Draft version May 1, 2023 年使用
AASTeX631 的 LaTeX 预印本 样式排版

arXiv:2304.14859v1 [astro-ph.SR] 28 Apr 2023

为什么“太阳海啸”很少在色球层留下印记

Ruisheng Zheng, [1], [3] Yihan Liu, [1] Wenlong Liu, [1] Bing Wang, [1] Zhenyong Hou, [4] Shiwei Feng, [1] Jiangliang Kong, [1], [2] Zhonghua Huang, [1] Hongqing Song, [1], [2] Hui Tian, [4], [5] Pengfei Chen [6], [7] Robertus Erdélyi [8] and Yao Chen [1], [2]

[1]山东大学空间科学研究所，中国威海 *264209* [2]山东大学前沿与交叉科学研究院，中国青岛 *266237* [3]中国科学院太阳活动重点实验室，中国科学院国家天文台，北京 *100101* [4]北京大学地球与空间科学学院，中国北京 *100871* [5]中国科学院空间天气学国家重点实验室、国家空间科学中心，中国北京 *100190* [6]南京大学天文与空间科学学院，中国南京 *210023* [7] 教育部现代天文学与天体物理学重点实验室（南京大学），中国南京 *210023* [8] 谢菲尔德大学数学与统计学院太阳物理与空间等离子体研究中心（*SP2RC*），希克斯大楼，霍恩斯菲尔德路，*S3 7RH*，英国

摘要

太阳日冕波常表现为从太阳大气中的爆发中心向全球传播的明亮扰动，就像地球海洋中的海啸。从理论上讲，由于日冕波前下方压力增强，日冕波可以扫过下方的色球层，并留下莫顿波形式的印记。尽管日冕波屡有观测记录，其色球层对应现象却很少被探测到。自三十年前发现日冕波以来，为何色球层很少留下太阳海啸的印记，始终是个谜。为解答这一问题，我们首先调查了过去十年间所有的日冕波及其相关莫顿波，尽管使用全球振荡网络组的低质量 Hα 数据可能会妨碍莫顿波的探测。本文展示了倾斜喷发中日冕波与莫顿波共存的 8 个案例（包括附录中的 5 个案例），并指出极端倾斜是解答这一问题的关键。对于所有这些事件，靠近太阳表面的日冕波前最低部分都显得非常明亮，而太阳过渡区和色球层中的同步扰动主要发生在亮段下方。因此，根据观测证据，我们提出了一种高度倾斜喷发中日冕波—莫顿波的激发机制情景：即使太阳耀斑较弱（例如 B级），日冕波的最低部分也能有效扰动色球层。

通讯作者：Ruisheng Zheng ruishengzheng@sdu.edu.cn

1. 引言

太阳大气由磁化等离子体构成，其中存在多种波；人们普遍认为，这些波与太阳物理学中的许多基本过程有关（De Pontieu 等，2007；Jess 等，2009）。最引人注目的波之一是太阳日冕波，常被观测到表现为从爆发源向外传播的环形扰动（Moses 等，1997；Thompson 等，1998），类似于地球上的海啸。日冕波常与大尺度日冕物质抛射（CME）、耀斑，甚至小尺度喷流相关联。人们对其解释不一，例如将其视为真正的快模磁流体力学（MHD）波（Wu 等，2001；Ofman 和 Thompson，2002）、伪波（Attrill 等，2007；Delann´ee 等，2008）或混合波（Chen 和 Wu，2011；Liu 和 Ofman，2014；Warmuth，2015）。借助太阳磁震学，快模日冕波能够估算难以直接测量的日冕磁场强度（Nakariakov 等，1999；Ballai，2007），还可能加速太阳高能粒子，进而影响空间天气（Carley 等，2013）。

在日冕波被观测发现之前，人们已根据色球层莫顿波的探测推测其存在；莫顿波最早于20世纪60年代被观测到（Moreton1960；Moreton& Ramsey 1960；Meyer 1968）。典型的莫顿波形成于距爆发中心不远处（∼100Mm），呈弧形色球扰动。它们以高速（∼1000 km s^{-1}）传播数分钟，随后变得不规则且弥散。莫顿波被解释为扫过色球层的日冕快磁声波波前在色球层上的地面轨迹（Uchida1968，1974年）。理论上，日冕波前会导致局部压力增强，压缩色球等离子体，因此这些莫顿波波前在Hα的谱线线心和蓝翼呈辐射，在红翼则呈吸收（Vrˇsnak 等 2002年；Vrˇsnak & Cliver2008 ）。此外，莫顿波常与太阳 II 型射电暴相关，这表明其日冕对应波已演化为激波（Mann 1995）。

借助太阳-地球关系观测台（Kaiser et al.2008）（STEREO）的前行（-A）和后随（-B）航天器，以及太阳动力学观测台（Pesnell et al. 2012）（SDO）的高质量观测，人们发现并研究了数百个日冕波。然而，观测到的莫顿波只有数十个。由于色球层莫顿波是日冕波的对应现象，自然会引出一些基本问题：为什么大多数日冕波未能引发可探测到的色球扰动？为什么对于所有具有圆形波前的日冕波，都没有观测到圆形莫顿波？此外，为什么以往观测到的莫顿波都只与强M级和X级耀斑有关？另一方面，如果日冕波能够压缩色球层，那么作为两者之间界面的过渡区（TR）理应首先受到压缩，但过渡区中的波动特征也鲜有报道。因此，尽管人们普遍认为莫顿波是日冕波在色球层中的对应现象，这两种现象之间的联系仍不明朗。

结合 SDO 和 STEREO 的双重视角观测，我们首先调查了 2010年 至 2021年 这十年间观测到的所有日冕波（https://www.lmsal.com/nitta/movies/AIAWaves/oindex.html），并通过全球振荡网络组（GONG）的 Hα谱线线心检查了相关的莫顿波。请注意，由于 GONG 数据质量较低，大多数检测到的莫顿波只能在动画中辨认，在静态图像中则非常微弱。尽管数据质量较低可能会减少检测到的莫顿波总数，但连续观测可用于研究所有日冕波。由于采用了相同的条件

对本文研究的所有日冕波，均使用质量较低的 GONG 数据来检测相关莫顿波，因此在分析日冕波与莫顿波之间的关系时，可以忽略数据因素。日冕波中伴有莫顿波的比例，将在后续统计工作中研究。

在这篇快报中，我们从快速浏览的样本里挑选了三个具有明显色球层波动特征、且与通过双视角观测确认的倾斜喷发相关的日冕波案例，首次提出一种莫顿波可能的激发机制情景。在这一情景中，当喷发高度“倾斜”时，日冕波的前端便靠近太阳表面，日冕波后方增强的压力很容易激发莫顿波。莫顿波的出现高度依赖倾斜喷发，这可以合理解释为何可探测到的莫顿波十分罕见。

2. 结果

本文详细展示并分析了三个日冕波事件，它们分别与2011年8月9日的一次X6.9级耀斑（E1）、2021年5月22日的一次M1.4级耀斑（E2）和2011年7月3日的一次B9.5级耀斑（E3）有关。每个事件都伴有日冕物质抛射和II型射电暴（补充图S6 和图 S7）。大气成像组件（AIA）（Lemen 等, 2012）搭载于SDO，极紫外成像仪（EUVI）（Howard 等, 2008）搭载于STEREO-A；双视角观测清楚地展示了倾斜喷发和日冕波（图 1 和图 1 动画）。在AIA 304、171和 193 $^{\circ}$A全日面合成图像（左列）中，所有喷发都沿高度非径向方向（扇区）运动，其相对于太阳径向方向的倾斜角范围为 $\sim$63–76°，该角度由对喷发核心或日冕波前最低部分的重建估算得出（补充图 S8和图 S9）。随着倾斜喷发发生，日冕波也沿单侧传播。在AIA 193 $^{\circ}$A和EUVI-A 195 $^{\circ}$A的局部差分图像（图 1中、右列）中，波前呈弧形（白色箭头），其靠近太阳表面的最低部分变得非常明亮（红色箭头）。

有趣的是，与波前的其余部分不同，AIA 193 $^{\circ}$A 中的亮段在 AIA 171、 304 $^{\circ}$A 和 Hα 中都有明显的相关特征（图 2 及图 2 动画）。在 AIA 171 中，波前被日冕暗化所取代，这可以解释为局地等离子体受热所致（Liu & Ofman 2014）。AIA 304 $^{\circ}$A 中的波动特征很明显，而 Hα响应微弱。He II 304 $^{\circ}$A 和 Hα 中的特征分别代表日冕波在过渡区和色球层中的对应表现，二者都具有类似于 193 $^{\circ}$A 波亮段的弧形，表明不同层中的三个波之间存在密切联系。根据时距图（补充图 S10），它们的速度相近，范围为 $\sim$380–580 km s^{-1} 。假设亮段在低高度处的快磁声速为 $\sim$200–300 km s^{-1} （Wu et al. 2001），日冕波可能表现为激波，其快磁声马赫数为 $\sim$2 （Warmuth et al. 2001），这与补充图 S7 中 II型射电暴的出现相一致。需要注意的是，E3 中的扰动是首个与微弱B级耀斑相关的莫顿波实例，尽管 Hα 中的波信号在时距图中几乎不可见（补充图 S10 ）。

对于日冕波前（图 2中的青色方框），我们分析不同通带下强度和辐射的演变（图 3）。上排曲线表示 AIA 193（绿色）、171（黑色）、 304 $^{\circ}$A（红色）和 GONG Hα （紫色）中归一化强度的变化。波到达后（粉色实线），AIA 171 $^{\circ}$A 的强度开始骤降，而强度

AIA 193 和 304 Å 中的强度骤然上升。尽管由于数据质量较差，GONG Hα 中强度开始上升的时间不确定，但它们都像 AIA 193 和 304 Å 中的强度一样达到明显峰值（虚线）。对于 E1 和 E2，AIA 193、304 Å 和 GONG Hα 中的峰值几乎同时出现。对于 E3，AIA 304 Å 中的峰值时间比 AIA 193 Å 晚 36 秒，但比 GONG Hα 早 30 秒（面板 (c)）。

图3底排展示了采用稀疏反演代码（Cheung 等（2015）；Su 等（2018））得到的亮段区域（图 2 中的青色方框）内微分发射测度（DEM）的平均演化。波穿越后（粉色实线），log(T/K) ≈ 6.2 处的 DEM 明显增加，而 log(T/K) ≈ 6.0 处的 DEM 同时减少（白色和粉色箭头）。这表明波前的局地等离子体从 log(T/K) ≈ 6.0 加热至 log(T/K) ≈ 6.2，与大气成像组件 193 Å 中的亮波前以及大气成像组件 171 Å 中的变暗现象一致。有趣的是，log(T/K) ≈ 5.7 处的 DEM 也与 log(T/K) ≈ 6.2处的 DEM 同时增加（红色箭头），尽管 E3 中的增幅较弱。此外，log(T/K) ≈ 5.7 处 DEM 的持续增加似乎是从 log(T/K) ≈ 5.9处的 DEM 演化而来，这可能意味着二者存在压缩关系。这表明，log(T/K) ≈ 5.7 处 DEM 的增加很可能代表日冕底部和/或上层过渡区等离子体的辐射增强，这是由于日冕波中近乎水平且靠近太阳表面的亮段向下膨胀并发生压缩所致。

3. 讨论与结论

Vrˇsnak 等（Vrˇsnak 等（2016））推测，在弱喷发中，非对称/非径向喷发或许是产生莫顿波的另一项必要条件；他们模拟了与脉冲式喷发相关的莫顿波。在 SDO 和地基观测台观测到的少数日冕波和莫顿波案例中，所有相关喷发均为非径向（Asai 等（2012）；Shen 和 Liu（2012）；Francile 等（2016）；Cabezas 等（2019）；Long 等（2019）；Wang 等（2020）），而倾斜喷发可能是日珥向磁场较弱的区域喷发所致（Panasenco 等（2013））。例如，2014年3月29日的倾斜喷发及其相关莫顿波见补充图S11 和图S11 动画），其他研究人员也对此进行了研究（Francile 等（2016）；Cabezas 等（2019）；Long 等（2019））。

AIA 304 Å 通道主要由两条 He II 303.8 Å 谱线主导；对于冕洞、宁静日冕区、活动区和耀斑等离子体，其温度为 log(T/K) ≈ 4.7。然而，在宁静太阳边缘外，硅 XI 303.33 Å 谱线也能在日冕温度 log(T/K) ≈ 6.2 时对该通道产生重要贡献（O'Dwyer 等（2010））。此前的一些观测表明，AIA 304 Å 通道中的波动特征可能由日冕谱线硅 XI 303.33 Å 主导（Long 等（2010）），也可能由过渡区中的 He II 303.8 Å 谱线主导（Long 等（2011））。在这篇快报中，304 Å 中的波前显然很窄，与 Hα 中的波前相似，却不同于 193 Å 中的波前。与莫顿波类似，304 Å 中的波前很窄，并且与日冕波前的亮部密切相关（图 1 中的红色和白色箭头，以及图 2 中的虚线框；这一情况与 Hou 等（2022）的结果相似）。此外，从 SDO 或 STEREO 的视角观察，304 Å 中的波前也能在日面上显现。因此，304 和 193 Å 中波前在日面上的形态差异表明，这篇快报中的 304 Å 波前很可能主要由 He II 谱线主导。

为进一步揭示日冕波与莫顿波之间的关系，我们检查了另外四个日冕波，它们分别与倾斜日缘喷发或径向喷发有关。在倾斜日缘喷发中（补充图S12 和图 S12 动画），日冕波的亮段和过渡区中的扰动十分明显（蓝色箭头），不过由于 Hα 数据质量较差，难以辨认色球层波动特征。尽管径向喷发与强 X 级或 M级耀斑有关（补充图 S13和图 S13动画），但在 He II 304 $^{\circ}$A 和 Hα中均未发现波动特征。因此，这与以下事实相符：日冕波的主体在 AIA 193 和 211 $^{\circ}$A 中很明显，而在 AIA 304 $^{\circ}$A 中没有特征。根据内田模型（Uchida 1968年，1974年），如果日冕波能够扰动色球层，过渡区应首先受到压缩。因此，上述案例中 He II 304 $^{\circ}$A 中的波很可能代表过渡区的响应，可视为日冕波与莫顿波之间缺失的一环。此外，在上述倾斜喷发案例中，所有日冕波都成功扰动了过渡区和色球层，其中包括与弱 B级耀斑相关的那一次。这进一步表明，倾斜喷发是产生色球层莫顿波的关键。

对于上述倾斜喷发中的日冕波，日冕波前靠近太阳表面处有一段明亮区域，与其他部分明显不同（图 1）；与此同时，过渡区和色球层中的扰动恰好出现在最亮段的正下方（图 2）。比较波前不同区域的演化后可以发现，最亮段所在区域的平均DEM演化很可能揭示了日冕激波/波后方日冕底部和上层过渡区的辐射增强（图 3），这与莫顿波的情景一致（Vr$\check{}$snak 等 2002年）。因此，日冕波前的亮段及其相关的差分发射量持续增加表明，倾斜日冕波的最低部分能够有效扰动过渡区和色球层，并进一步证明倾斜喷发在驱动莫顿波中的作用。

基于上述观测结果，我们在图 4中提出一种可能的莫顿波激发机制。日冕波（粉色点划曲线）由激波头部（实线部分）和弱侧翼（点线部分）组成。对于倾斜喷发中的日冕波（图版 (a)），波前最低处靠近激波的头部，因此在初始阶段（ t_0）相对较强。向外扩展的最低部分对太阳表面施加强烈压缩，从而形成亮段（红色区域）。这种压缩会引发压力跃变，使过渡区和色球层中的密度/温度升高，并以过渡区和色球层中的波动特征（扰动和投影弧）表现出来。随后，当日冕波前的头部升得更高时（在 t_1），最低部分因远离日冕波头部而变得很弱，几乎无法压缩其下方的过渡区，因此过渡区和色球层中的波动特征随之消失。相反，在径向喷发情景中（图版 (b)），日冕波的头部在喷发核心早期上升阶段后的几分钟，最初形成于典型的 50–100 Mm 高度处（Patsourakos 和 Vourlidas 2012年）。日冕波前的最低边缘远离激波头部（位于 h的高度之上），因而变得过于微弱，无法在过渡区和色球层留下印记。

在这种情形下，与倾斜喷发相关的日冕波很容易产生莫顿波。然而，所有与倾斜喷发相关的日冕波都会在色球层留下印记吗？我们展示了另外两个与倾斜喷发相关的莫顿波（补充图 S14 和图S14 动画）。与2011年9月一次X1.8 级耀斑相关的莫顿波

7几乎无法辨认，只有通过低层日珥及附近环系的振荡才得以确认（图 S14上方各面板中的粉色和黑色箭头）。与2021年10月28日一次X1.0级耀斑相关的莫顿波（蓝色箭头）也很微弱，而向西爆发的日珥（黄色箭头）的倾斜角为 $\sim 30^{\circ}$ ，该角度是根据双视角重建的爆发日珥点计算得出的（图 S14下方各面板）。因此，可将磁结构的尺度（位于倾斜日冕波前下方）及倾角范围等因素纳入这一情形。假设存在一个下方的大尺度日冕环系统，且在日冕波前向下压缩过程中保持完整（图 5a），该大尺度环系统可能会使磁流体动力学波从高阿尔fvén速度区域发生折射（´（ Wang 2000）。周围的大尺度环系统产生的折射确实导致某些倾斜喷发中的日冕波没有出现莫顿波。另一方面，如果喷发相对于径向的倾斜角较小，日冕波就难以显著扰动过渡区和色球层，莫顿波特征将很微弱，甚至可能消失（图5b）。

因此，上述情景表明，依赖高度倾斜的喷发是解开莫顿波罕见之谜的关键。因此，高度倾斜的喷发很可能建立了日冕波与莫顿波之间的全面联系；该情景还涉及其他因素（倾斜角度以及向下传播的日冕波前下方的磁结构）。我们还认为，当低质量的 H 304 $^{\circ}$数据无法探测到莫顿波时，氦 IIα A 中的波可能是莫顿波的对应现象。根据这一情景，与冲击性 X级耀斑相关的日冕波需要有中等倾斜度的喷发；而与微弱 B级耀斑相关的日冕波，则可在喷发及其相关日冕波前极度“倾斜”时，激发出可探测的莫顿波。中国太阳探测器（Chinese Hα Solar Explorer（Li 等， 2022）于2021年10月发射，其获取的高质量色球数据将提供更多莫顿波案例，以检验这一情景。还需进一步开展模拟，以验证本快报提出的情景。

SDO是美国国家航空航天局“与星共存”计划的一项任务。我们谨此感谢使用来自SDO、STEREO以及地基GONG项目的数据。本研究得到国家自然科学基金委员会（NSFC）项目11790303、12073016、11825301、11973031和12127901的资助。R.E.还感谢科学技术设施委员会（STFC，项目编号：ST/M000826/1）提供的支持。

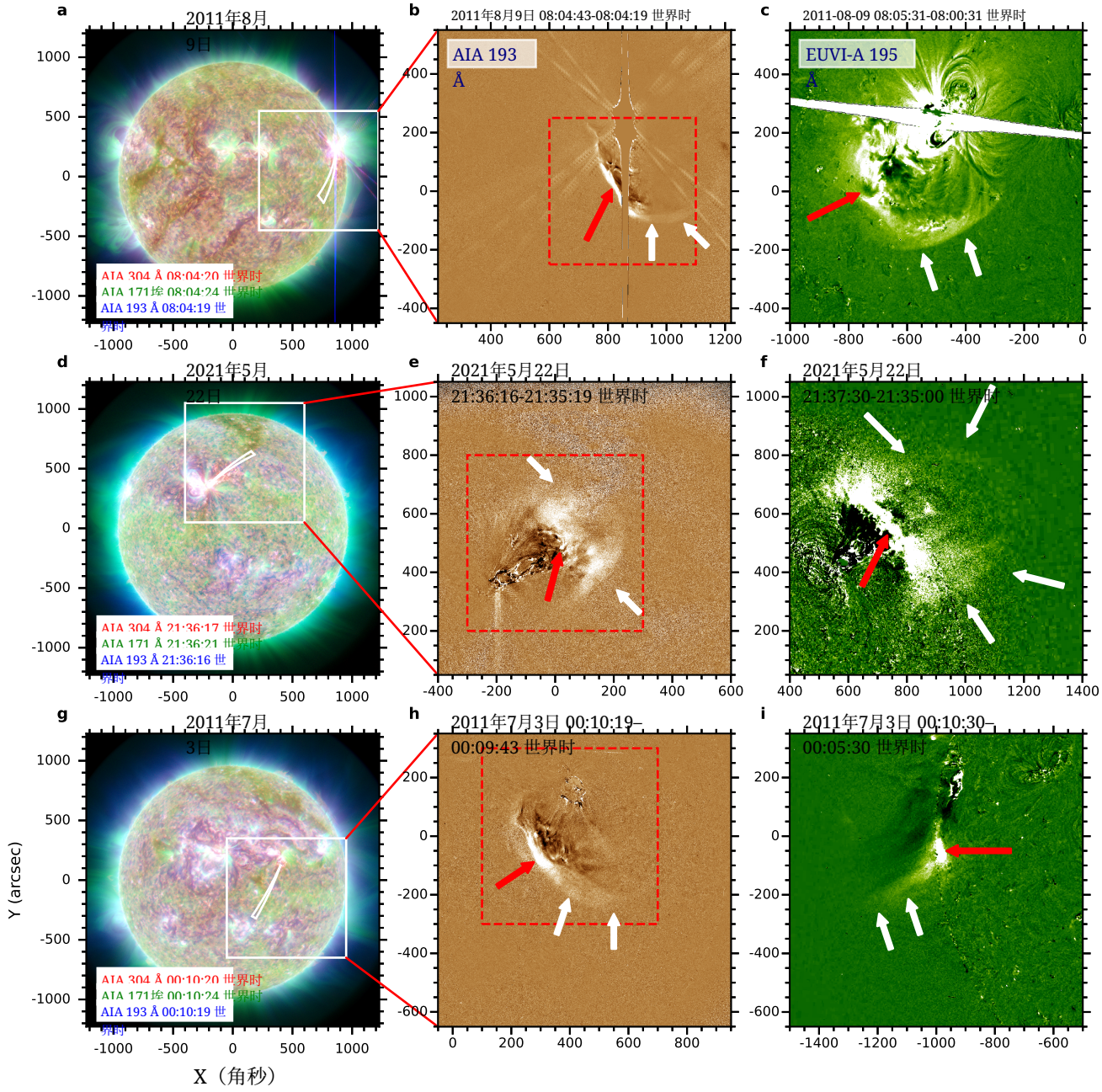

图1. 双视角下的日冕波。左列：喷发显示在由 AIA 304（红色）、171（绿色）和 193 ˚A（蓝色）组成的全盘合成图像中。扇区表示喷发及相关日冕波的方向，白框表示中间列图像的视场（FOV）。中列和右列：差分图像中显示了日冕波（白色箭头）和亮段（红色箭头），图像由 AIA 193 ˚A 和 EUVI-A 195 ˚A 拍摄。红色虚线框表示图2中各面板的视场。（中列和右列的动画可在线查看。）

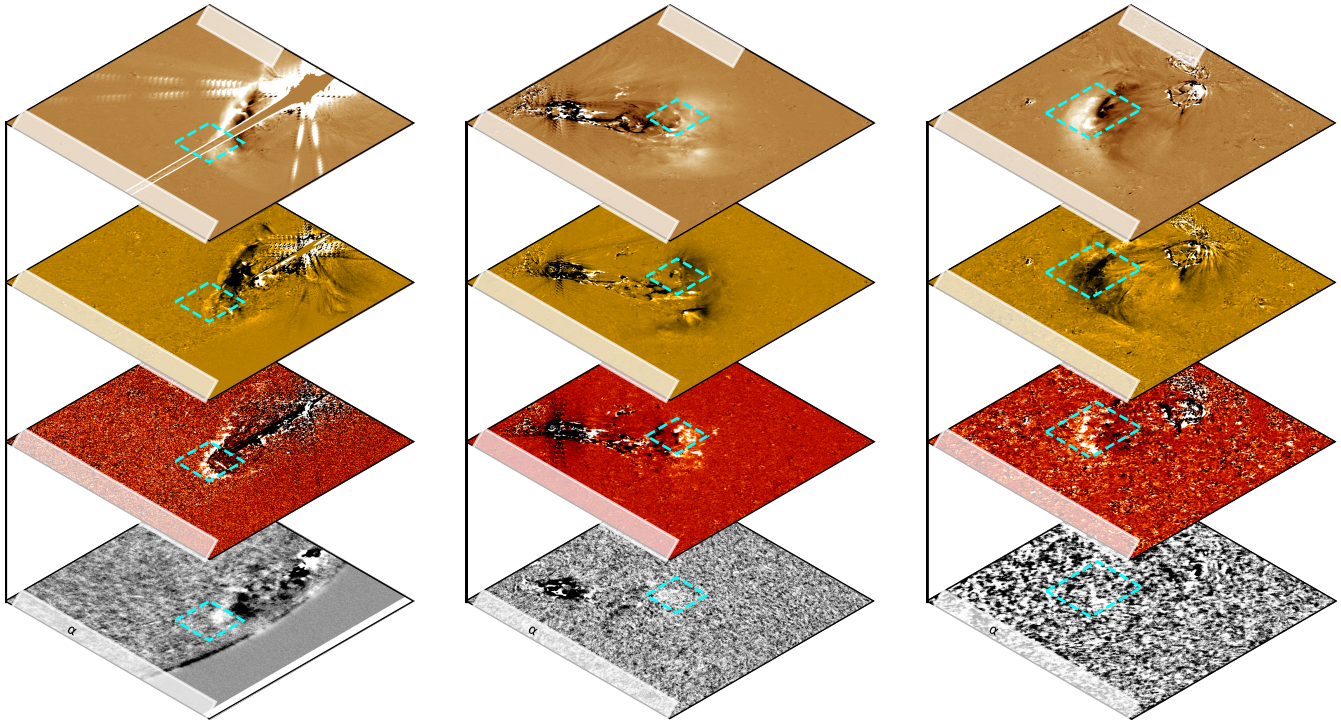

图 2. 不同大气层中的波动特征。差分图像中的青色方框标出了 AIA 193 ˚A 中日冕波的亮段及其在 AIA 171 中的响应， 304 ˚A 和 GONG Hα。青色方框标示了图 3中 DEM 演化的区域。（与本图相关的动画可在线查看。）

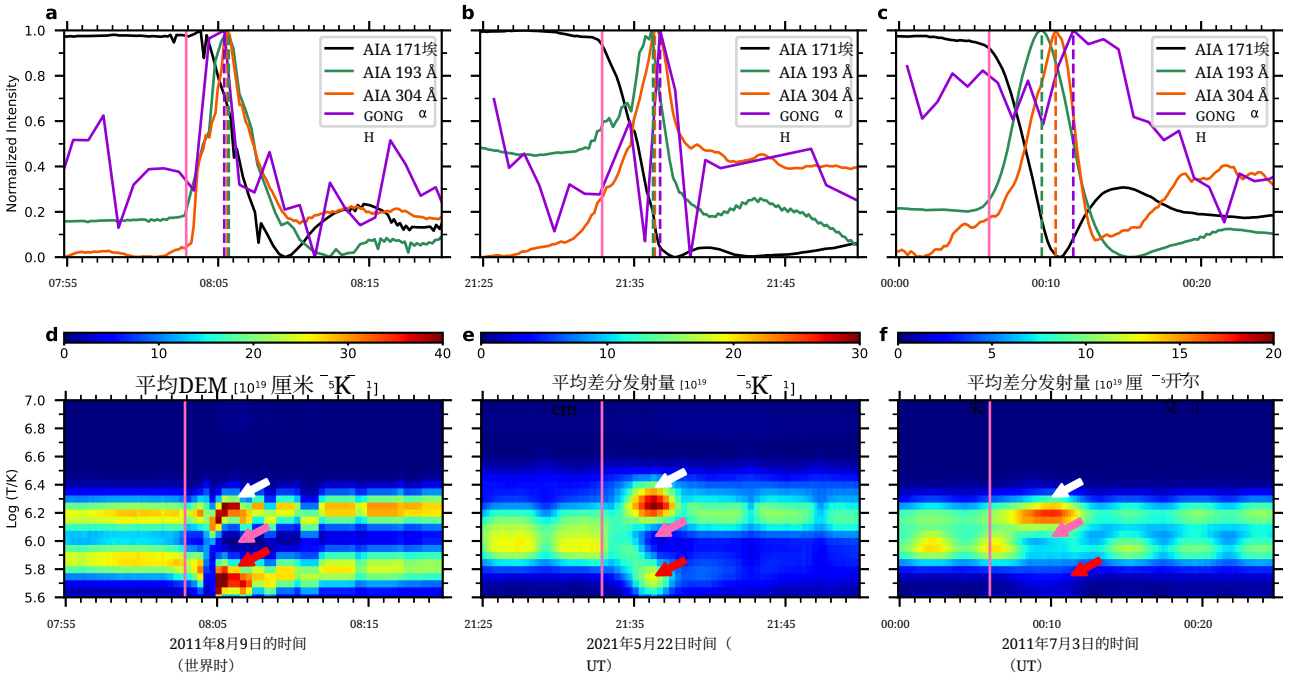

图3。等离子体强度和辐射的演化。上排：亮段区域（图2中的青色方框）的光变曲线，见 AIA 193、171，304 °A 和 GONG Hα。下排：亮段区域（图2中的青色方框）的平均差分发射量演化。粉色实线表示日冕波的到达时间，彩色虚线表示相应通带中的峰值时间，彩色箭头表示不同温度下的差分发射量变化。

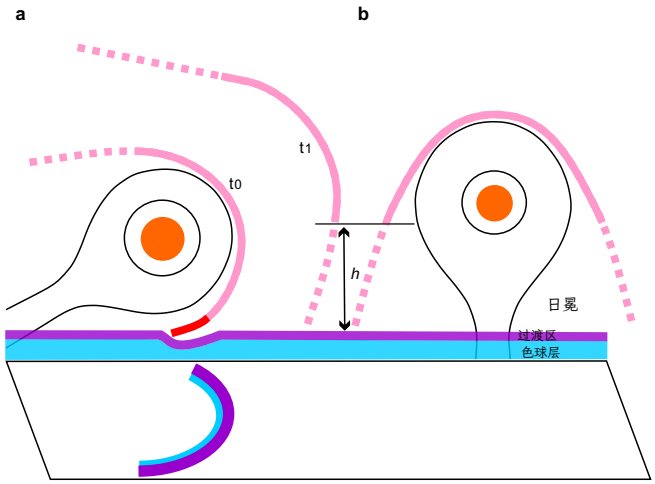

图 4. 激发莫顿波的机制情景。a)：对于带有核心（橙色）的倾斜喷发，相关日冕波（粉色实点线波前）的最低部分在初始时刻（t0）变得非常明亮（红色区域），并压缩下方的过渡区（紫色层）和色球层（蓝色层）。紫色和蓝色投影弧线分别表示过渡区和色球层中的扰动。经过数分钟传播后，日冕波前的波头从日冕底部上升至高度 h （t1）。b)：对于径向喷发，日冕波的波头在初始高度 h处形成。请注意，日冕波从波头附近的激波（实线）向远处逐渐退化为普通波（点线）。

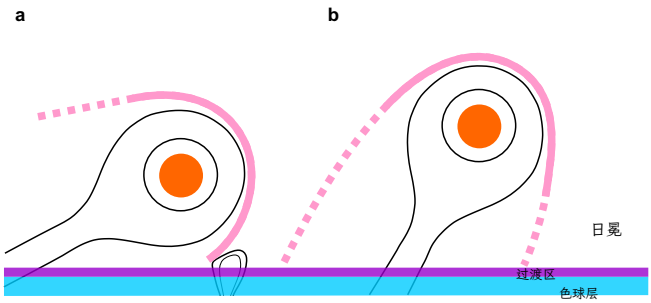

图5。倾斜喷发中莫顿波未能形成的情形。a）：日冕波遇到了低矮的日冕环。**b）**：喷发的倾斜角较大。日冕波（粉色实点线）由一个强波前（实线）和弱侧翼（点线）组成。

附录

A. 附录信息

数据日冕波的分析主要基于大气成像组件 AIA 304、171、 193 ˚A 和 EUVI 304、171，以及 195 ˚A 的双视角极紫外（EUV）观测（图1、图2及相关动画）。每幅 AIA 图像的时间间隔为 12 秒，像素大小为 0。6″。EUVI 图像的像素大小为 1。58″，时间间隔为 2.5 分钟、5 分钟或 10 分钟。此外，为研究莫顿波的演化，我们使用国家太阳天文台全球振荡网络组（GONG）的 Hα 滤光片图像。Hα 图像的时间间隔为 1 分钟，像素大小为 ∼1″ （图2）。

大日冕中的日冕物质抛射演化（白色箭头）由搭载于Brueckner 等人 1995 年的太阳和日球层观测台（*SOHO*）航天器上的大角度和光谱日冕仪（LASCO）观测；相关耀斑则由静止环境业务卫星（GOES）以太阳全盘积分软X射线辐射的形式记录（补充图 S6）。此外，相关射电暴（白色箭头）由日本国立信息与通信技术研究所（NICT）的 Hiraso RAdio Spectrograph（HiRAS）和 YAMAGAWA 米波频谱仪（Kondo 等人 1995 年；Iwai 等人 2017 年）以及射电太阳望远镜网络（RSTN）的 Learmonth（LEAR）站（Kennewell 和 Steward 2003 年）在 25–500 MHz 频率范围内探测到（补充图 S7）。

方法 为清晰识别波前和日冕物质抛射，将图像减去前一张图像，并标注两张图像的时间（图 1，图2，补充图 S6，图 S8，图S11，图 S12及相关动画）。采用时间切片方法分析不同层中的波动特征：针对一组差分图像，沿选定扇区堆叠切片，构建时距图。通过使用 SolarSoftWare（SSW）中的线性拟合（*linfit.pro*）函数拟合，得到波速及误差（蓝线）；并假设所选点的测量不确定度为 4 像素（∼ 1.74 Mm）（补充图 S10）。

借助双视角观测（补充图 S9上方各面板），我们通过 SSW 中的重建程序 *sccmeasure.pro* 重建喷发核心（日珥／日珥和喷流的核心物质）及波前的实际位置。为估算喷发倾角，我们从 E2 的喷发核心中选取一些点进行重建，这些点同时出现在 AIA 171 ˚A 和 EUVI-A 171 ˚A 中。对于 E1 和 E3，我们选择亮段而非不可见的喷发核心（补充图 S8），并假设喷发核心的倾角约等于亮段的倾角（图 4中橙色椭圆形核心和红色线段）。最后，我们将重建点叠加在一张 AIA 304 ˚A 图像上，其中爆发中心旋转至日边（补充图 S9下方面板）。

我们还采用稀疏反演代码（Cheung 等（2015）；Su 等（2018）），利用微分发射测度（DEM）方法研究了日冕波前沿的辐射演化。通过六个通道的大气成像组件图像组，获得一系列温度范围内的辐射，即 131 ˚A（铁 XXI， ∼10MK）、 94 ˚A（铁 XVIII， ∼6.4 MK）、 335 ˚A（铁 XVI， ∼2.5 MK）、211 ˚A（铁 XIV， ∼2.0 MK）、 193 ˚A（铁 XII， ∼1.6 MK）和 171 ˚A（铁 IX， ∼0.6 MK）。DEM

演化图根据选定区域（图 2 中的青色方框）内的平均值绘制，展示了一系列电磁图（图 3 底部面板）。

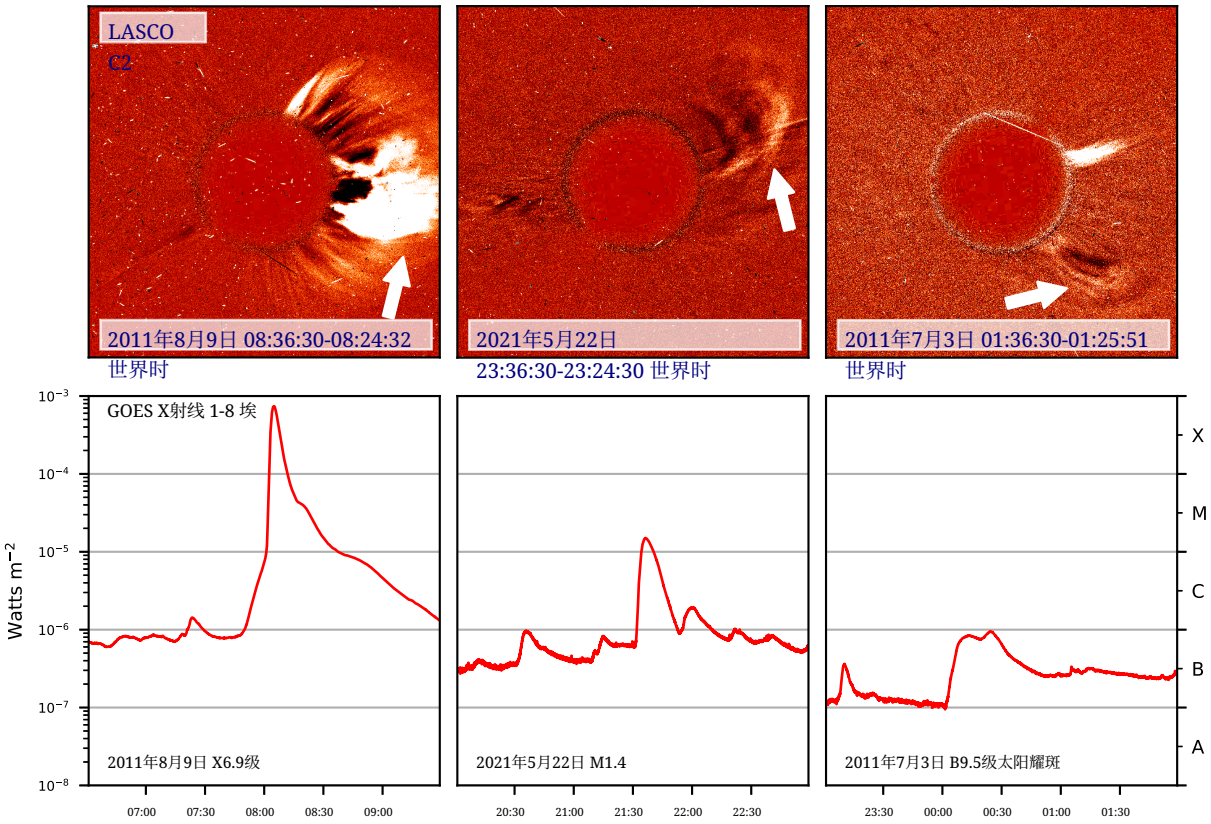

图 S6. 相关的日冕物质抛射和耀斑。上排：相关的日冕物质抛射（白色箭头）显示在 LACSO C2 的差分图像中。下排：相关耀斑由 GOES X射线 1–8 ˚A 标示。

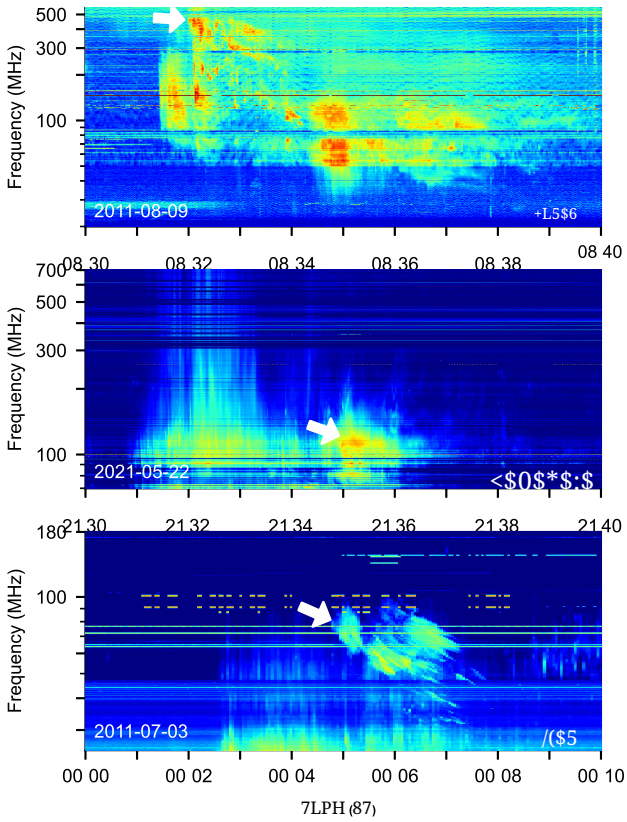

图 S7。相关射电暴。三个案例的射电动态频谱分别来自 HiRAS、YAMAGAWA 和 LEAR，白色箭头表示射电暴的起始时刻。

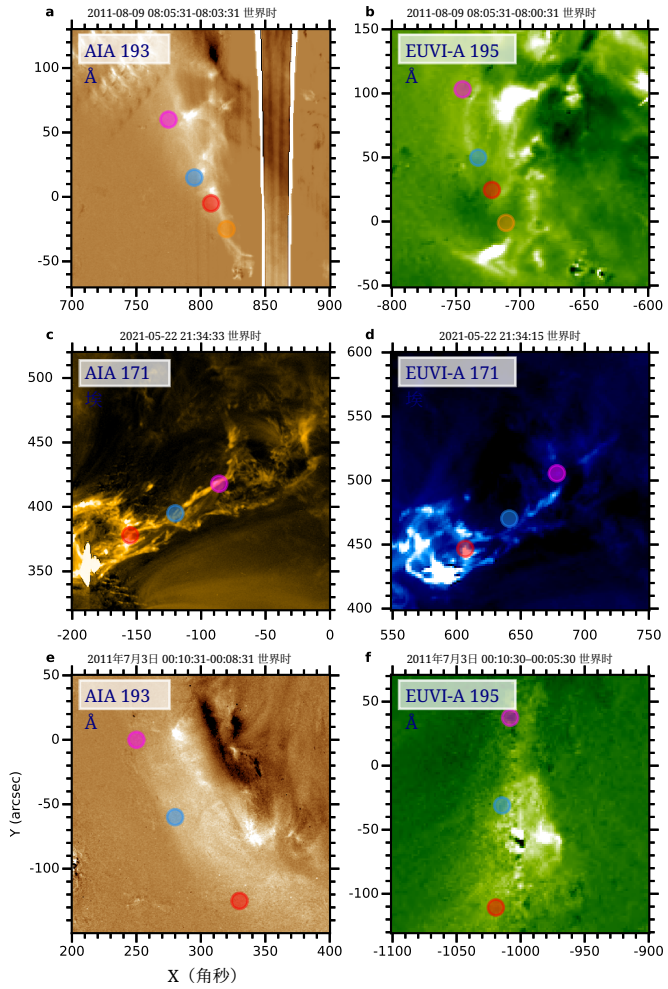

图 S8。重建所选取的点。大气成像组件和 EUVI-A 双视角中的彩色点表示补充图中重建的位置。S9。

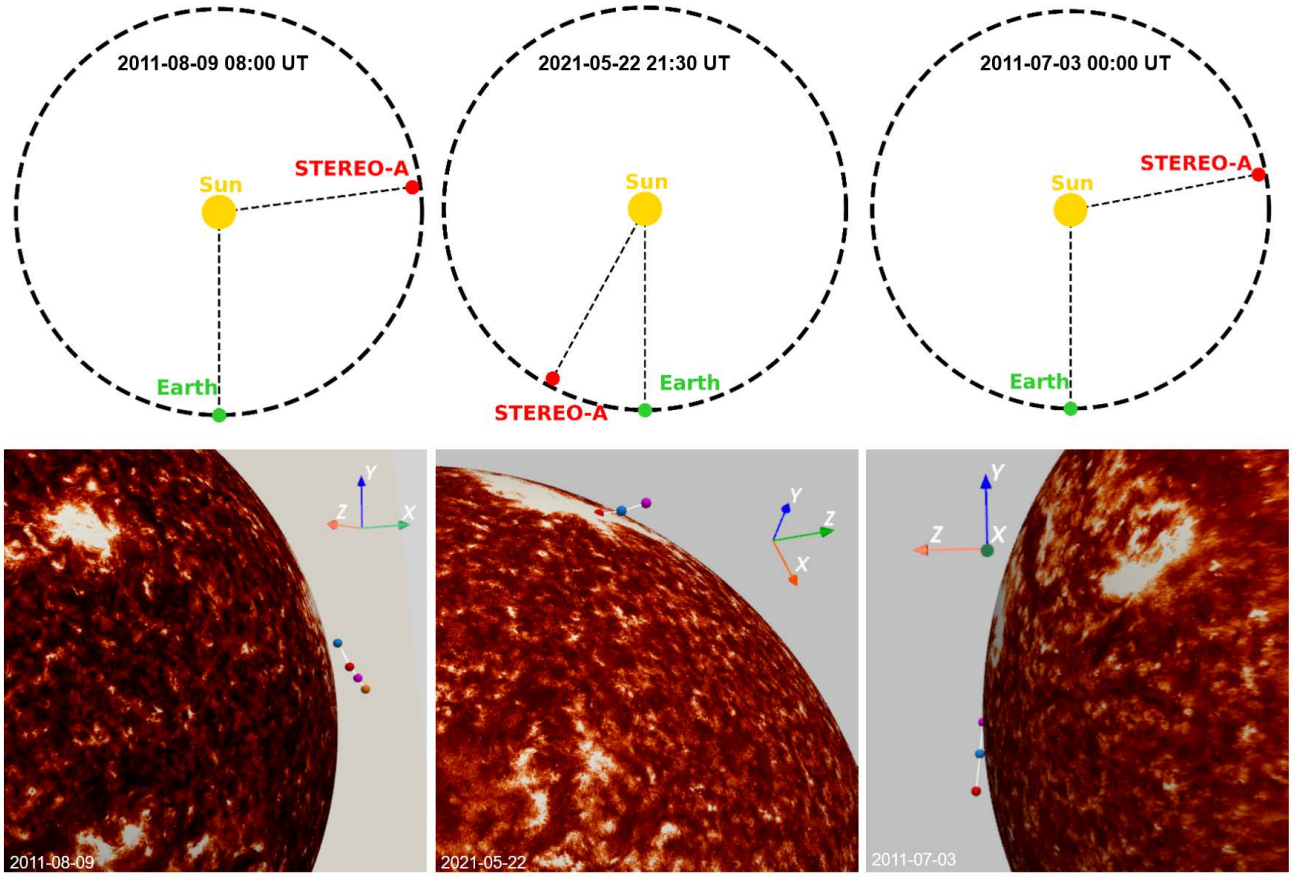

图 S9. 喷发的倾角。上排：太阳、地球和 STEREO-A 的位置。下排：旋转后的 AIA 304 Å 图像边缘上选取的点，分别显示倾角为 $\sim 73°$、$\sim 63°$ 和 $\sim 76°$。z 的轴指向地球，而 x 和 y 的轴定义了 AIA 图像的坐标平面。

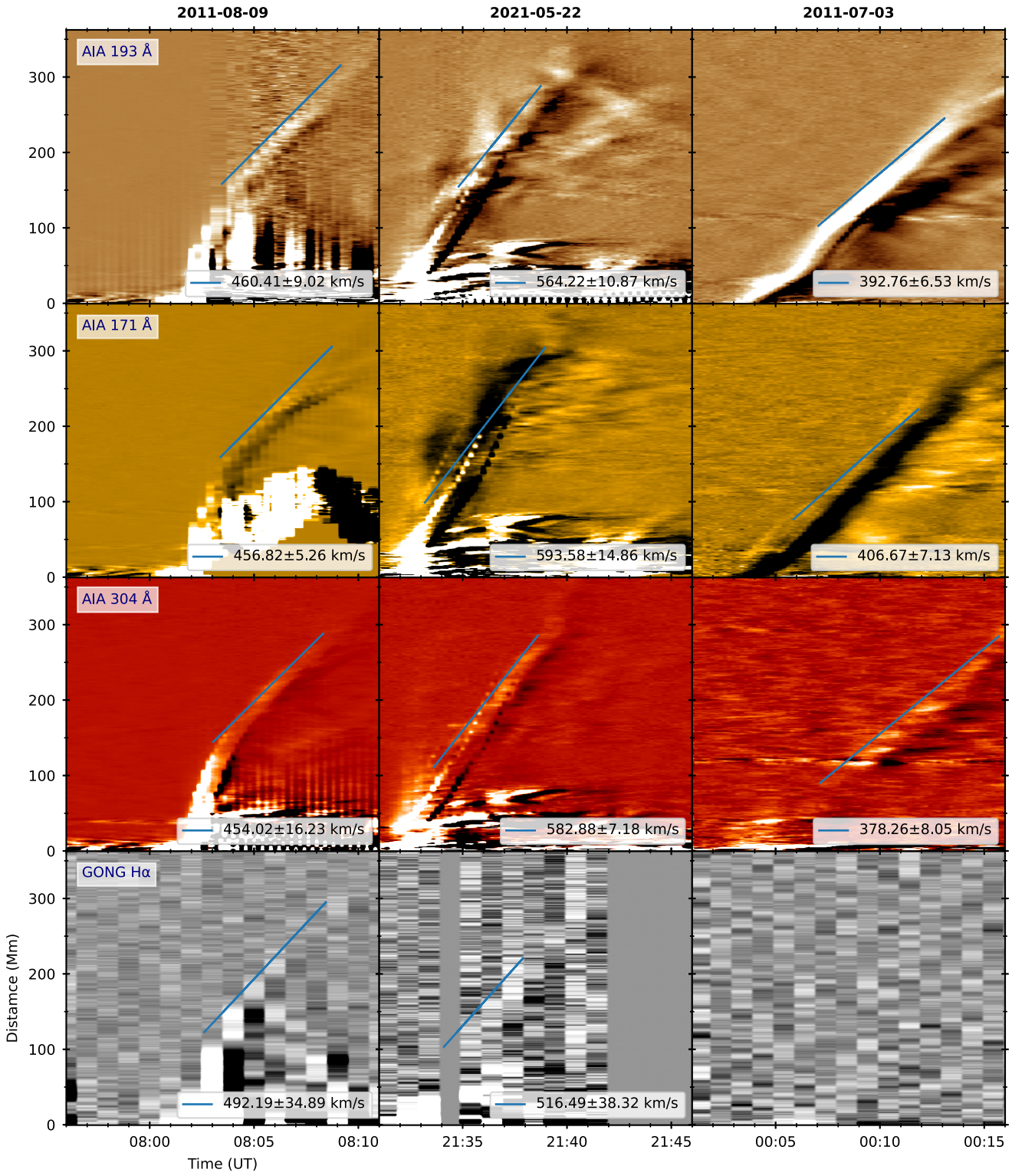

图 S10. 不同层中的波速。 AIA 193、171 中的速度， 304 ˚A 和 GONG Hα沿图中扇区计算。 1 针对三种情况（左、中、右列），倾斜线表示测得的速度。请注意，在最后一个面板中，E3 的色球层波动特征几乎无法辨认。

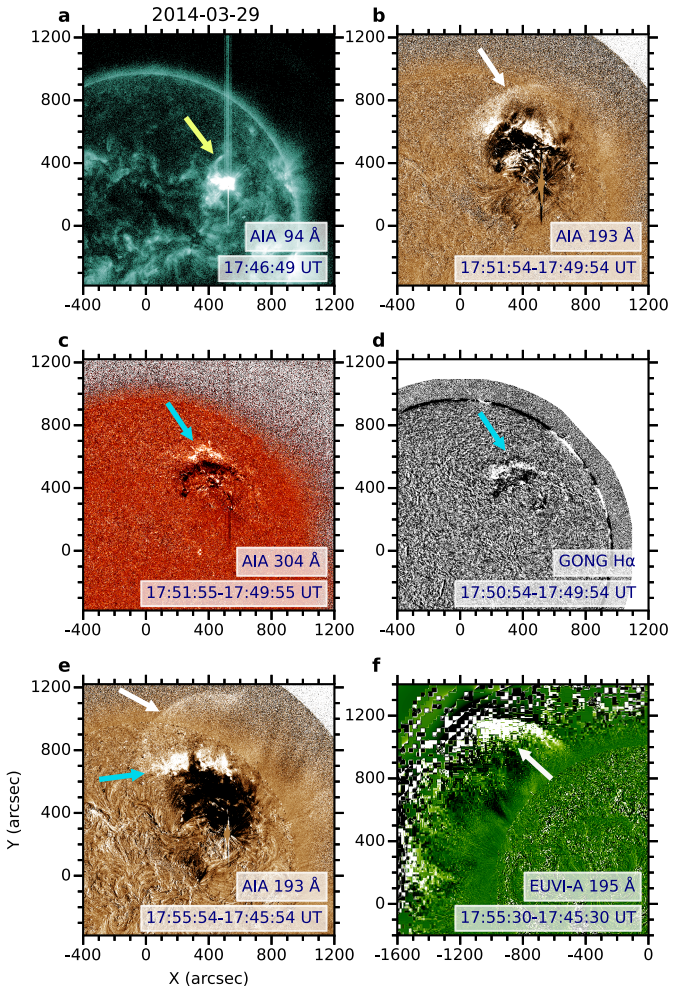

图 S11. 2014年3月29日伴随 X1.0级耀斑出现的莫顿波。倾斜喷发结构（黄色箭头）显示在大气成像组件 94 Å 图像中。在双视角差分图像中，蓝色箭头标示出大气成像组件 193 ˚Å 和 EUVI 195 ˚Å 图像中的日冕波（白色箭头）亮段，以及大气成像组件 304 ˚Å 和 GONG Hα图像中的同步波动特征。

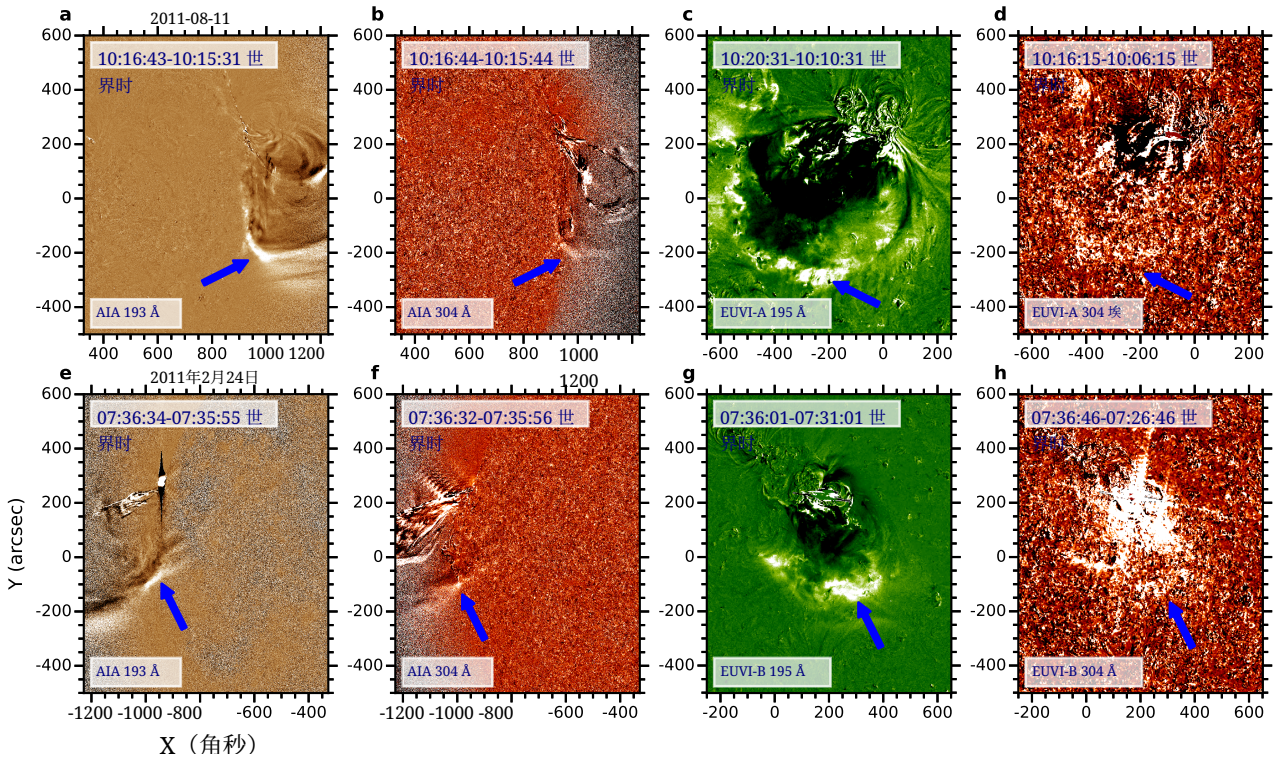

图 S12. 两个倾斜日缘喷发案例。两次喷发分别伴随一次耀斑：一次是2011年8月11日的C6.2级耀斑，另一次是2011年2月24日的M3.5级耀斑。在双视角差分图像中，蓝色箭头标示出 AIA 193 °A 和 EUVI 195 °A 中日冕波的亮段，以及氦 II 304 °A 中同时出现的波动特征。（此图的动画可在线查看。）

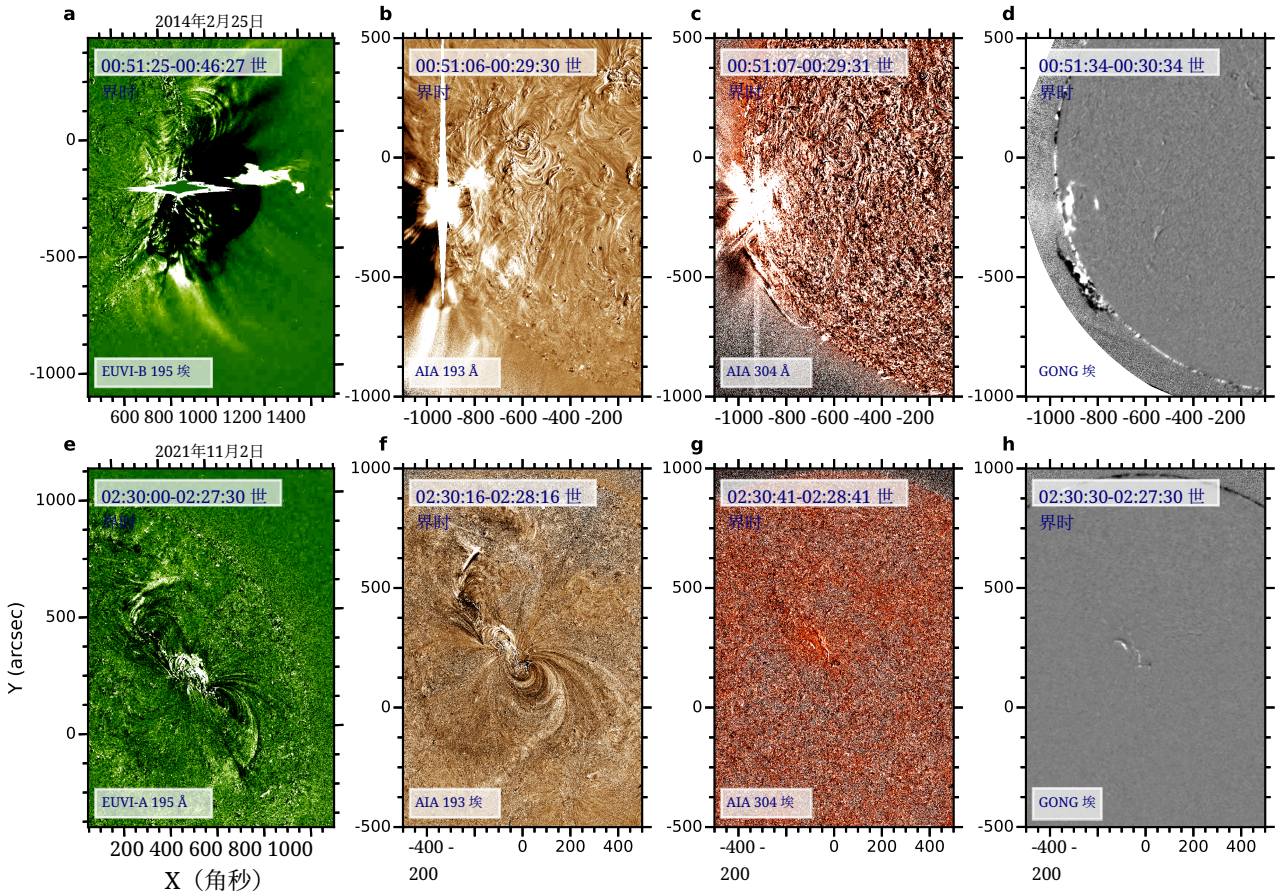

图 S13。径向喷发的两个案例。两次喷发分别伴随着2014年2月25日的X4.9级耀斑和2021年11月2日的M1.7级耀斑。在双视角差分图像中，大气成像组件 193 ˚A和EUVI 195 ˚A中的日冕波十分明显，但氦 II 304 ˚A和Hα中没有波的迹象。（此图的动画可在线查看。）

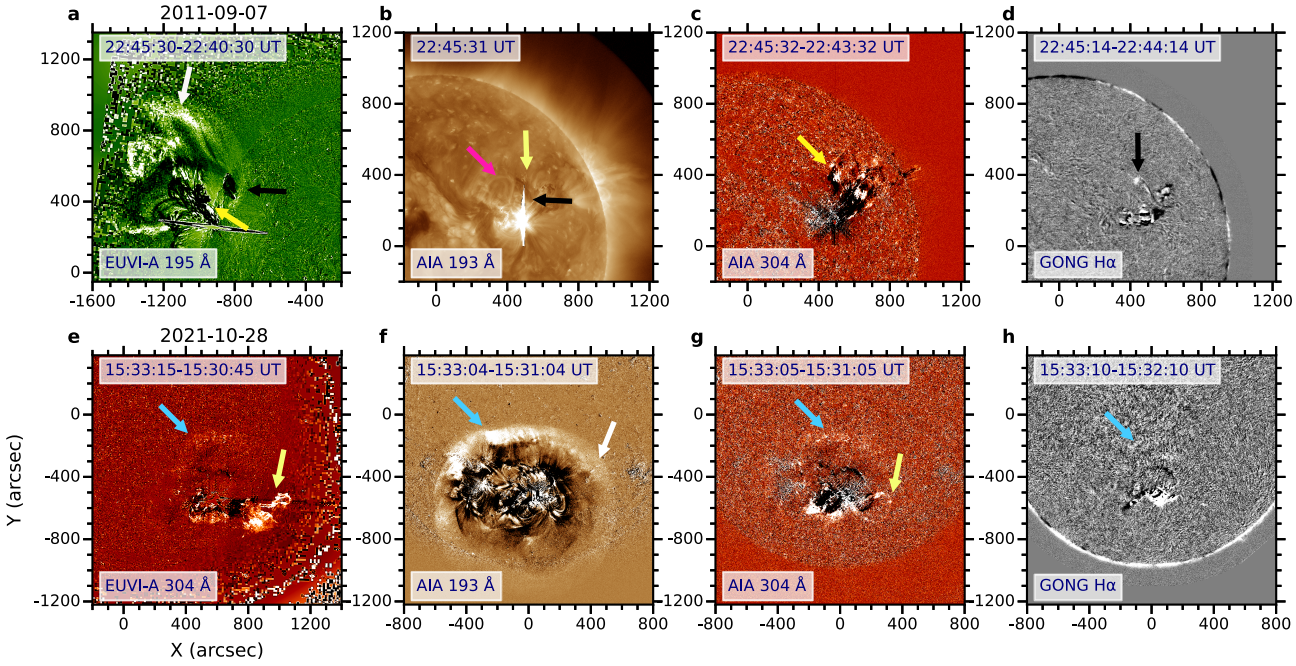

图 S14. 另外两个倾斜喷发案例。两次喷发分别伴随着2011年9月7日的一次X1.8 级耀斑和2021年10月28日的一次X1.0级耀斑。在双视角差分图像中，蓝色箭头标示了大气成像组件 193 ˚A 和 EUVI 195 ˚A 中日冕波（白色箭头）的亮段，以及大气成像组件 304 ˚A 和 GONG Hα 中同时出现的波动特征。这些波动与倾斜喷发的日珥（黄色箭头）密切相关，并受到周围日冕环（粉色箭头）和下方暗条（黑色箭头）的影响。（此图的动画可在线查看。）

参考文献

Asai, A., Ishii, T. T., Isobe, H., 等, 2012年, 《天体物理学杂志快报》, 745, L18, doi: 10.1088/2041-8205/745/2/L18 Attrill, G. D. R., Harra, L. K., van Driel-Gesztelyi, L., D´emoulin, P., & W¨ulser, J. P. 2007, 《天文学报》, 328, 760, doi: 10.1002/asna.200710794 Ballai, I. 2007, 太阳物理学, 246, 177, doi: 10.1007/s11207-007-0415-3 Brueckner, G. E., Howard, R. A., Koomen, M. J., 等, 1995, 太阳物理学, 162, 357, doi: 10.1007/BF00733434 Cabezas, D. P., Asai,A., Ichimoto, K., 等, 2019, 《天体物理学杂志》, 883, 32, doi: 10.3847/1538-4357/ab3a35 Carley, E. P., Long, D. M., Byrne, J. P., 等, 2013, 《自然·物理》, 9, 811, doi: 10.1038/nphys2767 Chen, P. F., & Wu, Y. 2011, 《天体物理学杂志快报》, 732, L20, doi: 10.1088/2041-8205/732/2/L20 Cheung, M. C. M., Boerner, P., Schrijver, C. J., 等, 2015, 《天体物理学杂志》, 807, 143, doi: 10.1088/0004-637X/807/2/143 De Pontieu, B., McIntosh, S. W., Carlsson, M., 等, 2007, 《科学》, 318, 1574, doi: 10.1126/science.1151747 Delann´ee, C., T¨or¨ok, T., Aulanier, G., & Hochedez, J. F. 2008, 太阳物理学, 247, 123, doi: 10.1007/s11207-007-9085-4 Francile, C., L´opez, F. M., Cremades, H., 等, 2016, 太阳物理学, 291, 3217, doi: 10.1007/s11207-016-0978-y Hou, Z., Tian, H., Wang, J.-S., 等, 2022, 《天体物理学杂志》, 928, 98, doi: 10.3847/1538-4357/ac590d Howard, R. A., Moses, J. D., Vourlidas, A., 等, 2008, 《空间科学评论》, 136, 67, doi: 10.1007/s11214-008-9341-4 Iwai, K., Kubo, Y., Ishibashi, H., 等, 2017, 《地球、行星与空间》, 69, 95, doi: 10.1186/s40623-017-0681-8 Jess, D. B., Mathioudakis, M., Erd´elyi, R., 等, 2009, 《科学》, 323, 1582, doi: 10.1126/science.1168680 Kaiser, M. L., Kucera, T. A., Davila, J. M., 等, 2008, 《空间科学评论》, 136, 5, doi: 10.1007/s11214-007-9277-0

Kennewell, J., & Steward, G. 2003, 太阳射电频谱仪 [SRS] 数据查看器 [srsdisplay](悉尼: IPS 射电与空间服务) Kondo, T., Isobe, T., Igi, S., Watari, S., & Tokimura, M. 1995, 通信研究实验室期刊, 42, 111 Lemen, J. R., Title, A. M., Akin, D. J., 等, 2012, 太阳物理学, 275, 17, doi:10.1007/s11207-011-9776-8Li, C., Fang, C., Li, Z., 等, 2022, 中国科学: 物理学、力学、天文学, 65, 289602, doi: 10.1007/s11433-022-1893-3Liu, W., & Ofman, L. 2014, 太阳物理学, 289, 3233, doi: 10.1007/s11207-014-0528-4Long, D., Deluca, E. E., & Gallagher, P. T. 2010, 收录于美国地球物理联合会秋季会议摘要, 第2010卷, SH23A–1825 Long, D. M., DeLuca, E. E., & Gallagher, P. T. 2011, 《天体物理学杂志快报》, 741, L21, doi: 10.1088/2041-8205/741/1/L21Long, D. M., Jenkins, J., & Valori, G. 2019, 《天体物理学杂志》, 882, 90, doi:10.3847/1538-4357/ab338dMann, G. 1995, 等离子体物理学杂志, 53, 109, doi: 10.1017/S0022377800018043Meyer, F. 1968年, 收录于《太阳活动区的结构与演化》, 编者 K. O. Kiepenheuer, 第35卷, 485 Moreton, G. E. 1960, 《天文学杂志》, 65, 494, doi: 10.1086/108346Moreton, G. E., & Ramsey, H. E. 1960, 《太平洋天文学会出版物》, 72, 357, doi: 10.1086/127549Moses, D., Clette, F., Delaboudini`ere, J. P., 等, 1997, 太阳物理学, 175, 571, doi: 10.1023/A:1004902913117Nakariakov, V. M., Ofman, L., Deluca, E. E., Roberts, B., & Davila, J. M. 1999, 《科学》, 285, 862, doi: 10.1126/science.285.5429.862O'Dwyer, B., Del Zanna, G., Mason, H. E., Weber, M. A., & Tripathi, D. 2010, 《天文学与天体物理学》, 521, A21, doi: 10.1051/0004-6361/201014872Ofman, L., & Thompson, B. J. 2002, 《天体物理学杂志》, 574, 440, doi: 10.1086/340924Panasenco, O., Martin, S. F., Velli, M., & Vourlidas, A. 2013, 太阳物理学, 287, 391, doi: 10.1007/s11207-012-0194-3

Patsourakos, S., &Vourlidas,A.2012, 太阳物理学,281, 187,doi：10.1007/s11207-012-9988-6Pesnell, W. D., Thompson, B. J.,&Chamberlin, P. C. 2012, 太阳物理学, 275, 3, doi：10.1007/s11207-011-9841-3Shen,Y., &Liu, Y.2012, 《天体物理学杂志快报》,752,L23, doi：10.1088/2041-8205/752/2/L23Su, Y., Veronig, A. M., Hannah,I. G.,等，2018, 《天体物理学杂志快报》, 856, L17,doi：10.3847/2041-8213/aab436Thompson, B. J.,Plunkett,S. P.,Gurman, J.B., 等，1998, Geophys. Res.Lett.,25, 2465, doi：10.1029/98GL50429Uchida, Y. 1968年,太阳物理学,4, 30, doi：10.1007/BF00146996—. 1974年, 太阳物理学, 39,431,doi：10.1007/BF00162436Vrˇsnak, B., & Cliver, E.W. 2008,太阳物理学, 253,215, doi：10.1007/s11207-008-9241-5ˇVrˇsnak, B., Zic,T., Luli´c, S., Temmer,M., & Veronig,A. M. 2016, 太阳物理学,291,89, doi：10.1007/s11207-015-0822-9 Vrˇsnak, B., Warmuth, A., Brajˇsa, R., & Hanslmeier, A. 2002年，《天文学与天体物理学》, 394，299，doi：10.1051/0004-6361:20021121Wang, J., Yan, X., Kong, D. 等，2020年，《天体物理学杂志》, 894，30，doi：10.3847/1538-4357/ab8565Wang, Y. M. 2000年，《天体物理学杂志快报》，543，L89，doi：10.1086/318178Warmuth, A. 2015年，《太阳物理学综述》，12，3，doi：10.1007/lrsp-2015-3Warmuth, A., Vrˇsnak, B., Aurass, H., & Hanslmeier, A. 2001年，《天体物理学杂志快报》，560，L105，doi：10.1086/324055Wu, S. T., Zheng, H., Wang, S. 等，2001年，《地球物理研究杂志》，106，25089，doi：10.1029/2000JA000447