地磁亚暴期间低高度ENA辐射事件的抵近观测与反演

路立^{1*}, Susan MCKENNA-LAWLOR², Jan BALAZ^{2,3}

1. 中国科学院国家空间科学中心空间环境探测研究室, 北京 100190;

2. Space Technology Ireland, Ltd., Maynooth, Co. Kildare, Ireland;

3. Institute of Experimental Physics, Kosice, Slovakia

* E-mail: luli@nssc.ac.cn

收稿日期: 2018-07-18; 收修改稿日期: 2018-11-13; 接受日期: 2018-11-22; 网络版发表日期: 2019-02-15

国家自然科学基金项目(批准号: 41574152)和斯洛伐克科学基金项目(编号: 2-0077-16)

摘要 2004年11月12日的系列地磁亚暴期间, TC-2卫星上的中性原子成像仪(NUADU)在飞临近地点附近的南、北极上空观测到低高度能量中性原子(ENA)辐射. 通过对高时空分辨探测数据的反演, 我们首次给出亚暴期间环电流能量离子沉降和注入过程的全球视场展示, 展示的时间分辨率高达1min. 探测结果表明, 观测到的ENA辐射主要来自低高度、高纬极区. 由于沉降能量离子沿磁力线运动, 在该区域通过电荷交换产生ENA的几率更大. 因此, 利用低轨道卫星探测高时间和高空间分辨率的ENA成像数据是监测地磁活动期间环电流离子动力学过程演化的最佳方法.

关键词 低高度ENA辐射, ENA图像反演, 投掷角分布, 离子注入, 离子沉降

1 引言

Roelof(1987)开创的地磁空间ENA探测数据反演技术首次建立了ENA图像与赤道环电流离子分布的直接联系. 这为地磁活动期间磁层环电流的动力学过程研究提供了有效探测和分析方法. 早期的ENA数据反演是通过正向模拟实现的. Roelof(1987)利用ISEE-1卫星上搭载的MEP探测器在1978年9月29日大磁暴期间收集的粒子数据获取了第一幅ENA图像. 然后, 他通过反复调整赤道环电流中的离子通量分布模拟出能量离子通过电荷交换产生的相同ENA分布. 这就证明了

ENA探测图像中包含了赤道环电流区离子通量分布的信息, 从而证明了通过ENA数据反演可以从ENA图像数据中得到赤道环电流的能量离子分布.

大多数已发表的涉及离子通量分布反演的研究都是基于搭载在IMAGE卫星上的高能中性原子成像仪(HENA)的探测数据(例如, Brandt等, 2002a, 2002b; Perez等, 2000, 2001; Zhang等, 2005). 在这些研究中, 为了满足平滑噪声和统计需求, 每幅用于反演的ENA图像的积分时间都要超过了10min, 在某些情况下甚至延长到了30min. 考虑到地磁亚暴的时间尺度, 研究地磁活动中环电流分布和演化需要更高时空分辨的

中文引用格式: 路立, McKenna-Lawlor S, Balaz J. 2019. 地磁亚暴期间低高度ENA辐射事件的抵近观测与反演. 中国科学: 地球科学, 49: 838–847, doi: 10.1360/N072018-00206

英文引用格式: Lu L, McKenna-Lawlor S, Balaz J. 2019. Close up observation and inversion of low-altitude ENA emissions during a substorm event. Science China Earth Sciences, <https://doi.org/10.1007/s11430-018-9307-x>

ENA图像数据和反演.

提高ENA图像数据的时空分辨率有两种方法, 一种是提高ENA成像探测仪器本身的性能; 另一种方法是利用抵近ENA辐射源的成像探测数据. 本文使用在近地点附近采集的ENA图像数据给出高时空分辨率的研究结果.

2 中性原子成像观测

由于能量离子倾向于沿磁力线运动, 辐射带结构与局部磁场形状相同. 能量离子的最大通量在赤道附近, 在高磁纬度的极区略有下降. 这是因为辐射带中的能量离子与地球上蒸发出来的低能中性原子相互作用, 通过电荷交换产生ENA, 导致能量离子损失. 换句话说, 在地磁活动过程中, 观测到的ENA主要来源于低高度, 高纬度极区(Brandt等, 1997; McComas等, 2012). 以往的探测与仿真结果也都证实了这一点(Roelof,

1987; Lu等, 2008b, 2014; Ma等, 2015).

2004年11月12日, 在一个大磁暴的末期, 搭载在TC-2卫星(Liu等, 2005)上的中性原子成像仪(NUADU)(McKenna-Lawlor等, 2004)在近地点(681km)附近, 见图1, 记录了两段ENA辐射增强事件. 两事件之间相隔约1h的NUADU穿越辐射带关机. 图2的原始数据展示出ENA像素分布几乎布满了 2π 立体角的全部仰角和方位角. 由于19:37~19:50UT时段的ENA数据在近地点附近的采集高度为700~3000km(图1d), 图2中(TC-2的卫星的自旋轴指向黄北极)ENA计数较大的像素仰角均大于 90° , 即朝向地球方向, 这表明ENA辐射源在极区高度(海拔高度的Z分量)小于700km. 2006年11月6日, STEREO/STE掠过夜侧近地点, 高度510~840km ($L \leq 1.15$), 观测到类似的ENA图像(Wang等, 2010).

相应的地磁活动指数由图3给出. 图3a显示IMF南向, 其中 $0 \leq B_z \leq 8\text{nT}$ (红色曲线). 图3d中的SYM-H指数, $-60 \sim -80\text{nT}$, 表征了一个中等偏弱的地磁活动事件. 在

图1 2004年11月12日TC-2卫星在X-Z平面(a)和Y-Z平面(b)上的轨道、TC-2卫星在18:25~18:41UT(c)和19:37~19:50UT(d)时段的海拔高度

(a)和(b)中红线表示采集ENA数据的位置, 对应时间分别标注在图中

图2 19:45:24UT, NUADU在4个卫星自旋周里采集的ENA原始数据图像

横坐标为360°方位角, 纵坐标为180°仰角. 从上到下显示了从高到低的四个能量通道. 顶部的色标显示累积ENA计数

18:25~18:41UT时段, 太阳风动压处于较高的水平(图3b), AE指数(图3c)增长显示为亚暴的膨胀相. 此后, 当太阳风动压降低, AE指数下降, 表示19:37~19:50UT为亚暴的恢复相阶段.

NUADU的第二能道(50~81keV)在亚暴膨胀相和恢复相期间采集的ENA图像数据, 在满足统计需求前提下分别采用积分时间4min和64s在角坐标系中展示, 见图4和5. 可以看出, 主要的ENA辐射出现在黄昏到夜晚时段. 在亚暴膨胀相阶段(图4), ENA辐射增强首先出现在午夜, 然后向黄昏方向延伸. 在亚暴恢复相阶段(图5), ENA辐射增强则首先出现在黄昏, 然后向午夜延伸.

图5中ENA数据的采集高度仅为图4的6%左右, 见图1c和1d. 这使得图5中抵近观测数据的时空分辨率远高于图4. 在图5中, 许多增亮的ENA像素围绕着地球轮廓, 表现出不同的结构特征. 1min的时间分辨率使我们能够有机会详细了解在亚暴恢复相的进化过程.

3 环电流离子的投掷角分布

通常我们考虑投掷角各向异性时, 赤道环电流的

图3 2004年11月12日行星际磁场(IMF, (a))、太阳风动压(b)、AE指数(c)和SYM-H指数(d)的时间变化曲线

ENA数据采集时段(18:25~18:41UT)和(19:37~19:50UT)分别用竖线分割表示

离子通量可由指数模型表示, 式(1); 其中, 投掷角分布参照损失锥加以修正(Roelof和Skinner, 2000), 式(2).

$$j_{\max 0}^{\text{eq}}(\phi, L, \alpha) = J_0^{\text{eq}} \exp \left\{ -\left(f_{\phi} + f_L + f_{\alpha} \right) \right\}, \quad (1)$$

$$f_{\alpha} = \begin{cases} k_{\alpha} \cos^2 \alpha_{\text{eq}} & (k_{\alpha} \geq 0) \\ -k_{\alpha} \cos^2 \alpha_{\text{eq}} & (k_{\alpha} < 0) \end{cases} + \begin{cases} 0 & \text{outside-loss-cone} \\ a_{\alpha} & \text{inside-loss-cone} \end{cases}. \quad (2)$$

由Kappa模型(Christon等, 1991)推演的环电流离子通量(Shen和Liu, 2002)可以表示为式(3):

$$j_{\text{ion}}(L, \phi, \lambda, E, \alpha) = ej_0(L, \phi) \frac{E}{E_0} \left(1 + \left(\frac{E(L/L_0)^3}{\kappa E_0} \right) \times \left[\sin \alpha_{\text{eq}} + (1 - \sin \alpha_{\text{eq}}) (L_0/L)^{0.45} \right]^2 \right)^{-\kappa-1}. \quad (3)$$

图4 2004年11月12日NUADU/TC-2的50~81keV能量通道在18:25~18:41UT期间采集的ENA图像序列

每幅图像的积分时间为4min. 每幅ENA图像中, 仰角用圆形虚线标注, 方位角用虚直线标注. 黑色曲线表示磁壳中 $L=4$ 、8的磁力线在ENA探测图上的投影, 对应的地方时标注为红色. ENA计数的对数色标在每幅图的右侧. ENA图像的采集时间标注在图的上方

图6给出了上述两个模型所对应的归一化离子通量的投掷角分布. 卫星的局地探测表明环电流能量离子有时会呈现出较弱的各向异性(Fok等, 1996), 所以在部分经典ENA反演研究模型中采用了各向同性的假设(Brandt等, 2001, 2002a; Roelof, 1987). 这里我们注意到上述实用中的投掷角分布假设都是理想化的, 忽略了它在不同时间所表现出不同分布特性的探测真实情况. 由于在同一个反演模型中无法引入多种投掷角分布, 鉴于Kappa模型的投掷角变化介于其他两种分布之间, 并且适用于赤道日侧环电流的大部分区域, 所以在以下的ENA图像反演中我们采用Kappa模型.

4 亚暴膨胀相的ENA成像数据反演

由于以上讨论的ENA辐射主要出现在黄昏, 我们选用Cluster卫星上测量的磁场数据作为参考, Cluster卫星在黄昏到午夜时区的磁力线拐点内侧飞行(图7b). 在亚暴膨胀相阶段, 18:25~18:41UT, $|B_z|$ 减小, B_x 先增加一段时间, 然后减小(如图7a所示), 表明该时区的磁

力线被尾向拉伸(Xu等, 2018). 由于第一个绝热不变量守恒, 式(4)

$$\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B} = \text{const}, \quad (4)$$

$v_{\perp}^2 \downarrow$, 则 $v_{\parallel}^2 \uparrow$. 磁尾能量离子的投掷角通过绝热扩散, 逐渐从“烤饼型”($v_{\perp}^2 > v_{\parallel}^2$)演化为“飞蝶型”($v_{\perp}^2 < v_{\parallel}^2$), 就像同步轨道探测记录描述的那样(Sauvaud和Winckler, 1980; Fu等, 2011, 2012a; Liu等, 2017a, 2017b). 这时, 环电流能量离子沿磁力线地向运动到低高度高纬极区, 称之为沉降离子.

利用线性约束反演方法(Lu等, 2008a)获取了亚暴膨胀相阶段的赤道面环电流离子通量分布(图8). 低高度ENA辐射与环电流沉降离子相关. 图8显示环电流沉降离子源于午夜前赤道平面 $L=6$ 附近, 并在 L 方向内、外延伸. 强离子通量区出现在黄昏到午夜时区, 并有西向延伸. 图8所示的离子通量大小也反映了沉降离子贡献的多少. 环电流区域的能量离子通量在磁场偶极化之前增加的现象(图8)也曾两次在2005年5月15日的大

图5 2004年11月12日NUADU/TC-2能量通道50~81keV在19:37~19:50UT期间采集的ENA图像序列
每幅图像的积分时间为64s. 图中采用的坐标、辅助线和标注与图4相同. 右侧为对数ENA计数色标

磁暴事件中用相同的时间间隔(4min)观测到(Lu等, 2016).

由太阳风从日面压迫地球磁壳(Fu等, 2012b, 2012c), 同时晨侧和黄昏侧也受到来自太阳风的压力, 使得 $B_{\parallel}$ 伴随有 $T_{\perp} > T_{\parallel}$ (图9a~c). 这里 $T_{\perp}$ (或 $T_{\parallel}$)正比于 $v_{\perp}^2$ (或 $v_{\parallel}^2$). 由于地球绕太阳公转, 地球上太阳风压的传播速度: $\bar{V}_{SE} = \bar{V}_S - \bar{V}_E$. 其中, $\bar{V}_S$ 是日地连线方向太阳风压力的传播速度; $\bar{V}_E$ 是地球公转速度. 这就导致了磁壳尾向变形的对称中心向黄昏偏移, 从而使环电流沉降离子, 乃至极光通常会出现在黄昏到午夜时段. 同步

轨道上测量的 $T_{\perp}$ 和 $T_{\parallel}$ 的准同步变化, 图9b和c(时差为12h), 也说明了这一点. 黎明前, 离子通量下降. 但由于较早的离子注入(图9d), 离子通量仍保持在较高水平. 这导致能量为50~400keV的能量离子密度略有增加(图9e).

5 亚暴恢复相的ENA 成像数据反演

在亚暴恢复相阶段(1937~1937UT), Cluster卫星位于磁场拐点内侧($B_z < 0$). 这里 $B_x \downarrow$ 和 $|B_z| \downarrow$ (图7a), 表明夜侧磁场的拐点, 乃至整个磁壳, 向地球方向移动. 这

图 6 归一化离子通量的投掷角分布的指数模型和Kappa模型

提示了磁场偶极化过程. 这时, 夜侧的离子投掷角分布又恢复了“烤饼型”(如图6所示). 19:37~19:50UT时段, 在地球同步轨道卫星上: 图9b显示了黄昏前高能离子(13~45keV/e)的温度, $T_{\parallel} > T_{\perp}$; 图9c也显示黎明前 $T_{\parallel} \approx T_{\perp}$. 这表明磁场偶极化使得尾向变形的磁壳在恢复过程中引起晨昏两侧磁壳向外松弛. 那里的磁场相应减小, 离子投掷角向磁场方向扩散. 离子通量同时保持在一个高水平(图9d), 密度下降(图9e), 也提供了黎明前离子投掷角扩散的间接证据.

利用图5所示的ENA图像数据反演得到的赤道离子通量分布序列图, 如图10所示. 强离子通量信号(橙色和红色)最早出现黄昏前, 见图10(19:37~19:38UT). 我们看到这里 $T_{\parallel} > T_{\perp}$, 预示着与环电流沉降离子有关.

图 7 Cluster卫星测量的磁场(a)和相应的Cluster卫星位置(b)

图 8 2004年11月12日18:25~18:41UT, 能道50~81keV, 通过反演获取的赤道离子通量分布序列图
用L-MLT坐标系显示. 每幅图右侧为离子通量对数的色标

图 9 同步轨道卫星LANL-80(a)、LANL-95(b)和LANL-97(c)上MPA在13~45keV/e能道探测的温度曲线, 及LANL-97卫星上SPA所得高能(50~400keV)质子通量(d)和质子密度(e)
MPA, 等离子体分析仪; SPA, 同步轨道粒子分析仪. (a)~(c)中的绿色线表示磁地方时(MLT)

图 10 2004年11月12日19:37~19:50UT, 能道50~81keV, 通过反演获取的赤道离子通量分布序列图
用L-MLT坐标系显示. 每幅图顶部为该图数据采集时间. 离子通量对数色标在图形右侧

我们利用图5的高空间分辨率数据反演出具有复杂结构的环电流离子通量分布. 强离子通量双带结构首先出现在黄昏(19:39UT). 此后, 这种增强的离子通量结构在黄昏-午夜时区扩展并向东移动(19:41~19:45UT); 最后, 该通量分部向地向收缩并在午夜逐渐减弱(19:46~19:49UT). 图10的赤道离子通量分布序列生动地描述了环电流离子的注射过程, 就像一个地向的雪耙还略带东移.

6 讨论和小结

一般来说, 只有投掷角与磁场平行(或反平行)的赤道环电流离子(称之为沉降离子), 才有机会到达高纬极区产生低高度ENA辐射. 在特定的投掷角分布前

提下, 赤道环电流离子通量越大所产生的沉降离子也越多. 所以, 引起低高度ENA辐射增亮有两个原因: 一个是亚暴膨胀相阶段的环电流能量离子的投掷角扩散($T_{\parallel} > T_{\perp}$), 见第4节; 另一个是亚暴恢复相阶段的磁尾能量离子的注入, 见第5节.

上面描述的两个亚暴事件都是低高度ENA辐射的例子, 皆产生于来自赤道环电流的沉降离子. 在19时45分24秒采集的原始ENA数据图像(图2)显示ENA辐射源的高度小于700km. 对比图4和5的两组ENA图像, 我们发现离ENA辐射源越近, 采集到的ENA数据的时间和空间分辨率越高. 由此可以推断, 利用一颗低轨道卫星获取高时空分辨率ENA图像数据是监测地磁活动期间亚暴环电流演化过程实际可行的最佳方法.

在亚暴膨胀相阶段, 磁场尾向拉伸, 由于环电流离子的投掷角扩散而引发离子沉降。在亚暴恢复相阶段, 磁场偶极化引起夜侧能量离子注入, 并伴随有磁壳松弛引发的黄昏侧能量离子投掷角扩散, 所造成的环电流离子通量分布演化过程首次以1min的时间分辨率予以生动描述。

致谢 对LANL和Cluster卫星团队所提供的探测数据表示感谢。

参考文献

- Brandt P C, Barabash S, Norberg O, Lundin R, Roelof E C, Chase C J, Mauk B H, Thomsen M. 1997. ENA imaging from the Swedish micro satellite Astrid during the magnetic storm of 8 February, 1995. *Adv Space Res*, 20: 1061–1066
- Brandt P C, Barabash S, Roelof E C, Chase C J. 2001. Energetic neutral atom imaging at low altitudes from the Swedish microsatellite Astrid: Extraction of the equatorial ion distribution. *J Geophys Res*, 106: 25731–25744
- Brandt P C, Demajistre R, Roelof E C, Ohtani S, Mitchell D G, Mende S. 2002a. IMAGE/high-energy energetic neutral atom: Global energetic neutral atom imaging of the plasma sheet and ring current during substorms. *J Geophys Res*, 107: SMP 21-1–SMP 21-13
- Brandt P C, Roelof E C, Ohtani S, Mitchell D G, Anderson B. 2002b. IMAGE/HENA: Pressure and current distributions during the 1 October 2002 storm. *Adv Space Res*, 33: 719–722
- Christon S P, Williams D J, Mitchell D G, Huang C Y, Frank L A. 1991. Spectral characteristics of plasma sheet ion and electron populations during disturbed geomagnetic conditions. *J Geophys Res*, 96: 1–22
- Fok M C, Moore T E, Greenspan M E. 1996. Ring current development during storm main phase. *J Geophys Res*, 101: 15311–15322
- Fu H S, Khotyaintsev Y V, André M, Vaivads A. 2011. Fermi and betatron acceleration of suprathermal electrons behind dipolarization fronts. *Geophys Res Lett*, 38: L16104
- Fu H S, Khotyaintsev Y V, Vaivads A, André M, Sergeev V A, Huang S Y, Kronberg E A, Daly P W. 2012a. Pitch angle distribution of suprathermal electrons behind dipolarization fronts: A statistical overview. *J Geophys Res*, 117: A12221
- Fu H S, Cao J B, Mozer F S, Lu H Y, Yang B. 2012b. Chorus intensification in response to interplanetary shock. *J Geophys Res*, 117: A01203
- Fu H S, Cao J B, Zong Q G, Lu H Y, Huang S Y, Wei X H, Ma Y D. 2012c. The role of electrons during chorus intensification: Energy source and energy loss. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 80: 37–47
- Liu C M, Fu H S, Xu Y, Cao J B, Liu W L. 2017a. Explaining the rolling-pin distribution of suprathermal electrons behind dipolarization fronts. *Geophys Res Lett*, 44: 6492–6499
- Liu C M, Fu H S, Cao J B, Xu Y, Yu Y Q, Kronberg E A, Daly P W. 2017b. Rapid pitch angle evolution of suprathermal electrons behind dipolarization fronts. *Geophys Res Lett*, 44: 10116–10124
- Liu Z X, Escoubet C P, Pu Z, Laakso H, Shi J K, Shen C, Hapgood M. 2005. The Double Star mission. *Ann Geophys*, 23: 2707–2712
- Lu L, McKenna-Lawlor S, Barabash S, Kudela K, Balaz J, Strharsky I, Liu Z X, Shen C, Cao J B, Brandt P C, Tang C L, Dandouras I. 2008a. Iterative inversion of global magnetospheric ion distributions using energetic neutral atom (ENA) images recorded by the NUADU/TC2 instrument. *Ann Geophys*, 26: 1641–1652
- Lu L, McKenna-Lawlor S, Barabash S, Balaz J, Liu Z X, Shen C, Cao J B, Tang C L. 2008b. Iterative inversion of global magnetospheric information from energy neutral atom (ENA) images recorded by the TC-2/NUADU instrument. *Sci China Ser E-Technol Sci*, 51: 1731–1744
- Lu L, McKenna-Lawlor S, Balaz J, Shi J, Yang C, Luo J. 2014. Technical configuration and simulation of the NAIS-H for the MIT mission (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 34: 341–351
- Lu L, McKenna-Lawlor S, Cao J B, Kudela K, Balaz J. 2016. The causal sequence investigation of the ring current ion-flux increasing and the magnetotail ion injection during a major storm. *Sci China Earth Sci*, 59: 129–144
- Ma S Y, Yan W N, Xu L. 2015. Tomographic reconstruction of storm time RC ion distribution from ENA images on board multiple spacecraft. *J Geophys Res-Space Phys*, 120: 9334–9354
- McKenna-Lawlor S, Balaz J, Strharsky I, Barabash S, Brinkfeldt K, Li L, Shen C, Shi J, Zong Q, Kudela K, Fu S, Roelof E C, son Brandt P C, Dandouras I. 2004. The energetic NeUtral atom detector unit (NUADU) for China's Double Star Mission and its calibration. *Nucl Inst Method Phys Res Sect A*, 530: 311–322
- McComas D J, Buzulukova N, Connors M G, Dayeh M A, Goldstein J, Funsten H O, Fuselier S, Schwadron N A, Valek P. 2012. Two wide-angle imaging neutral-atom spectrometers and interstellar boundary explorer energetic neutral atom imaging of the 5 April 2010 substorm. *J Geophys Res*, 117: A03225
- Perez J D, Fok M C, Moore T E. 2000. Deconvolution of energetic neutral atom images of the earth's magnetosphere. *Space Sci Rev*, 91: 421–436
- Perez J D, Kozłowski G, C:son-Brandt P, Mitchell D G, Jahn J M, Pollock C J, Zhang X X. 2001. Initial ion equatorial pitch angle distributions from medium and high energy neutral atom images obtained by IMAGE. *Geophys Res Lett*, 28: 1155–1158

- Roelof E C. 1987. Energetic neutral atom image of a storm-time ring current. *Geophys Res Lett*, 14: 652–655
- Roelof E C, Skinner A J. 2000. Extraction of ion distributions from magnetospheric ENA and EUV images. *Space Sci Rev*, 91: 437–459
- Sauvaud J A, Winckler J R. 1980. Dynamics of plasma, energetic particles, and fields near synchronous orbit in the nighttime sector during magnetospheric substorms. *J Geophys Res*, 85: 2043–2056
- Shen C, Liu Z X. 2002. Properties of the neutral energetic atoms emitted from Earth's ring current region. *Phys Plasmas*, 9: 3984–3994
- Wang L, Lin R P, Parks G K, Brandt P C, Roelof E C, Sample J G, Eastwood J P, Larson D E, Curtis D W, Luhmann J G. 2010. Energetic, ~5–90 keV neutral atom imaging of a weak substorm with STEREO/STE. *Geophys Res Lett*, 37: L08107
- Xu Y, Fu H S, Norgren C, Hwang K J, Liu C M. 2018. Formation of dipolarization fronts after current sheet thinning. *Phys Plasmas*, 25: 072123
- Zhang X X, Perez J D, Chen T, Wang C, Brandt P C, Mitchell D G, Wang Y L. 2005. Proton temperatures in the ring current from ENA images and *in situ* measurements. *Geophys Res Lett*, 32: L16101

(责任编辑: 傅绥燕)