Draft version April 25, 2023年使用
AASTeX631 默认样式排版

arXiv:2304.11802v1 [astro-ph.SR] 24 Apr 2023

太阳风中的小型磁通量绳的性质源自冕洞、活动区和宁静太阳

Changhao Zhai,[1] Hui Fu,[1] Jiachen Si,[1] Zhenghua Huang,[1] and Lidong Xia[1]

[1] *Shandong Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-Terrestrial Environment, Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai, Shandong,* 264209, *China*

摘要

太阳风中的重要结构——小型磁通量绳（SFRs）的起源和产生机制尚不明确。本研究分析并比较了1993个处于冕洞、活动区和宁静太阳太阳风中的SFRs。我们发现，处于这三类太阳风中的SFRs性质存在显著差异。根据SFRs内部的O^{7+}/O^{6+} 相较于背景太阳风是升高或降低30%，进一步将SFRs分为高温SFR、低温SFR和正常SFR。研究显示，在这三类太阳风中，正常SFR的参数均与背景相似。高温SFR和低温SFR的性质似乎处于两个极端。统计上，与正常SFR和背景太阳风相比，高温SFR（低温SFR）的持续时间更长（更短），速度和质子温度更低（更高），电荷态、氦丰度和FIP偏差更高（更低）。高温SFR（正常SFR）内部速度与O^{7+}/O^{6+} 之间的反相关不同于（类似于）背景太阳风中的反相关。大多数高温SFR和低温SFR应源自太阳。高温SFR可能来自与等离子体团相关的冕流，和/或太阳上的小尺度活动。低温SFR可能伴随温度较低物质的小尺度爆发。高温SFR和低温SFR也可能由不含或含有冷丝状体物质的行星际日冕物质抛射的磁侵蚀形成。正常SFR的特征可由这两种起源合理解释：一部分源自太阳，另一部分在日球层中产生。

关键词：太阳风（1534）；行星际磁场（824）；太阳活动周（1487）

1. 引言

磁通绳是太阳风（SW）中的重要结构，可在不同的日心距离处被探测到（Cartwright & Moldwin 2010; Chen & Hu 2020, 2022；Zhao等 2021）。它是一种沿轴线旋转的扭曲磁场结构。磁通绳的持续时间分布范围很广，从几分钟到数十小时不等。通常，根据磁通绳的持续时间或直径，可将其分为大型磁通绳和小型磁通绳（SFRs）。大型磁通绳也称为磁云（MCs），通常与行星际日冕物质抛射（ICMEs）相关。MCs的径向尺度为0.2至0.4 AU，持续时间从数小时到数十小时不等（Lepping等 1990；Moldwin等 2000）。人们已对MCs的性质、起源和产生机制进行了全面分析。通常，与太阳风相比，MCs具有更强的磁场强度、更低的质子温度和更低的等离子体β（Lepping等 1990；Burlaga 1991年；Cane & Richardson 2003）。从统计结果来看，MCs内部的电荷态、第一电离势（FIP）偏差和氦丰度（A_{He}）高于背景太阳风内部的相应值（Woo等 2004；Rouillard等 2010a；Manchester等 2017；Owens 2018；Song等 2021；Shi等 2022）。目前普遍认为，MCs起源于太阳，并且与太阳上的剧烈爆发事件密切相关。SFRs的持续时间通常不超过12小时，直径小于0.2 AU（Feng等 2008；Feng & Wang 2015；Yu等 2013, 2016；Huang等 2017a）。SFRs的起源和产生机制仍不清楚。

通讯作者：Hui Fufuhui@sdu.edu.cn

总体而言，人们认为SFRs可能起源于太阳和/或产生于日球层中（Moldwin等 1995, 2000；Cartwright & Moldwin 2008；Rouillard等 2009, 2010a,b, 2011；Feng & Wang 2015；Yu等 2016；Sanchez-Diaz等 2017, 2019；Hu等（2018）；Huang等 2018；Zheng & Hu 2018；Xu等 2020；Huang等 2020；Choi等 2021）。一些研究表明，SFRs是在太阳风传播过程中于日球层中产生的。部分分析表明，SFRs与MCs的原位性质存在差异。Ulysses号首次在5 AU处探测到一个位于日球电流片（HCS）附近、径向尺度约为0.05 AU的小型磁通绳（Moldwin等 1995年）。该SFR的性质不同于MCs。该SFR具有高密度、高等离子体β和高质子温度。因此，他们推断该SFR是由行星际空间中HCS附近的多次磁重联产生的。Moldwin等（2000）分析了Wind号和IMP 8号航天器观测到的六个SFRs。他们认为，SFRs是由太阳风中的磁重联产生的，而不是起源于太阳日冕，因为SFRs的膨胀特征和质子温度与MCs不同。他们还分析了SFRs的持续时间分布、壁到壁时间分布和轴向方向。Cartwright & Moldwin（2008）识别出68个磁通绳，其持续时间范围为39分钟至12.2小时。统计结果显示，磁通绳的持续时间呈双峰分布。大多数SFR事件的持续时间少于4小时。相比之下，MCs的持续时间分布峰值位于12至16小时。因此，他们认为SFRs和MCs的来源并不相同，SFRs的起源可能与太阳风中的磁重联有关。SFRs的壁到壁时间呈幂律分布，而SFRs的轴向电流密度呈非高斯分布（Zheng & Hu 2018）。因此，他们认为SFRs产生于日球层中，并与局地磁流体动力学湍流密切相关。Liu等（2021）分析了SFRs轴向方向与HCS方向之间的关系。他们发现，SFRs的轴向方向通常与HCS平行。因此，他们认为SFRs产生于HCS附近的日球层中。

其他研究也支持太阳风磁通绳源自太阳这一观点。太阳风磁通绳的原位观测与遥感联合观测为太阳风磁通绳可以来自太阳这一论断提供了直接证据。太阳—地球关系观测台（STEREO；Kaiser等 2008年）由两艘几乎完全相同的航天器（A和B）组成，可对太阳及日球层中的活动进行立体观测。在共转相互作用区（CIR）之前，STEREO-A探测到一个径向尺度约为0.08 AU的太阳风磁通绳。STEREO-B搭载的日球层成像仪（HI）对该太阳风磁通绳和CIR从太阳到STEREO-A的传播过程进行了成像（Rouillard等 2009年）。这表明太阳风磁通绳应源自太阳。由STEREO航天器搭载的HI仪器开展的遥感观测发现，间歇性外流沿冕流的延伸部分传播。在遥感图像中，还在冕流附近观测到了一些可能是太阳风磁通绳的扭曲结构（Rouillard等 2010a）。此外，Rouillard等（2010b）将HI仪器获取的遥感观测与先进成分探测器（ACE；Stone等 1998年）和STEREO探测到的原位测量进行了比较。上述联合观测证实了这些过境事件与太阳风磁通绳之间的关联。此外，通过日冕仪图像追踪了STEREO和ACE在原位探测到的太阳风磁通绳的来源。Rouillard等 （2011）发现，太阳风磁通绳与太阳上的小型或大型物质抛射体有关。小型抛射体通常出现在冕流顶端。进一步的观测表明，至少部分太阳风磁通绳来自太阳，并且应由日冕冕流顶端的磁重联产生（Sanchez-Diaz等 2017年，2019年）。

对太阳风磁通绳与磁云的一些比较表明，太阳风磁通绳可能来自太阳。Feng等（2007年）利用Wind的测量数据，识别出144个径向尺度约为0.004–0.6 AU的磁通绳（持续时间从几分钟到几十个小时不等）。磁通绳的尺寸和能量分布是连续的。毫无疑问，大尺度磁通绳（磁云）来自太阳。因此，他们认为太阳风磁通绳也源自太阳，是由小尺度爆发产生的。Feng等Feng等（2008年）分析了Wind探测到的125个小型和中型磁通绳，其持续时间为0.45至10.87小时。他们发现，太阳风磁通绳的平均磁场强度大于背景太阳风的平均磁场强度，并且太阳风磁通绳的轴向方向与磁云的几乎相同。上述统计结果表明，太阳风磁通绳也源自太阳。Feng& Wang （2015年）利用ACE的测量数据识别出24个持续时间为4至12小时的太阳风磁通绳。统计结果显示，太阳风磁通绳与磁云具有相同的高电荷态和高氦丰度特征。因此，他们认为太阳风磁通绳和磁云应由太阳上的同一过程产生。通过比较日球层等离子体片（HPS）内部与HPS附近一个太阳风磁通绳内部的温度、密度、氦丰度和电荷态，Huang等（2017a）发现，HPS与HPS附近太阳风磁通绳的性质

相似。他们推断，太阳风磁通绳和HPS都源自日冕，而太阳风磁通绳是在流带中通过交换磁重联产生的。

许多研究表明，太阳风磁通绳既可以在太阳上形成，也可以在日球层中形成。统计结果表明，太阳风磁通绳可能起源于太阳和日球层，因为部分太阳风磁通绳内部的电荷态较高（Yu等（2016）；Huang等（2018））。Yu等（2016）利用STEREO的测量数据发现，只有约5%的太阳风磁通绳呈现出增强的铁平均电荷态（Q_{Fe}）。Huang等（2018）基于ACE探测到的25个太阳风磁通绳，研究了 Q_{Fe}的分布。他们发现，约三分之一（8/25）的太阳风磁通绳与较高的 Q_{Fe}相关。研究还分析了靠近和远离HCS、存在和不存在反向流超热电子（CSE）的太阳风磁通绳的特性。Feng等（2015）根据太阳风磁通绳与HCS之间的距离，将太阳风磁通绳分为两类。他们发现，远离HCS的太阳风磁通绳通常（57例中有50例）伴有CSE。相比之下，靠近HCS的太阳风磁通绳中，只有60%伴有CSE。他们据此认为，太阳风磁通绳既可能在日冕中形成，也可能在行星际空间的HCS附近形成。Huang等（2020）将太阳风磁通绳分为两类：一类伴有CSE且远离HCS，另一类不伴有CSE且靠近HCS。他们发现，这两类太阳风磁通绳的特性不同。伴有CSE且远离HCS的太阳风磁通绳，其参数与磁云几乎相同。与不伴有CSE且靠近HCS的太阳风磁通绳相比，伴有CSE且远离HCS的太阳风磁通绳通常具有更高的FIP偏差效应和电荷态。因此，他们认为太阳风磁通绳既可以在太阳上形成，也可以在日球层中形成。Choi等（2021）分析了太阳风磁通绳内部超热电子的分布特征。他们发现，只有10.7%的情况下，太阳风磁通绳内部存在双向超热电子束。上述统计结果表明，大多数太阳风磁通绳内部超热电子的特性与磁云不同。Xu等（2020）对行星际日冕物质抛射、太阳风和流相互作用区（SIR）内部的太阳风磁通绳进行了统计分析。他们发现，行星际日冕物质抛射内部的太阳风磁通绳，其特性与太阳风和SIR内部的太阳风磁通绳显著不同。行星际日冕物质抛射中，具有强磁场、显著膨胀、高铁电荷态和CSE的太阳风磁通绳的概率，高于太阳风和SIR中的相应概率。因此，他们认为，大多数太阳风磁通绳的起源机制与磁云不同，只有少部分太阳风磁通绳来自太阳。此外，太阳风磁通绳也可以通过磁侵蚀过程形成。先前的研究表明，磁重联可发生在磁云的前部和／或后部（Dasso等，2006，2007；Ruffenach等，2012；Janvier等，2014；Lavraud等，2014）以及太阳风磁通绳的前部和／或后部（Feng & Wu，2009；Tian等，2010）。磁云的磁侵蚀效应可使总方位磁通减少40%（Ruffenach等，2015）。上述过程可侵蚀磁云的部分磁场结构，从而形成太阳风磁通绳。因此，日球层中的磁侵蚀也应有助于太阳风磁通绳的形成。这意味着，太阳风磁通绳的形成应与太阳上和日球层中的过程均有关。

通常，上述结果基于个案研究或少量案例。鉴于在太阳活动极大期和下降期，Wind 号航天器在1 AU处的单点观测表明，太阳风磁通绳的月数量约为300–500（100）个（见Hu等（2018）图3(a)以及Zheng & Hu （2018年）中的图1）。Hu等（2018年）基于Grad-Shafranov（GS）重建技术开发了一种太阳风磁通绳自动探测方法。他们从Wind在第23和第24太阳活动周期间测得的太阳风数据中提取出74241个太阳风磁通绳，持续时间为9至361分钟。基于上述太阳风磁通绳列表进行的统计分析显示，太阳风磁通绳在HCS附近出现得更频繁（Hu等（2018年））。值得注意的是，太阳风磁通绳的出现通常与太阳活动呈正相关（Hu等（2018年）；Zheng & Hu（2018年））。然而，上述正相关并不意味着太阳风磁通绳仅源自太阳，因为日球层中的局地过程也能产生太阳风磁通绳，且这些过程同样可能受太阳活动调制（Hu等（2018年）；Zheng & Hu（2018年））。基于Grad–Shafranov重建技术（Hu等（2018年））的自动探测方法（Hu 2017）也应用于Helios 1、2号和Voyager航天器探测到的数据。统计结果表明，在黄道面内，随着日心径向距离从0.3 AU增加至约7 AU，太阳风磁通绳的事件数逐渐减少（Chen & Hu 2020）。

不同源区太阳风中太阳风磁通绳的性质尚未得到系统分析和比较。三类主要太阳风源区——日冕洞（CH）、活动区（AR）和宁静太阳（QS）——在等离子体性质、磁场结构和磁活动方面存在显著差异。CH（AR和QS）区域分别以开放（闭合）磁场结构为主（Wiegelmann & Solanki 2004；Ito等，2010年；Wiegelmann等，2014年）。AR的温度高于CH区域，而QS区域的温度介于两者之间。此外，由于活动区的磁场更强且演化更快，爆发事件在活动区发生得更为频繁（Huang等，2017b）。因此，源自不同源区的太阳风，其电荷态、氦丰度和FIP偏差存在显著差异（Fu等，2015，2017年，

2018年；Abbo等，2016年）。因此，分析源自不同源区的太阳风中太阳风磁通绳的性质至关重要。这有助于加深对太阳风磁通绳起源和产生机制的理解。ACE航天器探测到的太阳风磁通绳，是通过基于Grad-Shafranov重构技术的自动检测方法识别的（Hu，2017年；Hu等，2017年，2018年；Chen等，2019年）。这对太阳风磁通绳的研究是一项重大进展，因为识别出的事件数量十分庞大。在太阳活动最大期和下降（最小）期，每月识别出的太阳风磁通绳数量约为数百个（一个）。这使得对太阳风磁通绳性质，尤其是其成分特征，进行统计分析成为可能。

本研究分析了源自冕洞（CH）、活动区（AR）和宁静太阳（QS）区域的太阳风中太阳风磁通绳（SFR）的特性。主要分析电荷态、FIP偏差和氦丰度，因为它们携带着太阳源区的信息（Manchester等，2017年）。首先，分析并比较了浸没在冕洞、活动区和宁静太阳太阳风中的SFR及其相关背景太阳风的特性。统计分析表明，这三类SFR的成分特性存在显著差异。SFR内部的成分参数与其相关背景太阳风之间仅有细微差异。其次，根据SFR内部的O^{7+}/O^{6+}相较于相关背景太阳风是否明显升高或降低，将SFR进一步分为高温SFR、低温SFR和正常SFR。分析并比较了浸没在冕洞、活动区和宁静太阳太阳风中的这三类SFR的特性。统计结果表明，高温SFR和低温SFR的特性与正常SFR显著不同。与正常SFR和背景太阳风相比，高温SFR和低温SFR的特性似乎分别处于两个极端。最后，考察了高温SFR、低温SFR、正常SFR和背景太阳风在速度与O^{7+}/O^{6+} 空间中的分布。高温SFR的分布与低温SFR、正常SFR及背景太阳风的分布不同。相关结果将加深我们对SFR特性的认识，并有助于理解SFR的起源和产生机制。本文结构如下：第2节介绍SFR列表、数据和分析方法。第3节展示并讨论结果。第4节总结统计结果。

2. 数据与分析

本研究使用了《小尺度磁通绳数据库》中所列出的 ACE 太阳风磁通绳事件列表[1] 。太阳风磁通绳通过一种基于 Grad-Shafranov 重构技术的自动检测方法进行识别（Hu 2017；Hu 等 2017，2018年；Chen 等 2019）。本文研究的太阳风磁通绳由 ACE 在 1999年 至 2008年期间探测获得，涵盖太阳活动周23的最大值阶段（1999年—2002年）、下降阶段（2003年—2006年）和最小值阶段（2007年—2008年）。由于成分参数的时间分辨率为1小时，因此选取持续时间为1至12小时的太阳风磁通绳。根据相关太阳风的源区类型，将太阳风磁通绳分为三类。 Fu 等 （2015年）将地球附近的太阳风向后追踪至太阳。根据光球磁场结构和极紫外图像，源区被划分为日冕洞、活动区和宁静太阳区。随后，根据源区类型将太阳风分为三组。统计分析表明，三类太阳风的原位参数存在显著差异（Fu 等 2017，2018年）。

本研究共分析了1993个太阳风磁通绳。浸没在冕洞、活动区和宁静太阳太阳风中的太阳风磁通绳数量分别为652、988和353。背景太阳风定义为太阳风磁通绳前缘之前12小时以及后缘之后12小时的时间段。同时，还排除了所定义背景太阳风中被其他太阳风磁通绳占据的时间区间。随后，对冕洞、活动区和宁静太阳风中的太阳风磁通绳及其相关背景的性质，尤其是成分特征，进行了分析和比较。最后，还研究了浸没在不同类型太阳风中的太阳风磁通绳在速度与O^{7+}/O^{6+} 空间中的分布。

SFRs和太阳风的原位参数由ACE航天器测量。太阳风的速度、质子数密度、氦丰度和质子温度由太阳风电子质子阿尔法监测器（SWEPAM；McComas等，1998年）测量，磁场则由磁场实验（MAG；Smith等，1998年）探测。电荷态（O^{7+}/O^{6+}、C^{6+}/C^{5+}和C^{6+}/C^{4+}）以及FIP偏差（Fe/O、Mg/O）由太阳风离子成分谱仪（SWICS；Gloeckler等，1998年）测量。由于电荷态和FIP偏差的时间分辨率为1小时，因此分析了持续时间超过1小时的太阳风磁通绳。如果某个小时（从t0到t0+1）完全处于某个太阳风磁通绳内，则采用该小时对应的数值。通常，太阳风磁通绳的两个边界并不恰好

[1] http://fluxrope.info/

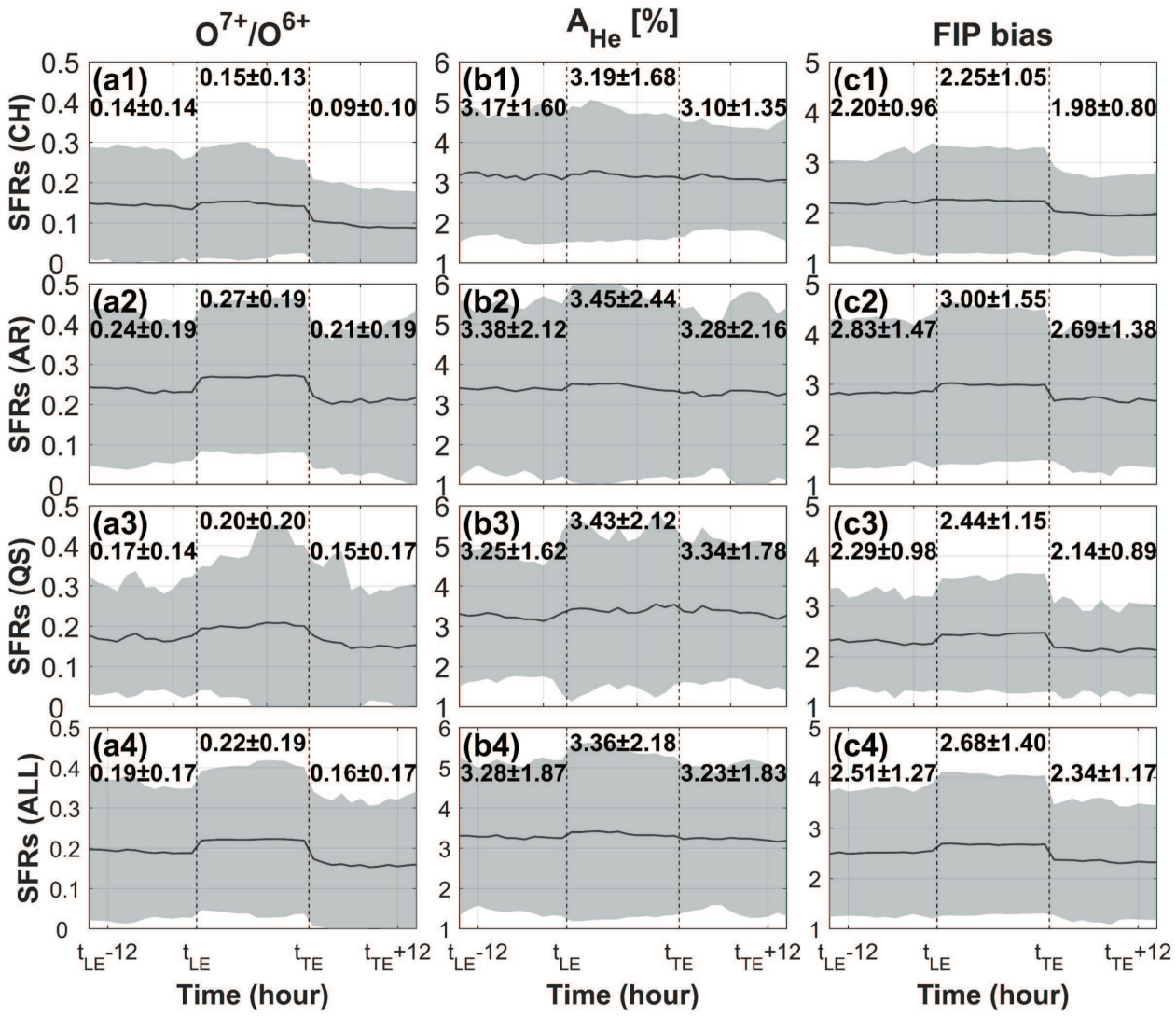


图1。三种类型太阳风中太阳风磁通绳及其背景的成分特征。第一至第四行依次展示了冕洞、活动区、宁静太阳风及整体太阳风磁通绳中的 O^{7+}/O^{6+} （左列）、氦丰度（中列）和 FIP偏差（由铁氧比得出，右列）。每个太阳风磁通绳的持续时间归一化为 12 小时，这与太阳风磁通绳前后背景太阳风的持续时间相同。太阳风磁通绳的前缘（LE）和后缘（TE）以竖直虚线标示。黑线表示平均值，阴影区域表示 1-sigma 标准差。各面板还给出了太阳风磁通绳内部及其相关背景太阳风中的平均值。

覆盖整个小时（从t0到t0+1）。如果某个小时（从t0到t0+1）位于太阳风磁通绳的起始或结束部分，且其中超过一半的时间被太阳风磁通绳占据，则采用该小时的数值。

3. 结果与讨论

3.1. 冕洞、活动区和宁静太阳风中太阳风磁通绳及其相关背景的性质

本研究分析的太阳风磁通绳总数为1993个，持续时间为1至12小时。处于已识别的冕洞、活动区和宁静太阳太阳风中的太阳风磁通绳分别有652个、988个和353个。处于冕洞、活动区和宁静太阳太阳风中的太阳风磁通绳及其相关背景的性质汇总并列于表1中。鉴于太阳风磁通绳（Hu等（2018））和太阳风（Zhao等，2009年；Fu等，2015年）的性质都会随太阳活动而变化，文中按太阳活动阶段列出各项参数。总体而言，处于冕洞、活动区和宁静太阳太阳风中的太阳风磁通绳，其性质彼此存在显著差异。还有

表1. 冕洞、活动区和宁静太阳风中太阳风磁通绳及背景的参数

		MAX	DEC	MIN	总计
SFR数量	CH	207	350	95	652
	AR	689	257	42	988
	QS	160	136	57	353
	ALL	1056	743	194	1993
持续时间（小时）[a]	CH	1.89 ± 1.22	1.85 ± 1.13	1.82 ± 1.25	1.86 ± 1.18
	AR	2.26 ± 1.65	2.12 ± 1.46	1.76 ± 1.19	2.20 ± 1.59
	QS	2.09 ± 1.42	2.01 ± 1.35	2.26 ± 1.87	2.09 ± 1.47
	ALL	2.16 ± 1.55	1.97 ± 1.30	1.94 ± 1.46	2.07 ± 1.45
O^{7+}/O^{6+} [c]	CH（SW）[b]	0.19 ± 0.16（0.15 ± 0.13）	0.14 ± 0.12（0.11 ± 0.13）	0.08 ± 0.07 (0.06 ± 0.07)	0.15 ± 0.13 (0.12 ± 0.12)
	AR（SW）	0.30 ± 0.20 (0.25 ± 0.20)	0.22 ± 0.15 (0.19 ± 0.15)	0.11 ± 0.08 (0.09 ± 0.08)	0.27 ± 0.19 (0.22 ± 0.19)
	QS（SW）	0.27 ± 0.26 (0.21 ± 0.19)	0.19 ± 0.10 (0.16 ± 0.13)	0.04 ± 0.04 (0.06 ± 0.05)	0.20 ± 0.20 (0.16 ± 0.16)
	ALL（SW）	0.27 ± 0.21 (0.22 ± 0.19)	0.18 ± 0.13 (0.15 ± 0.14)	0.07 ± 0.07 (0.06 ± 0.07)	0.22 ± 0.19 (0.18 ± 0.17)
C^{6+}/C^{5+} [c]	冕洞（太阳风）	0.86 ± 0.54（0.80 ± 0.54）	0.75 ± 0.53（0.63 ± 0.54）	0.56 ± 0.39（0.43 ± 0.42）	0.76 ± 0.52（0.65 ± 0.54）
	活动区（太阳风）	1.19 ± 0.77 (1.11 ± 0.76)	1.20 ± 0.74（1.01 ± 0.67）	0.79 ± 0.49 (0.63 ± 0.53)	1.18 ± 0.75 (1.06 ± 0.73)
	QS（SW）	1.11 ± 0.69 (1.08 ± 0.81)	1.12 ± 0.54 (0.96 ± 0.61)	0.43 ± 0.30 (0.52 ± 0.40)	1.00 ± 0.64 (0.92 ± 0.70)
	全部（太阳风）	1.12 ± 0.73 (1.04 ± 0.74)	0.99 ± 0.65 (0.82 ± 0.63)	0.56 ± 0.41 (0.50 ± 0.45)	1.02 ± 0.70 (0.89 ± 0.69)
C^{6+}/C^{4+} [c]	CH（SW）	3.02 ± 2.55（2.75 ± 2.41）	2.53 ± 2.36（2.09 ± 2.42）	1.35 ± 1.51 (1.01 ± 1.34)	2.52 ± 2.38 (2.13 ± 2.35)
	AR（SW）	4.48 ± 3.86 (4.04 ± 3.85)	4.41 ± 4.45 (3.61 ± 3.96)	2.08 ± 1.79 (1.71 ± 1.82)	4.38 ± 3.99 (3.80 ± 3.84)
	QS（SW）	4.12 ± 3.29（3.74 ± 3.04）	3.89 ± 2.50 (3.21 ± 2.85)	0.85 ± 0.83 (1.16 ± 1.40)	3.46 ± 2.97 (3.01 ± 2.88)
	ALL（SW）	4.18 ± 3.63 (3.73 ± 3.52)	3.48 ± 3.42 (2.79 ± 3.23)	1.32 ± 1.45 (1.21 ± 1.51)	3.67 ± 3.51 (3.07 ± 3.33)
第一电离势偏差（铁/氧）[d]	CH（SW）	2.49 ± 1.15 (2.33 ± 0.94)	2.14 ± 0.95 (1.99 ± 0.84)	2.07 ± 1.08 (1.85 ± 0.81)	2.25 ± 1.05 (2.08 ± 0.89)
	AR（SW）	3.12 ± 1.63 (2.89 ± 1.49)	2.76 ± 1.33 (2.53 ± 1.33)	2.22 ± 1.00 (2.09 ± 0.86)	3.00 ± 1.55 (2.75 ± 1.44)
	QS（SW）	2.75 ± 1.45 (2.46 ± 1.05)	2.36 ± 0.73 (2.16 ± 0.76)	1.83 ± 0.61 (1.75 ± 0.81)	2.44 ± 1.15 (2.20 ± 0.94)
	全部（太阳风）	2.96 ± 1.55 (2.71 ± 1.36)	2.41 ± 1.11 (2.20 ± 1.05)	2.02 ± 0.94 (1.86 ± 0.84)	2.68 ± 1.40 (2.41 ± 1.23)
FIP偏差 (Mg/O) [e]	CH（SW）	1.81 ± 0.55 (1.75 ± 0.48)	1.60 ± 0.42 (1.55 ± 0.45)	1.47 ± 0.29（1.43 ± 0.38）	1.65 ± 0.47（1.59 ± 0.46）
	AR（SW）	2.30 ± 0.67（2.24 ± 0.72）	2.17 ± 0.84（2.03 ± 0.81）	1.69 ± 0.48（1.69 ± 0.50）	2.25 ± 0.72 (2.15 ± 0.75)
	QS（SW）	2.02 ± 0.69 (1.87 ± 0.61)	1.82 ± 0.55 (1.72 ± 0.47)	1.43 ± 0.33 (1.49 ± 0.51)	1.84 ± 0.62（1.73 ± 0.56）
	全部（太阳风）	2.18 ± 0.68（2.08 ± 0.69）	1.85 ± 0.68（1.74 ± 0.64）	1.50 ± 0.36（1.50 ± 0.46）	2.00 ± 0.69（1.88 ± 0.68）
A_{He} [%]	CH（SW）	3.57 ± 1.79（3.36 ± 1.50）	3.11 ± 1.62（3.10 ± 1.60）	2.48 ± 1.30（2.55 ± 1.32）	3.19 ± 1.68（3.11 ± 1.55）
	AR（SW）	3.66 ± 2.52 (3.45 ± 2.30)	3.01 ± 2.19 (3.25 ± 2.32)	2.24 ± 1.22 (2.66 ± 1.41)	3.45 ± 2.44 (3.35 ± 2.28)
	QS（SW）	3.74 ± 2.24（3.44 ± 1.84）	3.48 ± 2.06（3.37 ± 1.80）	2.31 ± 1.43 (2.57 ± 1.40)	3.43 ± 2.12（3.24 ± 1.78）
	全部（太阳风）	3.65 ± 2.36 (3.42 ± 2.07)	3.14 ± 1.92 (3.20 ± 1.90)	2.37 ± 1.33（2.60 ± 1.37）	3.36 ± 2.18（3.24 ± 1.95）
磁场强度 (nT)	CH（SW）	8.32 ± 2.95（7.38 ± 3.18）	8.32 ± 3.08（7.18 ± 3.00）	7.98 ± 3.12 (5.94 ± 2.60)	8.27 ± 3.04 (7.05 ± 3.04)
	AR（SW）	8.44 ± 3.39（7.37 ± 3.32）	8.18 ± 3.42 (7.00 ± 3.52)	7.27 ± 1.96 (5.73 ± 2.16)	8.34 ± 3.36 (7.19 ± 3.35)
	QS（SW）	8.31 ± 3.26 (7.08 ± 2.86)	7.69 ± 3.02 (6.17 ± 2.49)	6.95 ± 1.93 (5.07 ± 2.11)	7.84 ± 3.02 (6.30 ± 2.68)
	ALL（SW）	8.40 ± 3.30（7.29 ± 3.22）	8.15 ± 3.21 (6.91 ± 3.13)	7.48 ± 2.57 (5.58 ± 2.38)	8.23 ± 3.22 (6.94 ± 3.14)
质子温度 (10^5开尔文)	CH（SW）	1.05 ± 0.69 (1.24 ± 0.81)	1.15 ± 0.70 (1.51 ± 0.87)	1.28 ± 0.70（1.55 ± 0.78）	1.14 ± 0.70 (1.44 ± 0.85)
	AR（SW）	0.85 ± 0.62 (1.09 ± 0.82)	1.01 ± 0.97 (1.27 ± 0.97)	1.14 ± 0.73 (1.35 ± 0.85)	0.90 ± 0.73 (1.15 ± 0.87)
	QS（SW）	0.89 ± 0.59 (1.01 ± 0.61)	0.82 ± 0.48 (1.10 ± 0.65)	1.17 ± 0.68 (1.09 ± 0.61)	0.92 ± 0.58 (1.06 ± 0.63)
	全部（太阳风）	0.89 ± 0.63 (1.11 ± 0.79)	1.04 ± 0.79 (1.36 ± 0.88)	1.21 ± 0.70 (1.34 ± 0.77)	0.97 ± 0.70 (1.24 ± 0.84)
质子数密度 (n/cc)	CH（SW）	9.66 ± 6.91 (8.13 ± 6.62)	9.09 ± 7.89 (6.76 ± 5.26)	9.62 ± 7.45 (7.61 ± 5.95)	9.33 ± 7.53 (7.30 ± 5.85)
	AR（SW）	8.44 ± 7.68 (7.31 ± 6.66)	7.81 ± 7.06 (6.06 ± 4.91)	6.97 ± 3.77 (7.05 ± 7.56)	8.25 ± 7.48 (6.96 ± 6.27)
	QS（SW）	8.65 ± 7.43（7.71 ± 6.61）	7.90 ± 6.12 (6.64 ± 4.44)	11.78 ± 10.93 (6.81 ± 5.01)	8.52 ± 7.23 (7.21 ± 5.74)
	全部（太阳风）	8.69 ± 7.53 (7.39 ± 6.47)	8.41 ± 7.32 (6.46 ± 5.00)	9.37 ± 7.78 (7.24 ± 6.23)	8.61 ± 7.47 (7.01 ± 5.92)
速度 (km s $^{-1}$)	CH（SW）	437 ± 80 (465 ± 101)	475 ± 93 (523 ± 110)	467 ± 88 (500 ± 115)	461 ± 90 (502 ± 111)
	AR（SW）	410 ± 60 (430 ± 79)	436 ± 85 (459 ± 98)	446 ± 78 (480 ± 103)	418 ± 68 (441 ± 88)
	QS（SW）	418 ± 64 (439 ± 75)	429 ± 60 (455 ± 82)	449 ± 69 (458 ± 84)	427 ± 65 (449 ± 80)
	ALL（SW）	416 ± 65 (440 ± 86)	452 ± 87 (490 ± 108)	456 ± 81 (482 ± 105)	432 ± 77 (464 ± 100)
膨胀速度 [f]（千米 秒$^{-1}$）	CH	-0.06 ± 9.47	-0.88 ± 9.73	-0.77 ± 9.07	-0.61 ± 9.55
	AR	0.14 ± 9.67	-0.53 ± 9.18	-0.60 ± 8.99	-0.06 ± 9.52
	QS	0.08 ± 9.59	-0.91 ± 8.71	-3.03 ± 10.20	-0.87 ± 9.42
	ALL	0.09 ± 9.61	-0.77 ± 9.37	-1.47 ± 9.43	-0.38 ± 9.51
相关系数 速度与 O^{7+}/O^{6+} 之间	CH（SW）	-0.49 (-0.61)	-0.54 (-0.59)	-0.55 (-0.70)	-0.51 (-0.60)
	AR（SW）	-0.37 (-0.37)	-0.29 (-0.40)	-0.63 (-0.73)	-0.36 (-0.40)
	QS（SW）	-0.14 (-0.24)	-0.20 (-0.47)	-0.60 (-0.61)	-0.20 (-0.34)
	全部（太阳风）	-0.36 (-0.41)	-0.43 (-0.53)	-0.53 (-0.67)	-0.40 (-0.47)

a 磁通量绳的平均持续时间。b 太阳风磁通绳的背景太阳风。c O^{7+}/O^{6+} (C^{6+}/C^{5+}, C^{6+}/C^{4+})表示O^{7+} 和O^{6+} (C^{6+} 和C^{5+}、C^{6+} 和C^{4+})之间的密度比，表中给出的数值是太阳风磁通绳和背景太阳风中各参数的平均值和标准差。d FIP偏差根据原位测得的铁氧比与其对应的光球值0.065之比推导得出（Asplund等（2009））。e FIP偏差根据原位测得的Mg/O与其对应的光球值0.081之比推导得出（Asplund等（2009））。f 太阳风磁通绳的膨胀速度由其前缘和后缘之间速度差的一半推导得出（Yu等（2016）；Hu等（2018））。

在这三类太阳风中，太阳风磁通绳内部的参数与其相关背景之间的差异都很小（见表1）。

图1展示了太阳风磁通绳及其背景在冕洞、活动区和宁静太阳风中的成分特征。冕洞太阳风磁通绳中的 O^{7+}/O^{6+} 最低，活动区太阳风磁通绳中的最高，宁静太阳区磁通绳结构则介于两者之间。活动区太阳风磁通绳中的 O^{7+}/O^{6+} 约为冕洞太阳风磁通绳中的两倍。三类太阳风磁通绳内部的 O^{7+}/O^{6+} 均略高于背景太阳风中的值。总体而言，太阳风磁通绳内部的 O^{7+}/O^{6+} 比背景太阳风中的值高10%–20%。冕洞、活动区和宁静太阳区磁通绳结构内部的 O^{7+}/O^{6+} （背景值）分别为 0.15 ± 0.13（0.12 ± 0.12）、0.27 ± 0.19（0.22 ± 0.19）和 0.20 ± 0.20（0.16 ± 0.16）。C^{6+}/C^{5+} 和 C^{6+}/C^{4+} 的电荷态也列于表1中。定性而言，太阳风磁通绳及背景太阳风内部的 C^{6+}/C^{5+} 和 C^{6+}/C^{4+} 特征与 O^{7+}/O^{6+} 相似。FIP偏差的特征与 O^{7+}/O^{6+}几乎相同。太阳风磁通绳内部的 A_{He}也略高于其相关背景太阳风中的值。值得注意的是，三类太阳风中的A_{He} 彼此仅略有差异。明显的差别在于，活动区和宁静太阳区太阳风磁通绳中的 A_{He} 范围比冕洞太阳风磁通绳中的更宽。总体而言，快速太阳风中的 A_{He} 较高（4%–5%）且分布均匀（McComas等，2008）。慢速太阳风中的 A_{He}分布范围较宽，平均值较低（Aellig等，2001；Kasper等，2007，2012；Fu等，2018）。大型极区日冕洞产生的典型快速太阳风通常与较高的 A_{He}相关。典型快速太阳风的速度通常高于600 km s^{-1}，平均速度约为700 km s^{-1} （McComas等（2008）的图2）。然而，考虑到黄道面上的冕洞太阳风通常起源于小型、中等尺度的冕洞和/或冕洞边界，上述典型快速太阳风在地球附近很少出现。活动区和宁静太阳风的平均速度（约450 km s^{-1}）仅略低于冕洞太阳风的平均速度（约500 km s^{-1}，见Fu 等人（2015）的图5上图）。因此，黄道面冕洞风中的 A_{He} 低于大型极区日冕洞产生的典型快速太阳风中的值。黄道面冕洞风中的 A_{He} 并不高于活动区和宁静太阳风中的值。

我们认为，Fu 等人（2015年）对三类太阳风所采用的分类方法是合理的。统计结果表明，活动区太阳风中的 O^{7+}/O^{6+} 约为冕洞风中 O^{7+}/O^{6+} 的两倍（Fu 等人（2015年）论文图5的上图），尽管冕洞和活动区太阳风的速度之间没有显著差异。这与活动区太阳风源区的温度显著高于冕洞太阳风源区温度这一事实相一致。值得注意的是，在三类太阳风中，太阳风磁通绳的成分特征均高于背景。三类太阳风中，太阳风磁通绳内部的 O^{7+}/O^{6+} 平均值均比相应背景中的值高出10%–20%。太阳风磁通绳内部略高的 O^{7+}/O^{6+} 是所有太阳风磁通绳的共同特征吗？还是仅由部分太阳风磁通绳中显著较高的 O^{7+}/O^{6+} 所导致？是否也有部分太阳风磁通绳具有显著较低的 O^{7+}/O^{6+}？下一节中，我们将对太阳风磁通绳的成分特征进行更详细的研究和分析。

3.2. 高温SFR、低温SFR、正常SFR及其在冕洞、活动区和宁静太阳太阳风中的相关背景之间的比较

为进一步探究太阳风磁通绳的特征，我们根据太阳风磁通绳内部的 O^{7+}/O^{6+} 是否明显升高或降低，将太阳风磁通绳分为高温SFR、低温SFR和正常SFR。如果太阳风磁通绳内部的 O^{7+}/O^{6+} 比相关背景太阳风中的数值高（低）30%，则将其定义为高温SFR（低温SFR）。其余太阳风磁通绳称为正常SFR。因此，进一步将处于某一类型太阳风中的太阳风磁通绳分为高温SFR、低温SFR和正常SFR。阈值（30%）高于太阳风磁通绳与相关背景太阳风之间 O^{7+}/O^{6+} 平均差异（10%–20%）（见图 1 左栏）。我们还采用了 50% 和 80% 等不同阈值。从定量结果来看，不同阈值下高温SFR（低温SFR）的比例和参数并不相同。阈值越高，三种太阳风中高温SFR（低温SFR）的比例越低。阈值为 30% 、 50% 和 80% 时，高温 SFR （低温 SFR ）的比例分别约为 16% （ 18% ）、 9% （ 8% ）和 4% （ 1% ）。阈值越高，高温SFR、低温SFR和正常SFR之间的参数差异越显著。不过，对于不同阈值，高温SFR、低温SFR和正常SFR之间的差异在定性上相同。高温SFR、低温SFR和正常SFR的数量及其特性分别汇总于表 2 至 4。

SFRs 的平均持续时间在活动区（冕洞）太阳风中最长（最短），而宁静太阳区磁通绳结构的持续时间介于两者之间（见表 1）。在冕洞、活动区和宁静太阳风中，高温SFR和低温SFR的平均持续时间通常在活动区（冕洞）太阳风中最长（最短）（见表 **2** 和 **3**）。唯一的例外

表2. 冕洞、活动区和宁静太阳风中高温SFR及背景的参数

		MAX	DEC	MIN	总计
SFR数量	CH	32	65	26	123
	AR	106	34	6	146
	QS	22	26	4	52
	ALL	160	125	36	321
持续时间（小时）[a]	CH	2.09 ± 1.44	2.08 ± 1.52	1.96 ± 0.96	2.06 ± 1.39
	AR	2.51 ± 2.09	2.32 ± 1.43	2.50 ± 1.52	2.47 ± 1.93
	QS	2.41 ± 2.11	2.50 ± 1.70	2.75 ± 1.50	2.48 ± 1.84
	ALL	2.41 ± 1.98	2.23 ± 1.54	2.14 ± 1.13	2.31 ± 1.73
O^{7+}/O^{6+} [c]	CH（SW）[b]	0.37 ± 0.23（0.21 ± 0.17）	0.23 ± 0.17（0.11 ± 0.12）	0.13 ± 0.08（0.05 ± 0.06）	0.24 ± 0.20 (0.13 ± 0.14)
	AR（SW）	0.47 ± 0.26 (0.26 ± 0.21)	0.31 ± 0.24 (0.17 ± 0.15)	0.17 ± 0.10（0.08 ± 0.08）	0.43 ± 0.27 (0.23 ± 0.20)
	宁静太阳（太阳风）	0.48 ± 0.42 (0.25 ± 0.18)	0.24 ± 0.10（0.13 ± 0.08）	0.06 ± 0.05 (0.05 ± 0.05)	0.32 ± 0.31 (0.17 ± 0.15)
	ALL（SW）	0.46 ± 0.29（0.25 ± 0.20）	0.25 ± 0.18 (0.13 ± 0.12)	0.13 ± 0.08（0.06 ± 0.06）	0.35 ± 0.27（0.18 ± 0.18）
C^{6+}/C^{5+} [c]	CH（SW）	1.17 ± 0.80 (0.97 ± 0.64)	1.03 ± 0.67 (0.65 ± 0.56)	0.81 ± 0.43（0.48 ± 0.40）	1.02 ± 0.68 (0.71 ± 0.58)
	AR（SW）	1.38 ± 0.86 (1.12 ± 0.78)	1.44 ± 1.03 (0.97 ± 0.59)	1.08 ± 0.57 (0.61 ± 0.49)	1.38 ± 0.89 (1.06 ± 0.73)
	QS（SW）	1.35 ± 0.89 (1.21 ± 0.71)	1.23 ± 0.62 (0.81 ± 0.46)	0.61 ± 0.51 (0.51 ± 0.38)	1.22 ± 0.76 (0.94 ± 0.62)
	全部（太阳风）	1.34 ± 0.86 (1.10 ± 0.74)	1.19 ± 0.80 (0.77 ± 0.56)	0.83 ± 0.48（0.51 ± 0.41）	1.23 ± 0.82 (0.90 ± 0.68)
C^{6+}/C^{4+} [c]	CH（SW）	4.67 ± 4.03 (3.52 ± 3.08)	3.78 ± 2.99 (2.12 ± 2.27)	2.34 ± 2.12 (1.07 ± 1.23)	3.73 ± 3.24 (2.30 ± 2.51)
	AR（SW）	5.85 ± 5.13 (3.94 ± 3.50)	5.42 ± 4.26 (3.19 ± 2.56)	3.44 ± 2.89 (1.55 ± 1.66)	5.66 ± 4.89 (3.65 ± 3.28)
	QS（SW）	5.23 ± 3.46 (4.46 ± 3.55)	4.35 ± 3.41 (2.57 ± 1.87)	1.34 ± 1.10 (1.11 ± 1.13)	4.46 ± 3.44 (3.19 ± 2.89)
	全部（太阳风）	5.56 ± 4.76 (3.95 ± 3.43)	4.38 ± 3.55（2.49 ± 2.32）	2.41 ± 2.24 (1.16 ± 1.31)	4.79 ± 4.24 (3.05 ± 3.00)
第一电离势偏差（铁/氧）[d]	CH（SW）	2.85 ± 1.81 (2.34 ± 1.01)	2.04 ± 0.84（1.92 ± 0.76）	2.60 ± 1.60 (1.96 ± 0.97)	2.37 ± 1.37 (2.04 ± 0.89)
	AR（SW）	3.42 ± 1.95 (2.94 ± 1.69)	2.30 ± 1.09 (2.30 ± 1.03)	2.17 ± 0.83 (2.13 ± 0.70)	3.13 ± 1.83（2.75 ± 1.56）
	宁静太阳（太阳风）	2.67 ± 1.15 (2.37 ± 1.06)	2.26 ± 0.67（2.07 ± 0.70）	1.34 ± 0.62（1.65 ± 0.60）	2.35 ± 0.96（2.15 ± 0.89）
	全部（太阳风）	3.22 ± 1.86（2.74 ± 1.51）	2.17 ± 0.89（2.05 ± 0.84）	2.34 ± 1.44（1.93 ± 0.88）	2.73 ± 1.60（2.37 ± 1.27）
FIP偏差（Mg/O） [e]	CH（SW）	2.12 ± 0.90（1.79 ± 0.51）	1.70 ± 0.47（1.50 ± 0.38）	1.55 ± 0.34 (1.45 ± 0.37)	1.78 ± 0.63 (1.57 ± 0.44)
	AR（SW）	2.57 ± 0.84 (2.30 ± 0.78)	2.06 ± 0.63 (1.94 ± 0.63)	1.78 ± 0.42 (1.69 ± 0.43)	2.43 ± 0.82 (2.19 ± 0.76)
	QS（SW）	2.30 ± 0.85 (2.02 ± 0.76)	1.68 ± 0.39 (1.65 ± 0.45)	1.48 ± 0.37 (1.42 ± 0.29)	1.92 ± 0.70 (1.78 ± 0.63)
	全部（太阳风）	2.46 ± 0.87 (2.16 ± 0.76)	1.80 ± 0.53 (1.64 ± 0.51)	1.58 ± 0.37 (1.49 ± 0.38)	2.12 ± 0.80 (1.88 ± 0.69)
A_{He} [%]	CH（SW）	4.03 ± 2.57（3.39 ± 1.71）	2.94 ± 1.72 (3.01 ± 1.53)	2.09 ± 1.24 (2.72 ± 1.46)	3.13 ± 2.06 (3.07 ± 1.59)
	AR（SW）	3.91 ± 2.48 (3.46 ± 2.53)	3.65 ± 3.72 (2.71 ± 2.17)	1.78 ± 0.67 (2.54 ± 1.12)	3.80 ± 2.79 (3.23 ± 2.43)
	QS（SW）	4.52 ± 3.60 (3.25 ± 1.93)	4.01 ± 2.05 (3.49 ± 1.61)	2.43 ± 0.66 (3.06 ± 1.52)	4.16 ± 2.84 (3.35 ± 1.75)
	全部（太阳风）	4.01 ± 2.67 (3.41 ± 2.28)	3.36 ± 2.52 (3.03 ± 1.74)	2.07 ± 1.14 (2.77 ± 1.44)	3.62 ± 2.59 (3.19 ± 2.00)
磁场强度 (nT)	CH（SW）	9.53 ± 3.27 (7.76 ± 3.61)	8.56 ± 3.02 (7.61 ± 3.33)	8.04 ± 2.70 (6.31 ± 2.60)	8.74 ± 3.09 (7.42 ± 3.34)
	AR（SW）	9.03 ± 3.55 (8.10 ± 3.65)	7.82 ± 3.20 (6.47 ± 2.63)	7.93 ± 1.66 (6.18 ± 1.91)	8.73 ± 3.46 (7.61 ± 3.44)
	QS（SW）	9.77 ± 3.64 (7.50 ± 3.64)	9.84 ± 3.85 (7.03 ± 3.05)	7.52 ± 2.07 (4.48 ± 1.42)	9.59 ± 3.68 (6.91 ± 3.32)
	ALL（SW）	9.22 ± 3.52 (7.93 ± 3.66)	8.60 ± 3.33 (7.17 ± 3.12)	7.94 ± 2.43 (5.91 ± 2.37)	8.87 ± 3.39 (7.40 ± 3.39)
质子温度 (10^5开尔文)	CH（SW）	0.79 ± 0.48 (1.22 ± 0.94)	0.99 ± 0.62 (1.59 ± 0.99)	1.06 ± 0.65 (1.50 ± 0.73)	0.94 ± 0.60 (1.48 ± 0.95)
	AR（SW）	0.71 ± 0.65 (1.21 ± 0.95)	0.86 ± 0.48 (1.22 ± 0.80)	1.30 ± 0.63 (1.58 ± 0.93)	0.76 ± 0.63 (1.23 ± 0.92)
	QS（SW）	0.70 ± 0.44（0.93 ± 0.53）	0.83 ± 0.50 (1.14 ± 0.70)	0.89 ± 0.19 (0.99 ± 0.49)	0.78 ± 0.46 (1.04 ± 0.62)
	全部（太阳风）	0.73 ± 0.60 (1.16 ± 0.90)	0.92 ± 0.57 (1.40 ± 0.90)	1.07 ± 0.60 (1.41 ± 0.76)	0.83 ± 0.60 (1.28 ± 0.90)
质子数密度 (n/cc)	CH（SW）	13.91 ± 8.51 (10.13 ± 9.06)	11.86 ± 9.34 (8.55 ± 7.05)	9.38 ± 6.09 (8.58 ± 7.38)	12.23 ± 8.88 (9.03 ± 7.77)
	AR（SW）	9.84 ± 8.98 (7.97 ± 6.74)	8.23 ± 6.03 (6.27 ± 4.56)	4.58 ± 2.48（4.46 ± 2.96）	9.43 ± 8.43 (7.52 ± 6.31)
	QS（SW）	11.43 ± 7.73 (9.45 ± 8.60)	7.37 ± 6.76 (6.76 ± 4.44)	10.84 ± 1.90 (8.14 ± 2.67)	9.22 ± 7.50 (8.13 ± 6.97)
	全部（太阳风）	10.80 ± 8.89 (8.65 ± 7.64)	9.88 ± 8.25 (7.56 ± 5.96)	8.66 ± 5.94 (7.68 ± 6.71)	10.35 ± 8.56（8.16 ± 6.98）
速度 (km s $^{-1}$)	CH（SW）	414 ± 63 （440 ± 83）	455 ± 98 （519 ± 121）	457 ± 88 (493 ± 100)	444 ± 89 (493 ± 114)
	AR（SW）	409 ± 60 (436 ± 77)	437 ± 82 (448 ± 82)	436 ± 61 (465 ± 109)	417 ± 66 (440 ± 81)
	QS（SW）	406 ± 66 (428 ± 67)	452 ± 54 (474 ± 65)	425 ± 43 (448 ± 59)	429 ± 63 (451 ± 69)
	ALL（SW）	410 ± 61 (435 ± 77)	449 ± 86 (491 ± 107)	447 ± 78 (478 ± 97)	428 ± 75 (462 ± 96)
膨胀速度 [f] (km s^{-1})	CH	0.63 ± 10.14	-0.80 ± 10.06	-0.99 ± 9.16	-0.61 ± 9.90
	AR	0.48 ± 9.77	-0.43 ± 8.78	-0.58 ± 8.38	-0.02 ± 9.23
	QS	-0.33 ± 9.56	-1.16 ± 8.45	-3.34 ± 9.90	-1.48 ± 9.14
	ALL	0.39 ± 9.80	-0.73 ± 9.36	-1.61 ± 9.28	-0.53 ± 9.50
相关系数 速度与 O^{7+}/O^{6+} 之间	CH（SW）	-0.59 (-0.56)	-0.38 (-0.52)	-0.66 (-0.71)	-0.46 (-0.54)
	AR（SW）	-0.31 (-0.43)	-0.08 (-0.33)	-0.56 (-0.71)	-0.29 (-0.42)
	QS（SW）	0.14 (-0.19)	-0.29 (-0.51)	-0.73 (-0.79)	-0.12 (-0.35)
	全部（SW）	-0.26 (-0.42)	-0.27（-0.48）	-0.56（-0.69）	-0.34（-0.47）

a 太阳风磁通绳的平均持续时间。b 太阳风磁通绳的背景太阳风。c O^{7+}/O^{6+} （C^{6+}/C^{5+}、C^{6+}/C^{4+}）表示O^{7+}与O^{6+} （C^{6+}与C^{5+}、C^{6+}与C^{4+}）之间的密度比，表中所列数值为太阳风磁通绳和背景太阳风中各参数的平均值和标准差。d FIP偏差由原位探测的Fe/O与其相应光球值0.065（Asplund等（2009））之间的比值得出。e FIP偏差由原位探测的Mg/O与其相应光球值0.081（Asplund等（2009））之间的比值得出。f 太阳风磁通绳的膨胀速度由太阳风磁通绳前缘和后缘之间的速度差的一半得出（Yu等（2016）；Hu等（2018））。

是活动区和宁静太阳风中的高温SFR持续时间几乎相同。 高温SFR的平均持续时间长于低温SFR。冕洞、活动区和宁静太阳风中高温SFR（低温SFR）的平均持续时间分别为2。06 ± 1.39（1。54 ± 0.79）、2。47 ± 1.93（2。00 ± 1.45）、2。48 ± 1.84（1。84 ± 1.10）小时（见表 2 和 3）。

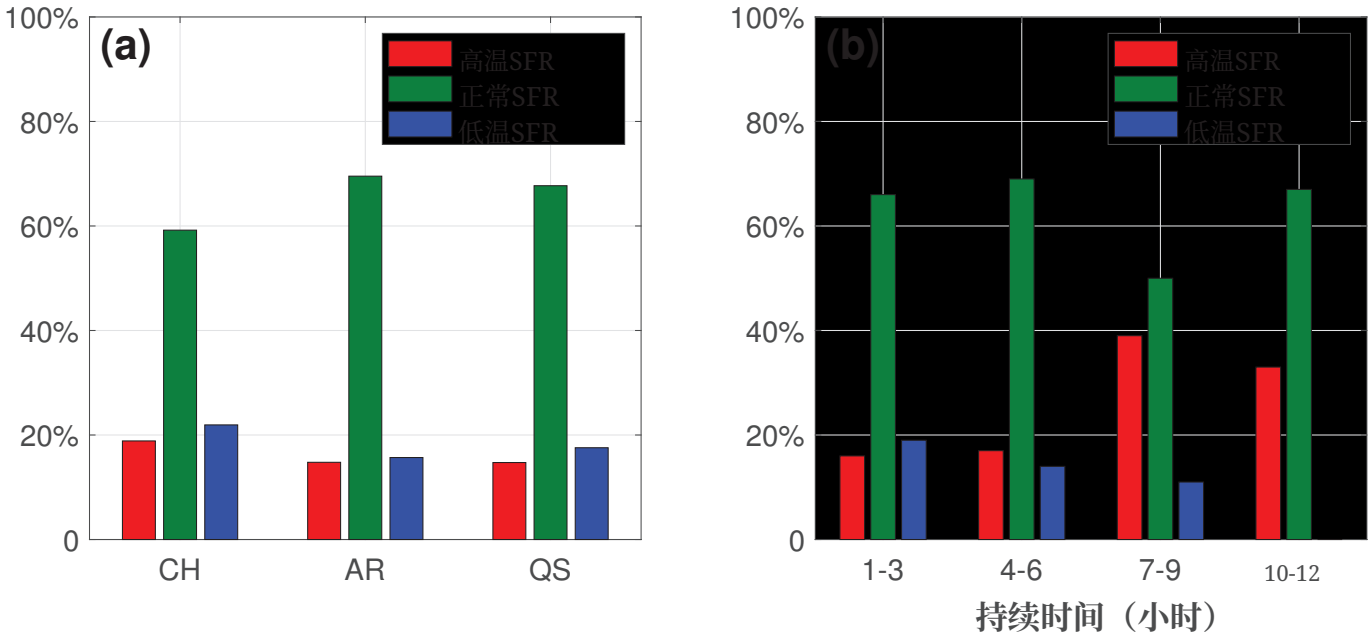


图2展示了高温SFR、低温SFR和正常SFR在三种太阳风中的占比（左图），以及高温SFR、低温SFR和正常SFR的占比随持续时间的变化（右图）。红色、蓝色和绿色分别表示高温SFR、低温SFR和正常SFR。一个显著特征是，随着持续时间增加，高温SFR的占比上升，而低温SFR的占比下降。

图2(a)分析并展示了冕洞、活动区和宁静太阳风中三类太阳风磁通绳的占比。冕洞、活动区和宁静太阳风中高温SFR（低温SFR）的占比分别为19%、15%和15%（22%、16%和18%）。冕洞风中的高温SFR和低温SFR占比均略高于活动区和宁静太阳风中的占比。图2(b)展示了高温SFR、低温SFR和正常SFR的占比随持续时间的变化。太阳风磁通绳的持续时间分为四档：1–3小时、4–6小时、7–9小时和10–12小时。统计结果表明，高温SFR的占比随持续时间增加而上升（图2(b)中的红色柱）。持续时间不足7小时的太阳风磁通绳中，高温SFR占比低于20%；而持续时间为7至12小时的太阳风磁通绳中，高温SFR占比约为30%至40%。与高温SFR不同，低温SFR的占比随持续时间增加而下降（图2(b)中的蓝色柱）。持续时间为0–3小时、4–6小时和7–9小时的低温SFR占比分别为19%、14%和11%。没有低温SFR的持续时间超过9小时。

高温SFR、低温SFR、正常SFR及其相关背景太阳风的磁场强度、质子温度和速度如图3所示。高温SFR、低温SFR和正常SFR内部的磁场强度均高于背景太阳风中的磁场强度（图3左图）。低温SFR内部的磁场强度与高温SFR内部的磁场强度接近，且二者比正常SFR内部的磁场强度高约10%。在冕洞、活动区、宁静太阳以及整体太阳风中，高温SFR（低温SFR）和正常SFR的磁场强度分别为8。74 ± 3.09（9。04 ± 3.07）和7。89 ± 2.96、8。73 ± 3.46（8。85 ± 3.80）和8。14 ± 3.22、9。59 ± 3.68（7。50 ±2.32）和7。50 ± 2.83，以及8。87 ± 3.39（8。69 ± 3.39）和7。96 ± 3.09纳特（见图3左图）。

质子温度在高温SFR、低温SFR、正常SFR及其相关背景太阳风中表现出两个特征。首先，低温SFR内的质子温度显著高于高温SFR和正常SFR内的质子温度。高温SFR（低温SFR）和正常SFR浸没于冕洞、活动区、宁静太阳以及整体太阳风中的质子温度分别为0。94 ± 060（1。55 ± 078）和1。07 ± 066、0。76 ± 063（1。30 ± 082）和0。84 ± 070、0。78 ± 046（1。33 ± 064）和0。84 ± 055，以及0。83 ± 060（1。39 ± 079）和0。91 ± 0。67 × 10^5 K。其次，低温SFR内的质子温度与背景太阳风中的质子温度几乎相同或略高，而与背景太阳风相比，高温SFR和正常SFR内的质子温度明显较低。高温SFR（正常SFR）内的质子温度比其相关背景太阳风中的质子温度低约30%（20%）（图3中间面板中的红线和绿线）。

表3. 冕洞、活动区和宁静太阳风中低温SFR与背景的参数

		MAX	DEC	MIN	总计
SFR数量	CH	34	80	29	143
	AR	97	43	15	155
	QS	20	14	28	62
	ALL	151	137	72	360
持续时间（小时） [a]	CH	1.74 ± 1.05	1.51 ± 0.73	1.38 ± 0.56	1.54 ± 0.79
	AR	2.12 ± 1.55	1.74 ± 1.20	1.93 ± 1.39	2.00 ± 1.45
	QS	1.95 ± 1.15	1.29 ± 0.47	2.04 ± 1.23	1.84 ± 1.10
	ALL	2.01 ± 1.40	1.56 ± 0.89	1.75 ± 1.08	1.79 ± 1.18
O^{7+}/O^{6+} [c]	CH（SW）[b]	0.07 ± 0.05 (0.14 ± 0.12)	0.08 ± 0.07 (0.14 ± 0.16)	0.03 ± 0.03 (0.06 ± 0.09)	0.07 ± 0.06 (0.12 ± 0.14)
	AR（SW）	0.17 ± 0.11（0.28 ± 0.25）	0.10 ± 0.08（0.19 ± 0.20）	0.05 ± 0.04 (0.06 ± 0.07)	0.15 ± 0.11 (0.23 ± 0.23)
	QS（SW）	0.09 ± 0.05 (0.21 ± 0.18)	0.11 ± 0.07 (0.18 ± 0.15)	0.02 ± 0.01 (0.06 ± 0.06)	0.06 ± 0.06（0.13 ± 0.15）
	ALL（SW）	0.14 ± 0.10 (0.24 ± 0.22)	0.09 ± 0.07 (0.16 ± 0.17)	0.03 ± 0.03 (0.06 ± 0.07)	0.10 ± 0.10 (0.17 ± 0.19)
C^{6+}/C^{5+} [c]	CH（太阳风）	0.48 ± 0.30 (0.65 ± 0.42)	0.49 ± 0.35 (0.65 ± 0.57)	0.27 ± 0.16 (0.42 ± 0.43)	0.45 ± 0.32 (0.60 ± 0.52)
	AR（太阳风）	0.85 ± 0.55 (1.13 ± 0.87)	0.74 ± 0.42 (0.96 ± 0.77)	0.47 ± 0.34 (0.53 ± 0.54)	0.79 ± 0.52 (1.02 ± 0.83)
	QS（SW）	0.58 ± 0.29 (0.91 ± 0.52)	0.77 ± 0.43 (1.05 ± 0.68)	0.27 ± 0.16 (0.57 ± 0.42)	0.46 ± 0.33 (0.78 ± 0.55)
	全部（太阳风）	0.75 ± 0.51（0.99 ± 0.78）	0.60 ± 0.41 (0.79 ± 0.68)	0.32 ± 0.23 (0.50 ± 0.46)	0.61 ± 0.46（0.81 ± 0.71）
C^{6+}/C^{4+} [c]	CH（SW）	1.28 ± 0.99 (2.08 ± 1.72)	1.35 ± 1.30 (2.12 ± 2.38)	0.40 ± 0.34 (0.95 ± 1.33)	1.16 ± 1.16 (1.87 ± 2.10)
	AR（SW）	2.62 ± 1.97 (4.28 ± 4.43)	2.20 ± 1.49 (3.69 ± 5.91)	1.08 ± 0.92 (1.30 ± 1.68)	2.38 ± 1.84 (3.80 ± 4.83)
	QS（SW）	1.78 ± 1.13 (3.18 ± 2.16)	2.24 ± 1.68 (3.47 ± 2.93)	0.38 ± 0.28 (1.23 ± 1.39)	1.15 ± 1.23 (2.34 ± 2.30)
	全部（太阳风）	2.25 ± 1.81 (3.62 ± 3.83)	1.72 ± 1.46 (2.80 ± 4.09)	0.54 ± 0.59 (1.13 ± 1.44)	1.74 ± 1.65 (2.79 ± 3.70)
第一电离势偏差（铁/氧）[d]	CH（SW）	2.06 ± 0.71 (2.40 ± 0.90)	1.93 ± 0.59 (2.04 ± 0.97)	1.62 ± 0.38 (1.96 ± 1.05)	1.91 ± 0.61 (2.11 ± 0.99)
	AR（SW）	2.85 ± 1.13 (2.86 ± 1.43)	2.32 ± 1.23 (2.39 ± 1.45)	1.62 ± 0.49 (1.86 ± 0.75)	2.61 ± 1.18 (2.61 ± 1.42)
	QS（SW）	2.12 ± 0.75 (2.16 ± 0.84)	2.22 ± 0.48（2.29 ± 0.76）	1.68 ± 0.43（1.71 ± 0.66）	1.92 ± 0.61（1.98 ± 0.79）
	全部（太阳风）	2.60 ± 1.08（2.66 ± 1.29）	2.09 ± 0.88（2.18 ± 1.16）	1.65 ± 0.43（1.84 ± 0.86）	2.25 ± 0.99 (2.31 ± 1.20)
FIP偏差 (Mg/O) [e]	CH（SW）	1.55 ± 0.33 (1.72 ± 0.44)	1.50 ± 0.29 (1.54 ± 0.38)	1.44 ± 0.30 (1.43 ± 0.38)	1.50 ± 0.30 (1.56 ± 0.41)
	活动区（太阳风）	2.18 ± 0.51 (2.30 ± 0.78)	1.96 ± 0.86 (2.05 ± 0.94)	1.48 ± 0.36 (1.48 ± 0.43)	2.06 ± 0.63 (2.14 ± 0.84)
	QS（SW）	1.57 ± 0.35 (1.71 ± 0.55)	1.69 ± 0.35 (1.89 ± 0.61)	1.29 ± 0.20 (1.51 ± 0.57)	1.45 ± 0.33 (1.65 ± 0.59)
	ALL（SW）	1.98 ± 0.54 (2.09 ± 0.74)	1.68 ± 0.60 (1.75 ± 0.70)	1.38 ± 0.29 (1.47 ± 0.47)	1.76 ± 0.57 (1.83 ± 0.72)
A_{He} [%]	CH（SW）	3.84 ± 1.53 (3.48 ± 1.57)	3.23 ± 1.55 (3.19 ± 1.72)	2.22 ± 1.01 (2.34 ± 1.26)	3.27 ± 1.56 (3.10 ± 1.65)
	AR（SW）	3.23 ± 2.13 (3.71 ± 2.63)	2.42 ± 1.50 (3.17 ± 2.53)	2.71 ± 1.25 (2.98 ± 1.48)	2.95 ± 1.93 (3.46 ± 2.51)
	QS（SW）	3.53 ± 1.20 (3.53 ± 1.21)	3.24 ± 1.19（3.68 ± 2.39）	2.61 ± 1.43（2.67 ± 1.44）	3.01 ± 1.38（3.17 ± 1.68）
	全部（太阳风）	3.41 ± 1.92（3.62 ± 2.24）	2.97 ± 1.55（3.23 ± 2.08）	2.53 ± 1.31（2.61 ± 1.40）	3.08 ± 1.72（3.26 ± 2.06）
磁场强度 (nT)	CH（SW）	9.36 ± 2.60（7.84 ± 2.67）	8.71 ± 2.77（8.05 ± 3.14）	9.64 ± 4.26（6.44 ± 3.18）	9.04 ± 3.07（7.66 ± 3.12）
	AR（SW）	8.97 ± 3.80（8.33 ± 4.00）	9.12 ± 4.06 (7.65 ± 4.78)	7.36 ± 2.46 (6.42 ± 2.47)	8.85 ± 3.80 (7.92 ± 4.18)
	宁静太阳（太阳风）	8.27 ± 2.58（7.18 ± 2.95）	8.24 ± 2.85 (6.26 ± 2.43)	6.75 ± 1.59 (5.20 ± 2.25)	7.50 ± 2.32 (6.01 ± 2.66)
	ALL（SW）	8.96 ± 3.48 (8.07 ± 3.63)	8.82 ± 3.31 (7.72 ± 3.79)	7.78 ± 3.13 (5.94 ± 2.76)	8.69 ± 3.39 (7.48 ± 3.62)
质子温度 (10^5K)	CH（SW）	1.51 ± 0.77 (1.28 ± 0.76)	1.55 ± 0.81 (1.46 ± 0.83)	1.61 ± 0.70 (1.51 ± 0.82)	1.55 ± 0.78 (1.43 ± 0.82)
	AR（SW）	1.22 ± 0.68（1.09 ± 0.81）	1.46 ± 1.07（1.49 ± 1.18）	1.49 ± 0.76（1.54 ± 0.88）	1.30 ± 0.82（1.26 ± 0.97）
	QS（SW）	1.25 ± 0.50 (1.16 ± 0.53)	1.03 ± 0.45 (1.12 ± 0.66)	1.49 ± 0.72 (1.01 ± 0.63)	1.33 ± 0.64 (1.08 ± 0.61)
	全部（太阳风）	1.28 ± 0.69（1.14 ± 0.77）	1.47 ± 0.90 (1.44 ± 0.97)	1.52 ± 0.73 (1.32 ± 0.80)	1.39 ± 0.79 (1.30 ± 0.87)
质子数密度 (n/cc)	冕洞（太阳风）	9.67 ± 4.69（9.30 ± 6.70）	7.91 ± 4.22（8.42 ± 6.32）	9.52 ± 2.62（10.25 ± 8.61）	8.56 ± 4.32（8.81 ± 6.68）
	AR（太阳风）	8.13 ± 8.85（9.02 ± 8.71）	8.42 ± 12.01 (6.24 ± 5.94)	5.71 ± 2.32 (7.39 ± 9.31)	8.06 ± 9.60 (8.11 ± 8.10)
	宁静太阳（SW）	7.89 ± 4.31 (8.37 ± 6.44)	8.20 ± 3.36 (6.53 ± 3.41)	6.12 ± 3.11 (7.09 ± 5.25)	7.47 ± 3.87 (7.52 ± 5.48)
	全部（太阳风）	8.40 ± 7.77 (9.00 ± 8.08)	8.12 ± 7.92 (7.44 ± 6.05)	7.11 ± 3.21 (8.43 ± 8.01)	8.16 ± 7.51 (8.28 ± 7.31)
速度 (km s $^{-1}$)	CH（SW）	453 ± 71 (457 ± 88)	493 ± 86 (505 ± 99)	475 ± 95 (491 ± 122)	480 ± 86 (491 ± 104)
	AR（SW）	434 ± 62 (432 ± 79)	475 ± 89 (484 ± 104)	486 ± 83 (506 ± 96)	449 ± 75 (456 ± 94)
	QS（SW）	438 ± 41 (440 ± 63)	421 ± 49 (434 ± 69)	485 ± 62 (452 ± 76)	459 ± 60 (445 ± 71)
	ALL（SW）	438 ± 62 (438 ± 80)	481 ± 87 (492 ± 101)	482 ± 78 (479 ± 103)	461 ± 78 (468 ± 97)
膨胀速度 [f] (千米 s^{-1})	CH	-0.03 ± 9.80	-0.85 ± 9.64	-0.49 ± 8.89	-0.58 ± 9.55
	AR	0.50 ± 9.84	-0.94 ± 9.57	-0.62 ± 9.53	-0.06 ± 9.74
	QS	0.26 ± 9.56	-0.82 ± 8.67	-2.72 ± 10.41	-0.94 ± 9.50
	ALL	0.34 ± 9.78	-0.87 ± 9.46	-1.30 ± 9.58	-0.42 ± 9.63
相关系数 速度与 O^{7+}/O^{6+} 之间	CH（SW）	-0.61 (-0.60)	-0.67 (-0.60)	-0.59 (-0.67)	-0.58 (-0.57)
	AR（SW）	-0.45 (-0.20)	-0.43 (-0.32)	-0.82 (-0.74)	-0.49 (-0.32)
	QS（SW）	-0.21 (-0.46)	-0.60 (-0.64)	-0.54 (-0.55)	-0.48 (-0.45)
	全部（太阳风）	-0.45 (-0.29)	-0.58 (-0.49)	-0.58 (-0.64)	-0.51 (-0.41)

a 太阳风磁通绳的平均持续时间。b 太阳风磁通绳的背景太阳风。c O^{7+}/O^{6+} (C^{6+}/C^{5+}, C^{6+}/C^{4+})表示O^{7+} 与O^{6+} (C^{6+} 与C^{5+}、C^{6+} 与C^{4+})之间的密度比，表中所列数值为太阳风磁通绳和背景太阳风中各参数的平均值和标准差。d FIP偏差由原位测得的Fe/O与其对应的光球值0.065（Asplund等（2009））之比得出。e FIP偏差由原位测得的Mg/O与其对应的光球值0.081（Asplund等（2009））之比得出。f 太阳风磁通绳的膨胀速度由太阳风磁通绳前缘和后缘之间速度差的一半计算得出（Yu等（2016）；Hu等（2018））。

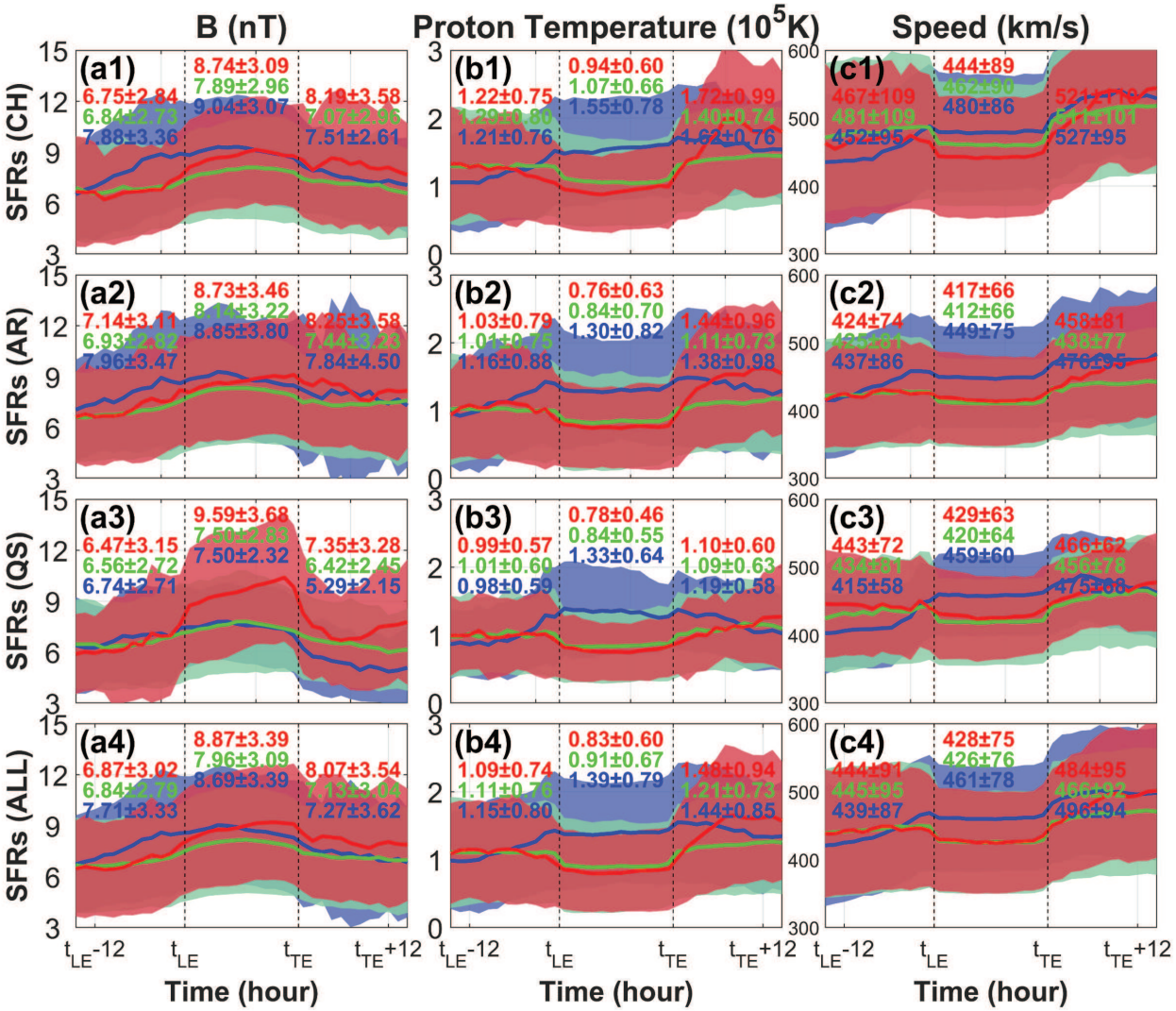


图3。从左至右依次显示高温SFR、低温SFR、正常SFR及其相关背景太阳风的磁场强度、质子温度和速度。从上至下依次展示冕洞、活动区和宁静太阳太阳风中的SFR，以及总体SFR。每个SFR的持续时间均归一化为12小时，与SFR前后背景太阳风的持续时间相同。SFR的前缘（LE）和后缘（TE）以垂直虚线标示。红色、蓝色和绿色分别代表高温SFR、低温SFR和正常SFR。实线表示平均值，阴影区域表示1σ标准差。每个面板还给出了高温SFR、低温SFR、正常SFR及其相关背景太阳风中的平均值。

图 3 右侧面板中一个显著特征是，在三种类型的太阳风中，低温SFR的速度均高于高温SFR和正常SFR。高温SFR和正常SFR的速度几乎相同。在冕洞、活动区、宁静太阳以及整体太阳风中，高温SFR（低温SFR）和正常SFR的速度分别为 444± 89 (480 ± 86) 和 462 ± 90, 417 ± 66 (449 ± 75) 和 412 ± 66, 429 ± 63 (459 ± 60) 和 420 ± 64, 以及 428± 75 和 (461 ± 78) 和 426 ± 76 千米/秒$^{-1}$，分别。从统计上看，浸没在三种类型太阳风中的高温SFR、低温SFR和正常SFR均未显著膨胀。膨胀速度都接近于零（参见表 2 至 4中的膨胀速度）。

图中展示了高温SFR、低温SFR、正常SFR及其相关背景太阳风的成分特征，见图4。左侧各面板展示了 O^{7+}/O^{6+} 。高温SFR、低温SFR、正常SFR及其背景太阳风中的 O^{7+}/O^{6+}有两个显著特征。首先，高温SFR（低温SFR）中的 O^{7+}/O^{6+} 显著高于（低于）正常SFR中的相应数值。高温SFR（低温SFR）中的 O^{7+}/O^{6+}

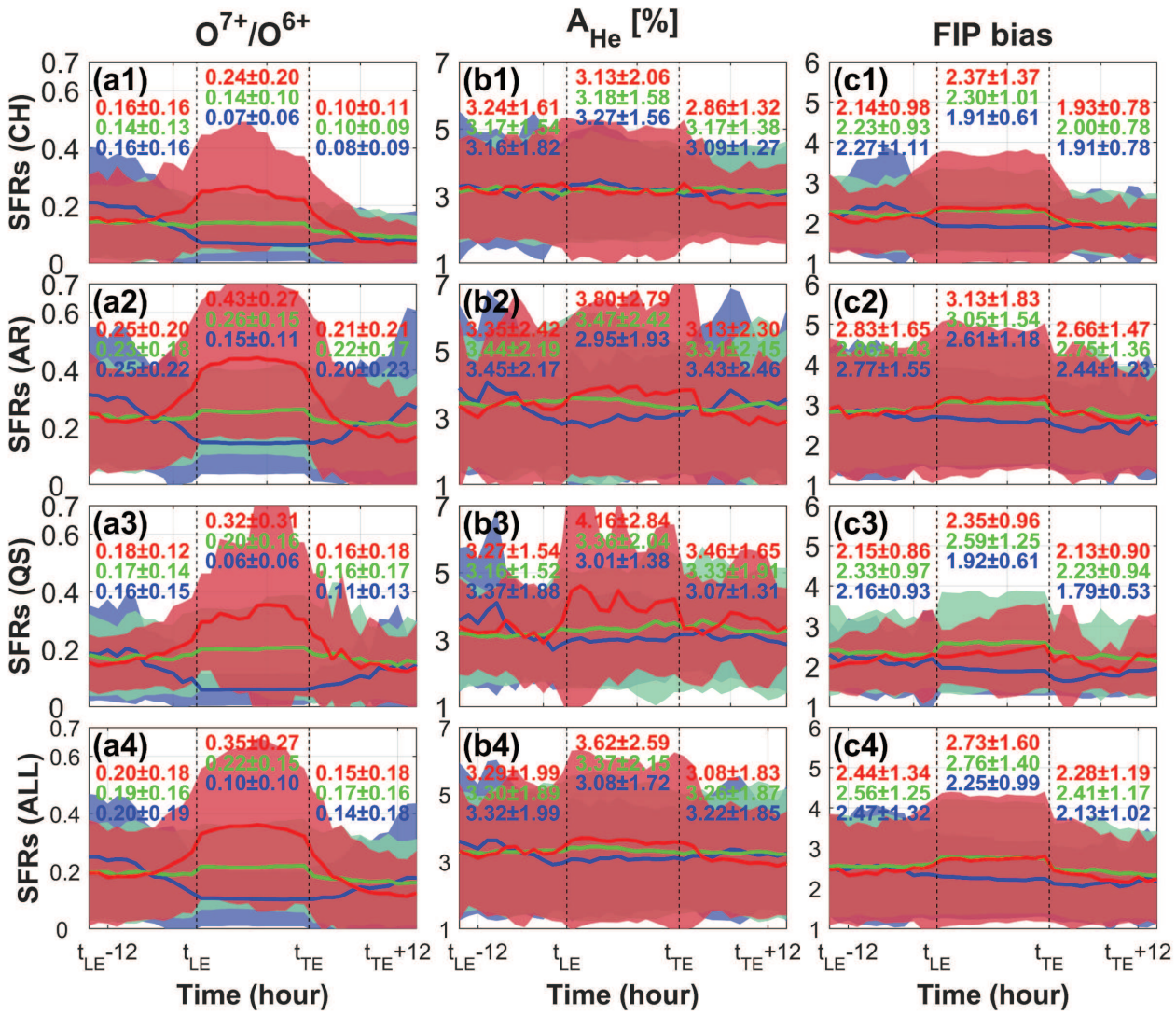


图 4. 高温SFR、低温SFR、正常SFR及其相关背景太阳风中的成分特征。从左至右依次展示 O^{7+}/O^{6+}、氦丰度和 FIP偏差（根据铁氧比 Fe/O 得出）。从上至下依次展示冕洞、活动区和宁静太阳风中的SFR，以及所有SFR的整体情况。每个SFR的持续时间均归一化为 12 小时，这与SFR前后背景太阳风的持续时间相同。SFR的前缘（LE）和后缘（TE）用竖直虚线标出。红色、蓝色和绿色分别代表高温SFR、低温SFR和正常SFR。实线表示平均值，阴影区域表示 1σ 标准差。每个面板还给出了高温SFR、低温SFR、正常SFR及其相关背景太阳风中的平均值。

约比正常SFR中的数值高（低）60%。浸没于冕洞、活动区、宁静太阳以及整体太阳风中的高温SFR（低温SFR）和正常SFR，其 O^{7+}/O^{6+} 分别为 0.24 ± 0.20（0.07 ± 0.06）和 0.14 ± 0.10、0.43 ±0.27（0.15 ± 0.11）和 0.26 ± 0.15、0.32 ± 0.31（0.06 ± 0.06）和 0.20 ± 0.16，以及 0.35 ± 0.27（0.10 ± 0.10）和 0.22 ± 0.15。其次，高温SFR（低温SFR）中的 O^{7+}/O^{6+} 显著高于（低于）背景太阳风中的相应数值（图4左侧各面板中的红线和蓝线）。与此同时，正常SFR中的 O^{7+}/O^{6+} 约比相关背景太阳风高 10%–20%（图4左侧各面板中的绿线）。高温SFR（低温SFR）的 O^{7+}/O^{6+} 约比背景太阳风高 100%（低 50%）。高温SFR（低温SFR）与背景太阳风之间的 O^{7+}/O^{6+} 差异远高于筛选高温SFR（低温SFR）所用的阈值（30%）。A_{He} 的特征展示于图4中间列。总体而言，高温SFR（低温SFR）中的 A_{He} 最高（最低），正常SFR中的 A_{He} 则介于两者之间。高温SFR（低温SFR）中的 A_{He} 比背景太阳风中的相应数值高（低）约 10%–20%

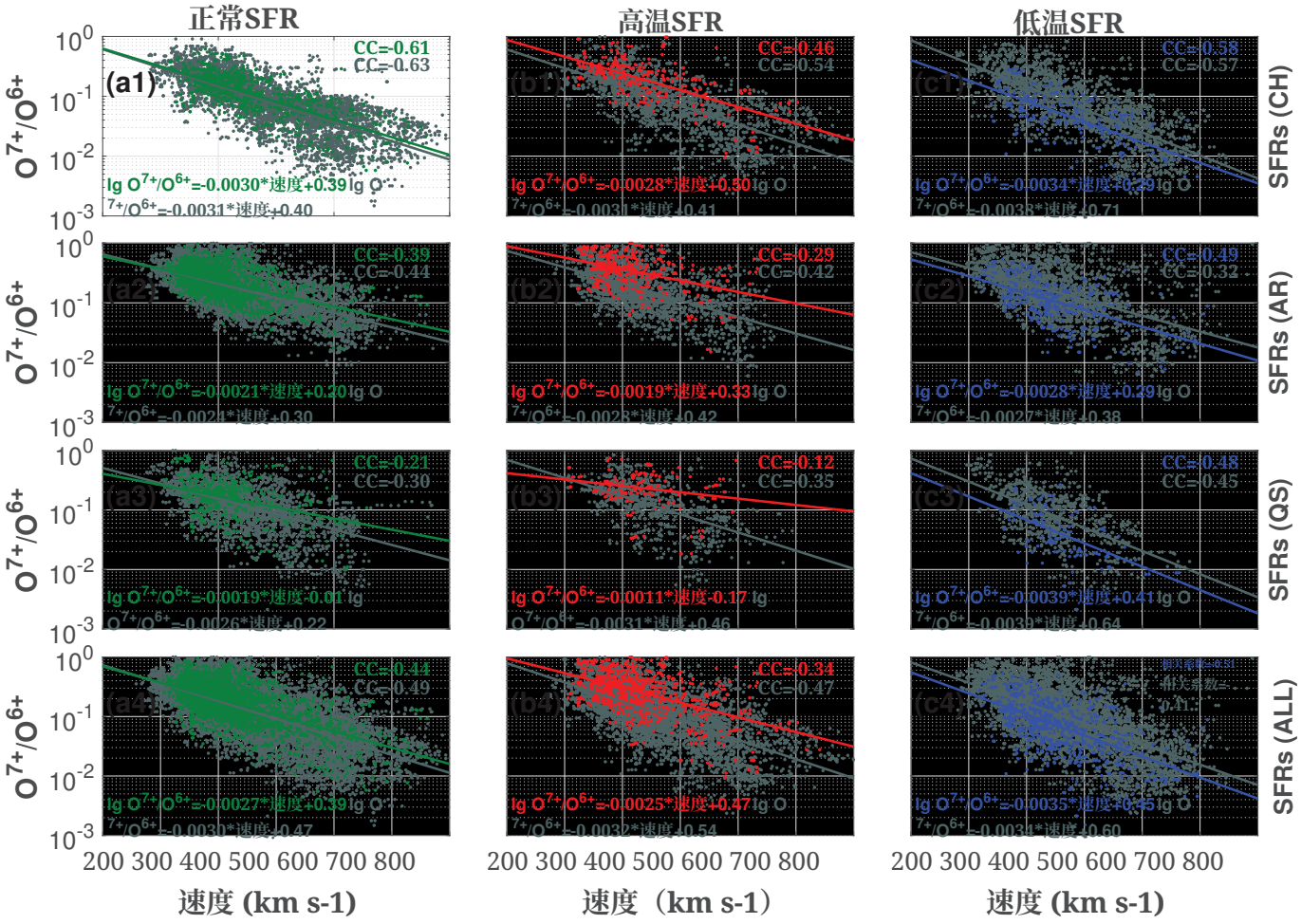


图5. 冕洞、活动区、宁静太阳以及整体太阳风中的正常SFR（左图）、高温SFR（中图）和低温SFR（右图）的速度与 O^{7+}/O^{6+} 空间分布（从上到下）。绿色、红色和蓝色分别代表正常SFR、高温SFR和低温SFR。此外，还列出了高温SFR、低温SFR和正常SFR的背景太阳风分布（灰色）以供比较。每个面板中还给出了速度与 O^{7+}/O^{6+} 之间的相关系数和线性拟合结果。

太阳风。正常SFR内部与其背景太阳风中的 A_{He} 几乎相同（图4中间面板的绿色线）。高温SFR（低温SFR）的 A_{He} 分布范围也比正常SFR更宽（更窄）（见图4中间面板的阴影区域）。图4所示的FIP偏差由铁氧比得出。统计结果表明，在三种太阳风中，低温SFR的FIP偏差（分布范围）均低于（窄于）高温SFR和正常SFR（图4右侧面板）。冕洞、活动区、宁静太阳以及整体太阳风中高温SFR（低温SFR）和正常SFR内部的FIP偏差分别为 2.37 ± 1.37（1.91 ± 0.61）和 2.30 ± 1.01、3.13 ± 1.83（2.61 ± 1.18）和 3.05 ± 1.54、2.35 ± 0.96（1.92 ± 0.61）和 2.59 ±1.25，以及 2.73 ± 1.60 （ 2.25 ± 0.99 ）和 2.76 ± 1.40。冕洞、活动区和宁静太阳风中高温 SFR （低温 SFR ）的分布范围分别约为 1.0-3.8（1.3-2.5）、1.3-5.0（1.5-4.8）和 1.4-3.3（1.3-2.5）。由Mg/O得出的FIP偏差特征与由铁氧比得出的几乎相同（见表1至表4）。

高温SFR、低温SFR、正常SFR及其 $^{7+}/O^{6+}$ 相关背景太阳风在速度与 O^{7+}/O^{6+} 空间中的分布特征也得到了研究。正常SFR、高温SFR和低温SFR分别处于冕洞、活动区和宁静太阳风中的分布，展示于图5的左列、中列和右列中。背景太阳风中的速度与 O^{7+}/O^{6+} 之间存在显著的反相关关系。正常SFR的相关系数和线性拟合结果与其相关背景太阳风的结果相似（图5的左列）。正常SFR（背景太阳风）处于冕洞、活动区、宁静太阳风以及整体太阳风中的相关系数分别为−0.61（−0.63）、−0.39（−0.44）、−0.21（−0.30）和−0.44（−0.49）。正常SFR（背景

表4。冕洞、活动区和宁静太阳风中正常SFR和背景的参数

		MAX	DEC	MIN	总计
SFR数量	CH	141	205	40	386
	AR	486	180	21	687
	QS	118	96	25	239
	ALL	745	481	86	1312
持续时间（小时）[a]	CH	1.88 ± 1.20	1.91 ± 1.09	2.05 ± 1.66	1.91 ± 1.20
	AR	2.23 ± 1.56	2.18 ± 1.51	1.43 ± 0.81	2.20 ± 1.53
	QS	2.05 ± 1.30	1.99 ± 1.29	2.44 ± 2.45	2.07 ± 1.45
	ALL	2.14 ± 1.46	2.02 ± 1.31	2.01 ± 1.81	2.09 ± 1.43
O^{7+}/O^{6+} [c]	CH（SW）[b]	0.16 ± 0.10（0.15 ± 0.12）	0.14 ± 0.10（0.11 ± 0.12）	0.08 ± 0.06 (0.06 ± 0.08)	0.14 ± 0.10 (0.12 ± 0.11)
	AR（SW）	0.27 ± 0.16 (0.25 ± 0.19)	0.22 ± 0.11 (0.19 ± 0.14)	0.12 ± 0.05 (0.12 ± 0.08)	0.26 ± 0.15 (0.23 ± 0.18)
	QS（SW）	0.25 ± 0.20 (0.20 ± 0.19)	0.19 ± 0.09 (0.17 ± 0.13)	0.06 ± 0.04 (0.05 ± 0.05)	0.20 ± 0.16 (0.17 ± 0.16)
	ALL（SW）	0.25 ± 0.17 (0.22 ± 0.19)	0.18 ± 0.11 (0.15 ± 0.13)	0.08 ± 0.06 (0.07 ± 0.08)	0.22 ± 0.15 (0.18 ± 0.17)
C^{6+}/C^{5+} [c]	CH（SW）	0.87 ± 0.43 (0.81 ± 0.51)	0.74 ± 0.48 (0.65 ± 0.53)	0.54 ± 0.34 (0.45 ± 0.41)	0.76 ± 0.46 (0.68 ± 0.52)
	AR（SW）	1.21 ± 0.76 (1.11 ± 0.74)	1.24 ± 0.67 (1.04 ± 0.63)	0.98 ± 0.41 (0.83 ± 0.51)	1.21 ± 0.73 (1.08 ± 0.71)
	宁静太阳（太阳风）	1.15 ± 0.65 (1.08 ± 0.84)	1.12 ± 0.51 (1.01 ± 0.62)	0.55 ± 0.29 (0.51 ± 0.37)	1.06 ± 0.59 (0.96 ± 0.72)
	全部（太阳风）	1.14 ± 0.71 (1.04 ± 0.73)	1.01 ± 0.61 (0.85 ± 0.62)	0.62 ± 0.37 (0.54 ± 0.45)	1.06 ± 0.67 (1.92 ± 0.69)
C^{6+}/C^{4+} [c]	CH（SW）	2.99 ± 2.00 (2.74 ± 2.23)	2.47 ± 2.16 (2.18 ± 2.46)	1.19 ± 0.96 (1.08 ± 1.36)	2.51 ± 2.07 (2.25 ± 2.33)
	AR（SW）	4.49 ± 3.63 (4.03 ± 3.73)	4.63 ± 4.73 (3.65 ± 3.19)	2.38 ± 1.08 (2.38 ± 1.86)	4.49 ± 3.92 (3.88 ± 3.56)
	QS（SW）	4.26 ± 3.32 (3.74 ± 3.08)	3.89 ± 2.13 (3.40 ± 2.95)	1.20 ± 0.90 (1.13 ± 1.34)	3.74 ± 2.86 (3.21 ± 2.96)
	ALL（SW）	4.21 ± 3.41 (3.71 ± 3.42)	3.61 ± 3.55 (2.89 ± 2.95)	1.40 ± 1.05 (1.35 ± 1.55)	3.82 ± 3.43（3.20 ± 3.20）
第一电离势偏差（铁/氧）[d]	冕洞（太阳风）	2.50 ± 0.98（2.31 ± 0.92）	2.24 ± 1.06（2.02 ± 0.82）	1.96 ± 0.73（1.84 ± 0.72）	2.30 ± 1.01（2.10 ± 0.86）
	活动区（太阳风）	3.09 ± 1.61 (2.89 ± 1.45)	2.93 ± 1.35 (2.58 ± 1.25)	2.81 ± 1.10 (2.34 ± 0.97)	3.05 ± 1.54（2.79 ± 1.40）
	QS（SW）	2.86 ± 1.57 (2.50 ± 1.05)	2.41 ± 0.77 (2.17 ± 0.75)	2.06 ± 0.67 (1.79 ± 0.90)	2.59 ± 1.25 (2.26 ± 0.95)
	全部（太阳风）	2.96 ± 1.53 (2.71 ± 1.33)	2.55 ± 1.18 (2.24 ± 1.02)	2.14 ± 0.84（1.91 ± 0.87）	2.76 ± 1.40（2.46 ± 1.22）
FIP偏差（Mg/O） [e]	CH（SW）	1.78 ± 0.43（1.74 ± 0.48）	1.59 ± 0.42（1.57 ± 0.47）	1.44 ± 0.25 (1.44 ± 0.39)	1.64 ± 0.43 (1.61 ± 0.48)
	AR（SW）	2.26 ± 0.63 (2.21 ± 0.66)	2.23 ± 0.86 (2.04 ± 0.75)	1.86 ± 0.53 (1.90 ± 0.48)	2.25 ± 0.70（2.15 ± 0.69）
	QS（SW）	2.02 ± 0.65（1.85 ± 0.55）	1.88 ± 0.60（1.74 ± 0.46）	1.55 ± 0.38（1.52 ± 0.56）	1.91 ± 0.62（1.76 ± 0.53）
	全部（太阳风）	2.14 ± 0.63 (2.06 ± 0.65)	1.90 ± 0.72 (1.76 ± 0.62)	1.55 ± 0.39 (1.55 ± 0.50)	2.02 ± 0.67 (1.90 ± 0.65)
A_{He} [%]	CH（SW）	3.40 ± 1.57 (3.43 ± 1.52)	3.13 ± 1.61 (3.11 ± 1.56)	2.74 ± 1.35 (2.53 ± 1.21)	3.18 ± 1.58 (3.16 ± 1.54)
	AR（SW）	3.67 ± 2.58 (3.46 ± 2.33)	3.01 ± 1.86 (3.30 ± 2.29)	2.00 ± 1.19 (2.30 ± 1.22)	3.47 ± 2.42 (3.38 ± 2.30)
	QS（SW）	3.62 ± 1.97 (3.43 ± 1.91)	3.34 ± 2.11 (3.34 ± 1.90)	1.84 ± 1.36 (2.21 ± 1.19)	3.36 ± 2.04 (3.23 ± 1.87)
	全部（太阳风）	3.61 ± 2.34 (3.44 ± 2.11)	3.12 ± 1.81 (3.21 ± 1.89)	2.36 ± 1.38 (2.40 ± 1.21)	3.37 ± 2.15（3.27 ± 1.99）
磁场强度 (nT)	CH（SW）	7.79 ± 2.78（7.33 ± 3.21）	8.11 ± 3.17 (7.00 ± 2.89)	7.18 ± 2.27 (5.78 ± 2.42)	7.89 ± 2.96 (6.96 ± 2.99)
	AR（SW）	8.21 ± 3.24（7.25 ± 3.15）	8.05 ± 3.27 (6.94 ± 3.12)	6.91 ± 1.43 (5.18 ± 1.60)	8.14 ± 3.22 (7.10 ± 3.13)
	QS（SW）	7.98 ± 3.17（7.15 ± 2.90）	7.02 ± 2.42 (6.04 ± 2.29)	7.04 ± 2.15 (5.22 ± 2.08)	7.50 ± 2.83 (6.40 ± 2.65)
	ALL（SW）	8.10 ± 3.16 (7.24 ± 3.14)	7.87 ± 3.11 (6.80 ± 2.90)	7.08 ± 2.09 (5.47 ± 2.21)	7.96 ± 3.09 (6.92 ± 3.02)
质子温度 (10^5K)	CH（SW）	1.02 ± 0.68 (1.22 ± 0.77)	1.07 ± 0.63 (1.44 ± 0.82)	1.24 ± 0.67 (1.55 ± 0.80)	1.07 ± 0.66 (1.38 ± 0.81)
	AR（SW）	0.81 ± 0.57 (1.05 ± 0.77)	0.94 ± 0.99 (1.16 ± 0.86)	0.79 ± 0.54 (1.00 ± 0.62)	0.84 ± 0.70 (1.08 ± 0.79)
	QS（SW）	0.88 ± 0.61 (1.01 ± 0.61)	0.80 ± 0.47 (1.09 ± 0.64)	0.86 ± 0.52 (1.14 ± 0.61)	0.84 ± 0.55 (1.06 ± 0.62)
	全部（太阳风）	0.86 ± 0.60 (1.08 ± 0.76)	0.97 ± 0.77 (1.29 ± 0.82)	1.03 ± 0.64 (1.28 ± 0.74)	0.91 ± 0.67 (1.18 ± 0.79)
质子数密度 (n/cc)	CH（SW）	8.56 ± 6.41 (8.13 ± 6.99)	8.58 ± 8.10 (6.73 ± 5.33)	9.79 ± 9.22 (7.11 ± 4.85)	8.65 ± 7.59 (7.28 ± 6.02)
	AR（SW）	8.17 ± 7.04 (7.47 ± 6.86)	7.59 ± 5.53 (6.24 ± 5.40)	8.44 ± 4.26 (6.92 ± 4.27)	8.03 ± 6.67 (7.14 ± 6.50)
	QS（SW）	8.23 ± 7.64 (7.79 ± 6.78)	8.03 ± 6.14 (6.72 ± 4.79)	20.81 ± 12.75 (7.40 ± 5.29)	8.55 ± 7.60 (7.32 ± 6.00)
	ALL（SW）	8.24 ± 7.03 (7.53 ± 6.70)	8.09 ± 6.84 (6.57 ± 5.32)	11.20 ± 9.87 (7.01 ± 4.79)	8.28 ± 7.10 (7.14 ± 6.16)
速度 (km s $^{-1}$)	CH（SW）	440 ± 85 (465 ± 101)	475 ± 92 (518 ± 107)	468 ± 84 (496 ± 112)	462 ± 90 (498 ± 108)
	AR（SW）	406 ± 58 (426 ± 77)	427 ± 82 (450 ± 94)	416 ± 65 (449 ± 92)	412 ± 66 (433 ± 83)
	QS（SW）	418 ± 66 (439 ± 75)	423 ± 61 (449 ± 84)	419 ± 64 (459 ± 89)	420 ± 64 (446 ± 82)
	ALL（SW）	413 ± 66 (437 ± 85)	446 ± 86 (483 ± 105)	441 ± 78 (476 ± 103)	426 ± 76 (458 ± 97)
膨胀速度 [f] (km s^{-1})	CH	0.69 ± 9.20	-0.64 ± 10.07	-0.98 ± 9.15	-0.43 ± 9.73
	AR	0.09 ± 9.32	-0.40 ± 8.76	-0.01 ± 8.09	-0.11 ± 9.03
	QS	-0.21 ± 9.03	-1.00 ± 8.41	-3.27 ± 9.65	-1.30 ± 8.95
	ALL	0.17 ± 9.24	-0.61 ± 9.33	-1.51 ± 9.17	-0.45 ± 9.28
相关系数 速度与 O^{7+}/O^{6+} 之间	CH（SW）	-0.58 (-0.62)	-0.64 (-0.63)	-0.62 (-0.70)	-0.61 (-0.63)
	AR（SW）	-0.41 (-0.43)	-0.35 (-0.47)	-0.68 (-0.65)	-0.39 (-0.44)
	QS（SW）	-0.20 (-0.19)	-0.27 (-0.44)	-0.55 (-0.60)	-0.21 (-0.30)
	ALL（SW）	-0.40 (-0.43)	-0.51（-0.57）	-0.57（-0.66）	-0.44（-0.49）

a 太阳风磁通绳的平均持续时间。b 太阳风磁通绳的背景太阳风。c O^{7+}/O^{6+} （C^{6+}/C^{5+}、C^{6+}/C^{4+}）表示O^{7+} 与O^{6+} （C^{6+} 与C^{5+}、C^{6+} 与C^{4+}）之间的密度比，表中给出的数值分别为太阳风磁通绳内部参数和背景太阳风参数的平均值及标准差。d FIP偏差由原位探测得到的Fe/O与其相应光球值0.065（Asplund等（2009））之间的比值推导得出。e FIP偏差由原位探测得到的Mg/O与其相应光球值0.081（Asplund等（2009））之间的比值推导得出。f 太阳风磁通绳的膨胀速度由太阳风磁通绳前缘和后缘之间的速度差的一半推导得出（Yu等（2016）；Hu等（2018））。

太阳风）分别为-0.0030（-0.0031）和0.39（0.40）、-0.0021（-0.0024）和0.20（0.30）、-0.0019（-0.0026）和-0.01（0.22），以及-0.0027（-0.0030）和0.39（0.47）。高温SFR的分布特征不同于其相关背景太阳风。高温SFR的相关系数低于正常SFR和背景太阳风。此外，高温SFR的斜率和截距也不同于正常SFR和背景太阳风。高温SFR（背景太阳风）中速度与O^{7+}/O^{6+} 在冕洞、活动区、宁静太阳以及整体太阳风中的相关系数分别为-0.46（-0.54）、-0.29（-0.42）、-0.12（-0.35）和-0.34（-0.47）。高温SFR（背景太阳风）的斜率和截距分别为-0.0028（-0.0031）和0.50（0.41）、-0.0019（-0.0028）和0.33（0.42）、-0.0011（-0.0031）和-0.17（0.46），以及-0.0025（-0.0032）和0.47（0.54）。低温SFR的相关系数和斜率与其相关背景太阳风的几乎相同（图5右栏）。不同之处在于，在三种类型的太阳风中，低温SFR的截距均低于背景太阳风的截距。这与低温SFR内部的O^{7+}/O^{6+} 低于背景太阳风中的O是一致的。低温SFR（背景太阳风）在冕洞、活动区、宁静太阳以及整体太阳风中的相关系数分别为-0.58（-0.57）、-0.49（-0.32）、-0.48（-0.45）和-0.51（-0.41）。低温SFR（背景太阳风）在冕洞、活动区、宁静太阳以及整体太阳风中的斜率和截距分别为-0.0034（-0.0038）和0.29（0.71）、-0.0028（-0.0027）和0.29（0.38）、-0.0039（-0.0039）和0.41（0.64），以及-0.0035（-0.0034）和0.45（0.60）。

太阳风速度与 O^{7+}/O^{6+} 之间的反相关性最早由国际日地探险者号的观测发现（Ogilvie等，1989年），随后由尤利西斯号的探测得到证实（Geiss等，1995年；Gloeckler等，2003年）。此外，源自不同源区的太阳风中仍然存在这种反相关性，并且来自冕洞、活动区和宁静太阳区域的太阳风，其斜率和截距几乎相同（Fu等，2017年）。目前主要有两种用于描述太阳风释放、加热和加速过程的太阳风模型，即磁重联环路打开（RLO）模型（Fisk等，1999年；Fisk，2003年；Woo等，2004年）和波动湍流驱动（WTD）模型（Hollweg，1986年；Wang和Sheeley，1991年；Cranmer等，2007年）。以往的统计结果表明，这两种机制均成立（Fu等，2017年，2018年）。太阳风速度与 O^{7+}/O^{6+} 之间的反相关性可以由上述两种主要的太阳风产生机制合理解释（Fu等，2017年）。目前的结果表明，速度与 O^{7+}/O^{6+} 之间的反相关性在太阳风磁通绳内部的等离子体中仍然成立，尤其是对于正常SFR和低温SFR。正常SFR内部等离子体的相关系数、斜率和截距与背景太阳风的相应参数相似。因此，我们认为，在这三类太阳风中，正常SFR内部等离子体的产生机制与其背景的产生机制相同。相比之下，高温SFR中速度与 O^{7+}/O^{6+} 之间的反相关性并不显著。高温SFR的斜率和截距不同于背景太阳风的相应参数。上述结果表明，高温SFR的等离子体产生机制可能与背景太阳风的产生机制并不完全相同。低温SFR的相关系数和斜率与背景太阳风相似（截距则低于背景太阳风），这意味着低温SFR也应源自太阳，并且其源区具有较低的电子温度。

目前的统计结果表明，高温SFR和低温SFR的性质存在显著差异。与正常SFR和背景太阳风相比，它们似乎分别处于两个极端。从统计上看，与正常SFR相比，高温SFR具有更长的持续时间、更低的速度和质子温度、更高的电荷态和氦丰度。与正常SFR和背景太阳风相比，低温SFR通常伴随着更短的持续时间、更高的速度和质子温度，以及更低的电荷态、氦丰度和FIP偏差。高温SFR和低温SFR的共同特征是，它们的磁场强度均高于正常SFR。高温SFR和低温SFR应当源自太阳。因为如果SFR是在日球层中形成的，那么SFR内部的电荷态和元素丰度应与背景太阳风中的几乎相同。不过需要指出的是，SFR与背景太阳风具有相同的性质，并不单单意味着SFR是在日球层中形成的。

高温SFR内部的电子温度应高于源区中的背景温度，因为O^{7+}/O^{6+} 比值代表太阳附近的温度。高温SFR可能有多种起源。首先，高温SFR来自与等离子体团相关的冕流。遥感与原位联合观测表明，SFR也可以在日冕流线尖端释放（Rouillard等，2009年、2010a、b、2011年；Sanchez-Diaz等，2017年、2019年）。上述研究为SFR来自太阳这一观点提供了直接证据。来自冕流的SFR的O^{7+}/O^{6+} 应与背景太阳风的相近或更高，因为冕流的温度高于周围区域（Habbal等，2010年；Boe等，2018年）。此外，冕流中的SFR释放过程通常与磁重联有关。SFR内部的等离子体可能在磁重联过程中被加热。因此，从冕流中释放的SFR内部的O^{7+}/O^{6+} 比值在统计上应高于背景太阳风中的相应比值，

其次，高温SFR可能由太阳上的小尺度活动产生。高温SFR的统计特征可以由这一情景得到合理解释。已知行星际日冕物质抛射内部具有较高电荷态的等离子体会在耀斑过程中被加热（Lepri和Zurbuchen，2004年；Gopalswamy等，2013年；Fu等，2020年；Zhai等，2022年）。高温SFR的加热过程可能与日冕物质抛射相同。因此，高温SFR内部的等离子体可能通过小尺度喷发过程被加热。此外，高温SFR的统计特征在定性上与行星际日冕物质抛射相似。因此，一些高温SFR可能由太阳上的小尺度爆发产生。第三，高温SFR的形成也可能与日球层中的磁侵蚀过程有关。先前研究表明，磁重联可以发生在磁云（Dasso等，2006年、2007年；Ruffenach等，2012年；Janvier等，2014年；Lavraud等，2014年）和SFR（Tian等，2010年）的前部和后部。磁重联可以侵蚀部分磁场，从而减小磁通绳的尺度。因此，SFR也可能是在日球层中传播期间通过磁侵蚀过程产生的。在这一情景下，SFR的性质应与磁云相似。此外，高温SFR内部的A_{He}总体高于背景中的A，表明太阳小尺度活动和磁侵蚀过程可能对高温SFR的形成贡献更大。考虑到流光带太阳风通常表现出较低的A_{He}（Kasper等，2007年、2012年；Suess等，2009年；Fu等，2018）。

低温SFR的形成机制是什么？一种合理的解释是，低温SFR与小型冷暗条或日珥喷发有关。通常，暗条物质在太阳上温度较低，因此其电荷态也较低（Lepri & Zurbuchen 2010年）。此外，考虑到暗条物质来自色球层，暗条的FIP偏差应低于日冕（Song等 2017年）。从定性角度看，低温SFR的性质与上述两个特征（较低的电荷态和FIP偏差）相符。然而，低温SFR的氦丰度可能与暗条中的氦丰度不一致。通常认为，暗条物质来自色球层，因此暗条内部的氦丰度较高。按照这一情景，如果低温SFR与小型暗条或日珥喷发有关，其氦丰度也应较高。不过，我们尚无确凿证据证明暗条物质的来源（Song等 2017年）。暗条物质可能来自具有较高A_{He} (Spicer等 1998年的色球层，和/或来自具有较低A_{He} (D´emoulin 1993年的日冕。因此，低温SFR内部较低的A_{He}并不意味着低温SFR与暗条喷发无关。低温SFR的数量随持续时间增加而减少，这一事实可以用低温SFR与小型冷暗条或日珥喷发有关这一观点来合理解释。此前的统计分析表明，小型暗条喷发的发生率与喷发尺度成反比（Sterling & Moore 2016年；Sterling等 2020年）。磁重联侵蚀也可能促成低温SFR的形成。如果行星际日冕物质抛射中含有大量冷暗条或日珥物质，那么形成的SFR应是具有较低电荷态和FIP偏差的低温SFR。但如图2(b)所示，低温SFR的数量随持续时间增加而减少，这表明磁重联侵蚀过程似乎并非主要成因。

正常SFR的特征可以用两种来源合理解释：既可能来自太阳，也可能在日球层中形成。如果正常SFR来自太阳，并随周围太阳风传播至日球层，那么正常SFR与背景太阳风应具有相同的成分特征。另一方面，不同类型太阳风中正常SFR的特征，也可以用正常SFR在日球层中形成这一观点合理解释。在这种情形下，磁通绳在局部形成，而SFR形成过程中电荷态和元素丰度不会改变。因此，处于冕洞、活动区和宁静太阳太阳风中的正常SFR，其电荷态和元素丰度存在显著差异，但与各自对应的背景太阳风基本相同。

4. 总结与结论

本研究考察了处于冕洞、活动区和宁静太阳太阳风中的SFR。根据SFR内部的O^{7+}/O^{6+}相较于背景太阳风是否明显升高或降低，进一步将SFR分为高温SFR、低温SFR和正常SFR。随后，分析并比较了三种类型太阳风中高温SFR、低温SFR、正常SFR及其对应背景的性质。最后，考察了高温SFR、低温SFR、正常SFR及其对应背景太阳风在速度与O^{7+}/O^{6+}空间中的分布。主要结果总结如下：

1. 浸没在冕洞、活动区和宁静太阳风中的太阳风磁通绳，其性质彼此存在显著差异。在这三种太阳风中，太阳风磁通绳内部的成分参数与其相关背景之间存在细微差异

。在这三种太阳风中，太阳风磁通绳内部的成分特征平均值（如 O^{7+}/O^{6+}、A_{He} 和 FIP偏差）均略高于其相关背景中的对应值（高约 10%）。

2. 高温SFR的比例随持续时间增加而上升，而低温SFR的比例则随之下降。持续时间短于6小时的SFR中，高温SFR约占15%；持续时间长于6小时的SFR中，高温SFR约占30%—40%。持续时间短于3小时的SFR中，低温SFR的比例接近20%；而持续时间为7—9小时的低温SFR中，这一比例则降至约10%。持续时间超过9小时的SFR中没有低温SFR。在CH风中，高温SFR和低温SFR的比例都略高。

3. 高温SFR、低温SFR和正常SFR的性质差异显著。在三种太阳风中，正常SFR的参数与背景几乎相同。统计上，与正常SFR和背景太阳风相比，高温SFR（低温SFR）具有更长（更短）的持续时间、更低（更高）的速度和质子温度、更高（更低）的电荷态、氦丰度和FIP偏差。高温SFR和低温SFR的共同特征是，它们的磁场强度均高于正常SFR。

4. 高温SFR（正常SFR）内部速度与 O^{7+}/O^{6+} 之间的反相关不同于（类似于）背景太阳风中的反相关。正常SFR的相关系数和拟合结果与背景太阳风的几乎相同。高温SFR的相关系数低于正常SFR和背景太阳风的相关系数。此外，高温SFR的斜率和截距也不同于正常SFR和背景太阳风的斜率和截距。低温SFR的相关系数和斜率与其对应的背景太阳风几乎相同，而在三种太阳风中，其截距均低于背景太阳风中的截距。

本研究提供了有关太阳风磁通绳性质的新观测事实。相关结果将有助于阐明太阳风磁通绳的起源和产生机制。结果表明，大多数高温SFR和低温SFR都来自太阳。高温SFR可能来自与等离子体团相关的冕流，和/或由太阳上的小尺度活动产生。低温SFR可能伴随着源区内温度较低物质的小尺度爆发。高温SFR和低温SFR也可能分别由源区内不含或含有冷丝状体或日珥物质的行星际日冕物质抛射发生磁侵蚀而形成。不同类型太阳风中的正常SFR特征，可以由两种起源得到合理解释：一种来自太阳，另一种产生于日球层。

作者非常感谢匿名审稿人提出的极具帮助且富有建设性的意见和建议。我们感谢 ACE SWICS、MAG 和 SWEPAM 仪器团队以及 ACE科学中心提供 ACE数据。本研究得到中国国家自然科学基金委员会（42230203、41974201、U1931105）的资助。

参考文献

Abbo, L., Ofman, L., Antiochos, S. K., et al. 2016, 《空间科学评论》, 201, 55, doi: 10.1007/s11214-016-0264-1Aellig, M. R., Lazarus, A. J., & Steinberg, J. T. 2001, 地球物理学研究快报, 28, 2767, doi: 10.1029/2000GL012771Asplund, M., Grevesse, N., Sauval,A. J., & Scott, P. 2009,ARA& A,47, 481,doi: 10.1146/annurev.astro.46.060407.145222Boe, B., Habbal,S., Druckm¨uller, M., et al. 2018, 《天体物理学杂志》, 859, 155, doi:10.3847/1538-4357/aabfb7Burlaga, L. F. E. 1991年, in 内日球层物理学II, Vol. 21, 1–22, doi: 10.1007/978-3-642-75364-0 1

Cane, H. V., & Richardson, I.G. 2003, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 108, 1156, doi: 10.1029/2002JA009817Cartwright, M. L., & Moldwin, M. B. 2008, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 113, A09105, doi: 10.1029/2008JA013389—. 2010年, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 115, A08102, doi:10.1029/2009JA014271Chen, Y., & Hu, Q. 2020年, 《天体物理学杂志》, 894, 25, doi: 10.3847/1538-4357/ab8294—. 2022 年 , 《天体物理学杂志》 , 924, 43, doi: 10.3847/1538-4357/ac3487

Chen, Y., Hu, Q., & le Roux, J. A. 2019年, 《天体物理学杂志》, 881, 58, doi: 10.3847/1538-4357/ab2ccf Choi, K.-E., Lee, D.-Y., Wang, H.-E., et al. 2021年, 《太阳物理学》, 296, 148, doi: 10.1007/s11207-021-01888-0 Cranmer, S. R., van Ballegooijen, A. A., & Edgar, R. J. 2007年, 《天体物理学杂志增刊》, 171, 520, doi: 10.1086/518001 Dasso, S., Mandrini, C. H., D´emoulin, P., & Luoni, M. L. 2006年, 《天文学与天体物理学》, 455, 349, doi: 10.1051/0004-6361:20064806 Dasso, S., Nakwacki, M. S., D´emoulin, P., & Mandrini, C. H. 2007年, 《太阳物理学》, 244, 115, doi: 10.1007/s11207-007-9034-2 D´emoulin, P. 1993, Advances in Space Research, 13, 95, doi: 10.1016/0273-1177(93)90463-L Feng, H. Q., & Wang, J. M. 2015年, 《天体物理学杂志》, 809, 112, doi: 10.1088/0004-637X/809/2/112 Feng, H. Q., & Wu, D. J. 2009年, 《天体物理学杂志》, 705, 1385, doi: 10.1088/0004-637X/705/2/1385 Feng, H. Q., Wu, D. J., & Chao, J. K. 2007年, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 112, A02102, doi: 10.1029/2006JA011962 Feng, H. Q., Wu, D. J., Lin, C. C., et al. 2008年, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 113, A12105, doi: 10.1029/2008JA013103 Feng, H. Q., Zhao, G. Q., & Wang, J. M. 2015年, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 120, 10,175, doi: 10.1002/2015JA021643 Fisk, L. A. 2003年, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 108, 1157, doi: 10.1029/2002JA009284 Fisk, L. A., Schwadron, N. A., & Zurbuchen, T. H. 1999, 地球物理学研究杂志, 104, 19765, doi: 10.1029/1999JA900256 Fu, H., Harrison, R. A., Davies, J. A., et al. 2020年, 《天体物理学杂志快报》, 900, L18, doi: 10.3847/2041-8213/abb083 Fu, H., Li, B., Li, X., et al. 2015年, 《太阳物理学》, 290, 1399, doi: 10.1007/s11207-015-0689-9 Fu, H., Madjarska, M. S., Li, B., Xia, L., & Huang, Z. 2018年, 《皇家天文学会月刊》, 478, 1884, doi: 10.1093/mnras/sty1211 Fu, H., Madjarska, M. S., Xia, L., et al. 2017年, 《天体物理学杂志》, 836, 169, doi: 10.3847/1538-4357/aa5cba Geiss, J., Gloeckler, G., & von Steiger, R. 1995年, 《空间科学评论》, 72, 49, doi: 10.1007/BF00768753 Gloeckler, G., Zurbuchen, T. H., & Geiss, J. 2003年, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 108, 1158, doi: 10.1029/2002JA009286 Gloeckler, G., Cain, J., Ipavich, F. M., et al. 1998年, 《空间科学评论》, 86, 497, doi: 10.1023/A:1005036131689 Gopalswamy, N., M¨akel¨a, P., Akiyama, S., et al. 2013年, 《太阳物理学》, 284, 17, doi: 10.1007/s11207-012-0215-2 Habbal, S. R., Druckm¨uller, M., Morgan, H., et al. 2010年, 《天体物理学杂志》, 708, 1650, doi: 10.1088/0004-637X/708/2/1650 Hollweg, J. V. 1986, 地球物理学研究杂志, 91, 4111, doi: 10.1029/JA091iA04p04111 Hu, Q. 2017, 《太阳物理学》, 292, 116, doi: 10.1007/s11207-017-1134-z Hu, Q., Linton, M. G., Wood, B. E., Riley, P., & Nieves-Chinchilla, T. 2017, 《太阳物理学》, 292, 171, doi: 10.1007/s11207-017-1195-z Hu, Q., Zheng, J., Chen, Y., le Roux, J., & Zhao, L. 2018, 《天体物理学杂志增刊》, 239, 12, doi: 10.3847/1538-4365/aae57d Huang, J., Liu, Y., Liu, J., & Shen, Y. 2020, 《天体物理学杂志快报》, 899, L29, doi: 10.3847/2041-8213/abac18 Huang, J., Liu, Y. C. M., Peng, J., et al. 2017a, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 122, 6927, doi: 10.1002/2017JA023906 —. 2018, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 123, 7167, doi: 10.1029/2018JA025660 Huang, Z., Madjarska, M. S., Scullion, E. M., et al. 2017b, 《皇家天文学会月刊》, 464, 1753, doi: 10.1093/mnras/stw2469 Ito, H., Tsuneta, S., Shiota, D., Tokumaru,M., & Fujiki, K. 2010年, 《天体物理学杂志》, 719, 131, doi: 10.1088/0004-637X/719/1/131 Janvier, M., D´emoulin, P., & Dasso, S. 2014, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 119, 7088, doi: 10.1002/2014JA020218 Kaiser, M. L., Kucera, T. A., Davila, J. M., et al. 2008年, 《空间科学评论》, 136, 5, doi: 10.1007/s11214-007-9277-0 Kasper, J. C., Stevens, M. L., Korreck, K. E., et al. 2012年, 《天体物理学杂志》, 745, 162, doi: 10.1088/0004-637X/745/2/162 Kasper, J. C., Stevens, M. L., Lazarus, A. J., Steinberg, J. T., & Ogilvie, K. W. 2007年, 《天体物理学杂志》, 660, 901, doi: 10.1086/510842 Lavraud, B., Ruffenach, A., Rouillard, A. P., et al. 2014, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 119, 26, doi: 10.1002/2013JA019154 Lepping, R. P., J ones, J. A., & Burlaga, L. F. 1990, 地球物理学研究杂志, 95, 11957, doi: 10.1029/JA095iA08p11957 Lepri, S. T., & Zurbuchen, T. H. 2004, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 109, A01112, doi: 10.1029/2003JA009954 —. 2010, 《天体物理学杂志快报》, 723, L22, doi: 10.1088/2041-8205/723/1/L22 Liu, Q., Zhao, Y., & Zhao, G. 2021, 物理学前沿, 9, 637, doi: 10.3389/fphy.2021.745152 Manchester, W., Kilpua, E. K. J., Liu, Y. D., et al. 2017, 《空间科学评论》, 212, 1159, doi: 10.1007/s11214-017-0394-0 McComas, D. J., Bame, S. J., Barker, P., et al. 1998年, 《空间科学评论》, 86, 563, doi: 10.1023/A:1005040232597 McComas, D. J., Ebert, R. W., Elliott, H. A., et al. 2008年, 地球物理学研究快报, 35, L18103, doi: 10.1029/2008GL034896

Moldwin, M. B., Ford, S., Lepping, R., Slavin, J., & Szabo, A. 2000, 地球物理学研究快报, 27, 57, doi: 10.1029/1999GL010724Moldwin, M. B., Phillips, J. L., Gosling, J. T., et al. 1995年, 地球物理学研究杂志, 100, 19903, doi: 10.1029/95JA01123Ogilvie, K. W., Coplan, M. A., Bochsler, P., & Geiss, J. 1989, 《太阳物理学》, 124, 167, doi: 10.1007/BF00146526Owens, M. J. 2018, 《太阳物理学》, 293, 122, doi: 10.1007/s11207-018-1343-0Rouillard, A. P., Savani, N. P., Davies, J. A., et al. 2009, 《太阳物理学》, 256, 307, doi:10.1007/s11207-009-9329-6Rouillard, A. P., Davies, J. A., Lavraud, B., et al. 2010a, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 115, A04103, doi:10.1029/2009JA014471Rouillard, A. P., Lavraud, B., Davies, J. A., et al. 2010b, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 115, A04104, doi:10.1029/2009JA014472Rouillard, A. P., Sheeley, N. R., J., Cooper, T. J., et al. 2011, 《天体物理学杂志》, 734, 7, doi: 10.1088/0004-637X/734/1/7Ruffenach, A., Lavraud, B., Owens, M. J., et al. 2012, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 117, A09101, doi:10.1029/2012JA017624Ruffenach, A., Lavraud, B., Farrugia, C. J., et al. 2015, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 120, 43, doi: 10.1002/2014JA020628Sanchez-Diaz, E., Rouillard, A. P., Lavraud, B., Kilpua, E., & Davies, J. A. 2019, 《天体物理学杂志》, 882, 51, doi: 10.3847/1538-4357/ab341cSanchez-Diaz, E., Rouillard, A. P., Davies, J. A., et al. 2017, 《天体物理学杂志快报》, 835, L7, doi: 10.3847/2041-8213/835/1/L7Shi, X., Fu, H., Huang, Z., Ma, C., & Xia, L. 2022年, 《天体物理学杂志》, 940, 103, doi:10.3847/1538-4357/ac9b20Smith, C. W., L' Heureux,J., Ness, N. F., et al. 1998年, 《空间科学评论》, 86, 613, doi: 10.1023/A:1005092216668Song, H., Li, L., Sun, Y., et al. 2021年, 《太阳物理学》, 296, 111, doi: 10.1007/s11207-021-01852-ySong, H. Q., Chen, Y., Li, B., et al. 2017a, 《天体物理学杂志快报》, 836, L11, doi: 10.3847/2041-8213/aa5d54Spicer, D. S., Feldman, U., Widing, K. G., & Rilee, M. 1998年, 《天体物理学杂志》, 494, 450, doi: 10.1086/305203Sterling, A. C., & Moore, R. L. 2016, 《天体物理学杂志快报》, 828, L9, doi: 10.3847/2041-8205/828/1/L9

Sterling, A. C., Moore, R. L., Panesar, N. K., et al. 2020年, 《天体物理学杂志》, 889, 187, doi: 10.3847/1538-4357/ab5dccStone, E. C., Frandsen, A. M., Mewaldt, R. A., et al. 1998年, 《空间科学评论》, 86, 1, doi: 10.1023/A:1005082526237Suess, S. T., Ko, Y. K., von Steiger, R., & Moore, R. L. 2009年, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 114, A04103, doi:10.1029/2008JA013704Tian, H., Yao, S., Zong, Q., He, J., & Qi, Y. 2010年, 《天体物理学杂志》, 720, 454, doi:10.1088/0004-637X/720/1/454Wang, Y. M., & Sheeley, N. R., J. 1991年, 《天体物理学杂志快报》, 372, L45, doi: 10.1086/186020Wiegelmann, T., & Solanki, S. K. 2004年, 《太阳物理学》, 225, 227, doi: 10.1007/s11207-004-3747-2Wiegelmann, T., Thalmann, J. K., & Solanki, S. K. 2014年, 《天文学与天体物理学评论》, 22, 78, doi: 10.1007/s00159-014-0078-7Woo, R., Habbal, S. R., & Feldman, U. 2004年, 《天体物理学杂志》, 612, 1171, doi:10.1086/422799Xu, M., Shen, C., Hu, Q., Wang, Y., & Chi, Y. 2020年, 《天体物理学杂志》, 904, 122, doi:10.3847/1538-4357/abbe21Yu, W., Farrugia, C. J., Galvin, A. B., et al. 2016年, 《地球物理学研究杂志》（空间物理学）, 121, 5005, doi: 10.1002/2016JA022642Yu, W., Farrugia, C. J., Galvin, A. B., et al. 2013年, 载于《美国物理联合会会议系列》第1539卷《太阳风13》, 编者: G. P. Zank、J. Borovsky、R. Bruno、J. Cirtain、S. Cranmer、H. Elliott、J. Giacalone、W. Gonzalez、G. Li、E. Marsch、E. Moebius、N. Pogorelov、J. Spann 和 O. Verkhoglyadova, 第311–314页, doi: 10.1063/1.4811050Zhai, H., Fu, H., Huang, Z., & Xia, L. 2022年, 《天体物理学杂志》, 928, 136, doi: 10.3847/1538-4357/ac56e4Zhao, L., Zurbuchen,T. H., & Fisk, L. A. 2009年, 地球物理学研究快报, 36, L14104, doi: 10.1029/2009GL039181Zhao, L. L., Zank, G. P., Hu, Q., et al. 2021年, 《天文学与天体物理学》, 650, A12, doi:10.1051/0004-6361/202039298Zheng, J., & Hu, Q. 2018年, 《天体物理学杂志快报》, 852, L23, doi: 10.3847/2041-8213/aaa3d7