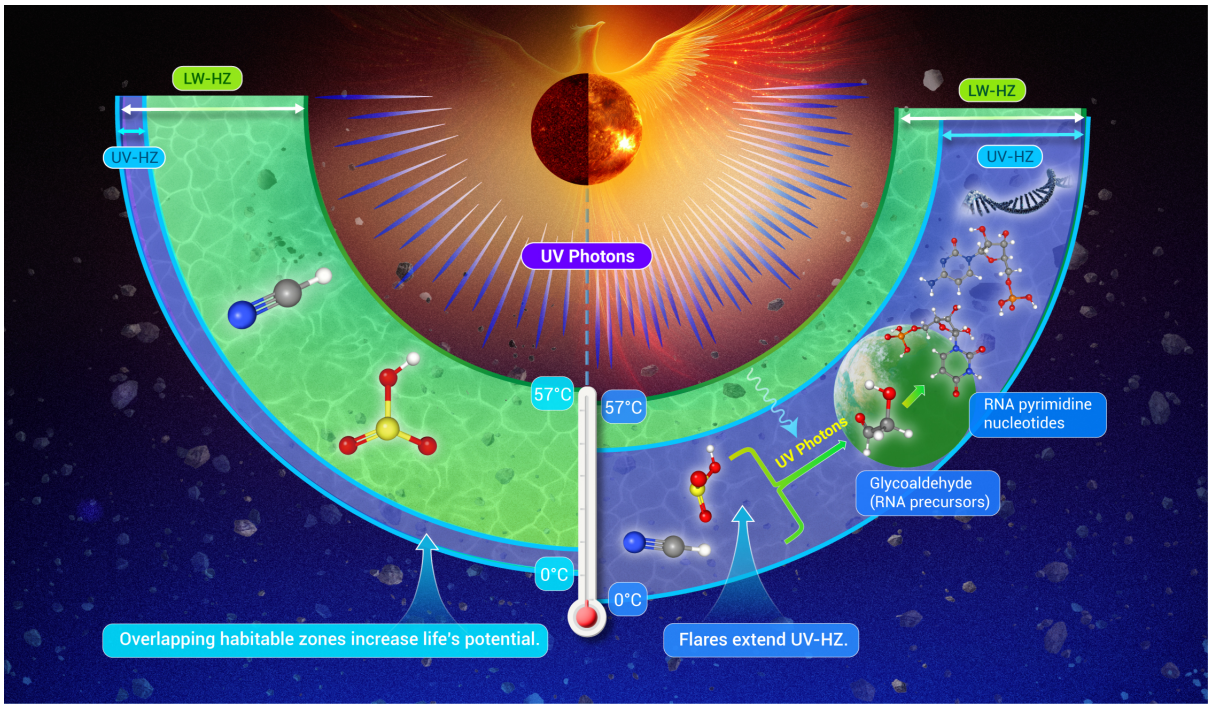
arXiv:2603.24944v1 [astro-ph.EP] 26 Mar 2026

耀斑驱动的宜居性：拓展低质量恒星周围的生命潜力

Dong-Yang Gao[1,2,6], Hui-Gen Liu[1, 4, 6, *], Ming Yang[3, 5, 6, *], 以及 Ji-Lin Zhou[1,46]这些作者对本研究的贡献相同。
*通讯作者。电子邮箱：huigen@nju.edu.cn（H.-G.L.）；myang@tongji.edu.cn （M.Y.）

图文摘要



公众摘要

- 改进的耀斑光谱模型评估了恒星耀斑对行星宜居性的影响。随温度变化的光化学反应速率限定了
- 一个物理紫外宜居带（UV-HZ）。耀斑扩大了低质量恒星周围的宜居带，使液态水和生命起源前
- 的紫外环境得以共存。在开普勒耀斑恒星周围发现了一颗位于紫外宜居带内的岩质行星，值得进一步观测。
-
-

耀斑驱动的宜居性：
拓展低质量恒星周围生命的潜力

Dong-Yang Gao[1,2,6], Hui-Gen Liu[1,4,6,*], Ming Yang[3,5,6,*], 以及 Ji-Lin Zhou[1,4]

[1]南京大学天文学与空间科学学院，中国南京，210023[2]山东大学空间科学研究院、空间科学与技术学院，山东省空间环境与探测技术重点实验室，中国威海，264209[3]同济大学测绘与地理信息学院，中国上海，200092[4]教育部现代天文学与天体物理学重点实验室，中国南京，210023[5]上海市深空探测行星制图与遥感重点实验室，中国上海，200092

[6]这些作者对本研究的贡献相同[*]通讯作者：huigen@nju.edu.cn（H.-G.L.）；myang@tongji.edu.cn （M.Y.）

摘要

传统的环恒星宜居带（宜居带）定义聚焦于液态水，却忽略了紫外辐射在前生物化学中的关键作用。低质量恒星在宁静态期间通常无法在整个液态水宜居带内提供充足的紫外辐射，以支持光化学反应。然而，频繁的耀斑能够提供大量紫外通量，可能促成宜居条件。我们通过纳入一个用于 RNA 前体合成的温度依赖模型，完善了紫外宜居带（紫外宜居带）的概念。此外，我们还探讨了一种参数化的光谱能量分布模型，并采用适用于不同恒星耀斑的经验耀斑频率分布，以量化其紫外贡献。将这一框架应用于不同的耀斑恒星后，我们发现，低质量恒星周围的紫外宜居带可延伸至更靠内的区域，并在很大范围内与传统宜居带重叠。将该分析应用于围绕开普勒 耀斑恒星运行的 9 颗行星后，我们发现其中 3 颗位于修订后的紫外宜居带和液态水宜居带（长波宜居带）内，且不会造成臭氧耗竭。我们的研究结果凸显了耀斑在拓展低质量恒星周围生命潜力方面的重要作用，并为系外行星宜居性标准提供了新的视角。

引言

数十年来，探测宜居行星一直是天文学界的首要目标。近年来发现的大量系外行星揭示了多种行星系统构型，其中类地世界比巨行星更为常见。[1] 要评估类地行星的宜居性，必须深入了解它们的内在性质以及宿主恒星的特征。[2] 这项评估的一个关键方面，是岩质行星能否在表面维持液态水；这决定了液态水宜居带（LW-HZ）的范围。[3]

在宜居带中搜寻系外行星，对于确定后续观测的理想目标并了解其行星性质至关重要。[4,5] 以往研究通过模拟水损失和最大温室效应，确定了保守宜居带的边界；而乐观宜居带则依据“近期金星”和“早期火星”的经验标准来界定。[3,6] 然而，这些定义主要考虑恒星稳定的入射通量，忽略了紫外线辐射；对于频繁发生高能耀斑的恒星而言，紫外线辐射尤为重要。

过量的紫外辐射会抑制光合作用并损害生物系统，而适量的紫外辐射则有助于维持重要的生物过程。[7,8] 根据“平庸原理”，Buc- cino 等人[8] 提出，紫外辐射宜居带（UV-HZ）内的行星所接收的紫外通量应为早期太古宙地球的二分之一至两倍。由于嘧啶RNA前体是生命的构成基石，了解嘧啶的形成途径至关重要。[9,10] 这一途径

包括七个光化学反应速率常数相近的步骤，起始物是HCN与SO的混合物S_3^{2-}或HS^-。Rimmer 等人[10] 通过实验测量紫外光驱动的光化学反应（光化学，即前生物合成所需的反应）以及在没有紫外光时发生的双分子反应（暗化学）的速率常数，估算了光化学所需的紫外光量。他们选取了紫外辐射（>45 尔格 cm^{-2} s^{-1}）能够使每个步骤的产率至少达到50%的区域，从而使总产率（>0.1%）足以维持稳定的前生物化学反应。根据阿伦尼乌斯方程，[11] 化学反应速率对温度极为敏感。Rimmer 等人[10] 还给出了不同温度下生命起源所需的近紫外（200-280 nm）通量，称为生命起源通量（f_{Abio}）。

随着恒星质量降低，恒星温度（T_{eff}）也随之下降，因此低质量恒星发出的紫外辐射较弱。因此，宁静的低质量恒星可能无法在液态水宜居带内提供足够的紫外能量来合成生物机制。[12,13]

由于许多低质量恒星具有更强的磁活动，由恒星表面的磁重联引发的这些耀斑会释放全波段辐射[14–16]。与宁静阶段相比，耀斑还会增强紫外辐射[17–19] ，这可能有助于生物生成过程。[9] 然而，频繁的超级耀斑会耗损臭氧层，使更多有害的紫外辐射剂量到达行星表面，并损伤蛋白质和脂质。[20,21] 这引出了一个关键问题：恒星耀斑产生的紫外辐射是否适中，足以维持低质量恒星周围宜居带的宜居性？要了解宜居性，尤其是低质量耀斑恒星周围行星的宜居性，还需要进一步了解主星的紫外辐射和耀斑频率。

耀斑频率分布（FFD）是恒星磁活动的关键指标，对于评估耀斑对行星宜居性的影响至关重要。[17,22] 然而，仪器精度和观测节奏可能导致低能耀斑无法被完整探测。[18,23] 此外，缺乏同步多波段观测会使耀斑光谱能量分布（SED）的建模产生显著误差。[19,24] 这些局限使得难以准确确定不同恒星的FFD。为估算耀斑总能量并从光学光变曲线中获得耀斑光谱能量分布，人们会采用辐射流体力学模拟和经验模型。[25,26]

本研究聚焦于耀斑恒星，它们会频繁发生耀斑事件，增强轨道行星所受的紫外辐射和全波段辐射。我们使用针对不同恒星质量的经验校正累积耀斑频率分布（CFFD），重新评估这些恒星周围的紫外宜居带（UV-HZ），并构建恒星耀斑在近紫外波段的光谱能量分布模型。不同于以往研究，[13,27] 我们采用了更全面的方法，既考虑随行星表面温度变化的紫外辐射最低需求，也依据 RNA 前体合成所需的紫外辐射，改进紫外宜居带边界的估算。此外，我们将这些方法应用于耀斑恒星周围已知的 开普勒行星，以评估其宜居性。本文旨在确定哪些类型的耀斑恒星能够维持温和区域，使液态水和适量紫外辐射得以支持遗传分子或生物体的合成。

材料与方法

不同耀斑恒星的耀斑光谱能量分布模型

耀斑光谱能量分布（SED）由热和非热机制产生，具体取决于各种环境因素，例如局部磁结构、局部等离子体条件以及能量沉积速率。[28–30] 这些光谱能量分布有望解释观测到的辐射，并为太阳耀斑和恒星耀斑中的物理过程提供线索。我们总结了耀斑光谱能量分布的特征如下：

1. 人们认为，耀斑期间光学和近紫外波段的连续辐射，是大气加热、磁能释放以及日冕高度处电子加速的响应。[31] 高温黑体假设（温度为 ≈9,000 K 的热光球光谱）

能够再现耀斑光谱的某些光谱区域（例如白光波段），但忽略发射线。[32] 近紫外连续谱显著高于高温黑体假设，这可能是由氢复合造成的。[19]

2. 耀斑期间，氢巴尔末线会增强并展宽，在近紫外波段尤为明显。在巴尔末跳跃波长（ ~0.365 m）以下，耀斑通量可比高温黑体模型的预测值高出数倍。然而，只有少数太阳耀斑呈现出明显的巴尔末跃迁。[33]

3. 发射线的贡献不可忽略，尤其是在近紫外波段。[24,34] 幸运的是，通过对高温黑体光谱采用适当的伪连续谱温度进行积分，即可将这一贡献纳入考量。[19]

若干基于9,000 K高温黑体光谱的耀斑光谱能量分布模型，结合哈勃空间望远镜（HST）获取的远紫外和近紫外发射线数据，与实际观测的吻合程度优于高温黑体模型（例如，MUSCLES模型[26]）。基于对M型矮星凌日系外行星巡天卫星白光耀斑的研究，并结合GALEX紫外测光数据，Jackman等人[19]外推了恒星在紫外波段的耀斑频率分布，以检验不同的耀斑光谱能量分布模型。他们发现，9,000 K高温黑体模型对M0–M2型恒星的GALEX NUV（0.177-0.283 m）能量估计最多低估了2.3±0.6倍。要更准确地确定耀斑的光谱能量分布，需要对每次事件进行多波段观测，包括低能耀斑。[35,36]

为了改进适用于不同恒星类型的耀斑光谱能量分布模型，我们在紫外波段的 0.100 至 0.365 m 范围内采用幂律连续谱叠加高温黑体光谱，并在白光波段采用高温黑体模型，同时考虑巴尔末跃迁。我们的耀斑光谱能量分布模型由方程（1）描述，

$$F_\lambda(T_{\rm flare}) = \begin{cases} F_{\lambda,\ \rm HBB}(T_{\rm flare}),\ \text{for } \lambda > 0.365\ \mu\text{m}, \\ \\ F_{\lambda,\ \rm HBB}(T_{\rm flare}) + F_{0.365\ \mu\text{m},\ \rm HBB}(T_{\rm flare}) \times f_{\rm b} \times \left(\dfrac{\lambda}{0.365\ \mu\text{m}}\right)^{\gamma}, \text{for } 0.1\ \mu\text{m} \le \lambda \le 0.365\ \mu\text{m}, \end{cases} \tag{1}$$

其中 $F_{\lambda,\ \rm HBB}(T_{\rm flare}) = B_\lambda(T_{\rm flare}) + S_\lambda$，即高温黑体光谱 $B_\lambda(T_{\rm flare})$ 与恒星宁静态光谱 $S(\lambda)$ 的组合。$T_{\rm flare}$ 是恒星耀斑活动区的温度。因子 $f_{\rm b}$ 是 0.365 μm 处的增强比，γ 是与波长依赖性相关的幂律指数。

我们将 $T_{\rm flare}$ 设为 9,000 开尔文，令耀斑光谱能量分布模型只包含两个参数：巴尔末跃迁短波长一侧连续谱的增强程度（$f_{\rm b}$），以及描述紫外连续谱变化趋势的幂律指数（γ）。该模型修正了采用 9000 K 热黑体假设时对紫外辐射的低估。[19,24]

恒星耀斑和太阳耀斑都是磁活动的表现形式，并具有相似的物理过程。[37]然而，对于质量不同、对流层厚度各异的恒星，耀斑呈现出不同的特征。[31,38] 我们利用M型和G型恒星耀斑的观测数据与光谱模型，对 $f_{\rm b}$ 和 γ 进行了拟合，并采用线性插值为不同类型的恒星建立光谱能量分布模型（见补充信息中的表S1 ）。

图1 展示了几种耀斑光谱能量分布模型。以往的观测[19,33] 表明，对于M型恒星，$f_{\rm b}$ 高于太阳耀斑，而 γ 则较低。这表明，与G型和K型恒星相比，M型恒星耀斑期间的紫外-光学辐射对比更加显著。在我们的模型中，当 $T_{\rm eff}$ 从3,400 K变化到6,000 K时，$f_{\rm b}(T_{\rm eff})$ 从1.013变化到0.011，而 $\gamma(T_{\rm eff})$ 则从-0.500变化到1.032（见补充信息中的图S1 ）。请注意，本研究考察了特定光谱型恒星在耀斑影响下宜居带的变化。因此，$f_{\rm b}$ 和 γ 代表某一恒星类型的典型或平均耀斑光谱能量分布，而非单颗恒星的情况。观测到的太阳耀斑和恒星耀斑能量范围从 10^{28}到 10^{38} 尔格。[17,23,39,40] 关于耀斑光谱能量分布模型验证以及恒星光度增加的详情

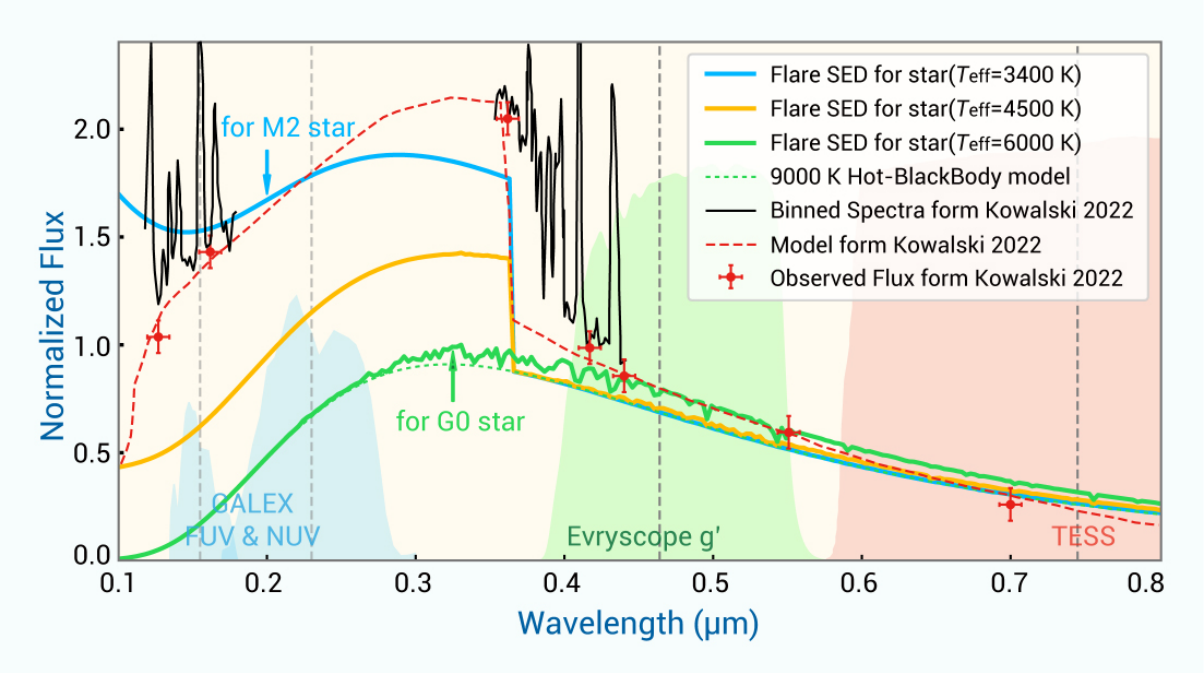


图1. 不同光谱型恒星的耀斑光谱能量分布。 蓝色、橙色和绿色实线分别表示有效温度为3,400 K、4,500 K和6,000 K的恒星的耀斑光谱能量分布模型。两个箭头分别标出M2型（$T_{\rm eff}$ =3,400 K）和G0型（$T_{\rm eff}$ =6,000 K）恒星的耀斑光谱能量分布。对于有效温度为 $T_{\rm eff} < 6,000$ K的恒星，与 $T_{\rm flare}$=9,000 K高温黑体模型（绿色点线）相比，耀斑会增强近紫外波段。黑色实线表示AD Leo的“大耀斑”光谱，带误差线的数据点标示了Kowalski给出的按波长分箱的观测连续谱通量。[25] 棕色虚线是采用同一研究中的双组分辐射流体力学模型得到的最佳拟合。彩色背景显示不同滤光片的相对通带，灰色竖直虚线标示GALEX远紫外波段（0.155 μm）、GALEX近紫外波段（0.230 μm）、Evryscope g′ 波段（0.464 μm）和TESS波段（0.745 μm）。

由耀斑引起的相关内容见补充信息中的“耀斑恒星的平均光度”一节。平均恒星近紫外辐射是光化学反应产物累积的必要条件，而这些产物对于形成大分子前生物库存至关重要（详情请参阅“不同耀斑恒星周围的宜居带”小节）。

耀斑恒星周围宜居带的计算

液态水宜居带

对于宁静恒星，长波宜居带边界采用 Kopparapu 等人的方法确定。[3,6] 内边界对应于“近期金星”，位于 57 °C，[41] 外边界则对应于 “ 早期火星 ”，位于 0 °C。对于耀斑恒星，恒星耀斑会增加到达行星的通量。尽管磁活动区随机分布在恒星表面，但只有朝向行星的耀斑才会影响其宜居性。我们计算了耀斑导致的恒星光度增量，详情见补充信息。考虑到现有的耀斑光谱以及 M 型至 G 型恒星的光谱能量分布，积分波长范围设定为 0.1 至 3。0 μm。

考虑到恒星辐射总光度增加，我们对宁静恒星的长波宜居带边界进行调整，据此确定了耀斑恒星的长波宜居带边界。这一调整均匀地应用于内边界和外边界，

$$d_{\text{flare, LW}} = d_{\text{quiet, LW}} \times (1 + \frac{L_{\text{flare}}}{L_*})^{0.5}, \tag{2}$$

其中 $d_{\text{flare, LW}}$ 表示考虑恒星耀斑时，主星到长波宜居带边界的距离；而 $d_{\text{quiet, LW}}$ 表示不考虑恒星耀斑时，主星到长波宜居带边界的距离。 L_{flare} 表示恒星发生耀斑时的时间平均辐射总光度（如补充信息中的方程 S6 所述），而 L_* 表示宁静状态下的辐射总光度。

紫外辐射宜居带

紫外辐射宜居带（UV-HZ）主要关注生物过程。约38亿年前的太古宙地球上，近紫外辐射为合成生化化合物提供了必要的能量来源。以往研究将紫外宜居带定义为仅考虑在 0 ℃ 下生命起源所需紫外通量的区域。然而，根据阿伦尼乌斯方程[10,11]，，化学反应速率对温度高度敏感。在地球这类平均温度为 15 ° C 的行星上，反应速率会显著提高。因此，维持 RNA 合成需要更多紫外辐射。

为求得生命起源所需的平均近紫外通量（f_{Abio}），我们依据 Rimmer 等人[10] 的图 3A，使用阿伦尼乌斯方程拟合f_{Abio} 与行星表面温度（T_{surf}）之间的关系。同样地，我们选取图中的 50% 曲线，以确保通量足以支持稳健的前生物化学。拟合结果如下：

$$f_{\text{Abio}} = f_0 \times e^{(T_{\text{surf}} - 273\ \text{K})/10\ \text{K}}\ \text{photons cm}^{-2}\ \text{s}^{-1}, \tag{3}$$

其中 $f_0 = 4.08 \times 10^{12}$。

若忽略行星的大气温室效应，表面平衡温度 T_{surf} 与 $d^{-0.5}$成正比。然而，考虑行星大气层时，温度随距离增加而下降的幅度较小。为描述 T_{surf} 与 d之间的相关性，我们采用了指数函数：

$$T_{\text{surf}} = T_0(\frac{d}{1\ \text{AU}})^{\chi}. \tag{4}$$

为确定 T_0 和 χ 在方程（4中的值，我们采用 Kopparapu 等人定义的长波宜居带的内外边界。[3,6] 内边界设定在湿温室极限，此处表面

温度设为 330 K，[41]，而外边界设定在水的冰点处（$T_{\mathrm{surf}} = 273\mathrm{K}$）。通过比较这些边界温度（即 T_{surf}）与相应的距离（即 d），我们可以利用方程（ χ 4）求出不同恒星的 值。对于太阳型恒星，K，且 。因此，将方程（4）代入（3），并采用一阶近似，可得长波宜居带内的 。图 2 展示了典型 M 型、K 型和 G 型恒星在不同位置处的 及模型表面温度。

为获得不同恒星的宁静态近紫外通量，通常采用恒星光球模型（例如 PHOENIX[42,43]），这类模型仅包含恒星光球辐射。然而，不能忽略来自色球层和过渡区的辐射贡献。对于较冷的恒星（K型至M型恒星）而言，尤其如此：与色球层辐射相比，其 200 至 280 nm 波段的光球通量相对较弱。[44] 为计入其他机制的贡献，我们将 PHOENIX 模型得出的近紫外通量除以不同的因子进行校正。这些因子是 GALEX 近紫外波段（0.177-0.283 μm）中模型辐射与观测辐射的比值。我们根据 Wang 等人的统计样本，计算了不同恒星对应因子的中位数。[45] （见图 S3）。校正后，即可得到不同恒星在宁静阶段的近紫外总辐射，其中包括来自光球、色球层、过渡区和日冕的贡献。

为估算恒星耀斑产生的近紫外贡献，我们采用了耀斑光谱能量分布模型和基于一组G型至M型年轻恒星样本得出的经验累积耀斑频率分布[18]。我们计算了耀斑恒星在长期内释放的总能量，并将近紫外通量的时间平均增量加到恒星静止时的通量上（参见补充信息中的“耀斑导致的恒星光度增强”）。请注意，恒星耀斑造成的近紫外增强随时间变化。耀斑事件的典型时间尺度为数小时。根据先前的研究，某些益生前体分子（如2-氨基噁唑）的反应时间尺度从几分钟到几小时不等。[43] 然而，对于行星大气或表面而言，产物后续发生的化学反应往往与物质的全球动力学相耦合，而其时间尺度通常远长于耀斑持续时间。例如，根据Segura 等人的研究，恒星耀斑对大气臭氧柱深度的全球影响可持续数月至数年。[46] 因此，采用恒星耀斑造成的时间平均增量，能够体现其对光化学的长期及全球影响。

获得耀斑恒星的平均近紫外通量后，我们采用 f_{Abio} 的下限来估算紫外宜居带的边界。通过比较不同距离和表面温度下，行星大气层上方的平均恒星辐照与 f_{Abio} （见方程3），我们确定了有耀斑和无耀斑情况下紫外宜居带的内边界（见补充信息中的图S7 ）。随着与恒星距离的减小，生命起源通量迅速增加（$f_{\mathrm{Abio}} \propto d^{-7}$ ，对于太阳型恒星而言），而恒星辐射的增加则较为缓慢（$\propto d^{-2}$）。因此，紫外宜居带存在一个物理内边界，以确保满足 f_{Abio}的最低要求。超出内边界后，恒星辐射始终能够达到生命起源所需的生命起源通量（见图2、补充信息中的图S6 和S7 ）。考虑到生命依赖液态水，紫外宜居带的外边界因此设为与长波宜居带的外边界一致。

臭氧耗竭的累积耀斑频率分布局限

由于紫外宜居带的内边界由紫外通量下限定义，因此也应存在紫外通量上限，因为过量的紫外辐射会使前生命分子解离。根据 Abrevaya 等人的研究，[43] 即使接收到的 UVC（200-280 nm）通量比 ~15 当前地球大气层外的通量高出倍（即 92 W m^{-2}），仍有一小部分（$\sim 10^{-4} - 10^{-5}$）微生物能够存活。不过，这一 UVC 通量指的是大气层外的辐射。由于臭氧等大气成分屏蔽紫外辐射的能力各不相同，表面紫外通量应低于估算的大气层外通量。此外，紫外光不稳定分子可以通过自屏蔽机制（例如 2-氨基噁唑）或借助其他紫外吸收分子（例如嘌呤核糖核苷）的存在来延长其寿命。[47] 此外，含有紫外吸收物质（例如 $Fe(CN)_6^{4-}$）的浑浊水可以强烈屏蔽紫外辐射。[48] 因此，一些溶解的分子

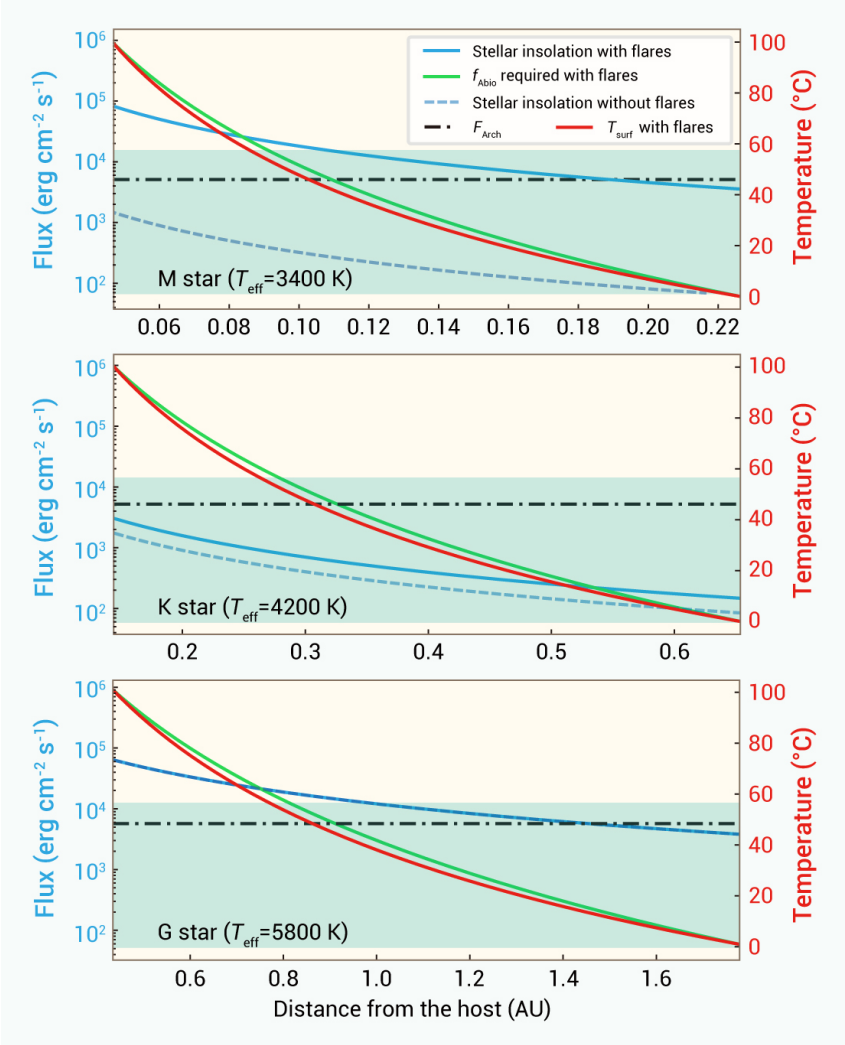


图 2. 典型 M、K 和 G 型恒星周围长波宜居带中，前生物化学所需的近紫外通量。 绿色实线表示 f_{Abio} 在不同位置的需求，而蓝色实线和虚线分别表示有耀斑和无耀斑时的恒星近紫外辐照量。紫外宜居带的内边界是绿色实线与蓝色实线的交点。太古宙地球的近紫外通量（F_{Arch}）也以点划线表示。红线显示了行星表面温度模型值（T_{surf}）的变化，绿色背景标示温度介于 0 °C (273 K) 和 57 °C(330 K) 之间的区域。

或积聚在水中而得以保存。因此，我们实际上并未通过前生物化学来使用紫外通量的上限。

然而，对于成熟的行星系统，例如围绕开普勒耀斑恒星运行的类地行星，类地大气中的臭氧对于屏蔽紫外辐射、保护潜在生命至关重要。因此，我们依据先前的研究限制了超级耀斑的累积耀斑频率分布，以避免显著的臭氧耗竭。频繁的超级耀斑会通过高能粒子和紫外辐射严重消耗臭氧层。GJ1243等M型矮星周围的类地行星，其类地臭氧层会因 10^{34} 尔格的耀斑以每$^{-1}$天[17,21] 0.4次的频率发生而大幅耗竭。因此，我们对累积耀斑频率分布的上限进行了缩放，以考虑臭氧耗竭。也就是说，如果某颗耀斑恒星的累积耀斑频率分布超过 $10^{34} \times (\frac{d}{0.16\ \text{天文单位}})^2$ 尔格耀斑的相应阈值，就认为该行星不适宜居住。 d 表示行星与宿主恒星之间的距离。值得庆幸的是，即使考虑拟合关系中的不确定性，针对不同恒星采用的所有经验累积耀斑频率分布都低于这些上限。

结果

不同耀斑恒星周围的宜居带

地球上的生命起源于38亿年前，[49] 当时太阳的年龄约为8亿年。因此，生命起源需要 ~10亿年的时间尺度。[50,51] 在恒星年龄达到10亿年前，G、K和M型恒星的色球活动和日冕辐射通常会逐渐维持在较高水平；随着恒星自转减慢，磁场的发电机效应产生减弱，这些活动和辐射也会随之降低。[52] 我们很难确定太古宙地球何时能够产生前生命分子，但主序阶段寿命更长的M型恒星，在紫外辐射变得适中的情况下，可能有足够的时间积累前生命分子。为了估算生命起源期间年轻恒星的近紫外辐射，我们选取10亿年作为计算恒星辐照的典型年龄。

对于一般情况，我们考虑质量范围为0.3至1.1个太阳质量的耀斑恒星（$M_\odot$），其光谱型涵盖M2型至G0型。我们采用Baraffe 等人在恒星年龄为10亿年时的恒星演化模型，[53]以计算这些恒星的有效温度（T_{eff}）和半径（R_*）。利用Gao等人的耀斑样本，[18] 我们建立了累积耀斑频率分布与 T_{eff}之间的经验关系，并根据耀斑恒星的平均光度计算了宜居带边界。更多计算细节请参见“材料与方法”部分。

如图3所示，无论是否发生耀斑，早期 K 型和 G 型恒星周围始终存在紫外宜居带（$M_* = 0.76$–1.10 M⊙，$T_{\text{eff}} = 4{,}700$–$6{,}000$ K）。考虑宁静恒星近紫外辐射（包括光球、色球层、过渡区和日冕的贡献）时，紫外宜居带很窄（例如，质量低于 ~0.36 M⊙的宁静恒星，其紫外宜居带宽度小于 0.007 天文单位），行星几乎无法位于其中。若只考虑光球贡献的近紫外通量，则质量低于 ~0.76 M⊙的宁静恒星周围不会出现紫外宜居带。然而，如果恒星发生耀斑，增强的紫外通量就能拓宽紫外宜居带。对于 G 型耀斑恒星，耀斑导致的紫外通量增幅仅占宁静辐射的一小部分，因此紫外宜居带只略有拓宽。由于耀斑频率较高，低质量恒星的紫外宜居带拓宽得更加明显。此外，质量约为 0.68 M⊙ 的 K 型恒星周围也存在狭窄的紫外宜居带。值得注意的是，耀斑光谱能量分布会显著提高近紫外光度，而非总光度；因此，所有恒星类型的长波宜居带变化都微乎其微（<0.006 天文单位）。

为评估耀斑光谱能量分布模型对紫外宜居带变化的影响，我们考察了两种特定的耀斑光谱能量分布：G0型耀斑光谱能量分布仅采用传统的 9000 K 热黑体假设；M2型耀斑光谱能量分布则考虑了M型恒星耀斑的巴尔末跃迁，因此更为准确。如图S9所示，尽管采用M2型耀斑光谱能量分布时紫外宜居带的范围显著更大，但两种光谱能量分布都能明显拓展紫外宜居带，并使其与长波宜居带的重叠范围扩大。

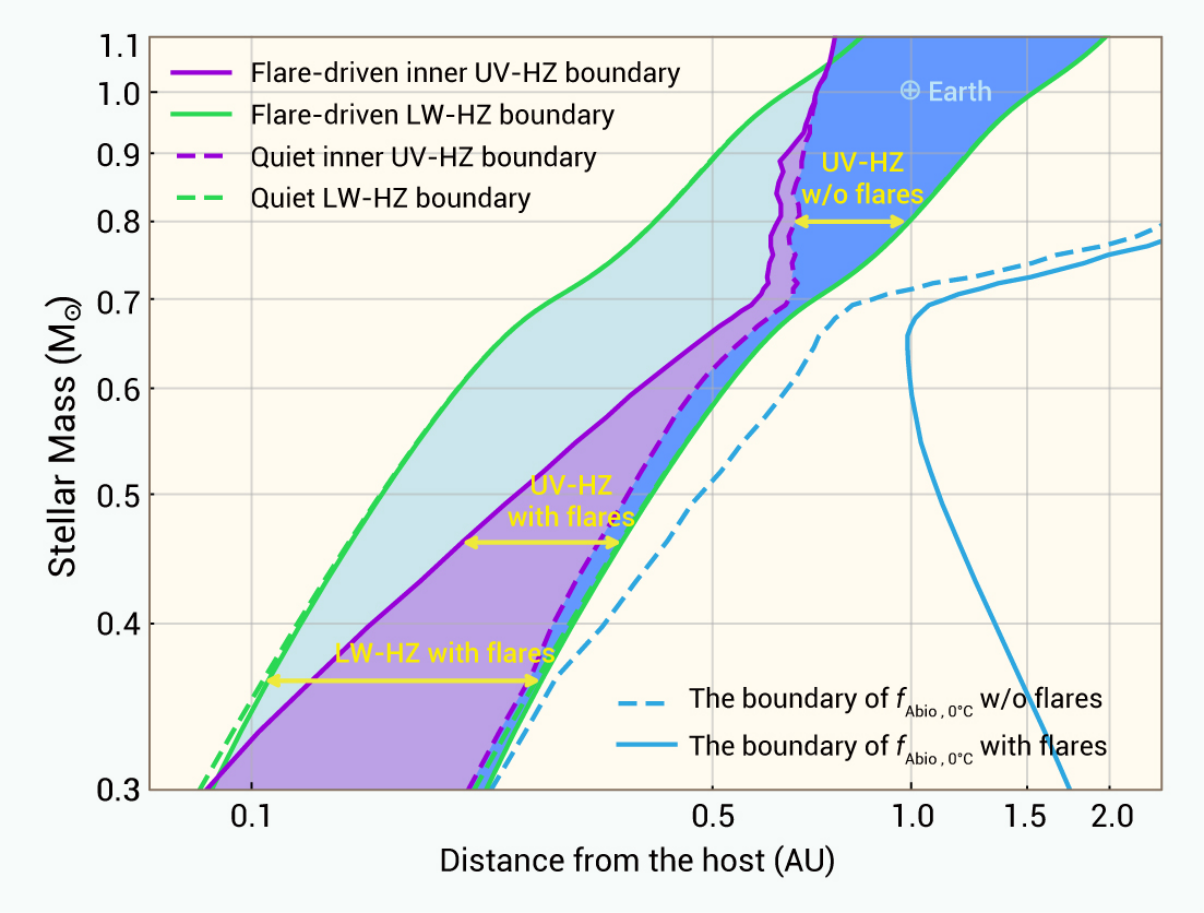


图 3. 年龄为 1.0 十亿年的耀斑恒星周围的宜居带。 洋红色实线表示耀斑驱动的内侧紫外宜居带边界，洋红色虚线表示宁静状态下的内侧紫外宜居带边界。黄绿色实线表示耀斑驱动的长波宜居带边界，黄绿色虚线表示宁静状态下的长波宜居带边界。图中以蓝色虚线和实线分别表示无耀斑和有耀斑时生命起源所需通量的边界 0 ℃ 。考虑到前生物化学也需要液态水环境，我们采用与长波宜居带外边界相同的紫外宜居带外边界。图中还以带圆圈的十字标出了地球的位置。

开普勒耀斑宿主星周围的宜居带

Yang 和 Liu[23] 公布了一份开普勒耀斑恒星目录，其中包括五颗拥有行星候选体的恒星，以及四颗在 NASA 系外行星档案中列为宜居行星宿主星的恒星[https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/]。他们将宜居性定义为平衡温度介于 180 K 至 310 K 之间，或接收到的辐照量介于地球的 0.25 至 2.2 倍之间。

根据恒星和行星参数（见补充信息中的表 S4 ），我们依据 Kopparapu 等人的公式3计算了长波宜居带边界。[3] 我们对这些宿主星的开普勒光变曲线进行了耀斑探测，并拟合了每颗恒星的累积耀斑频率分布参数（见补充信息中的表 S3 ）。我们利用 GALEX 近紫外数据测量了五颗宿主星的近紫外辐射通量（见表 S4）。对于四颗没有 GALEX 近紫外数据或 Swift UVOT 观测的宿主星，我们采用 Wang 等人给出的近紫外辐射通量统计中位数值。[45] （见图 S3）。对于太阳，我们采用 Willmer 给出的现代太阳光谱的 1.4 倍[54]，以考虑年龄为 1.0 十亿年的 G 型恒星的近紫外辐射演化。[55] 随后，我们分别在考虑和不考虑恒星耀斑的情况下，推导出长波宜居带和紫外宜居带边界。图 4 展示了考虑耀斑前后，开普勒-438周围恒星辐照和宜居带边界的变化。在宁静阶段，紫外宜居带仅宽 0.04 天文单位。计入耀斑增强后，紫外宜居带宽度增至 0.16 天文单位，使宜居带容纳另一颗类地行星的可能性提高了四倍。

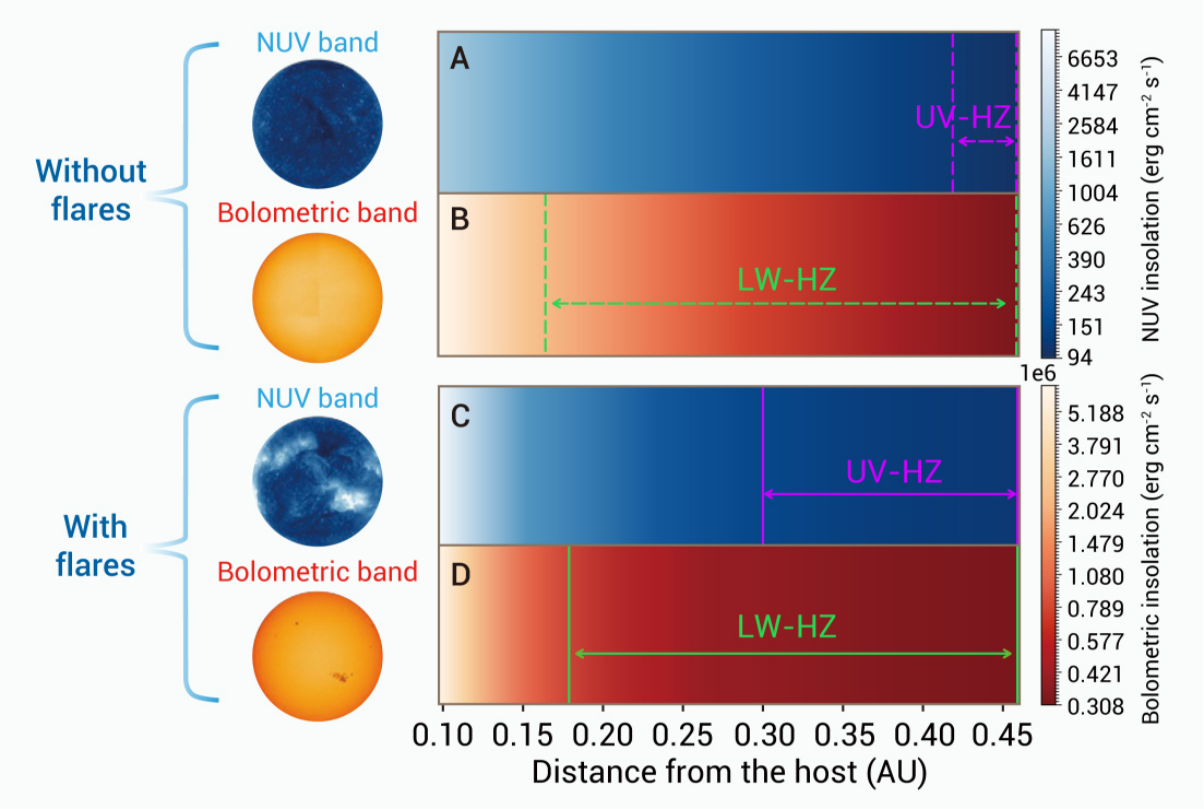


图 4. 有耀斑和无耀斑情况下，开普勒-438 周围的恒星辐照。 A 面板显示无耀斑时近紫外波段（200–280 nm）的辐照，B 面板则显示相同宁静条件下的全波段辐照。C 和 D 面板显示有耀斑时这两种辐照。黄绿色和洋红色竖线分别标示有耀斑和无耀斑情况下的长波宜居带与紫外宜居带边界。

图 5 展示了行星宿主恒星的宜居带边界。采用更新后的恒星参数后，KOI-7706.01 和 Kepler-1512 b 不再位于长波宜居带内（见表 S4）。虽然 Kepler-1540 b、Kepler-438 b 和 Kepler-155 c 位于长波宜居带内，但它们不在紫外宜居带内。这三颗行星，即，

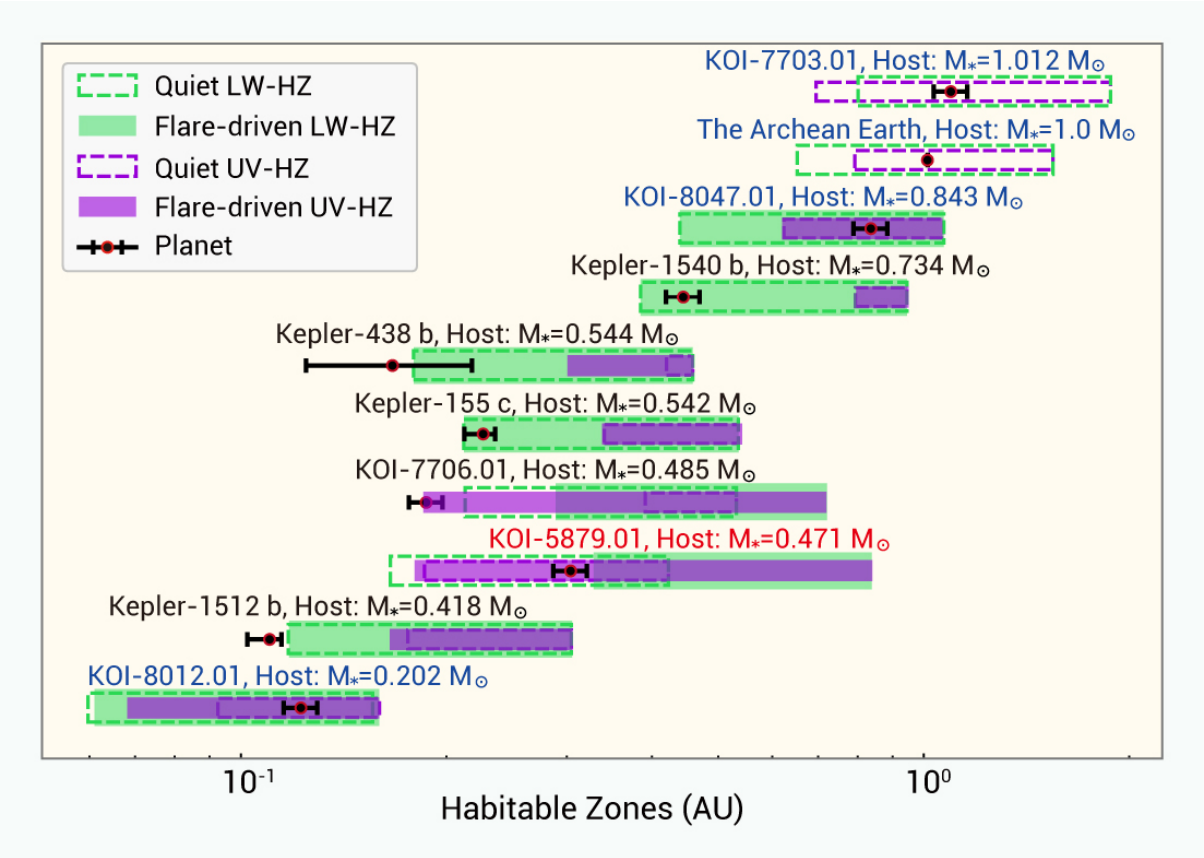


图 5. 按恒星质量排序的长波宜居带和紫外宜居带。 浅绿色虚线框表示静宁长波宜居带。浅绿色背景表示耀斑驱动的长波宜居带。洋红色虚线框表示静宁紫外宜居带。洋红色背景表示耀斑驱动的紫外宜居带。黑点表示位于相应半长轴处的行星或候选天体，误差范围亦已标出（见表 1）。由于无法获得 KOI-7703 和太古宙太阳的 CFFD幂律指数，因此不考虑它们的耀斑驱动宜居带。

表1。 围绕耀斑恒星运行的候选及已确认系外行星的宜居带边界开普勒。

行星	a^a (AU)	$d_{\text{in, FLW}}$ (AU)	$d_{\text{out, FLW}}$ (AU)	$d_{\text{in, FUV}}$ (AU)	位于[b]	TSM[c]
Kepler-1540 b	0.4426 ± 0.0251	0.383	0.941	0.788	长波宜居带	2.271
KOI-7703.01[d]	1.0911 ± 0.0618	0.798	1.869	0.693	长波宜居带，紫外宜居带	0.956
KOI-8047.01	0.8332 ± 0.0472	0.438	1.065	0.621	长波宜居带，紫外宜居带	0.576
Kepler-155 c	$0.2254^{+0.0092}_{-0.0139}$	0.211	0.533	0.333	长波宜居带	0.553
KOI-5879.01[e]	0.3027 ± 0.0172	0.327	0.835	0.179	-	0.332
Kepler-1512 b	$0.1097^{+0.0045}_{-0.0079}$	0.117	0.304	0.164	-	0.059
Kepler-438 b	$0.1660^{+0.0510}_{-0.0420}$	0.179	0.459	0.300	长波宜居带? [f]	0.059
KOI-7706.01[g]	0.1860 ± 0.011	0.288	0.719	0.185	-	0.028
KOI-8012.01	0.1219 ± 0.0069	0.062	0.162	0.069	紫外宜居带，长波宜居带	0.006
太古宙地球[d]	1.0	0.650	1.539	0.790	紫外宜居带，长波宜居带	-

注：$d_{\text{in、耀斑驱动的液态水宜居带}}$ 和 $d_{\text{out、耀斑驱动的液态水宜居带}}$ 分别表示耀斑驱动的长波宜居带的内边界和外边界；$d_{\text{in、远紫外}}$ 表示耀斑驱动的紫外宜居带的内边界。请注意，耀斑驱动的紫外宜居带的外边界与 $d_{\text{out、耀斑驱动的液态水宜居带}}$ 的外边界设定为相同。

[a] 对于 KOI-8012.01 和 KOI-7706.01，由于原始参考文献未提供半长轴的不确定度，我们采用 Thompson 等人给出的恒星质量典型不确定度 17%[56]，并通过误差传播估算不确定度。

[b] “紫外宜居带”和“长波宜居带”分别表示由耀斑驱动的紫外宜居带和液态水宜居带。

[c] 透射光谱学指标（TSM）按照 Kempton 等人的方法计算。[57] 以评估后续系外大气观测的可行性。

[d] KOI-7703 和太古宙太阳的耀斑事件数量不足，无法拟合累积耀斑频率分布。因此，文中给出了不考虑恒星耀斑时各情景的边界。

[e] 对于 KOI-5879，选择了更合适的耀斑能量积分范围，从 10^{30}到 10^{38} 尔格（详情见表S3 注释 b）。

[f] 半长轴的测量不确定性使我们无法明确判断这颗行星是否位于长波宜居带内（见图 5）。

[g] KOI-7706 上的耀斑可能会耗损 KOI-7706.01 的臭氧层（见图 S8）。

（此表的完整内容以机器可读形式提供。）

KOI-7703.01、KOI-8047.01和KOI-8012.01均位于两个宜居带的重叠区域内（无论是否考虑耀斑）。巧合的是，这三颗恒星分别属于G、K和M型恒星。请注意，KOI-5879.01原本位于长波宜居带内。考虑耀斑后，近紫外辐射可以满足生命起源通量的要求，但它已不再位于长波宜居带内。

如小节“臭氧耗竭的累积耀斑频率分布限制”所述，我们还根据这9颗行星宿主恒星的开普勒 光变曲线拟合出的累积耀斑频率分布，考察了臭氧耗竭的累积耀斑频率分布限制。特定能量的超级耀斑频率不得超过0.4天$^{-1}$。否则，这类超级耀斑会导致其行星上的臭氧耗竭。[21] 图6 展示了一个示例：考虑臭氧耗竭限制后，KOI-8012的观测和拟合累积耀斑频率分布。对于KOI-7706，其耀斑频率可能会导致其行星上的臭氧耗竭，因为能量为1。35×10^{34} 尔格的累积耀斑频率分布非常接近0.4天的限制$^{-1}$ （详见图S8）。

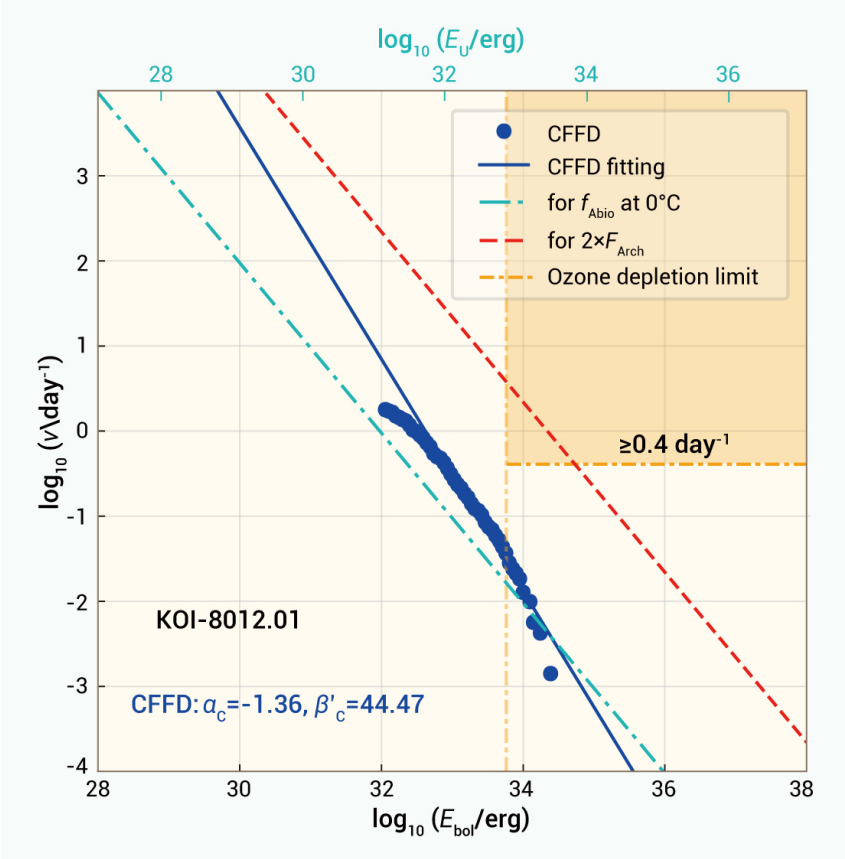


图6。KOI-8012的累积耀斑频率分布（CFFD）。蓝点表示直接根据观测得到的累积耀斑频率分布。蓝线表示拟合的累积耀斑频率分布，左下角以蓝色文字标出了两个参数（$\alpha_{\rm C}$ 和$\beta'_{\rm C}$。橙色区域表示臭氧耗竭禁区，其中耀斑率为 $\geq$ 0.4天$^{-1}$ ，且耀斑的全波段能量大于0。58×10^{34} 尔格。青色点划线表示生命起源通量所要求的耀斑下限，该通量为 0 °C。红色虚线表示太古宙地球接收的近紫外通量两倍时对应的耀斑频率。[8] 请注意，图中绘制青色点划线和红色虚线仅用于与先前研究进行比较，并未用于定义紫外宜居带。

总之，围绕开普勒耀斑宿主星的九颗行星的宜居性如下：

- 一颗岩质行星（KOI-8012.01）和两颗超级地球（KOI-8047.01 和 KOI-7703.01）同时位于紫外宜居带和长波宜居带内。它们的宿主恒星的累积耀斑频率分布未超过臭氧耗竭阈值。因此，这些行星的辐射环境更适合生命起源。

- 三颗行星（Kepler-1540 b、Kepler-438 b 和 Kepler-155 c）位于长波宜居带内。然而，根据模型表面温度下生命起源的要求，它们不在紫外宜居带内。对于 Kepler-438 b 和 Kepler-155 c，如果其表面的某些区域能维持在 0 °C，那么接收到的紫外辐射便能满足生命起源的要求（更多说明见图 S8 ）。

- KOI-7706.01 和 Kepler-1512 b 均不位于长波宜居带或紫外宜居带。此外，KOI-7706 的累积耀斑频率分布几乎达到臭氧耗竭的阈值，因此这两颗行星支持前生物化学的可能性较低。

- 如果主星处于宁静状态，KOI-5879.01 原本位于长波宜居带和紫外宜居带内。然而，主星的耀斑会使长波宜居带向外扩展，因此它不再位于宜居带内。

讨论

尽管人们已对许多系外行星开展统计研究，但从天体生物学和观测视角评估宜居带内单颗行星的宜居性仍颇具挑战。从多个方面评估恒星周围的宜居带，有助于我们更好地理解系外行星的宜居性。[5,58] 通过重新评估宜居带并编制其中行星的综合目录，我们可以推断，同时位于液态水宜居带和紫外辐射宜居带内的类地行星更有可能支持生命。

本文强调，生命起源所需的紫外辐射会随温度迅速变化。根据对耀斑恒星周围行星的分析，我们采用模型温度来估算紫外宜居带的内边界。由于表面温度与多个因素相关，例如大气效应、表面反照率以及昼夜两侧的热量再分配。[59]因此，Kepler-1540 b、Kepler-438 b 和 Kepler-155 c 值得借助大型望远镜进一步研究，以更好地约束其温度。即使是最有希望的目标之一 KOI-7703.01、KOI-8047.01 和 KOI-8012.01，也需要对其大气性质进行表征。我们还计算了这些行星的透射光谱度量（TSM），如表1所示。

本文采用耀斑事件产生的平均紫外通量。然而，紫外通量随时间变化而增强对生命或化学过程的影响，需要与连续紫外增强的影响进行比较。通过模拟太阳活动等现象，Ranjan等人[60] 发现，紫外波段随时间发生的长期变化对前生物化学影响甚微，但他们也提醒，在将高辐照量范围的结果外推至自然条件时应保持谨慎。通过用脉冲紫外辐射模拟耀斑，研究发现，微生物能够耐受高剂量的紫外辐射，其辐照量甚至高于当今地球上的微生物所经历的水平，且波长更短。[61] 因此，我们采用平均紫外通量的假设是合理的。当然，若能开展更多定量研究，探讨时间依赖性紫外辐射对前生物化学的影响，将有助于完善平均值假设。

为了准确模拟或确定恒星的紫外辐射，我们需要对各种恒星进行更多近紫外观测，尤其是年轻恒星。在宁静阶段，有必要对大样本恒星开展巡天调查，以刻画与不同恒星参数相关的近紫外辐射，例如自转周期、年龄、金属丰度和有效温度。像开普勒 和凌日系外行星巡天卫星 这样的长期监测也有助于刻画耀斑恒星的累积耀斑频率分布。此外，恒星耀斑事件期间的时间序列观测或光谱，对于理解物理过程并改进耀斑的光谱能量分布模型至关重要。

探索紫外通量对前生物化学影响的天体生物学实验，对于确定紫外辐射的限度也至关重要。紫外辐射对 RNA 前体等生物大分子的积累既有益也有害。极紫外辐射会破坏益生化学。然而，生命形成是一个选择性进化的过程，历经

漫长的时间。某些机制能够保护这些生物大分子，使其以特定的速率和概率存活，无论是在特定地点还是特定环境中。研究屏蔽机制[48,62]在不同环境中的作用，有助于完善生命起源所需的紫外条件。此外，在广泛的紫外辐射水平下，对更长时间尺度内累积产物的数量进行测试，对宜居性研究至关重要。定量评估紫外辐射对生命起源的影响仍是一个悬而未决的问题，需要更多数据和跨学科合作。

生命起源之后，许多其他因素也会影响生命的存续。例如，遗传分子的合成会受到多种因素影响。X射线、日冕物质抛射 (CMEs)[63–65]和恒星高能粒子 (SEPs)[66,67] 都可能导致水损失，并通过化学作用影响行星宜居性。乐观地说，当行星上存在生命时，生命可以通过聚集和生物膜形成等机制抵御高强度紫外辐射。[43] 因此，还需要开展更多实验室研究，考察耐辐射奇球菌[21] 和缓步动物等微生物在极端紫外环境中的表现，从而确定维持生命所能承受的紫外辐射上限。

结论

传统上用于判断液态水存在可能性的宜居带，已被广泛用于探测宜居行星；许多研究则认为，紫外辐射通过前生物化学对生命起源十分重要。我们采用先前生命起源实验研究提出的近紫外（200-280 nm）要求，并考虑不同温度对化学反应速率的影响，由此自然地限定了紫外宜居带的内边界。根据 GALEX 的观测结果，对年轻恒星的宁静恒星近紫外辐射进行修正后（~1 十亿年），低质量恒星的紫外宜居带与长波宜居带可在一个狭窄区域内重叠。然而，围绕这些低质量恒星的行星几乎不可能位于重叠区域内。为计算耀斑导致的紫外增强，我们建立了耀斑的光谱能量分布模型，并采用一个与不同恒星相关的累积耀斑频率分布经验模型。我们发现，耀斑恒星的长波宜居带和紫外宜居带可在同一区域内重叠，且该区域远宽于宁静低质量恒星的重叠区域。因此，耀斑低质量恒星能够维持重叠宜居带内行星的宜居性。具体而言，我们研究了九颗开普勒耀发恒星，并根据观测到的累积耀斑频率分布修正了它们的长波宜居带和紫外宜居带。一颗岩质行星（KOI-8012.01）和两颗超级地球（KOI-8047.01 和 KOI-7703.01）位于两个宜居带内，可避免大气中的臭氧遭到侵蚀。另有三颗行星，即 Kepler-1540 b、Kepler-438 b 和 Kepler-155 c，其表面温度值得进一步研究，以评估它们的宜居性。本研究为在耀斑低质量恒星周围寻找宜居行星和潜在生命提供了积极的展望。

资源可用性

主要联系人

Dong-Yang Gao：https://orcid.org/0000-0001-6643-2138；Hui-Gen Liu：https://orcid.org/0000-0001-5162-1753；Ming Yang：https://orcid.org/0000-0002-6926-2872；Ji-Lin Zhou：https://orcid.org/0000-0003-1680-2940。

数据和代码可用性

评估本文结论所需的所有数据均包含在本文和/或补充信息中。与本文相关的其他数据和代码可向主要联系人索取。

致谢

这些结果基于以下项目获得的观测数据： 开普勒。我们感谢 `Lightkurve`[68]在收集我们的 开普勒 数据时提供的宝贵帮助。感谢中国科学院国家天文台的 Song Wang、Xue Li 和 Jia-Hui Wang 就恒星近紫外辐射和恒星年龄进行的有益讨论。我们感谢国家重点研发计划（编号：2024YFA1611801）、国家自然科学基金委员会（编号：12150009）、中国载人航天工程（编号：CMS-CSST-2025-A16）、山东大学仪器教育基金（编号：yr20240205）、民用航天技术研究项目（编号：D010102）、中国教育部基础与跨学科突破计划（JYB2025XDXM105），以及上海市教育委员会人工智能创新计划对学科发展和研究范式改革的支持。

作者贡献

H.-G.L. 提出了本研究并进行了设计。D.-Y.G.、H.-G.L. 和 M.Y. 调查了观测数据及相关文献。D.-Y.G. 完成了计算与分析。J.-L. Z. 为本研究提出了关键建议。所有作者均参与讨论结果并审阅了稿件。

利益声明

作者声明不存在任何竞争性利益。

补充信息

补充文本、图 S1 至 S11、表 S1 至 S4、补充参考文献 S1-S32。

参考文献

1. Borucki, W. J.（2016）。开普勒任务：研制与概述。《物理学进展报告》**79**：036901。DOI：10.1088/0034-4885/79/3/036901。2. Huang, S.-S.（1959）。宇宙中的生命问题与恒星形成模式。《太平洋天文学会出版物》**71**：421。DOI：10.1086/127417。3. Kopparapu, R. K., Ramirez, R., Kasting, J. F., etal.（2013）。主序星周围的宜居带：新的估算。《天体物理学杂志》**765**：131。DOI：10.1088/0004-637X/765/2/131。4. Kopparapu, R. K., Hébrard, E., Belikov, R., et al.（2018）。直接成像任务的系外行星分类与产出估算。《天体物理学杂志》**856**：122。DOI：10.3847/1538-4357/aab205。5. Hill, M. L., Bott, K., Dalba, P. A., et al.（2023）。宜居带系外行星目录。《天文学杂志》**165**：34。DOI：10.3847/1538-3881/aca1c0。

6. Kopparapu, R. K., Ramirez, R. M., SchottelKotte,J., et al.（2014）。主序星周围的宜居带：对行星质量的依赖。《天体物理学杂志快报》787：L29。DOI：10.1088/2041-8205/787/2/L29。7. Cockell, C. S.（1999）。F、G和K型主序星的碳生物化学与紫外辐射环境。《伊卡洛斯》141：399–407。DOI：10.1006/icar.1999.6167。8. Buccino, A. P., Lemarchand, G. A., and Mauas, P. J. D.（2006）。环恒星宜居带周围的紫外辐射约束。《伊卡洛斯》183：491–503。DOI：10.1016/ j.icarus.2006.03.007。9. Xu, J., Ritson, D. J., Ranjan, S., et al.（2018）。利用亚硫酸盐和亚铁氰化物对氰化氢进行光化学还原同系化。《化学通讯》54：（44），5566–5569。DOI：10.1039/C8CC01499J。10. Rimmer, P. B., Xu, J., Thompson, S. J., et al.（2018）。系外行星上RNA前体的起源。《科学进展》4：eaar3302。DOI：10.1126/sciadv.aar3302。11. Arrhenius, S.（1900年）。地球表面温度的长期波动。《天空与地球》20：389–396。12. Guo, J., Zhang, F., Zhang, X., et al.（2010年）。宿主恒星周围的宜居带与紫外宜居带。325：25–30。DOI：10.1007/s10509-009-0173-9。13. Spinelli, R., Borsa, F., Ghirlanda, G., et al.（2023）。系外行星的紫外宜居带。《皇家天文学会月刊》522：1411–1418。DOI：10.1093/mnras/stad928。14. Pettersen, B. R.（1989年）。恒星耀斑及其特征综述。《太阳物理学》121：299–312。DOI：10.1007/BF00161702。15. Benz, A. O. and Güdel, M.（2010年）。太阳、恒星和年轻恒星体上磁驱动耀斑的物理过程。《天文学与天体物理学年度评论》48：241–287。DOI：10.1146/annurev-astro-082708-101757。16. Shibata, K. and Takasao, S.（2016）。“太阳和恒星环境中的分形重联”。《磁重联：概念与应用》。W. Gonzalez 和 E. Parker 编。第427卷。《天体物理学与空间科学图书馆》，373。DOI：10.1007/978-3-319- 26432-5_10。17. Günther, M. N., Zhan, Z., Seager, S., et al.（2020年）。来自TESS首批数据发布的恒星耀斑：探索一组新的M型矮星样本。《天文学杂志》159：60。DOI：10.3847/1538-3881/ab5d3a。18. Gao, D.-Y., Liu, H.-G., Yang, M., et al.（2022年）。校正由TESS和开普勒探测到的恒星耀斑频率分布。《天文学杂志》164：213。DOI：10.3847/1538-3881/ac937e。19. Jackman, J. A. G., Shkolnik, E. L., Million, C., et al.（2023）。将光学耀斑模型拓展至紫外：比较TESS和GALEX耀斑观测的结果，以

M型矮星。《皇家天文学会月刊》519：3564–3583。DOI：10.1093/mnras/stac3135。20. Youngblood, A., France, K., Loyd, R. O. P., 等（2017）。MUSCLES宝库巡天。IV. M型矮星紫外、Ca II K线和高能粒子通量的标度关系。《天体物理学杂志》843：31。DOI：10.3847/1538-4357/aa76dd。21. Tilley, M. A., Segura, A., Meadows, V., 等（2019）。模拟宜居带类地行星上的M矮星反复耀斑活动：无磁场行星的大气效应。《天体生物学》19：64–86。DOI：10.1089/ast.2017.1794。22. Jackman, J. A. G., Wheatley, P. J., Acton, J. S., 等（2021）。利用下一代凌日巡天观测到的恒星耀斑。《皇家天文学会月刊》504：3246–3264。DOI：10.1093/mnras/stab979。23. Yang, H. 和 Liu, J.（2019）。开普勒任务中的耀斑目录与耀斑活动。《天体物理学杂志增刊》241：29。DOI：10 . 3847 / 1538 - 4365/ab0d28。24. Brasseur, C. E., Osten, R. A., Tristan, I. I., 等（2023）。通过对GALEX和开普勒耀斑星开展多波段研究，约束近紫外和光学波段的恒星耀斑能量比。《天体物理学杂志》944：5。DOI：10.3847/1538-4357/acab59。25. Kowalski, A. F.（2022）。AD Leo的1985年4月12日大耀斑近紫外连续谱建模。《天文学与空间科学前沿》9：351。DOI：10.3389/fspas. 2022.1034458。26. Loyd, R. O. P., Shkolnik, E. L., Schneider, A. C., 等（2018）。HAZMAT. IV. 年轻M型恒星在远紫外波段的耀斑和超级耀斑。《天体物理学杂志》867：70。DOI：10.3847/1538-4357/aae2ae。27. Li, X., Wang, S., Han, H., 等（2024）。M型恒星的紫外与色球活动及宜居性。《天体物理学杂志》966：69。DOI：10.3847/1538-4357/ ad3038。28. Watanabe, K., Kitagawa, J. 和 Masuda, S.（2017）。日出号/SOT观测到的太阳耀斑中产生白光增强的特征。《天体物理学杂志》850：204。DOI：10.3847/1538-4357/aa9659。29. Watanabe, K. 和 Imada, S.（2020）。2012年10月23日X1.8级耀斑的白光辐射和色球响应。《天体物理学杂志》891：88。DOI：10.3847/1538-4357/ab711b。30. Okamoto, S., Notsu, Y., Maehara, H., 等（2021）。类太阳恒星超级耀斑的统计特性：使用开普勒主任务全部数据得出的结果。《天体物理学杂志》906：72。DOI：10.3847/1538-4357/abc8f5。31. Kowalski, A. F.（2023）。连接恒星耀斑中的高密度电子束日冕输运与深层色球加热。《天体物理学快报》943：L23。DOI：10.3847/2041-8213/acb144。

32. Kretzschmar, M.（2011）。作为恒星的太阳：白光耀斑观测。《天文学与天体物理学》530：A84。DOI：10.1051/0004-6361/201015930。33. Kleint, L., Heinzel, P., Judge, P., 等（2016）。2014年3月29日X1级耀斑期间紫外、可见光和红外波段的连续谱增强。《天体物理学杂志》816：88。DOI：10.3847/0004-637X/816/2/88。34. Kowalski, A. F., Wisniewski, J. P., Hawley, S. L., 等（2019）。HF/GF型dMe耀斑脉冲阶段的近紫外连续谱辐射。I. 数据。《天体物理学杂志》871：167。DOI：10.3847/1538-4357/aaf058。35. France, K., Loyd, R. O. P., Youngblood, A., 等（2016）。MUSCLES宝库巡天。I. 研究动机与概述。《天体物理学杂志》820：89。DOI：10 . 3847 / 0004 - 637X/820/2/89。36. Richey-Yowell, T., Shkolnik, E. L., Loyd, R. O. P., 等（2022）。HAZMAT. VIII. K型恒星紫外演化的光谱分析：K型矮星在首个十亿年内自转停滞的进一步证据。《天体物理学杂志》929：169。DOI：10.3847/1538-4357/ac5f48。37. Osten, R. A. 和 Wolk, S. J.（2015）。联系磁活动恒星的耀斑与瞬态质量损失事件。《天体物理学杂志》809：79。DOI：10 .1088 / 0004 - 637X/809/1/79。38. Kowalski, A. F., Allred, J. C., Uitenbroek, H., 等（2017）。太阳和恒星耀斑中的氢巴耳末线展宽。《天体物理学杂志》837：125。DOI：10.3847/1538-4357/aa603e。39. Shibata, K. 和 Magara, T.（2011）。太阳耀斑：磁流体动力学过程。《太阳物理学综述》8：6。DOI：10.12942/lrsp-2011-6。40. Tu, Z.-L., Yang, M., Zhang, Z. J., 等（2020）。利用凌日系外行星巡天卫星首年观测数据发现的类太阳恒星超级耀斑。《天体物理学杂志》890：46。DOI：10.3847/1538- 4357/ab6606。41. Popp, M., Schmidt, H. 和 Marotzke, J.（2016）。CO_2 和太阳强迫下向湿温室状态转变。《自然·通讯》7：10627。DOI：10.1038/ncomms10627。42. Ranjan, S., Wordsworth, R. 和 Sasselov, D. D.（2017）。绕M型矮星运行的行星表面紫外环境：对前生物化学的影响及开展后续实验研究的必要性。《天体物理学杂志》843：110。DOI：10.3847/1538-4357/ aa773e。43. Abrevaya, X. C., Leitzinger, M., Oppezzo, O. J., 等（2020）。比邻星b的紫外表面宜居性：首批实验揭示生命可能能够在恒星耀斑中存活。《皇家天文学会月刊》494：L69–L74。DOI：10.1093/mnrasl/slaa037。44. Loyd, R. O. P., France, K., Youngblood, A., 等（2016）。MUSCLES宝库巡天。III. 11颗拥有行星的M型和K型恒星从X射线到红外线的光谱。《天体物理学杂志》824：102。DOI：10.3847/0004-637X/824/2/102。

45. Wang, S., Li, X., Han, H., 等（2024）。基于恒星演化模型预测光球紫外辐射。《天体物理学杂志》976：43。DOI：10. 3847/ 1538 - 4357/ad87d0。46. Segura, A., Walkowicz, L. M., Meadows, V., 等（2010）。强烈恒星耀斑对绕M型矮星运行的类地行星大气化学的影响。《天体生物学》10：751–771。DOI：10.1089/ast.2009.0376。47. Todd, Z. R., Szostak, J. W., and Sasselov, D. D.（2021）。防护紫外线光损伤：对早期地球地表生命起源化学的启示。《ACS地球与空间化学》5：239–246。DOI：10.1021/acsearthspacechem.0c00270。48. Ranjan, S., Kufner, C. L., Lozano, G. G., 等（2022）。前生物地球天然水体中的紫外线透射。《天体生物学》22：242–262。DOI：10.1089/ast.2020.2422。49. Mojzsis, S. J., Arrhenius, G., McKeegan, K. D., 等（1996）。地球上存在38亿年前生命的证据。《自然》384：55–59。DOI：10.1038/384055a0。50. Dodd, M. S., Papineau, D., Grenne, T., 等（2017）。地球最古老热液喷口沉淀物中早期生命的证据。543：60–64。DOI：10.1038/nature21377。51. Cavalazzi, B., Lemelle, L., Simionovici, A., 等（2021）。34.2亿年前海底以下热液环境中的细胞残留物。《科学进展》7：eabf3963。DOI：10. 1126/sciadv.abf3963。52. Shkolnik, E. L. and Barman, T. S.（2014）。HAZMAT。I. 早期M型恒星远紫外与近紫外辐射的演化。《天文学杂志》148：64。DOI：10.1088/0004-6256/148/4/64。53. Baraffe, I., Homeier, D., Allard, F., 等（2015）。从前主序到主序、直至氢燃烧极限的低质量恒星新演化模型。《天文学与天体物理学》577：A42。DOI：10.1051/0004-6361/201425481。54. Willmer, C. N. A.（2018）。太阳在多个滤光片中的绝对星等。《天体物理学杂志增刊》236：47。DOI：10.3847/1538-4365/aabfdf。55. Li, X., Wang, S., Ma, J., 等（2025）。恒星活动与宜居带的演化。I. 疏散星团和场星中矮星的紫外辐射。《天体物理学杂志增刊》281：13。DOI：10.3847/1538-4365/ae08a9。56. Thompson, S. E., Coughlin, J. L., Hoffman, K., 等（2018）。开普勒观测到的行星候选体。VIII. 基于第25次数据发布、测得完备度和可靠性的全自动目录。《天体物理学杂志增刊》235：38。DOI：10.3847/1538-4365/aab4f9。57. Kempton, E. M. .-., Bean, J. L., Louie, D. R., 等（2018）。优先筛选最适合进行大气特征分析的凌日系外行星巡天卫星行星候选体的框架。《太平洋天文学会刊》130：114401。DOI：10 . 1088 / 1538 - 3873/aadf6f。

58. Hall, C., Stancil, P. C., Terry, J. P., 等（2023）。系外行星宜居性的新定义：引入光合作用宜居带。《天体物理学杂志快报》948：L26。DOI：10.3847/2041-8213/acccfb。59. Riihelä, A., Bright, R. M., and Anttila, K.（2021）。南极海冰损失推动冰雪反照率反馈近期增强。《自然·地球科学》14：832–836。DOI：10.1038/s41561-021-00841-x。60. Ranjan, S. and Sasselov, D. D.（2016）。紫外线环境对前生命分子合成的影响。《天体生物学》16：68–88。DOI：10.1089/ast.2015.1359。61. Abrevaya, X. C., Odert, P., Leitzinger, M., 等（2025）。EXO-UV计划：研究紫外辐射对系外行星生物学影响的实验研究最新进展。《太阳系研究》59：72。DOI：10.1134/S0038094624602019。62. Sajeev, Y.（2023）。生物分子互补性的益生源化学起源。《Communications Chemistry》6：259。DOI：10.1038/s42004-023-01060-8。63. Kay, C., Opher, M., and Kornbleuth, M.（2016）。绕M型矮星和类太阳恒星运行的系外行星遭受日冕物质抛射撞击的概率。《天体物理学杂志》826：195。DOI：10. 3847/0004-637X/826/2/195。64. Khodachenko, M. L., Ribas, I., Lammer, H., 等（2007）。低质量M型恒星的日冕物质抛射（CME）活动是影响类地系外行星宜居性的重要因素。I. 日冕物质抛射撞击近距离宜居带中类地系外行星的预期磁层。《天体生物学》7：167–184。DOI：10.1089/ast.2006.0127。65. Peña-Moñino, L., Pérez-Torres, M., Varela, J., 等（2024）。比邻星b空间天气的磁流体动力学模拟：宜居条件与射电辐射。《天文学与天体物理学》688：A138。DOI：10.1051/0004-6361/202349042。66. Yamashiki, Y. A., Maehara, H., Airapetian, V., 等（2019）。恒星超级耀斑对行星宜居性的影响。《天体物理学杂志》881：114。DOI：10. 3847 / 1538 - 4357/ab2a71。67. Hu, J., Airapetian, V. S., Li, G., 等（2022）。类太阳恒星超级耀斑相关日冕物质抛射产生的极端高能粒子事件。《科学进展》8：eabi9743。DOI：10.1126/sciadv.abi9743。68. Lightkurve合作组，Cardoso, J. V. d. M., Hedges, C., 等（2018）。Lightkurve：使用Python进行开普勒和凌日系外行星巡天卫星的时间序列分析。天体物理学源代码库，记录编号ascl:1812.013。

《耀斑驱动的宜居性：拓展低质量恒星周围的生命潜力》的补充信息

Dong-Yang Gao[1,2,6],Hui-Gen Liu[1, 4, 6, *], Ming Yang[3, 5, 6, *], 以及
Ji-Lin Zhou[1,46]这些作者对本研究的贡献相同。
*通讯作者。电子邮箱：huigen@nju.edu.cn（H.-G.L.）；myang@tongji.edu.cn （M.Y.）

此 PDF 文件包含：

补充文本 图 S1 至 S11 表 S1 至
S4 补充参考文献 S1-S32

补充文本

耀斑恒星的平均光度

耀斑光谱能量分布

在光谱能量分布模型中，紫外波段（0.100 至 0.365 μm）的耀斑辐射由叠加在高温黑体光谱上的幂律连续谱构成，而白光波段则采用 9,000 开尔文高温黑体模型。巴尔末跃迁将这两个区域分隔开来。该模型基于此前的研究，[S1–S3] 并将发射线贡献纳入连续谱。该耀斑的详细耀斑光谱能量分布模型见正文方程（1）。

我们基于 AD Leo 上耀斑的光谱观测以及 G型恒星模拟耀斑的光谱能量分布，推导出了耀斑光谱能量分布模型的参数 f_{b} 和 γ 。拟合结果列于表 S1 ，并展示于图 S1A 中。根据线性相关假设，当 T_{eff} 从 3,400 K 变化至 6,000 K 时， f_{b} 从 1.013 降至 0.011，而 γ 则在 -0.500 至 1.032 之间变化。图 S1B 展示了若干耀斑光谱能量分布模型。需要注意的是，本研究主要考察不同光谱型下耀斑对宜居带的影响，其中 f_{b} 和 γ 反映的是特定光谱型的特征，而非单颗恒星的特征。

为验证耀斑光谱能量分布模型，我们将计算得到的近紫外通量与观测结果进行了比较。所选观测光谱为 Segura 等人报道的 AD Leo 在 915 s 时的耀斑峰值光谱。[S4]图 S2 展示了比较结果。该光谱能量分布模型在紫外C波段（0.2 - 0.28 μm）的总能量仅比观测光谱能量低 7%。此外，我们估算了 M型恒星的总能量修正因子，即该光谱能量分布模型与 9,000K 高温黑体光谱之间的耀斑能量比。我们的结果与前人工作在不同紫外波段中的估算值一致，表 S2对此作了说明。因此，本文提出的连续谱耀斑光谱能量分布模型是适用的。由于缺乏 K型恒星近紫外波段的观测光谱能量分布，难以验证 K型恒星的光谱能量分布模型。不过，近紫外波段的耀斑增强通常对 G型和K型恒星的贡献较小；因此，我们对 K型恒星的光谱能量分布模型进行了线性插值。

Table S1. The specrum and fitted values of $f_{\rm b}$ and γ in the flare SED model.

Spectral Type	spectrum		$f_{\rm b}$	γ
M-type star	AD Leo: flare spectrum near Hγ peak[a]	800 s	0.486±0.190	0.829±0.470
		915 s (Peak)	0.277±0.131	0.072±0.487
		1,038 s	0.206±0.141	-0.140±0.700
	AD Leo: flare spectrum at U band peak[b]	Observation	1.013±0.159	-0.052±0.133
		Model	0.884±0.331	-0.014±0.240
	UV flare photometry[c]		1.0±0.4	$-0.5^{+0.2}_{-0.4}$
G-type star	Hot-BlackBody Model	9,000 K	0.011±0.001	1.032±0.118
		10,000 K	0.251±0.009	0.623±0.048

[a] Segura et al.[S4] provide synthetic flare spectra near the peak of the Hγ line around 915 seconds.
[b] Kowalski[S5] provides a synthetic flare spectrum and continuum observations at the U band peak around 542 seconds.
[c] Fleming et al.[S6] provide 21 flare events observed on GJ 65 in both GALEX FUV ($\lambda_{\rm eff} = 0.1539\ \mu m, \Delta\lambda = 0.1344 - 0.1786\ \mu m$) and NUV ($\lambda_{\rm eff} = 0.2316\ \mu m, \Delta\lambda = 0.1771 - 0.2831\ \mu m$) bands. Fleming et al.[S6] provide the clues of γ, which is used to determine $f_{\rm b}$ by incorporating the Energy Correction Factor (ECF) of 2.7±0.6 from Jackman et al.[S3]

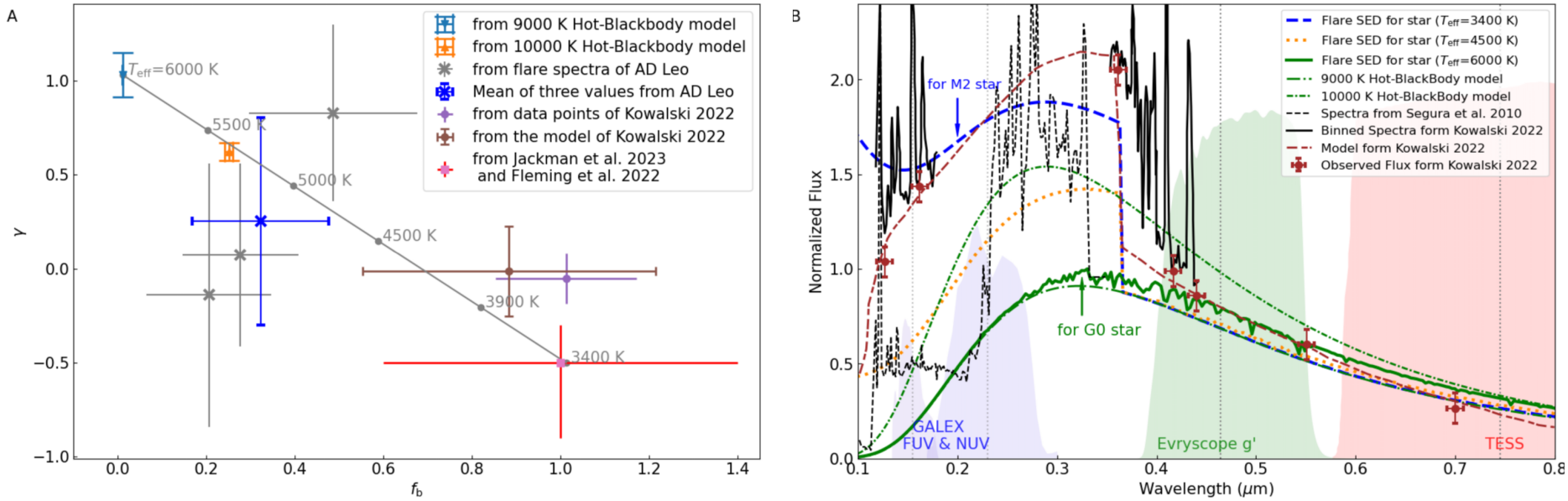


Figure S1. (A) Parameters of flare SED. The parameters are derived from flare spectra and models in Table S1. The gray line represents the linearly scaled model for the flare SED with varying stellar effective temperature ($T_{\rm eff}$). **(B) Flare SED for different stars.** The solid, dotted, and dashed lines in various colors represent flare SED models for different stars with $T_{\rm eff}$ =6,000 K, 4,500 K, and 3,400 K, respectively. The black solid line represents the adjusted "great flare" spectra of AD Leo, with plus symbols marking the data from wavelength-binned observed continuum fluxes by Kowalski.[S5] The red long-short-dashed line is the best fit using a two-component radiative-hydrodynamic model from the same study. The gray dashed line is the "great flare" spectra from Segura et al.[S4] The green long-dash-dotted and short-dash-dotted lines show the 9,000 and 10,000 K hot-blackbody model, respectively. Colored backgrounds show the relative band-passes of different filters, with gray vertical dotted lines marking the mean wavelengths for GALEX FUV band (0.155 μm), GALEX NUV band (0.230 μm), Evryscope g′ band (0.464 μm), and TESS band (0.745 μm).

表 S2. 耀斑光谱能量分布模型与前人针对 M型恒星提出的模型及观测结果的比较。

参数	前人工作	本研究
ECF[a] 近紫外	2.7±0.6[S3] 3.86[S7] 2–3[S8]	2.87
ECF 远紫外	6.5±0.7[S3] 12.6[S7]	9.38
$F_{\mathrm{FUV}}/F_{\mathrm{NUV}}$ [b]	0.85±0.52[S6] 0.5–2[S7]	0.85
$F_{0.2\ \mu m}/F_{0.28\ \mu m}$ [c]	1.3[S5] ∼0.9[S4]	1.2
$F_{0.464\ \mu\mathrm{m,\ g'}}/F_{0.745\ \mu\mathrm{m,\ TESS}}$ [d]	2.78±0.1[S9]	2.65

[a] 9000 K 热黑体假设下的能量校正因子（ECF）。
[b] 根据 GALEX 远紫外和近紫外波段得出的通量比，包括来自 GJ 65[S6]和主要为 M型恒星的 182 个耀斑事件。[S7]
[c] 根据 Kowalski[S5] 和 Segura 等人的光谱能量分布模型得出的通量比，[S4] 用于 AD Leo 的“大耀斑”。
[d] 根据 Evryscope 和凌日系外行星巡天卫星观测到的多个超级耀斑得出的通量比，详见 Howard 等人[S9]

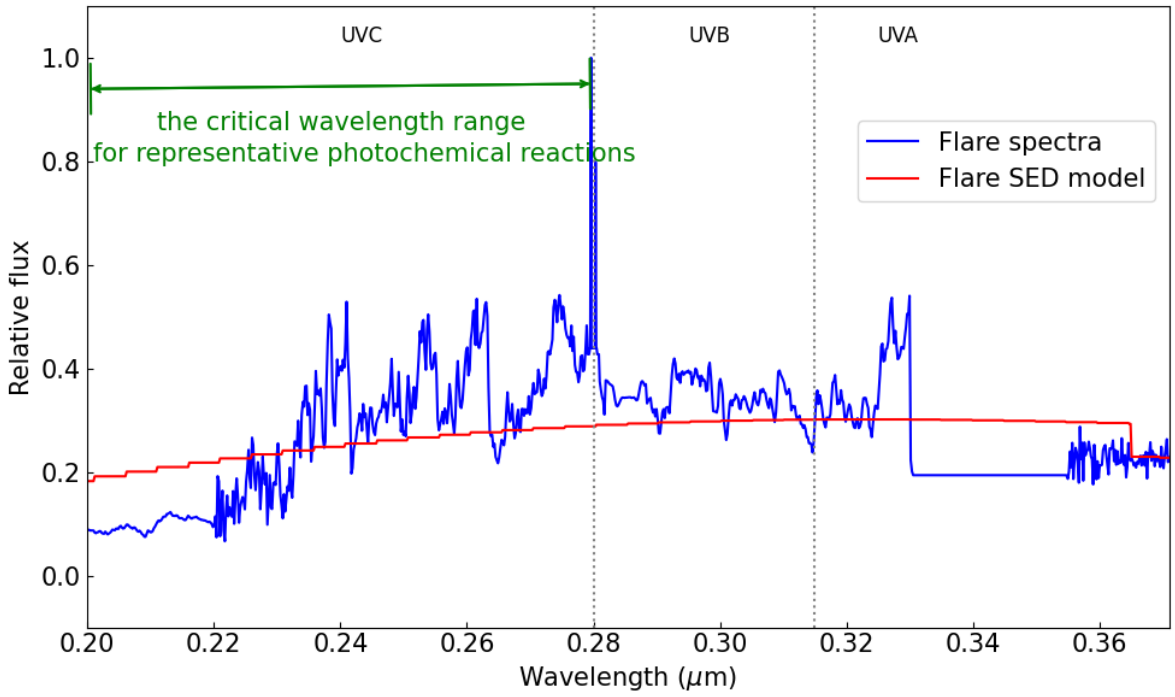


图 S2. 观测到的耀斑光谱与光谱能量分布模型的比较。 蓝线表示由 Segura 等人合成的多波段复合光谱。[S4]，时间为 915 s。红线表示正文中描述的光谱能量分布模型。灰色竖向虚线标示 UVA 与 UVB（0.315 μm）以及 UVB 与 UVC（0.28 μm）之间的边界。绿色水平箭头标示近紫外波长范围（0.20–0.28 μm），这对光化学反应至关重要。[S10] 在此范围内，耀斑光谱与光谱能量分布模型的通量比约为 1.07。

基于观测的宁静态近紫外辐射校正 s

为准确估算恒星静息状态下的近紫外辐射，我们使用了通过 GALEX 近紫外波段得到的光球辐射与观测总辐射之比[S11]（见表 S4）。此外，为符合本文采用的一般情况（即恒星年龄为 1.0 十亿年，且金属丰度 [Fe/H]为 0），我们采用了 Wang J. H. 提供的年龄信息[S12] 以及 [Fe/H] Wang S. 提供的参数[S11]。我们发现，全样本和筛选后样本（年龄：0.6–1.4 十亿年，[Fe/H]∼-0.2–0.2）的中位数值较为接近（见图 S3）。由于筛选后样本中温度低于 4,000 K 的恒星数量不足，我们在近紫外通量校正中采用了全样本的统计中位数值。

耀斑导致的恒星光度增强

累积耀斑频率分布（CFFD）记为 ν，可表示为

$$\nu = k_c E^{\alpha_c} \tag{S1}$$

or

$$\log_{10}(\nu) = \beta_c + \alpha_c \times \log_{10}(E), \tag{S2}$$

其中 $\beta_c = \log_{10}(k_c)$。能量介于 E 和 $E + dE$ 之间的耀斑发生频率为

$$d\nu(E) = k_c \alpha_c E^{(\alpha_c - 1)} dE. \tag{S3}$$

如果将 k_c 的单位设为 day^{-1}，那么每天的耀斑总能量为

$$E_{\text{total}} = \int_{E_{\text{low}}}^{E_{\text{high}}} E d\nu(E) dE = \int_{E_{\text{low}}}^{E_{\text{high}}} k_c \alpha_c E^{\alpha_c} dE \tag{S4}$$

$$= \begin{cases} \alpha_c 10^{\beta_c} \times (E_{\text{high}}^{(\alpha_c+1)} - E_{\text{low}}^{(\alpha_c+1)})/(\alpha_c+1), & \text{for } \alpha_c \neq -1 \\ \alpha_c 10^{\beta_c} \times ln(E_{\text{high}}/E_{\text{low}}), & \text{for } \alpha_c = -1 \end{cases} \tag{S5}$$

其中， E_{low} 和 E_{high} 分别是计算中考虑的能量下限和上限。已探测到的太阳和恒星耀斑的能量范围为 10^{28} 至 10^{38} 尔格。[S13–S16]

耀斑导致的恒星光度平均增幅为:

$$L_{\text{flare}} = E_{\text{total}}/(1 \text{ day}) = E_{\text{total}}/(86400 \text{ s}). \tag{S6}$$

使用我们先前研究中的 α_c 和 β_c 值，[S17] 我们得到了M2至G1型恒星的α_c 和 β_c 与 T_{eff} 之间的分布关系，如下所示:

$$\alpha_c = \begin{cases} 0.44(\pm0.01) \times \frac{T_{\text{eff}}}{1000 \text{ K}} - 2.84(\pm0.05), & \text{for } \ 3400 \text{ K} \leq \ T_{\text{eff}} < 5150 \text{ K} \\ -0.53(\pm0.03) \times \frac{T_{\text{eff}}}{1000 \text{ K}} + 2.18(\pm0.18), & \text{for } \ 5150 \text{ K} \leq \ T_{\text{eff}} \leq 5900 \text{ K} \end{cases} \tag{S7}$$

$$\beta_c = -32.0 \times \alpha_c - 1.09 \times 10^{-7}(\pm1.10 \times 10^{-4}) \times \frac{T_{\text{eff}}}{1000 \text{ K}} + 1.12(\pm0.54). \tag{S8}$$

在我们先前的研究中，由于采用了 9,000 开尔文高温黑体模型这一假设，[S17] 低估了紫外辐射的贡献。采用主论文中经过验证的光谱能量分布模型后，我们可以计算近紫外波段模型通量的修正因子，即:

$$R_{\text{corrected}} = \frac{\int_{\text{bol}} F_\lambda(T_{\text{flare}}) d\lambda}{\int_{\text{bol}} B_\lambda(T_{\text{flare}}) d\lambda}, \tag{S9}$$

其中， T_{flare} 表示耀斑温度，设为 9,000 开尔文； F_λ 是根据耀斑光谱能量分布模型得到的耀斑光谱（主论文中的公式1 ），而 $B_\lambda(T_{\text{flare}})$ 是在耀斑温度下计算的普朗克函数。例如，对于G型恒星 KOI-7703， $R_{\text{corrected}} = 1.14$；而对于M型恒星开普勒-1512， $R_{\text{corrected}} = 1.87$。

耀斑能量校正后，CFFD 的斜率保持不变（即 α_c 保持恒定），而 β_c 增加。校正后的更新版 β'_c 可用校正前拟合的参数描述:

$$\beta_c^{'} = -\log_{10}(R_{\text{corrected}}) \times \alpha_c + \beta_c. \tag{S10}$$

校正后典型 G、K 和 M 型恒星的经验累积耀斑频率分布如图 S4所示。对于大多数 M 型耀斑恒星，我们发现 $\alpha_C < -1$，这表明低能耀斑贡献了总耀斑能量的大部分。相反，对于温度高于 K5 型恒星的恒星，我们发现 $\alpha_C > -1$，这表明高能耀斑占主导地位。[S17–S20]

由于不同恒星的 CFFD 不同，可直接通过公式（L_{flare}）计算耀斑导致的恒星平均辐射总光度增强量（S6）。要估算紫外光度的平均增强量，我们需要结合光谱能量分布模型来估算耀斑期间活动区的面积，A_{flare}。根据以下公式:

$$\frac{L_{\text{flare}}}{L_*} = \frac{A_{\text{flare}} \int_{\text{bol}} F_{\text{flare}}(\lambda) d\lambda}{\pi R_*^2 \int_{\text{bol}} S_*(\lambda) d\lambda}, \tag{S11}$$

其中 $F_{\text{flar e}}$（λ）是主论文方程（1中定义的耀斑光谱能量分布，而 S_*（λ）是恒星 r

校正后的宁静阶段光谱。由于我们已经知道 $L_{\rm flare}$ 和恒星在宁静阶段的光度 $L*$，因此可以计算无量纲比值：

$$\frac{A_{\rm flare}}{\pi R_*^2} = \frac{\frac{L_{\rm flare}}{L_*}}{\frac{\int_{\rm bol} F_{\rm flare}(\lambda)d\lambda}{\int_{\rm bol} S_*(\lambda)d\lambda}}. \tag{S12}$$

光谱的全波段积分范围为 0.1 至 3 μm。随后，我们可以通过对 0.2 至 0.28 μm 范围内的积分，估算近紫外波段的平均增强幅度，如下所示：

$$f_{\rm flare,\ NUV} = \frac{A_{\rm flare}}{\pi R_*^2} \frac{\int_{\rm NUV} F_{\rm flare}(\lambda)d\lambda}{\int_{\rm NUV} S_*(\lambda)d\lambda}. \tag{S13}$$

耀斑恒星的紫外宜居带

不同类型耀斑恒星周围的宜居带

我们采用先前的研究[S17]来描述年龄为 ~1 十亿年的不同耀斑恒星的累积耀斑频率分布。基于 121 个耀斑恒星样本（包括 G、K 和 M 型恒星），我们获得了与其他研究一致的 α，如图 S5所示。我们得出了累积耀斑频率分布与恒星有效温度（$T_{\rm eff}$）之间的经验关系，如方程 S7 和 S8所示。这些恒星的自转周期为 1 至 5 天，根据经验陀螺年代学等时线推算，其年龄约为 0.1 至 3 十亿年。[S14, S21]此外，121 个样本中有 57 个（47%）也通过 FLAME（最终光度年龄质量估算器[S22]）获得了年龄，其中 95% 的年龄超过 1 十亿年。因此，我们采用这些相关关系来表示年龄约为 1.0 十亿年的恒星的累积耀斑频率分布。

为了估算恒星在约 1 Gyr 时的参数，我们采用 Baraffe 等人描述的恒星演化模型。[S23] 恒星质量设定在 1.1 至 0.3 个太阳质量之间，以代表不同的 G 型、M 型和 K 型恒星；我们计算它们在 1 Gyr 时的有效温度（$T_{\rm eff}$）和半径（R_*）。根据恒星参数（[Fe/H]=0），使用 Phoenix 模型生成光球近紫外通量。然后，通过除以图 S3 中全样本的中位数，对宁静态近紫外辐射进行校正。随后利用这些参数计算一般情况下存在耀斑时紫外宜居带的内边界。考虑到行星大气透射率，太古宙地球的大气中不存在臭氧和氧气。因此，对于 K 型和 G 型恒星（有效温度为 $T_{\rm eff} \geq 5{,}000$ K，质量为 $M_* \geq 0.84$ M⊙），我们采用 0.84 的大气透射率；对于温度较低的恒星（$T_{\rm eff} < 5{,}000$ K），则采用 0.74。[S24] 图 S6 展示了不同 $T_{\rm eff}$ 下耀斑恒星的长波宜居带（绿色区域）和紫外宜居带（紫色区域）。为便于查看，正文中的图 3 展示了不同恒星质量下存在和不存在耀斑时宜居带的边界。

开普勒耀斑宿主星周围的宜居带

对于开普勒耀斑恒星，我们拟合了全部九颗恒星的累积耀斑频率分布参数 $\alpha_{\rm C}$ 和 $\beta'_{\rm C}$，如表S3所示。更新后的恒星和行星参数列于表S4中。我们得到了它们的长波宜居带和紫外宜居带边界，如主文表1 和图 S7所示。主文中的图5 也展示了这些边界，以便更清晰地查看。

生命起源所需的观测累积耀斑频率分布

对于耀斑恒星，可以直接观测到特定波段的耀斑；因此，我们可以获得该波段内的耀斑能量，而非总能量。为了估算近紫外波段（200-280 nm）中 CFFD 的生命起源极限，我们需要通过光谱能量分布模型将耀斑能量转换到近紫外波段。这里，我们以 U 波段（320-400 nm）为例，因为此前已有针对.....上耀斑的观测

表 S3。 开普勒耀发恒星的累积耀斑频率分布参数

KIC 编号	行星名称	α_C	β'_C
4742188	KOI-7703.01[a]	-	-
11294822	KOI-8047.01	-1.08±0.34	35.18±11.28
5938970	Kepler-1540 b	-1.10±0.03	35.49±1.12
6497146	Kepler-438 b	-1.70±0.25	54.42±8.16
12302530	Kepler-155 c	-0.42±0.14	12.51±4.65
4762283	KOI-7706.01	-1.58±0.07	53.00±2.58
11198419	KOI-5879.01[b]	-2.35±0.07	77.94±2.44
8424002	Kepler-1512 b	-1.64±0.01	52.12±0.41
10452252	KOI-8012.01	-1.36±0.04	44.47±1.34

[a] 对于 KIC 4742188（KOI-7703），仅检测到一个耀斑事件，因此无法拟合 CFFD 参数。

[b] 为了计算耀斑总能量，我们为所有恒星设定了从 10^{28} 到 10^{38} 尔格的积分范围，KOI-5879 除外。对于 KOI-5879，由于其最小 α_C 值为 -2.35，当下限设为 $10^{29.85}$ 尔格时，耀斑光度（$L_{\rm flare}$）与恒星本身的光度（L_*）相近。因此，我们为这颗恒星选取 10^{30} 尔格作为更合适的耀斑能量下限，所得比值 $L_{\rm flare}/L_*$ 等于 0.62。

（此表的完整内容以机器可读格式提供。）

M型恒星，例如 AD Leo。[S18] 观测到的 U 波段耀斑能量通量 $F_{\rm U}$ 可以转换为近紫外波段的能量通量，即校正因子为

$$r_{\rm U} = \frac{F_{\rm U}}{\int_{200\ \rm nm}^{280\ \rm nm} F_{\rm flare}(\lambda) d\lambda}. \tag{S14}$$

对于像 KOI-7703 这样的 G型恒星，$r_{\rm U} = 1.94$，而对于像 KOI-8012 这样的 M型恒星，$r_{\rm U} = 1.19$。考虑到耀斑产生的近紫外通量在 M型恒星中占主导地位，我们可以忽略宁静恒星的通量。对于表面温度为 $T_{\rm surf}$的情况，生命起源所需的近紫外波段能量为 $F_0 \times e^{(T_{\rm surf} - 273\ \rm K)\ /10\ \rm K}$，其中$F_0 = 8 \times 10^{27}$ 尔格 $\rm s^{-1}$ 是根据方程 3得出的所需通量。因此，对于位于恒星 $T_{\rm surf}$ 处的一颗行星，我们可以得到耀斑恒星在 U 波段的累积耀斑频率分布限制如下：

$$v \geq \frac{8 \times 10^{27}\ \rm erg\ s^{-1}}{E_{\rm U}} \left(\frac{a_{\rm p}}{1\ \rm AU}\right)^2 \times e^{(T_{\rm surf} - 273\ \rm K)/10\ \rm K} \times \frac{r_{\rm U}}{\eta}, \tag{S15}$$

其中 η 是行星大气透射率。请注意，对于 G型和K型恒星，当宁静态近紫外通量不可忽略时，应从 F_0 中扣除该通量。特别是，如果宁静态近紫外通量大于F_0，则已满足限制，耀斑频率不受限制。设表面温度为$T_{\rm surf}$= 0 ℃（273 K），且 $\eta = 1$，我们可以得到累积耀斑频率分布的最小限制，

$$v \geq 6.9\ \rm day^{-1} \times \left(\frac{10^{32}\ \rm erg}{E_{\rm U}}\right)\left(\frac{a_{\rm p}}{1\ \rm AU}\right)^2 \times r_{\rm U}. \tag{S16}$$

请注意，如果观测到的 U 波段累积耀斑频率分布与累积耀斑频率分布限值相交，那么就应有足够的近紫外能量来驱动生命起源所需的前生物化学。

我们在图 6 和图 S8中绘出了累积耀斑频率分布限值，以展示行星表面温度为 0 ℃时的最低要求。此外，我们还绘出了达到太古宙地球两倍通量所需的累积耀斑频率分布，即 2 × 5,200 尔格 $\rm cm^{-2}\ s^{-1}$，供参考[S24]。

Table S4. Stellar and planetary parameters of the nine Kepler stars.

The planets/candidates	$T_{\rm eff}$ (K)	R_* ($R_\odot$)	$[Fe/H]$ (dex)	log$g$ (dex)	M_* ($M_\odot$)	Distance[a] (pc)	$f_{\rm NUV,\ obs}/f_{\rm NUV,\ ph}$ [b]	$R_{\rm p}$ ($R_\oplus$)	Ref. [c]	$T_{\rm eq}$ [d] (K)
KOI-8012.01	3374^{+112}_{-82}	$0.218^{+0.09}_{-0.06}$	$-0.36^{+0.30}_{-0.25}$	$5.066^{+0.103}_{-0.126}$	$0.202^{+0.111}_{-0.06}$	$101.197^{+0.479}_{-0.475}$	452	$0.42^{+0.17}_{-0.12}$	[S26]	216
Kepler-1512 b	3484^{+91}_{-91}	$0.393^{+0.048}_{-0.072}$	0.15±0.11	$4.865^{+0.077}_{-0.045}$	$0.418^{+0.051}_{-0.090}$	315.276±23.903	402	0.80±0.13	[S27]	318
KOI-5879.01	3827^{+56}_{-75}	$0.462^{+0.05}_{-0.07}$	$-0.40^{+0.1}_{-0.3}$	$4.782^{+0.06}_{-0.07}$	$0.471^{+0.06}_{-0.09}$	414.134±5.229	365	$1.60^{+0.17}_{-0.24}$	[S28]	228
KOI-7706.01	4281^{+115}_{-140}	$0.480^{+0.034}_{-0.064}$	$-1.18^{+0.30}_{-0.35}$	$4.761^{+0.077}_{-0.033}$	$0.485^{+0.046}_{-0.3}$	$436.123^{+5.203}_{-5.084}$	7.36	$1.19^{+0.08}_{-0.16}$	[S26]	332
Kepler-155 c	4057^{+251}_{-64}	$0.529^{+0.045}_{-0.135}$	$-0.06^{+0.090}_{-0.085}$	$4.721^{+0.147}_{-0.027}$	$0.542^{+0.053}_{-0.125}$	293.499±2.279	61.4	$1.97^{+0.19}_{-0.48}$	[S27]	300
Kepler-438 b	3748^{+112}_{-112}	$0.520^{+0.038}_{-0.061}$	0.16±0.14	$4.740^{+0.059}_{-0.029}$	$0.544^{+0.041}_{-0.061}$	$179.882^{+3.241}_{-3.128}$	33.9	$1.12^{+0.16}_{-0.17}$	[S27]	320
Kepler-1540 b	4641^{+74}_{-83}	$0.747^{+0.02}_{-0.04}$	0.16±0.15	$4.557^{+0.049}_{-0.014}$	$0.734^{+0.044}_{-0.028}$	$244.960^{+0.903}_{-0.896}$	3.9	$3.14^{+0.08}_{-0.17}$	[S26]	291
KOI-8047.01	4829^{+144}_{-129}	$0.794^{+0.046}_{-0.051}$	$0.48^{+0.05}_{-0.3}$	$4.564^{+0.032}_{-0.048}$	$0.843^{+0.036}_{-0.056}$	$587.233^{+6.626}_{-6.480}$	9.4	$1.98^{+0.11}_{-0.13}$	[S26]	227
KOI-7703.01	6031^{+180}_{-198}	$0.992^{+0.311}_{-0.111}$	-0.14±0.3	$4.45^{+0.07}_{-0.21}$	$1.012^{+0.144}_{-0.131}$	$1906.89^{+135.25}_{-118.76}$	1.95	$1.96^{+0.61}_{-0.22}$	[S26]	277
The Archean Earth	5607	0.9113	0.00	4.44	1.00	1.00	1.41	1.0	-	258

[a] The distance values of Kepler-438 and KOI-8047 are derived using parallaxes from GAIA DR3,[S29] while the distance values for other stars come from NASA Exoplanet Archive[https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/].

[b] This column lists the ratios of total NUV emission to photospheric NUV emission. The ratios of five hosts (KOI-8012, Kepler-1512, KOI-5879, Kepler-155, and KOI-8047) are measured using GALEX NUV data. For four hosts (KOI-7706, Kepler-438, Kepler-1540, and KOI-7703) without GALEX NUV and Swift UVOT observations, we estimated their ratios using the statistical values of Wang et al.[S11] (binned median curves in Figure S3). For the Sun, we used the solar spectrum of Willmer[S30] and the age evolution of NUV radiation of G-type stars to obtain the ratio of the Archean Sun with an age of 1.0 Gyr.[S31]

[c] This column lists the references for planetary parameters.

[d] The planet's equilibrium temperature ($T_{\rm eq}$) is calculated assuming zero albedo and complete redistribution of heat between the day and night sides.[S32]

(This table is available in its entirety in machine-readable form.)

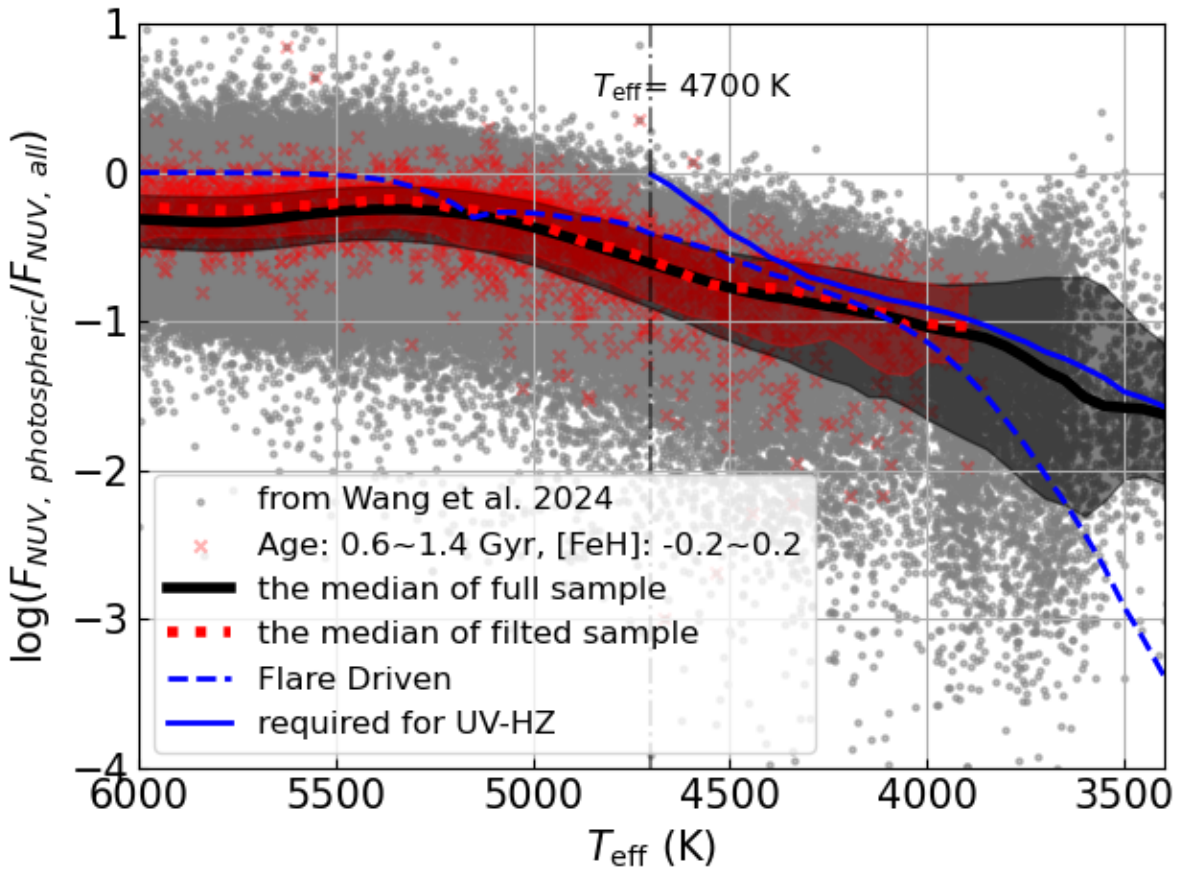


图 S3. GALEX 近紫外波段（0.177–0.283 μm）中光球辐射与总辐射之比。 灰色圆点来自 Wang 等人。[S11] 黑线表示分箱中位数。灰色区域表示 1-σ 离散度。为考察年龄为 1.0 十亿年的恒星辐射，我们筛选了年龄为 0.6 至 1.4 十亿年且 [FeH] 介于 -0.2 至 +0.2 的恒星。粉色十字表示所选恒星。红色点线表示筛选样本的分箱中位数，与完整样本的中位数一致。蓝色虚线表示恒星光球（来自 PHOENIX 模型）的近紫外辐射通量与耀斑驱动的辐射通量（来自本研究）之比。蓝色实线表示当长波宜居带的外边界恰好满足生物机制所需的近紫外辐射（即生命起源通量）时，光球近紫外辐射与总近紫外辐射之比。蓝色实线以上的恒星无法维持紫外宜居带。温度高于 4,700 K 的恒星（由黑色竖直点划线分隔）在宁静状态下具有紫外宜居带。

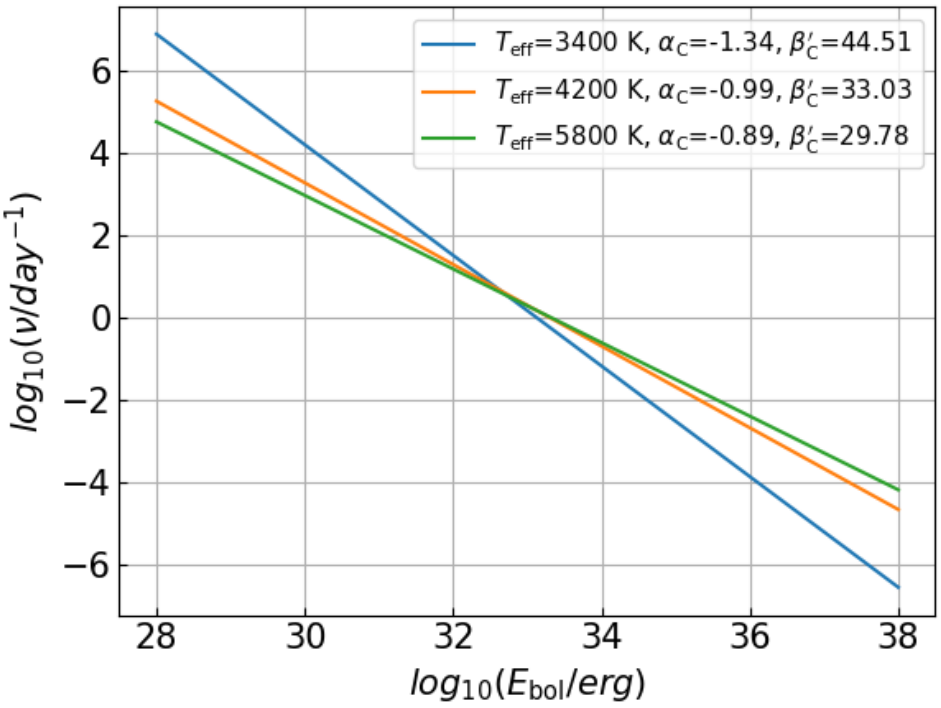


图 S4. 温度分别为 3,400 K、4,200 K 和 5,800 K 的三类恒星的累积耀斑频率分布。 幂律指数 α_C 和 β'_C 由方程S7 -S10得到。

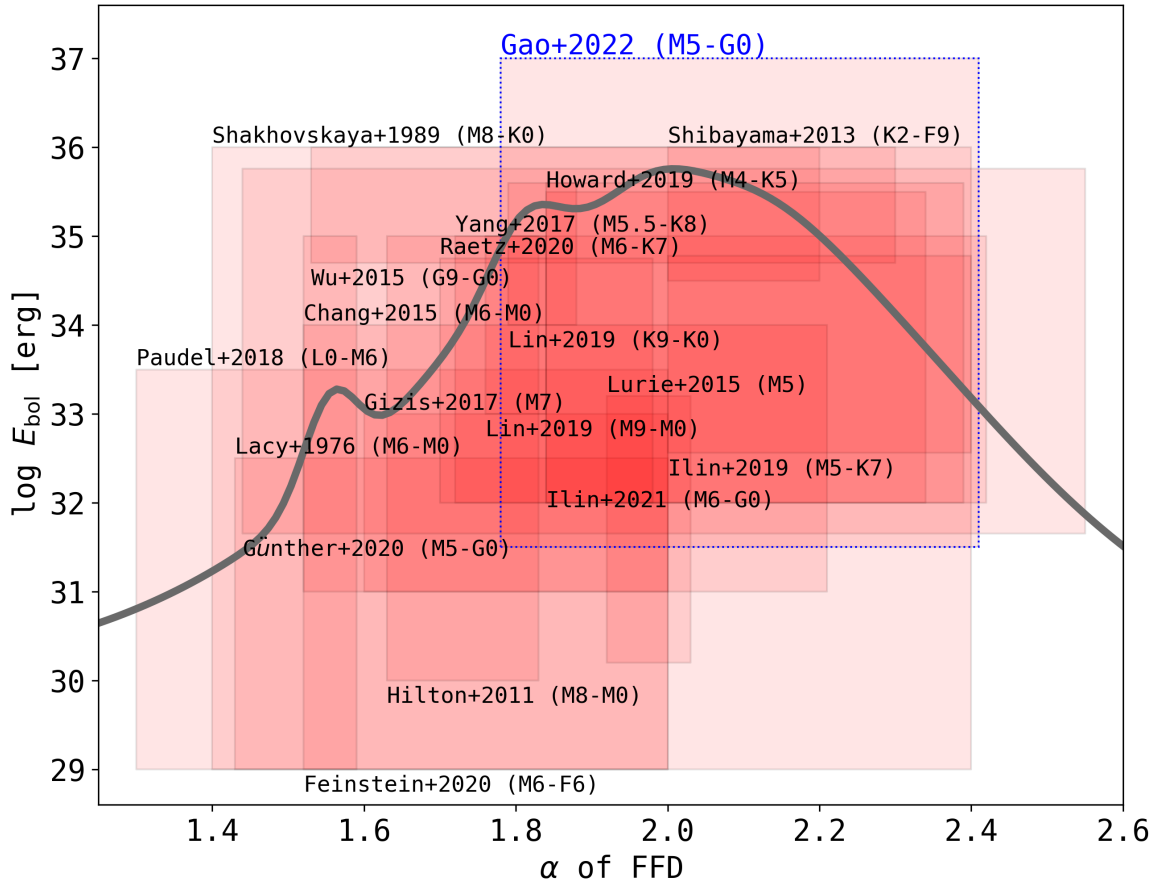


图 S5. FFD拟合概述。 红色矩形表示纵轴上的耀斑能量范围以及 α 横轴上的范围，参考文献标注在每个矩形的左上角或左下角。灰色线表示这些结果的叠加，其中每项结果均以高斯拟合表示。[S25] 蓝色虚线标记的矩形表示本研究采用的FFD参数，数据来源为Gao等人。[S17] 请注意，此处展示的数值是FFD的正幂律指数 α，不同于累积耀斑频率分布（CFFD）的负幂律指数（α_c）。在完整耀斑探测的情况下，$\alpha_c \sim -\alpha + 1$。

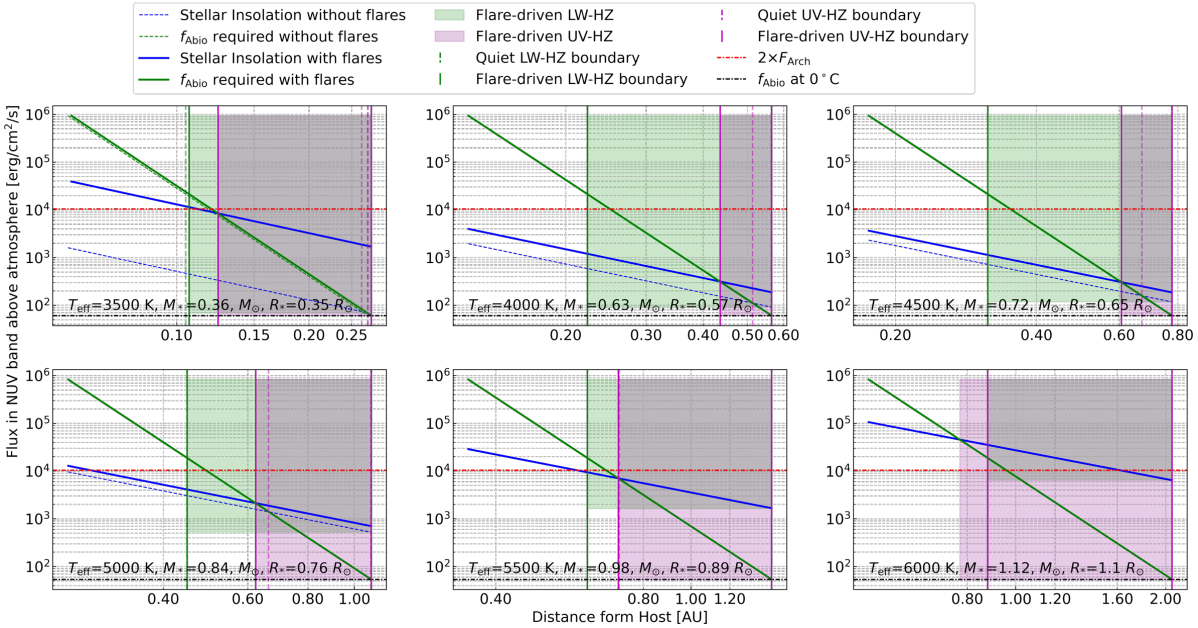


图 S6。不同 $T_{\rm eff}$下，耀斑恒星的耀斑驱动长波宜居带（绿色区域）和紫外宜居带（紫色区域）。图顶部说明了不同颜色和线型的含义。蓝色虚线和实线分别表示无耀斑和有耀斑时的恒星辐照。绿色虚线和实线分别表示无耀斑和有耀斑时所需的生命起源通量。绿色竖直虚线和实线分别表示无耀斑和有耀斑时长波宜居带的边界。品红色竖直虚线和实线分别表示无耀斑和有耀斑时紫外宜居带的边界。红色点划水平线表示太古宙地球接收到的近紫外通量的两倍（$2 \times F_{\rm Arch}$）。[S24] 黑色点划水平线表示生命起源所需的最低近紫外通量（$f_{\rm Abio}$），对应于 0 °C。[S10] 请注意，图中绘制红色和黑色点划水平线仅用于与前人工作进行比较。我们对紫外宜居带的定义并未使用这两条线对应的数值。

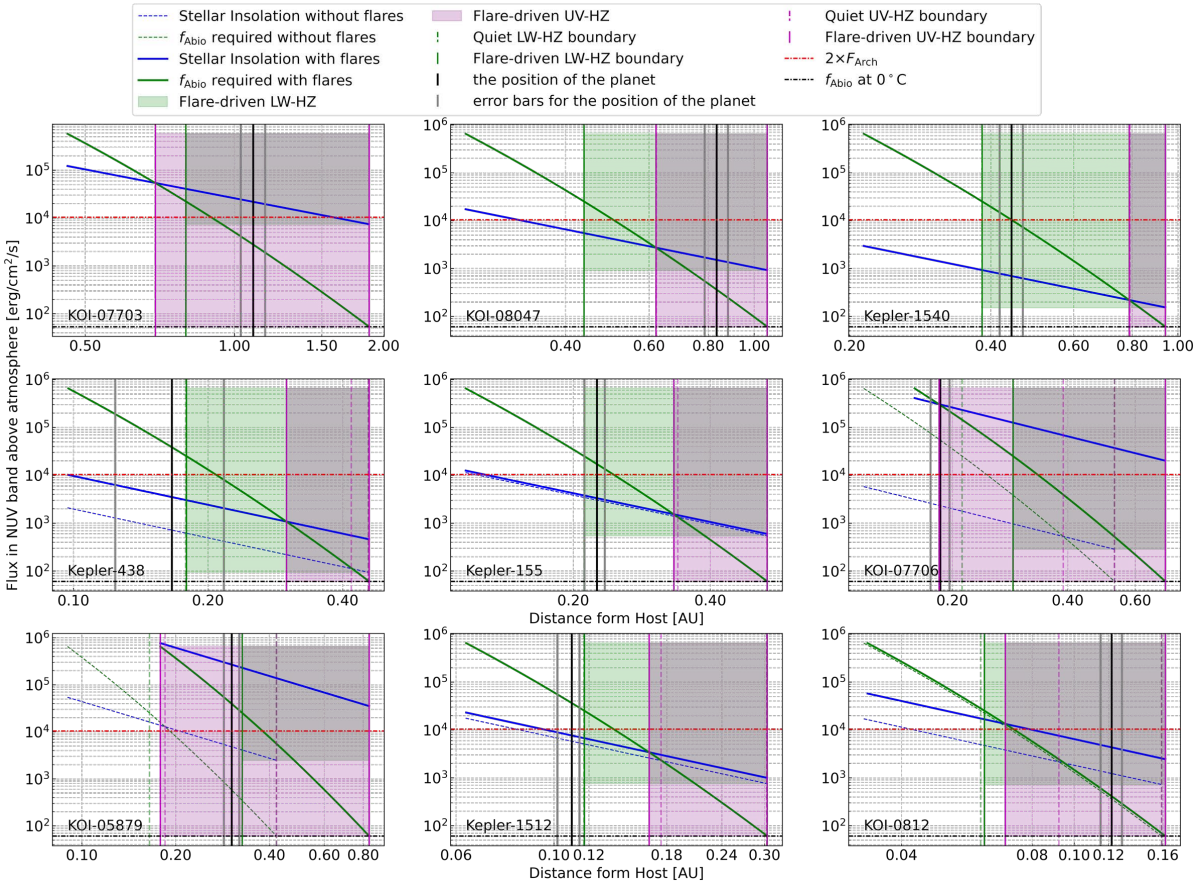


图 S7。 本文分析的耀斑活动开普勒行星系统中，由耀斑驱动的长波宜居带（绿色区域）和紫外宜居带（紫色区域）。 黑色实心竖线表示行星/候选天体的位置，其误差线为灰色实心竖线。其他颜色和线型与图 S6相同。

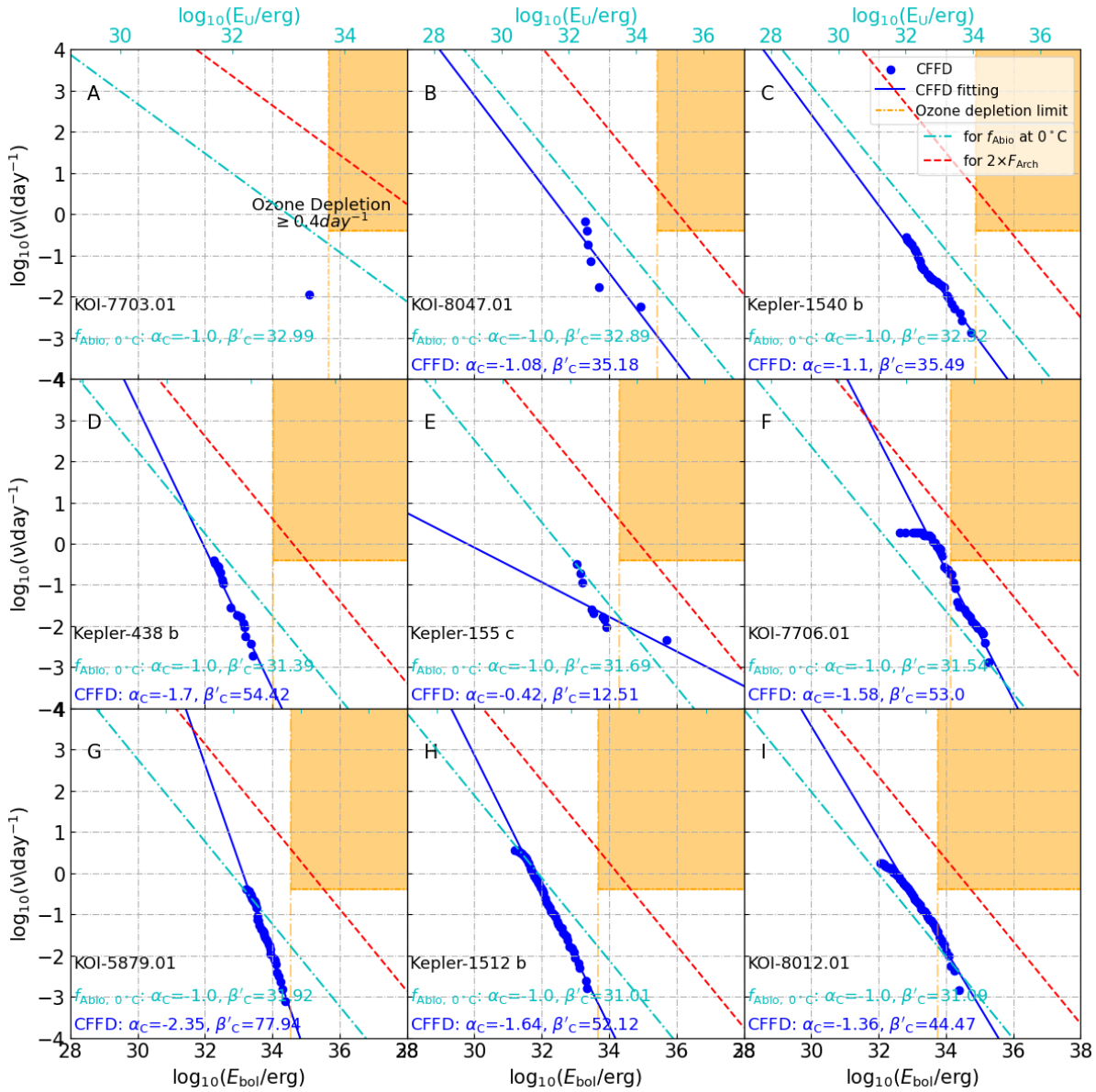
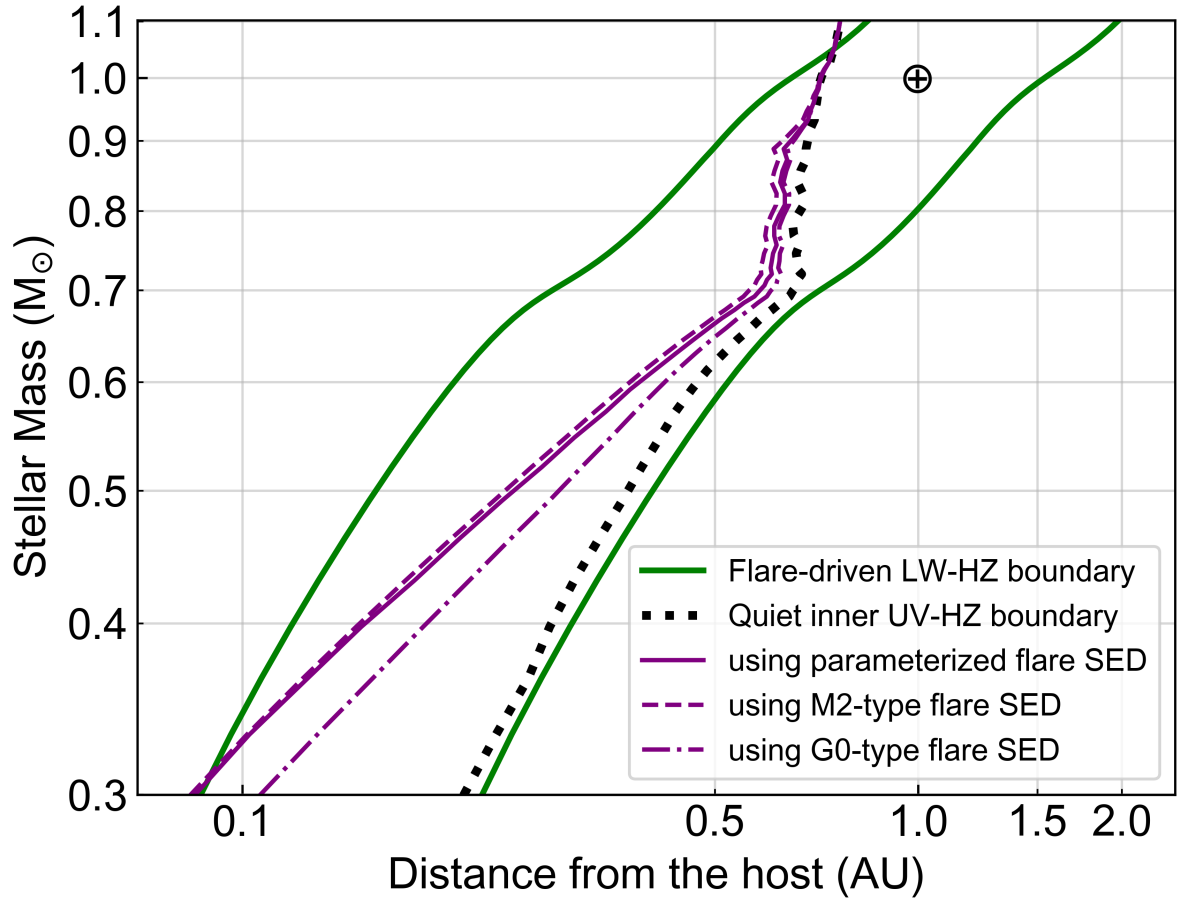


图 S8. 系外行星宿主星的 CFFD。 蓝色圆点表示直接来自观测的 CFFD。蓝线表示拟合的 CFFD，图的左下角以蓝色文字标出了拟合参数（$\alpha_{\rm C}$ 和$\beta'_{\rm C}$）。橙色区域表示臭氧耗竭区域，其中耀斑频率 $\geq$0.4 天$^{-1}$，对应的耀斑总辐射能大于 $10^{34}\times(\frac{0.16}{\text{天文单位}}^{d})^2$ 尔格。青色点划线表示根据方程 S16，生命起源通量所要求的 CFFD 最低限值。红色虚线表示接收到太古宙地球两倍近紫外通量时所对应的频率。对于 KOI-7703，在第 7 季（89.4 天）期间仅探测到一次耀斑，其能量为 1.28×10^{35} 尔格，对应的耀斑频率约为 0.01 天$^{-1}$。请注意，图中绘制青色点划线和红色虚线仅用于与前人工作进行比较。我们对紫外宜居带的定义并未使用这两条线对应的数值。由于行星的表面温度会随不同的大气效应而变化，因此青线给出了 0 ℃下生命起源的最低要求。如果 U 波段中观测到的 CFFD 与青线相交，例如 Kepler-438 b 和 Kepler-155 c，那么行星上应有足够的近紫外能量来驱动前生物化学。请注意，双横轴通过方程1中的光谱能量分布模型，分别显示耀斑总辐射能量 $E_{\rm bol}$ 和 U 波段的耀斑能量 $E_{\rm U}$。

计算的不确定性

耀斑光谱能量分布的影响

我们测试了两种不同的耀斑光谱能量分布，即 G0型（$T_{\rm eff}$=6,000 K）和 M2型（$T_{\rm eff}$=3,400 K）。无论恒星类型如何，耀斑光谱能量分布参数的变化都会改变紫外宜居带，如图 S9 所示。无论采用哪种光谱能量分布，紫外宜居带都明显扩展；而由于光谱能量分布模型中的巴尔末跃迁更明显，M2光谱能量分布会使所有类型恒星的内边界更靠近恒星。进一步开展耀斑光谱能量分布的光谱观测，有助于确定紫外宜居带。



图S9。不同耀斑光谱能量分布下紫外宜居带和长波宜居带的变化。绿色实线表示有耀斑时长波宜居带的内、外边界。深色点线表示紫外宜居带的静态内边界。紫色实线表示由参数化耀斑光谱能量分布模型确定的耀斑驱动的内边界（参见正文中的公式 1 ）。紫色虚线和点划线分别表示采用 M2（$T_{\rm eff}$=3,400 K）和 G2（$T_{\rm eff}$=6,000 K）耀斑光谱能量分布模型时的内边界。对于低质量恒星，光谱能量分布的变化对紫外宜居带的影响更为明显。所选用的不含巴尔末跃迁的 G2 光谱能量分布导致近紫外贡献较少，因而紫外宜居带的内边界更远。

CFFD 的影响

恒星的累积耀斑频率分布通常存在较大的不确定性。我们以 KOI-8012 为例，检验累积耀斑频率分布对紫外宜居带的影响。图S10中的蓝色十字表示两个累积耀斑频率分布参数的不确定性。在大多数情况下，紫外宜居带都能够存在，其宽度为 ~ 0.05 天文单位；但当 $\alpha_{\rm C}$ 和$\beta_{\rm C}$较大时，紫外宜居带会因臭氧耗竭的限制而消失。因此，累积耀斑频率分布的不确定性可能

会影响紫外宜居带的宽度，但不确定性的影响有限，除非耀斑能量达到臭氧耗竭的能量限值。

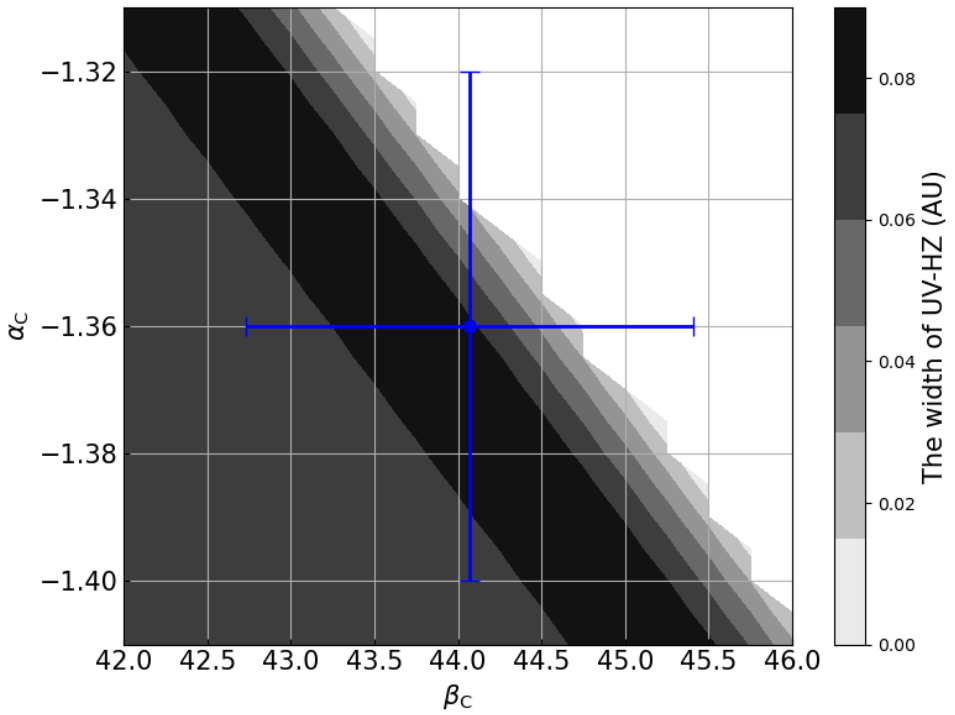


图 S10. KOI-8012 的紫外宜居带宽度随不同累积耀斑频率分布参数的变化。 蓝色十字表示 α_C 和 β_C 的值，这些值是针对 KOI-8012 使用 Gao等人的方法得到的。[S17] 此处，我们人为设置了臭氧耗竭限值。当 β_C 增加 ∼0.7，或 α_C 增加 0.2 时，紫外宜居带的宽度会从 ∼0.09 天文单位降至 0 天文单位，并消失。然而，在 1σ 不确定性范围内的大多数情况下，紫外宜居带仍能维持，宽度大于 0.05 天文单位。

九颗开普勒耀斑宿主星的累积耀斑频率分布参数 α_C 和 β'_C 的取值及不确定性列于表S3 。为了准确确定紫外宜居带的宽度，需要对耀斑光谱能量分布和累积耀斑频率分布进行更精确的测量或建模。

此外，当我们通过方程S5估算耀斑导致的近紫外通量增幅时，所选的能量上下限会影响耀斑的总积分能量。由于大多数$\alpha_C < -1$，低能耀斑将主导总能量。因此，我们测试了不同的低能限值。图S11 展示了当低能耀斑的能量从 10^{28} 变化到 10^{32} 尔格时，紫外宜居带如何变化。G型恒星的结果对限值的选择并不敏感，而对于 M型恒星，限值的选择则十分重要。即使将限值提高到 10^{32} 尔格，紫外宜居带平均也扩展了 ∼0.05 天文单位。随着低能耀斑的探测日益完整，紫外宜居带会向内侧区域扩展。

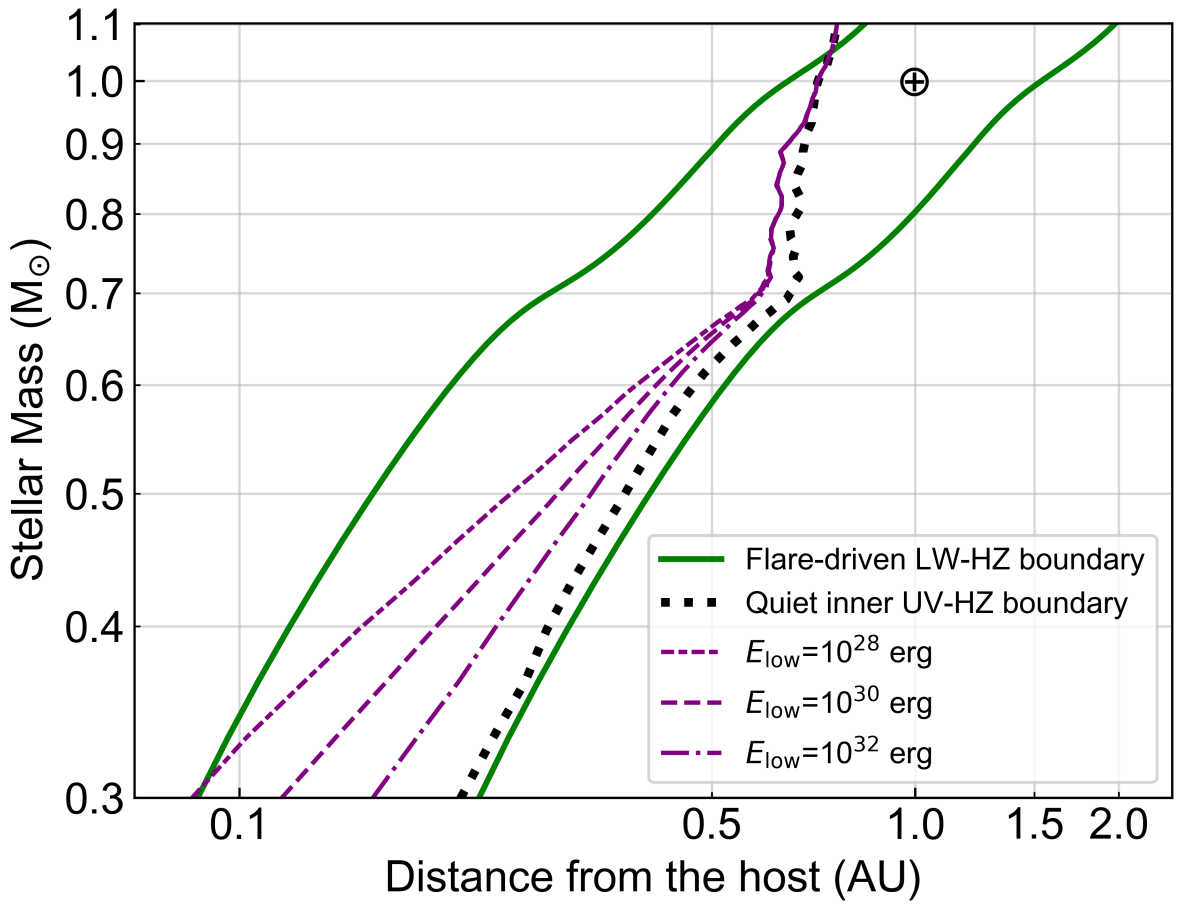


图 S11。 紫外宜居带随耀斑探测能量下限的变化。 紫外宜居带的耀斑驱动的内边界对应的耀斑能量下限为 10^{28}尔格（短虚线）、 10^{30} 尔格（长虚线）和 10^{32} 尔格（点划线）。其他颜色和线型与图 S9相同。

补充参考文献

S1. Kowalski, A. F., Allred, J. C., Uitenbroek, H., 等（2017）。《太阳与恒星耀斑中的氢巴耳末线展宽》。《天体物理学杂志》837：125。DOI：10.3847/1538-4357/aa603e。S2. Brasseur, C. E., Osten, R. A., Tristan, I. I., 等（2023）。《通过对 GALEX 和开普勒耀斑星的多波段研究，约束近紫外与光学波段的恒星耀斑能量比》。《天体物理学杂志》944：5。DOI：10.3847/1538-4357/acab59。S3. Jackman, J. A. G., Shkolnik, E. L., Million, C., 等（2023）。《将光学耀斑模型扩展至紫外：比较M型矮星的TESS和GALEX耀斑观测结果》。《皇家天文学会月刊》519：3564–3583。DOI：10.1093/mnras/stac3135。S4. Segura, A., Walkowicz, L. M., Meadows, V., 等（2010）。《强烈恒星耀斑对绕M型矮星运行的类地行星大气化学的影响》。《天体生物学》10：751–771。DOI：10.1089/ast.2009.0376。S5. Kowalski, A. F.（2022）。《AD Leo的1985年4月12日大耀斑的近紫外连续谱建模》。《天文学与空间科学前沿》9：351。DOI：10.3389/fspas.2022.1034458。S6. Fleming, S. W., Million, C., Osten, R. A., 等（2022）。《利用gPhoton在GJ 65系统中发现的新型时间分辨多波段耀斑》。《天体物理学杂志》928：8。DOI：10.3847/1538-4357/ac5037。S7. Berger, V. L., Hinkle, J. T., Tucker, M. A., 等（2024）。《恒星耀斑具有强远紫外辐射》。《皇家天文学会月刊》532：4436–4445。DOI：10.1093/mnras/stae1648。S8. Kowalski, A. F., Wisniewski, J. P., Hawley, S. L., 等（2019）。《HF/GF型dMe耀斑脉冲阶段的近紫外连续辐射。I. 数据》。《天体物理学杂志》871：167。DOI：10.3847/1538-4357/aaf058。S9. Howard, W. S., Corbett, H., Law, N. M., 等（2020）。《EvryFlare。III. Evryscope和凌日系外行星巡天卫星同时观测到的数十次超级耀斑的温度演化及其宜居性影响》。《天体物理学杂志》902：115。DOI：10.3847/1538-4357/abb5b4。S10. Rimmer, P. B., Xu, J., Thompson, S. J., 等（2018）。《系外行星上RNA前体的起源》。《科学进展》4：eaar3302。DOI：10.1126/sciadv.aar3302。S11. Wang, S., Li, X., Han, H., 等（2024）。《基于恒星演化模型预测光球紫外辐射》。《天体物理学杂志》976：43。DOI：10.3847/1538-4357/ad87d0。S12. Wang, J.-H., Xiang, M., Zhang, M., 等（2025）。《利用数据驱动方法估算LAMOST DR10中400万颗主序矮星的光谱年龄》。《天体物理学杂志增刊》280：13。DOI：10.3847/1538-4365/aded16。

S13. Shibata, K. 和 Magara, T.（2011）。《太阳耀斑：磁流体动力学过程》。《太阳物理学综述》8：6。DOI：10.12942/lrsp-2011-6。S14. Yang, H. 和 Liu, J.（2019）。《开普勒任务中的耀斑目录与耀斑活动》。《天体物理学杂志增刊》241：29。DOI：10.3847/1538-4365/ab0d28。S15. Günther, M. N., Zhan, Z., Seager, S., 等（2020）。《TESS首批数据发布中的恒星耀斑：探索新的M型矮星样本》。《天文学杂志》159：60。DOI：10.3847/1538-3881/ab5d3a。S16. Tu, Z.-L., Yang, M., Zhang, Z. J., 等（2020）。《TESS首年观测中太阳型恒星上的超级耀斑》。《天体物理学杂志》890：46。DOI：10.3847/1538-4357/ab6606。S17. Gao, D.-Y., Liu, H.-G., Yang, M., 等（2022）。《修正TESS和开普勒探测到的恒星耀斑频率分布》。《天文学杂志》164：213。DOI：10.3847/1538-3881/ac937e。S18. Hawley, S. L., Davenport, J. R. A., Kowalski, A. F., 等（2014）。《开普勒耀斑。I. 活动与非活动M型矮星》。《天体物理学杂志》797：121。DOI：10.1088/0004-637X/797/2/121。S19. Paudel, R. R., Gizis, J. E., Mullan, D. J., 等（2018）。《K2超冷矮星巡天。III. 白光耀斑在M6–L0型矮星中普遍存在》。《天体物理学杂志》858：55。DOI：10.3847/1538-4357/aab8fe。S20. Jackman, J. A. G., Wheatley, P. J., Acton, J. S., 等（2021）。《下一代凌日巡天探测到的恒星耀斑》。《皇家天文学会月刊》504：3246–3264。DOI：10.1093/mnras/stab979。S21. Mamajek, E. E. 和 Hillenbrand, L. A.（2008）。《利用活动-自转诊断改进太阳型矮星的年龄估算》。《天体物理学杂志》687：1264–1293。DOI：10.1086/591785。S22. Fouesneau, M., Frémat, Y., Andrae, R., 等（2023）。《盖亚数据发布第3版。Apsis。II. 恒星参数》。《天文学与天体物理学》674：A28。DOI：10.1051/0004-6361/202243919。S23. Baraffe, I., Homeier, D., Allard, F., 等（2015）。《新的恒星演化模型：涵盖氢燃烧极限以下的前主序和主序低质量恒星》。《天文学与天体物理学》577：A42。DOI：10.1051/0004-6361/201425481。S24. Buccino, A. P., Lemarchand, G. A. 和 Mauas, P. J. D.（2006）。《环恒星宜居带周围的紫外辐射约束》。《伊卡洛斯》183：491–503。DOI：10.1016/j.icarus.2006.03.007。S25. Ilin, E., Schmidt, S. J., Poppenhäger, K., 等（2021）。《利用K2观测疏散星团中的耀斑。II. 昴星团、毕宿星团、蜂巢星团、Ruprecht 147和M 67》。《天文学与天体物理学》645：A42。DOI：10.1051/0004-6361/202039198。

S26. Thompson, S. E., Coughlin, J. L., Hoffman, K., 等（2018）。开普勒观测到的行星候选体。VIII. 基于第25次数据发布、测得完备度与可靠性的全自动目录。《天体物理学杂志增刊》**235**：38。DOI：10.3847/1538-4365/aab4f9。S27. Torres, G., Kane, S. R., Rowe, J. F., 等（2017）。宜居带内或附近开普勒凌日小型行星候选体的验证。《天文学杂志》**154**：264。DOI：10.3847/1538-3881/aa984b。S28. Mullally, F., Coughlin, J. L., Thompson, S. E., 等（2015）。开普勒观测到的行星候选体。VI. Q1–Q16（47个月）行星样本。《天体物理学杂志增刊》**217**：31。DOI：10.1088/0067-0049/217/2/31。S29. 盖亚合作组（2022）。VizieR在线数据目录：Gaia DR3 第1部分。主源（盖亚合作组，2022）。VizieR在线数据目录，I/355。DOI：10.26093/cds/vizier.1355。S30. Willmer, C. N. A.（2018）。多个滤光片中的太阳绝对星等。《天体物理学杂志增刊》**236**：47。DOI：10.3847/1538-4365/aabfdf。S31. Li, X., Wang, S., Ma, J., 等（2025）。恒星活动与宜居带的演化。I. 疏散星团和场星中矮星的紫外辐射。《天体物理学杂志增刊》**281**：13。DOI：10.3847/1538-4365/ae08a9。S32. Kempton, E. M. .-., Bean, J. L., Louie, D. R., 等（2018）。一种用于优先筛选最适合进行大气特征分析的凌日系外行星巡天卫星行星候选体的框架。《太平洋天文学会出版物》**130**：114401。DOI：10.1088/1538-3873/aadf6f。