Draft version November 25, 2026年 使用 LaTeX 排版 默认 样式，采用 AASTeX7.0.2

arXiv:2611.31943v1 [astro-ph.SR] 24 Nov 2026

利用 VLA天空巡天对210,191颗邻近主序星进行宽带技术特征搜索

Steve Croft [1, 2, 3]

[1] Breakthrough Listen, University of Oxford, Denys Wilkinson Building, Keble Road, Oxford OX1 3RH, UK
[2] Breakthrough Listen, University of California, Berkeley, 501 Campbell Hall #3411, Berkeley, CA 94720, USA
[3] SETI Institute, 339 Bernardo Ave, Suite 200, Mountain View, CA 94043, USA

投稿至《天文学杂志》

摘要

射电技术特征的搜索一直集中于窄带信号。我们利用VLA天空巡天（VLASS；2017—2026年）所有观测时期的数据，对100秒差距内210,191颗盖亚 DR3主序星开展了一项互补性搜索，寻找2—4 GHz频段过量的宽带辐射。与第1历元目录交叉匹配后，得到51个高可靠性的位置关联（随机情况下预期为1.5个）。除一个之外，其余均为已知的自然辐射源；在可测量的情况下，这些辐射源会随其宿主恒星移动。剩余的辐射源位于LSPM J1943+5337附近，但并不在该恒星的位置上。由于恒星耀斑可能在连续谱流量中伪装成发射机，只有对32,985颗已知射电发射源类别之外的表观单星AFGK星，才会将任意光度下的探测计为可能的发射机；而对于M型矮星和AFGK型多星系统，只有当其超过 10^{10} W Hz^{-1}时才计入。对所有观测时期的208,232颗恒星进行强制测光后，在符合条件的恒星中发现1个稳态检验探测，以及3颗至少在一个历元中被探测到的恒星；随机情况下预期分别为1.3个和1.9个。稳态辐射的每颗恒星中位数上限为 $L_\nu < 4.0 \times 10^8$ W Hz^{-1}。不进行背景扣除时，在符合条件的AFGK型恒星中，宿主恒定发射机且其辐射超过 10^9 W Hz^{-1}的比例低于 1.5×10^{-4}；在已知发射体类别之外的所有恒星中，宿主辐射超过 $\sim 1.1 \times 10^{10}$ W Hz^{-1}的发射机的比例低于 2.3×10^{-5}；若将每个M型矮星探测都计为可能的发射机，则宿主辐射超过 10^9 W Hz^{-1}的发射机的M型矮星比例低于5.5×10^{-4}。堆叠探测到了M型矮星的总体平均辐射，且主要集中于具有活动证据的M型矮星中。因此，连续谱巡天能够约束窄带处理流程未搜索的宽带、调制或快速漂移信号。

关键词：技术特征（2128） — 地外智能搜寻（2127） — 射电连续谱辐射（1340） — 恒星活动（1580） — 主序星（1000）— 天空巡天（1464）

1. 引言

自射电技术特征搜寻开展以来，已知宜居带内的搭载多个例证，是技术存在的明确标志；借助现代光谱仪开展的窄带搜索可达到令人印象深刻的灵敏度：对附近恒星开展的 Breakthrough Listen（BL）巡天（H. Isaacson 等 2017年）对取自名义上 50秒差距样本的约 1327 个目标周围漂移窄带发射器的等效各向同性辐射功率（EIRP）给出了约 10^{13}瓦特量级的上限（包括对 C. Choza 等 2024年的修正）；此后，档案数据和兼容观测计划已将此类搜索扩展至更多目标（例如 C. D. Tremblay 等 2025年）。C. Painter 等 （2025年）迈出了超越漂移音调范式的一步：他们在 BL绿岸望远镜档案中搜索数千颗恒星，寻找 2.86 千赫兹谱块内偏离高斯峰度的信号，而不是匹配单个未分辨、多普勒-

通讯作者：Steve Croft 电子邮箱: scroft@berkeley.edu

漂移谱线的模板——这是迈向搜索更宽、更复杂信号的一个 stepping stone——而且 V. Gajjar 等 （2022年）搜索了1883 颗恒星，以寻找人工产生的色散宽带脉冲。

地面发射机正日益采用宽带传输——扩频、跳频、线性调频雷达和多载波调制已成为现代通信的主流——而功率分布在 kHz 至 GHz 范围内的发射机，对于专门搜索赫兹宽度漂移谱线的数据处理流程而言，实际上是不可见的。地球自身的泄漏也已从数量有限但功率强大的广播载波（从附近恒星处可以探测到；W. T. Sullivan 等，1978年；A. Loeb 和 M. Zaldarriaga，2007年；S. Z. Sheikh 等，2025年），转变为数量庞大但功率较低的发射机；R. C. Saide 等（2023年）模拟了全球移动通信塔网络的泄漏，并考察了它从附近恒星系统中观测时的样貌。M. A.Garrett （2026a）指出，这类分布式基础设施的总输出在遥远观测者看来会呈现为微弱的致密连续谱辐射——一种宽带射电技术特征（BRaT）；并将地球当前总泄漏（$L_\nu \sim 400\,\mathrm{W\,Hz^{-1}}$，L 波段）按功耗线性缩放，估算卡尔达肖夫 I 型文明的输出为 $L_\nu \sim 4\times10^{5}\,\mathrm{W\,Hz^{-1}}$ （ N. S. Kardashev，1964 年）。M. A. Garrett 提出了一种分层搜索方法：先利用宽视场连续谱巡天找出与附近恒星位置重合的致密源，再通过甚长基线干涉测量（VLBI）检验其是否具有高亮温、可忽略的偏振、非均匀光谱、闪烁，以及是否与宿主恒星共同运动。他还指出，现有巡天已能够对 BRaT 的普遍程度作出初步约束。B. Zuckerman（2026年）从发射机的角度得出了相关结论：寻求联系的附近文明会向数百颗类地行星定向发射连续的高功率信号，因此功率匮乏的问题及其对赫兹宽度信道的需求便不复存在。他指出，VLASS 等通用宽带巡天灵敏度足够高，能够探测到 200 pc 范围内老年太阳型恒星发出的此类信号，但认为现在据此推导定量上限还为时过早。

然而，现有的大面积射电连续谱巡天能够提供有趣的约束，正如它们已经对其他星系中的卡尔达肖夫 III 型文明所做到的那样（M. A. Garrett 2015年）。这类巡天会积累宽频段内的总功率，而不考虑调制、漂移率或带宽；它们还覆盖天空中很大一部分区域，并具有均匀的深度，因此巡天区域内的每颗恒星都会被观测到。代价在于，恒星连续谱源本身并非人工产生的：活动恒星会发出回旋同步辐射和相干射电辐射（M. G¨udel & A. O. Benz 1993年；J. R. Callingham 等，2021年；H. K. Vedantham 等，2022年），而绝大多数毫央射电源都位于河外，并可能偶然与某颗前景恒星重合。因此，连续谱技术特征搜索实际上是在寻找无法解释的射电辐射；其价值在于谨慎排除自然解释和偶然重合（M.A.Garrett 2026a）。

宽视场巡天近期已将射电恒星从个别奇特天体拓展为一个群体。L. N. Driessen 等（2023）利用盖亚（盖亚合作组等，2016）的自行，识别出在二十厘米射电天空微弱图像巡天（FIRST；R. H. Becker 等，1995）、VLA天空巡天（VLASS；M. Lacy 等，2020）和快速ASKAP连续谱巡天（RACS；D. McConnell 等，2020）中的射电对应体与恒星一同移动的恒星；悉尼射电恒星目录现已汇编了800多颗射电探测恒星（L. N. Driessen 等，2024）。T. W. H. Yiu 等（2024）利用 VLASS 和 LOFAR两米天空巡天（LoTSS；T. W. Shimwell 等，2022）的探测结果表明，射电辐射能够追踪恒星磁活动；A. De 等（2024）则将 VLASS 与 Gaia DR3 交叉匹配，以刻画500秒差距以内的射电恒星群体。I. Davis 等（2026）在150颗超耀发太阳型恒星中探测到其中6颗的 VLASS 对应体；多历元ASKAP采样显示，至少有 ∼10%的 M型矮星会产生高于 10^{15} erg s^{-1} Hz^{-1}的射电暴，且暴发占空比低于8.5%（J. Pritchard 等，2024）。每种巡天方法——依据变异性、圆偏振或自行进行选择——都有其自身的偏差（L. D. Matthews，2025）；对一个不依据射电性质选出的样本中每颗恒星的位置进行强制测光，可避免这些选择效应。这些研究旨在发现并理解射电恒星。我们的目标与之互补：针对100秒差距以内主序星的近乎完备样本（第2.1节），我们量化每个射电对应体关联为真实关联的概率，要求每个真实关联都有自然成因，并将未探测结果（无论逐个还是通过堆叠）转化为对人工辐射的限制。

我们使用截至目前已观测的所有VLASS历元（2017—2026年）开展搜索。VLASS覆盖以北的天空$\delta = -40^\circ$，频率为2–4 GHz，具有 ∼2.″5 的分辨率和 ∼00.12–0.15 毫央波束$^{-1}$ 的逐历元噪声；我们将其与Gaia DR3（盖亚合作组等，2023年）结合。我们将100秒差距内的所有主序星与Epoch-1 VLASS快速浏览成分目录（Y. A. Gordon等，2020年，2021年）进行交叉匹配，利用偏移目录量化偶然重合，对每个关联进行分类，并通过档案光学成像和多历元VLASS天体测量跟进唯一一个无法解释的源。随后，我们通过强制测光测量每个历元中的每颗恒星，依据恒星类型和光度确定可能被识别为可能发射机的探测范围，并在控制

位置处校准随机背景，同时将结果与独立的逐历元星表进行核对。最后，我们推导出单颗恒星及恒星群体的极限，并叠加所有未被单独探测到的恒星的图像。第2节介绍数据，第3节介绍方法，第4 节介绍结果，第5 节将其与窄带搜索和宽带泄漏基准进行比较。复现本研究所需的全部代码和数据均已归档并公开可用（第7节）。

2. 数据

2.1. 来自 *Gaia DR3* 的附近主序星

我们选取了 321,417 个视差 $\varpi > 10$毫角秒、 $\varpi/\sigma_\varpi > 10$且 $\delta > -45°$的 Gaia DR3 源。其中，299,746 个具有 $G_{BP}-G_{RP}$颜色测光。我们根据经验定义主序：在粗略筛除白矮星和巨星后，以 M_G的绝对星等中位数为基准，按 $G_{BP}-G_{RP}$划分为 0.1 星等的区间，并反复剔除偏离值；随后保留距这条基准线 $-1.5 < \Delta M_G < +1.0$ 星等以内的恒星。这个不对称窗口保留了未分辨双星（等质量双星最多可超亮 0.75 星等），并排除了白矮星序列，以及已知会污染 Gaia 邻近恒星样本的主序下方虚假暗弱源（Gaia 合作组等，2021年）。最终得到 218,654 颗恒星，其中 212,057 颗位于 $\delta > -41°$，且 210,191 颗处于 VLASS 第一历元覆盖区内。我们在 $G_{BP}-G_{RP} = 1.84$处分割样本，该位置接近 K7/M0 分界（M. J. Pecaut 和 E. E. Mamajek，2013年），分为 AFGK 型恒星（包括 768 颗颜色比 $G_{BP}-G_{RP} = 0.33$更蓝的 A 型星）和 M 型矮星。与 Gaia 邻近恒星目录（GCNS；盖亚合作组等，2021年）相比，该目录为每个 EDR3 源分配其位于 100秒差距内的概率；在 $\delta > -41°$ 处，样本包含 GCNS 列为位于 100秒差距内且未归类为白矮星的 229,425 个天体中的 91%。其余天体中，大多数（17,348 个，占 7.6%）落在我们的主序星窗口之外，例如严重超亮的未分辨双星和测光有问题的恒星；1,858 个位于 VLASS 覆盖区之外，只有 670 个未通过我们的视差筛选。反过来，GCNS 未将 642 颗样本恒星（0.3%）列为位于 100秒差距内。最亮恒星将在第5.3节讨论。1,867 对样本恒星（共 3,734 颗，多数为宽双星）的间距小于 $2\farcs5$，因此其测量并非相互独立；这些恒星占样本总数的比例不到 2%。

2.2. *VLASS* 星表与图像

VLASS 第1历元分为两个半历元（1.1 和 1.2），观测时间为 2017.7 至 2019.5 年（M. Lacy 等，2020；A. E. Kimball 等，2026）。我们使用加拿大射电天文数据中心的快速浏览（QL）分量星表（Y. A. Gordon 等 2020、2021年），该星表包含使用 PyBDSF（N. Mohan 和 D. Rafferty 2015）从 35,285 张 1 度^{2}QL 图像中提取的 3,381,277 个分量。我们使用所有 2,235,687 个具有拟合高斯函数的非重复分量（而不仅是推荐的“主样本”中的 1,880,195 个），以便也考虑恒星附近微弱且质量较差的分量。第1历元1.1半历元的观测受到天线指向误差影响，QL 峰值强度偏低 ∼15%；后续半历元因残余相位误差而偏低∼8%；而积分流量密度在 1.1 中偏低 ∼10%，其他情况下则准确至 ∼3%（A. E. Kimball 等，2026）。因此，我们将峰值强度和图像噪声除以$b_{\rm pk} = 0.85$ （半历元 1.1）或 0.92（后续半历元），并将星表总流量密度除以 0.90（1.1）或 1。

第1历元 QL 图像生成时未对 w项进行校正，这会使位置在低仰角处偏移最多达 $\sim 1''$；之后对图像元数据进行了校正（A. E. Kimball 等，2026），但第1历元目录早于该校正。我们将 242,942 个紧致（去卷积长轴 $< 1\farcs5$）、孤立且信噪比 > 20 的第1历元分量与第3历元 QL 列表进行匹配；第3历元图像已完成校正。结果发现，第1历元赤纬中位数偏大 $0\farcs42$（位于 $\delta < -20°$处），而在 $0\farcs13$ 处则变为偏小 $\delta > 60°$；赤经偏移 $\lesssim 0\farcs1$。对于每个第1历元位置，我们减去其图像的中位数偏移（对于至少包含 10 个参考分量的 9,199 幅图像）、其观测瓦片的中位数偏移（每个观测瓦片均通过单次扫描观测，共涉及 25,751 幅图像），或在其他情况下减去其赤纬处的滑动中位数（335 幅图像）；并将所采用偏移量的不确定度（每个坐标轴的中位数 $0\farcs06$ ）计入下文的位置误差。

CIRADA 星表还列出了每个分量到最近的 NVSS（J. J. Condon 等，1998年）和 FIRST（R. H. Becker 等，1995年；D. J. Helfand 等，2015年）源的距离，我们利用这些信息检验射电源是否与其对应的恒星一同运动。对于基于图像的分析，我们从加拿大天文学数据中心（CADC）获取了迄今观测到的全部七个 VLASS 半历元（1.1–4.1，2017—2026年）的 QL 图像，以及第1.2和第3.2历元的单历元图像；CADC 保存的 QL 图像副本已校正因忽略 w项而导致的图像位置偏差（A. E. Kimball 等，2026年）。对于 CADC 元数据中缺少观测日期的图像，我们从图像头信息中获取日期。为独立检验较晚的历元（第4.5节），我们还使用基于完整图像、通过 PyBDSF 制作的分量星表：美国国家射电天文台为第3.1、3.2和4.1半历元制作的临时快速浏览分量列表，以及由第1至第3历元 QL 图像中位数堆叠得到的星表（M. Lacy 等，2025年）；还有美国国家射电天文台根据第2.1至第3.2半历元的单历元（SE）连续谱图像制作的分量列表（2026年6月版本）。SE 图像经过自校准和掩膜处理，并

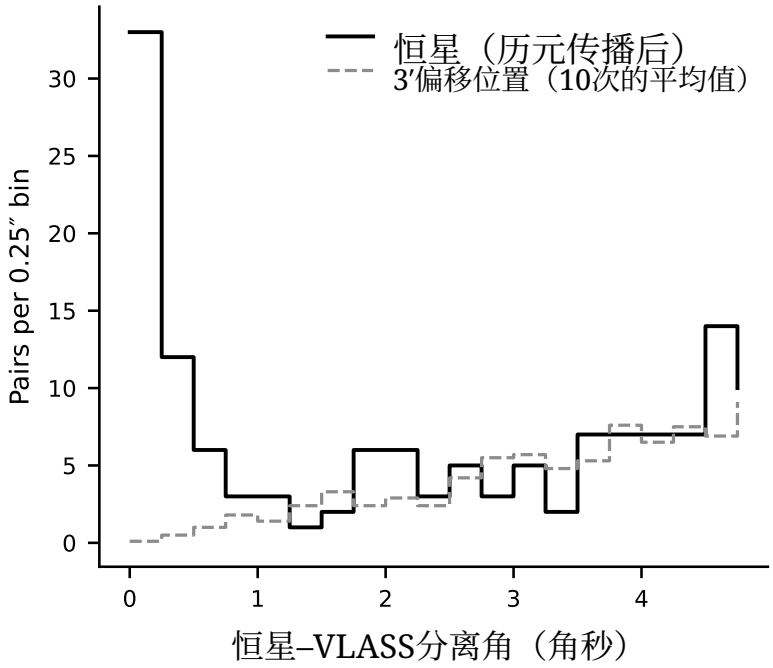


图1。 历元传播后的恒星与VLASS分量之间的分离角（实线），以及十次 3′偏移实现的平均值（虚线）的比较。 1″ 以内的超额源于真实的恒星关联；超过 ∼1″ 后，两种分布趋于一致。

0.″6 采用像素化处理，其保真度高于 QL 图像（A. E. Kimball 等，2026年），但目前仅覆盖部分天空：分别覆盖我们第2历元和第3历元恒星历元的44%和46%。

2.3. 辅助数据

对于每颗在 2.″5 范围内有 VLASS分量的恒星，我们通过 VizieR（F. Ochsenbein等人（2000年））检索最近的 ROSAT 2RXS（距离在 40″以内；T. Boller等人（2016年））和 eROSITA eRASS1（距离在 20″以内；A. Merloni等人（2024））X射线源，并通过 Gaia DR3 标识符而非位置匹配 SIMBAD（M. Wenger等人（2000年））中的识别结果和天体类型；每颗样本恒星的活动证据和技术特征资格（使用完整的X射线星表和 Gaia DR3 食双星分类；N. Mowlavi等人（2023年））详见第 3.5节。为检验探测阈值以下的流量标度，我们使用从高能天体物理科学档案研究中心检索的 VLA-COSMOS 3 GHz 星表（V. Smol˘ci´c等人（2017年））。对于那项尚无法解释的可靠关联，我们还使用了数字化巡天（POSS-I 和 POSS-II）底片，以及 Pan-STARRS1 图像和星表（K. C. Chambers等人（2016年）；H. A. Flewelling等人（2020年））。

3. 方法

3.1. 历元传播与交叉匹配

许多附近恒星在盖亚参考历元（J2016.0）与 VLASS 观测之间移动了数角秒。我们将每颗恒星分配给中心位置最近的 QL 图像，并利用其盖亚自行和视差，将恒星位置传播至该图像的观测日期（巴纳德星的视差位移达到 0.″55 ）；在最终的可靠性分析中，我们将每个恒星–分量对重新传播至测量该分量的图像日期。随后，我们找出了每颗恒星 10″ 范围内的所有分量。

为了直接测量偶然重合的发生率，我们将每颗恒星沿随机方向移动3′ ，并在此基础上重复匹配十次。图1比较了分离度分布：在1″以内有54个恒星–分量对，而每次偏移实现平均为3.4个；超过 ∼1″ 后，两种分布趋于一致。

3.2. 位置可靠性

遵循源识别的似然比方法（W.Sutherland & W. Saunders 1992），我们将所有间距为 r_i 的成对对象 $R_{\max} = 10''$ 建模为真实关联与二维高斯函数的混合

偏移分布，返回 地面源，其均匀面密度 λ 按每颗恒星从偏移目录中固定 ：

$$p_{\rm true}(r_i) = f\,\frac{r_i}{\sigma_i^2}\exp\!\left(-\frac{r_i^2}{2\sigma_i^2}\right), \qquad p_{\rm bg}(r_i) = 2\pi\lambda r_i, \qquad \sigma_i^2 = (k\,\sigma_{{\rm cat},i})^2 + \sigma_{{\rm corr},i}^2 + \sigma_{\rm sys}^2, \tag{1}$$

其中，$\sigma_{{\rm cat},i}$ 为每个坐标轴上的目录位置误差，由于 PyBDSF 的误差估计过于乐观，乘以因子 k 进行缩放；$\sigma_{{\rm corr},i}$为天体测量校正的不确定度，$\sigma_{\rm sys}$ 为残余系统误差下限， f 为实际检测到的恒星比例。最大化扩展似然得到每个坐标轴上的 $k = 1.50$, $\sigma_{\rm sys} = 0\farcs04$ ，以及 $\sim$50 个真实关联。每对匹配的可靠性为 $R_i = p_{\rm true}/\left(p_{\rm true} + p_{\rm bg}\right)$ 。我们将具有 $R > 0.5$ 的匹配称为可靠关联；这仅说明位置可靠性，并不涉及辐射的起源：共有 51 个（其中 48 个具有 $R > 0.9$），预计其中$\sum(1-R)$ 个为 $= 1.5$。一颗已知的射电恒星——RS CVn型双星 V376 Cep——低于阈值（$R = 0.01$）：其校正后的 Epoch-1 位置与该恒星相距 $0\farcs65$ ，而第3历元 QL 目录将其定位在相距$0\farcs14$ 处（第 4.5 节）。因此，其 Epoch-1 分量被视为无关源，所以该恒星受到混淆噪声限制，其上限就是其测量流量密度。该模型假设辐射以盖亚位置为中心：来自相距超过 $\sim1''$ 的伴星的辐射具有较低的 R ，且位于该恒星的强制测光测量范围之外（第3.6节），因此本次搜索无法约束来自宽距伴星的辐射。

3.3. 关联分类

对于每个可靠关联（$R > 0.5$），我们分别记录两类证据。活动证据包括X射线对应体（位于2RXS或eRASS1中，或SIMBAD中的X射线源类型；由于eRASS1仅覆盖半个天空），或SIMBAD中表明存在耀发、BY Dra型变星或RS CVn型变星、Hα 发射（发射线星；在主序上，这表明存在色球活动）、年轻性（金牛T星或年轻恒星体）、吸积（激变变星）或磁性化学奇特星的天体类型。相同标准也应用于强制探测（第3.5节）。多重性证据包括SIMBAD中的双星天体类型、盖亚非单星解、RUWE>1.4 （L. Lindegren等，2021年），或相对于主序脊线超出 $\Delta M_G < -0.5$ 星等的超光度。多重性本身并不是射电发射机制；我们记录它，是因为近距离双星（RS CVn型和BY Dra型变星系统）在射电亮星中所占比例过高，也因为它标示出辐射可能源自伴星的系统。

随后，按照以下优先顺序为每颗恒星指定一个类别：激变变星；磁性化学奇特星；RS CVn型双星；年轻恒星；BY Dra 变星；耀星；发射线星（均根据 SIMBAD天体类型）；X射线活动星；无法解释。仅有多重性证据不足以解释某个关联，这与强制探测所采用的规则相同（第 3.5节）。SIMBAD 中类型标注为 RS CVn 或 BY Dra 变星的两颗恒星 PW And 和 L Q Hya，实际上是年轻的单独矮星（J. L´opez-Santiago 等，2003；J. Lehtinen 等，2012），因此归类为年轻恒星。对于具有 X射线对应体的恒星，我们计算了 $\log(L_X/L_\nu)$，有 eRASS1 数据时使用其 0.2–2.3 keV 通量，否则使用 2RXS 计数率，并采用 $6\times10^{-12}\,{\rm erg\,cm^{-2}\,count^{-1}}$ 的日冕能量转换因子（0.1–2.4 keV；该因子取自 $8.31 + 5.30\,{\rm HR1}$） $\times\,10^{-12}$，适用于 HR 为 $1 = -0.44$的软日冕，以便与 G¨udel–Benz 关系进行比较，单位为 $L_X/L_\nu \approx 10^{15.5}$ 赫兹（M. G¨udel 与 A. O. Benz，1993）。

随后，我们检验了无法解释的匹配是否为背景源。（1）如果某个射电源在 VLASS 位置处与 NVSS 或 FIRST 源重合，但此后恒星移动的距离已超过该偏移量的两倍，而该射电源并未随恒星移动，因此可判定其为背景源。（2）对于通过这一检验的唯一源，我们比较了恒星偏离射电位置时拍摄的档案光学图像，并测量了三个 VLASS 观测历元中相对于恒星盖亚运动轨迹的射电位置（第 4.2 节）。

3.4. 所有 *VLASS* 观测历元中的强制测光

除了第1历元目录外，我们还通过强制测光测量了每颗恒星在每个 VLASS 历元中的数据。对于4个历元（半历元1.1和1.2、2.1和2.2、3.1和3.2，以及4.1），我们从加拿大天文学数据中心提取了中心最接近恒星的 QL 图像 $41''\times41''$ 裁剪图，并以根据自行外推的位置为中心：第1至第4历元分别有208,573、208,573、207,717和97,410张裁剪图（总计722,273张；第4.1历元覆盖半个天空）。如果恒星的 $41''$ 裁剪框会越过最近图像的边缘（我们不会改用有重叠区域的相邻图像），或者对于数百颗恒星而言，该历元在 $0\farcm72$范围内没有图像，则该恒星在该历元没有裁剪图。剔除恒星位置处含有屏蔽像素的2,165张裁剪图后，剩下720,108个可用的恒星历元（每颗恒星的中位数为3个），涵盖208,232颗恒星。其余1,959颗样本恒星（0.9%；其中335颗位于南部巡天边界， $\delta < -38°$）没有任何可用历元；这一损失仅取决于恒星在图像网格中的位置，与射电性质无关。另有18颗恒星在每个历元中均因混淆（第3.5节）而被筛除，最终有208,214颗恒星获得合并图像；其中32,667颗是可在任意光度下纳入分析的技术特征宿主，173,319颗仅在高光度下符合纳入条件

（第3.5节）；经过稳态检验的合并单元筛除后，其中32,666颗和173,315颗恒星仍纳入该检验，总计205,981颗。流量密度 S 是对恒星位置（包括视差）处的图像进行双线性插值得到的值，噪声 σ 则是裁剪图中距离恒星 $10''$ 之外区域的稳健均方根（中位数绝对偏差），并乘以因子$\eta = 0.86$–0.87进行缩放，使得 S/σ 在空白位置具有单位散布：每颗恒星周围有八个对照位置 $14''$，并使用相同的估计量进行测量。 η 小于1，是因为双线性插值会对相邻且部分相关的像素取平均，也因为微弱源和旁瓣会使裁剪图的均方根略微偏高；因此我们直接测量该值，而不对其建模。对以 $1''$ 采样的 $\sim 2\farcs9 \times 2\farcs2$ 波束进行双线性插值，可恢复真实峰值的 κ。我们在随机选取的恒星位置处向第1历元图像注入24,000个点源，并以最近的第1历元目录分量的波束作为当地恢复波束的替代值（后续历元的注入测试也使用相同的替代方式），然后重新测量这些点源，得到 $\kappa = 0.861$，并采用此值；可靠关联中最亮源的目录峰值给出 $\kappa = 0.899 \pm 0.010$（$N = 26$），我们将这5%的差异视为流量标度的系统不确定度（采用的值给出更保守的限制）。流量密度还需除以其半历元的 QL 峰值偏差 $b_{\rm pk}$（第2.2节）；作为检验，致密参考源相对于第1历元目录（第4.3节）的流量标度，与这些偏差的比值相差不超过7%。对于真实值分别为 $S/\sigma = 4$、5和6的注入源，在第1历元的0.15、0.51和0.81的情形下，均以 $\geq 5\sigma$ 被检出，这与高斯噪声的预期相符（第4.7节）。在对照位置处， S/σ 的平均值为零，散布最大为1.06；但在混淆筛除前，每次试验中高于 5σ、 6.8×10^{-5}–9.4×10^{-5} 的尾部远比高斯分布更重，因为随机位置上会出现旁瓣和无关源。

3.5. 强制探测与随机背景

如果一颗恒星在任一历元或其跨历元的逆方差加权合并图像中达到 $S/\sigma \geq 5$，且不与具有自然解释的可靠关联相对应，则该恒星属于强制探测。其他可靠关联，包括靠近 LSPM J1943+5337 、经证实并不位于该恒星处的源（第 4.2 节），均按照其他恒星进行测试；此时，随机背景必须将这类巧合计入：根据第 3.2 节的模型，在 Epoch-1 历元进行评估后，本应成为某个对照位置可靠关联的分量（$R > 0.5$ ）可不受该位置的混淆 veto 影响，恰如恒星自身的可靠分量一样（共 16 个对照位置分量）。对照位置的测量采用在恒星自身 veto 后保留下来的历元，并且在这些历元中各自应用独立的 veto，从而使恒星与其对照位置在相同历元上进行比较。恒星附近编录的 Epoch-1 分量可能会通过其波束翼部在恒星位置产生通量，尤其是在低赤纬处，此时 QL波束会被拉长。因此，我们将 $15''$ 内的每个分量都建模为具有其拟合尺寸和峰值的椭圆高斯，并在预测贡献达到探测阈值一半时，对相应的恒星历元实施 veto；共有 26 颗恒星的 76 个恒星历元被 veto，这些恒星因此获得受混淆噪声限制的上限。

对于稳态检验，预测贡献也会像流量密度一样在各历元上进行合并；如果一颗恒星达到合并阈值的一半，则将其否决（5颗恒星）。如果该恒星处存在真实源，并且该分量属于可靠关联，则不会因其自身分量而否决该恒星；根据可靠性模型，该恒星处存在一个分量的概率为 $R < 0.5$，其概率为 $2\pi\lambda\sigma_i^2/f$，在目录信噪比为 $=5$–7 时约为1–3%；50个自然辐射源中没有一个被否决。强制探测结果采用与可靠关联相同的 SIMBAD 和 X射线证据进行表征（第 3.3节），但是否将其计为可能的发射机取决于其恒星是否满足资格条件，资格条件定义如下。我们分别处理两类发射机，因为使用不同的统计方法最容易发现它们，因此偶然试验次数也不同。稳定发射机最适合在合并图像中探测，每颗恒星进行一次试验；仅间歇性开启的发射机最适合在单个历元中探测，每个恒星—历元进行一次试验。对于每项检验，我们统计会被计为可能发射机的强制探测结果， k，无论其来源如何；然后在对照位置处应用完全相同的选择效应和否决条件，估计其中有多少是偶然产生的， b，因为在这些位置预计不存在恒星辐射。给定 k 和b，其中真实发射机探测结果的数量的95%置信上限 μ_{95} 可由下式得到：$P(n \leq k \mid \mu_{95} + b)/P(n \leq k \mid b) = 0.05$ (G. Zech 1989年)；不进行背景扣除时，它就是 k的经典泊松上限，我们采用该上限作为主要极限（第 4.6节）。

连续谱探测本身无法区分发射机与恒星辐射，因此，搜索必须明确：在哪些恒星上，以及高于何种光度的探测结果才会被视为可能的发射机。排除所有具有活动证据的恒星——即在完整的2RXS或eRASS1目录中存在X射线对应体的恒星（分别在巡天历元1990.8年和2020.3年，结合盖亚自行进行匹配），或具有SIMBAD活动类型的恒星（第3.3节）——并不合适，因为这些证据反映的是X射线巡天在该恒星距离处的探测深度以及该恒星被研究的充分程度，而不是其预期的射电辐射：25,894颗恒星（12.3%）具有此类证据，但这一比例从10秒差距以内的73%下降到80–100秒差距处的9%，因此这样的规则会排除大多数距离最近的恒星，而这些恒星对微弱

发射机最为敏感；即使在AFGK型恒星中，10秒差距以内的44颗恒星也只会有5颗符合条件（11%），而80–100秒差距处的比例则为82%。相反，我们采用基于恒星类型和活动水平的标准，具体如下：

1. M型矮星（$G_{BP}-G_{RP}\geq 1.84$）会发生耀发，其回旋同步辐射和相干辐射的光度范围与我们的探测结果相重叠，无论其活动性是否已被编目，因此，除非M型矮星的探测结果超过任何可能的自然辐射，否则无法将其识别为人工产生的信号。我们采用一个经验包络 $L_{\rm env}=10^{10}$ 瓦特 赫兹$^{-1}$，仅当M型矮星探测结果的测量光度超过 $L_{\rm env}$时才将其计入。在本次巡天的任何历元中，都没有M型矮星探测结果达到这一阈值：光度最高的结果为 4.5×10^{9} 瓦特 赫兹$^{-1}$，是在噪声为中位数10倍的位置进行的一次测量；光度次高的结果为 2.3×10^{9} 瓦特 赫兹$^{-1}$。年轻的M型矮星双星DG CVn曾观测到光度很高的15 GHz非相干耀斑，达到 4.5×10^{9} 瓦特 赫兹$^{-1}$（R. P. Fender 等，2015年）。其光谱未经测量，且峰值出现在首次测量之前，但回旋同步耀斑光谱通常在10 GHz附近达到峰值，并且峰值以下为光学厚（R. A. Osten 等，2016年），因此其在3 GHz处的光度可能更低；若光学薄光谱延伸至3 GHz，$S_\nu\propto\nu^{-0.5}$ 其光度也只会升至 $\approx L_{\rm env}$。更罕见的耀发或相干暴发在低频处最亮，可能会在3 GHz处超过该包络；此类事件将计入 k。

2. 有盖亚多星性证据（RUWE >1.4、非单星解或 $\Delta M_G<-0.5$星等）的 AFGK 型恒星可能有未分辨的活动伴星或 M 型矮星伴星，因此按 M 型矮星处理。这类恒星共有 13,665 颗，占原本符合条件的 AFGK 型恒星的 29%；这一比例几乎不随距离变化（10秒差距以内为 33%，80–100秒差距处为 30%）。最亮恒星的 RUWE 值偏高，其中 $G<6$ 处有 32% 的恒星 RUWE 超过 1.4，而 $G=6$–13处这一比例为 25%；因此，有些恒星（例如 ϵ Eri，RUWE = 2.7）可能是误报，只有在 $L_{\rm env}$以上才符合条件。

3. 所有已知射电辐射源类别均予以排除，不论其光度如何：SIMBAD 中的激变变星、RS CVn 双星、年轻恒星和磁性化学特殊星，以及 Gaia DR3 食双星（样本中有 133 个；N. Mowlavi 等，2023年），其中包括大陵五型系统；RS CVn 和大陵五双星的耀发可超过10^{10} 瓦特 赫兹$^{-1}$ (M. G¨udel 2002）。巡天中任何类型恒星探测到的最亮射电源为 5.9×10^{9} 瓦特 赫兹$^{-1}$，它来自激变变星 AE Aqr 的一个历元观测，属于上述类别。

4. 对于所有光度，具有饱和或近饱和日冕的AFGK型恒星（log $L_X/L_{\rm bol}\geq-4$）也会被排除（共1,818颗恒星）。 L_X 的计算方式与第3.3节相同； $L_{\rm bol}$ 则根据 M_G 计算，未进行辐射改正（这些恒星的$|BC_G|$ <为0.5星等，对于1 dex量级的阈值而言绰绰有余）。这一判据取决于恒星本身，但能否应用该判据并不一致。我们采用以下名义巡天深度：2RXS为 2×10^{-13} erg cm^{-2} s^{-1}（0.1–2.4 keV；按采用的换算关系为0.033 count s^{-1}，接近2RXS计数率中位数0.029 count s^{-1}，不过巡天曝光随天区而异）；eRASS1为 5×10^{-14} erg cm^{-2} s^{-1}（半球中位数0.5–2 keV通量，对应50%完备度；A. Merloni等人（2024））。我们将这些深度与未经波段修正的0.2–2.3 keV通量进行比较。在这些深度下，2RXS可探测到51%的AFGK型恒星，覆盖半数以上天区的eRASS1则可探测到83%；而对于几乎所有这些恒星，饱和日冕（log $L_X/L_{\rm bol}\approx-3$）都可被探测到（2RXS对99%的恒星可探测至log $L_X/L_{\rm bol}=-2.9$）。表1按距离列出了已知发射体类别之外的AFGK型恒星中，测得的log $L_X/L_{\rm bol}$ 高于或低于阈值、在名义深度足以达到阈值时却没有对应体，或无法约束的恒星数量：无法约束的比例从20秒差距以内的零上升至80–100秒差距范围内的44%。因此，符合条件的恒星是那些没有测量证据表明其活动性高于阈值的恒星；无法约束的恒星中若有活动恒星，也会计入 k。TYC 3573-1391-1（93.5秒差距）是通过稳态检验（第4.4节）的唯一一颗符合条件的恒星，也是一个例子：它没有X射线对应体，且在其距离处2RXS仅能探测至log $L_X/L_{\rm bol}\approx-3.6$，因此其活动性在 -4下无法约束。若日冕比2RXS换算时假定的更硬，则 L_X会升高：对于HR1 $=0$ 或 $+0.3$，1,632颗仅依据2RXS确定 L_X 的符合条件恒星中，分别有113颗或175颗会超过阈值，但其中没有一颗会被计为探测到的源。

总计有 32,985 颗 AFGK型恒星（占样本的 16%）在任何光度下都符合条件，174,955 颗（包括 161,290 颗 M型矮星和 13,665 颗 AFGK型恒星）仅在高于 $L_{\rm env}$ 时符合条件，另有 2,251 颗在任何情况下都不符合条件。

AFGK型恒星在10秒差距内的符合资格比例为64%，在80–100秒差距处为67%，随距离变化几乎保持平坦；而根据存在规则，这两个比例分别为11%和82%。这些规则倾向于计入：对于我们视为符合资格的恒星，其自然辐射可能来自盖亚未标记的多星系统、低于X射线探测极限的日冕，或高于 $L_{\rm env}$的M型矮星耀斑，这些辐射都会进入 k，从而使限制变得更宽松，而不会虚假地收紧。我们采用了多星性

表1。 已知射电辐射源类别之外的AFGK型恒星活动水平的X射线约束。

壳层 (pc)	N	测量值 ≥ -4	测量值 < -4	深度 达到 -4	未约束	Unc. (%)
0–10	43	1	35	7	0	0
10–20	312	18	193	101	0	0
20–40	2,702	123	944	1,489	146	5
40–60	7,778	331	1,603	4,347	1,497	19
60–80	14,303	520	1,784	7,307	4,692	33
80–100	23,330	825	1,825	10,331	10,349	44

NOTE—各列给出具有测量的log值的恒星数量 $L_X/L_{\rm bol}$ ≥ -4 （排除）或 < -4 （低于阈值的X射线对应体），以及在名义巡天深度达到该阈值时没有对应体的恒星数量；最后一类则是在名义巡天深度未达到该阈值时没有对应体的恒星数量（未约束）。名义深度为$5 \times 10^{-14}\,{\rm erg\,cm^{-2}\,s^{-1}}$，适用于eRASS1半球（完备度达到50%时0.5–2 keV通量的半球中位数；A. Merloni等人（2024））；该数值未经波段修正，直接与0.2–2.3 keV通量进行比较；其他区域则为 $2 \times 10^{-13}\,{\rm erg\,cm^{-2}\,s^{-1}}$（0.1–2.4 keV；2RXS）；巡天曝光随天空位置而变化，因此深度各列仅为近似值。$L_{\rm bol}$来自 M_G。只有测量到的活动性才会排除一颗恒星：最后三列中的恒星均符合资格，因此其中的活动恒星会被计入 k。

在检查了AFGK型恒星的强制探测结果（第4.4节）后采用的判据，并给出不采用该判据时的结果。活动证据本身仅用于划分堆叠图像（第3.8节）。

随机背景遵循相同的规则：我们在符合条件的恒星周围统计对照位置检测及试验次数；对于包络层恒星，则只统计那些在该恒星距离处其流量密度会超过 $L_{\rm env}$ 的恒星，而这样的恒星一颗也没有。包络层检验分别应用于合并图像和每个历元，也应用于17颗包络层恒星的后续历元；这些恒星在第1历元中均是可靠的自然辐射源（共59个恒星历元；其中最亮者达到1.0×10^9 瓦特 赫兹$^{-1}$），但没有任何一个超过 $L_{\rm env}$。对所有恒星而言，对照位置在稳态检验中会给出 $b = 11.3$ 个结果，在单历元检验中会给出15.4个结果；对于符合条件的恒星，则分别为 $b = 1.3$ 和2.3。由于 b 基于10个和18个对照检测，其不确定度为 ± 0.4和 ± 0.5（泊松），或者通过对恒星进行自助法得到 ± 0.4 和 ± 0.6；后者考虑了聚集在同一颗恒星周围的对照检测。八个对照角度中的每一个也都是零假设的一次独立实现，可直接与 k比较：在稳态检验中，它们给出0–3个探测结果。将该不确定度边缘化后，占空比上限从4.0升至4.1，并从5.8升至5.9；我们报告标准值。靠近有辐射恒星的对照位置可能会检测到该辐射的旁瓣，但排除这些位置后，b 变为1.3和2.3。对于占空比上限，我们还统计恒星而非恒星历元：有 $k = 3$ 颗符合条件的恒星至少在一个历元达到 5σ，而对应的数量为 $b = 1.9$ （$\mu_{95,\ \rm host} = 6.1$）。

3.6. 单颗恒星的极限

对于一颗恒星, 在没有可靠关联的情况下，我们将95%完备度的检测阈值作为其极限 ld

$$S_{\rm lim} = \frac{(5 + 1.645)\,\sigma_{\rm img}}{b_{\rm pk}}, \tag{2}$$

其中，$\sigma_{\rm img}$ 是该恒星 QL 图像的平均岛区均方根噪声，$b_{\rm pk}$ 是其半历元的 QL 峰值偏差，而 5σ 是 PyBDSF 探测阈值：亮度至少达到此值的源以 95% 的概率被探测到。这描述的是恒星所在位置的灵敏度，而不是以测量流量密度为条件的置信界；对于没有辐射的恒星，“上限”始终具有这一含义。如果无关分量位于 $3''$（32 颗恒星）以内，则将上限提高到该分量的流量密度；对于 51 颗可靠探测到的恒星，任何人工分量的上限则采用由数据决定的单侧 95% 置信上限，即测量流量密度加上 1.645σ。光谱

光度上限为 $L_\nu^{\rm lim} = 4\pi d^2 S_{\rm lim}$；对于功率在 2–4 GHz 频段内均匀分布的发射机，等效全向辐射功率$_{\rm lim} = L_\nu^{\rm lim} \times 2$ GHz。2–4 GHz 内任意带宽的发射机，其带内功率除以 2 GHz 后即为带平均流量密度，因此，等效全向辐射功率上限适用于观测期间处于开启状态、未被射频干扰标记剔除，且未因成像而被解析掉或抑制的信号的总带内功率。标记剔除对窄带信号至关重要。VLASS 所使用的 VLA 校准管线（M. Lacy 等，2020）会自动标记并剔除时间和频率上的离群值。局限于单个 2 MHz 信道的信号，在该信道内的流量密度是带平均流量密度的 1000 倍：在我们的中位数上限下，~0.5 央，约为单个可见度的噪声水平；但亮十倍的信号将成为明显的离群值，很可能会被标记剔除。因此，我们的上限适用于分布在许多信道上的信号，以及仅在接近探测阈值时局限于少数信道的信号。

对于全历元分析（第 3.4 节），我们使用未 veto 历元的逆方差加权合并：对于没有辐射的恒星，采用完备性阈值 $S_{\rm lim} = (5 + 1.645)\,\sigma_{\rm coadd}$；对于存在辐射的恒星，则采用更大的置信上限 $S_{\rm coadd} + 1.645\,\sigma_{\rm coadd}$；对于少数所有历元均因混淆而被 veto 的恒星，其上限为最大的单历元 $S + 1.645\sigma$。如果某个发射机只在一个快照期间开启，且开启的历元未知，那么只有当它无论在哪个历元开启都会被探测到时，才能将其排除，因此其上限为噪声最大的未 veto 历元的单历元上限（$5+1.645$）σ_e（对于存在辐射的恒星，则取更大的 $S_e + 1.645\,\sigma_e$）；仅在最低噪声时期，上限会更低。所有上限均针对恒星位置处的辐射。对于偏离恒星的发射机，我们未考虑强制测光中灵敏度的下降，因此无法约束位于投影分离为 $\gg 1'' \times (d/\text{pc})$ au 的行星上的发射机。

3.7. 总体上限

如果有比例为 f 的恒星拥有谱光度为 L_T的稳定发射机，使恒星 i处的流量密度达到 $S_T = L_T/4\pi d_i^2$，那么该恒星被检测到的概率为 $p_i(L_T) = \Phi[(S_T - t_i)/\sigma_i]$，其中 Φ 是标准正态分布函数，$t_i = 5\sigma_i$是定义 k的阈值，因此每次检测（包括候选信号）都计作一个可能的发射机。我们不尝试区分已检测恒星上的发射机与自然辐射；将测量到的流量密度视为自然辐射基线，并要求发射机的信号高出 $5\sigma_i$，即 $t_i = S_i + 5\sigma_i$，对上限的影响至多为 0.01%。对于包络层恒星 $t_i = \max(5\sigma_i, S_{{\rm env},i})$，当 $S_{{\rm env},i} = L_{\rm env}/4\pi d_i^2$时，这是因为只有高于 $L_{\rm env}$的检测才计入：谱光度为 $L_T = L_{\rm env}$ 的发射机在包络恒星处被检测到的概率为 ≈ 0.5，这些恒星的贡献略低于 $L_{\rm env}$时便开始显现。排除恒星无论是否检测到，其 $p_i = 0$；σ_i 和 S_i指的是合并图像。作为一项无需判定任何检测信号来源的检验，我们还计算了所有 M型矮星在合并图像下的上限，其中每颗恒星和每次合并图像检测（包括自然辐射源）都计入 k，且每颗恒星均有 $t_i = 5\sigma_i$。注入—恢复（第3.4节）验证了这种形式。

预期探测到的发射机数量为 $fN_{\rm eff}(L_T)$，其中 $N_{\rm eff} = \sum_i p_i$，因此 $f < \mu_{95}/N_{\rm eff}(L_T)$，稳态检验的结果为 μ_{95}。这是对 f 的 95%置信上限，每颗恒星的完备度通过 p_i 纳入计算。我们将无背景上限作为主要结果，其中 μ_{95} 是针对 k 个稳态检验探测结果的经典泊松上限，并将它们全部视为可能的发射机；同时给出扣除背景后的（Zech）上限以供比较：无背景上限不依赖控制位置校准，并且是两个上限中更保守的一个。对于没有控制位置背景的 Epoch-1目录分析，这一结果简化为针对 $k = 0$ 个未解释的可靠关联（$\mu_k = 3.00$）的经典泊松上限 $f < \mu_k/N_{\rm eff}$；（由于没有背景项，此处排除已证实不属于 LSPM J1943+5337 的源），其中每颗恒星在其上限处采用 p_i 阶跃函数，资格规则相同，而 LSPM J1943+5337 附近的背景源仅在高于其测量光度时计入。如果发射机在随机比例为 δ 的数秒 VLASS快照中处于开启状态，那么当它在每个快照中的开关状态彼此独立时，至少在一个历元中于其宿主处被探测到的概率为 $1 - \prod_e(1 - \delta p_{ie})$；其中 p_{ie} 是合格恒星的单历元探测概率（对于包络恒星，则是高于 $L_{\rm env}$ 的探测概率）。我们将预期探测到的宿主数量 $f\sum_i[1 - \prod_e(1 - \delta p_{ie})]$, 与来自宿主级单历元测试（第 3.5 节）的 $\mu_{95,\ \rm host}$ 进行比较；由于一颗恒星在多个历元中处于开启状态时仍只计作一个宿主，这样就避免了将同一颗恒星的重复探测视为相互独立。当 $\delta \to 0$ 时，预期数量趋近于 $f\delta\sum_{i,\ e} p_{ie}$，得到 $f\delta < \mu_{95,\ \rm host}/\sum_{i,\ e} p_{ie}$。

3.8. 叠加

巡天图像切片的图像堆叠最初用于河外样本（R. L. White等（2007），此后也应用于恒星：74兆赫下的邻近年轻太阳型恒星（T. J. W. Lazio等（2010年）、0.07–1.4 GHz下的邻近低质量恒星、系外行星宿主星和年轻恒星体（J. Ling等（2022年）、VLASS中的金牛座–御夫座成员（R. A. Rahman等（2025年））以及激变变星（S. S. Rao等（2026年））。在此，我们堆叠每一颗

体积限制的盖亚样本中场主序星的恒星图像，位置采用其历元传播位置，并按光谱类型和活动性分类。为探测低于单星阈值的辐射，我们将六个距离壳层（0–10、10–20、20–40、40–60、60–80和80–100秒差距）中的强制测光进行堆叠；每个距离壳层均进一步划分为 $G_{BP}-G_{RP}=1.84$ AFGK型恒星（包括768颗颜色指数蓝于0.33星等的A型星）和M型矮星，并分别针对各个历元及全历元合并进行处理。我们构建两种统计量。逆方差加权平均光谱光度

$$\langle L_\nu\rangle=\frac{\sum_i w_i\,4\pi d_i^2 S_i}{\sum_i w_i},\qquad w_i=\left(4\pi d_i^2\sigma_i\right)^{-2}, \tag{3}$$

仅使用干净恒星：没有可靠关联、没有强制探测，并且没有任何历元的预测星表污染高于 0.5σ。其零假设是在八个对照位置上均采用相同的加权平均值；这些位置与恒星一样适用相同的筛选条件。我们减去这些位置的平均值，并采用形式误差与其散布中的较大者。我们报告所有干净恒星的堆叠结果，并分别报告具有和不具有活动证据的恒星的结果（第3.5节）。由于权重按 $d^{-4}\sigma^{-2}$ 缩放，我们报告恒星有效数 $N_{\rm eff,\,w}=(\sum w)^2/\sum w^2$，以及权重由十颗权重最高的恒星承担的比例。第二项统计量是壳层中所有未 veto 恒星（包括已探测恒星）的 S/σ 中位数，相对于对照位置处中位数的值，并给出自助法误差；它对少数亮源不敏感，也不要求排除探测结果。

对于发射器的上限，我们只使用符合条件的 AFGK 型恒星：这些堆叠探测的光度远低于 $L_{\rm env}$，此时没有其他恒星是符合条件的宿主。平均堆叠约束发射器比例与功率的乘积。对于每个 L_T，我们堆叠干净恒星；在合并图像中，具有该光度的发射机产生的信号至多为 3σ。这一选择仅由噪声决定，因此宿主很少会因筛选条件而被从堆叠中剔除。若每颗恒星以概率 f拥有这样一台发射机，则加权平均值$m=\sum_i a_i L_i$（权重归一化为 a_i）的期望为fL_T；除测量误差 s_m外，其宿主抽样方差为 $L_T^2 f\,(1-f)\,/N_{\rm eff}$，其中 $N_{\rm eff}=1/\sum_i a_i^2$。当权重集中在少数恒星上时，这一方差就很重要。95%上限 f_{95}由下式求得：$f_{95}L_T-q\,[s_m^2+L_T^2 f_{95}\,(1-f_{95})\,/N_{\rm eff}]^{1/2}=\max(m,\,0)$，其中 s_m 是形式误差，按对照位置处 S/σ 的均方根缩放；若八个对照位置均值的散布更大，则改用该散布，此时 q 取自由度为七的 Student-t 分布分位数，而非 1.645。中位数堆叠则直接约束 f，条件是 $S_T\gg\sigma$：通过蒙特卡罗模拟，我们求得符合条件的恒星中必须额外接收 S_T/σ_i 的比例。这里的恒星样本合并了 0–100秒差距范围内的恒星，并在查看数据前就已选定；这一比例需足以使中位数的偏移超过观测到的偏移加上其误差的 1.645 倍。比较这两种结果，可以区分堆叠信号究竟由许多微弱发射体产生，还是由少数明亮发射体产生。

4. 结果

4.1. 射电探测恒星是自然辐射源

表 2 列出了51个可靠关联，图 2 在颜色—星等图上展示了这些关联。在距恒星 $2\farcs5$ 范围内具有VLASS分量的75颗恒星中，有51颗具有可靠关联。其余24颗与对应恒星的距离更远（中位数$1\farcs8$，而可靠关联为 $0\farcs20$），其数量接近根据偏移目录预期的18个偶然重合；其中一些可能是低于可靠性阈值的恒星辐射，例如V376 Cep（第 3.2节），其中8颗具有2RXS对应源。与其他所有恒星一样，它们在每个历元都通过强制测光进行检验（第 3.4节）。在这75颗恒星中，有55颗具有2RXS对应源，27颗具有eRASS1对应源；根据星表中的源密度，在距恒星 $40''$ 范围内出现无关2RXS源的概率为 $\sim 1\times10^{-3}$，而在距恒星 $20''\sim 4\times10^{-3}$ 范围内出现eRASS1源的概率为。

在可靠关联中（表2）包括9颗耀斑星、6个RS CVn双星、6颗BY Dra变星、4颗年轻恒星、2个激变变星（包括AE Aqr），以及磁性Ap星 α^2 CVn；其中21颗是没有更具体SIMBAD类型的X射线活动恒星（其中19颗具有多重性证据），另有1颗是发射线星。50个自然辐射源中有49个具有X射线对应体。不论分类如何，39颗活动恒星显示出多重性证据，4颗没有；其余7颗是年轻恒星、激变变星或化学异常星。X射线探测到的恒星相对于GL_X/L_ν）$=12.86$–15.28（中位数为14.37），$\sim$1 dex射电明亮，这符合G¨udel–Benz关系的预期，也与活动恒星的射电明亮尾部一致（H. K. Vedantham 等，2022）。这颗发射线星2MASS J17022950+1341015（一颗位于30.5 pc处的M型矮星；$R=0.77$，$S=1.35$ mJy）具有多重性证据（RUWE = 5.3，光度超出预期0.60星等），但没有X射线对应体；其活动证据是其SIMBAD发射线类型。它仅在第1历元被探测到：强制测光显示，第1历元为 $S/\sigma=4.9$，而之后最多为1.8，这与耀斑的预期一致。其余的可靠关联将在第4.2节讨论。在一颗恒星的 $1''$ 范围内、靠近LP 732-30和2MASS J 14223872+0646143的另外两个无法解释的分量，其 $R<0.01$ 在天体测量校正后

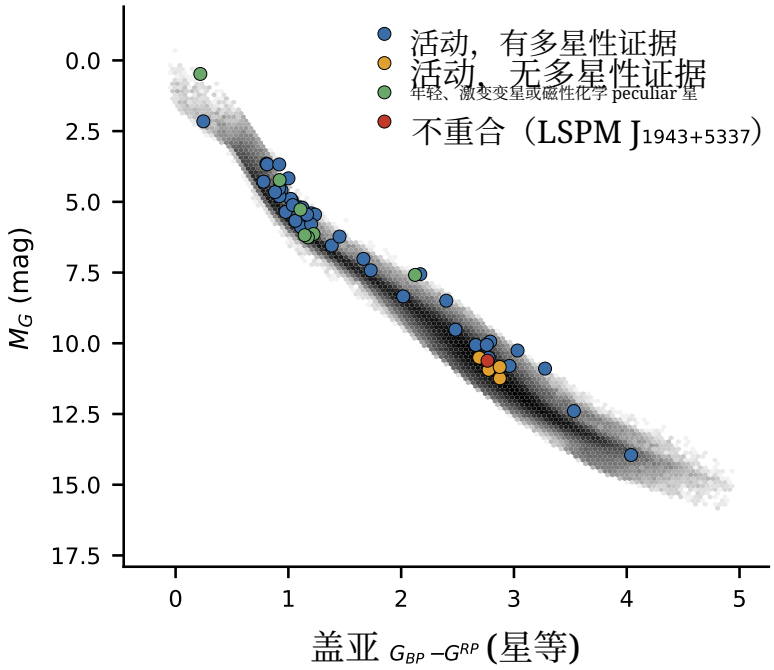


图 2. 210,191 颗样本恒星（灰色）的颜色—星等图，其中 51 个可靠关联根据证据以不同颜色表示：具有多星性证据（蓝色）和不具有多星性证据（橙色）的活动恒星、年轻恒星、激变变星和磁性化学奇特星（绿色），以及靠近 LSPM J1943+5337 的射电源；该射电源与恒星并不重合（红色）。

并且独立地看，它们在NVSS或FIRST与VLASS的观测之间并未随各自的恒星移动（这些恒星分别移动了 13.″5 和 1.″7）：两者都是背景源。

独立证据证实，大多数关联确实属于恒星。30个目标被列入悉尼射电恒星目录（L. N. Driessen 等，2024年），其中11个具有圆偏振探测结果，单凭这些结果即可确立其为恒星辐射；另有41个属于A. De（2024年）的VLASS–Gaia 射电星样本。在该样本的605颗恒星中，有66颗落入我们的样本。我们未能可靠关联的目标包括：仅由A. De（2024年）在VLASS 第 2 历元中探测到的13个源，以及低于星表阈值或存在模糊匹配的第 1 历元源（$R \leq 0.5$）；对于后者，我们的强制测光所得流量密度与其结果在 ∼0.1 毫央以内一致。此外，213颗悉尼星表中的恒星位于我们的样本中，其中30颗已被我们可靠关联。在其余183颗中，161颗仅在低于2 GHz的频段有星表收录的探测（主要来自RACS和LoTSS），22颗在VLASS中被探测到，其中18颗是强制探测（第3.5节）；总计而言，这183颗中有45颗是强制探测，其余则获得上限，这与变辐射的预期一致。A. De （2024年）将LSPM J1943+5337列为已确认的射电恒星，依据是其第 1 历元重合；第4.2 节表明，辐射并不来自该恒星。

表2。VLASS 第1历元　　与100 p内的51颗主序星可靠关联的分量（可靠性 $R > 0.5$）　　c.

Name	Gaia DR3	d (pc)	$G_{BP}-G_{RP}$ (星等)	Sep. (角秒)	R	$S_{3\,\mathrm{GHz}}$ (毫央)	log L_ν (瓦特 赫兹$^{-1}$)	X射线	log $\frac{L_X}{L_\nu}$ (Hz)	多重射电类别	
G 9-38B	660597997697274752	5.1	4.04	0.69 0.920	4.34	7.13	E	13.29	SR	Pc	Fl
BD+19 5116A	2824770686019003904	6.3	2.66	0.22 0.983	1.13	6.72	R	15.14	S	PDvc	Fl
V374 Peg	1893189736896880640	9.1	2.87	0.57 0.862	1.48	7.17	R	14.24	···	KDvc	Fl
CW UMa	758200712885953280	13.4	2.69	0.12 0.986	1.99	7.63	RE	13.95	···	Kvc	Fl
alf For B	5059349158319689344	14.1	1.11	0.10 0.998	5.04	8.08	RE	14.46	SR	Pvc	X
CD-38 11343B	5970189504209690496	15.7	2.96	1.11 0.654	1.94	7.76	RE	15.04	SO	PD	X

表 2 *continued on next page*

表 2 *(continued)*

Name	Gaia DR3	d (pc)	$G_{BP}-G_{RP}$ (星等)	Sep. (角秒)	R	$S_{3\,\mathrm{GHz}}$ (毫央)	对数 L_ν (瓦特 赫兹$^{-1}$)	X射线	对数 $\frac{L_X}{L_\nu}$ (Hz)	多重	射电类别	
1RXS J055641.0-101837	2999254213453678720	15.9	2.78	0.27	0.984	1.01	7.49	RE	13.61	···	Dv	X
G 249-36	1005873614080407296	16.3	2.87	0.06	0.999	9.36	8.47	R	12.94	···	KDvc	X
HD 43162C	2913314288686472576	16.7	2.78	0.10	0.997	3.28	8.04	E	13.95	SR	KDv	X
HD 283750	151650076838458112	17.4	1.38	0.09	0.998	2.96	8.03	R	14.74	SNR	PDvc	BY
LQ Hya	5739942011185493888	18.3	1.14	0.21	0.989	1.32	7.72	RE	15.07	···	vc	Y
Ross 776	1851868127125091840	19.7	2.79	0.02	0.998	2.99	8.14	R	13.93	SRO	PDv	Fl
BD+55 1823	1429437378934511616	20.1	2.17	0.23	0.988	1.79	7.94	R	14.51	SRO	PDv	Fl
sig CrB A	1328866562170960512	22.7	0.81	0.18	0.991	4.00	8.39	R	15.15	SO	KDvc	X
BF Lyn	812477352773908608	23.4	1.24	0.21	0.991	1.04	7.83	RE	15.24	SNO	Pvc	BY
[R78b] 233	3274291270411229056	26.8	3.03	0.06	0.995	1.85	8.20	RE	13.70	RO	KDvc	Fl
V478 Lyr	2042389925739687808	27.1	0.98	0.12	0.997	2.74	8.38	R	14.67	S	KDvc	RS
StKM 1-497	3205094369407459456	27.8	2.12	0.29	0.982	1.58	8.16	RE	14.27	SRO	Dv	Y
PW And	2860839993168687872	28.3	1.17	0.17	0.995	1.72	8.21	R	14.73	···	Dv	Y
HD 124498A	6298167775459045632	29.0	1.73	0.02	0.984	0.89	7.95	RE	14.62	SR	PDvc	X
2MASS J17022950+1341015	4544627976777952640	30.5	3.53	0.93	0.767	1.35	8.18	···	···	RO	v	Em
猎犬座α02	1517698716348324992	30.6	0.22	0.34	0.970	1.71	8.28	R	13.54	SRO	KDvc	CP
HD 166181	4590455518346609792	32.1	0.92	0.12	0.995	1.01	8.09	R	15.28	SR	KDv	RS
GS Leo	589720969909457792	35.4	1.06	0.20	0.992	1.87	8.45	RE	14.36	SNR	PDvc	BY
IZ Boo	1484942233437321728	36.0	2.40	0.21	0.992	2.00	8.49	R	13.73	O	KDv	Fl
HD 22403	69443337640657536	36.6	0.92	0.15	0.996	2.27	8.56	R	15.04	SO	KDvc	Y
NQ Com	3955187043030098176	40.5	1.67	0.36	0.977	0.86	8.23	RE	14.44	RO	v	BY
HD 143937	6243343170769568128	42.9	1.10	0.16	0.994	2.03	8.65	RE	14.59	SO	KDv	X
HD 195434A	4245659976227848704	45.1	1.20	0.17	0.990	1.32	8.51	R	14.70	S	KD	X
V402 长蛇座	5756823564825367936	47.5	1.17	0.26	0.987	2.64	8.85	RE	14.41	RO	KDv	BY
Gaia DR3 3821318547411001728	3821318547411001728	49.0	2.48	0.22	0.991	1.33	8.58	RE	13.51	R	Dv	X
HD 200391	1845206534070618624	50.5	0.81	0.50	0.957	2.48	8.88	R	14.79	SNO	Dv	RS
HD 25284	4888246251178417024	50.6	1.45	0.20	0.990	1.72	8.72	RE	14.37	SRO	D	X
BO Mic	6778413151435607680	51.0	1.20	0.20	0.993	3.32	9.02	R	15.10	SNRO	KDvc	BY
EV Dra	1403766939225964288	57.5	0.94	0.06	0.998	1.74	8.84	R	14.50	SNO	KDv	RS
UCAC4 747-046156	860453786736413568	57.7	3.28	0.39	0.965	1.96	8.89	R	12.86	O	Dvc	X
HD 79551	818854107897169024	60.1	0.88	0.46	0.901	1.13	8.69	R	14.67	S	Dv	X
BD+47 4087	1942527533757602176	60.3	1.04	0.25	0.988	1.05	8.66	R	14.53	SO	Dv	X
HD 295290	3105605708307826944	60.5	1.02	0.12	0.997	6.65	9.46	RE	13.94	O	Dv	Fl
BD+18 1512	3361628369521591808	61.7	1.03	0.11	0.997	9.13	9.62	RE	13.75	RO	Dv	X
HD 8358	2534358706998049792	62.3	1.00	0.06	0.999	4.29	9.30	R	14.33	SO	PDvc	RS
RZ Cas	541801332594262912	65.3	0.25	0.07	0.999	3.25	9.22	R	14.13	SN	Dv	X
大熊座XY	1023628919309621632	67.9	1.12	0.26	0.988	1.79	8.99	R	14.08	SO	Dvc	RS
1RXS J204412.7+312642	1859797431337296384	68.5	2.02	0.20	0.986	2.75	9.19	R	13.09	R	KD	X
盖亚 DR3 4808527947311614208	4808527947311614208	69.5	2.76	0.65	0.902	0.91	8.72	RE	13.14	RO	v	X
HD 101207B	767786259553138816	81.1	0.92	0.10	0.990	0.72	8.75	R	14.58	SRO	···	X
BD+08 102	2750199780197751936	81.1	1.11	0.10	0.997	2.01	9.20	R	14.14	SNRO	Kv	CV
BD+66 1664	2210120493272273920	89.4	0.92	0.45	0.925	1.86	9.25	R	14.42	SO	Dv	X
AE Aqr	4226332451596335616	91.6	1.22	0.05	0.996	2.87	9.46	R	14.29	S	KDvc	CV
HD 156848B	4108078979665915648	93.4	0.78	0.28	0.986	1.29	9.13	RE	14.32	S	Dv	X
LSPM J1943+5337	2137474969751117312	97.6	2.77	0.26	0.987	1.81	9.31	···	···	···	D	BG

NOTE—按距离排序。分量图像的VLASS观测历元处的分离度。 $S_{3\,\mathrm{GHz}}$ 为目录记录的总流量密度，已针对快速浏览积分流量偏差进行校正（在半历元1.1中除以0.90；A. E. Kimball 等，2026）。X射线：R ＝ROSAT 2RXS，E ＝eRASS1。多重性证据（Mult.）：S ＝SIMBAD双星类型，N ＝Gaia非单星解，R ＝RUWE >1.4，O ＝高出光度 >0.5 星等。射电恒星证据：P ＝位于悉尼射电恒星目录（L. N. Driessen 等，2024）中且有圆偏振探测，K ＝位于该目录中但没有圆偏振探测，D ＝见于A. De 等（2024），v ＝显著变源，c ＝在VLASS观测历元1.1–4.1期间与该恒星共同运动（第4.3节）。分类（SIMBAD天体类型，但LQ Hya和PW And为年轻单星；J. Lehtinen 等，2012；J. L´opez-Santiago，2003）：Fl ＝耀星；Em ＝发射线星；RS ＝RS CVn型双星；BY ＝BY Dra 变星；Y ＝年轻恒星；CV ＝激变变星；X ＝X射线活动星；CP ＝磁性化学奇特星；BG ＝与该恒星不重合（第4.2节）。机器可读版本位于可复现性软件包中。

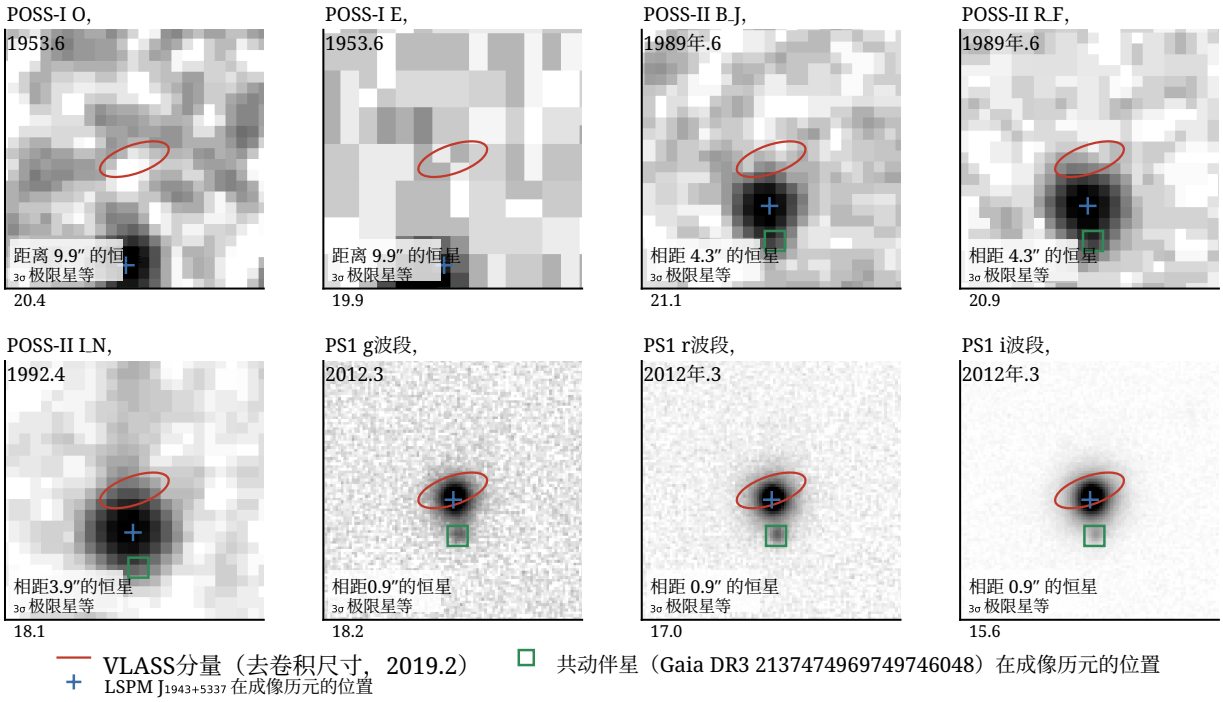


图3。 档案光学图像（$24'' \times 24''$，北向上、东向左），显示LSPM J1943+5337附近的VLASS分量（红色椭圆：去卷积尺寸，位于其Epoch-1位置，2019.2）。蓝色十字标示恒星，绿色方框标示其在盖亚DR3所给出的每个成像历元的共动伴星；它们传播得到的 1σ 位置不确定度分别最大为2.4和33毫角秒，远小于图示符号。恒星相对于射电位置在 $9\farcs9$（POSS-I）和 $\sim 4''$（POSS-II）时期发生了位移；3σ 每个面板均给出了射电位置处的极限。在Pan-STARRS1历元，恒星仅距 $0\farcs9$，并且主导了光线。由于射电位置取自2019.2年，本图单独只能检验静止射电源是否存在光学对应体；图4的多历元天体测量显示射电源并不位于恒星位置，但目前尚不能排除它以固定偏移量与恒星共同运动的可能性（第4.2节）。

4.2. *LSPM J1943+5337*：辐射与恒星并不重合

来自M型矮星LSPM J1943+5337 （$d = 98$pc； $R = 0.987$）的射电分量 $0\farcs26$ 在3 GHz下的流量密度为1.81毫央，且没有X射线对应体；该恒星在SIMBAD中也没有活动分类，因此这是唯一一个无法自然解释的可靠关联。其目录中的去卷积尺寸 $3\farcs3 \times 1\farcs3$表明这可能是一个已分辨的河外源，但在该信噪比下，快速浏览尺寸存在不确定性（Y. A. Gordon 等，2021年）。该恒星以153毫角秒 年$^{-1}$的速度向北移动，因此在POSS-I（1953年）中，它位于射电位置 $9\farcs9$，而在POSS-II（1989年–1992年）中位于 $\sim 4''$ 射电位置（假设射电源未移动；见下文）。在这些底片上，射电位置处均未发现光学源，深度分别达到 $g \gtrsim 20.4$ 和 $r \gtrsim 19.9$ （POSS-I），以及 $B_J \gtrsim 21.1$ 和 $R_F \gtrsim 20.9$ （POSS-II；图3）。由于即使在 $r \sim 22$ 的深度下，只有~30%的毫央斯基射电源具有光学对应体（Ž. Ivezić 等，2002年），而在底片深度下这一比例更低（W. H. de Vries 等，2004年），因此这一未探测结果本身只能提供微弱证据。档案成像还显示出一个共同自行伴星Gaia DR3 2137474969749746048，位于该恒星以 $3\farcs4$ 南的位置；其暗淡程度和颜色表明它可能是一颗冷白矮星。

决定性检验是天体测量。表3 和图4 展示了 VLASS 第 1.2、2.2 和 3.2 历元的射电位置；每幅图像均以五个致密参考源为基准进行校准，参考系与盖亚的偏差在（$\Delta\alpha^*$， $\Delta\delta$） $=(+0\farcs03,\ +0\farcs01)$ 以内，适用于这些可靠关联。该源在每个历元的检测亮度均稳定在 ~1毫央/波束$^{-1}$，而恒星向 ~$0\farcs8$ 北移动。在赤纬方向，射电位置保持不变（相对于其平均值，两个自由度下的$\chi^2 = 1.8$ ），到 2024.4 时，它与恒星相距 $1\farcs1$ （7σ 赤纬方向）。恒星位置处的辐射可被排除：$\chi^2 = 77.9$ 赤纬方向三个自由度下为 $\chi^2 = 104$ ，两个坐标方向各有 6 个自由度时为。在恒星几乎不移动的赤经方向，射电位置的散布超过其形式误差（静止源和共动源在两个自由度下分别给出 $\chi^2 = 18$ 和 16）。该源的去卷积长轴位置角为109°，接近东西向；由相同的 2019 年可见度生成的 QL 图像与单历元图像在赤 $0\farcs55$ 经方向相差

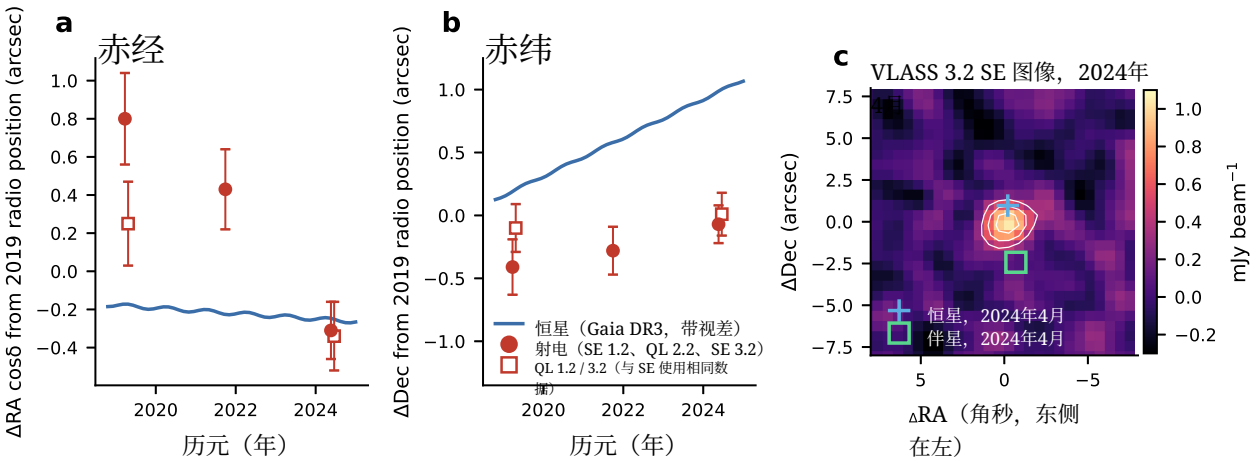


图4。（a）赤经和（b）赤纬方向上 LSPM J 附近射电源的偏移1943+5337相对于其第1历元星表位置（红色），该位置是在以致密参考源为基准的坐标系中测得的；并与包含视差的恒星盖亚轨迹（蓝色）进行比较。实心符号表示独立历元；空心方块表示与单历元图像共享数据的快速预览图像。（c）VLASS 3.2 单历元图像（2024.4），等高线分别为均方根的 3、5 和 7 倍；恒星（十字）已移 1.″1 离射电源；方块标示其伴星，如图3所示。

表3。 LSPM J1943+5337 附近射电源的多历元 VLASS 天体测量。

图像	历元 (yr)	$S_{\rm peak}$ (毫央 b^{-1})	SNR	$\Delta\alpha^*$ (角秒)	$\Delta\delta$ (角秒)	$\Delta\alpha^*_\star$ (角秒)	$\Delta\delta_\star$ (角秒)
QL 1.2	2019.23	0.92	7.5	$+0.25 \pm 0.22$	-0.10 ± 0.19	-0.17	$+0.19$
QL 2.2	2021.74	1.03	7.8	$+0.43 \pm 0.21$	-0.28 ± 0.19	-0.23	$+0.58$
QL 3.2	2024.38	1.04	8.3	-0.34 ± 0.18	$+0.01 \pm 0.17$	-0.25	$+0.99$
SE 1.2	2019.23	0.78	6.2	$+0.80 \pm 0.24$	-0.41 ± 0.22	-0.17	$+0.19$
SE 3.2	2024.38	1.06	8.5	-0.31 ± 0.15	-0.07 ± 0.15	-0.25	$+0.99$

NOTE—偏移量是相对于第1时期目录位置而言的，此前已将每幅图像与五个紧致参考成分进行配准。下标 $\star$：图像历元恒星的盖亚位置。

经方向相差 0.″31，赤纬方向相差。因此，我们将这种散布归因于略微分辨源的成像依赖质心偏移；将赤经误差放大三倍（足以吸收这种散布）后，赤纬检验不变。

因此，射电辐射的位置与 LSPM J1943+5337并不重合。现有的三个历元时间基线无法判定该源是静止的，还是以固定偏移量随恒星共同运动：拟合的赤纬运动68 ± 50 毫角秒 年$^{-1}$介于零与恒星的 153 毫角秒 年$^{-1}$之间，第4.3 节的全历元分析也无法得出结论。直接在三个历元的 Quick Look 裁剪图中测得的位置（第4.4节）更支持其为静止源（$\chi^2 = 7.3$ 对于共动源则为 18.3，自由度为 4），但这个略微分辨开的源，其 QL 位置会受成像影响，因此表3 在有单历元位置时采用单历元位置；我们不认为 QL 结果具有决定性。若该源与恒星共同运动，则它距恒星 $\sim 0.''8$（$\sim$ 75天文单位的投影距离），其功率为$L_\nu \approx 2.1 \times 10^9$ 瓦特 赫兹$^{-1}$。其延展结构、缺少 X射线对应体，以及样本中预计会有 3.4 次、发生于 1″ 范围内的偶然重合（第3.1节），再加上可靠性分析预测可靠关联中会有 1.5 次偶然重合（第3.2节），都支持它是背景源；我们将其归类为可能的背景源。全历元检验中的随机背景包含此类重合，因此如果这颗恒星符合条件，该源也会被计入；但它是一颗低于 $L_{\rm env}$ 的 M 型矮星，因此不符合条件（第3.5节）。尽管如此，这是样本中唯一性质尚未确定的关联。在恒星位置探测到致密成分的甚长基线干涉测量结果，将表明该辐射来自恒星；而未探测到则不能说明太多，因为角秒尺度源可能会被分辨掉。

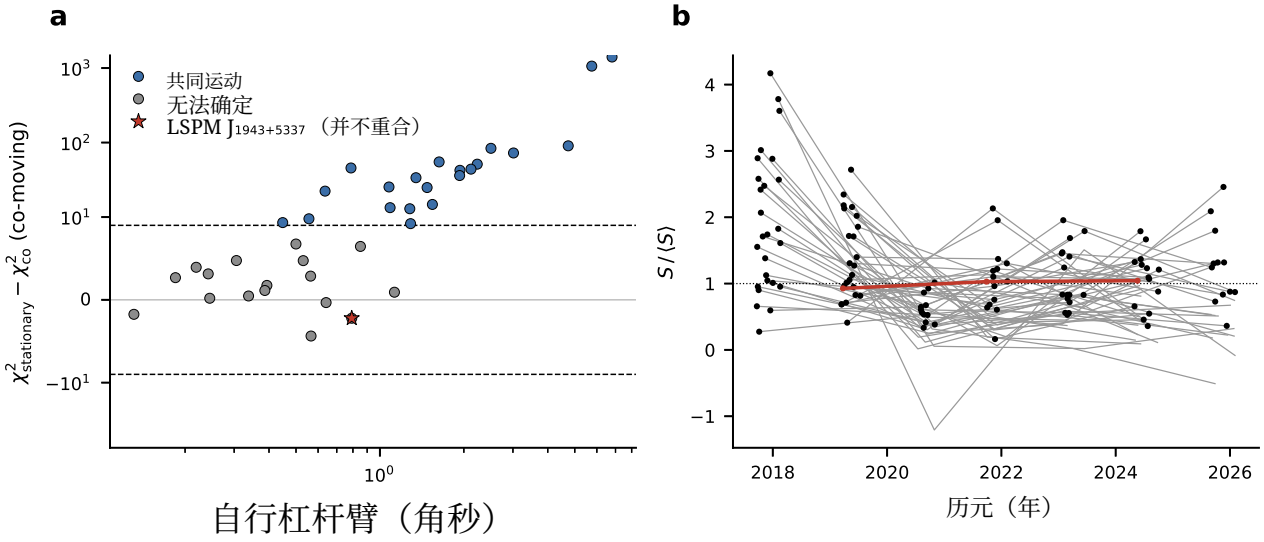


图5。 VLASS观测历元1.1–4.1中51个可靠关联的多历元行为。(a) χ^2 静止源与以恒定偏移量随恒星运动的源之间的差异，与在已探测历元范围内恒星的自行杠杆臂之间的关系；虚线表示 $|\Delta\chi^2| = 9$。蓝色：共同运动；灰色：无法确定；红色星号：LSPM J1943+5337。仅在一个历元中探测到的源未显示。(b) 各历元中峰值流量密度相对于每个源平均值的比例（点：探测结果）。LSPM J1943+5337 （红色）保持稳定；第1历元的超额反映了选择效应。

4.3. 已探测恒星的多历元行为

为检验这些可靠关联是否表现为恒星辐射源，我们在覆盖它们的每张 VLASS QL 图像中对其逐一测量，范围从历元 1.1（2017年）到历元 4.1（2025年–2026年）。对于每张图像，我们提取以恒星为中心的 $61'' \times 61''$ 裁剪图，并为最多六个紧致、孤立的参考分量提取裁剪图；这些分量位于 $0\farcs45$ （第1历元目录峰值流量密度> 4 毫央 波束$^{-1}$，去卷积长轴 $< 1\farcs5$，最近邻 $> 30''$）。参考源用于确定每张图像相对于校正后第1历元位置的天体测量参考系，并测量其相对于第1历元目录的流量标度（每半历元为 1.00–1.05，仅作检验；流量密度除以 $b_{\rm pk}$）。在恒星位置，如果外推位置 $3''$ 范围内存在 $\geq 5\sigma$ 峰值，我们就拟合二维高斯；否则记录强制峰值，其中 σ 是裁剪图中超出 $10''$部分的稳健均方根。位置误差由拟合误差、参考系配准误差和 $0\farcs1$系统误差下限按平方和开方合并得到。每颗恒星在每个半历元保留一张图像，共有 177 次独立测量（每颗恒星 3–7 次），其中 120 次为探测结果。

图5 总结了结果。51个源中有44个是变源（$p < 0.01$ 在恒定流量密度情况下），这符合耀发和回旋同步辐射源的预期；由于样本是在第1历元选择的，因此该历元的光变曲线存在偏高偏差。对于位置，我们将位于恒星运动轨迹上、允许存在恒定偏移的源，与静止源进行比较。21个源共同运动（$\Delta\chi^2 > 9$；自行杠杆臂为 $0\farcs4$–$6\farcs8$，中位数为 $1\farcs5$），17个源由于杠杆臂相较于位置误差过短而无法确定，另有12个源仅在一个历元中被探测到；没有任何源更支持静止源。因此，所有具有足够杠杆臂的源都会随其恒星运动。两个共同运动或无法确定的源G 9-38B和CD-38 11343B位于匹配恒星的盖亚位置 $1\farcs4$ 和 $2\farcs4$ 之间；二者均属于多星系统，辐射可能来自伴星。

4.4. 所有观测时期的强制探测

强制测光得到161个强制探测结果（合并图像中有114个，且至少在一个历元中有139个；图6）。其中90个是M型矮星，全部低于 $L_{\rm env}$（其中光度最高者在其最亮历元达到 4.5×10^9 瓦特 赫兹$^{-1}$），另有60个是属于排除类别或具有$\log L_X/L_{\rm bol} \geq -4$的AFGK型恒星，因此这些恒星均不计为可能的发射机。大多数是已知的自然辐射源：其中149个具有活动证据，包括在单个历元中探测到的耀斑星和活动双星，或低于第1历元目录阈值的持续辐射源。在这些恒星中，137个有2RXS或eRASS1对应源，另外12个仅依据SIMBAD天体类型得到鉴定；SIMBAD将其中96个列为X射线源、30个列为耀斑星、15个列为发射线星、9个列为BY Dra型变星、8个列为RS CVn型变星、4个列为年轻恒星，另有1个列为磁性化学奇特星（一颗恒星可能具有多个类型）。

表4列出了AFGK型恒星中不属于排除类别的11个强制探测结果。其中8个来自具有盖亚多重性证据的恒星，包括显著性最高的两个目标12 Sco B和V335 Peg（在单个历元中为16.6σ 和16.7σ ； V335 Peg在SIMBAD中是食双星和分光双星，但不在Gaia DR3食双星表中），且没有一个达到 $L_{\rm env}$。如果这些恒星在所有光度范围内都符合条件，那么在稳态检验中，AFGK型恒星将得到 $k = 7$ ，而不是 $b = 1.6$（$P\,(n \geq k \mid b) = 1 \times 10^{-3}$），在单历元检验中则得到 $k = 10$ ，而不是 $b = 2.8$ （$P = 6 \times 10^{-4}$）。这一显著超额——11个探测结果中有8个来自仅占恒星总数29%且具有多重性证据的恒星——正是未识别的活动伴星或M型矮星伴星会产生的结果，因为近距离双星在射电探测恒星中占主导地位（第4.1节）；这促使我们采用第3.5节中的多重性判据，否则它会被过度解读为一个发射机群体。

其余 3 个位于符合条件的恒星处的强制探测结果计入 k。只有 TYC 3573-1391-1 通过稳态检验（合并图像中为 7.8σ ），且其辐射与恒星位置偏离：在 4 个历元中，唯一亮到足以确定位置的强制探测结果拟合值为 1.44 毫央 $1\farcs8$，而恒星位置测得的值为 0.53 毫央；恒星位置处的辐射被排除（自由度为 8 时，$\chi^2 = 194$ ）。4 个独立星表将其位置记录在恒星以西 $1\farcs7$–$1\farcs8$ （第 4.5 节）。Gaia DR3 在射电位置处未列出任何源，而恒星在这 4 个历元中仅移动了 $0\farcs56$ ，幅度太小，无法区分静止源和共动源（$p = 0.05$ 和 0.06）。SIMBAD 中，除该恒星外，射电位置 $1'$ 范围内没有其他天体（最近的是一颗相距 $26''$ 的无关 Gaia恒星）；Gaia DR3 在 $6\farcs5$ 范围内也没有其他源。距离 $17''$、且位于其位置误差 2.6σ 范围内的 NVSS J202939+460047（1.4 GHz 下为 2.5 ± 0.5 毫央）很可能是同一源。因此，该辐射要么来自背景源（同一银纬处的对照位置 $b = 4^\circ$ 已将此情况纳入考虑），要么来自一颗在投影上距恒星 $\sim$170 au 的暗弱伴星；Gaia 可能无法探测到如此接近一颗 $G = 11$ 恒星的伴星。无论哪种情况，都计入 k。另外两颗恒星 1 Boo 和 TYC 7253-259-1 仅在一个历元中达到 5.0–5.5σ ，这符合噪声峰或未探测到的伴星耀发的预期，但也可能是占空比较低的发射机所致；SIMBAD 将 1 Boo 列为双星，但没有Gaia多重性证据，这是符合条件的恒星中仍存在残余多星系统的一个例子。

在稳态检验中， $k = 1$ 与 $b = 1.3$进行比较，得到 $\mu_{95} = 4.0$ ($P(n \geq k \mid b) = 0.71$)；在单历元检验中， $k = 3$ 个恒星历元与 $b = 2.3$进行比较，得到$\mu_{95,\ \rm snap} = 5.8$ ($P = 0.39$)：在符合条件的恒星中，强制探测相对于与背景源和噪声的偶然重合并无超额。八个对照角度给出了0–3个稳态检验探测（秩概率为0.67）。在其他阈值下也一致：在 $\geq 4\sigma$ 处，符合条件的恒星有9个合并探测，而预期值为4.6；在 $\geq 7\sigma$ 1 处，预期值为0.5；负尾部也一致（在-3σ以下为48个，而预期为51.9个）。在同一批恒星周围，Epoch-1目录在距离恒星 $1''$–$2\farcs5$ 处有4个分量，而在距离对照点 $14''$–$3'$ 处周围有3.5个。

根据我们的判据，M型矮星的强制探测结果中包括没有活动证据的稳定发射源，这说明为何不能仅凭连续谱流量逐一搜寻M型矮星。G 133-48（2MASS J01534955+4427284）是一颗距离我们24秒差距的M型矮星，具有稳定的 $L_\nu \approx 4.6 \times 10^7$ 瓦特赫兹$^{-1}$，处于我们可靠关联中18颗自然辐射M型矮星的范围内（5.3×10^6–1.5×10^9 瓦特赫兹$^{-1}$）。在独立星表中，它被探测到距该恒星 $0\farcs2$ （第4.5节）。我们使用每幅图像恢复波束（取自其头信息），对其三个历元各自的Quick Look图像裁剪拟合椭圆高斯（拟合信噪比为 = 4.5–6.9）；通过将同一源注入该历元的另外300张裁剪图并重新拟合，校准位置误差。对LSPM J1943+5337 采用相同流程后，也能恢复其相对于该恒星的偏移（第4.2节）。恒星位置上的辐射拟合良好（6个自由度下为$\chi^2 = 0.9$ ），而在恒星 $1\farcs34$ 运动期间，静止源模型的拟合效果较差（4 个 $p = 0.051$下为$\chi^2 = 9.5$ ）。该恒星没有X射线对应体，也没有SIMBAD活动类型记录，但它是快速自转星，光度周期为0.216天（E. R. Newton等，2016年），且$v \sin i = 47.6 \pm 2.9$ 千米 秒$^{-1}$（A. Y. Kesseli等，2018年）；其亮度还超出正常值0.7星等，这表明它可能有一颗未分辨伴星：恒星磁辐射是自然的解释，但连续谱流量无法将其与光度相同的发射机区分开来。LSPM J1943+5337很可能是第4.2节所述的背景源。

4.5. 与逐历元星表交叉核对

我们仅根据第1历元星表定义可靠关联，而不使用逐历元星表的并集，并依靠对历元2–4进行的强制测光。第1历元交叉匹配仅用于确定哪些探测结果被标记为可靠，并为混淆 veto 提供模型；未解释辐射的上限和检验则使用强制测光，它在每个历元测量每颗恒星（包括未探测到的恒星），并采用一种估计量，其噪声、假阳性率和恢复率均在对照位置进行了校准。因此，使用并集进行交叉匹配只会改变恒星在可靠关联和强制探测之间的归类，不会改变 μ_{95} 或总体上限。此外，这还会合并异质星表（已发表的第1历元星表、历元3和4的临时列表，以及历元2没有完整列表），而每份星表都需要各自的位置误差尺度、通量偏差和偶然对齐校准；并且由于

表4. 在 $\geq 5\sigma$ 处对已知射电辐射源类别之外、且没有测量证据表明 $\log L_X/L_{\rm bol} \geq -4$ 的 AFGK型恒星进行的强制探测（任一历元或合并图像）。

Name	Gaia DR3	k	d (pc)	$G_{BP}-G_{RP}$ (星等)	$S_{\rm coadd}$ (毫央)	SNR 半历元：信噪比	$L_{\nu,\max}$ (瓦特 赫兹$^{-1}$)	多星性	星表
TYC 7253-259-1	6180509689006780672	Y	74.8	1.22	0.28 ± 0.14	2.0 1.1:-1.8 , 2.1:5.0 , 3.1:0.7 , 4.1:-1.5	8.2×10^8	—	—
TYC 3573-1391-1	2071061615589030400	Y	93.5	1.13	0.53 ± 0.07	7.8 1.1:3.3, 2.1:4.3, 3.1:2.9, 4.1:5.5	8.3×10^8	—	SE3.1（1.″7）, SE2.1（1.″8）,E1 (1.″8) QL4.1 (1.″8)
1 Boo	1249218214732128640	Y	96.8	0.03	0.47 ± 0.10	4.7 1.2:2.4 , 2.2:-0.1 , 3.2:5.5	1.0×10^9	SIMBAD	—
del Cap	6838311796136238976	N	11.6	0.69	0.58 ± 0.10	5.9 1.2:1.2, 2.2:7.3, 3.2:1.3	1.9×10^7	SIMBAD；RUWE 3.9； $\Delta M_G = -1.37$	—
HD 317101A	4050315620888089472	N	33.6	1.64	0.36 ± 0.07	4.9 1.1:-0.4, 2.1:0.0, 3.1:9.6 , 4.1:1.1	2.0×10^8	SIMBAD；盖亚 NSS；RUWE 19.7	QL3.1（0.″4）
109 室女座	3655377057091634304	N	41.2	0.06	0.48 ± 0.09	5.1 1.2:1.7 , 2.2:3.8 , 3.2:3.5	1.4×10^8	RUWE 3.7; $\Delta M_G = -0.57$	—
71 金牛座	3312759303913978624	N	46.7	0.38	0.39 ± 0.07	5.6 1.1:1.8 , 2.1:0.2 , 3.1:2.7 , 4.1:5.9	2.0×10^8	SIMBAD；RUWE 5.0； $\Delta M_G = -1.31$	—
V335 Peg	2717981134566374272	N	63.3	0.65	0.89 ± 0.07	12.5 1.1:1.2, 2.1:1.6, 3.1:3.8、4.1:16.7	1.0×10^9	SIMBAD；盖亚 NSS；RUWE 5.9	QL4.1（0.″2）
V2082 Cyg	2051422413763933568	N	87.6	0.50	0.18 ± 0.07	2.7 1.1:3.0, 2.1:-3.1, 3.1:5.1, 4.1:-0.2	5.8×10^8	SIMBAD; $\Delta M_G = -0.95$	—
12 Sco B	6042159790157494784	N	94.8	0.69	1.00 ± 0.08	13.0 1.1:3.9 , 2.1:16.6 , 3.1:3.3 , 4.1:2.6	2.9×10^9	SIMBAD；RUWE 4.1； $\Delta M_G = -0.92$	—
HD 114993	6194009389692803584	北	95.1	0.36	0.51 ± 0.09	6.0 1.1:5.5 , 2.1:1.4 , 3.1:2.2 , 4.1:2.7	9.4×10^8	SIMBAD；RUWE 5.9； $\Delta M_G = -0.59$	—

NOTE—k：Y = 合格恒星，计入 k；N = 盖亚多重性证据（RUWE > 1.4、非单星解或 $\Delta M_G < -0.5$），因此仅在高于$L_{\rm env} = 10^{10}$ 瓦特赫兹$^{-1}$时才符合条件，但没有恒星达到此条件（第3.5节）。 $S_{\rm coadd}$，信噪比：对未 veto 历元进行逆方差合并。稳态检验中（合并图像信噪比 ≥ 5），计入的强制探测结果为 $k = 1$，而在采用相同选择效应和 veto 条件的空白控制位置，预期为 $b = 1.3$；单历元检验中， $k = 3$ 个恒星历元对应 $b = 2.3$。$L_{\nu,\ \max}$：最亮历元的谱光度。多星性：SIMBAD 双星类型、盖亚非单星解（NSS）、RUWE，以及相对于主序脊线的超光度 ΔM_G（星等）。星表：独立的逐历元分量星表；若某个 $\geq 5\sigma$ 分量在该历元距恒星位置不超过 4″，则予以记录，并列出间距（E1: Epoch-1 QL；QL：NRAO QL 列表；SE：单历元列表；Med：QL 中值叠加；第4.5节）。

高自行恒星在每个历元采样到的背景区域都不同，因此每颗恒星的偶然试验次数会随历元数增加。第1历元的天体测量精度是四个历元中最差的（第2.2节），所以从某种意义上说，完整的较晚历元星表更适合作为主星表。为检验这些选择是否会改变结果，我们使用第2.2节的8份独立分量星表重复了主要步骤。每个恒星—历元都与其所属半历元的星表进行匹配，并根据自行和视差将恒星的位置推算至各分量的观测日期；匹配定义为 $\geq 5\sigma$ 内的一个分量 2.″5，并以相同方式在八个对照位置统计偶然匹配。

流量标度和天体测量。 对于目录信噪比为 > 10的致密源匹配，我们在 QL 图像标度上的流量密度与 QL 星表峰值一致，并表明 $\kappa = 0$在第 3.1–4.1 半历元中为 0.83–0.87，涵盖所采用的 0.861。SE星表提供了独立的流量标度。我们校正后的流量密度为 SE 峰值的 1.13 ± 0.01 倍（$N = 28$；各半历元为 1.07–1.16）；对于在 QL 和 SE 第3历元星表中均被探测到的 17 个亮源，峰值一致，SE/QL $= 0.975 \pm 0.006$。因此，对于这些微弱的致密源，QL 峰值与 SE 峰值一致，而不是像亮校准源那样低 ∼8%（A. E. Kimball 等， 2026）；如果 SE 标度是正确的，我们后期历元的流量密度和上限将保守 ∼13%（第5.3节）。星表位置相对于恒星的位置散布，在扣除星表误差后为 0.″05–0.″19（SE）和 0.″10–0.″21（QL），与天体测量校正后的 Epoch-1 位置误差相当（第3.2节）。

阈值以下通量标度。快照巡天可能无法完整检出微弱源（R. L. White等（2007）），而我们的限值基于远低于星表阈值的强制测量通量密度。因此，我们对 10,830 个 VLA-COSMOS 3 GHz 源中的 6,203 个采用相同的估计量和校准（V. Smol˘ci´c等（2017年））；这些源在 0.″75处未解析、由单个分量构成，且在 8″范围内没有其他星表源，位于半历元 1.1、2.1 和 3.1 的 QL 图像中（共 18,608 次测量）。我们的流量密度与 COSMOS 数值之比的逆方差加权比

对于低于 0.5 毫央的源，该比值为 1.10 ± 0.04；对于 20–50 μ央的源，该比值为 1.10 ± 0.07，其单个信噪比为 $\sim$0.2；在 0.05 至 1 毫央的各个区间内，该比值为 1.03–1.12。因此，该估计量表明，微弱通量没有损失，且结果不依赖于流量密度。$\sim$10% 的超额（在 2.4σ 处）可能源于流量标度存在残余差异，或 VLASS波束内有更微弱的邻近源；我们不对此进行校正。如果这项超额是测量结果存在偏差所致，我们的限值就会相应地偏保守。

探测结果。在强制信噪比 ≥ 5未被否决的恒星历元中，90%（69/77）有 SE 匹配，67%（85/127）有 QL 匹配；未匹配上的大多略高于我们的阈值，此时 PyBDSF 的岛状源探测及其局部均方根与我们的估计量有所不同。反过来，50 个星表匹配的强制信噪比 < 5；其中 37 个距恒星超过 $1\farcs5$，其数量与根据对照位置预期的 52 个偶然匹配相符。161 个强制探测中，有 70 个至少在一个历元拥有目录对应源。独立星表在距恒星 $0\farcs2$ 处探测到 M 型矮星 G 133-48，且其裁剪图位置更支持它与恒星共同运动（第4.4节）。在合格恒星处唯一一次稳态检验探测到的 TYC 3573-1391-1，在四个星表中均有探测结果，且始终位于恒星以西 $1\farcs7$–$1\farcs8$，证实其辐射与恒星并不重合（第4.4节）。自行较大时，星表位置会随恒星移动：在匹配的历元之间，BD+44 2051B 和 G 272-61A 分别移动了 $23''$ 和 $8''$；与固定的天空位置相比，相对于移动恒星的恒定偏移拟合效果好得多（$\chi^2 = 32$ 在自由度各为 2 时，分别为 2 和 14452、964）。

混淆剔除。将第1历元的混淆剔除替换为各历元自己的目录（历元2在可用时采用SE，否则采用第1历元），并在恒星和对照位置处均排除距离测量位置 $2\farcs5$ 以内的分量，会增加8个强制探测（其中1个来自符合条件的恒星）；这些探测对应的第1历元分量并非可靠关联，或位于恒星后续位置附近。这也会抬高背景：稳态检验中为 $k = 2$，而 $b = 3.0$（$\mu_{95} = 4.4$）；单历元检验中为 $k = 4$，而 $b = 4.9$（$\mu_{95,\ \mathrm{snap}} = 5.5$）。同时采用两种剔除标准后，结果分别为 $k = 1$，而 $b = 1.3$；以及 $k = 3$，而 $b = 2.1$，使 μ_{95} 变化 <1%，并使$\mu_{95,\ \mathrm{snap}}$ 变化 +1%。不进行背景扣除时，主要极限仅通过 k和恒星数量受剔除标准影响：在高光度下，自有历元剔除和组合剔除分别给出 $f < 1.9 \times 10^{-4}$和 $f < 1.5 \times 10^{-4}$（$\mu_{95} = 6.3$ 和4.7），而采用的剔除标准对应 1.5×10^{-4}（低于 L_{env}），因此最不严格的变体会使极限放宽33%。所有变体均未发现超额；最大的超额出现在同时采用两种剔除标准的单历元检验中，为 $k = 3$，而 $b = 2.1$，其 $P(n \geq k \mid b) = 0.36$。自有历元变体的背景最高，稳态检验中为$b = 3.0$，因为其剔除标准豁免了恒星和对照位置处距离 $2\farcs5$ 以内的所有分量，因此其b 包含目录中记录的所有偶然重合；其 $k = 2$ 与之相符（$P(n \leq k \mid b) = 0.4232$；八个对照角度给出0–5，而对恒星进行自助法得到 ± 0.6，对应 b）。无背景上限不受 b影响。资格标准的影响大于剔除标准。将AFGK型恒星从$\log L_X / L_{\mathrm{bol}} \geq -3.5$ 而非 -4 中排除（33,398颗符合条件的恒星），稳态检验得到 $k = 2$，而 $b = 1.3$；单历元检验得到 $k = 4$，而 $b = 2.3$。若从 -4.5 中排除（31,612颗恒星），则分别得到 $k = 1$，而1.3；以及 $k = 3$，而2.1，因此两种选择都不会产生超额；若将AFGK多星系统在所有光度下都视为符合条件（46,650颗恒星），则会产生第4.4节所述的超额。

仅在星表中发现的恒星，以及中位数堆叠。12 颗既非已解释的可靠关联、也非强制探测的恒星，在 $1''$范围内有一个 $\geq 5\sigma$ 目录分量，其中 4 颗出现在两个或更多历元中。这些恒星中有 3 颗具有X射线活动（BD+40 883A、BD$-$07 2388 和 V376 Cep，见第 3.2 节）；第 4 颗位于 2MASS J14223872+0646143附近，其静止源身份已根据 NVSS 和 FIRST 的位置确认为背景源。单历元星表中发现的 8 颗恒星里，4 颗有活动证据，0 颗位于符合条件的恒星位置；其余的恒星在强制测光中低于阈值，或被混淆 veto，这与偶然匹配的预期相符。BD+40 883A（15 秒差距，$0\farcs65$年$^{-1}$）在三个历元中均被探测到，位置距其移动位置在 $0\farcs6$ 范围内，流量为 $\sim$1毫央，且为 5–6σ；但强制测光仅为 1.3–4.4σ。在这个低银纬天鹅座场中，我们的切图噪声估计（$b \approx -4°$）为 $\sim$0.24 毫央，高于星表均方根噪声 0.16–0.18 毫央，这可能是弥散银河系辐射所致。在 QL 中值叠加图像中（均方根噪声为 $\sim 94\,\mu$央），我们测试了在历元 1–3 期间移动距离小于 $1''$ 的 152,511 颗恒星。其中 46 颗在 $2\farcs5$范围内有一个 $\geq 5\sigma$ 分量。它们包括 28 个接受测试的可靠关联中的 20 个（其余大多是强变源，中位数堆叠会抑制耀斑）、11 个不计入统计的强制探测和 0 个计入统计的强制探测、6 颗仅在星表中发现的恒星，以及另外 9 颗恒星。其余 9 个匹配均位于距恒星 $1\farcs9$–$2\farcs3$ 的位置，少于预期的 22 个偶然匹配。因此，更深的中位数堆叠并未发现合并测试遗漏的稳定发射源。

4.6. 单颗恒星的极限及恒星群体的极限

仅根据第1历元目录，95%完备性极限的中位数为1.09毫央。合并所有历元后，稳定极限的中位数降至0.54毫央（第5至第95百分位数为0.45–0.69毫央），在中值距离处对应 $L_\nu < 4.0 \times 10^8$ 瓦特赫兹$^{-1}$（等效全向辐射功率$< 8.0 \times 10^{17}$ 瓦特，覆盖2 GHz），高于卡尔达肖夫 I 型文明的功率（N. S.Kardashev 1964），在 $\sim 10^{16}$瓦特（按照R. H. Gray 的2020年行星尺度定义）；单快照极限的中位数为

1.12毫央（如果发射机恰好在每颗恒星噪声最低的历元开启，则为0.91毫央）。图6 展示了全历元上限与距离的关系，表5 列出了十二颗最近恒星的两组上限。最严格的上限对应巴纳德星，来自3个历元，为 $L_\nu < 2.3\times10^{5}$ 瓦特赫兹$^{-1}$（等效全向辐射功率 $< 4.5\times10^{14}$ 瓦特），而第1历元的上限为 5.1×10^{5} 瓦特赫兹$^{-1}$。这些上限约束了每颗恒星位置处的总发射，因此，对于未探测到信号的恒星，无论其是否符合资格条件，这些上限都约束了发射机；资格条件只决定能否将某次探测识别为此类信号（第3.5节）。

图7展示了总体上限。将符合条件的恒星上的1个稳态检验探测计为一个可能的发射机（$\mu_{95} = 4.7$，未进行背景扣除），则在符合条件的 AFGK 型恒星中，宿主恒定的2–4 GHz发射机且 L_ν 高于 10^{7}, 10^{8}, 和 10^{9} W Hz^{-1} 的比例分别低于 5.3×10^{-2}、 1.3×10^{-3}和 1.5×10^{-4}，并且 $f < 1.5\times10^{-4}$ 可达$\sim 0.8\,L_{\rm env}$；这里恒星有效数是稳态检验中的32,666颗符合条件的恒星。随后，M型矮星和 AFGK多星系统在一个窄过渡区间内加入进来：在 $L_{\rm env}$ 本身，即 $f < 4.0\times10^{-5}$ 处，包络恒星上的发射机以 ≈ 0.5的概率被探测到；而在 $\sim 1.1\times10^{10}$ W Hz^{-1}以上为 $f < 2.3\times10^{-5}$，此时恒星有效数与稳态检验中排除类别之外的全部205,981颗恒星相差不到0.1%；若完全没有探测结果，则该值将为 1.5×10^{-5}。如果不采用多重性判据，在排除类别之外的46,206颗 AFGK 型恒星中，7个稳态检验探测将给出 $\mu_{95} = 13.1$，并且低于 $L_{\rm env}$的为 $f < 2.8\times10^{-4}$，约为采用的限值的两倍；由于该判据是在检查这些探测结果之后才采用的（第4.4节），因此采用的限值以该判据为条件。反过来，将符合条件的恒星限制为稳态检验中活动性测量值低于 X射线阈值，或在名义巡天深度下低于该阈值的20,421颗恒星（表1），会移除 TYC 3573-1391-1，并留下 $k = 0$，从而在 10^{9} W Hz^{-1} 以上得到 $f < 1.47\times10^{-4}$（$N_{\rm eff} = 20{,}371$），而采用该选择效应时为 1.46×10^{-4}：剩余的 X射线不完备性几乎不会改变限值，因为较小的样本由较小的 k抵消。对于 M型矮星，将每个探测结果都计为可能的发射机，所得限值不依赖任何资格条件决定。在拥有合并图像的159,937颗 M型矮星中，有72颗在合并图像中达到 5σ（其中16颗为可靠的自然关联源），因此在未进行背景扣除的情况下为 $\mu_{95} = 87.6$；M型矮星中宿主稳定发射机且高于 10^{7}, 10^{8}, 和 10^{9} W Hz^{-1} 的比例分别低于 1.6×10^{-1}、 4.9×10^{-3}和 5.5×10^{-4}（恒星有效数分别为563、18,061和159,550；图7）。这些限值比 $L_{\rm env}$低三个数量级，并且在 2.9×10^{6} W Hz^{-1}处达到 $f < 1$；由于 k 中计入了自然辐射源，因此它们弱于符合条件的 AFGK 型恒星对应的限值。扣除控制位置背景（$\mu_{95} = 4.0$）后，将得到 4.5×10^{-2}、1.1×10^{-3}、 1.2×10^{-4}、 1.2×10^{-4}（远低于 $L_{\rm env}$）、 3.4×10^{-5}（位于 $L_{\rm env}$）以及 2.0×10^{-5}。第1历元目录分析给出高于 $L_{\rm env}$的 $f < 1.4\times10^{-5}$，其中有 $k = 0$ 个无法解释的可靠关联源，且未进行背景扣除。对于一个发射机在随机比例为 δ 的快照中处于开启状态，且各快照之间相互独立的情况，按宿主恒星计数，在过渡区间之外高于 $\sim 1.1\,L_{\rm env}$的为 $f < 3.8\times10^{-5}$、 5.3×10^{-5}和 1.2×10^{-4}；未进行背景扣除时分别为 $\delta = 1$、0.3和0.1（扣除控制位置背景后为2.9×10^{-5}、 4.2×10^{-5}和 9.7×10^{-5}），并且 $f\delta < 1.1\times10^{-5}$ 为 $\delta \to 0$（8.5×10^{-6} 背景扣除后）。

4.7. 堆叠辐射

表6和图8展示了全历元堆叠结果。M型矮星的平均值在六个壳层中的4个超过 4σ，并在20–40 pc处最为显著，为 $\langle L_\nu\rangle = (8.1\times10^{5} \pm 9.2\times10^{4})$ W Hz^{-1} (8.8σ，9,861颗恒星，$N_{\rm eff,\ w} = 3$，650)；同一壳层的Epoch-1图像堆叠给出 $\langle L_\nu\rangle = (1.2\times10^{6} \pm 1.9\times10^{5})$ W Hz^{-1} (6.3σ)，数值更高，这是因为它仅排除了星表收录的探测，因此保留了全历元堆叠排除的强制探测，包括Epoch-1耀斑。按活动证据将干净恒星分组（表6）表明，该信号大部分来自其中少数具有活动证据的恒星：在20–40 pc处，2,216颗具有活动证据的M型矮星（占干净恒星的22%）给出 $\langle L_\nu\rangle = (1.9\times10^{6}\pm1.7\times10^{5})$ W Hz^{-1}(11.3σ)，而7,645颗不具活动证据的恒星为$(4.3\times10^{5}\pm1.1\times10^{5})$ W Hz^{-1} (4.1σ)。没有活动证据的M型矮星在任何壳层中的最高值仅为4.2σ；它们较弱的信号可能来自活动性未被收录的恒星。包含已探测恒星的中位数堆叠显示出相同的超额，即 $\Delta\mathrm{med}(S/\sigma) = 0.084\pm0.014$ (5.8σ)，但中位数偏移无法区分每颗恒星都存在的微弱辐射与少数恒星产生的较强辐射：0.084的偏移既可能由每颗恒星都达到 σ 的相应比例产生，也可能由6–10%的恒星达到或远高于 1σ产生。因此，堆叠信号是集中于具有活动证据恒星中的总体平均辐射；如果射电辐射能够示踪磁活动，这正是预期结果（M. G¨udel & A. O. Benz 1993年；M. G¨udel 2002年；J. R. Callingham 等，2021；T. W. H. Yiu 等，2024），而不是所有M型矮星共有的水平。AFGK型恒星的平均值最高分别达到4.0σ (60–80 pc)、具有活动证据恒星的6.3σ，以及不具有活动证据恒星的1.9σ。在干净恒星超过1000颗的每个壳层中，权重最高的十颗恒星所占权重最多为4.6%，因此没有任何堆叠结果由少数附近恒星主导。$\langle L_\nu\rangle$ 随距离上升，反映了已探测恒星的排除；这种排除使每个壳层的上限截断在与d^2成正比的光度处。图8c展示了第3.4节的注入—恢复测试。

表5。 样本中十二颗最近恒星位置处稳定的2–4 GHz辐射的95%限值（完备性阈值，或具有辐射的恒星的置信上限；第 3.6节）。

Star	Act.	符合条件	d (pc)	$G_{BP}-G_{RP}$ (星等)	$S^{\rm E1}_{\rm lim}$ (毫央)	$L^{\rm E1}_{\nu,\rm lim}$ (瓦特 赫兹$^{-1}$)	$N_{\rm ep}$	$S_{\rm coadd}$ (毫央)	$S_{\rm lim}$ (毫央)	$L_{\nu,\ \rm lim}$ (瓦特 赫兹$^{-1}$)	等效全向辐射功率$_{\rm lim}$ (W)
巴纳德星	A	L	1.83	2.83	1.27	5.1×10^{5}	3	$+0.04\pm0.09$	0.57	2.3×10^{5}	4.5×10^{14}
沃尔夫359	A	L	2.41	4.18	1.28	8.9×10^{5}	4	$+0.18\pm0.09$	0.59	4.1×10^{5}	8.2×10^{14}
拉兰德21185	A	L	2.55	2.22	1.17	9.0×10^{5}	3	$+0.02\pm0.11$	0.75	5.8×10^{5}	1.2×10^{15}
UV Cet	A	L	2.67	3.83	1.12	9.6×10^{5}	4	$+2.90\pm0.08$	3.03	2.6×10^{6}	5.2×10^{15}
BL Cet	A	L	2.72	3.75	1.12	9.9×10^{5}	4	$+1.11\pm0.08$	1.24	1.1×10^{6}	2.2×10^{15}
Ross 154	A	L	2.98	2.83	1.20	1.3×10^{6}	3	$+0.14\pm0.10$	0.63	6.7×10^{5}	1.3×10^{15}
Ross 248	A	L	3.16	3.53	1.01	1.2×10^{6}	3	-0.20 ± 0.08	0.53	6.4×10^{5}	1.3×10^{15}
eps Eri	A	L	3.22	1.14	1.11	1.4×10^{6}	3	-0.11 ± 0.10	0.66	8.2×10^{5}	1.6×10^{15}
拉卡伊9352	A	L	3.29	2.10	0.95	1.2×10^{6}	4	-0.06 ± 0.07	0.47	6.1×10^{5}	1.2×10^{15}
罗斯128	A	L	3.37	3.03	1.39	1.9×10^{6}	4	$+0.09\pm0.08$	0.56	7.7×10^{5}	1.5×10^{15}
天鹅座61 B	A	E	3.50	1.72	0.87	1.3×10^{6}	4	$+0.03\pm0.07$	0.43	6.3×10^{5}	1.3×10^{15}
天鹅座61 A	A	E	3.50	1.46	0.87	1.3×10^{6}	4	$+0.03\pm0.07$	0.43	6.3×10^{5}	1.3×10^{15}

NOTE—活动性：A = 活动证据（X射线对应体或SIMBAD活动类型；第3.5节），在这些距离处几乎每颗恒星都具备该证据，且不用于筛选技术特征宿主。资格条件：技术特征资格（第3.5节）；E= 在任何光度下均符合资格，L = 仅在高于 $L_{\rm env}=10^{10}\,{\rm W\,Hz^{-1}}$ 时符合资格（M型矮星，以及具有盖亚多重性证据的AFGK型恒星），X = 不符合资格（已知射电发射源类别或$\log L_X/L_{\rm bol}\geq-4$）。每个上限都约束恒星位置处的总发射，无论是自然产生的还是人工产生的，也不论其是否符合资格。E1：Epoch-1目录分析。 $N_{\rm ep}$， $S_{\rm coadd}$（测量得到的合并通量密度及其误差）， $S_{\rm lim}$， $L_{\nu,\ \rm lim}$：全纪元合并强制测光。EIRP$_{\rm lim}=L_{\nu,\ \rm lim}\times2$GHz（稳定的填充整个频带的信号）。这些上限适用于恒星周围约一个波束半径内的辐射； $1''$ 对应投影距离 $d$au，而位于更大分离距离处行星上的发射机将处于测量位置之外。

表6。 全历元合并强制测光的堆叠。

壳层 (pc)	分类	$N_{\rm all}$	$N_{\rm clean}$	$\langle L_\nu\rangle$ (10^5 瓦特 赫兹$^{-1}$)	SNR	$\langle L_\nu\rangle_{\rm act}$ (10^5 瓦特 赫兹$^{-1}$)	$\langle L_\nu\rangle_{\rm no\ 作用}$ (10^5 瓦特 赫兹$^{-1}$)	$N_{\rm eff,w}$	前10名 (%)	Δ 中值 (S/σ)
0–10	AFGK	44	44	0.0 ± 0.4	0.1	0.0 ± 0.4	⋯	9	76.2	$+0.157\pm0.156$
0–10	M	165	152	0.6 ± 0.2	2.7	0.7 ± 0.2	-0.8 ± 0.8	9	65.4	$+0.299\pm0.114$
10–20	AFGK	318	312	0.6 ± 1.6	0.4	0.3 ± 2.1	1.5 ± 2.5	157	15.3	$+0.075\pm0.082$
10–20	M	1,229	1,194	3.5 ± 0.7	4.8	7.0 ± 0.9	0.6 ± 0.9	599	4.6	$+0.168\pm0.042$
20–40	AFGK	2,713	2,694	5.7 ± 2.0	2.8	8.6 ± 3.1	3.2 ± 2.2	1,134	3.8	$+0.060\pm0.027$
20–40	M	9,897	9,861	8.1 ± 0.9	8.8	19.0 ± 1.7	4.3 ± 1.1	3,652	2.7	$+0.084\pm0.014$
40–60	AFGK	7,732	7,697	2.0 ± 3.8	0.5	16.6 ± 5.7	-3.8 ± 4.1	4,011	2.3	$+0.013\pm0.016$
40–60	M	25,641	25,627	9.9 ± 1.8	5.4	44.0 ± 4.3	4.1 ± 2.2	14,156	0.9	$+0.028\pm0.008$
60–80	AFGK	14,234	14,206	17.3 ± 4.3	4.0	50.8 ± 10.1	8.1 ± 4.3	7,971	1.2	$+0.030\pm0.012$
60–80	M	47,527	47,512	4.1 ± 2.1	1.9	41.7 ± 10.7	0.6 ± 2.2	29,033	0.4	$+0.009\pm0.006$
80–100	AFGK	23,232	23,210	14.6 ± 5.0	2.9	75.0 ± 12.0	1.7 ± 5.5	14,584	0.7	$+0.019\pm0.008$
80–100	M	75,482	75,464	14.9 ± 2.8	5.4	63.6 ± 11.5	11.9 ± 2.9	46,937	0.2	$+0.015\pm0.005$

NOTE—$\langle L_\nu\rangle$：干净恒星（无可靠关联、无强制探测、且不存在预测星表污染的历元）的逆方差加权平均光谱光度 $\geq0.5\sigma$，减去对照位置处的平均值；误差取形式误差与八个对照位置间散布中的较大值。$N_{\rm eff,\ w}=(\sum w)^2/\sum w^2$；前 10：权重最高的十颗恒星所占的权重比例。$\langle L_\nu\rangle_{\rm act}$ 和 $\langle L_\nu\rangle_{\rm no\ act}$：有活动证据和无活动证据的干净恒星的相同平均值（第3.5节）；⋯：少于十颗恒星。对照位置采用与恒星相同的筛选条件。 $\Delta\,{\rm med}(S/\sigma)$：壳层内所有未 veto 恒星（包括已探测恒星）的中位数 S/σ 减去对照位置处的中位数；误差为自助法误差。

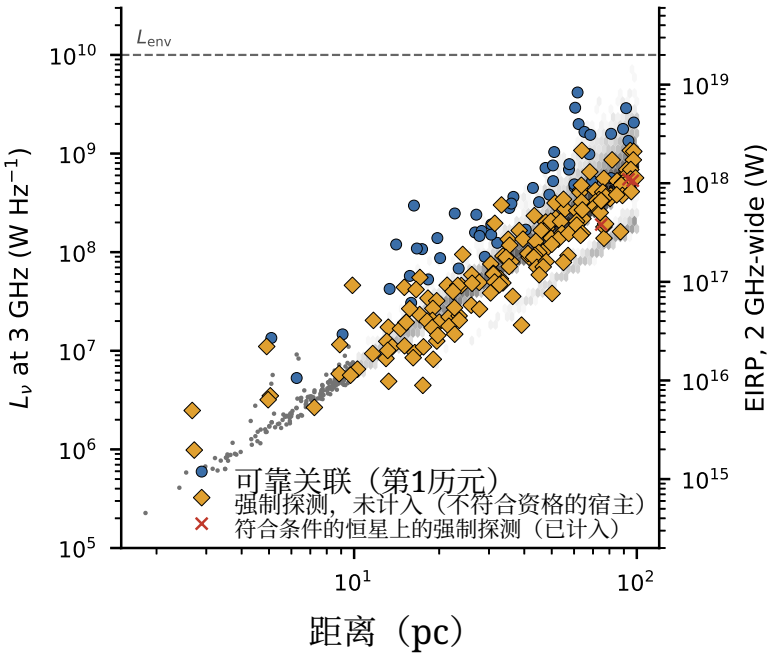


图6。 样本恒星位置处3 GHz 光谱光度随距离变化的全历元95%限值（完备性阈值，或对存在辐射的恒星给出的置信上限；第 3.6 节）。彩色符号表示测量光度，而非限值：可靠关联的第1历元目录通量密度（蓝色）；以及未计入（橙色：排除恒星，以及低于 $L_{\rm env}$ 的 M型矮星和 AFGK多星系统，虚线）和已计入（红色：符合条件的恒星）的强制探测对应的全历元合并通量密度；对于仅在单个历元中发现的47个强制探测，合并图像的通量密度低于 5σ。右侧纵轴表示填满2 GHz频带的稳定信号的等效全向辐射功率。

将符合条件的 AFGK 型恒星的全部堆叠信号都视为可能由人工产生，并假设每个宿主的光度相同（光度更高的宿主会被单独检测到，并从净堆叠样本中剔除，因此这些是针对具有共同光度的发射器群体的近似限值），均值堆叠在 $L_T = 1.4 \times 10^5$ 瓦特/赫兹处达到 $L_T\, f < 1$，比单独检测达到 $f < 1$（1.4×10^6 瓦特/赫兹）的光度暗 10 倍；在 10^6 瓦特/赫兹处给出的限值为 $f < 0.30^{-1}$（图7）。这些限值只涵盖少数恒星：在 10^6 瓦特/赫兹处，恒星有效数为 77，且 10 秒差距内的恒星占权重的 37%，因此这些限值约束的是最近的恒星，而非整个恒星群体；其中已计入宿主抽样方差。在对照位置的测量中注入光度为 $L_T = 1.5\times10^5$–10^7 瓦特/赫兹、略高于 $f < 1$ 交点的发射器，并令 $f = 0.1$–1 的发射器具有此光度；随后像处理真实恒星一样，剔除其合并图像或任一单个历元达到 5σ 的伪星，再应用相同的选择效应和估计量。每种情况下的 200 次试验中，该限值至少有 0.88 的试验覆盖了注入的 f。这些试验将 25 组随机宿主分配与仅有的 8 个噪声实现相结合，每个对照角度对应一个噪声实现；覆盖不足主要源于其中一个实现，其均值与其他七个相差在 1.3σ 以内。8 个噪声实现不足以验证 95% 的覆盖率，因此我们认为堆叠限值，尤其是接近 $f = 1$ 时的限值，只能视为近似值。合并的符合资格恒星的中位数堆叠可直接限制该比例，不受发射器是否被单独检测到的影响：在 10^7 瓦特/赫兹处为 $f < 0.084$，在 10^9 瓦特/赫兹处为 $f < 0.016^{-1}$。在高于 $\approx 8.3\times10^6$ 瓦特/赫兹时，单体限值比均值堆叠更严格；在 10^7 瓦特/赫兹及以上时，也比中位数堆叠更严格。我们没有根据 M 型矮星的堆叠推导发射器限值：在这些远低于 $L_{\rm env}$ 的光度下，M 型矮星上的发射器无法与堆叠检测到的自然辐射区分开来。

5. 讨论

5.1. 与窄带搜索的比较

表7 比较了我们对一颗位于50秒差距处恒星的上限与D. C. Price 等人（2020年）的结果；后者的绿岸望远镜和帕克斯频段分别在2.0–2.8 GHz和2.6–3.45 GHz处与VLASS重叠。在正文和表7 中，窄带上限包含C. Choza 等人（2024年）对turboSETI信噪比进行的3.3倍修正；表7 还列出了已发表的数值；图9 对所有使用turboSETI的搜索应用了相同修正。在流量密度方面，VLASS为 ~ 43，深100倍

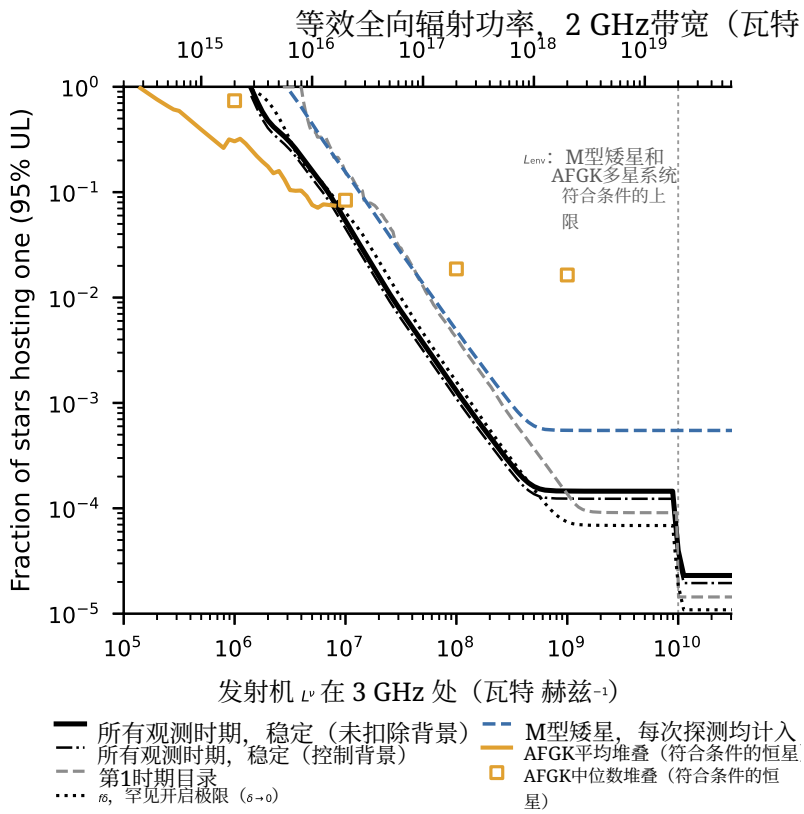


图7。 符合条件的恒星中，宿主存在高于给定谱光度（底部坐标轴）或2 GHz带宽等效全向辐射功率（顶部坐标轴）的稳定2–4 GHz发射机的比例的95%置信上限：所有观测时期未进行背景扣除（黑色实线；主要极限）和扣除控制位置背景（点划线）、第1历元目录分析（灰色虚线），以及 $f\delta$ （$\delta \to 0$）的罕见开启极限，按宿主恒星计数，未进行背景扣除（点线；有限占空周期见第4.6节）。远低于 $L_{\rm env} = 10^{10}\,{\rm WHz^{-1}}$ （竖线）时，仅排除类别之外的表观单星AFGK星对结果有贡献；M型矮星和AFGK多星系统在 $L_{\rm env}$附近经过一个窄过渡区间，在此处检测到其中一颗恒星上存在发射机的概率为 ≈ 0.5，因此置信上限下降。蓝色虚线：M型矮星，将每次合并检测（包括自然辐射源）计作一个可能的发射机（不设资格标准）。橙色线：由符合条件的AFGK型恒星的均值堆叠得到的近似极限，针对具有共同光度 L_T的发射机群体，并纳入宿主抽样方差；仅在其比单体限值更严格的范围内显示；方块：合并后的0–100 pc样本的中位数堆叠。

更深（0.54毫央，对比 ~ 23 央），因为它是在2 GHz带宽上积分，而不是在2.79赫兹信道上积分。然而，对于窄谱线，连续谱会将功率稀释到整个频段内，而我们的带内等效全向辐射功率上限（3.2×10^{17}瓦特）比BL上限 6.9×10^{12}瓦特高 $\sim 4.6 \times 10^4$倍（为已发表值 2.1×10^{12} 瓦特的$\sim 1.5 \times 10^5$ 倍）。在相同窄带数据中，若采用与带宽为 B 的信号相匹配的搜索，对总功率的灵敏度损失仅为 $\sqrt{B}$；因此，对于频段内的任何带宽，对绿岸望远镜数据进行专门搜索仍将具有更高灵敏度。连续谱巡天的优势在于覆盖率而非深度：D. C. Price 等人（2020）所使用的turboSETI流水线（E. Enriquez & D. Price 2019年）专为漂移音调设计，不会搜索雷达啁啾信号、扩频链路或宽带泄漏（不过，V. Gajjar 等人 2022年曾在BL数据中搜索色散宽带脉冲）；而连续谱测量则能够包含这些信号，前提是它们在经过干扰标记（第3.6节）后仍然存在，并且覆盖样本中的每一颗恒星。在发生率方面，按照一种常见的构造方式（每颗恒星的探测概率为50%，如D. C. Price 等人（2020）所采用，且不进行背景扣除；表 7），50秒差距内的4,103颗符合条件的恒星给出 $f < 1.5 \times 10^{-3}$，约比D. C. Price 等人（2020）对1,005个绿岸望远镜S波段目标所得的0.60%严格4倍；后者引用的数值为0.37%，但其等效全向辐射功率阈值高 $\sim 4.6 \times 10^4$ 倍。这两种方法具有互补性：针对附近恒星的定向窄带搜索能够约束 $\sim 10^3$ 颗恒星周围微弱、窄带、长占空比信号，而连续谱巡天则能约束该体积内每一颗 $\sim 10^5$ 恒星周围的明亮、宽带且具有任意波形的信号。窄带

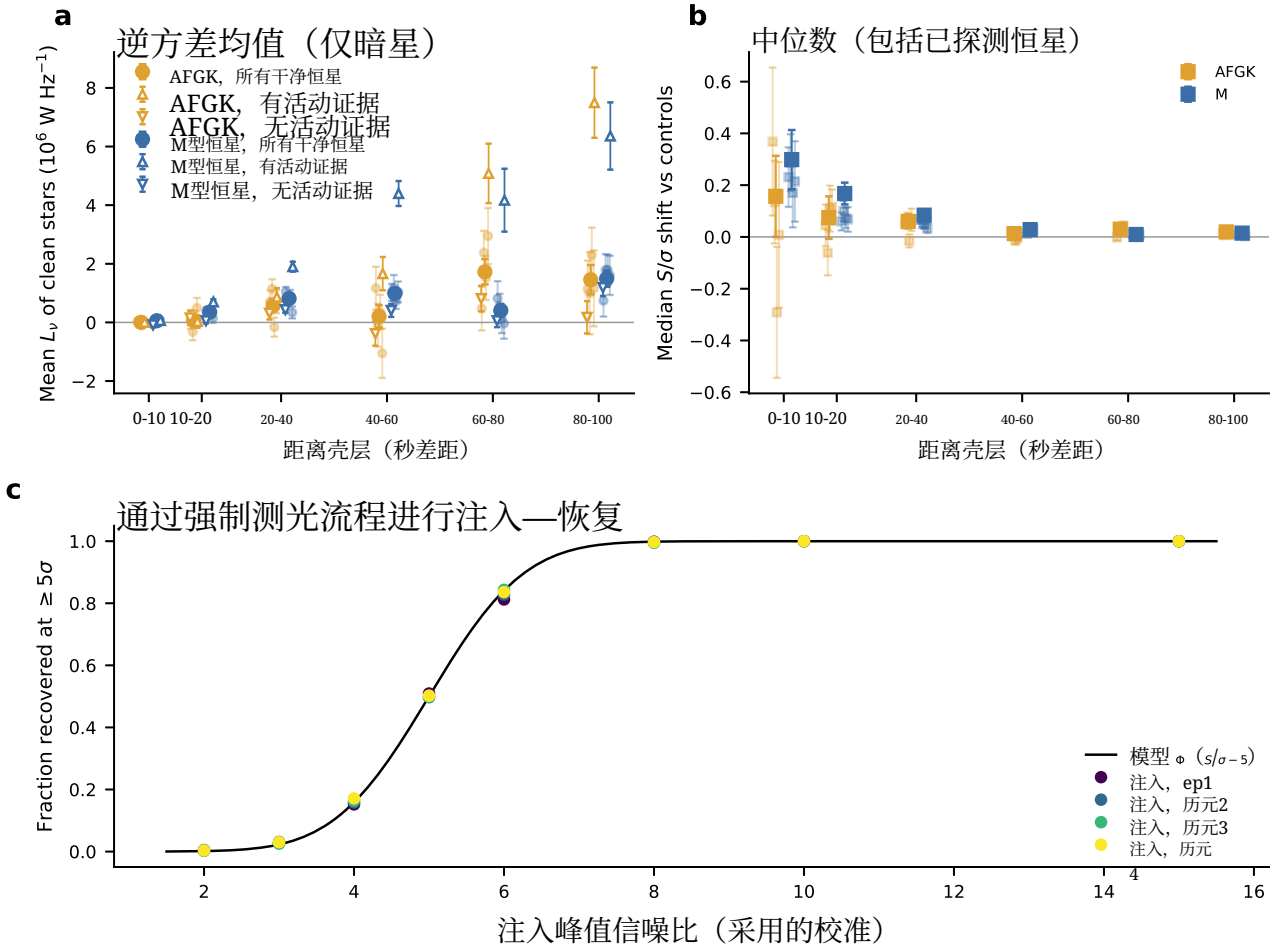


图8。 (a) 距离壳层中干净恒星的逆方差加权平均值3 GHz 光谱光度，分别对应全历元合并图像（大圆）和单个历元（小圆），以及按具有（空心向上三角）和不具有（空心向下三角）活动证据对全历元合并图像中的恒星进行划分的结果。(b) S/σ 相对于包括已探测恒星在内的对照位置的中位数偏移。(c) 在 $\geq 5\sigma$ 处恢复的注入点源比例与其真实 S/σ的关系，并与 $\Phi(S/\sigma - 5)$ 进行比较。

对整个巡天视场的搜索（例如 B. S. Wlodarczyk-Sroka et al. 2020年），以及目前在MeerKAT和VLA上运行的协同搜索（D. Czech et al. 2021年；C. D. Tremblay et al. 2025年），平均而言覆盖更多恒星样本，且恒星距离更远。然而，无论它们与我们的体积样本有多少重叠，仅搜索窄带信号在大多数情况下都会漏掉一个BRaT，因此窄带搜索和连续谱搜索仍然是互补的。

图9在发射机率与等效全向辐射功率的平面上展示了这些上限$_{\min}$，用于比较技术特征调查（J. E. Enriquez 等，2017年；D. C. Price 等，2020年；C. Painter 等，2025年）。发射机率为（$N_\star\,\nu_{\rm rel}$）$^{-1}$，其中$\nu_{\rm rel} = \Delta\nu/\nu_c$ 为分数带宽，VLASS取2/3；对于 $k > 0$，我们使用等效的 $f_{95}/(3\nu_{\rm rel})$，当 $k = 0$时它可化简为前者。由于给定等效全向辐射功率下的总体上限，只涉及对该功率敏感的 $N_{\rm eff}$ 恒星，因此VLASS的上限是一条曲线，而非一个点。该曲线从 2.8×10^{15}瓦特处的0.5开始，此时 $f = 1$；在$\sim 2.2 \times 10^{19}$瓦特以上升至 1.2×10^{-5}，此时恒星有效数与排除类别之外的全部205,981颗恒星相差不到0.1%；在 $L_{\rm env}$ 以下（等效全向辐射功率为 2×10^{19} 瓦特），上限几乎完全由符合条件的AFGK型恒星决定，而包络层恒星则在其附近一个狭窄的过渡区间内逐渐纳入。对于堆叠结果，其限制的是恒星比例而非恒星数量，因此我们使用等效数量 $N = 3/f_{95}$，并且只在其比单体限值约束力更强时才予以展示。VLASS下限低于图中任何一项调查在等效全向辐射功率$_{\min} < 10^{20}$瓦特处达到的发射机率，但两者并非完全可比。窄带等效全向辐射功率$_{\min}$ 值对应的发射机，其带宽窄于各项搜索所用的通道，通常只有几赫兹；而VLASS值则是稳定信号在多个通道内扩展、经数据标记剔除和成像后仍保留下来的带内总功率（第3.6节）。

表 7。 与 Breakthrough Listen 窄带巡天的比较，该巡天由 D. C. Price 等人 (2020年) 针对一颗位于 50秒差距处的恒星开展。

巡天	Band	驻留时间	$S_{\rm lim}$ (央)	等效全向辐射功率$_{\rm lim}$ (瓦特)	$N_\star$	f_{95} (%)
BL GBT	1.80–2.80 GHz	3×5 分钟 ON	2.3×10^{1}	6.9×10^{12} (2.1×10^{12})	1,005	0.6
BL Parkes	2.60–3.45 GHz	多历元	1.0×10^{2}	3.0×10^{13} (9.1×10^{12})	189	3.2
本研究 (VLASS QL)	2–4 GHz	∼5次快照	5.4×10^{-4}	3.2×10^{17}	4,103	0.15

NOTE—Breakthrough Listen（BL）的上限适用于带宽为 $\lesssim$3 赫兹的信号，且采用 $|\dot{\nu}| \leq 4$ 赫兹·秒$^{-1}$，并使用 D. C. Price 等 (2020年) 所采用的 1 赫兹发射机宽度约定，其中包含 C. Choza 等(2024年) 的 3.3 倍修正（括号内为已发表的数值），如图9 所示；VLASS上限适用于在干扰标记剔除后仍保留信号的带内总功率（第3.6节）。 $N_\star$ 是对发生率上限构成约束的恒星数量（对于BL GBT，为S波段目标，即与VLASS重叠的频段；对于VLASS，为50秒差距内且没有活动证据的恒星）。 f_{95} 是采用统一构造方法得到的、恒星宿主具有等效全向辐射功率高于$_{\rm lim}$ 的发射机时恒星比例的95%上限：每颗恒星的探测概率为50%，如D. C. Price 等(2020年)所采用，且不进行背景扣除（$3/0.5N_\star$ 表示零次探测；对于VLASS， $\mu_{95} = 3.0$ 表示这些恒星中稳态检验探测次数为0）。D. C. Price 等(2020年)报告的数值为0.37%（绿岸望远镜S波段）和2.0%（帕克斯）。

5.2. 与宽带技术特征基准的比较

若将频段平均的3 GHz光度视为平坦宽带频谱的代表值，则M. A. Garrett（2026a）的I型泄漏基准 $L_\nu \sim 4 \times 10^5$ W Hz^{-1}（在2 GHz频宽内等效全向辐射功率为 $\sim 8 \times 10^{14}$ W）只有巴纳德星单独达到，其全历元上限为 $L_\nu < 2.3 \times 10^5$ W Hz^{-1}。巴纳德星未被探测到，因此这为其所在位置的总发射设定了上限，并排除了该处存在I型BRaT的可能性。然而，即使探测到这一水平的辐射，也不能将其归因于发射机，因为巴纳德星是M型矮星，自然辐射也可能产生这种信号。最近恒星中占大多数的M型矮星也同样如此：连续谱未探测为其中每颗恒星的BRaT设定了上限，但仅凭连续谱探测无法识别BRaT，还需要采用M. A. Garrett（2026a）提出的其他诊断方法。符合条件的AFGK型恒星堆叠结果刚好达到该基准：若发射器的输出均为 $L_\nu = 4 \times 10^5$ W Hz^{-1}，则需要 $f < 0.48$；但有效恒星仅有39颗，其中10秒差距以内的恒星占权重的58%，因此这只能约束最近的AFGK型恒星，而非整个恒星群体。地球当前总泄漏为 $\sim$ 400W Hz^{-1}，按全历元中位灵敏度，只能探测至 $\sim$ 16300 au（另见S. Z. Sheikh等，2025年）。M. A. Garrett（2026a）提出的若干诊断方法受限于VLASS的分辨率与探测深度，无法实施——包括亮温、偏振、频谱结构和闪烁；但其中两项是本研究的重点：与盖亚恒星的关联，以及与该恒星的共同运动（第4.2节和第4.3节）。对于几秒差距处、轨道半径为数个au的行星，其BRaT与宿主恒星的偏移为 $\lesssim 0\farcs1$，远小于我们的匹配容差。频率 $\gtrsim 1$ GHz也能避开活动M型矮星周围行星所预期的较高电离层截止频率（M. A. Garrett 2026a,b），因此，对于构成我们样本大多数的M型矮星，2–4 GHz频段更为合适。

B. Zuckerman（2026年）提出了一种不同类型的基准：一个位于200 pc外、持续朝向地球发射的60 MW发射机，在一个几赫兹宽的通道中产生 $\sim 10^{10}$ Jy。对我们的2 GHz频带取平均后，这是$\sim$ 15Jy，即 $L_\nu \sim 7.2 \times 10^{13}$ W Hz^{-1}（朝向地球的等效全向辐射功率为 $\sim 1.4 \times 10^{23}$ W），超过我们的中位数限值 10^5 倍，也超过灵敏度最低的单星限值（$L_\nu < 2.5 \times 10^{10}$ W Hz^{-1}） 2×10^3 倍。由于我们的限值约束的是地球接收到的流量密度，因此它们可直接应用于定向发射；只有将其换算为发射器功率时才假设各向同性。因此，对于在VLASS观测期间于2–4 GHz内运行、并将信号分散到多个通道的发射机，每颗具有强制测光结果的恒星都可单独排除这种功率；其光度远高于$L_{\rm env}$，因此除排除类别之外的每颗恒星都符合条件，包括M型矮星；并且由于信号是连续的，稳态检验适用，在该光度下给出 $f < 2.3 \times 10^{-5}$ 。不过，该基准本身是窄带的，而且B. Zuckerman（2026年）将其设定在10 GHz，因此我们的方案是其频带内类比。若将同一信号集中在一个2 MHz的VLASS通道中，其流量密度将达到 $\sim 1.5 \times 10^4$Jy，成为极端离群值，几乎肯定会被自动标记剔除（第3.6节）；要排除这一窄带基准本身，需要对原生通道进行成像，并采用能够保留窄带持久信号的数据标记剔除方法（第5.4节）。Zuckerman所针对的恒星类别——老年F6–M2型矮星——对应于$0.64 \leq G_{BP} - G_{RP} \leq 2.23$ （M. J. Pecaut & E. E. Mamajek 2013年）。在这一范围内具有全时期限值的45,360颗表面上为单星的恒星中（RUWE < 1.4、无Gaia非单星解、且不过度增亮），991颗被排除或未纳入稳态检验，另有2颗被计为强制探测（TYC 3573-1391-1，其辐射位置偏离恒星，以及

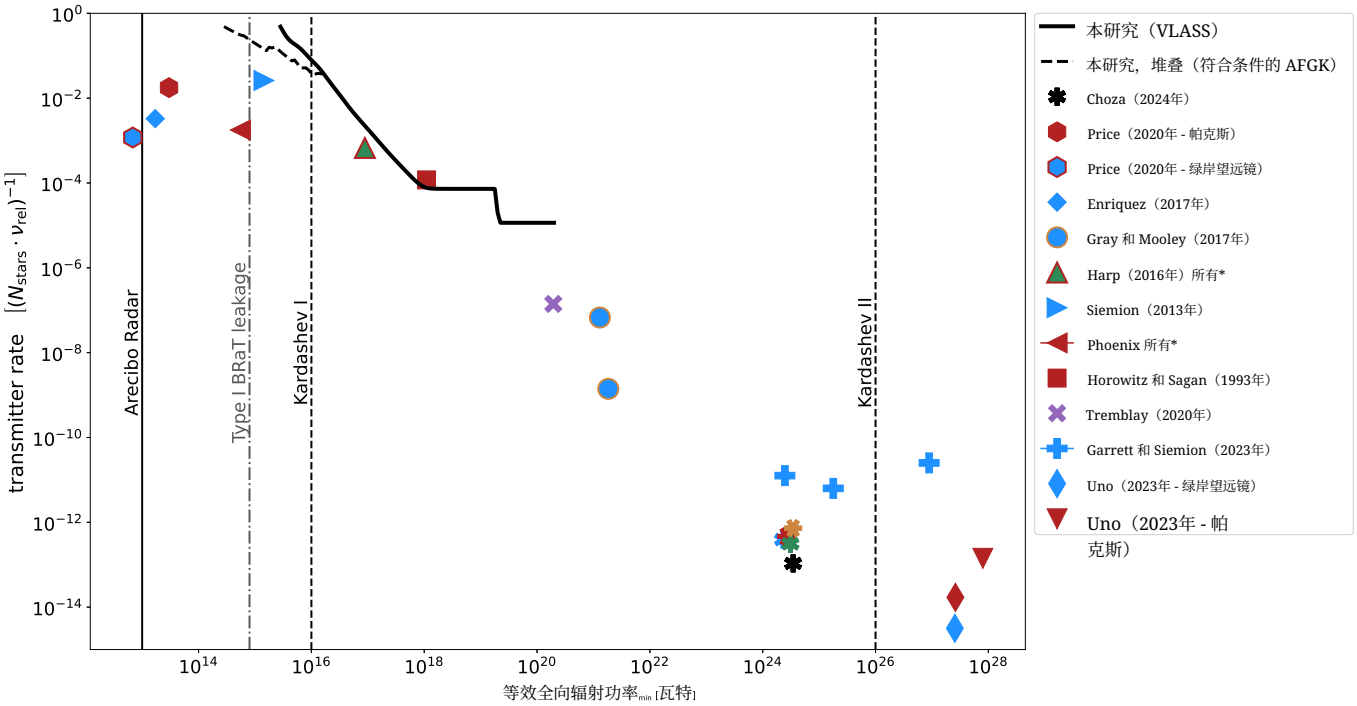


图9。发射机率与等效全向辐射功率（EIRP）$_{min}$的关系，展示了本研究以及此前的无线电技术特征搜寻结果（P. Horowitz 和 C. Sagan 1993年；P. R. Backus 和凤凰计划团队 2004年；A. P. V. Siemion 等人 2013年；G. R. Harp 等人 2016年；J. E. Enriquez 等人 2017年；R. H. Gray 和 K. Mooley 2017年；D. C. Price 等人 2020年；C. D. Tremblay 和 S. J. Tingay 2020年；M. A. Garrett 和 A. P. V. Siemion 2023年；Y. Uno 等人 2023年；C. Choza 等人（2024））；文献值根据 B. Jacobson-Bell 等人（准备中）的汇编绘制。窄带等效全向辐射功率（EIRP）$_{min}$值是指发射机带宽窄于各次搜寻频率信道的总功率（大多数搜寻为 0.05–3 赫兹，R. H. Gray 和 K. Mooley 2017年为 15 和 122 赫兹）；对于 MWA 巡天，我们绘制了 C. D. Tremblay 和 S. J. Tingay（2020年）所述的 10 赫兹传输带宽情形，即将其针对 10 千赫兹信道的限值提高了 1000 倍。使用 turboSETI 的搜寻（J. E. Enriquez 等人 2017年；D. C. Price 等人 2020年；M. A. Garrett 和 A. P. V. Siemion 2023年；Y. Uno 等人 2023年）的等效全向辐射功率（EIRP）$_{min}$值均乘以 C. Choza 等人（2024）得出的 3.3 倍修正因子；他们自己的限值已包含该修正，其他搜寻未使用 turboSETI，因此按已发表数值绘制。VLASS 限值（黑色）针对分布在多个信道中的稳定信号的总带内功率：未进行背景扣除的单体限值（实线；2×10^{19} 瓦特处的阶跃表示 M型矮星和 AFGK 多星系统开始符合条件）以及在约束更强时，针对符合条件的 AFGK 型恒星的近似平均堆叠限制（虚线），后者假设发射机具有相同的光度。竖线标示阿雷西博雷达的等效全向辐射功率（EIRP）、卡尔达肖夫 I 型和 II 型功率水平（N. S. Kardashev 1964年），以及 M. A. Garrett（2026a）提出、分布在 2 GHz 频段上的 I 型宽带泄漏基准。

TYC 7253-259-1，仅在单个历元中被探测）。只有TYC 3573-1391-1通过了稳态检验，该检验适用于连续信号，因此即使它是一个发射机$f < 1.1 \times 10^{-4}$，对于其余44,369颗（$k = 1$，未进行背景扣除）。我们没有这些恒星的年龄信息。如果其中有一部分 q 属于老年恒星，则仅针对老年子集的限值会更弱，$f_{\rm old} < f/q$；然而，在基准光度本身下，年龄并不重要，因为每颗恒星都会被单独排除。Zuckerman关于任何老年太阳型恒星的射电探测都值得关注的论点（引用了L. D. Matthews 2025年）只有在排除活动性之后才成立：活动太阳型恒星在VLASS中也会被探测到（I. Davis et al. 2026年以及本研究），这也是我们排除已知辐射源类别和饱和日冕，并谨慎处理多星系统的原因（第3.5节）。

5.3. 解读与注意事项

我们的上限适用于在持续数秒的 VLASS 快照期间开启的辐射（2017年到2026年间每颗恒星最多观测4次），即在斯托克斯 I 中、位于 1.965–4.013 GHz 相关器频带内，并排除被标记剔除的射频干扰数据（2.093–2.221 GHz 和 3.629–4.013 GHz 的频谱窗口包含卫星下行链路，受影响最严重，因此仅限于这些频段的发射机受到的约束较弱；A. E. Kimball 等，2026），且位于恒星约一个波束半径以内（表 5）。等效全向辐射功率值假定为平坦且填满频带的频谱；对于仅占据部分频带的信号，如果该信号在其所占频率处能够通过数据标记剔除和校准权重，则等效全向辐射功率上限不变，详见

（第 3.6节），而光谱光度上限适用于频带平均功率。在第1历元目录分析中，我们的噪声估计（每幅图像的平均岛区均方根噪声）略偏保守；全时期限值使用校准剪切图均方根噪声（第3.4节）。

样本根据盖亚 DR3 的天体测量和测光（$\varpi/\sigma_\varpi > 10$、测量的 $G_{BP} - G_{RP}$以及主序星窗口）定义。它包含 VLASS 天区内 100秒差距以内 GCNS 恒星的 91%（第2.1节），未纳入最暗的晚 M 型恒星和亚恒星天体，并包含未分辨双星。此外，样本还排除了 100秒差距以内、位于$V < 4$以北的 35 颗亮矮星，其中包括天狼星、织女星、牛郎星、北落师门和北河二；这些恒星缺少 Gaia DR3 源或精确视差，或者不在主序星窗口内。我们在它们的 SIMBAD 位置采用相同的强制测光进行测量：32 颗未探测到（均低于 3.3σ），其上限分别为 5.4×10^5、 5.1×10^5、 3.1×10^6和 3.5×10^6 瓦特 赫兹$^{-1}$，对应天狼星、牛郎星、织女星和北落师门；另外 3 个探测结果分别是大陵五（β英仙座，32 毫央）、磁性 Ap 星 θ 御夫座（6。1σ）以及多星系统 ξ 金牛座（6。2σ），它们都可能是自然辐射源。这些恒星未纳入总体上限；总体上限针对的是盖亚样本，并按每颗恒星自身的灵敏度加权，而非针对一个完整体积。

表2 中的分类遵循 SIMBAD；文献中将一些归为 X射线活动的恒星进一步划分为更具体的类型（σ CrB A 是 RS CVn型双星，而 RZ Cas 是大陵型食双星），但这不影响分析。自然辐射源的分类部分依赖于 SIMBAD 这一实时数据库，且流量标度因峰值损失校准而带有 5% 的系统不确定度。我们的流量标度遵循A. E. Kimball 等（2026年）基于校准源的 QL偏差；Single Epoch 星表表明，较暗致密源在后续历元的 QL 峰值偏差较小，在这种情况下，我们后续历元的极限值最多会保守 ∼13%（第4.5节）。将源注入恢复图像（第3.4节）可以检验估计量，但不能检验成像；在快照巡天中，成像可能无法完整恢复微弱流量（R. L. White等（2007））；第4.5 节对 VLA-COSMOS 的比较表明，在经过校准的流量标度下，我们的估计量能够恢复低至 ∼20 μ央的源。

最后，只有当发射机产生的信号能够从自然辐射中凸显出来时，才能识别出它；第3.5 节规定了这一条件所在的集合。远低于 $L_{\rm env}$ 总体上限所依据的是32,985颗符合条件的AFGK型恒星，占样本的16%，因为M型矮星或AFGK多星系统的探测结果只有高于 $L_{\rm env}$时才计入，而属于已知发射体类别或具有饱和日冕的2,251颗恒星从不计入。与活动证据的存在不同，这些标准是恒星的内在属性；活动证据会使10秒差距内的恒星减少73%，但在80–100秒差距处仅减少9%，而AFGK型恒星的净符合条件比例随距离变化很小（第3.5节）。能否证明某颗恒星低于X射线阈值，仍取决于其距离和天空位置（表1），因此，符合条件的恒星是那些没有测量到超过该阈值的活动证据的恒星。名义上的 2RXS深度仅能覆盖约一半AFGK型恒星的$\log L_X/L_{\rm bol} = -4$，而盖亚也不会标记出每一颗双星；这些标准遗漏的 AFGK型恒星仍符合条件，因此它们的自然辐射会进入 k 并削弱总体上限，而不会使其产生偏低偏差；筛选后的检验也未显示出超额信号。包络线依据的是从DG CVn观测到的高光度15 GHz非相干耀斑，以及本次巡天中探测到的光度最高的M型矮星；更罕见且强度超过该包络线的耀斑同样会被计入。每颗恒星的上限不受资格条件影响：每个上限约束的是该恒星位置处的总发射。对于具有辐射的211颗恒星（50个自然发射体的可靠关联和161个强制探测，占样本的0.1%），只有当人工分量超过测量到的辐射时，才能排除该人工分量：它们的上限是总流量密度的置信上限（第3.6节）。要将低于 $L_{\rm env}$ 的人工分量与自然辐射区分开来，就需要建立每颗恒星预期射电辐射的模型，例如通过其X射线光度和G¨–Benz关系（M.G¨udel & A. O. Benz 1993年）推断，或依据其变异性和圆偏振进行判断，并同时搜索超出该模型的信号；这将留待未来研究。

5.4. 展望

VLASS 4.1是最终的巡天项目：它重新观测了第1历元首次覆盖的那一半天空，其单历元产品将取代第1.1历元的产品（A. E. Kimball 等，2026）。天空的另一半（包括 LSPM J1943+5337）有三个历元。针对该源开展一次VLA观测，将把其自行基线延长至近十年，并确定其性质；类似的观测，或未来对VLASS的任何扩展，都可以检验每个计入的强制探测是否具有共同运动。单历元成像改进了流量标度和天体测量，而其Stokes V图像将直接识别相干恒星辐射，正如悉尼射电恒星目录在更低频率下所做的那样（L. N. Driessen 等，2024）。我们的上限是在整个频段上对接收功率取平均，这对于填满整个频段的辐射是恰当的统计量；更窄的信号则会被稀释。计划中的VLASS单历元粗谱立方体将为每个128 MHz谱窗提供一个平面（A. E. Kimball 等，2026），从而提高对局限于

单个谱窗内信号的灵敏度，最高可达 $\sqrt{16} = 4$；重新以原生2 MHz信道宽度对校准可见度进行成像——这是B. Zuckerman (2026年)所考虑的滤波器宽度——对于位于单个信道内的信号，灵敏度最高可提高~ $\sqrt{1000} \approx 30$ 。甚长基线干涉测量观测将测量亮温和紧致性，这是M. A. Garrett (2026a)提出的宽带搜索下一阶段。低频连续谱巡天将把该方法扩展到相干恒星辐射和许多地面发射机最强的频率范围（J. R. Callingham 等，2021；T. W. H. Yiu 等，2024）。

6. 结论

我们在截至目前观测到的所有 VLASS 观测历元中，搜索了 100秒差距以内的 210,191 颗 Gaia DR3 主序星，寻找过量的 2–4 GHz 连续谱辐射。在 51 个可靠的第一历元关联源中，有 50 个是已知的自然辐射源；在自行基线允许的情况下，它们均与各自的恒星共同运动；LSPM J1943+5337 附近的射电源与该恒星并不重合，很可能是一个背景源。对所有历元中的 208,232 颗恒星进行强制测光后，除自然辐射源之外发现了 161 个强制探测结果。应用恒星分类和光度标准——对于表观单星AFGK星，在任何光度下均计入位于已知射电辐射源类别之外的探测结果；而对于 M型矮星和 AFGK多星系统，仅计入高于 $L_{\rm env} = 10^{10}$ W Hz^{-1} 的探测结果——最终得到 1 个稳态检验探测结果，以及至少在一个历元中被探测到的 3 颗恒星；这些结果与对照位置一致。具有 Gaia多重性证据的 AFGK型恒星显示出显著的探测结果过量，这与活动伴星的预期相符。独立的逐历元目录，包括 Single Epoch 和中值堆叠星表，证实了这些结果。我们没有发现令人信服的技术特征候选体：计入的探测结果数量并不多于偶然重合，每个结果都可能由噪声、背景源或恒星辐射造成，因而没有任何结果值得优先后续观测。我们对每颗进行强制测光的恒星所在位置的稳态宽带辐射给出了限制（95%完备性阈值，或在探测到辐射时给出置信上限）——中位数为 $L_\nu < 4.0 \times 10^8$ W Hz^{-1}，而巴纳德星为 $L_\nu < 2.3 \times 10^5$ W Hz^{-1} ——并且在未扣除背景的情况下，将符合条件的 AFGK 型恒星中宿主发射机的比例限制为：高于 10^9 W Hz^{-1} 时为 $f < 1.5 \times 10^{-4}$ （不采用多重性判据时为 2.8×10^{-4} ）；在所有位于已知发射体类别之外的恒星中，该比例限制为高于 $\sim 1.1 \times 10^{10}$ W Hz^{-1}时的 $f < 2.3 \times 10^{-5}$ 。若将每个 M型矮星探测结果都视为可能的发射机，而不作资格判定，则在高于 10^9 W Hz^{-1}的情况下，宿主发射机的 M型矮星少于 5.5×10^{-4} 。堆叠能够探测到 M型矮星的总体平均辐射，这些辐射集中于具有活动证据的恒星；对于具有相同光度的 AFGK 发射机，堆叠的探测灵敏度可达到比单独探测结果低 10 倍的光度，即 $f < 1$，但仅限于距离最近的恒星周围。连续谱巡天是窄带技术特征搜索的调制无关补充，能够覆盖当前窄带处理流程未搜索的信号，并针对近邻主序星的一个近乎完备样本中的每颗恒星开展搜索。

7. 数据可用性

所有代码、下载的星表、722,273 张 VLASS 裁剪图，以及由此生成的表格和图表均存档于 Zenodo, doi:10.5281/zenodo.24326437。每个脚本都记录了所用的确切查询，且该软件包可重现本文中的所有数值。

致谢

S.C. 的研究经费由 Breakthrough Listen 提供。突破奖基金会为突破倡议提供资金，突破倡议负责管理 Breakthrough Listen。

美国国家射电天文台是美国国家科学基金会的一个设施，由联合大学公司根据合作协议运营。加拿大射电天文数据中心（CIRADA）的经费来自加拿大创新基金会2017年创新基金（项目35999）的拨款，以及安大略省、不列颠哥伦比亚省、艾伯塔省、曼尼托巴省和魁北克省的资助。本研究使用了加拿大天文学数据中心的设施；该中心由加拿大国家研究委员会运营，并得到加拿大航天局的支持。本研究使用了欧洲航天局（ESA）盖亚任务的数据，这些数据由盖亚数据处理与分析联盟（DPAC）处理。DPAC的经费由各国机构提供，尤其是参与盖亚多边协议的机构。本研究使用了SIMBAD数据库和VizieR星表访问工具（法国斯特拉斯堡的斯特拉斯堡天文数据中心 CDS），通过哈佛-史密森天体物理中心的镜像站访问。数字化巡天由太空望远镜科学研究所在美国政府拨款NAG W-2166的资助下制作。泛星计划1巡天得以开展，离不开下列机构的贡献：K. C. Chambers 等人（2016年）。本研究使用了俄德SRG任务的软X射线仪器eROSITA的数据，这些数据由德国eROSITA联盟使用eSASS软件处理；还使用了ROSAT全天巡天的数据，这些数据通过高能天体物理科学档案研究中心（HEASARC，美国国家航空航天局戈达德太空飞行中心）和VizieR获取。

分析代码和论文稿件文本在人工智能系统（Claude Science / Opus 5.5，Anthropic）的协助下完成。研究还使用了OpenAI GPT-6.2 Astra审阅稿件和代码，并提出修改建议。所有结果均由作者核实。

观测设施：VLA、盖亚、ROSAT、eROSITA、PS1、PO:1.2米望远镜、MAST

软件： Astropy（Astropy合作组等，2013，2018，2022），NumPy（C. R. Harris 等，2020），SciPy（P. Virtanen 等，2020），pandas（W. McKinney，2010），Matplotlib（J. D. Hunter，2007），PyVO（M. Graham 等，2014），PyBDSF（N. Mohan 和 D. Rafferty，2015）

参考文献

Astropy合作组、Robitaille, T. P.、Tollerud, E. J. 等，2013年，《天文学与天体物理学》，558，A33，数字对象唯一标识符：10.1051/0004-6361/201322068 Astropy合作组、Price-Whelan, A. M.、Sip˝ocz, B. M. 等，2018年，《天文学杂志》，156，123，数字对象唯一标识符：10.3847/1538-3881/aabc4f Astropy合作组、Price-Whelan, A. M.、Lim, P. L. 等，2022年，《天体物理学杂志》，935，167，数字对象唯一标识符：10.3847/1538-4357/ac7c74 Backus, P. R. 与凤凰计划团队，2004年，发表于美国天文学会第204次会议摘要，卷204，75.04 Becker, R. H.、White, R. L. 与 Helfand, D. J.，1995年，《天体物理学杂志》，450，559，数字对象唯一标识符：10.1086/176166 Boller, T.、Freyberg, M. J.、Tr¨umper, J. 等，2016年，《天文学与天体物理学》，588，A103，数字对象唯一标识符：10.1051/0004-6361/201525648 Callingham, J. R.、Vedantham, H. K.、Shimwell, T. W. 等，2021年，《自然·天文学》，5，1233，数字对象唯一标识符：10.1038/s41550-021-01483-0 Chambers, K. C.、Magnier, E. A.、Metcalfe, N. 等，2016年，arXiv 预印本。https://arxiv.org/abs/1612.05560 Choza, C.、Bautista, D.、Croft, S. 等，2024年，《天文学杂志》，167，10，数字对象唯一标识符：10.3847/1538-3881/acf576 Condon, J. J.、Cotton, W. D.、Greisen, E. W. 等，1998年，《天文学杂志》，115，1693，数字对象唯一标识符：10.1086/300337 Czech, D.、Isaacson, H.、Pearce, L. 等，2021年，《太平洋天文学会出版物》，133，064502，数字对象唯一标识符：10.1088/1538-3873/abf329 Davis, I.、Hallinan, G.、Ayala, C.、Dong, D. 与 Myers, S.，2026年，《天体物理学杂志》，1001，143，数字对象唯一标识符：10.3847/1538-4357/ae4a22 De, A.、Narang, M.、Puravankara, M. 等，2024年，《天文学杂志》，168，288，数字对象唯一标识符：10.3847/1538-3881/ad84e7 de Vries, W. H.、Becker, R. H.、White, R. L. 与 Helfand, D. J.，2004年，《天文学杂志》，127，2565，数字对象唯一标识符：10.1086/383550 Driessen, L. N.、Heald, G.、Duchesne, S. W. 等，2023年，《太平洋天文学会刊》，40，e036，数字对象唯一标识符：10.1017/pasa.2023.26 Driessen, L. N.、Pritchard, J.、Murphy, T. 等，2024年，《太平洋天文学会刊》，41，e084，数字对象唯一标识符：10.1017/pasa.2024.72 Enriquez, E. 与 Price, D.，2019年，turboSETI：基于Python的搜寻地外文明计划搜索算法，天体物理学源代码库，记录编号 ascl:1906.006 Enriquez, J. E.、Siemion, A.、Foster, G. 等，2017年，《天体物理学杂志》，849，104，数字对象唯一标识符：10.3847/1538-4357/aa8d1b Fender, R. P.、Anderson, G. E.、Osten, R. 等，2015年，《皇家天文学会月报：快报》，446，L66，数字对象唯一标识符：10.1093/mnrasl/slu165 Flewelling, H. A.、Magnier, E. A.、Chambers, K. C. 等，2020年，《天体物理学杂志增刊》，251，7，数字对象唯一标识符：10.3847/1538-4365/abb82d 盖亚合作组、Prusti, T.、de Bruijne, J. H. J. 等，2016年，《天文学与天体物理学》，595，A1，数字对象唯一标识符：10.1051/0004-6361/201629272 盖亚合作组、Smart, R. L.、Sarro, L. M. 等，2021年，《天文学与天体物理学》，649，A6，数字对象唯一标识符：10.1051/0004-6361/202039498 盖亚合作组, Vallenari, A., Brown, A. G. A., et al. 2023, 《天文学与天体物理学》, 674, A1, 数字对象唯一标识符: 10.1051/0004-6361/202243940 Gajjar, V., LeDuc, D., Chen, J., et al. 2022, 《天体物理学杂志》, 932,81, 数字对象唯一标识符: 10.3847/1538-4357/ac6dd5 Garrett, M. A. 2015, 《天文学与天体物理学》, 581, L5, 数字对象唯一标识符: 10.1051/0004-6361/201526687 Garrett, M. A. 2026a, 《皇家天文学会月刊》, 549,stag991, 数字对象唯一标识符: 10.1093/mnras/stag991 Garrett, M. A. 2026b, arXiv 预印本. https://arxiv.org/abs/2611.26025 Garrett, M. A., & Siemion, A. P. V. 2023, 《皇家天文学会月刊》, 519, 4581, 数字对象唯一标识符: 10.1093/mnras/stac2607 Gordon, Y. A., Boyce, M.M., O'Dea, C. P., et al. 2020, 《美国天文学会研究札记》, 4, 175, 数字对象唯一标识符: 10.3847/2515-5172/abbe23 Gordon, Y. A., Boyce, M.M., O'Dea, C. P., et al. 2021, 《天体物理学杂志增刊》, 255, 30, 数字对象唯一标识符: 10.3847/1538-4365/ac05c0 Graham, M., Plante, R., Tody, D., & Fitzpatrick, M. 2014, 天体物理学源代码库,记录 ascl:1402.004 Gray, R. H. 2020, 《天文学杂志》, 159, 228, 数字对象唯一标识符: 10.3847/1538-3881/ab792b Gray, R. H., & Mooley, K. 2017, 《天文学杂志》, 153, 110, 数字对象唯一标识符: 10.3847/1538-3881/153/3/110 G¨udel, M. 2002, 《天文学与天体物理学年度评论》, 40, 217, 数字对象唯一标识符: 10.1146/annurev.astro.40.060401.093806 G¨udel, M., & Benz,A. O.1993, 《天体物理学杂志》, 405, L63, 数字对象唯一标识符: 10.1086/186766 Harp, G. R., Richards, J., Tarter, J. C., et al. 2016, 《天文学杂志》, 152, 181, 数字对象唯一标识符: 10.3847/0004-6256/152/6/181 Harris, C. R., Millman, K. J.,van der Walt, S. J.,et al. 2020, 《自然》, 585, 357, 数字对象唯一标识符: 10.1038/s41586-020-2649-2 Helfand, D. J., White,R. L., & Becker, R. H. 2015, 《天体物理学杂志》, 801, 26, 数字对象唯一标识符: 10.1088/0004-637x/801/1/26 Horowitz, P., & Sagan, C.1993, 《天体物理学杂志》, 415, 218, 数字对象唯一标识符: 10.1086/173157 Hunter, J. D. 2007, 《计算机科学与工程》, 9, 90, 数字对象唯一标识符: 10.1109/mcse.2007.55 Isaacson, H., Siemion, A. P. V., Marcy,G. W., et al. 2017, 《太平洋天文学会出版物》, 129,054501, 数字对象唯一标识符: 10.1088/1538-3873/aa5800 Ivezi´c, ˇZ., Menou, K., Knapp,G. R., et al. 2002, 《天文学杂志》,124, 2364, 数字对象唯一标识符: 10.1086/344069 Kardashev, N.S. 1964, 《苏联天文学》,8, 217 Kesseli, A. Y., Muirhead, P. S., Mann, A. W., & Mace, G. 2018, 《天文学杂志》, 155, 225, 数字对象唯一标识符: 10.3847/1538-3881/aabccb Kimball, A. E.,Lacy, M., Ott, J., etal. 2026, 载于 SPIE会议录, 第14153卷, 射电望远镜、技术与方法, ed. J. Lazio, M.-T. Chen, & S. J.Wijnholds (国际光学工程学会), 1415309, 数字对象唯一标识符: 10.1117/12.3105474

Lacy, M., Dong, D., & VLASS团队. 2025, VLASS第三历元快速浏览及快速浏览中位数堆栈临时组分列表, VLASS备忘录22, 美国国家射电天文台. https://library.nrao.edu/public/memos/vla/vlass/VLASS 022.pdf Lacy, M., Baum, S. A., Chandler, C. J., et al. 2020, 《太平洋天文学会出版物》, 132, 035001, 数字对象唯一标识符: 10.1088/1538-3873/ab63eb Lazio, T. J. W., Carmichael, S., Clark, J., et al. 2010, 《天文学杂志》, 139, 96, 数字对象唯一标识符: 10.1088/0004-6256/139/1/96 Lehtinen, J., Jetsu, L., Hackman, T., Kajatkari, P., & Henry, G. W. 2012, 《天文学与天体物理学》, 542, A38, 数字对象唯一标识符: 10.1051/0004-6361/201219185 Lindegren, L., Klioner, S. A., Hern´andez, J., et al. 2021, 《天文学与天体物理学》, 649, A2, 数字对象唯一标识符: 10.1051/0004-6361/202039709 Ling, J., Isella, A., Johns-Krull, C., & Lazio, T. J. W. 2022, 《天体物理学杂志》, 926, 228, 数字对象唯一标识符: 10.3847/1538-4357/ac4514 Loeb, A., & Zaldarriaga, M. 2007, 《宇宙学与天体粒子物理学杂志》, 2007, 020, 数字对象唯一标识符: 10.1088/1475-7516/2007/01/020 L´opez-Santiago, J., Montes, D., Fern´andez-Figueroa, M. J., & Ramsey, L. W. 2003, 《天文学与天体物理学》, 411, 489, 数字对象唯一标识符: 10.1051/0004-6361:20031377 Matthews, L. D. 2025, 《太平洋天文学会出版物》, 137, 116001, 数字对象唯一标识符: 10.1088/1538-3873/ae1661 McConnell, D., Hale, C. L., Lenc, E., et al. 2020, 《太平洋天文学会刊》,37, e048, 数字对象唯一标识符: 10.1017/pasa.2020.41 McKinney, W. 2010, 载于第九届科学领域Python会议论文集, 56–61, 数字对象唯一标识符: 10.25080/majora-92bf1922-00a Merloni, A., Lamer, G., Liu, T., et al. 2024, 《天文学与天体物理学》, 682, A34, 数字对象唯一标识符: 10.1051/0004-6361/202347165 Mohan, N., & Rafferty, D. 2015, 天体物理学源代码库, record ascl:1502.007 Mowlavi, N., Holl, B., Lecoeur-Ta¨ıbi, I., et al. 2023, 《天文学与天体物理学》, 674, A16, 数字对象唯一标识符: 10.1051/0004-6361/202245330 Newton, E. R., Irwin, J., Charbonneau, D., et al. 2016, 《天体物理学杂志》, 821, 93, 数字对象唯一标识符: 10.3847/0004-637x/821/2/93 Ochsenbein, F., Bauer, P., & Marcout, J. 2000, 《天文学与天体物理学增刊》, 143, 23, 数字对象唯一标识符: 10.1051/aas:2000169 Osten, R. A., Kowalski, A., Drake, S. A., et al. 2016, 《天体物理学杂志》, 832, 174, 数字对象唯一标识符: 10.3847/0004-637x/832/2/174 Painter, C., Croft, S., Lebofsky, M., et al. 2025, 《天文学杂志》, 169, 222, 数字对象唯一标识符: 10.3847/1538-3881/adbc5e Pecaut, M. J., & Mamajek, E. E. 2013, 《天体物理学杂志增刊》, 208, 9, 数字对象唯一标识符: 10.1088/0067-0049/208/1/9 Price, D. C., Enriquez, J. E., Brzycki, B., et al. 2020, 《天文学杂志》, 159, 86, 数字对象唯一标识符: 10.3847/1538-3881/ab65f1 Pritchard, J., Murphy, T., Heald, G.,等. 2024年, 《皇家天文学会月刊》, 529, 1258, 数字对象唯一标识符: 10.1093/mnras/stae127 Rahman, R. A., Lovell, J. B.,Koch, E.W., 等. 2025年, 《天体物理学杂志》, 981, 68, 数字对象唯一标识符: 10.3847/1538-4357/ad9f37 Rao, S. S., Sivakoff, G.R., Heinke, C. O., 等. 2026年, arXiv 预印本. https://arxiv.org/abs/2611.07448 Saide, R. C., Garrett, M. A., & Heeralall-Issur, N. 2023年, 《皇家天文学会月刊》,522, 2393, 数字对象唯一标识符: 10.1093/mnras/stad378 Schmitt, J. H. M. M., Fleming, T. A., & Giampapa, M. S. 1995年, 《天体物理学杂志》, 450, 392, 数字对象唯一标识符: 10.1086/176149 Sheikh, S. Z., Huston, M. J.,Fan, P., 等. 2025年, 《天文学杂志》, 169, 118, 数字对象唯一标识符: 10.3847/1538-3881/ada3c7 Shimwell, T. W., Hardcastle, M. J., Tasse, C., 等. 2022年, 《天文学与天体物理学》, 659, A1, 数字对象唯一标识符: 10.1051/0004-6361/202142484 Siemion, A. P. V.,Demorest, P., Korpela, E., 等. 2013年, 《天体物理学杂志》, 767, 94, 数字对象唯一标识符: 10.1088/0004-637x/767/1/94 Smol˘ci´c, V., Novak, M., Bondi,M., 等. 2017年,《天文学与天体物理学》, 602, A1, 数字对象唯一标识符: 10.1051/0004-6361/201628704 Sullivan, W. T., Brown, S., & Wetherill, C. 1978年, 《科学》, 199, 377, 数字对象唯一标识符: 10.1126/science.199.4327.377 Sutherland, W., & Saunders, W. 1992, 《皇家天文学会月刊》, 259, 413, 数字对象唯一标识符: 10.1093/mnras/259.3.413 Tarter, J. 2001年, 《天文学与天体物理学年度评论》, 39, 511, 数字对象唯一标识符: 10.1146/annurev.astro.39.1.511 Tremblay, C. D., & Tingay,S. J. 2020年, 《太平洋天文学会刊》, 37,e035, 数字对象唯一标识符: 10.1017/pasa.2020.27 Tremblay, C. D., Sofair, J., Steffes, L., 等. 2025年, 《天文学杂志》, 169, 122, 数字对象唯一标识符: 10.3847/1538-3881/ad9ea5 Uno, Y., Hashimoto, T., Goto, T., 等. 2023年, 《皇家天文学会月刊》, 522, 4649, 数字对象唯一标识符: 10.1093/mnras/stad993 Vedantham, H. K., Callingham, J. R., Shimwell, T. W., 等. 2022年, 《天体物理学杂志快报》, 926, L30, 数字对象唯一标识符: 10.3847/2041-8213/ac5115 Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant,T. E., 等. 2020年, 《自然·方法》, 17, 261, 数字对象唯一标识符: 10.1038/s41592-019-0686-2 Wenger, M., Ochsenbein, F., Egret, D., 等. 2000年, 《天文学与天体物理学增刊》, 143, 9, 数字对象唯一标识符 : 10.1051/aas:2000332 White, R. L., Helfand, D. J., Becker, R. H., Glikman,E., & de Vries, W. 2007年, 《天体物理学杂志》, 654, 99, 数字对象唯一标识符: 10.1086/507700 Wlodarczyk-Sroka, B. S., Garrett, M. A., & Siemion, A. P. V. 2020年, 《皇家天文学会月刊》, 498, 5720, 数字对象唯一标识符: 10.1093/mnras/staa2672 Yiu, T. W. H., Vedantham, H. K., Callingham, J. R., & G¨unther, M. N. 2024年, 《天文学与天体物理学》, 684, A3, 数字对象唯一标识符: 10.1051/0004-6361/202347657 Zech, G. 1989年, 《核仪器与方法A辑》, 277,608, 数字对象唯一标识符: 10.1016/0168-9002(89)90795-x Zuckerman, B. 2026年, 《天体物理学杂志》, 1001, 167, 数字对象唯一标识符: 10.3847/1538-4357/ae4c38