

TC-1 卫星在近地磁尾观测到的持续尾向流事件

张灵倩 刘振兴 马志为 濮祖荫 王继业 沈超

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080; 中国科学院等离子体研究所, 合肥 230031; 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 中央民族大学物理与电子工程学院, 北京 100081. E-mail: lqzhang@cssar.ac.cn)

摘要 2004年7月11日ACE卫星、Imagine卫星和TC-1卫星联合观测到伴随有持续尾向流的亚暴过程。TC-1卫星在近地磁尾晨侧观测到的磁尾亚暴过程有三个阶段: 增长相过程(11:43~12:19), 预膨胀过程(12:19~12:28)和偶极化过程。Imagine卫星在12:26观测到极光突然增亮; 2 min后偶极化过程发生。尾向流的持续时间约45 min, 经历了增长相和预膨胀相。随偶极化过程的发生, TC-1卫星进入等离子体片内观测到高速地向流。尾向流具有明显的高密、低温和沿磁场方向流动的特征, 与Cluster等卫星在近地磁尾观测到的电离层上行离子流特征吻合。卫星的联合观测表明近地磁尾尾向流与南向行星际磁场密切相关, 对亚暴过程有重要影响。

关键词 亚暴膨胀相突发 偶极化 南向行星际磁场 尾向流

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30年来磁层亚暴研究已经取得很大进展, 但关于膨胀相起源仍有很大争议。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]。

上行离子作为电离层和磁尾耦合过程的重要方式对亚暴过程有重要的影响。Cladis等人^[7]根据引导中心轨迹计算得到磁层中极隙区起源O⁺的粒子分布结果, 最早提出了由于磁场和电场对上行O⁺离子压力的响应, 使上行离子有可能成为亚暴的触发机制。Daglis等人^[8~10]对上行H⁺和O⁺离子与亚暴AE指数和亚暴增长相期间越尾电流的变化进行了观测和分析, 得到的结论如下: 伴随上行H⁺和O⁺离子的密度增长, 越尾电流增强, 同时AE指数增高。Kistler等人^[11]进一步使用Cluster和Image卫星对亚暴期间上行离子和极光活动进行了多点观测, 发现上行离子与极光弧之间有非常好的对应关系, 上行离子通量最高时间与极光弧亮度最高时间相对应。最近的观测和模拟结

果进一步表明极区电离层上行离子对近地磁尾动力学过程有重要的影响。2005年Liemohn等人^[12]利用Polar卫星对近地磁尾(约9.5 Re)的低能、冷等离子体上行离子细流进行了统计研究。观测结果显示离子细流是连续的出现在尾瓣区, 形成尾瓣风。由于上行离子细流可以将电离层起源的离子连续和直接的提供给近地磁尾内磁层提供电离层起源的粒子成分, 在地磁扰动时不需要通过磁层对流将远磁尾的上行离子携带至近地。Nose等人^[13]和Moore等人^[14]研究了南向行星际磁场驱动下向阳面和夜侧极光椭圆带区域的上行离子, 结果表明起源于夜侧极光椭圆带区域上行离子能够形成极光区风, 对近地磁尾(10 Re附近)粒等离子体片成分和等离子体片有重要的影响。

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, 最高为7.813×10⁻³ nT, 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。2004年7月11日TC-1卫星观测到1次典型的伴随有持续尾向流的亚暴过程, 尾向流的持续时间约45 min。本文的主要目的是通过TC-1卫星在2004年7月11日观测到的

2006-10-10 收稿, 2006-12-22 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)和国家杰出青年基金项目(40125012)资助

持续尾向流事件, 了解近地磁尾尾向流对亚暴过程的影响.

1 2004 年 7 月 11 日亚暴事件分析

1.1 地面、Imagine 卫星和 ACE 卫星的联合观测

() 亚暴 AE 指数: 极光电集流的强度通常用极光电集流指数 AL, AU, AE 和 AO 来描述. 这些指数的数值由均匀分布在极光带附近各个地磁台的每个小时内水平强度变化来决定(应消除平均的平静变化), 水平强度的单位为纳特. AU 指数是在这些台站中每个小时内的最大正变化, AL 指数是在这些台站中每个小时内的最大负变化, AE 指数是每小时内最大正变化同最大负变化的绝对值之和. AE 指数是目前普遍用来描述亚暴强度的指数. 当天 AE 指数的变化如图 1 所示: 在 12:30 左右, AE 指数最高超过 500 nT.

() DST 指数: 是描述磁暴时变化的指数. 在地磁赤道附近选取 5 个均匀分布在不同经度上的地磁台, 这些台站的每个小时内水平强度变化的平均值就是 DST 的数值, 单位为 nT. 当天 9:00 DST 指数达到最高, 为 23 nT; 由 12:00~13:00, DST 指数由 2 nT 变化为 -5 nT, 没有磁暴发生.

() 极光活动: Imagine 卫星于 12:26:05 观测到了明显的极光增亮, 由此确定亚暴膨胀相触发的时间为 12:26:05.

() 太阳风和行星际磁场条件: 如图 2 所示, ACE 卫星的观测结果显示自 10:00~11:30 行星际磁场

持续南向, 在 -5 nT 逐渐升高到 -9 nT; 在 11:33 行星际磁场突然南转北. 太阳风流速由 390 km/s 持续增加至 450 km/s.

1.2 TC-1 卫星的观测结果

2004 年 7 月 11 日 TC-1 卫星在近地磁尾观测到的亚暴过程中磁场和流场随时间的演化如图 3 所示, 图 3 中从上到下依次为流场(V_x)、磁场(B_x, B_y, B_z)、密度(n)、温度(包括热离子温度 T , 平行磁力线温度 T_{par} 和垂直磁力线的温度 T_{per})和流场投影(包括平行磁力线速度 V_{par} 和垂直磁力线速度 V_{per}).

1.2.1 磁场特性

() 11:43 ~ 12:19 为亚暴增长相过程: 磁场 B_x 分量从 26 nT 逐渐升高至 56 nT; 磁场 B_y 分量在 30 nT 逐渐下降至 20 nT; 磁场 B_z 分量由 10 nT 逐渐下降至 2 nT. 该过程持续时间约 36 min, 具有明显的亚暴增长相特征.

() 12:19 ~ 12:28 为预膨胀过程: 磁场 B_x 分量由 56 nT 逐渐下降至 53 nT; 磁场 B_y 分量从 20 nT 逐渐下降至 18 nT; 磁场 B_z 分量从 2 nT 迅速升高至 12 nT. 在增长相后期磁场位型出现了与膨胀相期间相似的变化特征, 由非偶极型逐渐向偶极型转化, 等离子体片有较弱膨胀. 将这种在亚暴增长相后期、膨胀相触发之前的缓慢等离子体片膨胀过程称为预膨胀过程, 此过程伴随着磁场的明显扰动. 增长相期间储存在近地磁尾的能量有可能首先在预膨胀过程中被缓慢释放, 然后在偶极化过程中被突然释放. 与磁通量堆

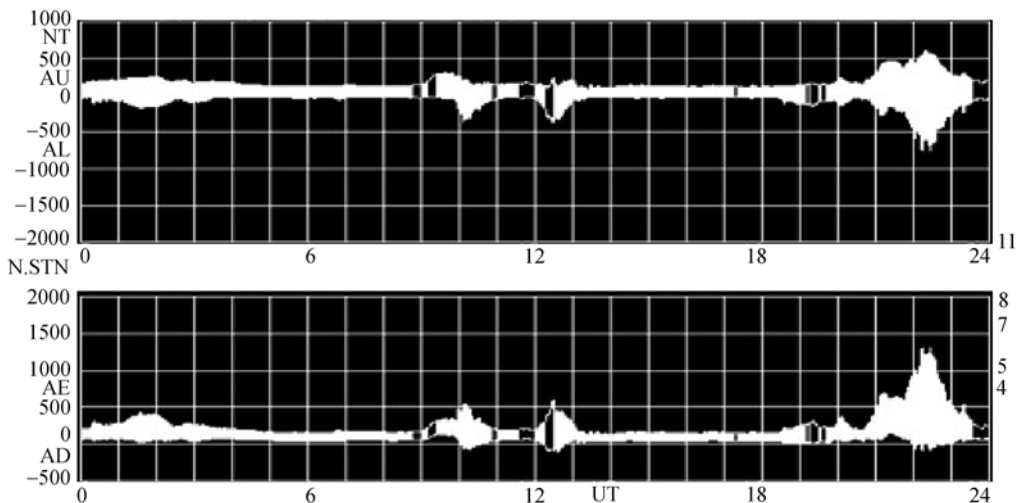


图 1 2004 年 7 月 11 日 AE 指数

在 12:30 左右, AE 指数最高超过 500 nT, 有亚暴发生

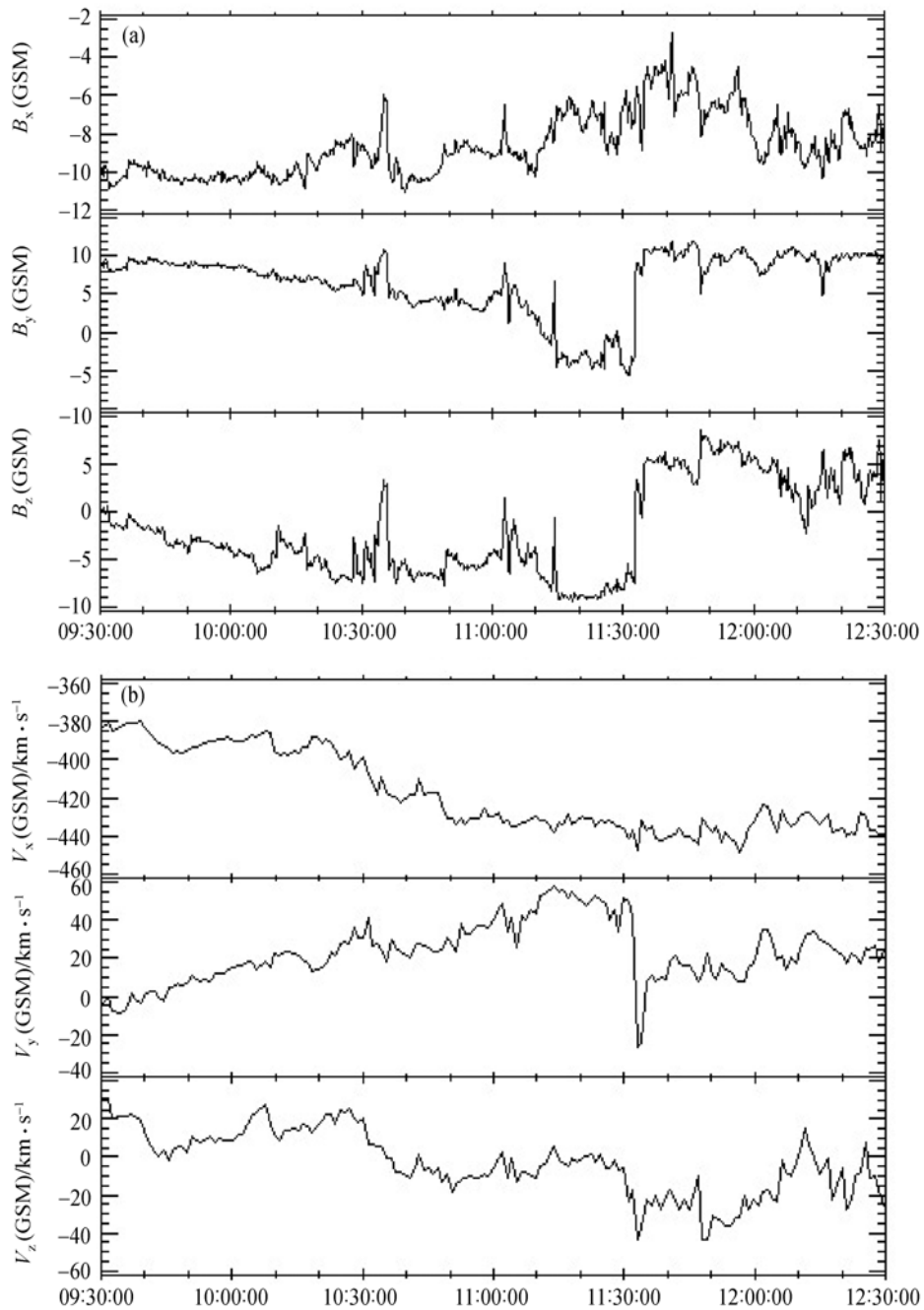


图2 太阳风和行星际磁场条件

2004年7月11日10:00~11:30期间太阳风流速由390 km/s持续增加至450 km/s; 行星际磁场持续南向, 在-5 nT逐渐升高到-9 nT. 在11:33行星际磁场突然南转北

积过程不同, 预膨胀过程中的磁场 B_x 下降, B_z 分量增高. 与偶极化过程也不同, 偶极化过程持续时间较短 (约 2~3 min), 且磁场 B_y 分量会有突然增强. 预膨胀过程的持续时间较长 (约 9 min), 而且磁场 B_y 分量没有较明显的变化.

() 12:28~12:31 为偶极化过程: 磁场偶极化过程持续了约 3 min. 磁场 B_x 分量由 52 nT 迅速下降至 18 nT; 磁场 B_y 分量从 16 nT 突然升高至 37 nT; 磁场 B_z 分量从 14 nT 迅速升高至 25 nT. 12:31 之后恢复相开始, 和增长相开始时刻 (11:43) 的磁场 (26, 23, 10 nT)

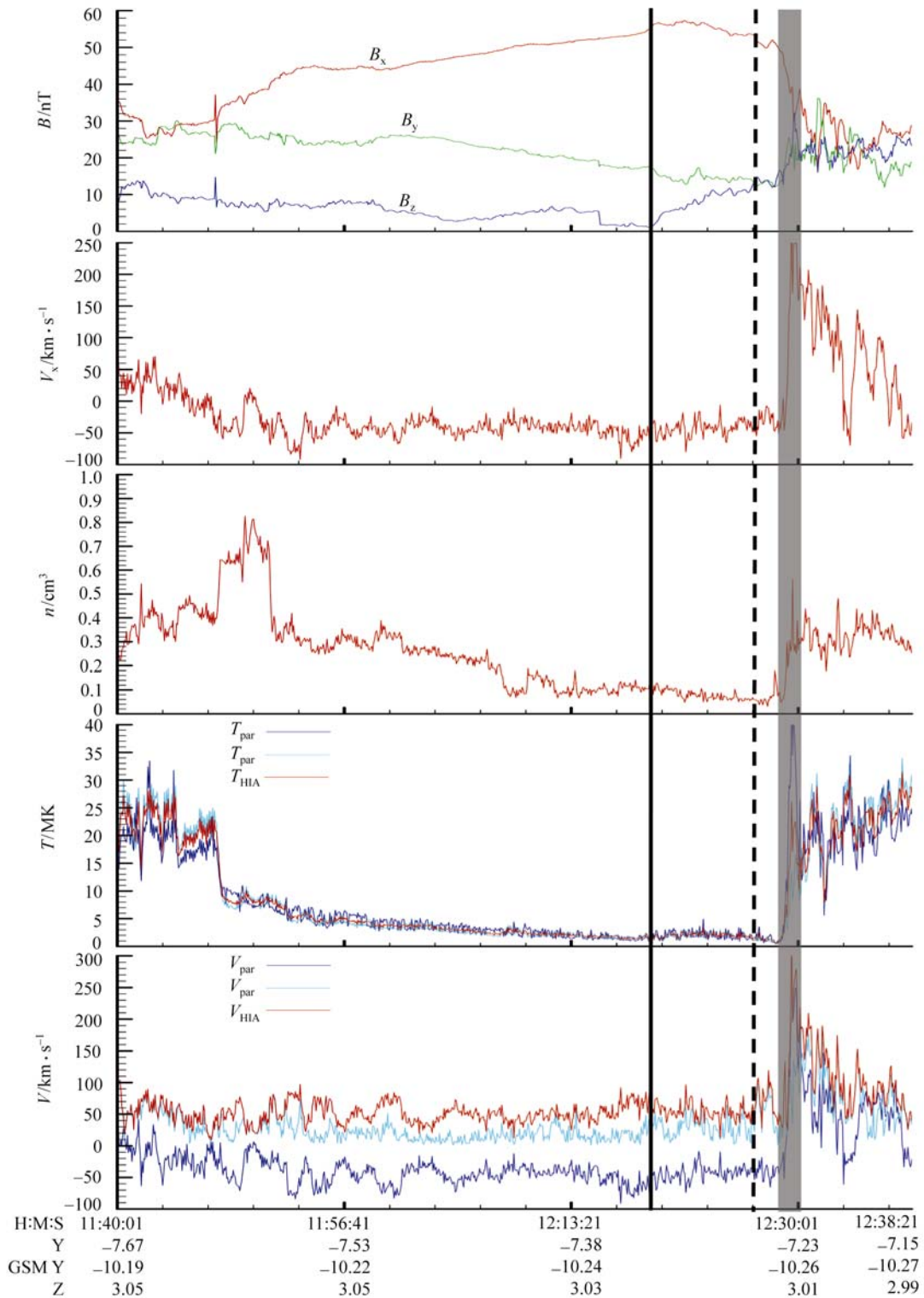


图 3 2004 年 7 月 11 日 TC-1 卫星在近地磁尾观测到的尾向流和亚暴过程

实线标志为预膨胀过程开始时间(12:19); 虚线标志为极光突然增亮, 亚暴膨胀相触发时间(12:26); 阴影部分为偶极化过程, 持续时间约 3 min. TC-1 卫星在近地磁尾观测到持续时间约 45 min 的尾向流事件, 尾向流具有明显的高密、低温和沿磁场方向流动特征. 尾向流经历了整个增长相和预膨胀过程. 随偶极化过程发生, 在等离子体片内观测到高速地向流

相比, 到 12:36 磁场各个分量为(30, 14, 20 nT), 磁力线基本恢复原状。

1.2.2 热离子特性分析

(1) 热离子密度和温度

增长相期间尾向流速(V_x)最高达到 -90 km/s, 平均为 -43 km/s; V_y 平均为 -13 km/s; V_z 平均为 -7 km/s. 热离子密度由 0.8 cm^{-3} 逐渐下降至 0.1 cm^{-3} . 热离子的温度由 27 MK 持续下降至 3 MK, 平行温度(T_{par})和垂直温度(T_{per})同时下降, 且 T_{par} 和 T_{per} 逐渐趋向一致. 尾向流的平行温度平均 3.2 MK, 垂直平均温度 3.0 MK, 热离子由各向异性逐渐趋向各向同性. 增长相期间 TC-1 卫星的位置基本没有变化, 由 $(-7.5$ Re, -10.2 Re, 3.0 Re)运动至 $(-7.4$ Re, -10.2 Re, 3.0 Re). 热离子密度的变化是由于增长相期间等离子体片变薄, 卫星由等离子体片逐渐进入等离子体片边界层造成的。

在预膨胀过程中, 热离子密度由 0.1 cm^{-3} 进一步下降至 0.04 cm^{-3} . TC-1 卫星位于等离子体片边界层附近, 并逐渐进入低纬瓣区. 预膨胀过程中尾向流热离子温度有逐渐增高的趋势, 同时热离子的温度、 T_{par} 和 T_{per} 表现出明显的扰动。

随偶极化过程的发生, V_x 由 -40 km/s 突然升高至 250 km/s, 同时热离子密度迅速升高至 0.3 cm^{-3} 左右. 热离子的温度由 1 MK 迅速升高至 24 MK. 同时温度由各向同性转变为明显的各向异性. 密度的变化表明随偶极化过程的发生, TC-1 卫星由片边界层进入了中心等离子体片观测到高速地向流. 速度和温度的突然变化不是尾向流结束, 而是由于 TC-1 卫星由尾向流区域(低纬瓣区和等离子体片边界层)进入了地向流区域(等离子体片内)造成的。

与偶极化过程出现的地向流温度(约 25 MK)相比, 尾向流具有明显的低温特性. 相对磁场而言, 地向流热离子的垂直温度高于平行温度, 尾向流的平行温度高于垂直温度. 温度的变化表明了流场与磁场之间可能存在着能量转化过程. 首先离子的热能能够转化为磁能储存在近地磁尾; 在预膨胀过程中, 随磁场位型逐渐由非偶极型向非极型转化, 部分磁能可能会转化为离子的热能。

(2) 流场和磁场的夹角

尾向流的持续时间为 $11:43 \sim 12:28$, 约 45 min,

经历了整个增长相过程和预膨胀过程. 将流场在磁场方向上投影, 可知整个尾向流持续期间尾向流和磁场之间的夹角平均为 104.4° , 尾向流基本沿磁力线方向流动, 即尾向流具有明显的场向特征. 尾向流平行磁场速度在 40 km/s 左右, 垂直磁场速度在 10 km/s 左右, 平行磁场速度明显较垂直磁场速度高。

2 讨论

目前对近地磁尾尾向流的起源一般认为有两种: () 直接起源于电离层的极光椭圆区域, 这是被 ISEE-1 卫星和 Polar 卫星证实的. 这部分尾向流的主要特征是低温、高密, 主要分布在低纬瓣区, 片边界层和等离子体片内; () 被电离层反射回来向磁尾方向流动的离子束, 主要分布在等离子体片边界层, 且能量较高. 本事件中观测到的连续尾向流具有电离层上行离子流的明显特征, 如低温、高密和沿磁力线流动等特征, 这与 ISEE-1 卫星和 Polar 卫星在近地观测到来自电离层的尾向流特征基本吻合, 且卫星在等离子体片边界层和低纬瓣区等区域连续观测到了尾向流, 表明其来自电离层. Cluster 卫星在近地磁尾(4 Re 附近)曾观测到类似的持续时间超过 30 min 上行离子流事件^[14]. 上行离子的流速平均在 50 km/s 左右, 上行离子的 O^+ 数密度较 H^+ 的高. 这一事件中, Cluster 卫星位置处的磁力线与夜侧极光椭圆带相连, 上行离子通量与极光弧亮度最高相对应. 这一观测表明起源于夜侧极光椭圆带区域的上行粒子和亚暴过程有密切的关系。

TC-1 卫星在近地磁尾, 包括晨昏两侧和夜侧的低纬瓣区、等离子体片边界层和等离子体片区域都观测到大量的尾向流事件. 对这些尾向流事件的统计分析表明近地磁尾尾向流具有明显来自电离层的高密、低温特征^[15]. 由此可以知道 TC-1 卫星在近地磁尾观测到的尾向流应该是来自电离层, 对近地磁尾动力学过程有重要的影响¹⁾. 本文对了解近地磁尾尾向流对亚暴过程的影响提供了观测依据。

3 结论

2004 年 7 月 11 日 ACE 卫星、Imagine 卫星和 TC-1 卫星联合观测到行星际磁场南转北触发的亚暴过程. ACE 卫星观测到 $10:00 \sim 11:30$ 期间行星际磁场持续南向, 在 $11:33$ 行星际磁场突然南转北; 自 $11:43$

1) Zhang L Q, Liu Z X, Pu Z Y, et al. The effect of the tailward flow original from the ionosphere on the near Earth magnetic field. Chin J Space Sci, 2007, 27(3). 已接受

开始, TC-1 卫星在近地磁尾晨侧($-7 R_e$, $-10 R_e$, $3 R_e$) 观测到亚暴增长相过程开始, 增长相持续时间约 36 min; 在增长相后期(12:19 起)有预膨胀过程发生, 持续时间 9 min; Imagine 卫星在 12:26 观测到极光突然增亮, 亚暴膨胀相触发; 2 min 后偶极化过程发生, 持续时间约 3 min. 亚暴过程中伴随有持续约 45 min 尾向流, 经历了整个亚暴增长相过程和预膨胀过程. 尾向流分布在等离子体片边界层和低纬瓣区, 具有明显的高密、低温和沿磁场方向流动特征. 等离子体片内来自中磁尾的高温地向流与等离子体片边界层来自电离层的低温尾向流相互作用较易激发不稳定性, 对亚暴膨胀相的触发可能有重要的影响. 本文的观测同时表明近地磁尾尾向流与南向行星际磁场密切相关, 这与 Nose 等人 [13] 和 Moore 等人 [14] 的研究结果相吻合.

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. Braking of high-speed flows in the near-Earth tail. *Geophys Res Lett*, 1997, 24: 1179—1182[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: 6104—6110
- 6 Moore T E. Origin of magnetospheric plasma. *Rev Geophys*, 1991, (Suppl 1): 1039—1048
- 7 Cladis J B, Francis W E. The polar ionosphere as a source of the storm time ring current. *J Geophys Res*, 1985, 90: 3465—3473
- 8 Daglis I A, Paschalidis N P, Sarris E T, et al. Statistical features of the substorm expansion-phase as observed by AMPTE/CCE in Magnetospheric substorms. In: Kan J R, Potemra T A, Kokubun S, et al, eds. *Geophysical Monography Series*, 64. Washington: American Geophysical Union, 1991. 323—332
- 9 Daglis I A, Sarris E T, Kremser G. Ionospheric contribution to the cross-tail current during the substorm growth phase. *J Atmos Terr Phys*, 1991, 53: 1091—1098[DOI]
- 10 Daglis I A, Sarris E T, Wilken. AMPET/CCE CHEM observations of the ion population at geosynchronous altitudes. *Ann Geophys*, 1993, 11: 685—696
- 11 Kistler L M, Frey H U, Mobius E, et al. Motion of auroral ion outflow structures observed with Cluster and IMAGE FUV. *J Geophys Res*, 2002, 107: 1186—1192[DOI]
- 12 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
- 13 Nose M, Taguchi S, Hosokawa K, et al. Overwhelming O^+ Contribution to the plasma sheet energy density during the October 2003 superstorm: Geotail/EPIC and IMAGE/LENA observations. *J Geophys Res*, 2005, 110: doi: 10.1029/2004JA010930
- 14 Moore T E, Fok M C, Christon S P, et al. Solar and ionospheric plasmas in the ring current region. *Geophys Monogr*, 2005, 159: 179—194
- 15 张灵倩, 刘振兴, 王继业. 近地磁尾流场的分布特性. *科学通报*, 2007, 52