

# 地球磁层内近地磁尾流场的分布特性: 探测一号卫星的观测结果

张灵倩 刘振兴 王继业 马志为 濮祖荫 沈超 郭九苓

(中国科学院空间科学与应用技术研究中心, 北京 100080; 中央民族大学物理与电子工程学院, 北京 100081; ③ 中国科学院等离子体研究所, 合肥 230031; ④ 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 北京大学现代教育技术中心, 北京 100871.

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

**摘要** TC-1 卫星的观测清晰表明近地磁尾流场的流速随地心距离变化. 其中尾向流的流速随地心距离的增加而逐渐增强, 并且有从晨昏两侧向夜侧运动的趋势; 地向对流的流速随地心距离的下降而逐渐下降, 并且有自夜侧向晨昏两侧运动的趋势. 尾向流和地向对流在不同等离子体区域的分布有明显不同: 在低纬瓣区以尾向流为主; 在等离子体片边界层尾向流和对流都较强; 在等离子体片内以地向流为主. 近地磁尾流场的一个重要特征是尾向流和地向流在  $11 R_E$  附近形成了一个明显的强流分布区域, 在此区域地向流和尾向流的流速都较强. 强流分布区域的位置和亚暴膨胀相触发区域的位置一致, 可能对亚暴膨胀相的触发有重要的影响. 另外 TC-1 卫星的观测显示来自中磁尾的 BBF 和对流有明显区别. BBF 基本上分布在  $9 R_E$  以外, 且主要发生在  $|Z| < 3 R_E$  区域.

**关键词** 近地磁尾 地向流 尾向流

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、Pi2 的发生及偶极化开始的位置都位于这个区域 [1-4]. 近地磁尾同时是中磁尾和电离层活动的直接响应区域, 在电离层与磁层耦合过程中起着核心的作用. 近地磁尾场和粒子的研究对了解亚暴和磁暴过程的触发机制有重要的意义 [5,6]. 近地磁尾流场按  $V_y$  的方向可以区分为尾向流和地向流. 以往的观测和研究主要集中在了解地向流, 包括对流和中磁尾重联过程产生的高速地向流(BBF)对亚暴膨胀相触发的影响. 对流和高速地向流都和亚暴过程有密切的关系. BBF 发生在中性片内, 速度矢量与磁场垂直, 持续时间约 10 min. Angelopoulos 等人 [7] 最早注意到 BBF 与 AE 指数存在密切的相关性. 近地中性线模型认为近磁尾磁重联产生的高速流直接触发亚暴膨胀相 [8,9]. 在 Lyons 等人 [10] 提出的“对流减弱模型”中提出对流和亚暴膨胀相的触发存在密切的关系: 即行星际磁场(IMF)由南转北或  $|B_y|$  减小相联系的对流减弱触发了亚暴膨胀相.

以往的观测表明在近地磁尾等离子体片边界层附近存在有尾向流. 直接起源于极光椭圆带区域的上行离子细流与低纬瓣区和等离子体片边界层出现

的尾向流有密切关系. 来自夜侧极光椭圆带源区的上行离子沿磁力线直接进入近地磁尾 [11], 在等离子体片边界层附近形成尾向流动的上行离子细流 [12]. ISEE-1 卫星和 Polar 卫星的观测证实了在近地磁尾低纬瓣区和等离子体片边界层有持续的来自电离层的尾向流. 上行离子细流可以直接将电离层的离子带进近地磁尾等离子体片区域, 对近地磁尾的粒子成分和磁尾动力学过程有重要的影响 [13,14]. 相对地向流而言, 对尾向流的观测和研究较少. 关于近地磁尾尾向流的研究主要是关于来自电离层的上行离子对近地磁尾粒子成分的影响. TC-1 卫星在近地磁尾近赤道区域观测到了大量的尾向流事件. 尾向流在磁静期间、亚暴过程和磁暴期间都有出现, 并且在不同磁地方时的低纬尾瓣、等离子体片边界层和等离子体片区域都能观测到. 本文的主要目的是通过对 TC-1 卫星的观测了解近地磁尾流场, 包括尾向流和地向流的分布特征, 为进一步了解近地磁尾尾向流对亚暴过程的影响提供观测基础.

## 1 近地磁尾尾向流的分布特性

2003 年 12 月 30 日发射的 TC-1 卫星是近地赤道

2006-12-20 收稿, 2007-03-06 接受

国家自然科学基金重大项目(批准号: 40390150)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 40536030)和国家自然科学基金项目(批准号: 40674094)资助

卫星, 轨道高度  $6900 \times 85300$  km, 倾角  $28.5^\circ$ , 开普勒周期约 27.4 h. TC-1 卫星为近地磁尾场和粒子时空变化的因果关系探测提供了很好的观测条件. 在 TC-1 卫星上配置有热离子分析仪(Hot Ion Analyser, 简称为 HIA). HIA 能够测量离子的能谱、三维分布函数, 探测的能量范围为  $5 \text{ eV} \sim 30 \text{ keV}$ , 时间分辨率为 4 s. 利用 HIA 的探测数据, 可以了解近地磁尾( $13 R_E$  以内)近赤道区域流场的基本特性.

在 GSM 坐标系下, 将流场按  $X$  方向的不同区分为尾向流( $V_x < 0$ )和地向流( $V_x > 0$ ). 首先对 2004 年 07 月 01 日~2004 年 10 月 31 日期间 TC-1 卫星观测到的尾向流进行统计, 统计条件为: 1)  $0 > X > -14 R_E$ ; 2)  $V_x < 0$ ; 3)  $V_{\max} > 50 \text{ km/s}$ ; 4) 持续时间超过 3 min. TC-1 卫星观测到满足上面条件的尾向流事件共 629 起. 尾向流的分布如图 1 所示. 由图 1 可以知道:

( ) 在  $X$ - $Y$  平面, 尾向流的流速随  $X$  坐标的减小而逐渐增强. 尾向流有从晨昏两侧向夜侧运动的趋势. 尾向流在夜侧较晨昏两侧强.

( ) 在  $X$ - $Z$  平面, 尾向流有较强的  $V_z$  分量, 南半球尾向流基本沿磁力线流向赤道面. 北半球尾向流远离赤道面, 向高纬运动. 尾向流在赤道面附近最强.

## 2 近地磁尾地向流的分布特性

### 2.1 低速地向流(对流)

TC-1 卫星在近地磁尾观测到的地向流包括了对流和来自中磁尾重联过程形成的高速地向流. 相对中磁尾重联产生的高速地向流而言, 对流的流速较低, 又称其为低速地向流, 简称为地向流.

首先对 2004 年 07 月 01 日~2004 年 10 月 31 日期间 TC-1 卫星在近地磁尾观测到的低速地向流进行统计, 统计条件为: 1)  $0 > X > -14 R_E$ ; 2)  $V_x > 0$ ; 3)  $V_{\max} > 50 \text{ km/s}$ ; 4) 持续时间超过 3 min. 由于在近地磁尾  $14 R_E$  之内的 BBF 持续时间较短, 基本不超过 2 min. 所以在上面的统计条件下得到的地向流分布事实上是近地磁尾近赤道区域( $|Z| < 5 R_E$ )的对流分布.

TC-1 卫星观测到满足上面条件的低速地向流事件共 1978 起. 地向流的分布如图 2 所示. 由图 2 可以知道:

( ) 在  $X$ - $Y$  平面, 地向流的流速随  $X$  坐标的减小而逐渐减弱. 赤道面附近, 地向流主要沿日地连线, 晨昏两侧地向流的  $V_y$  分量较夜侧强. 总的来说对流

在夜侧较弱, 在晨昏两侧较强. 并且对流有自夜侧向晨昏两侧运动的趋势.

( ) 在  $X$ - $Z$  平面, 晨昏两侧地向流的分布和强度较对称. 地向流有较强的  $V_z$  分量, 南半球对流基本沿磁力线流向向阳面赤道面. 北半球对流远离赤道面, 向向阳面高纬运动. 对流速度在赤道面和南北半球没有明显区别.

### 2.2 高速地向流(BBF)

BBF 的选择条件是  $V_x > 300 \text{ km/s}$  且持续时间超过 30 s 的高速地向流. 首先对 2004 年 07 月 01 日~2004 年 10 月 31 日期间 TC-1 卫星在近地磁尾观测到的不同持续时间和速度条件下的 BBF 事件数目进行了统计, 结果如表 1 所示.

表 1 中, BBF 事件数为 TC-1 卫星在近地磁尾探测到的 BBF 事件数目. 由表 1 可以看出和中磁尾相比, 在近地磁尾( $14 R_E$  之内)的 BBF 持续时间较短, 且流速较低.

TC-1 卫星在近地磁尾探测到的流速超过  $300 \text{ km/s}$ , 且持续时间超过 30 s 的 BBF, 其分布特征如图 3 所示.

由图 3 可以看出, BBF 基本上分布在  $9 R_E$  以外, 其速度基本不随位置变化. 在夜侧和晨昏两侧都有 BBF 出现, 但由于 BBF 事件的数量较少, 无法给出分布的具体特征. 和对流相比, BBF 主要发生在等离子体片区域( $|Z| < 3 R_E$ ). 总的来说, BBF 与对流有明显的区别. 在近地磁尾 BBF 的数量明显较地向流和尾向流低.

需要特别说明的是图 1, 2 和 3 中在  $Z = 0$  附近有空白的带状区域. 这是由于 2004 年 07 月 01 日~10 月 31 日期间 TC-1 卫星上的热离子分析仪在  $Z = 0$  (GSM 坐标系下)附近没有有效的观测数据造成的, 并不是这一区域没有尾向流或地向流.

## 3 不同等离子体区域的流场分布

2004 年 07 月 01 日~2004 年 10 月 31 日期间 TC-1 卫星在近地磁尾  $7 \sim 13$  个地球半径之间观测到尾向流共 516 起, 地向流共 1596 起. 将每一起事件的流速 ( $V_x, V_y, V_z$ )、磁场 ( $B_x, B_y, B_z$ ) 和热离子密度 ( $n$ ) 进行时间平均, 代表其流场特征. 进一步区分在低纬瓣区、等离子体片边界层和等离子体片区不同等离子体区域出现的尾向流和地向流事件, 参考中磁尾不同等离子体区域热离子的典型参数, 结合 TC-1 卫星在近地磁尾观测的热离子特性使用如下的判别步骤和条件:

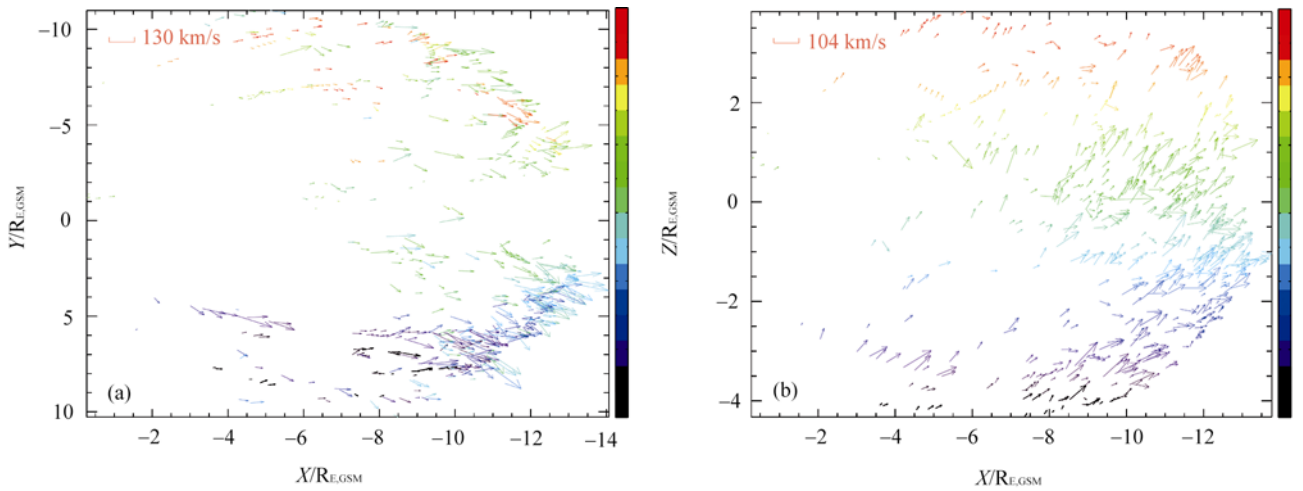


图 1 近地磁尾尾向流的分布

(a) 尾向流在 X-Y 平面的分布, (b) 尾向流在 X-Z 平面的分布. 图中线段的颜色代表 Z 坐标, 线段的长度代表流速在平面投影的大小, 箭头的方向代表尾向流在该平面的方向

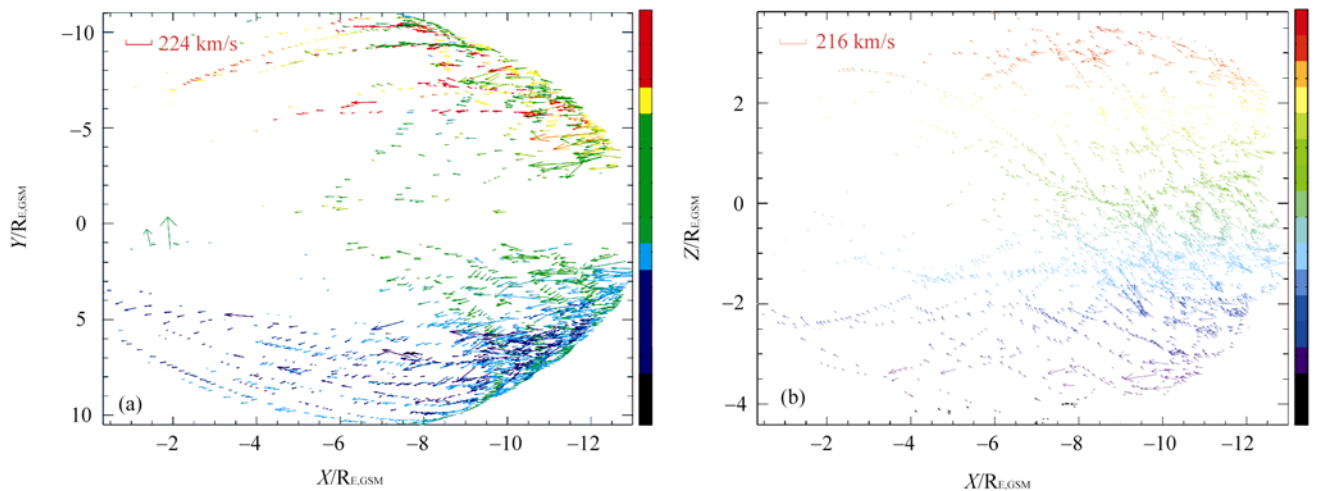


图 2 近地磁尾地向流的分布

(a) 地向流在 X-Y 平面的分布, (b) 地向流在 X-Z 平面的分布. 图中线段的颜色代表 Z 坐标, 线段的长度代表流速在平面投影的大小, 箭头的方向代表地向流在该平面的方向

表 1 不同统计条件下探测到的 BBF 事件次数

持续时间/s	30	30	30	40	40	40
平均速度/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	300	400	500	300	400	500
BBF 事件数/起	92	47	17	61	34	8

- ( )  $-7 > X > -14 R_E$ ;
- ( )  $B_z > B_x$ , 或  $n > 0.4 \text{ cm}^{-3}$ , 等离子体片区;
- ( )  $n < 0.04 \text{ cm}^{-3}$ , 低纬瓣区;
- ( )  $B_x/B_z < 1.5$ , 等离子体片区;
- ( )  $n < 0.07$  且  $B_x/B_z > 2.0$ , 低纬瓣区;
- ( ) 等离子体片边界层(不符合以上条件).

按这样的统计条件得到近地磁尾不同等离子体区域(低纬瓣区、等离子体片边界层和等离子体片区域)持续时间超过 3 min 的尾向流和地向流发生概率统计结果如表 2 所示.

由表 2 可以知道尾向流和地向流在不同等离子体区域的分布有明显不同: 尾向流共 516 起, 地向流共 1596 起, 两者之比约 1:3. 其中低纬瓣区尾向流共 54 起, 地向流共 8 起, 两者之比约 7:1; 等离子体片边界层尾向流共 262 起, 地向流共 588 起, 两者之比约 1:2; 等离子体片内共 200 起, 地向流共 1000 起,

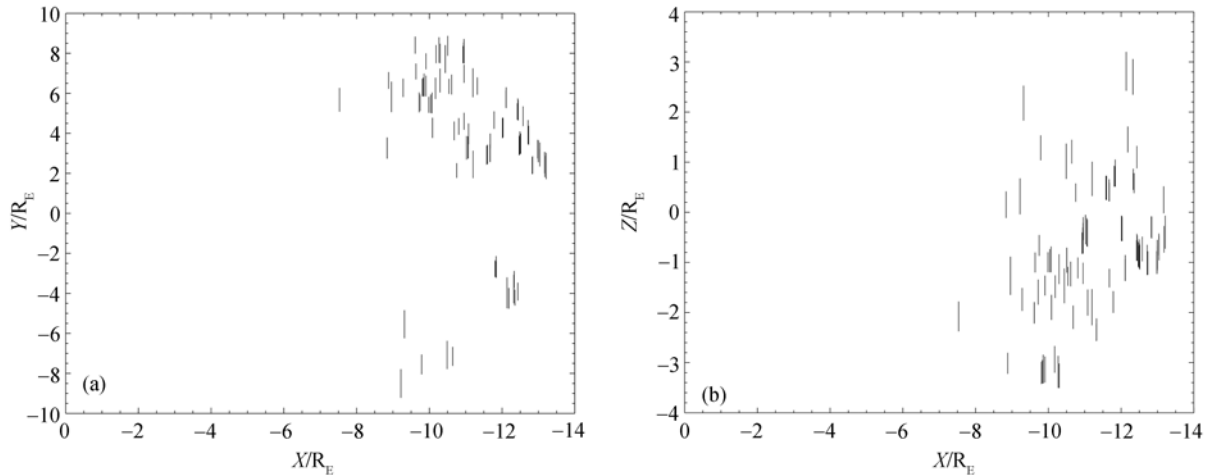


图3 TC-1卫星在近地磁尾观测到的BBF分布

(a) BBF在X-Y平面的分布, (b) BBF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, BBF基本上分布在 $9 R_E$ 以外, 其速度基本不随位置变化, 且主要发生在 $|Z| < 3 R_E$ 区域

表2 不同区域尾向流和地向流发生概率的统计结果

等离子体区域	流场形式	
	尾向流/起	地向流/起
低纬瓣区	54	8
等离子体片边界层	262	588
等离子体片内	200	1000
合计	516	1596

两者之比为 1:5. 从磁力线的特征来说, 在低纬瓣区开磁力线区域以尾向流为主; 在等离子体片边界层开-闭磁力线过渡区域尾向流和地向流都较强, 尤其

地向流更明显; 在等离子体片内闭合磁力线区域以地向流为主. 总的来说, 尾向流和地向流的分布随等离子体区域的不同而有明显区别.

#### 4 讨论和结论

将 TC-1 卫星在近地磁尾观测到的尾向流和地向流的分布做进一步比较(图 4), 发现:

( ) 在 X-Y 平面, 近地  $6 R_E$  以内尾向流和地向流都较弱;  $11 R_E$  附近地向流和尾向流都较强; 尾向流与地向流在  $11 R_E$  附近形成一个明显的界面.

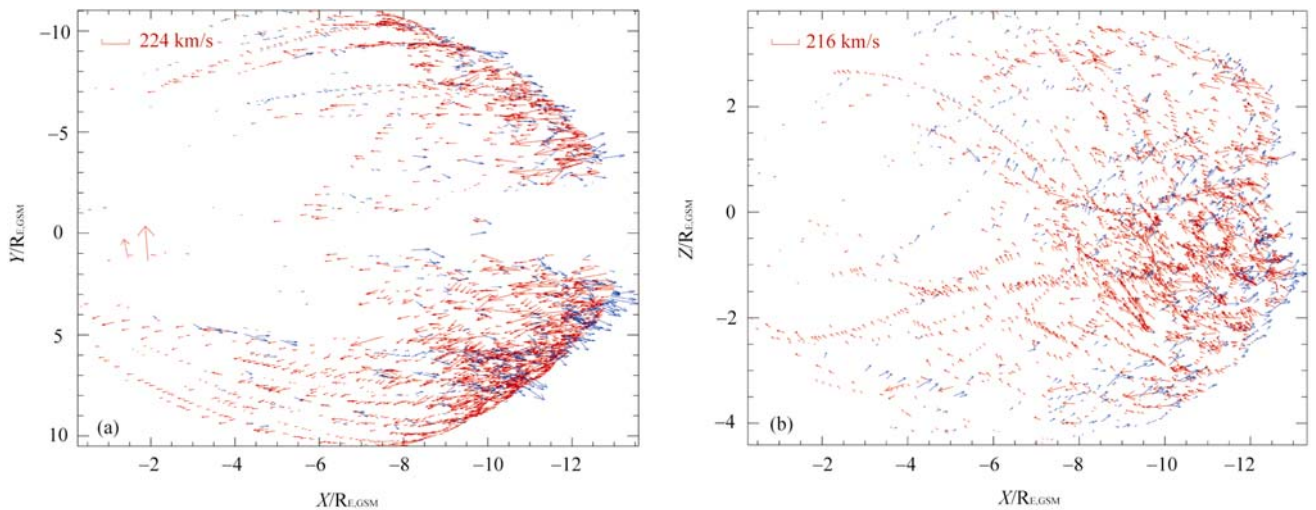


图4 近地磁尾近赤道区域的流场分布

(a) X-Y 平面, (b) X-Z 平面. 图中红色线段代表地向流, 蓝色线段代表尾向流, 线段的长度代表流速在平面投影的大小, 箭头的方向代表地向流或尾向流在该平面的方向. 在近地  $6 R_E$  以内, 尾向流和地向流都较弱; 尾向流与地向流在  $11 R_E$  附近形成一个明显的界面, 在此界面地向流和尾向流的流速都较强, 其分布比较密集

( ) 在  $X-Z$  平面, 尾向流和地向流都有较强的  $V_z$  分量.

尾向流和地向流在  $11 R_E$  附近形成了一个明显的强流分布区域, 在此界面地向流和尾向流的流速都较强, 且分布较为密集. 相向运动的地向流和尾向流容易引起波动, 对不稳定性的发生有重要的影响. 该强流分布区域的位置与亚暴膨胀相触发的位置一致, 可能对亚暴膨胀相的触发有重要的影响.

总的来说, TC-1 卫星的观测清晰表明近地磁尾尾向流和地向流的流速都随地心距离不同而有明显变化. 其中尾向流的流速随地心距离的增加而逐渐增强, 并且有从晨昏两侧向夜侧运动的趋势; 地向流的流速随地心距离的下降而逐渐下降, 并且有自夜侧向晨昏两侧运动的趋势. TC-1 卫星的观测也同时表明近地磁尾流场的分布特性随等离子体区域的不同而有明显区别. 在低纬瓣区以尾向流为主; 在等离子体片边界层尾向流和地向流都较强; 在等离子体片内以地向流为主. 另外 TC-1 卫星的观测显示来自中磁尾的 BBF 基本上分布在  $9 R_E$  以外, 其速度基本不随位置变化, 且主要发生在  $|Z| < 3 R_E$  区域. 在近地磁尾, BBF 与地向对流有明显的区别.

致谢 感谢中国双星数据中心为本文提供所需数据.

### 参 考 文 献

- 1 Lui A T Y, Chang C L, Mankofsky A, et al. A cross-field current instability for substorm expansions. *J Geophys Res*, 1991, 96: 11389—11401
- 2 Shiokawa K, Baumjohann W, Haerendel G, et al. High-speed ion flow, substorm current wedge, and multiple Pi2 pulsations. *J Geophys Res*, 1998, 103: 4491—4507 [\[DOI\]](#)
- 3 Yau A W, Shelley E G, Peterson W K, et al. Energetic auroral and polar ion outflow at ED 1 altitudes: Magnitude, composition and magnetic activity dependence and long term variations. *J Geophys Res*, 1985, 90: 8417—8432
- 4 Lui A T Y. Current disruption in the Earth's magnetosphere: Observations and models. *J Geophys Res*, 1996, 101: 13067—13088 [\[DOI\]](#)
- 5 Shelley E G, Jonson R G, Sharp R D. Satellite observations of energetic heavy ions during a geomagnetic storm. *J Geophys Res*, 1972, 77(31): 6104—6110
- 6 Moore T E. Origin of magnetospheric plasma. *Rev Geophys*, 1991, 29(Supp 1): 1039—1048
- 7 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
- 8 Shiokawa K, Baumjohann W, Haerendel G. Braking of high-speed flows in the near-Earth tail. *Geophys Res Lett*, 1997, 24: 1179—1182 [\[DOI\]](#)
- 9 Baker D N, Pulkkinen T I, Angelopoulos V, et al. Neutral line model of substorms: Past results and present view. *J Geophys Res*, 1996, 101: 12975—12987 [\[DOI\]](#)
- 10 Lyons L R, Blanchard G T, Baker D N. Substorm onset: The result of IMF-driven reduction in large-scale convection. In: Kokubun S, Kamide Y. Substorm 4. New York: Terra Scientific Publishing Company and Kluwer Academic Publishers, 1998. 265
- 11 Gazey N G J, Lockwood M, Grande M, et al. EISCAT/CRRES observations: Nightside ionospheric ion outflow and oxygen-rich substorm injections. *Ann Geophys*, 1996, 14: 1032—1043 [\[DOI\]](#)
- 12 Eastman T E, Frank L A, Peterson W K, et al. The plasma boundary layer. *J Geophys Res*, 1984, 89: 1553—1572
- 13 Liemohn M W, Moore T E, Craven P D, et al. Occurrence statistics of cold, streaming ions in the near-earth magnetotail: Survey of polar-tide observation. *J Geophys Res*, 2005, 110: 2687—2704 [\[DOI\]](#)
- 14 Sharp R D, Car T D L, Peterson W K, et al. Ion streams in the magnetotail. *J Geophys Res*, 1981, 86: 4639—4648