Draft version March 14, 2023 年使用 LaTeX
twocolumn 样式，通过 AASTeX63 排版

arXiv:2303.06465v1 [astro-ph.SR] 11 Mar 2023

S-Web 成分增强的起源： 慢至中速太阳风

B. J. Lynch, [1] N. M. Viall, [2] A. K. Higginson, [2] L. Zhao, [3] S. T. Lepri, [3] and X. Sun[4]

[1] *Space Sciences Laboratory, University of California–Berkeley, Berkeley, CA 94720, USA*
[2] *NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA*
[3] *Department of Climate and Space Sciences and Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA* [4] *Institute for Astronomy, University of Hawaii–Manoa, Pukalani, HI 96768, USA*

摘要

将整个日球中观测到的太阳风与其在太阳日冕中的起源联系起来，是日球物理学的核心目标之一。慢太阳风的磁场、整体等离子体和重离子成分性质的变异性，被认为源于太阳日冕中的磁重联过程。我们利用 *Wind* 和先进成分探测器 航天器的观测数据，识别出2003年4月15日至5月13日（卡林顿自转周 2002）太阳风中变异性和成分增强的区域，并证明它们与描述日冕大尺度磁拓扑的分界线网（S-Web）结构之间的关系。其中包括4个伪流（PS）风区间，以及2次头盔流线（HS）日球电流片/等离子体片穿越（另有1次行星际日冕物质抛射），这些区间均表现出增强的氦核与质子比和/或碳、氧、铁离子电荷态升高。我们应用磁螺度–增量的部分方差（H_m–PVI）方法，识别相干磁结构，并量化其在各区间内的性质。这些结构在HS风和PS风中的平均持续时间均为 ∼1 小时。我们发现，在与HS相关的太阳风中，1.5–2小时尺度的PVI等待时间分布相较于幂律拟合呈现适度增强，而在PS区间中则不存在这一现象。我们结合以往对慢太阳风中 ∼90 分钟周期性密度结构的观测、动态S-Web模型的进一步发展，以及未来帕克太阳探测器 与太阳轨道器 联合观测活动的背景，对研究结果进行了讨论。

关键词： 太阳风 — 太阳：日球 — 太阳：日冕 — 太阳：磁场 — 太阳：太阳—地球关系

1. 引言

太阳日冕的全局磁几何直接决定太阳风外流的结构（例如，Zirker 1977年；Axford 等，1999年；Antiochos等，2007、2011年；Cranmer 2012年）。数十年的原位观测表明，日球结构和太阳风性质反映了其源区的日冕磁结构（Zurbuchen 2007年；Zhao 等，2014年）。在太阳活动极小期，极区日冕洞与快速、稀薄太阳风相关（Geiss 等，1995年；McComas 等，2002年），而头盔流线（HS）带和日球电流片（HCS）则与较慢、较致密且变化更大的太阳风相关（Gosling 1997年；McComas 等，1998年b；Zurbuchen 等，2002年；Zhao等，2009）。在太阳活动极大期，头盔流线带高度扭曲，伪流（PS）日冕结构通常也发挥着重要作用对黄道面内太阳风的贡献（Riley与Luhmann，2012年）。

HS 带的大尺度闭合磁通系统将相反极性的开放磁场分隔开来，从而形成日冕电流片；日冕伪流线（有时称为单极流线）则是被单一极性的开放磁场包围的闭合磁通区域（例如 Wang等，2007年；Titov等，2012年；Rachmeler等，2014年；Wang等，2012年；Wang与Panasenco，2019年；Mason等，2021年）。因此，源自日冕伪流线的太阳风往往比来自冕洞的快太阳风更类似于稠密且变化显著的 HS慢太阳风（Crooker等，2012年），但观测已经确立，名义上的快太阳风与慢速太阳风之间存在连续的状态谱，而不是明显分离的双峰分布（例如 Stakhiv等，2015年，2016年）。

将太阳风与其起源源区联系起来，已成为日球物理学的核心目标之一，旨在检验并约束不同的太阳风形成理论（Viall & Borovsky 2020 年）。此外，准确的空间天气预报需要了解日球中的不同太阳风流及其

通讯作者：Benjamin J. Lynchblynch@berkeley.edu

形成位置，例如，已知中尺度结构会驱动磁层动力学（Viall et al. 2021年）。因此，建立这种太阳—日球层联系是帕克太阳探测器 (PSP；Fox et al. 2016年）和太阳轨道器 （M¨uller et al. 2020年）任务的基本科学目标之一。

白光日冕仪和日球层成像数据表明，源自冕盔流柱的太阳风包含一种持续而间歇性的增强亮度外流，称为“流柱团块”；这些流柱团块描绘了慢太阳风主体的外流（Sheeley等 1997年、1999年、2009年；Rouillard等 2010a 年、 b ；Sanchez-Diaz 等 2017b 年）。尽管关于日冕流柱和伪流线附近稳态慢太阳风的基本理论已经确立（例如Arge和Pizzo 2000年；Lepri等 2008年；Riley和Luhmann 2012年及其中的参考文献），但这种稳态图景难以与通过遥感和原位观测发现的慢太阳风变化相协调；这些变化很可能需要一个随时间变化的磁重联成分。

太阳风变化的另一个例证是，Kepko等（2020年）分析了25年的太阳风数据，在Viall等（2008年）最初研究的基础上进行了拓展，发现尺寸范围为70–900兆米的间歇性周期性密度结构是慢太阳风中普遍存在的特征，其出现时间占多数（$\gtrsim$ 60%）。此外，Viall等（2010年）以及Viall和Vourlidas（2015年）研究了太阳—地球关系观测台（STEREO；Kaiser等 2008年）的SECCHI（Howard等 2008年）HI1和COR2白光成像数据，并表明日冕流柱外流的强度变化中存在明显的 ∼90 分钟变化特征，从而证实许多周期性密度结构是太阳风形成过程的结果。

在原位慢太阳风中，尤其是在日冕电流片附近，人们发现了时间尺度为数小时的磁结构，并将其与磁重联联系起来（Crooker等 1996，2004年；Suess等 2009）。高时间分辨率的成分数据揭示了周期为0.5–3小时的太阳风结构，其氦、氧和碳密度以及重离子电荷态均呈现出特征性变化（Viall等 2009；Kepko 等人 2016 ）。原位元素和离子成分测量通常被用作太阳风形成过程以及低至中日冕中“冻结-in”日冕电子温度的替代指标；当太阳风整体膨胀的特征时间尺度超过各种离子种类的电离和复合时间尺度时，便可认为离子电荷态被冻结在太阳风外流中（例如Hundhausen等 1968；Owocki等 1983；Ko等 1997；Landi等 2012年b，c；Landi和Lepri 2015年）。事实上，Kepko等（2016年）表明，这些密度和成分变化也常常对应于具有相干磁场特征以及双向电子流时段的区域，这表明其中可能依次存在小型磁通量绳或类似磁通绳的时段。初步迹象显示，原位小磁通绳可能与离子成分增强的时段相吻合（Foullon等 2011年；Feng和Wang 2015年；Yu等 2016年；Kepko 等人 2016）。

慢太阳风起源的分离面网（S-Web）模型（Antiochos 等人 2011）基于太阳日冕的磁场几何结构，预测磁场的拓扑分离面是最有可能发生互换重联的区域——互换重联是将闭合磁通日冕等离子体释放到邻近开放磁力线上的机制。

动态S-Web模型扩展了此前关于冕洞边界处磁重联的观测和理论研究（Madjarska等 2004年；Edmondson等 2009年、2010年；Linker等 2011年；Rappazzo等 2012年；Brooks等 2015年；Pontin & Wyper 2015年；Scott等 2021年）以及活动区外围太阳风外流的研究（例如Sakao等 2007年；Harra等 2008年；Baker等 2009年；Brooks & Warren 2011年；Edwards等 2016年），旨在解决与慢太阳风相关的一系列悬而未决的问题，包括其超出预期的纬向范围（Crooker等 2012年），以及慢速太阳风等离子体、磁场和成分的原位测量所表现出的变化性似乎要求存在的磁重联成分（例如Viall等 2009年；Zhao等，2009；2014年、2017年；Lepri等 2013年、2014年；Kepko 等人 2016；Sanchez-Diaz等 2017a、2019年；Di Matteo 等人 2019；R´eville等 2022年）。

Higginson 等人 （2017a、b）给出了模拟结果，表明互换磁重联普遍存在，并且很可能是释放大量慢太阳风的主要机制，尤其是在沿 S-Web 拓扑特征的区域。自该项工作以来，在模拟由磁重联产生的慢太阳风结构以及与动态 S-Web 外流相关的互换重联过程方面，已经取得了许多重要进展，这些进展总结于图 1中。图 1（a）展示了 Lynch（2020）模拟中形成流线团块通量绳/等离子体团的挤断重联三维结构。这些模拟结果在日冕白光日冕仪合成观测中，与日冕流入和流线团块外流的形态及运动学均表现出定性一致性，其他近期建模工作也得出了类似结果（例如 R´eville 等人，2020）。图 1（b）展示了 Higginson &Lynch（2018）的模拟结果；他们表明，通量绳/等离子体团结构的持续形成几乎充满了整个日球电流片。图 1（c）展示了 Aslanyan 等人 （2022）的模拟结果；他们研究了三维伪流构型中发生的互换重联，并基于模拟的瞬时磁连接，构建了一个合成的超热电子俯仰角代理量。

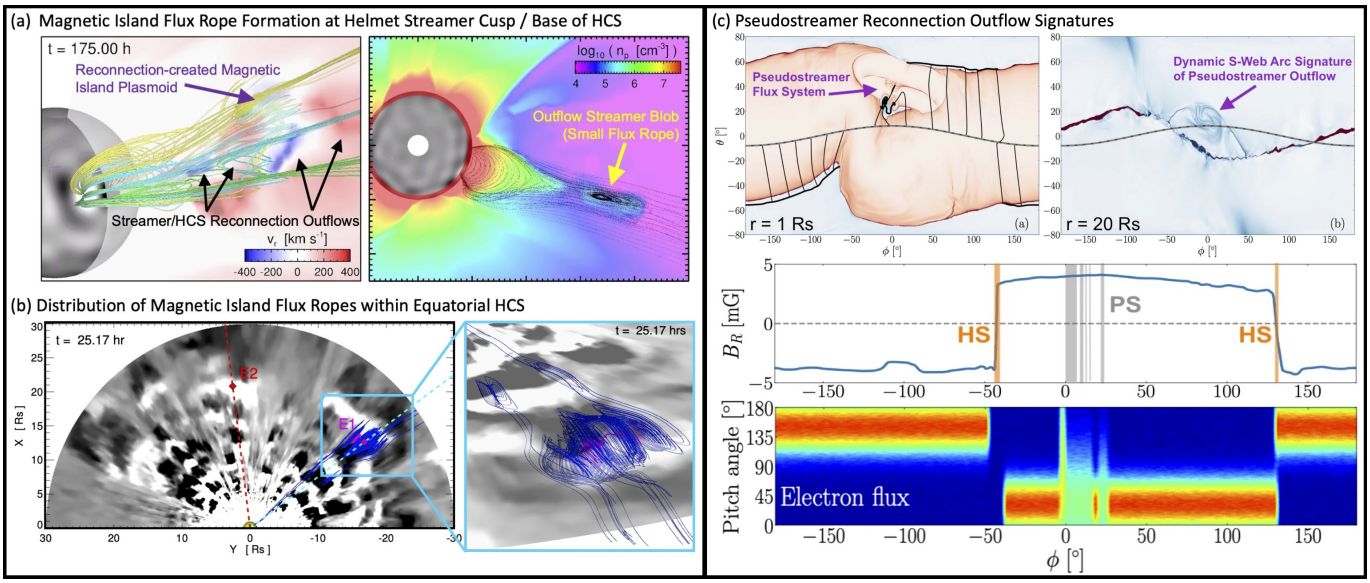


图 1。 头盔流线和伪流线中生成慢至中速太阳风内高密度闭合磁场等离子体间歇性外流的磁重联机制。（a）HS团块脱离磁重联的 ARMS 模拟（改编自 Lynch 2020）以及（b）日球电流片的小型磁通绳/磁重联等离子体团结构（改编自Higginson & Lynch 2018）。（c）伪流线中互换重联外流的 ARMS 模拟，以及基于磁连接得到的超热电子俯仰角合成代理量（改编自 Aslanyan et al.2022）。

此前，Zhao 等人 （2017）利用 先进成分探测器（ACE；Stone et al.1998）在 CR 2002 期间获取的太阳风数据，基于日球回溯映射、观测者连接磁力线的 PFSS建模，以及同步图中磁力线足点附近的 EUV 195 Å 辐射像素亮度，建立了源区分类方案。将其基于 EUV 亮度的源区分类（“冕洞”“冕洞边界”“宁静太阳”“活动区边界”“活动区”和“头盔流线”）应用于 1998–2011年的原位数据后，得到了 O^{7+}/O^{6+} 按其距冕洞的距离排列的统计分布，表明日冕电子温度、质量密度和/或外流速度的某种组合相对平滑地增加。

人们已经制定了许多其他太阳风分类方案，用于识别特定的太阳风“类型”，以便尝试揭示不同等离子体、磁场和成分特征之间的物理关系之内 以及 不同太阳风类型之间的物理关系（这些类型通常是日冕源区分类的替代指标）。例如，Xu和Borovsky(2015年) 部分基于质子比熵构建了“四等离子体”分类方案， $S_p = T_p/n_p^{2/3}$，并表明该方案与O^{7+}/O^{6+}、C^{6+}/C^{5+} 特征具有显著相关性；在Alfv´én速度–比熵（v_A–S_p）空间中，其“抛射体”“冕洞”“流线带”和“扇区反转”（HCS/HPS穿越）类型之间也有相对清晰的区分。Ko等 (2018年) 研究了垂直速度涨落（δv_T， δv_N 在RTN坐标中）并给出了高速流和伪流区间（低速δv）中各种太阳风性质的叠加历元趋势，包括磁场涨落、Alfv´én速度、超热电子束流的宽度、质子比熵 S_p、氦丰度、碳、氧和铁的电荷态以及Fe/O成分。Bloch等 (2020年) 采用了几种机器学习技术，根据 S_p–O^{7+}/O^{6+} 参数空间中的数据，识别“流线带”和“冕洞”太阳风类型簇，数据来自尤利西斯号 和ACE数据。Roberts等(2020年) 使用了 k-均值聚类方法，该方法基于包括氧和铁电荷态以及Fe/O比值在内的多个太阳风变量；将结果在湍流研究中常用的交叉螺度（σ_c）和残余能量（σ_r）参数空间中进行可视化后，得到了一些区分明显的太阳风类型，同时也得到了一些高度重叠的太阳风类型。

在本文中，我们将 Zhao 等人（2017年）对 CR 2002 的分析扩展至源区的磁复杂度，并研究等离子体、磁场和成分中太阳风变化性度量与相关源区大尺度几何 S-Web 构型之间的关系。在第 2节中，我们介绍 *Wind* 和 ACE 航天器在 CR 2002 期间获得的原位太阳风观测，并定义若干个质子和 α 粒子密度呈现增强变异性的慢速至中速区间。随后我们展示，这些区间中的每一个都对应于碳、氧和铁的离子成分特征增强。在第 3节中，我们执行日球层回溯映射过程，将 1 au 处的原位时间序列映射到势场源表面模型（PFSS）处的卡林顿经度，位置为

2.5 $R_\odot$ （3.1），并显示这些增强变异性和成分的区间可回溯映射至与冕帽流带和日冕伪流带相关的 S-Web 拓扑结构（3.2）。在第 4节中，我们介绍增强变异性区间内磁螺度–增量的部分方差（H_m–PVI）分析，并量化头盔流线（4.2）和伪流线（4.3）慢太阳风之间的相似性与差异性，同时对这些时间序列开展一些统计分析（4.4）。最后，在第 5节中，我们讨论研究结果对于慢太阳风起源理论与建模的意义，以及利用互补的 PSP 和 *Solar Or-biter* 观测推动未来研究的方向。

2. 增强变异性区间

2.1. 质子密度与阿尔法粒子与质子比

与快太阳风相比，慢太阳风中的质子和氦密度（以及它们的相对丰度比）表现出显著更大的变异。快、慢太阳风中的平均阿尔法粒子（He^{2+}）与质子（H^+）比值 $A_{\rm He} \equiv n_\alpha/n_p \times 100$（或 α/p，两者可互换使用）约为3–5%，但快太阳风中的相对变异为 ∼10%，而慢太阳风中可高达 ∼40%（Gosling 1997年；Schwenn 2006年）。长期以来，氦增强一直与CME物质的原位观测相关（例如，Borrini等 1982年；Richardson & Cane 2004年；Zurbuchen等 2016年；Lepri & Rivera 2021年），但近期分析也在量化背景太阳风区间内的氦变异方面取得了显著进展（Kasper等 2007年；Suess等 2009年；Wang 2016a年；Sanchez-Diaz等 2019年）。例如，Kasper等（2007年，2012年）表明，太阳风 α/p 比值同时取决于太阳风速度和太阳活动周期的阶段，其中最慢速太阳风区间内的 $A_{\rm He}$ 随太阳黑子数的变化最大，这支持太阳风氦成分具有多个来源和/或机制的观点（Schwenn等 2006年）。Viall等（2009年）、Kepko等（2016年）及其他研究者表明，太阳风氦丰度（以及氦丰度方差的相关增加）通常与周期性质子密度结构（及其方差增加）同时出现，也与离子和元素组成增加的时期同时出现（另见Kasper等 2012年）。

图2 展示了卡林顿自转周 2002（从 *Wind*/3DP（Lin 等（1995））和 *Wind*/SWE（Ogilvie 等（1995））在 1 AU 处的观测数据。该自转周始于2003年4月15日 21:35 UT，止于2003年5月13日 03:24 UT。从上到下依次绘出体径向速度 V_r、质子数密度 n_p、α粒子数密度 n_α、$A_{\rm He}$ 比值及其方差 $\mathrm{Var}[A_{\rm He}] \equiv \sigma^2_{\alpha/p}$，这些量均按 6小时分箱计算。3DP数据以黑色表示，SWE数据以红色表示。通过目视检查图2 中的时间序列，我们确定了卡林顿自转周 2002 期间的八个不同区间，这些区间可视为慢至中速太阳风（$V_r \lesssim 550$ km s^{-1}），并具有以下一种或多种特征：质子密度升高（$n_p \geq 5$ cm^{-3}）；α粒子密度升高（$n_\alpha \geq 0.25$ cm^{-3}）；$A_{\rm He}$（≥ 5%）升高；或 $\sigma^2_{\alpha/p}$（≥ 0.80升高。每个区间均在顶部 x轴上方标记为 #1–8，并以黄色、绿色、青绿色或紫色阴影标示。选用这些颜色是为了表示不同的大尺度日冕源区构型，相关讨论见第3.2节。唯一不符合慢至中速标准的是区间 #2（紫色阴影），该区间被明确识别为快速行星际日冕物质抛射，并由Richardson 和 Cane(2010年）编入目录。图2中各区间的起止时间列于表1，并附有相关区间平均量的概述。

2.2. 离子和元素组成增强

图 3 显示了 ACE 对 CR 2002 太阳风的测量结果。从上到下依次为：SWEPAM（McComas 等（1998a））测得的太阳风整体速度 V_r、归一化的 272 eV 超热电子俯仰角分布（PAD）、MAG（Smith 等（1998））测得的 RTN 坐标系下的 $\boldsymbol{B}$ 和磁场指向角（δ 为 RT 平面上方/下方的仰角；λ 为 RT 平面内的方位角），以及 SWICS（Gloeckler 等（1998））测得的碳（$Q_{\rm C}$: 4–6+）、氧（$Q_{\rm O}$: 5–8+）和铁（$Q_{\rm Fe}$: 6–20+）的选定离子电荷态成分，以及 Fe/O 丰度比。此处，太阳风速度和磁场数据为 1小时平均值，而 SWICS 成分测量为 2小时平均值。

图 3 还显示了与增强的 n_p、n_α或 $A_{\rm He}$ 变异性相关的各个慢至中等速度太阳风区间，这些区间已在图 *Wind*的数据中得到识别（见图 2）。结合磁场和超热电子俯仰角分布，与扇区边界以及日冕电流片/等离子体片（HCS/HPS）穿越相对应的区间立即显现出来，即编号为 #8 和 #3 的区间，二者均以浅黄色阴影标示。

图3的另一个特别值得注意的特征是，其余每个慢至中等速度区间都与更宽的超热电子束流俯仰角分布和/或碳、氧、铁中升高的电荷态相吻合。尽管 Borovsky（2020年、2021年）近期的分析表明，超热电子束流强度的变化通常伴随着其他等离子体和/或成分性质的同步变化，但我们在此注意到，区间#7、#6和#4的较宽俯仰角分布与 Aslanyan etal.（2022）通过其磁流体力学模拟构建的交换重联伪流光外流合成俯仰角分布在定性上高度一致（图1（c）的下部面板）。我们将在下一节说明，这些区间实际上确实映射到日冕伪流光源区。

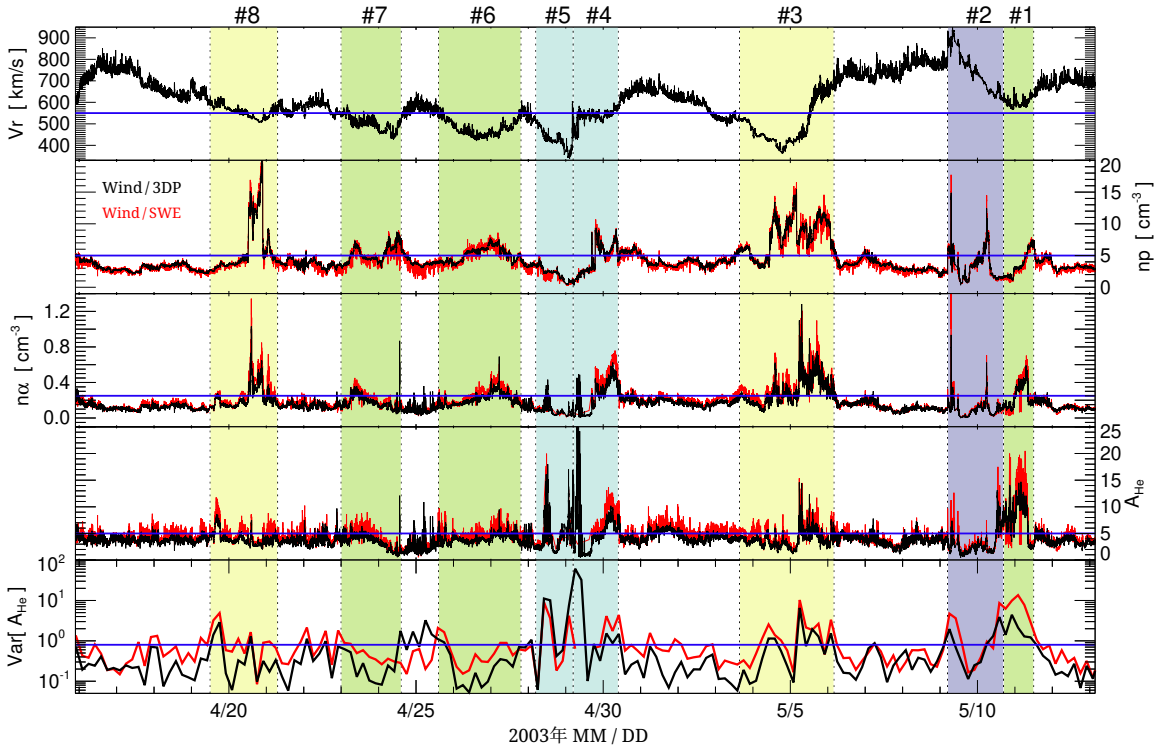


图2。 来自 *Wind* 航天器在卡林顿自转（CR）2002年期间的原位太阳风数据。从上到下依次绘制了体径向速度 V_r、质子数密度 n_p、α粒子数密度 n_α、He^{2+}/H^+ 比值、 $A_{He} \equiv n_\alpha/n_p \times 100$及其方差 $\sigma^2_{\alpha/p}$ （以6小时分箱表示）。黑色曲线为 *Wind*/3DP 的1分钟数据，红色曲线为 *Wind*/SWE 的97秒数据。顶部坐标轴上标记为#1–8的八个区间，代表不同的大尺度日冕源区分类（HS—黄色、PS—绿色、青色、行星际日冕物质抛射—紫色）。各区间的属性总结于表 1。

#	开始时间 日/月 时:分	结束时间 [UT]	来源区域	$\langle V_r \rangle$ [km s^{-1}]	$\langle n_p \rangle$ [cm^{-3}]	$\langle A_{He} \rangle$ [%]	$\langle Q_C \rangle$ [4–6+]	$\langle Q_O \rangle$ [5–8+]	$\langle Q_{Fe} \rangle$ [6–20+]	⟨铁/氧⟩
8	04/19 13:58	4月21日 05:24	HS（Y）	**556 ± 26**	**6.1 ± 4.1**	**5.1 ± 1.6**	**5.07 ± 0.15**	**6.14 ± 0.08**	**10.82 ± 0.96**	0.11 ± 0.02
7	4月23日 00:00	4月24日 14:12	PS（G）	**498 ± 32**	**5.2 ± 1.3**	4.4 ± 1.6	**5.19 ± 0.08**	**6.08 ± 0.02**	10.12 ± 0.52	**0.13 ± 0.02**
6	4月25日 14:24	04/27 19:12	PS（G）	**478 ± 34**	**5.2 ± 1.1**	**5.0 ± 1.1**	**5.24 ± 0.16**	**6.09 ± 0.05**	9.85 ± 0.32	**0.16 ± 0.03**
5	04/28 04:48	04/29 04:47	PS（T）	**432 ± 45**	2.2 ± 1.0	3.9 ± 1.8	**5.52 ± 0.18**	**6.32 ± 0.16**	**11.83 ± 1.29**	**0.19 ± 0.09**
4	04/29 04:48	04/30 09:36	伪流（T）	**534 ± 32**	**4.5 ± 2.3**	**7.6 ± 2.4**	**5.35 ± 0.15**	**6.29 ± 0.14**	**11.07 ± 0.51**	**0.31 ± 0.28**
3	05/03 15:27	05/06 03:56	HS（Y）	**496 ± 95**	**7.9 ± 2.8**	**4.6 ± 1.7**	**5.24 ± 0.24**	**6.20 ± 0.15**	**11.01 ± 0.79**	**0.14 ± 0.07**
2	05/09 04:48	05/10 16:48	行星际日冕物质抛射（P）	738 ± 89	3.5 ± 2.3	3.2 ± 2.1	**5.06 ± 0.15**	**6.12 ± 0.05**	**11.10 ± 1.14**	**0.21 ± 0.11**
1	05/10 16:48	05/11 12:00	PS（G）	**601 ± 20**	3.6 ± 1.8	**9.4 ± 5.3**	**5.19 ± 0.08**	**6.22 ± 0.08**	10.09 ± 0.25	**0.20 ± 0.07**
非区间CR 2002平均值				637 ± 93	4.0 ± 1.9	4.5 ± 1.2	5.01 ± 0.17	6.04 ± 0.09	10.37 ± 0.55	0.11 ± 0.03

表1。 CR 2002年期间每个慢至中等速度、成分增强太阳风区间的开始和结束时间，以及区间平均的太阳风等离子体量： V_r 和 n_p （来自 *Wind*/3DP）、 A_{He} （来自 *Wind*/SWE），以及 Q_C、Q_O、 Q_{Fe}和Fe/O（来自ACE/SWICS）。区间的底色也有所标示（Y—黄色，G—绿色，T—青绿色，P—紫色）。粗体数值表示，与CR 2002年其余非区间时段的平均值相比，速度更慢或增强程度更高。

每个所识别区间内的电荷态和元素组成增强具有以下性质。碳含量增加$^{6+}$ 而碳含量减少$^{5+}$ 将导致碳$^{6+}$/碳$^{5+}$ 比值大幅升高，该比值与通常用于识别日冕电子温度升高时期的氧$^{7+}$/氧$^{6+}$ 比值具有相似的性质（例如，Landi et al. 2012年a；Kepko 等人 2016）。此外，除区间#6和#7外，每个区间还显示出氧$^{7+}$ 的显著增加，同时氧$^{6+}$减少，从而形成了众所周知的氧$^{7+}$/氧$^{6+}$ 比值的局部极大值（例如Zhao等，2009；Wang，2016b）。在区间#3、#4–5和#8期间，较高铁电荷态的水平也有所升高，铁$^{\geq 12+}$，其中包括一些传统

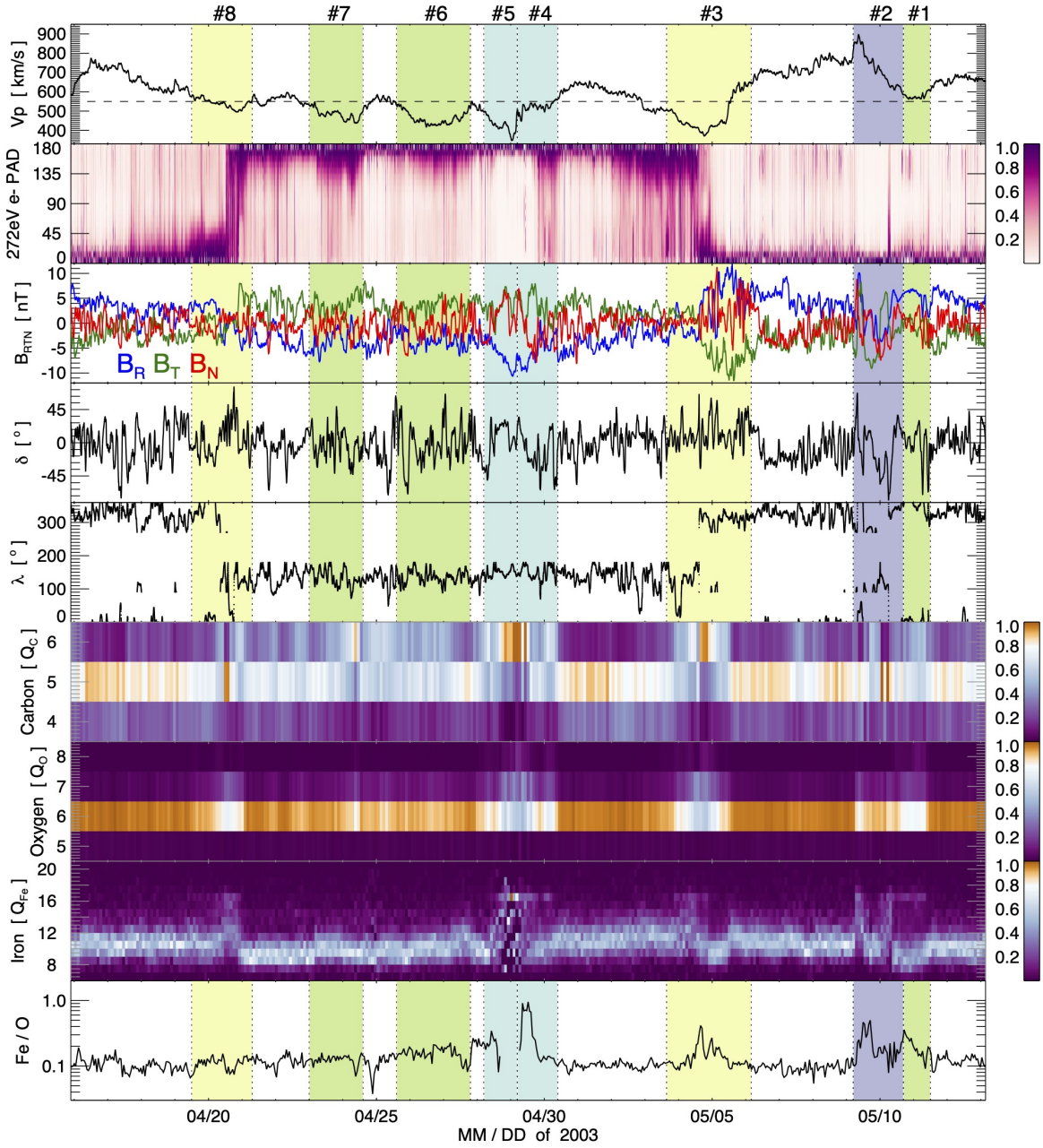


图3。 CR 2002期间，来自ACE/SWEPAM、ACE/MAG和ACE/SWICS的太阳风以及离子和元素组成性质。从上到下依次为：质子 V_r、272 eV超热电子俯仰角分布（PAD）、 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{RTN}}$的磁场分量、磁场仰角和方位角（$\delta$、 λ）、C^{4-6+}、O^{5-8+}和Fe^{6-20+}的分布，以及Fe/O比值。图2 和表1 中的慢至中等速度区间也予以标示。

上被称为“热”的铁$^{\geq 16+}$ （Lepri和Zurbuchen（2004））特征。最后，元素组成比值Fe/O在区间#1–5期间显示出明显增强，而在区间#6–7期间的增强则不太明显。从表1可以看出，只有区间#8未超过非区间Fe/O平均值。

3. 太阳—日球层连接与日冕S-Web

3.1. 日球层弹道反向映射

在此，我们遵循 Parenti 等人 （2021年）及其中所引用文献所述的日球层反向映射标准流程。太阳风在 1 AU 处的原位观测数据，沿着 Parker（1958）帕克螺旋流线，从航天器向太阳进行弹道映射，并假设恒定的 V_r 值等于 ACE 测得的 1 小时平均值。图 4（a）绘出了日球层

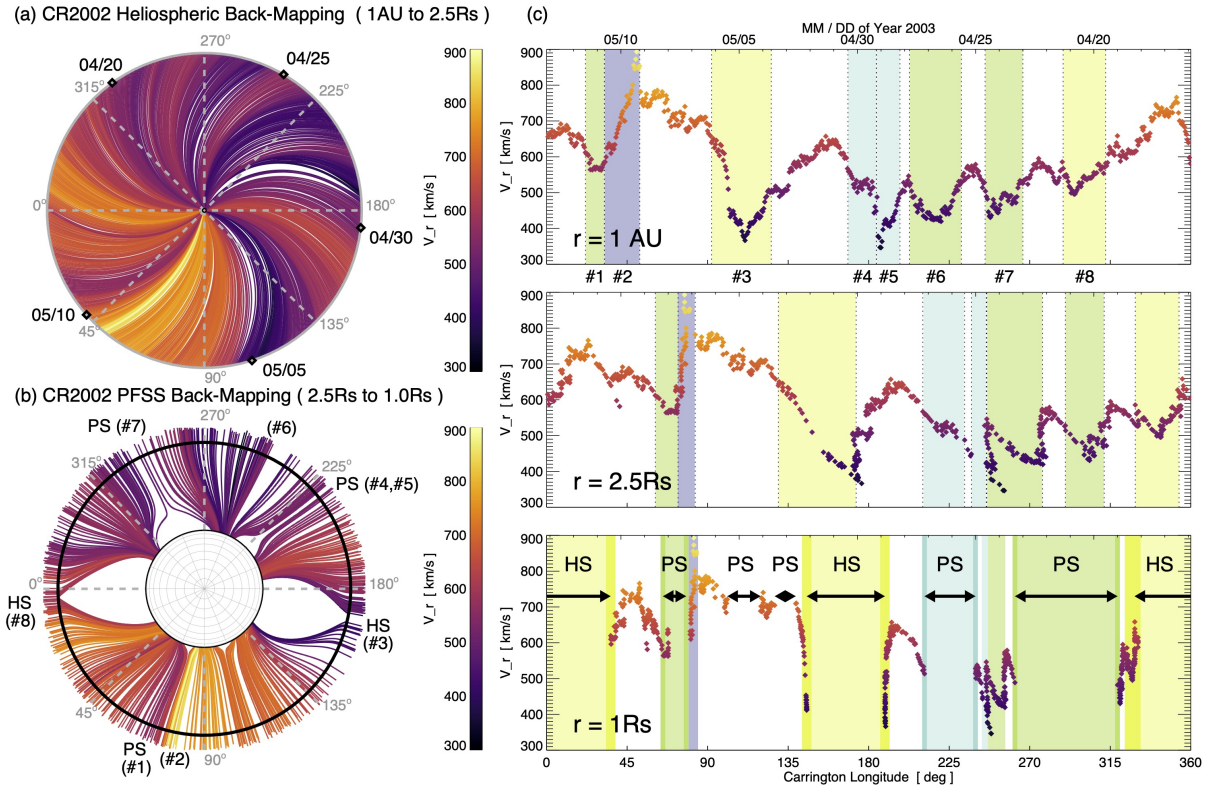


图 4。 CR2002 的日球反向映射。（a）黄道面流线按 1 AU 径向速度值着色，延伸至 $r = 2.5R_\odot$ 源表面。（b）从 R_{ss} 到 $1R_\odot$ 的日球反向映射延续，其中采用 PFSS磁场。黄道面的视角来自太阳北极。（c）将 1 AU 处 ACE/SWEPAM 的 1 小时径向速度时间序列映射到卡林顿经度：先映射至源表面（中图），再映射至太阳表面（下图）；上图显示 1 AU 处的时间序列。第 2 节中的高 α/p 区间也分别显示在各个位置。2

按径向速度着色的帕克螺旋流线表示。

为了将原位太阳风观测反向映射至太阳表面的日冕源区，我们采用标准PFSS模型（例如 Altschuler& Newkirk1969；Wang & Sheeley 1992），以近似太阳日冕的大尺度几何结构。我们根据 MDI 获取的光球磁场视向观测（Scherrer等人 1995年）计算 PFSS外推；这些观测由 太阳与日球层观测台 （SOHO；Domingo等人 1995年）搭载的仪器获得。通过 $B_r = B_{\rm los}/\sin\theta$ 关系，将视向磁场转换为径向磁场。以 CR 2002 的原始高分辨率（3600×1080）MDI日面拼接图为起点，并采用 Sun等人（Sun等人 （2011年）对极区磁场值进行插值，然后将其重新划分为 720×360，并计算阶数达到 $l_{\rm max} = 16$ 的 PFSS球谐函数，源表面高度为 $R_{ss} = 2.5\,R_\odot$。 图4（b）绘出了从 R_{ss} 到下边界 $r = 1\,R_\odot$的磁力线映射。这里标出了大尺度、闭合磁场日冕中的高速流和伪流结构，并注明了各自对应的区间。

图4的上图绘制了1 AU处径向速度随卡林顿经度的变化（如上方的轴 x标签所示，此时时间从右向左变化）。我们还绘出了在 §2.1中识别出的相应增强变异性区间。图4（c）的中图绘制了1小时ACE速度测量随卡林顿经度的变化，位于R_{ss}；而图4（c）的下图显示了位于 $1\,R_\odot$处的流线足点的卡林顿经度。

这种弹道映射方法已被广泛用于估计原位太阳风测量对应的日冕源区（例如 Neugebauer等人 2002年、2004年；Gibson等人 2011年；Zhao 等人 2013年、2017年），包括利用新的PSP开展的研究（例如 Badman等人 2020年；Panasenco等人 2020年；Griton等人 2021年）以及 太阳轨道器 数据（例如 Telloni等人 2021年）。我们注意到，虽然对速度流线或磁力线（例如来自势场源表面模型外推）的积分所产生的数值误差相当小（Stansby&Verscharen 2022），但由这些技术映射得到的磁力线脚点位置的总体“不确定性”通常约为 10° （Neuge-bauer等人 2002年；Leamon & McIntosh 2009年），这主要是由于模型本身固有的假设和简化，例如日冕中的无电流近似，以及未考虑快慢太阳风流之间相互作用的未扰动帕克螺旋结构等。

3.2. *S-Web* 源区构型

分界线网络（S- Web）拓扑结构的静态表示基于 Q-图，该图定义为对数“挤压因子”，$\log Q$。 Q-图量化了磁场的几何连通性（Titov 2007年），即分界面和准分界面是 Q 较高的区域（例如Titov等人 2011年；Antiochos等人 2012年；Scott等，2018）。我们根据 Q 在CR 2002势场源表面模型磁场外推中，按照 Titov （2007年）所述公式计算了 $Q = N^2/|\Delta|$值。

$$N^2 = \left(\frac{\partial Y}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial z}\right)^2 , \quad (1)$$

以及 $|\Delta| = |B_x/B_x^*|$。虽然完整的推导（在任意坐标中）见 Titov（2007），但用球坐标表示的表达式很容易得到：$B_x/B_x^* \to B_r/B_r^*$，起始和终止磁力线位置变为（x_0, y_0, z_0） $\to$（r_0, θ_0, ϕ_0）、（X, Y, Z） $\to$（R, Θ, Φ），微分则变为弧长变化 $\partial y \to r_0\,\partial\theta$、 $\partial Y \to R\,\partial\Theta\sin\theta_0\,\partial\phi$，以及 $\partial Z \to R\sin\Theta\,\partial\Phi$。我们注意到，当起始和终止径向表面分别设为 $r_0 = R_\odot$ 和 $R = R_*$时，便得到 Titov（2007）中方程（22）给出的 N^2 的精确球坐标定义。我们从一组 1536×768 条磁力线的网格计算磁场连通性，这些磁力线从所需的径向距离 r_0 出发，并在（θ, ϕ）中均匀分布。与 Wyper 等人（2016）的 Q-图计算一样，我们采用四阶中心差分格式计算导数。

图5 总结了日冕部分的日心回溯映射过程，以说明成分增强区间与其起源日冕S-网络结构之间的连通性。图5（a）重复显示了1小时平均 V_r 映射至 R_{ss} （见图4（c））的点，并绘出了我们所关注的回溯映射区间的经度范围；在后续每个面板中均标出了这些区间的边界。图5（b）显示了CR 2002的MDI磁图。由PFSS解计算得到的正（负）极性开放磁场区域分别以蓝色（红色）阴影表示；图中还显示了带有代表性绿色磁力线的冕帽流带结构，以及作为黑色等值线的日冕电流片位置（$B_r = 0$ 位于 R_{ss}）。绿色磁力线沿日冕电流片位置、在略低于 R_{ss}的径向距离处追踪，因此代表属于冕帽流带的最大闭合磁通管，并展示了大尺度开放与闭合日冕磁通系统之间的边界。回溯映射区间标注在图的顶部坐标轴上。

图5（c）绘制了 Q-图，位置为 R_{ss}。$\log Q$ 的值也以蓝色和红色阴影表示，以指示 B_r 极性。HCS电流片的位置可根据极性变号处立即确定。每种极性内包含的较深色弧线对应于

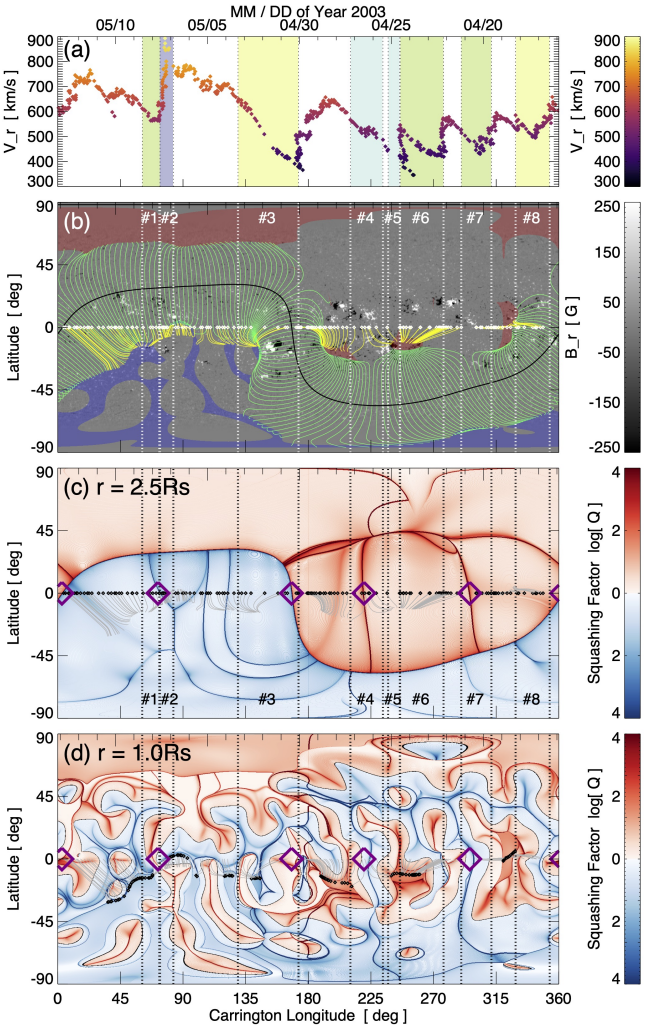


图5。CR2002的PFSS外推磁结构，以及反向映射的慢至中速太阳风原位区间。（a）反向映射的 V_r 时间序列和区间#1–8，位于 $R_{ss} = 2.5R_\odot$ 图4（c）中。（b）开放磁场区域的综合图（蓝色为正极性，红色为负极性）。冕帽流带的构型以从 $B_r = 0$ 处的 R_{ss} 等值线追踪出的绿色磁力线表示，该等值线代表日冕电流片的位置。（c） Q-图，位于 R_{ss} 显示S-Web结构特征性弧线的区域。$\log Q$ 值以蓝色（红色）阴影表示正极性（负极性）。（d） Q-图，位于 $1R_\odot$ 显示区间#4–7的赤道磁力线足点位置，以及伪流线之间的低纬度开放磁场区域。

对应于S-Web弧。这些S-Web弧表明了伪流磁通系统外部脊和扇结构的势场源表面模型磁力线映射（Scott等，2018），以及/或狭窄开放磁场通道的存在（Antiochos等，2007）。紫色菱形表示与其相应反向映射的成分增强区间相关联的S-Web特征。包含HCS穿越（#3、#8）的原位区间显然与HS 带以及日冕电流片和黄道面的交点相关，尽管区间#8在（–）处的空间范围错过了日冕电流片的势场源表面模型位置（3.），偏差为。

这些区间与HS 带以及日冕电流片和黄道面的交点相关，尽管区间#8在 R_{ss} （329°–353°）处的空间范围错过了日冕电流片的势场源表面模型位置（3.7°），偏差为 ∼10°。这种差异是与我们简化的反向映射相关的不确定性的典型体现（如上文所述）；但鉴于日冕电流片—黄道面交点下方的势场源表面模型头盔流线宽度在 $R_\odot$ 处覆盖 ∼67° 的卡林顿经度（330°–37°），区间#8期间的太阳风与其源自头盔流线这一部分之间的关联是显而易见的。区间#1、#4和#7各自在其经度范围内包含一条定义清晰的伪流S-Web弧。区间#5紧邻区间#4的S-Web弧，区间#6似乎横跨#4和#7这两条S-Web弧之间的中点。

图 5（d）绘制了 Q-图，其位置为 $r = 1\,R_\odot$，并显示了从 R_{ss}追踪得到的 PFSS 磁力线足点。正极性（蓝色）开放磁场足点映射到 HS 带南部边界/极冠洞延伸区北部边界。负极性（红色）开放磁场足点映射到一系列低纬日冕洞，这些日冕洞夹在 HS 带北部边界与一系列大型 PS 南部边界之间，并位于 AR 磁场上方，Carrington 经度 180°–315°。虽然区间 #5 和 #6 在 R_{ss} 处并未与明显的 S-Web 弧相关联，但其磁力线足点映射到低纬日冕洞与大型赤道 PS 之间开放—闭合磁通边界附近。

4. 成分增强太阳风中的相干磁结构

4.1. H_m–PVI分析流程

我们采用了Pecora等人(2021年)的磁螺度–增量的部分方差（H_m–PVI）流程，用于识别源自日冕高速流和伪流源区的成分增强太阳风区间中的相干磁结构。在此，我们简要回顾识别小尺度磁通绳和/或相干磁通管的方法；在第4.2节和4.3节中，我们分别介绍将该技术应用于高速流区间（#3、#8）和伪流区间（#1、#4–#7）所得的结果。在第4.4节中，我们比较并对照各区间中 H_m和PVI时间序列的性质。

一般而言，磁螺度可写为

$$H_m = H_m^+(\ell) + H_m^-(\ell) \tag{2}$$

其中时间或空间尺度 ℓ用于定义大于ℓ 的尺度中所包含的磁螺度，定义为 $H_m^+(\ell)$，而小于 ℓ 的尺度中所包含的磁螺度定义为 $H_m^-(\ell)$。由于我们关注的是局部相干性，因此将忽略 H_m^+项，并遵循 Pecora等人 (2021年) 对以下内容的规定：使用两点相关函数 H_m^- 对 $C_{jk} = \langle B_j(\boldsymbol{r})B_k(\boldsymbol{r}+\boldsymbol{s})\rangle$ 进行局部估计（例如 Matthaeus 和 Goldstein 1982年）。我们取空间滞后 $\boldsymbol{s} = s\hat{}\boldsymbol{e}_i$ 位于 $\hat{}\boldsymbol{r}$ 方向，因此 j, k 分别是航天器 RTN坐标中的切向和法向方向。

我们通过以下方式计算以位置 x 为中心、宽度为 $W = 2\ell$ 的区间内两点相关函数的空间平均值

$$C_{jk}(x,s) = \frac{1}{W}\int_{x-\frac{W}{2}}^{x+\frac{W}{2}} d\xi \left[B_j(\xi+s)B_k(\xi) - B_j(\xi)B_k(\xi+s)\right]. \tag{3}$$

按照 Pecora 等（2021年）的方法，我们对 C_{jk}（x, s）应用形式为 f（s） $= \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos$（$2\pi s/W$）的平滑窗函数，以获得局部螺度估计值，

$$H_m(x,\ell) = \int_0^\ell ds\; C_{jk}(x,s)\; f(s)\,. \tag{4}$$

空间域量（x, s）可以通过通常的 x（t） $= \int d\tau\; V_r$（τ）Taylor 近似转换为空间域量（t, τ）。

在我们对 H_m（t, ℓ）的实现中，采用 $\ell_H = 4.3 \times 10^6$ km（4300 兆米，∼6.2 $R_\odot$）的空间尺度；对于 500 km s^{-1} 的太阳风速度，这对应于 2.4 小时的时间尺度（即以 64 秒采样间隔获得的 ∼135 个数据点），这正是八个区间内矢量磁场的平均相关时间尺度（2.37 ± 1.83 小时）。然而，我们注意到，日冕电流片/日冕高密度片区间期间的相关时间尺度明显更大（4.58 ± 1.0 小时），高于 PS区间（0.98 ± 0.52 小时），这与先前的估计结果一致（例如 Matthaeus 等，2005年）。通常，如果 H_m（t, ℓ）中的某个峰值超过 ± 1-σ 阈值，就认为该峰值具有显著性。在以下各节中，该标准差根据整个关注区间内的 H_m 曲线计算，即根据第 2 节所定义的区间（并在图 2–5 中示出）计算。

PVI 度量（例如Pecora 等，2019年，2021年）定义为

$$\mathrm{PVI}(t,\ell) = \frac{|\Delta\boldsymbol{B}(t,\ell)|}{\sqrt{\langle\,|\Delta\boldsymbol{B}(t,\ell)|^2\,\rangle}}\,, \tag{5}$$

其中 $|\Delta\boldsymbol{B}$（t, ℓ）$| \equiv |\boldsymbol{B}$（$t+\ell$） $-\boldsymbol{B}$（t）$|$，时间或空间平均取自适当的区间，且ℓ 表示增量的尺度大小。PVI 技术已被广泛用于识别不连续结构、重联电流片，以及作为湍流结构的度量（例如Greco 等，2009a，b、2018年；Osman 等，2014 年；Pecora 等，2019 年）。由于我们旨在利用 PVI 识别相干磁通管和/或小型磁通绳等离子体团的尖锐磁边界，因此选择 $\ell_{\mathrm{PVI}} = 2.13$ 分钟的时间尺度，以及 24 小时的平均窗口（为上述磁场平均相关时间尺度的 10 倍）。同样，我们

通过设定阈值来确定任意给定 PVI峰的显著性，其中一些作者使用了 PVI >2 （Pecora 等，2021 年）、>2.4 （Greco 等，2008 年）、>3 （Kilpua 等，2022 年），或者使用更大的阈值 >4–6（例如 Servidio 等，2011 年；Zhou 等，2019 年）。在此，我们使用 PVI >3.0 来处理每个 CR 2002 太阳风区间，以便比较高速流和伪流的 PVI 统计。研究表明，PVI峰的幅度与太阳风中不同类型的边界或不连续结构有关。例如，PVI $\gtrsim 3$ 阈值被解释为代表真实的相干磁结构物理边界处的不连续结构，而非随机统计涨落；相反，PVI 值 $\gtrsim 5$则与磁重联事件相关（Servidio 等，2011 年）。

该 H_m–PVI程序的优势在于，对于磁岛或相干通量绳状结构，在通量绳内部某处存在一个局部 $H_m(t)$极大值，而PVI(t)则会在通量绳边界处产生局部极大值。对于给定的时间序列，H_m 或PVI中的局部峰值都可能分别由各种相互独立的特征产生，但两个PVI峰值夹住一个局部 H_m 极大值的组合似乎是一种相当稳健的识别标准（Pecora 等，2021 年）。

为完整起见，我们指出，还有许多互补方法可用于识别相干区间和/或太阳风通量管边界，这些方法基于统计等离子体性质或湍流测量。例如，可以利用 $\Delta\theta_B$（例如Borovsky 2008 年，以及其中的参考文献）来表征磁场方向的快速变化（即切向间断），而且最近已表明，这些变化与超热电子束流宽度和/或强度的突变相吻合（Borovsky 2020 年、2021年；Borovsky 等，2021 年）。

4.2. 头盔流线（*HS*）风区间

图 6 展示了我们识别出的两个与HS风以及原位HCS/HPS和IMF扇区边界穿越相关的成分增强区间。图 6（a）展示了区间#8，其时间范围为年积日109.582至111.267（总持续时间为40.44小时）；图 6（b）展示了区间#3，其时间范围为年积日123.644至126.164（总持续时间为60.48小时）。在每个图中，顶部面板显示（归一化的）272 eV超热电子俯仰角分布。接下来的三个面板显示64秒分辨率的RTN分量矢量磁场（B_R 蓝色；B_T 绿色；B_N 红色），以及其局部方向角：纬度 $\delta \in [-90°, 90°]$ 和经度 $\lambda \in [0°, 360°]$。第四和第五个面板显示磁螺度测量值 H_m^- 和PVI廓线。剩下的三个面板显示来自ACE/SWICS的 C^{4-6+}、O^{5-8+}和Fe^{6-20+}的2小时离子成分测量。

PVI面板中以实心红线显示PVI ≥ 3.0 阈值，并用红色菱形符号标示局部极大值。与PVI峰位置相关的垂直线绘制在每个面板上方。 H_m^- 中的剖面 6(a)以1.0×10^8归一化，其标准差为 $\sigma = 0.582$。 H_m^- 中的剖面6(b)具有两个独立的归一化值，如额外的 y轴在年积日124.764处所示，这是由于 $\boldsymbol{B}$ 在HCS/HPS穿越后幅值增大。对于 $t < 124.764$，归一化值为1.0×10^8；而对于 $t > 124.764$，我们以 7.68×10^8 进行归一化，使得 $\sigma = 1.124$ 两侧均为 H_m^-。每个 $\pm1\sigma$ 面板中的H_m^- 幅值大于1-σ 的局部极大值，在各个PVI区间内均以蓝色菱形绘图符号标示。

H_m–PVI方法在每个区间内识别出若干连贯的磁结构。显著PVI峰的出现往往聚集在局部区域，而每个区间的HCS/HPS穿越（ λ 中与超热电子俯仰角分布的双向化/展宽相吻合的 $\sim180°$ 转变）两侧均有一簇PVI峰。

在HS区间8中，PVI峰主要有四个聚集区：年积日109.7–109.9、110.0–110.15、110.2–110.6和110.9–111.3。最大的两个PVI峰聚集区出现在HCS/HPS穿越的两侧，并包含数量最多的显著 H_m 峰。当超热电子俯仰角分布从单向的（0°）束流电子转变为更宽、更各向同性的分布（年积日110.5至111.1）时，在俯仰角分布转变开始阶段出现了三次连续的、连贯的从北向南磁场旋转（ δ中的正到负剖面），而在另一侧俯仰角分布转变为反向（180°）束流电子的过程中，还出现了若干幅度较大的 H_m 结构。值得注意的是，以年积日111.0为中心的结构，在 δ 和 λ中都对应一个宽度为1.5小时、相对平坦的剖面。最后，在宽电子俯仰角分布区域内，HCS/HPS穿越持续期间，O^{7+} 略有增加（而O^{6+}减少），这与同一时期Fe电荷态略微向较高值偏移相吻合。同样，在俯仰角分布转变的开始和结束阶段，C^{6+} 显著增加，同时还出现了若干与HCS/HPS区间相关的 H_m–PVI结构。

HS区间#3呈现出许多与区间#8相似的特征。例如，显著的 H_m^- 峰值出现在年积日124.6的IMF扇区边界两侧，其中包括年积日124.5–124.8之间连续出现的三个结构，随后又出现三个结构，中心分别位于年积日125.0、125.1和125.2。这些 H_m–PVI结构还与（δ，λ）中的相干旋转相关，同时在HCS处出现C^{6+} 的尖锐局部极大值，该极大值叠加在年积日124.0–125.5期间C^{6+}增强的更宽广区域之上。O^{7+} 信号在略窄的范围内（年积日124.3–125.2）呈现出类似但不太明显的趋势。然而，增强的高Fe电荷态（最高可达Fe^{16+}）往往更早出现（年积日123.9–124.6），并在Fe^{9-11+} 处重新表现为强烈峰值，持续 $t > 125.0$。在HCS穿越之前，超热电子俯仰角分布更为斑驳，

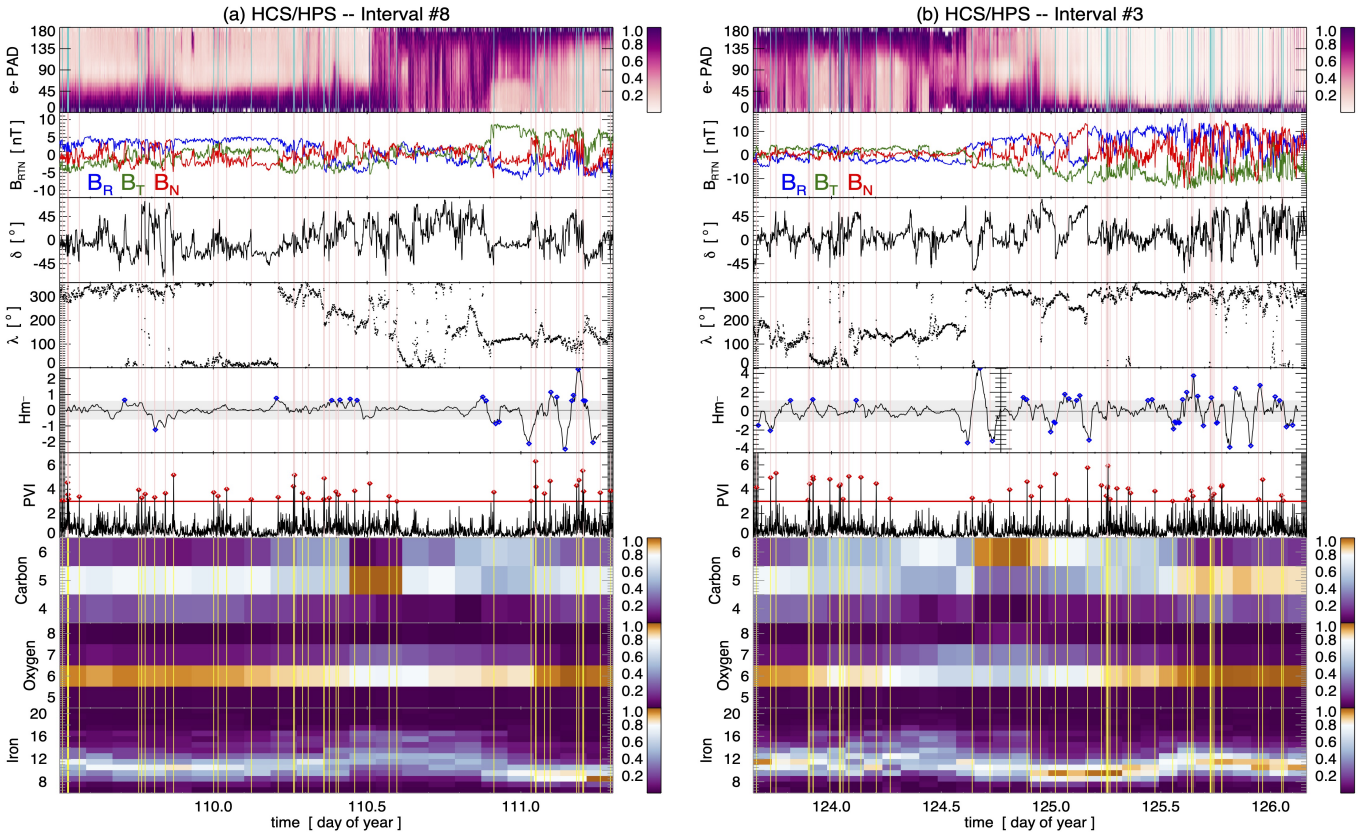


图6。 头盔流线流（HS）Wind，其中包括日球电流片/等离子体片穿越事件。(a) HS（#8），年积日109.582至111.26。(b) HS（#3），年积日123.644至126.164。

在 180° 束流电子与更宽广、更各向同性（甚至双向）的俯仰角分布之间交替，然后在年积日125.0之后过渡到更稳定的 0° 束流电子。

在这两个时间段内，PVI峰几乎全部出现在磁场角度的不连续结构处，并且这些位置通常也与电子俯仰角分布的变化重合。因此，我们的结果似乎支持这样的推测：PVI峰标示了不同等离子体区间的边界（可能是磁通管、离散的太阳风流，或磁岛等离子体团/小磁通绳）。在这些区间的 H_m–PVI分析中，另一个特征是，即使 H_m 剖面未超过1-σ 显著性阈值，在界定PVI峰之间通常仍存在局部峰值以及连贯的磁场特征。

4.3. 伪流（*PS*）*Wind*区间

图 7 以与图 6相同的格式，展示了与非高速流相关的其余成分增强区间，即来自伪流或伪流邻近源区的区间。图 7（a）展示了区间 #7，其时间范围为年积日 113.0 至 114.6（持续 38.4 小时）；图 7（b）展示了区间 #6，时间范围为年积日 115.6 至 117.8（52.8 小时）；图 7（c）展示了区间 #4 和 #5 的合并区间，时间范围为年积日 118.2 至 120.4（52.8 小时）；最后，图 7（d）展示了 ICME区间 #2，时间范围为年积日 129.2 至 130.7（36 小时），以及随后出现的短暂伪流区间 #1，时间范围为年积日 130.7 至 130.5（19.2小时）。

上述对HS区间的定性描述同样适用于每个PS区间。具体而言，H_m–PVI分析继续通过显著的PVI峰识别磁场不连续结构和/或电子俯仰角分布的突然变化，PVI峰明显呈现聚集特征，并且这些峰通常夹在 H_m^- 幅值中的显著局部极大值两侧。对于区间#7和#6，H_m 归一化为 1.0×10^8，由此得到#7的标准差为 $\sigma = 0.940$，#6的标准差为 $\sigma = 0.768$。

在区间#7（图7（a））中，从年积日113.1–113.55开始出现一系列显著的 H_m 峰，这些峰早于年积日113.35–113.75期间的PVI > 3 事件簇；随后，在 H_m 处的下一个大型PVI簇出现了另一组连续的 $t \gtrsim 114.2$峰。在区间#6（图7（b））中，PVI簇出现得更频繁且持续时间更短，而显著的 H_m 峰则更加分散，遍布整个区间。两者主要在年积日116.3–116.7期间以及 $t > 116.9$处重叠。基本上，整个#7区间的碳$^{6+}$均有中等程度的增强，但氧或铁的较高温电荷态几乎没有相应增强。区间#6的情况类似，不过铁$^{10-12+}$ 之间

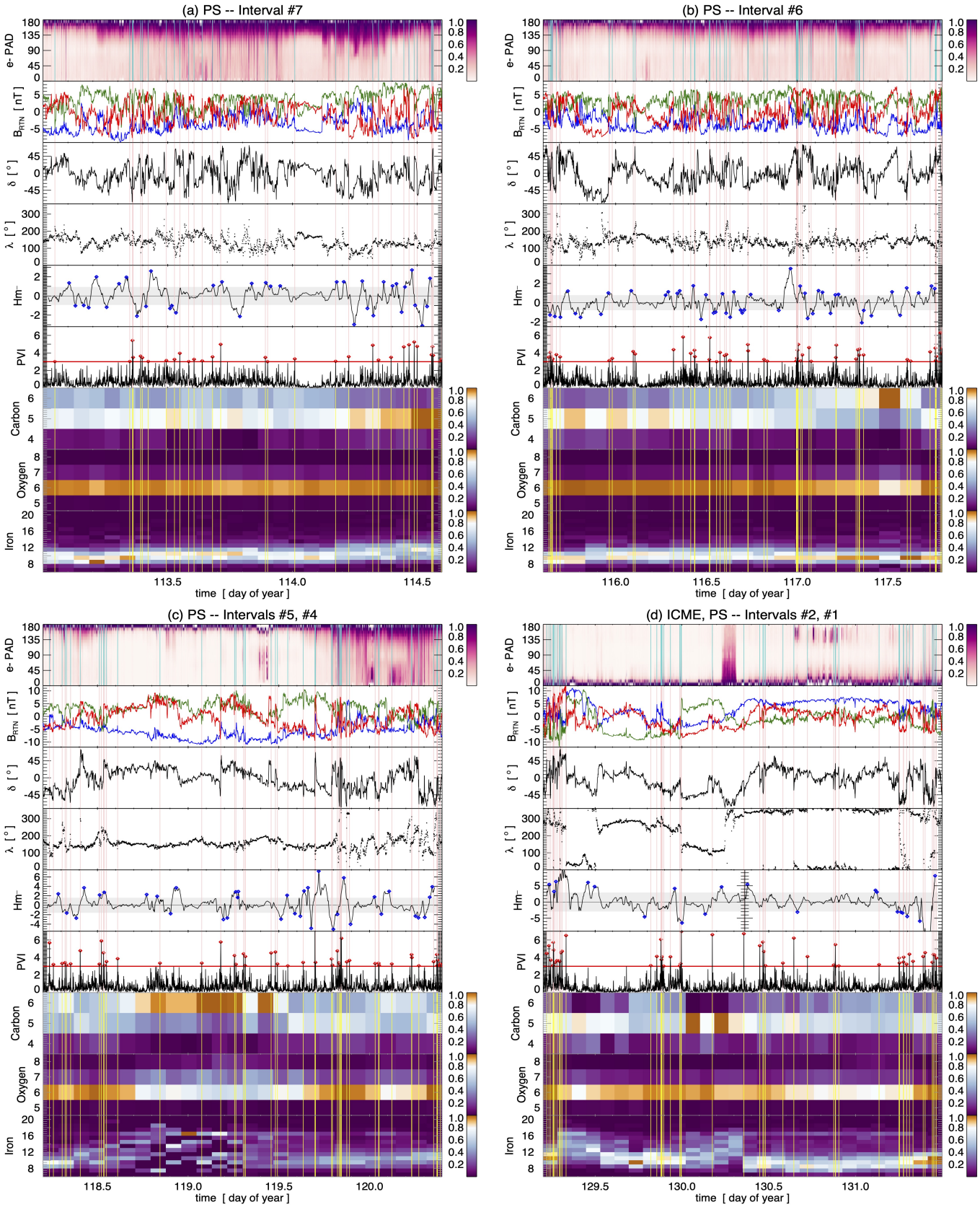


图7。 非冕盔流、成分增强区间（主要来自伪流线），格式与图 6相同。（a）年积日113.0至114.60的伪流（#7）。（b）年积日115.60至117.80的伪流（#6）。（c）年积日118.20至120.40的伪流（#5、#4）。（d）年积日130.70至131.50的行星际日冕物质抛射（#2）和伪流（#1）。

年积日116–117，以及对于$t > 117$而言更为显著的C^{6+}区域。此外，在以117.5为中心的2小时数据点中，有一个数据点显示O^{7+}略有增加（而O^{6+}减少），且与一个相干磁结构区间 coincident。总体而言，PS区间#7和#6的成分增强可以认为少于我们之前的HS区间。尽管仍存在一些电子俯仰角分布特征较宽的离散区域，尤其是在#7中，但总体来说，这些PS区间的PAD剖面变化较小——对于单极性PS太阳风而言，这也是预期的结果。

PS区间#5+4 和#2+1，分别如图7（c）和7（d）所示，也显示出PVI簇以及由PVI峰界定的相干结构连续序列。区间 H_m #5+4 中的归一化1.0×10^8为 $\sigma = 1.608$，从而得到标准差10^8。对于ICME区间（#2），我们采用相同的归一化（ $\sigma = 2.902$ ），得到 3.877×10^7；而对于尾随PS区间（#1），我们采用 σ 的归一化，以获得匹配的 σ 值。

PS区间 #5+4 具有我们PS区间中最为增强的重离子电荷态，包括从年积日118.7–119.6开始显著增加的C^{6+} 和 O^{7+} 。这与年积日118.9、119.1、119.2和119.3处的 H_m 峰同时出现。区间#5+4 还包含高度变化且增强的高温铁电荷态$Fe^{\geq 12+}$，其中Fe^{16+} 组分几乎贯穿整个时间范围（年积日118.5–120.2）。此外，在年积日118.4–118.5和119.7–119.8的结构中，还存在（较小的）通量绳状旋转。再次可以看到，代表相干结构边界的PVI峰与磁场中的不连续结构（δ， λ）角度相吻合。

尽管图7（d）的ICME区间内存在有趣且成分增强的内部磁结构——包括Fe分布在ICME边界处的大幅增强（例如年积日129.3–129.7和130.0–130.4）——但在本文中，我们将重点关注PS区间#1。Fe^{16+} 组分也存在于该区间的大部分时间内，一直持续到年积日131.3。年积日130.6–131.0期间，出现了一系列引人关注的短暂、间歇性双向电子爆发，并且与之对应的 H_m 结构未超过1-σ 阈值，但出现在一个延伸的PVI峰簇的后段。超过该阈值的 H_m 峰出现在区间#1末尾及区间#2开始阶段（年积日130.2–130.7），并且位于 $t \gtrsim 131.3$的相干磁结构还显示出通量绳状旋转特征。

4.4. 统计性质

鉴于在我们研究的慢速至中速、成分增强型高速流和伪流太阳风区间内，磁场结构及其涨落具有变化性和“随机性”，因此需要采用统计方法来表征时间序列的各种性质（例如 Zurbuchen 等人 2000）。这些分析的汇总结果见图8。

图 8（a）绘制了A_{Hm}（τ） H_m^-（t）时间序列的自相关函数，其中上排为HS区间，下排为PS区间。每组曲线的平均 e折叠时间 $\langle\tau_{1/e}\rangle$分别标示在相应面板中。如果将磁螺度携带结构的特征宽度（持续时间）定义为 $w = 2\langle\tau_{1/e}\rangle$ ，那么HS区间的平均宽度为 $w_{\rm HS} = 0.94 \pm 0.02$ 小时，PS区间的平均宽度为 $w_{\rm PS} = 0.96 \pm 0.22$ 小时。这些数值与太阳风质子密度结构中发现的 ~90 分钟周期性相符，即大致处于同一量级（例如Viall 等人 2010年；Viall 与 Vourlidas 2015年；Kepko 等人 2016年；Di Matteo 等人 2019）。

图 8(b)绘制了高速流（顶部行）和伪流（底部行）区间内的时间等待时间直方图， $f_{\rm PVI}(\Delta t)$。我们使用 IDL linfit.pro 最小二乘极小化程序，在对数–对数空间中对每个分布拟合了一条直线，以表示 $f(x) = Ax^b$ 幂律形式。最佳拟合直线也以红色绘制在各面板中，拟合参数（及其 1-σ 不确定度）标注在图中。高速流和伪流分布具有非常相似的斜率：高速流情况下为 $b = -0.83 \pm 0.08$ ，伪流情况下为$b = -1.02 \pm 0.06$。如果 PVI峰代表相干磁结构的边界，即等离子体团磁通绳或单个磁通管，那么 PVI峰之间的Δt “等待时间”应大致等于磁通结构的直径（由于航天器相对撞击参数的不同，会存在一定变化）。高速流和伪流分布的平均等待时间分别为 $\langle\Delta t\rangle = 1.10$ 小时和 1.01 小时。高速流等待时间分布中的黄色竖条突出显示了中心位于 $\Delta t = 1.625$、1.875 和 2.125 小时的柱。每个柱的计数均比最佳拟合线高出 $\gtrsim$ 1-σ ，这可能表明在这些时间尺度上存在额外的相干结构；这一结果再次与 Viall 等人（2010）关于周期性密度结构的 ~90 分钟时间尺度极为一致。有趣的是，伪流等待时间分布在 1.5–2 小时尺度范围内似乎没有类似增强，尽管伪流在 Δt= 2.875 小时和 5.62 小时处柱的计数也高于最佳拟合线约 1-σ 。

图 8(c) 绘制了空间等待时间直方图，$f_{\rm PVI}(\Delta s)$ ，格式与第 8(b) 列相同。这里需要指出的是，HS区间和PS区间的平均空间长度再次基本相同，分别为 $\langle\Delta s\rangle = 2.44\,R_\odot$（1698 兆米）和 $2.41\,R_\odot$ （1677 兆米）。一个有趣的特征是，在将 HS 的 PVI 等待时间分布表示为空间尺度后，1.5–2 小时尺度范围内的小幅增强“消失”了。由于我们使用径向速度时间序列对 PVI峰之间的距离进行积分，而不是采用恒定的 V_r 值，PVI Δs 分布并非 Δt 分布的简单重新缩放版本。这意味着，至少对于高速流慢至中等速度的太阳

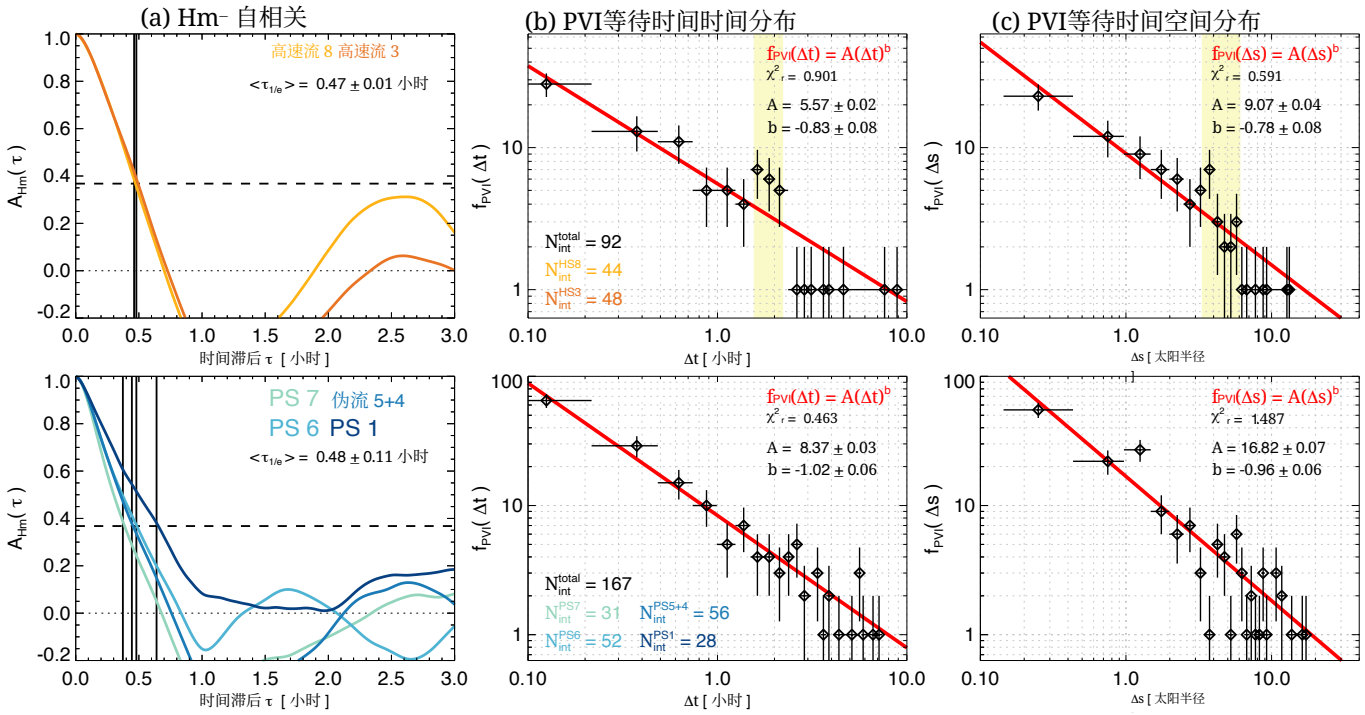


图 8。 通过 H_m–PVI分析定义的间歇性和相干磁结构的统计性质，分析对象为我们研究的具有增强 α/p 和重离子电荷态的慢至中等速度太阳风区间。（a）图 $H_m^-(t)$ 剖面的自相关，剖面来自图 6 （上）和图 7（下）。（b）HS（#8、#3）和PS（#7、#6、#5+4、#1）区间中 Δt 两个PVI峰之间的时间等待时间分布。（c）HS和PS区间中 Δs 两个PVI峰之间的空间等待时间分布。在（b）、（c）列中，红色曲线表示相应等待时间分布的幂律拟合。

风而言，如果关注空间域，那么在太阳风随后经历日球层演化的过程中，可能会错过与太阳风形成过程/源区性质相关的周期性或准周期性信号。相反，PS $\Delta s = 1.25\,R_\odot$箱中的计数显著高于幂律拟合值，但在PS Δt 分布中没有明显对应的增强。从时间和空间时刻的一阶矩得到的平均太阳风速度为 $\langle V_r\rangle = \langle\Delta s\rangle/\langle\Delta t\rangle = 429$ 千米/秒$^{-1}$，对于 HS区间为 $\langle V_r\rangle = 461$ 千米/秒$^{-1}$，对于 PS区间为。这些数值似乎略低于在我们的成分增强区间内直接从 $V_r(t)$ 剖面获得的平均值（表1、图 2–4）。

我们的 PVI 等待时间统计似乎与以往对这些分析方法的应用相容且一致；在小于磁相关尺度的尺度上，PVI 等待时间分布可以很好地用幂律近似，而在大于相关尺度的尺度上，该分布则更多地呈现经典的泊松等待时间指数形式（Greco等（2009a）、b）。图8（b）、（c）中的时间/空间图显示，对于 $\Delta t \gtrsim 2.4$ 小时（$\Delta s \gtrsim 6\,R_\odot$），以及等待时间/长度尺度的一阶矩（$\langle\Delta t\rangle$、$\langle\Delta s\rangle$），相对于最佳拟合线均出现了一致的偏离/转折，其数值约为相应的相关尺度（参见 §4.1）。事实上，我们所获得的幂律取值范围拟合指数（-1.02至-0.78）与 Greco等 （2009b）在MHD湍流模拟数据中发现的值（-0.92）、太阳风 1 AU 处的值（-1.29），以及 PSP观测中 PVI > 3 磁场涨落在 ∼0.25 AU 处的值（-1.29至-0.83；Chhiber等（2020））完全一致。

5. 总结与讨论

众所周知，原位太阳风成分、其变化及相关等离子体结构，都是太阳风形成过程以及其起源日冕条件的遗留特征。我们对2002年CR 2002期间1 AU处的一组慢至中等速度、成分增强太阳风区间进行了全面分析。我们依据太阳风速度以及 n_p、 n_α、$A_{\rm He}$ 中某些组合的观测增强或其变化，选取了这些区间。我们表明，这些区间分别对应于具有复杂、展宽或双向超热电子束流、升高的（高温）碳、氧和铁离子电荷态以及增强的Fe/O比值的太阳风流。

伪流线是发生互换重联的主要位置，并被认为是间歇性慢太阳风外流的一个组成部分的来源（例如，Masson等，2012年；Wang等，2012年；Higginson等，2017b；Wang与Panasenco，2019年）。一般而言，增强表面流——

例如平移流或旋转剪切流、磁通量涌现和/或磁通量抵消／磁绳切割——会积累体电流，使磁零点承受应力，并在拓扑边界处形成强电流片，从而为磁重联创造有利条件（例如，Antiochos等，2012年；Rappazzo等，2012年；Burkholder等，2019年；Mason等，2021年）。

Lynch 与 Edmondson (2013年) 表明，二维半（2.5D）伪流互换重联（以喷发前突破重联的形式存在）可导致外部脊线沿线密度呈现爆发性、准稳态的特征，并在受应力零点和电流片附近产生日冕变暗特征（另见 Kumar 等人 2021 ）；而 Aslanyan 等人 (2021 年、2022) 的最新模拟表明，Higginson 等人(2017a、b) 观测到的复杂三维互换重联动力学，也可在伪流线器磁通系统的开放—闭合边界处产生。

Zhao 等人的 (2017年) 源区分类与 PFSS 磁力线足点附近的大尺度日冕磁拓扑之间存在一种内在联系。例如，他们提出的“宁静太阳”“活动区”和“活动区边界”分类——通常被认为是闭合磁通区域——很可能与形成 S-Web 的结构相关，即伪流和小型/狭窄的开放磁场区域，例如低纬度冕洞。通过应用标准反向映射技术，我们表明，1 AU 处的慢速至中速、成分增强太阳风时段可映射到大尺度日冕特征，例如 HS 带和 S-Web 弧。这些正是 -map 拓扑分析所预测的、在太阳日冕开放—闭合磁通边界动态演化过程中有利于互换重联发生的位置。最后，我们注意到，源自远离日冕电流片的 S-Web 弧、相对缓慢、高度结构化且成分增强的太阳风，是检验 S-Web 理论的关键依据（例如 Higginson等，2017b；Di Matteo 等人 2019）。

我们分析了由 Pecora 等人 (2021年) H_m– PVI 程序确定的每个成分增强区间内原位相干磁结构的性质，该程序用于识别携带螺度的磁通管和/或磁岛等离子体团。这些相干磁结构的特征宽度（$\sim$1 小时，来自 H_m；$\sim$2 小时，来自 PVI）与以下两种方法确定的 $\sim$90 分钟周期一致：原位质子密度时间序列（Viall 等人 2010年），或汤姆孙散射白光日冕仪亮度涨落；后者与视线方向积分的电子密度成正比 n_e (Viall & Vourlidas 2015年)。在与高速流相关的太阳风中，PVI 等待时间的幂律分布之上似乎存在一个 1.5–2 小时的时间尺度特征；相比之下，在我们的PS区间中，这一特征要么明显减弱，要么不存在。与时间分布没有相应增强相伴的 $s \sim 1.25\,R_\odot$ PS相关等待时间长度尺度似乎也有所增强。由于高速流和PS区域在拓扑结构上存在差异，例如 Edmondson &Lynch (2017年) 以及 Higginson & Lynch (2018年) 所讨论的那样，人们或许可以预期高速流和PS区域边界处会出现不同类型的重联产生的磁结构，但仍需要对其起源及日球层演化开展进一步的数值建模。

本研究补充了以往对相干区间内或按太阳风类型刻画磁场和等离子体性质的统计研究（例如 Ko 等 2018年；D’Amicis 等 2019年；Borovsky 等 2019年、2021年），也补充了针对特定小尺度结构的研究（Khabarova 等 2021年；Gershkovich 等 2022年），例如小型磁通量绳（例如 Feng 等 2008年；Yu 等 2016年；Murphy 等 2020年；Choi 等 2021年）。重要的是，我们通过应用 H_m–PVI 方法，尝试关联慢至中等速度太阳风中结构化变化的各种原位性质，这是对以往工作的显著拓展；在以往研究中，通过“目视”识别出的相干磁结构被证明与质子密度和 $A_{\rm He}$ 观测中的结构相重合（例如 Kepko 等人 2016；Di Matteo 等人 2019）。鉴于近期人们越来越关注机器学习/人工智能神经网络等复杂自动化方法的进一步改进与发展，H_m–PVI程序看起来很有希望被纳入正在构建的工具集，用于分类太阳风类型及其性质（例如第 1 节所述），并识别和刻画相干磁通量绳区间；这些区间的时空尺度跨度从行星际日冕物质抛射（例如 Nguyen 等 2019年；dos Santos 等 2020年；Roberts 等 2020年；Narock 等 2022年）到嵌入慢太阳风中的小尺度磁通绳以及 HCS/HPS穿越（例如 Hu 等 2018年；Zhao 等人 2020年）。

本文 प्रस्तुत的结果为未来的研究工作开辟了多条途径：(1) 将当前分析扩展到太阳活动周期不同阶段的更多CRs，以开展原位太阳风等离子体、磁场和成分测量；(2) 基于其脚点位置/源区拓扑结构的日冕条件，对与空间分布中的离散、与观测者相连且具有不同太阳风外流性质的太阳风磁通管相关的重离子电荷态和元素丰度进行正向建模；以及(3) 进一步分析现有和未来关于动态 S-Web外流的数值磁流体动力学模拟及其推导出的观测特征。

鉴于近期已在将重离子成分正向建模的相关方面整合进稳态磁流体动力学太阳风计算中取得进展（例如 Oranet al.2015；Shen etal. 2017；Lionelloet al. 2019；Szenteet al. 2022），开展以下研究将极具意义：对不同磁重联情景下相干磁结构的形成与演化进行

动态时间依赖磁流体动力学建模计算。例如，Aslanyanetal.（2022年）针对与PS交换磁重联外流相关的合成超热电子俯仰角分布“时间序列”所进行的计算，与我们部分PS区间（尤其是第4、6和7号区间）中观测到的束流电子展宽在定性上高度一致。Lynchet al.（2014年）指出，由PS磁重联产生的最大尺度（即低频）$\delta B/\langle B\rangle$特征具有100–350 Mm（0.14–0.50 $R_\odot$）的特征长度尺度；这些特征位于日冕中，反映了其起源PS磁通系统的空间尺度；而Higginson& Lynch（2018年）证明，由磁流体力学模拟导出的、针对类似尺度的非线性扭转阿尔夫´波所生成的合成原位磁场特征，可能类似于小尺度磁通绳/流带斑块等离子体团的相干磁结构；这类结构通常与日冕电流片/日冕电流片附近的HS慢太阳风相关。

在最大尺度上（即我们时间区间持续时长的几十个小时），我们的高速流和伪流S-Web弧区间与原位成分增强之间存在非常明显的关联。在图6–7所描绘的相干磁结构尺度上，存在一些迹象表明，PVI边界也与根据重离子电荷态推断出的日冕冻结-in温度的离散变化相关。本文所使用的ACE/SWICS数据采用2小时采样间隔，这显然限制了我们解析低于平均窗口时长的电荷态结构的能力。在Kepko等（2016年）和Gershkovich等（2022）中，研究人员使用高采样率（仪器原生分辨率为12分钟）的ACE/SWICS数据，指出某些所关注的离散磁通管区间确实与各种成分测量值的突然变化相吻合（即He、碳和氧丰度、碳$^{6+}$/碳$^{5+}$ 电荷态比值等）。重离子传感器（HIS；对于重离子，其原生分辨率为30秒）的测量结果是太阳轨道器太阳风分析仪（SWA）仪器套件（Owen 等，2020年），应能够识别并表征与原位成分增强相关的更小尺度相干磁结构集合。

此外，利用多航天器测量以及遥感与原位四元观测几何，建立特定等离子体特征与观测充分的互换重联事件之间的太阳—日球层联系，其科学重要性最近已由Telloni等人(2020年)通过*Solar Orbiter*的Metis日冕仪首次直接成像“折返结构”而得到证明（Antonucci等人2020年）。这一折返结构事件很可能起源于复杂的S-Web构型：一条从主HS带/日冕电流片延伸出来的小型伪流S-Web弧，以及一个零点脊线—扇形幕拓扑，其中伪流和高速流磁通系统强烈相交。这充分促使人们继续开展动态S-Web模型的理论发展、数据分析和数值模拟，以研究慢太阳风。

致谢

作者感谢 NASA HGI 80NSSC18K0645 和 HSR 80NSSC18K1553 提供的支持。此外，BJL 感谢 NASA 资助项目 80NSSC21K0731、80NSSC20K1448 和 80NSSC21K1325 提供的支持；NMV 和 AKH 感谢 NASA戈达德太空飞行中心竞争性内部科学家资助模型（IFSM）提供的支持；LZ 感谢 NASA 资助项目 80NSSC21K0579 提供的支持；STL 感谢 NASA 资助项目 80NSSC19K0853 和 80NSSC20K0192 提供的支持。

作者感谢 *Wind* 和 ACE 任务团队提供原位磁场、等离子体以及成分数据，相关数据可从 http://cdaweb.gsfc.nasa.gov和 https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/获取；同时感谢 MDI团队提供光球磁图数据，相关数据可从 http://hmi.stanford.edu/data/synoptic.html获取。

参考文献

Altschuler, M. D., & Newkirk, G. 1969, 《太阳物理学》, 9, 131 Antiochos, S. K., DeVore, C.R., Karpen, J. T., & Miki´c, Z. 2007, 《天体物理学杂志》, 671, 936 Antiochos, S. K., Linker, J. A., Lionello, R., et al. 2012, 《空间科学评论》, 172, 169 Antiochos, S. K., Miki´c, Z., Titov, V. S., Lionello, R., & Linker, J. A. 2011, 《天体物理学杂志》, 731, 112 Antonucci, E., Romoli, M., Andretta, V., et al. 2020年, 《天文学与天体物理学》, 642, A10 Arge, C. N., & Pizzo, V. J. 2000年, 《地球物理研究杂志》, 105, 10465 Aslanyan, V., Pontin, D. I., Higginson, A. K. 等，2022年, 《天体物理学杂志》，929，185 Aslanyan, V., Pontin, D. I., Wyper, P. F. 等，2021年，《天体物理学杂志》，909，10 Axford, W. I., McKenzie, J. F., Sukhorukova, G. V. 等，1999年，《空间科学评论》，87，25 Badman, S. T., Bale, S. D., Mart´ınez Oliveros, J. C. 等，2020年，《天体物理学杂志增刊》，246，23 Baker, D., van Driel-Gesztelyi, L., Mandrini, C. H., D´emoulin, P., & Murray, M. J. 2009年，《天体物理学杂志》，705，926

Bloch, T., Watt, C., Owens, M., McInnes, L., & Macneil, A. R. 2020年，《太阳物理学》，295，41 Borovsky, J. E. 2008年，《地球物理研究杂志》，113，A08110 —. 2020年，《地球物理研究快报》，47，e84586 —. 2021年，《天文学与空间科学前沿》，8，18 Borovsky, J. E., Denton, M. H., & Smith, C. W. 2019年，《地球物理学研究杂志（空间物理学）》，124，2406 Borovsky, J. E., Halekas, J. S., & Whittlesey, P. L. 2021年，《天文学与空间科学前沿》，8，93 Borrini, G., Gosling, J. T., Bame, S. J., & Feldman, W. C. 1982年，《地球物理研究杂志》，87，7370 Brooks, D. H., Ugarte-Urra, I., & Warren, H. P. 2015年，《自然·通讯》，6，5947 Brooks, D. H., & Warren, H. P. 2011年，《天体物理学杂志通讯》，727，L13 Burkholder, B. L., Otto, A., Delamere, P. A., & Borovsky, J. E. 2019年，《地球物理学研究杂志（空间物理学）》，124，32 Chhiber, R., Goldstein, M. L., Maruca, B. A. 等，2020年，《天体物理学杂志增刊》，246，31 Choi, K.-E., Lee, D.-Y., Wang, H.-E. 等，2021年，《太阳物理学》，296，148 Cranmer, S. R. 2012年，《空间科学评论》，172，145 Crooker, N. U., Antiochos, S. K., Zhao, X., & Neugebauer, M. 2012年，《地球物理研究杂志》，117，4104 Crooker, N. U., Burton, M. E., Phillips, J. L., Smith, E. J., & Balogh, A. 1996年，《地球物理研究杂志》，101，2467 Crooker, N. U., Huang, C.-L., Lamassa, S. M. 等，2004年，《地球物理研究杂志》，109，A03107 D'Amicis, R., Matteini, L., & Bruno, R. 2019年，《皇家天文学会月报》，483，4665 Di Matteo, S., Viall, N. M., Kepko, L. 等，2019年，《地球物理研究杂志》，124，837 Domingo, V., Fleck, B., & Poland, A. I. 1995年，《太阳物理学》，162，1 dos Santos, L. F. G., Narock, A., Nieves-Chinchilla, T., Nu˜nez, M., & Kirk, M. 2020年，《太阳物理学》，295，131 Edmondson, J. K., Antiochos, S. K., DeVore, C. R., Lynch, B. J., & Zurbuchen, T. H. 2010年，《天体物理学杂志》，714，517 Edmondson, J. K., & Lynch, B. J. 2017年，《天体物理学杂志》，849，28 Edmondson, J. K., Lynch, B. J., Antiochos, S. K., De Vore, C. R., & Zurbuchen, T. H. 2009年，《天体物理学杂志》，707，1427 Edwards, S. J., Parnell, C. E., Harra, L. K., Culhane, J. L., & Brooks, D. H. 2016年，《太阳物理学》，291，117 Feng, H. Q., & Wang, J. M. 2015年，《天体物理学杂志》，809，112 Feng, H. Q., Wu, D. J., Lin, C. C. 等，2008年，《地球物理研究杂志》，113，12105 Foullon, C., Lavraud, B., Luhmann, J. G. 等，2011年，《天体物理学杂志》，737，16 Fox, N. J., Velli, M. C., Bale, S. D. 等，2016年，《空间科学评论》，204，7 Geiss, J.、Gloeckler, G. 与 von Steiger, R. 1995年，《空间科学评论》，72，49 Gershkovich, I.、Lepri, S. T.、Viall, N. M.、Di Matteo, S. 与 Kepko, L. 2022年，《天体物理学杂志》，933，198 Gibson, S. E.、de Toma, G.、Emery, B. 等 2011 年，《太阳物理学》，274，5 Gloeckler, G. 、 Cain, J.、Ipavich, F. M. 等 1998年，《空间科学评论》，86，497 Gosling, J. T. 1997年，载于《美国物理联合会会议系列》，第385卷，《太阳附近的机器人探测：科学基础》，S. R. Habbal 编，17–24 Greco, A.、Chuychai, P.、Matthaeus, W. H.、Servidio, S. 与 Dmitruk, P. 2008年，《地球物理研究快报》，35，L19111 Greco, A.、Matthaeus, W. H.、Perri, S. 等 2018年，《空间科学评论》，214，1 Greco, A.、Matthaeus, W. H.、Servidio, S.、Chuychai, P. 与 Dmitruk, P. 2009年a，《天体物理学杂志通讯》，691，L111 Greco, A.、Matthaeus, W. H.、Servidio, S. 与 Dmitruk, P. 2009年b，《物理评论E》，80，046401 Griton, L.、Rouillard, A. P.、Poirier, N. 等 2021年，《天体物理学杂志》，910，63 Harra, L.K.、Sakao, T.、Mandrini, C. H. 等 2008年，《天体物理学杂志通讯》，676，L147 Higginson, A. K.、Antiochos, S. K.、DeVore, C. R.、Wyper, P. F. 与 Zurbuchen, T. H. 2017年a，《天体物理学杂志》，837，113 —。2017年b，《天体物理学杂志通讯》，840，L10 Higginson, A. K. 与 Lynch, B. J. 2018年，《天体物理学杂志》，859，6 Howard, R. A.、Moses, J. D.、Vourlidas, A. 等 2008年，《空间科学评论》，136，67 Hu, Q.、Zheng, J.、Chen, Y.、le Roux, J. 与 Zhao, L. 2018年，《天体物理学杂志增刊》，239，12 Hundhausen, A. J.、Gilbert, H. E. 与 Bame, S. J. 1968年，《天体物理学杂志通讯》，152，L3 Kaiser, M. L.、Kucera, T. A.、Davila, J. M. 等 2008年，《空间科学评论》，136，5 Kasper, J. C.、Stevens, M. L.、Korreck, K. E. 等 2012年，《天体物理学杂志》，745，162 Kasper, J. C.、Stevens, M. L.、Lazarus, A. J.、Steinberg, J. T. 与 Ogilvie, K. W. 2007年，《天体物理学杂志》，660，901 Kepko, L.、Viall, N. M.、Antiochos, S. K. 等 2016年，《地球物理研究快报》，43，4089 Kepko, L.、Viall, N. M. 与 Wolfinger, K. 2020年，《地球物理学研究杂志（空间物理学）》，125，e28037 Khabarova, O.、Malandraki, O.、Malova, H. 等 2021年，《空间科学评论》，217，38 Kilpua, E. K. J.、Good, S. W.、Ala-Lahti, M. 等 2022年，arXiv 电子预印本，arXiv:2204.13058 Ko, Y.-K.、Fisk, L. A.、Geiss, J.、Gloeckler, G. 与 Guhathakurta, M. 1997年，《太阳物理学》，171，345

Ko, Y.-K.、Roberts, D. A. 与 Lepri, S. T. 2018年，《天体物理学杂志》，864，139 Kumar, P.、Karpen, J. T.、Antiochos, S. K. 等 2021年，《天体物理学杂志》，907，41 Landi, E.、Alexander, R. L.、Gruesbeck, J. R. 等 2012年a，《天体物理学杂志》，744，100 Landi, E.、Gruesbeck, J. R.、Lepri, S. T. 与 Zurbuchen, T. H. 2012年b，《天体物理学杂志》，750，159 Landi, E.、Gruesbeck, J. R.、Lepri, S. T.、Zurbuchen, T. H. 与 Fisk, L. A. 2012年c，《天体物理学杂志》，761，48 Landi, E. 与 Lepri, S. T. 2015年，《天体物理学杂志通讯》，812，L28 Leamon, R. J. 与 McIntosh, S. W. 2009年，《天体物理学杂志通讯》，697，L28 Lepri, S. T.、Antiochos, S. K.、Riley, P.、Zhao, L. 与 Zurbuchen, T. H. 2008年，《天体物理学杂志》，674，1158 Lepri, S. T.、Landi, E. 与 Zurbuchen, T. H. 2013年，《天体物理学杂志》，768，94 Lepri, S. T. 与 Rivera, Y. J. 2021年，《天体物理学杂志》，912，51 Lepri, S. T. 与 Zurbuchen, T. H. 2004年，《地球物理研究杂志》，109，1112 Lepri, S. T.、Zurbuchen, T. H.、Gruesbeck, J. R. 与Gilbert, J. A. 2014年，载于《国际天文学联合会研讨会》，第300卷，《国际天文学联合会研讨会》，B. Schmieder、J.-M. Malherbe 与 S. T. Wu 编，289–296 Lin, R. P.、Anderson, K. A.、Ashford, S. 等 1995年，《空间科学评论》，71，125 Linker, J. A.、Lionello, R.、Miki´c、Titov, V. S. 与 Antiochos, S. K. 2011年，《天体物理学杂志》，731，110 Lionello, R.、Downs, C.、Linker, J. A. 等 2019年，《太阳物理学》，294，13 Lynch, B. J. 2020年，《天体物理学杂志》，905，139 Lynch, B. J. 与 Edmondson, J. K. 2013年，《天体物理学杂志》，764，87 Lynch, B. J.、Edmondson, J. K. 与 Li, Y. 2014年，《太阳物理学》，289，3043 Madjarska, M. S.、Doyle, J. G. 与 van Driel-Gesztelyi, L. 2004年，《天体物理学杂志通讯》，603，L57 Mason, E. I.、Antiochos, S. K. 与 Vourlidas, A. 2021年，《天体物理学杂志通讯》，914，L8 Masson, S.、Aulanier, G.、Pariat, E. 与 Klein, K.-L. 2012年，《太阳物理学》，276，199 Matthaeus, W. H.、Dasso, S.、Weygand, J. M. 等 2005年，《物理评论快报》，95，231101 Matthaeus, W. H. 与 Goldstein, M. L. 1982年，《地球物理研究杂志》，87，6011 McComas, D. J.、Bame, S. J.、Barker, P. 等 1998年a，《空间科学评论》，86，563 McComas, D. J.、Elliott, H. A. 与 von Steiger, R. 2002年，《地球物理研究快报》，29，1314 McComas, D. J.、Bame, S. J.、Barraclough, B. L. 等 1998年b，《地球物理研究快报》，25，1 M¨uller, D.、St. Cyr, O. C.、Zouganelis, I. 等 2020年，《天文学与天体物理学》，642，A1 Murphy, A., Winslow, R. M., Schwadron, N. A., 等 2020年，待刊 Narock, T., Narock, A., Dos Santos, L. F. G., & Nieves-Chinchilla, T. 2022年，《天文学与空间科学前沿》，9, 838442 Neugebauer, M., Liewer, P. C., Goldstein, B. E., Zhou, X., & Steinberg, J. T. 2004年，《地球物理研究杂志》，109, A10102 Neugebauer, M., Liewer, P. C., Smith, E. J., Skoug, R. M., & Zurbuchen, T. H. 2002年，《地球物理研究杂志》，107, 1488 Nguyen, G., Aunai, N., Fontaine, D., 等 2019年，《天体物理学杂志》，874, 145 Ogilvie, K. W., Chornay, D. J., Fritzenreiter, R. J., 等 1995年，《空间科学评论》，71, 55 Oran, R., Landi, E., van der Holst, B., 等 2015年，《天体物理学杂志》，806, 55 Osman, K. T., Matthaeus, W. H., Gosling, J. T., 等 2014年，《物理评论快报》，112, 215002 Owen, C. J., Bruno, R., Livi, S., 等 2020年，《天文学与天体物理学》，642,A16 Owocki, S. P., Holzer, T. E., & Hundhausen, A. J. 1983年，《天体物理学杂志》，275, 354 Panasenco, O., Velli, M., D'Amicis, R., 等 2020年，《天体物理学杂志增刊》，246, 54 Parenti, S., Chifu, I., Del Zanna, G., 等 2021年，《空间科学评论》，217, 78 Parker, E. N. 1958年，《天体物理学杂志》，128, 664 Pecora, F., Greco, A., Hu, Q., 等 2019年，《天体物理学杂志通讯》，881, L11 Pecora, F., Servidio, S., Greco, A., & Matthaeus, W. H. 2021年，《天文学与天体物理学》，650, A20 Pontin, D. I., & Wyper, P. F. 2015年，《天体物理学杂志》，805, 39 Rachmeler, L. A., Platten, S. J., Bethge, C., Seaton, D. B., & Yeates, A. R. 2014年，《天体物理学杂志通讯》，787, L3 Rappazzo, A. F., Matthaeus, W. H., Ruffolo, D., Servidio, S., & Velli, M. 2012年，《天体物理学杂志通讯》，758, L14 R´eville, V., Velli, M., Rouillard, A. P., 等 2020年，《天体物理学杂志通讯》，895, L20 R´eville, V., Fargette, N., Rouillard, A. P., 等 2022年，《天文学与天体物理学》，659, A110 Richardson, I. G., & Cane, H. V. 2004年，《地球物理研究杂志》，109, 9104 —. 2010年，《太阳物理学》，264, 189 Riley, P., & Luhmann, J. G. 2012年，《太阳物理学》，277, 355 Roberts, D. A., Karimabadi, H., Sipes, T., Ko, Y.-K., & Lepri, S. 2020年，《天体物理学杂志》，889, 153 Rouillard, A. P., Davies, J. A., Lavraud, B., 等 2010a，《地球物理研究杂志》，115, 4103 Rouillard, A. P., Lavraud, B., Davies, J. A., 等 2010b，《地球物理研究杂志》，115, 4104 Sakao, T., Kano, R., Narukage, N., 等 2007年，《科学》，318, 1585 Sanchez-Diaz, E., Rouillard, A. P., Davies, J. A., 等 2017a，《天体物理学杂志》，851, 32

Sanchez-Diaz, E., Rouillard, A. P., Lavraud, B., Kilpua, E., & Davies, J. A. 2019年, 《天体物理学杂志》, 882, 51 Sanchez-Diaz, E., Rouillard, A. P., Davies, J. A., 等 2017b, 《天体物理学杂志通讯》, 835, L7 Scherrer, P. H., Bogart, R. S., Bush, R. I., 等 1995年, 《太阳物理学》, 162, 129 Schwenn, R. 2006年, 《空间科学评论》, 124, 51 Schwenn, R., Raymond, J. C., Alexander, D., 等 2006年, 《空间科学评论》, 123, 127 Scott, R. B., Pontin, D. I., Antiochos, S. K., DeVore, C. R., & Wyper, P. F. 2021年, 《天体物理学杂志》, 913, 64 Scott, R. B., Pontin, D. I., Yeates, A. R., Wyper, P. F., & Higginson, A. K. 2018年, 《天体物理学杂志》, 869, 60 Servidio, S., Greco, A., Matthaeus, W. H., Osman, K. T., & Dmitruk, P. 2011年, 《地球物理学研究杂志（空间物理学）》, 116, A09102 Sheeley, N. R., Walters, J. H., Wang, Y.-M., & Howard, R. A. 1999年, 《地球物理研究杂志》, 104, 24739 Sheeley, N. R., Wang, Y.-M., Hawley, S. H., 等 1997年, 《天体物理学杂志》, 484, 472 Sheeley, Jr., N. R., Lee, D. D.-H., Casto, K. P., Wang, Y.-M., & Rich, N. B. 2009年, 《天体物理学杂志》, 694, 1471 Shen, C., Raymond, J. C., Miki´c, Z., 等 2017年, 《天体物理学杂志》, 850, 26 Smith, C. W., L'Heureux, J., Ness, N. F., 等 1998年, 《空间科学评论》, 86, 613 Stakhiv, M., Landi, E., Lepri, S. T., Oran, R., & Zurbuchen, T. H. 2015年, 《天体物理学杂志》, 801, 100 Stakhiv, M., Lepri, S. T., Landi, E., Tracy, P., & Zurbuchen, T. H. 2016年, 《天体物理学杂志》, 829, 117 Stansby, D., & Verscharen, D. 2022年, arXiv 电子预印本, arXiv:2201.07783 Stone, E. C., Frandsen, A. M., Mewaldt, R. A., 等 1998年, 《空间科学评论》, 86, 1 Suess, S. T., Ko, Y.-K., von Steiger, R., & Moore, R. L. 2009年, 《地球物理研究杂志》, 114, A04103 Sun, X., Liu, Y., Hoeksema, J. T., Hayashi, K., & Zhao, X. 2011年, 《太阳物理学》, 270, 9 Szente,J., Landi, E.,& vanderHolst,B.2022年, 《天体物理学杂志》, 926,35 Telloni, D., Andretta, V., Antonucci, E., 等 2021年, 《天体物理学杂志通讯》, 920, L14 Telloni, D., Zank, G. P., Stangalini, M., 等 2022年, arXiv 电子预印本, arXiv:2206.03090 Titov, V. S. 2007年, 《天体物理学杂志》, 660, 863 Titov, V. S., Miki´c, Z., Linker, J. A., Lionello, R., & Antiochos, S. K. 2011年, 《天体物理学杂志》, 731, 111 Titov, V. S., Mikic, Z., T¨or¨ok, T., Linker, J. A., & Panasenco, O. 2012年, 《天体物理学杂志》, 759, 70 Viall, N. M., & Borovsky, J. E. 2020年, 《地球物理学研究杂志（空间物理学）》, 125, e26005 Viall, N. M., DeForest, C. E., & Kepko, L. 2021年, 《天文学与空间科学前沿》, 8, 139 Viall, N. M., Kepko, L., & Spence, H. E. 2008年, 《地球物理研究杂志》, 113, A07101 Viall, N. M., Spence, H. E., & Kasper, J. 2009年, 《地球物理研究快报》, 36, L23102 Viall, N. M., Spence, H. E., Vourlidas, A., & Howard, R. 2010年, 《太阳物理学》, 267, 175 Viall, N. M., & Vourlidas, A. 2015年, 《天体物理学杂志》, 807, 176 Wang, Y.-M. 2016a年, 《天体物理学杂志通讯》, 833, L21 —. 2016b年, 《天体物理学杂志》, 833, 121 Wang, Y.-M., Grappin, R., Robbrecht, E., & Sheeley, Jr., N. R. 2012年, 《天体物理学杂志》, 749, 182 Wang, Y. M., & Panasenco, O. 2019年, 《天体物理学杂志》, 872, 139 Wang, Y.-M., & Sheeley, Jr., N. R. 1992年, 《天体物理学杂志》, 392, 310 Wang, Y.-M., Sheeley, Jr., N. R., & Rich, N. B. 2007年, 《天体物理学杂志》, 658, 1340 Wyper, P. F., DeVore, C. R., Karpen, J. T., & Lynch, B. J. 2016年, 《天体物理学杂志》, 827, 4 Xu, F., & Borovsky, J. E. 2015年, 《地球物理研究杂志》, 120, 70 Yu, W., Farrugia, C. J., Galvin, A. B., 等 2016年, 《地球物理研究杂志》, 121, 5005 Zhao, L., Gibson,S. E., & Fisk, L. A. 2013年, 《地球物理研究杂志》, 118, 2834 Zhao, L., Landi, E., Lepri, S. T., 等 2017年, 《天体物理学杂志》, 846, 135 Zhao, L., Landi, E., Zurbuchen, T. H., Fisk, L. A., & Lepri, S. T. 2014年, 《天体物理学杂志》, 793, 44 Zhao, L., Zurbuchen, T. H., & Fisk, L. A. 2009年, 《地球物理研究快报》, 36, L14104 Zhao, L. L., Zank, G. P., Adhikari, L., 等 2020年, 《天体物理学杂志增刊》, 246, 26 Zhou, Z., Zuo, P., Feng, X., 等 2019年, 《太阳物理学》, 294, 149 Zirker, J. B. 1977年, 《地球物理学与空间物理学评论》, 15, 257 Zurbuchen, T. H. 2007年, 《天文学与天体物理学年评》, 45, 297 Zurbuchen, T. H., Fisk, L. A., Gloeckler, G., & von Steiger, R. 2002年, 《地球物理研究快报》, 29, 1352 Zurbuchen, T. H., Hefti, S., Fisk, L. A., Gloeckler, G., & Schwadron, N. A. 2000年, 《地球物理研究杂志》, 105, 18327 Zurbuchen, T. H., Weberg, M., von Steiger, R., 等 2016年, 《天体物理学杂志》, 826, 10