尾瓣持续磁重联与磁层亚暴相关性研究

张 辉[①] 濮祖荫[①③*] 曹 馨[①] 傅绥燕[①] 肖池阶[②] 刘振兴[③] A. Korth[④] M. Frazen[④] Q. G. Zong[⑤] H. Reme[⑥] K. H. Glassmeier[⑦] R. Friedel[⑧] G. D. Reeves[⑧] M. W. Dunlop[⑨]

(① 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; ② 中国科学院国家天文台, 北京 100081; ③ 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080; ④ Max-Planck-Institute for Solar System Research, 37191 Katlenburg-Lindau, Germany; ⑤ Center for Space Physics, Boston University, 725 Commonwealth Avenue, Boston, MA 02215, USA; ⑥ CESR/CNRS, F-31028 Toulouse Cedex 4, France; ⑦ IGM, TU Braunschweig, D-38106, Braunschweig, Germany; ⑧ Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545, USA; ⑨ Rutherford Appleton Laboratory, Oxon, OX11 0QX, UK. * 联系人, E-mail: zypu@pku.edu.cn)

摘要 根据尾瓣持续磁重联的特征, 首先利用 Cluster 星簇测量的近地磁尾等离子体密度、温度、整体运动速度、磁场等数据, 确认尾瓣磁重联过程的存在; 其次, 利用 GOES, LANL 等同步高度卫星数据, 极光数据以及地面观测的 AE 指数等描述亚暴突发(onset)现象; 结合上述两方面的观测, 进而分析研究了尾瓣持续磁重联和磁层亚暴的相关性和时序关系, 确认了尾瓣持续磁重联是行星际磁场持续南向期间亚暴膨胀相突发的原因.

关键词 尾瓣重联 磁层亚暴 高速流 亚暴膨胀相突发**(onset)**

对亚暴膨胀相突发(onset)的研究是当前空间物理的前沿课题之一. 在现有多个理论模型中占主导地位的两个基本模型是: 近地中性线模型(Near Earth Neutral Line Model)[1,2]和近地电流片中断模型(Near Earth Current Disruption Model)[3]. 这两个模型矛盾的焦点在于: 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; 电流片中断模型则认为是近磁尾电流片不稳定性触发亚暴膨胀相, 偶极化向磁尾传播可能在中磁尾引发磁重联. 为了确认这些机制的正确性, 大量的工作集中在对中磁尾重联与亚暴过程的时序分析上. 如果这两者是相关联的, 其时序的先后关系应能体现其物理上的因果关系.

磁尾突发性的高速流(BBF, Burst Bulk Flow)是磁尾磁重联的标志[4,5]. 2001~2003 年Cluster星簇在中磁尾观测到 300 多次BBF事件. 我们对这些BBF数据的分析显示, 有很多亚暴膨胀相与BBF相关, 也有很多亚暴与BBF不相关; 部分亚暴事件中先有BBF, 后观测到亚暴触发相; 另一些亚暴突发在先, 后出现BBF. 我们认为, 这些事实表明, 亚暴触发过程的复杂性远不是上述两个模型中的任何一个可以完全描述的; 不同的亚暴可能有不同的触发机制, 因此BBF和膨胀相突发之间的时序关系也可能不同. 太阳风储存于磁尾的能量可能因不稳定性爆发而触发亚暴[3]. 行星际磁场 (IMF)变化(包括南转北)触发亚暴是否与磁尾磁重联有关还是一个正在研究的课题. IMF南向时储存在磁尾的能量主要集中在尾瓣区, 这些能量主要是通过尾瓣磁重联释放的, 因此尾瓣磁重联与亚暴膨胀相很可能有密切的关系. 但磁尾重联规模不同可能对近磁尾的效应不同, 由于有些重联释放能量不足, 不能引起明显的亚暴.

如同前文[6]中提到的, 在行星际磁场持续南向和太阳风速度较高的条件下, 磁尾尾瓣积累了大量的过剩磁能, 磁尾晨昏电场增强, 等离子体片密度升高. 此种条件下磁重联进行得比较深入, 重联不但将等离子体片的闭合磁力线及等离子体带出重联区域, 而且不断进入重联区域的尾瓣磁场及等离子体也参与重联过程, 我们称之为持续尾瓣磁重联(CLR, Continuous Lobe Reconnection). 它的观测特征是: (ⅰ) 有明显的磁重联特征, 例如出现伴随着磁场B_Z分量反转的速度V_X分量反转; (ⅱ) 明显的空泡现象, 由于尾瓣的等离子体参与重联过程, 位于重联区域的卫星可以观测到等离子体逐步由等离子体片向尾瓣区域过渡的特征, 如温度、密度降低以及高能质子通量变低等; (ⅲ) 对流性的高速流, 这些高速流速度$|V_X|\geq$400 km/s, 携带磁通量; (ⅳ) 事件后期, 等离子体密度、温度升高. 本文不试图对所有亚暴进行解释, 而只分析在IMF持续南向期间发生的亚暴与CLR的关系. 我们发现两者间存在密切的相关性, CLR 总是发生在亚暴突发前, 并且两者具有同样的准周期性. 另一方面, 如果磁尾磁重联不能发展成为CLR,

只限于等离子体片内，近磁尾可能只会有伪暴发生，甚至没有任何明显的亚暴现象.

2001~2003 年Cluster星簇穿越磁尾 100 多次，其远地点为 19.6R_E. 本文对前文[6]列出的 37 个CLR事件与亚暴的相关关系，进行个例分析和统计分析；另外也针对部分没有发展成为CLR的事例进行了分析.

本文对近磁尾亚暴分析采用同步高度GOSE系列卫星的磁场观测数据、同步高度LANL 系列卫星对强能电子加速的观测数据、地面地磁观测台站的极光电激流指数数据和Polar卫星的UVI(Ultraviolet Imager)的极光观测图像. Cluster对磁尾磁重联的探测仪器见前文[6]的相关介绍.

1 持续尾瓣重联(CLR)与亚暴时序关系的个例分析

1.1 2002 年 10 月 14 日 1405UT 事例

从 1100UT 至 1500UT 期间，Geotail 处于向阳面的太阳风中，其位置为(13.5, 14.1, −5.2)R_{EGSM} 附近. 这期间 Geotail 观测到太阳风的 V_X 为−360 km/s，假设此时向阳面磁层顶日下点位于平均位置 X_{GSM} = 10 R_E 处，则 Geotail 观测到的太阳风以−360 km/s 的速度在约 1.03 min 后到达磁层顶(在 X 方向以−360 km/s 的速度在 1.03 min 内从 13.5R_E 到达 10R_E). 因此要以 Geotail 观测到磁场作为磁层顶外侧的磁场条件，则需要将 Geotail 的 FGM 数据向后延时 1.03 min，即每个数据点的时间增加 1.03 min(图 1 中数据已经做了延时). 从图 1 可以看到，磁层顶向阳面外 IMF 在 1100UT~1420UT 期间持续南向，B_z 最小达到−15 nT. 从前文[6]得知，这为CLR的发生提供了必要条件.

图 2 显示，1405UT时Cluster/SC1 卫星深入到等离子片中心，观测到尾向高速流，同时，H^+密度、等离子体温度开始逐步下降. 1424UT~1440UT卫星观测到了低温低密度的磁层尾瓣等离子体；此后，等离子体的密度和温度各自恢复，但密度没有能恢复到1406UT之前的数值，而温度却高于此前的温度，同时卫星观测到地向的高速流. Cluster星簇中的SC4 观测到类似的现象. 根据前文[6]所述，这个结构完全符合CLR的预期特征: (1) 磁重联; (2) 空泡; (3) 对流性高速流; (4) 事件后温度升高、密度降低. 此外SC3 比其他的三颗卫星更靠近等离子片中心，它观测到的空泡结构在时间尺度上要小于其他卫星，并且于1425UT再次接近等离子片中心，观测到了尾向的对流性高速流. 这些现象确切表明: 至少从 1405UT开始，持续尾瓣磁重联结构产生并向磁尾运动. 此时，Cluster星簇SC3 的位置是(−13.8, 10, 0.9)R_{EGSM}.

同步轨道子夜侧卫星和地面的观测表明，该 CLR 期间有亚暴发生.

(ⅰ) 图 3 给出的极光观测数据，图中极光区域的灰度根据左侧色标，对应不同的极光亮度，深灰色表示极光增亮的区域，该图中极光是在磁地方时坐标系中展示的. 1407UT 极光卵子夜侧突然增亮，此后，除了个别时间段的亮度稍微有所减弱以及个别数据不可信之外，极光增亮区显示出以下的特性: (1) 增亮区高纬侧边缘向极区扩张; (2) 亮度最强部分西向移动，在 25 min 的时间内从 2100LT 运动到 1800LT 附近; (3) 1354UT~1357UT、1401UT~1403UT 期间有

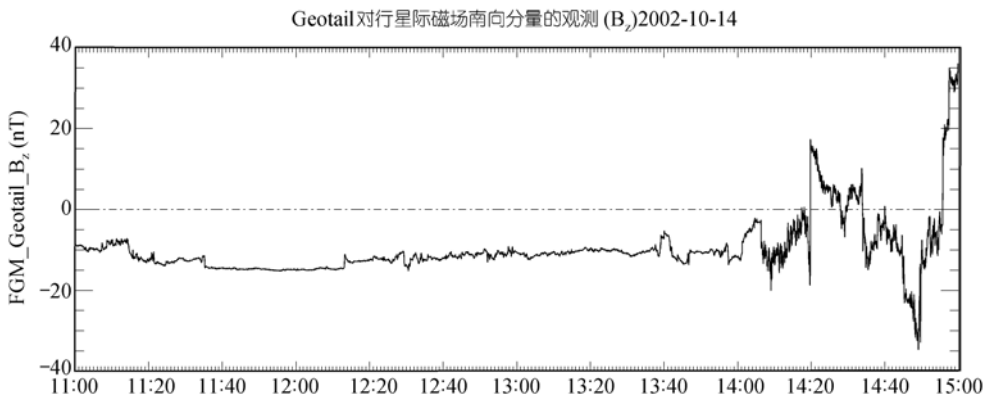


图 1 Geotail 观测的行星际磁场的 B_z 分量

太阳风速度为−360 km/s, Geotail 位于(13.5, 14.1, −5.2)R_{EGSM}，假设向阳面磁层顶日下点位于平均位置 X=10 R_E，Geotail 位置处的太阳风以−360 km/s 的速度在 1.03 min 后到达平均磁层顶位置，因此 Geotail 的磁场观测数据做了 1.03 min 的向后平移，以代表磁层顶外侧的磁场特征. 图中 CLR 的开始时间为 14∶05UT

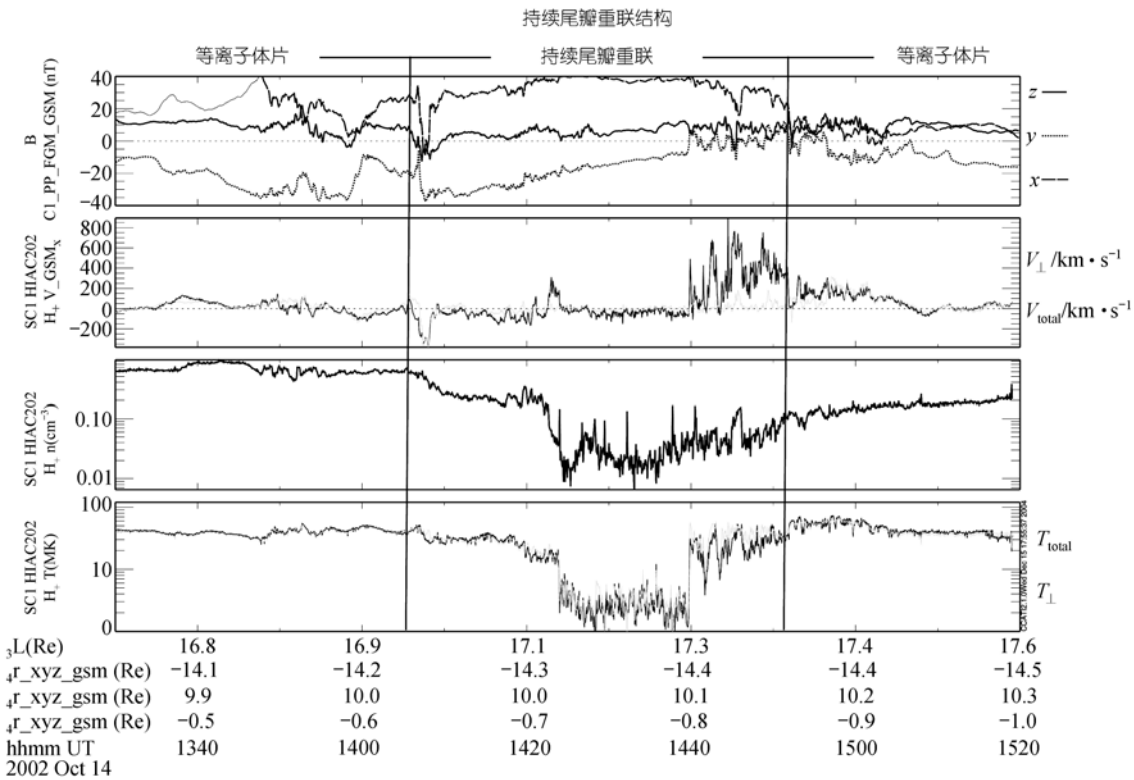


图 2　Cluster/SC1 观测的 CLR 事件，自上向下分别是 FGM 磁场、HIA 质子速度、HIA 质子密度和 HIA 质子温度

14:05UT 之前, Cluster/SC1 位于等离子体片内, 从 14:05UT 开始卫星进入 CLR 区域, 14:52UT 卫星再次进入等离子体片内. 图中, 第一条竖线表明 Cluster 开始观测到 CLR 的时刻, CLR 的开始时间不晚于该时刻; 第二条竖线表明 Cluster 离开 CLR 区域的时刻, CLR 结束时间不早于该时刻

两次小范围空间区域的增亮，但增亮幅度不大，两次之间相互独立，是两次伪暴(Pseudo-Breakup)[7]. 这表明亚暴膨胀相突发发生于 1407UT，晚于尾瓣重联的开始时间(1405UT或更早的 1358UT).

(ii) 图 4 给出了 2002 年 10 月 14 日的极光电激流指数 AL 和 AU. 1420UT 起 AL 明显地突然变化，幅度达 600 nT. AE 指数有 1000nT 的突然增加.

(iii) 图 5 给出同步高度 LANL1991-080 与 LANL1994-084 卫星对低能电子通量的测量. LANL1991-080 位于子夜后 3 h(3.4 MLT), LANL1994-084 位于子夜位置(24MLT), 它们于 1410UT 几乎同时观测到了一个无色散的电子注入事件. 大约 10min 后 LANL-01A(15MLT)观测到一个色散的电子注入事件. LANL-02A(19.5MLT)于 1423UT 也观测到了一个有色散的电子通量的增强(图中没有显示). 由此可以断定，电子注入的源区在子夜附近，强能电子东向漂移，并逐步色散.

(iv) 图 6 给出 GOSE10 的磁场数据. 从 1420UT 开始，磁场的地球向分量突然变小，同时北向分量突然增加，这一同步轨道磁场的偶极化现象，是亚暴在内磁层的主要特征之一.

上述的各种亚暴特征现象说明: 在 CLR 发生 2 min 后，从 1407UT 开始，发生了一次亚暴. 这个过程中，极光亚暴明显; AE 指数有近 1000nT 的变化; 同步高度电子通量增强了 2~3 个量级.

1.2　2001 年 8 月 27 日 0401UT 事例

Cluster 星簇于 2001 年 8 月 27 日 0401UT 起观测到了另外一次典型的 CLR 事件. 事件前以及事件过程中，ACE 卫星和 Geotail 卫星显示磁层顶向阳面 IMF 持续南向达 2 h. CLR 开始后，Polar 观测到 0408UT 有极光亚暴产生. 0408UT 同步轨道 GOES 卫星观测到同步高度磁场偶极化. 0412UT 地磁观测到 AE 指数的突然增强，幅度达 600 nT. LANL 系列卫星由于位于向阳面或子夜前 7 h，虽观测到了电子注入过程，但是稍有色散. 这次 CLR 事件也导致了一起亚暴过程.

上述的两个个例分析表明: 在行星际磁场持续南向期间，CLR 与一类亚暴可能密切相关，其时序关

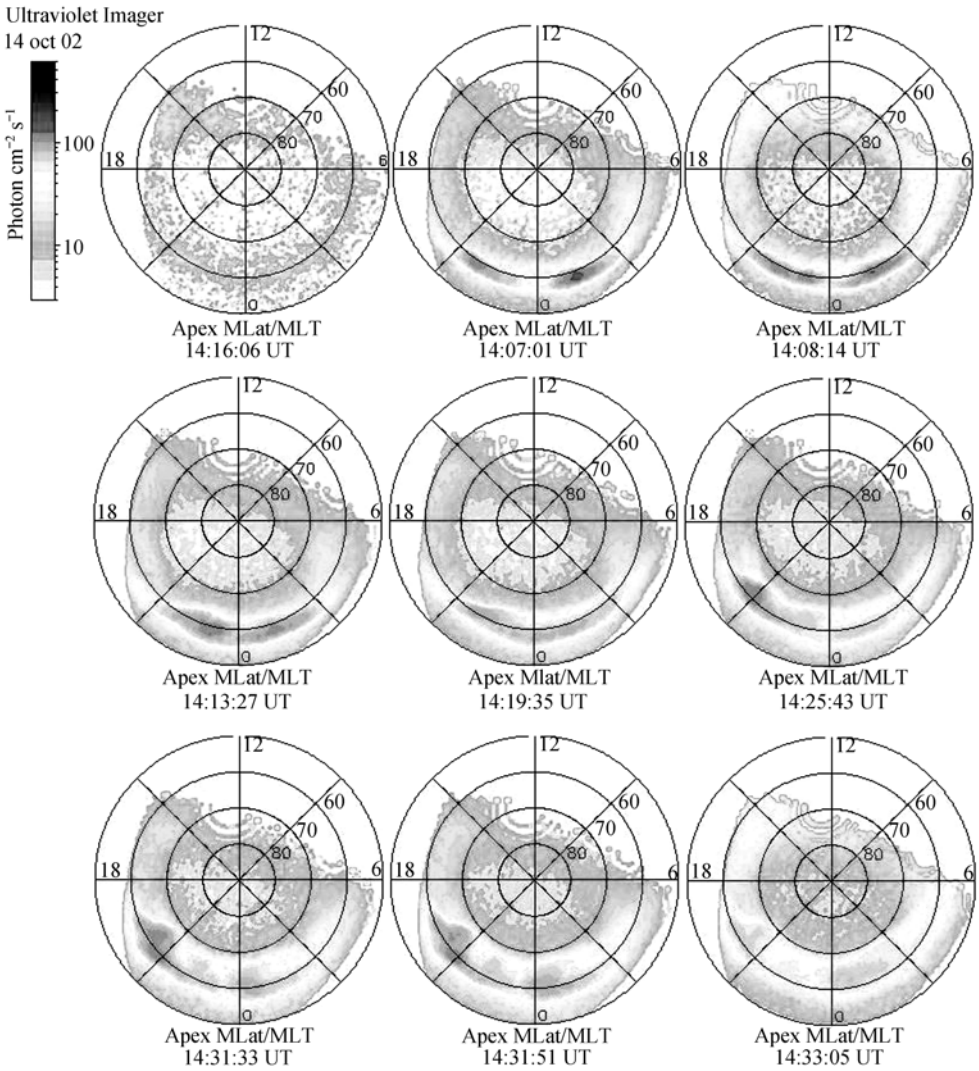


图 3 2002 年 10 月 14 日 1405CLR 期间极光序列图

在 14∶06∶06UT 之前有两次极光小范围短时间尺度增亮的伪暴发生; 从 14∶06∶06~14∶07∶01 之间的某个时刻开始极光突发增亮, 这标志着极光亚暴膨胀相的开始; 此后极光的发展具有西行特性: 从最初的 21∶00LT 附近最终西行至 18∶00LT, 同时极光的极向边缘向极区膨胀, 极光极向边缘纬度由最初的 60°北移至 70°附近

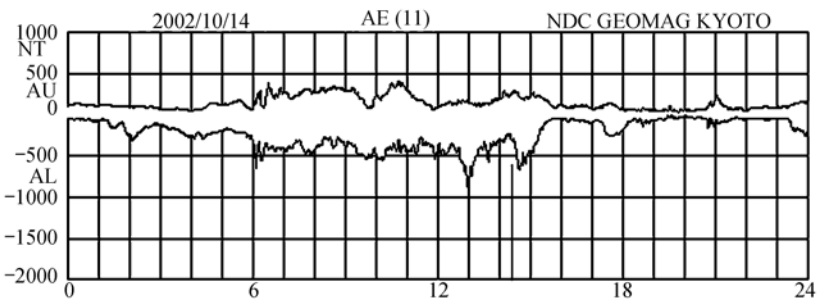


图 4 2002 年 10 月 14 日 1405CLR 期间 AL, AU 指数

14∶20 时(竖线线指示)AL 指数突发减小, 变化幅度达 600 nT, 这标志着一次较强的地磁亚暴的发生. 该图来源于 WDC-C2 KYOTO AE index service

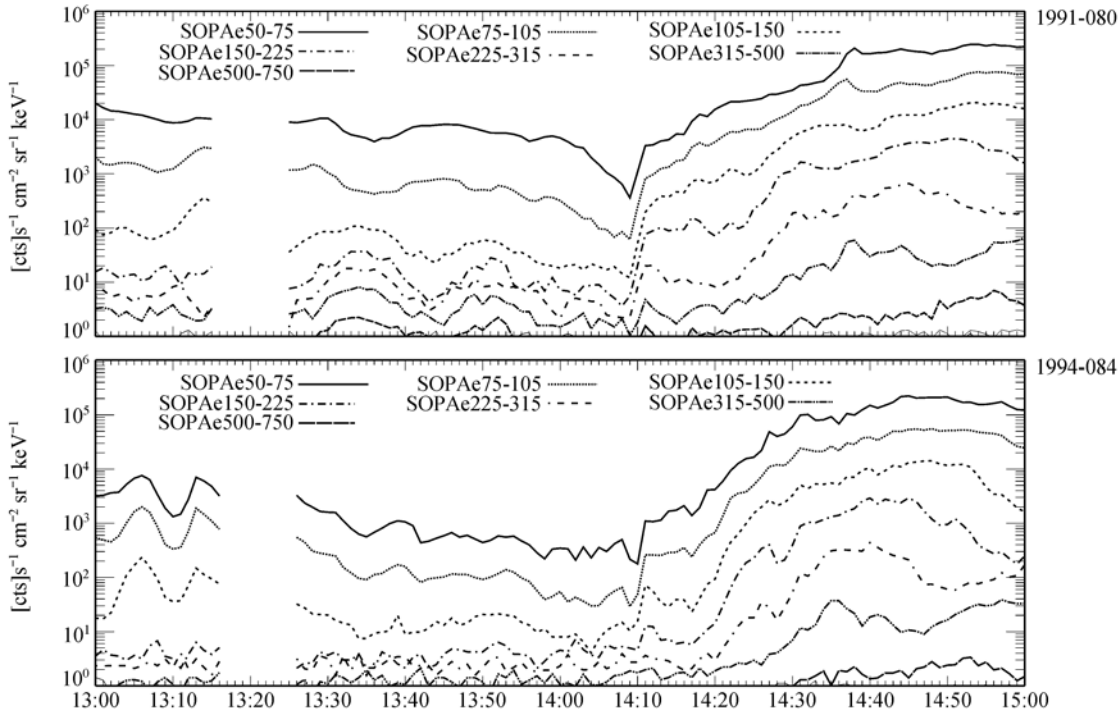


图 5　2002 年 10 月 14 日 1405CLR 期间电子注入(injection)事件

位于磁地方时 0 点的 LANL1994-084 与处于磁地方时 3.4 点的 LANL1991-080 几乎同时(1410UT)观测到了一个无色散的电子注入事件，说明电子的加速区域就在两个卫星附近；位于磁地方时 15 点的 LANL01A 于 1420UT 观测到一个色散的电子注入事件；位于磁地方时 19.5 点的 LANL02A 于 1423UT 观测到色散的电子注入事件. 这一时间序列表明了注入电子的东向漂移

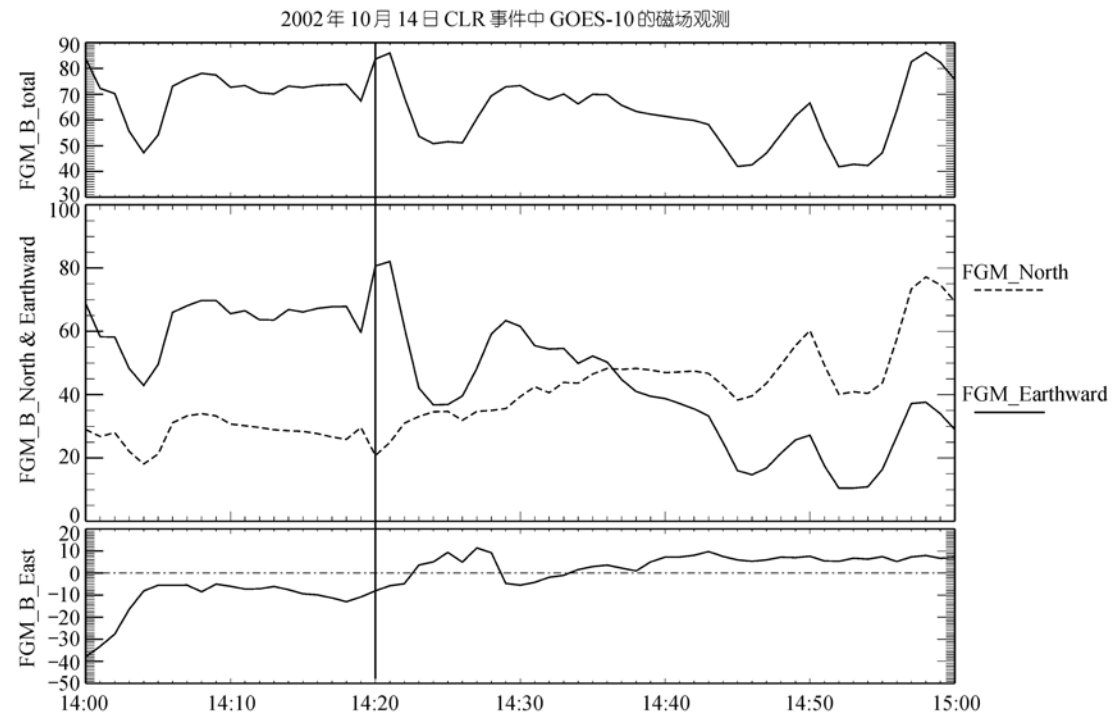


图 6　2002 年 10 月 14 日 1405CLR 期间同步轨道 Goes-10 观测的磁场变化

图中第一栏表示磁场总量；第二栏的分别为北向分量和地球向分量；第三栏表示磁场的东向分量. 图中可以看出，在 14∶20UT 磁场地向分量突然变弱而北向分量变强，这是一次磁场偶极化过程. 竖线标出了同步轨道偶极化的开始时间

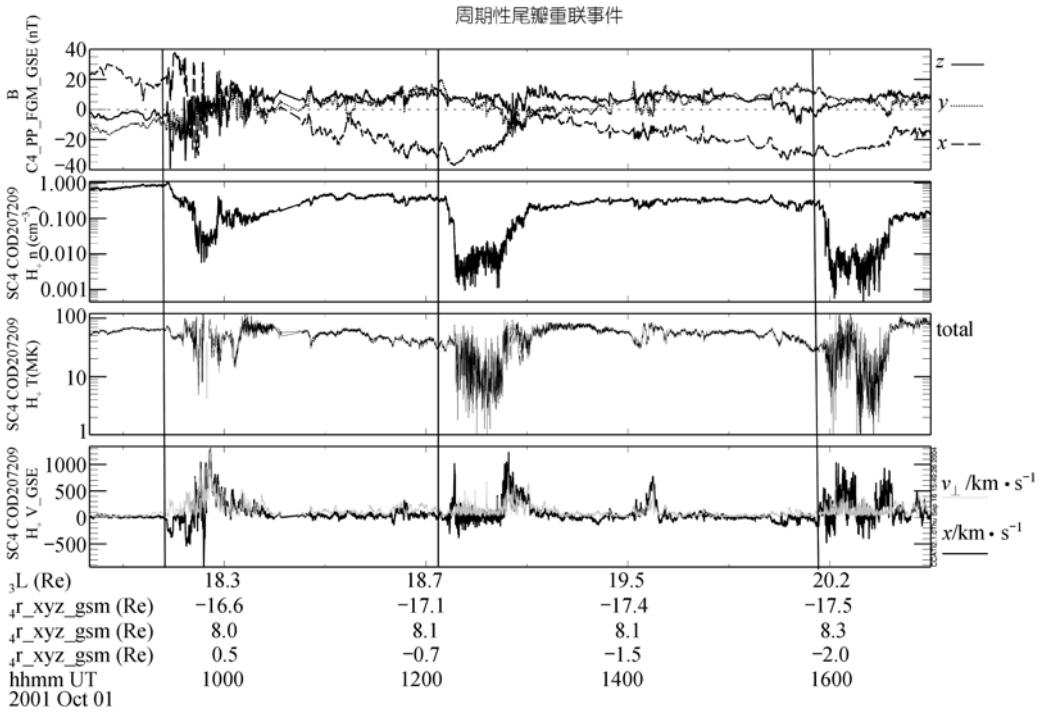


图 7 2001 年 10 月 1 日准周期性 CLR 事件

根据前文[6]中给出的CLR的特征，可以确定这三次周期性的CLR分别开始于 0926UT, 1213UT, 1549UT. 图中自上而下分别是:Cluster/SC4 FGM, HIA密度, HIA温度和HIA速度. 图中三个竖线表明了三次CLR事件被观测到的开始时间: 0926UT, 1213UT和 1549UT

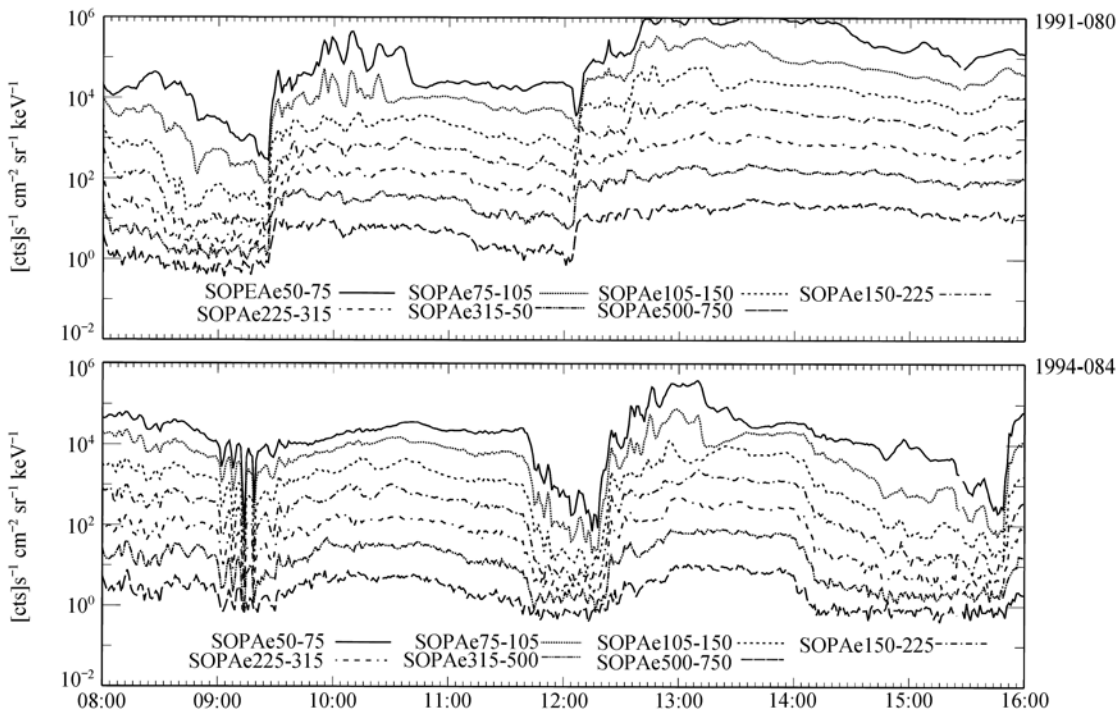


图 8 2001 年 10 月 1 日准周期性 CLR 事件期间电子注入

观测到的能量电子无色散注入事件分别开始于 0927UT, 1202UT 和 1550UT, 1991-080 的位置分别是 22.6 MLT, 1.2MLT 和 5.0MLT, 1994-084 位置分别为 16.5MLT, 19.2MLT 和 22.9MLT. 其中第一次电子注入事件，被加热的电子在到达 1994-084 所处的磁层昏侧时，已经损失，故没有明显的注入事件；第二次事件中同样由于 1994-084 处于昏侧，其在几分钟之后观测到一个色散的电子注入事件；第三次电子注入只被位于子夜前的 1994-084 观测到，而且其是局部的电子加热，故 1991-080 没有观测到

系表明这些亚暴突发可能起源于 CLR.

1.3 CLR 与亚暴的周期性分析

2001 年 10 月 1 日, Cluster 星簇观测到了一次准周期的 CLR 事件(见图 7), IMF 在 0500UT~1700UT 整段时间内持续南向, 最大值达到–15 nT, 周期大约为 2.5 h. 相关的亚暴现象为: AE 指数准周期性的增加; 同步轨道有准周期性的电子注入事件(见图 8)和偶极化. 第三个 CLR 对应的亚暴现象不是太强烈, 比如 AE 指数的变化幅度较小, 此时对应的 IMF 的 B_z 分量较小. 详见表 1.

在这次事件中, 准周期性的 CLR 对应准周期性的亚暴, 而且 CLR 在时间上均早于亚暴的膨胀相突发(以 AE 指数的突增为标志). 从 2001~2003 年的数据中还可发现其他比较明显的准周期 CLR 及对应的准周期的亚暴. 二者的相关性和时序关系表明: CLR 可能是引起这类亚暴膨胀相突发的原因.

2 持续尾瓣重联(CLR)与亚暴时序关系的统计分析

2001~2003 年期间, Cluster星簇穿越磁尾等离子体片 150 多次. 穿越位置在GSM坐标系中分布在$-20\ R_E < X_{GSM} < -10\ R_E$, $-10R_E < Y_{GSM} < 10\ R_E$区域内. 前文[6]和本文确定了这期间观测到的 37 例CLR事件, 它们的统计特性见表 2. 分析可知:

(ⅰ) 所有的 CLR 都对应亚暴现象, 两者相关性很好.

(ⅱ) 这 37 个事件中, 有 34 个亚暴发生在 CLR 之后, 平均延迟 8.7 min; 另外 3 个事例的时序关系难以确定, 我们认为这是由于卫星所处位置不好, 没有能在第一时间观测到 CLR 的开始.

(ⅲ) 在 34 个时序关系确定的事件中, 相对于 CLR 的开始时间, AE 指数平均延迟 12.34 min. 图 9 对 2001 年的 13 例 CLR 与 AE 指数的关系进行了统计. 平均而言, CLR(第一条竖线)早于亚暴膨胀相突发(第二条竖线)8 min. 此外, 同步高度的偶极化平均滞后 9.5 min; 同步高度电子注入平均滞后 9.3 min.

CLR 区别于普通磁尾重联的地方在于, 由于有持续的能量供给, 它可由一般的等离子体片重联发展成为尾瓣等离子体参与的较大尺度、较长时间的重联过程. 这个发展过程初期, 磁重联在中性片中心部位发生, 有些情况下, Cluster 星簇虽然位于等离子体片中, 但却仍然可能处在重联区域的南北两侧, 故而不能观测到 CLR 真正的开始时间. 这就是表 2 中有三个事件 CLR 与亚暴的时序关系无法确定的原因.

CLR 的对流性高速流的速度一般为 $V_{XGSM}\approx 500$ km/s 左右, 它到达内磁层(7~10 R_E)所需时间约为 2 min 左右, 而本文得到的亚暴相对 CLR 的滞后时间为 8.7 min, 甚至更长. 我们认为, 单束的高速流(BBF)不容易触发亚暴. 亚暴触发需要一个能量的积累和内磁层磁场与等离子体状态调整的过程. 实际的延迟大于高速流到达内磁层所需时间可能是这种能量积累以及内磁层调整过程的反映.

3 讨论与结论

上文对 CLR 与亚暴膨胀相突发的相关性和时序关系进行了个例与统计分析. 上述分析表明: IMF 持续南向期间 CLR 能够引起一类亚暴. 由统计分析和准周期性分析得知, CLR 与这类亚暴的相关性很高, 几乎所有的 CLR 都能对应到亚暴的观测, 因而两者之间存在密切关联. 时序分析则揭示了 CLR 与这类亚暴之间存在因果关系: CLR 是起因, 亚暴则是结果. IMF 持续南向为这类亚暴的发生提供能量保证, 同时使得 CLR 与亚暴之间的因果关系显得确切合理.

根据前文[6]和本文的观测证据, 我们可以描绘这类亚暴的发生过程: IMF南向时, 磁层顶向阳面发生磁重联, 磁通和粒子进入磁层并由磁层大尺度对流传输到磁尾, 并储存在磁尾尾瓣中[1,2]. IMF南向时间较长, 则磁尾存储的能量增多. 这些能量通过磁尾重联释放并由高速流携带到达内磁层(7~10 R_E). 磁尾重联可能有不同的触发原因: (ⅰ) 尾瓣存储能量有一个域值, 超过这个域值, 中性片自发地产生重联, 这是磁层的本征行为. (ⅱ) IMF条件变化引起磁层大

表 1　周期性亚暴期间各种亚暴现象时序

CLR 开始时间	AE 突增时间	AE 相对 CLR 延时/min	同步轨道偶极化时间	偶极化相对 CLR 延时/s	同步轨道电子注入时间	电子注入相对延时/s	确认亚暴突发时间
0926UT	0936UT	10	0931UT	5	0927UT	1	0927UT
1213UT[a)]	1218UT	5	1216UT	3	1202UT	-11	
1549UT[b)]	1621UT	30			1550UT	1	1550UT

a) 1213UT 的 CLR 事例中等离子片很厚, CLR 开始时, Cluster 虽然在等离子片中, 却远离重联区域, 因此时序确定有困难

b) 1549UT 事件中, Goes 卫星位置不好, 因此没有观测到偶极化

表 2 2001~2003 年 CLR 与亚暴时序关系统计表

序号	深度重联的开始时间	最早亚暴现象时间	最早的亚暴现象	亚暴延迟时间
1	2001.07.29 0843UT	0855UT	同步高度偶极化	12
2	2001.07.29 1222UT	1224UT	AE 指数	2
3	2001.07.31 2320UT	2342UT	AE 指数	22
4	2001.08.03 1328UT	1358UT	同步高度偶极化	30
5	2001.08.13 0220UT	0250UT	同步高度偶极化	30
6	2001.08.17 1623UT	1626UT	同步高度电子注入	3
7	2001.08.22 0920UT	0945UT	同步高度偶极化	25
8	2001.08.27 0401UT	0408UT	同步高度偶极化	7
9	2001.08.29 1032UT	1039UT	AE 指数	7
10	2001.09.14 2355UT	次日 0000UT	AE 指数	5
11	2001.09.17 0715UT	0720UT	同步高度偶极化	5
12	2001.10.01 0926UT	0928UT	同步高度电子注入	2
13	2001.10.01 1213UT	1202UT	同步高度电子注入	–11
14	2001.10.01 1549UT	1550UT	同步高度电子注入	1
15	2002.08.02 0010UT	0027UT	AE 指数	17
16	2002.08.02 0215UT	0220UT	AE 指数	5
17	2002.08.04 0228UT	0230UT	AE 指数	2
18	2002.08.13 2229UT	2231UT	同步高度电子注入	2
19	2002.08.18 1838UT	1844UT	同步高度偶极化	6
20	2002.08.18 2231UT	2233UT	AE 指数	2
21	2002.08.20 2242UT	2240UT	AE 指数	–2
22	2002.08.21.0754UT	0742UT	AE 指数	–12
23	2002.09.01 2252UT	2258UT	同步高度偶极化	6
24	2002.09.11 0838UT	0845UT	同步高度偶极化	7
25	2002.09.13 1802UT	1810UT	同步高度电子注入	8
26	2002.10.03 0047UT	0048UT	AE 指数	1
27	2002.10.14 1403UT	1410UT	同步高度电子注入	7
28	2002.10.14 1700UT	1721UT	AE 指数	21
29	2003.07.22 0815UT	0840UT	AE 指数	25
30	2003.07.22 1235UT	1300UT	AE 指数	25
31	2003.07.24 2240UT	2242UT	AE 指数	2
32	2003.07.29 1810UT	1812UT	同步高度电子注入	2
33	2003.08.01 0548UT	0550UT	同步高度电子注入	2
34	2003.08.24 1834UT	1837UT	同步高度电子注入	3
35	2003.08.29 1930UT	1933UT	AE 指数	3
36	2003.09.01 0450UT	0451UT	同步高度偶极化	1
37	2003.09.24 1420UT	1421UT	同步高度电子注入	1

尺度对流的变化触发重联，这是由外部因素激发的[8]. 对CLR而言其IMF一般持续 2 h以上. 这表明CLR最初是由磁尾能量释放的本征过程所激发的. IMF长时间持续南向期间(一般大于 6 h), CLR与这类亚暴同时具有2~3 h准周期现象更表明这种本征过程的存在. 另一方面, 如果IMF短时间南向后即转为北向, 尾瓣中存储的能量较少. 这些能量被IMF变化所激发的重联所释放后, 也会被高速流携带到内磁层. 由于能量较少，有

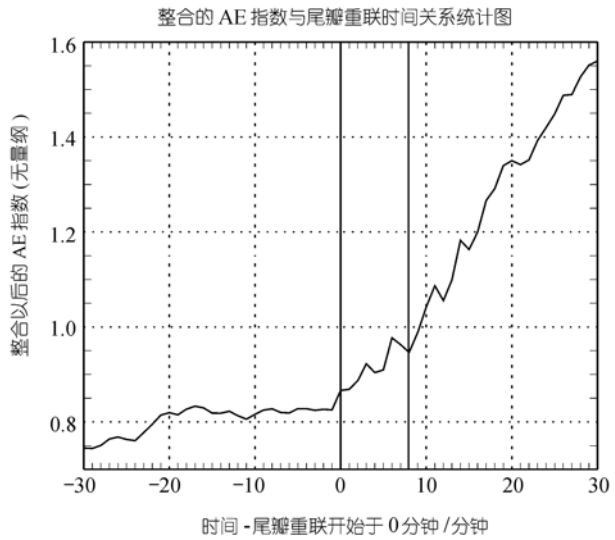


图 9　CLR 事件与 AE 指数的统计关系

统计数据是 2001 年 7 月~10 月 14 个 CLR 事件对应的 AE 指数. 对于每一个事件, 我们以 CLR 开始时间为基点, 选择其前后各 30 min 时间段内的 AE 指数数据, 将每个数据点除以该 1 h 内的 AE 指数的平均数, 这样这个事件的每一个时间点都有了一个 AE 相对变化数. 最后对所有 14 个事件对应时间的数据点取平均值从而生成该图. 图中, 第一条竖线表示 CLR 开始时间(0 min); 第二条竖线表示 AE 指数迅速变化的时间(8 min), 我们认为第二条竖线位置为亚暴膨胀相的突始(Onset). 这样整合的 AE 指数显示亚暴膨胀相突始比 CLR 开始时间平均慢了 8 min

时引起很小的亚暴或伪暴, 有时甚至没有明显的亚暴现象出现. 我们以 2001 年 08 月 27 日 0215UT Cluster 观测到的对流性高速流为例, 来说明这一过程.

图 10 给出这一高速流事件. 由 ACE 卫星数据可知, 0200UT~0215UT 期间向阳面磁层顶外侧 IMF 为南向, 持续时间为~15 min. 0210UT 左右, 可能由于 IMF 的一次变化, 导致在 0215UT 磁尾产生一次重联过程. 高速流是对流性的, 伴随有磁场 B_Z 分量, 其垂直于磁场的速度分量达到 500 km/s; 这束高速流位于等离子片中心, 磁场 B_X 分量 2 次达到 0 值. 然而由于这次磁层能量存储时间较短, 能量积累总量较小, 故而亚暴现象不明显. AL 指数几乎没有变化, 同步高度没有观测到电子注入. 虽然 GOES-8 卫星处于子夜附近, 但是没有观测到磁场偶极化.

2001 年 9 月 12 日有另一高速流事件. 磁层顶外的 IMF 从 1200UT~1300UT 持续南向, B_z~−5 nT; 太阳风速度较小, 为 380 km/s. 从 1300UT 开始, IMF 的 B_z 突然减小(位于磁层顶向阳面外侧的 Geotail 卫星也观测到了这一变化), 相应地磁尾发生了一次磁重联过程, Cluster 观测到了等离子体片内同步的高速流反

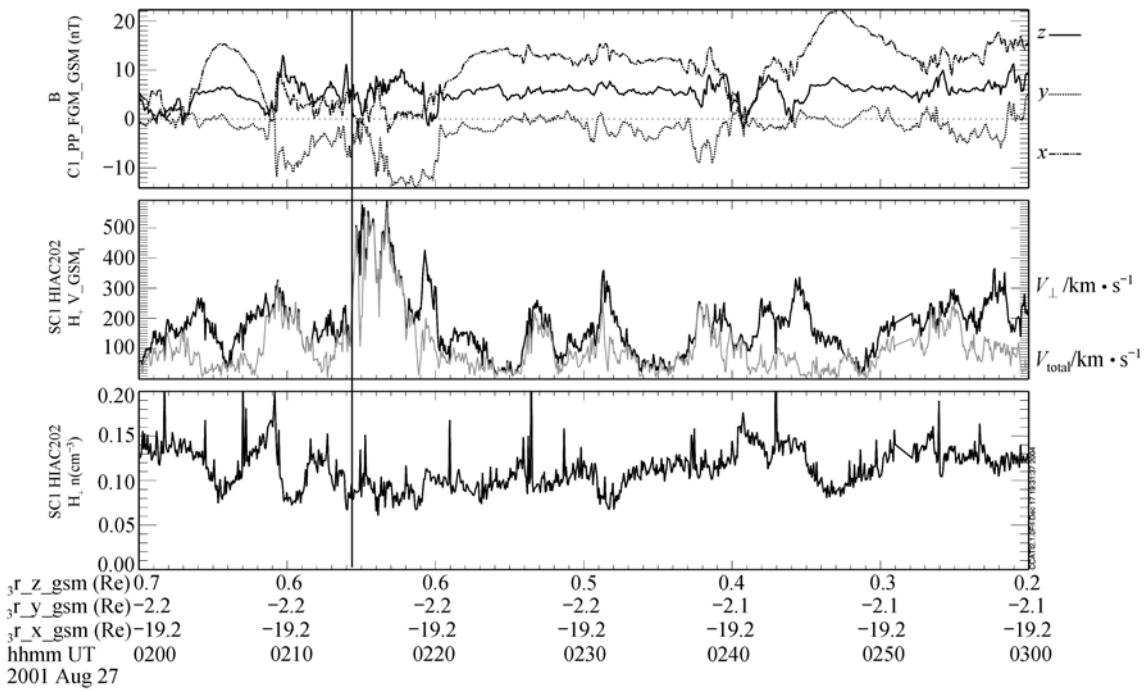


图 10　2001 年 8 月 27 日 0215UT 高速流事件

图中由上而下依次是 FGM 磁场数据、速度和密度. 高速流在 0215UT 达到峰值, 图中竖线表示该高速流的开始. 该重联产生的高速流未能引起明显的亚暴

转与磁场反转，这是磁重联的标志. 但是由于太阳风动压较小, IMF 的 B_z 数值较小，磁尾储存的能量不大，故而在内磁层只有类似伪暴的现象产生. AE 指数变化很小，同步轨道的电子有较短时间的通量变大. 对 2001~2003 年三年的数据统计中，这种 IMF 持续较短时间而对应释放能量较少的磁重联(高速流)事件，一共有 13 例，它们都表明这类的磁重联(高速流)只能引起伪暴或者对内磁层影响不大.

总之，由本文的分析和讨论可以得到如下的结论:

(ⅰ) CLR 与 IMF 持续南向期间的亚暴有密切的因果关系. CLR 是引起亚暴的最初原因，携带能量的高速流在内磁层为亚暴触发创造了条件，而亚暴的触发可能需要一个复杂的过程.

(ⅱ) 内磁层是否能发生亚暴取决于高速流携带的能量. 部分重联过程不能提供亚暴所需要的足够能量，只能引起伪暴. 对于 CLR 中的高速流，其携带的能量在内磁层需要有一段时间的积累，然后才引起亚暴. 亚暴膨胀相突发与 CLR 开始之间的时间滞后平均为 8 min(超过高速流运动到近磁尾所需时间)说明了这一点.

(ⅲ) 磁层尾瓣中储存的能量存在一个域值，能量达到域值时，中性片中某些过程能够激发重联，从而释放能量. IMF 持续南向时的 CLR 的准周期性尤其说明这种机制. IMF 的变化也可激发重联，只要能量合适，这种重联也可以触发亚暴.

近磁尾积累由高速流携带的能量的过程中，迅速形成了有利于亚暴触发的条件. 本文没有讨论 CLR 产生的高速流在内磁层的影响以及亚暴膨胀相的触发过程. 今后利用 Double Star 卫星数据，结合 Cluster 的观测，我们将对这些过程进行详细研究.

致谢 感谢中国 Cluster 数据中心为本文提供的所需数据，日本 WDC-C2 KYOTO AE index service 提供的 AE 指数数据，美国 NASA 的 Goddard Space Flight Center 提供的行星际条件数据和极光数据. 本文受国家自然科学基金重大课题“地球空间暴多时空尺度物理过程研究”(批准号: 40390150)和国家“973”计划(批准号: G200000784)和北京市重点学科(批准号: XK100010404)资助项目.

参 考 文 献

1 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: 12975~13010[DOI]

2 Russell C T, McPherron R L. The magnetotail and substorms. Space Sci Rev, 1973, 15: 205~266

3 Lui A T Y. Current disruption in the Earth's magnetosphere: Observations and models. J Geophys Res, 1996, 101: 13067~13088[DOI]

4 Baumjohann W, Paschmann G, Lühr H. Characteristics of high-speed ion flows in the plasma sheet. J Geophys Res, 1990, 95: 3801~3809

5 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

6 曹馨，濮祖荫，张辉，等. Cluster星簇对中磁尾尾瓣持续磁重联观测研究，科学通报, 2005, 50(18): 2015~2021[摘要]

7 Akasofu S -I. The development of auroral substorm. Planet Space Sci, 1964, 12: 273~282

8 McPherron R L, Terasawa T, Nishida A. Solar wind triggering of substorm expansion onset. J Geomagn Geoelectr, 1986, 38(11): 1089~1108

(2005-06-28 收稿, 2005-08-31 接受)