应对太阳耀斑预报中的已知挑战 I：利用 4π全日球框架进行太阳边缘耀斑预报

K. D. Leka[1], **Eric L. Wagner**[1], **Lisa Upton**[2], **Bibhuti Kumar Jha**[2], **Kiran Jain**[3],**Sara Petty**[1]

[1]西北研究协会，美国科罗拉多州博尔德。[2]西南研究院，美国科罗拉多州博尔德。[3]国家太阳天文台，美国科罗拉多州博尔德。

arXiv:2601.05209v1 [astro-ph.SR] 8 Jan 2026

要点：

- 太阳耀斑预报通常无法预报发生在太阳日缘附近或刚刚越过日缘的耀斑。
- 我们提出了一种新的全日球预报方法，结合了表面磁通输运模型和背面日震学。
- 在这一概念验证框架下，地球有效太阳边缘耀斑的预报表现得到显著提升。

通讯作者：K. D. Leka，leka@nwra.com

摘要

已证实，业务化太阳耀斑预报的一种失效模式是无法预报发生在太阳边缘附近或刚越过太阳边缘的耀斑。为解决这一不足，我们开发了一个“4π”全日球事件预报框架，并评估其应对这一特定挑战的统计分类能力。我们使用磁表面通量输运模型生成全日面的光球径向磁场地图，并据此识别和追踪活动区（AR）；所采用的新标记方案不依赖观测者位置，并允许事后修改。耀斑相关磁参数与一个“可见性”指数相结合，该指数用于指示活动区相对于可见太阳边缘的位置，以及耀斑被探测到的可能性。根据软X射线通量峰值为耀斑赋予标签，并使用非参数判别分析进行统计分类。我们还测试了一个版本，其中通过背面日震学将太阳背面（“不可见”一侧）新出现或正在形成的活动区纳入模型。我们使用布赖尔技巧评分和ROC技巧评分，专门评估新框架在日缘区域的表现，发现其提升幅度不超过 2σ 级。然而，我们确实发现，假阴性，即“漏报”的数量有所减少；并且有充分证据表明，背面日震学提供的额外信息有助于预测发生在太阳边缘附近及刚越过边缘的耀斑，尤其是东侧边缘事件。尽管这一框架的各个组成部分仍可改进，我们的研究表明，利用现有资源可以缓解太阳耀斑预报中已知的一种失效模式。

通俗摘要

太阳耀斑可能发生在 Sun 上磁场集中的任何区域（活动区或太阳黑子群）。太阳耀斑预报通常会利用这些磁场的特征来估计耀斑发生的可能性。然而，相当一部分从地球上可见的太阳耀斑（因此可能危害我们的技术系统，尤其是通信系统）发生在磁场数据日益嘈杂、不可靠的区域，或恰好位于 Sun 的边缘之外，在那里我们根本无法观测到磁场。对此类耀斑的预报通常不成功，因此这一问题被称为“边缘耀斑挑战”。我们开发了一种框架，通过基于物理的建模来绘制“4π”或“全太阳”（包括太阳背面，即 Sun 上无法观测的部分）的地图，并测试这种新能力能否应对这一特定的预报挑战。此外，我们还量化了纳入背面日震学所提供的额外信息后带来的改进。背面日震学是一种利用地球可见数据探测 Sun 背面强磁场的技术。我们表明，借助这一新的“4π”预报框架，并结合有关背面磁场的额外信息，可以有效减少预报漏报的日缘耀斑数量。

1 引言

太阳耀斑预报面临的挑战已有充分记录和讨论（例如，Leka 与 Barnes，2017；Leka 等，2019a；Georgoulis 等，2021）。近期研究表明，业务预报机构确实能够取得优于随机预报或基于气候学预报的技巧，这一结论由多种评估指标衡量得出（Leka 等，2019a）。在研究方面，近期涌现出大量旨在改进耀斑预报的工作，其中绝大多数都在探索机器学习（ML）方法（仅在2024年和2025年至今，标题中包含“太阳耀斑预报”的同行评审出版物就有34篇），不过也有一些研究考察了新的数据源（Leka 等，2023；Sun 等，2023；Zbinden 等，2024）。这类研究的核心推动力是数据样本量不断增加，其中很大一部分数据来自太阳动力学观测台（SDO；Pesnell 等，2012）：截至本文撰写时，该设施已连续观测可见太阳圆面近15年，

截至本文撰写时。在太阳动力学观测台的各项仪器中，日震与磁成像仪（HMI；Scherrer 等，2012；Couvidat 等，2012；Schou 等，2012；Centeno 等，2014；Hoeksema 等，2014）提供的磁场数据一直是耀斑预报研究的核心，这在一定程度上得益于该仪器提供的“空间天气活动区斑块参数”数据产品。该数据产品包含少量预先计算的参数，用于描述光球磁集中区或 HMI 活动区斑块（“HARP”；Bobra 等，2014），这些参数可作为元数据轻松获取（Bobra 等，2014）。基于机器学习的预报方法已受到广泛关注，许多研究都在探索将 SHARP 参数与不同类型的机器学习工具结合使用的效果；已有研究报告了预报能力的提升，不过，比较不同论文中的某项具体指标时必须谨慎（参见 Barnes 等，2016；Kubo，2019；Leka 等，2019a 的讨论）。

近期发现，当前方法尤其难以解决一个具体的性能差距：日缘耀斑预报（Park 等，2020）。由于缺少光球磁场数据，甚至缺少太阳圆面边缘或可见太阳圆面之外的白光成像，算法通常无法对位于（或疑似位于）这些区域的活动区（AR）提供预报。一些机构确实会提供有效期较长的预报，可用于预报某个活动区——但通常最多只能预报到其经过西侧日缘后的第二天（例如，NOAA/美国国家气象局太空天气预报中心、DAFFS 等机构提供的 2 天或 3 天预报；描述见 Leka 等，2019a）。不过，这种方式只能应对西侧日缘事件。发生在可见东侧日缘或其刚外侧的太阳耀斑也会影响地球电离层，例如，若事件相关日冕环发出的软X射线（SXR）和 [极紫外] （E/UV）辐射可在日缘上方观测到（参见例如美国国家海洋和大气管理局/空间天气预报中心，2024a）。

近期有一项工作尝试通过一种仅基于极紫外辐射图像的预报系统来应对这一挑战，该系统能够捕捉日缘上方出现的日冕环（Lee 等，2024）。然而，这种方法仍依赖日地连线数据，而且必须存在活动区相关辐射（也就是说，活动区必须足够大、足够活跃，并且足够靠近日缘，才能获得相关日冕环供分析）。

在此，我们提出一种不同的方法：“4π”事件预报。其基本技术是采用“全太阳”表示，即同时涵盖面向地球一侧的“可见区域”和背面的“不可见区域”，或采用太阳光球磁场的 4π 表示。我们对识别出的活动区进行参数化，以定量表征其磁场分布（这在预报方法中很常见）；并使用统计分类器评估一组已标记的产生活动事件和未产生活动事件的活动区，从而能够对未来区域及其参数进行预测性标记。在这一新的 4π 全太阳预报框架中，我们还：（1）纳入通过背面日震学识别出的背面（从地球不可见）活动区信息；（2）为“被掩蔽”区域和近日缘区域，以及原本无法获得预报的面向地球一侧区域提供预报。

我们在第 2 节介绍完整的方法，包括用于生成 4π-Sun 的框架和输入（包括观测与建模、近侧与背面），详见第 2.1 节；并在第 2.2 节介绍一种新的用于 4π 分析的活动区引用方案。我们在第 2.3 节介绍参数化，在第 2.4 节介绍统计方法以及设计并开展的具体检验，在第 3 节介绍结果，最后在第 4 节进行讨论。

2 方法

该 4π 预报框架主要由三部分组成：生成完整的4π 太阳表面磁场、识别活动区并对其磁场

分布进行参数化，以及结合耀斑活动对这些参数化结果进行统计分析。

2.1 生成 4π Sun

全日面（与 可见日面）的光球磁场是众多日球层模型所需的输入，包括太阳风和日球层事件传播（例如，Wang-Sheeley-Arge-ENLIL 太阳风和日冕物质抛射传播模型；Arge 等人，2004；Odstrcil 等人，2004）。这种边界输入可以通过在 $\approx$1mo 自转周期内生成日面或会合输入来逐步“构建”，但这样一来，太阳背面的信息必然会非常过时。为生成表示某一时刻 Sun 状态的同步 4π 图，研究人员开发了表面磁通输运模型，用于同化面向地球一侧的光球磁场信息，并根据模拟物理过程演化磁场。

2.1.1 平流磁通输运模型

在此，我们使用平流磁通输运模型（AFT；Upton 和 Hathaway，2014a、2014b），构建覆盖整个 Sun 的太阳光球磁通量同步估计。简而言之，同化来自面向地球的源的数据；在当前版本中，使用 hmi.M 720s 数据序列中的 HMI 视线方向磁场图，通过“μ校正”估算径向分量 B_r （Svalgaard 等人，1978；Wang 和 Sheeley，1992）；另请参见 Leka 等人（2017）的讨论。同化窗口是一个加权函数，其权重从日面中心向外径向递减。这会降低对靠近可见太阳边缘的数据的重视程度，因为已知这些区域的磁场测量存在问题。

随后，AFT 求解感应方程的径向分量：

$$\frac{\partial B_r}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u} B_r) = S(\theta, \phi, t) + \eta \nabla^2 B_r \tag{1}$$

其中， B_r 为径向磁场， $\vec{u}$ 表示水平流动，包括对流和轴对称流动（差异自转和子午环流）， S 为磁源项（表示添加到模型中的新磁通量）， η 为数值扩散项。在本研究中，感应方程以 15 分钟为时间步长求解，并每小时同化一次 HMI 数据。对流速度通过球谐代码实现，该代码模拟随时间演化的胞状对流结构（尺度为超米粒尺度及以上）。这些对流胞的寿命与其尺寸成反比，并随观测到的轴对称流动一起输运（Upton 和 Hathaway，2014a）。该对流模拟用于生成一系列纬向和经向流场图，时间 cadence 为 15 分钟，与模型时间步长一致。采用此配置生成的 AFT图称为 AFT“基线”图。

The 4π AFT图在纬度和经度方向上的采样间隔均为 0.352° （对应的磁图大小为 512×1024 像素），比大多数表面磁通输运模型更精细，尤其是作为全球模型的内边界输入时。这里，我们实际上关注的是活动区的小尺度行为和特征，因此，较高的 AFT空间采样至关重要。AFT磁场图经过场填充（填充率为 1），信号幅值以高斯等效 Mx cm^{-2} 为单位表示，以体现这一特性（并与 HMI数据保持一致）。在本实验中，我们使用每天以三次时间 cadence（世界时 00:00、08:00 和 16:00）生成的 AFT生成的磁图。

*2.1.2 AFT*活动区检测

活动区是所有耀斑的主要来源，对较大耀斑尤其如此。因此，我们采用以下算法来检测 AFT图中的磁场集中区域

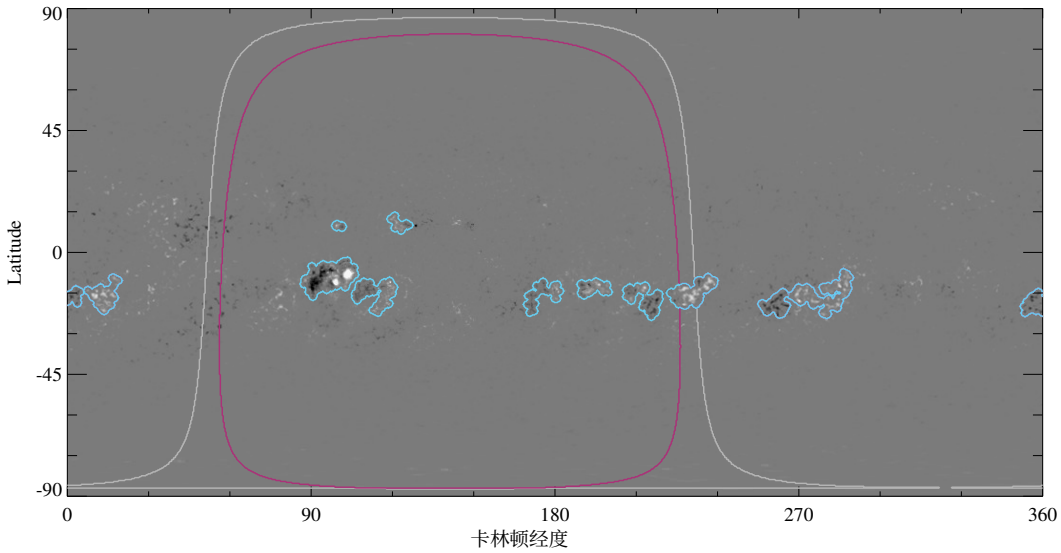

图1。2014.01.04 18:00 UT 的 AFT 全太阳（或“4π”）磁场图示例，缩放至 $\pm 1,000$ Mx cm^{-2}，并标出了太阳边缘（灰色）、AFT 同化窗口（洋红色）以及识别出的 AFT 活动区，即 AFT-AR（蓝色）。请注意，这一天的 b0 角使南极略微可见。在此示例中，完全位于同化窗口内的区域将标记为 Disk，位于背面的两个区域（位于 CL=$[0°, 280°]$）将标记为 Far，而中心位于 CL $\approx 230°$ 、横跨同化窗口和日缘分界线的区域将标记为 Occ，即“被掩蔽”（详情见第 2.3.1 节）。

，并将其称为 AFT 活动区（AFT-AR）。这种方法是对 Sreedevi 等人（2023）提出的方法的扩展。

首先，对图像应用 150 Mx cm^{-2} 的强度阈值，并排除低于此阈值的像素。其次，应用圆形核（直径为 4 像素）的形态学闭运算，填补被此阈值分隔开的像素间隙；此步骤也有助于连接活动区双极的正、负极性。接下来，应用 20 像素的面积阈值（约为 $4.5°^2$，或约 6.6 Mm^2），以排除非常小的区域；该阈值依据对截至此步骤所检出区域进行频率分布分析后得出的下限确定。可以说，此步骤可能会去除正在生长区域的最初检出结果，但其主要作用是去除小型伪检出。最后，应用适度的磁通平衡条件和磁通阈值，主要用于剔除谱斑区及类似的单极区。此处，通量平衡定义如下：

$$r = \frac{|(\Phi^+ + \Phi^-)|}{(\Phi^+ - \Phi^-)} \tag{2}$$

其中，Φ^+，Φ^- 分别为正、负极性的有符号磁通总量。因此，磁通平衡活动区满足 $r = 0$，而完全不平衡的区域（单极区）则产生 $r = 1$。在本研究中，我们要求活动区满足 $r < 0.7$（要求 Φ^+ 与 Φ^-之间的磁通不平衡不超过 $5\times$），且 $\Phi > 5\times10^{19}$Mx。

图1展示了一个标出了各区域的 AFT 磁图示例。

2.1.3 日震学获得的背面磁图

然而，我们无法直接且持续地观测从“近侧”（即日地连线）所见的太阳日缘以外区域的磁场。不过，

太阳磁场确实会演化，新的活动区也持续在太阳“不可见”的背面涌现。日震学可用于推断背面涉及大量磁通量的活动（Lindsey & Braun, 2000; Braun & Lindsey, 2001; Gonz´alez Hern´andez 等, 2007; Gonz´aLez Hern´andez 等, 2010）。在本实验中，我们使用全球振荡网络组（GONG；Harvey 等, 1996; Jain 等, 2021）背面处理流程生成的日震学输出（相移图）。每张背面相移图由五张连续的相移图合成，这些图在 48 小时内以 6 小时间隔获取。随后，按照 Gonz´alez Hern´andez 等（2007, 2014）和 MacDonald 等（2015）的方法，将每日两次、于 00:00UT 和 12:00UT 获取的相移图转换为网格为 180×360 像素的磁通密度图。这些图中的信息用于向 AFT 模型提供额外的背面磁通量涌现信息（如下文所述）。

2.1.4 背面活动区检测

为检测由 GONG 相位移数据生成的背面磁通量图中的磁活动，我们采用多步骤方法：

1. 首先，我们使用关系式 $I_{\rm th} = \underline{I} + 3\sigma(I)$ 为选定的 GONG 推断通量密度图设定磁通密度阈值，其中 I 和 $\sigma(I)$ 仅在推断通量密度大于 0.1 Mx cm^{-2} 的像素上计算（这是为了避免反演产生的噪声值）。此步骤采用西格玛裁剪方法即，通过迭代移除超出 3σ 的强度值来计算均值（AstroPy 开发者，2025年）。典型阈值约为 90 Mx cm^{-2}，西格玛裁剪后 $\sigma(I) = 20$。通量密度图中任何超过该磁通密度阈值的特征都会被标记为候选区域。

2. 接下来，我们通过检查前一次或下一次观测中的 GONG 磁通量图信号，确保候选区域具有持续性。为此，首先使用略微宽松的阈值在这些相邻图像中识别候选区域，即 $I_{\rm th} = I + 2\sigma(I)$。随后检查区域是否重叠；如果相邻 GONG 通量密度图中的区域重叠超过 5 个像素，我们便确认该候选区域具有持续性。

3. 确认候选活动区具有持续性后，我们会计算其属性，包括基于通量密度加权空间平均（即磁场质心或 MCOM 方法）得出的纬度和卡林顿经度、总磁通量以及最大通量密度。我们仅接受峰值磁通密度至少为 250 Mx cm^{-2}、总磁通量大于 5×10^{20} Mx，且质心纬度位于以下定义的活动带范围内的候选背面活动区：

$$\ell = \ell_0 \exp\left(-\frac{T - T_0}{\tau}\right) \pm 20^\circ,\ \ell_0 = \pm 28^\circ\ \&\ \tau = 90; \tag{3}$$

其中 ℓ_0，因此 ℓ是带符号纬度（即指两个半球），而 $T-T_0$ 是自太阳活动周期开始以来的月数（Hathaway，2011）。相关参数经过调校，使识别出的背面活动区的分布（在纬度和数量方面）尽可能符合太阳近侧观测到的分布。20° 的选择依据是一个完整太阳活动周期内近侧活动区数据中观测到的“蝴蝶翅膀”的最大宽度。为确保稳健性，采用了 Hathaway（2011）公式 9 中 1σ 值的 4 倍作为限值。

图2（面板 a、b 和 c）展示了这一过程的一个典型示例。三个面板显示了连续三张背面通量密度图：图2b 表示用于识别背面活动区的目标时刻目标图，图2a 和 c 则是相隔 ±12 小时的背面通量密度图，用于验证活动区的一致性。三个时刻的等值线均表示区域候选体，不过相邻时刻的候选体

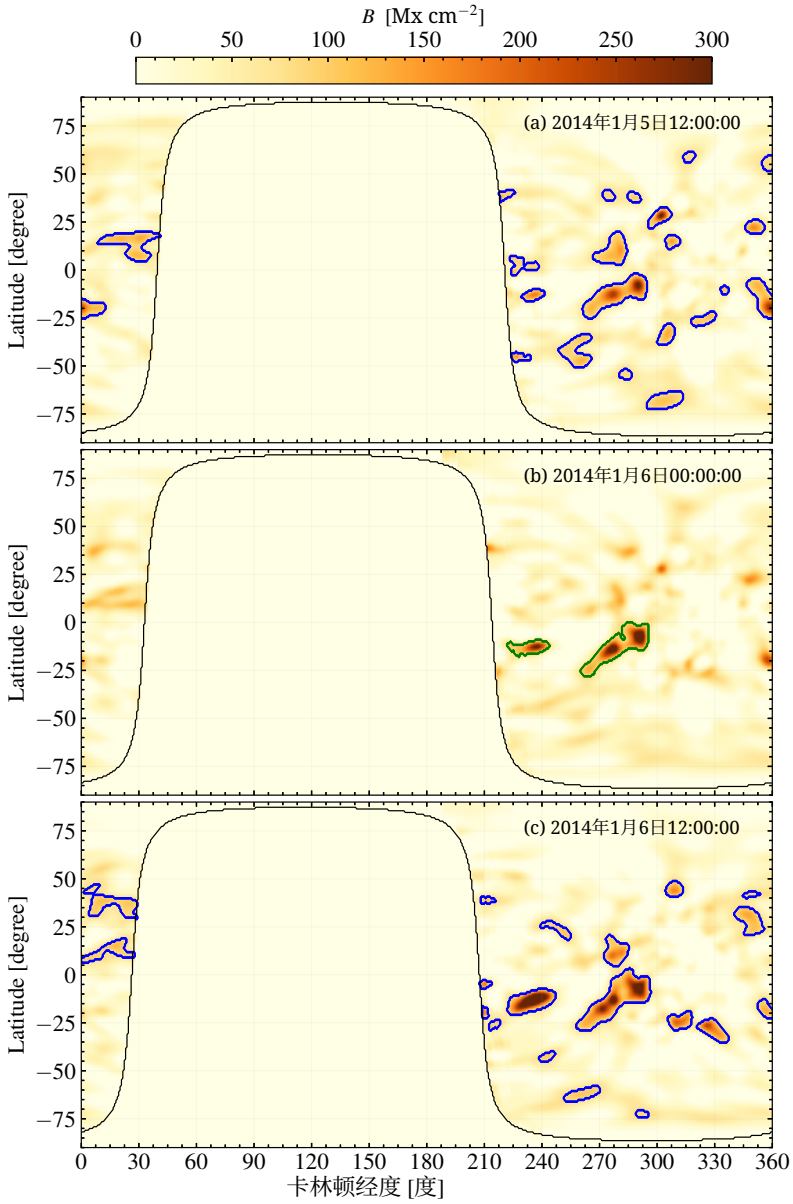

图2。 目标时刻的 GONG 通量密度图（中间的 b 面板），以及目标时刻前 12 小时的先前图（顶部的 a 面板）和目标时刻后 12 小时的后续图，缩放比例如图所示。蓝色等值线（-12 小时的 a 面板和 +12 小时的 c 面板）根据宽松阈值标出潜在活动区（详情见正文）；b 面板中的绿色等值线标出最终确定的背面活动区，这些活动区满足背面活动区的所有判据，包括为避免噪声而应用于目标时刻的更严格阈值。

（±12 小时）是基于宽松阈值得出的。在目标时刻，唯一满足所有判据的候选活动区，是轮廓显示在图2b中的那些。

2.1.5 将背面活动区信息纳入 *AFT*

在 GONG 通量密度图上识别出背面活动区后，需要将这些信息纳入 AFT 模型。具体步骤如下：

1. 根据上述轮廓，为每个候选活动区定义一个“区域掩膜”。由于背面候选活动区的位置波动较大，我们将掩膜向东西方向各扩展 10 个像素（10°），并向南北方向各扩展 5 个像素（5°）。利用已建模的 AFT 图，在同一区域内计算总磁通量。如果 GONG 通量密度图中掩膜内（背面候选活动区）的总磁通量大于 AFT 图中同一掩膜内的总磁通量，则启动将背面活动区纳入 AFT 的流程；否则将其排除。这样做是为了确保我们只纳入新的背面活动区，或显著增长的活动区所产生的磁通量。此后活动区的任何衰减都完全由表面磁通量输运过程控制。

2. 要将 GONG 识别的候选活动区加入 AFT，我们使用根据 GONG 通量密度图得出的活动区位置和磁通量，构建一个理想的双极区，将其模拟为两个极性相反的二维高斯分布，并调整标准差和振幅，使其符合 HMI 磁图的特征。这些简单的双极区会依据纬度采用预期的 Joy 定律倾角，并依据半球按照 Hale 定律确定极性方向（Hale 等，1919）。磁通量与面积关系（Sheeley，1966；Mosher，1977）以及面积与极性分离距离关系（Hathaway 和 Upton，2016），用于确定负极性和正极性磁通量聚集区的大小及间距。

3. 检验表明，直接使用 GONG 图中估算的磁通量密度会向 AFT 图中加入过多磁通量；新加入的背面活动区在 AFT 数据同化过程利用 HMI数据进行校正后，其磁通量密度会急剧下降，这一现象证实了这一点。因此，我们计算需要通过一个新的双极区加入 AFT 的、来自 GONG 识别活动区的总磁通量比例 f，计算如下：

$$f = \frac{\alpha\Phi_{\mathrm{Far}} - \Phi_{\mathrm{AFT}}}{\alpha\Phi_{\mathrm{Far}}}. \tag{4}$$

我们在初步分析中发现，当 $0.25 \leq \alpha \leq 0.35$ 时，新插入活动区的同化过程最为平稳，因此赋予了 $\alpha = 0.3$。然而，本研究关注的是活动区的短期演化；事实上，α 可能与磁通量密度、近侧同化前基于 AFT 的演化、活动区形态，甚至太阳活动周期期相呈非线性关系。相关研究仍在进行中，但超出了本研究的范围。

添加背面活动区，或在活动区经过 Sun 背面时向已确立的活动区添加磁通量，其效果是（不出所料）使 AFT-AR 的数量增加到高于 AFT-Baseline 识别出的数量，尤其是在东侧边缘。

2.2 活动区追踪与编号

美国国家海洋和大气管理局会为其识别出的活动区依次编号，“HMI 活动区斑块”（HARP；Bobra 等，2014）也采用同样做法，尽管这两个机构对活动区的定义大相径庭。这两种编号方案的共同点是，随着 Sun 自转，活动区越过西侧边缘而消失后，

穿过“背面”，重新出现在东侧可见边缘时，会被赋予一个新编号。这种做法会造成两个混淆之处：首先，同一团磁通量在其生命周期内会被赋予多个身份；其次，依次编号的方式使得无法将新识别出的活动区纳入记录，甚至无法在事后更正列表。由于本项目必须追踪活动区，且可能跨越多次太阳自转，并纳入可能首次在背面被识别的活动区，因此需要一种新的活动区标记系统。

在这个新的“4π”框架中，一旦通过上述方法（第 2.1.2、2.1.4 节）识别出磁区，便会为其分配一个识别编号，并使用经过修改的 AutoTAB（autotabpy）算法对其进行追踪（Jha 等，2021；Sreedevi 等，2023；Jha、Sreedevi 等，2025）。新识别出的活动区会被赋予一个代码（“AFT-ID”），其中注明首次检测日期、MCOM 纬度和卡林顿经度。例如，ID 为“20121109TN11243”（或“AFT-ID”）的 AFT 活动区于 2012年11月9日首次被识别为 AFT 活动区，其纬度为北纬 11 度，卡林顿经度为 243 度。这个标识符是易于解析的字符串，最重要的是，它具有唯一性；无需根据地球的相对位置进行更改。该系统在运行超过 10 年的数据后，既不会产生重复项或冲突，也允许根据检测算法的具体情况进行修改，而不会破坏编号方案。

随后，在 10° 时间窗口内，根据 NOAA 活动区的纬度和卡林顿经度，将 AFT-AR 与相应的 NOAA 活动区编号关联起来。因此，单个 AFT-ID 可以关联多个 NOAA 活动区，这与 HARP-ID 的情况类似。彼此距离较近的 AFT-AR 会在 10° 内合并，或并入匹配范围最大的和/或最早出现的活动区。实际上，这一过程将多个（最初识别出的）能够匹配到同一 NOAA 活动区编号的 AFT-AR 视为单个 AFT-AR。此外，由于 AFT-AR 可能会消失，并以新的 AFT-ID 再次出现（这是由噪声水平变化以及时间连续性方面的细微挑战所致），在各自的生命周期内，一个 NOAA 活动区实际上可能关联多个 AFT-ID（下文第 3.1 节讨论的 NOAA 活动区 12205 就是这种情况）。现有 NOAA 文档并未明确说明，一个有编号的 NOAA 活动区穿越整个远侧面后，在太阳东侧边缘再次出现时究竟何时会被赋予新编号；但通过将每个唯一的 AFT-AR 与所有相关的 NOAA 活动区编号关联起来，便可以正确标记日缘及日缘外事件（见第 2.4.2 节）。

2.3 参数化

我们对 AFT-AR 的磁场分布进行参数化，重点描述活动区在耀斑活动性方面的特征。根据开发 DAFFS-G 的经验（Leka 等，2018、2019a，见 www.nwra.com/DAFFS），其耀斑预测基于 GONG 的视线方向磁场，因此本文采用的参数包括已证明在这一背景下有效的参数。必须强调的是，我们并非要追求“最佳”预报，而是为 4π 预报提供“概念验证”。

2.3.1 识别、位置和可见性

识别参数包括 AFT-AR 标识符（在统计分析中转换为供 Fortran 代码使用的 32 位整数代码，见第 2.4.1 节），以及一个用于指示数据是否已根据 HMI 输入同化至 AFT 的代码。位置参数不仅包括 AFT 活动区的 MCOM 纬度 / 卡林顿经度，还包括扩展至 $\pm 180^\circ$（0° 为中央经线）的斯托尼赫斯特纬度 / 经度，以及观测角的余弦 $\mu = \cos(\theta) = \cos(\text{Stonylat.}) \cos(\text{StonyLong.})$，其中 $\mu < 0$ 表示超出可见范围的 MCOM AFT 活动区位置。

表1。 可见性标签

名称	分配	描述
“日面”	盘面上	从地球可完全观测， $<$ 5% 的区域超出 AFT 同化窗口
“Occ”	被掩蔽，日缘	$>$ 5% 的区域超出 AFT 同化窗口，但由于其大小和位置，仍预计可见（公式 5）
“远”	背面，不可见	由于大小和位置的关系，从地球上不可见

与 AFT 活动区的位置相关的是分配给该区域的“可见性”参数（图3、表1）。盘面上（“Disk”）的活动区从地球侧视角完全可见，其 AFT 活动区边界超过 95% 位于 AFT 同化窗口内，而该窗口实际上在 $\mu \approx 0.1$ （$\theta \approx 84°$）处截断。遮挡或临边活动区（“Occ”）满足以下任一条件：(1) 其 AFT 活动区边界超过 5% 位于 AFT 同化窗口之外；或 (2) 完全位于可见日缘之外，但鉴于其大小，在高能事件期间预计仍可从地球上看到与该区域相关的日冕环（图3）。因此，前一项边界条件将 Occ 分配给那些从地球上可能可以目视探测到、但由于观测角极端，通常会被标准耀斑预报方法排除的区域（见 Barnes 等，2016；Leka 等，2019a；Park 等，2020 的讨论）。背面或不可见活动区（“Far”）则从地球上完全不可见。

后一个边界并非固定不变；我们根据 AFT 活动区的半宽（经度方向）确定一个以该区域的 MCOM位置为圆心、大小相应的简单半圆是否会延伸至可见日缘之外。首先计算的实质上是从该区域的斯托尼赫斯特经度 θ_{Stony} 处能够被观测到的最低高度：

$$h_{\min} = R_{\odot}(\frac{1}{\cos\theta_p} - 1.0) \tag{5}$$

其中， $\theta_p = \theta_{\mathrm{Stony}} - 90.$ 是超出日缘的距离（以经度度数计）。然后，如果张成该区域大小的半圆满足 $h > h_{\min}$，则将该区域标记为“被掩蔽”；否则，它是完全不可见的“远侧”活动区。

2.3.2 磁场表征

在整个分析过程中，只有高于 AFT地图噪声估计值的像素才会纳入参数计算。根据弱信号区域的标准差，该估计值约为 15 Mx cm^{-2}；而 AFT 活动区的识别和跟踪必然采用更高的阈值。因此，在参数化模块中仅使用 AFT 活动区“斑块”内的像素（见图 1），可确保我们只使用 AFT 活动区划定范围内、因而显著高于噪声水平的像素。

由于这是一项“概念验证”，我们将此处展示的磁场参数数量限制为两个，并将它们结合起来进行多参数分析。

第一个参数是该区域的总磁通量。正如 Sawyer 等（1986）；Welsch 等（2009）；Barnes 等（2016）所讨论的，总磁通量是一个广延参数（与活动区的大小有关），众所周知，它是相当不错的耀斑活动预测因子，在某种程度上也可作为基准，用来比较更复杂的分析。因此，总无符号磁通量简单表示为 $\sum_{i=0}^{N} |B_{\mathrm{r\,i}}|\, A_{\mathrm{i}}$ $B_{\mathrm{r\,i}}$ i^{th} $^{-2}$ ，其中， 是 AFT 活动区斑块中 N 个像素各自的径向磁通密度（Mx cm），而 A_{i} 是以 cm^2 为单位的像素尺寸。

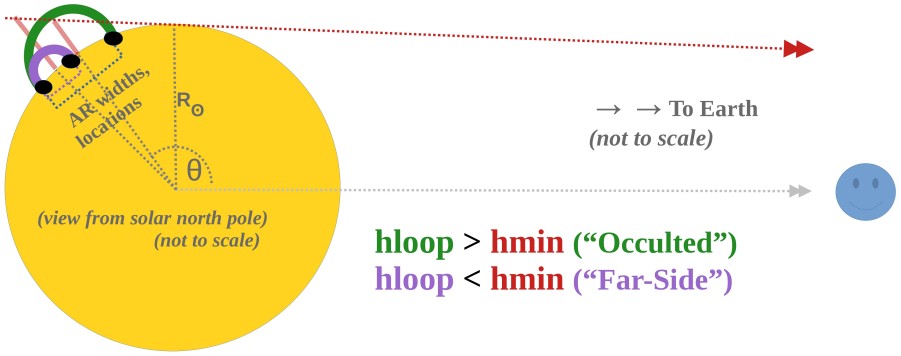

图3. 背面活动区（紫色）和掩星区域（绿色）的示意图（不按比例绘制），并标示有效的斯托尼赫斯特经度 $\theta > 90°$。对于两个环系，红色线段表示活动区环系若要从地球上可见所需达到的最小高度。如示意图所示，我们的模型根据活动区的大小和位置，判断应将其标记为“背面”还是“被掩蔽”。

第二个参数仅需使用 B_r 分布即可获得，并且在大样本评估中表现良好。它是 Schrijver (2007) 的 $\mathcal{R}$ 参数，即强梯度极性反转线（SGPIL）紧邻区域内的总磁通量。极性反转线的识别方法与 (Schrijver, 2007) 中所述的方法相似：基本做法是分别对两种极性进行掩膜处理，扩展这些掩膜，并将重叠区域识别为 SGPIL。我们采用 100 Mx cm^{-2} 的阈值和 2 像素（≈ 8.5 Mm）的宽度；此外，我们对生成的图进行腐蚀和膨胀，以去除单像素区域，最后将边界向外扩展 ≈ 2 个像素。这个最终区域即为“强梯度极性反转线”（s）附近的范围。需要注意的是：（1）一个磁区内可能存在多条 SGPIL；（2）由于极性反转线按定义是没有宽度的线，我们有意取其周围的一小片区域。此处使用的具体数值和阈值与原文 (Schrijver, 2007) 不同，但考虑到数据源、灵敏度、数据网格和空间分辨率的差异，仍能恢复预期的形态。随后，我们计算符合这些判据的 AFT 活动区面积，以及其中包含的磁通量。

AFT-AR 有时会以卡林顿经度=$[0°, 360°]$ 边界附近为中心。在这种情况下，分析模块会识别出这一情况，并创建一幅经度“接缝”位于经度=180°的新地图，对 AFT 地图进行环绕，从而使分割区域能够作为一个整体进行参数化。

2.4 4π 耀斑预报的统计方法

在这项概念验证研究中，我们重点关注对带标签数据进行统计分类 . 如上所述，全面验证背面耀斑活动超出了本文的范围；我们重点考察在有与无相关区域信息的情况下进行临边耀斑区域分类的能力。

*2.4.1 NWRA*分类基础设施

此处的统计评估采用 NWRA 分类基础设施（NCI）执行。NCI 是正在运行的 NWRA 判

别分析耀斑预报系统（DAFFS；Leka 等，2018）的“研究部门”。NCI 是一个成熟的统计分类器平台，在现有形式及早期开发阶段，均曾作为众多研究的统计分析工具（Leka 与 Barnes，2003年；Barnes 等人，2007年；Barnes 与 Leka，2006年；Leka 与 Barnes，2007年；Komm 等人，2011年；Barnes 等人，2014年；Welsch 等人，2009年；Barnes 等人，2017年；Lin 等人，2021年；Leka 等人，2023年）。NCI 基于非参数判别分析（NPDA；Kendall 等人，1983年），利用已知总体样本估计概率密度函数的非参数方法，并通过交叉验证，为新的测量值分配类别。在基本形式下，DA 会生成类别预测。借助贝叶斯定理，可进一步计算某个测量值属于两个（或更多）总体之一的概率：如果**x**属于总体 j，那么

$$P_j(\mathbf{x}) = \frac{q_j f_j(\mathbf{x})}{q_1 f_1(\mathbf{x}) + q_2 f_2(\mathbf{x})}. \tag{6}$$

其中，q_j 是属于总体 j 的先验概率，f_j**(x)**是总体 j 的概率密度函数；在本研究中，$j = 2$ 指事件总体，而 $j = 1$ 指非事件总体。

基于这些密度估计和概率，NCI 输出了范围广泛的评估数据和指标，用于量化所选输入参数区分各总体的能力（见第 2.4.3 节）。鉴于本研究的性质，我们此时不采用不确定性的自助法估计，而是根据对类似样本量的经验来估计技巧评分不确定性（Leka 等，2018、2023）。

NCI 输入所需的组成部分包括待评估的参数（第 2.3 节）以及这些参数的标签，其形式为“事件列表”（第 2.4.2 节）。NCI 代码包旨在满足特定项目的需求；在本研究中，我们根据 AFT地图参数的具体情况，尤其是可见性标签，对相关模块进行了修改。

2.4.2 事件列表生成

事件列表构成了样本标签，用于通过非参数密度估计进行评估。本项目需要的是耀斑开始的时间和位置，以及该耀斑最终的峰值大小。初始数据源是美国国家海洋和大气管理局编辑的耀斑事件列表（美国国家海洋和大气管理局/空间天气预报中心，2024年），其中报告的耀斑参数主要基于地球同步运行环境卫星X射线传感器（GOES/XRS；Garcia，1994），尤其是 $1–8\,^{\circ}$A软X射线传感器。本研究不进行任何进一步的背景扣除或校准。

美国国家海洋和大气管理局提供的耀斑列表确实包含一些错误和缺失的信息。具体而言，许多耀斑未与 NOAA 活动区编号匹配，或缺少位置信息。发生在太阳边缘后方不远处的耀斑尤其常缺少信息。我们对数据集进行了整理，特别关注这类事件。对于已列出、已分配 NOAA 活动区但未标注位置的事件，我们利用 NOAA 活动区列表和标准差异自转速率（包括推算日缘后方的位置）进行核实并分配位置。东边缘外事件则根据日期、位置和向后推算的差异自转，分配给一个“未来分配”的 NOAA 活动区。若事件缺少位置或 NOAA 活动区编号，我们会手动查找是否存在同时发生的事件，所用资源包括 NOAA/美国国家气象局太空天气预报中心 Hα 耀斑事件列表、Solar Monitor（Gallagher 等，2002）、*SolarSoft* “最新事件档案”（Freeland 和 Handy，1998；S. Freeland，2025）以及其他在线公共资源。当然，所有涉及此类查证的分配都带有一定主观判断；整理后的列表可在本文的支持数据中获取（Leka 等，2025）。不过，与下文分析相关的是，我们需要认识到

表2. 活动区与耀斑样本数量 2010年6月—2016年12月

样本描述	逐区域 盘面活动区	被掩蔽区域
AFT-AR（“HMI基线”）	23,485	4,825
C1.0+ 耀斑	5,929	302
M1.0+ 耀斑	1,012	67
AFT-AR（“HMI + GONG ”）	23,892	6,580
C1.0+ 耀斑	5,923	522
M1.0+ 耀斑	1008	127

样本描述	全日面 # 样本	#C1.0+耀斑/ # M1.0+耀斑
AFT-AR（“HMI基线”）	6,911	3,895 / 950
AFT-AR（“HMI + GONG ”）	6,944	3,995/ 1002

由于衰减效应，地球视角探测到的 Occ耀斑必然会被低估。

因此，如上所述，AFT-AR通过与NOAA活动区编号相关联，与耀斑事件建立联系。AFT-AR可能持续多个太阳自转周期，因此可能与不止一个NOAA活动区相关联。区域与事件的匹配依据卡林顿经度、纬度和日期进行。在此阶段，我们尚未尝试纳入真正的背面事件，例如由太阳轨道器搭载的X射线成像光谱仪和望远镜（STIX；Krucker等人（2020）；Xiao等人（2023））观测到的事件；这项重大工作超出了这项初步概念验证研究的范围。

我们根据两个用于定义事件的阈值生成事件列表，分别对应 $10^{-6}\,\mathrm{W\,m^{-2}}$（C1.0）和 $10^{-5}\,\mathrm{W\,m^{-2}}$（M1.0）的峰值通量等级；有效期为24小时，分别从00:00、08:00和16:00世界时开始。对于每个AFT-AR，列表都会记录其有效期内是否发生事件。“全日面”事件列表的生成方式很简单：统计日面或Occ AFT-AR中是否发生过任何事件。值得注意的是，AFT图每天采样三次，每次采样之间相隔8小时的演化时间；我们认为，这样可以得到相互独立的派生参数。最终相关的样本量见表2。

2.4.3 验证统计

NPDA 会给出一个概率，表示某个数据点（来自参数化）属于所分配群体之一的概率。在本例中，我们采用两个群体——即将发生耀斑和耀斑平静，其级别和有效期如第 2.4.2 节所述。此处报告的一项评估指标是布赖尔技巧评分（本质上是均方误差技巧评分），它概括了可靠性图；可靠性图以图形方式展示概率分类的可靠性、技巧和分辨率（讨论见 Barnes 等，2016；Leka 等，2019a）。可靠性图和 BSS 指标无需设定阈值（P_{th}），来判定某个概率是“预测事件”与“预测无事件”，从而填写真值表中的真正例、假阴性等。

我们还绘制接收者（相对）工作特征（曲线）（ROC）图，用于比较虚警率与探测概率，这实质上是随着 P_{th} 在 [0.0 与 1.0] 之间逐步变化而得到的“真值表”各组成部分。ROC 技巧评分（ROCSS；相关讨论见 Leka 等（2019a））通过归

一化曲线下面积来概括 ROC 图，其中 ROCSS=0.0 表示没有技巧，而 ROCSS=1.0 表示技巧完美。因此，BSS 和 ROCSS 能够提供全面的信息，同时不受指定的 P_{th} 影响。

皮尔斯技巧评分（也称为真实技巧统计量（TSS）；Barnes 等（2016）；Bloomfield 等（2012）；Leka 等（2019a））是文献中常用的二分技巧评分。研究表明，当概率阈值等于事件率时，该评分达到最大值，或为 $P_{\mathrm{th}} = R = N_{\mathrm{event}}/N_{\mathrm{total}}$（Bloomfield 等，2012；Kubo，2019）。ROC 曲线上的 max(TSS) 位置已标出；它是 ROC图中距 $x = y$ “无技巧”线垂直距离最大的位置。此处的 max(TSS) 评分都“尚可”（约为 0.45–0.6），但在某种程度上，TSS 和其他二分技巧评分会因对 P_{th} 的敏感性而分散注意力。

在本研究中，气候发生率是一个值得关注的挑战，因为人们认为，刚刚越过太阳边缘的耀斑探测率会有所衰减（Woods et al., 2006），而且无法准确核算 N_{total}。日面的事件率 R 最准确，因为所有信息理应齐备并得到核算。因此，评估期间采用的所有气候事件率均为 $P_{\mathrm{th}} = R_{\mathrm{Disk}}$。

此处关注的是可能对地球造成影响的事件的漏报预报，即 “假阴性”。因此，我们在验证统计中纳入测试案例之间假阴性条目数（“ΔFN”）的变化（F11 与 F10，或 FH11 与 FH10），其中 $P_{\mathrm{th}} = R_{\mathrm{Disk}}$。为求完整，但不深入讨论对 P_{th} 敏感的结果，我们也报告各项检验之间“假阳性”（虚警）数量的变化。最后，我们还报告纳入日缘信息时（F11 和 FH11 检验）正确预报的 Occ 耀斑数量，即“真正例”；并将其与缺少信息时（F10 和 FH10 检验）必然为零的数量进行比较，同样是在 $P_{\mathrm{th}} = R_{\mathrm{Disk}}$ 的情况下。

我们不详细报告其他众多技巧评分，因为本研究的重点并非分类本身的性能（只要其表现合理且不存在病态情况），而是评估通过获取地球朝向观测源之外的额外信息所带来的改进。

2.5 检验

这些测试旨在评估在近日缘和边缘外耀斑的背景下，获取近日缘和边缘外磁场数据所带来的统计分类性能“增益”（如果有）。不同的测试配置见表3，其中用布尔值标示掩蔽区域是否纳入密度估计（即“训练”）。

对于这些测试，所有事件列表所包含的耀斑事件均相同，并依据所示阈值确定。换言之，如果耀斑发生在日缘之外（但被 GOES 的软X射线探测到），就会将其纳入“事件”。日缘之外较大区域中的较小耀斑极有可能存在欠采样，从而造成偏差。然而，鉴于任何耀斑预报方法的最终目标都是预报具有影响力的事件，本研究将基于 GOES 的耀斑探测结果作为真实标签。

2.5.1 日面区域与被掩蔽区域

基本方法是比较 NCI 的分类性能，具体取决于在“训练”系统时是否纳入掩蔽区域——即 计算用于得出基于区域的事件概率的非参数密度估计。名称表示是否纳入 [日面、Occ] 区域的布尔值；也就是说，表3中的“10”与 “11”分别表示不纳入和纳入 Occ 区域。

表3。 检验汇总

名称	Disk 区域?	被掩蔽区域?	数据/区域输入	概率依据
F10	Y	N	仅表面磁通输运	逐区域
F11	Y	Y	” ”	” ”
F10-FD	Y	N	” ”	全日面
F11-FD	Y	Y	” ”	” ”
FH10	Y	N	表面磁通输运 +日震学	逐区域
FH11	Y	Y	” ”	” ”
FH10-FD	Y	N	” ”	全日面
FH11-FD	Y	Y	” ”	” ”

换言之，对于所有 *10 测试，区域概率仅根据日面数据和日面结果计算，这与大多数预报机构采用的总体方法相同（参见 Barnes 等，2016；Leka 等，2019a、2019b 中的讨论）。相比之下，所有 *11 测试的区域概率均根据参数（AFT 活动区）和结果计算；也就是说，使用日面（Disk）和被掩蔽（Occ）参数，并使用日面和被掩蔽耀斑来计算区域概率。

不过，在评估中，所有 *10 和 *11 测试所依据的事件列表，都包含了所有已检测到并分配到区域的耀斑。对于“10”测试，Occ AFT 活动区始终被赋予 0.0 的概率。因此，在这项测试中，任何 Occ 耀斑都必然会被记为“漏报”，而 Occ 非事件结果则会被记为“真阴性”。然而，这与完全“没有信息”并不相同。许多系统会对某个区域作出气候学预测，即使对于该区域，除此之外并无任何定量信息；这通常$\gg 0$ 也就表明系统对该区域的存在有所了解。在此采用的方案中，我们可以确信，“10”测试中的被掩蔽区域会被记为“漏报”或假阴性，但结果会偏向真阴性。

2.5.2 仅表面磁通输运与表面磁通输运 + 日震学

构建了检验，以评估纳入日震学背面信息后带来的额外性能（表3）。用于计算参数的这些图看起来并无差异，但其底层数据要么是仅将 HMI 数据同化到磁通量输运中的“AFT-Baseline”AFT图（表3中的“F”名称），要么是包含从 GONG 日震数据中检测并跟踪到的 AFT 活动区的“AFT+GONG”图（表3中的“FH”；见第2.1节）。

正如预期，在 FH11 数据集中，6.5 年期间相较于 F11 多出了略多于 2,000 个数据点（每个目标时刻每隔 8 小时的 AFT-AR）。这是因为额外的日震学信息提供了更多活动区探测（表2）。这项额外信息的影响，从耀斑阳性 AFT-AR 数据点的数量上显而易见：对于被掩蔽区域 Occ，AFT+GONG 的此类数据点显著多于 AFT基线（C1.0+ 和 M1.0+ 均如此）；而对于盘面上的耀斑阳性 AFT-AR 数据点，两者数量基本相等，这也符合数据同化所带来的预期。

2.5.3 逐区域与全日面

逐区域检验直接比较某个事件由特定区域产生的概率与实际结果，如上文所述。样本量相当大，而且许多预报算法都采用这种方式。然而在实践中，耀斑本身的位置并不重要（除非它会引发对高能粒子等相关现象的预报；Whitman 等，2023）。此外，当活动区的定义不同时，全日面预报也有助于比较不同方法（Leka 等，2019a）。

因此，我们采用“全日面方法”进行检验（Leka 等，2019a，附录 B），即采用类太阳整体观测方式，或不考虑源自 AFT 活动区的耀斑位置。根据 AFT 活动区的概率构建每个时刻的全日面概率（见 Leka 等，2019a）：

$$P_{\mathrm{FD}} = 1.0 - \prod (1.0 - P_{\mathrm{AFT_AR}}) \tag{7}$$

其中，$P_{\mathrm{AFT_活动区}}$表示给定时刻每个 AFT 活动区的概率，P_{FD} 表示事件的全日面概率。与逐区域检验一样，F10-FD 和 FH10-FD 检验包含仅针对日面事件计算的日面 AFT 活动区概率，并且在计算全日面概率之前，被遮挡的 AFT 活动区被赋予 $P_{\mathrm{AFT\ 活动区}} = 0.0$ 。通过这种方式，在 F10-FD 和 FH10-FD 检验中，被遮挡的 AFT 活动区不会增加全日面事件概率。另一方面，对于 F11-FD 和 FH11-FD 检验，它们会增加全日面事件概率。对于所有 -FD 检验，评估使用完整事件列表进行，但在适用情况下，$P_{\mathrm{th}} = R_{\mathrm{Disk}}$。因此，在该时间段内，GONG 补充的 AFT 图中还有 33 个额外的全日面样本可以进行分析，因为至少识别出一个“Occ”区域，而 AFT 基线图中不存在此类区域。

虽然在实际应用中，一些业务预报系统会将“无数据/数据缺失”或“数据质量不佳”处理为基于气候学的预报（Leka 等，2018，2019a），但在此我们力求展示一个更严格的情形：有信息与无信息之间的差异。这种处理方式也能提供最易于解读的结果。

3 结果

此处呈现的结果旨在实现“概念验证”。除了采用两个已证明与太阳耀斑产出率相关的参数外，我们并未投入太多精力来争取最佳表现。

3.1 两种日缘耀斑的故事

那么，效果如何？我们先来看两个例子：一个是分类成功，另一个是分类失败。

3.1.1 成功：美国国家海洋和大气管理局 *AR 12192*，*2014*年*10*月

NOAA AR 12192 于 10 月中下旬横穿日面，并表现出显著的耀斑活动。不过，在它实际可见之前，耀斑就已开始发生。2014.10.14 世界时 08:00，以及随后 16:00，使用 AFT+GONG (FH-11) 测试预测 M1.0+ 耀斑的概率为 > 0.1 （显著高于 $R = 0.043$ 气候学基准）。此时，该活动区位于 $-125°$ 经度，也就是日缘以外 $35°$，但仍产生了两个由 GOES 探测到的 M 级耀斑（世界时 18:37 的 M1.1 和世界时 19:07 的 M2.2）。概率一直维持在较高水平；事实上，AR 12192 是第 24 太阳活动周中耀斑活动显著的活动区。

表4。 结果摘要：逐区域

Test	事件定义对数（R）	气候基准- $P_{\mathrm{th}}=R$	Δ（漏报） $P_{\mathrm{th}}=R$	Δ（虚报）	Occ真阳性 ROCSS $P_{\mathrm{th}}=R$		ΔROCSS Brier 技能分数		ΔBSS
F10	C1.0+	0.252			0	0.606		0.255	
F11	” ”	” ”	-10	-1	116	0.617	+0.011	0.264	+0.009
F10	M1.0+	0.043			0	0.676		0.161	
F11	” ”	” ”	-26	+190	34	0.734	+0.058	0.178	+0.017
FH10	C1.0+	0.248			0	0.574		0.232	
FH11	” ”	” ”	+31	-9	155	0.584	+0.010	0.240	+0.008
FH10	M1.0+	0.042			0	0.615		0.149	
FH11	” ”	” ”	-24	-111	60	0.718	+0.103	0.151	+0.002

相比之下，不包含任何背面信息的 AFT-Baseline 测试，在上述 2014.10.14 的两个时刻，预测概率均为 ≈ 0.01 。经过 HMI 数据同化后，概率有所上升，但此时该区域已经多次发生耀斑。

3.1.2 失败：*2014*年*11*月的 *NOAA* 活动区 *12205*

根据多项分析，这个活动区在其生命周期中反复增长和减弱，耀斑活动性也不断变化，因而成为一项重大挑战。2014年10月底，GONG识别出的一个新 AFT 活动区出现在 AFT+GONG 日面图中（AFT-ID 20141027TN21014，即于 2014.10.27 在 N12、卡林顿经度 014 处开始形成），此时它几乎位于 -180° 斯托尼赫斯特经度。随后，这个 AFT 活动区于 2014.10.31 16:00 世界时在接近 $\approx -130^\circ$ 斯托尼赫斯特经度的位置消失。随着该卡林顿经度转入视野，且 HMI 数据同化开始，磁通量集中区自 2014.11.05 起增长；它也因此获得了新的 AFT-ID 20141108TN15010——但几天后，其面积再次缩小。因此，遗憾的是，2014.11.05 出现的大型、环状结构清晰可见的 Occ M级耀斑被误分类。最后，在 2014.11.06 之后（当时这个 AFT 活动区，也就是 NOAA 活动区 12205，位于 ≈斯托尼赫斯特经度 E60，已完全进入日面），之后出现的多次大型耀斑均被正确分类。

事实上，采用不同方法进行的分析（Hamada 等，2024年、2025年）证实，该位置的地震学特征在2014.10.27–2014.10.29期间有所减弱。这个活动区或许能成为未来改进近太阳边缘活动区日震探测的良好测试案例。

3.2 大样本分析

全样本检验及其所得指标汇总见表4，其中逐区域检验的结果列于表4，全日面检验的结果列于表5。ROC图见图4–5，可靠性图见图6–9。

总体而言，ROCSS 和 BSS 各自的表现都相当不错，而且正如之前所述，它们并不是本文的重点。随着耀斑阈值（M+）升高，BSS 会下降，而 ROCSS 则会上升，这与此前的结果一致（Barnes 等，2016；Leka 等，2019a）。ROC图和可靠性图与众多出版物中展示的结果“基本相当”，证实“4π-框架”的总体表现符合预期。

表5。 结果摘要：全日面

Test	事件定义对数 (R)	气候基准- $P_{\rm th}=R$	Δ(漏报) $P_{\rm th}=R$	Δ(虚报)	Occ真阳性 ROCSS $P_{\rm th}=R$	ΔROCSS	Brier 技能分数	ΔBSS
F10-FD	C1.0+	0.446			0	0.719		0.383	
F11-FD	” ”	” ”	-73	+62	15	0.723	+0.004	0.394	+0.011
F10-FD	M1.0+	0.108			0	0.656		0.188	
F11-FD	” ”	” ”	-37	+85	0	0.686	+0.030	0.209	+0.021
FH10-FD	C1.0+	0.426			0	0.687		0.343	
FH11-FD	” ”	” ”	-90	+45	49	0.702	+0.015	0.364	+0.021
FH10-FD	M1.0+	0.103			0	0.627		0.174	
FH11-FD	” ”	” ”	-50	+15	4	0.662	+0.035	0.176	+0.002

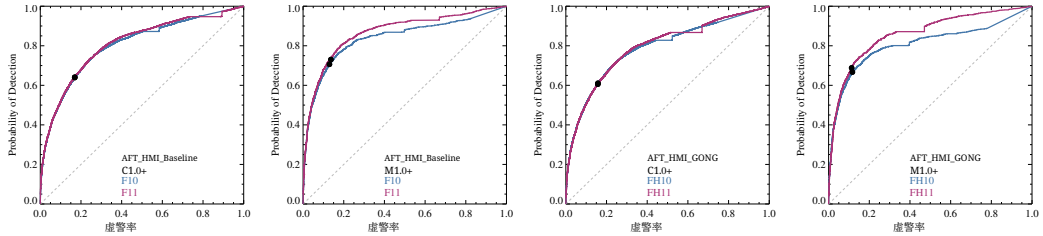

图4。 基于区域的预报的ROC图，对比了所示的配对检验（*c.f.* 表3）。对于每项检验，均标出了ROC曲线上的 $P_{\rm th}$ 位置；该位置对应TSS $=$ 命中率减去虚警率达到最大值。相关的ROCSS以及配对检验之间的差异见表4。

加入“Occ”数据后，统计指标总体朝着预期的“方向”改善：ROCSS 和 BSS评分均有所提高，但随着信息增加而提升的幅度并不大，尤其是在 F-FD 和 FH-FD检验中。鉴于样本量（Barnes 等，2016；Leka 等，2018、2023），我们预计这些技巧评分中的基于区域的不确定性为 $\simeq 0.01$ (C+) 和 $\simeq 0.02$（M+）。因此， ΔROCSS 所体现的改善幅度，对于 C1. 为 1σ ，对于 M1. 超过 3σ ，但对于 ΔBSS，全部处于 $\approx 0.0\sigma - 1.0\sigma$ 范围内。

这些幅度虽小但呈正向的改进趋势也反映在图中。C1.0+ 的F10 与F11以及FH10与FH11检验的ROC图差异很小，而M1.0+ 的ROC图（图4）则有明显差异，表现为各概率分箱之间的散布更小。与F检验相比，FH检验的改进更为显著，这反映在表4中较高的 ΔROCSS上。可靠性图中的差异很难通过肉眼判断，这也反映在 ΔBrier 技能分数上。对于 FH-11 / M1.0+，可以看到低概率分箱在 $x = y$ 线上略微趋于紧密，但在较高概率处出现了明显的过度预报，且程度略高于FH-10检验。这一趋势与Occ耀斑的代表不足直接相关，意味着这更多是漏检，而非过度预报。

全日面检验（F-FD 和 FH-FD）显示出相似的统计结果：所有 Δ[ROCSS、BSS] 均处于正确的“方向”，但统计改进幅度较小。鉴于处于“Occ”状态的活动区和耀斑总体占比较小，这一结果并不出人意料。

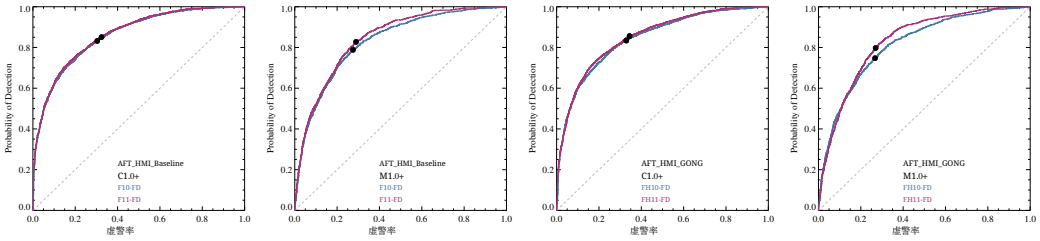

图5。 与图4相同，但针对全盘预报，并在表5中给出了相应的 ROCSS。

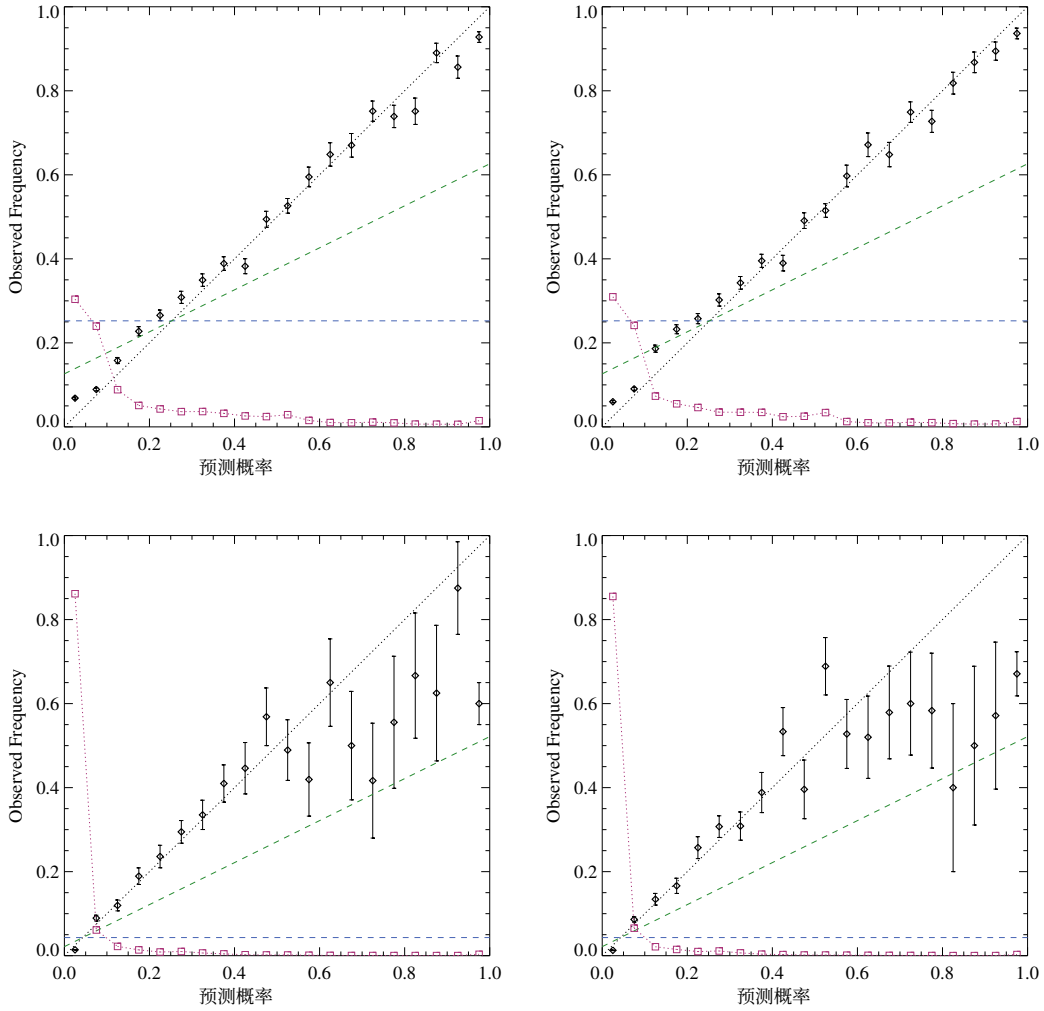

图6。 不包含（左图中的 F10）和包含（右图中的 F11）遮挡区域数据的 AFT-HMI基线数据的可靠性图，分别针对 C1.0+ 耀斑（上图）和 M1.0+ 耀斑（下图）。预测概率被划分为 20 个分箱，误差条反映了该分箱的样本量（Wheatland，2005）。图中还显示了样本量直方图（红色）、气候学（蓝色）和“无技巧”线（绿色）。

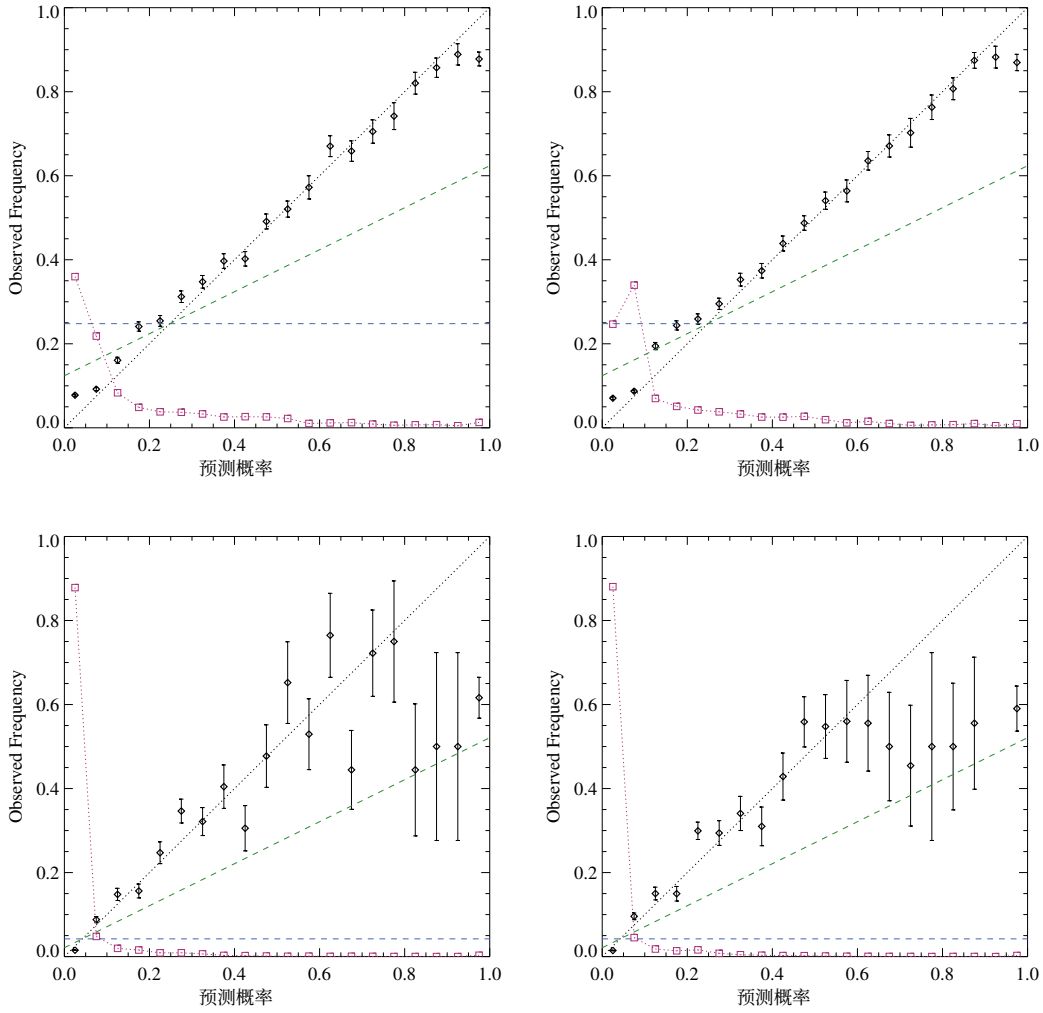

图 7. 与图6相同，但此处展示的是由基于 GONG 的日震学提供信息的 AFT 图： *i.e.* FH10（左）和 FH11（右）。

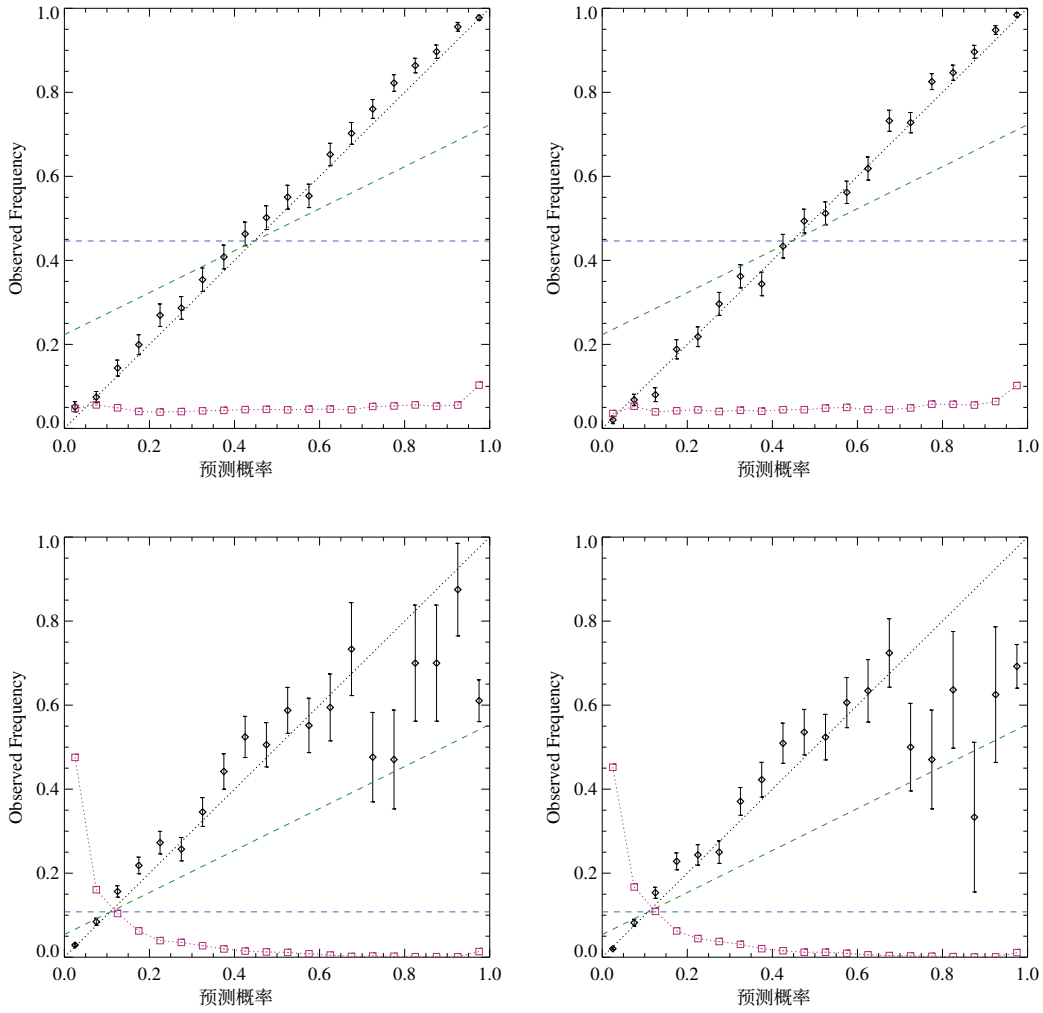

图8。与图6相同，但展示全盘预报， *i.e.* F10-FD（左）和 F11-FD（右） .

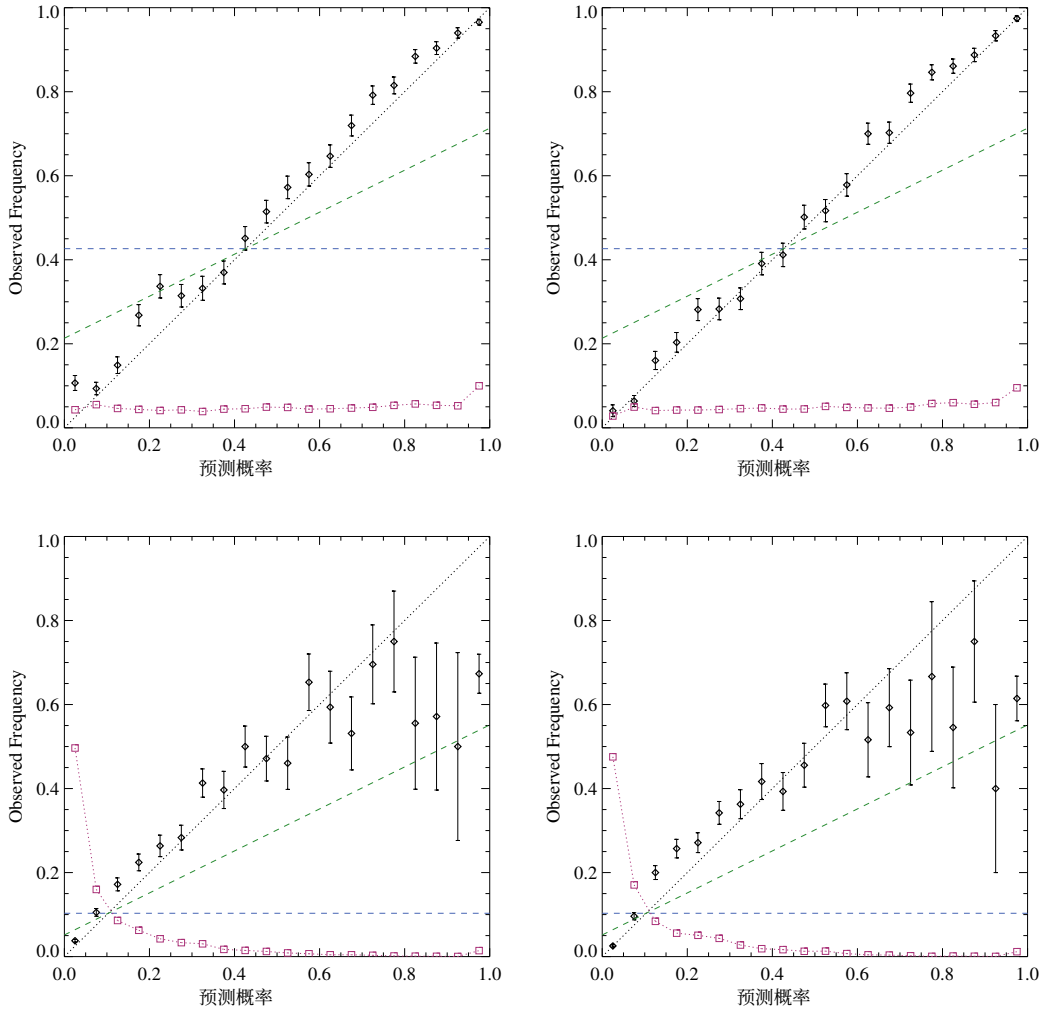

图9。 与图 7 相同，但展示全盘预报， *i.e.* FH10-FD（左）和 FH11-FD（右）。

表6. 东 *vs* 西“Occ”成功率（逐区域）

Test	事件定义	气候学	N_{East}	N_{West}	不平衡（H）
F11	C1.0+	0.252	8	108	0.86
FH11	C1.0+	0.248	45	110	0.42
F11	M1.0+	0.043	2	32	0.88
FH11	M1.0+	0.042	24	36	0.20

FD检验的 ROC 图对 C1.0+ 的改善同样微乎其微，对 M1.0+ 的改善则较为明显（尽管改善幅度不大），其中 FH 检验呈现出更显著的视觉改善。正如 ΔBrier 技能分数的结果所预示的那样，可靠性图中的趋势并不明显；不过，对于 C1.0+，与 FH10-FD 相比，FH11-FD 在低概率分箱上的表现有所改善。

基于区域和基于全盘的测试通常都显示假阴性有所减少，其中 F-FD 和 FH-FD 检验的减少更为显著，但 FH（区域）情况除外。这一趋势令人鼓舞，不过具体数值对 P_{th} 较为敏感；根据现有事件列表，日面与日面+Occ 的 P_{th} 差异最高可达 25%，这同样是由于 Occ 的事件漏检以及未知的“非事件”率所致。真值表中的假阴性与假阳性通常存在权衡，这一点在表4和表5中有所体现。根据用户偏好，可以优化 P_{th}，以改善其中一种错误的表现；而在 $P_{\mathrm{th}} = R_{\mathrm{Disk}}$，加入 Occ 数据所提供的信息后，假阳性可能减少，也可能不会减少。

考虑到这些 P_{th} 注意事项，最值得关注的是“TP (Occ)”条目。对于所有“-10”检验，这些条目必然都是“0”，这意味着没有 Occ 事件被成功分类。除一个“-11”检验外，其余所有“-11”检验的 TP(Occ) $\gg 0$ 均表明，借助 4π 信息，近日缘、日缘处以及刚刚越过日缘的事件确实都被成功分类。对于 FD 检验，数字比基于区域的检验小，但必须记住，这些基本上代表从地球观测视角进行的 4π 评估：每个 TP (Occ) 条目代表一个 24小时周期（回顾我们每 8 小时采样一次），在此期间唯一 的事件是一个 Occ 事件；如果没有提供 4π 信息，该事件就会被漏掉。此外，无论是基于区域还是基于 FD 的检验，AFT-GONG FH 检验系统性地提供了比 AFT-Baseline 更多的此类案例，这表明背面日震学提供的额外信息能够改善对日缘附近耀斑的分类。

东侧与西侧日缘 Occ 分类性能的差异，可用于检验这样一个假设：由于数据较近期才被同化到 AFT 模型中，西侧边缘耀斑的预测结果预计会更好。表6列出了按东侧太阳边缘 *vs.* 西侧太阳边缘划分的、正确分类的 Occ AFT-AR。正确分类数量采用与表4相同的 $P_{\mathrm{th}} = R_{\mathrm{Disk}}$，而“失衡比”遵循通量平衡（公式 2），$H = |(N_{\mathrm{East}} - N_{\mathrm{West}})| / N_{\mathrm{total}}$，因此 $H = 0$ 为完全平衡，$H = 1$ 为完全失衡，其中 N_{East}，N_{West}分别代表东侧和西侧日缘的真正例。这项半球分析证实了所述假设：仅使用 AFT 模型时（F11 检验），失衡比很高，且 N_{West}占主导。重要的是，纳入背面日震学信息后（FH11 检验），失衡比显著降低。因此，结果清楚表明，4π 框架提升了日缘耀斑分类性能；尤其是纳入背面日震学提供的信息，对东侧边缘耀斑具有显著附加价值。

4 讨论与结论

我们在此介绍一个概念验证版“4π 太阳高能事件预报系统”，并从太阳耀斑入手。具体而言，我们提出这一基础设施，以应对未来对全日球空间天气预报的需求；随着更多任务进入太阳系、活动范围超出太阳附近的日地连线，这一需求将日益迫切。近期，我们重点关注改善影响地球的太阳耀斑预报的可能性，这些耀斑发生在太阳边缘附近或刚刚越过太阳边缘（即“边缘耀斑挑战”）。在这种情况下，通常用于生成此类预报的数据会变得不可靠，甚至完全无法获取。

新的 4π 框架由表面磁通量输运模型、来自背面日震学的信息输入以及统计分类器组成。为该系统开发的其他组件包括一份合适的耀斑事件列表（本例中特别精心整理，用于表征近日缘和边缘外耀斑）、一种新的活动区识别与标记方案，以缓解地球侧序贯编号方案带来的问题，以及一种验证方法，用于在已知探测偏差的背景下对这一挑战的性能进行统计评估。

我们针对涵盖 6.5 年（多个太阳自转）的统计显著样本量进行了检验，采用逐区域和全日面表示，并遵循标准的耀斑预报事件定义。然而，即使有这一多年数据集，样本量仍不大，这意味着纳入与不纳入边缘信息之间的差异在统计上可能并不明显。我们通过采用重叠有效期（每 8 小时部署一次、每次有效期为 24 小时）在一定程度上缓解了这一挑战，以增加样本量。我们认为，8 小时样本间 AFT图的演变可提供相互独立的观测—分类结果对，但这或许无法完全避免非独立事件标签造成的偏差。我们分别使用选定的三个时刻的数据对分析进行了检验（例如，采用三组不同的单时刻采样和 24 小时有效期，从而得到三组完全独立的 24 小时标签和结果），每组的样本量约为“合并数据”的三分之一。我们已确认，对于当前实验，8 小时子采样不会给概率分布带来显著偏差；事件率或由此得到的技巧评分也不存在统计显著差异，尤其考虑到样本量较小时预期的不确定性会更大。单时刻结果与合并数据结果之间的主要差异是，后者的技巧评分略高，这是因为样本量更大，因此概率密度函数的估计更准确。用于验证我们结论的数据可在相关开放数据存储库中获取（Leka 等，2025）。

因此，我们的实验发现，仅使用表面磁通输运模型提供的信息，确实能够根据标准验证指标改善对地球可见日缘耀斑的预报。具体而言，该框架能够总体减少“漏报”事件的数量，并能对西侧太阳边缘耀斑进行成功分类。我们还发现，将利用背面日震学探测到的新太阳活动区或先前已识别区域的增长纳入模型后，预报效果会进一步改善，尤其是对东侧边缘耀斑的预报。

可以说，若以所有可见耀斑为整体进行评估，我们展示的改进在统计上幅度较小。不过，这些改进始终符合预期方向，也很好地证明了这一概念的可行性。这里描述的流程中，每个环节都有改进空间。同样，对于该框架的每个组成部分，也都可以采用不同的方法或数据源。本文着重使用表面上可通过业务化方式获取的数据，这意味着我们无需依赖 *Sun-Earth* 连线之外的数据。

然而，此处介绍的新基础设施值得关注，其中包括：

1. 一种新颖的活动区编号方案，可避免太阳自转引发的以地球为中心的混淆，允许事后更改，并提供唯一标识符；2. 将背面活动区的探测及其磁性质评估纳入 4π Sun 表面磁通量输运模型的方法；3. 使用已知与太阳耀斑产生相关的磁场参数来表征 4π Sun；4. 为日缘附近及被掩蔽区域开发验证方法，以覆盖绝大多数耀斑预报系统通常会遗漏的区域。

当时机成熟（若确有此时机）而决定推进业务化 4π 高能事件预报工具时，确实应考虑找出表现最佳的磁通量输运系统、最灵敏的震动探测算法、最稳定的活动区识别与跟踪系统，以及最优的磁场参数组合。事实上，为了实现最佳的“日缘耀斑”预测，可以考虑将这种4π基于磁场的方法与一种专注于太阳边缘上方可见的紫外日冕辐射的方法结合起来（Leka等人，2023；Lee 等，2024）。然而，对于这项概念验证而言，重点并非获得尽可能高的技巧评分。相反，我们提出一种新颖的方法，介绍为此开发的必要基础设施，并展示 4π “全日球层”空间天气预报的效用，首先着手解决当今业务化太阳耀斑预报中的“日缘耀斑挑战”失效模式。

开放研究部分

本项目包含来自多个不同来源的数据和代码，其中一些属于“处理流程”和／或公开资源，另一些则是专为本研究创建的。以下大致按照提供数据的机构和／或责任方列出资源的可用情况。

NSO:

1. 相移图可在以下网址获取：https://gong2.nso.edu/archive/patch.pl ?menutype=farside#step2

西南研究院:

1. AFT基线图可供获取，参见 Jha 和 Upton（2024年）。最新的 AFT 基线图也可从 https://data.boulder.swri.edu/ lisa/AFT Baseline/ 获取，该图每天都会更新，纳入最新可用的 HMI 磁像仪数据。2. GONG引导的输入 AFT 图可供获取，参见 Jha、Upton 等人（2025年）。3. 用于识别、跟踪和标记 AFT 活动区的 AFT-AR代码可供获取，参见 Jha、Sreedevi 等人（2025年）。

NWRA:

1. 已创建一个项目专用代码库，详见 Leka等（2018）。在此代码库中，我们提供：包含 AFT 活动区参数化数据和事件总体的 IDL“save”文件。这些文件实质上是数百个输出文件的摘要；若提供原始文件，它们体积庞大，且包含大量与本项目无关的数据。每项检验的预报或分类器概率均已提供；此处还提供了用于汇总 AFT-AR（由西南研究院提供）的 JSON文件。此外，还提供了经过“整理”的事件列表（其信息用于确定 IDL save 文件结构中的“POP”标签）。

2. 用于计算概率的 NCI 见 Leka 等人（2018）的说明。判别分析的线性版本可在 https://www.cora.nwra.com/~graham/DA.html 获取。我们开发了一些针对特定项目计算环境的数据处理封装程序，但未将其纳入，因为它们并非通用分析工具。3. 用于计算技巧评分、ROCSS 以及绘制图表所需指标的代码，均已在（Leka 等，2025）代码库中提供。

致谢

本项目主要由美国国家航空航天局/R2O2R 项目资助，资助编号为 #80NSSC22K0273；此外，还获得了美国国家航空航天局 LWS/SC 项目资助（编号 80NSSC22K0892，转拨给 NWRA）。KJ 部分获得了美国国家科学基金会授予国家太阳天文台的「宇宙之窗——多信使天体物理学」（WoU-MMA）项目资助。文中所表达的所有观点仅代表作者个人。本研究使用了 GONG 数据，该数据由 NSO 综合日面观测计划获取；该计划由国家太阳天文台管理。国家太阳天文台由天文学研究大学协会（AURA）运营，并依据与美国国家科学基金会签订的合作协议开展工作，同时获得美国国家海洋和大气管理局的资助。GONG 仪器网络由大熊湖太阳天文台、高海拔天文台、利尔蒙斯太阳观测站、乌代浦尔太阳观测站、加那利群岛天体物理研究所和托洛洛山美洲际天文台共同承载。我们感谢 HMI 和太阳动力学观测台的设施及团队，以及 GONG 设施和团队，尤其是 Mitch Creelman，使本项目得以完成；感谢 Amr Hamada 博士就 NOAA 活动区 12205 提供意见，并感谢 Graham Barnes 博士对 NCI 的支持。作者还感谢两位认真细致的审稿人，他们帮助我们澄清并完善了论文的表述。

利益冲突声明

作者声明不存在利益冲突。

参考文献

Arge, C. N., Luhmann, J. G., Odstrcil, D., Schrijver, C. J.，和 Li, Y.（2004年10月）。1997年5月12日 CME 期间太阳风的流结构与日冕源。《大气与太阳-地球物理学杂志》，*66*（15-16），1295-1309。doi：10.1016/j.jastp.2004.03.018 AstroPy 开发者。（2025年）。西格玛裁剪。https://docs.astropy.org/en/stable/api/astropy.stats.sigma clip.html。（访问时间：2024-2025年）Barnes, G., Birch, A. C., Leka, K. D.，和 Braun, D. C.（2014年5月）。新兴前活动区的日震学研究。III. 统计分析。《天体物理学杂志》，*786*，19。doi：10.1088/0004-637X/786/1/19 Barnes, G.，和 Leka, K. D.（2006年）。耀斑活动区与无耀斑活动区的光球磁场特性 III：磁荷拓扑模型。《天体物理学杂志》，*646*，1303–1318。doi：10.1086/504960 Barnes, G., Leka, K. D., Schrijver, C. J., Colak, T., Qahwaji, R., Ashamari, O. W., . . . Wagner, E. L.（2016年10月）。耀斑预报方法比较 I：“全清”研讨会的结果。《天体物理学杂志》，*829*，89。doi：10.3847/0004-637X/829/2/89 Barnes, G., Leka, K. D., Schumer, E. A.，和 Della-Rose, D. J.（2007年）。利用矢量磁图数据对太阳耀斑进行概率预报。《空间天气》，*5*，9002。doi：10.1029/2007SW000317 Barnes, G., Schanche, N., Leka, K. D., Aggarwal, A.，和 Reeves, K.（2017年6月）。太阳高能事件分类器的比较。载于 M. Brescia（编），天文信息学（第325卷，第201-204页）。doi：10.1017/S1743921316012758 Bloomfield, D. S., Higgins, P. A., McAteer, R. T. J.，和 Gallagher, P. T.（2012年3月）。迈向可靠的太阳耀斑预报方法基准测试。《天体物理学杂志快报》，*747*，L41。doi：10.1088/2041-8205 Bobra, M. G., Sun, X., Hoeksema, J. T., Turmon, M., Liu, Y., Hayashi, K., . . . Leka, K. D.（2014年9月）。日震与磁成像仪（HMI）矢量磁场处理流程：SHARPs——空间天气HMI活动区补丁。《太阳物理学》，*289*，3549-3578。doi：10.1007/s11207-014-0529-3 Braun, D. C.，和 Lindsey, C.（2001年10月）。太阳远侧半球的地震成像。《天体物理学杂志快报》，*560*（2），L189-L192。doi：10.1086/ 324323 Centeno, R., Schou, J., Hayashi, K., Norton, A., Hoeksema, J. T., Liu, Y., . . . Barnes, G.（2014年9月）。日震与磁成像仪（HMI）矢量磁场处理流程：谱线反演代码的优化。《太阳物理学》，*289*，3531-3547。doi：10.1007/s11207-014-0497-7 Couvidat, S., Schou, J., Shine, R. A., Bush, R. I., Miles, J. W., Scherrer, P. H.，和 Rairden, R. L.（2012年1月）。太阳动力学观测台（SDO）搭载的日震与磁成像仪（HMI）仪器的波长依赖性。《太阳物理学》，*275*，285-325。doi：10.1007/s11207-011-9723-8 Freeland, S.（2025年）。*Solarsoft* 最新事件。https://www.lmsal.com/solarsoft/ latest events archive.html。（访问时间：2023 - 2025年）Freeland, S. L.，和 Handy, B. N.（1998年10月）。使用SolarSoft系统进行数据分析。《太阳物理学》，*182*（2），497-500。doi：10.1023/A:1005038224881 Gallagher, P. T., Moon, Y. J.，和 Wang, H.（2002年9月）。活动区监测与耀斑预报 I。数据处理与初步结果。《太阳物理学》，*209*（1），171-183。（见 https://solarmonitor.org）doi：10.1023/A:1020950221179 Garcia, H. A.（1994年10月）。利用 GOES 软X射线测量获得温度和发射量。《太阳物理学》，*154*，275-308。doi：10.1007/BF00681100 Georgoulis, M. K., Bloomfield, D. S., Piana, M., Massone, A. M., Soldati, M., Gal- lagher, P. T., . . . Worsfold, M.（2021年5月）。耀斑可能性与活动区爆发预报（FLARECAST）项目：大数据中的耀斑预报

及机器学习时代。《空间天气与空间气候学杂志》，11，39。doi: 10.1051/swsc/2021023 Gonz´alez Hern´andez, I., D´ıaz Alfaro, M., Jain, K., Tobiska, W. K., Braun, D. C., Hill, F., & P´erez Hern´andez, F.（2014年2月）。基于日震学推断的全日面磁指数。《太阳物理学》，289（2），503-514。doi: 10.1007/s11207-013-0339-z Gonz´alez Hern´andez, I., Hill, F., & Lindsey, C.（2007年11月）。太阳背面活动区地震学特征的校准。《天体物理学杂志》，669（2），1382-1389。doi: 10.1086/521592 Gonz´aLez Hern´andez, I., Hill, F., Scherrer, P. H., Lindsey, C., & Braun, D. C.（2010年6月）。背面地震成像识别活动区的成功率。《空间天气》，8（6），06002。doi: 10.1029/2009SW000560 Hale, G. E., Ellerman, F., Nicholson, S. B., & Joy, A. H.（1919年4月）。太阳黑子的磁极性。《天体物理学杂志》，49，153。doi: 10.1086/142452 Hamada, A., Creelman, M., Jain, K., & Lindsey, C.（2025年6月）。背面训练的活动区识别（FASTARR）：一种机器学习方法。《天体物理学杂志增刊系列》，278（2），53。doi: 10.3847/1538-4365/add893 Hamada, A., Jain, K., Lindsey, C., Creelman, M., & Oien, N.（2024年12月）。基于日震与极紫外测量的太阳背面活动区：用于推进日球层机器学习的新数据集。《天体物理学杂志》，977（1），85。doi: 10.3847/1538-4357/ad8636 Harvey, J. W., Hill, F., Hubbard, R. P., Kennedy, J. R., Leibacher, J. W., Pin- tar, J. A., . . . Yasukawa, E.（1996年5月）。全球振荡网络组（GONG）项目。《科学》，272（5266），1284-1286。doi: 10.1126/science.272.5266.1284 Hathaway, D. H.（2011年10月）。太阳黑子带向赤道漂移的标准定律。《太阳物理学》，273（1），221-230。doi: 10.1007/s11207-011-9837-z Hathaway, D. H., & Upton, L. A.（2016年11月）。利用表面磁通输运预测第25太阳活动周的振幅和半球不对称性。《地球物理研究杂志（空间物理学）》，121（11），10,744-10,753。doi: 10.1002/ 2016JA023190 Hoeksema, J. T., Liu, Y., Hayashi, K., Sun, X., Schou, J., Couvidat, S., . . . Turmon, M.（2014年9月）。日震与磁成像仪（HMI）矢量磁场处理流程：概述与性能。《太阳物理学》，289，3483-3530。doi: 10.1007/s11207-014-0516-8 Jain, K., Tripathy, S. C., Hill, F., & Pevtsov, A. A.（2021年10月）。基于GONG观测评估占空比：地面连续太阳观测。《太平洋天文学会刊》，133（1028），105001。doi: 10.1088/1538-3873/ac24d5 Jha, B. K., Priyadarshi, A., Mandal, S., Chatterjee, S., & Banerjee, D.（2021年1月）。利用长达一个世纪的Kodaikanal太阳黑子数据测量太阳差异自转。《太阳物理学》，296（1），25。doi: 10.1007/s11207-021-01767-8 Jha, B. K., Sreedevi, A. B., Karak, B. B., & Banerjee, D.（2025年6月）。autotabpy。Zenodo。doi: 10.5281/zenodo.15666357 Jha, B. K., & Upton, L.（2024年）。HMI AFT基线图。哈佛Dataverse。doi: 10.7910/DVN/CGFKRE Jha, B. K., Upton, L., Leka, K. D., & Jain, K.（2025年）。AFT HMI+GONG背面光球径向磁场图。哈佛Dataverse。doi: 10.7910/ DVN/AJ3LPD Kendall, M., Stuart, A., & Ord, J. K.（1983年）。《高级统计学理论》（第4版，第3卷）。纽约：麦克米伦出版公司。Komm, R., Ferguson, R., Hill, F., Barnes, G., & Leka, K. D.（2011年2月）。耀斑活动区与无耀斑活动区的次表面涡量。《太阳物理学》，268，389–406。doi: 10.1007/s11207-010-9552-1

Krucker, S., Hurford, G. J., Grimm, O., K¨ogl, S., Gr¨obelbauer, H. P., Etesi, L., . . . Lin, R. P. （ 2020 年 10 月）。成像 X 射线光谱仪 / 望远镜（ STIX ）。《天文学与天体物理学》， *642*， A15。doi: 10.1051/0004-6361/ 201937362 Kubo, Y.（2019年4月）。为什么一些概率预报缺乏可靠性? 《空间天气与空间气候学杂志》， *9*， A17。doi: 10.1051/swsc/2019016 Lee, J., Moon, Y.-J., Jeong, H.-J., Yi, K., & Lee, H.（2024年8月）。根据极紫外强度能否正确进行太阳边缘耀斑预测? 《天体物理学杂志快报》， *971*（2）， L47。doi: 10.3847/2041-8213/ad6b9b Leka, K. D., & Barnes, G.（2003年）。耀斑活动区与无耀斑活动区的光球磁场特性 II：判别分析。《天体物理学杂志》， *595*， 1296–1306。Leka, K. D., & Barnes, G.（2007年）。耀斑活动区与无耀斑活动区的光球磁场特性 IV：具有统计显著性的样本。《天体物理学杂志》， *656*， 1173–1186。doi: 10.1086/510282 Leka, K. D., & Barnes, G.（2017年）。太阳耀斑预报：现有方法与挑战。载于Buzulukova, N.（编）， 《地球空间极端事件：起源、可预测性与后果》（第一版，第3章）。美国马萨诸塞州剑桥：Elsevier。Leka, K. D., Barnes, G., & Wagner, E. L.（2017年2月）。评估（并改进）基于视向磁图估算太阳径向磁场分量的方法。《太阳物理学》， *292*， 36。doi: 10.1007/s11207-017-1057-8 Leka, K. D., Barnes, G., & Wagner, E. L.（2018年4月）。NWRA分类基础设施：描述及其向判别分析耀斑预报系统（DAFFS）的扩展。《空间天气与空间气候学杂志》， *8*（27）， A25。doi: 10.1051/swsc/2018004 Leka, K. D., Dissauer, K., Barnes, G., & Wagner, E. L.（2023年1月）。从色球层到日冕的即将发生耀斑活动区与耀斑平静活动区的特性 II：NWRA分类基础设施（NCI）的非参数判别分析结果。《天体物理学杂志》， *942*， 84。doi: 10.3847/1538-4357/ac9c04 Leka, K. D., Park, S. H., Kusano, K., Andries, J., Balch, C., Barnes, G., . . . Terkildsen, M.（2019a，8月）。耀斑预报方法比较 II：业务化太阳耀斑预报系统的基准、指标与性能结果。《天体物理学杂志增刊系列》， *243*（2）， 36。取自https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab2e12 doi: 10.3847/1538-4365/ab2e12 Leka, K. D., Park, S. H., Kusano, K., Andries, J., Balch, C., Barnes, G., . . . Terk- ildsen, M.（2019b，8月）。耀斑预报方法比较 III：业务化太阳耀斑预报系统的系统性行为。《天体物理学杂志》， *881*（2），101。取自https://doi.org/10.3847/1538-4357/ ab2e11 doi: 10.3847/1538-4357/ab2e11 Leka, K. D., Wagner, E. L., Petty, S., & Jha, B. K.（2025年）。《复现数据：应对太阳耀斑预报中的已知挑战 *I*：利用 4π 全日球框架进行太阳边缘耀斑预测》。哈佛Dataverse。取自https://doi.org/10.7910/DVN/3QQ5CO doi: 10.7910/DVN/3QQ5CO Lin, P. H., Kusano, K., & Leka, K. D.（2021年6月）。太阳耀斑的爆发性：磁通量绳的挑战。《天体物理学杂志》， *913*（2），124。doi: 10.3847/ 1538-4357/abf3c1 Lindsey, C., & Braun, D. C.（2000年3月）。太阳背面的日震图像。《科学》， *287*（5459），1799-1801。doi: 10.1126/science.287.5459.1799 MacDonald, G. A., Henney, C. J., D´ıaz Alfaro, M., Gonz´alez Hern´andez, I., Arge, C. N., Lindsey, C., & McAteer, R. T. J.（2015年7月）。从太阳近侧日震数据中选取的活动区形态。《天体物理学杂志》， *807*（1），21。doi: 10.1088/0004-637X/807/1/21

Mosher, J. (1977). 太阳活动区的磁历史 (博士学位论文，加州理工学院，帕萨迪纳，加利福尼亚州)。(答辩日期：1976年11月1日) doi: 10.7907/ZPPR-4490 美国国家海洋和大气管理局/空间天气预报中心。(2024年9月)。观测到*R3*（强）高频无线电中断。https://www.swpc.noaa.gov/news/r3-strong-hf-radio -blackout-observed. 美国国家海洋和大气管理局/空间天气预报中心。(2024年)。太阳与地球物理事件报告。https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-and-geophysical -event-reports. Odstrcil, D., Riley, P., & Zhao, X. P. (2004, February). 1997年5月12日行星际日冕物质抛射事件的数值模拟。《地球物理研究杂志（空间物理学）》, *109*(A2), A02116. doi: 10.1029/2003JA010135 Park, S. H., Leka, K. D., Kusano, K., Andries, J., Balch, C., Barnes, G., . . . Terk- ildsen, M. (2020, feb). 耀斑预报方法比较（四）：评估连续日预报模式。《天体物理学杂志》, *890*(2), 124. Retrieved from https://doi.org/10.3847%2F1538-4357%2Fab65f0 doi: 10.3847/1538-4357/ab65f0 Pesnell, W. D., Thompson, B. J., & Chamberlin, P. C. (2012, January). 太阳动力学观测台（SDO）。《太阳物理学》, *275*, 3-15. doi: 10.1007/s11207-011 -9841-3 Sawyer, C., Warwick, J. W., & Dennett, J. T. (1986). 太阳耀斑预测. 科罗拉多州博尔德：科罗拉多联合大学出版社。Scherrer, P. H., Schou, J., Bush, R. I., Kosovichev, A. G., Bogart, R. S., Hoeksema, J. T., . . . Tomczyk, S. (2012, January). 太阳动力学观测台（SDO）的日震与磁成像仪（HMI）探测项目。《太阳物理学》,*275*, 207-227. doi: 10.1007/s11207-011-9834-2 Schou, J., Scherrer, P. H., Bush, R. I., Wachter, R., Couvidat, S., Rabello-Soares, M. C., . . . Tomczyk, S. (2012, January). 太阳动力学观测台（SDO）上日震与磁成像仪（HMI）的设计与地面校准。《太阳物理学》, *275*, 229–259. doi: 10.1007/s11207-011-9842-2 Schrijver, C. J. (2007, February). 与所有大型太阳耀斑相关的特征磁场模式及其在耀斑预报中的应用。《天体物理学杂志快报》, *655*, L117–L120. doi: 10.1086/511857 Sheeley, N. R., Jr. (1966, May). 太阳磁场的测量。《天体物理学杂志》, *144*, 723. doi: 10.1086/148651 Sreedevi, A., Jha, B. K., Karak, B. B., & Banerjee, D. (2023, October). AutoTAB：双极磁区自动跟踪算法。《天体物理学杂志增刊系列》, *268*(2), 58. Retrieved 2025年3月7日, from https://dx.doi.org/10.3847/1538-4365/acec47 (出版商：美国天文学会) doi: 10.3847/1538-4365/acec47 Sun, D., Huang, X., Zhao, Z., & Xu, L. (2023, May). 基于深度学习的太阳耀斑预报模型（三）：从极紫外图像中提取前兆。《天体物理学杂志增刊系列》, *266*(1), 8. doi: 10.3847/1538-4365/acc248 Svalgaard, L., Duvall, T. L., Jr., & Scherrer, P. H. (1978, July). 太阳极区磁场的强度。《太阳物理学》, *58*, 225. doi: 10.1007/BF00157268 Upton, L., & Hathaway, D. H. (2014a, August). 子午向流变化对第23和第24太阳活动周的影响。《天体物理学杂志》, *792*(2), 142. Retrieved from https://doi.org/10.1088/0004-637x/792/2/142 doi: 10.1088/0004-637x/ 792/2/142 Upton, L., & Hathaway, D. H. (2014b, January). 利用表面磁通量输运模型预测太阳极区磁场。《天体物理学杂志》, *780*, 5. doi: 10.1088/0004-637X/780/1/5 Wang, Y., & Sheeley, J. N. R. (1992, June). 关于太阳日冕的势场模型。《天体物理学杂志》, *392*, 310–319. doi: 10.1086/171430

Welsch, B. T., Li, Y., Schuck, P. W., & Fisher, G. H. (2009, November). 光球流场与太阳耀斑之间有何关系？《天体物理学杂志》, *705*, 821-843. doi: 10.1088/0004-637X/705/1/821 Wheatland, M. S. (2005, July). 太阳耀斑统计预报方法。《空间天气》, *3*, 7003. doi: 10.1029/2004SW000131 Whitman, K., Egeland, R., Richardson, I. G., Allison, C., Quinn, P., Barzilla, J., . . . Hosseinzadeh, P. (2023, December). 太阳高能粒子预报模型综述。空间研究进展, *72*(12), 5161-5242. doi: 10.1016/j.asr.2022.08.006 Woods, T. N., Kopp, G., & Chamberlin, P. C. (2006, October). 大型耀斑期间太阳紫外辐照度对总太阳辐照度的贡献。《地球物理研究杂志（空间物理学）》, *111*(A10), A10S14. doi: 10.1029/2005JA011507 Xiao, H., Maloney, S., Krucker, S., Dickson, E., Massa, P., Lastufka, E., . . . Piana, M. (2023, May). 太阳轨道器上成像X射线光谱仪与望远镜（STIX）的数据中心。《天文学与天体物理学》, *673*, A142. doi: 10.1051/0004-6361/202346031 Zbinden, J., Kleint, L., & Panos, B. (2024, September). 研究并比较IRIS光谱线Mg II、Si IV和C II在耀斑前兆诊断中的应用。《天文学与天体物理学》, *689*, A72. doi: 10.1051/0004-6361/202347824