

# TC-1 卫星在近地磁尾( $9\sim 13 R_E$ )探测到的对流型高速流和场向高速流

张灵倩, 刘振兴, 马志为, W. Baumjohann, M.W. Dunlop, 王国军, 王霄, H. Reme, C. Carr

中国科学院空间科学与应用技术研究中心, 北京 100080;

浙江大学聚变理论与模拟中心, 浙江 310027;

Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Graz 6, 8042, Australia;

Space Sciences Division, Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, Oxfordshire OX110QX, UK;

Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, Toulouse Cedex F-78140, France;

Imperial College, London SW7 2BZ, UK

E-mail: [lqzhang@cssar.ac.cn](mailto:lqzhang@cssar.ac.cn)

2007-10-26 收稿, 2008-04-01 接受

国家自然科学基金青年科学基金项目(批准号: 40704031)、国家自然科学基金重大项目(批准号: 40620130094)和国家自然科学基金面上项目(批准号: 40536030)资助

**摘要** 对 2004~2006 年期间每年的 6~11 月(2006 年截止到 10 月), 共 17 个月的 TC-1 卫星上 4 s 精度的 FGM 和 HIA 数据进行了统计分析. 统计结果显示: 在区域( $-14 R_E < X < -9 R_E$ ,  $|Y| < 10 R_E$ ,  $|Z| < 5 R_E$ )内, TC-1 卫星共观测到的高速流事件共 465 起, 其中对流型高速流 94 起, 场向流型事件 371 起. 对流型高速流和场向高速流有明显不同, 主要表现在: 对流型高速流流场和磁场夹角超过  $45^\circ$ ,  $B_x$  磁场强度小于 15 nT 较弱,  $\beta$  的最可几值为 0.4; 场向高速流流场和磁场夹角的最可几值为  $20^\circ$ ,  $B_x$  磁场强度的最可几值约为 30 nT,  $\beta$  的最可几值 0.1. 对流型高速流主要发生在等离子体片内; 场向高速流主要分布在等离子体片边界层附近. TC-1 卫星的观测结果表明, 近地对流型高速流与爆发性整体高速流(bursty bulk flows, BBFs)的特性一致, 说明有相当数量的 BBFs 是可以进入近地  $13 R_E$  以内的. 由于对流型高速流能够更有效的向近地磁尾输运能量, 有可能会对亚暴触发过程产生重要的影响.

**关键词**  
高速流  
对流型高速流  
场向高速流  
爆发性整体高速流

磁层亚暴是地球空间最重要的能量存储和释放过程. 由于磁层亚暴对地球空间有广泛和重要的影响, 其全球过程、效应和模型研究一直是日地物理学最受重视的前沿课题之一. 近地磁尾是亚暴膨胀相触发的主要活动区域, 粒子注入事件、越尾电流中断及偶极化开始的位置都位于这个区域<sup>[1-4]</sup>. 磁尾等离子体片及边界层中存在的高速流, 建立了中磁尾重联过程和近地磁尾亚暴活动的联系, 对理解亚暴过程有重要的意义.

以往的观测表明高速流对亚暴过程有重要的影

响. Lui<sup>[5]</sup>最早发现等离子体片边界层存在大量的高速流事件. Baumjohann 等人<sup>[6-8]</sup>利用 AEPTE/IRM 卫星的数据对不同 AE 指数条件下中心等离子体片和等离子体片边界层内的离子特性进行了统计分析, 主要结论是: 在 AE 指数较高的条件下, 高速流发生的几率较高; 对于高 AE 条件, 在内中心等离子体片发现高速流的机率较等离子体片边界层高; 在外中心等离子体片内, 高速流出现机率小, 且不依赖于 AE 指数. 高速流的主要部分持续时间通常小于 10 s, 通常称这些高速流为爆发流(flow burst, FB). 其后, An-

gelopoulos等人<sup>[9]</sup>将中心等离子体片内持续时间约 10 min 的高速流定义为爆发性整体高速地向流(bursty bulk flow, BBF). BBF由特征时间约 1 min 的爆发流(flow bursts)组成,其速度向量与磁场垂直. BBF是亚暴过程中重要的能量输运方式<sup>[10]</sup>. 最近Cao等人<sup>[11]</sup>利用Cluster中三颗卫星的联合观测发现BBF的持续时间约为 20 min.

迄今为止,关于高速流的分类比较复杂,目前主要的高速流包括:( )和中磁尾磁重联过程相关的主要有BBF、场向高速流;( )和偶极化过程关联的高速流. 每种高速流的产生机制都不同,特征也有明显区别. Petrukovich 等人<sup>[12]</sup>利用AEPTE卫星的数据对高速流的流场和磁场夹角特性进行了统计研究,发现场向高速流的夹角在 20°左右,通常发生在低 $\beta$ 区;对流型高速流的夹角大于 45°高左右,通常发生在高 $\beta$ 区. Raj等人<sup>[13]</sup>利用wind卫星的数据对近地等离子体片( $X_{\text{GSM}} = -25 \sim 0 R_E$ )的高速流进行了分析,发现根据分布函数的不同,可以将高速流分为两种:高速整体流(high-speed bulk flows)和场向束流(field-aligned beams). 高速整体流总是伴随着较强的磁场震荡和高能粒子通量的增加,场向束流主要是由中磁尾重联在等离子体片边界层形成的高速流经近地磁镜点反射而成. 磁镜点指的是地球偶极子场在近地南北高纬地区的反射点.

以往关于高速流的研究主要在 13  $R_E$ 之外<sup>[14]</sup>. TC-1 卫星在近地磁尾 9~13  $R_E$ 之间观测到大量高速流事件. 本文利用TC-1 卫星的数据对磁尾(13  $R_E$ 之内)的近地高速流(near-Earth high speed flow, NEHF)进行了统计分析,以了解近地磁尾高速流的特征及其对亚暴过程的影响.

## 1 数据与分析方法

2002年12月30日发射的TC-1卫星是近地赤道卫星,轨道高度 6900×85300 km,倾角 28.5°,开普勒周期约 27.4 h. TC-1 卫星上配置有和磁通门磁强计(FGM)和热离子分析仪(HIA). FGM 可以精确进行高时间分辨的磁场三维测量,测量范围为 -65536~+65504 nT,最高分辨率为  $7.813 \times 10^{-3}$  nT,时间分辨率为 4 s. HIA 能够测量离子的能谱、三维分布函数,探测的能量范围为 5 eV~30 keV,时间分辨率为 4 s.

在选取高速流时,根据高速流的两个典型特征:( )高速且主要的速度分量为地向;( )持续时间

约 1 min. 我们使用了下面的高速流定义:  $V_x > 200$  km/s 的持续时间超过 30 s.

流场与磁场夹角的大小作为标量,其取值范围是 0°到 180°之间,在南北半球没有区别. 按流场和磁场的夹角可以将高速流区分为场向高速流(field-aligned high speed flow)和对流型高速流(convection-type high speed flow). 当流场和磁场的夹角取值 0°~45°和 135°~180°时为场向高速流;当流场和磁场的夹角取值 45°~135°时,为对流型高速流. 这 465 起高速流事件中有 371 起场向高速流事件,94 起对流型高速流事件. 在 GSM 坐标系下,对每一起对流型高速流的物理参数包括:磁场总强度( $B$ )、 $X$ 方向分量磁场( $B_x$ )、流场和磁场夹角( $\theta$ )在持续时间内进行统计平均,得到该物理参量在这起事件持续时间内的统计平均值,用来代表这起事件的物理特性.

## 2 统计结果

### 2.1 近地高速流的空间分布

对 2004~2006 年期间每年的 6~11 月(2006 年截止到 10 月),共 17 个月的 TC-1 卫星上 4 s 精度的 FGM 和 HIA 数据进行了统计分析. 统计结果显示:在 GSM 坐标系下,在近地磁尾( $-14 R_E < X < 0$ )观测到符合高速流选取条件的事件共 586 起,其中在近地磁尾  $-14 R_E < X < -9 R_E$  之间观测到的高速流事件共 465 起. 在 465 起近地高速流事件中有 371 起场向流型事件,94 起对流型事件.

根据统计结果,465 起近地高速流的分布如图 1 所示.

由图 1 可以看出,近地磁尾高速流其速度基本不随位置变化. 近地磁尾高速流在夜侧和晨昏两侧都有出现,图 1(b)显示高速流出现在  $-4 R_E < Z < 6 R_E$  区域.

图 1(a)显示高速流在 GSM  $X$ - $Y$  平面内的分布具有一定的晨-昏不对称性,昏侧出现率高于晨侧. 其次,图 1(b)显示高速流在 GSM  $X$ - $Z$  平面内的分布具有一定的南北不对称性,在北半球较南半球高. 这有可能和卫星运行的轨道相关. 总的来说,TC-1 卫星观测到的高速流主要分布在近地、夜侧和低纬度区域.

### 2.2 近地磁尾对流型高速流

近地磁尾高速流事件的统计特性如图 2 所示.

由图 2(a)可以看出:近地对流型高速流的磁场  $X$  分量主要分布在  $\pm 15$  nT 以内. 这表明对流型高速流在南北半球都有分布,且主要集中在等离子体片内,磁

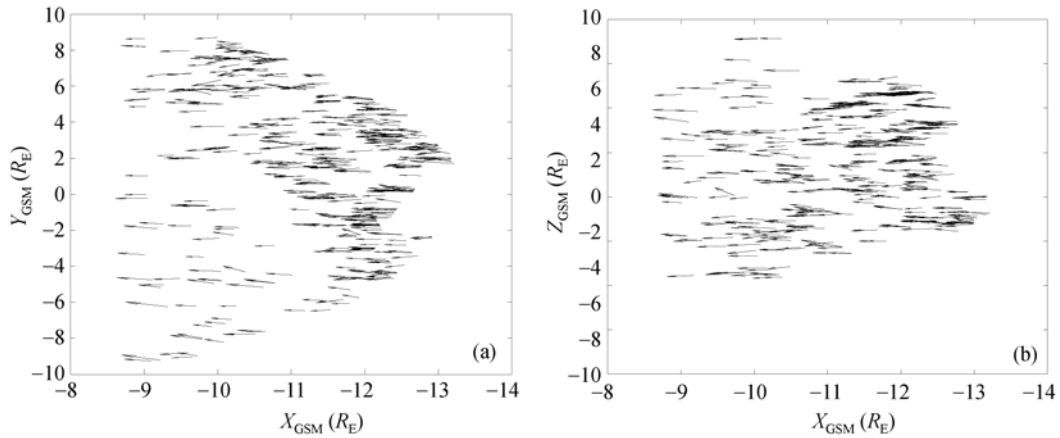


图1 TC-1 卫星在近地磁尾观测到的高速流分布

(a) 近地磁尾高速流在 X-Y 平面的分布; (b) 近地磁尾高速流在 X-Z 平面的分布. 图中线段的长度代表流速在平面投影的大小, 其中 X 和 Y 轴的单位长度都代表 1000 km/s. 线段的起点代表高速流发生的位置, 箭头代表高速流的方向. 近地磁尾高速流基本上分布在  $9 R_E$  以外, 其速度基本不随位置发生明显变化

场强度较弱.

由图 2(b)可以看出: 近地磁尾对流型高速流的流场和磁场夹角在角边域  $45^\circ$  和  $135^\circ$  处出现概率有极大值.

由图 2(c)可以看出: 近地磁尾对流型高速流  $\beta$  值的最可几值为 0.4.

根据对流型高速流的统计特性, 我们可以知道对流型高速流主要分布在中心等离子体片内, 具有弱磁场强度和高  $\beta$  值特征.

### 2.3 近地磁尾场向高速流

在 GSM 坐标系下, 对每一起场向高速流的物理参数包括: 磁场( $B$ )、X 方向分量磁场( $B_x$ )、流场和磁场夹角( $\theta$ )在持续时间内进行统计平均, 得到该物理参量在这起事件持续时间内统计平均值, 用来代表这起事件的物理特性. 最后对每起场向高速流事件  $V_x > 200$  km/s 的持续时间进行统计, 得到 371 起场向高速流事件的持续时间. 这样得到了 371 起近地磁尾场向高速流事件的统计特性, 如图 3 所示:

由图 3(a)可以看出: 近地磁尾场向高速流的磁场 X 分量主要分布在  $\pm 30$  nT 左右, 场向高速流在南北半球都有分布, 但主要分布在北半球. 这和 TC-1 卫星的运行区域有关.

由图 3(b)可以看出: 近地磁尾场向高速流的流场和磁场夹角较小, 主要在  $20^\circ$  和  $160^\circ$  左右, 具有明显的场向特征. 用锐角表示流场和磁场夹角, 则流场和磁场夹角的其最可几值为  $20^\circ$ .

由图 3(c)可以看出: 近地磁尾场向型高速流  $\beta$  值的最可几值约为 0.1.

根据场向高速流的统计特性, 我们可以知道场向高速流主要分布在等离子体片边界层附近, 具有高磁场强度和低  $\beta$  值特征.

### 3 结论和讨论

从上面的统计结果可以知道 TC-1 卫星在近地磁尾 ( $9 \sim 13 R_E$ ) 观测到的对流型高速流主要发生在中心等离子体片内, 具有较大的流场和磁场夹角和较高的  $\beta$  值. 这些特征和其他卫星在观测到的 BBF 特征一致. 和场向高速流相比, 对流型高速流由于和磁场近垂直, 能够更有效的向近地磁尾输运能量, 从而会对近地磁尾和亚暴过程产生重要的影响. 虽然 Shiokawa 等人<sup>[14]</sup>利用 AEPTE 卫星的数据对磁尾  $9 \sim 19 R_E$  之间近地等离子体片内的高速流进行了统计分析, 发现 BBF 在  $13 \sim 15 R_E$  附近会“刹车”(BBF braking). 但 TC-1 卫星的观测结果表明, 有相当数量的 BBF 是可以进入近地  $13 R_E$  以内的.

总的来说, 本文对 2004~2007 年期间每年的 6~11 月(2007 年截止到 10 月), 共 17 个月的 TC-1 卫星上 4 s 精度的 FGM 和 HIA 数据进行了统计分析. 在 GSM 坐标系内, TC-1 卫星在近地磁尾 ( $-14 R_E < X < -9 R_E$ ,  $|Y| < 10 R_E$ ,  $|Z| < 5 R_E$ ) 探测到的  $V_x$  流速超过 200 km/s, 且持续时间超过 30 s 的高速流事件共 465 起. 近地磁尾高速流基本上分布在  $9 R_E$  以外, 其速度基本不随位置变化. 近地磁尾高速流在夜侧和晨昏两侧

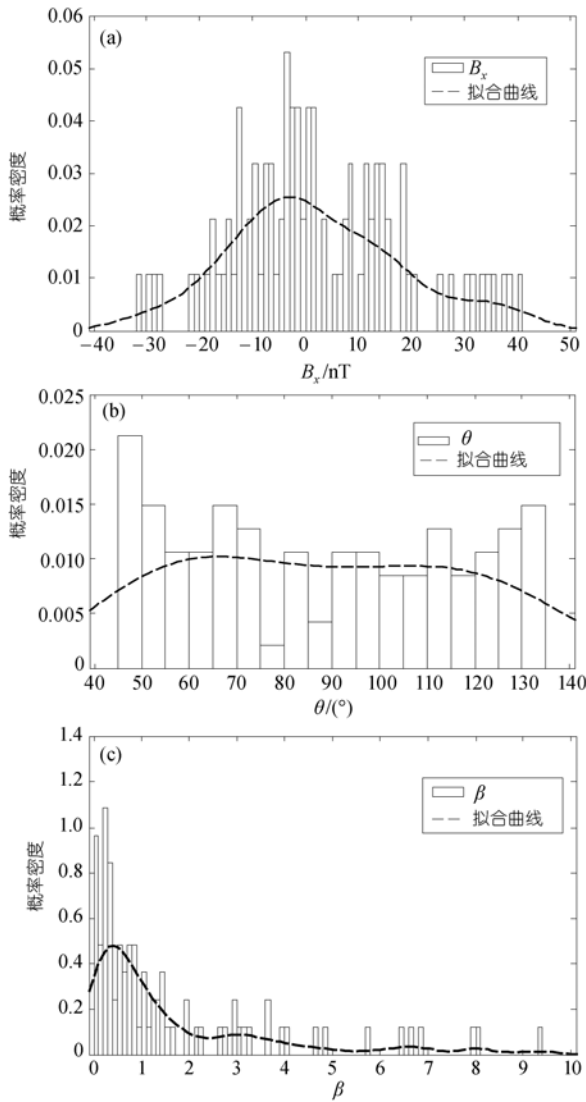


图 2

(a) 近地对流型高速流的磁场  $B_x$  分布图; (b) 近地对流型高速流的磁场和流场夹角; (c) 近地对流型高速流的  $\beta$  值

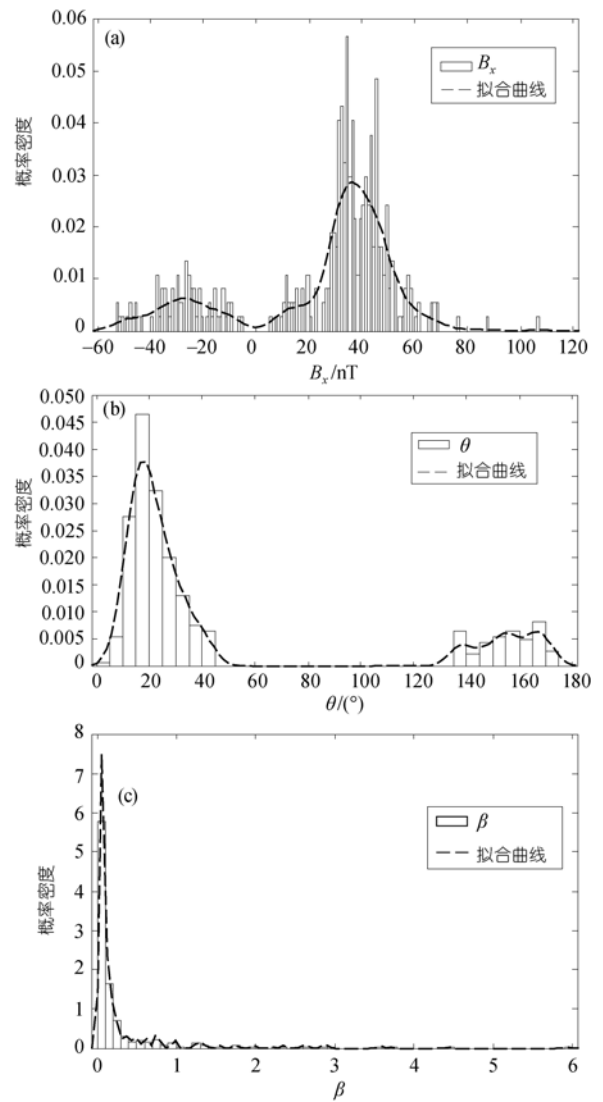


图 3

(a) 近地场向高速流的磁场  $B_x$  分布图; (b) 近地场向高速流的磁场和流场夹角; (c) 近地场向高速流的  $\beta$  值

都有出现, 且主要发生在等 $|Z| < 4 R_E$  的区域. 将高速流事件按流场和磁场的夹角区分为两种: 场向高速流和对流型高速流. 在 465 起近地高速流事件中有 371 起场向流型事件, 94 起对流型事件. 两者有明显不同, 主要表现在:

( ) 场向高速流流场和磁场夹角较小, 最可几值约  $20^\circ$ ; 对流型高速流流场和磁场夹角超过  $45^\circ$ ; 对流型高速流磁场强度较弱,  $B_x$  分量小;

( ) 于 15 nT; 场向高速流磁场强度较强,  $B_x$  分量的最可几值在 30 nT 左右;

( ) 对流型高速流具有较高的  $\beta$  值, 最可几值约 0.4; 场向高速流流场和磁场夹角较的  $\beta$  值较低, 最可几值约 0.1.

( ) 对流型高速流和场向高速流的特性比较表明: 对流型高速流主要发生在中心等离子体片内, 而场向高速流主要分布在等离子体片边界层附近.

致谢 感谢中国双星资料中心为本文提供所需资料.

## 参考文献

- 1 McPherron R L. Substorm related changes in the geomagnetic tail: The growth phase. *Planet Space Sci*, 1972, 20: 1521—1539[[doi](#)]
- 2 Fairfield D H, Ness N F. Configuration of the geomagnetic tail during substorms. *J Geophys Res*, 1970, 75: 7032[[doi](#)]
- 3 Nagai T, Baker D N, Higbie P R, et al. Development of substorm activity in multiple-onset substorms at synchronous orbit. *J Geophys Res*, 1983, 88: 6994—7004[[doi](#)]
- 4 Lui A T Y. Current disruption in the Earth's magnetosphere: Observations and models. *J Geophys Res*, 1996, 101: 13067—13088[[doi](#)]
- 5 Lui A T Y. Observations of ion streaming during substorms. *J Geophys Res*, 1983, 88: 7753—7764[[doi](#)]
- 6 Baumjohann W, Paschmann G, Cattell C A. Average plasma properties in the center plasma sheet. *J Geophys Res*, 1989, 94: 6597—6606[[doi](#)]
- 7 Baumjohann W, Paschmann G, Sckopke N, et al. Average ion moments in the plasma sheet Boundary layer. *J Geophys Res*, 1988, 93: 11507—11520[[doi](#)]
- 8 Baumjohann W, Paschmann G, Luhr H, et al. Characteristics of high-speed ion flows in the plasma sheet. *J Geophys Res*, 1990, 95: 11507—11520
- 9 Angelopoulos V, Baumjohann W, Kennel C F, et al. Bursty bulk flows in the inner central plasma sheet. *J Geophys Res*, 1992, 97: 4027—4039[[doi](#)]
- 10 Angelopoulos V, Kennel C F, Coroniti F V, et al. Statistical characteristics of bursty bulk flow events. *J Geophys Res*, 1994, 99: 21257—21280[[doi](#)]
- 11 Cao J B, Ma Y D, Parks G, et al. Joint observations by cluster satellites of bursty bulk flows in the magnetotail. *J Geophys Res*, 2006, 111: A04206 [[doi](#)]
- 12 Petrukovich A A, Baumjohann W, Nakamura R, et al. Are earthward bursty bulk flows convective or field-aligned? *J Geophys Res*, 2001, 106(10): 21211—21215[[doi](#)]
- 13 Raj A, Phan T, Lin R P, et al. Wind survey of high-speed bulk flows and field-aligned beams in the near-earth plasma sheet. *J Geophys Res*, 2002, 107: 1419—1435[[doi](#)]
- 14 Shiokawa K, Baumjohann W, Haerendel K G. Braking of high-speed flows in the near-Earth tail. *Geophys Res Lett*, 1997, 24: 1179—1182[[doi](#)]