

基于 AWSoM+FGL 的日冕物质抛射行星际传播模拟

戴幸华

(山西师范大学物理与电子工程学院 太原 030031)

摘要 日冕物质抛射 (Coronal Mass Ejections, CMEs) 是影响空间天气的重要因素。为了预测其到达地球的时间和对地效应, 需要准确的背景太阳风模拟和 CMEs 三维重构。本文选取发生在 2014 年 1 月 7 日的一个 CME 事件, 使用 AWSoM (Alfvén Wave Solar atmosphere Model) 的稳态 (Steady state) 模式分别模拟了基于 GONG 和 ADAPT-GONG 磁图的包含日冕和内日球层的两种背景太阳风, 使用 FGL (Fitting of Gibson-Low) 重构了基于 SOHO、STEREO-A 和 STEREO-B 三个观测视角的 CME 三维速度、密度、压强和磁场。将重构所得三维 CME 插入到稳态背景日冕, 使用 AWSoM 的 Time accurate 模式计算了 CME 从日冕到地球的行星际传播过程。基于两种背景太阳风计算的 CME 到达地球时间相对于实测时间的误差都在一小时以内, 验证了 AWSoM+FGL 的有效性。

关键词 日冕物质抛射, 太阳风, 空间天气, 数值模拟, 三维重构
中图分类号 P353

Simulating Interplanetary Propagation of a Coronal Mass Ejection Based on AWSoM+FGL

DAI Xinghua

(School of Physics and Electronic Engineering, Shanxi Normal University,
Taiyuan 030031)

Abstract Coronal Mass Ejections (CMEs) are an important factor influencing space weather. To predict their arrival time at Earth and their geoeffective impact, accurate background solar wind simulations and three-dimensional reconstructions of CMEs are required. This paper selects a CME event that occurred on January 7, 2014. Using the steady-state mode of the Alfvén Wave Solar atmosphere Model (AWSoM), two background solar wind scenarios—incorporating the corona and inner heliosphere—were simulated based on GONG and ADAPT-GONG magnetograms, respectively. The three-dimensional velocity, density, pressure, and

* 基金项目: 国家自然科学基金 (11603040, 11973058)

投稿日期: 2026-03-09

E-mail: xinghua.dai@outlook.com

magnetic field of the CME were reconstructed using the Fitting of Gibson–Low (FGL) method, based on observations from three vantage points: SOHO, STEREO-A, and STEREO-B. The reconstructed three-dimensional CME was then inserted into the steady-state background corona, and the interplanetary propagation process of the CME from the corona to Earth was computed using the time-accurate mode of AWSoM. The errors between the CME arrival times at Earth calculated using the two background solar wind scenarios and the actual measured times were both within one hour, validating the effectiveness of the AWSoM+FGL approach.

Key words Coronal mass ejections, Solar wind, Space weather, Numerical simulation, Three-dimensional reconstruction

0 引言

日冕物质抛射^[1](Coronal Mass Ejections, CMEs)是太阳大气中磁化等离子体的剧烈爆发现象,可能产生显著的地磁暴及高能粒子事件^[2],是影响空间天气的重要因素。为了预测 CMEs 的到达时间及其对地效应,研究者提出了不同类型的 CME 预报方法^{[3],[4]},包括经验模型、机器学习及物理模型等。

物理模型通过求解描述 CMEs 传播的动力学方程或方程组,得到解析解或数值解。其中,磁流体力学模型因其完备性,被认为能较好描述 CMEs 的演化过程,但是由于结构复杂,一般情况下无法解析求解,只能数值求解^[5]。求解过程包括背景太阳风的计算^{[6],[7]}, CME 的三维重构^{[8]-[11]},以及 CME 在背景太阳风中的传播。WSA-ENLIL+Cone 模型^{[12]-[15]}被广泛用于 CME 的业务预报^[16],其中太阳风速度的计算使用了磁流管的膨胀因子以及开放磁场足点与临近冕洞边界的角距离,是一个经验关系。CME 的三维重构则使用了圆锥模型^[15](Cone),其中只有等离子体而没有磁场分布。

AWSoM (Alfvén Wave Solar atmosphere Model)^[17]对太阳风速度的计算没有使用前述的经验关系,而是基于阿尔芬波湍流对太阳风的加热和加速机制。AWSoM 是 SWMF (Space Weather Modeling Framework)^[18]的一部分,是 SC (Solar Corona) 模块的核心,被广泛用于日冕和日球层的数值模拟^{[19]-[23]}。SWMF 中的 IH (Inner Heliosphere) 模块与 SC 模块经过耦合,可以得到从太阳表面到内日球层的背景太阳风分布。Jin 等^[24]使用 AWSoM 和 EEGGL (Eruptive Event Generator using Gibson–Low configuration)^[25]模拟了产生于 2011 年 3 月 7 日的 CME 在行星际空间的传播。其中的 EEGGL 使用了 Gibson–Low 解析解^[26],包含了 CME 内部磁场的分布。FGL (Fitting of Gibson–Low)^[27]将 Gibson–Low 解析解直接应用到 CME 的正向重构,得到了 CME 的速度、密度、磁场和压力的自相似解。对于发生在 2011 年 3 月 7 日的 CME, Dai^[28]将 FGL 重构所得结果插入到 AWSoM 得到的背景太阳风之中,模拟结果与实际观测有较好的吻合,验证了 AWSoM+FGL 的有效性。

本文基于 AWSoM+FGL,使用 GONG (Global Oscillation Network Group) 和 ADAPT (Air Force Data Assimilative Photospheric flux Transport^{[29][30]})-GONG 两种类型的全日面综合磁图,选取发生在 2014 年 1 月 7 日的典型非径向 CME 事件,模拟了 CME 的行星际传播,通过与 ACE 卫星的就地 (in situ) 测量数据进行对比,进一步验证了 AWSoM+FGL 模拟结果的有效性。

1 研究方法

1.1 AWSoM

不同于被广泛使用的 WSA^{[12],[13]}算法, AWSoM^[17]中太阳风的加热和加速主要由阿尔芬波湍流的传播、耗散和反射机制完成, 其控制方程为

$$\frac{\partial \omega_{\pm}}{\partial t} + \nabla \cdot [(\mathbf{u} \pm \mathbf{V}_A)\omega_{\pm}] + \frac{\omega_{\pm}}{2}(\nabla \cdot \mathbf{u}) = -\Gamma_{\pm}\omega_{\pm} \mp \mathcal{R}\sqrt{\omega_{-}\omega_{+}}, \quad (1)$$

其中 $\omega_{\pm} = \rho z_{\pm}^2/4$ 是阿尔芬波湍流能量密度, +号代表正向传播, -号代表反向传播。 $\mathbf{z}_{\pm}$ 是Elsässer变量, 等于 $\delta \mathbf{u} \mp \delta \mathbf{B}/\sqrt{\mu_0 \rho}$, $\delta \mathbf{u}$ 和 $\delta \mathbf{B}$ 是湍流的速度和磁场。 $\Gamma_{\pm} = \frac{2}{L_{\perp}} \sqrt{\frac{\omega_{\mp}}{\rho}}$ 是耗散率, $L_{\perp}$ 是阿尔芬波横向相关长度, ρ 是质量密度。 $\mathcal{R}$ 是反射系数, $\mathbf{V}_A$ 是阿尔芬速度。求解方程(1)

可以得到 $\omega_{\pm}$, 从而进一步得到用于加速太阳风的阿尔芬压强 $P_A = \frac{\omega_{+} + \omega_{-}}{2}$, 以及用于加热离

子的能量 $Q_i = f_p(\Gamma_{-}\omega_{-} + \Gamma_{+}\omega_{+})$ 和用于加热电子的能量 $Q_e = (1 - f_p)(\Gamma_{-}\omega_{-} + \Gamma_{+}\omega_{+})$, f_p 的大小在0和1之间。

为了提高AWSoM的计算效率, Sokolov等^[31]提出了TFLM(Threaded-Field-Line Model)模型。该模型假设在色球和低日冕区域($1.0 \sim 1.1R_{\odot}$)的磁场是势场, 从而将三维问题转换为一维问题。本文使用经过TFLM加速后的AWSoM, 即AWSoM-Realtime (AWSoM-R), 来模拟背景太阳风的三维分布。

1.2 FGL

FGL^[27]属于正向重构(Forward Modeling), 需要调整模型参数以更好地拟合观测图像。相比于传统的正向重构, 如Cone^[15]及GCS(Graduated Cylindrical Shell)^[32], FGL最大的不同之处是其重构结果既有等离子体也有磁场。FGL使用的Gibson-Low模型^[26]中包含参数 r_0 , r_1 和 a , 其中 r_0 是球状轴对称磁静力学系统的半径, r_1 是磁静力学系统球心到太阳中心的距离, a 是磁静力学系统沿径向的收缩距离。FGL引入参数 τ 来拟合CME的观测图像以确定前述三个参数的合适值, 即

$$r_0 \rightarrow \tau \times r_0, r_1 \rightarrow \tau \times r_1, a \rightarrow \tau \times a. \quad (2)$$

τ 的实际值 τ_{cme} 由速度的比值决定, 即

$$\tau_{cme} = \frac{u_{cme}}{u_{fr}} \tau_{fr}, \quad (3)$$

其中 τ_{fr} 是 τ 的初始值, u_{cme} 和 u_{fr} 分别是CME速度的实测值和初始值。FGL还通过质量的比值确定了Gibson-Low模型中的另外一个参数 a_1 , 即

$$a_{1cme} = a_{1fr} \sqrt{\frac{M_{cme}}{M_{fr}}}, \quad (4)$$

其中 a_{1cme} 是 a_1 的实际值, a_{1fr} 为初始值, M_{cme} 和 M_{fr} 分别是CME质量的实测值和初始值。 a_1 决定了CME的磁场、等离子体密度和压力, 是非常重要的一个参数, 公式(4)通过质量比值的平方根直接计算出 a_1 的合适值, 不同于以往的研究中需要使用参数之间的经验关系。详细推导过程可参考Dai^[27]。

2 研究结果

为了模拟2014年1月7日CME的行星际传播, 本文使用SWMF中的SC和IH模块分别计算色球及日冕区域($1 \sim 24R_{\odot}$)和内日球层区域($18 \sim 240R_{\odot}$)的物理状态, 生成CME传播需要的背景太阳风。SC的内边界由GONG或者ADAPT-GONG的全日面综合磁图提供, IH的内边界由SC提供, 耦合范围是 $18 \sim 20R_{\odot}$ 。其余参数以及网格设置可以参考Dai^[28]。

2.1 背景太阳风

全日面综合磁图是决定模拟所得背景太阳风的核心观测数据，通过坡印廷通量参数 PFP (Poynting flux parameter) 转化为 AWSoM 的内边界。 PFP ，即 $\left(\frac{S_A}{B}\right)_\odot$ ，是日面的坡印廷通量 S_A 和综合磁图中磁场 B 的比值。作为可调自由参数， PFP 的取值会显著影响模拟结果，是 AWSoM 中极为重要的一个参数。

Huang 等^[33]使用 ADAPT-GONG 综合磁图作为 AWSoM 的输入，研究了第 24 太阳活动周期间涵盖低年和峰年等不同阶段 PFP 取值和日面磁场分布之间的联系，得到了定量的经验关系式，即

$$PFP = 0.42 \cdot A + 0.02 \pm 0.11 \quad (5)$$

和

$$PFP = -0.07 \cdot B + 1.29 \pm 0.16, \quad (6)$$

其中 A 是开放磁场区域的面积， B 是开放场中无符号径向磁场分量的平均值。 PFP 与 A 的 Spearman 相关系数为 0.96，与 B 的 Spearman 相关系数为 -0.91。Huang 等^[34]使用 GONG 综合磁图得到了相似的公式，即

$$PFP = 0.42 \cdot A + 0.07 \pm 0.17 \quad (7)$$

和

$$PFP = -0.1 \cdot B + 1.57 \pm 0.21, \quad (8)$$

其中 PFP 与 A 的 Spearman 相关系数为 0.75，与 B 的 Spearman 相关系数为 -0.79。上述公式表明，不管使用 ADAPT-GONG 还是 GONG 综合磁图， PFP 都与 A 成线性正相关，都与 B 成线性负相关。因此，在太阳活动峰年， A 小， PFP 也小；在太阳活动低年， A 大， PFP 也大。 PFP 的取值范围大致在 0.1 到 1.2 $\text{MWm}^{-2} \text{T}^{-1}$ 之间。

为了对比不同磁图的模拟结果，本文使用了第 2145 卡林顿周 (Carrington Rotations) 的 GONG 和 ADAPT-GONG 两种综合磁图，如图 1 所示。图 2 和图 3 是使用两种磁图作为 AWSoM 的输入，经过 SC 和 IH 耦合得到的背景太阳风。两种磁图使用的 PFP 值并不相等，使用 GONG 时 PFP 取 0.33，使用 ADAPT-GONG 时 PFP 取 0.21。 PFP 的两个取值保证了两种磁图各自模拟所得太阳风的速度、密度、温度和磁场的总体分布在 2013 年 12 月 11 日 07:08 至 2014 年 1 月 7 日 19:08 期间 (27.5 天) 与 ACE 的实测值有较好的吻合，如图 2 和图 3 的第三列所示。2145 卡林顿周位于第 24 太阳活动周的峰年，因此 PFP 取值偏小，与 Huang 等^[33]和 Huang 等^[34]的结论一致。图 1 所示两种磁图的磁场分布不一样，模拟得到的太阳风结构也有区别。图 2 和图 3 的第一和第二列展示了 2013 年 12 月 11 日 07:08 太阳赤道面和地球所在太阳子午面的太阳风二维截面图，其中第一行的速度分布存在明显差异。根据第三列模拟值与实测值的对比，使用 ADAPT-GONG 得到的速度分布更接近实测值。为了更定量地对比模拟值与实测值，我们计算了皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coefficient, PCC) 和平均绝对百分比误差 (Mean Absolute Percentage Error, $MAPE$)，即

$$PCC = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

和

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_i - y_i|}{|x_i|} \times 100\%, \quad (10)$$

其中 x 是实测值， y 是模拟值， N 是数据点的个数。 PCC 用于衡量曲线的变化趋势或者形状相似度，模拟曲线和实测曲线越接近同升或者同降， PCC 的值就越接近 1。 $MAPE$ 用于衡量曲线的绝对距离，模拟曲线越接近实测曲线， $MAPE$ 的值就越接近 0。 PCC 不考虑曲线的绝对距离，只评价形状相似度； $MAPE$ 不考虑曲线的形状相似度，只评价绝对距离。表 1 给出了速度、质子数密度、质子温度和磁场的 PCC 和 $MAPE$ 数值。CR-GONG 和 CR-ADAPT 两

行分别是使用图 2 和图 3 第三列数据得到的结果，其中速度的模拟曲线最接近实测曲线， PCC 值分别为 0.274 和 0.295。观察图 2 和图 3 的第三列可知，模拟曲线相对于实测曲线存在整体的时间偏移，其中图 2 第三列的模拟曲线右移 7 天，图 3 第三列的模拟曲线左移 2.75 天，可以得到表 1 中 CR-GONG(+7)和 CR-ADAPT(-2.75)两行的 PCC 和 $MAPE$ 数值。平移后的速度曲线 PCC 值分别变为 0.910 和 0.583，相对于实测曲线的相似度都得到了显著提升。CR-GONG(+7)的速度相似度提升更为显著，从 0.274 变为 0.910，但是并不表明 GONG 磁图的效果更好，原因是时间平移量过大（右移 7 天）。而 CR-ADAPT(-2.75)的 PCC 值从 0.295 变为 0.583，只需要左移 2.75 天。此外，平移前的 CR-ADAPT 速度 PCC 值 (0.295) 和 $MAPE$ 值 (15.9) 也优于平移前的 CR-GONG 速度 PCC 值 (0.274) 和 $MAPE$ 值 (32.7)。综上所述，我们认为 ADAPT-GONG 得到的速度分布更接近实测值。

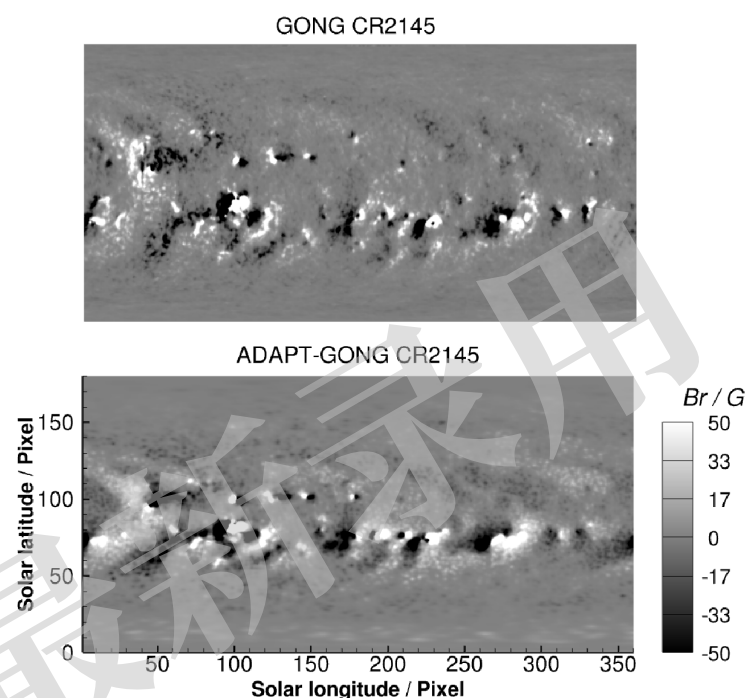


图 1 GONG (2014-01-07T20:04, 2145.39) 和 ADAPT-GONG (2014-01-07T20:00, 2145.50) 综合磁图。为了清晰显示磁场的整体分布，磁场饱和值的最大和最小值分别设为 +50 和 -50 高斯。

Fig. 1 GONG (2014-01-07T20:04, 2145.39) and ADAPT-GONG (2014-01-07T20:00, 2145.50) composite magnetograms. To clearly display the overall distribution of the magnetic field, the maximum and minimum saturation values for the magnetic field are set to +50 and -50 Gauss, respectively.

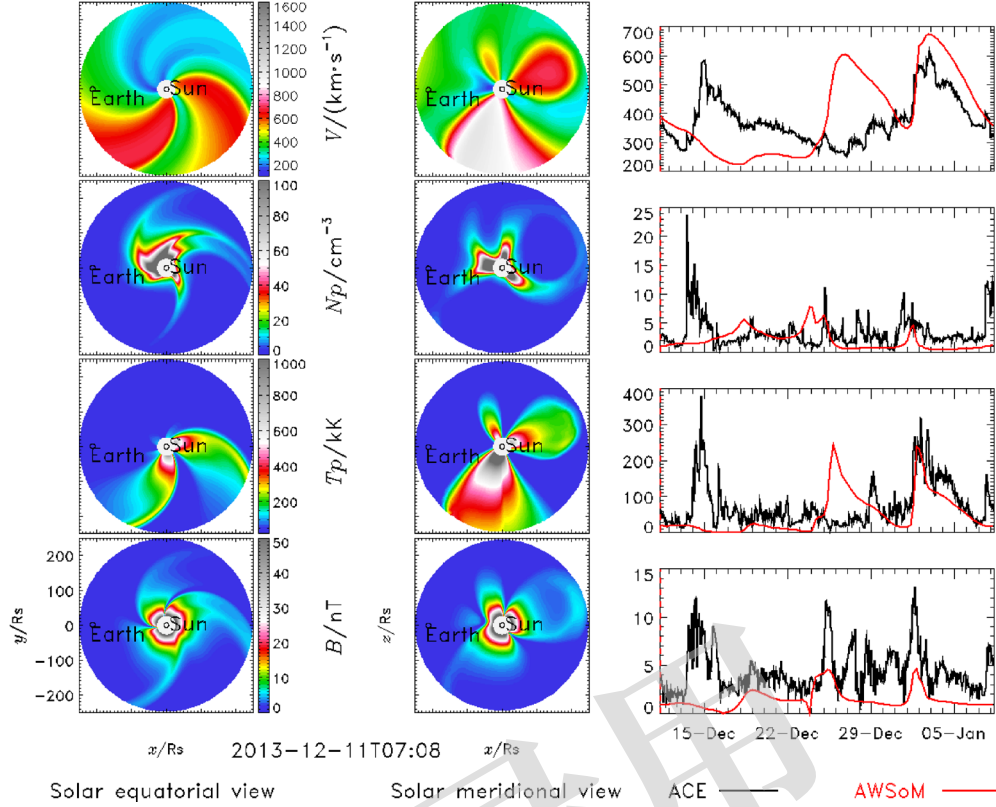


图 2 使用 GONG 磁图作为 AWSOM 输入模拟所得的背景太阳风, $PFP=0.33$ 。第一行: 速度; 第二行: 质子数密度; 第三行: 质子温度; 第四行: 磁场。第一列: 2013 年 12 月 11 日 07:08 太阳赤道面; 第二列: 2013 年 12 月 11 日 07:08 地球所在太阳子午面; 第三列: 2013 年 12 月 11 日 07:08 至 2014 年 1 月 7 日 19:08 地球附近磁场分布, 黑色曲线是 ACE 卫星的实测值, 红色曲线是 AWSOM 在地球位置的模拟结果。第三列的横坐标刻度间隔是一天。

Fig. 2 Background solar wind simulation using the GONG magnetogram as input for AWSOM, with $PFP = 0.33$. First row: velocity; second row: proton number density; third row: proton temperature; fourth row: magnetic field. First column: solar equatorial plane on January 7, 2014, 19:08; second column: solar meridian plane containing Earth on January 7, 2014, 19:08; third column: magnetic field distribution near Earth from December 11, 2013, 07:08 to January 7, 2014, 19:08. The black curve represents the measured values from the ACE satellite, and the red curve represents the simulation results from AWSOM at Earth's location. The tick interval on the third column's horizontal axis is one day.

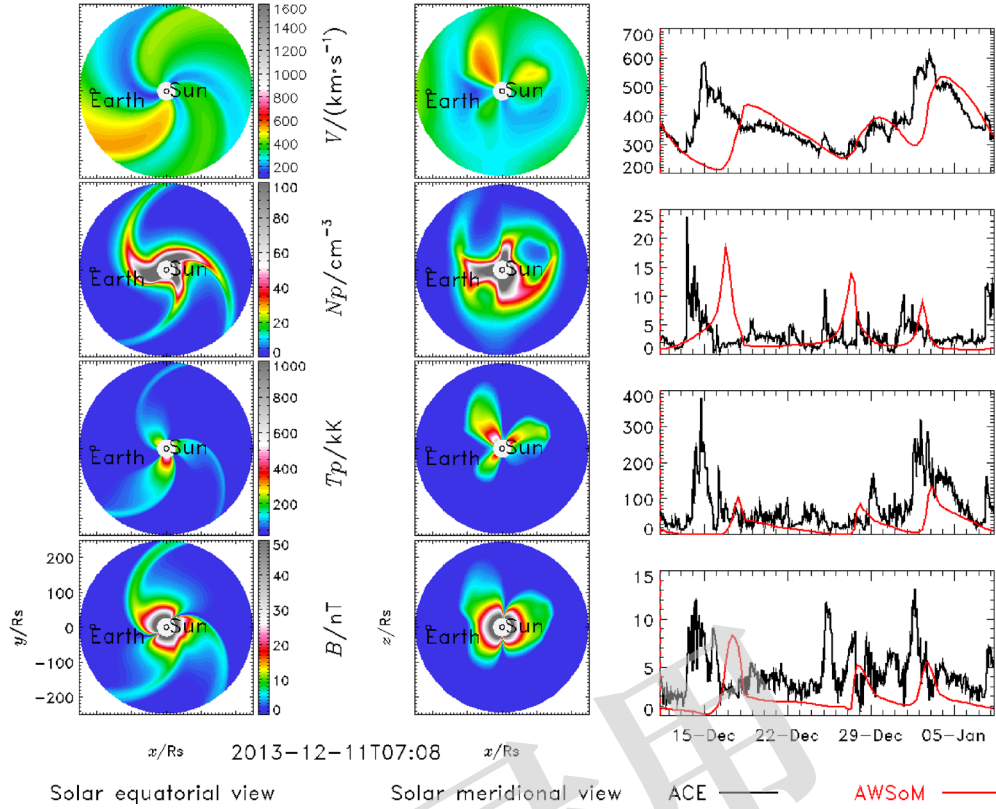


图 3 使用 ADAPT-GONG 磁图作为 AWSoM 输入模拟所得的背景太阳风, $PFP=0.21$ 。第一行: 速度; 第二行: 质子数密度; 第三行: 质子温度; 第四行: 磁场。第一列: 2013 年 12 月 11 日 07:08 太阳赤道面; 第二列: 2013 年 12 月 11 日 07:08 地球所在太阳子午面; 第三列: 2013 年 12 月 11 日 07:08 至 2014 年 1 月 7 日 19:08 地球附近磁场分布, 黑色曲线是 ACE 卫星的实测值, 红色曲线是 AWSoM 在地球位置的模拟结果。第三列的横坐标刻度间隔是一天。

Fig. 3 Background solar wind simulated using the ADAPT-GONG magnetogram as input for AWSoM, with $PFP = 0.21$. First row: velocity; second row: proton number density; third row: proton temperature; fourth row: magnetic field. First column: solar equatorial plane at 07:08 on December 11, 2013; second column: solar meridian plane containing Earth at 07:08 on December 11, 2013; third column: magnetic field distribution near Earth from 07:08 on December 11, 2013 to 19:08 on January 7, 2014. The black curve represents the measured values from the ACE satellite, and the red curve represents the simulation results from AWSoM at Earth's location. The tick interval on the third column's horizontal axis is one day.

表 1 基于 GONG 和 ADAPT-GONG 两种磁图的 PCC 和 $MAPE$
Table 1: PCC and $MAPE$ based on GONG and ADAPT-GONG magnetograms

	V	N_p	T_p	B
	$PCC, MAPE$	$PCC, MAPE$	$PCC, MAPE$	$PCC, MAPE$
CR-GONG	0.274, 32.7	-0.0965, 86.8	0.242, 109.1	0.325, 64.1
CR-ADAPT	0.295, 15.9	-0.0880, 132.6	0.233, 70.1	-0.207, 80.6
CR-GONG(+7)	0.910, 13.9	0.0857, 102.5	0.798, 54.0	0.424, 73.1
CR-ADAPT(-2.75)	0.583, 17.8	0.265, 138.0	0.327, 77.1	0.612, 61.3

2.2 CME 三维重构

FGL 属于正向重构, 需要以 GL 解析模型拟合日冕仪的 CME 图像。不同的观测视角越多, 约束条件越充分, 重构越准确。本文选取发生在 2014 年 1 月 7 日的一个 CME, SOHO/C3、STEREO-A/COR2 和 STEREO-B/COR2 三个不同视角的日冕仪对其均有观测, 如图 4 所示。该时段 STEREO-A、STEREO-B 和地球的日球经度 (heliospheric longitude) 分别为 151、-153 和 0 度, 与太阳的距离分别为 0.96、1.09 和 0.98 天文单位。

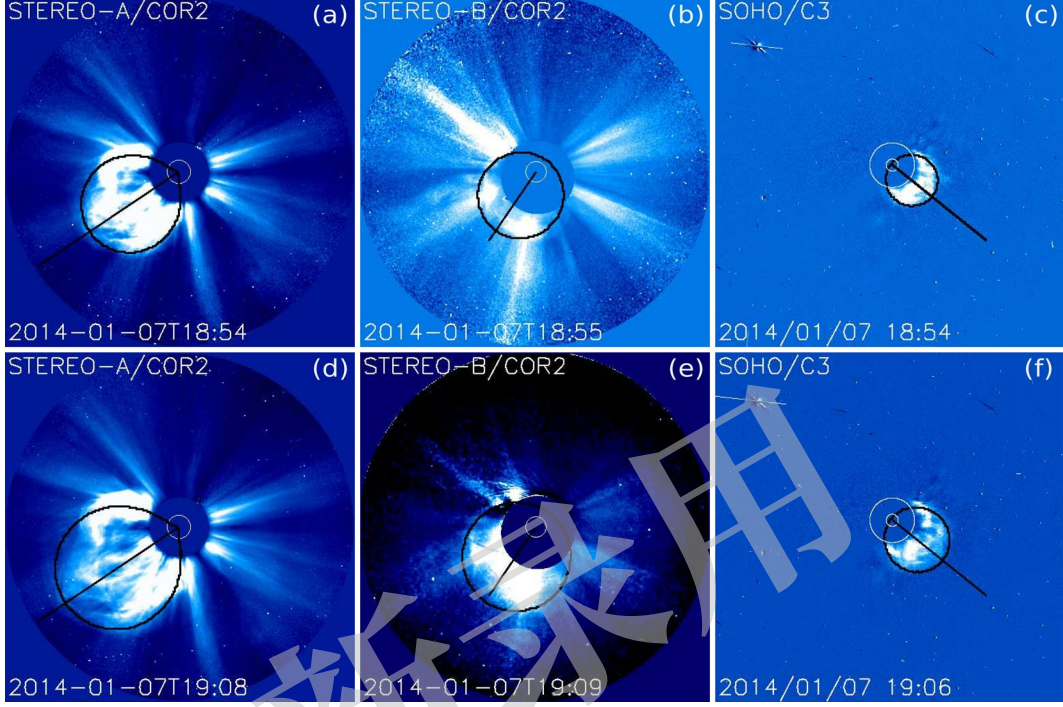


图 4 发生在 2014 年 1 月 7 日的一个 CME。第一列: STEREO-A/COR2 日冕仪观测图; 第二列: STEREO-B/COR2 观测图; 第三列: SOHO/C3 观测图。各个日冕图上叠加了 FGL 重构 CME 的黑色轮廓以及 CME 的主攻方向。

Fig. 4 A CME that occurred on January 7, 2014. First column: STEREO-A/COR2 coronagraph observation image; second column: STEREO-B/COR2 observation image; third column: SOHO/C3 observation image. The black contour of the FGL-reconstructed CME and its main propagation direction are overlaid on each coronagraph image.

FGL 通过调整 r_0 , r_1 和 a 三个参数以及主攻方向经纬度和前沿速度, 给出了最终重构所得 CME 的轮廓及其主攻方向, 如图 4 所示。 τ_{fr} 、 u_{fr} 和 u_{cme} 的数值分别为 1.2、1148 km·s⁻¹ 和 2036 km·s⁻¹, 由公式 (3) 可得 τ_{cme} 的数值为 2.13。 u_{cme} 通过拟合重构 CME 和实测 CME 的前沿而得到。 r_0 、 r_1 和 a 的初始值分别为 2.5、3.0 和 0.5 $R_\odot$, 由公式 (2) 可得 r_0 、 r_1 和 a 的最终值分别为 5.32、6.38 和 1.06 $R_\odot$ 。

重构所得 CME 主攻方向的日球经纬度为 W48S33, 其日面投影位置以白色菱形标记在图 5 第一行的 HMI 磁图和 AIA 极紫外图中。CME 源区产生了一个 X1.2 级耀斑, 峰值时间是 18:32 UT, 中心经纬度为 W08S12, 其位置以白色三角形标记。对比 CME 的主攻方向和源区位置, 两者的经纬度分别相差了 40 和 21 度, 可知该 CME 是一个典型的非径向传播事件, 与 Mostl 等^[35]及 Wang 等^[36]的研究结果一致。

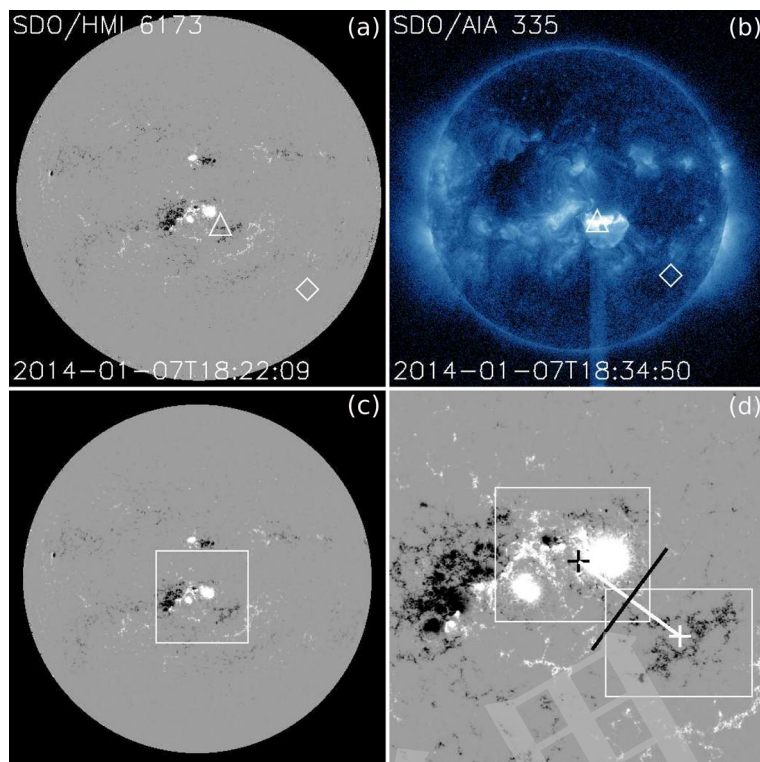


图 5 2014 年 1 月 7 日 CME 源区观测。(a) SDO/HMI 磁场观测；(b) SDO/AIA 极紫外观测。三角形标记了源区发生的 X1.2 级耀斑位置，菱形标记了重构 CME 主攻方向的日面径向投影位置。(c) 正方形标记出的源区；(d) 在放大后的源区上确定 GL 模型的对称轴方向（黑色粗直线）。

Fig. 5 Observations of the source region of the CME on January 7, 2014. Top left: SDO/HMI magnetic field observation; top right: SDO/AIA EUV observation. The triangle marks the location of the X1.2-class flare that occurred in the source region, and the diamond marks the radial projection position of the reconstructed CME on the solar disk.

Bottom left: the source region marked by a square; bottom right: the direction of the symmetry axis of the GL model (thick black straight line) determined on the enlarged source region.

确定了重构 CME 的主攻方向和轮廓两个几何特性以及速度之后, FGL 需要进一步确定影响磁场的关键参数 a_1 及对称轴方向。使用 SolarSoft 的 `scc_calc_cme_mass.pro` 程序计算图 4 (d) 中的实测 CME 亮度对应的质量 M_{cme} , 大小为 0.66×10^{16} 克。重构 CME 的 a_{1fr} 初始值为 0.001, 可计算对应的投影亮度, 并使用 `scc_calc_cme_mass.pro` 程序计算该投影亮度对应的质量 M_{fr} , 大小为 1.27×10^{16} 克。由公式 (4) 可得 a_{1cme} 的最终值为 0.0014。GL 模型中磁静力学系统的对称轴方向如图 5 (d) 中的黑色直线所示, 与太阳赤道的夹角大小为 126 度。

2.3 CME 传播

SWMF 中 steady-state (稳态) 模式的 SC 与 IH 耦合后生成背景太阳风, FGL 重构得到包含速度、密度、压力和磁场的三维 CME。将重构所得 CME 插入到稳态 SC 模块, 运行 time-accurate 模式的 SC 与 IH, 当 CME 从 SC 完全进入 IH 后, 解除耦合并关闭 SC, 继续运行 IH, 即可得到 CME 在日冕及内日球层的演化过程。

使用 GONG 和 ADAPT-GONG 两种磁图生成的背景太阳风有两种, 对应的 CME 传播过程也有两种, 如图 6 和图 7 的第一和第二列所示, 此时 CME 自插入 SC 模块之后传播了 24

个小时, 在第三列的四个子图中以竖直方向的虚线标记对应的时刻, 即 2014 年 1 月 8 日 19:08, 并显示在第一和第二列的底部。此时, 两种背景太阳风模拟所得的 CME 对应激波尚未到达地球。对比两图可知, 由于背景太阳风不一样, 同一个初始 CME 传播到同一时刻具有不同的形态。图 6 中的 CME 在主攻方向上比图 7 中的 CME 要传播的更快, 原因是该主攻方向上图 6 的背景太阳风速度明显快于图 7 的背景太阳风速度。

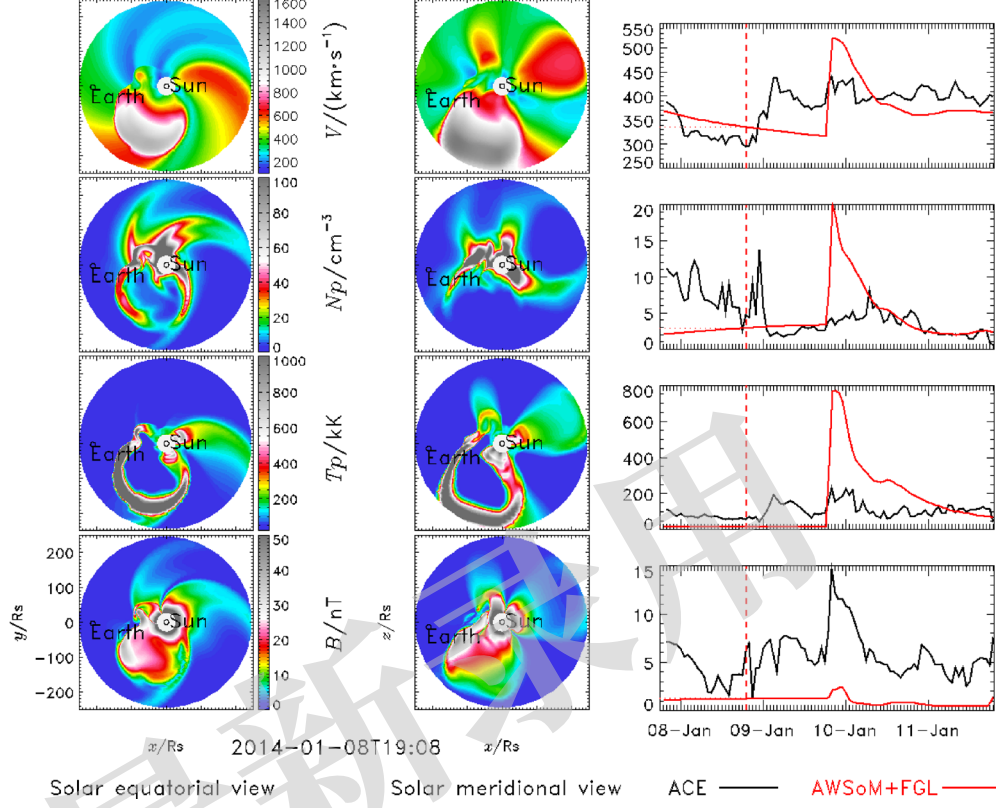


图 6 CME 在 GONG 磁图生成的背景太阳风中演化。第一和第二列展示了 CME 插入 SC 模块之后 24 小时 (2014 年 1 月 8 日 19:08) 的截面图, 第三列中红色竖直虚线的横坐标是第一和第二列对应的时间。第三列的横坐标刻度间隔是一小时。

Fig. 6 The evolution of the CME in the background solar wind generated from the GONG magnetogram. The first and second columns show cross-sectional views at 24 hours after the CME was inserted into the SC module (January 8, 2014, 19:08). The horizontal coordinate of the red vertical dashed line in the third column corresponds to the time of the first and second columns. The tick interval on the third column's horizontal axis is one hour.

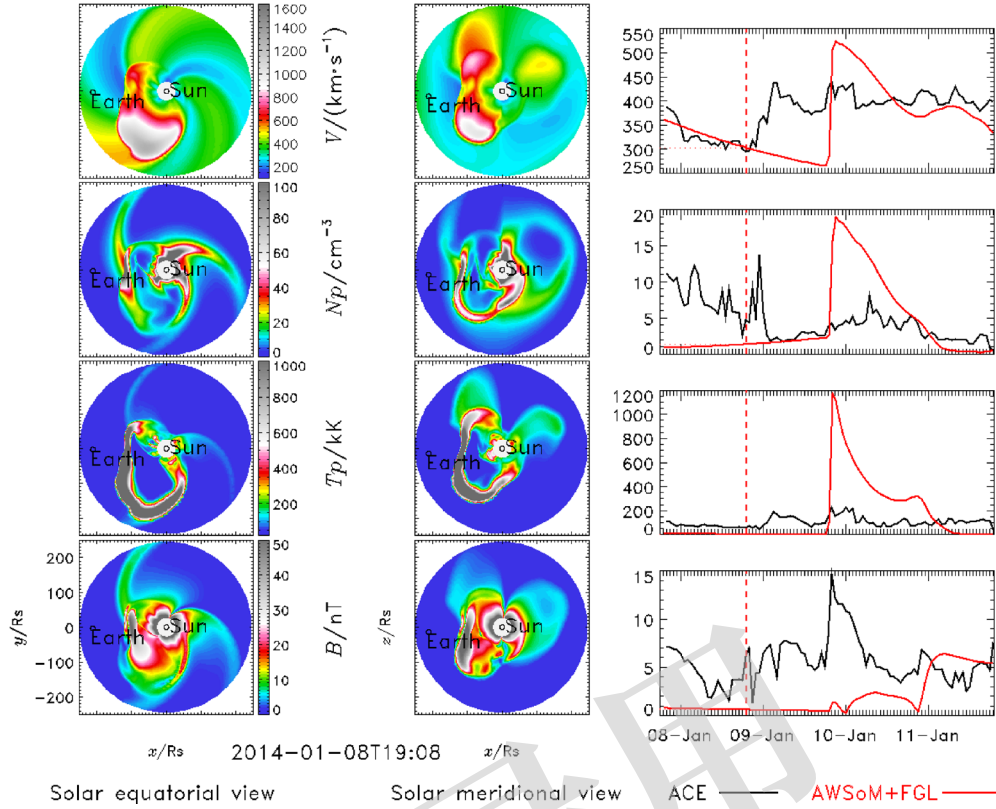


图 7 CME 在 ADAPT-GONG 磁图生成的背景太阳风中演化。第一和第二列展示了 CME 插入 SC 模块之后 24 小时（2014 年 1 月 8 日 19:08）的截面图，第三列中红色竖直虚线的横坐标是第一和第二列对应的时间。第三列的横坐标刻度间隔是一小时。

Fig. 7 The evolution of the CME in the background solar wind generated from the ADAPT-GONG magnetogram. The first and second columns show cross-sectional views at 24 hours after the CME was inserted into the SC module (January 8, 2014, 19:08). The horizontal coordinate of the red vertical dashed line in the third column corresponds to the time of the first and second columns. The tick interval on the third column's horizontal axis is one hour.

因此，如果地球位于 CME 的主攻方向，由 GONG 得到的 CME 到达时间应明显早于由 ADAPT-GONG 得到的到达时间。然而由图 6 和图 7 可知，地球位于 CME 的侧翼方向。为了更准确地比较模拟值和实测值，图 8 和图 9 使用了时间分辨率为一分钟的 ACE 数据，即每分钟一个平均值，而此前的图 2、图 3、图 6 和图 7 中 ACE 的时间分辨率均为一小时，即每小时一个平均值。图 8 和图 9 中第一和第二列的 CME 自插入 SC 模块之后传播了 48 个小时，在第三列中以竖直方向的虚线标记对应的时刻，即 2014 年 1 月 9 日 19:08，并显示在第一和第二列的底部。此时，两种背景太阳风模拟所得的 CME 对应激波都正好到达地球，而 ACE 测量的激波到达时间约为 1 月 9 日 19:40，与模拟激波的到达时间（1 月 9 日 19:08）相差不到一个小时。另外，图 8 和图 9 显示激波到达地球的速度实测值约为 $530\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，而图 6 和图 7 的低时间分辨率数据则显示 1 月 9 日 19:40 的速度实测值约为 $440\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，显著低于模拟值和高时间分辨率的实测值。

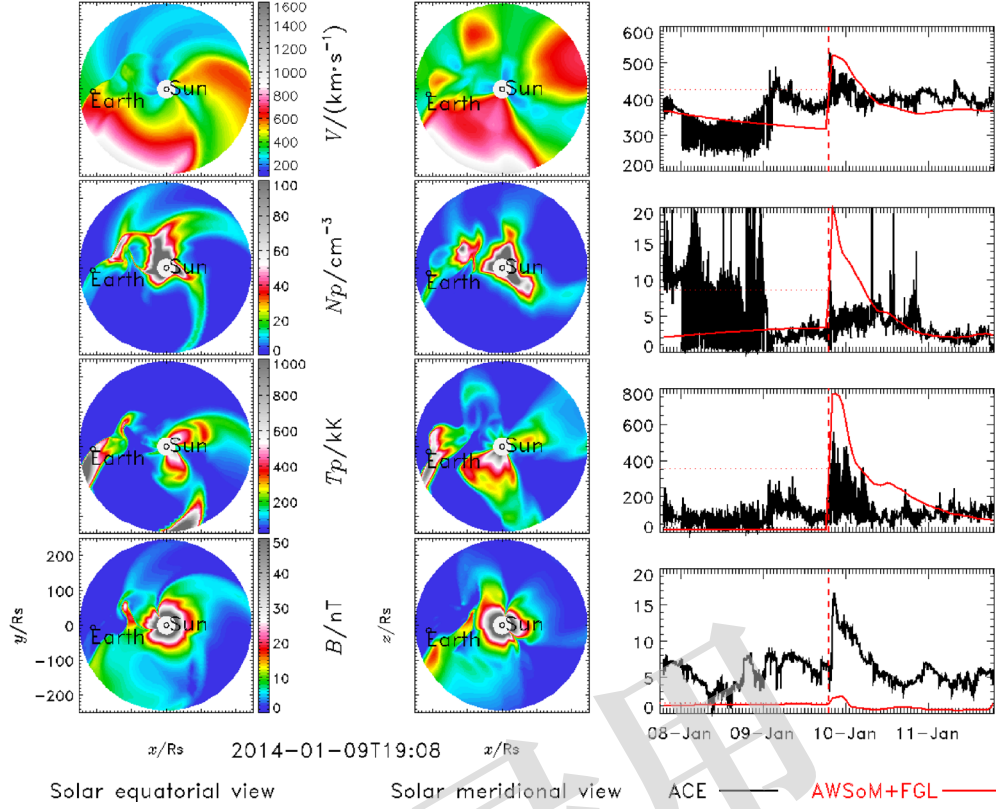


图 8 CME 在 GONG 磁图生成的背景太阳风中演化。第一和第二列展示了 CME 插入 SC 模块之后 48 小时（2014 年 1 月 9 日 19:08）的截面图，第三列中红色垂直虚线的横坐标是第一和第二列对应的时间。第三列的横坐标刻度间隔是一小时。ACE 数据的时间分辨率为一分钟。

Fig. 8 The evolution of the CME in the background solar wind generated from the GONG magnetogram. The first and second columns show cross-sectional views at 48 hours after the CME was inserted into the SC module (January 9, 2014, 19:08). The horizontal coordinate of the red vertical dashed line in the third column corresponds to the time of the first and second columns. The tick interval on the third column's horizontal axis is one hour. The time resolution of the ACE data is one minute.

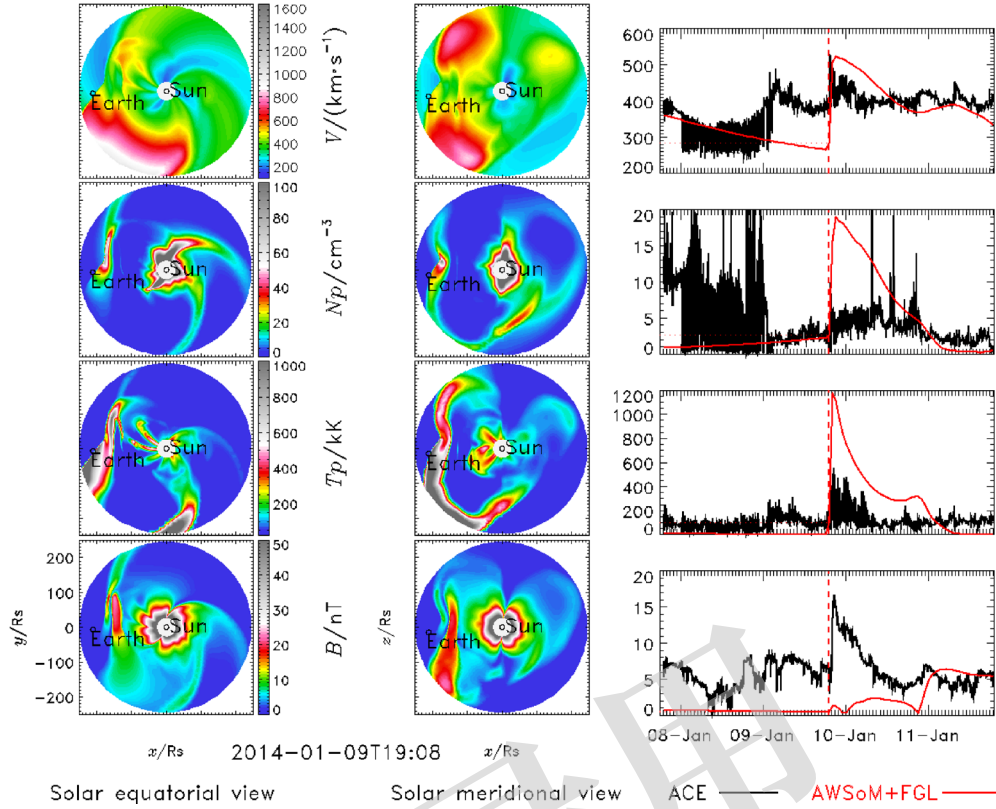


图 9 CME 在 ADAPT-GONG 磁图生成的背景太阳风中演化。第一和第二列展示了 CME 插入 SC 模块之后 48 小时（2014 年 1 月 9 日 19:08）的截面图，第三列中红色竖直虚线的横坐标是第一和第二列对应的时间。第三列的横坐标刻度间隔是一小时。ACE 数据的时间分辨率为一分钟。

Fig. 9 The evolution of the CME in the background solar wind generated from the ADAPT-GONG magnetogram. The first and second columns show cross-sectional views at 48 hours after the CME was inserted into the SC module (January 9, 2014, 19:08). The horizontal coordinate of the red vertical dashed line in the third column corresponds to the time of the first and second columns. The tick interval on the third column's horizontal axis is one hour. The time resolution of the ACE data is one minute.

3 结论

CME 行星际传播的准确模拟既要有准确的背景太阳风，也要有准确的 CME 三维重构。为了得到准确的背景太阳风，需要有完备的数值太阳风模型、准确的磁图输入以及合理的参数设置。本文使用 AWSoM 模型，GONG 和 ADAPT-GONG 两种磁图输入，分别对应 $PF=0.33$ 和 $PF=0.21$ 两种参数设置，得到了两种背景太阳风。为了得到准确的 CME 三维重构，需要有合理的 CME 模型，多视角的日冕图像观测，以及模型对观测图像的准确拟合。本文使用 FGL 三维重构方法，SOHO、STEREO-A 和 STEREO-B 三个不同视角图像，通过 GL 解析模型拟合观测图像，得到 CME 的主攻方向为 W48S33，明显偏离了其源区的中心方向 W08S12。

本文使用 AWSoM+FGL 模拟 CME 到达时间的误差在一小时以内，得益于数值模型和重构方法对观测数据的充分利用，这也是后续研究和应用的重点和难点。首先，为了得到准确的背景太阳风，要根据不同的太阳活动阶段选取不同的 PF 取值，产生了不确定性；其次，由于目前的 STEREO-B 数据不可用，实时预报中只有 STEREO-A 和地球两个视角的常规观测，降低了 CME 重构结果的可靠性。

ADAPT-GONG 磁图在 GONG 磁图的基础上，使用太阳光球磁通量输运模型中的较差自

转、子午环流、超米粒输运、随机背景磁浮现和数据同化等手段，弥补了 GONG 磁图缺少太阳背面实时数据和南北极区观测困难的缺陷，使磁图更接近实时太阳光球磁场，为日冕和太阳风的模拟提供了更可靠的初始和边界条件，得到更加真实的背景太阳风^[37]。表 1 的 *PCC* 和 *MPAE* 也表明，使用 ADAPT-GONG 磁图模拟所得的速度曲线更接近实测曲线。基于同一个 GONG 磁图，ADAPT 算法通过调整超米粒参数的取值会得到 12 个不同的 ADAPT-GONG 磁图，从而模拟出不同的背景太阳风。在与实际观测对比之前，无法判断 12 个 ADAPT-GONG 磁图中的哪一个是最优的^[33]。为了验证 *PFP* 的取值规律（公式 5 至 8），本文沿用 Huang 等^[33]和 Huang 等^[34]的做法，选取编号为 7 的 ADAPT-GONG 磁图作为模拟的输入。因此，我们不排除使用其余 11 个 ADAPT-GONG 磁图可能得到更接近实际观测的背景太阳风模拟结果。

本文和 Dai^[28]应用 AWSoM+FGL 分别对两个不同的 CME 事件进行了重构和模拟，初步验证了方法的有效性。在后续的研究中，为了更全面地验证方法的可靠性，一方面需要将 AWSoM+FGL 应用到更多的 CME 例子；另一方面，对于同一个 CME 的行星际传播模拟，可以使用不同的就地测量数据（例如同时使用 ACE、STEREO-A 和 STEREO-B 三个不同视角）来更加立体地验证模拟结果。

参考文献

- [1] CHEN P F. Coronal mass ejections: models and their observational basis[J]. *Living Reviews in Solar Physics*, 2011, **8**(1): 1
- [2] 沈芳, 连婉怡, 陶新祎. 太阳高能粒子在行星际背景太阳风大尺度结构中的传播模拟进展[J]. *空间科学学报*, 2025, **45**(5): 1163-1187 (SHEN F, LIAN W Y, TAO X Y. Progress in simulations of solar energetic particles propagation in large-scale structures of interplanetary background solar wind[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(5): 1163)
- [3] ZHAO X H, DRYER M. Current status of CME/shock arrival time prediction[J]. *Space Weather*, 2014, **12**(7): 448-469
- [4] VOURLIDAS A, PATSOURAKOS S, SAVANI N P. Predicting the geoeffective properties of coronal mass ejections: current status, open issues and path forward[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 2019, **377**(2148): 20180096
- [5] FENG X S. Magnetohydrodynamic Modeling of the Solar Corona and Heliosphere[M]. Singapore: Springer, 2020
- [6] SHEN F, LIU Y S, YANG Y. Numerical research on the effect of the initial parameters of a CME flux-rope model on simulation results[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2021, **253**(1): 12
- [7] ZHOU Y F, FENG X S. Three-dimensional simulation study of the interactions of three successive CMEs during 4-5 November 1998[J]. *Universe*, 2021, **7**(11): 431
- [8] DAI X H, WANG H N, HUANG X, *et al.* The classification of ambiguity in polarimetric reconstruction of coronal mass ejection[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, **780**(2): 141
- [9] DAI X H, WANG H N, HUANG X, *et al.* An improvement on mass calculations of solar coronal mass ejections via polarimetric reconstruction[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, **801**(1): 39
- [10] DAI X H, WANG H N, INHESTER B. Electron density reconstruction of solar coronal mass ejections based on a genetic algorithm: method and application[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **896**(2): 155
- [11] ZHAO X M, FENG L, SONG H Q, *et al.* Advances in 3D reconstruction of coronal mass ejections[J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2023, **47**(1): 1-53
- [12] WANG Y M, SHEELEY JR N R. Solar wind speed and coronal flux-tube expansion[J]. *Astrophysical Journal*, 1990, **355**: 726
- [13] ARGE C N, ODSTRCIL D, PIZZO V J, *et al.* Improved method for specifying solar wind speed near the sun[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2003, **679**: 190-193
- [14] ODSTRCIL D, RILEY P, ZHAO X P. Numerical simulation of the 12 May 1997 interplanetary CME event[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2004, **109**(A2): A02116

- [15] ZHAO X P, PLUNKETT S P, LIU W. Determination of geometrical and kinematical properties of halo coronal mass ejections using the cone model[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A8): SSH 13-1-SSH 13-9
- [16] MAYS M L, TAKTAKISHVILI A, PULKKINEN A, *et al.* Ensemble modeling of CMEs using the WSA-ENLIL+Cone model[J]. *Solar Physics*, 2015, **290**(6): 1775-1814
- [17] VAN DER HOLST B, SOKOLOV I V, MENG X, *et al.* Alfvén wave solar model (AWSOM): coronal heating[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, **782**(2): 81
- [18] TÓTH G, SOKOLOV I V, GOMBOSI T I, *et al.* Space weather modeling framework: A new tool for the space science community[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A12): A12226
- [19] JIVANI A, SACHDEVA N, HUANG Z G, *et al.* Global sensitivity analysis and uncertainty quantification for background solar wind using the Alfvén wave solar atmosphere model[J]. *Space Weather*, 2023, **21**(1): e2022SW003262
- [20] SACHDEVA N, MANCHESTER W B, SOKOLOV I, *et al.* Solar wind modeling with the Alfvén wave solar atmosphere model driven by HMI-based near-real-time maps by the National Solar Observatory[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, **952**(2): 117
- [21] SHI T, MANCHESTER W, LANDI E, *et al.* AWSOM magnetohydrodynamic simulation of a solar active region. II. statistical analysis of Alfvén wave dissipation and reflection, scaling laws, and energy budget on coronal loops[J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, **961**(1): 60
- [22] HUANG Z G, TÓTH G, HUANG J, *et al.* Adjusting the potential field source surface height based on magnetohydrodynamic simulations[J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, **965**(1): L1
- [23] CHEN H F, SACHDEVA N, HUANG Z G, *et al.* Decent estimate of CME arrival time from a data-assimilated ensemble in the Alfvén wave solar atmosphere model (DECADE-AWSOM)[J]. *Space Weather*, 2025, **23**(1): e2024SW004165
- [24] JIN M, MANCHESTER W B, VAN DER HOLST B, *et al.* Chromosphere to 1 AU simulation of the 2011 March 7th event: a comprehensive study of coronal mass ejection propagation[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, **834**(2): 172
- [25] JIN M, MANCHESTER W B, VAN DER HOLST B, *et al.* Data-constrained coronal mass ejections in a global magnetohydrodynamics model[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, **834**(2): 173
- [26] GIBSON S E, LOW B C. A time-dependent three-dimensional magnetohydrodynamic model of the coronal mass ejection[J]. *The Astrophysical Journal*, 1998, **493**(1): 460
- [27] DAI X H. A time-dependent self-similar reconstruction of solar coronal mass ejections based on the Gibson-low model[J]. *The Astrophysical Journal*, 2022, **925**(1): 24
- [28] DAI X H. Simulating propagation of a coronal mass ejection from solar corona to 1 au with the Alfvén wave solar atmosphere model and fitting of Gibson-low[J]. *The Astrophysical Journal*, 2025, **993**(2): 250
- [29] WORDEN J, HARVEY J. An evolving synoptic magnetic flux map and implications for the distribution of photospheric magnetic flux[J]. *Solar Physics*, 2000, **195**(2): 247-268
- [30] ARGE C N, HENNEY C J, KOLLER J, *et al.* Air force data assimilative photospheric flux transport (ADAPT) model[J]. *Twelfth International Solar Wind Conference*, 2010, **1216**(1): 343-346
- [31] SOKOLOV I V, VAN DER HOLST B, MANCHESTER W B, *et al.* Threaded-field-line model for the low solar corona powered by the Alfvén wave turbulence[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **908**(2): 172
- [32] THERNISIE N A F R, HOWARD R A, VOURLIDAS A. Modeling of flux rope coronal mass ejections[J]. *The Astrophysical Journal*, 2006, **652**(1): 763
- [33] HUANG Z G, TÓTH G, SACHDEVA N, *et al.* Modeling the solar wind during different phases of the last solar cycle[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2023, **946**(2): L47
- [34] HUANG Z G, TÓTH G, SACHDEVA N, *et al.* Solar wind driven from GONG magnetograms in the last solar cycle[J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, **965**(1): 1
- [35] MÖSTL C, ROLLETT T, FRAHM R A, *et al.* Strong coronal channelling and interplanetary evolution of a solar storm up to Earth and Mars[J]. *Nature Communications*, 2015, **6**: 7135

- [36] WANG R, LIU Y D, DAI X H, *et al.* The role of active region coronal magnetic field in determining coronal mass ejection propagation direction[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, **814**(1): 80
- [37] SACHDEVA N, VAN DER HOLST B, MANCHESTER W B, *et al.* Validation of the Alfvén Wave solar atmosphere Model (AWSoM) with observations from the low corona to 1 au[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **887**(1): 83



戴幸华 男, 1984年5月出生于广东省阳江市, 现为山西师范大学物理与电子工程学院讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为日冕物质抛射的三维重构、行星际传播数值模拟及预报等。
E-mail: xinghua.dai@outlook.com