

特色专题

2024 年 5 月特大地磁暴的首个太阳爆发触发过程研究

宿英娜^{1,2}, 欧雨迪^{1,2}, 张潇文³, 万双峰^{1,2}, 滕伟霖^{1,2}, 季海生^{1,2}

摘要 重点研究了 2024 年 5 月 10—11 日特大地磁暴事件的系列太阳爆发的“先锋官”,即发生在 5 月 8 日的 X1.0 级耀斑的触发过程。多波段观测显示,该事件的太阳源区包含 2 个密不可分的活动区 AR13668 和 AR13664。活动核心区存在 4 个暗条,相应的高温波段表现为 4 组亮的热冕环结构,对应非线性无力场模型中的 1 个扭缠磁绳和 3 个弱扭缠的剪切磁拱。分析 X1.0 级耀斑的复杂触发过程,发现其伴随 2 个 M 级耀斑和 2 个热通道的爆发。发生在第 1 个 M 级耀斑期间的热通道 HC1 的爆发为热通道 HC2 形成后便迅速进入快速上升相提供了有利条件,而 HC2 的快速上升又推进了 HC1 的快速爆发,最终二者合并为一体成功抛出后,形成一个晕状日冕物质抛射。多波段观测和非线性无力场联合分析表明,热通道 HC2 的形成是光球磁对消引发的 2 组剪切磁拱的磁绳截断磁重联所致,该过程发生在第 2 个 M 级耀斑期间,随后热通道 HC2 的快速上升触发了 X1.0 级耀斑的开始。揭示了 2024 年 5 月特大地磁暴的首个日面爆发触发的复杂过程,即多个耀斑和热通道爆发的耦合,推动对极端空间天气事件日面爆发的触发过程的深入理解。

关键词 地磁暴;太阳耀斑;日冕物质抛射;热通道;磁场

由具有地磁效应的太阳风暴引发的剧烈空间天气已被公认为一种自然灾害。研究表明,约每 50~100 年发生一次的极端地磁暴事件^[1],可能引发技术系统的大规模瘫痪,但预测这类太阳风暴及其具体影响仍存在显著挑战。2024 年 5 月 10—11 日,发生了自 2003 年 11 月以来最强的地磁暴,其 Dst 指数峰值达到 -412 nT ^[2]。此极端空间天气事件源自 2024 年 5 月

8—9 日在太阳活动区 13668/13664 发生的 4 个与 X 级或 M 级太阳耀斑相关的晕状日冕物质抛射 (coronal mass ejections, CME) 在传播期间的相互作用。这本质上是一种“完美风暴”,即多种因素共同作用,最终导致了一场异常规模的地磁暴^[3]。

采用基于物理信息神经网络 (physics-informed neural networks) 的 NF2 非线性无力场外推代码对该太阳源区开展三维磁场重构,研究发现约 90% 的耀斑事件与相对自由磁能的减少有关^[1]。研究关注的爆发事件期间均存在异常强烈的磁通量浮现,这些爆发沿极性反转线 (polarity inversion line, PIL) 在碰撞剪切作用下产生^[4]。

1. 中国科学院紫金山天文台暗物质与空间天文重点实验室,南京 210023

2. 中国科学技术大学天文与空间科学学院,合肥 230026

3. 加利福尼亚大学伯克利分校文理学院,伯克利 94720

收稿日期: 2025-04-21; 修回日期: 2025-06-09

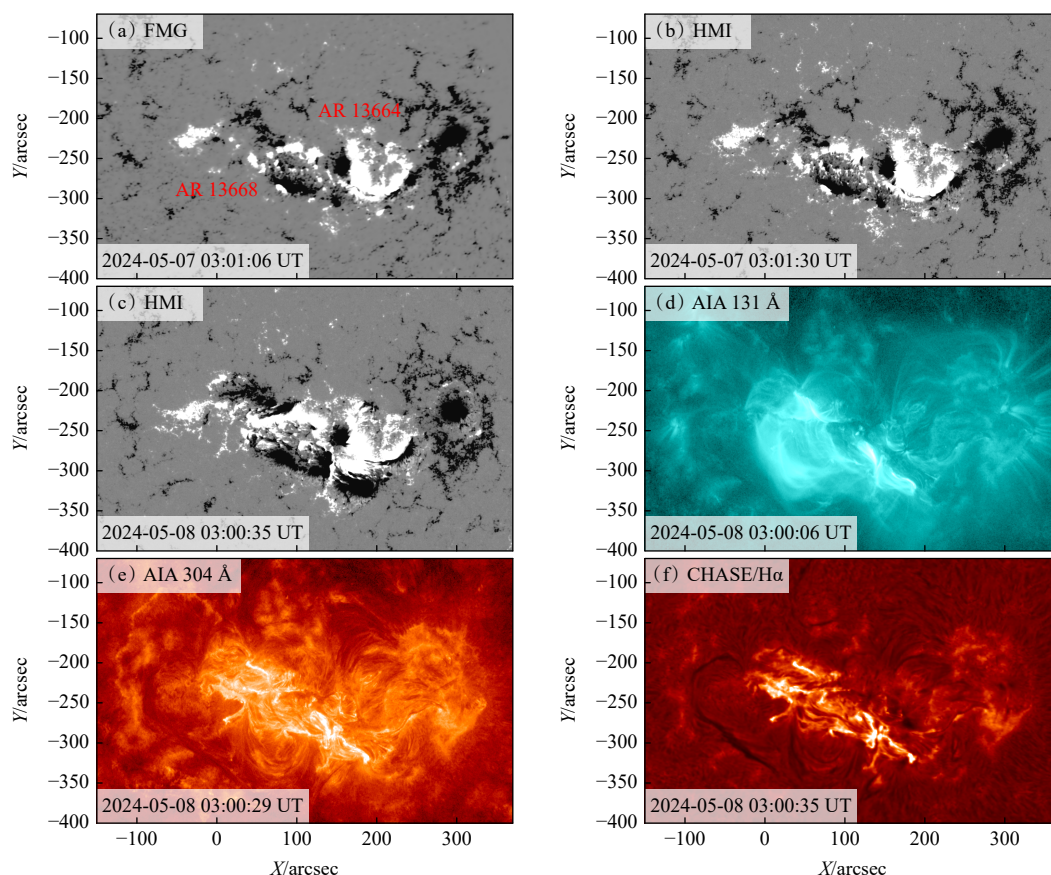
基金项目: 中国科学院基础与交叉前沿科研先导专项(B类)(XDB0560000); 国家重点研发计划项目(2022YFF0503001, 2021YFA1600502); 国家自然科学基金委员会面上项目(12173092)

作者简介: 宿英娜, 研究员, 研究方向为太阳物理, 电子信箱: ynsu@pmo.ac.cn

引用格式: 宿英娜, 欧雨迪, 张潇文, 等. 2024 年 5 月特大地磁暴的首个太阳爆发触发过程研究[J]. 科技导报, 2025, 43(16): 105-113; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.04.00097

2024年4月30日出现在日面东边缘的AR13664与随后数日浮现的AR13668合并形成一个复杂的超级活动区^[3],如图1所示。在随太阳自转从东向西运动的过程中,该活动区连续产生了一系列M/X级耀

斑和CME,其中包括12个X级耀斑^[5]。在本研究中,重点关注引发2024年5月特大地磁暴的太阳源区爆发事件中的首个X1.0级耀斑的触发和演化过程。



(a)~(b)和(c)~(f)中的图像分别拍摄于2024年5月7日03:01 UT和2024年5月8日03:00 UT。(a)~(b)耀斑发生1天前ASO-S/FMG和SDO/HMI拍摄的视向光球磁图(2024年5月7日03:01 UT);(c)SDO/HMI拍摄的视向光球磁图(2024年5月8日03:00 UT);(d)~(e)SDO/AIA拍摄的131 Å和304 Å的图像;(f)CHASE拍摄的H α 线心的图像

图1 爆发前的太阳源区概况

1 数据和仪器

美国SDO(太阳动力学天文台, Solar Dynamics Observatory)^[6]的全日面观测覆盖了爆发全过程:大气成像组件(atmospheric imaging assembly, AIA)^[7]可以提供7个远紫外(EUV)波段(94 Å、131 Å、171 Å、193 Å、211 Å、304 Å、335 Å)图像,时间分辨率为12 s,空间分辨率1.2";日震与磁场成像仪(Helioseismic and Magnetic Imager, HMI)^[8]提供时间分辨率为45 s的视向磁图、多普勒速度图和时间分辨率720 s的矢量磁图,空间分辨率为1"。本文用到了搭载在中国“夸父一号”(Advanced Space-based Solar Obser-

vatory, ASO-S)卫星^[9]上的全日面矢量磁像仪(Full-disk vector Magnetograph, FMG)^[10-11]、莱曼阿尔法太阳望远镜(Lyman- α Solar Telescope, LST)^[12]和太阳硬X射线成像仪(Hard X-ray Imager, HXI)^[13]的观测数据。其中,FMG利用磁敏感线Fe I 5234.19 Å,通过斯托克斯偏振测量获取全日面光球磁场数据,像素大小为0.55",时间分辨率为2 min。全日面成像仪(solar disk imager, LST/SDI)提供Ly α 波段的全日面成像,像素大小为0.5",空间分辨率为9.5",时间分辨率分别可达1 min(常规模式)和6 s(爆发模式)。HXI是基于傅立叶空间调制的硬X射线成像仪,其空

间分辨率可达 3.1", 时间分辨率可达 4 s(常规模式)。H α 全日面太阳图像源自中国“羲和号”(Chinese H α Solar Explorer, CHASE)卫星^[14]上搭载的 H α 成像光谱仪(H α Imaging Spectrograph, HIS), 时间分辨率达 1 min, 每个像素为 0.52"。

2 观测结果

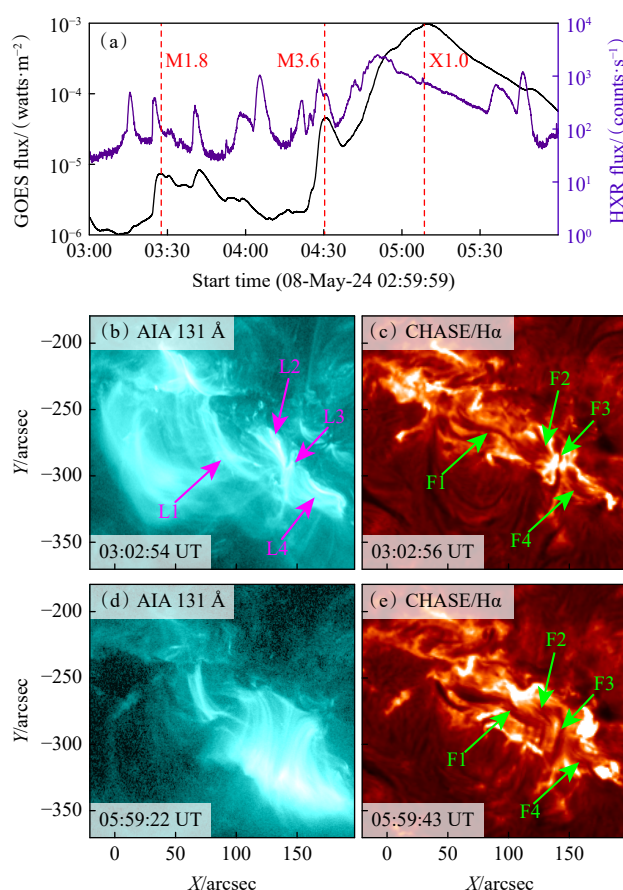
2.1 太阳爆发及源区概况

图 1 展示了耀斑前活动区的多波段观测图像。ASO-S/FMG 和 SDO/HMI 的视向光球磁图(图 1(a)~(c))显示源区磁场由 2 个活动区(AR13668 和 AR13664)的多对磁极构成, 其结构十分复杂。对比几幅磁图可以看出, 爆发前 1 天内, 太阳源区尤其是核心活动区 AR13664 存在强烈的磁浮现过程。活动核心区存在多组热冕环(图 1(d)), 其足点表现为多条亮带(图 1(e)), 相应的 CHASE 卫星的 H α 观测呈现出多个暗条(图 1(f))。

图 2(a)中的 GOES 卫星软 X 射线光变曲线显示, 研究关注的 X1.0 级耀斑峰值在 05:09 UT。研究发现, 在此之前 1.5 h 内发生的 M1.8 级(峰值时刻 03:27 UT)和 M3.6 级(峰值时刻 04:30 UT)耀斑均与该 X1.0 级耀斑密切相关。AIA 131 Å 观测显示爆发前活动核心区存在 4 组高度剪切的热冕环(图 2(b)中的 L1、L2、L3、L4), 与 CHASE/H α 观测图像(图 2(c))中的 4 个暗条(F1、F2、F3、F4)对应。爆发前的 4 组热冕环在爆发后演化为一组拱形冕环(图 2(d))。而与之对应的 4 个暗条在爆发前后并无显著变化, 如图 2 中的 CHASE/H α 在爆发前后的图像(图 2(c)和(e))所示。

2.2 3 个耀斑和 2 个热通道的爆发

接下来展示整个爆发的演化过程。在 03:02 UT, 主体位于活动区 AR 13668 的热通道 HC1 开始出现, 如图 3 第 1 行的粉色虚线所示。随后, 该热通道缓慢上升并不断扩张, 如图 3 中第 1 行的 131 Å 序列图像所示。热通道 HC1 的上升发生在第 1 个 M1.8 级耀斑期间, 在 131 Å 和 304 Å 图像中分别出现增亮的冕环和耀斑带(图 3)。该耀斑期间冕环和耀斑带最亮的区域位于活动区 13664, 与 HXI 在 10~20 keV 的源(图 3(e)和(f))在空间位置上一致。

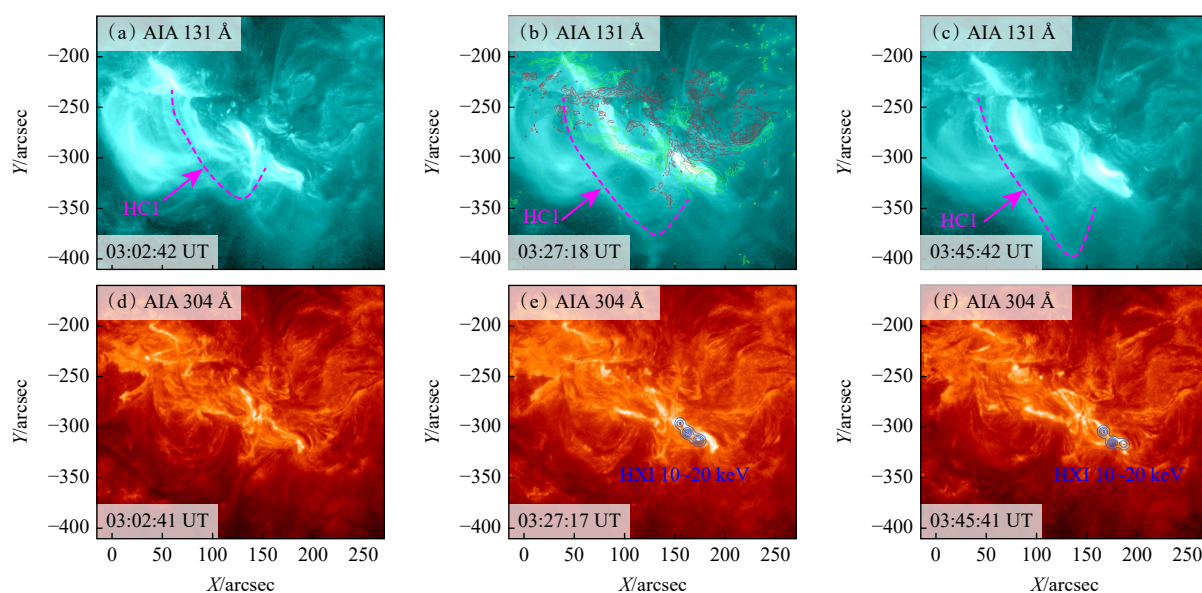


(a) ASO-S/HXI 硬 X 射线(10~20 keV, 紫色曲线)和 GOES 软 X 射线(1~8 Å, 黑色曲线)的光变曲线, 3 条竖直的红色虚线表示 3 个耀斑峰值时刻; (b)~(e) 展示了 SDO/AIA 和 CHASE 分别在 131 Å((b)(d)) 和 H α 线心((c)(e))拍摄的爆发前和爆发后的核心活动区的图像

图 2 爆发概况总览

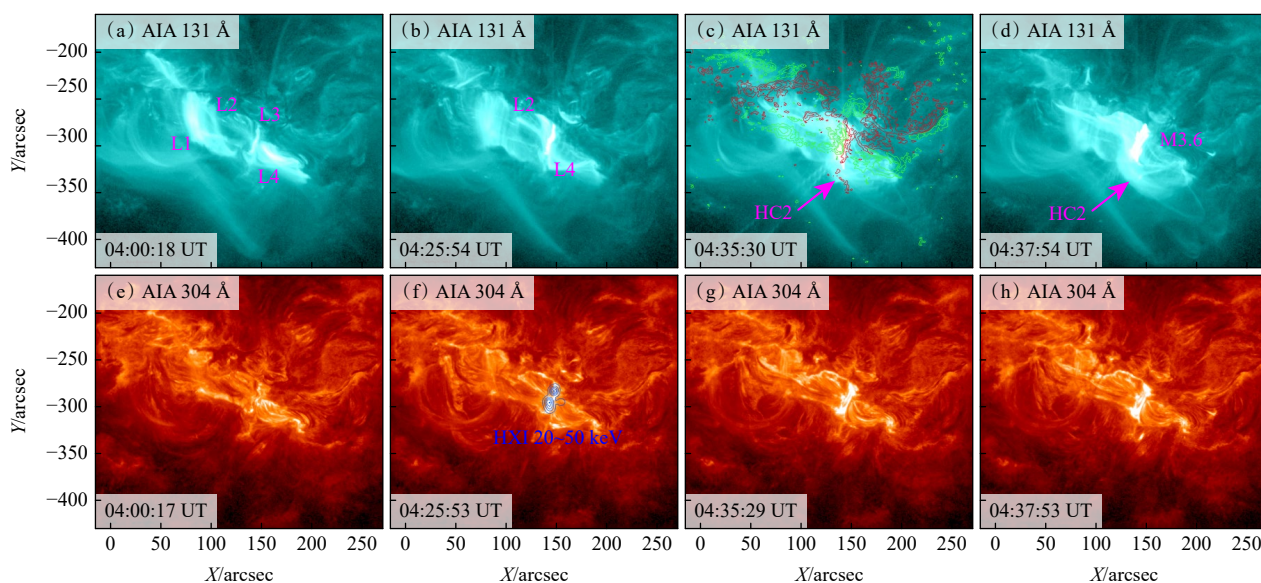
热通道 HC1 上升一段时间后, 原冕环 L3 开始显著增亮, 随后形成一个跨越 L3 的新热通道 HC2, 如图 4 中第 1 行的 AIA 131 Å 序列图像所示。相应的 304 Å 序列图像显示, 增亮的原冕环 L3 区出现显著增亮的亮带(图 4 第 2 行), 与 HXI 20~50 keV 波段探测到硬 X 射线源空间位置一致(图 4(f))。热通道 HC2 的形成过程发生在 M3.6 耀斑期间。

热通道 HC2 形成之后便迅速开始快速上升, 在与位于其上方的热通道 HC1 合并后, 形成一个跨越 2 个活动区的大尺度热通道, 最后一起抛射出去, 如图 5 第 1 行(131 Å)和第 2 行(131 Å 差分)的时间序列图像所示。合并后的热通道在后续上升过程中不断向西部扩张, 对应 AIA 304 Å 和 LST/SDI 观测到的亮点的滑动(图 5(k)和(o), 绿/粉色带箭头的虚线所示)。2 个热通道的合并和上升过程发生在 X1.0 级耀



(a)~(c) AIA 131 Å 的 3 幅图像显示了 HC1 的初始爆发过程, 粉色箭头标记热通道 HC1; (b) 中的红/绿等值线表示 SDO/HMI 观测的视向磁图的正/负磁极。(d)~(f) 为与 (a)~(c) 对应的 3 幅 AIA 304 Å 图像; 图 (e)~(f) 中的蓝色等值线表示 HXI 在 03:24 UT 的 10~20 keV 成像, 其中, HXI 成像使用了“CLEAN”的算法进行图像重构

图 3 热通道 HC1 的演化



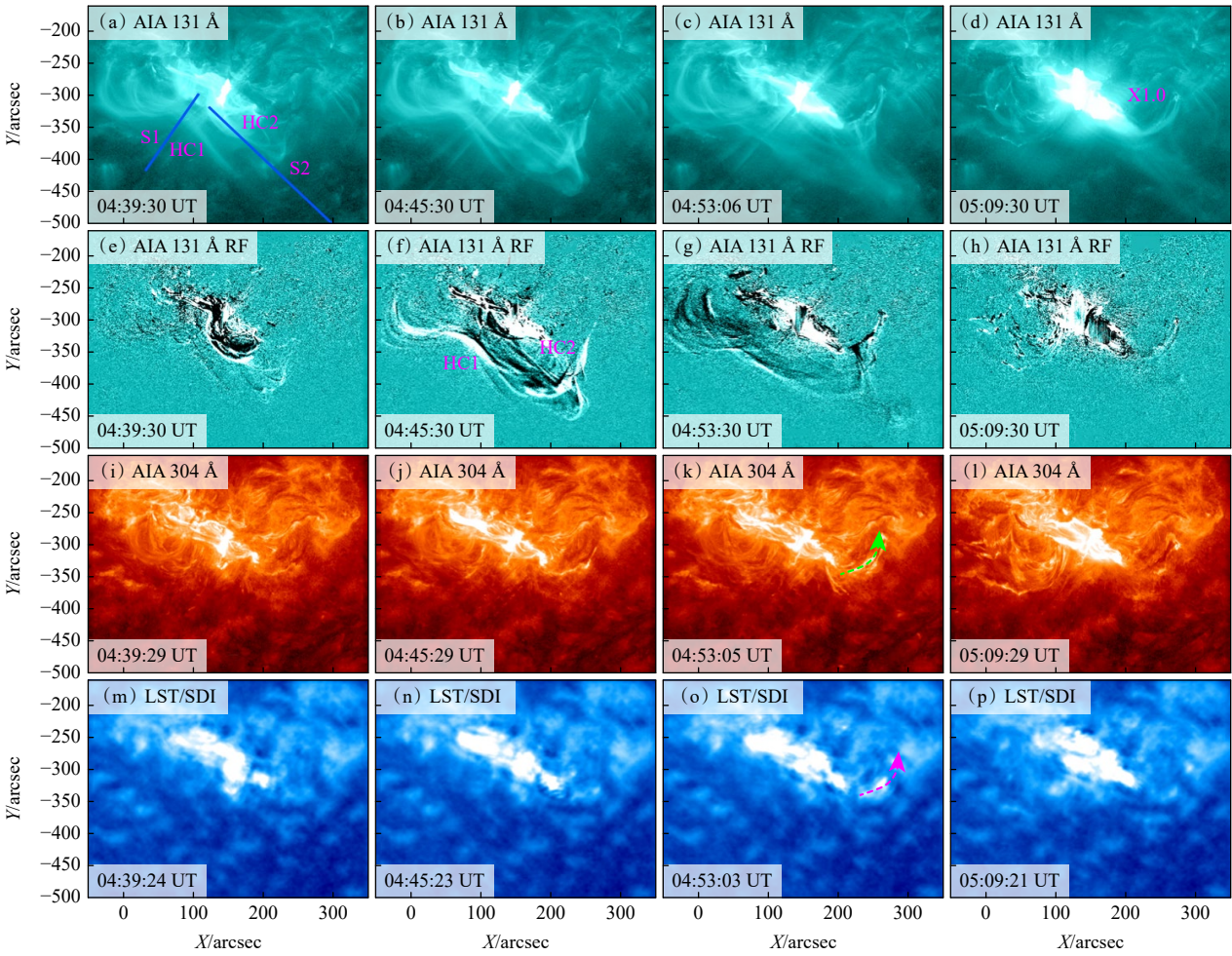
(a)~(d) AIA 131 Å 的 4 个时刻的观测图像, 粉色箭头标记热通道 HC2; (c) 中的红/绿等值线表示 SDO/HMI 观测的视向光球磁图的正/负磁极; (e)~(h) 为与 (a)~(d) 对应的 AIA 304 Å 观测图像; 图 (f) 中的蓝色等值线表示 HXI 在 04:27 UT 的 20~50 keV 成像

图 4 热通道 HC2 的形成

斑的上升相, 其间原冕环 L3 处的增亮一直最强, 而 AR13668 和 AR13664 的其他区域也呈现出不同强度的亮环(图 5 的第 1、2 行)和亮带(图 5 的第 3、4 行)。热通道成功抛射出去后, X1.0 级耀斑达到峰值(05:09 UT)。

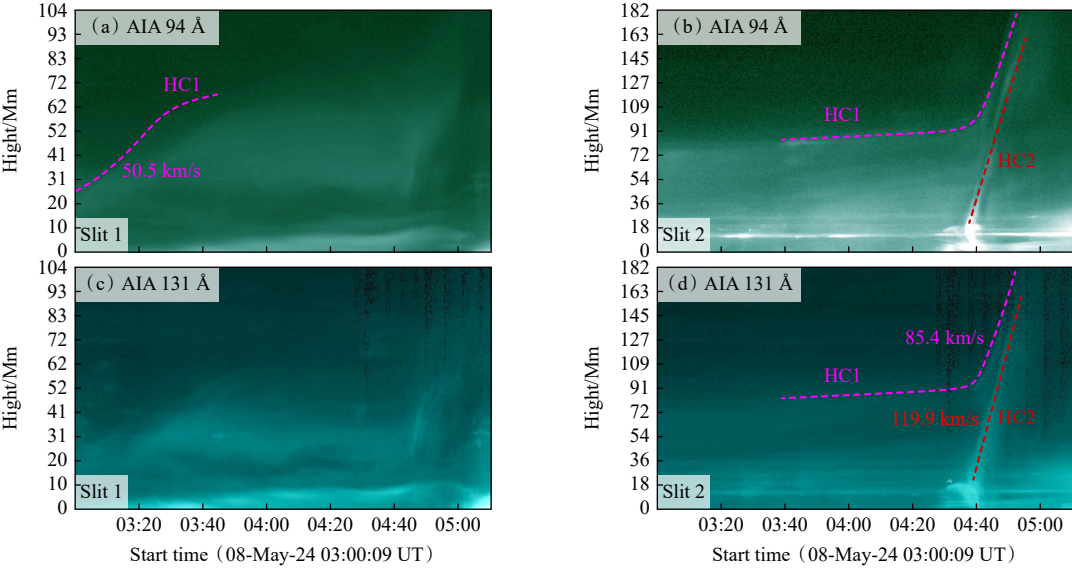
为了更好地分析 2 个热通道的爆发过程, 沿图

5(a) 中 2 个热通道的爆发方向(S1 和 S2)做了 94 Å 和 131 Å 的观测时距图, 如图 6 所示。图 6 中显示热通道 HC1 自 03:00 UT 开始上升(速度: 50.5 km/s)直至 03:40 UT 左右, 之后上升速度变得极其缓慢。大约 1 h 后, 热通道 HC2 形成后便快速上升(速度: 119.9 km/s), 没有经历缓慢上升阶段, 随后位于其上方



(a)中的 S1 和 S2 分别表示 HC1 和 HC2 的初始爆发方向;(k)和(o)中的绿/粉色虚线箭头表示热通道爆发期间西部足点增亮的传播方向

图 5 AIA 131 Å、131 Å 差分、304 Å和 LST/SDI 图像中热通道 HC1 和 HC2 的爆发过程



(a)~(b)(94 Å)和(c)~(d)(131 Å)分别显示沿 2 个热通道初始爆发方向(图 5(a)中 slit1 和 slit2)的观测时距图, 热通道发 HC1 和 HC2 的外边缘分别用粉色和红色虚线标记

图 6 爆发热通道的观测时距图

的热通道 HC1 也进入快速上升阶段(速度: 85.4 km/s)。从图 6 中可以看出热通道 HC2 快速上升开始时刻比热通道 HC1 稍早, 且 HC2 上升速度更快。

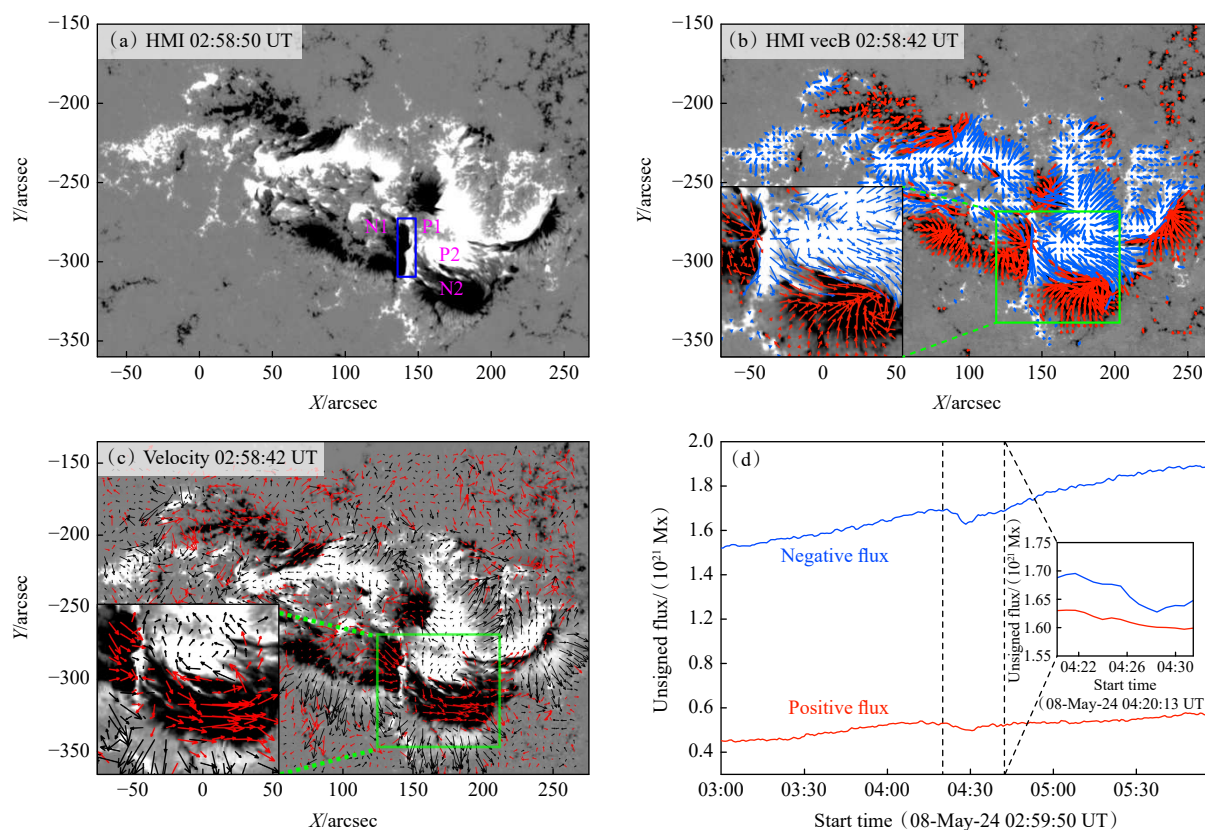
2.3 爆发前的源区磁场演化

X1.0 级耀斑期间, 最亮的冕环和耀斑带对应的光球磁场是一对紧密靠近的磁极(P1, N1), 如图 7(a)中蓝框所示。这对磁极之间的矢量磁场呈现出高度剪切特征, 即横场方向(红蓝箭头)几乎与两者之间的极性反转线平行, 如图 7(b)中局部放大的光球矢量磁图。Wang 等^[4]指出这对磁极之间存在碰撞剪切。图 7(b)显示磁极(P1, N1)西部的一对磁极(P2, N2)也是高度剪切的。光球磁场随时间的长期演化表明, 磁极 N1 一直在向西部快速移动, 不断挤压 P1。磁极 N2 也在不断向西快速移动, 而磁极 P2 主体呈现出顺时针旋转运动, 靠近磁中性线的部分呈现出向东运动的趋势, 如图 7(c)中的光球速度图显示。图 7(a)中蓝

框区域中的正负磁通量随时间的演化曲线(图 7(d))表明, 在 3 个耀斑期间的大大部分时间里, N1 和 P1 的极性反转线附近区域内的磁通量(尤其是负磁通量)在增大, 而热通道 HC2 形成前 10 min 内出现短时间的显著磁对消。负磁通量的增大主要是因为磁极 N1 的向西运动导致更多负磁通量进入蓝框区域, 而 10 min 左右短时间的显著对消与热通道的形成紧密相关。

3 非线性无力场重建和讨论

了解日冕磁场的三维结构是理解太阳爆发触发机制的前提。由于观测技术限制, 目前尚无法对日冕磁场进行常规直接观测, 因此发展了多种利用光球磁场来重建日冕磁场的方法^[15]。为了进一步研究热通道 HC2 的形成和 X1.0 级耀斑的触发, 采用“最优化法”^[16], 以 03:12 UT 的 HMI 光球矢量磁场为边界, 构



(a)~(b)为 SDO/HMI 拍摄的爆发前的视向光球磁图和光球矢量磁图; (b)中的背景图显示磁场的垂直分量, 蓝色(正)和红色(负)箭头表示横向磁场, 其强度由箭头的长度表示; (c)背景图为矢量磁图的垂直分量, 正(白色)和负(黑色)垂直磁场分量上的速度场分别由黑色和红色箭头表示; (d)为(a)中蓝框所包围区域内的正(红色)和负(蓝色)磁通量随时间的演化, 插图显示了 04:20~04:32 UT 时间范围内磁通量变化的放大图

图 7 爆发前的源区磁场分布及演化

建了该活动区的三维非线性无力场模型。

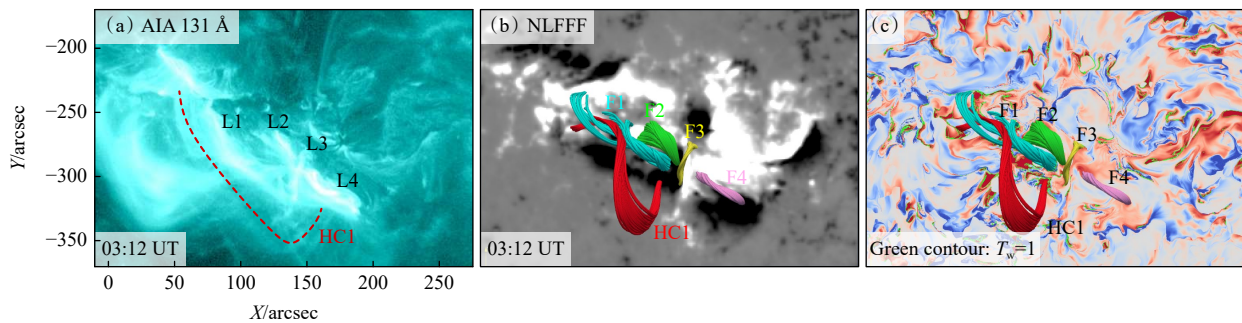
图 8 展示了 AIA 131 Å 的观测和非线性无力场模型的对比。观测中的 4 组亮冕环 L1~L4(图 8(a))与模型中的 4 组磁力线 F1~F4(图 8(b))对应,这些磁力线还与图 2 中 CHASE/H α 图像的 4 个暗条的位置和形状符合较好。而观测的热通道 HC1 与模型中对应的磁场结构在形态上有些差别。图 8(c)显示 HC1 和 F1 为磁扭缠数^[17]大于 1 的磁通量绳结构,而其他 3 组磁力线的磁扭缠数均小于 1,对应弱扭缠的剪切磁拱。

图 9 展示了热通道 HC2 形成前和爆发后该活动区的非线性无力场模型的对比。从图中可以看出,HC2 形成前后,磁拱 F2 和 F4 发生显著变化,即 HC2 形成后同一位置可追踪的 2 组磁力线都减少了。具体而言,图 9 中的局部放大磁扭缠分布图显示扭缠数大于

0.7 的面积减小了。模型中磁拱 F2 和 F4 中磁力线的减少,再结合热通道 HC2 形成的观测及其形成前 10 min 的磁极 P1 和 N1 之间的磁对消,推测热通道 HC2 的形成是源自光球磁对消引发的剪切磁拱 F2 和 F4 之间的缆绳截断(tether-cutting)磁重联^[18]。

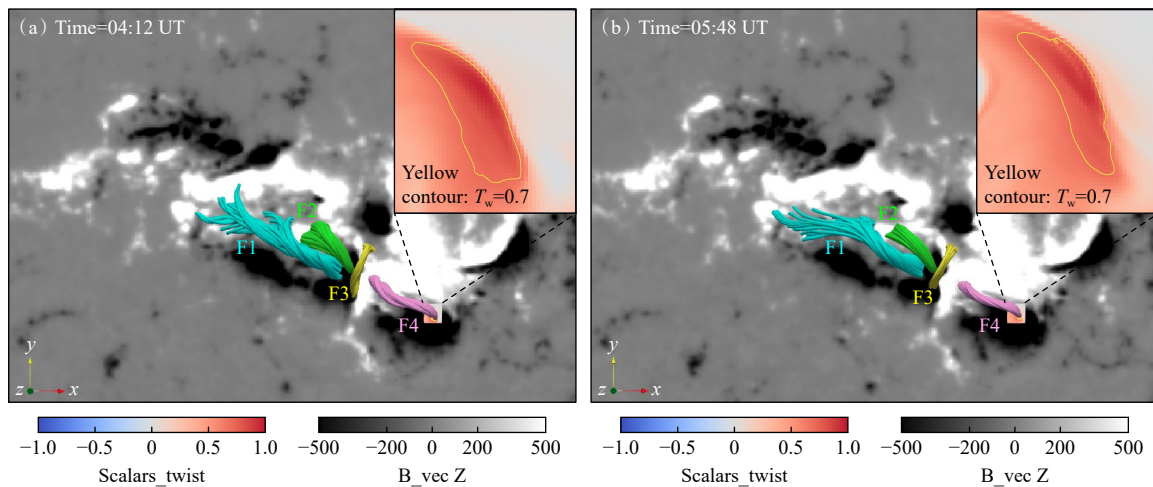
4 结论

2024 年 5 月 10—11 日发生了自 2003 年 11 月以来最强的地磁暴事件, Dst 峰值指数达到 -412 nT。该极端空间天气事件的太阳爆发源头为 AR13668 和 AR13664 发生的一系列大耀斑和晕状 CME。本文采用多波段观测和非线性无力场外推,重点分析其中的首个 X1.0 级耀斑的触发过程。



(a) 为 03:12 UT 时刻的 AIA 131 Å 图像,红色点线表示热通道 HC1; (b)~(c) 背景图分别为 03:12 UT 的 HMI 光球视向磁图和非线性无力场模型中的磁扭缠分布图,蓝色、绿色、黄色和粉色曲线分别对应图 2 中的暗条 F1、F2、F3 和 F4,而红色曲线与(a)中的热通道 HC1 对应; (c) 中的绿色等值线对应的磁扭缠数为-1

图 8 观测和非线性无力场模型对比



(a) 和 (b) 中对应 F1、F2、F3 和 F4 的磁力线是从同一位置追踪的,例如粉线 F4 是从其右足点开始追踪的磁扭缠数大于 0.7

(局部放大图)的一组磁力线

图 9 热通道 HC2 形成前和爆发后,活动区 AR13664 非线性无力场模型的对比

该事件的太阳爆发源区的磁场结构和 2024 年 5 月 8 日 X1.0 级耀斑的触发过程均十分复杂。爆发前核心区存在多个暗条和亮的热冕环。在 X1.0 级耀斑之前 1.5 h 内发生的 2 个 M 级耀斑和 2 个热通道的爆发均与该耀斑的触发密切相关,然而活动区的暗条均未发生显著变化。第 1 个 M 级耀斑伴随热通道 HC1 的出现和爆发,而该热通道在以 50.5 km/s 的速度上升到一定高度后,便进入了长达 1 h 的极其缓慢的上升阶段。接下来,碰撞剪切极性反转线附近的光球磁对消引发的磁绳截断磁重联导致热通道 HC2 的形成,其形成过程伴随第 2 个 M 级耀斑。有趣的是,热通道 HC2 形成之后,并未经过常见的缓慢上升阶段,而是迅速以 119.9 km/s 的速度直接进入快速上升阶段,随后 X1.0 级耀斑开始。HC2 的爆发又促进了位于其上方的热通道 HC1 的快速(85.4 km/s)上升,最终 2 个热通道合并为一体成功抛射出去,并产生一个速度为 530 km/s 的晕状 CME。

研究表明,该特大地磁暴事件由多个大耀斑及伴随的晕状 CME 相互作用所致。其中的首个 X1.0 级耀斑的触发伴随 2 个 M 级耀斑和 2 个热通道的爆发。发生在第 1 个 M 级耀斑期间的热通道 HC1 的爆发,为第 2 个 M 级耀斑期间热通道 HC2 形成后迅速进入快速上升阶段提供了有利条件,而 HC2 的快速上升又进一步推进 HC1 的快速爆发和 X1.0 级耀斑的开始。本研究揭示了特大地磁暴源区爆发的复杂性,展示了多个耀斑和磁绳的相继爆发与相互作用可能是引起这次“完美风暴”的首个 X1.0 级耀斑的原因。

参考文献(References)

- [1] Weiler E, Mostl C, Davies E E, et al. First observations of a geomagnetic superstorm with a Sub-L1 monitor[J]. Space weather, 2025, 23(3), arXiv: 2411.12490v3.
- [2] Jarolim R, Veronig A M, Purkhart S, et al. Magnetic field evolution of the solar active region 13664[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2024, 976(1): L12.
- [3] Liu Y D, Hu H D, Zhao X W, et al. A pileup of coronal mass ejections produced the largest geomagnetic storm in two decades[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2024, 974(1): L8.
- [4] Wang R, Liu Y D, Zhao X W, et al. Unveiling key factors in solar eruptions leading to the solar superstorm in 2024 May[J]. Astronomy & Astrophysics, 2024, 692: A112.
- [5] Li Y, Liu X F, Jing Z C, et al. Various features of the X-class white-light flares in super active region NOAA 13664[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2024, 972(1): L1.
- [6] Pesnell W D, Thompson B J, Chamberlin P C. The solar dynamics observatory (SDO)[J]. Solar Physics, 2012, 275(1-2): 3-15.
- [7] Lemen J R, Title A M, Akin D J, et al. The atmospheric imaging assembly (AIA) on the solar dynamics observatory (SDO)[J]. Solar Physics, 2012, 275(1-2): 17-40.
- [8] Scherrer P H, Schou J, Bush R I, et al. Scherrer P H, Schou J, Bush R I, et al. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO)[J]. Solar Physics, 2012, 275(1-2): 207-227.
- [9] Gan W Q, Zhu C, Deng Y Y, et al. The advanced space-based solar observatory (ASO-S)[J]. Solar Physics, 2023, 298(5): 68.
- [10] Su J T, Bai X Y, Chen J, et al. Data reduction and calibration of the FMG onboard ASO-S[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2019, 19(11): 161.
- [11] Liu S, Su J T, Bai X Y, et al. The magnetic-field calibration of the full-disk magnetograph onboard the advanced space based solar observatory (ASO-S/FMG)[J]. Solar Physics, 2023, 298(12): 141.
- [12] Feng L, Li H, Chen B, et al. The Lyman-alpha Solar Telescope (LST) for the ASO-S mission-III. data and potential diagnostics[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2019, 19(11): 162.
- [13] Su Y, Liu W, Li Y P, et al. Simulations and software development for the hard X-ray imager onboard ASO-S[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2019, 19(11): 163.
- [14] Li C, Fang C, Li Z, et al. The Chinese Ha solar explorer (CHASE) mission: An overview[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2022, 65(8): 289602.
- [15] Su Y N. Studying solar eruptions from reconstructed magnetic field[J]. Acta Astronomica Sinica, 2019, 60(1): 2.
- [16] Wiegmann T, Inhester B. How to deal with measurement errors and lacking data in nonlinear force-free coronal magnetic field modelling?[J]. Astronomy and Astrophysics, 2010, 516: A107.
- [17] Liu R, Kliem B, Titov V S, et al. Structure, stability, and evolution of magnetic flux ropes from the perspective of magnetic twist[J]. The Astrophysical Journal, 2016, 818(2): 148.
- [18] Moore R L, Sterling A C, Hudson H S, et al. Onset of the magnetic explosion in solar flares and coronal mass ejections[J]. The Astrophysical Journal, 2001, 552(2): 833-848.

Study on the initiation of the first solar eruption triggering the May 2024 geomagnetic storm

SU Yingna^{1,2}, OU Yudi^{1,2}, ZHANG Xiaowen³, WAN Shuangfeng^{1,2}, TENG Weilin^{1,2}, JI Haisheng^{1,2}

1. Key Laboratory for Dark Matter and Space Science, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China

2. School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

3. College of Letters and Science, University of California, Berkeley 94720, USA

Abstract This article focuses on the triggering process of an X1.0 class flare that occurred on May 8, which is the first event in a series of solar eruptions related to the massive geomagnetic storm event on May 10–11, 2024. Multi-wavelength observations show that the solar source region of this event is composed of two closely-related active regions, AR 13668 and AR 13664. There are four filaments in the core area of the activity, and the corresponding high-temperature observations exhibit four sets of bright corona loops, corresponding to one twisted magnetic flux rope and three weakly twisted sheared magnetic arcades in the nonlinear force-free field model. The complex triggering process of X1.0 class flares is analyzed, and it is found that they are associated with the eruption of two M-class flares and two hot channels. The eruption of the hot channel HC1 during the first M-class flare provides favorable conditions for the fast rise of the hot channel HC2 after its formation, which in turn propels the fast rise of HC1. Eventually, the two hot channels merge and successfully erupt, forming a halo coronal mass ejections. The joint analysis of multi-wavelength observations and nonlinear force-free field shows that the formation of the hot channel HC2 is caused by the tether-cutting magnetic reconnection of two sheared magnetic arcades triggered by the magnetic flux cancellation. This process occurs during the second M-class flare, and the fast rise of the hot channel HC2 subsequently triggers the onset of the X1.0 class flare. The study reveals the complex triggering process of the first X-class solar flare related to the massive geomagnetic storm in 2024 May, which involves coupling between multiple flares and hot channel eruptions, deepening our understanding of the triggering process of extreme space weather events in the source region.

Keywords geomagnetic storm; solar flare; coronal mass ejection; hot channel; magnetic field ●



(责任编辑 王丽娜)