

2024 年 5 月空间天气事件的太阳 行星际传播分析*

刘晓迪^{1,2} 钟鼎坤¹ 向长青¹

1(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 综合运用多种观测手段,对2024年5月8日至11日源于AR 13664太阳活动区7个前向全晕日冕物质抛射(CME)事件的日地空间传播过程进行了分析.这7个CME可分为两组,第一组为发生于5月8日05:36 UT至5月9日09:24 UT的4个CME,第二组为发生于5月9日18:52 UT至11日01:36 UT的3个CME.利用日地关系观测台A星的日球层成像仪(STEREO A/HI)观测追踪这两组CME对应的高密度区域的时间-距角关系,并采用固定 ϕ 角拟合法及调和均值法推算这两组CME的最优传播方向及平均径向速度.结果显示,这两组CME的高密度区域在STEREO A/HI分别发生了混叠,采用拟合得到的径向速度推算这两组CME到达地球轨道附近的时间与实际被WIND飞船就位观测到的开始时间的最小差值分别约为0.5 h和3 h.结果表明,这两组CME在日地传播过程中,后面快速的CME追上了前面稍慢的CME,从而形成两个复杂喷出物,产生了异常强烈的地磁暴.

关键词 日冕物质抛射, 射电暴, J-map, 固定 ϕ 角拟合法, 调和均值法

中图分类号 P353

Analysis of Solar Interplanetary Propagation of Space Weather Events in May 2024

LIU Xiaodi^{1,2} ZHONG Dingkun¹ XIANG Changqing¹

1(State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract A variety of observations are employed to conduct a preliminary analysis of the propagation in solar-interplanetary space of seven earth-directed full-halo Coronal Mass Ejections (CME) originating from the solar Active Region (AR) 13664 from 8 to 11 May 2024. These seven CME can be divided into two groups. The first group consists of four CME that occurred during the period from 05:36 UT

* 国家自然科学基金项目(42030204)和国家重大科技基础设施子午工程项目共同资助

2025-02-18 收到原稿, 2025-04-08 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

on 8 May to 09:24 UT on 9 May, and the second group consists of three CME that occurred during the period from 18:52 UT on 9 May to 01:36 UT on 11 May. We utilize the heliospheric imager on the Solar Terrestrial Relations Observatory A (STEREO A/HI) to observe and track the time-elongation relationships of the high density regions corresponding to these two groups of CME, and apply the fixed Φ -angle fitting method and the harmonic mean fitting method to calculate the most probable propagation directions and average radial velocities of these two groups of CME. The results show that the high-density regions associated with these two groups of CME are respectively overlapped in the field of view of STEREO A/HI. The minimum differences between the two group CME' arrival times near the Earth's orbit calculated from the fitting radial velocities and the actual start times observed in situ by the WIND spacecraft are 0.5 hours and 3 hours respectively. These results indicate that during the solar-terrestrial propagation of these two groups of CME, the fast CME behind catch up with the slower CME ahead, thus, the two groups of CME form two complex ejecta and generate the extremely intense geomagnetic storm.

Key words Coronal Mass Ejection (CME), Radio bursts, J-map, Fixed Φ -angle fitting method, Harmonic mean method

0 引言

2024 年 5 月 10 日晚发生了自 2003 年万圣节事件以来最强的地磁暴^{*}, Dst 指数^{*}最低达到 -412 nT, Kp 指数^{**} 24 h 大于 8, 此次地磁暴的强度大、影响范围广、持续时间长, 使其成为研究地磁暴机制和影响的理想案例. 这样的强地磁暴通常是由朝向地球快速运动的携带强行星际南向磁场分量的 CME 触发的^[1,2], 例如 Dst 指数为 -472 nT 的 2003 年 11 月 20 日地磁暴源于 AR 10501 活动区的快速 CME 产生的^[3], Dst 指数低至 -589 nT 的 1989 年 3 月事件是由同一太阳活动区 (AR 5395) 连续喷发的 CME 造成的^[4].

针对 CME 的产生和日地传播过程, 目前已经形成从近太阳到 1 AU 的多种天基观测手段与地面观测手段, 研究用到的观测数据如下.

(1) 基于地球同步环境卫星 18 号 (GOES 18) 的 X 射线传感器 (XRS) 的数据及太阳紫外成像仪 (SU-VI) 的 195 Å 的太阳图像数据. 本文获取了耀斑爆发前后的软 X 射线流量数据, 太阳活动区中耀斑的发生位置、时间和级别.

(2) 太阳和日球层观测台 (SOHO)^[5] 搭载的广角及分光日冕仪 (LASCO)^[6] 的 C2 和 C3 望远镜观测数

据, 可以分别获取 $1.5 \sim 6 R_s$ (太阳半径) 和 $3 \sim 30 R_s$ 的 CME 在天平面的白光成像.

(3) 日地关系观测台 (STEREO)^[7] A 星搭载的日地联系日冕与日球层研究 (SECCHI)^[8] 仪器组所属的两个日冕仪 (COR1 和 COR2) 和两个日球层成像仪 (HI1 和 HI2) 的观测数据. 其中 COR1 和 COR2 的观测范围分别为 $1.5 \sim 4 R_s$ 和 $2.5 \sim 15 R_s$, HI1 和 HI2 的角视场范围为 $4^\circ \sim 24^\circ$ 和 $18.7^\circ \sim 88.7^\circ$, 可以提供 CME 从日冕到行星际介质乃至地球的三维演化过程的观测数据. 此外, STEREO A 的粒子及 CME 瞬变事件就位测量仪器 (IMPACT)^[9] 提供了相关的行星际磁场和太阳风等离子体参数.

(4) WIND 飞船的磁强计 (MFI)^[10] 和太阳风实验仪 (SWE)^[11] 提供了地球轨道附近的行星际磁场和太阳风等离子体参数. 除了这些天基卫星观测之外, 本文还采用地基观测, 使用了国际太阳射电频谱仪网络 (e-Callisto) 的射电频谱数据^[12], 其工作频率为 $45 \sim 870$ MHz, 能够全年连续 24 h 观测太阳射电频谱, 时间分辨率为 0.25 s, 网络中每个台站均提供了 II 型射电暴观测, 可以获取日心距离为 $1 \sim 2 R_s$ 的 CME 驱动的激波速度.

利用 STEREO/HI 的成像观测, 可以获得 CME 事件的运动学参数. 2013 年 Wang 等^[13] 基于单颗

^{*} Dst 指数: https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/202405/index.html

^{**} Kp 指数: https://kp.gfz-potsdam.de/app/files/Kp_ap_Ap_SN_F107_since_1932.txt

STEREO 卫星数据提取了 2010 年多个 CME 事件参数 (主传播方向、传播速度等), 其结果表明, 与固定 Φ 角拟合法相比, 调和均值法提取的 CME 事件的参数和预计到达时间更为准确; 同时, 基于两颗 STEREO 卫星的立体观测, 采用直接三角法及球面切线法分析了 5 个朝向地球的 CME 事件, 研究发现在提取 CME 传播参数时, 融入合适的 CME 前沿结构假设和利用多视角卫星观测可以减小反演误差. 2017 年 Hu 等^[14] 结合多源数据分析了 2010 年 9 月 4 日从连接两个活动区的源区发起的 CME 在日冕和行星际空间的演化. 2024 年 Liu 等^[15] 结合 STEREO, SOHO, WIND 等数据, 使用渐变圆柱壳模型 (GCS) 分析与 2024 年 5 月空间天气事件相关的全晕 CME, 验证了 2024 年 5 月的地磁暴支持太阳超级风暴是多种因素结合产生的“完美风暴” (活动区持续喷发、多个 CME 相互作用以及特定的磁场配置) 这一假说, 并发现两个复杂抛射物产生的地磁效应截然不同, 这主要归因于磁场配置的差异.

本文结合多种仪器数据, 对 2024 年 5 月特大空间天气事件进行初步分析. 通过收集和整理 GOES 卫星数据, 分析了 CME 爆发前后 X 射线流量的变化; 使用国际射电网的频谱仪数据推断了与 II 型射电暴相关的 CME 驱动激波的速度; 基于单颗 STEREO A 卫星的 COR2, HI1 和 HI2 追踪了 7 个前向全晕 CME 的传播轨迹, 并使用固定 Φ 角拟合法和调和均值法提取 CME 参数, 包括主传播方向、传播速度以及到达 1 AU 的时间, 推断 CME 的相互作用.

1 数据分析方法

利用 STEREO A/COR2 和 HI 对 CME 成像观测获取的 CME 主传播方向以及在行星际空间的平均传播速度等参数, 对固定 Φ 角拟合法 (F Φ) 和调和均值法 (HM) 进行分析.

基于单卫星成像观测的固定 Φ 角拟合法^[13,16,17], 将 CME 视为一个沿径向向外运动的点 T , 如图 1 (a)^[17] 所示, 并假设传播方向和传播速度保持固定不变. 基于这种假设, 得到 T 到日心的距离与距角和传播方向的关系为

$$R_{F\Phi} = d_A \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta_{F\Phi})}. \quad (1)$$

式中, $R_{F\Phi}$ 表示点 T 到日心的距离; d_A 表示观测者

(这里指 STEREO A) 的日心距; α 表示距角, 即太阳与 T 对于观测者的夹角; $\beta_{F\Phi}$ 表示固定的传播方向, 逆时针为正.

将 $R_{F\Phi} = V_{F\Phi}t$ 代入式 (1), 可以推导出 α 的计算公式为

$$\alpha = \arctan \left(\frac{V_{F\Phi}t \sin \beta_{F\Phi}}{d_A - V_{F\Phi}t \cos \beta_{F\Phi}} \right). \quad (2)$$

其中, $V_{F\Phi}$ 表示固定的传播速度; t 表示时间. 选取 $[-30^\circ, 200^\circ]$ 和 $[200 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}, 1500 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}]$ 分别作为 $\beta_{F\Phi}$ 和 $V_{F\Phi}$ 的参数空间, 分别以 1° 和 $3 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 作为步长, 对 $\beta_{F\Phi}$ 和 $V_{F\Phi}$ 的参数空间进行遍历取值, 代入式 (2) 得到理论距角. 比较理论距角与实测距角 (后文提及的采样点), 得到误差公式为

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\alpha_{\text{obs}}(t_i) - \alpha_{\text{the}}(t_i)]^2. \quad (3)$$

选取式 (3) 中最小误差 $\sigma_{\min}$ 对应的 $\beta_{F\Phi}$ 和 $V_{F\Phi}$ 参数

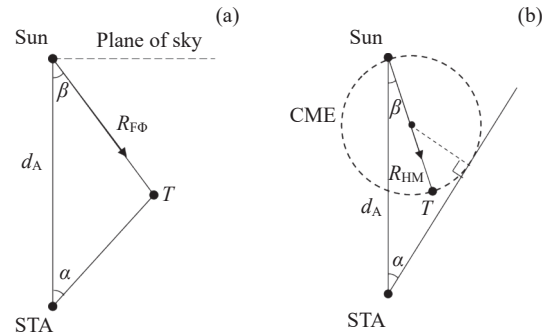


图 1 F Φ 方法 (a) 和 HM 方法 (b) 几何原理. Sun 和 STA 分别表示太阳和 STEREO A 飞船的位置, d_A 表示 STA 飞船日心距, Sun 到 T 表示 CME 主传播方向, α 和 β 分别表示 STA 对 CME 前沿的观测距角和主传播方向的夹角 (β 逆时针为正), $R_{F\Phi}$ 和 R_{HM} 表示两种方法中 T 的日心距

Fig. 1 Geometric principles of the F Φ fitting method (a) and HM fitting method (b). Sun and STA denote the positions of the Sun and the STEREO A spacecraft respectively, d_A represents the heliocentric distance of the STA. The direction from the Sun to T represents the propagation direction of the CME. α is the elongation of the CME front by STA, β is the angle between the STA and the CME propagation direction, whose counterclockwise rotation is regarded as positive. $R_{F\Phi}$ and R_{HM} represent the heliocentric distances of T in the two methods

值作为最优拟合参数, 即主传播方向 $\beta_{F\Phi}$ 和传播速度 $V_{F\Phi}$, 并将误差值不超过 $2\sigma_{\min}$ 的参数最大范围作为拟合误差值.

基于单卫星成像观测的调和均值法^[13,16,17], 将 CME 视为与太阳相切、沿径向向外传播的圆形, 如图 1(b)^[17] 所示, 同时假设传播方向和传播速度保持不变, 此时传播方向是指圆形锋面上具有最大日心距离的点 T 的方向. 基于这种假设, 得到 T 到日心的距离与距角和传播方向的关系为

$$R_{\text{HM}} = 2d_A \frac{\sin \alpha}{1 + \sin(\alpha + \beta_{\text{HM}})}. \quad (4)$$

式中, R_{HM} 表示 T 到日心的距离, β_{HM} 表示固定的传播方向, 逆时针为正.

将 $R_{\text{HM}} = V_{\text{HM}}t$ 代入式 (4), 可以得出观测距角 α 的计算公式为

$$\alpha = \arctan \left(\frac{V_{\text{HM}}t \sin \beta_{\text{HM}}}{d_A - V_{\text{HM}}t \cos \beta_{\text{HM}}} \right) + \arcsin \left[\frac{V_{\text{HM}}t}{\sqrt{(2d_A - V_{\text{HM}}t \cos \beta_{\text{HM}})^2 + (V_{\text{HM}}t \sin \beta_{\text{HM}})^2}} \right]. \quad (5)$$

其中, V_{HM} 表示固定的传播速度, t 表示时间. 同样选取 $[-30^\circ, 200^\circ]$ 和 $[200 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}, 1500 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}]$ 分别作为 β_{HM} 和 V_{HM} 的参数空间, 分别以 1° 和 $3 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 作为步长, 对 β_{HM} 和 V_{HM} 的参数空间进行遍历取值, 代入式 (5) 得到理论距角. 比较理论距角与实测距角 (后文提及的采样点), 选取式 (3) 中最小误差 $\sigma_{\min}$ 对应的 β_{HM} 和 V_{HM} 参数值作为最优拟合参数, 即主传播方向

β_{HM} 和传播速度 V_{HM} , 并将误差值不超过 $2\sigma_{\min}$ 的参数最大范围作为拟合误差值.

2 结果与分析

2.1 源区观测

根据 GOES 18 卫星观测的 X 射线流量数据^{*}, 2024 年 5 月 8—11 日期间共发生 64 次 C 级以上耀斑, 其中 8 次为 X 级耀斑, 43 次为 M 级耀斑, 其最大强度达到 X5.7, 峰值时间为 2024 年 5 月 11 日 01:23 UT. 图 2 为 2024 年 5 月 8—11 日 GOES 18 卫星观测的 X 射线流量变化, 图 2 中对 8 次 X 级耀斑事件用红色竖虚线进行了标记. 将耀斑在 GOES 18 的太阳紫外成像仪 (SUVI) 的观测图像上进行定位, 发现 54 次发生在活动区 AR 13664, 7 次发生在活动区 AR 13663, 1 次发生在活动区 AR 13672. 因此, 2024 年 5 月 8—11 日期间, 太阳活动区 AR 13664 最为活跃.

CME 的爆发一般在时间和空间上与耀斑有一定的相关性, 即 CME 的爆发常伴随着耀斑的发生^[18,19], 并且更快的 CME 速度对应更高的耀斑峰值强度^[20]. 这里将 SOHO/LASCO 在此期间的成像观测到的 7 个全晕前向 CME 与耀斑联系起来. 表 1 列出了相关的耀斑参数, 包括强度级别、开始时间、峰值时间、结束时间以及在日面的位置, 并在图 2 中以 F1, F2, ..., F7 对 7 个相关耀斑的峰值时间进行标记. 图 3 给出了 7 个相关耀斑在太阳源区的位置, 其均位于活动区 AR 13664, 图 3 中绿色圆圈中的星号表示每个耀斑

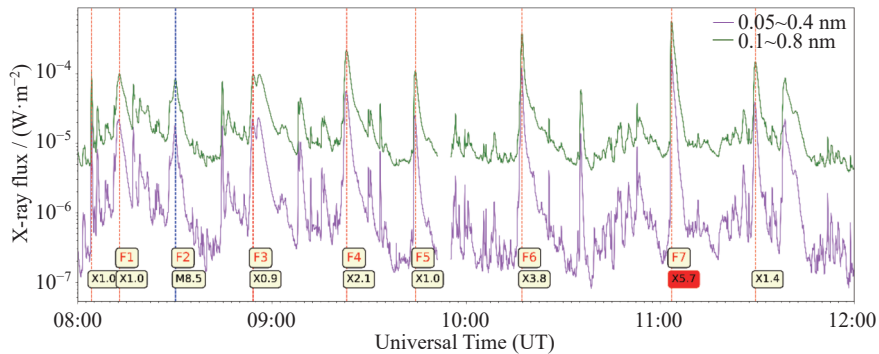


图 2 2024 年 5 月 8—11 日 X 射线流量变化 (红色虚线为 X 级耀斑事件, 蓝色虚线表示 M 级耀斑)

Fig. 2 Variation of X-ray flux from 8 to 11 May 2024 (The red line indicates the X-class flare event, and the blue line indicates the M-class flare)

* <https://data.ngdc.noaa.gov/platforms/solar-space-observing-satellites/goes/goes18/l2/data/>

表 1 2024 年 5 月 8—11 日前向全晕 CME 及伴随耀斑的数据信息
Table 1 Parameters of the frontal full-halo CME and their associated flares from 8 to 11 May 2024

序号	日期	太阳耀斑					日冕物质抛射		
		类别	时间(UT)			位置/(°)	时间(UT)	高度/ R_s	线性速度 /($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)
			开始	峰值	结束				
1	5月8日	X1.0	04:37	05:09	05:33	20 S, 11 W	05:36	2.84	530
2	5月8日	M8.5	11:26	12:04	12:17	25 S, 4 W	12:24	2.82	676.5
3	5月8日	X0.9	21:08	21:40	22:05	18 S, 18 W	22:24	3.33	952.4
4	5月9日	X2.1	08:45	09:13	09:36	19 S, 24 W	09:24	3.99	1280.4
5	5月9日	X1.0	17:23	17:44	18:01	16 S, 29 W	18:52	7.14	1024.2
6	5月10日	X3.8	06:27	06:54	07:06	14 S, 37 W	07:12	3.54	952.7
7	5月11日	X5.7	01:10	01:23	01:39	14 S, 45 W	01:36	3.88	1613.5

注 CME时间指SOHO/LASCO/C2和C3首次观测到CME的时间; 高度指SOHO/LASCO/C2和C3首次观测到CME时, CME前沿的高度; 拟合线性速度的数据所在的日心距范围为 $1.5\sim 30 R_s$; 表中耀斑的参数来源于GOES 18卫星的观测*, CME相关参数来源于SOHO/LASCO/C2和C3的观测**.

的位置, F1, F2, ..., F7 表示 7 个相关耀斑.

2.2 CME 在内日球层的传播

利用 e-Callisto 多个台站的 II 型射电暴频谱数据***, 计算与 CME1, CME5 和 CME7 相关的 II 型射电暴观测导出的驱动激波的速度. 以导出的驱动激波速度计算激波越过 LASCO/C2 遮光板的时间, 自该时间往后检查 LASCO/C2 图像, 将首次出现亮结构的时间作为对应的 CME 首次在 LASCO 视野中的被观测时间, 然后基于 STEREO A/COR2 和 HI 对 CME1~7 的成像观测, 追踪 CME 本体前沿的轨迹, 推断其主传播方向、在行星际空间的平均传播速度及 1 AU 处的预计到达时间等参数.

2.2.1 II 型射电暴

在上述 7 个前向全晕 CME 事件中, e-Callisto/HUMAIN 台站监测到 CME1 伴随的 II 型射电暴, e-Callisto/HURBANOVO 台站监测到 CME5 伴随的 II 型射电暴, e-Callisto/ALMATY 台站监测到 CME 7 伴随的 II 型射电暴. 首先对相关频谱数据进行预处理, 使其更容易分辨出 II 型射电暴, 然后结合适当的日冕密度模型, 利用 II 型射电暴的频率漂移率推断激波的传播速度. 这里以 HUMAIN 台站射电观测为例, 简要介绍 II 型射电暴频谱处理方法^[21].

对于每一固定频率, 对其随时间变化的通量密度进行一维高斯拟合, 拟合峰值时间对应峰沿时间 t_p ,

起始沿时间 t_b 和终了沿时间 t_e .通过确定高斯拟合峰值的百分比获得. 其中起始沿时间指高斯拟合曲线中通量密度上升的时间点, 终了沿时间指高斯拟合曲线中通量密度下降的时间点, 百分比的选择与具体事件的观测特征有关, 对于 HUMAIN 台站观测到的 II 型射电暴频谱, 百分比选择为 20%~50%. 图 4 给出了对固定频率 117.88 MHz 下通量密度的拟合结果. 重复该过程, 得到每一频率对应的峰沿时间、起始沿时间和终了沿时间, 从 117.88~190.77 MHz 频率范围中获得 38 组峰沿时频点、起始沿时频点和终了沿时频点, 通过对这三条分支的 38 个时间参数进行滑动平均处理, 得到三条平滑分支, 如图 5(a) 所示. 误差条以条带频率的特征尺度计算, 该特征尺度为峰值在一维高斯拟合中沿频率方向的全高半宽.

Newkirk^[22] 提出了日冕密度模型 $n = 4.2 \times \alpha \times 10^{10+4.32/r}$, 其中 n 表示电子密度, 单位 m^{-3} ; r 表示以太阳半径为单位的日心距离; α 表示电子密度增强因子, 这里选用 $\alpha = 2$; 等离子体频率和电子密度的关系为 $f = \alpha \times 8.97 \times \sqrt{n}$, f 单位为 Hz, $\alpha = 1$ 表示基频波段, $\alpha = 2$ 表示谐频波段. 基于上述日冕密度模型和等离子体频率公式, 可以将 II 型射电暴辐射频率转换为激波发生的日冕高度或日心距. 假定在拟合高度内激波速度为常数, 对这些激波日心距离-时间点进行直线拟合, 可以得到其对应的平均速度, 如图 5(b) 所示,

* <https://data.ngdc.noaa.gov/platforms/solar-space-observing-satellites/goes/goes18/l2/data/>

** https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

*** <https://e-callisto.org/Data/data.html>

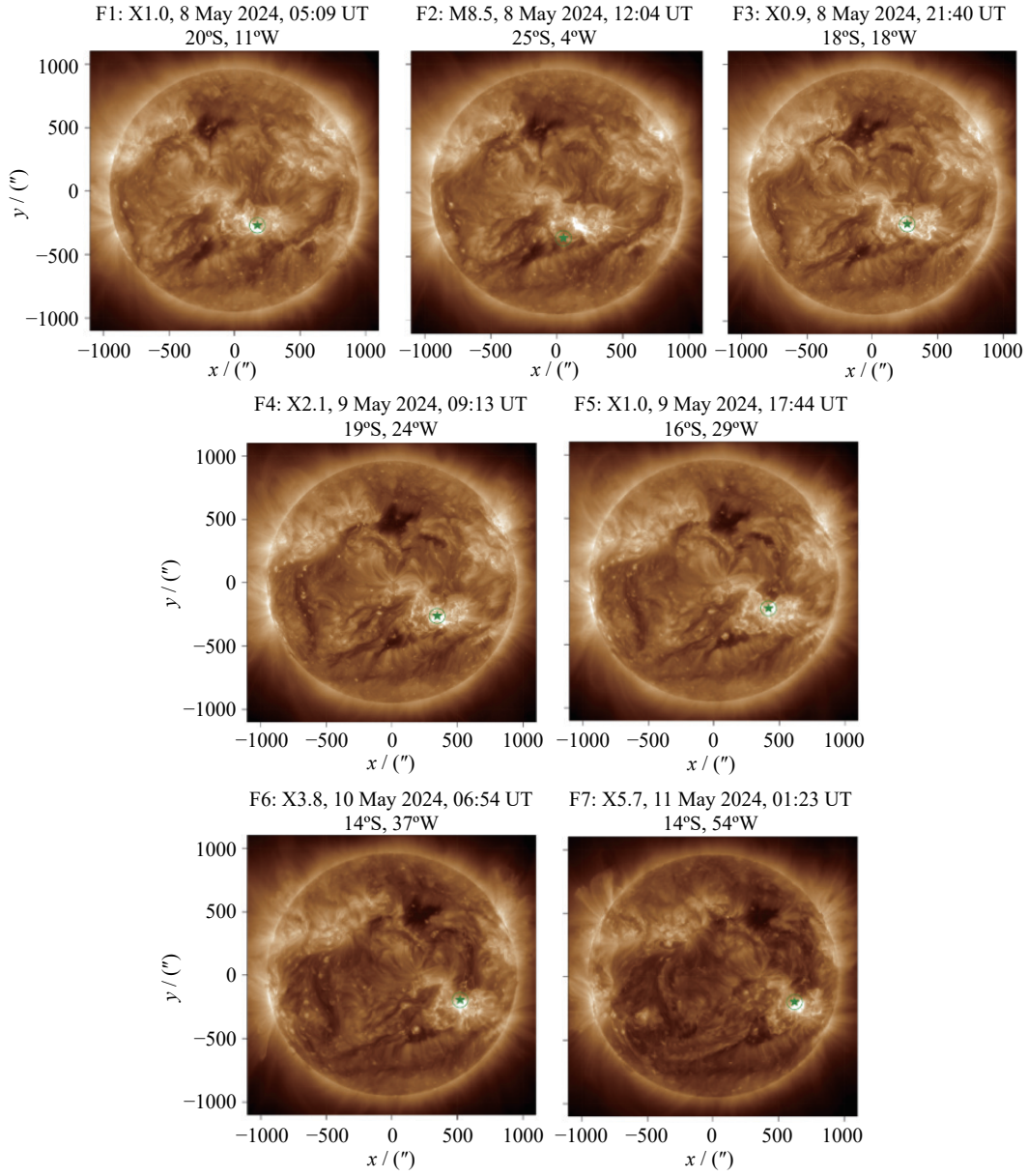

 图 3 GOES 18/SUVI $195\text{\AA}$ 波段观测的太阳紫外图像 (绿色星号表示每个耀斑的位置)

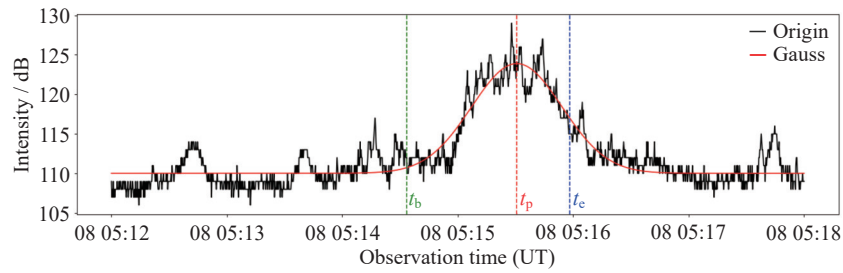
 Fig. 3 Solar ultraviolet image observed by GOES 18/SUVI at $195\text{\AA}$ (Green asterisks indicate the position of each flare)

 图 4 固定频率 117.88 MHz 的流量密度 (黑色实线) 随时间的变化曲线及高斯拟合曲线 (红色实线)

 Fig. 4 Curve of the flux density (black solid line) at a fixed frequency of 117.88 MHz varying with time and the Gaussian fitting curve (red solid line)

HUMAIN 台站观测到的 II 型射电暴起始沿平均速度为 $(1432.27 \pm 12) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 峰沿平均速度为 $(1203.1 \pm 14) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 终了沿平均速度为 $(1095.36 \pm 20) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 图中还给出相应的误差条, 这些误差条是由条带 (起始沿、峰沿和终了沿) 的频率误差条导出的。

使用同样方法, 利用 e-Callisto/HURBANOVO 台站的射电频谱观测反演得到 CME5 的 II 型射电频谱起始沿、峰沿和终了沿的平均速度分别为 $(813.8 \pm 34) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $(634.61 \pm 21) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $(590.61 \pm 11) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 如图 6 所示; 利用 e-Callisto/ALMATY 台站的射电频

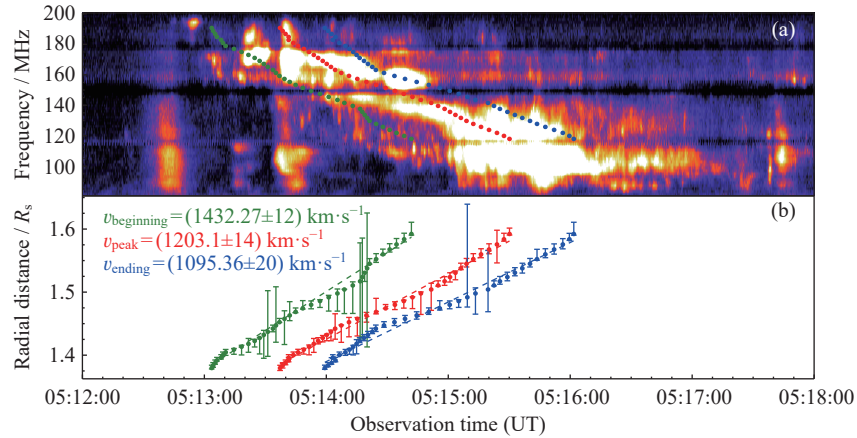


图 5 (a) 2024 年 5 月 8 日 HUMAIN 台站观测到的 II 型射电暴动态射电频谱. (b) 射电暴频谱三个条带 (起始沿、峰沿、终了沿) 的射电源日心距离及其误差条随时间的变化和由频谱漂移得出的相应初始激波速度. 绿点、红点、蓝点分别代表频谱的起始沿、峰沿和终了沿

Fig. 5 (a) Dynamic radio spectrum of a type II radio burst observed by the HUMAIN station on 8 May 2024. (b) Heliocentric distances of the three edges (beginning, peak, and ending) of the radio burst spectrum and their error bars as a function of time, along with the corresponding initial shock velocities derived from the spectral drift. Green, red, blue dots represent the beginning edge, peak edge, and ending edge of the spectrum, respectively

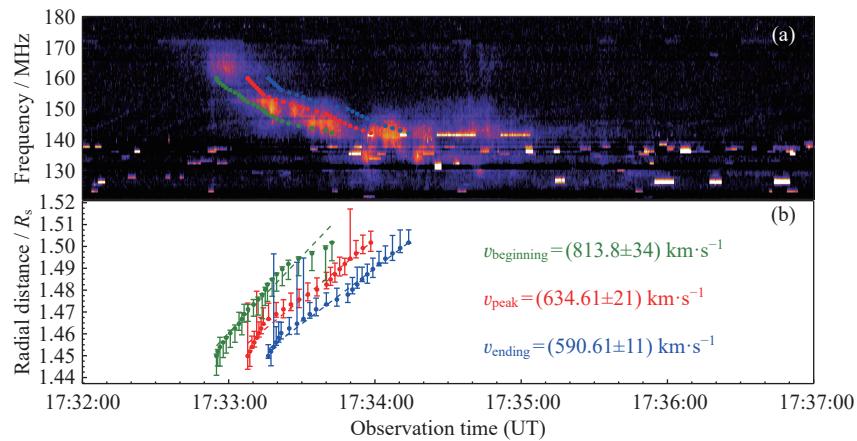


图 6 (a) 2024 年 5 月 9 日 HURBANOVO 台站观测到的 II 型射电暴动态射电频谱. (b) 射电暴频谱的三个条带 (起始沿、峰沿、终了沿) 的射电源日心距离及其误差条随时间的变化和由频谱漂移得出的相应初始激波速度. 绿点、红点、蓝点分别代表频谱的起始沿、峰沿和终了沿

Fig. 6 (a) Dynamic radio spectrum of a type II radio burst observed by the HURBANOVO station on 9 May 2024, as well as the beginning edge (green), peak edge (red), and ending edge (blue) of the spectrum. (b) Heliocentric distances of the three edges (beginning, peak, and ending) of the radio burst spectrum and their error bars as a function of time, along with the corresponding initial shock velocities derived from the spectral drift. Green, red, blue dots represent the beginning edge, peak edge, and ending edge of the spectrum, respectively

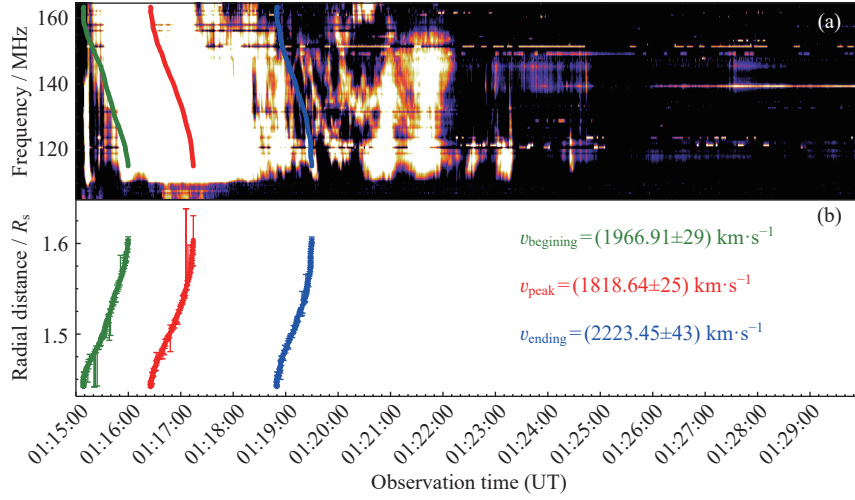


图 7 (a) 2024 年 5 月 11 日 ALMATY 台站观测到的 II 型射电暴动态射电频谱及频谱的起始沿 (绿点)、峰沿 (红点)、和终了沿 (蓝点). (b) 射电暴频谱的三个条带 (起始沿、峰沿、终了沿) 的射电源日心距离及其误差条随时间的变化及由频谱漂移得出的相应初始激波速度

Fig. 7 (a) Dynamic radio spectrum of a type II radio burst observed by the ALMATY station on 11 May 2024, as well as the beginning edge (green), peak edge (red), and ending edge (blue) of the spectrum. (b) Heliocentric distances of the three edges (beginning, peak, and ending) of the radio burst spectrum and their error bars as a function of time, along with the corresponding initial shock velocities derived from the spectral drift

谱观测反演得到 CME7 的 II 型射电频谱的起始沿、峰沿和终了沿的平均速度分别为 $(1966.91 \pm 29) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $(1818.64 \pm 25) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $(2223.45 \pm 43) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 如图 7 所示.

2.2.2 基于 STEREO A/COR2 与 HI 观测图像提取 CME 传播参数

2024 年 5 月 7—12 日, 探测器 STEREO A 位于地球公转轨道前方约 12° 且距离太阳约 0.96 AU 位置处, 如图 8 所示.

利用 STEREO A/SECCHI/COR2 与 HI 的成像观测*追踪筛选出的 7 个前向全晕 CME 从近太阳到行星际空间较为完整的传播过程. 图 9(a)~(c) 给出的是 CME1 传播期间由 STEREO A/COR2, HI1 和 HI2 观测到的某时刻的移动差分图像 (前一时刻减去后一时刻).

为描绘 CME 的传播径迹, 首先将成像观测图像像素点在太阳投影 Cartesian 坐标系 (HPC)^[23] 下的坐标转换为横纵坐标分别为距角 (Elongation) 和位置角 (Position Angle, PA) 的新坐标系, 其中距角表

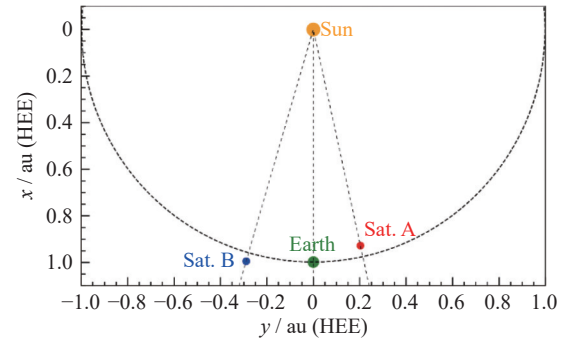


图 8 太阳、地球与 STEREO A/B 卫星在 2024 年 5 月 8 日 12:00 UT 时的相对位置

Fig. 8 Relative locations of the Sun, the Earth and the STEREO A/B satellites at 12:00 UT on 8 May 2024

示像素点与太阳中心相对于观测者的夹角, 方位角表示从太阳北极逆时针测量的角度. 为了尽量保证各 CME 本体出现在 HI 视场中的每个观测时刻都有较为清晰的亮前沿, 选择沿 $\text{PA}=100^\circ$ 对 COR2, HI1 和 HI2 在 2024 年 5 月 7—12 日的移动差分图像进行狭长切割, 再将得到的狭长部分按照时间排列, 得到该

* https://stereo-ssc.nascom.nasa.gov/data/ins_data/secchi/L0_YMD/

时段内从 STEREO A 视角观测到的 CME 本体前沿的时间-距角关系, 即 J-map^[24-27], 如图 10 所示。

对于每个 CME 事件, 根据其在 SOHO/LASCO/C2 或 C3 视野中 $PA=100^\circ$ 首次出现的时刻和位置作为参考, 选择其在 STEREO A/COR2 视野中相应亮特征出现的时间和位置, 按照表 1 中的速度估算该 CME 在下一时刻出现在 COR2 或 HI 中的位置, 以此位置作为参考, 在 COR2 或 HI 图像中定位该位置附近的最亮前沿特征, 从而描绘 CME 本体亮特征在相应时刻的位置, 进而完成对 CME 本体亮特征在 $PA=100^\circ$ 的方向上的人工采样, 如图 9(d)(白色实线表示 $PA=100^\circ$, 黑色叉号表示采样点)。将所有采样点进行插值平滑后投射到 J-map 中, 如图 10 所示。从图 10 中可以清晰看到各个 CME 的传播轨迹,

7 个 CME 均在 STEREO A/HI2 视场中被观测到, 观测距角超过 25° 。

图 10 J-map 图显示 CME1~4 的迹线在 HI2 视场中合并成一个更大且明亮的锋面, 这个特征意味着前向激波后, 各 CME 本体可能聚合为一个复杂喷出物^[15]; 另外, CME5~7 的迹线也有合并的趋势。为进一步分析 CME 之间的联系, 使用 $F\Phi$ 与 HM 方法拟合得到各 CME 的主传播方向、传播速度和预计到达 1 AU 处的时间等参数, 拟合结果列于表 2。

$F\Phi$ 法的拟合结果显示, CME1~4 的最优主传播方向在 $30^\circ\sim 50^\circ$ 内, 并且在行星际的平均传播速度逐渐增大, CME4 的最优传播速度为 $905\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$; CME5~7 的最优主传播方向分别为 56° , 43° 和 54° , 虽然 CME 6~7 的速度大于 CME5, 但是 CME 5~7

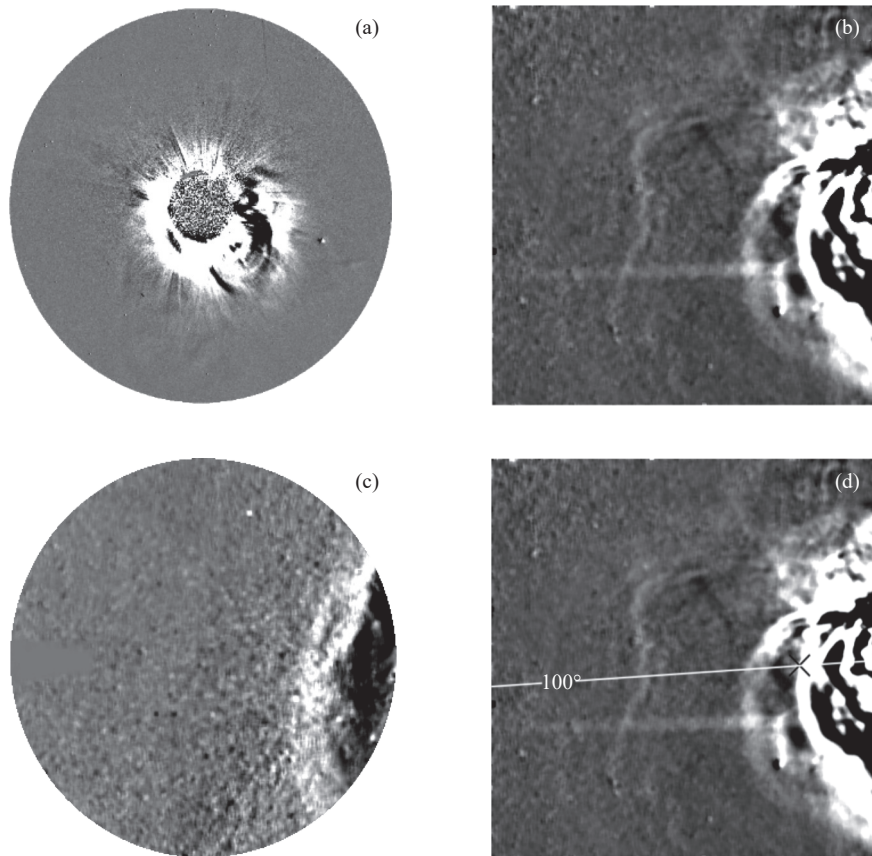


图 9 不同时刻 STEREO A/COR2, HI1 和 HI2 观测的移动差分图像以及人工采样. (a) COR2 在 2024 年 5 月 8 日 06:23 UT 的观测图像, (b) HI1 在 2024 年 5 月 8 日 16:08 UT 的观测图像, (c) HI2 在 2024 年 5 月 10 日 00:08 UT 的观测图像, (d) CME1 本体 2024 年 5 月 8 日 16:08 UT 在 HI1 视场中的亮前沿

Fig. 9 Time-lapset difference images observed by STEREO A/COR2, HI1 and HI2 at different moments and a schematic diagram of manual sampling. (a) Observational image of COR2 at 06:23 UT on 8 May 2024, (b) observational image of HI1 at 16:08 UT on 8 May 2024, (c) observational image of HI2 at 00:08 UT on 10 May 2024, (d) schematic diagram of the bright front of the main body of CME1 in the field of view of HI1 at 16:08 UT on 8 May 2024

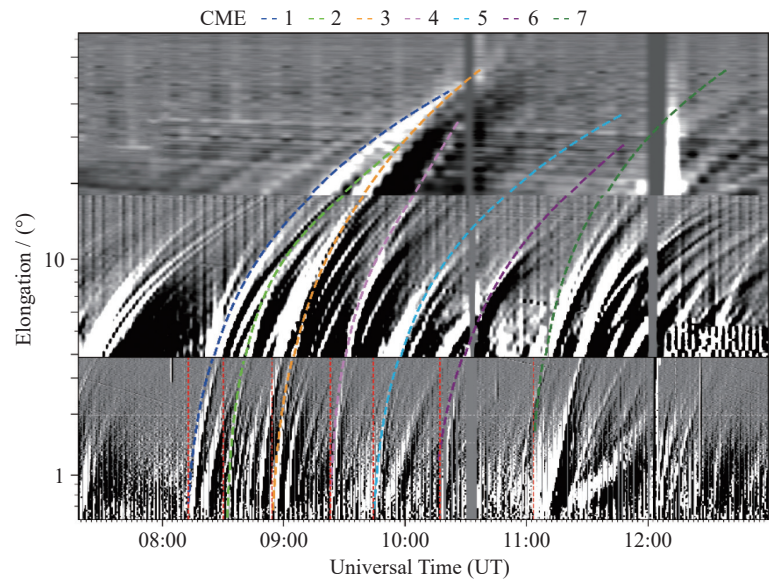


图 10 由 STEREO A/COR2, HI1 和 HI2 移动差分图像在 $PA = 100^\circ$ 附近的狭长部分构成的时间-距角关系 (J-map). 垂直红色虚线表示耀斑峰值时间, 其他颜色表示各个 CME 本体的轨迹

Fig. 10 Time-lapset different diagram (J-map) composed of the narrow stripes near $PA = 100^\circ$ in the moving difference images of STEREO A/COR2, HI1 and HI2. The vertical red dashed lines denote peak times of flares, and other color curves represent the trajectories of CMEs' main bodies

表 2 $F\Phi$ 和 HM 方法得到的 7 个前向全晕 CME 最优拟合参数

Table 2 Optimal fitting parameters of 7 frontal full-halo CME obtained by the $F\Phi$ and HM methods

	固定 ϕ 角拟合法 ($F\Phi$)			调和均值法 (HM)		
	传播方向/ $(^\circ)$	传播速度/ $(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	抵达时间(UT)	传播方向/ $(^\circ)$	传播速度/ $(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	抵达时间(UT)
1	48 ± 2	530 ± 3	05/11 10:08	40 ± 5	539 ± 6	05/11 09:23
2	33 ± 14	584 ± 27	05/11 07:44	11 ± 15	638 ± 39	05/11 02:41
3	41 ± 2	776 ± 6	05/11 02:33	30 ± 7	797 ± 12	05/11 01:43
4	30 ± 10	905 ± 63	05/11 04:41	-5 ± 11	1124 ± 117	05/10 20:11
5	56 ± 4	479 ± 3	05/13 07:15	51 ± 4	482 ± 3	05/13 07:04
6	43 ± 2	524 ± 9	05/13 11:47	18 ± 5	584 ± 24	05/13 03:58
7	54 ± 6	869 ± 24	05/12 23:39	57 ± 1	875 ± 3	05/12 23:42

的速度均小于 CME4 的速度. HM 方法的拟合结果显示 CME1~4 的最优主传播方向在 $-5^\circ\sim40^\circ$ 内, 在行星际的平均传播速度同样是逐渐增大的, 其中 CME4 的最优传播速度达到了 $1124\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$; CME5~7 的最优主传播方向分别为 51° , 18° 和 57° , 其对应速度同样小于 CME4. 对两种方法的结果进行对比发现, HM 方法得到的传播方向与 STEREO A 的夹角更小, 平均夹角为 28.8° , 与地球的夹角也相对较小, 并且拟合得到的传播速度均大于 $F\Phi$ 方法的拟合结果. 结

合 CME1~4 的迹线和拟合参数, 可以推断 CME4 赶上其前的 CME1~3, 并相互作用合并成一个复杂喷出物, CME7 追赶上 CME5~6, 并在日地传播过程中形成另外一个复杂喷出物, 即这 7 个 CME 的本体分两组抵达 1 AU 处, 该结论与 Wang 等^[28] 和 Liu 等^[15] 的结论一致.

2.3 就位观测

图 11 是 WIND 飞船 2024 年 5 月 10—14 日的就位测量数据*, 包括地心太阳磁层坐标系 (GSM) 下

* https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/sc_merge_min1.html

的磁场数据、太阳风速度、质子温度和密度, 图 11(h) 为 Dst 指数^[29], 其中两个灰色阴影部分是 Liu 等^[15] 基于磁场、温度、密度的变化特征识别出的两个复杂喷出物, 其开始时间和结束时间分别约为 5 月 10 日 19:40 UT 和 5 月 12 日 10:40 UT, 5 月 12 日 20:40 UT 和 5 月 14 日 06:10 UT, 与这两个复杂喷出物相关的前向激波分别于 5 月 10 日 16:37 UT 和 5 月 12 日 09:09 UT 到达地球轨道处的 WIND 飞船, 如图 11 中垂直虚线所示。

第一个激波到达后, 各项参数均发生了强烈扰动。第一个复杂喷出物持续时间内, 磁场呈现复杂变化特征, 如图 11(a)~(d) 所示, 总磁场最高达到约 72.22 nT, 南向磁场分量长时间处于 -20 nT 以下, 长时间的太阳风高速度和强的南向磁场触发了强地磁暴, Dst 指数最低达到 -412 nT (见图 11 h), 这与前节推断的 CME1~4 的相互作用有关。根据 $F\Phi$ 的拟合结果, CME4 以 $905 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度追赶上 CME1~3, 并于 5 月 11 日 04:41 UT 抵达 1 AU 处, 晚于 WIND 观测的第一个复杂喷出物开始时间约为 8.0 h; HM

的拟合结果中, CME4 以 $1124 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度追赶上 CME1~3, 并于 5 月 10 日 20:11 UT 抵达 1 AU 处, 晚于第一个复杂喷出物的开始时间约 0.5 h。

从图 11 可以看出, 第二个激波到达时, 仍处在磁暴的恢复期, 质子温度开始升高, 质子密度开始降低, 各向磁场的变化也逐渐趋于平缓, 直至第二个复杂喷出物开始, 但此期间磁场的变化并没有第一个复杂喷出物持续期间的变化强烈。根据 $F\Phi$ 的拟合结果, CME5~7 在行星际空间中分别以 479, 524, $869 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度传播, 并于 5 月 13 日 07:15 UT, 5 月 13 日 11:47 UT, 5 月 12 日 23:39 UT 抵达 1 AU 处, 分别晚于第二个复杂喷出物的开始时间约为 10, 15, 3 h。根据 HM 的拟合结果, CME5~7 在行星际空间分别以 482, 584, $875 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度传播, 并于 5 月 13 日 07:04 UT, 5 月 13 日 03:58 UT, 5 月 12 日 23:42 UT 抵达 1 AU 处, 分别晚于第二个复杂喷出物的开始时间约 10, 73 h。同时第二个激波/喷出物的地磁效应比第一个要小很多, Wang 等^[28] 指出这主要是对应两组 CME 的源区的极向磁场不同而导致的。

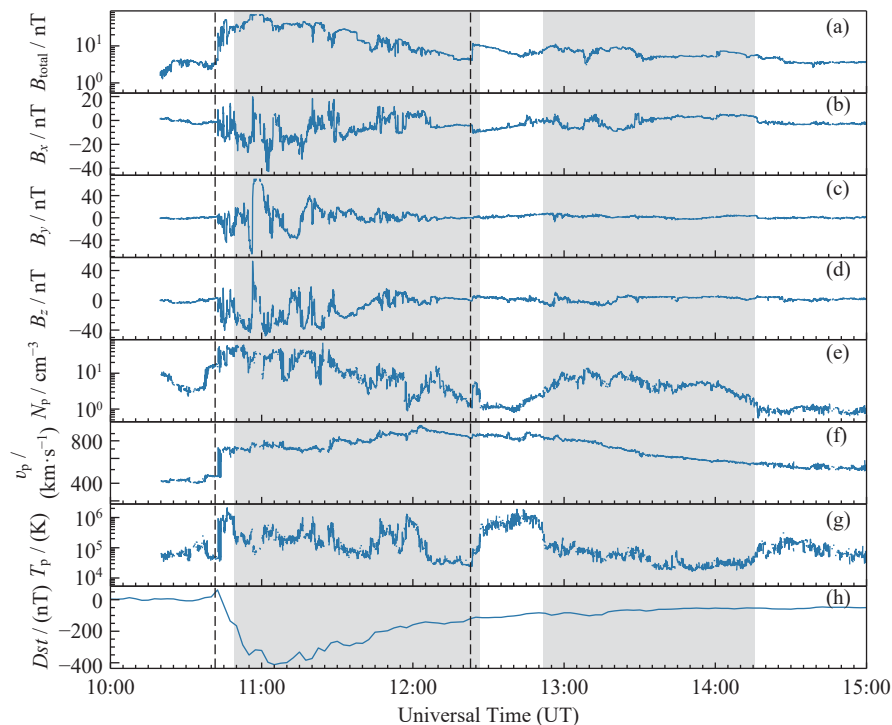


图 11 2024 年 5 月 10—14 日 WIND 卫星 1 min 分辨率的就位观测数据 (黑色垂直虚线表示激波到达时间, 灰色阴影部分表示复杂喷出物持续时间)

Fig. 11 In-situ 1-minute observational data of the WIND from 10 to 14 May 2024 (The black vertical dashed lines denote the arrival times of the two shock waves, and the gray shaded areas stand for the durations of the two complex ejecta)

图 12 显示的是 STEREO A 在 2024 年 5 月 10—14 日就位测量数据 (时间分辨率为 1 min)^{*}, 包括在 RTN 坐标系下的磁场数据、太阳风速度、质子温度和密度. 根据 Liu 等^[15]的研究结果, 需将 WIND 的数据时间向前移动约 2.6 h, 以便在每个探测器上对齐每次激波. 第一次激波到达 STEREO A 的时间约为 5 月 10 日 14:03 UT, 第二次激波到达时间约为 5 月 12 日 07:32 UT, 如图 12 中黑色垂直虚线所示. 相比与 WIND 数据, STEREO A 的太阳风速度、质子温度和密度数据缺失较多, 但是 RTN 坐标系下的磁场分量数据相对完整, 并且在第一次复杂喷出物持续期间呈现出扰动现象, 在第二次复杂喷出物持续期间趋于平缓. 这与 WIND 的观测结果类似, 但是 STEREO A 的磁场数据更强, 总磁场最高约为 84 nT, 如图 12(a) 所示. 其原因可能是前 4 个 CME 的传播方向与 STEREO A 的平均夹角为 19° , 小于与地球的平均夹角 31° (STEREO A 与地球的夹角约为 12° , 如图 8 所示, CME 传播方向见表 2), 因而 STEREO A 处观测到的太阳风等离子体受到的压缩比 WIND 观测到的更强, 观测到的磁场更强.

3 结论与讨论

利用 GOES 18 卫星的 X 射线流量数据、国际射电网络 (e-Callisto) 的 II 型射电暴频谱数据和 STEREO A 的成像数据, 对引起 2024 年 5 月 10—14 日强地磁暴的 7 个前向全晕 CME 在日地空间的运动特性进行了初步分析, 通过固定 Φ 角拟合法 (F Φ) 和调和均值法 (HM) 提取了 CME 的传播参数, 并与 WIND 和 STEREO A 卫星的就位观测数据进行对比验证, 得出如下结论.

(1) 太阳活动特征. GOES 18 卫星数据显示, 2024 年 5 月 8—11 日太阳活动区 AR 13664 极为活跃, 共发生 64 次 C 级以上耀斑, 其中包括 8 次 X 级耀斑, 最大强度达到 X5.7.

(2) II 型射电暴. 在 7 个候选 CME 中, e-Callisto 射电频谱仪网络中只监测到与 CME1, CME5 和 CME7 相关的 II 型射电暴. 根据 e-Callisto/HUMAIN 台站观测反演得到 CME1 的 II 型射电频谱起始沿、峰沿和终了沿平均速度分别为 $(1432.27 \pm 12) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $(1203.1 \pm 14) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $(1095.36 \pm 20) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; 根据 e-Callisto/HURBANOVO 台站观测反演得到 CME5 的

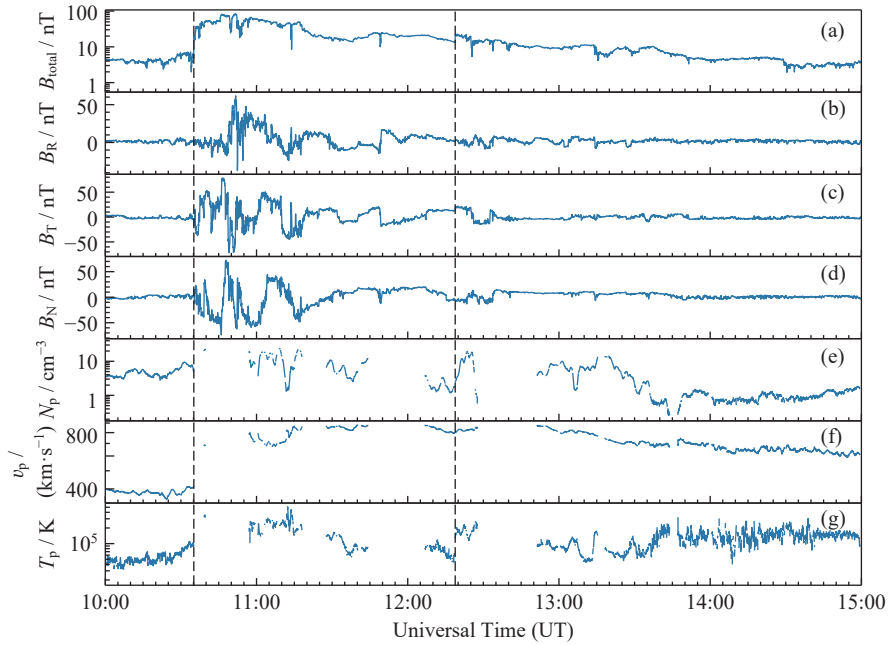


图 12 2024 年 5 月 10—14 日 STEREO A 卫星 1 min 分辨率的就位观测数据

Fig. 12 In-situ 1-minute observational data of the STEREO A from 10 to 14 May 2024

^{*} https://stereo-ssc.nascom.nasa.gov/data/ins_data/impact/

II 型射电暴观测推断的起始沿、峰沿和终了沿平均速度分别为 $(813.8 \pm 34) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $(634.61 \pm 21) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $(590.61 \pm 11) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; 根据 e-Callisto/ALMATY 台站观测反演得到 CME 7 的 II 型射电频谱的起始沿、峰沿和终了沿平均速度分别为 $(1966.91 \pm 29) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $(1818.64 \pm 25) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $(2223.45 \pm 43) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

(3) CME 传播参数. $F\Phi$ 方法拟合得到 CME1~4 的最优主传播方向在 $30^\circ \sim 50^\circ$ 之间, 传播速度分别为 530, 584, 776, $905 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; CME5~7 的最优主传播方向分别为 56° , 43° 和 54° , 速度分别为 479, 524, $869 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. HM 方法拟合得到 CME1~4 的最优主传播方向在 $-5^\circ \sim 40^\circ$ 之间, 速度分别为 539, 638, 797, $1124 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; CME5~7 的最优主传播方向分别为 51° , 18° 和 57° , 速度分别为 482, 584, $875 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

(4) CME 相互作用. 根据 J-map 图像和拟合参数结果推断 CME1~4 在行星际空间中可能发生相互作用并合并成一个复杂喷出物, 而 CME5~7 的迹线也有合并的趋势, 但是无法在行星际空间追上前 4 个 CME, 因而会在行星际空间形成另外一个复杂喷出物, 这样本文研究的 7 个前向全晕 CME 分 2 组到达地球轨道附近. $F\Phi$ 预计第一个和第二个复杂喷出物 (以 CME4 和 CME7 的参数为基准) 到达 1 AU 的时间与实际被 WIND 飞船就位观测到的开始时间的差值分别约为 8 h 和 3 h; HM 预计第一个和第二个复杂喷出物到达 1 AU 的时间与实际被 WIND 飞船就位观测到的开始时间的差值分别约为 0.5 h 和 3 h. 因此, HM 方法拟合效果比 $F\Phi$ 方法好, 与 Hu 等^[14] 研究 2010 年 9 月 4 日 CME 传播得到的结果一致.

(5) 就位观测. STEREO A 的磁场数据比 WIND 卫星数据更强, 总磁场最高约为 84 nT, 这与 CME 的传播方向与 STEREO A 的夹角更小, 进而受到更高程度的压缩有关. Liu 等^[15] 分别基于 STEREO A 数据和 WIND 数据, 重建了 Dst 指数, 前者的 Dst 指数极值为 -494 nT, 低于后者的极值 (-378 nT) 和地球实测极值 (-412 nT), 因此, 若地球处于 STEREO A 飞船的位置, 将会遭遇更强地磁暴.

将 7 个 CME 分为 CME1~4 和 CME5~7 两组, 其形成了两组复杂喷出物. 根据 Wang 等^[28] 在图 1 中对太阳源区的分析, 这两组 CME 是从两条不同的极性反转线喷发的, CME1~4 起源于太阳活动区的南侧极性反转线, 其磁通量绳的轴向场与极向场均以

南向分量主导; CME5~7 源自北侧极性反转线, 其磁通量绳的轴向场与极向场在爆发过程中转向北向. 因此, 第二个复杂喷出物期间的磁场强度较小, 而且行星际磁场几乎一直为北向.

使用两种方法的拟合结果表明, CME5 的速度比 CME1~4 的速度低, Liu 等^[15] 使用 GCS 模型拟合的结果同样表明, CME5 相对于前面 4 个 CME 表现出明显的速率降低, Wang 等^[28] 指出这种速度差异可能与源区的磁通浮现率有关, AR 13664 的磁通浮现率在 5 月 8 日达到峰值, 为 $1.6 \times 10^{21} \text{ Mx h}^{-1}$, 此时为 CME1~4 的爆发期, 而 CME5 相关耀斑爆发时, 磁通浮现率出现显著下降.

在 AR 13664 的系列持续喷发中, CME1~4 从太阳源区到 1 AU 的传播过程中, 后面快速的 CME 追赶上前面速度较慢的 CME 并发生相互作用, 产生了长时间的高速度太阳风和强的南向行星际磁场分量, 导致 Dst 指数极低, 这是引起本次特强地磁暴的主要原因. 相比之下, CME5~7 虽然也发生相互作用, 但是由于源区磁场极性为北向, 因此没有如第一个复杂喷出物那样, 引起强烈的地磁效应.

致谢 国际 GOES 卫星、SOHO 卫星、STEREO 卫星、WIND 卫星数据团队及 e-Callisto 射电网络为本文研究提供了科学观测数据, 世界数据中心 (WDC) 提供了 Dst 指数.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

- [1] SCHWENN R, DAL LAGO A, HUTTUNEN E, *et al.* The association of coronal mass ejections with their effects near the Earth[J]. *Annales Geophysicae*, 2005, **23**(3): 1033-1059
- [2] FENG Xueshang, XIANG Changqing, ZHONG Dingkun. Numerical study of interplanetary solar storms[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2013, **43**(6): 912-933 (冯学尚, 向长青, 钟鼎坤. 行星际太阳风暴的数值模拟研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 2013, **43**(6): 912-933)
- [3] GOPALSWAMY N, YASHIRO S, MICHALEK G, *et al.* Solar source of the largest geomagnetic storm of cycle 23[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(12): L12S09
- [4] BOTELER D H. A 21st century view of the March 1989 magnetic storm[J]. *Space Weather*, 2019, **17**(10): 1427-1441
- [5] DOMINGO V, FLECK B, POLAND A I. The SOHO mission: an overview[J]. *Solar Physics*, 1995, **162**(1/2): 1-37
- [6] BRUECKNER G E, HOWARD R A, KOOMEN M J, *et al.* The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO)[J]. *Solar Physics*, 1995, **162**(1/2): 357-402

- [7] KAISER M L, KUCERA T A, DAVILA J M, *et al.* The STEREO mission: an introduction[J]. *Space Science Reviews*, 2008, **136**(1/2/3/4): 5-16
- [8] HOWARD R A, MOSES J D, VOURLIDAS A, *et al.* Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (SECCHI)[J]. *Space Science Reviews*, 2008, **136**(1/2/3/4): 67-115
- [9] LUHMANN J G, CURTIS D W, SCHROEDER P, *et al.* STEREO IMPACT investigation goals, measurements, and data products overview[J]. *Space Science Reviews*, 2008, **136**(1/2/3/4): 117-184
- [10] LEPPING R P, ACÜNA M H, BURLAGA L F, *et al.* The WIND magnetic field investigation[J]. *Space Science Reviews*, 1995, **71**(1/2/3/4): 207-229
- [11] OGILVIE K W, CHORNAY D J, FRITZENREITER R J, *et al.* SWE, a comprehensive plasma instrument for the WIND spacecraft[J]. *Space Science Reviews*, 1995, **71**(1/2/3/4): 55-77
- [12] BENZ A O, MONSTEIN C, MEYER H, *et al.* A world-wide net of solar radio spectrometers: e-CALLISTO[J]. *Earth, Moon, and Planet*, 2009, **104**(1/2/3/4): 277-285
- [13] WANG Jingjing, LUO Bingxian, LIU Siqing, *et al.* Analysis of CME events in 2010 combined with in-situ and STEREO/HI observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, **56**(3): 746-757
- [14] HU H D, LIU Y D, WANG R, *et al.* Multi-spacecraft observations of the coronal and interplanetary evolution of a solar eruption associated with two active regions[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, **840**(2): 76
- [15] LIU Y D, HU H D, ZHAO X W, *et al.* A pileup of coronal mass ejections produced the largest geomagnetic storm in two decades[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2024, **974**(1): L8
- [16] LUGAZ N. Accuracy and limitations of Fitting and Stereoscopic Methods to determine the direction of coronal mass ejections from Heliospheric Imagers observations[J]. *Solar Physics*, 2010, **267**(2): 411-429
- [17] LIU Y, THERNISIEN A, LUHMANN J G, *et al.* Reconstructing coronal mass ejections with Coordinated Imaging and in situ observations: global structure, kinematics, and implications for space weather forecasting[J]. *The Astrophysical Journal*, 2010, **722**(2): 1762-1777
- [18] ZHANG J, DERE K P, HOWARD R A, *et al.* On the temporal relationship between coronal mass ejections and flares[J]. *The Astrophysical Journal*, 2001, **559**(1): 452-462
- [19] ZHOU G P, WANG J X, CAO Z L. Correlation between halo coronal mass ejections and solar surface activity[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2003, **397**(3): 1057-1067
- [20] YASHIRO S, MICHALEK G, AKIYAMA S, *et al.* Spatial relationship between solar flares and coronal mass ejections[J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, **673**(2): 1174-1180
- [21] Li R. Predicting the Arrival Time of an Interplanetary Shock Based on the DART Observations [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences), 2024
- [22] NEWKIRK JR G. The solar corona in active regions and the thermal origin of the slowly varying component of solar radio radiation[J]. *The Astrophysical Journal*, 1961, **133**: 983
- [23] THOMPSON W T. Coordinate systems for solar image data[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2006, **449**(2): 791-803
- [24] SHEELEY JR N R, WALTERS J H, WANG Y M, *et al.* Continuous tracking of coronal outflows: two kinds of coronal mass ejections[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1999, **104**(A11): 24739-24767
- [25] LIU Y, DAVIES J A, LUHMANN J G, *et al.* Geometric triangulation of imaging observations to track coronal mass ejections continuously out to 1 AU[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2010, **710**(1): L82-L87
- [26] SHEELEY JR N R, HERBST A D, PALATCHI C A, *et al.* Heliospheric images of the solar wind at Earth[J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, **675**(1): 853-862
- [27] DAVIES J A, HARRISON R A, ROUILLARD A P, *et al.* A synoptic view of solar transient evolution in the inner heliosphere using the Heliospheric Imagers on STEREO[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(2): L02102
- [28] WANG R, LIU Y D, ZHAO X W, *et al.* Unveiling key factors in solar eruptions leading to the solar superstorm in 2024 May[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2024, **692**: A112
- [29] World Data Center for Geomagnetism, NOSE K M, IYEMORI T, *et al.* Geomagnetic D_{st} index[EB/OL]. (2015-12-30)[2024-09-14]. <https://doi.org/10.17593/14515-74000>

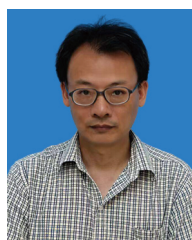
作者简介



刘晓迪 女, 2000 年 10 月出生于河南省濮阳市, 现为中国科学院国家空间科学中心 2022 级硕士研究生, 主要研究方向为空间天气领域的可视分析应用。
E-mail: 2512548127@qq.com



钟鼎坤 (通信作者) 男, 1979 年 8 月出生于广东省韶关市, 现为中国科学院国家空间科学中心副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为空间天气科学数据管理和可视分析。
E-mail: dkzhong@spaceweather.ac.cn



向长青 (通信作者) 男, 1968 年 8 月出生于湖北省宜昌市, 现为中国科学院国家空间科学中心副研究员, 主要研究方向为空间物理、空间天气数值建模。
E-mail: cqxiang@swl.ac.cn