0254-6124/2014/34(3)-341–11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Lu Li, McKenna-Lawlor S, Balaz J, Shi Jiankui, Yang Chuibai, Luo Jing. Technical configuration and simulation of the NAIS-H for the MIT mission (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(3): 341-351, doi:10.11728/cjss2014.03.341

中性原子成像探测的物理设计与仿真 *

路 立[1] S McKenna-Lawlor[2] J Balaz[2,3] 史建魁[1]

杨垂柏[1] 罗 静[1]

1(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

2(Space Technology Ireland, National University of Ireland, Ireland)

3(Institute of Experimental Physics, Kosice, Slovakia)

摘 要 研究了磁层–电离层–热层耦合星座 (MIT) 卫星计划中高能中性原子成像仪 (NAIS-H) 探测方案的原理设计和模拟仿真. 以双星中性原子成像仪设计思想为基础, 依据 MIT 卫星计划的总体科学目标和磁层卫星的轨道环境及相应自旋姿态, 给出中性原子成像仪的技术架构, 并针对地磁偶极场的环电流模型进行了模拟仿真. 仿真结果表明, 所研制的 NAIS-H 以其高时空分辨能力适用于监测和反演磁暴期间磁层等离子体的全球动力学过程.

关键词 能量中性原子, 自旋姿态, 环电流

中图分类号 P 353

Technical Configuration and Simulation of NAIS-H for the MIT Mission

LU Li[1] S McKenna-Lawlor[2] J Balaz[2,3] SHI Jiankui[1]

YANG Chuibai[1] LUO Jing[1]

1(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*Space Technology Ireland, National University of Ireland, Ireland*)

3(*Institute of Experimental Physics, Kosice, Slovakia*)

Abstract Energetic Neutral Atoms (ENA) are generated within the Earth's magnetosphere through charge exchange between magnetically trapped energetic ions and cool neutral gasses. An ENA imager can potentially record the arrival directions and energies of magnetospheric ENAs, as well as provide (indirectly) global images of the spatial and energy distributions of their parent ion populations. Preliminary technical configuration and simulation of the Neutral Atom Imaging System for high energy neutral atoms (NAIS-H) designed for the Chinese Magnetospheric-Ionospheric-Thermospheric

* 中国科学院空间科学战略性先导科技专项项目 (XDA04060204) 和地震行业科研专项项目 (201008007) 共同资助

2013-07-08 收到原稿, 2014-02-26 收到修定稿

E-mail: luli@nssc.ac.cn

(MIT) mission are described. In inherited the design concept of NUADU and focus on the main scientific objective of MIT and the orbit, a preliminary technical overview of this instrument is provided. The simulations under a dipolar magnetic field model show that the instrument has the capability to monitor global dynamic processes with high temporal and spatial resolution.

Key words Energetical Neutral Atoms (ENA), Spinning attitude, Ring current

0 引言

中性原子成像探测是正在发展中的空间探测技术, 始于 20 世纪末期. 其利用空间等离子体中电荷交换产生的能量中性原子在传播过程中不受磁场影响这一特性, 实现对空间等离子体的可视化遥测. 1995 年发射的 Astrid 卫星携带了一台中性原子成像仪 (PIPPI) 对地球极区粒子沉降带进行了中性原子成像观测 [1−2]. 1997 年发射的 Cassini 卫星上安装了专用中性原子成像仪 (INCA), 2001 年 1 月掠过木星时发回了木星磁层和 I_0 环的中性原子图像. 2000 年发射的 IMAGE 卫星携带了三台中性原子成像仪 LENA (10∼300 eV), MENA (1∼30 keV) 和 HENA (10∼200 keV), 对地球空间的中性原子分布进行了多能谱监测. 2004 年中国发射的 TC-2 卫星上也搭载了一台中欧联合研制的中性原子成像仪 (NUADU)[3], 获得大量地磁活动期间中性原子图像探测数据.

本文针对中国科学院空间科学战略性先导科技专项空间科学背景型号项目 MIT 卫星计划中的高椭圆轨道磁层卫星 (MIT-HEO), 研制了一种高能中性原子成像仪 (NAIS-H). 重点讨论了所研制高能中性原子成像仪 (NAIS-H) 的主要功能和技术架构, 并对其运行的磁层空间环境进行了模拟仿真实验. 以中国双星中性原子成像仪 (NUADU) 的主要技术特性为基础 [3], 依据 MIT 卫星计划的总体科学目标和轨道特性对所研制仪器进行了改进升级, 在维持原有时间分辨能力不变的前提下, 将仪器的空间和能谱分辨能力分别提高近一倍, 并进行了仿真验证.

1 科学目标和轨道特性

中国首个磁层–电离层–热层 (MIT) 耦合星座计划的主要科学目标是, 利用小卫星星座系统, 对近地磁层中 MIT 耦合关键区域进行探测, 监测研究电离层向磁层上行粒子流的起源、加速机制与传输规律, 认识来自电离层和热层的物质外流在磁层空间暴发生与演化过程中的重要作用, 了解磁层空间暴引起的等离子体层/电离层和热层全球多尺度扰动特征, 揭示磁层–电离层–热层系统相互作用的关键途径和变化规律. MIT 计划主要研究电离层上行粒子流, 特别是 O^+ 外流的源区特征、上行路径、加速机制以及在地磁活动中的变化规律, 大磁暴时环电流中 O^+ 离子来源和注入途径以及富含能量 O^+ 的等离子体对磁层空间暴发生与演化的影响, 暴时等离子体层拓扑形态的剧烈变化与机理, 等离子体层被剥蚀后电离层冷等离子体回填过程, 电离层/热层暴的行星际与磁层驱动及全球扰动特征.

MIT 卫星计划中拟搭载的中性原子成像仪的磁层卫星轨道设计为极轨大椭圆轨道, 对应的轨道倾角为 90°, 远地点高度 6.677 R_e, 近地点高度 1 R_e, 如图 1(a) 所示. 在卫星设计寿命周期内考虑卫星椭圆轨道长轴在轨道面内的近地点辐角漂移为 +75° 至 +115°, 如图 1(b) (c) 所示. 卫星采用自旋稳定, 自旋轴垂直黄道面, 自旋周期为 6 s. 对应的姿态参数包括自旋轴纬度 (LAT)、经度 (LNG)、GSE 坐标与 GSM 坐标的夹角 (GEM) 以及卫星 GSE 坐标位置 (x, y, z) 等.

中性原子成像仪 (NAIS-H) 在卫星轨道特定区间内所获得的中性原子探测图像可以提供环电流的形态信息, 包括全球不对称性、能量粒子的漂移和注入. NAIS-H 具有在不同磁层环境下探测高时空分辨环电流区中性原子 (40∼300 keV) 图像的能力. NAIS-H 探测数据可以有效研究磁暴主相期间环电流的演化过程以及衰减过程, 反演磁暴期间环电流区等离子体分布的拓扑形态和精细结构, 分析等离子体层、环电流和辐射带的耦合, 深入研究极端行星际条件下磁层–电离层耦合对环电流动力学过程的影响.

磁暴期间, 尤其是强磁暴期间, 氧离子丰度增加. 依据双星上中性原子成像仪的探测数据分析 [4−5],

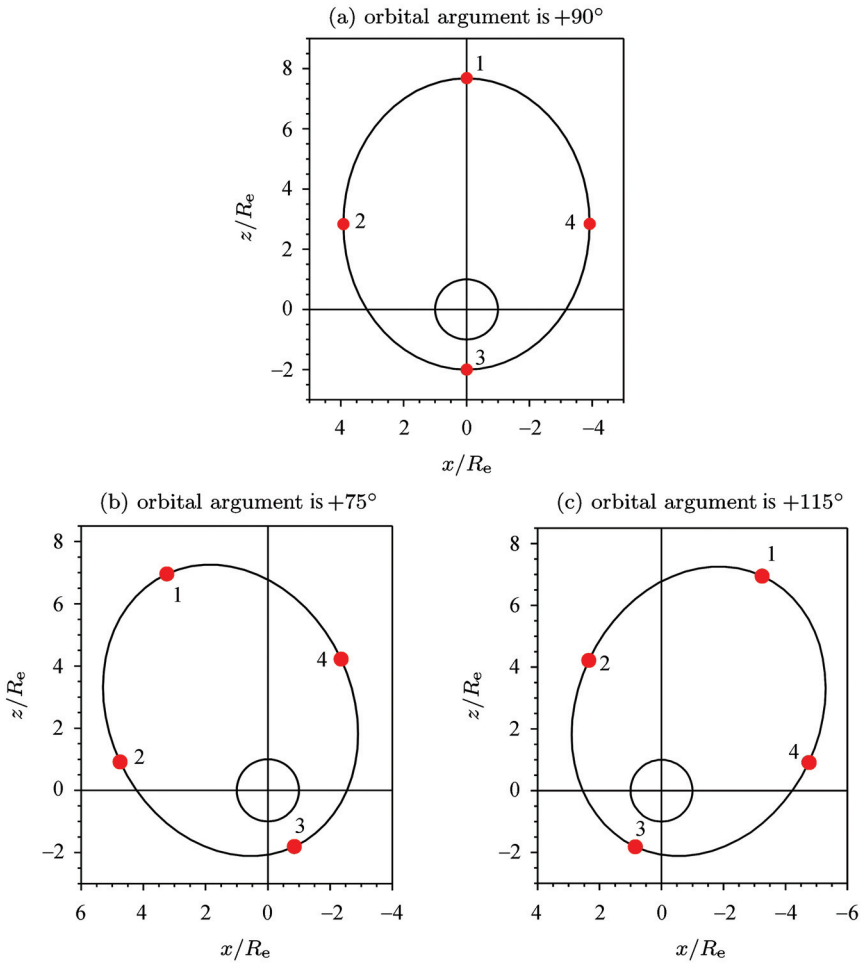


图 1　MIT 卫星磁层星的轨道特性 (黑色曲线为卫星轨道, 红点表示用于模拟仿真特定关注的卫星位置, 位置顺序用标号表示)

Fig. 1　Orbits of magnetospheric satellite of MIT mission with different arguments (black lines show orbits, and red dots marked with serial number show positions where we make simulations)

可以发现, 当高能段 (80 keV 以上能道) 氧离子通量增加到与质子相当时, 由于随着能量增加质子电荷交换截面迅速减小, 氧离子的电荷交换截面比质子大约 200 倍 [6], 所以 80 keV 以上能道记录的中性原子图像基本是由氧原子辐射形成的, 对应的反演结果反映了暴时氧离子通量的全球分布特性. 结合低能段上行氧离子的局地探测, 中性原子成像探测对 MIT 计划关于磁暴期间环电流中氧离子的来源、注入途径和等离子体层拓扑形态变化等研究具有重要意义.

2　原理样机的物理设计与仿真

依据 MIT 卫星的轨道设计和自旋方式, 构建了中性原子成像仪 NAIS-H 探头部分传感器分布设计和整体仪器的结构模型 (见图 2). 中性原子成像仪高能段探头 (NAIS-H) 采用 30 组探测器, 沿自旋轴从 0° 到 180° 均匀分布. 中性原子探测图像的每个像素对应 6° (仰角) × 2.8° (方位角) 立体角; NAIS-H 探头沿轨道的空间覆盖范围是 183.75° (仰角) × 2.8° (方位角). 仪器每个卫星自旋周可以覆盖全部 4π 立体角的视场空间.

NAIS-H 探测器主要功能模块由三部分组成: 准直器/偏转板、离子注入型硅探测器以及脉高分析器. 中性原子通过准直器时不受电场偏转的影响, 可直接入射到硅探测器上, 并在硅探测器中沉积能量. 通过对探测器沉积能量幅度进行脉高分析, 可以实现对中性原子能谱的分辨.

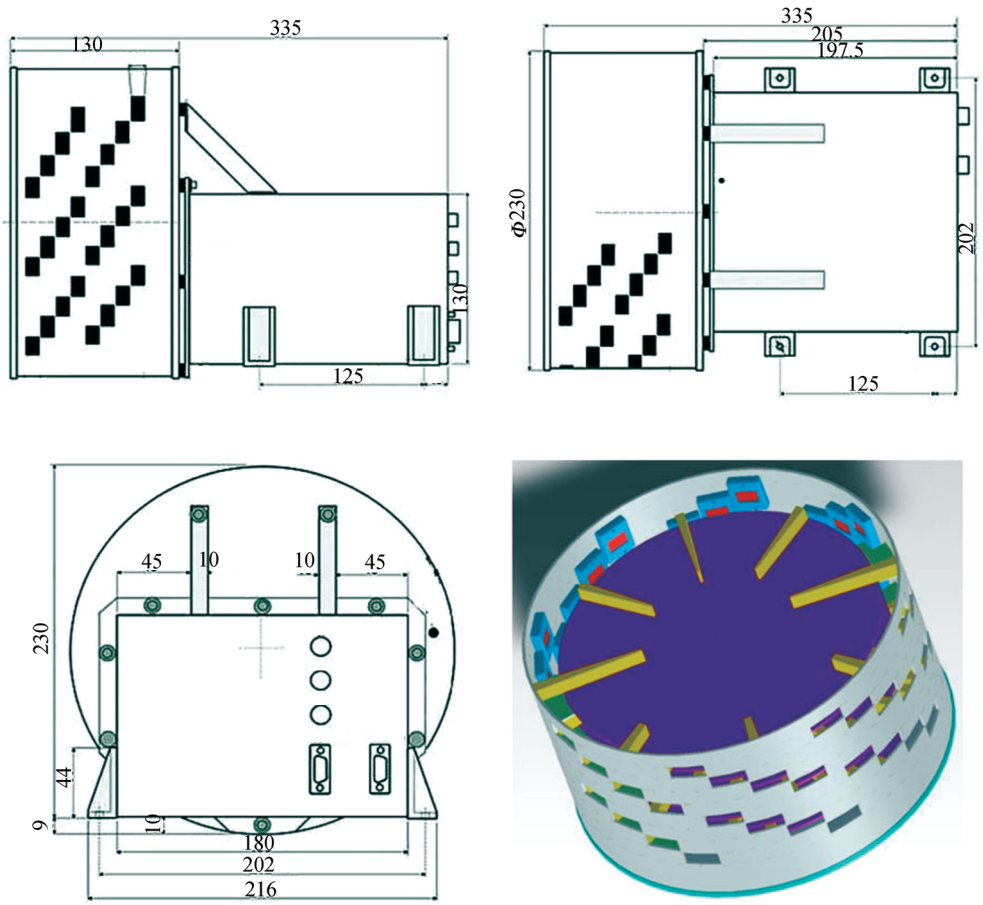


图 2 NAIS-H 机械结构模型三视图及探头部分的传感器分布设计 (右下图)

Fig. 2 Three view drawing of mechanical structure of NAIS-H, and the sensor head is shown in the bottom-right panel

2.1 高压偏转系统

高压系统的上下偏转板分别加高压在入射口形成强电场区域, 对带电粒子进行偏转, 以免其入射到硅探测器上产生干扰信号. 入射口处偏转板一块加 +5000 V 电压, 另一块加 −5000 V 电压, 在偏转板间距 (d = 10 mm) 及半径长度 (r = 114 mm) 固定的前提下, 可将能量小于 320 keV 带电粒子均偏转掉, 防止其入射干扰中性原子的测量. 图 3 给出的是氢离子模拟仿真结果.

2.2 硅探测器

当粒子入射到硅探测器中的时候, 在灵敏区产生电离形成电子–空穴对, 电子–空穴在电场的作用下向电极运动形成脉冲信号, 脉冲信号的幅度与粒子沉积的能量成正比, 通过对脉冲幅度进行鉴别, 可以区分粒子的能谱.

探测粒子能量范围为 40~300 keV, 通常 40 keV 的氢原子 (H) 在硅中的射程为 4 μm, 硅探测器入射窗的死层会影响粒子能量的测量. 假设硅探测器的死层为 50 nm, 镀铝挡光层为 150 nm, 模拟不同能量的氢原子 (H) 和氧原子 (O) 在硅探测器中的沉积能量, 结果如图 4 所示. 通过对沉积能量的鉴别, 可实现 8 个能道的中性粒子能谱测量, 每个能道同时记录 H 和 O 能量的粒子事件数.

2.3 高能带电粒子污染分析

能量低于 320 keV 的带电粒子被电场偏转, 高能带电粒子会入射到硅探测器并在探测器中沉积能量输出脉冲, 如图 5 所示. 从图 5 可以看出, 能量大于 300 keV 的电子和能量大于 160 MeV 的质子沉积能量均小于或接近于图 3 所示氢原子入射能谱上限 (300 keV) 的沉积能量 (图 5 中绿实线所示). 当这

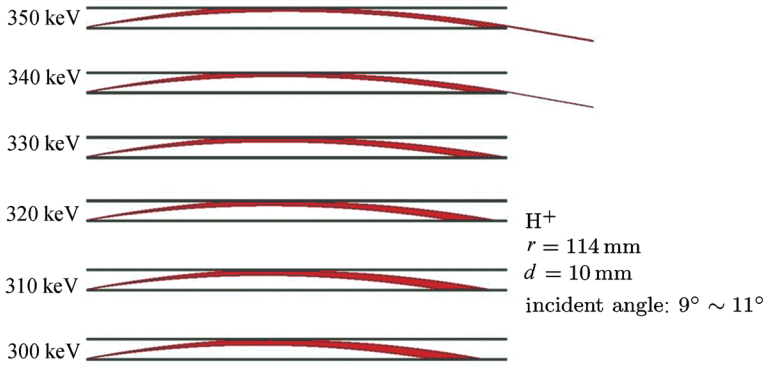


图 3　电场偏转带电粒子仿真结果 (红色曲线表示特定能量的带电粒子束)

Fig. 3　Simulation result of the deflections. The red curves show the charge particle beams with certain energies

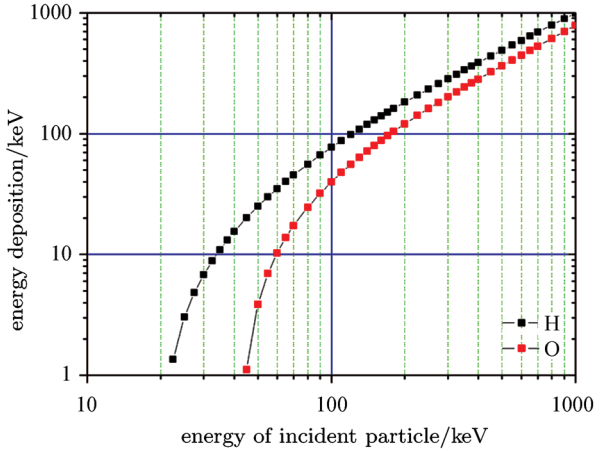


图 4　入射粒子沉积能量

Fig. 4　Energy deposition of incident particles

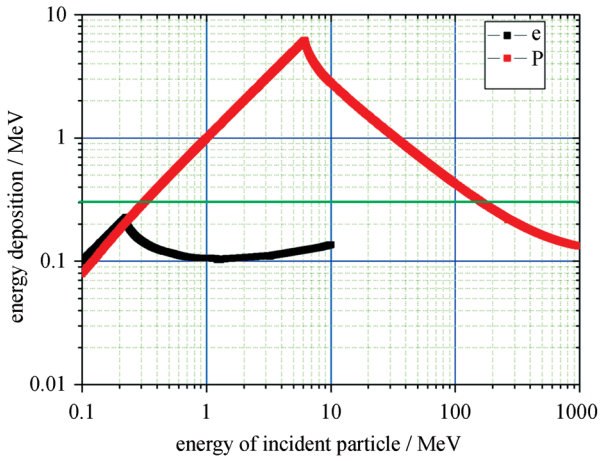


图 5　高能带电粒子在探测器中的沉积能量

Fig. 5　Energy deposition of high energy particles

部分带电粒子进入探测器就会造成对中性原子探测数据的污染, 因此辐射带中的探测数据是不可用的.

3　中性原子成像探测模拟仿真

图 6 给出的是高能中性原子成像仪探头传感器的几何结构、空间尺度和角分布原理设计. 定义太阳方向为自旋方位角的起点, 从 0° 到 360° 共 128 个像元, 每个像元的角宽度为 2.8125°; 仰角从 0° 到 180° 共 30 个像元, 每个像元的角宽度为 6°. 对应的 NAIS-H 探头特性参数和几何因子列于表 1.

3.1　控制方程

采用的计算网格是在 GSM 坐标系中将 $L = 2$ 到 $L = 8$ 的磁壳层按经纬度均分, 用每个体元对应的壳指数 L, 经度 φ 和纬度 θ 表示. 在壳指数 2~8 以外的区域对中性原子通量来说假定为光学薄.

在上述计算系统中, 中性原子图像上指定像素 (仰角 δ 和方位角 ε) 的中性原子通量计数可表示为 [4]

$$C_{\delta,\varepsilon} = \int \Delta E \Delta T \Delta \Omega A(\delta,\varepsilon) \cdot [j_{\mathrm{ionH}}\sigma_{\mathrm{H}}(E) + j_{\mathrm{ionO}}\sigma_{\mathrm{O}}(E)] n \cdot \mathrm{d}l. \quad (1)$$

其中, ΔE 为响应能道的能量范围, ΔT 为指定像素 ENA 通量计数的积分采集时间, $\Delta\Omega$ 为体元对像素 (δ,ε) 所张的立体角, $A(\delta,\varepsilon)$ 为探测器的响应截面, j_{ionH} 和 j_{ionO} 为待求的氢和氧离子通量, $\sigma_{\mathrm{H}}(E)$ 和 $\sigma_{\mathrm{O}}(E)$ 分别为氢和氧离子对应的电荷交换截面, n 为逃逸层蒸发的中性原子密度, $\mathrm{d}l$ 为积分线元. 积分沿指定像素的视线方向.

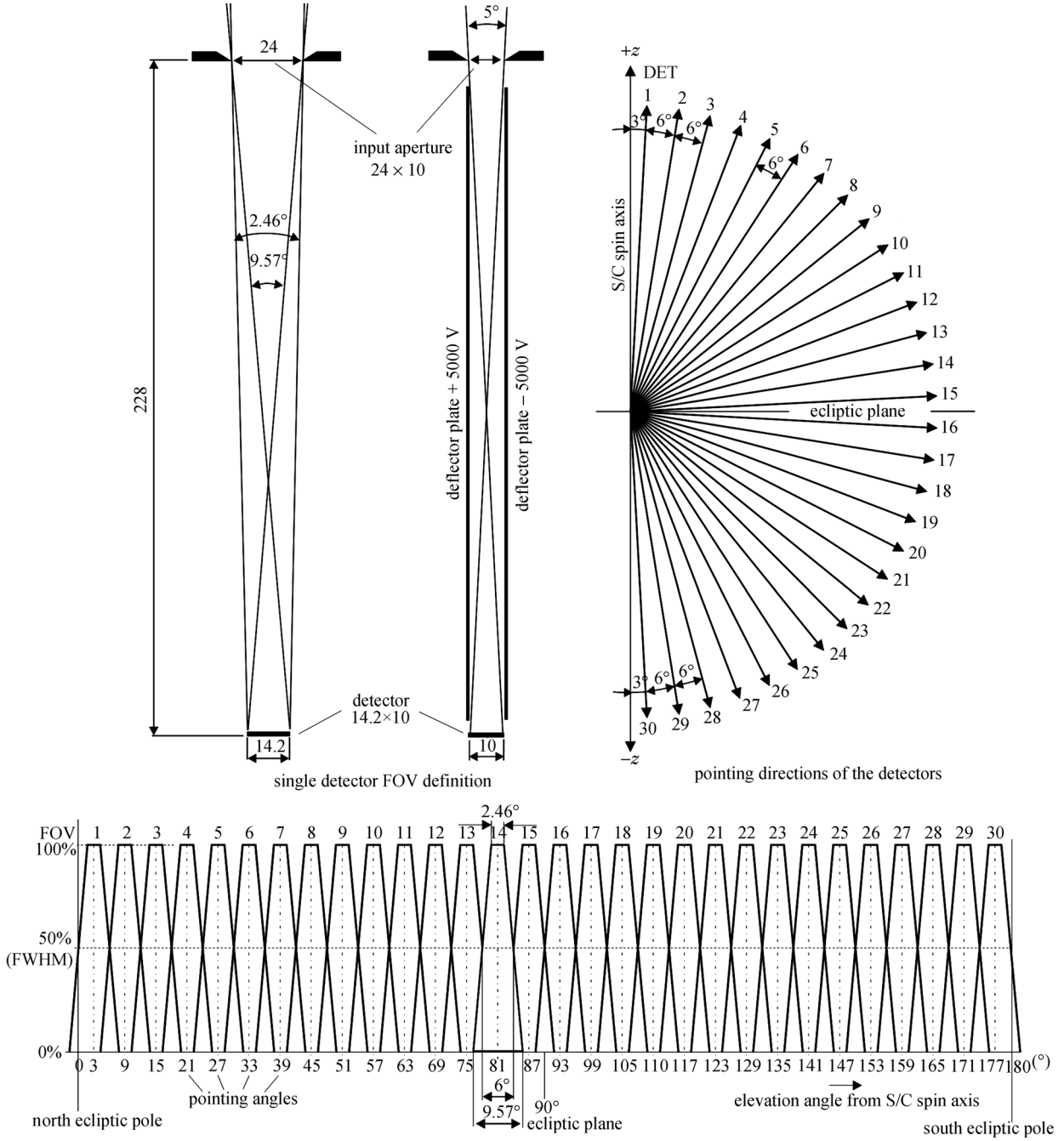


图 6 NAIS-H 探头传感器的几何结构、空间尺度和角分布

Fig. 6 Geometric construction, space scale and angular distribution of the sensor head of NAIS-H

3.2 探测器响应函数

图 6 给出的是中性原子成像仪上 30 个探测器的响应截面和视场的几何分布. 在这个系统中, 由体元 (L,φ,θ) 发出的中性原子通量沿视线方向指向对应中性原子图像的仰角和方位角分别用 δ^* 和 ε^* 表示, 而中性原子图像相应像素法向方向的仰角和方位角分别用 δ 和 ε 表示, 相应像素的探测器有效响应截面可以表示为

$$A_{i,j,k}(\delta,\varepsilon)=bh\cos\Delta\delta\cos\Delta\varepsilon\quad(\mathrm{cm}^2). \tag{2}$$

这里, $\Delta\delta=|\delta^*-\delta|$, $\Delta\varepsilon=|\varepsilon^*-\varepsilon|$;

$$\begin{cases} h=0, & \Delta\varepsilon\geqslant 2.51^\circ;\\ h=1.0-22.8\tan\Delta\varepsilon, & 0^\circ<\Delta\varepsilon<2.51^\circ. \end{cases} \tag{3}$$

表 1 NAIS-H 探头特性参数

Table 1 Characteristic parameter of the sensor head of NAIS-H

几何参数/mm		几何因子/(cm^2·sr)	
探测器长度	14.2	单探测器	0.006 555 863
探测器宽度	10	30 个探测器	0.196 675 89
视窗长度	24		
视窗宽度	10		
瞄准距离	228		

入射角	仰角/(°)		方位角/(°)	
有效率	总宽	半宽	总宽	半宽
100%	2.462 334 281	±1.231 167 14	0	0
50%	6.025 575 007	±3.012 787 503	2.512 570 057	±1.256 285 029
0%	9.577 194 403	±4.788 597 202	5.022 726 533	±2.511 363 267

$$\begin{cases} b=0, \quad \Delta\delta \geqslant 4.79^\circ; \\ b=1.91-22.8\tan\Delta\delta, \quad 1.23^\circ<\Delta\delta<4.79^\circ; \\ b=1.42, \quad \Delta\delta \leqslant 1.23^\circ. \end{cases} \tag{4}$$

其中, h 为探测器有效宽度, b 为探测器有效长度.

3.3 磁层离子通量

环电流区离子通量分布可表示为 [7]

$$j_{\rm ion}(L,\varphi,\lambda,E,\alpha)= ej_0(L,\varphi)\frac{E}{E_0}\Big\{1+\Big[\frac{E(L/L_0)^3}{\kappa E_0}\Big][\sin\alpha_{\rm eq}+ (1-\sin\alpha_{\rm eq})(L_0/L)^{0.45}]^2\Big\}^{-\kappa-1}. \tag{5}$$

其中, $e=(1+1/\kappa)^{\kappa+1}\approx 2.962(\kappa=5.5)$, λ 为磁纬, E 为离子能量, E_0 为离子通量分布极大 (j_0) 时所对应的能量. 离子投掷角用磁纬和赤道离子投掷角表示, 有

$$\sin\alpha=\frac{(1+3\sin^2\lambda)^{1/4}}{\cos^3\lambda}\sin\alpha_{\rm eq}. \tag{6}$$

由于中性原子成像仪上没有质谱分析器, 很难区分质子和其他重离子成分 (主要是氧离子), 因此, 可以定义一个混合离子通量 $j^*(L,\varphi,\lambda,E,\alpha)$ 和相应的混合电荷交换截面 $\sigma^*(E)$, 即

$$\begin{aligned} &j_{\rm ionH}(L,\varphi,\lambda,E,\alpha)\sigma_{\rm H}(E_{\rm H})+ j_{\rm ionO}(L,\varphi,\lambda,E,\alpha)\sigma_{\rm O}(E_{\rm O})= \\ &ej_0^*(L,\varphi)\Bigg\{\frac{\sigma_{\rm H}(E_{\rm H})E_{\rm H}}{E_{\rm H0}}\Big\{1+\Big(\frac{E_{\rm H}(L/L_0)^3}{\kappa E_{\rm H0}}\Big)\cdot [\sin\alpha_{\rm eq}+(1-\sin\alpha_{\rm eq})(L_0/L)^{0.45}]^2\Big\}^{-\kappa-1}+ \\ &\frac{\sigma_{\rm O}(E_{\rm O})E_{\rm O}}{E_{\rm O0}}\Big\{1+\Big[\frac{E_{\rm O}(L/L_0)^3}{\kappa E_{\rm O0}}\Big]\cdot [\sin\alpha_{\rm eq}+(1-\sin\alpha_{\rm eq})(L_0/L)^{0.45}]^2\Big\}^{-\kappa-1}\Bigg\}\equiv \\ &j^*(L,\varphi,\lambda,E,\alpha)\sigma^*(E), \end{aligned} \tag{7}$$

其中, $j_0^*(L,\varphi)$ 为仿真所设定的环电流区离子分布函数.

3.4 逃逸层中性粒子密度分布

中性原子成像仪的最低能道大于 40 keV, 因此不能直接探测源于逃逸层的低能段中性原子辐射. 中性原子成像仪记录的中性原子图像是源于逃逸层的低能段蒸发中性原子与环电流区能量离子进行电荷交换后产生的能量中性原子成分.

经 Rairden 等 [8] 调整后的 Chamberlain 模型 (见图 7 中黑色曲线) 给出的低能段氢原子密度分布太低不适用于环电流区的反演. Ostgaard 等 [9] 的逃逸层氢原子密度分布年平均模型 (见图 7 中蓝色和绿色曲线) 低于太阳活动高年的探测值, 因此也不适用于 2004 年 11 月大磁暴期间环电流区的氢原子密度分布. 如果考虑大磁暴期间逃逸层蒸发的中性原子径向通量守恒, 可以在 Chamberlain 模型中增加一个中性风项, 将低能段氢原子密度分布表示为

$$n(r)=1600\Big[\exp\Big(17.5e^{-1.5r}-\frac{r}{1.46}\Big)+\Big(\frac{1.78}{r}\Big)^2\Big]. \tag{8}$$

此模型 (见图 7 中红色曲线) 与太阳活动高年环电流区氢原子密度的探测分布 (见图 7 中的黑色三角) 一致, 也应该适用于大磁暴期间低能段氢原子密度在该区域的分布特性.

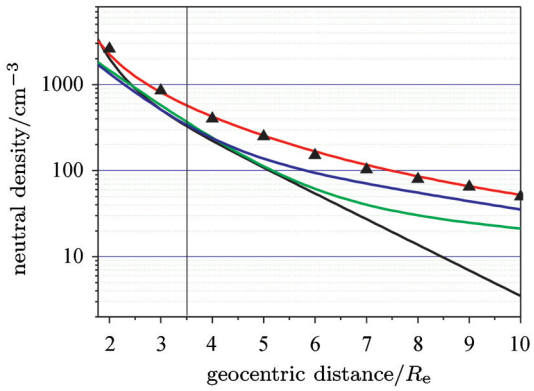


图 7 环电流区低能段氢原子密度分布 (黑色曲线表示经 Rairden 等 [8] 调整后的 Chamberlain 模型结果; 红色曲线表示本文建立的逃逸层中性原子分布密度模型结果; 绿色曲线对应日顶角 90°, 蓝色曲线对应日顶角 180°, 分别表示 Ostgaard 等 [9] 的氢原子年平均模型结果. 黑色三角表示太阳活动高年的观测值 [10])

Fig. 7 Black line represents the Chamberlain model adjusted by Rairden *et al.*[8]. The red line represents the Chamberlain model with an added neutral wind term. Green and blue lines show the yearly average hydrogen density profiles at solar zenith angles $\phi = 90°$ (green) and $\phi = 180°$ (blue) obtained by Ostgaard *et al.*[9] for distances $> 3.5\,R_e$. Triangles show values obtained by Tinsley *et al.*[10] under solar maximum conditions

4 仿真结果

仿真采用了混合模拟方式, 其中, 氢离子 (H^+) 能段为 40~50 keV, 通量 $J_H = 8 \times 10^5\,cm^{-2}{\cdot}s^{-1}{\cdot}sr^{-1}{\cdot}keV^{-1}$, 氧离子 ($O^+$) 能段为 68~80 keV, 通量 $J_O = 2 \times 10^4\,cm^{-2}{\cdot}s^{-1}{\cdot}sr^{-1}{\cdot}keV^{-1}$. 在赤道面的离子通量分布如图 8 所示.

考虑积分 50 个卫星自旋周 (5 min 积分), 针对如图 1 所示 75°, 90°, 115° 三个不同辐角轨道的 12 个不同卫星位置设定的卫星姿态参数列于表 2. 对应的仿真结果如图 9~11 所示, 其中, 中性原子成像图最大探测计数列于表 3.

5 结论

混合模拟结果表明, 在质子 (40~50 keV) 和氧离子 (68~80 keV) 最大通量分别为

$$8.0 \times 10^5\,cm^{-2} \cdot\ sr^{-1} \cdot s^{-1} \cdot keV^{-1},$$
$$2 \times 10^4\,cm^{-2} \cdot\ sr^{-1} \cdot s^{-1} \cdot keV^{-1}$$

的理想分布条件下, 探测一幅可以用于反演的能量中性原子图像需要积分约 50 个卫星自转周 (5 min). 上述原理设计的探测效果与 NUDAU/TC-2 积分 5 min 的图像及 HENA/IMAGE 积分 30 min 的图像基本一致, 均可有效满足环电流区等离子体空间统计分布的反演. 能量中性原子 (ENA) 成像的有效监测区域在辐射带以外的极区上空 (例如图 9~11 的位置 1 和 3).

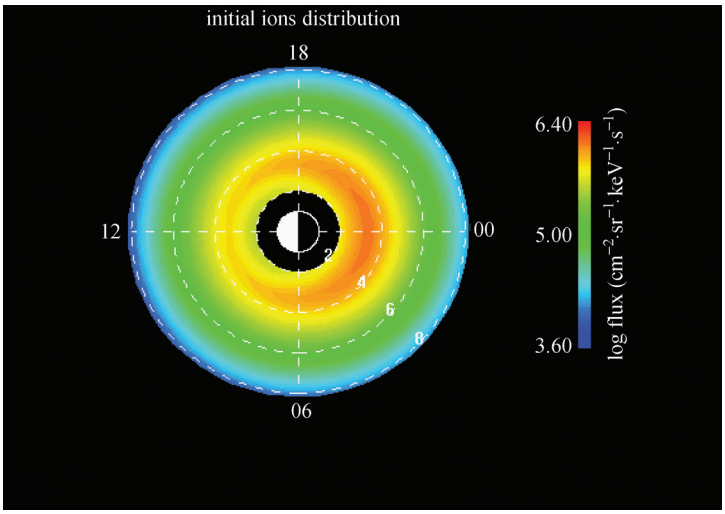


图 8 赤道面离子通量分布

Fig. 8 Ion flux distribution in the equatorial plane

表 2　卫星姿态参数

Table 2　Attitude parameters of the satellite

轨道辐角	位置	自旋轴纬度/(°)	自旋轴经度/(°)	GSE 与 GSM 夹角/(°)	GSE coordinates		
					x/km	y/km	z/km
+90°	1	90.0	0.0	10.0	0.000 000 00	0.0	48 911.703 125 00
	2	90.0	0.0	10.0	24 965.027 343 7	0.0	18 084.654 296 88
	3	90.0	0.0	10.0	0.003 769 61	0.0	−12 742.400 390 62
	4	90.0	0.0	10.0	−24 965.027 343 75	0.0	18 084.652 343 75
+75°	1	90.0	0.0	10.0	−20 670.978 515 62	0.0	44 329.058 593 75
	2	90.0	0.0	10.0	14 983.092 773 44	0.0	26 940.937 500 00
	3	90.0	0.0	10.0	5 385.174 316 41	0.0	−11 548.535 156 25
	4	90.0	0.0	10.0	−30 268.902 343 75	0.0	5 839.585 449 22
+115°	1	90.0	0.0	10.0	20 670.978 515 62	0.0	44 329.058 593 75
	2	90.0	0.0	10.0	30 268.902 343 75	0.0	5 839.587 890 62
	3	90.0	0.0	10.0	−5 385.167 480 47	0.0	−11 548.539 062 50
	4	90.0	0.0	10.0	−14 983.093 750 00	0.0	26 940.935 546 88

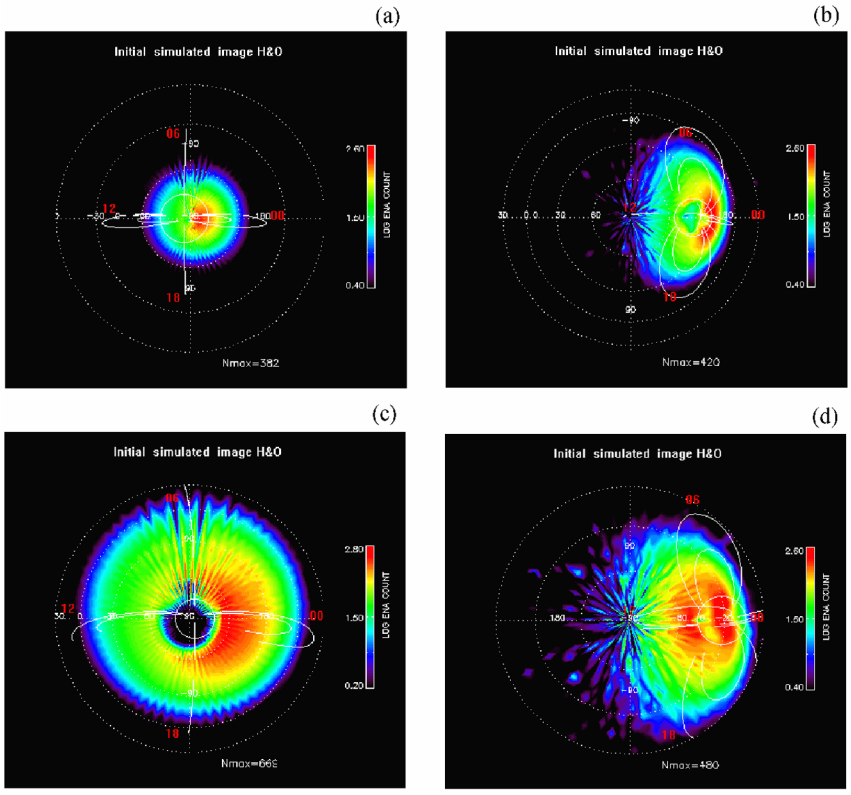


图 9　辐角 +90° 轨道, 位置 1(a), 2(b), 3(c) 和 4(d) 相应仿真结果

Fig. 9　Simulated ENA count plots with orbital argument +90°, where panel (a) is for position 1, panel (b) for position 2, panel (c) for position 3 and panel (d) for position 4

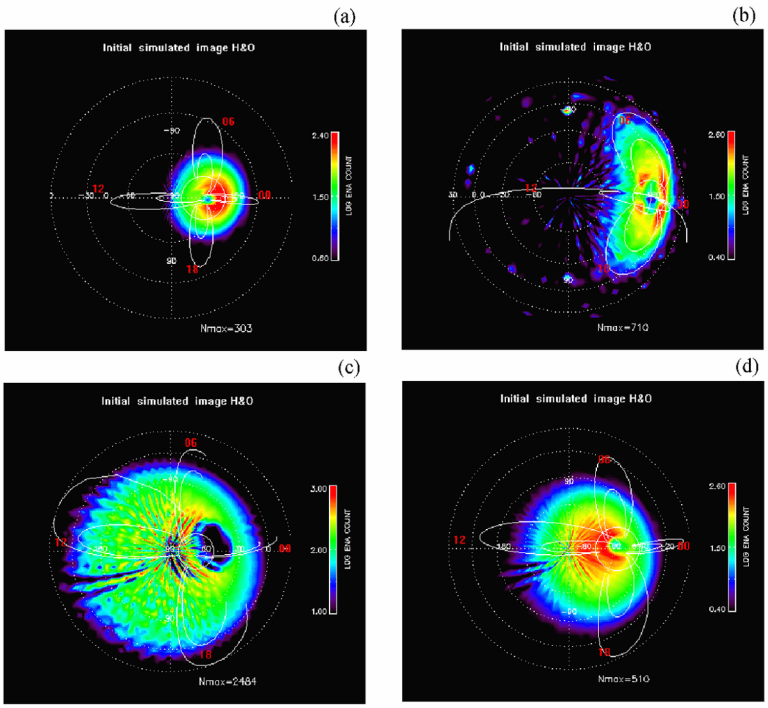


图 10 辐角 +75° 轨道, 位置 1(a), 2(b), 3(c) 和 4(d) 相应仿真结果

Fig. 10 Simulated ENA count plots with orbital argument +75°, where panel (a) is for position 1, panel (b) for position 2, panel (c) for position 3 and panel (d) for position 4

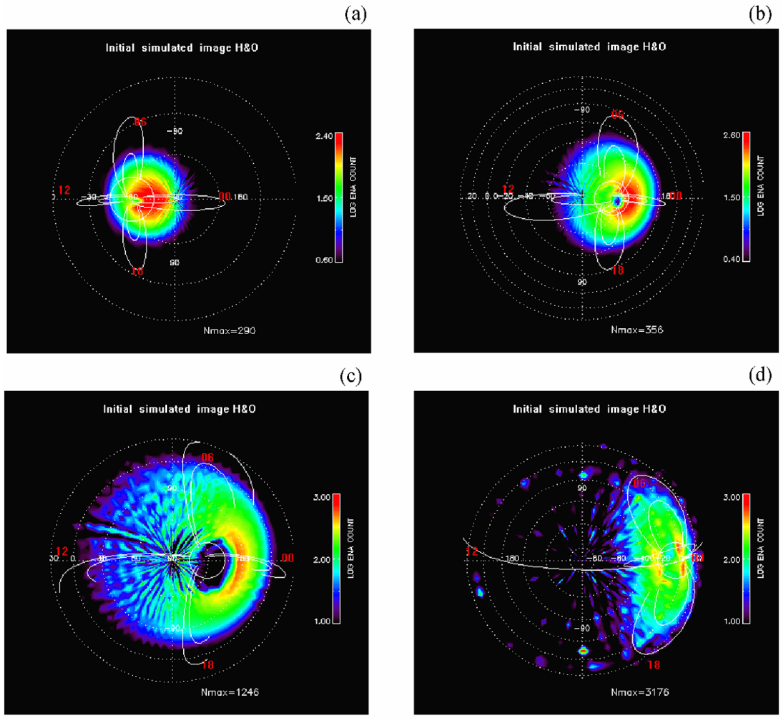


图 11 辐角 +115° 轨道, 位置 1(a), 2(b), 3(c) 和 4(d) 相应仿真结果

Fig. 11 Simulated ENA count plots with orbital argument +115°, where panel (a) is for position 1, panel (b) for position 2, panel (c) for position 3 and panel (d) for position 4

表 3 中性原子成像仿真图最大计数

Table 3 Maximum counts of ENA simulation plots

轨道辐角	位置	中性原子成像仿真图最大探测计数
+90°	1	382
	2	420
	3	669
	4	480
+75°	1	303
	2	710
	3	2484
	4	510
+115°	1	290
	2	356
	3	1246
	4	3176

辐射带附近的情况比较复杂, 模拟图像角分布的范围也较大 (例如图 9~11 的位置 2 和 4).

中性原子成像探测是对空间等离子体分布的遥测, 其可以明确区分被测等离子体的空间变化与时间变化. 通常地磁活动指数的时间变化尺度量级约为分钟以上, 这也反映了空间等离子体及电磁场时间变化对空间天气的综合效应. 本文构建的中性原子成像仪在时空分辨能力上满足对近地磁层主要活动区域等离子体空间分布的监测需求, 配合 MIT 星座中其他卫星的原位探测, 可追踪研究上行氧离子的来源和注入途径及演化过程, 研究能量氧离子对磁层空间暴发生与演化的影响.

参考文献

[1] Barabash S, Brandt P C, Norberg O, *et al*. Energetic neutral atoms image by the Astrid microsatellite [J]. *Adv. Space Res.*, 1997, **20**(4/5):1055-1060

[2] Brandt P C, Barabash S, Norberg O, *et al*. ENA image from the Swedish microsatellite Astrid during the magnetic storm of 8 Feb. 1995 [J]. *Adv. Space Res.*, 1997, **20**(4/5):1061-1066

[3] McKenna-Lawlor S, Balaz J, Barabash S, *et al*. The energetic Neutral Atom Detector Unit (NUADU) for China's Double Star Mission and its calibration [J]. *Nucl. Inst. Meth.*, 2004, A(503):311-322

[4] Lu Li, McKenna-Lawlor S, Barabash S, *et al*. Iterative inversion of global magnetospheric ion distributions using Energetic Neutral Atom (ENA) images recorded by the NUADU/TC-2 instrument [J]. *Ann. Geophy.*, 2008, **26**(6):1641-1652

[5] Lu L, McKenna-Lawlor S, Barabash S, *et al*. Comparisons between ion distributions retrieved from ENA images of the ring current and contemporaneous, multipoint ion measurements recorded in-situ during the major magnetic storm of 15 May 2005 [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**, A12218, doi:10.1029/2010JA015770

[6] Smith P H, Bewtra N K. Charge exchange lifetimes for ring current ions [J]. *Space Sci. Rev.*, 1987, **22**:301-318

[7] Shen C, Liu Z X. Properties of the neutral energetic atoms emitted from Earth's ring current region [J]. *Phys. Plasmas*, 2002, **9**:3984-3994

[8] Rairden R L, Frank L A, Craven J D. Geocoronal imaging with dynamics explorer [J]. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**:13 613-13 630

[9] Østgaard N, Mende S B, Frey H U, *et al*. Neutral hydrogen density profiles derived from geocoronal imaging [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A7): doi:10.1029/2002JA009749

[10] Tinsley B A, Hodges R R, Rhorbaugh R P. Monte Carlo models for the terrestrial exosphere over a solar cycle [J]. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**:13 631-13 647