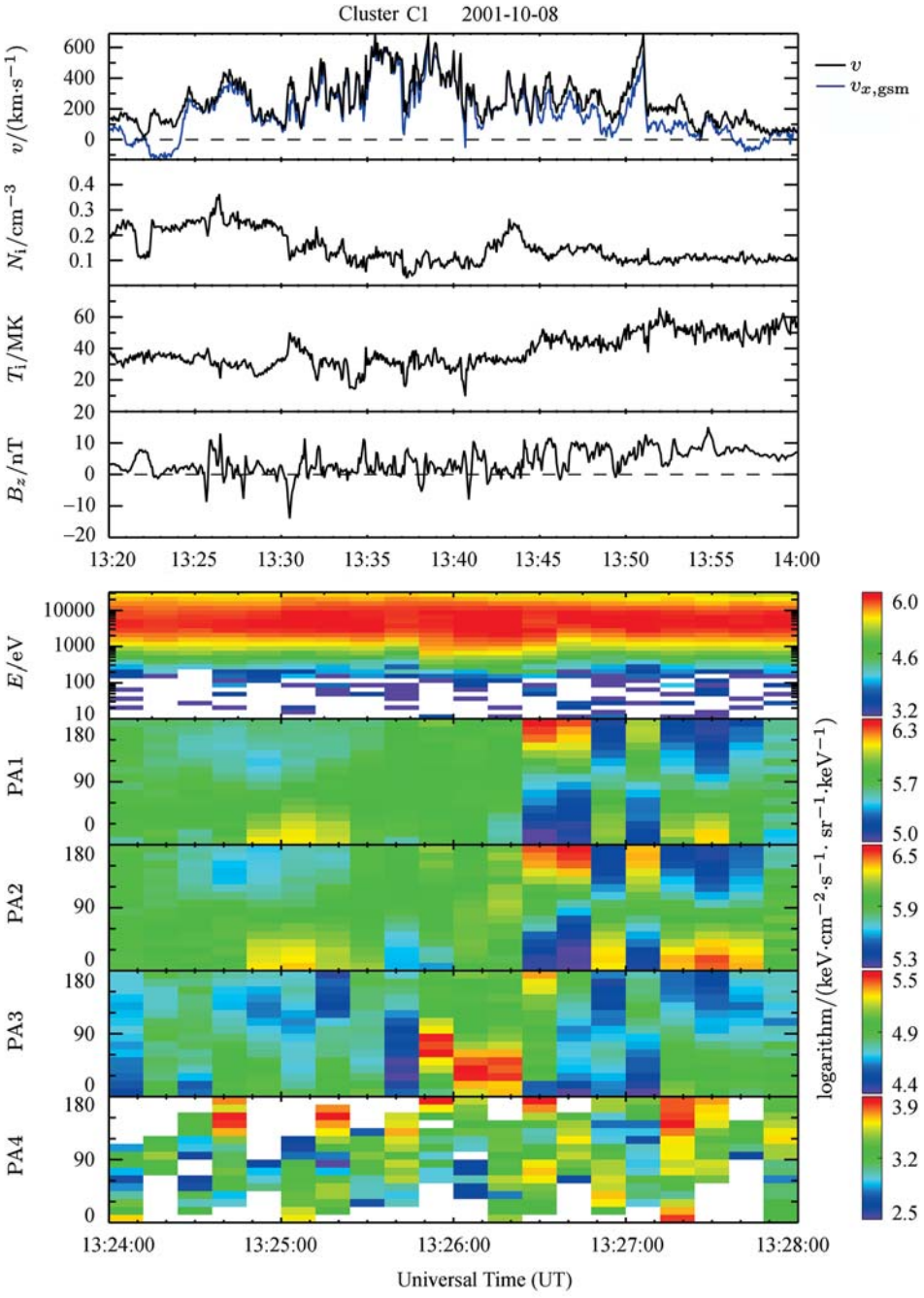

图 4 Cluster C1 卫星在 2001 年 10 月 8 日 13:20 UT—14:00 UT 的观测. 由上至下分别为等离子体整体流速及 x 分量, 离子密度, 离子温度, 磁场 B_z 分量, 离子微分能通量及投掷角分布 (能档范围为 <100 eV, 100∼1000 eV, 1∼10 keV, 10∼30 keV)

Fig. 4 Observations made by Cluster C1 within 1:20 UT—14:00 UT on 8 October 2001. Panels from top to bottom are plasma bulk velocity and its x component, ion density, ion temperature, magnetic field B_z component, ion differential energy flux and its pitch angle distributions (energy channels: <100 eV, 100∼1000 eV, 1∼10 keV, 10∼30 keV), respectively

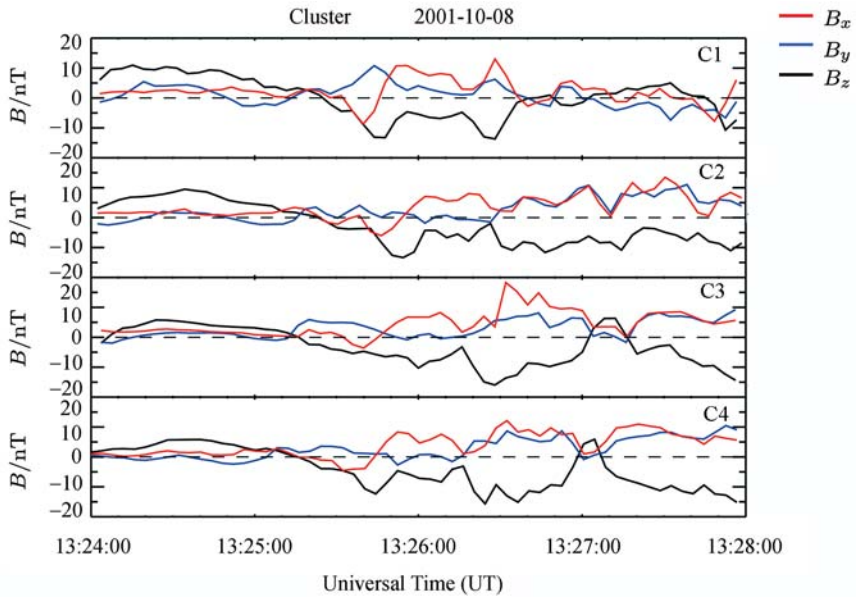

图 5　Cluster 四颗卫星的磁场观测数据

Fig. 5　Magnetic field observed by four Cluster satellites

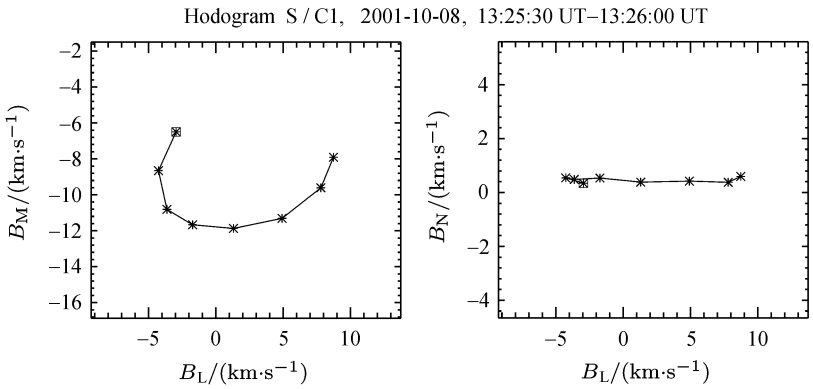

图 6　利用 MVA 方法分析 C1 卫星观测的磁场数据得到的矢端图

Fig. 6　Hodogram of magnetic field observed by C1 in the minimum variance coordinate system

究, 分析了高速流前端 B_z 的变化特征. 统计结果表明, 在高速流前端, 随着等离子体速度的增大, 磁场 B_z 分量的值会出现先减小后剧烈增大的特征.

尽管绝大多数高速流前端都可以观测到 B_z 这一变化特征, 但是并非所有的高速流中都会发现磁结构的存在, 本文统计结果表明, 2/3 的高速流前端虽然有偶极化的特征, 但并非磁结构. 正如 Slavin 等 [4] 指出的, 这些磁结构的运动方向由各重联点的强度决定. 一个完整的磁绳结构要求 B_z 反转方向, 即要求必须存在所谓双极, 而不仅仅是大小变化符合特征. 磁结构的存在常常表明, 在磁尾等离子体片中存在至少两个重联点. 多个重联点出现的条件目前尚不十分清楚, 但从观测中常常可以观测到磁结构存在的现象推断, 在等离子体片中出现多个重联的概率并不十分稀少. 高速流与背景等离子体的相互作用会在高速流前端形成一个薄的边界, 高速流对背景磁场的挤压会造成 B_z 的增大, 而 B_z 增大前的减小有可能与界面碰撞然后回旋的粒子形成的电流有关. Zhou 等 [16−17] 曾利用数值模拟的方法, 研究了高速流前端偶极化锋面形成后, 背景等离子体中的部分离子在界面磁场的作用下反射回背景, 这些增加的离子造成了高速流到达之前等离子体流速的增加.

关于偶极化过程前后 B_z 的不对称性, Ohtani 等 [3] 认为, 地向运动的磁结构靠近地球一侧的磁场

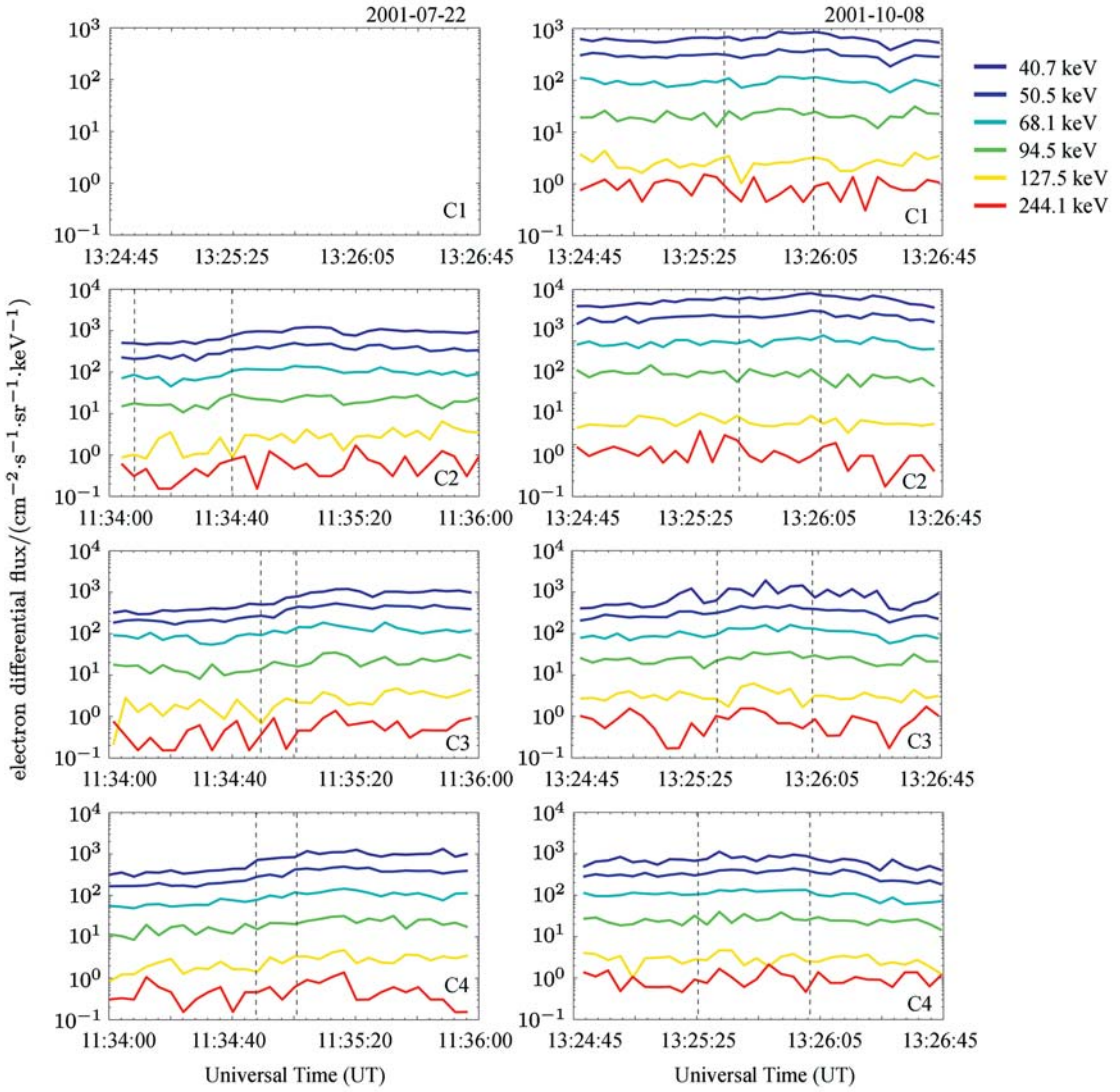

图 7 事件 A 和 B 中高速流前端不同能档高能电子的变化

Fig. 7 Variation of high energy electrons observed by RAPID during Event A and Event B

方向由北指向南, 正好与地球磁场方向相反, 所以磁结构在地向运动过程中有可能与地球磁场发生再重联. 事实上无论高速流前端是否存在磁结构, 高速流都会与背景等离子体发生相互作用, 如果磁结构与地球磁场发生再重联, 则会使得相互作用的效应变弱, 造成观测中的不对称性. 这里认为, 由于地球磁场接近偶极磁场, 重新发生重联较为困难, 尽管不能排除发生这样过程的可能性, 但 B_z 的变化特征极大可能是由于高速流对背景磁场的挤压而造成的. 正如 Zhou 等 [23] 所提出的那样, 在偶极化锋面电流片的作用下, 热离子会有部分反射进入上游, 这些反射离子的存在可以产生相应的抗磁电流, 附加的磁场效应则会减小背景的磁场, 从而造成磁场 B_z 分量的减小. 随后 B_z 分量的增加则可能是高速流携带的磁通量堆积的效应.

高能电子的观测证实了两类形成机制的存在, 也为判别两种过程提出了一种可能的方法. 虽然这种特征并不是对于所有的高能电子能段都很明显, 也会存在不同卫星观测的差异, 但本文列举出的两个事件中高能电子的观测部分证实了这一方法的可行性. 显然, 研究不同能量区间电子的加速与来源, 将有助于理解高速流的形成及其与背景等离子体相互作用过程中的演化. 有研究表明 [26], 对应于不同的偶极化锋面, 高速流极大值的位置不同, 可能表征锋面形成

的不同阶段, 相应的电子加速也存在不同的绝热加速过程. 探讨各种加速过程对于不同能档电子的加速效率, 有助于进一步揭示相互作用的动力学过程.

在研究中还发现, 并非所有高速流前端均存在明显的偶极化特征, 因此偶极化特征出现的条件是否是相互作用演化的结果, 这些结构是否会随着地向的流动而存在变化以及磁结构的存在即多重重联过程的出现条件等问题还有待深入探讨.

致谢 Cluster 卫星观测数据由 CAA 提供.

参考文献

[1] Angelopoulos V, Baumjohann W, Kennel C F, *et al.* Bursty bulk flows in the inner central plasma sheet [J]. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**:4027-4039

[2] Angelopoulos V, Coroniti F V, Kennel C F, *et al.* Multipoint analysis of a bursty bulk flow event on April 11, 1985 [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**:4967-4989

[3] Ohtani S, Shay M A, Mukai T. Temporal structure of the fast convective flow in the plasma sheet: Comparison between observations and two-fluid simulation [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, A03210, doi:10.1029/2003JA010002

[4] Slavin J A, Lepping R P, Gjerloev J, *et al.* Geotail observations of magnetic flux ropes in the plasma sheet [J]. *J. Geophys. Res.*, **108**(A1), 1015, doi:10.1029/2002JA009557, 2003

[5] Runov A, Angelopoulos V, Sitnov M I, *et al.* THEMIS observations of an earthward- propagating depolarization front [J]. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L14106, doi:10.1029/2009GL038980

[6] Runov A, Angelopoulos V, Sitnov M, *et al.* Dipolarization fronts in the magnetotail plasma sheet [J]. *Planet. Space Sci.*, 2010, doi:10.1016/j.pss.2010.06.006

[7] Sormakov D A, Sergeev V A. Topology of magnetic flux ropes in the magnetospheric plasma sheet as measured by the Geotail spacecraft [J]. *Cosmic Res.*, 2008, **46**(5):387-391

[8] Cao J B, Ma Y D, Parks G, *et al.* Joint observations by Cluster satellites of bursty bulk flows in the magnetotail [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**, A04206, doi:10.1029/2005JA011322

[9] Shue J H, Ieda A, Lui A T Y, *et al.* Two classes of earthward fast flows in the plasma sheet [J]. *J. Geophys. Res.*, **113**, A02205, doi:10.1029/2007JA012456

[10] Ma Y D, Cao J B, Nakamura R, *et al.* Statistical analysis of earthward flow bursts in the inner plasma sheet during substorms [J]. *J. Geophys. Res.*, **114**, A07215, doi:10.1029/2009JA014275

[11] Panov E V, Nakamura R, Baumijohann W, *et al.* Multiple overshoot and rebound of a bursty bulk flow [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, **37**, L08103, doi:10.1029/2009GL041971

[12] Ma Y D, Cao J B, Reme H, *et al.* The radial evolution of earthward BBFs during substorm [J]. *Sci China Earth Sci.*, 2010, **53**:1542-1551, doi:10.1007/s11430-010-4040-x

[13] Reme H, Aoustin C, *et al.* First multispacecraft ion measurements in and near the Earth's magnetosphere with the identical Cluster Ion Spectrometry (CIS) experiment [J]. *Ann. Geophys.*, 2001, **19**:1303-1354

[14] Wilken B, Güttler W, Korth A, *et al.* RAPID the imaging energetic particle spectrometer on Cluster [J]. *Space Sci. Rev.*, 1997, **79**:399-473

[15] Balogh A H, Carr C M, Acuna M H, *et al.* The cluster magnetic field investigation: Overview of in-flight performance and initial results [J]. *Ann. Geophys.*, 2001, **19**:1207-1217

[16] Zhou X Z, Angelopoulos E V, Sergeev V, Runov A. Accelerated ions ahead of Earthward-propagating dipolarization fronts [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, 115, A00103, doi:10.1029/2010JA015481

[17] Zhou X Z, Angelopoulos V, Sergeev V, Runov A. On the nature of precursor flows upstream of advancing dipolarization fronts [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**, A03222, doi:10.1029/2010JA016165

[18] Nakamura R, Baumijohann W, Klecher B, *et al.* Motion of the dipolarization front during a flow burst event observed by Cluster [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(20):1942, doi:10.1029/2002GL015763

[19] Nakamura R, Baumijohann W, Zhang T L, *et al.* Cluster and Double Star observations of dipolarization [J]. *Ann. Geophys.*, 2005, **23**:2915-2920

[20] Shiokawa K, Miyashita Y, Shinohara I, Matsuoka A. Decrease in B_z prior to the dipolarization in the near-Earth plasma sheet [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, A09219, doi:10.1029/2005JA011144

[21] Henderson P D, Owen C J, Alexeev I V, *et al.* Cluster observations of flux rope structures in the near-tail [J]. *Ann. Geophys.*, 2006, **24**:651-666

[22] Sergeev V, Angelopoulos V, Apatenkov S, *et al.* Kinetic structure of the sharp injection/dipolarization front in the flow-braking region [J]. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L21105, doi:10.1029/2009GL040658

[23] Zhou M, Ashour-Abdalla M, Deng X, *et al.* THEMIS observation of multiple dipolarization fronts and associated wave characteristics in the near-Earth magnetotail [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**, L20107, doi:10.1029/2009GL040663

[24] Deng X, Ashour-Abdalla M, Zhou M, *et al.* Wave and particle characteristics of earthward electron injections associated with dipolarization fronts [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**, A09225, doi:10.1029/2009JA015107

[25] Zhang X J, Angelopoulos V, Runov A, *et al.* Current carriers near dipolarization fronts in the magnetotail: A THEMIS event study [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**, A00I20, doi:10.1029/2010JA015885

[26] Fu H S, Khotyaintsev Y V, Andre M, *et al.* Fermi and betatron acceleration of suprathermal electrons behind dipolarization fronts [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2011, **38**, L16104, doi:10.1029/2011GL048528