

特色专题

2024 年 5 月太阳活动区 13664 磁场演化及其极端空间天气事件研究综述

周桂萍^{1,2}, 周振军³, 张小凡^{1,2}, 林伟^{1,2}, 万庆涛^{1,2}

摘要 2024 年 5 月 10—11 日, 太阳活动区(AR)13664 爆发了自卡林顿事件(1859 年)以来最强的太阳风暴事件之一, 引发了 G5 级地磁暴(地磁扰动指数达 -412 nT)和全球范围的极光现象。AR 13664 呈现致密复杂的磁场分布, 伴随快速磁场演化与高活动性, 如丰富的磁场浮现、拓扑重构与产生多个耀斑和日冕物质抛射(CME)等。由此 AR 13664 是否代表强烈太阳爆发的能量积累和释放的典型过程, 使其成为研究磁场复杂度、能量存储与释放机制、强烈太阳爆发成因的理想对象。综述了目前相关研究成果, 聚焦基于多波段观测、磁流体力学建模和非线性无力场外推, 揭示 AR 13664 从磁通量浮现到近地空间响应的全链条物理过程。围绕 AR 13664 的研究结果表明: (1) 该活动区表现出极高的磁通量浮现速率, 峰值可达 2.2×10^{22} Mx/d, 迅速形成复杂的 $\beta\gamma\delta$ 型磁结构, 总无符号磁通量高达 1.35×10^{23} Mx, 为能量的高效存储奠定了磁拓扑基础; (2) 磁拓扑分析结果表明, 磁能释放过程与准分割面(QSL)及多重电流片的演化高度相关, 揭示了局部非势能区的能量释放机制; (3) 多阶段磁剪切过程被清晰观测到, 表明磁绳结构的逐步形成与不稳定性增强, 与随后爆发的 12 次 X 级耀斑和多个晕状 CME 密切相关; (4) 相关 CME 具有跨赤道日面源区大尺度结构, 在日地空间快速传播, 最快投影速度超过 2000 km/s, 其行星际结构在 1 AU 处表现为强烈的南向磁场(行星际磁场 z 轴分量 B_z 最小达到 -50 nT), 对地球磁层造成剧烈冲击, 诱发强磁暴和电离层扰动过程。这些研究系统描绘了极端空间天气事件从太阳源头到近地空间的全链条演化过程, 为太阳爆发的触发、能量积累释放, 以及传播机制提供了创新性理解, 为建立更加准确和可预报的空间天气模型提供了重要的研究基础。

关键词 极端太阳风暴; 活动区; 日冕物质抛射; 磁重联; 地磁暴

太阳活动区(active region, AR)是太阳表面磁场高度集中、结构复杂的强磁场载体。AR 通常表现为黑子群的聚集, 其磁场的演化、不稳定性及其与邻近

磁场的相互作用被认为是太阳耀斑、日冕物质抛射(coronal mass ejection, CME)和高能粒子的驱动力^[1-4]。AR 是太阳大气中磁能积累与释放的主要场所, 也是影响太阳-地球空间天气的关键区域, 其中爆发活动可对地球磁层、电离层等近地空间环境, 以及卫星通信、导航系统乃至地面电网等基础设施和技术系统产生显著扰动。因此, 研究太阳活动区的结构、演化及

1. 中国科学院国家天文台太阳物理研究部, 北京 100101

2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 101499

3. 中山大学大气科学学院, 珠海 519080

收稿日期: 2025-04-24; 修回日期: 2025-06-05

基金项目: 中国科学院基础与交叉前沿科研先导专项(B类)(XDB0560102); 国家重点研发计划项目(2022YFF0503800); 国家自然科学基金委员会项目(12533010, 12350004, 12473095, 12373111, 12403067)

作者简介: 周桂萍, 研究员, 研究方向为日冕物质抛射的源区、初发和传播, 以及太阳/恒星磁活动类比, 电子信箱: gpzhou@nao.cas.cn

引用格式: 周桂萍, 周振军, 张小凡, 等. 2024 年 5 月太阳活动区 13664 磁场演化及其极端空间天气事件研究综述[J]. 科技导报, 2025, 43(16): 93-104; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.04.00117

其磁场性质,对于理解太阳爆发现象、评估地球空间天气风险具有重要的理论和现实意义。

太阳爆发事件(耀斑、CME)的主要源区与太阳活动区紧密相关,其磁场演化及拓扑复杂性直接决定极端空间天气的剧烈程度。1859 年的卡林顿事件是历史上记录的最强地磁暴(地磁扰动指数值(Dst) ≈ -1760 nT)。研究表明,约 40% 的强耀斑事件仅由约 0.5% 的超级活动区(SAR)产生^[5]。具有复杂磁结构的超级活动区则更易产生强耀斑^[5-7]。然而,这类活动区其磁能存储位置、释放触发机制并不明晰^[8-9]。

活动区的形成源于太阳内部磁通量的浮现过程。新生的磁通量穿过光球进入日冕,逐渐积累磁自由能。在复杂磁拓扑结构中,磁重联等机制会触发快速的能量释放。活动区内黑子的磁场极性分布是评估其爆发潜力的关键依据。按照 Hale 分类方法,依据其磁极性和复杂程度,黑子可分为简单的 α 型(单极性)、 β 型(双极性)、 δ 型(单个半影中极性相反的本影)、 γ 型(正负极性分布非常不规则,无法归类为双极黑子群)到复杂的组合形态,如 $\beta\gamma$ 型和 $\beta\gamma\delta$ 型等。特别是 $\beta\gamma\delta$ 型黑子所处的活动区,其极性反转线(PIL)附近往往伴随剧烈剪切运动和大尺度电流系统,是最容易产生 X 级耀斑和高速 CME 的结构类型。活动区的磁场物理参数,如 TOTUSJH(总无符号电流螺度)、TOTPOT(光球总磁能密度)、R_VALUE(极性反转线周边磁通量强度)等,可有效反映非势能积累程度。研究发现,这些参数与耀斑发生具有高度相关性,是现代爆发预测中重要的量化指标^[10-11]。

2024 年 5 月 2—14 日,太阳活动区 AR 13664 在可见日面发展为近 10 年来最活跃的大型活动区之一,形态与 1859 年卡林顿事件的致灾活动区高度相似,表现出显著爆发性,两者对比见表 1^[11]。AR 13664 产生超 100 个黑子、呈现 $\beta\gamma\delta$ 型复杂磁场,无符号径向磁通量从 $\sim 3.3\times 10^{22}$ Mx 增至 13.5×10^{22} Mx^[11]。该活动区在整个生命周期中,共产生 12 次 X 级耀斑(含 1 次 X8.7 耀斑)和 52 次 M 级耀斑^[10],其中 2 次 X 级耀斑(5 月 9 日、10 日)触发了 G5 级地磁暴($Kp=9$),产生至少 19 个 CME(含 10 个晕状结构)^[12],其中 4 个在传播过程中先后堆叠在一起形成复杂结构,导致行星际磁场 z 轴分量(IMF B_z)持续南向偏转,并引发 2003 年以来最强的地磁暴(2024 年 5 月

11 日 02:00 UT, $Dst=-412$ nT),恢复期超 72 h。CME 引起 2024 年 5 月 11 日 02:00 UT 中子计数减少 15%,以及福布斯(Forbush)下降,根据地球同步环境业务卫星 GOES-16 记录, >500 MeV 质子通量增加了 3 倍,被确认为第 74 次地面增强(GLE)事件。

表 1 AR 13664 与卡林顿事件对比

特征	AR 13664	卡林顿事件(1859年)
总磁通量	$\approx 13.5\times 10^{22}$ Mx	$\approx 5\times 10^{22}$ Mx
最大黑子尺寸(直径)	>30000 km	可能 >50000 km
地磁暴强度(Dst)	≈ -412 nT	≈ -1760 nT
爆发持续时间	4天渐变	更短但更剧烈
复杂度	$\beta\gamma\delta$ 型	高度复杂

AR 13664 磁场演化速度之快、能量聚集程度之高、爆发活性之强,使其成为研究太阳极端活动的理想样本,也为理解卡林顿级事件的成因提供了重要线索。因此,AR 13664 不仅在太阳物理学研究具有重要的科学价值,也为空间天气预警、磁暴预测和灾害防护策略提供了独一无二的实证样本。现代多源数据(如磁场探测)极紫外成像、射电频谱、地磁监测等)和数值模型(非线性无力场外推、磁拓扑分析),为开展磁场演化规律、爆发触发机制及其空间天气效应的研究提供了机会。本文综合已有研究成果,对其磁结构、演化过程、爆发活动与近地空间效应进行系统综述,以期理解与 AR 13664 类似的复杂活动区演化爆发规律和太阳-地球系统极端响应机制,为建立极端事件准确预警预报模型提供重要研究基础。

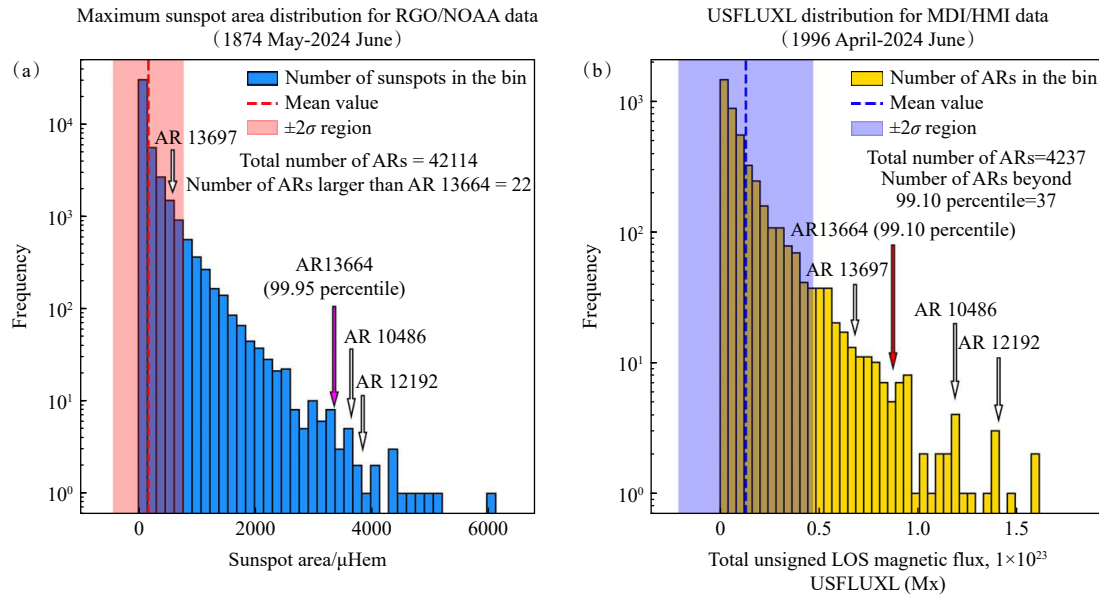
1 AR 13664 历史地位

AR 13664 在多项物理参数上均表现出高度极端性,被确认为第 25 太阳活动周中迄今唯一超级活动区^[5]。其黑子面积、非势能参数、磁通量与浮现速率均位于历史前列。在 2024 年 5 月 9 日,该活动区的最大黑子面积达到 $3494\ \mu\text{Hem}$ ($1\ \mu\text{Hem}\approx 304$ 万 km^2 ; 百万分之一太阳半球,MSH),位列黑子面积历史排名前 0.05%(英国皇家格林尼治天文台(RGO)和美国国家海洋和大气管理局(NOAA)1874—2024 年联合记录)。活动区结构早期为 β 型,随后迅速演化为高度混杂的 $\beta\gamma\delta$ 型,极性反转线长度迅速增长,表明其具

备复杂的磁拓扑结构和强爆发潜力^[13]。通过 SDO/HMI(太阳动力学天文台的日震磁像仪)磁图数据计算, AR 13664 的总无符号视向峰值磁通量达到 1.35×10^{23} Mx, 其磁通量增长速率峰值达到 2.2×10^{22} Mx/d, 远高于大多数活动区样本均值^[11,14]。

纵向将 AR 13664 与历史上不同活动区进行对比: 从活动区面积上看, 相比前 2 次太阳活动周的最大 AR(AR 10486 和 AR 12192), AR 13664 面积略小, 但磁通量分布更集中^[13](图 1^[13])。活动区 AR 10486 是 2003 年“万圣节风暴”的主触发源区, 产生有史以来最强之一的 X17.2 耀斑, 并多次触发晕状(Halo) CME^[15]。AR 12192 产生了自 1990 年至今最大面积

的黑子, 约 $4300 \mu\text{Hem}$, 但其结构相对稳定, 爆发效率较低; 从爆发能力看, AR 12673 爆发了第 24 太阳活动周最强的 X9.3 耀斑, 结构紧凑且剪切剧烈。AR 13664 峰值磁通量浮现速率在卫星高精度测量时代仅次于 AR 12673(2.9×10^{22} Mx/d)与 AR 12192(3.4×10^{22} Mx/d), 表明其快速积累磁能的能力, 被认为是最快的磁通量增长速率之一。然而, AR 最大磁场强度高达 4000 G, 远高于典型强活动区。高磁通量浮现率及强磁场打破能量存储极限, 驱动多米诺式爆发链^[16]。因此, AR 13664 在多个关键物理维度上集成了 AR 12192 的“尺度优势”与 AR 12673 的“爆发能力”。



AR 13664 覆盖的黑子面积和磁通量上均超过绝大多数活动区, 分别位列前 99.95% 和 99.10%

图 1 RGO/NOAA 数据库中太阳黑子群的最大面积和 MDI/HMI 数据库中黑子群视线方向总的无符号磁通量分布

从矢量磁场参数上看, AR 13664 也展现出系统性极端特征, 在 SDO/SHARP 数据集中提供的 20 多项标准化参数中, 共有 16 项达到或超过其他 99% 的活动区, 其中以下参数排在首位: 总无符号电流螺度(TOTUSJH), 净磁缠绕数(TOTTWIST), PIL 附近总无符号磁通量密度(R_VALUE), 极性净电流绝对值之和(SAVNCPP), 以及净电流螺度绝对值(ABSJNZH)。其他关键参数如光球层总磁能密度(TOTPOT)、总无符号垂直电流(TOTUSJZ)与总无符号磁通量(USFLUX), 也均超过 99.9% 的活动区^[10,13]。这些参数与耀斑产率高度相关^[17], 共同反映出该活动区具有极高的非势能

积累程度与潜在爆发极端活动能力。

2 爆发源区磁场演化特性

AR 13664 的演化和爆发过程由多颗空间探测器进行全面观测, 涵盖了从近日面到远日面多个视角。观测平台包括地球轨道附近的羲和号(CHASE), 夸父一号(ASO-S)、太阳动力学天文台(SDO)、太阳和日球观测天文台(SOHO)、日地关系天文台(STEREO), 以及当时处于太阳背面的太阳轨道飞行器(Solo)。观测时间从 2024 年 5 月 1 日持续至 6 月 12 日, 完整

覆盖了其爆发全过程。

在此期间, AR 13664 共爆发了 23 次 X 级耀斑, 并伴随多次 CME, 最终触发了自 2003 年以来最强的地磁风暴($K_p=9$), 对地球空间环境产生了深远影响^[13]。AR 13664 的演化可分为 4 个阶段。

1) 初期阶段(2024 年 5 月 1—4 日): 首次出现在东边缘, 表现为普通的双极活动区(β 型), 磁通量稳定($<4\times 10^{22}$ Mx), 面积 $\approx 300\ \mu\text{Hem}$ 。黑子直径 5000~20000 km, 磁场强度 1000~3000 G, 呈现简单 α 或 β 磁场构型^[10]。磁场结构清晰, 正负极性分布对称, 极性反转线较短且结构平直, 没有明显的剪切特征。该阶段黑子分布稀疏, 数量不多, 活动区在空间分布上呈现分离型双极系统, 该阶段并未爆发 M 级或 X 级耀斑, 活动性较低。

2) 浮现阶段(2024 年 5 月 5—6 日): 双极黑子连续浮现, 磁通量浮现率经历爆发性磁通量增长(速率从 0.35×10^{22} Mx/d 升至 2.2×10^{22} Mx/d), 其无符号径向总磁通量达 1.35×10^{23} Mx, 与第 24 太阳周最大活动区 AR 12192 相当(2×10^{23} Mx)^[11]。新双极场的持续注入不仅扩大了原有活动区的空间范围, 同时让活动区磁场结构变得更为复杂。在这一过程中, 一些新浮现的双极场向内侧移动并与原有磁极发生接触或合并, 形成了高度压缩的极性反转线区域, 为后期磁剪切的增强与能量积累奠定了基础。

3) 压缩剪切阶段(2024 年 5 月 7—8 日): 多个分离的磁场逐步合并为强磁场区, 伴随不同的黑子合并增长面积, 其中最大的巨型黑子直径超过 30000 km。黑子数量从初期 80 多个下降至约 40 个, 总面积不断扩大, 最终达到 $\sim 3494\ \mu\text{Hem}$ 的峰值。东侧连续浮现多个双极磁场结构, 自 2024 年 5 月 7 日起迅速增大, 自由磁能显著增加, 耀斑活动随之增强^[10]; AR 13664 的空间结构发生显著变化。这种黑子“数量减少、面积增加”的现象反映出合并带来的磁场结构压缩和磁能汇聚。HMI 磁图显示, PIL 的长度和曲率迅速增长, PIL 两侧的矢量磁场的运动方向趋于反平行, 形成典型的高度剪切结构。剪切速率在部分区域达到 0.5~1.0 km/s, TOTUSJZ(总垂直电流)升高至 2×10^{14} A, 显示出系统内部正在积累大量非势能。该阶段也是多数 SHARP 参数(如 TOTUSJH、TOTTWIST、R_VALUE)迅速上升的时段, 为后续爆发活跃期积蓄能量。

4) 磁能峰值与爆发阶段(2024 年 5 月 9—10 日): 最大黑子直径 >30000 km, 总磁通量 $\approx 13.5\times 10^{22}$ Mx, 磁场强度 >4000 G, 发展为复杂的 $\beta\gamma\delta$ 型; PIL 和强剪切流(速度达 1 km/s), 持续超 2 d, 覆盖纬度范围 $200''$; 持续剪切运动形成海蛇状磁绳^[10]。AR 13664 的磁参数达到峰值, TOTUSJH、TOTPOT、R_VALUE、USFLUX、TOTTWIST 等关键参数均达到活动区磁参数观测史的前 0.1%, 部分甚至位列第一, 意味着该系统已处于强的非势能极限状态。与此同时, SDO/AIA 94 Å 与 131 Å 波段成像显示, PIL 区域上方形成了清晰的 Sigmoid 结构, 这是典型的爆发前日冕构型, 通常预示着低层剪切场驱动的磁重联即将发生。

AR 13664 在可见日面发展为近 10 年来最活跃的大型活动区之一, 其快速演化与高活动性使其成为研究复杂活动区中磁场能量存储与释放机制的典型代表。通过对光球层磁结构浮现与水平运动的分析, Romano 等^[11]认为, 同纬度、同经度的连续双极浮现, 叠加汇聚与剪切运动, 是磁能积累的关键过程(图 2^[11])。

3 爆发能量过程与拓扑结构

AR 13664 在其爆发活跃期产生了至少 11 个 X 级白光耀斑(WLF), 在 3600 Å 和 6173 Å 波段上明显增强。耀斑足点处的白光增强主要由非热电子束加热驱动, 特别是在上升阶段与硬 X 射线(HXR)峰值高度一致^[18], 而 6173 Å 波段的延迟增强则可能受辐射回暖效应影响^[19]。在衰减期, 白光辐射多出现于耀斑环, 与 HXR 源区存在空间错位, 其增强可能与热等离子体冷却、汤姆逊散射或边缘等离子体抛射有关^[20-23], 体现出多种辐射机制共存的特征^[24]。Velusamy 等^[25]利用美国戈德斯通天文台(GAVRT)全频段(3~14 GHz)射电观测发现, 相较于静态的热回旋共振谱, 耀斑发生前后的频谱表现出高频段的辐射通量过剩, 这表明, 在此期间 AR 13664 的极端高活动性可能导致了在耀斑前后阶段仍然存在残余的非热辐射成分的积累。

基于光球磁场观测结合三维磁场外推, MacTaggart 等^[26]认为 AR 13664 爆发的第 1 次晕状 CME 是由新浮现的扭曲双极场所触发。磁中心线上正负磁通量的挤压, 促使电流密度增加并重新分布是磁绳形

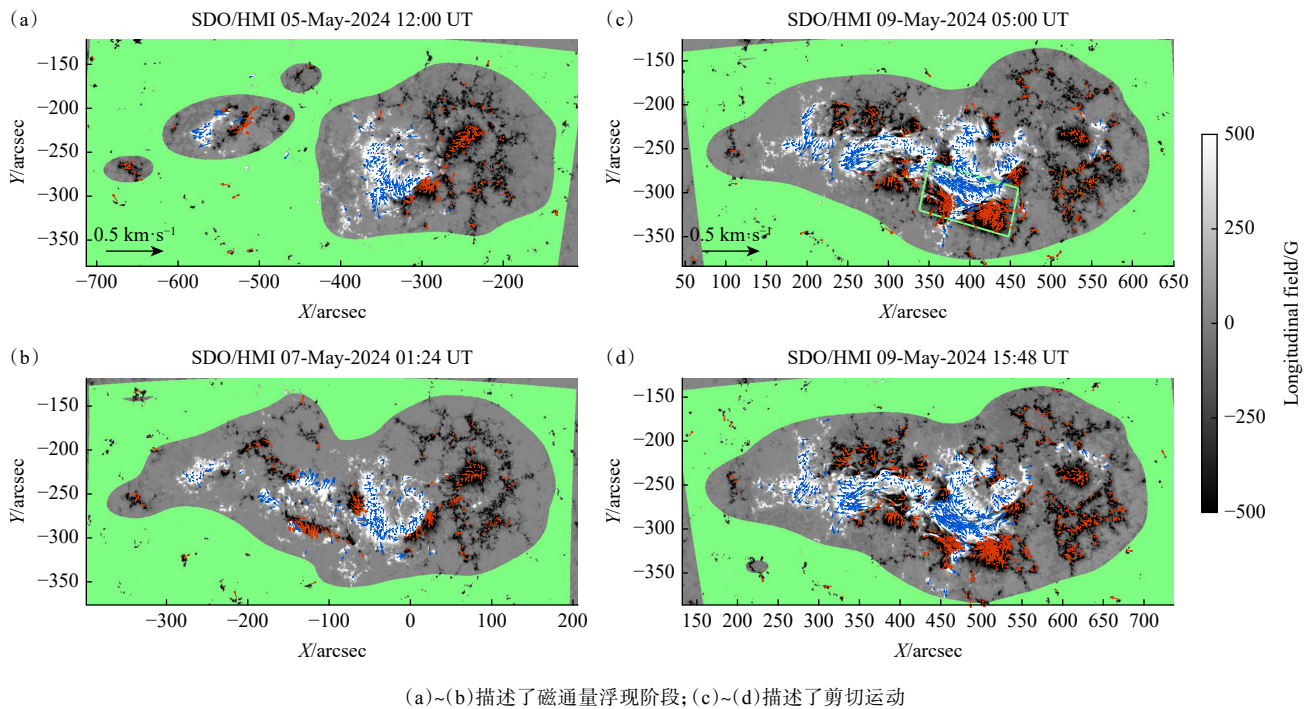


图2 使用 DAVE4VM 结合 SHARP HMI 矢量磁图绘制的水平速度图

成原因,而拓扑分割面上磁重联主导了能量释放。关于同源多个 CME 的成因, Wang 等^[16]分析认为 AR 13664 磁通量的快速浮现,促进了碰撞剪切,导致多个强磁场梯度极性反转线的形成,触发相互作用并产生多个同源 CME;其中 7 次晕状 CME 根据轴向磁场方向的差异,可分为 2 类,且引起不同的地磁效应。南向磁场主导的 CME 导致 Dst 快速下降,而北向磁场主导的 CME 会引发磁层顶压缩迟滞。CME 南向和北向磁场的来源极可能与其日面源区磁结构有关^[27]。根据 SDO 全日面紫外观测的较差图显示,尤其在 211 Å 波段(图 3(a)),以 2024 年 5 月 9 日的 X1.1 级耀斑/CME 为例,AR 13664 触发的 X 级耀斑/CME 均伴有跨赤道的大尺度日冕暗化区域,与白光日冕仪观测到的 CME 的抛射方向一致,这就预示相关 CME 的日面源区磁结构包含跨赤道的多重复杂磁场连接性,极可能是行星际对应物南向和北向磁场的主要贡献。

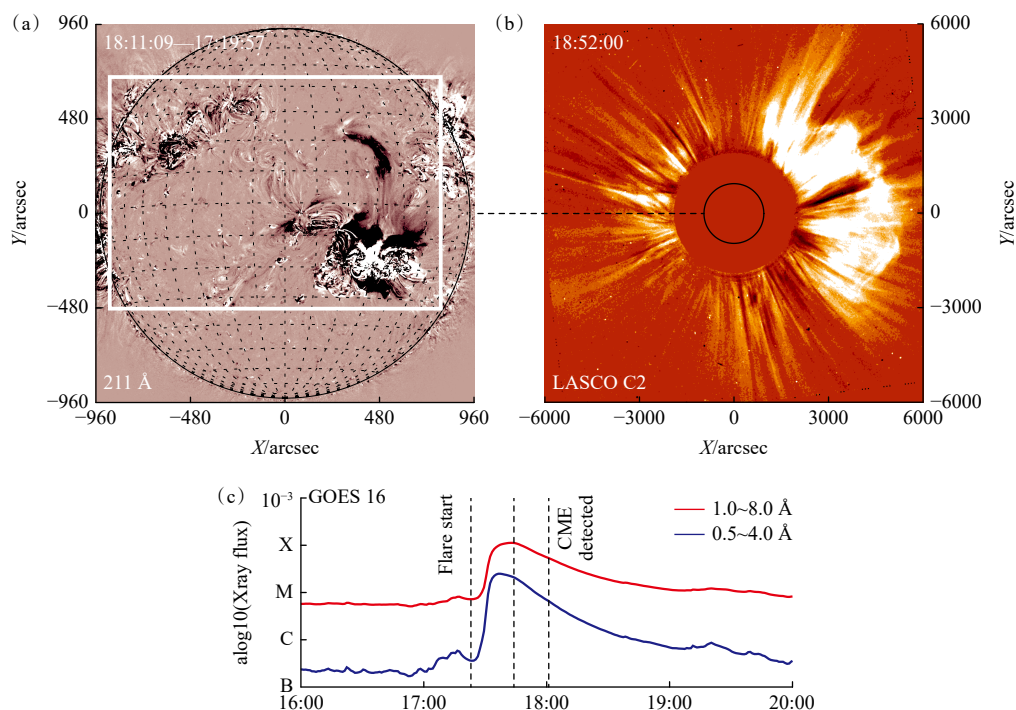
4 CME 行星际传播

活动区 AR 13664 触发了多次强耀斑与日冕物质抛射,这一系列能量释放在日地空间形成了复杂的磁流体扰动结构。AR 13664 的行星际传播特征展现了高度非线性、多层结构交叠与极端场强叠加等现象,

对地球轨道及更广阔的太阳系空间环境产生了深远影响^[12-13, 28]。

2024 年 5 月 8 日, AR 13664 爆发了首个晕状 CME, 伴行星际激波, 相关太阳风速度峰值达 1000 km/s, B_z 分量持续南向, 高达 -50 nT^[10, 29]。随后连续触发至少 6 次 Halo 型 CME, 伴随 X 级强耀斑。这些不同速度的快 CME, 在离开日冕后呈现显著的相互作用行为。在行星际空间中, 多个 CME 的相继传播与碰撞导致其形成复合驱动结构, 包括多重激波、交叠磁鞘与连续磁云系统^[30]。太阳风探测卫星(Wind)、深空气候观测卫星(DSCOVR)与先进成分探测器(ACE)均观测到了这些结构的动态演化, 特别是在 L1 点探测到的双重前向击波及随后的压缩鞘层, 清楚地揭示了 CME-CME 互扰与磁压耦合的过程^[12, 31-32]。关于太阳风-磁层耦合的驱动原因, Vichare 等^[33]提出了一种非线性机制, 即行星际磁场 Y 分量(IMF- B_y)强度的增加与黏滞的协同作用。这一机制极有可能加强太阳风-磁层耦合, 调制低纬电离层; 并进一步总结出 IMF- B_y 幅度-电离层响应的定量关系, 为地磁暴预报模型提供新的参数。

Kwak 等^[31]提出, 与 2024 年 5 月 9 日 08:45 UT 耀斑相关的 CME 在传播过程中扫过了前期 CME, 并最终在接近 1 AU 处与 5 月 8 日 04:37 UT 耀斑相关的



(a) SDO/211 Å波段的较差显示跨赤道日冕暗化,如白色方框内所示;(b)SOHO/LASCO 白光日冕仪观测到的 CME 的抛射方向与跨赤道日冕暗化走向一致;(c)GOES X-ray 流量显示耀斑开始于 17:23 UT,峰值时间为 17:44 UT,相关 CME 于 18:01 UT 已被 STEREO-A 探测到以 2024 年 5 月 9 日的 X1.1 级耀斑/CME 为例

图 3 AR 13664 触发的 X 级耀斑伴随的系列 CME 具有跨赤道的大尺度日面源区磁结构

CME 发生合并。由此引发的 IMF B_z 剧烈波动(尤其是持续的强南向分量)导致了 Dst 指数在主相与恢复相均表现出非典型的“锯齿状”结构,引发了近 20 年来最强地磁暴。因此,这种 CME 行星际堆积效应,有放大磁场的效果^[30]。进一步地,Kwak 等^[31]利用 WSA-ENLIL+Cone 模型模拟了这一 CME-CME 相互作用场景,结果与 L1 点就位观测到的太阳风参数非常吻合,进一步验证了 CME-CME 相互作用在引发强烈地磁风暴中的核心作用。

这些高速 CME 驱动形成强烈的激波结构。2024 年 5 月 10 日 17:05 UT,激波到达地球,显著压缩了地磁层至约 5.04 个地球半径(RE),并触发了一次深度的 Forbush 下降。这些激波在不同传播阶段持续加速高能粒子,产生了一次典型的多重注入型太阳高能粒子事件(SEP)。Ippolito 等^[34]利用蒙特卡洛模拟表明,CME 通过期间增强的低频太阳风湍流导致行星际磁场线扩散增强,使地球磁连接区域显著靠近 AR 13664,从而促使由 CME 激波加速的高能质子在短时间内传播至 L1 点,并造成 GOES 观测到质子通量的急剧上升。同时,Hayakawa 等^[12]研究证实,CME

激波的连续叠加在日球空间形成复杂结构,对多个探测器(包括 GOES 与地面中子监测器)记录到的质子通量增强具有决定性影响。其数据显示,从 2024 年 5 月 9 日开始,质子通量逐步增强,并在 10—11 日迅速跃升,反映出多个激波前沿在不同阶段的持续加速作用。

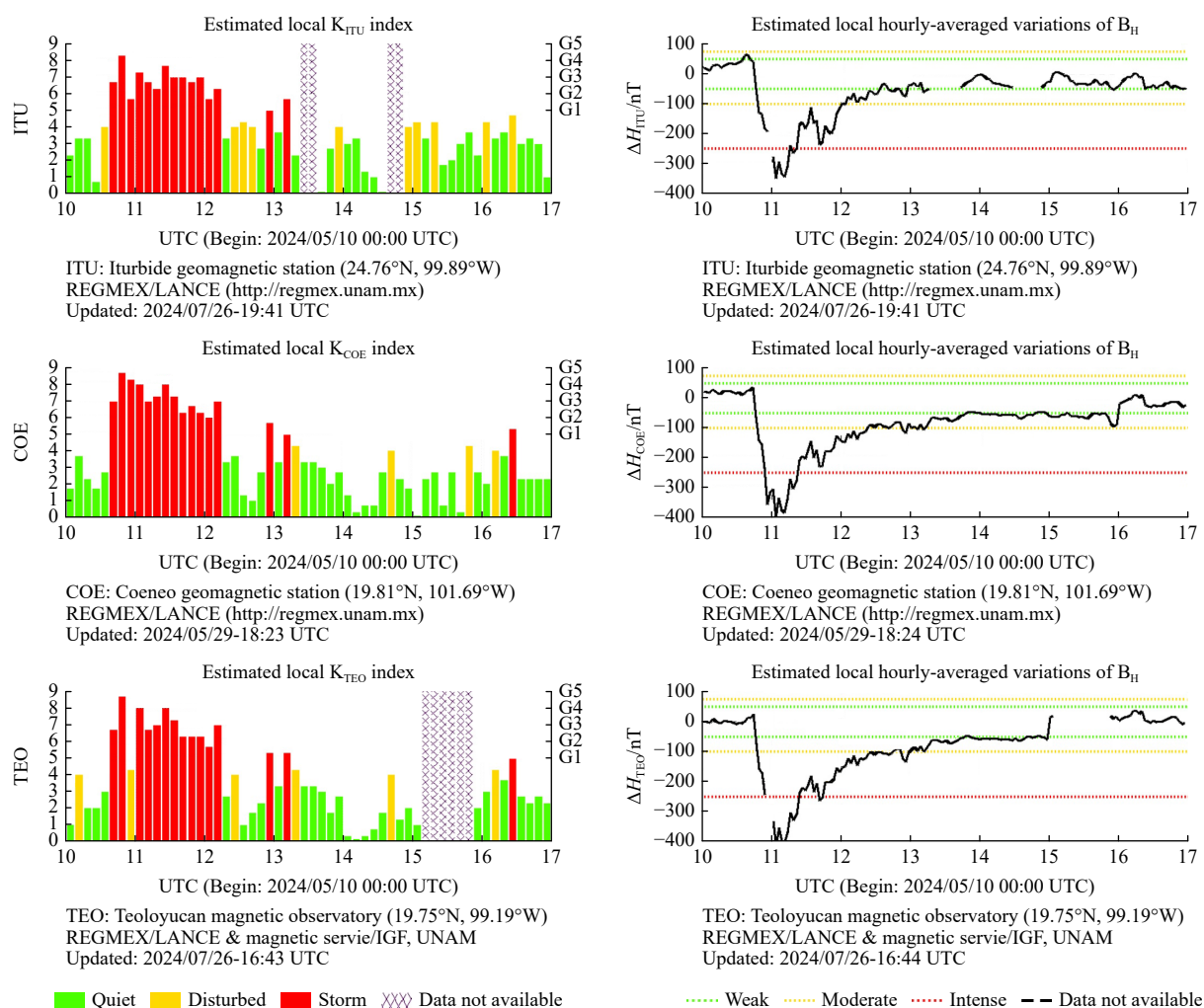
5 近地空间响应

Liu 等^[30]认为,在 AR 13664 所触发的 CME 中,其中 7 次的晕状(Halo)快速 CME,构成了 2 次典型的“复合型太阳爆发事件”。这些爆发在行星际空间形成了强大的磁云与多重激波结构,在 2024 年 5 月 10—11 日对地球空间环境造成了自 2003 年以来最强的扰动过程。这次事件在磁层、电离层、热层、大气成分、导航通信系统以及地面电力系统中均引发了广泛而复杂的影响,体现了地球多尺度耦合系统对极端太阳活动多层级响应。

受连续激波压缩与磁云南向磁场影响,地球磁层发生了深度压缩与大规模磁场重联。 Dst 指数在

2024年5月11日03:00 UT左右降至 -412 nT(图4^[35]), 达到现代记录中第6强水平。强度明显超越2015年3月(-234 nT)和2017年9月事件(-148 nT), 表明此次事件在能量注入和磁层持续性扰动方面均达到极端值^[12]。伴随 Dst 下降, Kp 指数升至最大值9, 并在

连续24 h内保持高于8级, 表明全球磁层处于持续高扰动状态。与此同时, AE/AL等指数显示极光电流系统向赤道延展, 并出现饱和趋势, 代表包括环电流、场向电流(FAC)和极区电流等系统在内的高纬电流结构已进入极限响应区间^[12,29]。



左侧图表显示了3个区域的 K 指数, 右侧图表显示了3个区域的 ΔH 指数

图4 由墨西哥地磁台网(REGMEX)3个站点(COE、ITU、TEO)测量的区域地磁指数

在2024年5月超级地磁暴期间, 赤道电离层表现出显著的扰动特征。福尔摩沙卫星七号(COSMIC-2)和全球导航卫星系统电离层总电子含量(GNSS TEC)等数据一致显示, 在风暴主相期间, 赤道F层高度迅速上升, 最大跃升幅度达到 ~ 300 km, 特别是在黄昏侧印度-东南亚-非洲区域^[33]。该扰动伴随TEC的剧烈增强与波动, 在亚洲、非洲与美洲低纬地区形成了典型的电离层舌状结构(TOI), 在恢复阶段出现高达70%的降幅^[35]。这类扰动不仅表现为L波段

GNSS信号的闪烁增强(scintillation), 也造成GPS(全球定位系统)、北斗、Galileo等系统在中低纬地区频繁出现相位偏移与信号锁失, 严重影响导航与授时系统精度^[36]。Vichare等^[33]认为事件期间在赤道印度洋-非洲区域的等离子体垂直上升速度大幅高于静态模型预测值, 表明强南向IMF引发的“瞬间穿透电场”(PPEF)效应在此次电离层暴中具有主导作用。

Wan等^[37]利用Swarm B卫星对于510 km高度的电子密度的观测结果显示, 在此次地磁暴期间美洲片

区的赤道电离层异常显著增强,而亚洲片区的赤道电离层异常受到抑制,表现出强烈的经度差异(图 5^[37])。基于地基和空基的多种观测数据表明,此次地磁暴期间的电离层扰动是瞬间穿透电场、赤道向扰动风、中性大气成分变化(O/N_2)和扰动发电机电场(DDEF)的综合作用的结果,表现出复杂的性质特征。

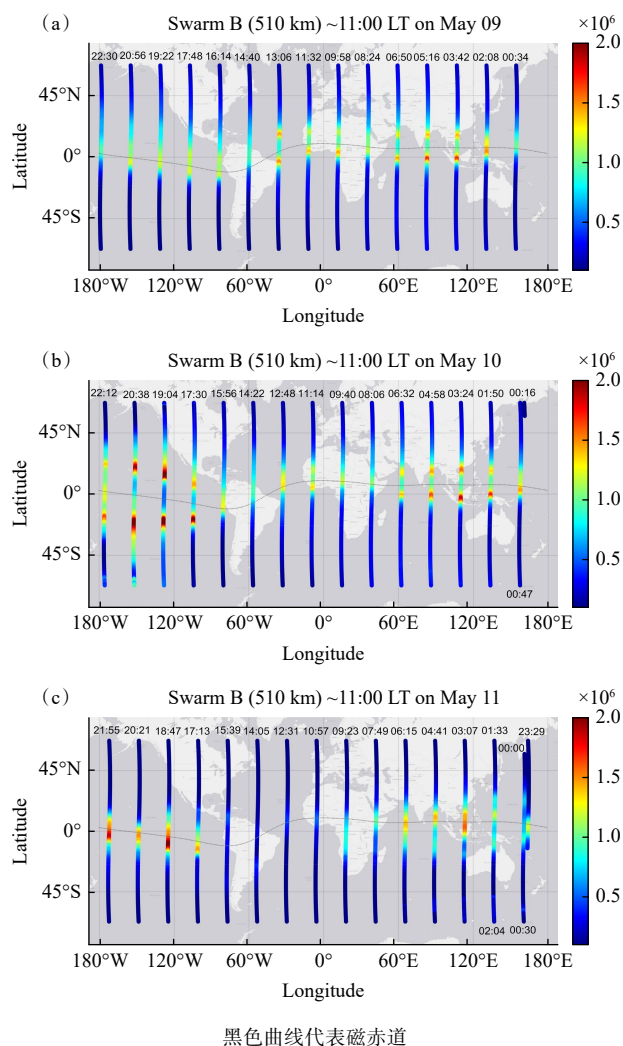


图5 Swarm B(510 km)卫星在2024年5月9—11日
电子密度的观测结果

热层和中高层大气的组分也因该事件发生变化。根据 AURA/MLS 卫星载荷的观测^[38], 2024 年 5 月超级风暴后大气中出现明显臭氧损耗。其中 75~80 km 高度中层顶区域臭氧减少高达 60%, 并在随后的 2 周内持续维持在 30%~50% 的低值区间。热层区域(>90 km)臭氧浓度也出现约 20% 的下降, 与极区高能粒子沉降过程密切相关。这些变化主要由高能电子与质子沉降引发的 HO_x/NO_x 化学催化反应所致,

同时热层加热与子午环流结构改变也起到了间接放大作用。在 2024 年 5 月地磁风暴后, 臭氧在中层顶 (75 km) 最大损耗达 60%, 热层 (>90 km) 浓度下降约 20%, 持续影响达 15 d 以上, 具有明显的高纬主导性与南北不对称特征。这种变化由太阳高能粒子沉降 (SEP+EEP) 引发的 HO_x/NO_x 链式反应和热层加热所导致的环流扰动共同驱动。此外, Abunina 等^[39]指出, 多个 CME 叠加引发的行星际扰动导致银河宇宙射线密度下降 15.7%, 为 Forbush 效应历史极值之一。

在 2024 年 5 月超级磁暴期间,地磁感应电流(GIC)在墨西哥区域显著增强,部分高压变电站记录到瞬时 GIC 电流超过 40 A(为 2021 年事件的 4 倍),并报告温度异常^[34]。意大利中部观测站测得的地磁扰动幅值接近 600 nT,为 30 年来最大之一,表明中纬度电网对极端空间天气仍存潜在脆弱性^[36]。

Liu 等^[30]根据太阳风参数,使用经验公式计算得出的 Dst 曲线值与实测数据十分接近,其最小值约为 -378 nT, 仅比实际最小值低约 8%。这种估计与实测结果的高度一致性可被视为一种“校准”,可以将该方法应用于 STEREO-A 探测器所观测到的太阳风数据,利用 STEREO-A 卫星观测到激波比 Wind 提前 2.6 h 抵达,估算该段结构命中地球时 Dst 指数值的变化,验证了多点观测在极端事件预测中的优势。

低地球轨道卫星(LEO)受热层密度增强影响可能出现轨道衰减加快的趋势,例如,俄罗斯的小型遥感卫星 KANOPUS-V 3 的平均轨道衰减率在风暴前约为每日 38 m,而在风暴高峰期间则急剧增加至每日 180 m,增长了超过 4 倍。许多其他卫星也在短短几天内经历了类似的快速轨道下降。这种突如其来的轨道衰减给卫星运营商带来了巨大挑战,尤其是在维持特定高度或星座配置时。计划外的高度变化可能会扰乱卫星之间精心设计的间距和相位,从而影响某些系统的服务质量或覆盖范围。根据美国太空部门公开的数据分析,超过 5000 颗卫星在风暴期间进行了主动机动,其中 SpaceX 的 Starlink 卫星群占据了主导地位。这些卫星通过自主导航系统启动推进器,主动调整轨道,以应对突如其来的轨道衰减。大规模的机动行为不仅增加了卫星之间发生碰撞的风险,还对碰撞预警系统提出了更高的要求,这些表明极端空间天气事件对在轨资产的持续运营带来很大风险。

6 讨论

AR 13664 触发的系列爆发增加了人类对超级活动区新的认知,但也显露出对日地系统极端响应机制理解上的诸多空白。该活动区在太阳周期尚未达到极大期时快速形成并爆发,说明强活动区的时空分布可能并不完全服从经典的周期规律,而是在更高维度的非线性演化过程^[11,40]。其在短时间内实现的高磁通量增长速率与系统性非势能积累,体现了太阳局部磁流体动力学系统高效的“发电机制”,现有基于稳态剪切场和逐步重联的理论模型难以给出充分解释^[13,41]。AR 13664 连续爆发多次 X 级耀斑,并形成多个 CME 复合磁云,最终导致长时间强南向 IMF 输入与全球磁暴响应。其扰动模式表明,极端空间天气形成的一个重要模式,即源自非单一磁通量系统的强爆发,而可能由中等强度事件的结构性叠加所主导^[29,42]。

值得注意的是,该活动区触发恒星级别的白光耀斑强度,预示太阳具备更高能级磁活动的物理潜力,类似 AR 13664 的超级活动区提供了连接太阳与恒星耀发机制的关键桥梁^[12,24,43]。与此同时,此次事件造成电离层严重扰动、导航系统频繁失控、极区臭氧显著下降,以及地面电力系统遭遇感应电流增强,进一步凸显太阳活动已成为全球现代基础设施安全的重要风险因子。在多系统耦合、多学科交汇的背景下,深入探索 AR 13664 触发的日地系统爆发事件,是推动人们反思和重塑空间天气建模范式和预报服务能力、基础科研投入结构及全球响应体系的科学推进器。

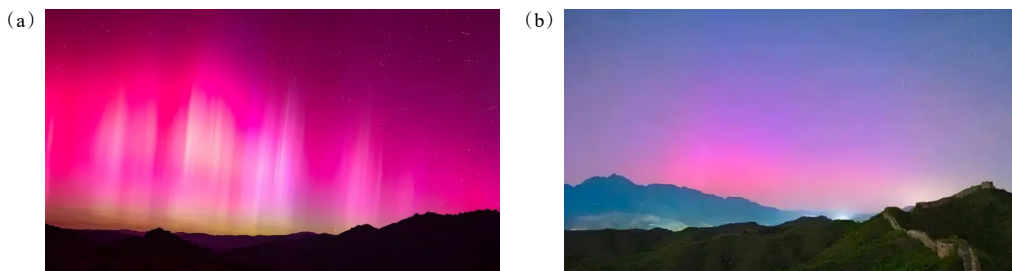
尽管一系列研究揭示了极端空间天气事件的日地过程和对地球环境的影响,然而当前国内外在空间天气预报和应对方面仍存在较多不足。尤其是在预报的准确性和时效性上,现有的模型和监测网络仍无法提供足够精确的预测,特别是对于极端事件发生的

时间、强度和影响范围的准确把握,不能及时准确地应对相关灾害性空间天气对地面技术系统,如电力、通信、导航等基础设施的潜在巨大影响。随着观测和研究不断取得进展,亟须深化太阳活动机理研究,全面理解极端爆发事件成因,具备早期预警能力;同时加强空间天气的监测能力建设,提高预警和应急响应能力,更好地保护技术系统和社会生活免受极端空间天气事件的威胁。

7 结论与展望

第廿五太阳周出现的这次太阳风暴事件呈现出从太阳源区、行星际扰动到地球响应的完整扰动链条。其爆发源区 AR 13664 呈现出极端的磁通量浮现速率(峰值达 2.2×10^{22} Mx/d)、非势能积累³³和复杂的 $\beta\gamma\delta$ 磁结构,形成强剪切的极性反转线(PIL)和典型的 sigmoid 形态,短时间内爆发了至少 12 次 X 级与 52 次 M 级耀斑^[11,13]。白光耀斑活动尤为显著,在 3600 Å 和 6173 Å 波段的增强幅度分别达到 13%~27% 和 9%~15%^[24]。

该系列爆发伴随多次快速晕状 CMEs。这些 CMEs 在日地空间内相继发生相互作用和合并,形成结构复杂的复合行星际 CMEs 系统。L1 点探测数据显示,该事件形成了双激波结构、多重鞘层和多重磁通量绳系统,磁场总强度达到 74 nT, IMF B_z 分量连续南向维持超过 30 h,构成典型的复合 ICME 结构^[10,29]。传播结构覆盖角度广泛,前沿传播速度普遍超过 1000 km/s,局部区域接近 1800 km/s^[28,31]。强烈的行星际磁场扰动引发了自 2003 年“万圣节风暴”以来最强的 G5 级地磁暴, Dst 指数值最低降至 -412 nT^[35]。极光活动扩展至地磁纬度 29.8°,形成全球性可视极光事件(图 6)^[12]。



图片来源: <https://static.bjd.com.cn/dams-res/editing/image> 和 <https://pics1.baidu.com>

图 6 2024 年 5 月 10 日晚至 11 日凌晨中国新疆阿勒泰的红色极光(a)和北京周边拍到的极光(b)

全球范围内的 TEC(总电子含量)显著上升^[35]。GNSS 系统在多个区域受到严重影响, L 波段信号闪烁增强与频繁失锁现象, 提示可能造成导航与授时精度退化。风暴期间电离层扰动还引发了 O/N₂ 比值的下降与热层结构变化, Kwak 等^[31]指出该比值在极区出现显著降低。部分地区的垂直 TEC 在恢复相期间出现下降趋势^[35], 影响导航系统的垂直定位误差。

围绕该事件的系列研究激发了关于太阳爆发与空间天气耦合机制的科学思考。首先, AR 13664 并未出现在太阳极大期, 而是在上升—极大过渡阶段迅速成长, 打破了周期峰值与爆发强度线性对应的传统认识, 预示太阳活动受控于更复杂的深层调控机制^[40], 相关的物理规律以及被调控的极端爆发是否有更长时标周期性规律等尚待破解。其次, 极端爆发的白光耀斑增强幅度接近恒星上超级耀斑水平, 太阳爆发的能量释放上限仍未被完全揭示和理解, 类太阳恒星超级耀发很可能与太阳耀斑有共同的机理或不同性质^[12,24,43]。通过太阳和恒星活动的类比研究, 不仅促进对恒星活动及其周边空间天气的深入理解, 而且也是检验太阳物理和空间物理获得的已有规律, 以及深化探索未知的需要。另外, 多重磁云结构经过相互作用长期维持南向 IMF、造成激波交互形成和磁通量绳重组等复杂动力学过程, 预示空间天气模型的发展需要对行星际磁场预测、结构合并演化、扰动持续性等方面进行充分地物理刻画^[42], 并急需发展日地系统的非线性耦合的观测和理论框架。

未来观测任务将在弥补现有模型不足与推动科学进展等方面发挥关键作用。目前, 国内的先进观测如 ASO-S^[44]、“羲和”卫星^[45], 以及“空间环境地基综合监测网”(子午工程)等提供了包含太阳矢量磁场、硬 X-ray 与 Lyman- α 成像与 H α 光谱, 以及近地空间局地 and 遥测等最新数据, 正进一步揭示太阳光球—色球—日冕—近地空间的物质和能量传输细节。国外空间观测如太阳轨道探测器(Solar Orbiter)、Wind、ACE、火星大气与挥发物演化任务探测器(MAVEN)等已为 AR 13664 提供了从太阳表面至 1 AU 的多点联动观测, 促进建立 CMEs 并合过程中的三维结构演化链。正在研制的太阳极轨天文台^[46-47]与规划中环日全景探测^[48]等将突破黄道面和单视角的限制, 将补全当前在太阳极区与三维磁场重构方面的观测局限, 将为全面

建模多源爆发、磁云并合和行星际扰动传播机制提供重要的数据基础。AR 13664 触发的系统性重大爆发不仅验证夯实太阳活动已有规律, 更为揭示更多新的多尺度耦合物理机制与推动全球空间天气模型升级提供一个重要契机。

参考文献(References)

- [1] Cook G R, MacKay D H, Nandy D. Solar cycle variations of coronal null points: Implications for the magnetic breakout model of coronal mass ejections[J]. *The Astrophysical Journal*, 2009, 704(2): 1021–1035.
- [2] Georgoulis M K, Yardley S L, Guerra J A, et al. Prediction of solar energetic events impacting space weather conditions[J]. *Advances in Space Research*, 2024. doi: 10.1016/j.asr.2024.02.030.
- [3] Yeates A R, Attrill G D R, Nandy D, et al. Comparison of a global magnetic evolution model with observations of coronal mass ejections[J]. *The Astrophysical Journal*, 2010, 709(2): 1238–1248.
- [4] Zhu C M, Qiu J, Liewer P, et al. How does magnetic reconnection drive the early-stage evolution of coronal mass ejections?[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, 893(2): 141.
- [5] Chen A Q, Wang J X. Quantifying solar superactive regions with vector magnetic field observations[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2012, 543: A49.
- [6] Jiang C W, Wu S T, Yurchyshyn V, et al. How did a major confined flare occur in super solar active region 12192?[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 828(1): 62.
- [7] Sammis I, Tang F, Zirin H. The dependence of large flare occurrence on the magnetic structure of sunspots[J]. *The Astrophysical Journal*, 2000, 540(1): 583–587.
- [8] Green L M, Török T, Vršnak B, et al. The origin, early evolution and predictability of solar eruptions[J]. *Space Science Reviews*, 2018, 214(1): 46.
- [9] Kusano K, Iju T, Bamba Y, et al. A physics-based method that can predict imminent large solar flares[J]. *Science*, 2020, 369(6503): 587–591.
- [10] 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.
- [11] Romano P, Elmhamdi A, Marassi A, et al. Analyzing the sequence of phases leading to the formation of the active region 13664, with potential carrington-like characteristics[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2024, 973(1): L31.
- [12] Hayakawa H, Ebihara Y, Mishev A, et al. The solar and geomagnetic storms in 2024 may: A flash data report[J]. *The Astrophysical Journal*, 2025, 979(1): 49.
- [13] Jaswal P, Sinha S, Nandy D. Deconstructing the properties of solar super active region 13664 in the context of the historic geomagnetic storm of 2024 may 10–11[J]. *The Astrophysical Journal*, 2025, 979(1): 31.

- [14] Sun X D, Norton A A. Super-flaring active region 12673 has one of the fastest magnetic flux emergence ever observed[J/OL]. [2025-06-05]. <https://arxiv.org/pdf/1711.08383>.
- [15] Zhou G P, Wang J X, Wang Y M, et al. Quasi-simultaneous flux emergence in the events of October–November 2003[J]. *Solar Physics*, 2007, 244(1): 13–24.
- [16] 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.
- [17] Sinha S, Gupta O, Singh V, et al. A comparative analysis of machine-learning models for solar flare forecasting: Identifying high-performing active region flare indicators[J]. *The Astrophysical Journal*, 2022, 935(1): 45.
- [18] Song D C, Tian J, Li Y, et al. Spectral observations and modeling of a solar white-light flare observed by CHASE[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2023, 952(1): L6.
- [19] Hao Q, Yang K, Cheng X, et al. A circular white-light flare with impulsive and gradual white-light kernels[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 2202.
- [20] Heinzel P, Kleint L, Kašparová J, et al. On the nature of off-limb flare continuum sources detected by SDO/HMI[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, 847(1): 48.
- [21] Hiei E, Nakagomi Y, Takuma H. White-light flare observed at the solar limb[J]. *PASJ: Publications of the Astronomical Society of Japan*, 1992, 44(1): 55–62.
- [22] Li Y, Jing Z C, Song D C, et al. The white-light emissions in two X-class flares observed by ASO-S and CHASE[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2024, 963(1): L3.
- [23] Oliveros J C M, Krucker S, Hudson H S, et al. Chromospheric and coronal observations of solar flares with the helioseismic and magnetic imager[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 780(2): L28.
- [24] 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.
- [25] Velusamy T, Dorcey R, Kreuser-Jenkins N, et al. Observations of the 2024 may 14 X8.7 solar flare with the goldstone-apple valley radio telescope (GAVRT)[J]. *Research Notes of the AAS*, 2024, 8(6): 163.
- [26] MacTaggart D, Williams T, Aslam O. The magnetic topology of AR13664 leading to its first halo CME[J/OL]. [2025-06-05]. <https://arxiv.org/abs/2410.15964>.
- [27] Wang Y M, Zhou G P, Ye P Z, et al. A study of the orientation of interplanetary magnetic clouds and solar filaments[J]. *The Astrophysical Journal*, 2006, 651(2): 1245.
- [28] Rodkin D, Lukmanov V, Slemzin V, et al. Observation and modeling of complex transient structure in heliosphere followed by geomagnetic storm on May 10–11, 2024[J/OL]. doi: 10.1016/j.asr. 2024.12. 068. <https://export.arxiv.org/abs/2501.07160>.
- [29] Elvidge S, Themens D R. The probability of the may 2024 geomagnetic superstorm[J]. *Space Weather*, 2025, 23(1): e2024SW004113.
- [30] 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.
- [31] Kwak Y S, Kim J H, Kim S, et al. Observational overview of the may 2024 G5-level geomagnetic storm: From solar eruptions to terrestrial consequences[J]. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 2024, 41(3): 171–194.
- [32] Weiler E, Möstl C, Davies E E, et al. First observations of a geomagnetic superstorm with a sub-L1 monitor[J/OL]. [2025-06-05]. <https://arxiv.org/pdf/2411.12490v3>.
- [33] Vichare G, Bagiya M S. Manifestations of strong IMF-by on the equatorial ionospheric electrodynamics during 10 may 2024 geomagnetic storm[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51(23): e2024GL112569.
- [34] Ippolito A, Alberti T, Giannattasio F. Modeling the magnetic connection from earth to solar *Corona* during the may 11 geomagnetic superstorm[J]. *The Astrophysical Journal*, 2025, 979(2): 146.
- [35] Gonzalez-Esparza J A, Sanchez-Garcia E, Sergeeva M, et al. The Mother's Day geomagnetic storm on 10 May 2024: Aurora observations and low latitude space weather effects in Mexico[J]. *Space Weather*, 2024, 22(11): e2024SW004111.
- [36] Spogli L, Alberti T, Bagiacchi P, et al. The effects of the May 2024 Mother's Day superstorm over the Mediterranean sector: From data to public communication[J]. *Annals of Geophysics*, 67(2): PA218.
- [37] Wan Q T, Ma G Y, Zhou G P, et al. The ionospheric response during the super geomagnetic storm on may 10–11, 2024[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, 130(4): e2024JA033627.
- [38] Winant A, Pierrard V, Botek E. Ozone decrease observed in the upper atmosphere following the May 11th 2024 Mother's Day solar storm[J]. *Annales Geophysicae Discussions*, 2025: 1–13.
- [39] Abunina M A, Shlyk N S, Belov A V, et al. On the features of great Forbush effect during May 2024 extreme geomagnetic storm[J/OL]. [2025-06-05]. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2025arXiv250108029A>.
- [40] Sun X D, Bobra M G, Hoeksema J T, et al. Why is the great solar active region 12192 flare-rich but CME-poor?[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 804(2): L28.
- [41] Toriumi S, Wang H M. Flare-productive active regions[J]. *Living Reviews in Solar Physics*, 2019, 16(1): 3.
- [42] Riley P. On the probability of occurrence of extreme space weather events[J]. *Space Weather*, 2012, 10(2): 02012.
- [43] Maehara H, Shibayama T, Notsu S, et al. Superflares on solar-type stars[J]. *Nature*, 2012, 485(7399): 478–481.
- [44] Gan W Q, Zhu C, Deng Y Y, et al. Advanced space-based solar observatory (ASO-S): An overview[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 156.
- [45] Li C, Fang C, Li Z, et al. Chinese *Ha* Solar Explorer (CHASE)—a complementary space mission to the ASO-S[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 165.
- [46] 邓元勇, 周桂萍, 代树武, 等. 太阳极轨天文台[J]. *科学通*

- 报, 2023, 68(4): 298–308.
- [47] 杨孟飞, 汪景琇, 王赤, 等. 太阳立体探测任务设想[J]. 科学通报, 2023, 68(8): 859–871.
- [48] Wang Y M, Ji H S, Wang Y M, et al. Concept of the solar ring mission: An overview[J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63(9): 1699–1713.

Review of magnetic field evolution of solar active region 13664 and associated extreme space weather events in May 2024

ZHOU Guiping^{1,2}, ZHOU Zhenjun³, ZHANG Xiaofan^{1,2}, LIN Wei^{1,2}, WAN Qingtao^{1,2}

1. Department of Solar Physics Research, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101499, China

3. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519080, China

Abstract During May 10–11, 2024, Solar Active Region (AR) 13664 experienced one of the most intense solar storm events since the Carrington Event of 1859, triggering a G5-level geomagnetic storm (Dst index reaching -412 nT) and global auroral displays. AR 13664 exhibited a dense and complex magnetic field distribution, accompanied by rapid magnetic field evolution and high activity such as abundant magnetic emergence, topological restructuring, and the generation of multiple flares and coronal mass ejections (CMEs). AR 13664 may represent a typical process of energy accumulation and release in intense solar eruptions, making it an ideal subject for studying magnetic complexity, energy storage and release mechanisms, and the causes of strong solar eruptions. This paper reviews current relevant research findings, focusing on multi-band observations, magnetohydrodynamic modeling, and nonlinear force-free field extrapolations, to reveal the full chain physical processes from magnetic flux emergence to near-Earth space responses of AR 13664. The research results around AR 13664 indicate: (1) the region exhibited an extremely high rate of magnetic flux emergence, peaking at 2.2×10^{22} Mx/day, rapidly forming a complex $\beta\gamma\delta$ -type magnetic structure, with a total unsigned magnetic flux of up to 1.35×10^{23} Mx, laying the magnetic topological foundation for efficient energy storage; (2) magnetic topology analysis indicates that the energy release process is closely related to the evolution of quasi-separatrix layers (QSLs) and the development of multiple current sheets, revealing the energy release mechanism in local non-potential energy regions; (3) multi-stage magnetic shearing processes were clearly observed, showing the gradual formation of magnetic rope structures and enhanced instability, closely associated with subsequent eruptions of 12 X-class flares and multiple halo CMEs; (4) the associated CMEs exhibit large-scale trans-equatorial source structures and propagate swiftly through solar-terrestrial space. Some of these CMEs reach projected speeds surpassing 2000 km/s and showcase pronounced southward magnetic fields (with the North-south magnetic field B_z dropping to a minimum of -50 nT) at 1 AU. These characteristics lead to significant impacts on Earth's magnetosphere, instigating intense magnetic storms and disturbances in the ionosphere. These studies systematically depict the full chain evolution process of extreme space weather events from the solar source to near-Earth space, providing innovative insights into the triggering, energy accumulation, release, and propagation mechanisms of solar eruptions, and offering an important research foundation for establishing more accurate and predictable space weather models.

Keywords extreme solar storms; active region; coronal mass ejections; magnetic reconnection; geomagnetic storms ●



(责任编辑 王丽娜)