

THEMIS星座对2008年2月26日磁层亚暴的观测

——磁尾重联触发的亚暴分析研究

褚项宁^{®*}, 濮祖荫[®], 曹馨[®], V. MISHIN[®], 王珏[®], 魏勇[®], 宗秋刚[®], 傅绥燕[®], 谢伦[®], V. ANGELOPOULOS[®], 刘江[®], K. H. GLASSMEIER[®],

- J. MCFADDEN[®], D. LARSON[®], S. MENDE[®], H. FREY[®],
- C. T. RUSSELL[®], I. MANN[®], D. SIBECK[®], T. I. SAIFUDINOVA[®],
- M. V. TOLOCHKO[®], L. A. SAPRONOVA[®], H. REME[®], E. LUCEK[®]
- ① 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;
- ② Institute of Solar-Terrestrial Physics, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia;
- ③ IGPP, UCLA, Los Angeles, California, USA;
- Institute of Geophysics and Extraterrestrial Physics, Technical University of Braunschweig, Braunschweig and Max Planck Institute of Solar System Research, Katlenburg-Lindau, Germany;
- ⑤ Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, California, USA;
- ⑥ Department of Physics, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada;
- 7 Code 674, NASA/GSFC, Greenbelt, MD, USA;
- ® Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, Toulouse, France;
- Blackett Laboratory, Imperial College London, London, UK
- * E-mail: chuxiangning@gmail.com

收稿日期: 2009-04-17; 接受日期: 2009-08-03

国家自然科学基金项目(批准号: 40731056)、国家重点基础研究发展计划("973"计划)(批准号: 2006CB806305)、美国 NASA NASS-02099 项目 和德国 für Luft- und Raumfahrt 50QP0402 项目资助

摘要 本文利用 THEMIS 卫星结合地面极光和地磁的观测,研究了 2008年2月26日 04:05 和 04:55 UT 的两次亚暴事件. Angelopoulos 已经对发生在 04:55 UT 的第二个亚暴事件做了分析. 本文对两次亚暴的相关活动进行了详细研究,特别对第一次做了深入讨论,并着重分析了磁重联与亚暴活动的关系. 在两次亚暴的初始阶段,第一次极光增亮发生在中磁尾磁重联后 2~3 min,但是持续时间较短,极向膨胀缓慢,与伪暴的特征相似,标志了亚暴的初突发(initial onset). 两次亚暴都存在第二次极光增亮和极光的极向膨胀,且时间与近地磁尾观测的地向流和磁场偶极化同时发生,并与亚暴膨胀相的其他活动的发生同步,标志了亚暴的主突发(major onset). 在两次亚暴的增长相期间,极盖区开放磁通量持续增加;在亚暴膨胀相和恢复相中,极盖区磁通量迅速减少.表明两次亚暴膨胀相的演化分别与两次尾瓣开放磁力线重联过程相联系的.从亚暴活动的参数分析,这两次亚暴膨胀相的演化分别与两次尾瓣开放磁力线重联过程相联系的.从亚暴活动的参数分析,这两次亚暴都属于小亚暴范围;从重联率分析,两次磁重联都属于弱重联.本文的观测结果表明,中磁尾磁尾重联首先触发伪暴;高速流将磁通量和能量传

关键词 亚暴 极光增亮 极光膨胀 磁场偶极化

输到近地磁尾; 高速流减速最终导致亚暴电流楔(substorm current wedge, 简称 SCW)的形成和电流中断, 产生近地偶极化和极光膨胀, 引起亚暴膨胀相突发. 本文的观测结果是对近地中性线模型(near earth neutral line, 简称NENL)和重联-电流中断协同模型(synthesis scenario of MR and CD, 简称 RCS)模型及亚暴膨胀相两步突发观点的有力支持.

1 引言

对亚暴膨胀相突发(onset)的研究是当前空间物 理学的前沿课题之一. 膨胀相突发包含有三个相互 联系的过程:中磁尾磁重联,近磁尾磁场偶极化和极 光突然增亮. 目前亚暴研究中争论最激烈的问题就 是这三个过程之间的时间顺序及其因果关系. 在现 有的众多理论模型中有两个占主导地位的基本模型: 近地电流片中断模型(NECD)[1]和近地中性线模型 (NENL)^[2-4]. NECD 认为发生在近磁尾 X~ - (8~10)R_E 的等离子体不稳定性触发了越尾电流中断[5],导致亚 暴电流楔的形成,极光出现和局地磁场偶极化;后者 产生向磁尾传播的稀疏波, 引起电流中断区域向磁 尾扩展,并在中磁尾引发磁重联和高速流. NENL 则 认为,中磁尾- $20R_E > X > -30R_E$ 首先发生磁重联,生 成尾向等离子体团和地向高速流; 地向高速流向近 磁尾传输磁通量和能量,并在近磁尾迅速减速,在此 过程中磁通量堆积, 形成场向电流和亚暴电流楔, 产 生极光和磁场偶极化. 此外, 重联-电流中断协同模 型(RCS)^[6~8]提出,中磁尾磁重联产生的高速流在近 地磁尾减速时, 促使等离子体片气球模不稳定性迅 速爆发,导致近地电流中断,产生场向电流,引起亚 暴突发. RCS 在重联、偶极化、极光三个亚暴过程的 时间序列和因果关系方面与 NENL 一致. 另外, 有的 学者进一步指出,亚暴突发通常分为两步:初突发 (initial onset, 引起伪暴)和主突发(major onset, 引起 膨胀相)[9-13]. 为了检验上述模型的正确性, 许多科学 家做了大量的工作, 其中工作焦点集中在对磁尾重 联和亚暴过程的时序分析上. 研究亚暴过程的时序 和因果关系, 必须要以多颗卫星观测为基础, 这在过 去的单颗卫星观测时代是不可能做到的. Cluster-双 星地球空间六点星座首次提供了系统的观测研究中 近磁尾亚暴活动关联的机会和条件. Cao等人[13]发现 膨胀相突发前,中磁尾出现由磁重联产生的地向流; 膨胀相突发后, 偶极化逐步由近磁尾扩展到中磁尾.

这是对 NENL 和 RCS 模型的有力支持.

THEMIS 计划^[14]提出的主要目的也是为了解决 NECD 和 NENL 之间的争论. THEMIS 计划包括五颗 卫星、全天空极光地面成像仪和地磁台站网链. THEMIS 五颗卫星轨道位于赤道平面附近, 其远地点 分别为 30R_E, 20R_E, 12R_E, 12R_E和 10R_E, 轨道周期互 相成倍数. 五颗卫星每四天排列在磁尾日地连线一 次,可以很好的用于研究亚暴不稳定性的突发和演 化过程. Angelopoulos 等人[15]使用 THEMIS 卫星的局 地观测和地面观测,研究了发生在2008年2月26日 04:55 UT 的亚暴事件的时间序列和因果关系. 他们 观测到中磁尾磁重联比极光的极向膨胀先发生至少2 min, 并发生在近地电流中断3 min之前. 根据这个时 间序列, 他认为此次亚暴突发是由中磁尾磁重联触 发的, 符合 NENL 模型. 而 Lui^[16]则认为 04:55 UT 的 亚暴膨胀相实际上发生在1 h 之前, 其极光活动是 04:05 UT 亚暴的末期特征. 因此 Lui 认为这次亚暴事 件更符合电流中断模型. 现在这次亚暴事件已经引 起了国际空间物理界的广泛关注.

我们仔细分析了THEMIS空间和地面极光后发 现,实际上2008年2月26日有两次亚暴发生,其膨 胀相突发分别在04:05 和 04:55 UT. 在两次亚暴期间, THEMIS 卫星都位于等离子体片内或附近. Angelopoulos 等人[15]对第二次亚暴事件进行了研究. 本文中我们同时对两个亚暴做了深入研究, 并对第 一次亚暴做了详细的讨论. 通过对极光活动的细致 分析我们发现,这两次亚暴都存在两次极光增亮,第 一次较弱的极光增亮发生在中磁尾重联 2~3 min 后, 第二次较强的极光增亮与近地磁场偶极化几乎同时 发生(1 min 内). 在每次亚暴的增长相中, 极盖区开放 磁通量保持增加; 亚暴的膨胀相和恢复相期间, 极盖 区开放磁通量迅速下降. 与典型的亚暴事件相比, 这 两次亚暴过程中积累和释放的磁通量都比较小, 表 明弱的磁重联导致了这两次小亚暴事件. 上述结果 与 NENL 和 RCS 一致, 并支持两步突发的观点.

本文第二节介绍数据和观测,第三节和第四节讨 论亚暴时序及重联与亚暴的关系,最后一节是结论.

2 数据和观测

2.1 数据

2008年2月26日03:30到05:30 UT, THEMIS 五颗卫星分布在磁尾日地连线附近,处于等离子体 片或邻近区域内. 本文使用 THEMIS/ESA 的等离子 体数据^[17]和 THEMIS/FGM 的磁场数据^[18], 数据精度 为3s(卫星的自旋周期). 地面极光数据取自THEMIS 地面台站的全天空极光成像仪阵列(ASIs), 共有 20 个全天空极光成像仪, 空间分辨率 1 km, 时间精度 3 s; 地磁数据来自 THEMIS 地磁台站链[19,20], 共有 21 个 地磁台站, 时间精度 0.5 s, 并由此计算得到了极光电 急流指数 AE. 此外, 本文还采用地磁反演技术(MIT), 依据磁纬大于 40°的 110 个地磁台站磁场数据, 计算 了极盖区开放磁通量Ψ [21-23]; 依据北半球极光区 27 个地磁台站的数据, 计算了西向电急流指数 J_{w} . 在我 们关注的 2 h 内, Cluster 四颗卫星处于近地的太阳风 中. 太阳风参数取自 C3, 数据精度为 4 s(卫星的自旋 周期). 同步卫星 GOES12 位于子夜侧, 提供同步轨 道的磁场数据,数据精度是1 min. 文中的卫星、极光 台站位置,地磁台站坐标都使用 GSM 坐标.

2.2 观测概述

图 1显示 2008 年 2 月 26 日 04:00:00 UT 时刻 THEMIS 五颗卫星的位置在 GSM 坐标下 XZ 平面内的投影, 其中的磁力线踪迹采用了 T96 模型计算得到^[24]. 由图可知, THEMIS 五颗卫星均处于等离子体片内或附近.

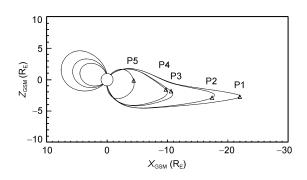


图 1 THEMIS 系列卫星在 04:00:00 UT 时刻在 GSM 坐标下 XZ 平面内的位置

图 2 显示了两次亚暴事件的相关参数. 图 2(b)显示太阳风的速度和密度一直保持稳定, $IMF B_z$ 在 04:48 UT 之前一直保持南向且 $|B_z|$ <2 nT. 在本文关注的 2 h里, 平静期 AE 指数的基准值小于 50 nT; AE 指数有两次上升后再次下降的过程; 西向电急流 J_w 、地磁台站GILL与 FYTS 的 Pi2 波动和地磁台站 SNKQ 磁场的负湾扰(ΔH)的幅度也都存在两次独立的先增加后减小的过程. 极盖区开放磁通量 Ψ 也有两次积累上升然后释放减少的过程. 以上观测表明,在03:30:00到05:30:00 UT 时间段,相继发生了两次相互独立的亚暴.

图 3 显示了地磁台站 RANK 的磁场 H分量(a), THEMIS P1 的磁场(b)和等离子体速度(c), P2 的磁场(d)和等离子体速度(e), P3 的磁场(f)和等离子体速度(g), P4 的磁场(h)和等离子体速度(i)以及 P5 的不同能段的离子通量(j). 由图 3 可知, P1 观测到了两次中磁尾的等离子体速度反转(分别在 04:10 和 04:50 UT),表明重联扩散区从卫星的地向一侧移动到尾向一侧;P3 和 P4 观测到了两次近地磁尾的高速流(04:04 和 04:53 UT)和随后的磁场偶极化过程(04:05 和 04:53 UT),其特征为 B_z 分量增加, B_x 分量减少;P5 观测到两次能量离子注入事件.

图 4(a)给出了 04:05 UT 亚暴事件的 SNKQ(右) (66.45°N, 356.99°E)和 GILL(左)(66.18°N, 332.78°E)台站的极光观测, 五个时刻分别是 04:00:06 UT (第一次极光增亮前), 04:00:33 UT (第一次极光增亮后), 04:01:42 UT (第一次弱的极光极向膨胀后), 04:03:42 UT (第二次强的极光增亮后) 和 04:04:51 UT (第二次极光极向膨胀后). 这些极光发生在 04:55 UT 亚暴极光前约 1 h, 在 04:40 UT 时极光已经消失. 图 4(b)给出了 04:55 UT 亚暴事件的 SNKQ(右)和 GILL(左)台站的极光观测, 五个时刻分别是 04:51:24 UT (第一次极光增亮前), 04:51:51 UT (第一次极光增亮后), 04:52:42 UT (第一次弱的极光极向膨胀后), 04:53:15 UT (第二次强的极光增亮后)和 04:54:09 UT (第二次极光极向膨胀后).

下文对两次亚暴事件的观测逐个进行了详细的分析.

2.3 04:05 UT亚暴

在 04:05 UT 亚暴发生之前, GILL 和 SNKQ 极光台站视野范围内存在稳定的极光弧.第一次极光增亮于04:00:21 UT 出现在SNKQ台站视野西侧, 04:01:21

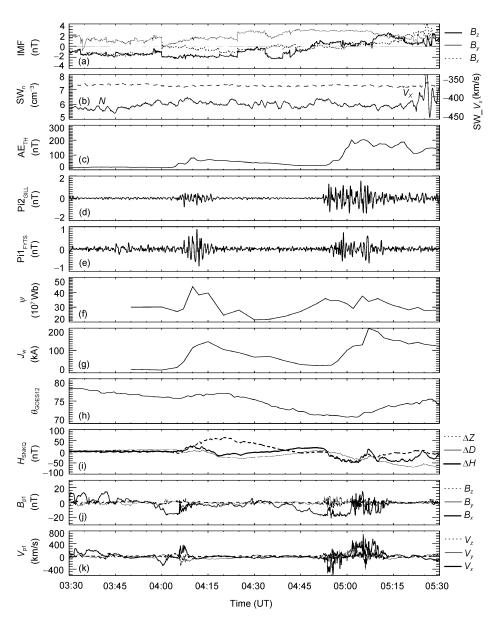


图 2 从上面到下面各栏分别为: (a) 舷激波外近地太阳风的行星际磁场(IMF); (b) 等离子体速度 V 和密度 N; (c) 地磁 AE 指数; (d) 高纬地磁台站 GILL(66.18°N, 332.78°E)的 Pi2 地磁脉动; (e) 中纬地磁台站 FYTS(55.765°N, 35.281°W)的 Pi2 地磁脉动; (f) 极盖区开放磁通量; (g) 西向电急流 J_w ; (h) 同步轨道卫星 GOES12 的磁场倾角; (i) 高纬地磁台站 RANK (72.41°N, 335.74°E)磁场; (j)和(k) THEMIS/P1 卫星的磁场和等离子体速度

UT 开始极向缓慢膨胀. 04:03:30 UT 第二次极光增亮出现在 SNKQ 台站中部,与第一次极光增亮位置纬度相同,但更靠近子夜. 1 min 后,04:04:30 UT,极光开始迅速向极向膨胀. RANK 台站磁场 H 分量负湾扰从~04:05 UT 开始,到~04:15 UT 达到 44 nT 的极大值. AE 指数从 04:04:00 UT 开始突增. 高纬地磁台站GILL 在~04:02 UT 观测到 Pi2 地磁脉动,于~04:11

UT 达到最大值; 中纬地磁台站 FYTS 在~04:06 UT 观测到 Pi2, 且于~04:11 UT 到极大值. Ψ 从 04:10 UT 的 43.8×10⁷ Wb 下降到 04:20 UT 的 24.6×10⁷ Wb. 西向电急流 $J_{\rm w}$ 从~04:07 UT 的 48 kA 上升到~04:15 UT 的极大值 139 kA. GOES12 于 04:05:30 UT 在同步轨道观测到缓慢的磁场偶极化. P5(~4.48, 5.28, ~0.16) $R_{\rm E}$ 处在子夜附近,观测到了 50~200 keV 能量范围内的能

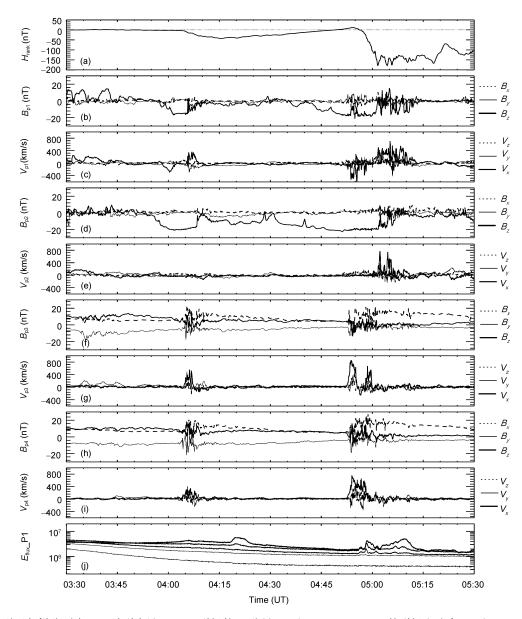


图 3 从上到下各栏分别为: (a) 地磁台站 RANK 磁场的 H 分量; (b)和(c) THEMIS/P1 的磁场和速度; (d)和(e) THEMIS/P2 的 磁场和速度; (f)和(g) THEMIS/P3 的磁场和速度; (h)和(i) THEMIS/P4 的磁场和速度; (j) P5 的 50~200 keV 能量粒子的通量

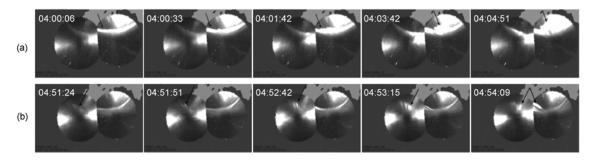


图 4 (a) (b)两栏分别是 04:05 和 04:55 UT 两次亚暴过程的极光图

量色散的粒子注入.

THEMIS卫星观测到了磁尾重联的证据. P1 ((-21.9, 4.35, -2.72) R_E) 等离子体温度~1 keV, 密度 在~1.0 cm⁻³ 左右,可见该卫星处在等离子体片中. P1 于 03:58 UT 观测到 300 km/s 的尾向流, 伴随着负 B_z ; 尾向流于 04:05 UT 转为 400 km/s 的地向流, 并伴 随着正的 B₂. 我们把 P1 测量的磁场和速度投影到电 流片局地坐标系(LMN)^[25]中. 这里 LMN 分别代表磁 场最大、中间、最小的变化方向, 其中N与Z轴的夹 角小于 90° , 即 N 的方向垂直于电流片向上. 高速流 反转时, V_x 和 B_z 同时由负变正, B_x 始终为负, B_y 随着 V_{r} 反号而由正变为负号. 磁场与速度的变化表明卫 星观测到了重联区附近的磁场霍尔四极分布[26,27], 这 表明有磁重联在 P1 附近发生. 本文对 ESA 电子的投 掷角各向异性也做了分析[15,28], 该结果可以作为重联 发生的另一个证据. 03:58:34 到 04:01:52 UT 的时间段 内, P1 观测到了尾向的高速流, 伴随着负 B_x 和 B_z . 在 此期间,对 10~100 eV 的低能电子来说,投掷角 180° 的电子通量明显高于 0°电子通量, 说明低能电子流 入重联扩散区;对 300~3000 eV 的高能电子而言,投 掷角 180°的电子通量明显低于 0°的电子通量, 说明 高能电子流出重联扩散区. 这是磁重联扩散区的尾 向侧霍尔效应的特征. 图 5(a)显示了从 04:01:16 到

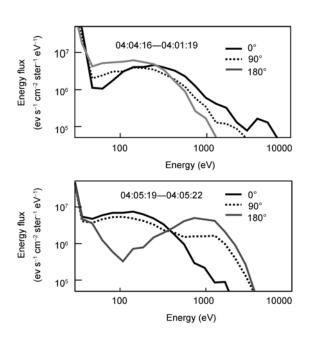


图 5 上下两栏分别是 04:01:16 到 04:01:19 UT 和 04:05:19 到 04:05:22 UT 的电子空间分布的各向异性示意图

04:01:19 UT 时间段的电子空间分布各向异性的示意图. 04:05:16 到 04:08:04 UT 的时间段内, P1 观测到了地向流, 伴随负 B_x 和正 B_z . 在此期间, 投射角 180°的低能电子通量明显低于0°低能电子通量, 投射角 180°的高能电子通量高于0°高能电子通量, 这说明低能电子和高能电子分别流入和流出重联扩散区. 这是磁重联扩散区的地向侧霍尔效应的特征. 图 5(b)显示了从 04:05:19 到 04:05:22 UT 电子空间分布的各向异性的示意图. 以上观测与重联点附近的磁场霍尔效应的描述是一致的 $[^{28}]$. 这些结果表明, 重联点从P1 的地球一侧移动到磁尾一侧, 且重联发生于03:58:34 UT 之前.

P2 ((-17.4, 5.03, -2.88) R_E) 也观测到了磁重联的霍尔效应. P2 在 03:58:48 UT 探测到伴随负 B_x 和正 B_z 的地向流. 40~200 eV 低能电子的尾向通量(0°投射角)比较高,即低能电子向重联点入流; 300~300 eV 高能电子的地向(180°投射角)的通量比较高,即高能电子向地向出流. 我们可以推断,P1 和 P2 观测到了同一个重联,重联位置处于 P1 和 P2 之间,即重联坐标—17.4 $R_E > X > -21.9R_E$.

P4 ((-9.77, 4.88, -1.61) R_E) 在 04:04:10 UT 首先 在近地观测到了地向流,伴随着磁场的强烈扰动. P3 ((-10.6, 4.21, -1.84) R_E) 在 04:04:45 观测到了地向流,比 P4 晚 35 s. 这个时间差可能是由于两颗卫星的空间分布不同造成的. P4 在 04:05:04 UT 观测到了 Bz 的突然增大,表明在 P4 附近发生了磁场偶极化,P3 在 04:04:51 UT 也观测到了磁场偶极化.

THEMIS 卫星 P1, P2, P3, P4 四颗卫星在电离层的足点的纬度都在58.4±0.4°,处于极光台站GILL和SNKQ的极光增亮和膨胀区域附近,表明地面极光的增亮和膨胀与磁尾的重联和偶极化是相关的.

2.4 04:55 UT亚暴

Angelopoulos 等人^[15]对 04:55 UT 的亚暴做了时序和因果分析,关于高中纬 Pi2 突发时间和磁重联的突发时间,重联霍尔效应和电子各向异性等部分,本文的结果与该文相符,此处不再赘述.我们对地面极光数据又做了进一步的分析,结果如下: 04:05 UT 亚暴的极光在 04:40 UT 时已经弥散消失,且 SNKQ 和 GILL台站上空已经出现稳定的极光弧.这表明该极光亚暴已经结束.对于 04:55 UT 亚暴而言,极光第一次增亮发生在 04:51:39 UT, 04:52:21 UT 时刻极光开始缓慢的

向极向膨胀. 第二次极光增亮在 04:53:03 UT, 比第一次增亮更靠近子夜, 随后极光于 04:53:48 UT 快速极向膨胀. 高纬 Pi2 突发起始于 04:52:00 UT, 中纬 Pi2 地磁脉动从 04:53:05 UT 开始. GOES12 于 05:03:30 UT 在同步轨道观测到缓慢的磁场偶极化. P5 在子夜侧观测到了能段 50~200 keV 的高能离子色散注入.

THEMIS 地磁台站 RANK 在 04:54:30 UT 观测到了地磁负湾扰,在~05:01 UT 负湾扰达到极大值 178 nT. AE 指数从 04:54:00 UT 开始上升. 西向电急流 $J_{\rm w}$ 从 04:58 UT 开始增加,到 05:07 UT 增加到极大值 199 kA, Ψ 在 05:05 UT 到达极大值 37.5×10⁷ Wb,05:25 UT 时降低到 27.7×10⁷ Wb.

P1和P2此时正处于等离子体片附近/内部. P1和P2分别在04:50:28和04:50:38 UT 首次观测到磁重联,由此可知磁重联发生在P1和P2卫星之间. 根据重联区粒子出流速度反推计算,磁重联应该发生在04:50:03 UT,重联位置 X~~20R_E. P3在04:52:27 UT观测到地向流,随后与04:53:05观测到磁场偶极化.

P1, P2, P3, P4 的足点纬度在 58.4±0.5°, 处于极光增亮和膨胀区域附近, 表明本次亚暴极光的增亮和膨胀与磁尾的重联和偶极化是相关的.

值得强调指出的是, 04:05 UT 亚暴的极光, 在经历极向和赤道向扩展后,于 04:40 UT 已经恢复平静; AE指数, J_w , Pi2 地磁脉动,地磁负湾扰的变化都清楚表明这是两次独立的亚暴. 这与 Lui^[16]认为以上活动是一次亚暴的论断不符. 此外, Ψ 在两次亚暴中都有上升再下降的过程,说明尾瓣开放磁通量有两次积累与释放的经历. 在第一次亚暴结束后, Ψ 从 04:40 UT 再次开始上升, 然后在 05:05 UT 达到最大值,随后下降. 这说明先后发生的两次亚暴,分别与依次发生的两次尾瓣重联有关.

3 亚暴的时间序列和因果关系分析

本节首先分析 04:05 UT 亚暴事件的时间序列. P1 和 P2 分别在 03:58:34 和 03:58:48 UT 观测到了电子的霍尔效应,表明磁重联在 03:58:34 UT 之前已经开始. 在观测到尾向流之前,P1 卫星于 03:58:16 UT 观测到 V_z >20 km/s 的北向流,伴随着磁场 B_z 分量的负扰动,这说明卫星进入了重联入流区. 卫星进入重联入流区可以作为重联的观测证据^[1]. 在重联发生后 185 s, SNKQ 台站于 04:00:21 UT 观测到较弱的第一

次极光增亮;极光增亮后 60 s,极光弧开始缓慢的极向膨胀.高纬台站在~04:02 UT观测到了 Pi2 地磁脉动. SNKQ 台站在 04:03:30 UT观测到了较强的第二次极光增亮,极光增亮后 60 s 后极光弧快速极向膨胀.几乎同时(1 min 内) P3 和 P4 分别在近地于04:04:51 和 04:05:04 UT观测到了磁场偶极化; AE 指数突增于 04:04:00 UT 开始;高纬地磁台站负湾扰在~04:05 出现.中纬 Pi2 地磁脉动在~04:06 UT 发生.

其次本节分析 04:55 UT 亚暴事件的时序关系. 中磁尾磁重联发生于 04:50:03 UT, P1 和 P2 分别在 25 和 35 s 后观测到了重联入流区. 第一次极光增亮发生在重联后 96 s, 且在增亮后 42 s 开始缓慢的极向膨胀. 高纬地磁台站在极光增亮后 21 s 观测到 Pi2 地磁脉动. 第二次极光增亮发生在 04:53:03 UT, 45 s 后开始迅速向极向膨胀. 本次极光增亮出现在 P3 观测到的地向流(04:52:27 UT)和偶极化(04:53:05 UT) 1 min之内. AE 指数从 04:54:00 UT 开始上升. 高纬地磁台站负湾扰和中纬 Pi2 地磁脉动分别在 04:54:30 和 04:53:05 UT 发生.

表 1 总结了两次亚暴相关事件的时间序列. 由表 1 可以看出两次亚暴有很多共同点. 首先, 两次亚暴 极光的首次增亮都出现在中磁尾重联后 2~3 min 内, 然后高纬很快出现 Pi2 地磁脉动. 我们利用 T96 模型 将 P1 和 P2 投影到电离层, 其足点在 SNKQ 和 GILL 台站中线 0.5 地方时附近, 表明磁重联与极光活动从 位置上看二者可能密切相关. 由此可以推断中磁尾磁 重联很可能是这两次极光亚暴的起因,与 Angelopoulos 等人[15]等的观点相同. Angelopoulos 等人[15]提出重联 产生的动力学阿尔芬波和伴随的加速的电子可能是 产生极光第一次增亮的机制,这一推断与观测事实 相符. 但是第一次极光增亮仅表伪暴开始, 不代表膨 胀相的开始, 也不是由高速流减速和亚暴电流楔形 成所引起的. 其次, 高纬地磁负湾扰、中纬 Pi2 地磁 脉动和AE指数突增这些膨胀相的相关现象都是几乎 同时出现的, 并且发生在 P3 和 P4(X~-10R_E)观测到 地向流和近地偶极化约一分钟的时间间隔之内. 一 个合理的解释是所有这些现象及亚暴膨胀相的突发, 都与高速流到达近地磁尾,导致亚暴电流楔的形成 和偶极化有关[8,29]. 以往一些研究成果, 已提供了这 方面的相关证据. 例如, 众所周知, AE 指数和高纬地 磁负湾扰都是电急流强度的表征[30]; 地向高速流减 速产生场向电流,后者可以引起中纬Pi2地磁脉动[31].

| 表 1 | 04:05 和 04:55 UT 两次亚暴相关事件的时间序列 |
|-----|--------------------------------|
| | |

| 时间 | 观测时刻 | 时间差(从 03:57:16 UT) | 观测时刻 | 时间差(从 04:50:03 UT) |
|------------------|----------|--------------------|----------|--------------------|
| 事件 | | | 04.50.00 | |
| 重联突发 | * | * | 04:50:03 | 0 |
| P1 进入入流区 | 03:57:16 | 0 | 04:50:28 | 25 |
| P2 进入入流区 | * | * | 04:50:38 | 35 |
| P1 的重联区霍尔效应 | 03:58:34 | 78 | * | * |
| P2 的重联区霍尔效应 | 03:58:48 | 92 | * | * |
| 第一次极光增亮 | 04:00:21 | 185 | 04:51:39 | 96 |
| 第一次极光膨胀 | 04:01:21 | 245 | 04:52:21 | 138 |
| 高纬台站 GILL Pi2 突发 | ~04:02 | 284 | 04:52:00 | 117 |
| 第二次极光增亮 | 04:03:30 | 374 | 04:53:03 | 180 |
| P4 观测到地向流 | 04:04:10 | 414 | * | * |
| P3 观测到地向流 | 04:04:45 | 449 | 04:52:27 | 144 |
| 第二次极光膨胀 | 04:04:30 | 434 | 04:53:48 | 225 |
| P4 观测到偶极化 | 04:05:04 | 468 | * | * |
| P3 观测到偶极化 | 04:04:51 | 455 | 04:53:05 | 182 |
| AE 指数突增 | 04:04:00 | 404 | 04:54:00 | 237 |
| 中纬台站 FYTS Pi2 突发 | ~04:06 | 524 | 04:53:05 | 182 |
| 高纬台站 RANK 负湾扰突发 | ~04:05 | 464 | 04:54:30 | 267 |

再次,特别让人关注的是,极光亚暴的第二次增亮(即主增亮)与 P3 和 P4 观测到的地向流和近地偶极化同时(1 min 内),并与其他膨胀相现象的发生同步,在 04:05 和 04:55 UT 两次亚暴中都是如此.这再次表明,极光主增亮和偶极化可以作为亚暴膨胀相突发的表征,它们与高速流到达近磁尾最终导致亚暴电流楔的形成和越尾电流中断是相关的.这一观测结果可以用下列过程来解释:中磁尾的磁重联产生地向流,地向流向近地携带磁通量和能量,最终产生 SCW 的形成,导致近地的偶极化和亚暴主突发[11,13],与 NENL 和 RCS 的图像相符.

向阳面重联和尾瓣磁重联之间的平衡可以使尾瓣磁通量保持稳定^[32]. 尾瓣磁重联提供了亚暴发展所需的大多数磁通量和能量^[3]. 04:05 UT 亚暴期间IMF 和太阳风条件一直没有变化. 亚暴主突发后几分钟内磁通量 Y继续增加, 然后急剧减少, 说明膨胀相突发可能是与闭合磁力线磁重联相联系的; 而膨胀相突发以后亚暴释放的能量, 则是由尾瓣开放磁力线磁重联提供的^[11,13,33,34]. 04:55 UT的亚暴也有相似的特征, 但 Y的减小出现在 IMF 由南转北之后. Russell^[33]指出, IMF 由南转北更容易为尾瓣重联创造条件. 显然, 所有上述特征都与亚暴的两步触发的观点一致^[9,11~13,35].

4 重联率和亚暴强度

在两次亚暴期间 AE 指数最大值分别为 80 和 203 nT, 而一般亚暴 AE 指数的典型值是 100~500 nT $^{[36]}$; 西向电急流 $J_{\rm w}$ 最大值分别是 139 和 199 kA, 远远小于亚暴的典型数值 500~1000 kA; 地磁负湾扰分别达到了 40 和 150 nT, 也在小亚暴 100~300 nT 的范围内 $^{[2,37,38]}$. 根据上述亚暴特征,两次亚暴都是小亚暴.

无论是 NENL 还是 RCS, 亚暴的强度都是与磁 尾重联释放的通量和能量相关的. 因此我们可以推 断, 引起这两个小亚暴的重联过程应该是比较弱的. 通常可用三种方法来估算重联率: 探测沿重联线的 电场分量 $E_{\prime\prime}$, 测量分型线的磁场正切值, 或者计算入 流速度与渐近线阿尔芬速度的比值[39], 快速磁重联 的无量纲重联率介于 0.01 和 0.2[40]. 我们采用第三种 方法, 通过 P1 测量数据计算重联率. 计算的关键步 骤在于从等离子体速度 Z 分量中去除等离子体片的 摆动速度分量. 在重联静止参照系中, 等离子体相对 于电流片中心没有Z分量速度. 计算中我们假设在此 参照系中重联区域关于等离子体片是上下对称的, 取磁场 $|B_v|<2$ nT区间的 V_v 平均值作为等离子体片的摆 动速度. 对于 04:55 UT 亚暴, 等离子体片摆动速度 V_{z0} 为~18.4 km/s, 入流区速度平均值(V₂)为~47.8 km/s, 因 此入流速度为 $\langle V_z \rangle - V_{z0} \sim 29.4$ km/s. 渐进阿尔芬速度

 $V_{\rm A}$ 可以利用入流区磁场和等离子体密度计算得到. 磁场平均值和密度平均值分别为 $\langle |B| \rangle$ =17 nT, $\langle N \rangle$ =0.15~0.25 cm⁻³,因此阿尔芬速度大致为~(750~970) km/s. 由此,重联率计算得~(0.030~0.038). 利用相同的方法,计算得到 04:05 UT 亚暴重联的重联率为~(0.04~0.05). 两次重联率都接近快速磁重联率的下限,故皆为弱重联.

小亚暴和弱重联相联系,这是因为向阳面磁层顶重联向尾瓣输入的磁通量 Ψ 少,且磁尾尾瓣重联在亚暴期间释放的磁通量 $\Delta\Psi$ 也少.04:05 和 04:55 UT 亚暴期间磁通量最大值 Ψ 分别为 43.8×10⁷ 和 37.5×10⁷ Wb,小于典型亚暴的(60~80)×10⁷ Wb^[34,41];释放的磁通量 $\Delta\Psi$ 分别为 19.2×10⁷ 和 9.8×10⁷ Wb,也小于典型亚暴的(30~40)×10⁷ Wb^[34].太阳风输入磁层的能量可以用经验公式 ε' =($\Delta\Psi$)²· V_x/μ_0 S_T来估计^[23,35],这里 μ_0 =4 π ×10⁻⁷ H,S_T=6×10¹⁶ m².在这两次亚暴期间,太阳风速度一直较为稳定 V_x ~380 km/s (见图 2),因此对于两次亚暴分别有 ε' ~1.8×10¹¹和~4.8×10¹⁰ W,与 Akasofu^[42]给出的亚暴能量下限 1.0×10¹¹ W 接近.很显然,这一结论与磁尾尾瓣重联触发亚暴主膨胀相的描述也是一致的.

5 总结

THEMIS 的观测显示 2008年2月26日两个亚暴

都是与中磁尾重联相关的, 且具有如下特征.

- 1) 第一次极光增亮较弱, 出现在中磁尾重联后 2~3 min, 随后的极光弧的极向膨胀较缓慢.
- 2) 第二次较强的极光主增亮与近地地向流和磁场偶极化同时(在 1 min 内), 极光在增亮后很快向极向迅速膨胀.
- 3) 亚暴膨胀相期间,极盖区开放磁通量持续积累;在膨胀相和恢复相期间,极盖区开放磁通量迅速释放并下降.
- 4) 这两次亚暴的 AE 指数, 西向电急流 J_w, 地磁负湾扰和地磁 Pi2 脉动均小于典型亚暴值. 两个亚暴相关的重联率也接近快速重联率的下限. 太阳风向磁层输入的能量、向阳面重联输入极盖区的开放磁通量和磁尾尾瓣重联释放的磁通量都小于典型亚暴所对应的数值.

本文的观测结果表明,中磁尾磁重联首先触发伪暴;高速流将磁通量和能量传输到近地磁尾,导致了 SCW 的形成和电流中断,由此产生近地偶极化和极光膨胀,最终引起亚暴膨胀相突发.本文的观测结果与 NENL 和 RCS 模型及亚暴膨胀相两步突发观点的图像和预测是一致的.至于高速流到达近磁尾后 SCW 的形成和越尾电流中断的物理过程,目前正在进一步研究中.

致谢 作者们感谢加拿大空间局对 THEMIS 地面极光和地磁观测台站的赞助和提供相关的数据, 并感谢 A. Viljanen, J. Posch, T. Iyemori, K. Yumoto, O. Troshichev, D. Milling, E. Kharin, B. M.Shevtsov 和A. Vinnitskiy, INTERMAGNET 计划的首席科学家们, GIMA, H. Gleisner, S. Solovyev, S. Khomutov, 和 O. Kusonskiy等给本项研究提供高纬地磁数据. 本文北大作者们对周煦之和张辉在工作过程中给予的帮助,表示由衷的感谢.

参考文献

- 1 Lui A T. Current disruption in the Earth's magnetosphere: Observations and models. J Geophys Res, 1996, 101(A6): 13067 13088
- 2 Mcpherron R L. Physical processes producing magnetospheric substorms and magnetic storms. Geomagn, 1991, 4: 593-739
- 3 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
- 4 Baumjohann W. Modes of convection in the magnetotail. Phys Plasmas, 2002, 9(9): 3665 3667
- 5 Lui A T, Mankofsky A, Chang C L, et al. A current disruption mechanism in the neutral sheet—A possible trigger for substorm expansions. Geophys Res Lett, 1990, 17: 745—748
- 6 Pu Z Y, Kang K B, Korth A, et al. Ballooning instability in the presence of a plasma flow: A synthesis of tail reconnection and current disruption models for the initiation of substorms. J Geophys Res, 1999, 104(A5): 10235—10248
- 7 Pu Z Y, Korth A, Chen Z X, et al. A global synthesis model of dipolarization at substorm expansion onset. J Atmos Sol-Terr Phy, 2001, 63(7): 671-681
- 8 Zhang H, Pu Z Y, Cao X, et al. TC-1 observations of flux pileup and dipolarization-associated expansion in the near-Earth magnetotail

- during substorms. Geophys Res Lett, 2007, 34(3): L3104
- 9 Nakamura R, Baker D N, Yamamoto T, et al. Particle and field signatures during pseudobreakup and major expansion onset. J Geophys Res, 1994, 99(A1): 207-221
- 10 Mishin V M, Saifudinova T, Bazarzhapov A, et al. Two distinct substorm onsets. J Geophys Res, 2001, 106(A7): 13105 13118
- 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): 41–43
- 12 McPherron R L. Substorms, in COSPAR workshop on capacity development. http://www.faculty.iu-bremen.de/jvogt/cospar/cbw3/substorms/lecture_rmcpherron.pdf
- 13 Cao X, Pu Z Y, Zhang H, et al. Multispacecraft and ground-based observations of substorm timing and activations: Two case studies. J Geophys Res, 2008, 113: A07308
- 14 Angelopoulos V. The THEMIS mission. Space Sci Rev, 2008, 141: 5-34
- 15 Angelopoulos V, McFadden J P, Larson D, et al. Tail reconnection triggering substorm onset. Science, 2008, 321: 931–935
- 16 Lui A T. Re-evaluation of observations for the February 26, 2008 substorm reported to show tail reconnection triggering substorm expansion onset. Eos Trans AGU, 2008, 89(53): 1-5
- 17 Mcfadden J P, Carlson C W, Larson D, et al. The THEMIS ESA plasma instrument and in-flight calibration. Space Sci Rev, 2008, 141(1): 277-302
- 18 Auster H U. The THEMIS fluxgate magnetometer. Space Sci Rev, 2008, 141: 235 264
- 19 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(1): 357—387
- 20 Russell C T, Chi P J, Dearborn D J, et al. THEMIS ground-based magnetometers. Space Sci Rev, 2008, 141(1): 389-412
- 21 Mishin V M. The magnetogram inversion technique and some applications. Space Sci Rev, 1990, 53(1): 83 163
- 22 Mishin V M, Block L P, Bazarzhapov A D, et al. A study of the CDAW 9C substorm of May 3, 1986, using magnetogram inversion technique 2, and a substorm scenario with two active phases. J Geophys Res, 1997, 102: 19819—19859
- 23 Mishin V M, Falthammar C G. Pseudo-and true substorm onsets within framework of the analogy. Eur Space Agency Spec Publ, 1998. 731
- 24 Tsyganenko N A. Modeling the Earth's magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause. J Geophys Res, 1995, 100(A4): 5599-5612
- 25 Sonnerup B U O, Scheible M. Minimum variation analysis, analysis methods for multi-spacecraft data. ISSI Science Report, 1998, SR-001: 180—220
- 26 Pu Z Y, Xiao C J, Zhang X G, et al. Double Star TC-1 observations of component reconnection at the dayside magnetopause: a preliminary study. Ann Geophys, 2005, 23: 2889—2895
- 27 Oieroset M, Phan T D, Fujimoto M, et al. In situ detection of collisionless reconnection in the Earth's magnetotail. Nature, 2001, 412(6845): 414-417
- 28 Nagai T, Fujimoto M, Nakamura M S, et al. A large southward magnetic field of -23.5 nT in the January 10, 1995 plasmoid. J Geophys Res, 1998, 103: 4441-4451
- 29 Shiokawa K, Baumjohann W, Haerendel G. Braking of high-speed flows in the near-Earth tail. Geophys Res Lett, 1997, 24(10): 1179—1182
- 30 Mcpherron R L, Russell C T, Aubry M P. Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968, 9, Phenomenological model for substorms. J Geophys Res, 1973, 78(16): 3131—3149
- 31 Shiokawa K, Baumjohann W, Haerendel G, et al. High-speed ion flow, substorm current wedge, and multiple Pi 2 pulsations. J Geophys Res, 1998, 103(A3): 4491–4507
- 32 Cowley S, Lockwood M. Excitation and decay of solar wind-driven flows in the magnetosphere-ionosphere system. Ann Geophys, 1992, 10: 103 105
- 33 Russell C T. How northward turnings of the IMF can lead to substorm expansion onsets. Geophys Res Lett, 2000, 27: 3257 3259
- 34 Pu Z Y. Observational features of magnetotail open field line reconnection. Eos Trans AGU, 2006, 87(52): 1-5
- 35 Mishin V M, Saifudinova T, Bazarzhapov A, et al. Two distinct substorm onsets. J Geophys Res, 2001, 106(A7): 13105 13118
- 36 Kauristie K, Pulkkinen T I, Pellinen R J. Dynamics of the auroral oval during moderate substorms. Geomagn Aeronomy, 1994, 34: 731 736
- 37 Kamide Y, Akasofu S I. Latitudinal cross section of the auroral electrojet and its relation to the interplanetary magnetic field polarity. J Geophys Res, 1974, 79: 3755-3771
- 38 Lui A T, Akasofu S, Hones Jr E W, et al. Observation of the plasma sheet during a contracted oval substorm in a prolonged quiet period. J Geophys Res, 1976, 81: 1415—1419
- 39 Priest E R, Forbes T. Magnetic Reconnection: MHD Theory and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- 40 Wang X, Yang H A, Jin S P. Scalings of steady state Hall magnetohydrodynamic reconnection in high-beta plasmas. Phys Plasmas, 2006, 13: 60702
- 41 Boakes P D, Milan S E, Abel G A, et al. A statistical study of the open magnetic flux content of the magnetosphere at the time of substorm onset. Geophys Res Lett, 2009, 36(4): L04105
- 42 Akasofu S I. Physics of Magnetospheric Substorms. Holland: Reidel Publishing Co., 1997