Draft version March 14, 2023年 使用
AASTeX63 默认样式排版的 LATEX

arXiv:2303.07078v1 [physics.space-ph] 13 Mar 2023

天问一号和 MAVEN 在火星观测到的行星际日冕物质抛射与流相互作用区

Yutian Chi,[1] Chenglong Shen,[2,3] Long Cheng,[4] Bingkun Yu,[1] Bin Miao,[2,3] Yuming Wang,[2,3,5] Tielong Zhang,[3,6] Zhuxuan Zou,[4] Mengjiao Xu,[1] Zonghao Pan,[2,3] Zhenpeng Su,[2,3] Jingnan Guo,[2,3] Dongwei Mao,[4] Zhihui Zhong,[4] Zhiyong Zhang,[4] Junyan Liu,[4] Can Wang,[4] Zhiyong Wu,[4] Guoqiang Wang,[7] Sudong Xiao,[7] Kai Liu,[2,3] Xinjun Hao,[2,3] Yiren Li,[2,3] Manming Chen,[2,3] and Yang Du[8]

[1] *Institute of Deep Space Sciences, Deep Space Exploration Laboratory, Hefei 230026, China*
[2] *Deep Space Exploration Laboratory/School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*
[3] *CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, University of Science and Technology of China, Hefei, China*
[4] *CAS Key Laboratory of Geospace Environment, Department of Geophysics and Planetary Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, China*
[5] *Anhui Mengcheng Geophysics National Observation and Research Station, University of Science and Technology of China, Mengcheng,Anhui, China*
[6] *Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Graz, Austria*
[7] *Institute of Space Science and Applied Technology, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, China*
[8] *Shanghai institute of satellite engineering, Shanghai, China*

已投稿至《天体物理学杂志增刊》

摘要

天问一号航天器（Wan 等（2020））是中国首个火星探测任务。火星轨道器磁强计（MOMAG）是天问一号任务搭载的一台科学仪器，旨在研究火星磁场，包括从太阳风到磁鞘和电离层的区域。利用首批公开的天问一号/MOMAG数据，我们基于2021年11月16日至2021年12月31日期间火星原位观测，编制了行星际日冕物质抛射（ICME）和流相互作用区（SIR）目录。我们比较了行星际日冕物质抛射和共转相互作用区期间天问一号/MOMAG与火星大气挥发物演化任务（MAVEN）/MAG测得的磁场强度和矢量磁场，发现两者总体上具有良好的一致性。由于MAVEN自2019年以来进行了轨道调整，天问一号/MOMAG仪器目前几乎是火星上唯一的行星际磁场监测仪。观测结果表明，天问一号上的MOMAG仪器运行良好，能够准确测量近火星太阳风空间中的矢量磁场。结合天问一号搭载的MOMAG、MINPA和MEPA与MAVEN搭载的MAG、SWIA和STATIC进行多点观测，将为系统研究火星上的行星际日冕物质抛射和共转相互作用区的特征及其对火星大气和电离层的影响打开一扇窗口。

关键词：Space Weather、行星际日冕物质抛射、流相互作用区

1. 引言

日冕物质抛射（CMEs）和流相互作用区（SIRs）是日球层中两种常见的大尺度扰动，会驱动地球及行星环境中的极端空间天气（Gonzalez 等人（1999）；Crider 等（2005）；Richardson 和 Cane（2012）；Zhang 等（2021b））。日冕物质抛射是等离子体和磁通量的大规模爆发，将巨大能量从太阳日冕低层输送到行星际空间。行星际日冕物质抛射（ICMEs）是日冕物质抛射在行星际空间中的对应体，也是严重空间天气的主要成因，尤其是在

通讯作者：Chenglong Shenclshen@ustc.edu.cn

太阳活动极大期（Zhang 等（2007）；Shen 等（2017））。流相互作用区主要由高速太阳风流（日冕洞喷发而来）与流带中形成的低速流相互作用产生（Gosling 和 Pizzo（1999））。如果流相互作用区持续时间超过一个太阳自转周期，也可称为共转相互作用区（CIRs，Jian 等（2006））。在地球，行星际日冕物质抛射可引发强烈的地磁暴（Zhang 等（2021b））、大范围电离层异常（Wang 等（2016）），并扰乱大气-电离层耦合系统（Yi˘git 等（2016）），还会造成一系列不良后果，包括卫星系统运行中断、地面电力网受损，以及高频通信和卫星导航系统中断（Cannon 等（2013））。经过地球的流相互作用区可引发周期性地磁暴（Chi 等（2018）），改变地球附近的高能粒子环境（Rouillard 和 Lockwood（2007）），并在电离层中产生周期性振荡（Yu 等（2021））。

与地球不同，火星没有全球性的内禀磁场，但拥有局部地壳磁场（Connerney 等（2015b））。因此，行星际日冕物质抛射/共转相互作用区携带行星际磁场（IMF），可直接影响火星大气/电离层。此前许多研究利用多艘航天器的原位观测和数值模拟，研究太阳瞬变事件与火星大气之间的相互作用。在太阳瞬变事件（行星际日冕物质抛射）经过期间，太阳风相互作用区受到压缩（Crider 等（2005）），火星大气冷离子逃逸率也有所上升（Brain 等（2015）；Zhang 等（2021a）），这两者均表明，行星际日冕物质抛射与火星之间的相互作用是火星大气演化的重要因素（Xu 等（2018））。共转相互作用区可导致火星感生磁层和电离层发生强烈扰动（Dubinin 等（2009））。与行星际日冕物质抛射和共转相互作用区相关的激波所加速的高能粒子，也会增强电离层电离（Morgan 等（2010））。经过火星的行星际日冕物质抛射/共转相互作用区会对火星环境产生显著影响。研究火星处行星际日冕物质抛射/共转相互作用区的原位特征，对于理解火星大气和电离层的演化至关重要。

自2014年以来，火星大气与挥发物演化探测器（MAVEN）持续监测火星附近的太阳风参数；火星快车（MEX）航天器自2003年以来开展监测；天问一号则自2021年11月以来持续监测。天问一号航天器（Wan 等（2020））是中国的首个火星探测任务，于2020年7月23日发射，主要任务目标是研究火星周围的环境特征。火星轨道器磁强计（MOMAG）（Liu 等（2020））是轨道器搭载的七种有效载荷之一，用于监测火星周围的磁场，以深入了解其空间环境及其与太阳风的相互作用。自2021年11月16日起，天问一号航天器搭载的 MOMAG 仪器持续测量火星周围的局部磁场状况，其可靠性已由 Zou 等 (2023年) 验证。尽管 MAVEN 和天问一号主要执行行星探测任务，但两艘航天器都曾多次穿越火星磁层，并在太阳风中停留了相当长的时间，记录到包括行星际日冕物质抛射和共转相互作用区在内的大型太阳瞬变结构。MAVEN 航天器（Jakosky 等（2015a））于2013年11月18日发射，历经8年研究太阳和太阳风与火星磁层及高层大气的相互作用。MAVEN 搭载的磁强计（MAG）（Connerney 等（2015a））和太阳风离子分析仪（SWIA）（Halekas 等（2015））测量火星周围的磁场强度和方向、密度、温度、整体流速以及动压。MAVEN 和天问一号搭载的仪器可同时探测行星际日冕物质抛射和共转相互作用区的到达。结合天问一号与 MAVEN 的多点观测，为系统研究行星际日冕物质抛射和共转相互作用区的特征及其对火星大气和电离层的影响提供了契机。

在本研究中，我们利用天问一号和 MAVEN 的原位观测识别行星际日冕物质抛射和共转相互作用区事件，并对其中五个事件进行详细描述。本文结构如下。第2节简要介绍天问一号和 MAVEN 的原位磁场及太阳风等离子体观测，以及本研究用于识别行星际日冕物质抛射和共转相互作用区的标准。第3节介绍天问一号航天器探测到的前两个行星际日冕物质抛射，并比较这两个事件期间天问一号和 MAVEN 的磁场观测。第4节介绍天问一号探测到的前三个共转相互作用区事件，以及火星附近共转相互作用区的特性。最后一节总结并讨论了我们的主要结果。

2. 数据集与判据

图 1 展示了2021年11月16日至2022年12月31日期间，火星、金星、水星、STEREO-A和地球在日心地球黄道（HEE）坐标系中的轨道。轨道轨迹以由浅至深的颜色表示时间由早到晚。在此期间，火星与地球之间的日心经度间隔角从 ∼159。3° 变为135。9°。本研究采用天问一号搭载的MOMAG和MAVEN搭载的MAG所获得的行星际磁场矢量数据

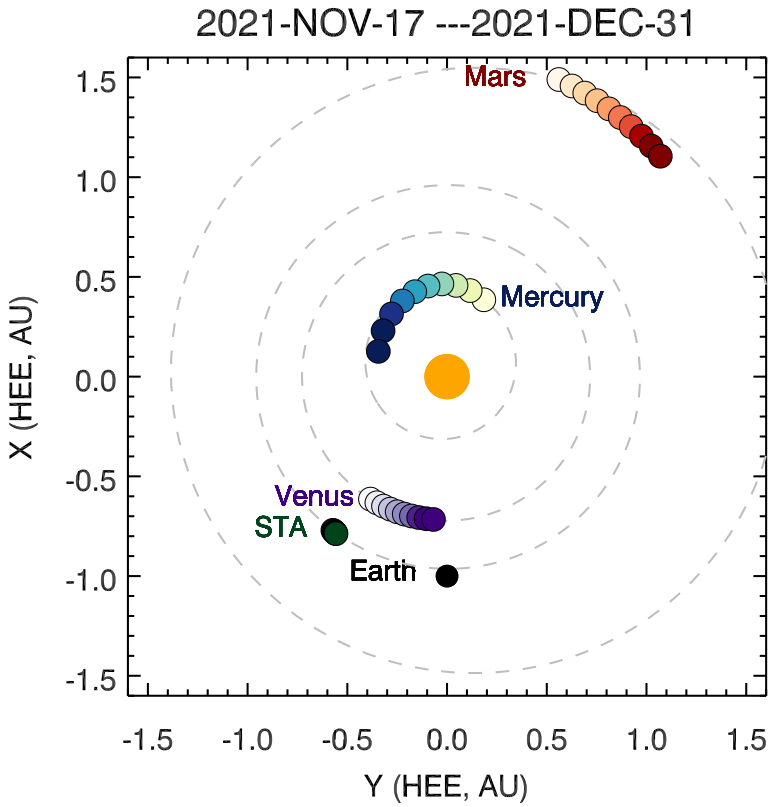


图1. 2021年11月16日至2022年12月31日期间，火星、金星、水星、STEREO-A和地球在日心地球黄道（HEE）坐标系中的轨道，按时间以不同颜色标示。黑点、紫点、蓝点、绿点和红点分别表示地球、金星、水星、STEREO-A和火星的位置。

以及MAVEN/SWIA提供的太阳风等离子体数据。本文使用的所有数据均以火星太阳轨道（MSO）坐标系表示，其中x轴从火星指向太阳，z轴与火星自转轴对齐，y轴则构成该坐标系。

MAVEN以 ∼4.5小时的轨道绕火星运行，而天问一号以7.8小时的轨道绕火星运行。图2 展示了2021年11月16日至18日期间天问一号和MAVEN的轨道。天问一号沿倾角较大的椭圆轨道平面绕火星运行，近火点约为1.08个火星半径（RM），远火点约为4.17个RM（图2中的红线）。根据天问一号的轨道，MOMAG约有50%–75%的时间处于太阳风中，在晨昏侧探测太阳风中的磁场。MAVEN的轨道平面倾角为 75°，近火点高度在150至200 km之间（1.04–1.06个RM），远火点高度在5,900至6,000 km之间（2.74–2.77个RM）（图2中的蓝线）。显然，MOMAG磁场数据与MAVEN/MAG磁场数据在太阳风中的观测时长并不相同。因此，考虑到天问一号和MAVEN轨道的差异，MAVEN的观测可补充天问一号的观测。结合天问一号和MAVEN的太阳风测量与原位观测，将极有助于了解火星处行星际日冕物质抛射和共转相互作用区的特征。

MAVEN 航天器和天问一号航天器经常穿越弓形激波。筛选 MAVEN 未受扰动的太阳风时段时，依据的是太阳风速度的观测 $|v| > 200$ km/s、归一化磁场波动水平 $\sigma B/|B| < 0.15$、高度 R > 500km，以及 $\sqrt{(T/|v|)} < 0.012$（Halekas等（2017））。我们将磁场强度的突然增加定义为天问一号航天器穿越弓形激波（Wang等（2023））。对于每个轨道，天问一号从磁鞘进入太阳风的时刻，以及太阳风进入磁鞘的时刻，都可以轻易确定。两次穿越之间的时段被选作天问一号的太阳风时段（Cheng（2023））。

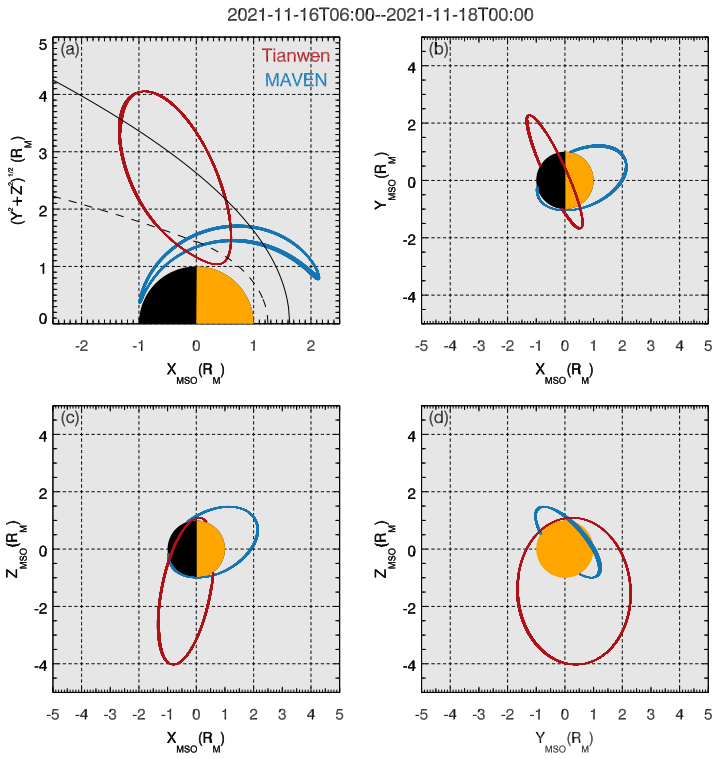


图2。 2021年11月16日 06:00UT 至 2021年11月18日 00:00UT 期间天问一号（红线）和 MAVEN（蓝线）的轨道。面板 (a) 显示了天问一号和 MAVEN 在柱坐标系中的轨迹。内侧黑色虚线表示磁堆积边界的平均位置，外侧黑线表示弓形激波的平均位置（Trotignon 等人 2006年）。面板 (b) 显示了两艘航天器在 X-y 平面沿 Z=0 平面的轨道。面板 (c) 显示了两艘航天器在 X-Z 平面沿 y=0 平面的轨道。太阳位于右侧。面板 (d) 显示了从太阳方向观察到的两艘航天器轨道。各面板均采用 MSO坐标系。

尽管行星际日冕物质抛射的特征可能差异很大，但仍可依据其特有的磁场和太阳风等离子体特征，将其与周围的太阳风区分开来。在火星上识别行星际日冕物质抛射所用的标准与地球上的类似（Chi 等人 2016）：1）磁场强度高于周围环境；2）磁场方向平滑旋转，且大致单调；3）质子温度异常偏低；4）等离子体速度降低；5）等离子体β较低（β）。请注意，并非所有行星际日冕物质抛射都能观测到上述特征。符合五项标准中至少三项的结构即可识别为行星际日冕物质抛射。满足上述全部五项标准的一种特殊类型的行星际日冕物质抛射也称为磁云（Burlaga 等人 1981）。Zhao 等人(2021年) 使用 2014年12月6日至2019年2月21日的 MAVEN/MAG 和 SWIA 数据识别出 24 个行星际日冕物质抛射，并给出了火星处行星际日冕物质抛射的统计特征：平均磁场强度为 5.99 nT，密度为 5.27 cm^{-3}，速度为 394.7 km s^{-1}，动压为 1.34 nPa。

速度持续上升以及垂直总压力显著增强，是确定共转相互作用区（SIR）边界的关键标准（Jian 等（2006）；Chi 等（2018））。磁场压缩并增强、质子密度和温度升高，则是识别共转相互作用区的其他重要标准。Huang 等人（2019年从2014年10月至2018年11月期间火星附近的数据中识别出126个共转相互作用区，并发现其平均持续时间约为37.0小时，平均速度为430 km s^{1}, , 在1.5天文单位处的平均最大磁场强度为11 nT。

3. 行星际日冕物质抛射事件

根据第2节中提及的标准以及天问一号/MOMAG和MAVEN/MAG的观测数据，我们在2021年11月16日至12月31日期间识别出2个行星际日冕物质抛射事件。图3 （a–f）展示了MAVEN/MAG（黑色星号）和天问一号/MOMAG（红色星号）测得的总磁场强度（B）、火星太阳轨道坐标系中的仰角（θ）和方位角 ϕ，以及火星太阳轨道坐标系中的磁场三个分量（B_x、B_y和B_z）。如图3所示，天问一号/MOMAG的磁场数据与MAVEN/MAG数据相当。面板（g–k）展示了MAVEN/SWIA测得的太阳风速度、等离子体密度、总动压、质子温度和等离子体β。我们仅使用未受扰动的太阳风中的等离子体和磁场数据点，其筛选标准见第2节。

如图 3中的紫色阴影区域所示，在火星附近探测到一次明显的行星际日冕物质抛射（ICME-1），从12月10日00:00 UT持续至12月11日 14:10 UT，历时约38小时。其前边界确定得很清楚，表现为仰角 θ 、B_x、B_y和 B_z 磁场分量（图 b、d–f）中的方向不连续。ICME 的后边界则由等离子体密度和动压的急剧增强确定（图 h 和 i）。该结构呈现出典型 ICME 的特征，包括磁场强度增强、磁场矢量单调平滑地变化、速度降低、等离子体密度较低以及等离子体β较低。

根据 MAVEN 太阳风筛选标准（Halekas 等（2015）），2021年12月10日 06:09 UT 至 19:50 UT 期间，MAVEN 未测得未受扰动的太阳风数据（以黑线标示）。如图 3 (j) 所示，该时段的等离子体温度显著高于背景太阳风，这可能会影响未受扰动太阳风的筛选。因此，对于这一区域，我们仅采用 5 项标准中的前 4 项（太阳风速度 $|v| > 200$ km/s、归一化磁场波动水平 $\sigma \mathrm{B}/|B| < 0.15$、高度 R > 500 km）来筛选未受扰动的太阳风。在此期间，天问一号穿越弓形激波的信号在 MOMAG 观测中也不明显。可能的原因是，ICME 的到达会显著改变火星弓形激波的整体形态（Jakosky等（2015b））。根据天问一号/MAG 和 MAVEN/MOMAG 的观测，ICME-1 的磁场强度（图 a）高于周围太阳风。天问一号/MAG 和 MAVEN/MOMAG 探测到的平均磁场强度分别为 7.29 nT 和 6.74 nT。在图 (b) 中，MAG 和 MOMAG 的磁场仰角（θ）均显示出明显的旋转，从 -90° 到 90°。如图 (d–f) 所示，天问一号/MOMAG 和 MAVEN/MAG 测得的磁场矢量 B_x、B_y和 B_z同时旋转。根据磁场的旋转特征，ICME-1 也可识别为 SWN 型磁云。

图3 表明，天问一号/MOMAG运行良好，且天问一号/MOMAG与MAVEN/MAG的磁场观测可以互为补充。与 Zhao 等人（2021年）研究的火星典型 ICME 参数相比，ICME-1具有更高的磁场强度（7.02 nT）、更高的速度（438.88 kms^{-1}）、更低的等离子体密度（1.82 cm^{-3}），以及相当的动压（0.57 nPa）。这些参数表明，ICME-1对应一次强烈的 CME 事件。

图4 展示了天问一号和 MAVEN 航天器探测到的第二个行星际日冕物质抛射（ICME-2）。一次行星际日冕物质抛射（以紫色阴影表示）持续约44小时，从2021年12月29日世界时00:00到2021年12月30日世界时20:00。在此期间，行星际观测显示出明显的 ICME 特征，包括磁场强度增强、磁场矢量平滑旋转、速度降低、质子温度较低以及等离子体β较低。CME-2时段内的天问一号/MOMAG数据与 MAVEN/MAG 在图（d–f）中的磁场强度和磁场矢量相当。在 ICME-2 时段内，正如图（d–f）所示，MAVEN 仅在未受扰动的太阳风中短暂运行。天问一号/MOMAG数据对于识别 ICME-2 边界和展示磁场方向旋转至关重要。与（Zhao 等人 2021年研究的火星典型 ICME 参数相比，ICME-2具有更高的磁场强度（6.33 nT）、更低的速度（335.55 kms^{-1}）、更低的等离子体密度（6.37 cm^{-3}），以及相当的动压（1.20 nPa）。两个行星际日冕物质抛射的参数平均值列于表1。

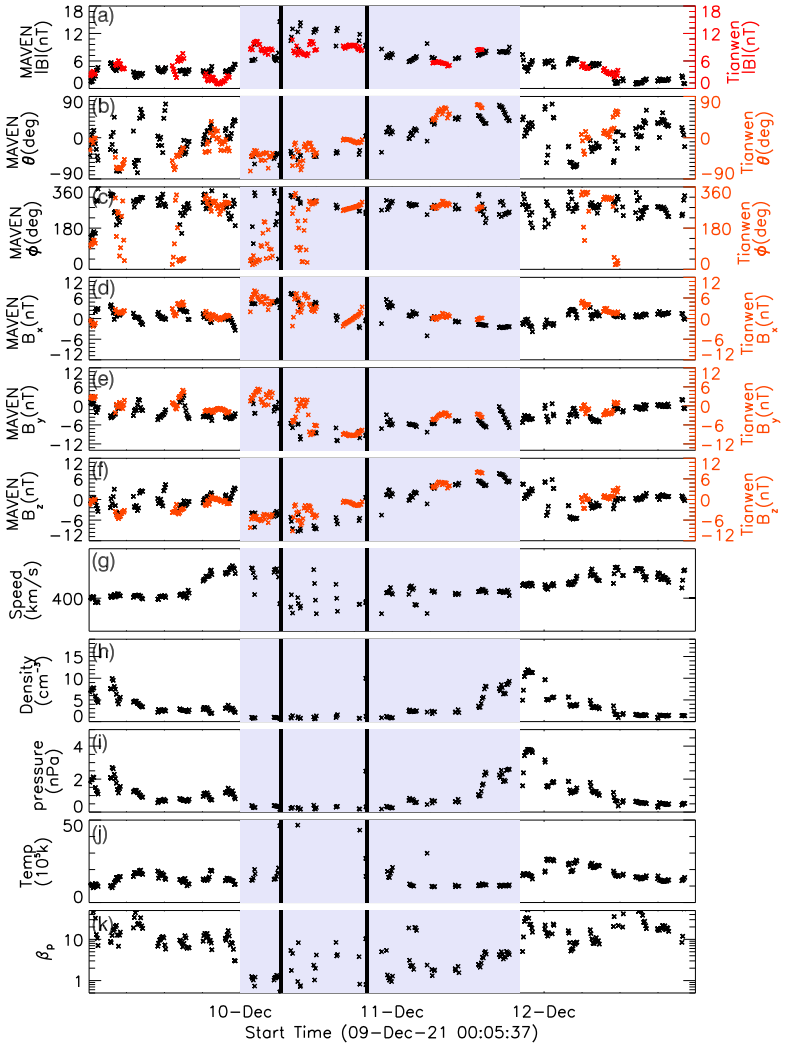


图 **3** *in-situ* 4 00 05 9, . 天 2021 θ 问和 Maven 航天器对从 12 月 日 UT 开始的 天时间间隔的观测。从上到下，这些面板依次显示磁场强度（B）、MSO坐标系中磁场的仰角（ ）和方位角（ϕ）、MAVEN/MAG（黑色星号）和天问一号/MOMAG（红色星号）测得的MSO坐标系中磁场的三个分量（B_x、B_y 和 B_z）、太阳风速度（ V_{sw}）、质子密度（ N_P）、总压（ P_{dp}）、质子温度（ T_P）以及 MAVEN/SWIA 测得的等离子体 β （β）。淡紫色带表示根据本图数据推断的行星际日冕物质抛射对应的时间间隔。

表1. 天问航天器在火星探测到的日冕物质抛射的开始和结束时间

No.	激波时刻 (UT)	开始时间 抛射物的 (UT)	结束时间 抛射物的 (UT)	抛射物中的平均值 B (nT)	B_s (nT)	V_{sw} (km/s)	T_p (10^5K)	N_p (厘米$^{-3}$)	P_{dp} nPa
1	——	2021-12-10T00:00	2021-12-11T14:10	7.02	4.99	438.88	13.59	1.82	0.57
2	——	2021-12-29T00:00	2021-12-30T20:00	6.33	1.67	335.55	7.03	6.37	1.20

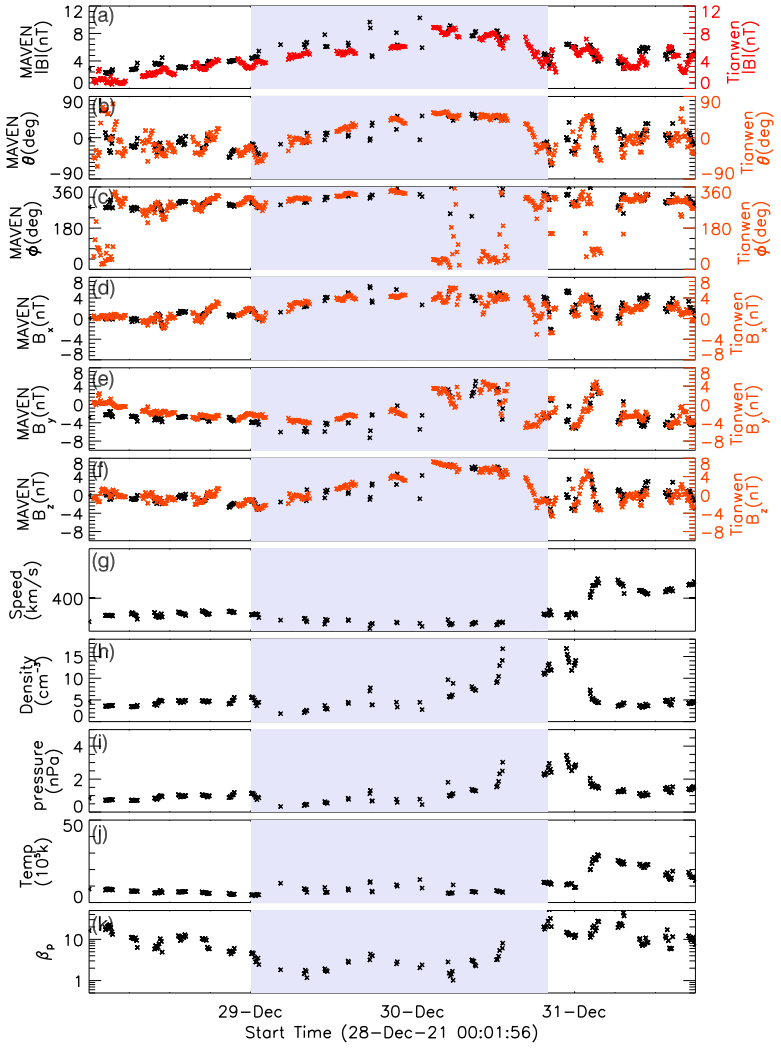


图 4 *in-situ* 4 00 01 28, 。天问和 2021 Maven 航天器对从 12 月 日 UT 开始的 天时间段的观测。淡紫色带表示根据本图数据推断出的行星际日冕物质抛射区间。图的设置与图 3 相同。

4. 共转相互作用区事件

根据共转相互作用区的判据，我们从2021年11月16日至12月31日期间识别出3个共转相互作用区事件。共转相互作用区目录及其平均参数见表2。2021年11月18日至19日，天问一号和 MAVEN 航天器记录到一个共转相互作用区事件（共转相互作用区-1），如图 5所示。图中的紫色阴影区域表示该共转相互作用区的起止时间。从11月18日13:00 UT至11月19日13:00 UT，共转相互作用区-1持续约24小时，短于火星上共转相互作用区的平均持续时间（Huang 等（2019））。在此期间，共转相互作用区-1表现出磁场压缩、质子数密度增大、温度升高以及太阳风速度持续增大等特征。未观测到与共转相互作用区-1相关的明显前向激波或反向激波。共转相互作用区-1的最大磁场强度为9.5 nT。该共转相互作用区的速度从 ∼390 km/s 增至518.53 km/s，平均速度为415.04 km/s。质子密度同时降低、质子温度升高，可用于识别流界面。图 5 中的蓝色竖线标示了流界面的时刻，即11月19日03:40 UT；（Su 等（2023））也识别出了该流界面。

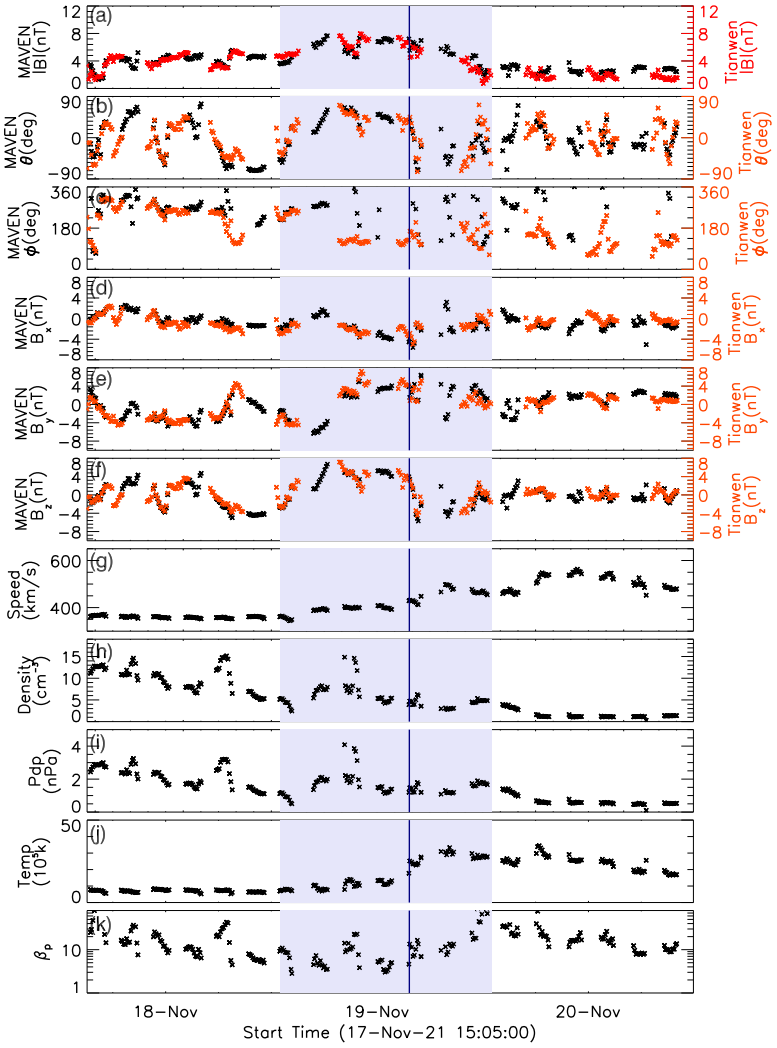


图 5. 天问和 MAVEN 航天器 *in-situ* 对 2021年11月17日 15:05 UT 起始的 3 天时间区间的观测。淡紫色带表示根据本图数据推断出的共转相互作用区区间。蓝色垂直线表示共转相互作用区的流界面。绘图设置与图 3 相同。

2021年12月16日至12月18日，天问一号和 MAVEN 航天器探测到另一个共转相互作用区事件（SIR-3）。两个事件（共转相互作用区-1和SIR-3）相隔27.7天，约相当于一次太阳自转。如图 6所示，紫色阴影区域表示共转相互作用区的持续时段。该共转相互作用区仅持续23小时，远短于火星上共转相互作用区的典型持续时间（Huang 等（2019））。2021年12月16日06:00 UT，磁场强度、体速度、质子密度和动压同时急剧升高，呈现出明显的前向激波特征。SIR-3期间的速度从约300 kms^{-1} 增至545 kms^{-1}，平均值为446.9 kms^{-1}。MAVEN/MAG测得SIR-3的最大磁场强度为9.5 nT，天问一号/MOMAG测得的最大值为8.8 nT，略低于Huang 等 (2019) 报告的共转相互作用区平均磁场强度。SIR-3的平均磁场强度为4.95 nT。SIR-3的最大密度和平均密度分别为20 cm^{-3} 和6.01 cm^{-3}。由于缺少连续的太阳风等离子体数据，难以识别SIR-3的流界面。图 6 中的蓝色竖线标示了SIR-3可能的流界面；12月16日19:50 UT时，质子温度升高而质子密度降低。

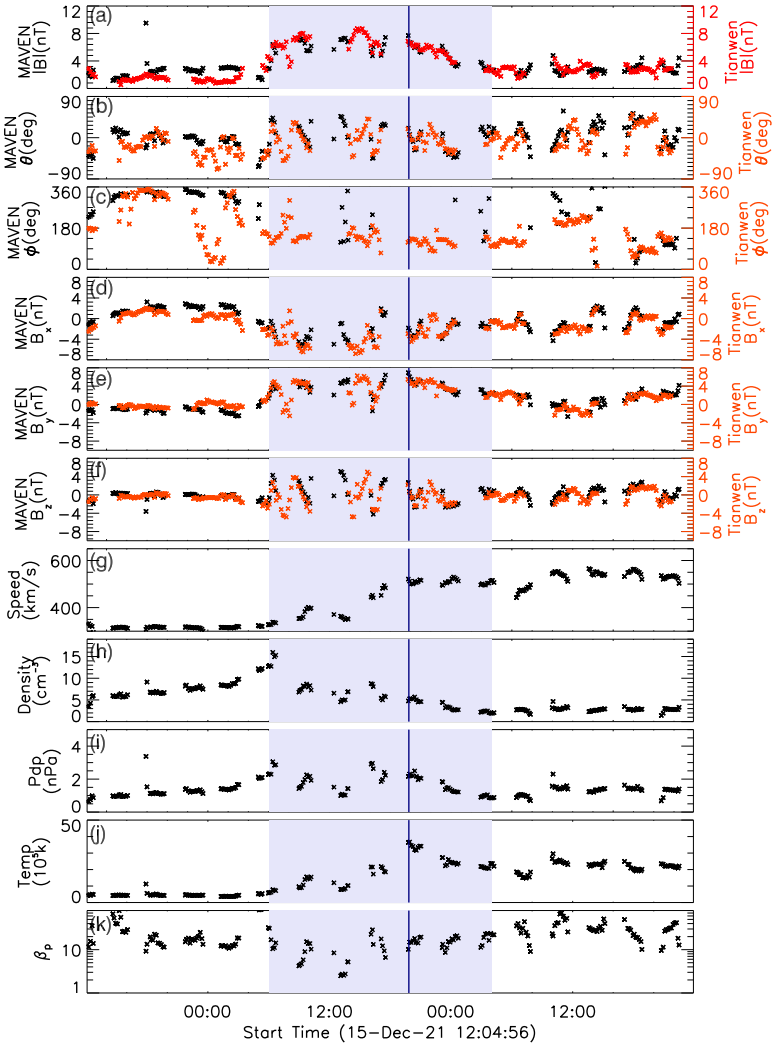


图 6 *in-situ* 3 12 04 15, 。天问和 2021 MAVEN 航天器对从 12 月 : UT 开始的 - 天时间间隔进行的观测。淡紫色带表示根据本图数据推断出的共转相互作用区间隔。图的设置与图3相同。

比较共转相互作用区-1和SIR-3中的参数可知，这两个共转相互作用区的平均参数相当。这表明，这两股高速太阳风流来自同一个日冕洞，并在相邻的两次太阳自转中被观测到。

表 2. 天问航天器在火星探测到的共转相互作用区的开始和结束时间

No.	开始时间 共转相互作用区的 (UT)	结束时间 共转相互作用区的 (UT)	时间 流界面 (UT)	共转相互作用区中的平均值 B (nT)	B_s (nT)	V_{sw} (千米/秒)	T_p (10^5开尔文)	N_p (cm^{-3})	P_{dp} nPa
1	2021年11月18日13:00	2021年11月19日13:00	2021年11月19日03:40	5.33	2.12	415.04	16.38	5.73	1.62
2	2021年12月2日11:00	2021年12月3日19:30	2021-12-02T21:15	9.06	2.93	428.47	19.35	9.33	2.61
3	2021-12-16T06:00	2021-12-17T04:00	2021-12-16T19:50	4.95	1.80	446.95	19.51	6.01	1.78

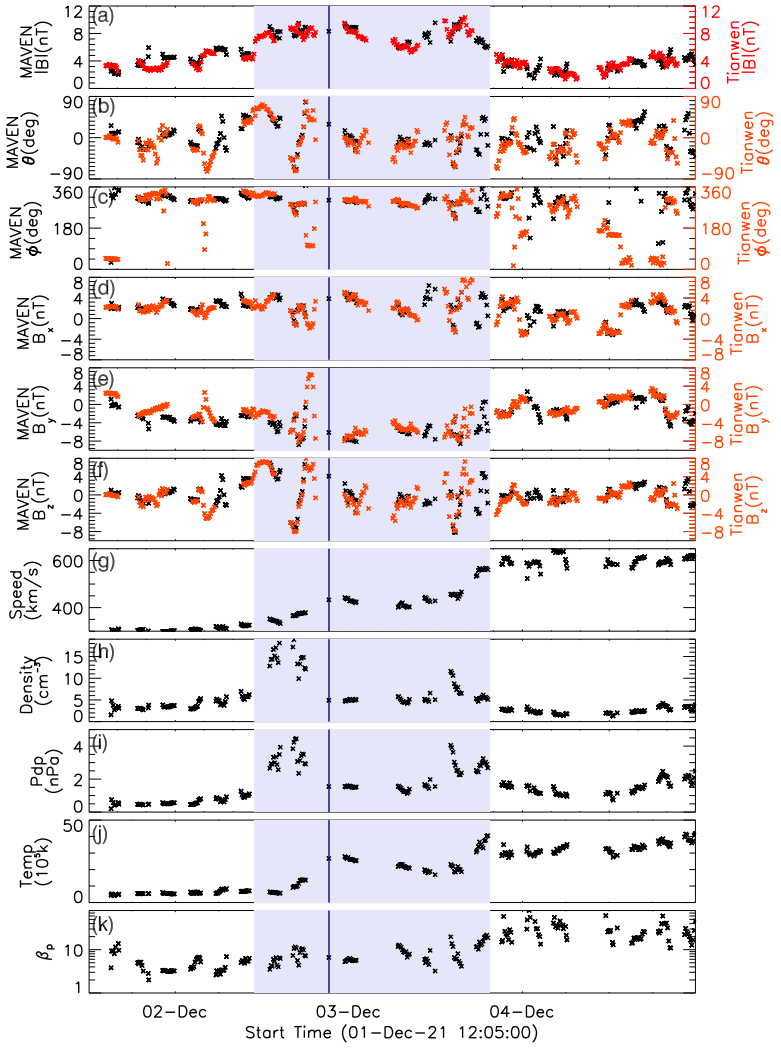


图 7 *in-situ* 4 12 05 01, 。天问和 MAVEN 2021 航天器对 12 月 : UT 开始的为期 - 天的时间段进行的观测。淡紫色带表示根据本图数据推断出的共转相互作用区（SIR）时段。图的设置与图3相同。

如图7所示，灰色阴影表示天问一号和MAVEN航天器探测到的流相互作用区-2时段。流相互作用区-2两侧的一对前向—反向激波分别于12月2日约11:00 UT和12月3日约19:30 UT被观测到。前向激波的特征是磁场、体速度、质子密度和动压同时增加。反向激波的特征是体速度急剧增加，而磁场、质子密度和动压降低。值得注意的是，在火星，仅约4%的共转相互作用区伴有前向—反向激波对（Huang 等（2019））。流相互作用区-2持续约32.5小时，与火星上共转相互作用区的平均持续时间相当。流相互作用区-2的速度从 ~300km/s升至581.02 km/s，平均值为428.47 km/s。流相互作用区-2的平均磁场为9.06 nT，较周围太阳风显著增强。

如果共转相互作用区随太阳自转而转动，那么天问一号和 MAVEN 应在流相互作用区-2 之后 27 天探测到另一个共转相互作用区。我们调查了天问一号和 MAVEN 在 2021年12月28日至31日期间的原位观测。在此期间仅记录到一次典型的行星际日冕物质抛射，如图 4所示。在 ICME-2 时段之后，图 4显示体速度和温度明显升高，而质子密度和压力降低。这

表明该结构由一个共转相互作用区和一个行星际日冕物质抛射或复杂抛射体组成。图 1 展示了火星、金星、水星、地球和 STEREO-A 的位置。我们将结合靠近地球的 Wind航天器和 STEREO-A 航天器的原位观测以及共转相互作用区目录（Chi 等（2022）），研究共转相互作用区从 1 天文单位到 1.52 天文单位的演化，并预测未来共转相互作用区的到达时间（Jian 等（2006）；Chi 等（2018））。

5. 结论与讨论

天问一号任务是中国首次火星探测任务。天问一号搭载的MOMAG能够对近火星空间的矢量磁场进行高质量测量。MOMAG于2021年11月16日至2021年12月31日获取的磁场数据最近已向公众发布。我们利用天问一号/MOMAG首批可用磁场测量数据，并结合MAVEN/MAG和SWIA的观测，编制了行星际日冕物质抛射和共转相互作用区目录。

MOMAG和MAG的磁场观测为联合测量并比较行星际日冕物质抛射和共转相互作用区期间的矢量磁场提供了独特机会。正如我们在论文中所述，天问一号/MOMAG测得的磁场总强度、磁场方向的仰角（θ）和方位角（ϕ）分量，以及火星太阳轨道坐标系中的三个磁场分量（B_x、B_y和B_z），均与MAVEN/MAG的观测结果相当。鉴于MAVEN调整了轨道并缩短了其处于太阳风中的时间，目前天问一号/MOMAG数据几乎是火星附近唯一的行星际磁场监测数据。我们期待利用天问一号和MAVEN的多项观测，进一步研究火星附近的行星际日冕物质抛射和共转相互作用区。这些观测有助于加深我们对火星附近共转相互作用区和行星际日冕物质抛射特征的认识。

未来，结合贝皮科伦坡号、STEREO、Wind、SOHO、天问一号和MAVEN的多点观测，将为研究行星际日冕物质抛射从太阳表面传播至1.52天文单位处的起源与传播过程提供独特机会。如图1所示，在此期间，这些航天器有机会处于同一连线上（合），这将有助于我们解决日球层中日冕物质抛射演化的一些未解问题。此外，结合Wind或STEREO-A在1天文单位处的测量数据，还可研究共转相互作用区的基本性质及相关激波从1天文单位到1.52天文单位处的演化。行星际日冕物质抛射和共转相互作用区的到达会扰乱整个火星高层大气—电离层—磁层系统，并显著影响火星大气中离子逃逸的瞬时速率（Jakosky等（2015b））。天问一号搭载的火星离子与中性粒子分析仪（MINPA）（Kong et al. 2020）和火星高能粒子分析仪（MEPA）（Tang et al. 2020）能够探测火星空间等离子体环境中的低能离子、中性粒子、电子、质子、α粒子和重离子。天问一号航天器搭载的MOMAG、MINPA和MEPA所获得的观测数据将揭示火星高层大气—电离层—磁层系统对行星际日冕物质抛射或共转相互作用区的响应。

致谢

所有天问一号磁场数据均可通过行星探测计划科学数据发布系统获取（http://202.106.152.98:8081/marsdata/），您也可以直接从 MOMAG 团队官方网站下载本文使用的数据（http://space.ustc.edu.cn/dreams/tw1momag/）。我们感谢整个 MOMAG 团队提供数据访问权限和支持。本文使用的所有 MAVEN 数据均可从美国国家航空航天局的行星数据系统获取（https://pds-ppi.igpp.ucla.edu/mission/MAVEN/MAVEN/）。

本研究得到国家自然科学基金委员会（42130204、41904151、42188101、42074222）、中国科学院战略性先导科技专项（XDB41000000）以及中国国家航天局民用航天技术预先研究项目（资助编号 D020104）的资助。

参考文献

Brain, D. A.、McFadden, J.、Halekas, J. S. 等，2015，《地球物理研究快报》，42，9142；Burlaga, L.、Sittler, E.、Mariani, F. 和 Schwenn, R.，1981，《地球物理研究杂志：空间物理》，86，6673

Cannon, P., Angling, M., Barclay, L., 等，2013年，《极端空间天气：对工程系统和基础设施的影响》（英国皇家工程院） Cheng, L. 2023年，《天体物理学杂志》，审稿中

Chi, Y., Shen, C., Luo, B., Wang, Y., & Xu, M. 2018年, Space Weather，16，1960 Chi, Y., Shen, C., Scott, C., 等, 2022年，Space Weather，20，e2022SW003112 Chi, Y., Shen, C., Wang, Y., 等，2016年，太阳物理学，291，2419 Connerney, J., Espley, J., Lawton, P., 等，2015a，空间科学评论，195，257 Connerney, J. E., Espley, J. R., DiBraccio, G. A., 等，2015b，《地球物理研究快报》，42，8819 Crider, D. H., Espley, J., Brain, D. A., 等，2005年，《地球物理研究杂志：空间物理》，110 Dubinin, E., Fraenz, M., Woch, J., 等，2009年，《地球物理研究快报》，36 Gonzalez, W. D., Tsurutani, B. T., & De Gonzalez, A. L. C. 1999年，空间科学评论，88，529 Gosling, J., & Pizzo, V. 1999年，共转相互作用区，21 Halekas, J., Taylor, E., Dalton, G., 等，2015年，空间科学评论，195，125 Halekas, J., Ruhunusiri,S., Harada, Y., 等，2017年，《地球物理研究杂志：空间物理》，122，547 Huang, H., Guo, J., Wang, Z., 等，2019年，《天体物理学杂志》，879，118 Jakosky, B. M., Lin, R. P., Grebowsky, J. M., 等, 2015a，空间科学评论，195，3 Jakosky, B. M., Grebowsky, J. M., Luhmann, J. G., 等，2015b，科学，350，aad0210 Jian, L., Russell, C., Luhmann, J., & Skoug, R. 2006年，太阳物理学，239，337 Kong, L., Zhang, A., Tian, Z., 等，2020年，《地球与行星物理》，4，333 Liu, K., Hao, X., Li, Y., 等，2020年，《地球与行星物理》，4，384 Morgan, D. D., Gurnett, D. A., Kirchner, D. L., 等, 2010年，《伊卡洛斯》，206，95 Richardson, I. G., & Cane, H. V. 2012年,《空间天气与空间气候》, 2, A01 Rouillard, A., & Lockwood, M. 2007年,《空间研究进展》, 40, 1078 Shen, C., Chi, Y., Wang, Y., Xu, M., & Wang, S. 2017年,《地球物理研究杂志：空间物理》, 122, 5931 Su, Z., Wang, Y., Zhang, T., et al. 2023年,《天体物理学杂志快报》, 审稿中 Tang, S., Wang, Y., Zhao, H., et al. 2020年,《地球与行星物理》, 4, 355 Trotignon, J., Mazelle, C., Bertucci, C., & Acu˜na, M. 2006年,《行星与空间科学》, 54, 357 Wan, W., Wang, C., Li, C., & Wei, Y. 2020年,《自然·天文学》, 4, 721 Wang, C., Rosen, I. G., Tsurutani, B. T., et al. 2016年,《空间天气与空间气候》, 6, A5 Wang, Y., Zhang, T., Wang, G., et al. 2023年,《地球与行星物理》, 7, 1, 数字对象唯一标识符: 10.26464/epp2023028Xu, S., Fang, X., Mitchell, D. L., et al. 2018年,《地球物理研究快报》, 45, 7337 Yi˘git, E., Kn´ı˘zov´a, P. K., Georgieva, K., & Ward, W. 2016年,《大气与太阳-地球物理学杂志》, 141, 1 Yu, B., Scott, C. J., Xue, X., et al. 2021年,《天体物理学杂志》, 916, 106 Zhang, C., Rong, Z., Nilsson, H., et al. 2021a,《天体物理学杂志快报》, 922, L33 Zhang, J., Richardson, I., Webb, D., et al. 2007 年 ,《地球物理研究杂志：空间物理》 , 112, A10102 Zhang, J., Temmer, M., Gopalswamy, N., et al. 2021b,《地球与行星科学进展》, 8, 1 Zhao, D., Guo, J., Huang, H., et al. 2021年,《天体物理学杂志》, 923, 4 Zou, Z., Wang, Y., Zhang, T., et al. 2023年, arXiv 预印本 arXiv:2302.04671