

陈志青, 沈超, 路立等. 2004 年 11 月磁暴期间环电流的演化过程——TC-2 卫星中性原子成像仪观测结果. 地球物理学报, 2010, **53**(10): 2271~2279, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.001

Chen Z Q, Shen C, Lu L, et al. Evolvement of the ring current during a magnetic storm; TC-2 neutral atom imager observations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(10): 2271~2279, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.001

## 2004 年 11 月磁暴期间环电流的演化过程 ——TC-2 卫星中性原子成像仪观测结果

陈志青<sup>1,2</sup>, 沈超<sup>1</sup>, 路立<sup>1</sup>, S. McKenna-Lawlor<sup>3</sup>, 刘振兴<sup>1</sup>, 燕广庆<sup>1</sup>

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 中国科学院研究生院地球科学学院, 北京 100049

3 爱尔兰大学空间技术学院, Maynooth, Co. Kildare, 爱尔兰

**摘 要** 本文通过对 TC-2 卫星上搭载的中性原子成像仪 (NUADU) 在 2004 年 11 月发生的一次大磁暴期间观测到的一系列中性原子 (ENA) 图像的分析, 试图给出环电流在磁暴期间的演化模式. 研究表明, 南向的行星际磁场 (IMF) 分量在离子从磁尾向内磁层注入和随后的环电流增长过程中起着关键的作用. IMF 转为北向后, 离子注入随即很快停止. 在离子注入增强期间, 离子的漂移路径是开放的, 以致大量环电流离子从黄昏侧注入后快速地损失在黄昏至正午的磁层顶. 所以, 环电流往往在离子漂移路径从开放变为封闭后才达到最大强度, 而不是在这之前, 尽管那时的离子注入强度更大. 在该磁暴主相期间, 离子注入发生在 17:00~22:00 LT 范围内, 形成极其不对称的环电流分布形态. 而在恢复相期间, 由于受大的 IMF  $B_y$  分量的影响, 离子注入区的地方时分分布范围东向扩张. 对称环电流在磁尾对流减小、离子漂移路径变为封闭形态之后形成. 在磁暴恢复相后期, 从 ENA 图像看环电流基本衰减到平静时期的水平, 而  $Dst$  指数仍然显示较强的磁扰动, 这说明越尾电流对  $Dst$  指数有很重要的影响.

**关键词** 环电流, 中性原子成像, 磁暴

DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.001

中图分类号 P353

收稿日期 2010-04-19, 2010-09-07 收修定稿

### Evolution of the ring current during a magnetic storm: TC-2 neutral atom imager observations

CHEN Zhi-Qing<sup>1,2</sup>, SHEN Chao<sup>1</sup>, LU Li<sup>1</sup>, S. McKenna-Lawlor<sup>3</sup>,  
LIU Zhen-Xing<sup>1</sup>, YAN Guang-Qing<sup>1</sup>

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

2 College of Earth Science, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Space Technology Ireland, National University of Ireland, Maynooth, Co. Kildare, Ireland

**Abstract** A series of ENA images were obtained by the NUADU instrument aboard TC-2 during a strong, long duration magnetic storm that occurred in November 2004. This paper follows the evolution of the ring current during this magnetic storm. It is shown that the southward IMF  $B_z$  component plays a key role in facilitating ion injection from the magnetotail into the inner magnetosphere with consequent enhancement of the ring current. Ion injection stopped soon after

**基金项目** 科技部项目 (2006CB806305)、国家自然科学基金委项目 (40974101) 和中国科学院重点实验室专项研究经费资助.

**作者简介** 陈志青, 男, 2002 年于中国农业大学获得工学硕士学位, 现为中国科学院空间科学与应用研究中心助理研究员, 从事空间物理研究工作. E-mail: zhiqing@cssar.ac.cn

the IMF turned from southward to northward. Also during ion injection episodes, the ion drift paths opened and ring current ions were lost at the noon to dusk magnetopause soon after they were injected at the dusk side region. As a result, the ring current intensified after the occurrence of an open-to-closed transformation of the ion drift paths, rather than at the stage when ion injection was strong. In the main phase of the storm, ion injection took place between 17:00~22:00 LT, leading to an extremely asymmetric ring current. In contrast in the recovery phase of the storm, ion injection region reached the post-midnight sector. We attributed this phenomenon to a significant positive IMF  $B_y$  component. A symmetrical ring current was formed after the drift paths changed back to a closed configuration due to a decrease in tail convection. When the storm entered its late recovery phase, the ring current faded away while the  $Dst$  still indicated a strong magnetic disturbance. This suggested an important contribution to  $Dst$  from the cross tail current.

**Keywords** Ring current, Neutral atom imaging, Magnetic storm

## 1 引言

绕地球流动的环电流是地球电流体系中最重要、最重要的电流之一,在磁暴的发展过程中起着非常重要的作用.用来衡量环电流强度的  $Dst$  指数的大幅度下降是磁暴发生的一个关键信号.

自从 Störmer 1911 年第一次提出环电流的概念以来,学术界开展了大量的相关研究.在某些方面,人们已经对环电流有相当的理解.目前普遍认为环电流主要由能量为 10 keV 到 200 keV 的离子(主要成分:  $H^+$ ,  $O^+$ ,  $He^+$ )和电子在径向范围 2 至 7 个地球半径内绕地球漂移而形成<sup>[1]</sup>,大部分能量由离子携带.这种绕地球的电流是因为在磁场曲率和梯度漂移的共同作用下,电子东向运动,而离子西向运动.通过磁尾注入的起源于太阳风的粒子构成环电流的主要成分,但在某些情况下起源于电离层的粒子也有着显著的贡献<sup>[2,3]</sup>.

目前对环电流的认识在很多方面还不是很清楚.比如环电流粒子是在什么位置怎样从磁尾注入到环电流区域的?环电流的具体经向和纬向分布区域?环电流的衰减机制是什么?环电流的对称性如何?这些问题仍然没有确切的答案.根据粒子轨道理论,当运动到靠近地球的区域时,从磁尾注入的离子将在磁场梯度的作用下向西漂移<sup>[4]</sup>.这样可以预见离子通量最大的区域将出现在昏侧,这已经为一些观测数据所证实<sup>[5]</sup>.但同样也有观测表明,通量最大区可以向东移动,越过午夜甚至到达晨侧附近.统计分析表明,通量最大区域的地方时位置与行星际磁场(IMF)的  $B_y$  分量存在某种关系<sup>[6]</sup>.目前普遍认为,粒子漂移路径由开放到闭合的转变在对称环电

流的形成中起着关键的作用<sup>[1]</sup>.这种漂移路径的变化是对磁层对流电场变化的快速响应<sup>[7]</sup>,而磁层对流电场最终由太阳风和 IMF 条件所驱动.

目前对环电流的认识主要基于理论分析、数值模拟和局地的卫星测量数据.理论分析、数值模拟需要测量数据来证实,而局地测量往往由于观测点少,同一地点重复观测时间间隔长,而无法区分物理过程的时间变化和空间变化.

中性原子成像技术可以监测大尺度的物理过程,是研究环电流全局变化的非常有效的技术手段<sup>[8]</sup>.双星计划<sup>[9]</sup> TC-2 卫星上搭载的中性原子成像仪(NUADU)<sup>[10]</sup>可以探测  $4\pi$  立体角的中性原子(ENA)通量分布.卫星飞越地球两极附近时中性原子成像仪所获得的观测图像由于地方时对称性好,可以直接用来分析环电流的变化过程,而无须进行复杂而且并不是普遍适用的图像反演.

本文将通过对 NUADU 在两极附近所获取的中性原子图像的分析,揭示磁暴期间环电流的变化过程.第 2 节简要介绍 NUADU 仪器和数据格式;第 3 节分析在不同的磁暴发展阶段所观测到的 ENA 图像;第 4 节为总结和结论.

## 2 中性原子成像仪和观测数据

环电流区域捕获的能量离子在绕磁力线回旋运动时可能与地冕的低能中性原子发生碰撞.碰撞过程中,能量离子与低能中性原子交换一个电子后转变为能量中性原子(ENA),而保持能量和运动方向不变.由于运动不受电磁场的影响,也不受地球重力场的影响(粒子能量远大于其逃逸能量),碰撞产生的 ENA 将保持恒定速度沿直线飞行.

如果我们在空间某点放置一个可以记录这些类似光线的能量中性原子的仪器,就可以获得遥测图像.这些图像包含了产生 ENA 的源离子的信息(能量、种类、通量等).整个过程类似于照相机的工作原理.TC-2 卫星上搭载的中性原子成像仪(NUADU)<sup>[10]</sup>就是这样一台“照相机”.该仪器配备了 16 个固体探测器,每个探测器的视角为  $11.5^\circ \times 2.5^\circ$ ,均匀地分布在  $180^\circ$  仰角范围内.16 个探测器的指向如图 1 所示<sup>[10, 11]</sup>.

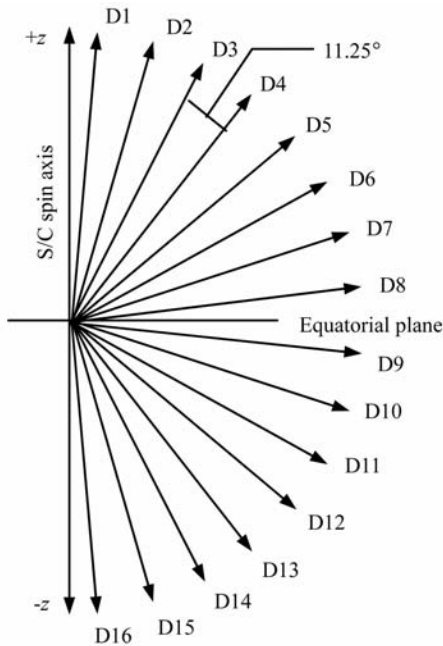


图 1 NUADU 仪器 16 个探测器的指向

Fig. 1 Pointing directions of the 16 detectors of the NUADU instrument

NUADU 的旋转轴与卫星的自旋轴保持一致.在一个卫星自旋周期(4 s)内,探测器按均匀的方位角间隔采集数据 128 次.这样卫星每自旋一周可以在每个观测能道产生一个  $16 \text{ 行} \times 128 \text{ 列}$  的数据矩阵,矩阵的每个元素包含了不同方向的 ENA 通量信息.NUADU 不能区分粒子的种类,其探测到的通量是所有种类的 ENA 通量的总和.环电流的主要成分为  $\text{H}^+$  和  $\text{O}^+$ <sup>[11, 12]</sup>,所以仪器只对 H 和 O 进行了标定,在本文的每一个 ENA 图像上方可以见到对应的 H 和 O 的能量范围.

本文中,我们将每一个  $16 \text{ 行} \times 128 \text{ 列}$  的数据矩阵绘制成包含  $16 \times 128$  个方格的矩形图像,采用不同的颜色表示不同的粒子通量值(图 4~9).所有的 ENA 图像采用的坐标系为太阳磁层(SM)坐标系,图像最左边的列与太阳方向对齐,仰角方向与 SM

坐标系的  $z$  轴保持一致.图中白色的曲线为地球在仪器视场中的边界线(从卫星位置看到的地球最外边的轮廓线).

为了让不同地方时在图像中都有同等的视角,我们选取卫星在靠近两极位置所获取的 ENA 图像.在这些图像中地球边界线大体上呈水平的直线.在本文研究的数据时间段内,TC-2 卫星沿椭圆轨道运行,倾角大约为  $90^\circ$ (图 2),轨道周期为 11.48 h.卫星轨道近地点(高度 700 km)在南极盖上方,远地点(高度 39000 km)在北极盖上方<sup>[9]</sup>.这样,卫星每天飞越南极和北极各两次,总共有 4 个轨道片段可以提供符合要求的观测数据.

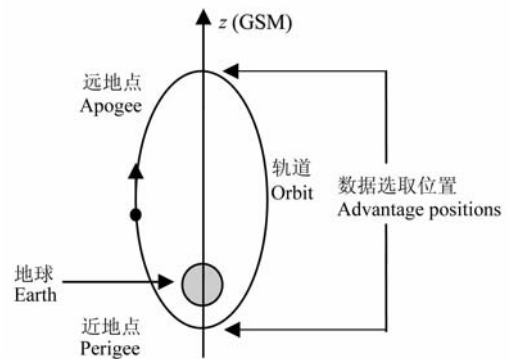


图 2 2004 年 11 月的 TC-2 卫星轨道示意图和数据选取点位置

Fig. 2 TC-2 orbit sketch in Nov, 2004 and advantage satellite positions

尽管 NUADU 装备了偏转系统用于防止带电粒子进入仪器,但能量高于阈域(300 keV)的带电粒子依然可以进入探测器从而对探测图像造成污染.不过,从探测图像中很容易区分带电粒子通量和 ENA 通量.ENA 通量总是出现在地球边界线附近,而带电粒子的通量可以来自除损失锥方向以外的所有方向,构成了图像的背景通量.

### 3 数据分析

为了研究磁暴期间环电流的变化,我们选取了 2004 年 11 月发生的一次大磁暴.这时 TC-2 发射不久,NUADU 仪器工作状态良好,数据较完整.这次磁暴期间的  $Dst$  指数最小值达到  $-373$ ,持续时间较长(图 3).

虽然 ENA 图像包含了关于源离子的信息,但由于 ENA 通量还依赖于其他的因素,如地冕中性成分的密度、粒子的电荷交换截面等,所以 ENA 图

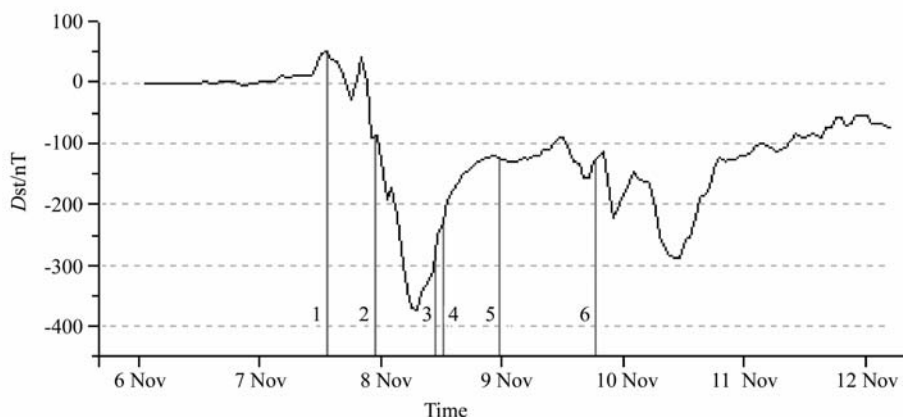


图3 2004年11月磁暴期间的  $Dst$  指数(垂直线段标识图4~9中的 ENA 图像的观测时间)

Fig. 3  $Dst$  index during storm of Nov, 2004, with vertical lines marking the times when the ENA images in Figs. 4~9 were recorded

像通常难以直接利用. 复杂的反演技术可以将 ENA 图像转换为源离子的通量分布. 路立等人成功地将约束线性迭代反演方法应用到 2004 年 11 月磁暴期间的单帧 ENA 图像, 取得了一些有价值的结果<sup>[13]</sup>. 但是反演技术要求采用参数化的模型来表示环电流离子分布. 到目前为止, 还没有一种离子分布模型可以很好地适用于快速变化的环电流, 特别是难以适用于剧烈磁暴期间的情况. 如果选取卫星经过地球磁极附近所获取的 ENA 图像, 并且假定环电流在赤道面两侧镜像对称分布, 我们可以直接对 ENA 图像进行定性的分析. 通过对图像的观察, 可以得知环电流离子通量的大致地方时分布情况.

图 3 中的垂直线段表示图 4~9 中的 ENA 图像的采集时间(世界时). 本文的 3.1~3.5 节将分析这些 ENA 图像, 讨论它们所展示的不同磁暴发展阶段的特性.

### 3.1 磁暴急始阶段

图 4 中的 ENA 图像采集时间为 2004 年 11 月 7 日 13:30 UT. 此时 TC-2 卫星正穿越南极盖, 位于 SM 坐标(15 km, 449 km, -8391 km)处.  $Kp$  指数为 3, 表示存在中等程度的磁层扰动. 从图中可以看出, 所有的地方时方向都有明显的 ENA 通量增强, 通量最大区域位于从正午到黄昏的扇区. IMF 数据显示, 在该 ENA 图像采集时间之前有两次 IMF  $B_z$  分量为负数的时段.

图 3 表明图 4 的 ENA 图像采集于磁暴急始期间. 这时的  $Dst$  指数几乎达到了最大值. 我们检查了其他在  $Dst$  指数增大之前 IMF 长时间保持北向的  $Dst$  指数增大事件(如 2004 年 12 月 5 日的  $Dst$  指数增大事件). 与图 4 所示的  $Dst$  指数增大事件不

同, 这些事件在对应的 ENA 图像中并没有发现离子注入的迹象. 这可以理解为南向 IMF 在离子从磁尾注入的过程中起着关键性的作用. 南向的 IMF 在磁层顶引发磁重联, 从而引起磁尾对流的增强. 在增强的越尾电场的作用下, 离子被注入到环电流区域.

在图 4 中的 ENA 图像采集前大约 40 min, IMF 快速地从南向转为北向. 一旦 IMF 转为北向后, 离子沿绕地球闭合的漂移路径运动. 40 min 的时间可以让中等能量( $\sim 50$  keV)的环电流离子从黄昏漂移至正午<sup>[14]</sup>. 所以, 我们认为在这个事例中, 离子是从黄昏到午夜的扇区注入的, 在 IMF 转北向后从注入区漂移到正午侧.

### 3.2 磁暴主相阶段

图 5 中的 ENA 图像采集时间为 2004 年 11 月 7 日 23:05 UT, 这时 TC-2 卫星正穿越北极盖, 位于 SM 坐标(36 km, -4220 km, 26896 km)处. 该 ENA 图像最显著的特点是 17:00~22:00 LT 范围的 ENA 通量增强, 以及所有方向的带电粒子通量的增强. ENA 通量的增强表明了从磁尾向环电流区域的离子注入, 而带电粒子通量的增强则表明磁尾离子/电子通量的增强(带电粒子沿磁力线做弹跳运动, 卫星所在位置可以沿磁力线映射到磁尾的某个区域). 另外非常明显的是该 ENA 图像显示此时的环电流离子分布是极其不对称的, 最大通量位于黄昏侧.

这时的 IMF  $B_z$  分量达到 -40 nT, 引起磁尾的强对流和形成开放的离子漂移路径. 离子从黄昏侧注入后, 继续向太阳方向漂移. 在到达正午之前, 因为开放的漂移路径, 离子从磁层顶损失掉了, 所以 ENA 图像显示在正午附近并没有 ENA 通量增强

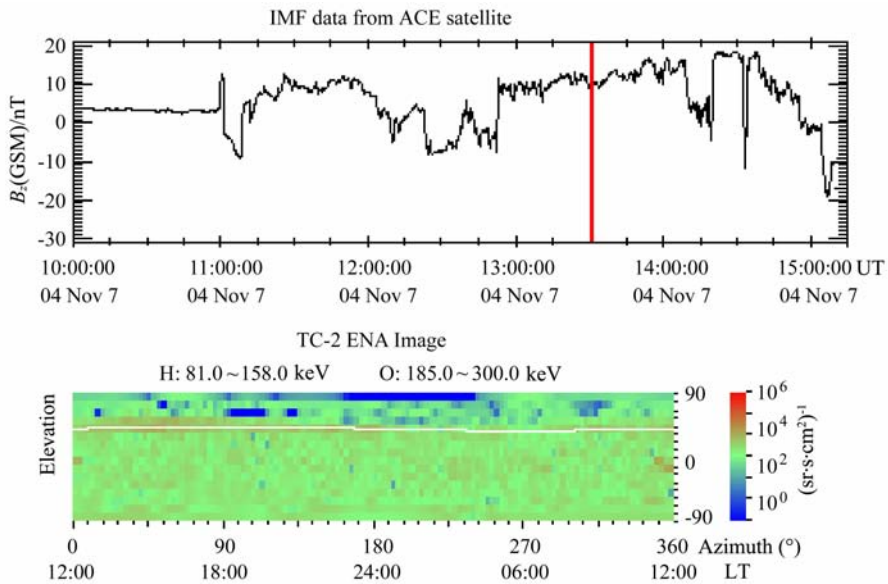


图 4 经过传输时间校正的 IMF  $B_z$  分量(上)和 2004 年 11 月 7 日 13:30 UT 的 ENA 图像(下,观测时间以红色垂直线标注)  
 Fig. 4 The IMF  $B_z$  component (top, corrected for the solar wind travel time from the ACE position to the Earth) with a vertical red line marking the time (13:30 UT on 7 Nov, 2004) when the ENA image (bottom) was recorded

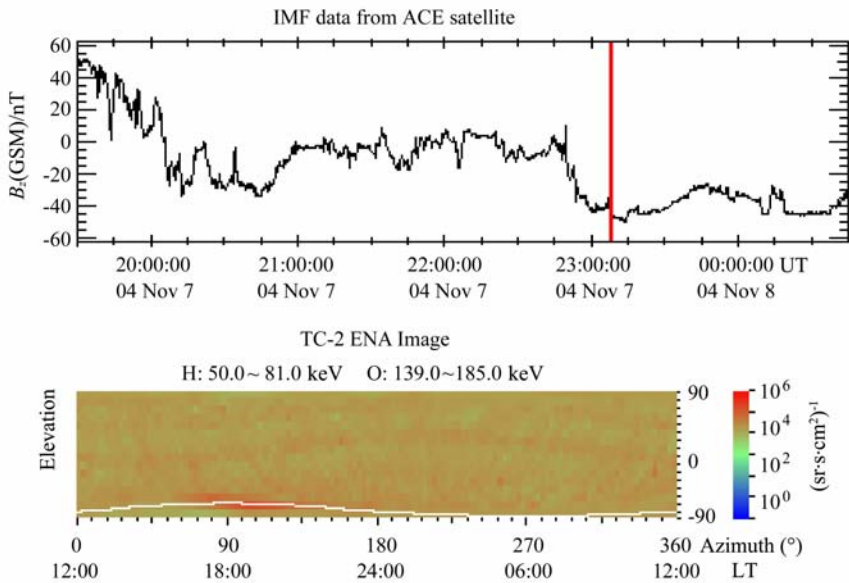


图 5 经过传输时间校正的 IMF  $B_z$  分量(上)和 2004 年 11 月 7 日 23:05 UT 的 ENA 图像(下,观测时间以红色垂直线标注)  
 Fig. 5 The IMF  $B_z$  component (top, corrected for the solar wind travel time from the ACE position to the Earth) with a vertical red line marking the time (23:05 UT on Nov 7, 2004) when the ENA image (bottom) was recorded

的现象。

这时的  $Kp$  指数达到 8,是整个磁暴期间的最大值。然而  $Dst$  指数(-98)却远远没有下降到磁暴期间的最小值(-373)。也就是说,地磁扰动达到最高水平时,环电流并没有达到最大的强度。我们认为这还是因为开放的离子漂移路径造成的。虽然此时的离子注入过程强烈,由于开放的漂移路径造成离子的损失非常快,最终只有少部分注入离子留在环电流区域, $Dst$  指数也就没有下降很多。Zong 等人的研究表明,磁暴主相期间环电流离子从磁层顶的

逃逸对环电流的损失有很重要的贡献<sup>[15]</sup>,图 5 的 ENA 图像印证了这样的结论。

### 3.3 恢复相早期

磁暴恢复相早期,NUADU 探测器在北极盖上方观测到图 6 所示的 ENA 图像。此时的卫星坐标为 SM (17 km, 3683 km, 25056 km),IMF  $B_z$  分量增大到 -10 nT。尽管环电流依然显示明显的不对称,由于离子注入的减弱和离子漂移路径的闭合,ENA 通量增强的区域包含了更大的地方时范围。ENA 通量增强区域越过子夜达到后午夜区,这看起

来与传统的粒子漂移理论相矛盾. 但有研究表明大的 IMF  $B_y$  分量 (12 nT) 可能通过影响空间电场分布改变粒子漂移路径使得离子首先经过后午夜区域<sup>[6]</sup>, 从而使得离子分布区域东向移动. 由于这时候的 IMF  $B_z$  分量仍然为负, 如 ENA 图像中黄昏到午夜的通量增强显示, 离子注入过程还没有停止. 但随着南向 IMF 的减弱, 越尾电场同时减弱, 此时的离子注入径向深度也明显减小, 在 ENA 图像上表现为 ENA 通量具有更大的径向(仰角方向)分布范围.

此时的  $Kp$  指数下降为 7. 但相比磁暴主相期

间所观测到的 ENA 图像(图 5), 图 6 中的 ENA 图像表明此时的环电流强度更大. 这再一次说明了在环电流形成过程中闭合的离子漂移路径所起的重要作用. 与磁暴主相相比, 这时候部分离子的漂移路径已经闭合了. 虽然粒子注入过程并没有磁暴主相期间那么强烈, 但更多的离子被捕获在环电流区域, 形成了地方时分布范围更广、通量更强的环电流.

### 3.4 恢复相期间对称环电流的形成

大约在磁暴恢复相开始 4 h 之后, 卫星运行到 SM 坐标 (-104 km, -33 km, -8287 km). 图 7

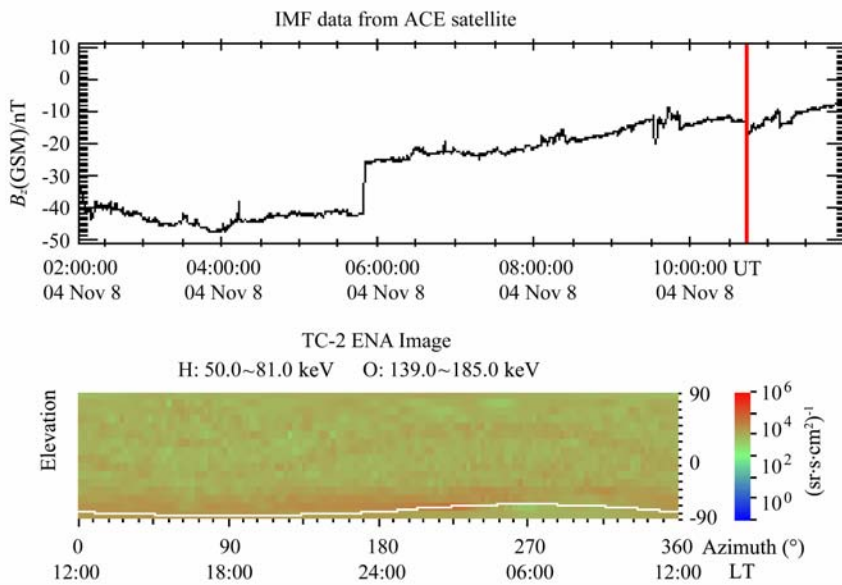


图 6 经过传输时间校正的 IMF  $B_z$  分量(上)和 2004 年 11 月 8 日 10:45 UT 的 ENA 图像(下, 观测时间以红色垂直线标注)  
Fig. 6 The IMF  $B_z$  component (top, corrected for the solar wind travel time from the ACE position to the Earth) with a vertical red line marking the time (10:45 UT on Nov 8, 2004) when the ENA image (bottom) was recorded

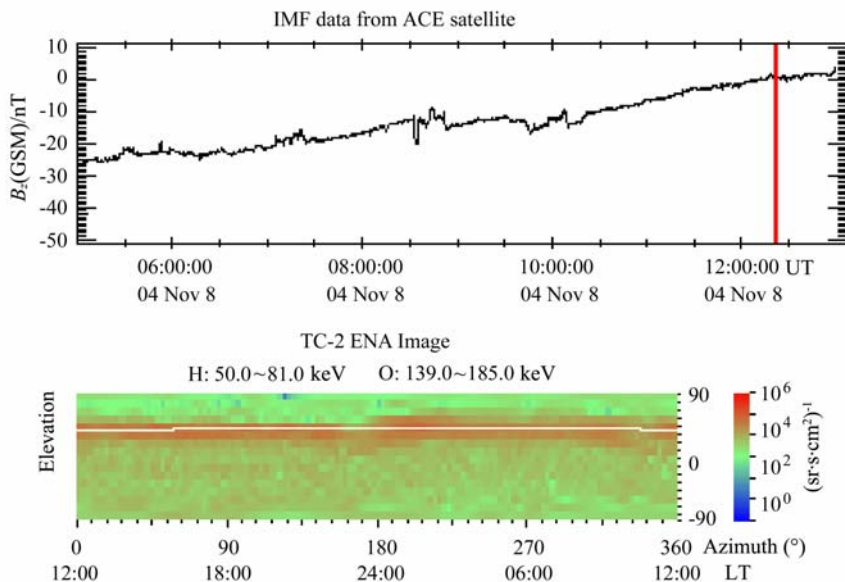


图 7 经过传输时间校正的 IMF  $B_z$  分量(上)和 2004 年 11 月 8 日 12:26 UT 的 ENA 图像(下, 观测时间以红色垂直线标注)  
Fig. 7 The IMF  $B_z$  component (top, corrected for the solar wind travel time from the ACE position to the Earth) with a vertical red line marking the time (12:26 UT on Nov 8, 2004) when the ENA image (bottom) was recorded

所展示的 ENA 图像就是这时候观测到的. 这时 IMF 南向分量完全消失, 导致对流电场驱动的离子注入过程停止, 离子沿闭合路径漂移. 如 ENA 图像所示, 环电流呈现对称分布. 当然对称的环电流可能在这之前的某个时刻已经形成了(我们估计一团中等能量( $\sim 50$  keV)的离子大约需要  $3\sim 4$  h 绕地球漂移直到大体沿地方时均匀分布).

### 3.5 恢复相后期

如图 8 所示, 磁暴进入到恢复相后期, 除了黄昏侧的 ENA 通量, 各地方时的 ENA 通量基本消失, 表明环电流已经很大程度上衰减了. 剩余的来自黄昏侧的 ENA 通量是新近注入的离子所引起的, 因为此时的 IMF 还有微弱的南向分量( $-5$  nT), 离子注入过程还没有完全停止.

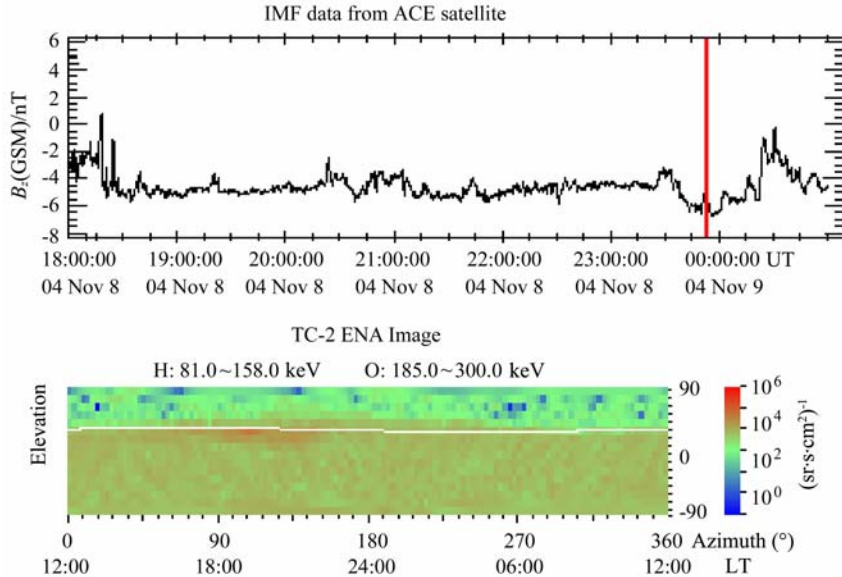


图 8 经过传输时间校正的 IMF  $B_z$  分量(上)和 2004 年 11 月 8 日 23:50 UT 的 ENA 图像(下, 观测时间以红色垂直线标注)

Fig. 8 The IMF  $B_z$  component (top, corrected for the solar wind travel time from the ACE position to the Earth) with a vertical red line marking the time (23:50 UT on Nov 8, 2004) when the ENA image (bottom) was recorded

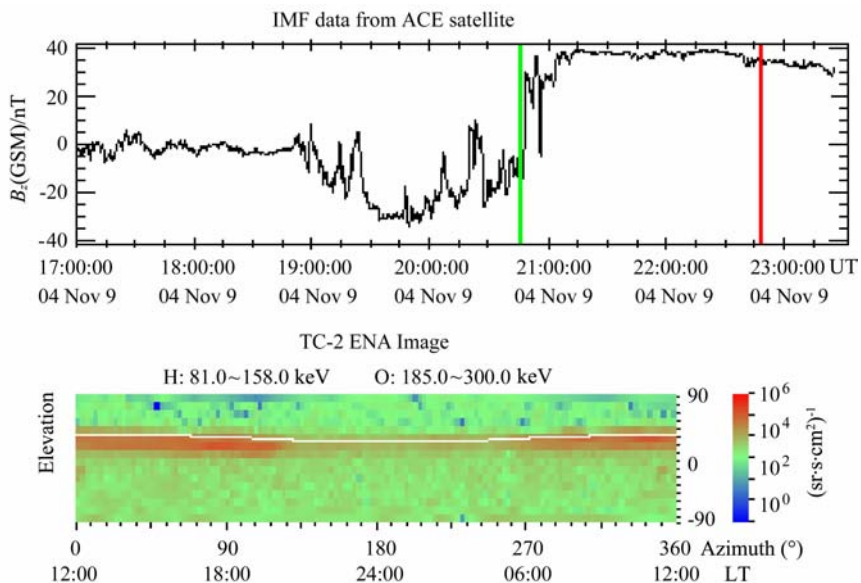


图 9 经过传输时间校正的 IMF  $B_z$  分量(上)和 2004 年 11 月 9 日 22:47 UT 的 ENA 图像(下, 观测时间以红色垂直线标注), 绿色垂直线段标识 IMF 突然转北向的时间

Fig. 9 The IMF  $B_z$  component (top, corrected for the solar wind travel time from the ACE position to the Earth) with a vertical red line marking the time (22:47 UT on Nov 9, 2004) when the ENA image (bottom) was recorded. The green vertical line marks the time when the IMF suddenly changed from southward to northward

尽管环电流已经很大程度上衰减了,从图 3 可以看出此时的  $Dst$  指数( $-110$  nT)却显示比主相期间(图 5)更强的磁扰动. 这表明此时的  $Dst$  指数很大程度上是来自越尾电流的贡献,因为影响  $Dst$  指数的磁层电流主要是环电流、越尾电流和磁层顶电流,而磁层顶电流对  $Dst$  指数的影响主要体现在磁暴急始期间太阳风动压增大压缩磁层的情况. 有研究表明,磁暴期间越尾电流对  $Dst$  指数的贡献可以和环电流的贡献相当<sup>[16]</sup>. 很明显,在本次磁暴中越尾电流比环电流消失得更慢. 但以前的研究却得到不同的结论. Kalegaev V V 等人采用 A2000, G2003 和 T01 模型分别模拟环电流和越尾电流的演化过程<sup>[16]</sup>. 他们发现三个模型都显示当  $Dst$  指数开始下降时越尾电流先于环电流而增强,但在磁暴恢复相期间三个模型产生了明显不同的结果. 在 A2000 和 G2003 模型中,环电流比越尾电流持续更长时间,而 T01 则表明环电流快速衰减,越尾电流衰减得非常慢. 本文的观测数据显然支持 T01 模型的结果.

在 2004 年 11 月 9 日 22:47 UT,也就是 IMF 突然从南向转为北向后大约 2 h,磁暴仍然处于恢复相期间,NUADU 仪器观测图 9 中的 ENA 图像. ENA 图像显示在午夜区域出现一个极不平常的通量缺口. 我们可以从粒子漂移理论来解释这样一个通量缺口:在 IMF 南向期间,离子漂移路径是开放的,离子通量在黄昏侧最大而在正午到晨侧的地方时范围内形成一个通量缺口. IMF 突然转为北向后,离子沿闭合的漂移路径西向漂移. 通量的缺口也会做同样的移动. 图 9 中 ENA 图像就是通量缺口漂移到午夜侧所形成的图像. 这样一种离子通量分布随时间的变化表明环电流的分布形态是一个对时间有高度依赖的过程,对环电流的研究需要将其作为一个动态和开放的系统来处理.

## 4 结 论

本文定性地分析了 2004 年 11 月大磁暴期间 TC-2 卫星所获得的一系列 ENA 图像,探讨了环电流的全局发展过程. 在这次磁暴中,环电流的演化表现出一些重要的特征. 结论如下:

(1)离子注入通常发生在黄昏到午夜的地方时范围内. 在大的 IMF  $B_y$  分量期间,注入范围可以向午夜延伸甚至达到晨侧.

(2)南向的 IMF 在离子从磁尾注入的过程中起着关键性的作用. 一旦 IMF 由南向转为北向,越尾

电场所引起的离子注入过程会很快停止.

(3)在磁暴主相期间,由于强对流电场的存在,离子漂移路径是开放的,造成环电流离子在黄昏到正午之间的磁层顶快速损失. 结果,虽然离子注入过程强烈,磁暴主相期间的环电流强度并没相应地增大. 并且这时的环电流分布呈现极其不对称的形态,主要的通量分布在 17:00~22:00 LT 范围内.

(4)大约在磁暴恢复相开始后 3~4 h,对称环电流开始形成. 离子漂移路径从开放到闭合的转变在对称环电流的形成过程中起着关键的作用.

(5)在该磁暴的恢复相期间,环电流比越尾电流消失得更快. 越尾电流同样对  $Dst$  指数有着显著的贡献.

以上结论仅仅建立在对一个磁暴的分析的基础上,是否适用于其他磁暴事例还有待研究. 接下来我们将进行多个磁暴的统计研究以检验这些结论是否适用于其他磁暴.

## 参考文献(References)

- [1] Xie L, Pu Z Y, Zhou X Z, et al. Energetic ion injection and formation of the storm-time symmetric ring current. *Ann. Geophys.*, 2006, **24**: 3547~3556
- [2] 傅绥燕,濮祖荫,宗秋刚等. 大磁暴中环电流离子成分的变化及其与磁暴演化的关系. 地球物理学报, 2001, **44**(1): 1~11  
Fu S Y, Pu Z Y, Zong Q G, et al. Ion composition variations in the ring current during intense magnetic storms and their relationship with evolution of storms. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, **44**(1): 1~11
- [3] Nosé M, Taguchi S, Hosokawa K, et al. Overwhelming O<sup>+</sup> contribution to the plasma sheet energy density during the October 2003 superstorm: Geotail/EPIC and IMAGE/LENA observations. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: A09S24, doi: 10.1029/2004JA010930
- [4] Shen Chao, Liu Zhenxing. Properties of the neutral energetic atoms emitted from Earth's ring current region. *Phys. Plasmas*, 2002, **9**(9): 3984~3994
- [5] Mei-Ching Fok, Moore T E, Kozyra J U, et al. Three-dimensional ring current decay model. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(A6): 9619~9632
- [6] son Brandt P C, Ohtani P S, Mitchell D G, et al. Global ENA observations of the storm main phase ring current: implications for skewed electric fields in the inner magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, 2002, **29**(20): 1954, doi:10.1029/2002GL015160
- [7] son Brandt P C, Mitchell D G, Ebihara Y, et al. Global IMAGE//HENA observations of the ring current: examples of rapid response to IMF and ring current-plasmasphere interaction. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A11): 1359, doi: 10.1029/2001JA000084



- [8] son Brandt P C, Mitchell D G, Roelof E C, et al. ENA imaging: seeing the invisible. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2005, **26**(2):143~155
- [9] Liu Z X, Escoubet C P, Pu Z, et al. The Double Star Mission. *Ann. Geophys.*, 2005, **23**: 2707~2712
- [10] McKenna-Lawlor S, Balaz J, Strharsky I, et al. An overview of the scientific objectives and technical configuration of the NeUtral Atom Detector Unit (NUADU) for the Chinese Double Star Mission. *Planetary and Space Science*, 2005, **53**: 335~348
- [11] Fu S Y, Wilken B, Zong Q G, et al. Ion composition variations in the inner magnetosphere: individual and collective storm effects in 1991. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A12): 29683~29704
- [12] Fu S Y, Zong Q G, Fritz T A, et al. Composition signatures in ion injections and its dependence on geomagnetic conditions. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A10): 1299, doi:10.1029/2001JA002006
- [13] Lu L, McKenna-Lawlor S, Barabash S, et al. Iterative inversion of global magnetospheric ion distributions using energetic neutral atom (ENA) images recorded by the NUADU/TC2 instrument. *Ann. Geophys.*, 2008, **26**(6): 1641~1652
- [14] Scherer K, Fichtner H, Heber B, et al. Space Weather: the Physics Behind a Slogan. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005: 133~187
- [15] Zong Q G, Wilken B, Fu S Y, et al. Ring current oxygen ions escaping into the magnetosheath. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A11): 25541~25556
- [16] Kalegaev V V, Ganushkina N Y, Pulkkinen T I, et al. Relation between the ring current and the tail current during magnetic storms. *Ann. Geophys.*, 2005, **23**: 523~533

(本文编辑 何 燕)