

赵旭东, 杜爱民, 徐文耀等. 2008 年 1 月 5 日磁层亚暴期间磁尾近地重联事件的 THEMIS 观测与分析. 地球物理学报, 2010, 53(5):1019~1027, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.001

Zhao X D, Du A M, Xu W Y, et al. A near Earth reconnection of the magnetospheric substorm on January 5, 2008: THEMIS observations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(5):1019~1027, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.001

2008 年 1 月 5 日磁层亚暴期间磁尾近地重联事件的 THEMIS 观测与分析

赵旭东^{1,2,3}, 杜爱民^{1,2}, 徐文耀¹, 王 源^{1,3}, 罗 浩^{1,3}

1 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 本文主要应用 THEMIS 卫星的磁场和等离子体流观测数据, 分析了 2008 年 1 月 5 日 08:51~08:57 UT 亚暴膨胀相期间磁尾的一个近地重联事件. 在亚暴膨胀相期间, 地面的全天空成像仪清楚地记录到了极光的极向扩展, THEMIS 的 P5 卫星在地球同步轨道附近观测到了磁场的偶极化现象. 在亚暴膨胀相末期的 08:51~08:57 UT 期间, P3 ($X_{\text{GSM}} \sim -9.12R_E$) 和 P4 ($X_{\text{GSM}} \sim -9.40R_E$) 同时观测到了一对方向相反的高速等离子体流. 这对方向相反的高速等离子体流是由磁尾的重联现象所引起. 重联的位置被估计位于 $X_{\text{GSM}} \sim -9.12R_E$ 和 $X_{\text{GSM}} \sim -9.40R_E$ 之间较小的空间范围内. 并且, 在重联位置的两侧, 重联的 Hall 效应被 P3 和 P4 两颗卫星观测到. 因此, 这一磁尾重联事件发生在距离地球非常近的空间范围内.

关键词 磁尾, 磁重联, 等离子体流, 亚暴

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.001

中图分类号 P353

收稿日期 2009-12-23, 2010-04-21 收修定稿

A near Earth reconnection of the magnetospheric substorm on January 5, 2008: THEMIS observations

ZHAO Xu-Dong^{1,2,3}, DU Ai-Min^{1,2}, XU Wen-Yao¹, WANG Yuan^{1,3}, LUO Hao^{1,3}

1 *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2 *State Key Laboratory of Space Weather, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract The data of magnetic field and plasma flows from THEMIS satellites are used to investigate a reconnection event in the interval of 08:51~08:57 UT during a substorm on January 5, 2008. During the expansion phase of the substorm, the auroral poleward expanding is clearly seen by the all sky imagers on the ground, and a dipolarization of the magnetic field is observed by P5 satellite near the synchronous orbit. Two opposite plasma flows are observed by two satellites P3 ($X_{\text{GSM}} \sim -9.12R_E$) and P4 ($X_{\text{GSM}} \sim -9.40R_E$) during the period of 08:51~08:57 UT in the expansion phase. These plasma flows are caused by the reconnection in the

基金项目 国家科技支撑计划课题(2008BAC35B01)、国家自然科学基金(40774086)、国家自然科学基金重大项目(40890163)、国家重点实验室专项基金项目(O8262DAA4S)资助.

作者简介 赵旭东, 男, 1983 年生, 博士研究生, 2005 年毕业于云南大学, 主要从事空间电流与亚暴方面研究.

E-mail: zhaoxud@mail.iggcas.ac.cn

magnetotail. The reconnection site is estimated in the region between $X_{GSM} \sim -9.12R_E$ and $X_{GSM} \sim -9.40R_E$. It is suggested that the site of this reconnection event could be much close to the Earth in the magnetotail.

Keywords Magnetotail, Magnetic reconnection, Plasma flow, Substorm

1 引言

在亚暴的膨胀相和恢复相期间,典型的极光现象通常在整个极区都可以被观测到^[1].在近地磁尾区域的亚暴膨胀相期间,磁场通常表现出快速的偶极化现象^[2].而发生在近地磁尾区域的磁场重联则是亚暴的另一个非常重要的现象.磁重联能够使质量、磁通量以及能量发生大尺度的传输,对近地磁层、电离层和地面磁场产生显著的影响.

与磁层亚暴相关的现象通常起始于 $(1\sim 2)R_E$ 的空间范围内,然后快速向周围扩展^[3~5].正是由于亚暴重联现象的复杂性和瞬时性,磁尾的卫星观测对于研究亚暴重联就显得尤为重要.通常,一个亚暴重联事件包含着两个过程:磁尾等离子体片中闭合场线的重联以及尾瓣区开放场线的重联^[2,6].

磁尾的重联事件发生时,在 X 线的尾向一侧可以观测到高速的尾向等离子体流伴随着南向磁场^[7,8].重联事件的另一个重要标志是在重联区域形成 Hall 电流系统,这一现象首先由 Sonnerup^[9]提出.根据重联的标志,许多学者研究了磁尾重联事件的发生位置.通常认为,亚暴期间的重联发生在磁尾的 $|X_{GSM}| < 15R_E$ 处^[2].等离子体片中的磁场线通过近地重联($X_{GSM} = (-10 \sim -15)R_E$)被减断后可以产生向磁尾运动的等离子体团^[10,11].Nishida 和 Nagayama 认为重联事件发生在磁尾的 $X_{GSM} = (-10 \sim -25)R_E$ 处^[12].Nagai 等人通过分析 Geotail 卫星的观测数据,认为亚暴膨胀相期间的磁重联经常发生在磁尾昏向一侧的 $X_{GSM} = (-20 \sim -30)R_E$ 范围内^[13].而 Cluster 卫星的观测则表明重联发生在 $X_{GSM} \sim -19R_E$ 以内的磁尾中^[14~17].亚暴膨胀相期间重联事件发生的位置也与太阳风的能量输入有关,并且可以发生在 $X_{GSM} \sim -8.6R_E$ 以内的近地磁尾^[18].Nagai 等人认为高的太阳风能量输入对应于亚暴膨胀相期间磁尾较近位置处的重联事件发生,而低的太阳风能量输入对应于亚暴膨胀相期间磁尾较远位置处的重联事件发生^[19].Angelopoulos 等人报道了一个亚暴事件中位于磁尾不同距离处多颗卫星的联合观测,阐述了亚暴发

展过程中不同事件发生的时间序列,并且分析认为磁尾重联事件的发生是亚暴膨胀相开始的触发机制^[5].

本文研究了发生在 2008 年 1 月 5 日亚暴膨胀相期间的一个近地重联事件.我们主要运用 THEMIS 中 P3、P4 和 P5 三颗卫星的磁场和等离子体观测数据分析了亚暴膨胀相期间这一磁尾重联事件的位置以及发展过程.

2 观测数据分析

2008 年 1 月 5 日 08:51~08:57 UT 期间,磁尾发生了一个亚暴重联事件.针对这一事件,我们运用 ACE 卫星的观测数据来分析行星际磁场(IMF)的条件.ACE 卫星位于 L1 处,其在 GSE 坐标系下的位置为: $X_{GSE} \sim 218R_E$, $Y_{GSE} \sim -6.5R_E$, $Z_{GSE} \sim 22.9R_E$.本文所用的 ACE 卫星数据来自于 NASA 的 OMNIWeb,并且都已经被平移到了弓激波顶处以去除时间上的延迟.King 和 Papitashvili 描述了 ACE 数据的平移方法^[20].在磁尾,来自 THEMIS 的三颗卫星 P3、P4 和 P5 的观测数据被用来研究磁场和等离子体的变化^[21].图 1 展示的是在 08:51 UT

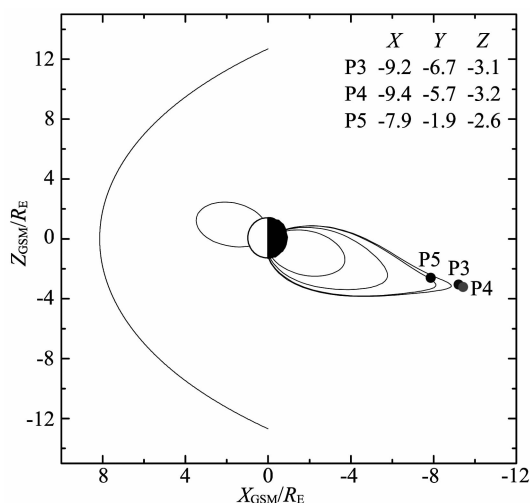


图 1 THEMIS 卫星 P3、P4 和 P5 在 08:51 UT 位于磁尾 X_{GSM} - Z_{GSM} 平面的位置分布
卫星在 GSM 坐标系下的坐标标注在图的右上角.
Fig. 1 The locations of THEMIS satellites in X_{GSM} - Z_{GSM} plane of magnetotail at 08:51 UT
The coordinates of satellites are located at the top right corner in the panel.

位于磁尾的 THEMIS 三颗卫星在 $X_{\text{GSM}}-Z_{\text{GSM}}$ 平面的位置分布. 图中日侧和夜侧磁层的闭合磁力线由 Tsyganeko 等人的 T96 模型计算得到^[22].

2.1 2008年1月5日亚暴事件的背景分析

图 2(a~d)分别为 GSM 坐标系下, ACE 卫星^[23]观测到的行星际磁场(IMF) B_X , B_Y , B_Z 分量和

太阳风速度 V_X 分量. 图 2e 展示的是京都大学世界数据中心 WDC-C2 发布的 AL 指数. 如图 2c 阴影部分所示, IMF B_Z 分量在大约 07:48 UT 转为南向(约 -10 nT), 并持续约 1 h. 在大约 08:46 UT, IMF B_Z 转为北向. 同时, AL 指数迅速下降, 并在大约 08:53 UT 达到了最小值 -508 nT.

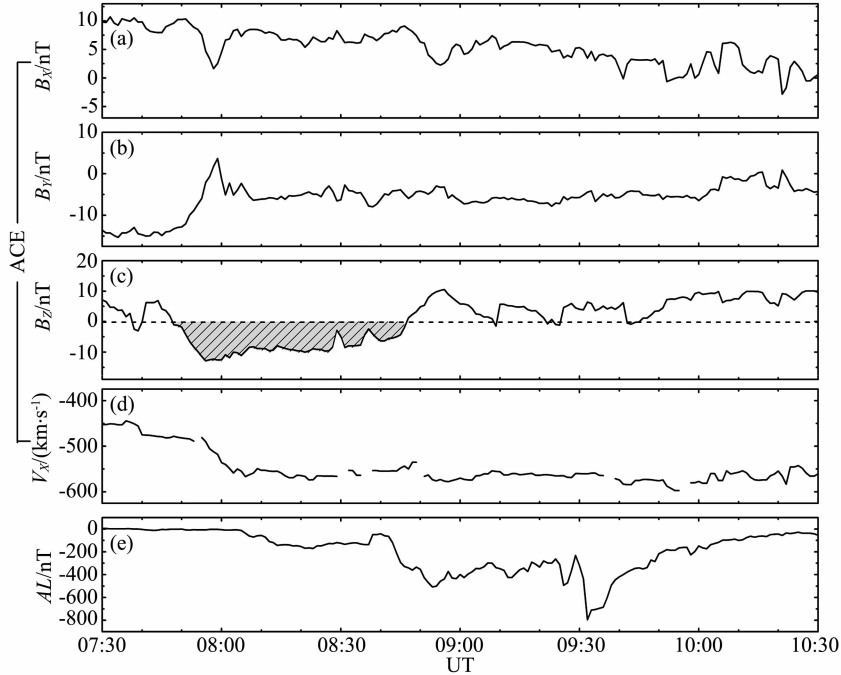


图 2 ACE 卫星观测到的行星际磁场(IMF)和太阳风速度以及 AL 指数

Fig. 2 The IMF and solar wind velocity measured by ACE and the AL index

在大约 08:32 UT, 地面台站 GAKO(地磁经度为 269.14° , 地磁纬度为 63.05°)的全天空成像仪(ASI)观测到了极光的突然点亮^[24]. 之后, 极光迅速向极向扩展, 并持续至大约 08:59 UT(图 3).

THEMIS 的 P5 卫星大约位于磁尾的 $X_{\text{GSM}} \sim -7.6R_E$ 处, 是 THEMIS 五颗卫星中距离地球最近的一颗. 图 4 展示的是 P5 卫星的磁通门磁力仪(FGM)^[25]观测到的磁场 B_X , B_Y 和 B_Z 分量的变化情况. 从图 4c 中可以看出, B_Z 在 08:00~10:00 UT 期间保持着北向. 在大约 08:32 UT, B_Z 突然增大, B_X 减小至大约 0 nT(图 4a), 并都伴有明显的扰动. 磁场的这些变化特征表明亚暴的偶极化大约开始于 08:32 UT.

2.2 亚暴重联事件分析

图 5 展示的是 2008 年 1 月 5 日 08:00~10:00 UT 期间, THEMIS 卫星中的 P3(黑线)和 P4(红线)两颗卫星的磁场以及等离子体观测. 图 5(a~c)分别为 GSM 坐标系下 FGM 测得的磁场 B_X , B_Y 和 B_Z 分量. 图 5(d~g)展示的是静电分析仪

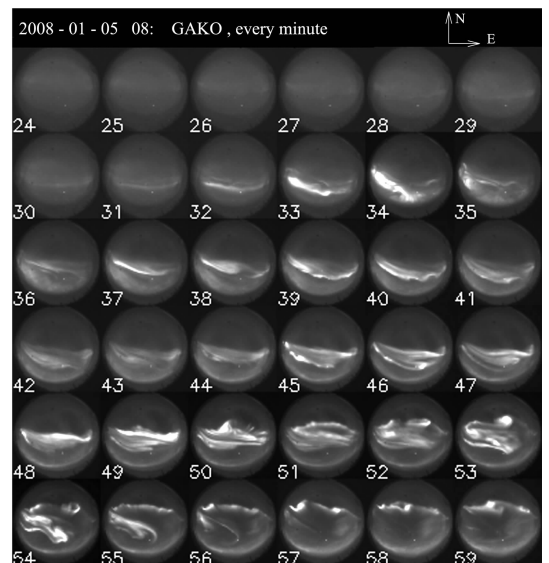


图 3 THEMIS 地面台站 GAKO 全天空成像仪观测到的极光点亮

Fig. 3 The aurora brightening observed by all sky imager on the ground station GAKO of THEMIS

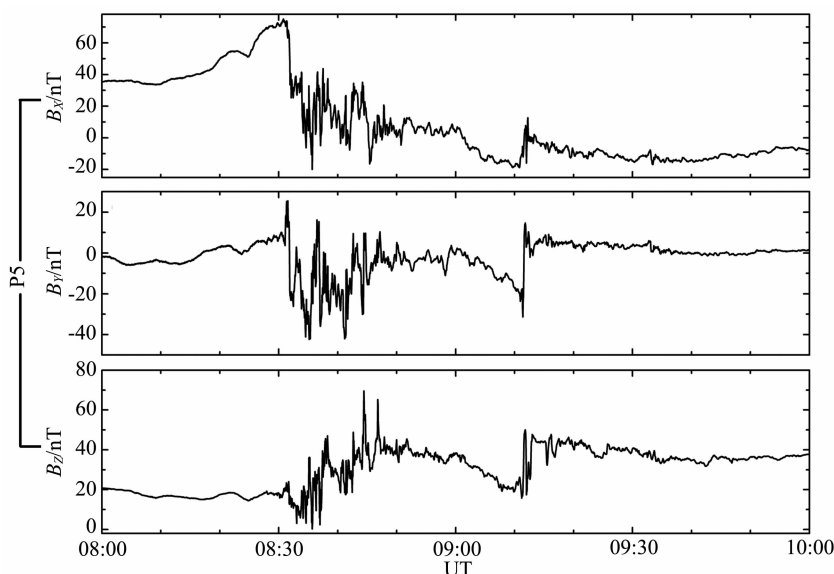


图4 P5 卫星观测到的磁场变化

亚暴的偶极化大约发生在 08 : 32 UT.

Fig. 4 The magnetic field observed by P5

The dipolarization of the substorm starts at about 08 : 32 UT.

(ESA)测得的离子温度 T , 离子数密度 N , 离子压力 P 以及 GSM 坐标系下的等离子体速度 V_x 分量^[26].

值得注意的是,在图 5g 中的 08 : 51 ~ 08 : 57 UT 期间,一对非常明显的反向高速等离子体流被相距很近的两颗卫星 P3 ($X_{\text{GSM}} \sim -9.12R_E$) 和 P4 ($X_{\text{GSM}} \sim -9.40R_E$) 观测到. 而且在 08 : 51 ~ 08 : 57 UT 期间, P3 和 P4 卫星观测到的磁场 B_x 分量向 0 的趋势增长(图 5a), 同时等离子体温度(图 5d)和等离子体压力(图 5f)也都快速地增加. 这些特征表明 P3 和 P4 卫星在此期间接近了中性片区域^[27, 28]. P4 观测的离子数密度高于 P3 观测的离子数密度(图 5e). 在两颗卫星观测到的高速反向等离子体流中, P4 记录到的尾向流的速度($V_x = -141 \text{ km/s}$)低于 P3 记录到的地向流的速度($V_x = 358 \text{ km/s}$). 被加速的高速等离子体流是磁重联的一个典型标志^[29]. 因此,这对反向高速等离子体流表明 P3 和 P4 两颗卫星很可能分别位于 X 线的地向和尾向一侧.

在我们所关注的 08 : 51 ~ 08 : 57 UT 时期之前, P3 和 P4 记录到的离子温度、离子数密度和离子压力在大约 08 : 36 UT 开始减小(图 5(d ~ f)中的竖线 L), 并大约在 08 : 48 UT 分别达到最小值 290 eV、 $0.1/\text{cm}^3$ 和 $51 \text{ eV}/\text{cm}^3$. 随后, 离子的温度和压力大约在 08 : 51 UT 分别增长至 4500 eV 和 $1500 \text{ eV}/\text{cm}^3$ (竖线 S). P3 卫星离子数密度的变化与离子温度和压力的变化不是完全一致. 在 08 : 51 UT 之前, P3 和 P4

卫星观测到的磁场 B_x 大约为 -50 nT . 根据 P3 和 P4 记录到的等离子体参数和磁场 B_x 的变化, 可以推测 P3 和 P4 可能在大约 08 : 36 UT 进入了尾瓣区. 之后两颗卫星向等离子体片区域靠近, 在大约 08 : 51 UT P3 和 P4 完全进入等离子体片并位于接近中性片的区域. 从图 5g 中还可以看出, 在 P3 和 P4 位于尾瓣区域时期(08 : 51 UT 以前), 两颗卫星记录到的等离子体流都比较缓慢.

P3 和 P4 卫星记录到的磁场 B_z 分量在 08 : 30 ~ 08 : 51 UT 期间发生了从负向至正向的变化. B_z 的转向表明重联的位置很可能最初位于 P3 和 P4 的地向一侧, 此时两颗卫星位于尾瓣区, 因此没有观测到较大的等离子体流. 在 08 : 51 ~ 08 : 57 UT 期间, 重联的位置扩展至 P3 卫星的尾向一侧, P3 位于磁尾的 $X_{\text{GSM}} \sim -9.12R_E$, P4 位于磁尾的 $X_{\text{GSM}} \sim -9.40R_E$. 因此根据两颗卫星所处的位置, 此期间磁尾的重联被推测发生在 $0.28R_E$ 较小的区域范围内. 虽然磁尾等离子体片中磁重联开始的时刻不能从这两颗卫星的观测来确定, 但从负的磁场 B_z 分量可以推测磁重联应该开始于 08 : 51 UT 以前, 即 P3 和 P4 两颗卫星位于尾瓣区域的时期.

3 讨论

地面台站 GAKO 的全天空成像仪 (ASI) 在大

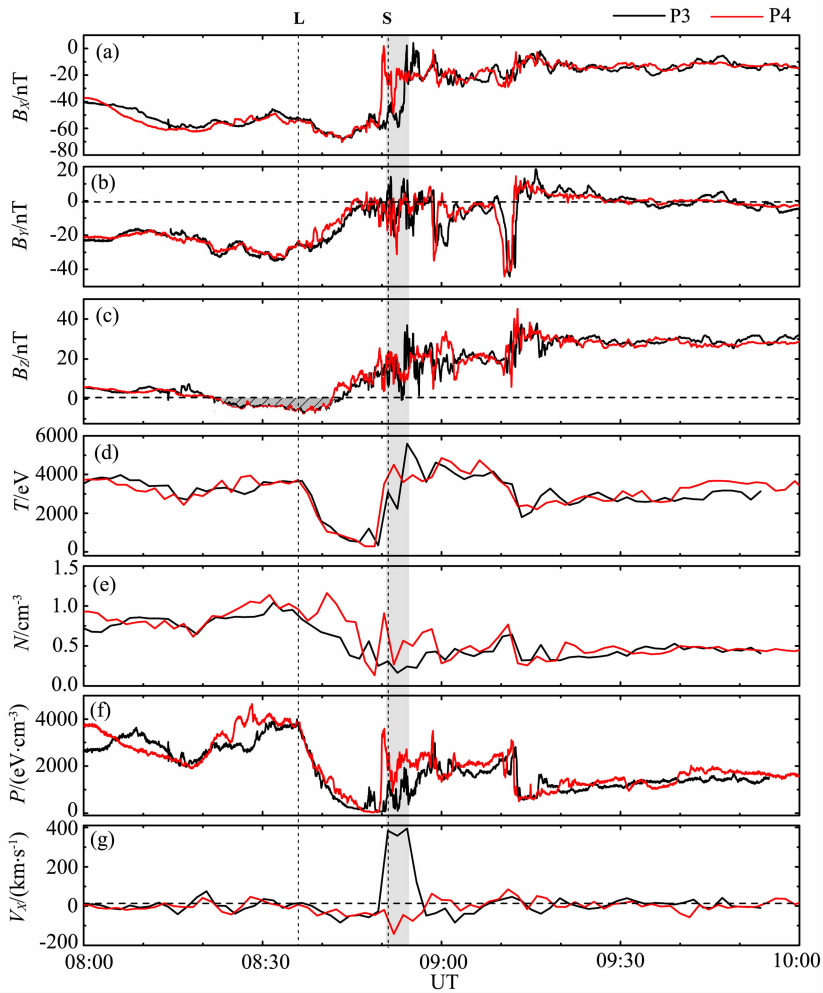


图 5 THEMIS 卫星 P3(黑线)和 P4(红线) 观测到的磁场三分量、等离子体温度、等离子体数密度以及等离子体压力

Fig. 5 The magnetic field components, the plasma temperature, plasma number density and plasma pressure observed by P3 (the black lines) and P4 (the red lines)

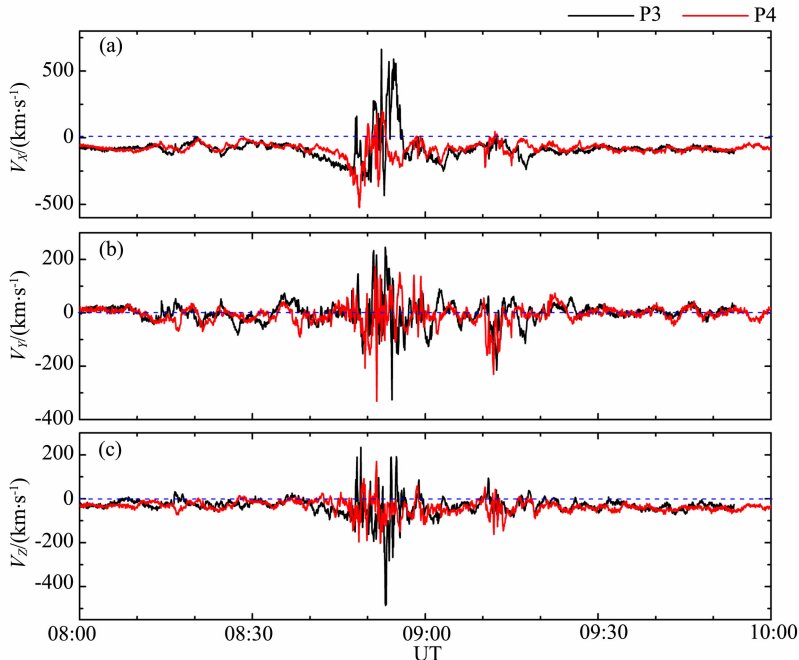


图 6 由 SST 和 ESA 观测数据计算出的总的等离子体速度

Fig. 6 The total ion velocity calculated from the stack of the SST moments and the ESA moments

约 08:32 UT 观测到了极光的突然点亮,同时 P5 卫星位于 $X_{GSM} \sim -7.6R_E$ 观测到了偶极化现象,表明电流片发生了中断. 亚暴的膨胀相被认为开始于尾瓣区磁场线的重联,同时靠近地球的内等离子体片区发生越尾电流的中断^[6]. 因此极光点亮对应的电流片中断的区域大约位于 $X_{GSM} \sim -7.6R_E$ 至 $-9.2R_E$ 之间的范围内. 而磁尾重联的起始位置应在电流片中断区域的尾向一侧. 由于 P3 和 P4 卫星在大约 08:51 UT 之前位于尾瓣区的位置原因,因此没有在极光点亮时刻附近观测到磁尾重联现象. 在亚暴膨胀相晚期,即 P3 和 P4 卫星位于等离子体片内时,两颗卫星观测到了位于 $X_{GSM} \sim -9.12R_E$ 至 $X_{GSM} \sim -9.40R_E$ 之间的重联现象.

3.1 P3 和 P4 卫星观测到的反向等离子体流

图 5g 中, P3 和 P4 观测到的等离子体流数据来自于 THEMIS 卫星的静电分析仪(ESA). 为了增加图 5g 中 ESA 记录的等离子体流速度数据的可信度,我们将引入固态望远镜(SST)观测到的等离子体数据,对两个仪器观测到的等离子体流总速度加以分析. ESA 观测的是从几电子伏至 25 keV 的能量粒子, SST 观测的是从 35 keV 至大约 500 keV 的能量粒子^[26]. 在应用 SST 的观测数据时,需要去除仪器各种背景噪声的影响. 去除噪声后,可以通过计算 SST 和 ESA 数据的动量和求出等离子体流总速度(V_{total}),即

$$V_{total} = (N_{sst} V_{sst} + N_{esa} V_{esa}) / (N_{sst} + N_{esa}),$$

式中, N_{sst} 和 N_{esa} 分别为 SST 和 ESA 观测的离子数

密度, V_{sst} 和 V_{esa} 分别为 SST 和 ESA 观测的等离子体流速度. 图 6(a~c) 分别为等离子体流总速度 V_x 、 V_y 和 V_z 分量. 从图 6a 中可以看出, P3 观测到的 V_x 在大约 08:51 UT 从尾向转为地向并达到较高的速度,而 P4 记录到的 V_x 在大约 08:51 UT 主要保持为尾向. P3 记录的最大地向流大约为 560 km/s, 而 P4 记录的最大尾向流接近于 -516 km/s. 因此,从图 6a 中 V_x 的变化也可以看出 THEMIS 卫星中的 P3 和 P4 在大约 08:51 UT 记录到了一对方向相反的等离子体流. 图 6b 中, P3 和 P4 的等离子体流总速度 V_y 分量在大约 08:51 UT 产生了较明显的扰动. 图 6c 表明, P3 和 P4 的等离子体流总速度 V_z 分量在大约 08:51 UT 都为负向,并分别接近于 -193 km/s 和 -203 km/s. 从 P3 和 P4 记录到的负向等离子体流总速度 V_z 分量也可以推测,在大约 08:51 UT 重联的发生造成了 Z_{GSM} 方向上向着中性片流动的高速等离子体流. 在 Z_{GSM} 方向上, P4 的位置比 P3 更远离 X_{GSM} 轴. 而在 08:51 UT 之前, P4 记录到的等离子体温度和数密度表明 P4 位于等离子体片中. 根据 P3 与 P4 的相对位置可知 P3 在 08:51 UT 左右也位于等离子体片中. 图 6a 中的 V_x 也说明了重联的位置在大约 08:51 UT 位于 P3 和 P4 之间的区域. 因此,由 SST 和 ESA 得到的等离子体流总速度表现出与 ESA 记录的等离子体流速度一致的结果.

图 7a 和 7b 分别是对 P3 和 P4 卫星的电场仪(EFI)记录的 Y_{GSM} 方向上的电场分量在时间上进行

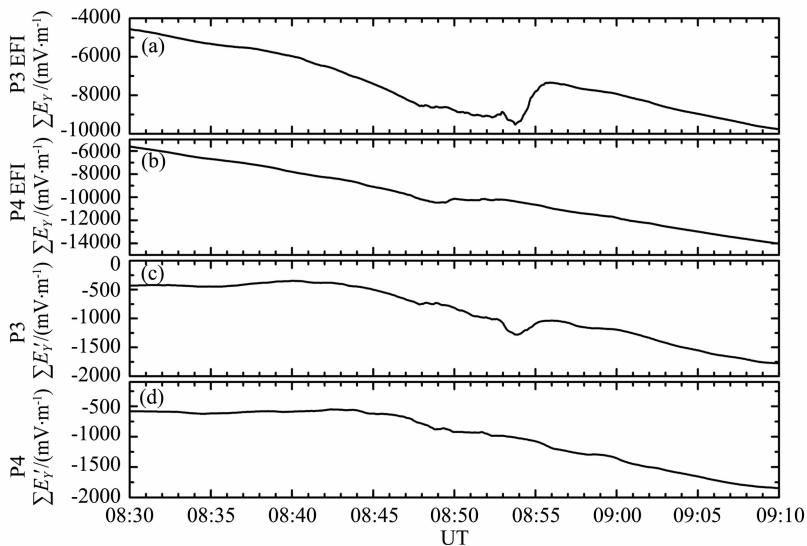


图 7 P3 和 P4 卫星由 EFI 计算得到的累积电场 $\sum E_y$ 以及由 $V_x \times B_z$ 计算得到的累积电场 $\sum E'_y$

Fig. 7 The cumulative integral of electric field $\sum E_y$ from the EFI and $\sum E'_y$ from $V_x \times B_z$ for P3 and P4

积分得到的累积电场 ($\sum E_Y$)^[30]. 图 7c 和 7d 展示的是对 $V_X \times B_Z$ 在时间上进行积分得到的累积电场 ($\sum E'_Y$). V_X 是由 SST 和 ESA 数据计算动量和而得到的等离子体流总速度, 与图 6a 中的 V_X 是相同的. 从 P3 卫星的 $\sum E_Y$ 和 $\sum E'_Y$ (图 7a 和 7c) 可以看出, 它们的变化趋势是基本一致的. 在 08:51 ~ 08:55 UT 期间, $\sum E_Y$ 和 $\sum E'_Y$ 都有一个增大的变化, 表明 E_Y 和 E'_Y 在此期间都主要为正向. 根据 B_Z 的方向, 正的 E_Y 对应着地向等离子体流, 与 P3 记录到的地向等离子体流一致. 而 P4 卫星的 $\sum E_Y$ 和 $\sum E'_Y$ 总是处于下降的趋势(图 7b 和 7d), 表明在大约 08:51 UT E_Y 和 E'_Y 都保持负向. 负的 E_Y 对应着尾向等离子体流, 也与 P4 记录到的尾向等离子体流一致. 因此, 从 P3 和 P4 的累积电场 $\sum E_Y$ 以及电场和磁场的对应关系也可以推测出, 大约在 08:51 UT, P3 观测到了地向等离子体流而 P4 观测到了尾向等离子体流.

3.2 重联的 Hall 效应

在近地磁尾磁层中, 由于扰动的存在会产生一对沿着顺时针和逆时针方向转动的对流涡, 进而在某些区域也会观测到类似于重联造成的反向等离子体流^[31]. 而 Hall 效应是磁重联区别于其他现象的一个非常重要的标志. 因此, 为了证明 P3 和 P4 记录到的地向和尾向高速等离子体流是磁尾区域的磁重联现象造成的, 本文考察了重联区域的 Hall 效应.

Hall 电流可以在一个 X 线的周围产生一个四极的 B_Y 磁场^[9]. 在大约 08:51 UT, P4 卫星记录到磁场 Y_{GSM} 方向分量 B_Y 发生了明显的减小变化. 其减小的变化幅度大约为 13 nT. 相反, P3 卫星记录到的磁场分量 B_Y 则显著增加, 其增加的变化幅度也大约为 13 nT. P3 和 P4 卫星在分别观测到快速的尾向等离子体流和地向等离子体流的同时, 记录到了以上 Y_{GSM} 方向的磁场分量 B_Y 变化. 因此, 这一磁场变化可能是由位于 X 线两侧的 Hall 效应造成的. X 线尾向一侧的 Hall 效应产生了负向的 B_Y , 进而 P4 记录到了负 Y_{GSM} 方向上增大的 $|B_Y|$. X 线地向一侧的 Hall 效应产生了正向的 B_Y , 因而使 P3 记录的 B_Y 从负 Y_{GSM} 方向变化到正 Y_{GSM} 方向. 图 8 为 X 线两侧形成的 Hall 效应示意图. P3 记录的磁场为 $B_X < 0, B_Y > 0, B_Z > 0$, 表明在大约 08:51 UT, P3 可能位于 X 线的地向一侧, 并且靠近中性片区

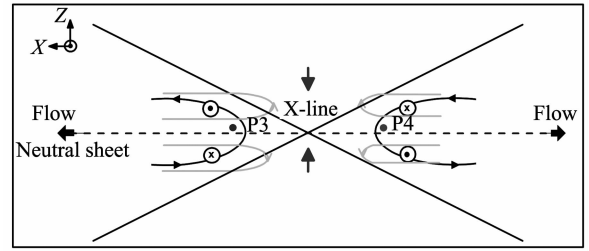


图 8 P3 和 P4 卫星所在 X 线两侧形成的 Hall 效应图中所用的坐标系为 GSM 坐标系, 中性片用虚线表示, 地球位于图中左侧, 黑色实线表示 $X_{GSM}-Z_{GSM}$ 平面内的磁力线. 中心为点或叉的圆圈表示 Hall 效应形成的四极场. 灰色的实线和指向中性片的箭头分别表示 Hall 电流和 Hall 电场.

Fig. 8 The Hall effects around the X-line for the locations of P3 and P4

The GSM coordinate is used in this figure. The neutral sheet is marked with the dashed line, and the Earth is to the left. The black solid lines denote the magnetic field lines in the $X_{GSM}-Z_{GSM}$ plane. The circles with dot and cross denote the magnetic field component of B_Y . The gray solid lines and the arrows toward the neutral sheet denote the Hall current and Hall electric field, respectively.

域. 当中性片北侧的 Hall 效应起主要作用时, P3 记录到了 $B_Y > 0$. P4 可能位于 X 线尾向一侧的中性片附近区域. 中性片北侧 Hall 效应的主导作用使 P4 记录到了磁场 B_Y 的强度在负 Y_{GSM} 方向上增大. P3 观测的 Hall 磁场强度为 13 nT, 其对应的总背景磁场强度为 46.7 nT, 约占总背景磁场的 28%. 与 P3 相似, P4 观测的 Hall 磁场强度也为 13 nT, 其对应的总背景磁场强度为 39.2 nT, 约占总背景磁场的 33%. 以上的分析结果与 Shay 等人得出的结论较为一致, 即 Hall 磁场的强度约为总背景磁场强度的 30%^[32].

从两颗卫星记录的电场数据也可以看出重联引起的 Hall 效应. 图 9 展示的是 P3 和 P4 卫星 EFI 仪器记录的 Z_{GSM} 方向上的电场 E_Z . 在大约 08:50 UT, P3 和 P4 记录的电场 E_Z 都表现出显著的下降. 这一现象可能是由分别位于 X 线地向和尾向一侧中性片以北的 Hall 电场造成的. 在 X 线附近的区域, 中性片北侧的 Hall 电场指向负 Z_{GSM} 方向. P3 和 P4 观测到的 E_Z 减小现象可能是重联产生的 Hall 电场叠加在背景电场上的结果.

3.3 P4 卫星观测到的北向磁场

高速的尾向等离子体流伴随着南向磁场或高速的地向等离子体流伴随着北向磁场, 通常被认为是磁重联发生的证据^[5]. 而本文中, P4 卫星在记录到

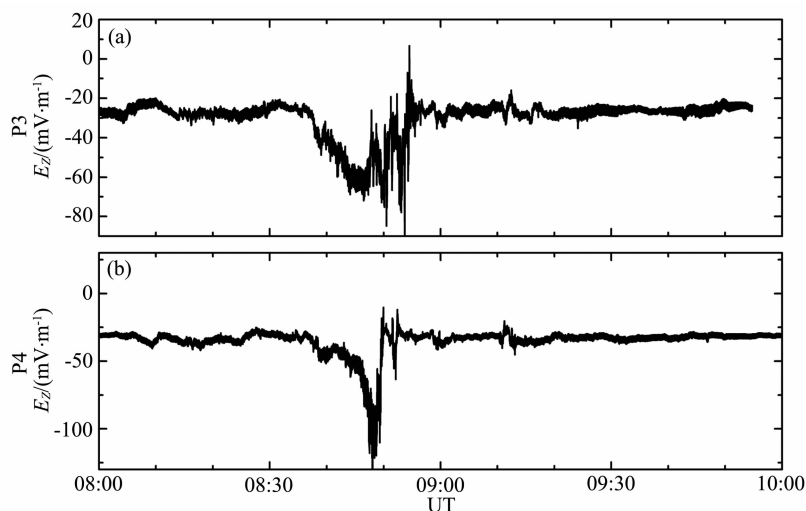


图9 P3和P4卫星EFI观测到的 Z_{GSM} 方向上的电场

Fig. 9 The electric field observed by P3 and P4 EFI in the Z_{GSM} direction

高速尾向等离子体流的同时观测到了北向磁场。导致这一现象的原因可能是P4所处的位置距离X线非常近。P4向着地球方向移动或者X线的位置向尾向扩展都可能造成上述现象。即当P4观测到高速尾向等离子体流时，北向磁场正好穿越P4所处的位置。

4 结 论

本文主要应用THEMIS卫星的观测数据，分析了2008年1月5日08:51~08:57 UT期间近地磁尾的一个磁重联事件。地面台站全天空成像仪的极光观测以及AL指数表明，此次磁重联事件发生在亚暴膨胀相的晚期。

由于缺少P5卫星的等离子体观测数据以及P3和P4卫星在大约08:51 UT之前位于尾瓣区的位置原因，我们不能确定磁尾等离子体片中磁重联的开始时刻。因此，磁重联开始时间的缺失使我们不能对亚暴过程中事件发生的时间序列进行分析，进而也就不能确定此次亚暴的触发机制。虽然重联开始时间难以确定，但根据P3和P4卫星的等离子体以及磁场的观测数据我们能够较充分地认为，P3和P4观测到的高速反向等离子体流可能是由亚暴膨胀相晚期的磁重联引起的。结合P3和P4卫星在磁尾所处的位置，此次磁重联的位置被估计位于 $X_{GSM} \sim -9.12R_E$ 至 $X_{GSM} \sim -9.40R_E$ 之间 $0.28R_E$ 的磁尾区域内。综上所述，2008年1月5日08:51~08:57 UT亚暴膨胀相晚期的磁尾磁重联事件发生在距离地球非常近的空间范围内。

致 谢 THEMIS计划由美国NASA基金(NAS5-02099)支持。我们在此感谢J. W. Bonnell和F. S. Mozer提供EFI数据；D. Larson和R. P. Lin提供SST数据；C. W. Carlson和J. P. McFadden提供ESA数据；K. H. Glassmeier, U. Auster和W. Baumjohann提供FGM数据以及S. Mende和E. Donovan提供了ASI数据。NASA戈达德空间飞行中心提供了时间平移后的ACE卫星数据。京都大学的世界地磁数据中心提供了AL指数的数据。

参考文献 (References)

- [1] Akasofu S-I. The development of the auroral substorm. *Planet. Space Sci.*, 1964, **12**: 273~282
- [2] Baker D, Pulkkinen T, Angelopoulos V, et al. Neutral line model of substorms: past results and present view. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(A6):12975~13010
- [3] Ohtani S, Takahashi K, Zanett L J, et al. Tail current disruption in the geosynchronous region in magnetospheric substorms. *Geophys. Monogr. Ser.*, 1991, **64**:131~140
- [4] Angelopoulos V, Phan T D, Larson D E, et al. Magnetotail flow bursts: association to global magnetospheric circulation, relationship to ionospheric activity and direct evidence for localization. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**(18):2271~2274
- [5] Angelopoulos V, McFadden J P. Tail reconnection triggering substorm onset. *Science*, 2008, **321**, doi:10.1126/science.1160495
- [6] Baker D, Pulkkinen T, McPherron R, et al. CDAW 9 analysis of magnetospheric events on May 3, 1986. Event C. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(A3):3815~3834
- [7] Baumjohann W, Paschmann G, Liühr H. Characteristics of

- high speed ion flows in the plasma sheet. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**:3801~3809
- [8] Angelopoulos V, Kennel C F, Coroniti F V, et al. Observations of a quasi-static plasma sheet boundary. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, **20**:2813~2816
- [9] Sonnerup B U O. *Solar System Plasma Physics*. New York: North-Holland, 1979
- [10] Hones Jr E W, Schindler K. Magnetotail plasma flow during substorms: a survey with Imp 6 and Imp 8 Satellites. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**(A12):7155~7169
- [11] Bieber J, Stone E, Hones Jr E, et al. Plasma behavior during energetic electron streaming events: further evidence for substorm-associated magnetic reconnection. *Geophys. Res. Lett.*, 1982, **9**(6): 664~667
- [12] Nishida A, Nagayama N. Synoptic survey for the neutral line in the magnetotail during the substorm expansion phase. *J. Geophys. Res.*, 1973, **78**(19):3782~3798
- [13] Nagai T, Fujimoto M, Saito Y, et al. Structure and dynamics of magnetic reconnection for substorm onsets with Geotail observations. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A3): 4419~4440
- [14] Baker D N, Peterson W K, Eriksson S, et al. Timing of magnetic reconnection initiation during a global magnetospheric substorm onset. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(24), doi: 10.1029/2002GL015539
- [15] Runov A, Nakamura R, Baumjohann W, et al. Cluster observation of a bifurcated current sheet. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(2), doi:10.1029/2002GL016136
- [16] Runov A, Nakamura R, Baumjohann W, et al. Current sheet structure near magnetic X-line observed by Cluster. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(11), doi: 10.1029/2002GL016730
- [17] Slavin J A, Tanskanen E I, Hesse M, et al. Cluster observations of traveling compression regions in the near-tail. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, A06207, doi: 10.1029/2004JA010878
- [18] Nagai T. Location of magnetic reconnection in the magnetotail. *Space Sci. Rev.*, 2006, **122**:39~54
- [19] Nagai T, Fujimoto M, Nakamura R, et al. Solar wind control of the radial distance of the magnetic reconnection site in the magnetotail. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, A09208, doi:10.1029/2005JA011207
- [20] King J, Papitashvili N. One min and 5-min solar wind data sets at the Earth's bow shock nose. <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/HROdocum.html> ap4, 2006
- [21] Sibeck D G, Angelopoulos V. THEMIS science objectives and mission phases. *Space Sci. Rev.*, 2008, **141**:35~59
- [22] Tsyganenko N, Stern D. Modeling the global magnetic field of the large-scale Birkeland current systems. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(A12):27187~27198
- [23] Stone E C, Frandser A M, Mewaldt R A, et al. The advanced composition explorer. *Space Sci. Rev.*, 1998, **86**:1~22
- [24] Mende S B, Harris S E, Frey H U, et al. The THEMIS array of ground-based observatories for the study of auroral substorms. *Space Sci. Rev.*, 2008, **141**:357~387
- [25] Auster H U, Glassmeier K H, Magnes W, et al. The THEMIS fluxgate magnetometer. *Space Sci. Rev.*, 2008, **141**:235~264
- [26] McFadden J P, Carlson C W, Larson D, et al. THEMIS ESA first science results and performance issues. *Space Sci. Rev.*, 2008, **141**:477~508
- [27] Deng X H, Matsumoto H, Kojima H, et al. Geotail encounter with reconnection diffusion region in the Earth's magnetotail: evidence of multiple X lines collisionless reconnection? *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, A05206, doi: 10.1029/2003JA010031
- [28] Lui A T Y, Zheng Y, Zhang Y, et al. Cluster observation of plasma flow reversal in the magnetotail during a substorm. *Ann. Geophys.*, 2006, **24**:2005~2013
- [29] Paschmann G, Sonnerup B U O, Papamastorakis I, et al. Plasma acceleration at the Earth's magnetopause: evidence for reconnection. *Nature*, 1979, **282**:243~246
- [30] Bonnell J W, Mozer F S, Delory G T, et al. The Electric Field Instrument (EFI) for THEMIS. *Space Sci. Rev.*, 2008, **141**:303~341
- [31] Keiling A, Angelopoulos V, Runov A, et al. Substorm current wedge driven by plasma flow vortices; THEMIS observations. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**, A00C22, doi: 10.1029/2009JA014114
- [32] Shay M, Drake J, Rogers B, et al. The scaling of collisionless, magnetic reconnection for large systems. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**(14):2163~2166

(本文编辑 何 燕)