



地球等离子层极紫外波段辐射特性计算

何飞^{①④}, 张效信^{②*}, 陈波^①, FOK Mei-Ching^③

① 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

② 中国气象局国家空间天气监测与预警中心, 北京 100081;

③ NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 20771, USA;

④ 中国科学院研究生院, 北京 100039

* E-mail: xxzhang@cma.gov.cn

收稿日期: 2009-04-14; 接受日期: 2009-06-24

国家自然科学基金项目(批准号: 40774098, 40774079, 40890160)、国家高技术研究发展计划(“863”计划)(批准号: 2007AA12Z314)和中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助

摘要 介绍了计算地球等离子体层 He^+ 密度分布的动态全球核心等离子体层模式(DGCPM), 模拟了等离子体层结构特性和 30.4 nm 辐射特性, 与 IMAGE 卫星观测结果的对比分析表明: (1) 等离子体层顶主要位于 $5.5 R_E$ 以内, 10 min 收缩或扩张的特征尺度约 $0.1 R_E$; (2) 等离子体层肩产生于行星际磁场南向偏转并从晨侧向正午方向旋转; (3) 等离子体层尾在行星际磁场南向偏转时会向昏侧旋转并变窄. 模拟得到从月球上观测时等离子体层位于 $5.5 R_E$ 以内, 对应月基极紫外相机视场角 $10.7^\circ \times 10.7^\circ$; 等离子体层 30.4 nm 辐射强度为 $0.1 \sim 11.4$ Rayleigh; 首次从侧面模拟出了等离子体层肩和尾结构, 其空间变化尺度量级为 $0.1 R_E$. 以上计算结果为月基极紫外相机参数设计提供了重要理论依据.

关键词

地球等离子体层
动态对流模式
极紫外辐射
月基探测

地球等离子体层是围绕在 $2 \sim 7 R_E$ ($R_E = 6378.5$ km 为地球半径)范围内的圆环状致密等离子体区域, 其典型的电子密度为 $10 \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$, 能量约 1 eV, 温度为 $3000 \sim 5000 \text{ K}$ ^[1,2]. 等离子体层的主要粒子是 H^+ (因此早期也被称为质子层). He^+ 离子数量居于第二位, 约占 $5\% \sim 10\%$, He^+ 与 H^+ 密度比率随不同的地磁活动条件变化, 介于 $1\% \sim 50\%$ 之间^[3,4]. 等离子体层中的离子均被捕获在地球磁力线上, 形成一种场致密度分布. 等离子体层是内磁层相互作用的核心区域, 与电离层、环电流和辐射带发生强烈相互作用, 其演化过程影响内磁层结构和近地空间环境, 对其研究具有重要的科学价值和应用价值.

等离子体层中粒子的显著特征之一是共振散射

太阳光中的极紫外(EUV)辐射^[5], 其散射强度与散射点离子密度成正比. 因此研究等离子体层离子分布的最好方法是通过光学方法对辐射进行成像, 再通过图像反演得到等离子体层的离子密度分布. 等离子体层 EUV 散射主要两条谱线为: He^+ 30.4 nm 和 O^+ 83.4 nm. 前者为孤立线谱, 散射率为 $1.8 \times 10^{-5} \sim 3.4 \times 10^{-5} \text{ photons} \cdot \text{ion}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[6]; 后者共包含 9 条伴线, 散射率为 $1.0 \times 10^{-7} \sim 9.4 \times 10^{-7} \text{ photons} \cdot \text{ion}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[7], 明显低于 30.4 nm 谱线. 其他离子成分虽然也有辐射, 但由于在等离子体层中含量极低, 不利于探测. 选用 30.4 nm 谱线的优势还在于: He^+ 含量在地球等离子体层中居于第二位($\sim 10\%$, 而 O^+ 成分不足 1%), 其分布和动力学特征能反映等离子体层整体特性. 该谱线是一

条孤立的线光谱, 在等离子体层中其辐射最强, 磁层空间对该谱线是光学薄的^[8], 且这一波段的背景辐射可以忽略不计, 因此观测和计算方法简单、准确. 此外, 光学探测反应时间短, 几分钟就可以拍摄一幅图像, 图像直观, 适合于进行磁暴和亚暴期间等离子体层对地磁活动响应的观测和研究, 适合于空间天气监测预报.

本文工作中, 首先介绍一种模拟地球等离子体层粒子密度分布的动态全球核心等离子体层模式, 然后对地球等离子体层 EUV 辐射的模拟和观测结果进行分析, 特别是分析磁暴期间地球等离子体层演化特征, 提出目前等离子体层研究仍存在的问题. 然后研究从侧面(月球轨道)对等离子体层进行成像探测的方法, 分析其可行性, 确定 EUV 相机的参数.

1 地球等离子体层 30.4 nm 辐射强度模拟

地球等离子体层 He^+ 共振散射太阳 30.4 nm 辐射, 沿某一给定视线方向 L 的积分光强 I 由以下积分公式得到:

$$I = 1/4\pi \int_L e^{-\tau} p(\theta) g n(\mathbf{r}) d\mathbf{s} \times 10^{-6}, \quad (1)$$

其中, $p(\theta) = 1 + 1/4(2/3 - \sin^2 \theta)$ 是共振散射角分布各向异性因子^[9], θ 是太阳光与散射光之间的夹角, g 是 He^+ 的共振散射因子(与太阳 30.4 nm 辐射通量和 He^+ 量子力学特性有关, 可以近似为常数), $n(\mathbf{r})$ 是位置 \mathbf{r} 处的 He^+ 密度, τ 是 He^+ 30.4 nm 辐射的光学深度, 在高度大于 1000 km(约 1.2 R_E 处) τ 可视为 0^[6,8].

模拟 He^+ 30.4 nm 辐射强度的核心是模拟 He^+ 密度的空间分布. 我们采用一种动态全球核心等离子体层模式(DGCPM)^[10], 该模式采用通量管对流的方法得到地球等离子体层离子的动态演化过程. 假定在同一通量管内离子密度恒定, 其密度大小决定于该通量管粒子流量在电离层的流进量与流出量^[11,12]

$$\frac{D_{\perp} N}{Dt} = \frac{F_n}{B_{ni}} + \frac{F_s}{B_{si}}, \quad (2)$$

其中 D_{\perp}/Dt 为运流微商, N 为单位通量中的离子数密度, F_s , F_n 分别为南北半球电离层进出通量管的离子流量, B_{si} , B_{ni} 分别为通量管南北半球电离层足点磁场强度. 用数值方法解该一阶双曲型偏微分方程, 可以得到任意时刻等离子体层离子密度分布.

模拟中需要考虑等离子体层区域磁场和电场分布模式. 由于没有内磁层全区域磁场和电场观测数据, 因此两者均采用理论经验模式. 在我们的计算中磁场采用国际地磁场参考模式(IGRF)和 Tsyanenko 磁场模式^[13]. Tsyanenko 模式与太阳风和行星际磁场参数相关, 较好地反应了各种磁层电流系统对地球磁场的贡献, 特别是能反映磁暴期间的变化. 电场模式采用 Weimer 模式^[14], 该模式能很好地反映磁暴和亚暴期间太阳风和行星际参数对中高纬电离层电场的影响, 比较适合于对实际观测数据的模拟. 模拟磁暴等离子体层演化时, 等离子体层通量管初始密度分布设置为饱和分布^[15], 输入弱对流参数对流 5 天(平静磁场和弱电场), 得到平静条件下等离子体层离子密度分布, 然后输入强对流参数(磁暴磁场和强电场), 得到磁暴发生不同时刻等离子体层密度分布.

2 地球等离子体层模拟和观测结果

美国 IMAGE 卫星于 2000~2005 年间在极轨大椭圆轨道远地区域对地球等离子体层进行了首次全局 EUV 成像, 利用光学成像方法得到了地球等离子体层在磁赤道面投影的整体图像. 下面对 IMAGE 观测到的两个磁暴进行分析, 并与模拟结果对比.

2.1 2000 年 5 月 24 日磁暴

2000 年 5 月 24 日发生了较强的磁暴, 行星际磁场分量达到了 -20.0 nT, 太阳风速度达到了 700 km/s, Dst 指数达到了 -150.0 nT, Kp 指数达到了 8.0(如图 1 所示). 在阴影区域所示的时间段内, 行星际磁场发生了强烈的南向偏转, 太阳风速度持续升高, Dst 指数持续下降, 并达到最大绝对值, 这对应磁暴的主相和恢复相的转折段. 在这一时间段内, 等离子体层被强烈的磁层对流刻蚀(Erosion), 并不断收缩, 向阳面等离子体层顶收缩到约 2.0 R_E , 背阳面等离子体层顶收缩到约 3.0 R_E . 等离子体层尾(Plume)宽度随时间收缩, 等离子体层肩(Shoulder)也向正午方向旋转, 见图 2(a). 图 2(b)是用 DGCPM 模拟的结果, 输入参数为图 1 阴影区域所示的参数. 模拟结果中, 等离子体层肩旋转速度与观测结果一致, 夜晚等离子体层顶与观测结果一致, 而白天等离子体层顶位置稍大于观测结果, 这可能是由于模型中磁场位形与实际磁场

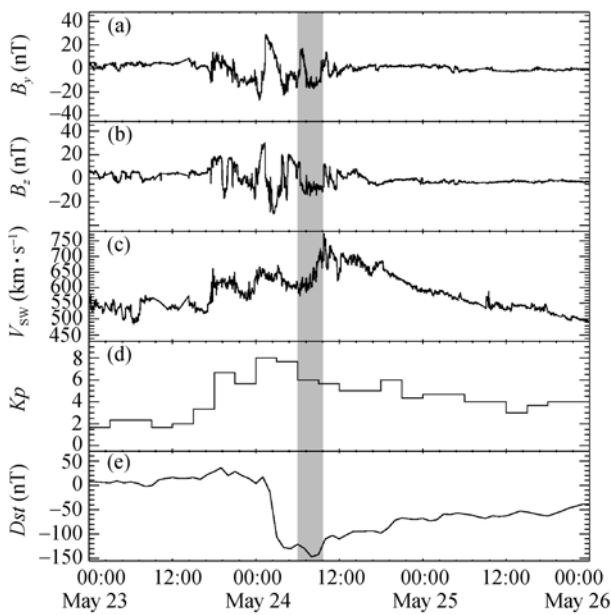


图 1 2000 年 5 月 24 日磁暴期间地磁指数和太阳风、行星际磁场参数. 阴影区域为模拟选取的时间段, 从上至下依次为(a)行星际磁场 Y 分量; (b)行星际磁场 Z 分量; (c)太阳风速度; (d) Dst 指数; (e) Kp 指数

位形不同, 对流电场分布强于实际电场分布, 导致日向对流加强.

2.2 2000 年 6 月 26 日磁暴

2000 年 6 月 26 日发生的小磁暴, 弱于 5 月 24

日磁暴, 行星际磁场分量在 -20.0 nT 以内, 太阳风速度小于 550 km/s, Dst 指数达到了 -100.0 nT, Kp 指数最大值 6.0 , 见图 3. 在阴影区域所示的时间段内, 行星际磁场同样发生了南向偏转, 太阳风速度持续升高, Dst 指数持续下降, 并达到最大绝对值. 在这一时间段内, 等离子体层被较强的磁层对流刻蚀, 并不断收缩, 等离子体层顶收缩到 $\sim 3.0 R_E$. 等离子体层尾宽度随时间收缩, 并向昏侧旋转, 并没有出现等离子体层肩, 见图 4(a). 图 4(b)是 DGCPM 模拟的结果, 输入参数为图 3 阴影区域所示的参数. 模拟结果与观测结果基本一致, 白天和夜晚等离子体层顶均与观测结果基本一致, 保持在 $3.0 R_E$ 左右. 只是模拟结果中等离子体层尾旋转速度略小于实际观测结果.

2.3 模拟等离子体层侧面成像结果

运用动态等离子体层模型, 我们模拟了从侧面观测地球等离子体层可能得到的图像. 在月球表面放置 EUV 相机并指向地心, 视场角为 15° (对应空间尺寸为 $15.0 R_E$), 在投影平面 (经过地心并与 EUV 相机轴线垂直的平面) 上空间分辨率为 $0.1 R_E$. 模拟选取了从月球轨道上月晨至月昏期间等时间间隔的 9 个位置 (如图 5), 研究不同位置侧面等离子体层辐射强度分布. 为研究从侧面观察时地球等离子体层肩和尾结构的特性, 我们选取的模拟时间为 UT09:36 24 May 2000, 对应的太阳风参数见图 1.

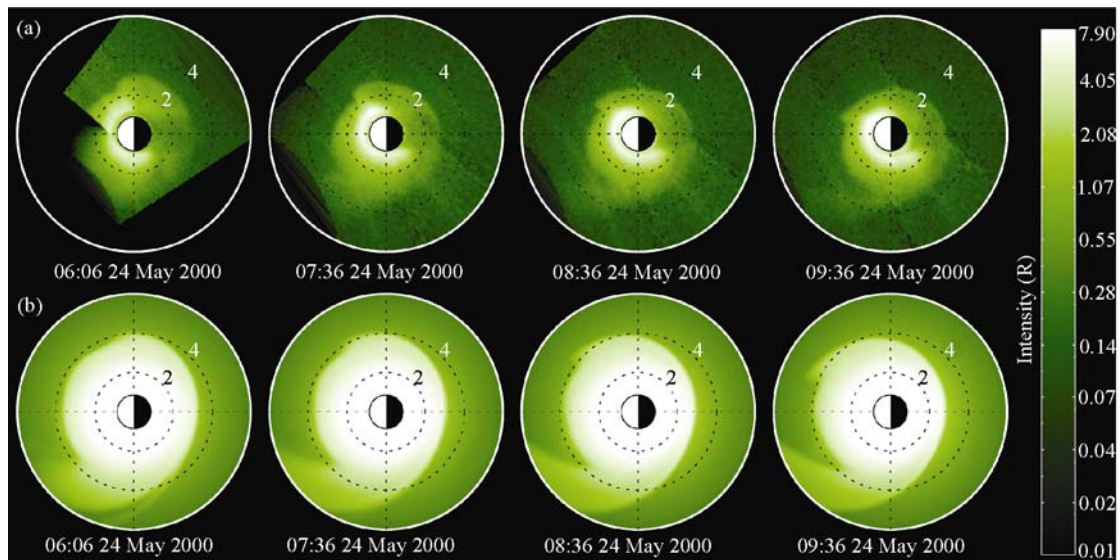


图 2 2000 年 5 月 24 日 IMAGE 卫星磁暴观测结果和模拟结果比较, 虚线圈代表的地球半径已标注于图中, 单位: R_E . (a) IMAGE 观测结果; (b) DGCPM 模拟结果

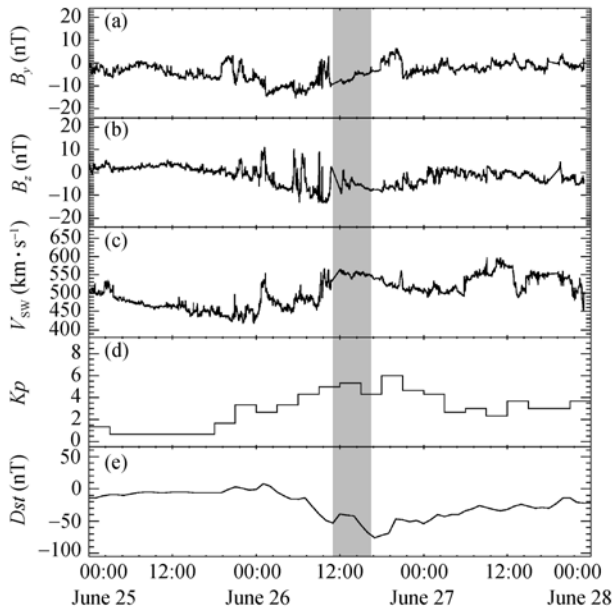


图3 2000年6月26日磁暴期间地磁指数和太阳风、行星际磁场参数。阴影区域为模拟选取的时间段, 从上至下依次为(a)行星际磁场Y分量; (b)行星际磁场Z分量; (c)太阳风速度; (d) Dst 指数; (e) Kp 指数

图6中等离子体层顶内辐射光强约为0.2~11.4 Rayleigh, 与以前探空火箭观测结果(0.1~10 Rayleigh)^[16]、模拟结果(0.1~15 Rayleigh)^[17]以及 Planet-B 卫星探测

结果(0.1~9 Rayleigh)^[18]相吻合。根据 GEOTAIL 卫星的观测结果^[19], 在 $5.5 R_E$ 以外, He^+ 密度接近恒定, 约为 $0.2\sim 2.0 \text{ cm}^{-3}$, 对应的辐射积分光强为 0.026~0.13 Rayleigh, 模拟结果中等离子体层顶之外的等离子体层槽(Trough)辐射强度约为 0.02~0.1 Rayleigh, 与观测结果吻合。

首次从侧面模拟了等离子体层肩和等离子体层尾图像。不同观测位置处, 由于光线方向和投影方向不同, 等离子体层尾结构在图像中的位形不同, 见图6中白线矩形框对应区域, 越接近月晨或月昼, 由于光线积分的遮挡和重叠效应, 图像上的等离子体层尾结构越不明显。等离子体层肩结构只在图6(d)~(g)中比较明显(见图中虚线矩形框所在区域), 在其他位置由于光线投影的重叠效应, 表现并不明显, 等离子体层肩的空间尺度为约 $0.2 R_E$ 。此外, 由于等离子体层主体的遮挡, 从侧面观测时, 等离子体层肩结构不如从极轨观测时明显。

由图6可知, 在月球轨道上不同位置处, 等离子体层主体结构(等离子体层、等离子体层尾、等离子体层肩)均在 $5.5 R_E$ 以内, 根据 IMAGE/EUV 观测结果, 地球等离子体层主要结构也处于 $5.5 R_E$ 范围内(等离子体层顶距地心平均距离), 因此 $10.7^\circ \times 10.7^\circ$ 视场角和 $0.1 R_E$ 空间分辨率能观测到等离子体层整体

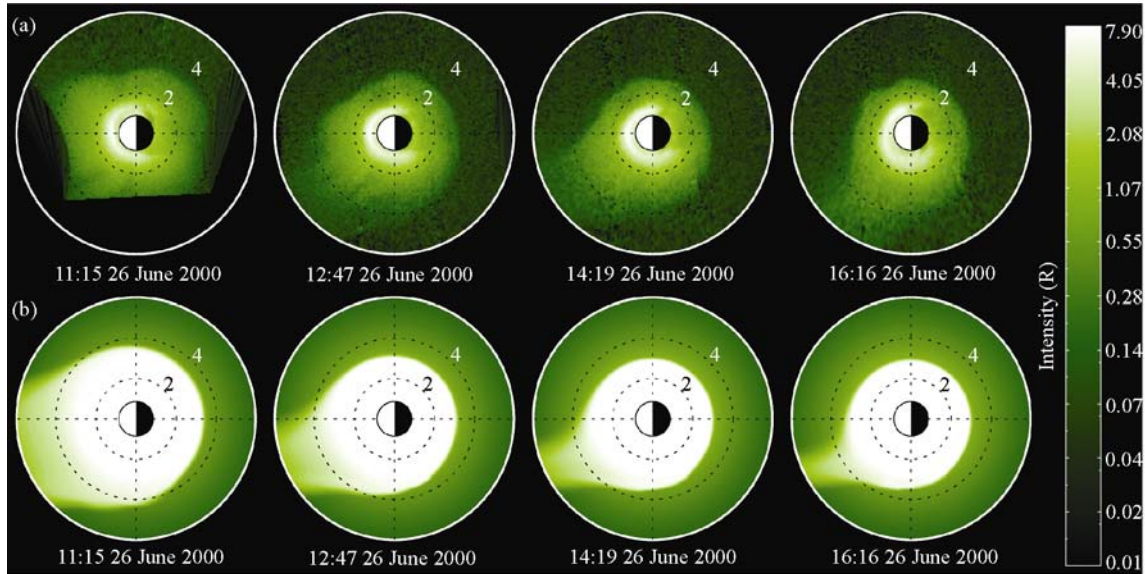


图4 2000年6月26日 IMAGE 卫星磁暴观测结果和模拟结果比较, 虚线圈代表的地球半径已标注于图中, 单位: R_E 。(a) IMAGE 观测结果; (b) DGCPM 模式模拟结果

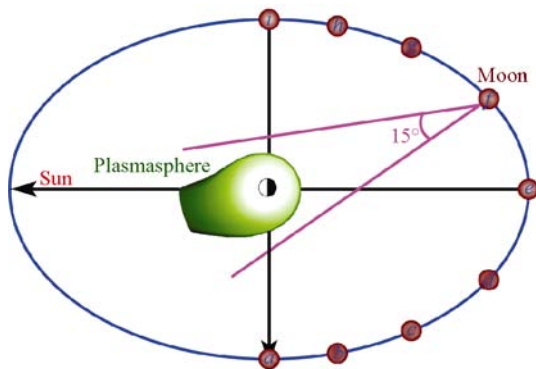


图 5 模拟选取的月球位置示意图. 位置 $a \sim i$ 在 SM 坐标系中的坐标依次为: $(0, 60 R_E, 0)$, $(-22.4 R_E, 54.3 R_E, 2.0 R_E)$, $(-40.7 R_E, 40.8 R_E, 3.7 R_E)$, $(-52.5 R_E, 21.9 R_E, 4.7 R_E)$, $(-56.6 R_E, 0, 5.1 R_E)$, $(-52.5 R_E, -21.9 R_E, 4.7 R_E)$, $(-40.7 R_E, 40.8 R_E, 3.7 R_E)$, $(-22.4 R_E, -54.3 R_E, 2.0 R_E)$, $(0, -60 R_E, 0)$

结构, 满足地球等离子体层科学研究需要.

3 结论

本文采用动态全球核心等离子体层模型 (DGCPM) 计算了地球等离子体层结构特性和辐射特性, 与 IMAGE 卫星观测结果进行了对比分析, 并计算了不同观测位置处地球等离子体层极紫外辐射强度的分布特性, 主要计算结果如下.

(1) 地球等离子体层在赤道面上位于 $5.5 R_E$ 以内, 在子午面上位于 $4.0 R_E$ 以内, 等离子体层顶、等离子体层肩和等离子体层尾的典型尺度量级为 $0.1 R_E$. 进行月基 EUV 观测时需要的 EUV 相机视场角为 $10.7^\circ \times 10.7^\circ$ (以地月平均距离 $60.0 R_E$ 计算), 空间分辨率为 $0.1 R_E$.

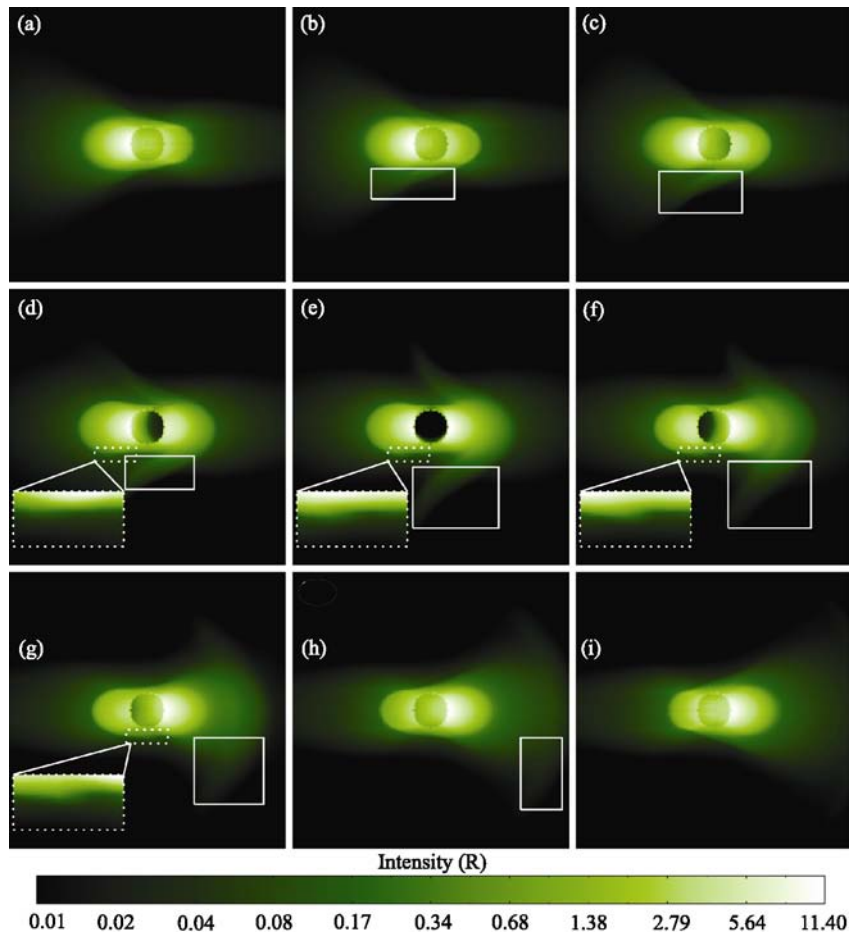


图 6 从月球轨道上不同位置模拟的等离子体层 EUV 辐射光强分布. (a)~(i)代表的月球位置分别对应图 5 所示的位置, 虚线框代表肩(Shoulder)所在区域, 白线框代表尾(Plume)所在区域, (d)~(g)左下角虚线框为肩(Shoulder)放大图

(2) IMAGE 卫星观测的磁暴等离子体层顶收缩或扩张的平均速率约为 $0.7 R_E/h^{[20,21]}$, 10 min 对应的尺度量级约 $0.1 R_E$, 与空间分辨率相当, 因此成像的时间分辨率为 10 min 或优于 10 min.

(3) 从侧面观测时, 等离子体层顶内(包括部分等离子体层尾)辐射强度为 $0.1\sim 11.4$ Rayleigh, 等离

子体层顶外 30.4 nm 辐射强度为 $0.02\sim 0.1$ Rayleigh, EUV 相机的探测范围需满足此要求.

本文计算为月基 EUV 相机设计提供了理论依据, 该相机能有效地对地球等离子体层进行全局连续观测, 有利于开展地球等离子体层物理特性研究及空间天气预报.

致谢 衷心感谢美国 Weimer D R 教授提供 Weimer 电场模型, 感谢 NASA-CCMC (<http://ccmc.gsfc.nasa.gov/>) 提供 IGRF 和 Tsyganenko 磁场模式代码, 感谢 IMAGE/EUV 研究组 Forrester T 教授提供 EUV 观测数据以及数据分析处理软件(<http://euv.lpl.arizona.edu/euv/>). 同时感谢 ACE 卫星科学中心(<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/>)提供 MAG 和 SWEPAM 观测数据, 感谢国际地磁数据京都分中心(<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>)提供地磁指数(Dst , Kp , AL).

参考文献

- Horwitz J L, Brace L H, Comfort R H, et al. Dual-spacecraft measurements of plasmasphere-ionosphere coupling. *J Geophys Res*, 1986, 91(A10): 11203—11216
- Chiu Y T, Luhmann J G, Ching B K, et al. An equilibrium model of plasmasphere composition and density. *J Geophys Res*, 1979, 84(A3): 909—916
- Farrugia C J, Geiss J, Young D T, et al. GEOS-1 observations of low-energy ions in the earth's plasmasphere: a study on composition, and temperature and density structure under quiet geomagnetic conditions. *Adv Space Res*, 1988, 8(1): 25—33
- Farrugia C J, Geiss J, Young D T, et al. The composition, and temperature and density structure of cold ions in the quiet terrestrial plasmasphere: GEOS-1 results. *J Geophys Res*, 1989, 94(A9): 11865—11891
- Meier R R. Ultraviolet spectroscopy and remote sensing of the upper atmosphere. *Space Sci Rev*, 1991, 58(1): 1—185
- Garrido D E, Smith R W, Swift D W, et al. Imaging the plasmasphere and trough region in the extreme ultraviolet region. *Opt Eng*, 1994, 33(2): 371—382
- Garrido D E, Smith R W, Swift D W, et al. Imaging the Earth's magnetosphere: Effects of plasma flow and temperature. *Planet Space Sci*, 39(11): 1559—1571
- Brandt J C. Interplanetary gas, VI, On diffuse extreme ultraviolet helium radiation in the night and day sky. *Astrophys J*, 1961, 134(2): 975—980
- Brandt J C, Chamberlain J W. Interplanetary gas, I, Hydrogen radiation in the night sky. *Astrophys J*, 1959, 130(1): 670—682
- Ober D M, Horwitz J L, Gallagher D L. Formation of density troughs embedded in the outer plasmasphere by subauroral ion drift events. *J Geophys Res*, 1997, 102(A7): 595—602
- Chen A J, Wolf R A. Effects on the plasmasphere of a time-varying convection electric field. *Planet Space Sci*, 1972, 20(4): 483—509
- Rasmussen C E, Guitar S M, Thomas S G. A two dimensional model of the plasmasphere: Refilling time constant. *Planet Space Sci*, 1993, 41(1): 35—43
- Tsyganenko N A, Sitnov M I. Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms. *J Geophys Res*, 2005, 110(A03208), doi: 10.1029/2004JA010798
- Weimer D R. Improved ionospheric electrodynamic models and application to calculating Joule heating rates. *J Geophys Res*, 2005, 110(A05306), doi: 10.1029/2004JA010884
- Carpenter D L, Anderson R R. An ISEE-Whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere. *J Geophys Res*, 1992, 97(A2): 1097—1108
- Ogawa T, Tohmatsu T. Sounding rocket observation of helium 304- and 584-Å glow. *J Geophys Res*, 1971, 76(25): 6136—6145
- Roelof E C, Mauk B H, Meier R R. Instrument requirements for imaging the magnetosphere in extreme ultraviolet and energetic neutral atoms derived from computer-simulated images. *Proc SPIE*, 1992, 1744(1): 19—30
- Nakamura M, Yoshikawa I, Yamazaki A, et al. Terrestrial plasmaspheric imaging by an extreme ultraviolet scanner on Planet-B. *Geophys Res Lett*, 2000, 27(2): 141—144
- Matsui H, Mukai T, Ohtani S, et al. Cold dense plasma in the outer magnetosphere. *J Geophys Res*, 1999, 104(A11): 25077—25095
- Murakami G, Hirai M, Yoshikawa I. The plasmopause response to the southward turning of the IMF derived from sequential EUV images. *J Geophys Res*, 2007, 112(A06217), doi: 10.1029/2006JA012174
- Goldstein J, Sandel B R, Forrester W T, et al. IMF-driven plasmasphere erosion of 10 July 2000. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(3): 1146, doi:10.1029/2002GL016478