0254-6124/2011/31(5)-587–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Duan Suping, Liu Zhenxing, Lu Li, Zhang T L, Reme H. TC-1 and Geotail joint observations of magnetic disturbances in the near-Earth plasma sheet during substorm. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(5): 587-595

TC-1 和 Geotail 对亚暴过程中近地等离子体片磁扰动的联合观测 *

段素平[1] 刘振兴[1] 路 立[1] Zhang T L[2] Reme H[3]

1(中国科学院空间科学与应用研究中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

2(Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, 8042 Graz, Austria)

3(Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, 31028 Toulouse, France)

摘 要 以 2004 年 9 月 28 日 02:53:20 UT 的亚暴为例, 通过 TC-1 在磁尾约 12.5 R_e 和 Geotail 卫星在近地磁尾等离子体片约 8∼9 R_e 的联合观测, 研究亚暴触发过程中近地磁尾等离子体片中等离子体波动特征. 结果表明, 亚暴触发区是近地磁尾中心等离子体片中较小的一个区域, 在亚暴触发区中低混杂不稳定性在近地磁尾等离子体片中存在, 准垂直传播的低混杂波发生在亚暴触发过程中, 而亚暴触发过程中近地磁尾等离子体片外边界区内的磁场偶极化信号和扰动都非常微弱. 在亚暴触发和亚暴膨胀相过程中出现了多次具有不同特征的磁场偶极化现象.

关键词 等离子体片, 亚暴, 磁场偶极化, 磁场扰动

中图法分类号 P 353

TC-1 and Geotail Joint Observations of Magnetic Disturbances in the Near-Earth Plasma Sheet During Substorm

DUAN Suping[1] LIU Zhenxing[1] LU Li[1] ZHANG T L[2] REME H[3]

1(*State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, 8042 Graz, Austria*)

3(*Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, 31028 Toulouse, France*)

Abstract On the basis of joint observations of TC-1 at about $-12.5\,R_e$ and Geotail at about $-8 \sim -9\,R_e$ in the near-Earth plasma sheet in the magnetotail, the plasma instabilities in the vicinity of substorm onset occurred at about 02:53:20 UT on 28 September 2004 were investigated. The observation results indicate that (1) the location of substorm onset triggering region is small within the inner plasma sheet in the near-Earth magnetotail, (2) the lower-hybrid instability is incited in

* 国家自然科学基金项目 (40704027, 40974099, 40731054) 和国家重点实验室专项基金共同资助

2010-05-24 收到原稿, 2011-03-15 收到修定稿

E-mail: spduan@spaceweather.ac.cn

the substorm triggering region and the lower-hybrid waves with the quasi-perpendicular propagation occur during substorm onset, (3) the magnetic dipolarization and the magnetic disturbance in the outside of near-Earth plasma sheet are very weak during substorm onset. The multiple magnetic dipolarization with different feature took place during substorm onset and substorm expansion phase.

Key words Plasma sheet, Substorm, Magnetic dipolarization, Magnetic disturbance

1 引言

磁层亚暴是目前磁层物理研究的热点问题, 它反映了太阳风–磁层–电离层之间的耦合过程. 磁层亚暴的触发与行星际磁场条件和太阳风动压的变化有直接联系 [1−2]. Hsu 等 [1] 认为, 60% 的亚暴触发与行星际磁场 B_z 分量的南转北或 B_y 分量的减小紧密相关, 而仅 2% 的亚暴触发与太阳风动压增加相关. 随后 Lyons 等 [3] 也得到了类似的结果, 指出, 当行星际磁场条件改变时会导致对流电场减小, 从而触发亚暴. 当然极区电离层的状态也是影响亚暴触发的另一个条件 [4]. 在合适的行星际磁场和太阳风条件下, 只有当极区电离层内的电导率足够大时, 磁层中的亚暴才能真正爆发, 否则就是一个伪暴现象.

以往的研究工作表明, 在亚暴触发过程中存在许多波和不稳定性 [5−9]. 由于在近地磁尾等离子体片中的特定特征参数决定了许多不稳定性不可能在该区域中出现, 如离子声不稳定性不可能在离子温度大于电子温度的等离子体环境中出现. Lui[7] 重点阐述了越场双流不稳定性和离子 Weibel 不稳定性在亚暴触发过程中的重要作用, 但是这种不稳定性要求离子与电子的相对漂移速度要远大于离子的热速度, 这一条件十分苛刻. Shinohara 等 [8] 根据 Geotail 卫星观测资料, 低混杂漂移不稳定性能很好地解释亚暴触发区内的低频电磁湍动. Liang 等 [5] 指出, 在亚暴触发过程中气球模不稳定性起着重要作用. Huba[10] 指出, 当等离子体 β 值大于 0.13 时, 低混杂漂移波不稳定性不可能激发. 之后 Shinohara 等 [8] 指出, 若考虑磁场的曲率漂移, 低混杂漂移波不稳定性能出现在高 β 等离子体中. 由于在亚暴增长相后期等离子体片变得非常薄, 等离子体片的厚度与离子回旋半径相当, 在这种情况下很容易激发漂移波 [11]. 在亚暴触发过程中近地等离子体片中存在等离子体密度和磁场的强梯度, 且磁场的曲率漂移现象也非常明显. 这些不均匀参量的出现非常容易激发低混杂漂移不稳定性. 至于是哪种不稳定性和波动与亚暴触发过程紧密相关, 仍然是一个未解决的磁层物理问题.

根据已有的亚暴研究资料, 亚暴触发区在近地磁尾等离子体片 8∼12 R_e 内, 在亚暴触发的同时伴随磁场偶极化现象. 与亚暴爆发相关的物理现象有, 同步轨道夜侧附近卫星观测到的偶极化现象、高能粒子注入现象, 中低纬度地磁台站观测到的磁场 Pi2 扰动, 极光椭圆带内赤道侧的极光突然增亮及磁尾磁场重联. 在亚暴研究中存在争论最多的是磁尾中与亚暴触发相关物理现象的时序问题, 而且这一问题至今没有明确的一致观点, 此内容不在本文的研究范围, 不作深入展开. 本文以 TC-1 和 Geotail 卫星在近地磁尾等离子体片中联合观测的一个实例, 着重阐述亚暴触发期间近地磁尾等离子体的扰动现象, 以此来说明亚暴触发区在近地磁尾等离子体片中的相关特征.

2 观测分析

2.1 亚暴触发时间的确定

图 1 给出的是 2004 年 9 月 28 日 00:00 UT–06:00 UT 时段内 AL, AU 和 AE 指数变化情况, 在 02:52:30 UT, AL 指数从 −50 nT 降到 −300 nT, 且变化的斜率最大, AE 指数显著增加, 其最大值约 400 nT, 如图 1 中的竖线所示. 图 2 给出的是 2004 年 9 月 28 日 00:00 UT–04:00 UT 4 h 之内 ACE 卫星观测到的行星际磁场和太阳风动压情况. 图 2 中的数据曲线表明, 行星际磁场 B_y, B_z 分量在 01:52:30 UT 时刻有明显的变化, 如图 2 中的竖线所示, B_y 分量明显减小且从 4 nT 降到 −6 nT; 而 B_z 分量在经历了持续 80 min 的南向后突然转为北向, 从 −5 nT 转变为 6 nT. 这样的行星际磁场变化很容易在磁层内激发磁层亚暴 [1−3]. 这一变化时间与 AE, AL 指数变化时间相差约 60 min, 这与当时太阳风速度 380 km/s 从 ACE 卫星传到地球磁层顶的时间一致. 根据这两类观测数据可以确定这一亚暴膨胀相的起始时间在 02:52:30 UT.

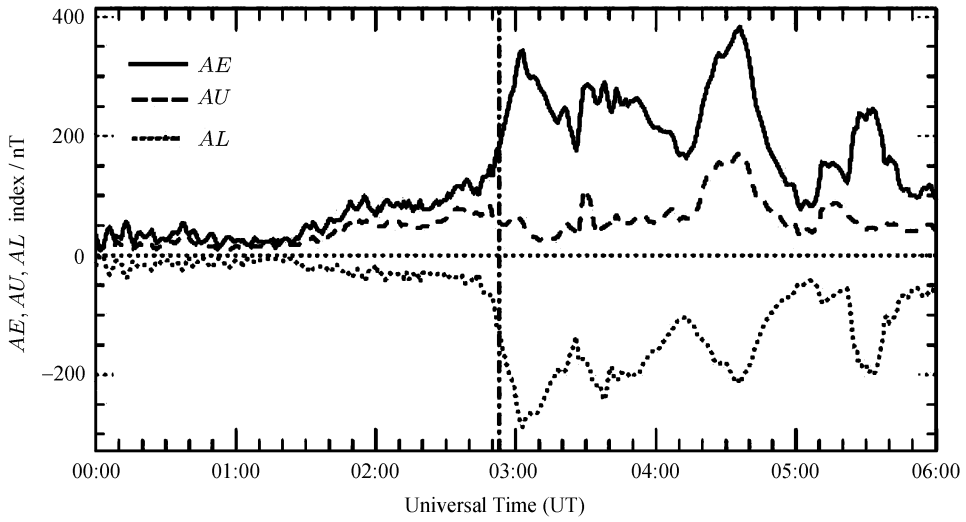


图 1　2004 年 9 月 28 日 00:00 UT–06:00 UT 时段内 AL, AU 和 AE 指数

Fig. 1　AE, AU and AL index in the intervals of 00:00 UT–06:00 UT on September 28, 2004

2.2　TC-1 和 Geotail 在近地磁尾等离子体片中对亚暴的联合观测

图 3 给出的是 TC-1 和 Geotail 卫星在 2004 年 9 月 28 日 02:00 UT–04:00 UT 时段内的轨道情况, 其中实线为 TC-1 卫星的轨迹, 虚线为 Geotail 卫星的轨迹. 图 3 中的 Geotail 和 TC-1 卫星的轨道曲线表明, Geotail 卫星在磁尾 8∼9 R_e 的范围内从磁尾向地球方向运动, 而 TC-1 在 12.5 R_e 附近从地球向磁尾方向运动, 其运动方向相反. 在 x 方向上两颗卫星相距约 3.0 R_e, 在 y 方向上相距约 5 R_e, 而在 z 方向上二者相距很小. 下面结合卫星观测到的等离子体和磁场的数据综合分析该亚暴过程的扰动现象.

图 4 给出的是 2004 年 9 月 28 日 02:30 UT–03:30 UT 期间 TC-1 卫星上热离子 (HIA) 和磁强计 (FGM) 仪器探测到的 4 s 数据. TC-1 卫星在 02:55 UT 附近观测到的等离子体中热离子的密度约为 0.4 cm^{-3}, 温度约为 3 keV, 等离子体 β 值约为 0.4, 总磁场约为 33 nT, B_x 分量约为 30 nT, 其是总磁场的主要分量. 根据 TC-1 卫星观测到数据, 可以判断卫星在亚暴急始 (onset) 时刻位于近地等离子体片的外边界, 这一判断参照了 Miyashita[12] 根据等离子体 β 值判断卫星所在位置属于磁尾等离子体片的某一区域. 正是因为 TC-1 位于等离子体片的外边界, 所以在亚暴急始时刻观测到的偶极化现象不十分明显.

图 5 给出的是 Geotail 卫星 3 s 磁场数据, 图 6 给出的是 Geotail 12 s 热离子数据. 从 Geotail 卫星观测的磁场数据可发现, 在 02:53:20 UT B_z 分量明显增大, 从 10 nT 增加到 17 nT, 磁场仰角明显增大, 从 15° 增加到 25°, 这是明显的磁场偶极化信号. 而随后还有两次偶极化, 即 02:54:30 UT 和 02:55:50 UT, 如图 5 中的两条点竖线所示. 在 02:54:30 UT B_x 分量从约 36 nT 减小到约 20 nT, B_y 分量从约 25 nT 减小到约 10 nT, 而 B_z 分量增加了约 2 nT. 在 02:55:50 UT B_x 分量和 B_y 分量均没有明显变化, 而 B_z 分量急剧增加, 从约 10 nT 增加到 26 nT. 在磁场变化的同时, Geotail 也观测到了等离子体离子数密度和温度的变化 (见图 6). 在亚暴急始时刻观测到离子数密度约为 1.0 cm^{-3}, 且离子数密度的总体变化趋势呈现下降, 离子温度约为 5 keV; 在第二次偶极化时, 离子数密度约为 0.6 cm^{-3}, 且为极小值, 而离子温度为极大值, 约 7.5 keV; 而第三次偶极化时, 离子数密度又增加到约 1.4 cm^{-3}, 离子温度又降到约 5 keV.

从 Geotail 卫星的磁场数据可看出在亚暴急始附近有明显的波动特征. 采用高分辨率磁场数据 (1/16 s 即 0.0625 s 精度的磁场数据), 对亚暴急始附近 02:52:48 UT–02:53:04 UT 时间内磁场数据作快速 Fourier 变换, 得到的磁场能谱密度曲线如图 7 所示. 图 7 中的磁场能谱密度曲线表明 B_x 和 B_y 分量与总磁场的能谱密度在 3.25 Hz, 3.90 Hz 处存

在明显的峰值, 如图 7 中的两条点竖线所示, 而 B_y 和 B_z 分量与总磁场的能谱密度在 3.60 Hz 处存在明显的峰值, 如图 7 中的虚竖线所示. 这表明在亚暴急始附近存在多种等离子体波动. 根据卫星测量的磁场数据 ($B = 40$ nT) 可得到质子的回旋频率约为 0.61 Hz, 低混杂波频率约为 25 Hz, 电子的回旋频率为 1120 Hz, 电子等离子体频率约为 8980 Hz, 这表明背景等离子体是处于电子等离子体频率大于电子回旋频率的高密弱场情形. 图 7 中磁场能谱密度峰值所对应的频率大于质子回旋频率而小于低混杂频率. 采用磁场最小变化分析方法, 得到扰动波矢量与磁场之间的夹角在 71° ~86° 的范围内. 根据图 7 得到的频谱分析和波的传播方向可判断准垂直传播的低混杂波发生在亚暴急始附近.

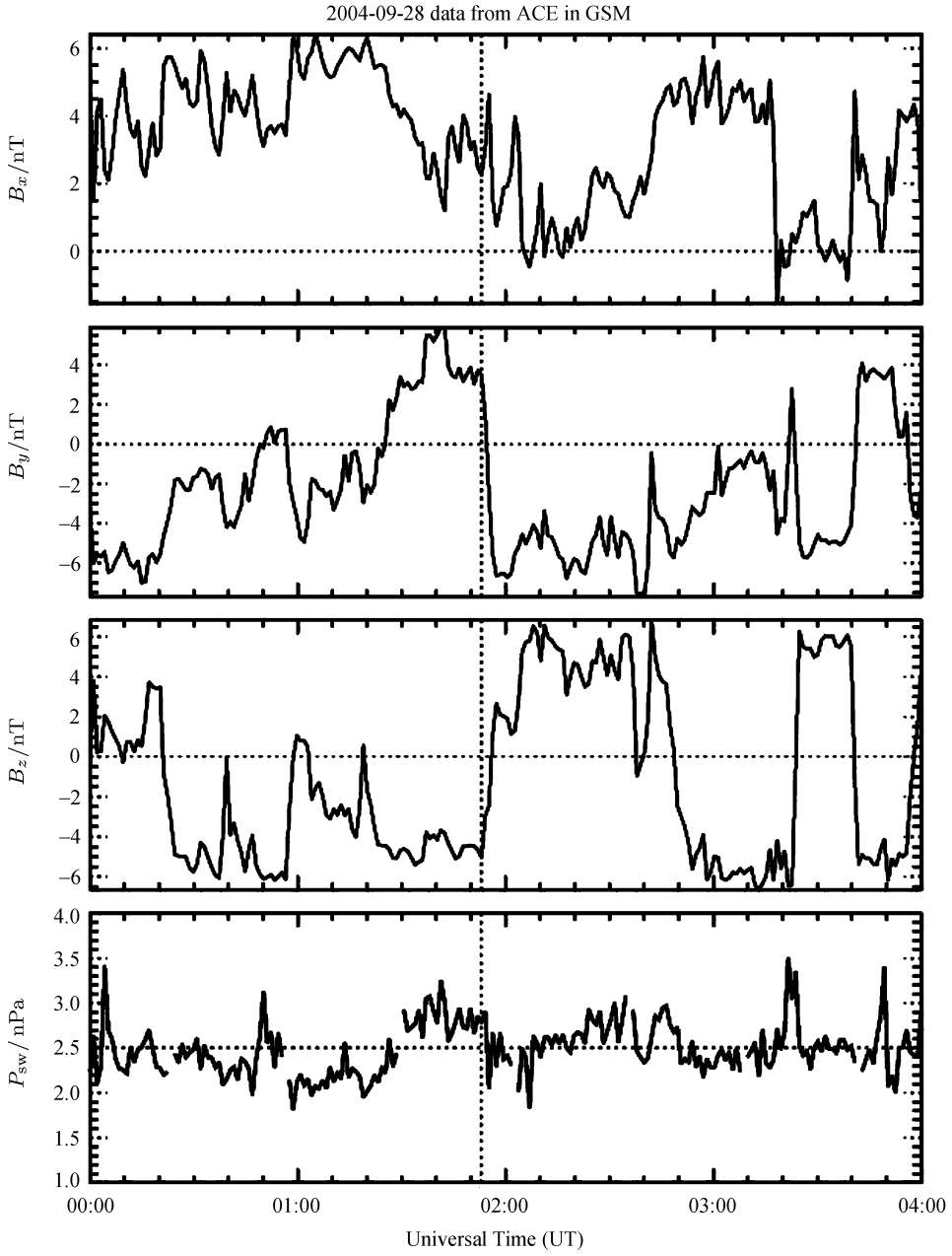


图 2 2004 年 9 月 28 日 00:00 UT–04:00 UT 时间段内的行星际磁场和太阳风动压

Fig. 2 Interplanetary magnetic field and solar wind dynamic pressure during the period of 00:00 UT–04:00 UT on 28 September 2004

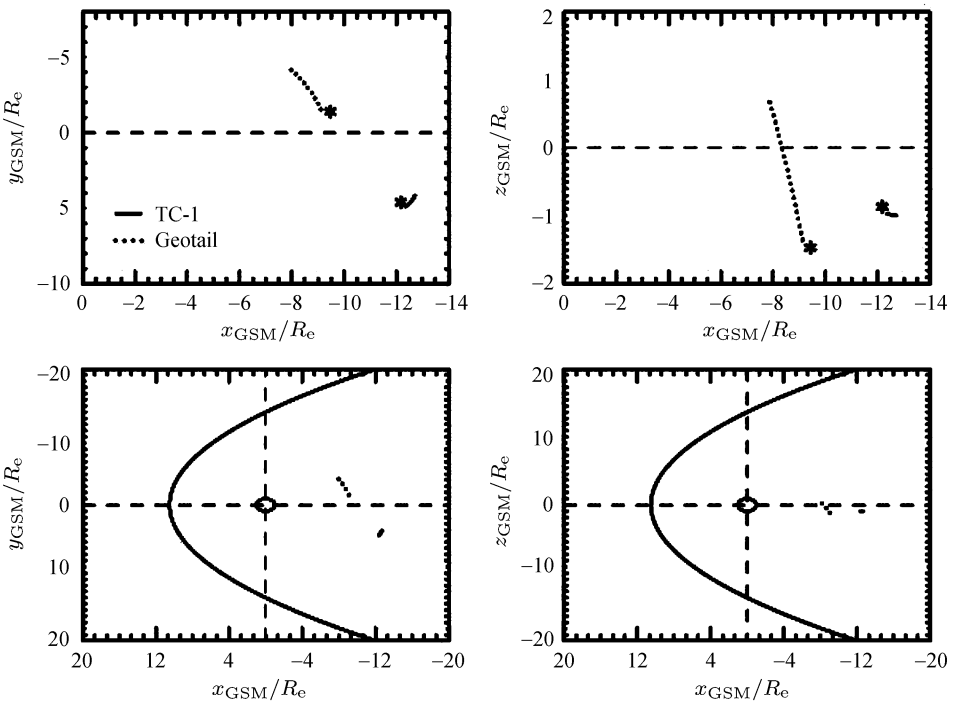


图 3 TC-1 和 Geotail 卫星在 2004 年 9 月 28 日 02:00 UT–04:00 UT 时段内轨道情况

Fig. 3 Orbits of TC-1 and Geotail from 02:00 UT to 04:00 UT on 28 September 2004

3 讨论

通过比较分析 TC-1 和 Geotail 卫星的观测资料, 可以看出, 2004 年 9 月 28 日 02:53:20 UT 亚暴的触发区被 Geotail 所观测到, 即在近地磁尾 $8\,R_e$ 处, 这与以往的研究结果即亚暴触发区在近地磁尾 $8\sim12\,R_e$ 范围内是一致. 另外, 比较 TC-1 和 Geotail 卫星数据发现, 两颗卫星在近地磁尾相差约 $3.8\,R_e$ 情况下观测到的现象差别很大. 这主要是因为 TC-1 卫星在这一亚暴触发时期位于近地磁尾等离子体片外边界处, 而 Geotail 卫星在亚暴触发期间位于近地磁尾等离子体片的中心部分.

从 Geotail 卫星的高分辨数据可以发现, 在亚暴急始附近, 近地磁尾等离子体片中存在准垂直传播的低混杂漂移波, 这表明在亚暴触发过程中存在多频段范围的低频等离子体波和不稳定性. Shinohara 等 [8] 指出, 在亚暴急始附近的低频电磁扰动可用低混杂漂移不稳定性来解释; 虽然 Huba 等 [10] 指出, 在高 β 不均匀等离子体中低混杂漂移不稳定性会出现致稳作用, 但是若考虑磁化等离子体中的磁场曲率漂移效应, 则这种致稳作用会消失, 而低混杂漂移波会被激发. 我们的分析结果与 Shinohara 等 [8] 得到的结果吻合.

从本事件中 TC-1 和 Geotail 两颗卫星的观测数据可以发现, 在近地磁尾等离子体片中亚暴触发的中心区域是相当小的一个范围. 如本文研究的亚暴触发区是在 Geotail 卫星所在的位置处, 而 TC-1 卫星与亚暴触发区存在一定的距离, 而没有观测到亚暴触发所具有的偶极化信号, 也没有观测到明显的磁场扰动. 这两颗卫星的不同观测结果表明, 亚暴过程中亚暴的触发及其能量传输和转化的关键区域在中心等离子体片内.

Geotail 卫星的观测结果表明, 在亚暴触发及其膨胀相过程中出现了多次偶极化过程, 但是每个偶极化的特征不相同, 伴随的等离子体数据变化也不相同, 在 02:54:30 UT 和 02:55:50 UT 两次偶极化过程呈现出明显的不同特征, 前者主要是由于磁场 B_x 和 B_y 分量急剧减小而表现出的磁场偶极化, 而 B_z 分量没有明显增加; 后者主要是由于 B_z 分量突然增加形成的, 而 B_x 和 B_y 分量没有明显的变化. 这些不同特征的偶极化可能预示着亚暴触发过程中的复杂物理过程, 可能对应着磁尾不同的物理过程.

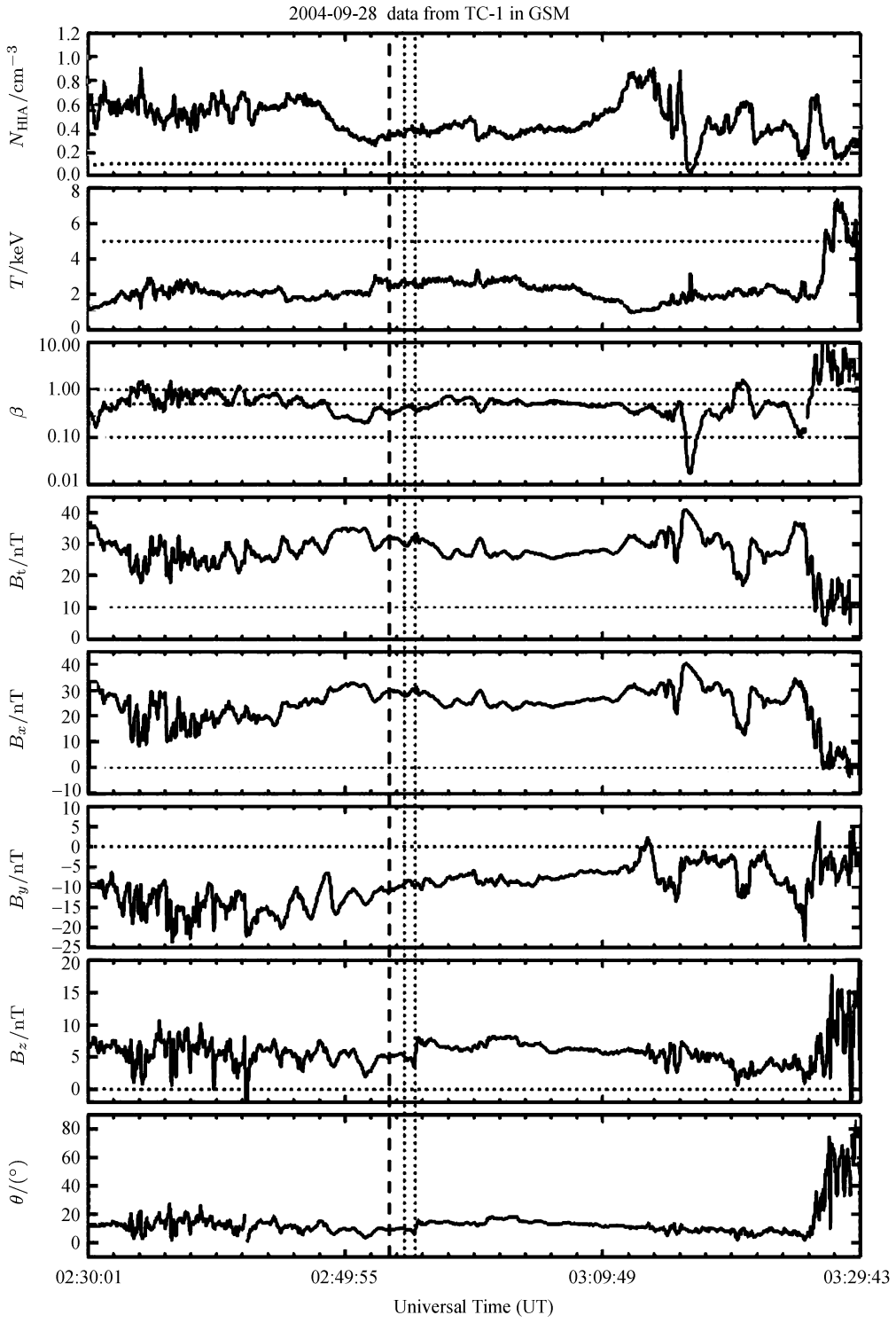


图 4 TC-1 观测到的等离子体和磁场数据. 从上到下分别为热离子的数密度 $N_{\rm HIA}$, 温度 T, 等离子体 β 值, 总磁场及磁场分量 $B_{\rm t}$, B_x, B_y, B_z 和磁场仰角 θ (竖虚线标记的是亚暴急始时刻)

Fig. 4 Magnetic field and plasma parameter observed by TC-1. From top to bottom, the panels are hot ions number density N, temperature T, plasma β value, the total magnetic field value, the B_x component, B_y component, B_z component, and the magnetic elevation angle θ (vertical dashed line marked the substorm onset time)

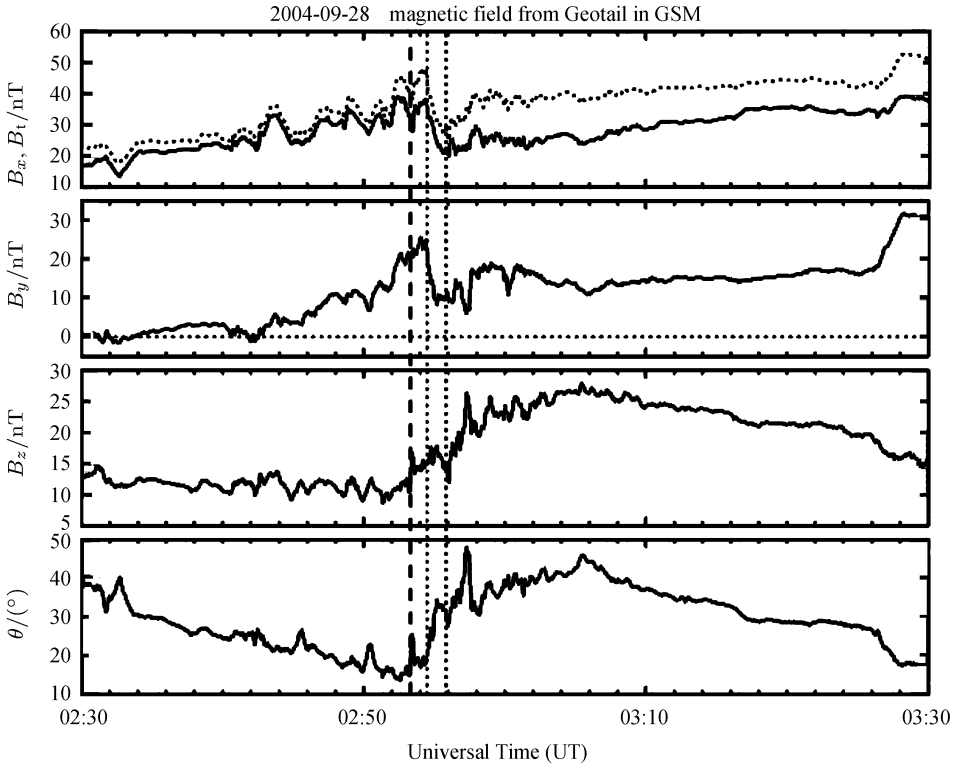


图 5 Geotail 卫星观测的磁场数据. 从上到下分别为磁场 B_x 分量 (实线) 和总磁场 B_t (虚线)、B_y 分量、B_z 分量及磁场仰角 (竖虚线标识的是亚暴急始时刻)

Fig. 5 Magnetic field data from Geotail. From top to bottom, the panels are the B_x component (solid line) and the total magnetic field value B_t (dotted line), B_y component, B_z component, and the magnetic elevation angle θ. The vertical dashed line marked the substorm onset time

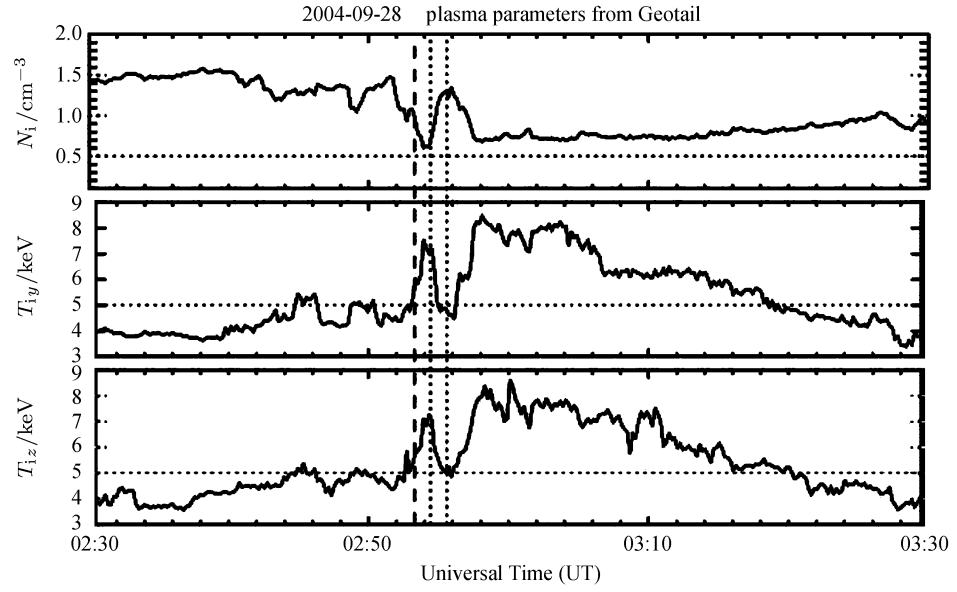


图 6 Geotail 卫星观测到的热离子数密度 N_i 和温度 T_i

Fig. 6 Ion density N_i and temperature T_i observed by Geotail

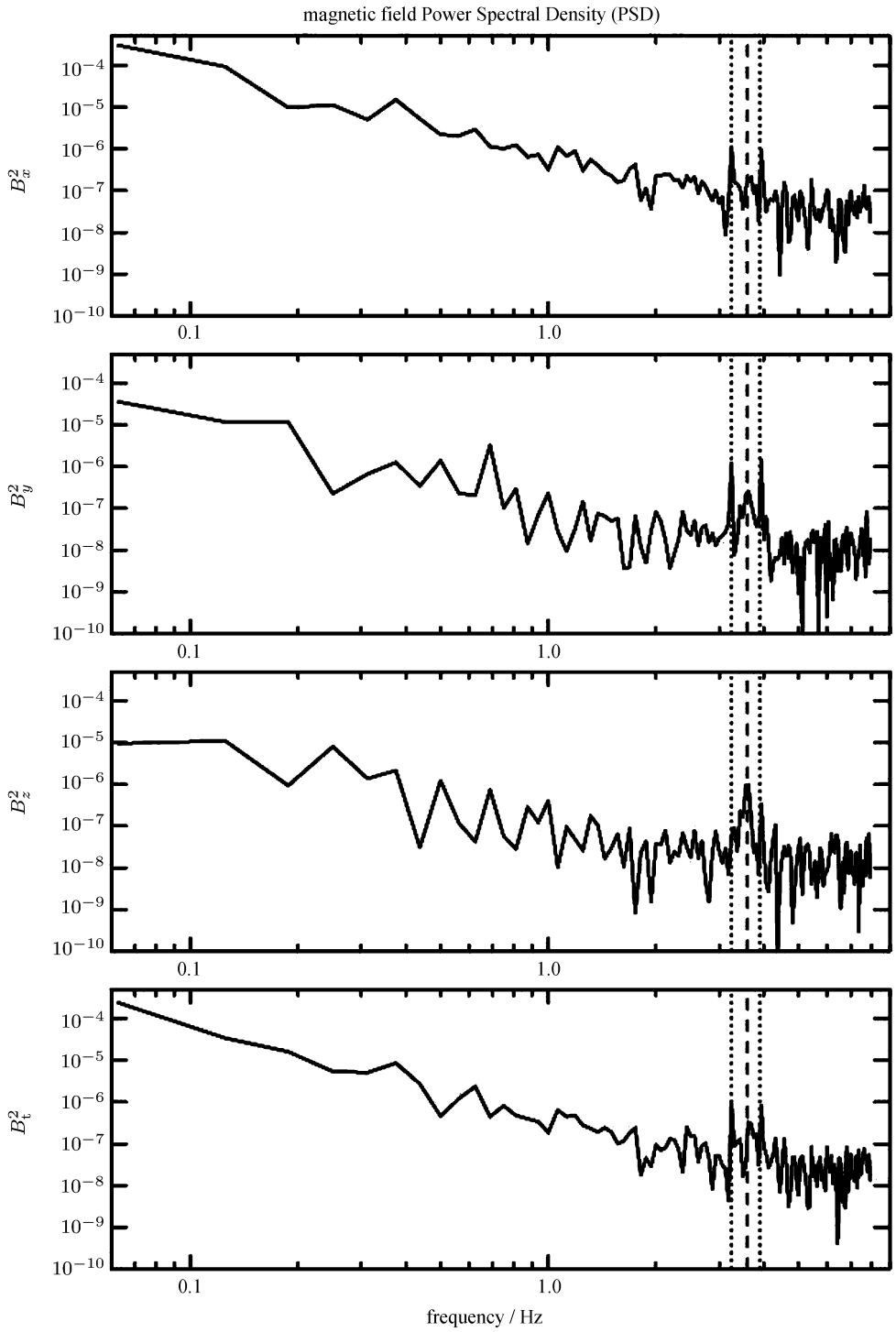


图 7 利用 Geotail 卫星的高分辨率数据得到的快速 Fourier 变化 (从左到右的竖线标记的频率分别为 3.25 Hz, 3.60 Hz, 3.90 Hz)

Fig. 7 FFT (Fast Fourier Transfer) obtained from the high resolution magnetic field data observed by Geotail (From left to right, the frequency values marked by the vertical lines are 3.25 Hz, 3.60 Hz, 3.90 Hz, respectively)

以往对亚暴偶极化研究的主要关注点在于将磁场偶极化作为亚暴急始时刻的标志性信号之一 [13], 而对亚暴过程出现的多次偶极化过程没有过多地关注.

4 结论

通过对 TC-1 和 Geotail 两颗卫星在近地磁尾等离子体片中相距不到 3.5 R_e 范围内的对比观测分析, 可以得出如下结论.

(1) 亚暴触发的中心区域在近地磁尾内等离子体片中一个相对较小的区域, 亚暴触发期间在近地磁尾等离子体片边界区中没有明显的亚暴偶极化信号和磁场扰动现象.

(2) 而在亚暴触发区附近的近地磁尾等离子体片的高 β 区域中, 存在低混杂不稳定性和准垂直传播的低混杂波.

(3) 在亚暴触发和膨胀相中存在具有不同特征的多次磁场偶极化过程.

本文重点研究了亚暴触发过程中出现的低混杂漂移波和不稳定性的理论以及不同波模之间的耦合关系. 关于亚暴触发过程和亚暴膨胀相中出现的多次磁场偶极化现象将另文详细分析.

致谢 ACE 卫星数据由 NASA CDAWEB 提供, *AE* 指数由日本 Koyto 网站提供, Geotail 磁场和等离子体数据由日本空间与航天科学学院的 Nagai T 通过 DARTS 提供.

参考文献

[1] Hsu T S, McPherron R L. Occurrence frequencies of IMF triggered and nontriggered substorms [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A7):1307

[2] Lyons L R, *et al.* Coordinated observations demonstrating external substorm triggering [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(A12):27 039-27 051

[3] Lyons L R, *et al.* Global auroral responses to abrupt solar wind changes:Dynamic pressure, substorm, and null events [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, A08208

[4] Kamide Y, Baumjohann W. Magnetosphere-Ionosphere Coupling [M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993

[5] Liang J, *et al.* In-situ observation of ULF wave activities associated with substorm expansion phase onset and current disruption [J]. *Ann. Geophys.*, 2009, **27**:2191-2204

[6] Lui A T Y. Potential plasma instabilities for substorm expansion onsets [J]. *Space Sci. Rev.*, 2004, **113**:127-206

[7] Lui A T Y, *et al.* A cross-field current instability for substorm expansions [J]. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(A7):11 389-11 401

[8] Shinohara I, *et al.* Low-frequency electromagnetic turbulence observed near the substorm onset site [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A9):20 365-20 388

[9] Holter Ø, *et al.* Characterization of low frequency oscillations at substorm breakup [J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(A10):19 109-19 119

[10] Huba J D, Drake J F, Gladd N T. Lower-hybrid-drift instability in field reversed plasmas [J]. *Phys. Fluids*, 1980, **23**:552-561

[11] Daughton W. Electromagnetic properties of the lower-hybrid drift instability in a thin current sheet [J]. *Phys. Plasmas*, 2003, **10**(8):3103-3119

[12] Miyashita Y, *et al.* Mass and energy transport in the near and middistant magnetotail around substorm onsets: Geotail observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**:6259-6274

[13] Liou K, *et al.* Magnetic dipolarization with substorm expansion onset [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**:1131