《天文学与天体物理学》手稿编号 aa_63609-26
2026年11月25日
©ESO 2026

arXiv:2611.32831v1 [astro-ph.EP] 24 Nov 2026

CORALIE演化恒星伴星径向速度搜寻（CASCADES）

VI：修订后的质量以及对583颗红巨星恒星参数的均一估计

E. Fontanet[1]⋆、S. Udry[1], D. Ségransan[1], P. Eggenberger[1], P. Figueira[1,2], 和 J. P. Faria[1]

[1] 日内瓦大学天文台，Pegasi路51b号，1290 韦尔苏瓦，瑞士[2] 安达卢西亚天体物理研究所-CSIC，天文学大道，18008 格拉纳达，西班牙

收到日期：2026年11月25日

摘要

背景。 巨星径向速度巡天使我们能够研究系外行星族群如何随恒星质量和演化而变化。然而，准确估计此类恒星的恒星质量颇具挑战性，因为等时线拟合等方法容易产生较大误差，这源于等时线彼此接近所导致的简并性。

目标。 我们对CASCADES巨星巡天的恒星参数进行了均一化的重新推导 . 其中包括参数-通过谱能量分布拟合获得的恒星半径，以及利用星震学更新后的恒星质量。

方法。 在适用时，我们使用TESS光变曲线测量所有恒星的最大振荡功率频率 $\nu_{\max}$。我们通过使用 ARIADNE（一种光谱能量分布（SED）拟合软件包）拟合宽带测光，重新提取巡天恒星的半径；其中有效温度、金属丰度和 $\log g$的先验取自光谱学。通过使用标度关系，我们计算具有 $\nu_{\max}$ 测量值的目标恒星的修订后质量估计值。

结果。 我们为该巡天的640颗恒星中的583颗获得了新的质量估计值。这些修订后的质量通常比等时线拟合所得结果低15%至20%（中位差为-0.35 $M_\odot$），低金属丰度恒星尤为明显，因为这一效应在它们身上更强。这些新质量影响了样本的整体质量分布，其中位数从2.11 $M_\odot$降至1.65 $M_\odot$。

结论。 这些修订后的质量为未来旨在研究宿主恒星质量与行星发生率之间联系的发生率分析提供了基础。它们还凸显了确定演化恒星质量时所涉及的不确定性。

关键词。 恒星：基本参数 – 行星系统 – 恒星：晚型 – 技术：测光 – 星表

1. 引言

随着系外行星探测数量不断增加，我们对系外行星统计特征的理解已得到显著提升。如今，人们已在广泛的轨道周期、质量和宿主恒星范围内发现系外行星。一个仍然具有现实意义的问题是，系外行星的发生率如何取决于宿主恒星质量和金属丰度（Johnson 等，2010；Reffert 等，2015）。要回答这一问题，就需要在质量更大的宿主恒星周围寻找系外行星，因为对于这些恒星，行星发生率仍缺乏充分约束。然而，研究质量更大的恒星，即处于 1.5 - 5 $M_\odot$ 范围内的恒星，对于处于主序阶段的恒星而言是一项具有挑战性的任务（Borgniet 等，2019）。由于温度更高且自转更快，要达到足以探测其轨道上系外行星的径向速度（RV）精度尤其困难。然而，红巨星自转较慢、表面温度较低，因此更适合开展径向速度巡天。研究中等质量巨星——其前身星在主序阶段可能是 A 型至 F 型恒星——由此成为研究这类恒星的替代途径。在此背景下，人们已开展多项巡天，以寻找围绕这些演化宿主恒星运行的系外行星（Frink 等，2002；Sato 等，2008；Jones 等，2011；Wittenmyer 等，2011）。

与主序前身星相比，巨星有助于获得精确的径向速度测量，但也带来了一些困难。其中一个主要难题是精确确定这些恒星的质量。这是一个关键问题，因为对演化恒星周围行星发生率的解读，极大程度上取决于宿主恒星质量。主要问题在于，对于赫罗图（HR 图）上处于这一区域的恒星，通过光谱学和等时线拟合得到的恒星质量存在严重简并性。质量较大的初次上行红巨星分支（RGB）恒星与质量较小的核心氦燃烧红团簇星会经过图上的同一位置，因此若没有额外约束，就很难将它们区分开来。这个问题早已为人所知，且在以往的一些研究中已有所探讨（Lloyd2011；Schlaufman & Winn2013；Ghezzi 等，2018；Malla 等，2024）。

为解决这一问题，可以将星震学作为一种补充方法，用于进一步约束恒星参数。可以在红巨星的测光时间序列中测量类太阳振荡。两个整体星震参数，即最大频率——mum振荡功率（$\nu_{\max}$）和大频率间隔（$\Delta\nu$），即连续径向振荡模之间的平均频率间距，可用于估计恒星质量和半径。虽然这已针对若干开普勒或

⋆ 通讯作者：emile.fontanet@unige.ch

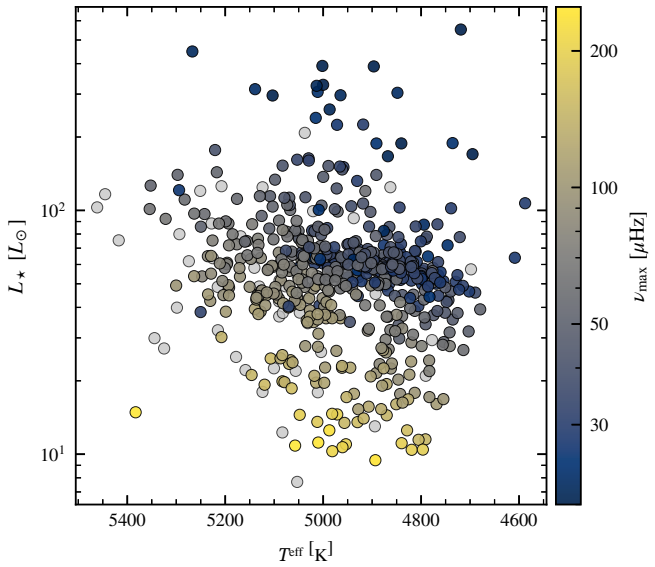


图1：CASCADES巡天恒星的赫罗图，按从TESS光变曲线测得的 $\nu_{\rm max}$ 值着色。未能测得 $\nu_{\rm max}$ 的恒星以浅灰色标示。

CoRoT样本（Sreenivas等（2024）；Miglio等（2009）），凌日系外行星巡天卫星（TESS）任务观测扇区数量的不断增加（Ricker等（2015））如今使这一技术能够应用于许多明亮红巨星（Stello等（2022）），包括连续观测区之外的那些恒星。虽然获得 $\Delta\nu$ 的稳健值对于观测扇区数量有限的恒星仍然具有挑战性，但测量 $\nu_{\rm max}$的位置，并结合对恒星半径和有效温度的独立估计，使我们能够通过标度关系$M \propto \nu_{\rm max} \cdot R^2 \cdot T^{1/2}{}_{\rm eff}$（Brown等（1991）；Kjeldsen和Bedding（1995）；Chaplin和Miglio（2013））（第4.1节，式2）。这可以在红巨星的完整样本上均匀进行，从而提供修订后的恒星质量估计，这些估计较少受到与等时线拟合相关的简并性的影响。

本研究修订了 CORALIE演化恒星伴星径向速度搜寻（CASCADES）的恒星参数。该长期径向速度观测计划以640颗G型和K型红巨星为目标。我们使用 ARIADNE（Vines& Jenkins 2022）推导更新后的光谱能量分布（SED）参数，从TESS光变曲线中提取 $\nu_{\rm max}$ 值，并使用星震标度关系为其中583颗恒星计算修订后的恒星质量。

本文结构安排如下。第2 节介绍CASCADES样本以及通过光谱能量分布拟合获得的恒星参数。第3节介绍TESS测光数据及其处理，以及 $\nu_{\rm max}$ 值的提取。第4节呈现修订后的质量，并将其与先前的估计值进行比较；我们还将在第5节讨论结果及其对巡天的意义。

2. 样本与恒星参数

*2.1. CASCADES*样本

CASCADES样本由640颗G型和K型红巨星组成，这些恒星通过安装在智利拉西拉的Leonhard Euler望远镜上的CORALIE光谱仪进行了约20年的径向速度观测。该巡天首次发表于Ottoni等人（2022），同时还列出了620颗恒星子样本的恒星参数，包括恒星半径、质量、金属丰度、有效温度和表面重力等。

虽然光谱有效温度和金属丰度通常都能得到较好的约束，但仅凭光谱学和等时线拟合，仍难以确定红巨星的恒星质量。这是因为这些恒星在赫罗图上占据一片拥挤区域，不同质量范围的恒星都密集分布于此。这导致质量较大的恒星沿红巨星支上升，与质量较小、已经历氦闪的核心氦燃烧红团簇星之间出现退化。这些退化可能使等时线拟合得出的恒星质量偏高（Schlaufman &Winn 2013；Mallaetal. 2020；Buldgen et al. 2022；Mallaet al.2024）。

在原始样本的 640 颗恒星中，我们剔除了 16 颗已被认定为双线光谱双星的恒星。对于这些系统，复合光谱和未分辨测光可能会使光谱能量分布导出参数产生偏差，并影响对 TESS 功率谱的解读。这些目标也不纳入系外行星发生率分析。此外，我们无法为另外 36 颗恒星提取可靠的 $\nu_{\rm max}$ 值。经目视检查功率谱后，我们剔除了这些目标。对于这些恒星，平滑后的功率谱未显示出明确的宽峰功率过剩， $\nu_{\rm max}$ 估值的不确定性过大，或者功率谱被与预期类太阳振荡模式不符的相干谐波结构所主导。因此，我们最终为 588 个目标提供了 $\nu_{\rm max}$值。对于其中五颗恒星，现有宽带测光不足以通过光谱能量分布拟合可靠地估算有效温度和恒星半径（第2.2节），因此我们为 583 颗恒星提供了修订后的质量。

*2.2. ARIADNE*提供的*SED*参数

除了利用星震学修订恒星质量外，我们还决定使用光谱能量分布拟合软件包 ARIADNE（Vines & Jenkins 2022）更新有效温度（$T_{\rm eff}$）、恒星半径、恒星光度以及其他标准光谱能量分布参数等恒星参数。ARIADNE[1] 是一种 Python 代码，利用来自多个巡天的宽带测光数据，对不同恒星大气模型进行贝叶斯模型平均（BMA）。我们使用 PHOENIX（Husser et al. 2013）、BT系列（Allard et al. 2012）、Kurucz（Kurucz 1993）和 CK04（Castelli & Kurucz 2003）模型网格，对完整样本进行同质化处理，每个目标共生成 100 000 个样本。除 $T_{\rm eff}$、log g 和 [Fe/H]，外，所有参数均采用 ARIADNE 的默认先验；对于这些参数，我们采用以 Ottoni等（2022）的光谱估计值为中心、标准差等于报告不确定度的高斯先验。这些估计值基于使用 CORALIE光谱仪获得的高分辨率光谱得出。默认先验包括：恒星半径在 0.05 $R_\odot$ 至 100 $R_\odot$ 之间的均匀先验；距离的高斯先验，其中心为 Bailer-Jones et al. (2018) 的距离估计值，标准差等于所给两个距离不确定度中较大者的五倍。对于消光 A_V，默认采用零与 Schlegel et al. (1998) 尘埃图给出的视线方向最大消光值之间的均匀先验。A

[1] https://github.com/jvines/astroARIADNE

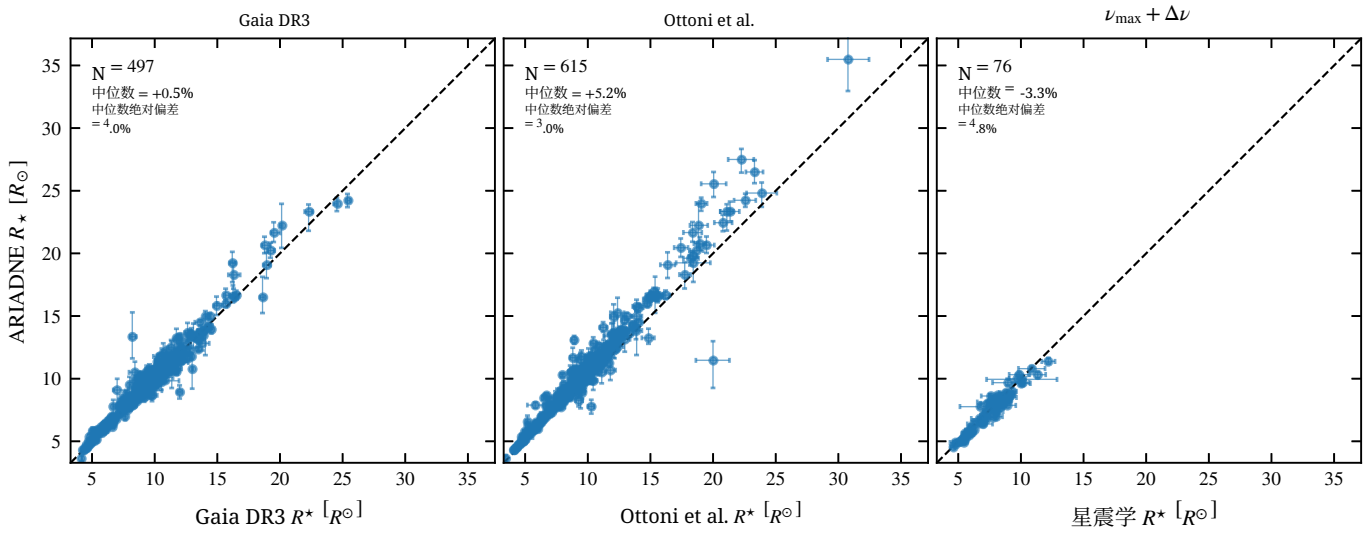


图2：ARIADNE得到的恒星半径值与Gaia DR3半径（Creevey等（2023））的比较（左图）、与Ottoni et al.（2022）的半径值比较（中图），以及与具有 $\Delta\nu$ 测量值的恒星的星震半径比较（右图）。对角虚线表示1：1一致。

算法的完整描述见 Vines& Jenkins(2022)。我们使用ARIADNE 内置的离群值识别程序，系统地移除了测光数据中的所有离群值。对于该样本中的五颗恒星，由于没有足够的测光数据，我们无法获得修订后的光谱能量分布参数。

在本文中最重要的量是恒星半径和有效温度，它们被用于第4.1节的公式2，根据 ν_{max}估计恒星质量。图2展示了ARIADNE获得的恒星半径值与Gaia数据发布第三版（DR3）以及Ottoni等（2022）所得半径值的比较。ARIADNE与Gaia DR3半径（Creevey等（2023））之间的中位数分数差定义为（$R_{ARIADNE} - R_{Gaia}$）/R_{Gaia} 的中位数，其值为 +0.5%，中位数绝对偏差（MAD）为4%。与Ottoni等（2022）半径值的比较显示，中位数偏移为 +5.2%，中位数绝对偏差为3%；总体而言，ARIADNE得到的半径略大。总的来说，这支持所采用的半径估计，同时也表明，与Ottoni等（2022）的先前分析相比，存在较小的系统差异。

我们还将 ARIADNE 的有效温度与 Ottonietal.（2022）报告的光谱学数值进行了比较。中位数分数差异为 −0。09%，中位数绝对偏差为 0。19%。鉴于在光谱能量分布分析中使用了光谱学参数作为高斯先验，这种高度一致性是意料之中的。因此，光谱能量分布导出参数代表了结合现有光谱学约束后得到的改进结果，而非完全独立的测定。

对于其中振荡谱足够清晰的76颗恒星子样本，我们还利用充分清晰的振荡谱，通过 $\Delta\nu$ 和 ν_{max} 使用 pySYD 获得的测量结果（Chontos等（2022）），推导出半径；同时结合式T_{eff}的光谱学测量结果，联立式1 和式3。这些半径未用于最终采用的质量估算，但可作为一致性检验，核验通过 ARIADNE 得到的半径值。虽然我们只能从一小部分恒星（主要是半径较小的恒星）中提取 $\Delta\nu$，但估算出的半径与 ARIADNE 的结果一致，中位数相对差异为异-3.3%，中位数绝对偏差（MAD）为4.8%（以星震学半径为参考）。

如式2所示，我们对恒星质量的估算取决于（$R/R_\odot$）^{2}。因此，可靠地估算恒星半径至关重要。推导最终恒星质量时，我们对R和T_{eff} 的后验不确定性进行了传播。

3. 星震学分析

*3.1. TESS*光变曲线与数据准备

我们从米库尔斯基空间望远镜档案馆（Ricker等（2015））使用 `astroquery.mast`[2]（Ginsburg et al. 2019）下载了公开的TESS任务光变曲线。可用时，我们使用科学处理操作中心（SPOC）的预搜索数据调节光变曲线（Jenkinsetal. 2016）。如果没有可用的 SPOC光变曲线，我们则使用快速查看管线（QLP）的光变曲线（Huangetal. 2020）。当 120 秒和 20 秒的 SPOC光变曲线均可用时，我们使用 120 秒的采样节奏数据，因为预期的 ν_{max} 红巨星目标的数值远低于 120 秒数据的奈奎斯特频率。

随后，我们对数据进行了基本的去趋势处理。首先，在 5 倍西格玛处对离群值进行西格玛截断。接着，我们使用萨维茨基-戈莱滤波器（萨维茨基与戈莱，1964），以 10 天为平滑窗口估算缓慢变化的基线，并在计算功率谱之前，用原始光变曲线除以该基线。只保留 QUALITY 标志为 0 的数据点。我们仅使用校正通量，即 `PDCSAP_FLUX`或 `KSPSAP_FLUX`。对于仅提供 `SAP_FLUX` 的数据扇区，则予以排除，因为我们发现这些未经校正的光变曲线会在分析中引入不可靠的 ν_{max} 测量结果。

这使得该巡天中640颗恒星总计获得了5007个观测扇区的数据（对于我们提供质量更新的583颗恒星，则为4615个观测扇区）。每颗恒星所对应的观测扇区数量分布见图3。每颗恒星的观测扇区数量中位数为5，仅有9颗恒星拥有单个观测扇区的数据。如

[2] https://astroquery.readthedocs.io/en/stable/mast/mast.html

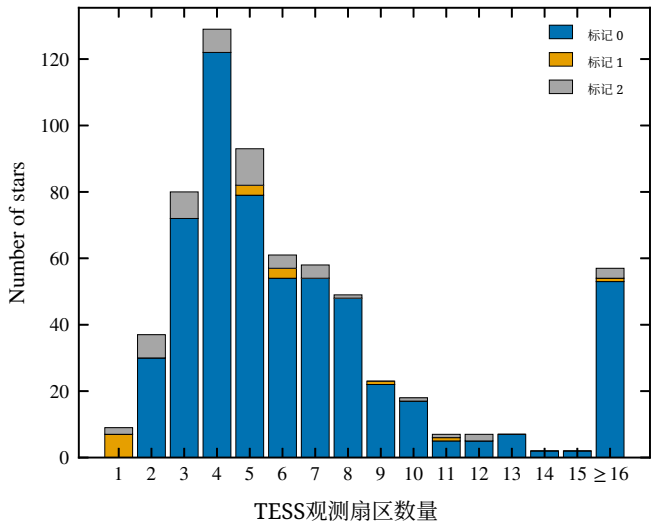


图 3：CASCADES巡天中恒星的TESS观测覆盖情况。直方图显示了我们在分析中采用的每颗恒星可用观测扇区数量。每个TESS观测扇区约持续27天，同一颗恒星的各观测扇区可能并不连续。颜色表示为提取 $\nu_{\max}$ 值所分配的标记：0 表示接受，1表示有保留地接受，2表示拒绝。

TESS观测扇区的跨度约为27天，因此每颗恒星的覆盖时长中位数约为135天。对于给定的恒星而言，这些观测扇区可能并不连续。

3.2. 提取 $\nu_{\max}$

从光变曲线中提取了 $\nu_{\max}$，使用的是 nuSYD Python软件包（Sreenivas等（2024））。nuSYD 通过生成平滑且经过背景校正的功率谱，测量 $\nu_{\max}$ 的值。若有多个观测扇区可用，我们使用 nuSYD 在共同的频率网格上计算各观测扇区的功率谱，计算其中位数光谱，并在该主光谱上测量 $\nu_{\max}$ 的值。我们采用各个功率谱的中位数而非平均值，以减小扇区特有伪影的影响。以这种方式组合功率谱，而不是在时间序列层面进行组合，也无需不同观测扇区之间具有相位相干性。我们还计算并保存了每个观测扇区单独得到的所有 $\nu_{\max}$ 值，以及在存在连续观测扇区时通过拼接这些观测扇区得到的值。拼接时，我们先分别对每个观测扇区进行去趋势处理，然后按时间顺序连接光变曲线，同时保留原始时间戳。对于每颗恒星，我们利用 $\nu_{\max}$ 和2 中的公式，结合 Ottoni et al. (2022) 给出的质量、半径和有效温度，反演得到 的初始估计值。该值仅用作提取过程的初始估计，而非最终 $\nu_{\max}$ 测量的先验。据 Sreenivas 等人(2024) 报告，nuSYD 返回的原始 $\nu_{\max}$ 估计值会受到平滑和背景校正过程引入的小幅系统偏差的影响。因此，我们采用了经 $\nu_{\max}$ 偏差校正的值，该值由 Sreenivasetal.(2024) 标定。

具有模糊功率过剩、各 $\nu_{\max}$ 扇区测量值之间存在较大差异或光变曲线质量较差的目标，会被标记和/或从干净的 $\nu_{\max}$质量样本中排除。我们使用以下标记：0 表示 $\nu_{\max}$ 提取质量良好，1 表示各扇区之间存在中等程度差异的恒星，2 表示没有明确的 $\nu_{\max}$ 提取结果或各扇区之间存在过大的差异。

提取结果；1 表示各扇区之间存在中等程度差异的恒星；2 表示没有明确的 $\nu_{\max}$ 提取结果或各扇区之间存在过大的差异。我们使用各个扇区的 $\nu_{\max}$ 测量值的中位数绝对偏差除以其中位数来量化扇区间散布。相对散布介于 20% 和 40% 之间的恒星被赋予标记 1，而散布超过 40% 的恒星被赋予标记 2。单扇区恒星会自动被赋予标记 1，因为无法评估其扇区间一致性。未发现任何问题的恒星被赋予标记 0。随后，在第一轮标记完成后，我们对所有光谱进行了目视评估。图 $\nu_{\max}$ 4 中展示了几个提取结果示例。

3.3. 验证及与文献比较

在最终样本中，我们剔除了所有标记为 2 的恒星，保留了标记为 0 和 1 的恒星。在包含更新后参数的表格中，我们增加了一列标示标记，并增加了一列说明标记原因（针对标记为 1 的恒星）。 $\nu_{\max}$ 标记为 1 的数值仍被视为可接受，但可靠性可能较低，且信噪比通常也较低。图中展示了一颗测得 $\nu_{\max}$ 且质量标记为 1 的恒星，见图4 （在此例中为单扇区测量）。

为了评估我们方法的质量，我们将获得的 $\nu_{\max}$ 数值与其他研究中共同观测目标的结果进行了比较。我们发现，与Hon 等人(2023)共有 400 颗恒星，与Zhou 等人(2024)共有 253 颗，与 Sreenivas 等人(2026)共有 28 颗，与Malla et al.(2024)共有 22 颗。由于部分恒星出现在多个星表中，因此共有 465 颗独特的恒星。

图 5 展示了本研究分析结果与上述研究结果的对比。本研究的分析结果与文献值相比，其 $\nu_{\max}$ 测量值的中位数相对差异分别为 -3.2%、-0.9%、-1.6% 和 -1.0%，对应的比较对象依次为Hon 等人(2023)、Zhou 等(2024)、Sreenivas 等人(2026) 和Mallaetal. (2024。使用中位数绝对偏差（MAD）计算得到的相应离散值分别为 5.2%、4.5%、2.4% 和 2%。这一致性支持本研究所采用 $\nu_{\max}$ 估算值的可靠性。

4. 修订后的恒星质量

4.1. 星震标度关系

恒星质量根据星震学标度关系估算（Brown等（1991）；Kjeldsen &Bedding 1995；Chaplin和Miglio（2013）），结合测得的 $\nu_{\max}$ 数值、ARIADNE 半径和有效温度：

$$\frac{\nu_{\max}}{\nu_{\max,\odot}} \simeq \frac{g}{g_\odot}\left(\frac{T_{\rm eff}}{T_{\rm eff,\odot}}\right)^{-1/2} = \frac{M}{M_\odot}\left(\frac{R}{R_\odot}\right)^{-2}\left(\frac{T_{\rm eff}}{T_{\rm eff,\odot}}\right)^{-1/2} \quad (1)$$

$$\frac{M}{M_\odot} = \left(\frac{\nu_{\max}}{\nu_{\max,\odot}}\right)\left(\frac{R}{R_\odot}\right)^{2}\left(\frac{T_{\rm eff}}{T_{\rm eff,\odot}}\right)^{1/2} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_\odot} \simeq \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{1/2}\left(\frac{R}{R_\odot}\right)^{-3/2} \quad (3)$$

采用太阳参考值$\nu_{\max,\odot}$ = 3090μHz、 $\Delta\nu_\odot$ =135.1 μHz 和 $T_{\rm eff,\odot}$ = 5772K。

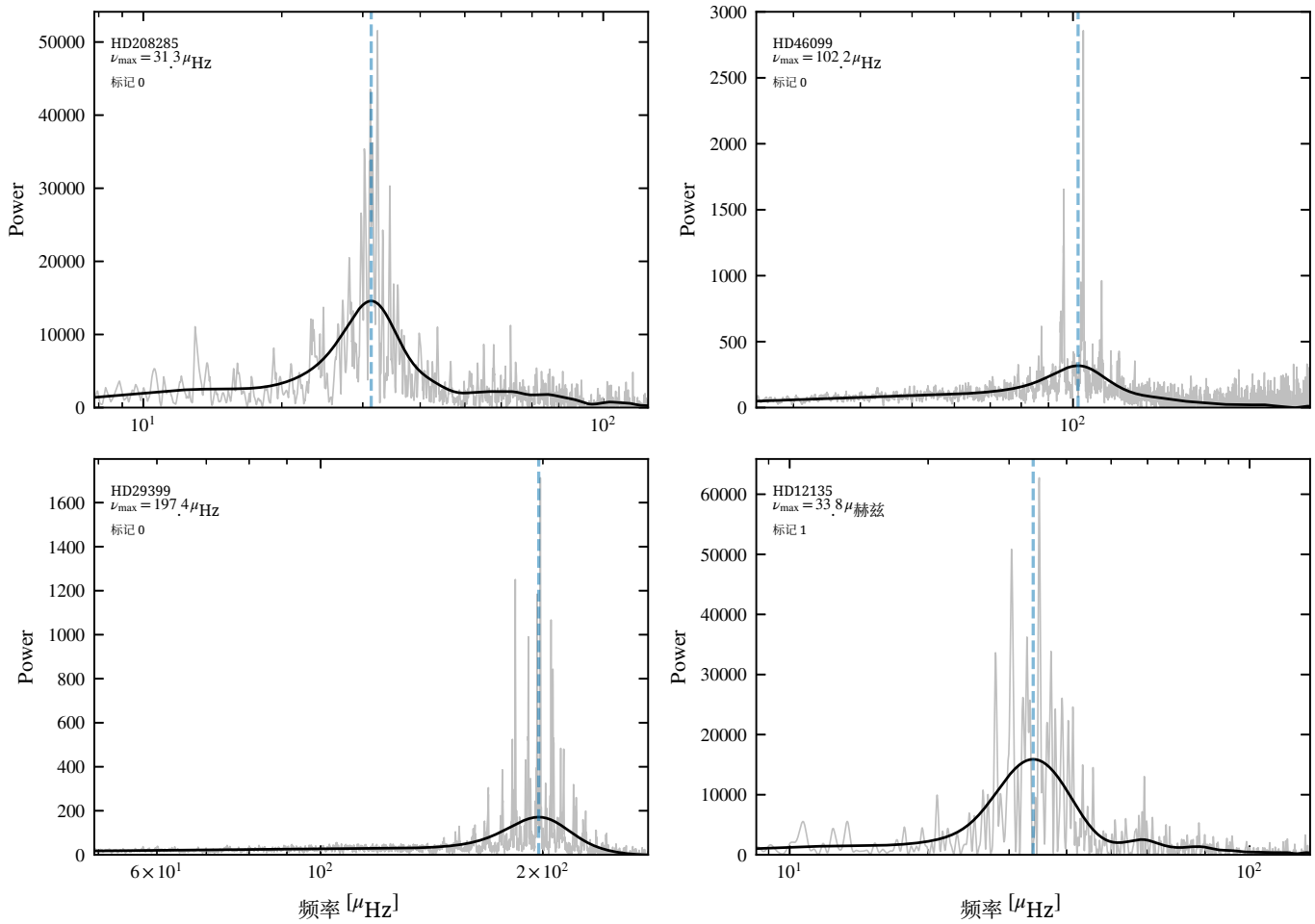


图4：使用 nuSYD Python软件包获得的三颗具有低、中和高 ν_{max} 值的恒星的功率谱及相应 ν_{max} 值示例。右下方面板展示了一颗标记为1的恒星示例，其 ν_{max}测量的可信度较低。对于这颗恒星，由于只有一个观测扇区的数据可用于提取，因此将标记设为“1”。灰色光谱是通过合并所有可用观测扇区的单个功率谱而得到的中位数谱，平滑黑线表示平滑后的光谱。虚线竖线表示未经校正的 ν_{max} 位置。

我们没有尝试为$\Delta\nu$ 完整样本测量大频率间隔，因为可靠的 $\Delta\nu$ 提取需要额外验证，尤其是对于 TESS 基线较短、谱窗复杂或振荡光谱信噪比较低的目标。我们转而使用 ν_{max} 作为表面重力约束，并将其与独立的光谱能量分布半径相结合。这一选择牺牲了一些精度，以换取整个巡天完整样本的一致性和稳健性。因此，我们使用公式 2，为 583 颗同时具有来自我们样本的 ν_{max} 足够质量的测量结果以及来自 ARIADNE 的半径估计的恒星计算质量。

为了估算质量估计的不确定性，我们通过对 ARIADNE 得到的有效温度和半径后验样本应用公式2 ，构建了质量后验分布。由于 nuSYD 不提供 ν_{max}的后验样本，我们从以采用的 ν_{max} 数值为中心、标准差为采用的ν_{max} 不确定性的正态分布中抽取了样本。我们发现，nuSYD 的形式不确定性相较于扇区间散布较小。因此，在有三个或更多观测扇区时，我们采用扇区散布作为 ν_{max} 不确定性，该散布定义为各观测扇区之间的高斯缩放MAD。对于只有两个观测扇区的恒星，我们使用两个数值之差的绝对值的一半。对于单个 ν_{max} ，观测扇区的目标，我们采用 nuSYD 形式不确定性与 ν_{max} 数值的 5.2% 中较大者；该比例对应于图5所示文献比较中观测到的最大MAD。报告的质量及其不确定性分别对应于所得质量后验分布的中位数、第 16 百分位数和第 84 百分位数。

4.2. 与等时线质量的比较

图6展示了583颗恒星的修订后的质量与 Ottonietal. （2022）使用 SPInS（Lebreton&Reese 2020）获得的质量之间的比较。6。尽管两种分布呈现出一致的趋势，但也可以看到一个明显且不可忽略的偏移。与 ν_{max}方法得到的质量相比，等时线拟合似乎系统性地给出了更大的恒星质量估计值，尤其是对于低金属丰度目标。这一差异已在先前的研究中有所报道（例如 Mallaet al. （2024）、Schlaufman& Winn （2013）、Buldgenetal.（2022））。

从这一比较中可以识别出两组。第一组是主要样本，其中不包括差异最大的低金属丰度目标恒星。这些恒星呈现出或多或少连续的

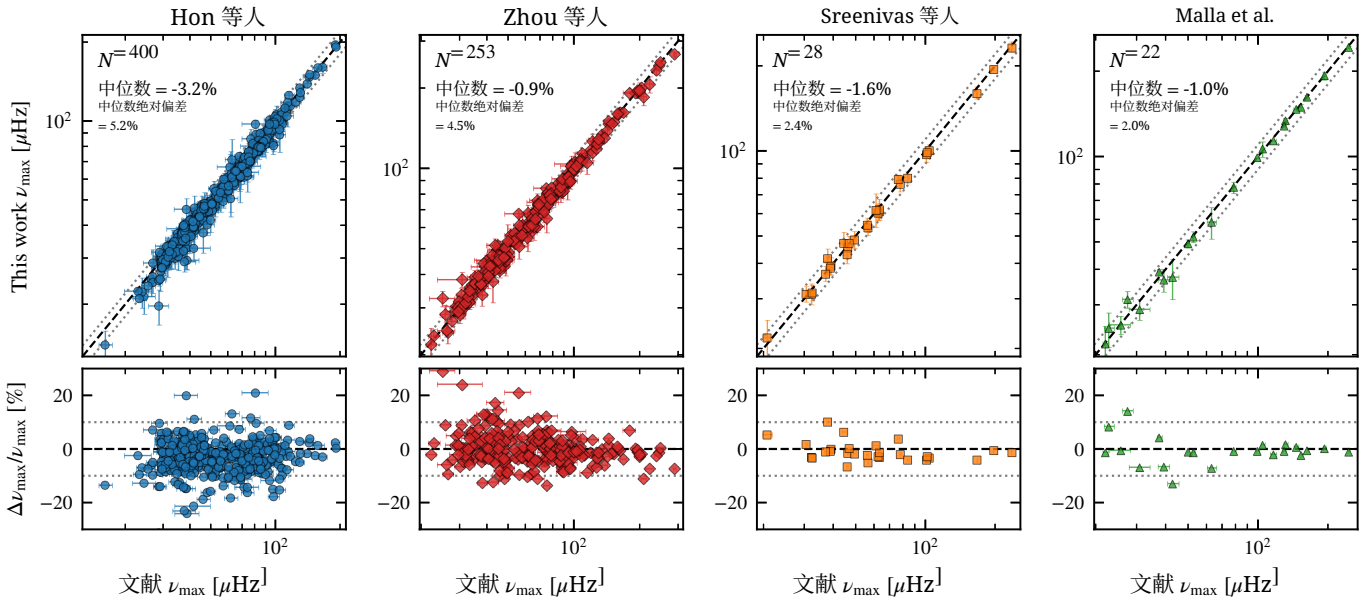


图 5：本研究获得的 ν_{max} 与以下文献结果的比较：Hon 等人 (2023)、Zhou 等人 (2024)、Sreenivas 等人(2026) 和Malla et al. (2024），从左到右排列。

两种方法之间的偏差通常为 15-20%，许多目标在误差范围内仍相容。这组恒星包括样本中质量最大的恒星（$M_{iso} > 2\ M_{\odot}$），更广泛地说，也包括金属丰度较高的恒星。

第二组在分布的低质量端形成了一个低金属丰度恒星团。这些目标通过两种方法得到的质量存在非常显著的差异（$|\Delta M/M_{iso}| > 0.4$，在许多情况下对应的差异大于 0.7 $M_{\odot}$）。这些恒星的等时线质量估计主要位于 1.5–2 $M_{\odot}$ 范围内，而基于 ν_{max} 的质量估计则将其置于 0.75–1.3 $M_{\odot}$ 质量范围内。其中大多数恒星都符合低质量红团簇星/核心氦燃烧星的特征（在图 1 的赫罗图中，光度介于 50 和 60 $L_{\odot}$ 之间，T_{eff} 介于 4700 K 和 5000 K 之间）；Ottoni等（2022）已经提到过这种可能性。这种行为与赫罗图中低质量核心氦燃烧星和质量更大的首次上升 RGB 星或次级红团簇星之间已知的简并性一致（Girardi 1999）。尽管 Ottoni等（2022）的质量估计考虑了金属丰度，但最大差异集中出现在贫金属目标中，这表明在我们的样本中，这种简并性对贫金属部分样本的影响更为严重。ν_{max} 测量为 M/R^2, 提供了额外约束，进而约束恒星表面重力，有助于打破这种质量简并。大多数这些目标的 ν_{max} 值介于 20 和 ~ 40 μHz 之间，半径介于 10 和 11 $R_{\odot}$之间，如图 A.1 所示。在图 1 中也可以看到它们位于 50–60 $L_{\odot}$ 范围内，并根据其 ν_{max}值以不同颜色标示。

5. 讨论

5.1. 有效性与局限性

虽然通过 ARIADNE 获得的修订版光谱能量分布参数（T_{eff}、半径、光度等）与 Ottoni et al. (2022此前的估算非常吻合，但我们提出的恒星质量更新大幅改变了目标的整体质量分布。这自然引出了新质量是否有效的问题。

我们这项研究的一个局限是，仅考虑 ν_{max}，并未尝试为完整样本测量 $\Delta\nu$。如果能可靠地测量 $\Delta\nu$，则可结合式 3 和式2，再利用对T_{eff}的估计，直接通过星震标度关系求得恒星质量和半径。相比之下，我们的方法将 ν_{max} 用作表面重力约束，并结合 ARIADNE 得出的光谱能量分布半径。提取 ν_{max} 而不使用$\Delta\nu$，并非为了深入分析各个目标，而是为了给完整样本获取一组经过修订且均一的恒星参数。更全面的分析或许能改善质量估计，但这超出了本次巡天级研究的范围。此外，利用 TESS 数据可靠地测量 $\Delta\nu$，比测量 ν_{max}要困难得多，尤其是对于观测扇区数量较少、光谱窗口复杂或信噪比较低的恒星。虽然我们未将 $\Delta\nu$ 用于完整样本的质量测定，但对于我们测得该参数的 76 颗恒星，这一子样本提供了额外的一致性检验，表明 ARIADNE 半径与星震半径一致。

尽管存在这一限制，ν_{max} 仍提供了宝贵的星震学约束，因为它近似按 $g/\sqrt{T_{eff}}$（式 1）缩放，因此可以直接约束 M/R^2（Morel与Miglio（2012））。将 ν_{max} 与独立确定的光谱能量分布半径结合使用，因此提供了额外的星震学约束，而仅凭光谱学和等时线拟合无法获得这一约束。

修订后的质量分布也可以放在其他红巨星族群的背景下进行考察。我们的样本显示，在 ν_{max} ~ 30μHz 和 R ~ 10 $R_{\odot}$（图 A.1）附近存在集中分布。Miglio 等人 （2009）利用 CoRoT 红巨星和族群合成模型表明，具有$20 < \nu_{max} < 50$ μHz 的主导族群与红团簇星相关，其半径约为 10 - 12$R_{\odot}$，质量主要介于约 0.8 至 1.8$M_{\odot}$。这些相似性与 CASCADES 中存在红团簇星族群相一致，不过我们强调，CASCADES 的确切质量分布取决于巡天选择函数，不能直接根据 CoRoT 的

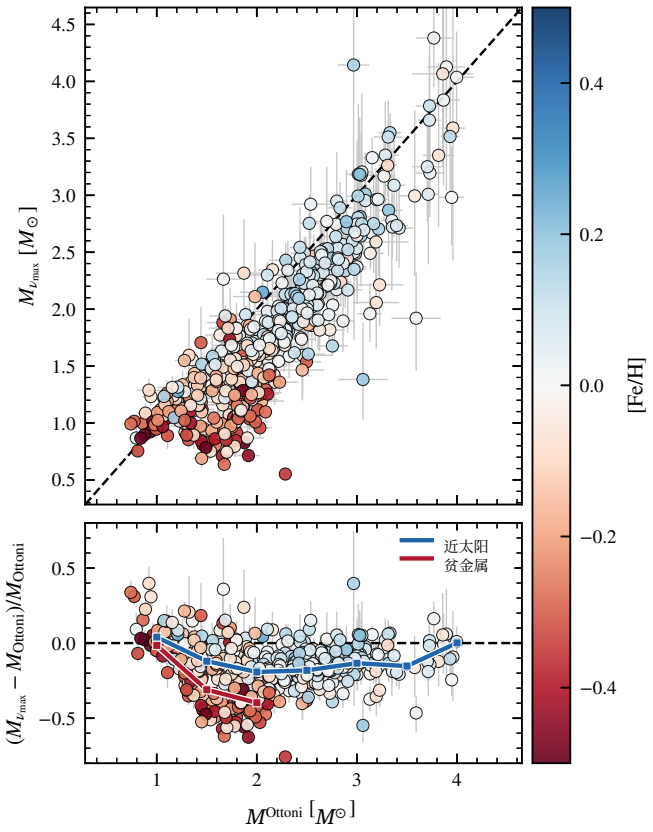


图 6：上图：使用等时线（Ottoni etal. (2022）和 ν_{max} 测量值（本研究）得到的恒星质量比较。圆点按恒星金属丰度着色。下图：质量差异比例随等时线质量的变化。蓝色和红色曲线分别表示近太阳金属丰度（ff）和贫金属（ff）恒星在质量间隔为 0.5$M_\odot$ 下的质量差异比例中位数，其中（−0.1 ⊴Fe/H] ≤ 0.1）和（[Fe/H] ≤ −0.2）。仅显示包含至少 5 颗恒星的区间。下图中的误差棒仅包含基于 ν_{max}的质量不确定度。

族群推断出来。Hekker 等人（2011）在开普勒红巨星样本中也观测到了类似的族群。

作为额外验证，过去Buldgen et al. (2022）和Pezzotti 等人 (2022）曾对巡天中的四颗恒星进行了详细的星震学质量测定。这些估计来自对单颗恒星振荡谱的更详细分析，而非本研究采用的巡天层面方法。图7 比较了这些详细的星震学估计、本研究结果以及Ottonietal. (2022）给出的等时线质量。在这四种情况下，本研究得到的质量都更接近详细的星震学估计。对于 HD 22532 和 HD 29399，两者在不确定度范围内一致；而对于 HD 64121 和 HD 69123，本研究的估计仍然偏高。这进一步支持了对该巡天恒星质量的整体修订，同时也说明了巡天层面方法在处理单个目标时的局限性。

5.2. 对 *CASCADES* 行星巡天的影响

在本研究背景下获得的修订后的质量，对整个巡天具有重要意义。图Ottonietal. (2022中展示了原始恒星质量分布，并将其与我们的更新结果进行了比较。我们观察到，分布峰值8明显

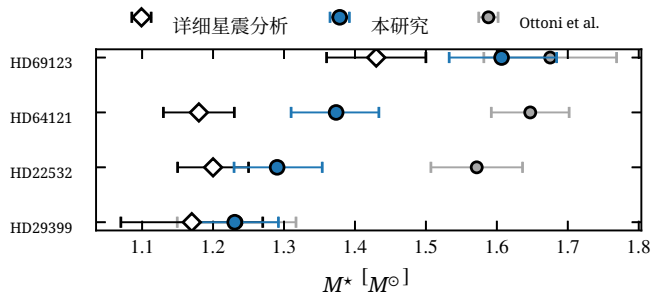


图7：将本研究得到的恒星质量与以下研究通过精确星震学分析获得的结果进行比较：Buldgen et al. (2022）和Pezzotti 等人(2022）。

向较低质量方向移动，中位恒星质量现为 1.65 $M_\odot$ （此前为 2.11 $M_\odot$ ）。

由于启动 CASCADES 的目标是研究中等质量恒星周围的系外行星群体，这次更新将直接影响该巡天的科学目标。质量大于 1.5 $M_\odot$ 的恒星样本数量已从505颗降至342颗，被归类为中等质量恒星的目标数量大幅减少。然而，修订后的样本中仍包含数百颗质量超过1.5$M_\odot$的恒星，因此仍适合研究恒星质量函数的发生率。

当然，宿主恒星质量的变化也会影响已探测行星本身的参数。截至2026年9月，在 CASCADES巡天背景下已有12个探测结果（Ottoni等（2022）；Pezzotti等（2022）；Fontanet等（2025）；Figueira等（2026））。因此，宿主恒星质量估计值的变化会导致行星最小质量估计值发生变化。对于径向速度探测行星，假设$M_p \ll M_\star$，推断出的最小质量随宿主恒星质量按以下关系缩放：$M_P \sin i \propto M_\star^{2/3}$。对于由Fontanet et al. (2025）和Figueira et al. (2026）分析的行星，采用我们修订后的恒星质量后，已发表的最小质量约降低了0.3%–16%。除 HD 102888 外，所有系统的降幅均低于10%。因此，修订后的恒星质量并未动摇先前发表的伴星具有行星属性这一结论。对于四个此前已通过详细星震学分析发表质量的宿主恒星，我们保留已发表的恒星质量和伴星质量。

6. 结论

通过本研究，我们对CASCADES巡天进行了以下改进：

1. 使用 ARIADNE 对基于光谱能量分布得出的恒星参数进行统一修订 2. 利用来自 TESS任务的数据，提取 588 颗恒星的 ν_{max} 值 3. 根据 ν_{max} 的值以及更新后的半径和有效温度，使用 ν_{max} 标度关系更新恒星质量

通过此次更新，样本的中位恒星质量从 2.11 $M_\odot$ 降至 1.65 $M_\odot$。质量高于 1.5$M_\odot$ 的恒星数量从 505 个减少至 342 个。最大的下调修订主要发生在位于赫罗图红团区域的低金属丰度恒星中，这与影响演化恒星等时线质量的已知退化现象一致。与文献

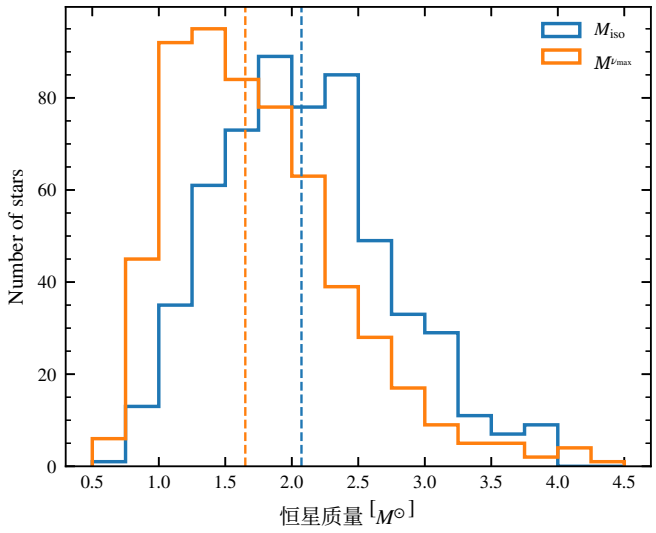


图 8：CASCADES样本中 583 颗恒星在质量更新前（蓝色）和更新后（橙色）的质量分布。竖线表示各分布的中位数。

星表的比较显示出良好的一致性，支持我们的 $\nu_{\rm max}$ 测量结果与文献的一致性。

这些修订后的质量为未来研究宿主恒星质量与CASCADES发生率之间关系提供了更可靠的基础。它们也会影响RV探测到的伴星推断出的最小质量，不过影响较小，因为$M_{\rm P}\sin i \propto M_\star^{2/3}$。更重要的是，本研究强调了仅依赖等时线估算演化恒星质量所带来的风险。

7. 数据可用性

所有新的恒星参数，包括修订后的质量、 $\nu_{\rm max}$值、所使用的TESS观测扇区和标记，将在发表后以电子格式提供于斯特拉斯堡天文数据中心(CDS)。

致谢。 本研究在国家行星系统研究能力中心框架内开展，该中心由瑞士国家科学基金会通过51*NF*40_182901 和51*NF*40_205606资助。作者还感谢SNSF通过MINT项目（资助编号 200020_205010）提供的资金支持。本文使用了通过TESS任务收集的数据，这些数据取自空间望远镜科学研究所（STScI）的MAST数据档案库。TESS任务对美国机构的资金支持由NASA探索者计划提供。STScI由天文学研究大学协会代表NASA根据合同NAS5–26555运营。本研究使用了欧洲航天局（ESA）Gaia任务的数据（https://www.cosmos.esa.int/gaia），这些数据由Gaia数据处理与分析联盟（DPAC, https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium）处理。DPAC的资金由各国机构提供，尤其是参与Gaia多边协议的机构。PF感谢由MCIN/AEI/10.13039/501100011033资助的Severo Ochoa资助项目CEX2021-001131-S提供的资金支持。PF还获得了欧盟资助（ERC, THIRSTEE，101164189）。然而，文中表达的观点和意见仅代表作者本人，并不一定反映欧盟或欧洲研究委员会的观点。欧盟和资助机构均不对这些观点和意见承担责任。PE感谢SNSF第219745号资助项目的支持（输运过程星震学与恒星和行星演化）。

参考文献

Allard, F., Homeier, D., & Freytag, B. 2012, 《伦敦皇家学会哲学汇刊A辑》, 370, 2765; Bailer-Jones, C. A. L., Rybizki, J., Fouesneau, M., Mantelet, G., & Andrae, R. 2018, AJ, 156, 58; Borgniet, S., Lagrange, A.-M., Meunier, N., et al. 2019, 《天文学与天体物理学》, 621, A87; Brown, T. M., Gilliland, R. L., Noyes, R. W., & Ramsey, L. W. 1991, ApJ, 368, 599; Buldgen, G., Ottoni, G., Pezzotti, C., et al. 2022, 《天文学与天体物理学》, 657, A88; Castelli, F. & Kurucz, R. L. 2003, 载于《IAU研讨会》第210卷《恒星大气建模》, N. Piskunov、W. W. Weiss与D. F. Gray编, A20; Chaplin, W. J. & Miglio, A. 2013, 《天文学与天体物理学年度评论》, 51, 353; Chontos, A., Huber, D., Sayeed, M., & Yamsiri, P. 2022, 《开放源码软件杂志》, 7, 3331; Creevey, O. L., Sordo, R., Pailler, F., et al. 2023, 《天文学与天体物理学》, 674, A26; Figueira, P., Fontanet, E., Faria, J. P., et al. 2026, 《天文学与天体物理学》, 712, A143; Fontanet, E., Udry, S., Ségransan, D., et al. 2025, 《天文学与天体物理学》, 699, A38; Frink, S., Mitchell, D. S., Quirrenbach, A., et al. 2002, ApJ, 576, 478; Ghezzi, L., Montet, B. T., & Johnson, J. A. 2018, ApJ, 860, 109; Ginsburg, A., Sip˝ocz, B. M., Brasseur, C. E., et al. 2019, AJ, 157, 98; Girardi, L. 1999, MNRAS, 308, 818; Hekker, S., Gilliland, R. L., Elsworth, Y., et al. 2011, MNRAS, 414, 2594; Hon, M., Huber, D., Rui, N. Z., et al. 2023, 《自然》, 618, 917; Huang, C. X., Vanderburg, A., Pál, A., et al. 2020, 《美国天文学会研究札记》, 4, 204; Husser, T. O., Wende-von Berg, S., Dreizler, S., et al. 2013, 《天文学与天体物理学》, 553, A6; Jenkins, J. M., Twicken, J. D., McCauliff, S., et al. 2016, 载于《天文学IV中的软件与网络基础设施》, 第9913卷, 99133E; Johnson, J. A., Aller, K. M., Howard, A. W., & Crepp, J. R. 2010, PASP, 122, 905; Jones, M. I., Jenkins, J. S., Rojo, P., & Melo, C. H. F. 2011, 《天文学与天体物理学》, 536, A71; Kjeldsen, H. & Bedding, T. R. 1995, 《天文学与天体物理学》, 293, 87; Kurucz, R. 1993, Robert Kurucz CD-ROM, 13; Lebreton, Y. & Reese, D. R. 2020, 《天文学与天体物理学》, 642, A88; Lloyd, J. P. 2011, ApJL, 739, L49; Malla, S. P., Stello, D., Huber, D., et al. 2020, MNRAS, 496, 5423; Malla, S. P., Stello, D., Montet, B. T., et al. 2024, MNRAS, 534, 1775; Miglio, A., Montalbán, J., Baudin, F., et al. 2009, 《天文学与天体物理学》, 503, L21; Morel, T. & Miglio, A. 2012, MNRAS, 419, L34; Ottoni, G., Udry, S., Ségransan, D., et al. 2022, 《天文学与天体物理学》, 657, A87; Pezzotti, C., Ottoni, G., Buldgen, G., et al. 2022, 《天文学与天体物理学》, 657, A89; Reffert, S., Bergmann, C., Quirrenbach, A., Trifonov, T., & Künstler, A. 2015, 《天文学与天体物理学》, 574, A116; Ricker, G. R., Winn, J. N., Vanderspek, R., et al. 2015, 《天文望远镜、仪器与系统杂志》, 1, 014003; Sato, B., Izumiura, H., Toyota, E., et al. 2008, PASJ, 60, 539; Savitzky, A. & Golay, M. J. E. 1964, 《分析化学》, 36, 1627; Schlaufman, K. C. & Winn, J. N. 2013, ApJ, 772, 143; Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998, ApJ, 500, 525; Sreenivas, K. R., Bedding, T. R., Huber, D., et al. 2026, MNRAS, 548, stag671; Sreenivas, K. R., Bedding, T. R., Li, Y., et al. 2024, MNRAS, 530, 3477; Stello, D., Saunders, N., Grunblatt, S., et al. 2022, MNRAS, 512, 1677; Vines, J. I. & Jenkins, J. S. 2022, MNRAS, 513, 2719; Wittenmyer, R. A., Endl, M., Wang, L., et al. 2011, ApJ, 743, 184; Zhou, J., Bi, S., Yu, J., et al. 2024, ApJS, 271, 17

附录 A： ν_{max} 和半径分布

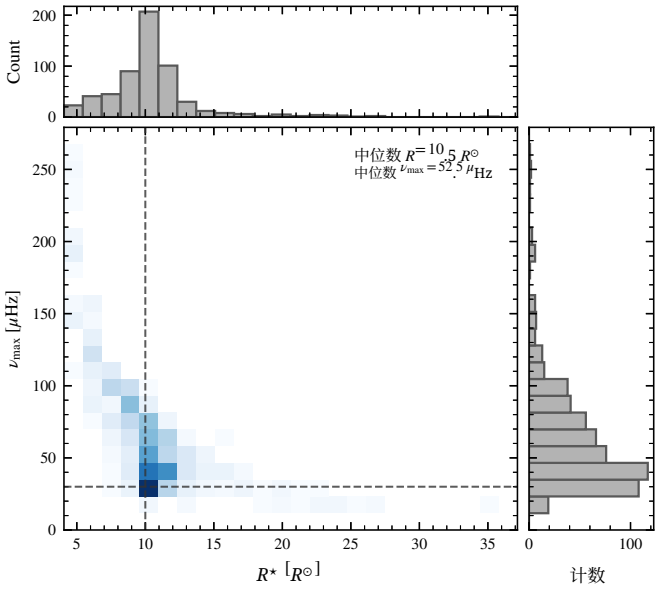


图 A.1：583 颗同时具有 ν_{max} 测量值和半径估计值的恒星的恒星半径与 ν_{max} 值的联合分布。水平线和垂直线分别表示联合分布峰值附近的 ν_{max} = 30μHz 和 R= 10 $R_{\odot}$。