

# 2009年2月13日 EUV 波现象数值研究<sup>\*</sup>

章磊 郑惠南 廖炽坚

(中国科学技术大学地球与空间科学学院 合肥 230026)

**摘要** 结合 STEREO 卫星的观测和三维磁流体力学数值模拟方法,采用 WSO (Wilcox Solar Observatory) 磁场数据和势场源表面模型建立日冕初始磁场,并在日面活动区加上时变的压强扰动,对 2009 年 2 月 13 日 05:35 UT 爆发的 CME-EUV 波 (Coronal Mass Ejections-Extreme Ultraviolet wave, 日冕物质抛射-远紫外波) 事件进行研究. 从 COR1/STEREO-A 图像判断,此次 CME 前沿速度约  $340 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ,角宽度约  $60^\circ$ ;分析 EUVI/STEREO-B  $195 \text{ \AA}$  的差分图像,可以看到,环形亮环波前从活动区向四周传播,亮环波前后面是日冕暗化区,取四个方向的波前位置进行线性拟合可知,该 EUV 波速度为  $247 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ,数值模拟得到的 EUV 波速度为  $245 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ,将计算结果采用 IDL 可视化后可以看到明显的亮环和暗区结构,数值模拟结果与卫星观测相一致,表明该 EUV 波现象是快磁声波.

**关键词** 日冕物质抛射, EUV 波, 磁流体力学, 数值模拟

**中图分类号** P 353

## Numerical Study of EUV Wave on 13 February 2009

ZHANG Lei ZHENG Huinan LIAO Chijian

(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

**Abstract** EUV wave is observed in the extreme ultraviolet spectrum as large-scale disturbances phenomenon, often accompanied by a coronal mass ejection. Besides, EUV wave is, when displayed in EUVI  $195 \text{ \AA}$  difference image, a bright ring propagating outside with the subsequent spread of the dark zone. The disturbance can often cover the whole solar disk. The current study explores the CME-EUV wave event that occurred at 05:35 UT on 13 February 2009, based on the STEREO satellite observations and the three-dimensional Magnetohydrodynamic (MHD) numerical simulation. We know this CME with  $340 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  front velocity and  $60^\circ$  angular width from the COR1/STEREO-A observations. Viewing in EUVI/STEREO-B  $195 \text{ \AA}$  running difference images, a bright toroidal wave front propagates outside from the active region, with dimming area following the bright wave front. The fitting velocity of EUV wave from the observation data is  $247 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ . The numerical simulation shows that the (fast-mode) wave, with legible bright front and dimming structure, propagates in a speed of  $245 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ . The simulation results turn out to be consistent with the satellite observations

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目 (41174125, 41074120, 41131065, 41121003) 和中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-EW-QN510) 共同资助  
2011-08-09 收到原稿, 2012-09-21 收到修定稿  
E-mail: zhangphy@mail.ustc.edu.cn

and confirm that EUV wave is a fast-mode MHD wave.

**Key words** Coronal Mass Ejections (CME), EUV waves, Magnetohydrodynamic (MHD), Numerical simulation

## 0 引言

日冕远紫外光谱常观测到被称为 EUV/EIT 波的大尺度扰动现象<sup>[1-2]</sup>, 某些时候扰动能波及整个日面. EUV/EIT 波通常表现为一个明亮的环状波前和随后的日冕暗化区 (dimming) 的运动<sup>[3]</sup>, 典型的 dimming 演化时间需要一个小时, 代表该区域存在密度下降, 损失的物质提供给 CME<sup>[4]</sup>. 亮环波前在弱磁场环境中往往呈圆环形在太阳表面传播, 传播范围广, 甚至能覆盖整个日轮, 其波前遇到强磁场区域 (活动区或冕洞) 常常会偏折或停滞. Klassen 等<sup>[5]</sup> 的统计显示, EIT 波典型速度为  $170\sim 350\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 平均  $271\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 只有 Moreton 波典型速度 ( $1000\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 的  $1/4$  左右. EUV 波和 Moreton 波常被认为是同一波动现象在不同区域的表现形式<sup>[6]</sup>, 观测的 EUV/EIT 波事件中有的 EUV 波在传播过程中速度衰减<sup>[7-8]</sup>, 有的在传播中加速<sup>[9]</sup>, 还有的在传播中速度几乎不变<sup>[10-11]</sup>. EUV 波事件与 CME 事件密切相关<sup>[11-13]</sup>, EUV/EIT 波现象与 II 型射电暴的联系紧密, Klassen<sup>[5]</sup> 对 1997 年的 21 个 II 型射电暴统计结果显示, 其中的 19 个 (90.5%) 都伴随有 EIT 波现象. EUV 波一般发生在日冕底层  $1\sim 2 R_{\odot}$  处.

关于 EUV/EIT 波现象的本质一直存在争议, 一种观点认为其应该是真正的 MHD 波动, 尤其是快磁声波<sup>[14-17]</sup>, 也有学者认为是慢模波<sup>[18]</sup>, 或可能是孤波<sup>[19]</sup>; 另一种观点认为 EUV/EIT 波现象并非真正的 MHD 波动<sup>[20-23]</sup>, Chen 等<sup>[20-22]</sup> 认为日冕 Moreton 波动是 CME 活塞驱动激波, 而不是耀斑压力脉冲引起的爆炸波, EIT 波动是由磁通量环爆发, 磁场重新分布而引起的.

本文利用三维磁流体力学模型结合 STEREO 卫星观测对一个典型的 CME-EUV 波事件进行详细分析, 以深入理解这种太阳活动现象.

## 1 卫星观测

一般来说, 观测 EUV/EIT 波现象的最好源区位于视场中心, 因为这里利于观察其波前向四周传播; 观测 CME 理想的情况是日冕物质抛射事件爆发位置在望远镜视场的侧面, 这样容易追踪其径向传播演化. 但是以往的太阳观测卫星 (SOHO 等) 或地面望远镜只有单个视角, 难以同时满足这两个要求, 然而 STEREO 是双星体系, 再配合第一拉格朗日点的 SOHO, 构成立体观测网络, 使得 EUV 波现象和 CME 同时处于理想观测位置成为可能.

2009 年 2 月 13 日的 CME-EUV 波事件源区是日面 NOAA 1012 活动区, 背景是理想的宁静太阳, 没有其他的活动区. 当日 STEREO-A 星和 STEREO-B 星分开角度约  $91^{\circ}$ , 其中, STEREO-B 星几乎正对着 NOAA 1012 活动区, 而 STEREO-A 星则处于活动区侧面探测其 CME 爆发的理想位置.

CME-EUV 波联合事件起始时刻约为 05:35 UT, EUV 波从活动区向周围传播, 文献 [24] 给出的此次 EUV 波速度约为  $250\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 是典型的 EUV/EIT 波速度. EUVI/STEREO-A  $195\text{\AA}$  的差分图像显示, 侧翼 CME 爆发起初呈现气泡形状 (见图 1), 植根于太阳表面的足点向两侧扩张, 其顶部向日冕高处膨胀, 初期 CME 根部与 EUV 波扩张的速度几乎相同, 一段时间以后, EUV 波以大致恒定的速度在日面传播, 而 CME 足点运动几乎停滞, 只是顶部的径向扩张继续, 所以观测 CME 的角宽度并不是随时间线性增长的, 这与 EUV/EIT 的伪波理论不符合, 按伪波理论, CME 的足点与 EUV/EIT 波亮环扩张应该是始终一致的.

EUVI 的观测范围局限于低日冕区域, 对于超出的 CME 结构无法追踪,  $1.3\sim 4.0 R_{\odot}$  范围的 CME 传播需要靠 COR1 来观察. 2009 年 2 月 13 日 STEREO-A 星 COR1 图像左侧上方和右侧下方存在稳定的盔

状冕流结构, 南极附近区域有发散的冕流 (见图 2), 直到 05:45 UT, COR1/STEREO-A 还看不到源区 CME 爆发的迹象, 05:55 UT 图像上能看到抛射物质刚刚超越 COR1 内边界  $1.3 R_s$  处 (见图 2), 此次事件的 CME 速度比较慢, 只有  $340 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  (见图 3).

## 2 数值模型

本文计算模型采用三维球坐标. 半径方向计算范围为  $1.0\sim 2.5 R_s$ , 半径的网格 61 点, 间隔  $0.025 R_s$ ;

纬度方向 122 格点间隔  $3^\circ$ , 范围为  $-1.5^\circ\sim 361.5^\circ$ ; 经圈方向 62 格点, 间隔  $3^\circ$ , 范围为  $-1.5^\circ\sim 181.5^\circ$ , 避开南极和北极点在球坐标下奇点问题, 总的网格点数约 46 万. 本网格划分类似于文献 [25].

经度方向的极轴附近采用开拓网格, 纬度方向采用周期性边界条件, 半径方向利用特征线投影边界条件和无反射边界条件的组合 [16].

本文所用的 MHD 方程组为球坐标非守恒格式, 即

$$\frac{\partial U}{\partial t} + A \frac{\partial U}{\partial r} + B \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} + C \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \phi} = S,$$

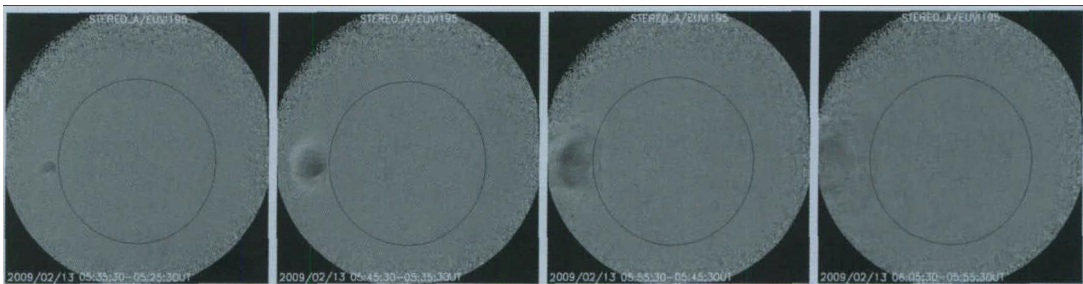


图 1 EUVI/STEREO-A 195 Å 差分图像 (CME 爆发初期足点向两侧扩张, 伴随 EUV 波在日面传播)  
Fig. 1 EUVI/STEREO-A 195 Å running-difference images (CME eruption foot points expand and EUV wave propagates on solar surface)

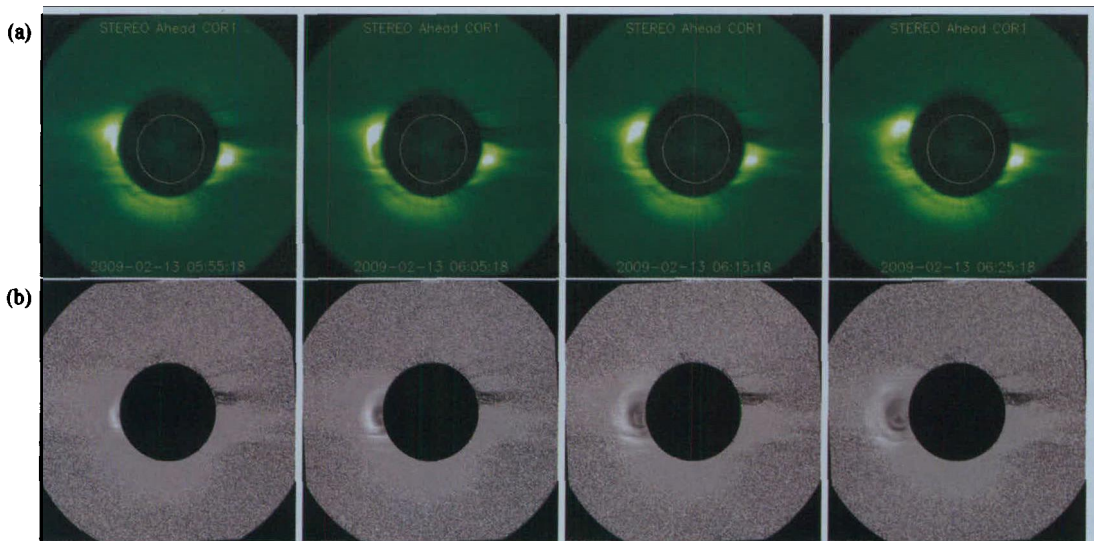


图 2 COR1/STEREO-A 白光像反映的冕流结构 (a) 及 COR1 差分图像 (b)  
Fig. 2 Upper panel gives COR1/STEREO-A white light images where the coronal streamer can be seen (a). Lower panel gives COR1 running-difference images (b)

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ u_r \\ u_\theta \\ u_\phi \\ B_r \\ B_\theta \\ B_\phi \\ p \end{pmatrix}$$

其中,  $U$  为解矢量;  $A, B, C$  为系数矩阵;  $S$  为源项.  $A, B, C, S$  的具体形式与文献 [16] 是一样的. 将方程组离散化后采用有限差分分裂步格式, 预估步采用隐

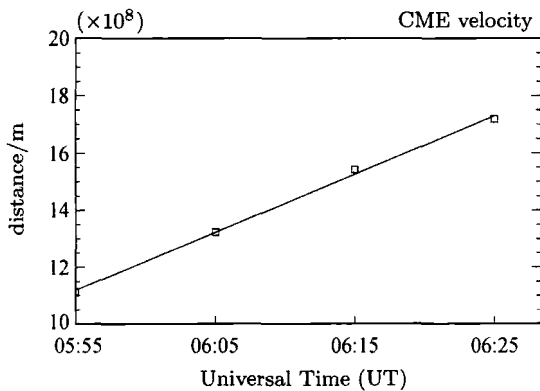


图 3 依据 COR1/STEREO-A 得到的太阳-STEREO-B 连线方向 CME 径向拟合速度为  $340 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  的差分图  
 Fig. 3 According to COR1/STEREO-A running difference images, CME radial fitted velocity on Sun-STEREO-B direction is  $340 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$

格式保证稳定性, 校正步用显格式保证计算精度.

由于日冕磁场直接观测存在困难, 通常依据光球磁场观测数据, 利用球谐函数展开进行磁场外推, 得到日冕内的磁场结构. 这里采用势场源表面模型 [26] 进行磁场初态计算. 势场源表面模型 (Potential Field Source Surface, PFSS) 假设在  $2.5 R_s$  处太阳风已经占主导地位, 磁场只有径向分量. PFSS 模型可以很方便地得到  $1.0\sim 2.5 R_s$  区域的磁场宏观结构, 其数据常作为太阳活动数值模拟的初始条件.

采用 WSO 网站提供的 CR2080 球谐函数系数, 通过级数展开的方法 [27], 将 PFSS 模型外推得到计算区域三维空间的磁场分布情况. 图 4 给出的是太阳表面磁场径向分量  $B_r$  的等值线, 本文模型在太阳表面  $1.0 R_s$  球面上以经度  $277^\circ$ , 纬度  $6^\circ\text{S}$  (NOAA 1012 活动区位置) 为中心, 引入压强脉冲 [16].

### 3 数值模拟结果

分析  $1.05 R_s$  太阳球面相对密度  $(\rho - \rho_0)/\rho_0$  的演化状况, 从 EUVI/STEREO-B  $195 \text{ \AA}$  的差分图像上看, EUV 波的亮环几乎以环形形式向外传播, 06:25 UT 以后亮环波前渐渐弥散, 亮环后紧跟的是大片的日冕暗化区, 即所谓的瞬时冕洞, 卫星观测图像分析的 EUV 波速度约  $247 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ . 将数值模拟结果与 EUVI/STEREO-B  $195 \text{ \AA}$  的差分图进行对比, 在亮环波前的位置, 传播速度两者符合得很好 (见图 5

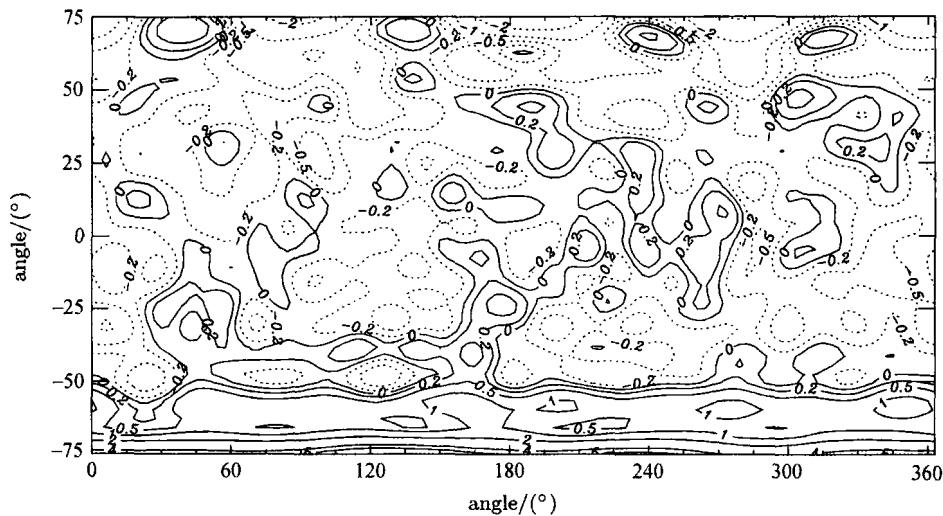


图 4 CR2080 太阳表面  $B_r$  等值线 (实线为  $B_r > 0$ , 虚线为  $B_r < 0$ , 数据来自 Stanford Wilcox Solar Observatory)  
 Fig. 4 Photospheric magnetogram synoptic map of Carrington Rotation 2080 on 13 February 2009  
 (data provided by Stanford Wilcox Solar Observatory)

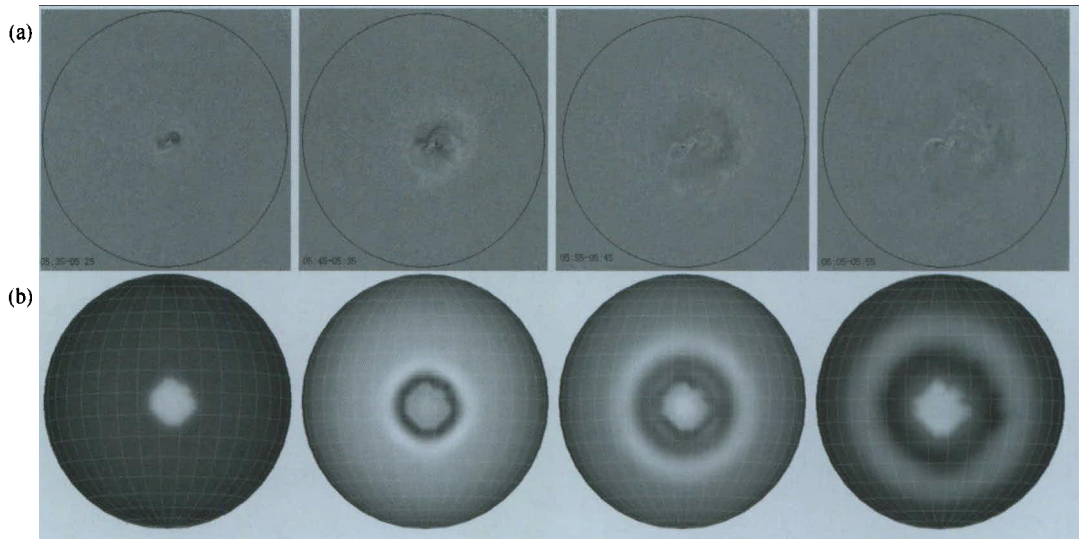


图5 (a)STEREO-B 星 EUVI 195 Å 的 EUV 波 05:35 UT—06:05 UT 差分图 (大致呈圆环状亮环结构), (b) 0.3  $T_A$ , 1.2  $T_A$ , 2.1  $T_A$ , 3.0  $T_A$  时刻, 数值模拟相对密度变化  $(\rho - \rho_0)/\rho_0$  结果 (计算结果与 EUVI 195 Å 图像相符)  
 Fig. 5 Comparison between the EUVI/STEREO-B 195 Å running-difference images of the EUV wave (a) and numerically simulated density-enhancement  $(\rho - \rho_0)/\rho_0$  images of the EUV wave (b) for four moments

和图 6). 通过计算得知, 该 EUV 波的传播速度略小于  $250 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 计算的  $1.05 R_s$  处阿尔芬波速度约为  $190 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 声速  $160 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\sqrt{v_A^2 + c_s^2} = 250 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ .

这里还给出了相对密度变化  $(\rho - \rho_0)/\rho_0$  在  $277^\circ$

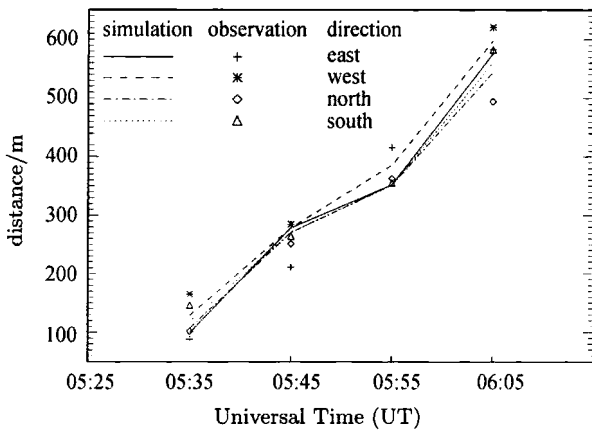


图6 卫星观测与数值模拟的 EUV 波波前位置-时间曲线 (数值模拟的波前位置密度提高 10%)  
 Fig. 6 Measured and numerically simulated distance-time curves of the EUV wave fronts (Numerically simulated wave fronts are identified by the 10% level of the density enhancement)

经线沿纬度的发展情况. 从图 7 可以清晰看出, 密度扰动从活动区向南北方向扩展. 图 8 表现了日冕等离子体在  $1.05 R_s$  太阳球面的投影速度随时间演化的过程, 绘出投影速度的等值线后发现其波前与相对密度变化的波前发展情况类似, 扰动基本是以活动区为中心向四周传播的.

### 4 结论

利用三维磁流体力学模型对 2009 年 2 月 13 日 05:35 UT 发生的一次 CME-EUV 波联合事件进行模拟, 并将模拟结果与 STEREO 卫星的观测图像进行对比, 由 EUVI/STEREO-B 195 Å 差分图像得出的 EUV 波前速度为  $247 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 综合东西南北四个方向数值模拟得到的 EUV 波速度平均约为  $245 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 两者差别很小. 分析此次事件, 可以认为其中的 EUV 波亮环波前运动符合日冕快磁声波特性, 考虑到该 CME 足点运动与 EUV 波传播在发展中明显不同 (CME 在日面的足点扩张几乎停滞), 与 EUV/EIT 波的伪波理论是矛盾的 [24]. 本文给出的模型不仅可以计算 EUV 波的传播速度, 也能反映 CME 爆发初期阶段的一些性质, 例如其足点向

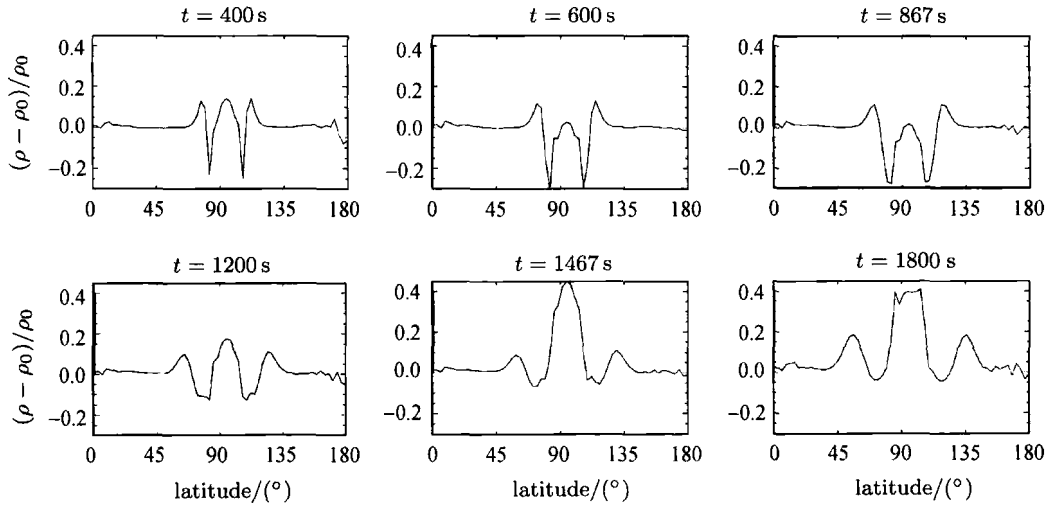


图 7 相对密度变化  $(\rho - \rho_0)/\rho_0$  在纬度方向随时间变化的系列结果 (经度  $277^\circ$ )

Fig. 7 Relative density  $(\rho - \rho_0)/\rho_0$  profiles at six moments at Carrington longitude  $277^\circ$

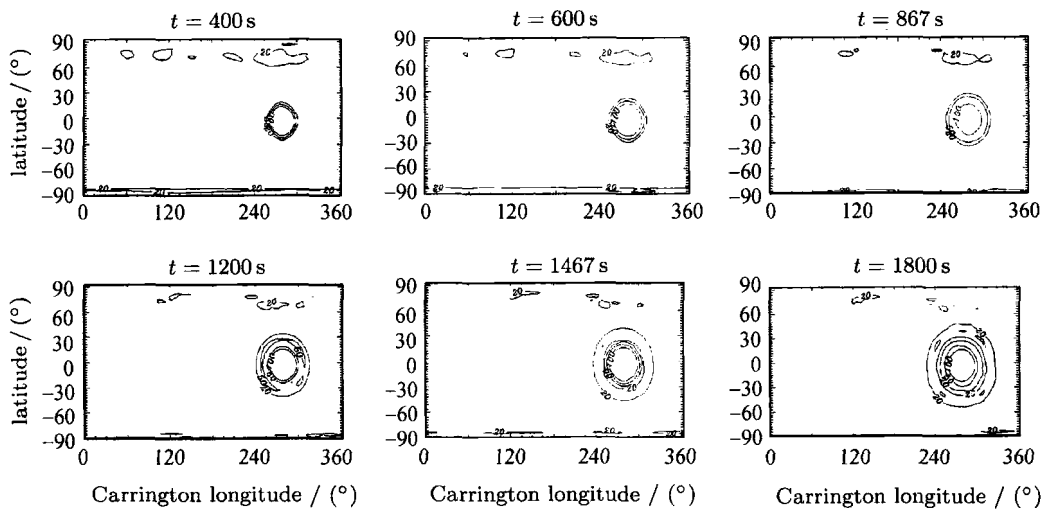


图 8  $1.05 R_s$  处等离子体流动投影速度等值线 ( $v = \sqrt{v_r^2 + v_\phi^2 + v_\theta^2}$ , 中心区域速度约  $200 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig. 8 Projected contours of plasma velocity  $v = \sqrt{v_r^2 + v_\phi^2 + v_\theta^2}$ , on the solar disk of  $1.05 R_s$ , and the center area velocity is  $200 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$

两侧扩张, 顶部白色亮环 (代表该区域等离子体密度增大) 的快速膨胀, 亮环之后存在一个暗腔 (代表密度下降) 等. 此次计算仅考虑了 05:35 UT–06:05 UT 的时间段, 此后, 从 EUVI 195 Å 差分图上看 EUV 波亮环波前在传播过程中逐渐耗散, 难以准确把握其位置. 本文对 2009 年 2 月 13 日 CME-EUV 波事件的计算结果与同样研究该事例的文献 [24,28] 结论基本一致, 说明本文所用模型在研究 EUV 波现象方面是比较成功的.

参考文献

- [1] Thompson B J, Plunkett S P, Gurman J B, et al. SOHO/EIT observations of an Earth-directed CME on May 12, 1997 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(14):2465
- [2] Moses D, Clette F, Delaboudiniere J P, et al. EIT observations of the Extreme Ultraviolet Sun [J]. *Solar Phys.*, 1997, **175**:571
- [3] Liu Kai. EUV Observation Research of Coronal Dimming Related Coronal Mass Ejections [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. In Chinese (刘凯).

- 与 CME 相关的日冕暗化的 EUV 观测研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009)
- [4] Ren Dongbai. The Eruption of a Small Filament in the Quiet Sun [D]. Kunming: Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2008. In Chinese (任冬柏. 暗条爆发及其相关耀斑和日冕 dimming 的观测研究 [D]. 昆明: 中国科学院云南天文台, 2008)
- [5] Klassen A, Aurass H, Mann G, *et al.* Catalogue of the 1997 SOHO-EIT coronal transient waves associated type II radio burst spectra [J]. *Astron. Astrophys.*, 2000, **141**(Supp.):357
- [6] Thompson B J, Reynolds B, Aurass H, Gopalswamy N, Gurman J B, Hudson H S, *et al.* Observations of the 24 September 1997 coronal flare waves [J]. *Solar Phys.*, 2000, **193**(1/2):161-180
- [7] Astrid M. Veronig, Manuela Temmer, Bojan Vrsnak, High-cadence observations of a global coronal wave by STEREO EUVI [J]. *Astrophys. J.*, 2008, **681**, L113
- [8] Long David M, Gallagher Peter T, James McAteer R T, Bloomeld D Shaun. Deceleration and dispersion of large-scale coronal bright fronts [J]. *Astron. Astrophys.*, 2011, arXiv:1104.4334v1
- [9] Long D M, Gallagher P T, McAteer R T J, Bloomeld D S. The kinematics of a globally propagating disturbance in the solar corona [J]. *Astrophys. J.*, 2008, **680**, L81
- [10] Ma S, Wills-Davey M J, Lin J, Chen P F, Attrill G D R, Chen H, Zhao S, Li Q, Golub L. A new view of coronal waves from STEREO [J]. *Astrophys. J.*, 2009, **707**:503
- [11] Kienreich I W, Temmer M, Veronig A M. STEREO quadrature observations of the three-dimensional structure and driver of a global coronal wave [J]. *Astrophys. J.*, 2009, **703**, L118
- [12] Attrill Gemma D R, Alexander J Engell, Meredith J Wills-Davey, Paolo Grigis, Paola Testa. HINODE/XRT and STEREO observations of a diffuse coronal "wave" — coronal mass ejection dimming event [J]. *Astrophys. J.*, 2009, **704**:1296
- [13] Patsourakos S, Vourlidas A, Wang Y M, Stenborg G, Thernisien A. What is the nature of EUV waves? First STEREO 3D observations and comparison with theoretical models [J]. *Solar Physics*, 2009, **259**(1/2):49-71
- [14] Thompson B J, Gurman J B, Neupert W M, *et al.* SOHO/EIT observations of the 1997 April 7 coronal transient: Possible evidence of coronal moreton waves [J]. *Astrophys. J.*, 1999, **517**:151-154
- [15] Wang Y M. EIT waves and fast-mode propagation in the solar corona [J]. *Astrophys. J.*, 2000, **543**:L89-L93
- [16] Wu S T, Zheng Huinan, Wang S, *et al.* Three-dimensional numerical simulation of MHD waves observed by the Extreme Ultraviolet Imaging Telescope [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A11):25 089-25 102
- [17] Zheng H N, Zhang Y Y, Wang S, Wang C B, Li B. Propagation of fast magneto-acoustic waves in stratified solar atmosphere [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(2):399-402
- [18] Wang Hongjuan, Shen Chengcai, Lin Jun. Numerical experiments of wave-like phenomena caused by the disruption of an unstable magnetic configuration [J]. *Astrophys. J.*, 2009, **700**, 1716
- [19] Wills-Davey M J, DeForest C E, Steno J O. Are "EIT waves" fast-mode MHD waves [J]. *Astrophys. J.*, 2007, **664**:556-562
- [20] Chen P F, Wu S T, Shibata K, *et al.* Evidence of EIT and Moreton waves in numerical simulations [J]. *Astrophys. J.*, 2002, **572**:L99-L102
- [21] Chen P F, Fang C, Shibata K. A full view of EIT waves [J]. *Astrophys. J.*, 2005, **622**:1202-1210
- [22] Chen P F. EIT waves and coronal magnetic field diagnostics [J]. *Sci. China: G*, 2009, **52**(11):1785-1789
- [23] Harra L K, Sterling C. Imaging and spectroscopic investigations of a solar coronal wave: Properties of the wave front and associated erupting material [J]. *Astrophys. J.*, 2003, **587**:1429
- [24] Patsourakos S, Vourlidas A, *et al.* "Extreme ultraviolet waves" are waves: First quadrature observations of an extreme ultraviolet wave from STEREO [J]. *Astrophys. J.*, 2009, **700**:L182-L186
- [25] Han S M, Wu S T, Dryer M. A three-dimensional, time-dependent numerical modeling of super-sonic, super-Alfvenic MHD flow [J]. *Comp. Fluids*, 1988, **16**(1):81-103
- [26] Altschuler M D, Gordon N J R. Magnetic fields and the structure of the solar corona I: methods of calculating corona fields [J]. *Solar Phys.*, 1969, **9**(1):131-149
- [27] Kazuyuki Hakamada. A simple method to compute spherical harmonic coefficients for the potential model of the coronal magnetic field [J]. *Solar Phys.*, 1995, **159**(1):89-96
- [28] Cohen O, Attrill G D R, Manchester IV W B, *et al.* Numerical simulation of an EUV coronal wave based on the February 13, 2009 CME event observed by STEREO [J]. *Astrophys. J.*, 2009, **705**(1):587