arXiv:2611.32356v1 [astro-ph.EP] 24 Nov 2026

围绕FGK恒星的凌日亚海王星均一质量观测 अभियान

Pierrot Lamontagne[1], Rafael Luque[1], Pedro Figueira[1],Carlos Cifuentes[2],Matthew C. Nixon[3],Luis Welbanks[3], Enric Pallé[4,5], Ilaria Carleo[6], María Rosa Zapatero Osorio[2], Dawid Jankowski[7], Grzegorz Nowak[7], Natalie M. Batalha[8], Joseph M. Akana Murphy[8], Gaia Lacedelli[4,5], 和 Felipe Murgas[4,5]

[l]安达卢西亚天体物理研究所（IAA-CSIC），Glorieta de la Astronomía s/n，18008 格拉纳达，西班牙[2]天体生物学中心（CAB），CSIC-INTA，Camino Bajo del Castillo s/n，28692，比利亚努埃瓦-德拉卡尼亚达（马德里），西班牙[3]地球与太空探索学院，亚利桑那州立大学，Tempe，AZ 85287，美国[4]加那利群岛天体物理研究所（IAC），C/ Vía Láctea s/n，E-38205 拉拉古纳，特内里费岛，西班牙[5]天体物理系，拉拉古纳大学（ULL），E-38206 拉拉古纳，特内里费岛，西班牙[6]意大利国家天体物理研究所 – 都灵天体物理天文台，Via Osservatorio 20，I-10025 皮诺托里内塞，意大利[7]天文研究所，物理、天文与信息学学院，尼古拉·哥白尼大学，Grudzi.adzka 5，87-100 Toru´n，波兰

[8]加州大学圣克鲁兹分校天文学与天体物理学系，加利福尼亚州圣克鲁兹，CA 95064，美国

收到日期：2026年7月29日 / 接受日期：2026年11月16日

摘要

亚海王星是银河系中最常见的行星之一，但我们对它们仍知之甚少，其起源和组成等基本问题尚未得到解答。要回答这些问题，需要精确测定整体密度；然而，当前文献中的数值来自采用不同径向速度（RV）提取方法、恒星活动处理方式和统计框架的研究。这些差异会给推导参数带来系统偏差，进而可能导致总体层面分析得出错误结论。我们针对开普勒任务及其 K2扩展任务观测到的12个亚海王星系统，开展了系统且一致的质量测量观测计划；这些系统因缺乏质量测量或质量测量约束较弱而入选（$\sigma_{M_p}/M_p > 25\%$）。我们使用来自 HIRES、HARPS-N 和 ESPRESSO 的新高分辨率光谱以及档案数据，并采用统一的层次贝叶斯框架和一致的数据整理方法。对于 HARPS-N 和 ESPRESSO 的阶梯光栅光谱，我们应用了四种独立的提取流程（CCF、SERVAL、LBL、sBART），并通过留一交叉验证堆叠合并所得后验分布，确保质量测量不依赖于单一处理流程。此外，我们通过统一的贝叶斯程序，为每个目标选定了首选噪声模型。因此，推导质量之间的差异不会源于分析中的特定选择。我们获得了四颗凌星行星的 $> 3\sigma$ 质量测定：Kepler-21 b（$M_p = 5.^{66+0.65}_{-0\,96}\,M_\oplus$，$\rho_p = 7\,61^{+0.96}_{-1\,28}$ $^{-3}$ 2 66 17 9 ± 3 2 $_\oplus$ 4 69 ± 1 31 $^{-3}$ 538 10 8$^{+2.4}_{-2\,8}$ $_\oplus$ 2 182 20 1$^{+4.5}_{-7\,8}$ $_\oplus$ .g cm ）、K - b（. . M， . . g cm ）、Kepler- b（ .M）和 K - b（ .M）。我们还更新了非凌星巨行星 Kepler-65 e 和 Kepler-129 d 的质量，并报告了其余15个信号的上限，其中包括对 K2-184、K2-244 和 K2-269 的首次约束。我们未在任何系统中发现新的非凌日伴星；这与短至中等周期的大质量行星并非这些亚海王星系统构型中的主导成分这一事实相符。两颗行星的质量与已发表数值 $\approx 2\sigma$：Kepler-126 d 的径向速度上限为17 $M_\oplus$，而最小质量为 55 ± 23 $M_\oplus$；Kepler-145 b 的质量为21 $M_\oplus$，而凌星时间变分质量为 $34^{+25}_{-11}\,M_\oplus$。在采用多种处理流程的目标中，四种数据处理结果的半振幅中位数相差叠加后验分布的0.75σ，最大相差2.7σ；这是单流程分析会忽略的一种系统偏差。

关键词。 行星 和卫星：探测 – 行星和卫星：基本参数 – 行星和卫星：组成 –
技术：径向速 度 – 恒星：基本参数 – 方法：统计

1。引言

亚海王星（1.5$R_\oplus$ < R_p < 4 $R_\oplus$）是银河系中行星形成最常见的结果之一，但其物理本质仍不明确。凌日巡天（主要是开普勒任务）揭示了绕太阳型恒星运行的近轨道行星半径分布呈双峰特征，在 1.5 至 2.0$R_\oplus$之间存在行星数量稀少的区域，即所谓的半径谷（Fulton 等（2017））。通常认为，这一谷值是由光蒸发（Owen 和 Wu（2013））或核心驱动质量流失（Gupta 和 Schlichting（2019））导致的大气质量流失所致，不过Raymond 等 (2018年);Venturini 等(2020年); Burn 等(2024年);Nielsen 等(2025）及其他研究表明，半径谷——

类似的特征也可能在行星形成过程中形成，随后这两种质量流失途径会重塑最终的行星群体。这一特征通常被解释为边界——

，主要由岩质超级地球和具有不可忽略挥发性物质质量的亚海王星行星构成的两类行星之间存在连续过渡。事实上，内部模型表明，大于 ~ 1。6$R_\oplus$ 的行星不太可能是纯岩质的（ Rogers （ 2015 ））。然而，仅凭半径在这一半径范围内并不能提供完整的判别依据：岩质内核加上适度的 H/He 包层，与含有少量原始气体的冰岩混合物，都可能表现出相同的半径（例如，Rogers 与 Sea-ger（2010））。即使获得单个系外行星的质量以测量其整体密度，也不足以区分这两种组成情景。单次密度测量

也不够充分，因为需要一个以一致方法测得整体密度的样本，才能检验其是否符合形成模型的预测（Burn 等（2026））。此类检验已在汇编的 M 矮星行星样本上开展（Luque 与 Pallé（2022）；Parc 等（2024）），但人们仍然怀疑，密度差异是否反映了分析方法的不一致，而非行星本身的性质。

在 M 型矮星周围，呈现出两个截然不同的密度群体，分别对应以岩质行星为主的群体，以及组成符合半岩石半冰组成的天体（Luque 与 Pallé（2022）；Parviainen 等（2023）；Parc 等（2024）；Lacedelli 等（2026））。理论模型表明，这类富挥发物行星无需将大气逃逸视为唯一的塑造机制，也能再现观测到的双峰性；例如，迁移驱动的组装和蒸汽世界演化就可以解释这一现象（Venturini 等，2020、2024；Burn 等（2024）；Chakrabarty 等（2026））。然而，对这一现象的解释仍存在争议，因为保有稀薄氢/氦包层的岩质内核，其整体密度与富水天体的整体密度，在目前可达到的精度下无法区分，因此同样的观测结果仍与气体矮行星情景相符（例如 Dorn 等（2015）；Zeng 等（2019）；Dorn 与 Lichtenberg（2021）；Rogers 等（2023））。此外，超级地球与亚海王星之间的转变似乎会随恒星质量而变化，这一点在观测上（Parviainen 等（2023）；Parc 等（2024））和理论上（例如 Burn 等，2021；Venturini 等，2024）均有所体现，暗示宿主恒星环境在塑造行星组成方面发挥着核心作用。对于低质量恒星，密度间隙和半径间隙似乎会缩小，这是因为长期受到高强度极紫外（XUV）辐照、较低的盘质量预算，以及在雪线之外形成的行星高效迁移等因素共同作用，使得超级地球与亚海王星群体在质量和半径上显得更为相似（Cloutier 与 Menou（2020）；Luque 与 Pallé（2022）；Parc 等（2024）；Venturini 等，2024；Gillis 等（2026））。

相比之下，较大质量 FGK恒星周围的行星能更有效地保留初始形成路径的特征，从而保留吸积和迁移的鲜明印记（Ho 等（2024））。因此，确定 FGK 恒星周围的亚海王星主要是气体矮行星（Rogers 等（2023））还是富水天体（Burn 等（2024），便是对形成路径的直接检验。这种基于密度的检验尤其有用，因为对于利用詹姆斯·韦布空间望远镜（JWST）观测的 M 矮星系外行星，大气表征（打破这种简并的唯一其他方法）可能会产生歧义。气体矮行星上被云层遮蔽、充满雾霾或具有高金属丰度氢包层的大气，能有效模拟真正富水世界的透射光谱（Roy 等（2023）；Piaulet-Ghorayeb 等（2024）；Roy 等（2025））。对 FGK恒星周围行星开展普查，将为学界提供一个规模庞大且无偏的样本，用于检验那些预测行星内部组成存在不同的行星形成模型。

基于来自多种数据约简流程、恒星活动处理方法和统计框架的已发表亚海王星径向速度质量，分析往往会将难以量化的系统误差引入质量–半径图。因此，表面上的成分分支或极端离群值可能反映的是分析选择，而非天体物理现实（Burt 等（2018）；Osborne 等（2024）；Akana Murphy 等（2024））。在本研究中，我们通过展示一项针对12个围绕明亮（$V < 12.5$等）FGK 矮星运行的亚海王星系统的质量测量观测计划，为均一径向速度分析树立先例。这些目标之所以入选，正是因为其已发表质量要么没有约束，要么呈现“离群”的整体成分。这里，我们使用“均一”一词特指分析过程。数量、置信度和精度在不同系统的径向速度之间有所不同，但数据筛选、噪声模型选择、先验分布和堆叠方法对全部12个系统保持一致。所有目标均在统一的层次贝叶斯框架内进行分析，并通过四种相互独立的数据约简流程进行一致的径向速度提取。关键在于，我们没有任意选择单一数据约简方案，而是采用留一交叉验证堆叠（Yao 等（2018））这一严谨方法，根据各处理流程在其自身数据上的预测性能为其加权，并结合由此得到的后验分布。最终获得了一组以均一方式推导的质量值，可以有置信度地置于质量–半径图中。

2. 样本选择

我们使用 NASA系外行星档案识别亚海王星，其现有质量测定要么缺失，要么精度不足，无法通过其在质量–半径（M–R）图上的位置约束行星成分。具体而言，我们要求质量分数精度σ_{M_p}/M_p 差于 25%，从而使每个目标都能受益于重新开展的径向速度分析。行星大小限定为 $R_p < 4R_\oplus$，轨道周期限定为 $P > 1$d。为确保径向速度信号能够通过现有仪器探测到，我们要求预期半振幅为 $K > 1.5$ m s^{-1}。对于没有已发表质量的行星，其预期半振幅根据 Parviainen 等（2023）的概率质量–半径关系（spright，基于 FGK 主星训练的 tepcat_fgk_z19 模型）进行估计。此外，我们要求半径分数精度优于 15%，以避免密度误差预算被半径不确定性主导。宿主星限定为 FGK 主序恒星，以及满足 $T_{eff} > 4000$K 和 $V < 12.5$ mag 的演化恒星；在使用 4–8 m 级望远镜时，这些恒星在 ~1 m s^{-1} 下能够提供足够的光子通量，以开展高精度径向速度观测。在这些限制条件下，我们优先选择位于质量–半径图稀疏采样区域的系统，包括候选超高密度亚海王星和超级水星类似体；在这些区域，新的质量测量对于区分相互竞争的内部结构模型具有最大的判别力。最终样本由 12 个行星系统组成，共包含 21 颗行星，其系统架构见图 1。表 1 总结了样本的基本恒星性质。对于每个系统，我们采用了能够提供内部一致性最高的单一参考来源；在条件允许时优先采用专门的光谱分析或均匀的恒星研究，否则则参考原始行星发现论文。为确保样本所采用的恒星参数遵循一致的方法，我们通过使用 ariadne（Vines 与 Jenkins（2022））对宽带光谱能量分布（SED）进行拟合，独立推导了每个目标的 T_{eff}、$R_\star$ 和 $M_\star$，并在图A.1中将结果与采用的文献值进行了比较。两组参数一致：在所有 T_{eff}、$R_\star$ 和 $M_\star$ 比较中，中位偏移量为 0.64σ，最大偏移量为 2.3σ，对应 TOI-1411 的等时线质量；该恒星的 T_{eff} 和 $R_\star$ 也分别相差 1.7σ和 2.1σ。TOI-1411 是样本中温度最低、大小最小的恒星（$T_{eff} \approx 4100$K，$R_\star \approx 0.61\ R_\odot$），接近 ariadne 的 SED 拟合显示出日益明显系统偏移的参数区域（Vines 与 Jenkins（2022））。总体上的一致性表明，所采用的文献参数与独立且均匀的测定结果相符。因此，我们保留这些参数作为样本的参考值。ariadne 的结果无法对其进行改进，因为对于 12 个目标中的 11 个，其等时线质量的精度低于文献质量（中位数差异为 2.3 倍）。

表 1：目标样本的恒星性质。

Star	N_{pl}	V （星等）	光谱类型	$M_\star$ ($M_\odot$)	$R_\star$ ($R_\odot$)	T_{eff} (K)	[铁氢比]	$v \sin i$ (千米 秒$^{-1}$)	Ref.
K2-182	1	11.833 ± 0.069	G9V	$0.865^{+0.016}_{-0.018}$	$0.793^{+0.013}_{-0.011}$	5170 ± 100	0.12 ± 0.06	< 2	Aka21
K2-184	1	10.345 ± 0.009	G8V	$0.819^{+0.028}_{-0.030}$	$0.764^{+0.033}_{-0.025}$	5252 ± 50	−0.22 ± 0.08	1.51[b]	May18
K2-244	1	11.780 ± 0.024	G3V	0.86 ± 0.02	$0.92^{+0.02}_{-0.01}$	5677^{+38}_{-39}	−0.29 ± 0.03	3.69 ± 0.24	Liv18
K2-269	1	11.784 ± 0.028	F7V	1.16 ± 0.04	1.45 ± 0.06	6209 ± 88	−0.080 ± 0.060	6.1[b]	Liv18b
K2-66	1	11.710 ± 0.026	G1IV	1.06 ± 0.07	1.79 ± 0.10	5865 ± 100	−0.050 ± 0.044	4.0 ± 1.0	How25
Kepler-126	3	10.505 ± 0.006	F7IV	$1.180^{+0.045}_{-0.058}$	$1.350^{+0.031}_{-0.036}$	6311^{+81}_{-75}	$-0.070^{+0.078}_{-0.084}$	8.7 ± 1.0[b]	Mor16
开普勒-129	3	11.809 ± 0.022	G4IV	$1.178^{+0.021}_{-0.030}$	$1.653^{+0.009}_{-0.012}$	5770 ± 83	0.29 ± 0.10	2.13 ± 0.10	Zha21
开普勒-145	2	11.977 ± 0.034	F4V	$1.370^{+0.042}_{-0.060}$	$1.890^{+0.047}_{-0.056}$	6200^{+100}_{-72}	$0.100^{+0.080}_{-0.067}$	6.7 ± 1.0[b]	Mor16
Kepler-21	1	8.25 ± 0.03	F6IV	1.340 ± 0.010	1.860 ± 0.020	6131 ± 44	−0.15 ± 0.06	7.75 ± 1.00	How12
Kepler-538	2[a]	11.270 ± 0.018	G5V	$0.892^{+0.051}_{-0.035}$	$0.8717^{+0.0064}_{-0.0061}$	5547 ± 50	−0.030 ± 0.080	1.10 ± 0.50	May19
Kepler-65	4	10.922 ± 0.008	F6IV	1.25 ± 0.06	1.41 ± 0.03	6211 ± 66	0.17 ± 0.06	11.9 ± 0.5	Cha13
TOI-1411	1	10.51 ± 0.03	K7V	$0.6045^{+0.0148}_{-0.0129}$	$0.6140^{+0.0185}_{-0.0169}$	4115^{+42}_{-45}	$0.012^{+0.071}_{-0.075}$	2.00 ± 0.50[b]	Mac23

注：参考文献缩写：Aka21 = Akana Murphy 等（2021）；May18 = Mayo 等（2018）；Liv18 = Livingston 等（2018b）；Liv18b = Livingston 等（2018a）；How25 = Howard 等（2025）；Mor16 = Morton 等（2016）；Zha21 = Zhang 等（2021）；How12 = Howell 等（2012）；May19 = Mayo 等（2019）；Cha 13 = Chaplin 等（2013）；Mac23 = MacDougall 等（2023）。光谱类型根据基于 Gaia 的重新评估进行了修订。[a] 包括未确认候选体 Kepler-538 c（KOI-365.02）。[b] K2-184 的投影自转速度数据来自 Abdurro'uf 等（2022），K2-269 的数据来自 Petigura 等（2017），Kepler-126 和开普勒-145 的数据来自 Petigura 等（2022），TOI-1411 的数据来自 Giacalone 等（2022）。

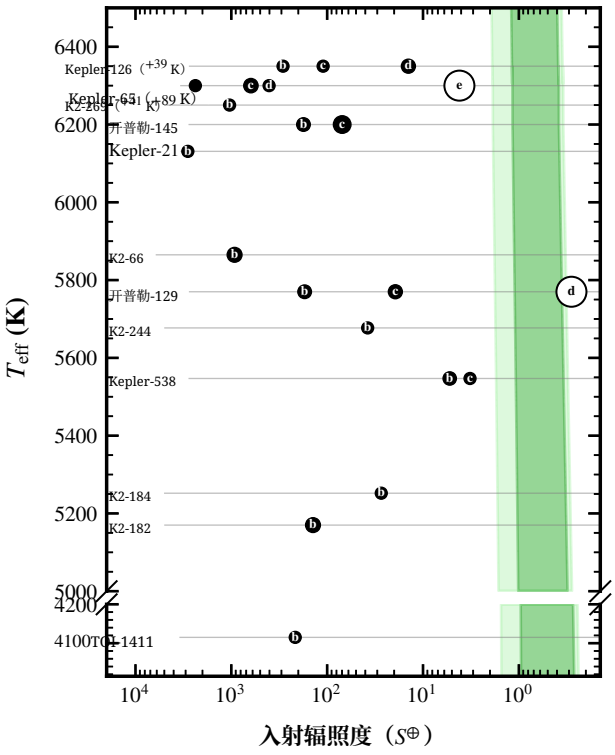


图 1：样本的系统架构：21 颗行星，其中包括两颗非凌日巨行星（半径未测量，按一个木星半径绘制）；它们围绕宿主星运行，宿主星的 T_{eff} 介于 4100 至 6300K 之间。宜居带边界取自Kopparapu(2013年)。

目标系统的先前研究

文献质量 M_p^{lit}列于表 6.3中，我们在第 B.1节所进行比较中使用了这些质量值，并附有其来源。下文将针对每个目标，总结其行星的发现与验证过程，以及已发表的质量测量结果。

K2-182：K2-182b 被认定为 K2 第 5 次观测活动的候选者（Pope 等人 2016年；Petigura 等人 2017年），并由 Mayo 等人 （2018年）验证。Akana Murphy 等人（2021年）利用20 ± 5$M_\oplus$ 来自凯克高分辨率阶梯光栅光谱仪（HIRES）的 12 次径向速度观测表明，该行星是一个高密度亚海王星。Thygesen 等人 （2023年）使用凌日系外行星巡天卫星（TESS）的凌日数据重新拟合了这些径向速度，并得到 21。$0^{+5.4}_{-5.1}$。$M_\oplus$，这就是我们用于比较的质量。

K2-184、K2-244 和 K2-269：K2-184b 是一颗在第 5 次观测活动中发现的候选行星（Barros 等， 2016；Pope 等， 2016），后经 Mayo 等人(2018)确认。其凌星时间变分（TTV）表明存在一颗非凌日伴星（Castro-González 等， 2022）。K2-244b 和 K2-269b 分别由Livingston 等人(2018b)和Livingston 等人(2018a)确认。这三颗行星均未有已发表的质量测量结果。

K2-66：K2-66 b 被识别为 K2候选体（Vander- burg 等人 2016），并由 Crossfield 等人 （2016）确认。Sinukoff 等人 （2017）根据 38 次 Keck/3 ± 3 HIRES径向速度测量，测得其质量为 21.6$_\oplus$ ，而 Howard 等人 （2025）利用 44 次 HIRES 径向速度测量（其中包括上述 38 次）将其修订为 16 ±4$M_\oplus$ 。据此，该行星位于光蒸发沙漠中（Lundkvist 等人 2016）。我们在比较中采用了后者的结果。

Kepler-126：三颗凌星行星由Rowe 等人（2014）确认，并显示出 TTV（Holczer 等人 2016）。目前发表的质量数据仅有根据 58 次 Keck/HIRES 径向速度测量得出的最小质量（Weiss 等（2023年））：4±7、 1±7和 55±23 $M_\oplus$，分别对应 b、c 和 d。

开普勒-129：行星 b 和 c 由 Rowe 等（2014年）验证。Zhang 等（2021年）在 Keck/HIRES径向速度中发现了巨行星开普勒-129d，并测得 43^{+13}_{-12} $M_\oplus$ （对于 c），以及 b 的上限为 20$M_\oplus$。借助更长的 HIRES观测基线，Weiss 等（2023年）获得了 P_d = 1936 ± 25d 和 $M_d \sin i$ = 2015 ± 43 $M_\oplus$，以及 b 和 c 的最小质量 10 ± 6和 25 ± 9 $M_\oplus$，我们在比较中采用了这些结果。

开普勒-145：Xie（2014年）根据 TTVs 确认了两颗行星，其质量分别为 37 ± 12 和 79 ± 16 $M_\oplus$。对开普勒测光数据进行光动力学拟合得到 34^{+25}_{-11} 和 25。$1^{+9.4}_{-6.0}$。$M_\oplus$ （分别对应 b 和 c；Ofir 等（2025））。Weiss 等/的 26 组 KeckHIRES径向速度（2023年）尚未发表径向速度质量结果。

Kepler-21： Howell等人（2012年）验证了该行星，并根据Keck。4 $M_\oplus$的径向速度/HIRES径向速度数据对其质量设定了上限，并通过星震学表征了宿主星。 López-Morales等人 （2016年）利用北半球高精度径向速度行星搜索器（HARPS- N）和HIRES径向速度测得其质量为 5。1 ± 1。7 $M_\oplus$，而 Bonomo 等人 （2023年）通过。5 ± 1。3 $M_\oplus$ 的

质量筛选后各目标和仪器的径向速度观测（第 3.7节），以及新增的+档案数据。

系统	HIRES	HARPS-N	ESPRESSO	APF	NEID	总计
K2-182	2+12	0+4	–	–	–	18
K2-184	–	36+0	0+45	–	–	81
K2-244	–	46+0	–	–	–	46
K2-269	–	21+0	36+0	–	–	57
K2-66	12+44	–	–	–	–	56
Kepler-21	7+66	0+97	–	59+0	0+20	249
Kepler-65	0+79	45+0	–	–	–	124
Kepler-126	0+58	64+0	–	–	–	122
开普勒-129	0+55	–	–	–	–	55
开普勒-145	0+26	–	–	–	–	26
开普勒-538	0+46	0+83	–	–	–	129
TOI-1411	24+45	–	–	–	0+7	76
总计	45+431	212+184	36+45	59+0	0+27	1039

对HARPS-N 保证观测时间（GTO）径向速度数据进行了同质化重新分析。 Beard等人 （2024年）加入了NEID径向速度数据，并通过对开普勒和TESS 测光数据以及HIRES、HARPS-N和NEID径向速度数据进行联合拟合，得到 6。68 ± 1。4$M_\oplus$，并将长期径向速度漂移归因于候选外行星。我们在比较中采用了他们最新的质量结果。

Kepler-538：Kepler-538 b 已由 Morton 等人 (2016年) 确认。Mayo 等人 (2019年) 测得 10。$6^{+2.5}_{-2.4}$。$M_\oplus$，数据来自 HARPS-N 和 HIRES 径向速度，并使用高斯过程（GP）处理恒星活动；Bonomo 等人 (2023年) 则测得 12。9 ± 2。9$M_\oplus$，基于同一项重新分析；我们的比较采用了后者。候选行星 Kepler-538c（KOI-365.02）是早期开普勒星表中列出、但未收录于最终第 25 版数据发布（DR25）星表中的一个微弱 117.8 天凌星信号（Mayo 等人，2019年），尚无已发表的质量测量结果。

Kepler-65：Chaplin 等人 (2013年) 确认了这三颗凌星行星，并通过星震学对宿主星进行了表征。Mills 等人 (2019年) 在 Keck/HIRES 径向速度数据中发现了非凌星巨行星 Kepler-65 e，并通过对开普勒测光数据和径向速度进行光动力学拟合，推导出 b、c 和 d 的质量。我们将其与这些结果以及 Kepler-65 e 的 $M_e \sin i$ = 207.$5^{+17.8}_{-17.5}$。$M_\oplus$ 进行了比较。

TOI-1411：TOI-1411b由Giacalone等人（2022年）确认，其恒星参数来自MacDougall等人（2023年）。Polanski等人（2024年）利用TESS-凯克巡天的Keck/HIRES径向速度测得其质量为$2.0^{+1.2}_{-1.1}$。$M_\oplus$。我们在比较中使用了这一质量。

3. 观测与数据处理

对于上述12个系统，我们使用了来自五台仪器的径向速度数据，并按测量次数排序如下：HIRES、HARPS-N、岩质系外行星及稳定光谱观测阶梯光栅摄谱仪（ESPRESSO）、自动行星搜寻仪（APF）和NEID。表2列出了各目标和仪器的测量次数，并将数据分为新数据（此前未发表且不来自公共档案）和档案数据。测光数据详见第4节。

3.1. Keck/HIRES

我们使用了 HIRES，这是一台交叉色散阶梯光栅光谱仪，安装在夏威夷莫纳克亚山上的凯克一号 10 米望远镜上（Vogt等（1994））。HIRES 的分辨本领为R ≈ 67，000，使用碘吸收池进行同步波长定标，精度可达数米/秒$^{-1}$。我们使用了九个目标的 476 次 HIRES 径向速度观测。其中 431 次已发表（Weiss 等（2023）；Howard等（2025）；Akana Murphy等（2021）；Polanski 等（2024）；Beard 等（2024）），另有 45 个观测时次此前未曾发表，来自加州行星搜寻计划（CPS）。[1] 所有数据均取自 CPS数据库，采用其当前的碘吸收数据处理方案，因此已发表和未发表的径向速度数据使用了同一种数据处理方案。该方案通过正向建模，将每个观测光谱表示为多普勒频移后的去卷积无碘恒星模板与碘池透射函数相乘，再与光谱仪仪器轮廓卷积（Butler等（1996）；W. Howard等（2010））。

3.2. 伽利略国家望远镜/北部高精度径向速度行星搜索器

HARPS-N 是一台光纤馈送阶梯光栅光谱仪，安装在西班牙拉帕尔马岛穆查乔斯天文台的 3.6 米伽利略国家望远镜（TNG）上，分辨本领为 R ≃ 115，000（Cosentino等（2012））。我们获取了五个目标（K2-184、K2-244、K2-269、Kepler-65 和 Kepler-126）的新光谱[2]，并使用了 HARPS-N 保障时间观测计划提供的 Kepler-21 和 Kepler-538 档案光谱[3]，以及 K2-182 的四条档案光谱。新光谱和档案光谱均使用相同的四种处理流程及版本进行处理（第3.6节）。

3.3. 甚大望远镜/*ESPRESSO*光谱仪

ESPRESSO 是一台光纤馈送阶梯光栅光谱仪，安装在帕拉纳尔天文台的欧洲南方天文台（ESO）甚大望远镜（VLT）上（Pepe等（2021））。所有光谱均采用标准高分辨率 1-UT（单台望远镜）模式获取，分辨本领为 R ≃ 140，000。我们获取了 36 条 K2-269[4] 的新光谱，并使用了 45 条 K2-184[5]的档案光谱。后者跨越了 2019年改造前后，因此我们将其分为两个数据集：ESPRESSO18（38 条光谱）和 ESPRESSO19（7 条光谱），并分别拟合径向速度偏移量ff。

3.4. 自动行星搜寻望远镜/*Levy*光谱仪

自动行星搜寻望远镜是位于加利福尼亚州利克天文台的一台专用2.4米望远镜，其光路连接至Levy光谱仪。这是一台高分辨率阶梯光栅光谱仪（R ≃ 110，000，配备标准 1″ 狭缝），使用碘吸收池进行精确的多普勒测量（Vogt等（2014））。我们采用了59个此前未发表的开普勒-21径向速度数据，这些数据是在利克天文台通过2019A观测计划（首席研究员：P. Robertson）和2023A观测计划（首席研究员：J. Luhn）获得的，并采用与HIRES相同的CPS碘吸收数据处理方案。

3.5. *WIYN/NEID*

NEID 是一台光纤馈入高分辨率阶梯光栅光谱仪，安装在基特峰国家天文台的 3.5 米 WIYN望远镜上（Schwab et al. 2016；Robertson et al. 2019）。它的分辨本领为R ≃ 110，000，并使用激光频率梳进行

[1] 包括2023A观测计划_U156。[2] 观测计划CAT23A_52、CAT23B_74、CAT24B_20和CAT25A 76。[3] 观测计划CAT15B_79以及HARPS-N保障时间观测计划。[4] 观测计划112.25F2.001。[5] 观测计划0102.C-0456、1102.C-0744、1102.C-0958、1104.C-0350和106.21M2.003。

率梳进行波长定标。我们使用了 27 个 NEID 档案数据中的径向速度。Kepler-21 的 20 个径向速度值为 Beard etal. （2024年）发表的数据，而 TOI-1411 的 7 个径向速度值则是来自 NEID 数据处理流程（DRP）的标准互相关函数（CCF）径向速度值，取自 NEID档案库（观测项目 2022A-361743）。

3.6. 径向速度提取

对于使用 HARPS-N 和 ESPRESSO 观测的目标，我们采用了通过不同径向速度提取管线获得的径向速度（互相关函数，CCF；光谱径向速度分析器，SERVAL；逐线法，LBL；以及采用模板匹配的径向速度半贝叶斯方法，sBART）。这使我们能够以统计一致的方式考虑依赖于处理流程的系统误差。HIRES、APF 和 NEID 的径向速度作为每种数据处理方案中通用的单一固定数据集输入，因此各数据处理结果之间的差异仅来自 HARPS-N 和 ESPRESSO 的径向速度。这是因为碘吸收径向速度（HIRES、APF）只能通过前向建模获得，而且现有处理流程尚不支持 NEID。

3.6.1. CCF

互相关函数法是高分辨率光谱学中一种用于径向速度提取的标准技术。它将观测到的恒星光谱与数值掩模进行相关，该掩模由标记已知恒星吸收线静止系位置的二进制透射区域（1/0）组成（Baranne 等人 1996）。掩模在速度空间中移动，卷积后产生平均谱线轮廓。通过对 CCF 轮廓拟合高斯函数，即可获得恒星径向速度（Pepe 等人 2002）。为优化多普勒信息，现代实现采用加权掩模，其中每条谱线的权重与其相对深度成正比（Bouchy 等人 2001）。该方法易受地球大气污染影响，数据处理软件（DRS）并不对其进行校正，而是将受污染的谱线完全从 CCF 掩模中排除，因而最多会舍弃 ~27% 的光谱范围（Allart 等人 2022）。在本研究中，HARPS-N 和 ESPRESSO 分别使用其对应 DRS 的 v3.3.12 和 v3.3.10 提取径向速度。每个目标都与根据其分类可获得的最接近的离散光谱型掩模进行相关（表 1）。

3.6.2. SERVAL

`SERVAL`是一种模板匹配算法（Anglada-Escudé &Butler 2012），依赖于在像素空间中进行前向建模，将每次观测分解为三个组成部分：高信噪比（S/N）的恒星模板、$F(\lambda)$；径向速度偏移、v_n；以及乘性背景多项式，$p(\lambda)$，用于解释由波长依赖的光纤耦合损耗等效应（ff引起的通量变化（Zechmeister 等（2017））。恒星模板直接由观测构建，通过使用带权最小二乘回归和三次B样条，将所有可用光谱叠加。每个阶梯光栅谱阶均独立拟合，将观测通量建模为对数波长空间均匀网格上定义的模板。通过屏蔽深度超过5%的地球大气特征以及已知天光谱线所在的光谱区域，对曝光进行了地球大气污染和天光发射校正。径向速度采用公共代码库[6]，提取，使用的提交版本为`58e5419`。对光谱应用了相同的处理配置，并针对每台光谱仪使用其特定的 `SERVAL`模式。我们保留了去-除模板叠加所用的样条过采样因子 `ofac` = 1，因为样本中没有恒星的自转速度足够快（表 1），其展宽的谱线轮廓无需更小的节点间距。

3.6.3. LBL

LBL 框架将 Bouchy 等人(2001) 的最优权重形式推广到单个光谱特征层面。该方法将光谱划分为数千个狭窄区间，这些区间由高信噪比恒星模板中相邻局部极大值之间的区域定义。只有模板导数在两侧均达到 3σ 显著性水平的极值才会保留，从而避免模板中的噪声产生虚假的谱线边界。每个区间有效地对应一条吸收线，并独立与模板匹配以估算其多普勒位移，从而得到逐谱线速度的分布（Artigau 等（2022））。最终径向速度通过混合模型组合各条谱线的位移得到；该模型包含用于生成整体径向速度测量值的名义总体，以及用于处理受系统误差影响谱线的离群总体。这种方法能够自动识别并降低受探测器缺陷、宇宙射线或残余地球大气污染影响的谱线的权重，而无需舍弃整个波长区间。径向速度使用公共代码库[7]，`LBL` 版本`v0.68.001`提取。地球大气吸收线是在此前而非同时去除的，具体通过专门的两步式 `telluclean` 处理步骤，将大气透射率与天文数据大气透射率（TAPAS；Bertaux 等人 2014）进行建模，然后再构建模板并提取径向速度。

3.6.4. sBART

`sBART`在半贝叶斯框架下重新构建了经典的模板匹配方法，从而以概率形式估计径向速度及其不确定性（Silva 等（2022））。不同于将阶梯光栅谱阶分别处理的传统处理流程，`sBART`采用全局参数化，即使用单一多普勒位移同时描述所有光谱阶次。该方法对连续谱干扰参数（例如斜率和截距项）进行解析边缘化，并将恒星模板构建中的不确定性明确传播到最终的径向速度估计中。通过在 TAPAS 透射率曲线中屏蔽地球大气特征深度超过 1% 的波长区域，对曝光进行地球大气污染校正。径向速度采用公共代码仓库[8]，`sBART` 版本 `v1.0.2`提取，采用均匀的 $0.1\,\mathrm{ms}^{-1}$ 速度采样，以及对称的搜索区间$\pm 200\,\mathrm{ms}^{-1}$。

3.7. 质量筛选

我们对新的和档案数据中的径向速度一视同仁，采用同一规则：人工标记、每种数据处理结果中进行一次 5σ 剪裁，以及跨数据处理方案的共同观测时次筛选。人工标记的是 K2-269 中两个信噪比较低的观测时次（13.8 和 9.9），所有处理流程在这两个时次都得出了不符合物理规律的径向速度（第一个时次的 $\approx +220\,\mathrm{ms}^{-1}$ 偏移）。共同观测时次筛选会在任一处理流程的质量控制将某个观测时次剔除时，将其从所有数据处理结果中移除。这样可以确保各数据处理结果使用相同的光谱，是一种保守做法。移除的 17 个观测时次全部来自 HARPS-N：两个被标记的观测时次、四个被剪裁的观测时次（Kepler-538 中两个，K2-184 和 K2-244 中各一个），以及作为共同观测时次筛选剔除项的 11 个观测时次（其中七个来自

[6] https://github.com/mzechmeister/serval

[7] https://github.com/njcuk9999/lbl[8] https://github.com/iastro-pt/sBART

Kepler-65，两个来自 Kepler-126，Kepler-21 和 Kepler-538 中各一个）。

4. 测光分析

来自开普勒、K2 和 TESS 的测光数据用于推断径向速度建模中恒星活动参数的先验分布，适用于采用包含高斯过程的噪声模型的目标（第 5 节）。与 M 型矮星相比，FGK恒星光变曲线中的恒星活动特征通常较弱（Suárez Mascareño 等（2017）），因此在我们的样本中，明显的旋转调制并不常见。我们未重新拟合凌星光变曲线以提高行星半径的精度，因为行星平均密度测量中的异质性主要往往源于行星质量的径向速度测定（Osborne 等（2024））。由开普勒、K2 和 TESS 得出的行星半径，基于均一且特性明确的空间观测，并经专用巡天流水线处理（Jenkins 等（2010），2016）；而径向速度分析在数据筛选、数据处理、活动处理和统计方法方面往往存在显著差异。对凌星测光和恒星参数进行完全均一的重新分析，超出了本研究的范围。

4.1. 恒星自转

我们在空间光度测量数据和由径向速度数据集得到的光谱活动指标中搜索恒星自转信号，并将所有搜索限制在 $P \in [2, 100]$d 以内；这一设置的下限既允许快速自转的年轻 FGK恒星，又避开了 1 d 的采样混叠。我们使用广义 Lomb–Scargle 周期图（GLS，Zechmeister 与 Kürster（2009））分析每条可用时间序列，其峰值显著性通过虚警概率（FAP）进行量化；虚警概率根据单频率概率计算，

$$\mathrm{FAP}(z) = (1 - z)^{(N-3)/2} \tag{1}$$

对于周期图功率z（来自 N 个数据点），再通过 Baluev(2008) 的解析混叠校正推广至完整频率范围。

我们分别在光度域和光谱域应用 GLS，从而为每个目标得到两个周期测量值。对于光度数据，周期图直接作用于光变曲线。对于光谱数据，我们利用每种可用数据处理方案中的活动指标：LBL 的差分线宽（dLW）（Artigau 等（2022））、SERVAL 和 sBART 的 dLW（Zechmeister 等（2017）；Silva 等（2022））、CCF 半高全宽（FWHM）、对比度、Na 和钙线指数（Baranne 等（1996）），以及 HIRES/NEID/APF 数据产品中的色球层 S 指数（Duncan 等（1991））。仅当 $N \geq 12$（其中 N 为该指标对应的径向速度或光度测量数量）、$P \in [2, 100]$d，以及 $P < T_{\mathrm{base}}/2$（其中 T_{base} 为数据集的总时间基线）时，才保留该指标级检测结果。随后，我们将保留的探测结果合并为每个域中的单个测量值，并通过以下方式为每个指标级检测结果分配权重：

$$w = \sqrt{1 + \mathrm{S/N}} \times s, \tag{2}$$

其中

$$\mathrm{S/N} = \tfrac{1}{2}(P_{95} - P_5)/\sigma_{\mathrm{noise}}. \tag{3}$$

此处，P_5 和P_{95} 分别为指标值的第5百分位数和第95百分位数，σ_{noise} 为误差中位数，而$s = -\log_{10}\mathrm{FAP}$是显著性评分。S/N上限设为50，因此噪声底被低估的指标不会最终占据主导地位。领域旋转周期P 是这些探测结果的加权中位数，其误差取以下三者中的最大值：每个指标形式误差的中位数、1.4826乘以各周期相对于P的加权中位数绝对偏差，以及根据Figueira等人(2025)设定的20%下限。P_{rot} 先验在光度估计可达到虚警概率 $< 10^{-3}$ 时取自该估计，否则取自光谱指标；光度是旋转调制更直接的示踪量（表3），每个有探测结果的目标均满足这一条件。

表3：用于径向速度建模先验的恒星旋转周期。

目标	P_{rot} (天)	$P_{\mathrm{rot}}^{\mathrm{lit}}$[a](天)	Ref.	振幅[b]
K2-182	26.00 ± 5.20	24.84 ± 3.69	Rei20	4.59
K2-184	20.91 ± 4.18	16.67 ± 1.35	Rei20	1.40
K2-244	...	...	...	0.09
K2-269	11.84 ± 2.37	12.40 ± 0.80	Rei20	0.22
K2-66	27.24 ± 10.33	...	...	0.54
Kepler-126	7.21 ± 1.44	8.11	Rei23	0.12
开普勒-129	10.02 ± 2.00	29.78 ± 0.56	Maz15	0.15
开普勒-145	13.53 ± 2.71	13.53	Rei23	0.11
Kepler-21	12.65 ± 2.53	12.62 ± 0.03	Lop16	0.21
Kepler-538	46.92 ± 9.38	24.10 ± 4.58	San21	0.61
Kepler-65	8.03 ± 1.61	7.91 ± 0.15	McQ13	0.14
TOI-1411	8.01 ± 1.60	...	...	0.47

注释。参考文献缩写：Rei20 = Reinhold 和 Hekker (2020)，Rei23 = Reinhold 等（2023），Maz15 = Mazeh 等（2015），Maz16 = Mazeh 等（2016），Lop16 = López-Morales 等（2016），San21 = Santos 等（2021），McQ13 = McQuillan 等（2013）。K - 在任一域中均未产生 GLS 检测，无法达到虚警概率 $< 10^{-3}$，因此赋予无信息 η_3 先验。[a] 每颗恒星列出一个已发表数值，优先采用直接光度测量结果。该汇编并不完整。如果来源未给出不确定度，则不附带不确定度。[b] 去趋势、去凌星光变曲线的第5百分位数至第95百分位数范围的一半，单位为千分之一，即方程3中的振幅项。

我们推导出的自转周期与九个具有已发表数值的目标中的六个相符。对于开普勒-129，我们的周期是已发表数值的三分之一；对于 Kepler-538，则约为其两倍，因此这两个周期都最可能是已发表周期的谐波。对于 K2-184，两个已发表数值来自同一颗恒星的不同 K2 观测活动，彼此相差 30%，并且分别位于我们的结果两侧，但无法对其进行确认。我们报告这些不一致之处，而不试图加以裁定。三者在最终噪声模型中均未采用高斯过程（第5节），因此没有任何一个会为本文报告的质量提供旋转先验。

4.2. 磁活动周期

我们在全自动超新星巡天（ASAS-SN；Kochanek 等，2017）和兹威基瞬变设施（ZTF；Bellm 等，2019）中，为样本内所有目标搜索了长基线地基测光时间序列。我们查询了卡特琳娜巡天（CSS）、超广角行星搜寻（SuperWASP）和美国变星观测者协会（AAVSO），但未找到匹配项。我们还检查了匈牙利制造的自动望远镜测光巡天（HATPI；Hartman 等，2026），其拉斯坎帕纳斯覆盖区仅覆盖样本中的五个 K2 目标。K2-182、K2-184、K2-269 和 K2-66 均未显示出显著周期性，而 K2-244 的179天基线对于长周期搜索而言过短。ASAS-SN 测光数据通过

Sky Patrol v2界面（Hart 等（2023））获取。该巡天包含两个不同的测光阶段：V波段（2013年–2018年；第1阶段）和g波段（2017年至今；第2阶段）。在我们的样本中，仅从第1阶段恢复了可用数据。ZTF 光变曲线通过 NASA/IPAC 红外科学档案（IRSA）光变曲线服务，使用 2″ 锥形搜索获取，并移除了带有标记的观测时次（`catflag` = 32768）。

我们保留了至少包含20个数据点且观测时次的测光不确定度为 $\sigma_{\rm mag} < 0.1$mag 的数据集。对于 ASAS-SN，我们样本中最短的光变曲线基线约为1700 d，中位数采样间隔为 ~3d，报告的测光不确定度为 ~20mmag，因此 ASAS-SN 按目标覆盖范围和保留数据点数计，都是主要数据源。在样本中的12个目标中，11个具有可用的 ASAS-SN 测光数据，3个具有可用的 ZTF 测光数据，而 TOI-1411 在所有查询的数据库中均未返回数据。我们使用 Lomb–Scargle周期图，分别对每项巡天独立进行周期搜索。频率网格根据数据采样情况自动设置。

我们搜索了介于 $P_{\rm min} = 20$d 和$P_{\rm max} = 0$之间的周期。$8 \times T_{\rm base}$，其中 $T_{\rm base}$ 是每个数据集的总基线，因此观测时间窗中至少可以容纳 ~1.25 个周期。我们使用虚警概率评估每个峰值的统计显著性。在任何目标中都未发现可归因于恒星自转周期的显著周期性（虚警概率 < 0.05）。这一零结果与成熟太阳型恒星预期具有较低的测光振幅相符，但对于样本中较短且采样更稀疏的光变曲线而言，这同样可能反映的是灵敏度有限，而非真正的宁静状态。三个目标显示出虚警概率为1–3%的边缘周期性，与季节性混叠一致（最明显的出现在 $P \sim 365$d 及其谐波处）。K2-184、Kepler-21、Kepler-65和 Kepler-126的季节平均星等显示出统计显著的（$> 5\sigma$）线性趋势，其振幅在可用基线内为 $\Delta m = 0.06$–0.10 mag。我们无法判断这些趋势是反映长期磁活动周期，还是低水平的仪器系统误差。只有 Kepler-21 采用了线性径向速度趋势（第 6.2节），对于这颗恒星，长期径向速度变化可能源于恒星本身，也可能由外部伴星候选体 Kepler-21c 导致（Beard 等（2024））。

5. 径向速度建模与推断

径向速度分析使用贝叶斯推断软件包`kima`[9] (Faria 等, 2018)v6.3.0完成，该软件包实现了专为从径向速度数据中探测系外行星而设计的跨维度框架（Brewer 与 Donovan，2015）。与预先固定行星数量的传统方法不同，`kima` 将开普勒信号的数量 $N_{\rm P}$视为可直接从数据中推断的自由离散参数。这使采样器能够在单次推断运行中探索维度不同的模型，并为相互竞争的行星架构提供后验概率。参数探索和证据计算采用扩散嵌套采样（DNS；Brewer 等，2010）完成，该方法可同时给出后验分布和贝叶斯证据（lnZ）。随后，根据 $N_{\rm P}$ 各分箱中后验样本的相对比例，估算最可能的行星构型。

对于每颗恒星，观测到的径向速度被建模为$N_{\rm P}$ 个开普勒信号之和，并加上仪器偏移、额外的白噪声项，以及用于描述长期变化的多项式趋势（最高二阶）。多项式部分吸收了未分辨长周期伴星造成的反射加速度，以及恒星磁活动周期可能引起的变化。多项式阶数通过贝叶斯模型比较确定，依据的是kima返回的边缘似然。这种策略只有在数据支持时才纳入长期信号，同时避免过度拟合。每台仪器均赋予独立的径向速度偏移和抖动项。我们拟合了两组模型：一组仅包含已知行星，用于测量所有行星质量；另一组还包含自由开普勒信号，用于搜寻新的伴星（第5.4节）。先验分布见第5.3节。

5.1. 高斯过程恒星活动建模与模型选择

恒星活动信号采用原生实现于 `kima`中的准周期（QP）高斯过程核进行建模。该核已成为对径向速度数据集中的旋转调制活动进行建模的标准选择（Stock 等，2023），能够捕捉恒星表面活动区的准周期演化。QP 核的形式为

$$k(t_i, t_j) = \eta_1^2 \exp\left[-\frac{(t_i - t_j)^2}{2\eta_2^2} - \frac{2\sin^2\left(\pi(t_i - t_j)/\eta_3\right)}{\eta_4^2} \right], \tag{4}$$

其中，η_1 为高斯过程振幅，η_2 为活动区的演化（衰减）时间尺度，η_3 为恒星自转周期，η_4 为控制活动信号谐波复杂度的平滑因子（Haywood 等，2014）。由于不同目标的恒星活动水平存在显著差异，因此并未对所有目标统一采用高斯过程建模。相反，是否纳入高斯过程由贝叶斯模型比较决定。对于最终采用包含高斯过程模型的目标，其高斯过程超参数后验分布列于表 C.2。

对于每个系统，我们通过一个二维模型网格对模型复杂度进行了系统性探索，该网格结合了阶数为 0、1 和 2 的多项式趋势，以及包含或不包含高斯过程活动成分的模型。因此，每颗恒星对应六种相互竞争的噪声模型。模型按照复杂度递增的顺序排列，其中加入高斯过程代表灵活性最大的提升，其次是更高阶的多项式趋势。仅当更复杂模型的证据超过简单替代模型的证据 $\Delta \ln Z \geq 5$时，才采用该模型；这对应于贝叶斯因子 BF $\approx e^5 \approx 148$。对于多约化目标，$\Delta \ln Z$是各数据处理方案中证据差异的平均值，并且同一阈值适用于每个目标。这种分层方法确保仅在具有统计依据时才引入额外的模型成分，从而对样本中的恒星变异进行统一处理。全部六种模型和全部 12 个目标的证据差异完整网格见表 C.1。

5.2. 不同径向速度化简结果间的留一交叉验证与贝叶斯模型平均

本质上，留一交叉验证（LOO-CV）会逐一留出每个拟合模型自身的一个数据点，并考察模型对该数据点的预测效果，同时对预测表现最佳的模型给予更高权重。这提供了一种原则明确、由数据驱动的方法，可为每个目标可用的四种独立径向速度提取结果赋予权重，而不是预先选定单一的数据处理方案。

不同的径向速度提取管线（CCF、SERVAL、LBL、sBART）对光谱信-

[9] https://www.github.com/kima-org/kima

息提取和噪声采用了略有不同的假设，因此针对相同的物理参数会得到略有不同的后验分布。为合并从不同数据处理方案中获得的后验分布，我们根据留一交叉验证（LOO-CV）为其分配权重 $\{w_r\}$。留一交叉验证用于评估在固定天体物理模型下，每种数据处理方案的数据集对自身观测结果的预测效果。对于仅使用 HIRES 或 NEID 观测的四个目标（K2-66、开普勒-129、开普勒-145 和 TOI-1411），没有可用的多流水线提取结果，因此未应用 LOO-CV 堆叠框架。这些目标报告的质量直接由可用的径向速度得出。

对于给定目标和固定的天体物理模型 M，令 r 表示数据处理方法的索引，并令 $\mathbf{y}_r$ 表示由该处理方法得到的径向速度时间序列（各数据处理方案中的观测时次已对齐，且观测数量相同）。LOO 下的期望逐点对数预测密度为

$$\mathrm{elpd}_{\mathrm{LOO},r} = \sum_i \log p(y_{r,i} \mid \mathbf{y}_{r,-i}, M), \tag{5}$$

其中，$y_{r,i}$ 表示数据处理方案 r中的第 i 个径向速度测量值，而 $\mathbf{y}_{r,-i}$表示其余所有数据点。较大的 $\mathrm{elpd}_{\mathrm{LOO},r}$ 表明在 r 数据处理方案中，各观测值在 M下具有更强的相互可预测性，也就是说，每个数据点都能被基于其余数据拟合的模型良好描述。计算式（5）需要对每个 i，在参数空间上进行边际化，求得留一预测分布，

$$p(y_{r,i} \mid \mathbf{y}_{r,-i}, M) = \int p(y_{r,i} \mid \mathbf{y}_{r,-i}, \boldsymbol{\theta}, M)\, p(\boldsymbol{\theta} \mid \mathbf{y}_{r,-i}, M)\, \mathrm{d}\boldsymbol{\theta}, \tag{6}$$

若通过显式重新拟合来计算，计算成本会很高。我们分两个概念步骤进行处理。首先，对于每个后验抽样$\boldsymbol{\theta}_s \sim \mathrm{p}(\boldsymbol{\theta} \mid \mathrm{y}_r, \mathrm{M})$，我们计算逐点预测对数评分 $\mathrm{l}_{r,s,i} = \log \mathrm{p}(\mathrm{y}_{r,i} \mid \mathrm{y}_{r,-i}, \boldsymbol{\theta}_s, \mathrm{M})$。当给定 $\boldsymbol{\theta}$ 后观测值条件独立时（白噪声模型即属此类），$\mathrm{l}_{r,s,i}$ 就是常规的逐点对数似然。当 M 包含高斯过程残差模型时，相关性会使各数据点彼此耦合，因此不能将它们视为独立。随后，我们采用多元高斯观测值的标准闭式 LOO 恒等式（Rasmussen 与 Williams 2006，第 5.4.2 节，式 5.10–5.12），因此无需针对每个 i 单独重新拟合高斯过程，也能得到 $\mathrm{l}_{r,s,i}$。其次，我们使用帕累托平滑重要性抽样留一交叉验证（PSIS-LOO）近似对$\boldsymbol{\theta}$ 的积分。该方法会对后验抽样 $\boldsymbol{\theta}_s$ 重新加权，使其趋近于每个 i 对应的留一后验，并通过拟合广义帕累托分布对重要性权重的上尾进行平滑，以提高其稳定性。由此得到 $\mathrm{elpd}_{\mathrm{LOO},r,i}$ 的逐点贡献，这些贡献$\widehat{\ }$相加后得到每种数据处理方案对应的标量 $\mathrm{elpd}_{\mathrm{LOO},r}$。诊断性帕累托形状参数 k_i 用于标记 PSIS 近似不可靠的观测值。我们选择在 $\mathrm{k}_i > 0.7$ 时舍弃该近似（Vehtari 等，2016）。对于这些被标记的观测值，我们需要在移除它们后重新运行模型，以获得其真实的 $\mathrm{elpd}_{\mathrm{LOO},r,i}$ 值。

我们通过两种方式将预测性能转换为每种数据处理方案 $\{\mathrm{w}_r\}$ with $\sum_r \mathrm{w}_r = 1$ 的权重。首先，我们计算了伪贝叶斯模型平均（pseudo-BMA）指标，该指标设置的权重与$\widehat{\ }\exp(\mathrm{elpd}_{\mathrm{LOO}}$成正比，相当于对各数据处理方案的 softmax 权重进行归一化。随后，我们计算了堆叠指标，该指标选择 se-$\widehat{\ }$lects $\{\mathrm{w}_r\}$ 以最大化 $\sum_i \log \sum_r \mathrm{w}_r \exp(\mathrm{elpd}_{\mathrm{LOO},r,i})$（Yao 等（2018））。由于所有数据处理方案均源自同一组光谱，因此这些数据集并不相互独立。在此处，我们更倾向于使用堆叠，因为它能够优化由多种数据处理方案构成的混合模型的预测得分，而不是将各数据处理方案视为相互独立的备选方案。此外，当多个数据处理方案彼此非常相似时，堆叠还可以减轻权重过高的影响。例如，SERVAL 和 sBART 在概念上较为接近，因为二者都依赖于针对地球大气污染的掩蔽策略，以及逐阶光谱的模板匹配来进行径向速度提取。将这类密切相关的数据处理方案视为相互独立的备选方案，会人为夸大它们的整体影响。这种通用方法也已应用于系外行星大气分析，以结合不同模型中的多种数据处理结果或反演，（Welbanks 等，2023；Nixon 等，2024）。

对于各数据处理结果之间共享的参数 $\boldsymbol{\phi}$，留一交叉验证加权的贝叶斯模型平均同样是各数据处理方案后验分布的混合：

$$p(\boldsymbol{\phi} \mid \{\mathbf{y}_r\}, M) = \sum_r w_r\, p(\boldsymbol{\phi} \mid \mathbf{y}_r, M), \tag{7}$$

其中 $p(\boldsymbol{\phi} \mid \mathbf{y}_r, M)$ 是数据处理方案 r 得到的边缘后验分布。本研究所采用的最终后验分布来自第 3.6 节所述四种数据处理结果的堆叠混合。由此得到的处理流程权重将在第 6.1 节讨论。

尽管术语如此，这并不是完全的贝叶斯模型平均：严格来说，需要每种数据处理结果的边缘似然，以及关于各数据处理结果的先验分布；当这四种数据处理结果是由同一组光谱产生的相关实现，而不是相互独立、彼此竞争的模型时，这两者都没有明确定义。相反，伪贝叶斯模型平均和堆叠权重通过留一交叉验证直接优化预测准确率。

5.3. 采用的先验

系统速度、偏移量、抖动和趋势系数采用 kima 的默认先验；相对于数据的尺度而言，这些先验均无信息性（偏移量和抖动的尺度随 $K_{\max}$ 变化，其中 $K_{\max}$ 是径向速度数据的峰峰值范围）。高斯过程超参数采用 kima 默认的对数均匀先验：$\eta_1 \sim \mathcal{U}_{\log}(10^{-5}\sigma_1, 10\,\sigma_1)$ m s^{-1}，其中 σ_1 是参考仪器的径向速度散布，$\eta_2 \sim \mathcal{U}_{\log}(5, 500)$ d，且 $\eta_4 \sim \mathcal{U}_{\log}(0.1, 10)$。演化时间尺度被限制为 $\eta_2 > \eta_3$，因此活动区的衰减速度不会快于恒星的自转速度；自转时间尺度的先验 η_3 则参考第 4.1 节的分析（表3）。

每颗已知行星的半振幅具有对数均匀先验，$K \sim \mathcal{U}_{\log}(0.1, K_{\max})$ ms^{-1} 其偏心率采用 Kumaraswamy(0.867,3.03) 先验，该先验能够再现已知系外行星群体的经验偏心率分布（Kipping 2013），并对 $\omega \in [0, 2\pi$采用均匀先验。凌星行星的轨道周期和凌日时间采用根据文献星历设定的高斯先验。非凌星巨行星 Kepler-65 e 和 Kepler-129 d 是通过径向速度数据发现的，我们也对这些数据进行了拟合，因此对它们的轨道相位采用均匀先验；对周期则分别采用 244.8–272.8 d（Kepler- 65 e）和 1500–3267 d（Kepler-129 d）范围内的均匀先验，以避免重复使用数据。第一个范围以已发表的 258.8 d 为中心，半宽为 14 d。第二个范围涵盖两个已发表的周期（Zhang 等（2021年）；Weiss 等（2023年）），并延伸至 HIRES观测基线。用于第 5.4 节搜索的自由行星，其周期采用均匀先验，半振幅采用对数均匀先验，且轨道为圆形。

5.4. 搜索额外伴星

我们报告的质量来自仅包含已知行星的拟合；但为了搜索额外的伴星，我们利用了 kima 的可变维度特性，并允许每个目标最多存在$N_{\mathrm{p}}^{\max} = 2$ 颗自由行星。额外行星的轨道被

设为圆轨道，因为偏心轨道模型会引入足够的额外灵活性，即使采用Jeffreys 先验，也无法可靠地阻止采样器拟合噪声特征，并夸大虚假信号的证据（Lucy & Sweeney 1971； *Zakam- ska* 等（*2010*）；Hara 等（2019））。后验样本按 $N_{\rm P}$ 进行标记，相邻架构之间的对数贝叶斯因子可直接由样本数量得到：

$$\ln B_{N,N-1} = \ln \frac{n_N}{n_{N-1}}, \tag{8}$$

其中，n_N 和n_{N-1} 分别是$N_{\rm P} = N$和$N_{\rm P} = N - 1$ 区间内的嵌套抽样后验权重。若$N_{\rm P} = N - 1$区间为空，则在$n_{\rm tot}$ 个后验样本下，其概率在95%置信度下低于 $3/n_{\rm tot}$ ；我们采用由此得到的下限 $\ln B_{N,\,N-1} \geq \ln(n_N/3)$。只有依次通过以下四项审查标准的自由信号，才算作探测：决定性的贝叶斯因子（$\ln B_{1,\,0} > 5$，第1级）；良好的后验形态（$K/\sigma_K > 3$；振幅偏度 $\gamma_1(K) < 1$，且至少90%的周期样本落在最大后验概率（MAP）周期的 ±5%以内，第2级）；在至少两种数据处理结果中，探测结果具有决定性且周期一致（差异在5%以内；第3级，仅适用于有多种数据处理结果的目标）；与回归年或其第一谐波的差异均超过5%（第4级）。

6. 结果与讨论

6.1. 数据处理比较与留一法堆叠

对于每个多流程目标，我们分别拟合了每个数据处理方案的径向速度，并将所得后验分布合并为加权混合。权重通过堆叠确定，使该混合模型能够在某个径向速度被留出拟合时，尽可能准确地预测该径向速度；我们使用 PSIS-LOO（第 5.2节）估计了这一评分。因此，模型对留出径向速度预测不佳的数据处理方案，对最终行星质量的贡献很小。在整个样本中，没有任何单一处理流程始终最优，而留一交叉验证堆叠权重明确体现了各流程之间的分工。图 2 展示了 Kepler-21 的分析作为一个具体示例，附录D则给出了各处理流程的拟合结果。

各目标的权重（图 3，第 a 行）证实，对于大多数系统，堆叠确实混合了多方面的信息。只有 K2-184 主要由单一处理流程主导，其全部权重都分配给LBL；其余七个多流程目标的权重则分布在两到三个数据处理方案之间。堆叠几乎不会改变中心质量估计。对于八个多约化目标中的 14 颗行星，四个单独处理流程得到的中位半振幅，与叠加后验分布的中位半振幅之间的跨度为 $0.75\,\sigma_K$ （图 D.2）。其中 13 颗行星的跨度小于 $1.3\,\sigma_K$，Kepler-126c 的跨度则达到 $2.7\,\sigma_K$。至少对于本样本而言，多流程方法带来的是对单一数据处理方案偶然选择不佳的稳健性，而不是推导质量的系统性偏移。我们还通过线性拟合检验了每个处理流程获得的权重是否取决于 $T_{\rm eff}$、[Fe/H], 或 $P_{\rm rot}$；该拟合同时考虑了两个坐标轴及权重的不确定性。结果发现，八个目标的样本量过小，无法在 95% 可信度下得到任何与零不一致的斜率。更大的样本应能够检验这些依赖关系。

这些权重是根据目标的全部径向速度拟合得出的，包括 HIRES、APF 和 NEID 的速度；在每种数据处理方案的拟合中，这些速度均保持不变。对于 Kepler-21、Kepler-65、Kepler-126 和 Kepler-538，这些权重因此部分反映了各数据处理方案与采用单一数据处理方案的仪器所得径向速度之间的一致程度。为检验堆叠效果是否受这一外部因素影响，我们在多重约化数据集上重复了分析。该数据集仅保留由全部四种处理流程处理的 HARPS-N 和 ESPRESSO 径向速度，涵盖除 K2-182 以外的所有多流程目标。其四 HARPS-N 径向速度仅跨越两个夜晚。在多重约化数据集（图3，第 2 列）上，所有七个目标在每个随机种子下的堆叠半振幅均与单管线结果一致。其 95%区间包含每个未被排除的处理流程所得结果的中位数，且其中位数与这些结果的差距不超过 1σ。对于每种处理流程和每个目标，各随机种子所得权重也具有可重复性，标准差均低于 0.08。在完整数据集上，只有 Kepler-21 和 Kepler-65 的权重在不同随机种子间的离散程度超过 0.1。对于 Kepler-65，HIRES径向速度确定了这颗周期为 259 天的巨行星的周期，其偏心率后验分布随后呈现双峰：一个峰位于$e \approx 0.25$，另一个位于较低的 e，且ω未受约束。对CCF进行拟合的嵌套采样器仅在五个随机种子中的一个找到第一个峰，导致堆叠权重和堆叠后的K_e最多变化 $0.37\,\sigma_K$。

加入 HIRES、APF 和 NEID 的径向速度数据后，在拥有这些数据的四个目标中，有两个目标（Kepler-21 和 Kepler-126）的权重变化超过了其种子散布。对于 Kepler-21，在最终后验分布中，权重从仅采用多种数据处理方案的运行结果中的sBART(65%）和LBL(35%），变为采用完整数据集时的sBART (58%）和SERVAL (42%）。半振幅的变化则小得多。在十颗行星中，有八颗的两个数据集之间的偏移小于 1σ完整数据集后验分布的宽度；Kepler-126 b 的偏移达到 1.6σ，Kepler-538b 的偏移达到 1.3σ。因此，堆叠质量几乎不受是否纳入单约化仪器数据的影响，但对某些目标而言，权重则在很大程度上取决于这一点。由于完整数据集的权重也反映了与 HIRES、APF 和 NEID 径向速度数据的一致程度，而我们无法核实这些数据本身的准确性，因此不将这些权重视为处理流程质量的排名。多种数据处理方案的权重（图3的第二列）更接近这样的排名，因为每种数据处理方案仅依据其自身产生的留出径向速度进行评分。七个目标仍不足以对处理流程进行排名，其中大多数目标的行星只能得到上限；应当在具有较高信噪比的大型样本上进行这类比较/。

6.2. 样本中的噪声模型选择

在为每个目标比较的六种噪声模型中（见第5节），有两个目标需要使用高斯过程。对于开普勒-21，高斯过程模型相较于不含高斯过程的最佳模型，其偏好程度为$\Delta \ln \mathcal{Z} = 98.3$。对于 K2-66，线性趋势首先优于常数偏移（$\Delta \ln \mathcal{Z} = 38.0$），随后高斯过程模型又在此基础上提高了 6.7。其余十个目标对高斯过程的支持均低于阈值，其中 Kepler-538 和 K2-184 最为接近，分别为 $\Delta \ln \mathcal{Z} = 3.9$ 和 2.6（表 C.1）。所有采用的模型都包含一个恒定的仪器偏移（$d = 0$），但 Kepler-21 例外：除高斯过程外，它还支持线性趋势。这与自转调制活动和缓慢的径向速度漂移均一致，Beard等人（2024年）将后者认定为长周期候选体 Kepler-21 c。Kepler-21 和 K2-66 的高斯过程超参数列于表C.2。

6.3. 行星质量及其组成方面的意义

表B.1 列出了完整的行星参数集，图4 汇总了完整样本的质量约束。在21个行星信号中，有六个超过 3σ 探测阈值。其中四个是凌星行星：Kepler-21 b（$K/\sigma_K = 7.1$）、K2-66 b（5.5）、Kepler-538 b（4.2）和 K2-182 b（3.3）；另外两个是非凌星巨行星：Kepler-129 d（61.1）和 Kepler-65 e（14.7）。其余15个信号给出了行星质量上限。三个系统（K2-184、K2-244 和 K2-269）此前没有质量测量，本研究为它们提供了首批径向速度约束，但都未达到 3σ 探测阈值。

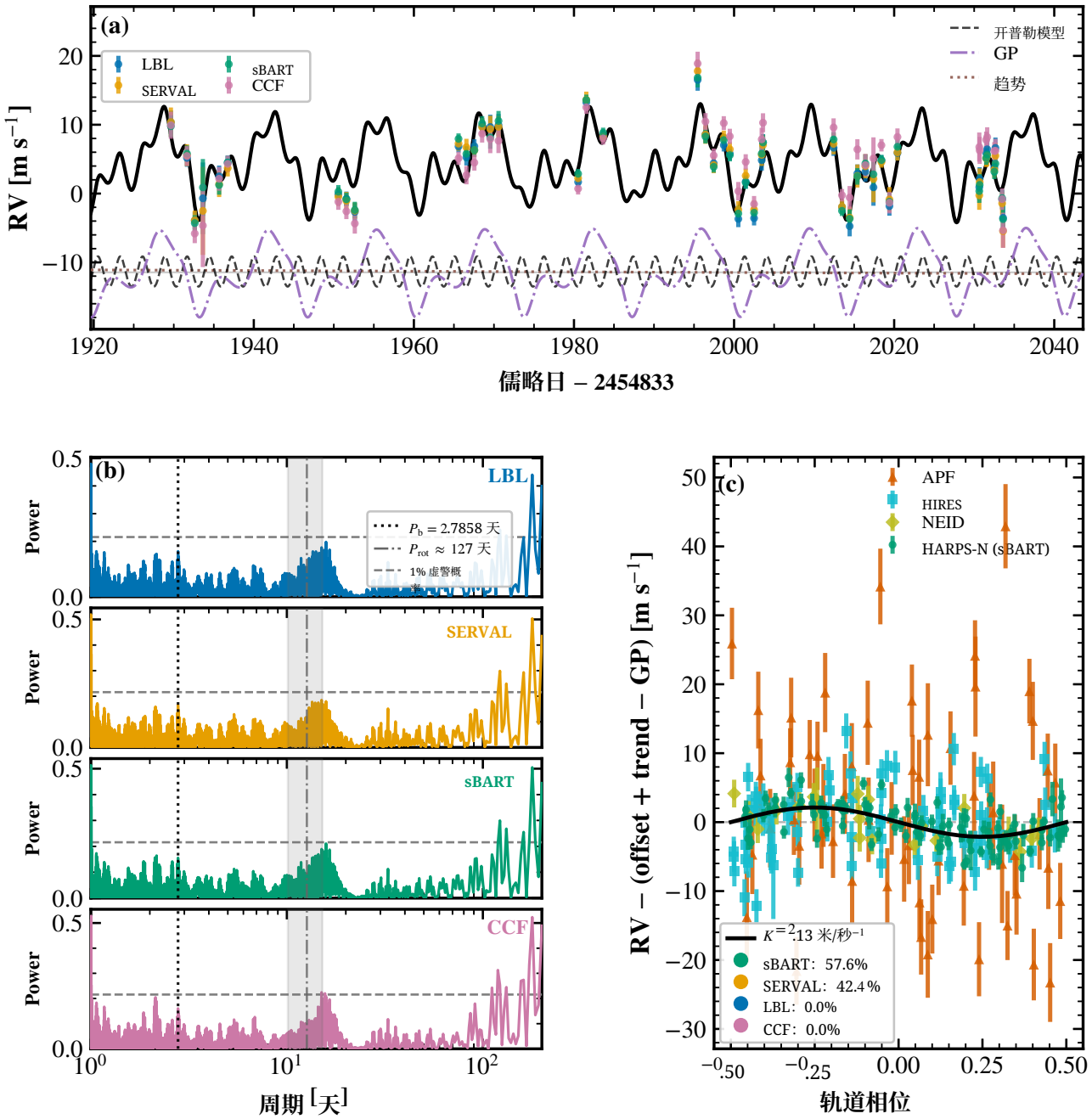


图 2：Kepler-21 b 的径向速度分析。(a) 各处理流程在观测最密集的 130 天时间窗内的 HARPS-N 径向速度，以及基于权重最高的数据处理方案（sBART）拟合的模型（开普勒模型+ 高斯过程 + 线性趋势）。(b) 各处理流程的广义最小二乘周期图。(c) 扣除偏移量、趋势和高斯过程后，按P_b折叠相位的径向速度。该行星在 7.1σ 处被探测到（K = 2.13 m s^{-1}），同时还存在一个周期为P_{rot} ≈ 12.7 天的准周期活动信号。

图4将质量约束与基于半径的 spright 先验分布以及表B.1中的文献质量 M_p^{lit}进行了比较。对于此前已有质量测定的系统，叠加后的质量后验分布与文献结果相差不超过1–2σ。Kepler-21 b 的质量为$5.66^{+0.65}_{-0.96}$. M⊕，而径向速度测得的质量为6.68 ± 1.4 M⊕（Beard 等（2024））；此前 HARPS-N 测得的径向速度质量为7.5 ± 1.3 M⊕（Bonomo 等人，2023年）。K2-66 b 的质量为17.9 ± 3.2 M⊕，而 HIRES 测得的径向速度质量为 16 ± 4 M⊕（Howard等（2025））。K2-182 b 的质量为$20.1^{+4.5}_{-7.8}$. M⊕，与 HIRES 测得的径向速度质量$21.0^{+5.4}_{-5.1}$. M⊕（Thygesen 等人，2023年）相符；Kepler-538 b 的质量为$10.8^{+2.4}_{-2.8}$. M⊕，而 HARPS-N 测得的径向速度质量为12.9 ± 2.9 M⊕（Bonomo 等人，2023年）。K2-182 b 的探测对种子值敏感（K/σ_K be-在五个采样器随机种子下，数值介于 2.6 和 3.5 之间），而 Kepler-538 b 的数值则取决于噪声模型，因为高斯过程会将其半振幅降至 0.2–0.4 ms^{-1}。

图5 在质量–半径图上标出了这些凌星行星。四个凌日探测结果的整体密度范围为：K2-66 b 为 4。7 gcm^{-3}，Kepler-21 b 为 7。6 g cm^{-3}。Kepler-21 b 的半径与具有类地组成且没有包层的岩石内部相符。其余三颗行星在中位质量下都过大，不可能具有岩石内部；它们位于 100% $MgSiO_3$ 曲线（密度最低的岩质模型）之上。因此，它们需要含有挥发性组分：K2-66 b（4。69 g cm^{-3}）和 K2-182 b（5。33 g cm^{-3}）的水质量分数为 10% 至 50%，而

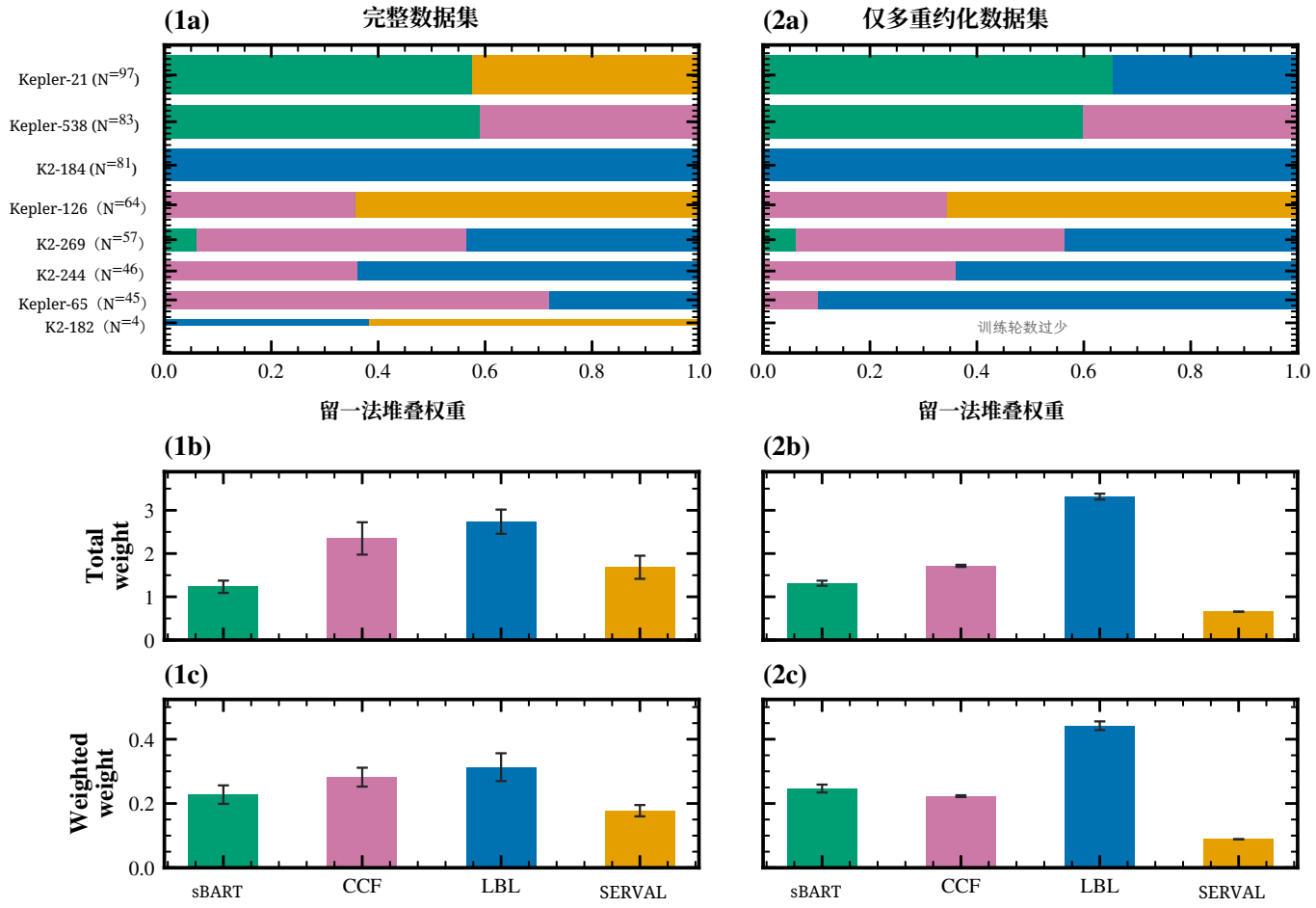


图 3：每个处理流程和目标的留一交叉验证堆叠权重。第 1 列：完整数据集，其权重用于给出最终后验分布。第 2 列：多重约化数据集（仅包含 HARPS-N 和 ESPRESSO）。第 a 行：每个目标的权重，条带厚度随 HARPS-N 和 ESPRESSO 径向速度数量N （括号内）缩放。第 b 行：每个处理流程的总权重，即分别对第 1 列的八个目标和第 2 列的七个目标求和。第 c 行：每个处理流程的平均权重，其中每个目标按N加权。误差条表示五个采样器随机种子下的标准差。只有 K2-184 由单一处理流程（LBL）主导，且没有任何处理流程在整个样本中均表现最佳。

Kepler-538 b 的水质量分数接近 10%（5.47 g cm^{-3}）；或者，它们具有氢/氦包层，质量超过行星质量的 0.1%。仅凭质量和半径无法区分这两类情况。

两个非凌星巨行星 Kepler-129 d（$M_p \sin i$ $=1986^{+29}_{-35}$ M⊕，与 HIRES 的 $M_p \sin i$ 2015 ± 43 M⊕相比；Weiss 等（2023））和 Kepler-65 e（$M_p \sin i$ $= 212^{+11}_{-14}$ M⊕，与 $207.5^{+17.8}_{-17.5}$ M⊕相比；Mills 等（2019））是样本中信噪比最高的探测结果，但不属于样本聚焦的亚海王星范围。其余上限与文献结果一致：Kepler-65 b–d 与 Mills 等（2019）的光动力学质量一致，Kepler-126 b 和 c 以及 Kepler-129 b 与 Weiss 等（2023）的 HIRES 最小质量一致，而 Kepler-145 c 则与 Ofir 等（2025）的 TTV质量一致。Kepler-129 c 在 95% 置信度下被约束为低于 39 M⊕，而 HIRES 的最小质量为 25 ± 9M⊕ （Weiss 等（2023））。对于 TOI-1411 b，95% 的 2.0 M⊕ 上限等于 Polanski 等（2024）报告的 HIRES 径向速度质量中位数。

最值得关注的比较对象是 Kepler-126 d。其已发表的最小质量为 $55 \pm 23M_\oplus$，基于 58 个 Keck/HIRES 观测时次（$K = 7.0 \pm 3.0$ m s^{-1}；Weiss 等（2023）），对应于该半径下约 20 g cm^{-3} 的整体密度。相比之下，堆叠视向速度后验分布给出 $K = 0.50^{+0.93}_{-0.33}$ m s^{-1}，其上限将质量限制在 $17M_\oplus$ 以下，置信度为 95% 置信度，并且——在 2.1σ 置信水平上支持已发表的数值。RV优选密度为 $1.42^{+2.75}_{-0.94}$ g cm^{-3}，与已发表质量所 ~20 g cm^{-3} 所暗示的数值不一致，从而排除了极端密度状态。Kepler-145 b 是唯一另一个偏移如此之大的对象：其 TTV质量为 $34^{+25}_{-11}M_\oplus$ (Ofir 等（2025）) 与我们的 RV质量后验分布（$M_p < 21M_\oplus$，置信度为 95% 置信度）在 2.0σ 置信水平上存在差异。

由于只有四个凌日探测结果，该样本无法支持密度分布或双峰性检验，例如与Burn 等人（2026）的模拟结果进行比较；我们将其留待未来研究。本研究为12个系统提供了新的约束条件，也为可应用于更大样本的方法学实践奠定了先例。

6.4. 非凌星伴星候选体

在12个系统中均未发现其他行星：评估的全部24个自由行星槽位（每个目标两个）都被判定为虚假信号。最接近达标的是K2-66，其 $\ln B_{1,0} \geq 4.3$（这是一个下限，因为其$N_p = 0$ bin为空），仍未达到5的阈值。该信号收敛于最大后验周期1503天（中位数1516天，68%置信区间为1445–1626天），$K/\sigma_K = 3.7$，但未通过第2级的周期单峰性和偏度子标准（分别为0.65和1.9，而要求值分别为0.9和1）。还需要更长的

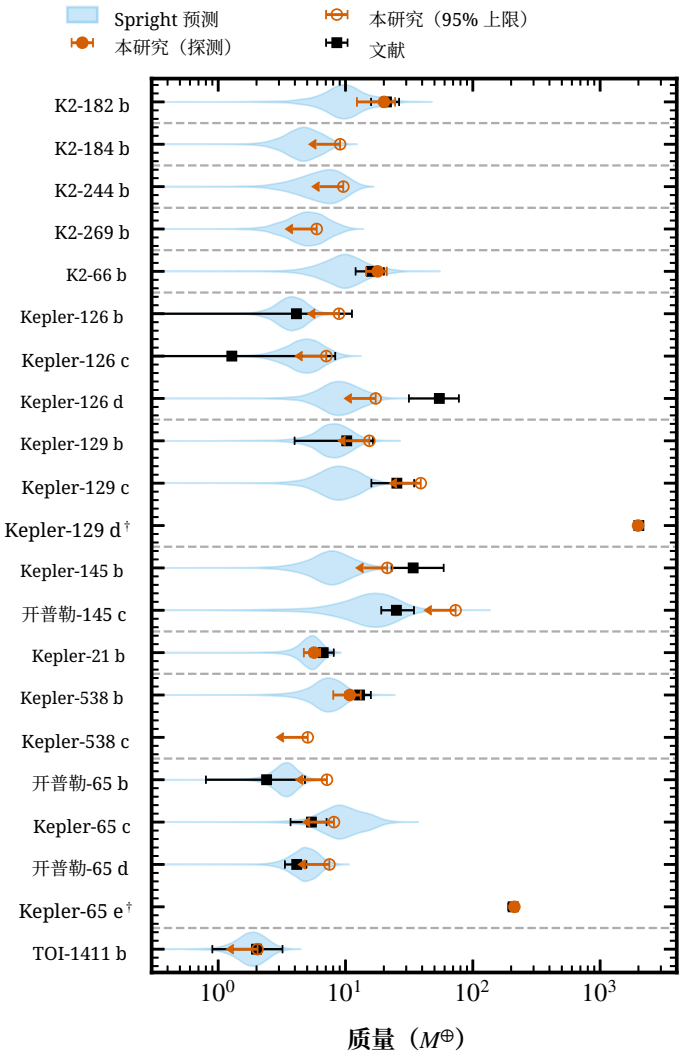


图4：样本中21个行星信号的行星质量 M_P（非凌日巨行星的$M_P \sin i$，以 † 标示），并与文献质量及根据行星半径得出的 spright 预测进行比较（Kepler-538 c 的半径低于该关系的适用范围，因此没有预测值）。其中六个信号为探测结果，十五个为95%上限。四个凌日探测结果的质量均达到或超过基于半径的预测值；文献质量的恢复误差在 2.1σ 以内。

基线才能确定K2-66趋势是否具有天体物理起源。在内侧超级地球的宿主星周围，1天文单位以内的大质量行星较为罕见，因此未发现新的伴星与这一结论一致（Bryan等（2019）；Zhu和Wu（2018））。

7. 总结与结论

我们开展了一项系统性的质量测量观测计划，研究了 12 个亚海王星系统：K2-182、K2-184、K2-244、K2-269、K2-66、Kepler-126、开普勒-129、开普勒-145、Kepler-21、Kepler-538、Kepler-65 和 TOI-1411。我们对所有目标采用统一的分层贝叶斯框架和一致的数据处理流程，并结合五台高分辨率光谱仪（HIRES、HARPS-N、ESPRESSO、APF 和 NEID），力求获得一组一致的亚海王星质量样本。这类样本对于开展组成和形成路径的种群层面研究必不可少。

在该样本中，我们检测到四颗凌星行星——Kepler-21 b、K2-66 b、Kepler-538 b 和 K2-182 b——以及非凌日巨行星 Kepler-65 e 和 Kepler-129 d 的反射运动。其余十五个信号给出了上限，其中包括对 K2-184、K2-244 和 K2-269 的首批径向速度约束。在已有先验质量的情况下，我们的结果与之相差不超过 2.1σ；偏移量最大的是 Kepler-126 d（< 17 相较于55 ± 23 $M_\oplus$）和开普勒-145 b（< 21 相较于 TTV质量34^{+25}_{-11} $M_\oplus$）。Kepler-21 b 与类地岩石组成相符，而 K2-66 b、K2-182 b 和 Kepler-538 b 则需要含有挥发性组分。在这 12 个系统中均未发现新的非凌日伴星；这与大质量行星并非这些亚海王星系统中短至中等周期轨道的主导架构这一结论相符。

本研究的方法学贡献本身就具有重要价值。通过留一交叉验证堆叠，将同一组光谱的四种径向速度数据处理结果结合起来，得到的质量不依赖于单一处理流程的选择。对于四种处理流程都能处理的光谱，堆叠后的半振幅从未排除任何单一处理流程的结果；而对特定恒星拟合不佳的数据处理方案，则会在无需干预的情况下获得可忽略不计的权重。这些权重取决于哪些径向速度数据纳入拟合，因此不能用来给处理流程排名。要进行此类排名，需要在更大的高信噪比光谱样本上比较多种数据处理方案。对于人口统计研究而言，质量不受处理流程选择影响，比提高任何单个目标的精度更为重要。目前的样本过小且约束不足，无法用于检验 FGK 型恒星周围亚海王星的密度分布；但本研究确实迈出了第一步，为后续利用更大规模的恒星样本（例如THIRSTEE项目的样本；/Lacedelli等（2024））开展研究奠定了基础。后续研究将采用这一方法，为新近普查到的亚海王星提供质量约束，从而检验具有均匀整体密度分布的形成理论。

数据可用性

每个目标的四种数据处理结果（CCF、SERVAL、LBL和sBART）的径向速度及其质量标志、HIRES、APF 和 NEID 的径向速度，以及第4.1节所使用的活动指标，仅以电子形式通过匿名文件传输协议提供于斯特拉斯堡天文数据中心（CDS），可访问 cdsarc.u-strasbg.fr（130.79.128.5），或通过 http://cdsweb.u-strasbg.fr/cgi-bin/qcat?J/A+A/访问。

致谢。本文所呈现的部分数据是在凯克天文台获取的。该天文台是一家私人501(c)3非营利组织，由加州理工学院、加利福尼亚大学和美国国家航空航天局以科学合作伙伴关系的形式共同运营。该天文台的建成得益于 W. M. 凯克基金会慷慨的资金支持。本文所呈现的凯克天文台原始数据一旦公开，便可通过凯克天文台档案库（KOA）访问。该档案库由 W. M. 凯克天文台和美国国家航空航天局系外行星科学研究所（NExScI）根据与美国国家航空航天局签订的合同运营。作者谨此致敬并承认，莫纳克亚山山顶在夏威夷原住民社区中一直具有极其重要的文化意义，备受尊崇。我们非常有幸能够在这座山上开展观测。本文所呈现的数据由 WIYN 3.5米望远镜获取，观测时间由 NN-EXPLORE计划分配，并得到美国国家航空航天局和美国国家科学基金会的支持。本文所呈现的数据由宾夕法尼亚州立大学建造的 NEID光谱仪获取，该仪器由美国国家科学基金会国家光学红外天文学研究实验室在 WIYN天文台运行，隶属于美国国家航空航天局与美国国家科学基金会的 NN-EXPLORE合作计划。作者荣幸获准在 I'oligam Du'ag（基特峰）开展天文研究；这座山对托霍诺奥哈姆族具有特别重要的意义。P.L.、R.L. 和 P.F. 感谢由

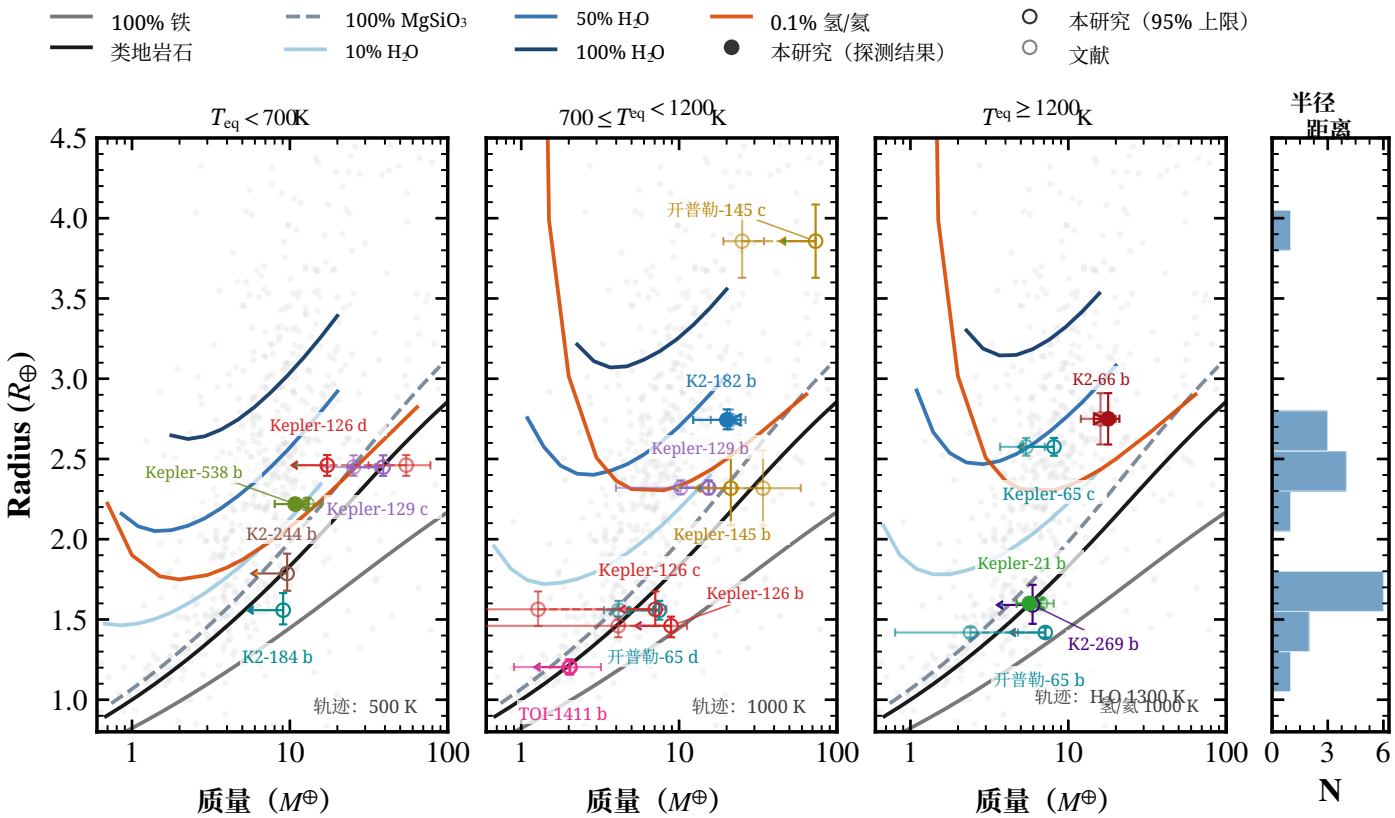


图 5：按三个平衡温度区间（低温：T_{eq} < 700K；温暖：700–1200 K；高温： ≥ 1200 K）绘制的质量–半径图，以及样本的半径分布（右）。探测结果（实心）和95%上限（空心，向左箭头）与文献质量（浅色圆圈）相连。Kepler-21 b 位于类地球岩石轨迹上，而 K2-182 b、K2-66 b 和 Kepler-538 b 的体积过大，无法由岩石内部构成。行星半径采用已发表的 $R_p/R_\star$，再乘以表 1 中采用的 $R_\star$；K2-66 b 除外，其半径取自 Howard 等人(2025年)。灰色背景：NASA系外行星档案（访问日期：2026-07-21）。岩石轨迹来自 Zeng等(2019)，受辐照海洋世界和含 0.1% 氢/氦包层轨迹来自 Aguichine等(2021年)，温度如各面板所示。

MCIN/AEI/10.13039/501100011033以及欧盟（ERC起始基金THIRSTEE，101164189）资助。我们还感谢西班牙科学与创新部国家研究机构 MCIN/AEI/10.13039/501100011033以及欧洲区域发展基金通过项目 PID2021-125627OB-C32和PID2024-158486OB-C32提供的“建设欧洲之路”资助。本研究由ERC基金（ERC高级基金SPEAR，GA 101200674）支持。由欧盟资助。然而，所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执行机构（ERCEA）的观点。欧盟和资助机构均不对其承担责任。我们使用了以下Python 数据分析和可视化软件包： numpy (Harris 等，2020), scipy (Virtanen 等，2020), matplotlib (Hunter 2007), astropy (Astropy Collaboration 等，2022),UltraNest (Buchner 2021), and kima (Faria 等，2018).

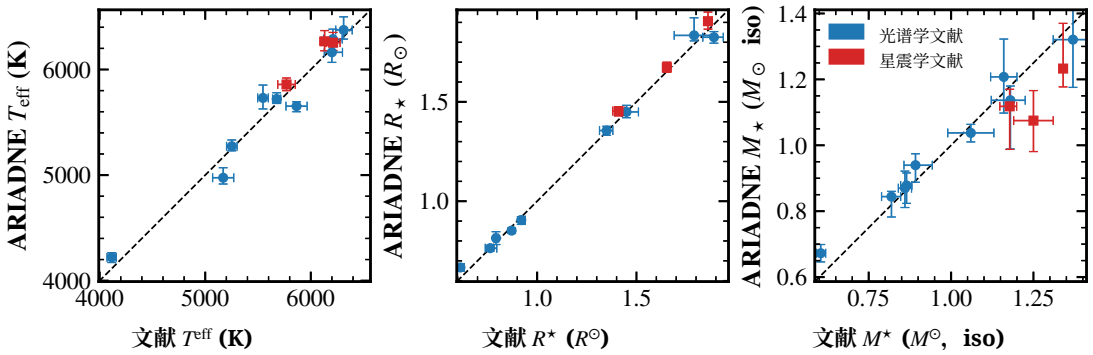
参考文献

Abdurro’uf、Accetta, K.、Aerts, C. 等，2022年，ApJS，259，35；Aguichine, A.、Mousis, O.、Deleuil, M. 与 Marcq, E.，2021年，ApJ，914，84；Akana Murphy, J. M.、Kosiarek, M. R.、Batalha, N. M. 等，2021年，AJ，162，294；Akana Murphy, J. M.、Luque, R.、Batalha, N. M. 等，2024年，AJ，169，26；Allart, R.、Lovis、Faria, J. 等，2022年，《天文学与天体物理学》，666，A196；Anglada-Escudé, G. 与 Butler, R. P.，2012年，ApJS，200，15；Artigau, É.、Cadieux, C.、Cook, N. J. 等，2022年，AJ，164，84；Astropy Collaboration、Price-Whelan, A. M.、Lim, P. L. 等，2022年，ApJ，935，167；Baluev, R. V.，2008年，MNRAS，385，1279–1285；Baranne, A.、Queloz, D.、Mayor, M. 等，1996年，A&AS，119，373–390；Barros, S. C. C.、Demangeon, O. 与 Deleuil, M.，2016年，《天文学与天体物理学》，594，A100；Beard, C.、Robertson, P.、Ford, E. B. 等，2024年，AJ，168，149

Bellm, E. C., Kulkarni, S. R., Graham, M. J., 等. 2019年, PASP, 131, 018002 Bertaux, J. L., Lallement, R., Ferron, S., Boonne, C., & Bodichon, R. 2014年, 《天文学与天体物理学》, 564, A46 Bonomo, A. S., Dumusque, X., Massa, A., 等. 2023年, 《天文学与天体物理学》, 677, A33 Bouchy, F., Pepe, F., & Queloz, D. 2001, 《天文学与天体物理学》, 374, 733–739 Brewer, B. J. & Donovan, C. P. 2015, MNRAS, 448, 3206–3214 Brewer, B. J., Pártay, L. B., & Csányi, G. 2010, Stat. Comput., 21, 649–656 Bryan, M. L., Knutson, H. A., Lee, E. J., 等. 2019年, 《天文学杂志》, 157, 52 Buchner, J. 2021年, J. Open Source Softw., 6, 3001 Burn, R., Bali, K., Dorn, C., Luque, R., & Grimm, S. L. 2026年, 《天文学与天体物理学》, 715, A85 Burn, R., Mordasini, C., Mishra, L., 等. 2024年, Nat. Astron., 8, 463–471 Burn, R., Schlecker, M., Mordasini, C., 等. 2021年, 《天文学与天体物理学》, 656, A72 Burt, J., Holden, B., Wolfgang, A., & Bouma, L. G. 2018, 《天文学杂志》, 156, 255 Butler, R. P., Marcy, G. W., Williams, E., 等. 1996, PASP, 108, 500 Castro-González, A., Díez Alonso, E., Menéndez Blanco, J., 等. 2022, MN- RAS, 509, 1075 Chakrabarty, A., Mulders, G. D., Aguichine, A., & Batalha, N. 2026, arXiv 电子印本, arXiv:2602.11923 Chaplin, W. J., Sanchis-Ojeda, R., Campante, T. L., 等. 2013年, ApJ, 766, 101 Cloutier, R. & Menou, K. 2020, 《天文学杂志》, 159, 211 Cosentino, R., Lovis, C., Pepe, F., 等. 2012, 载于《地基与机载天文仪器 IV》, 编者 I. S. McLean、S. K. Ramsay & H. Takami（国际光学工程学会） Crossfield, I. J. M., Ciardi, D. R., Petigura, E. A., 等. 2016, ApJS, 226, 7 Dorn, C., Khan, A., Heng, K., 等. 2015, 《天文学与天体物理学》, 577, A83 Dorn, C. & Lichtenberg, T. 2021, ApJ, 922, L4 Duncan, D. K., Vaughan, A. H., Wilson, O. C., 等. 1991, ApJS, 76, 383 Faria, J., C. Santos, N., Figueira, P., & J. Brewer, B. 2018, J. Open Source Softw., 3, 487 Figueira, P., Faria, J. P., Silva, A. M., 等. 2025年, 《天文学与天体物理学》, 700, A174 Fulton, B. J. & Petigura, E. A. 2018, 《天文学杂志》, 156, 264 Fulton, B. J., Petigura, E. A., Howard, A. W., 等. 2017, 《天文学杂志》, 154, 109

Giacalone, S., Dressing, C. D., Hedges, C., 等. 2022, 《天文学杂志》, 163, 99 Gillis, E. D., Cloutier, R., & Pass, E. K. 2026, 《天文学杂志》, 171, 317 Gupta, A. & Schlichting, H. E. 2019, MNRAS, 487, 24–33 Hara, N. C., Boué, G., Laskar, J., Delisle, J.-B., & Unger, N. 2019, MNRAS, 489, 738–762 Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., 等. 2020, 《自然》, 585, 357 Hart, K., Shappee, B. J., Hey, D., 等. 2023, arXiv 电子印本, arXiv:2304.03791 Hartman, J. D., Bakos, G. Á., Jordán, A., 等. 2026, 《天文学杂志》, 171, 270 Haywood, R. D., Collier Cameron, A., Queloz, D., 等. 2014, MNRAS, 443, 2517–2531 Ho, C. S. K., Rogers, J. G., Van Eylen, V., Owen, J. E., & Schlichting, H. E. 2024, MNRAS, 531, 3698–3714 Holczer, T., Mazeh, T., Nachmani, G., 等. 2016, ApJS, 225, 9 Howard, A. W., Sinukoff, E., Blunt, S., 等. 2025, ApJS, 278, 52 Howell, S. B., Rowe, J. F., Bryson, S. T., 等. 2012, ApJ, 746, 123 Hunter, J. D. 2007, 《计算机科学与工程》, 9, 90 J enkins, J. M., Caldwell, D. A., Chandrasekaran, H., 等. 2010, ApJ, 713, L87–L91 Jenkins, J. M., Twicken, J. D., McCauliff, S., 等. 2016, 载于《天文学 IV 软件与网络基础设施》, 编者 G. Chiozzi & J. C. Guzman, 第9913卷（国际光学工程学会）, 99133E Kipping, D. M. 2013, MNRAS, 434, L51–L55 Kochanek, C. S., Shappee, B. J., Stanek, K. Z., 等. 2017, PASP, 129, 104502 Kopparapu, R. K. 2013, ApJ, 767, L8 Lacedelli, G., Pallé, E., Luque, R., 等. 2024年, 《天文学与天体物理学》, 692, A238 Lacedelli, G., Pallé, E., Luque, R., 等. 2026, 《天文学与天体物理学》, 705, A260 Livingston, J. H., Crossfield, I. J. M., Petigura, E. A., 等. 2018a, 《天文学杂志》, 156, 277 Livingston, J. H., Endl, M., Dai, F., 等. 2018b, 《天文学杂志》, 156, 78 Lucy, L. B. & Sweeney, M. A. 1971, 《天文学杂志》, 76, 544 Lundkvist, M. S., Kjeldsen, H., Albrecht, S., 等. 2016, Nat. Commun., 7 Luque, R. & Pallé, E. 2022, 《科学》, 377, 1211–1214 López-Morales, M., Haywood, R. D., Coughlin, J. L., 等. 2016, 《天文学杂志》, 152, 204 MacDougall, M. G., Petigura, E. A., Gilbert, G. J., 等. 2023, 《天文学杂志》, 166, 33 Mayo, A. W., Rajpaul, V. M., Buchhave, L. A., 等 . 2019, 《天文学杂志》, 158, 165 Mayo, A. W., Vanderburg, A., Latham, D. W., 等. 2018, 《天文学杂志》, 155, 136 Mazeh, T., Perets, H. B., McQuillan, A., & Goldstein, E. S. 2015, ApJ, 801, 3 McQuillan, A., Aigrain, S., & Mazeh, T. 2013, MNRAS, 432, 1203–1216 Mills, S. M., Howard, A. W., Weiss, L. M., 等. 2019, 《天文学杂志》, 157, 145 Morton, T. D., Bryson, S. T., Coughlin, J. L., 等. 2016, ApJ, 822, 86 Nielsen, J., Johansen, A., Bali, K., & Dorn, C. 2025年, 《天文学与天体物理学》, 695, A184 Nixon, M. C., Welbanks, L., McGill, P., & Kempton, E. M.-R. 2024, ApJ, 966, 156 Ofir, A., Yoffe, G., & Aharonson, O. 2025年, 《天文学杂志》, 169, 90 Osborne, H. L. M., Nielsen, L. D., Van Eylen, V., & Barragán, O. 2024, 《天文学与天体物理学》, 693, A4 Owen, J. E. & Wu, Y. 2013, ApJ, 775, 105 Parc, L., Bouchy, F., Venturini, J., Dorn, C., & Helled, R. 2024, 《天文学与天体物理学》, 688, A59 Parviainen, H., Luque, R., & Palle, E. 2023, MNRAS, 527, 5693–5716 Pepe, F., Cristiani, S., Rebolo, R., 等. 2021, 《天文学与天体物理学》, 645, A96 Pepe, F., Mayor, M., Galland, F., 等. 2002, 《天文学与天体物理学》, 388, 632–638 Petigura, E. A., Crossfield, I. J. M., Isaacson, H., 等. 2017, 《天文学杂志》, 155, 21 Petigura, E. A., Rogers, J. G., Isaacson, H., 等. 2022, 《天文学杂志》, 163, 179 Piaulet-Ghorayeb, C., Benneke, B., Radica, M., 等. 2024, ApJ, 974, L10 Polanski, A. S., Lubin, J., Beard, C., 等. 2024, ApJS, 272, 32 Pope, B. J. S., Parviainen, H., & Aigrain, S. 2016, MNRAS, 461, 3399–3409 Rasmussen, C. E. & Williams, C. K. I. 2006, 《机器学习中的高斯过程》（麻省理工学院出版社）, 参见第5.4.2节, 公式 5.10–5.12 Raymond, S. N., Boulet, T., Izidoro, A., Esteves, L., & Bitsch, B. 2018, MNRAS, 479, L81–L85 Reinhold, T. & Hekker, S. 2020, 《天文学与天体物理学》, 635, A43 Reinhold, T., Shapiro, A. I., Solanki, S. K., & Basri, G. 2023, 《天文学与天体物理学》, 678, A24 Robertson, P., Mahadevan, S., Ramsey, L., & 等. 2019, 《天文学仪器、系统与技术杂志》, 5, 015003 Rogers, J. G., Schlichting, H. E., & Owen, J. E. 2023, ApJ, 947, L19 Rogers, L. A. 2015, ApJ, 801, 41 Rogers, L. A. & Seager, S. 2010, ApJ, 712, 974–991 Rowe, J. F., Bryson, S. T., Marcy, G. W., 等. 2014, ApJ, 784, 45 Roy, P.-A., Benneke, B., Fournier-Tondreau, M., 等. 2025, Nat. Astron., 10, 371–384 Roy, P.-A., Benneke, B., Piaulet, C., 等. 2023, ApJ, 954, L52 Santos, A. R. G., Breton, S. N., Mathur, S., & García, R. A. 2021, ApJS, 255, 17 Schwab, C., Rakich, A., Gong, Q., 等. 2016, 载于《地基与机载天文仪器 VI》, 编者 C. J. Evans、L. Simard & H. Takami, 第9908卷（国际光学工程学会）, 99087H Silva, A. M., Faria, J. P., Santos, N. C., 等. 2022, 《天文学与天体物理学》, 663, A143 Sinukoff, E., Howard, A. W., Petigura, E. A., 等. 2017, 《天文学杂志》, 153, 271 Stock, S., Kemmer, J., Kossakowski, D., 等. 2023, 《天文学与天体物理学》, 674, A108 Suárez Mascareño, A., Rebolo, R., González Hernández, J. I., & Esposito, M. 2017, MNRAS, 468, 4772–4781 Thygesen, E., Ranshaw, J. A., Rodriguez, J. E., 等. 2023, 《天文学杂志》, 165, 155 Vanderburg, A., Latham, D. W., Buchhave, L. A., 等. 2016, ApJS, 222, 14 Vehtari, A.、Gelman, A. 和 Gabry, J. 2016年, Stat. Comput., 27, 1413–1432 Venturini, J.、Guilera, O. M.、Haldemann, J.、Ronco, M. P. 和 Mordasini, C. 2020年, 《天文学与天体物理学》, 643, L1 Venturini, J.、Ronco, M. P.、Guilera, O. M. 等人 2024年, 《天文学与天体物理学》, 686, L9 Vines, J. I. 和 Jenkins, J. S. 2022年, MNRAS, 513, 2719–2731 Virtanen, P.、Gommers, R.、Oliphant, T. E. 等人 2020年, 自然·方法, 17, 261–272 Vogt, S. S.、Allen, S. L.、Bigelow, B. C. 等人 1994年, 载于《天文学仪器 VIII》, D. L. Crawford 和 E. R. Craine 编, 第 2198 卷（国际光学工程学会）, 362–375 Vogt, S. S.、Radovan, M.、Kibrick, R. 等人 2014年, PASP, 126, 359–379 W. Howard, A.、Johnson, J. A.、W. Marcy, G. 等人 2010年, ApJ, 721, 1467–1481 Weiss, L. M.、Isaacson, H.、Howard, A. W. 等人 2023年, ApJS, 270, 8 Welbanks, L.、McGill, P.、Line, M. 和 Madhusudhan, N. 2023年, 《天文学杂志》, 165, 112 Xie, J.-W. 2014年, ApJS, 210, 25 Yao, Y.、Vehtari, A.、Simpson, D. 和 Gelman, A. 2018年, 贝叶斯分析, 13, 917–1007 Zakamska, N. L.、Pan, M. 和 Ford, E. B. 2010年, MNRAS Zechmeister, M. 和 Kürster, M. 2009年, 《天文学与天体物理学》, 496, 577–584 Zechmeister, M.、Reiners, A.、Amado, P. J. 等人 2017年, 《天文学与天体物理学》, 609, A12 Zeng, L.、Jacobsen, S. B.、Sasselov, D. D. 等人 2019年, 美国国家科学院院刊, 116, 9723–9728 Zhang, J.、Weiss, L. M.、Huber, D. 等人 2021年, 《天文学杂志》, 162, 89 Zhu, W. 和 Wu, Y. 2018年, 《天文学杂志》, 156, 92

附录A：采用的恒星参数的一致性



图A.1：我们样本的 ARIADNE 光谱能量分布拟合恒星参数与采用的文献值的比较（$T_{\rm eff}$，$R_\star$，$M_\star$）。星震学目标为 Kepler-21、Kepler-65 和开普勒-129。对于样本中的大多数目标，ARIADNE 结果与文献值的差异在 1–2σ 以内。最大的偏移量出现在经星震学约束的目标上，涉及 $R_\star$ 和 $M_\star$；这些情况下，光谱能量分布拟合的精度较低。

附录B：行星参数

表B.1：我们样本的行星参数。

Star	行星	P （天）	$K^{\rm lit}$ (米 秒$^{-1}$)	K (米 秒$^{-1}$)	e	$R_p^{\rm lit}$ ($R_\oplus$)	$M_p^{\rm lit}$ ($M_\oplus$)	M_P ($M_\oplus$)	ρ_p (g cm^{-3})	R 参考文献.	M 参考文献
K2-182	b	4.7369696 ± 0.0000017	9.1 ± 2.3	$8.47^{+1.85}_{-3.22}$	$0.05^{+0.11}_{-0.04}$	2.744 ± 0.065	21.0 ± 5.4	$20.1^{+4.5}_{-7.8}$	$5.33^{+1.29}_{-2.06}$	Thy23	Thy23
K2-184	b	16.978010 ± 0.000024	...	<2.7	$0.18^{+0.19}_{-0.13}$	$1.56^{+0.11}_{-0.09}$	...	<9.1	<15	CG22	
K2-244	b	21.0688 ± 0.0032	...	<2.8	$0.18^{+0.29}_{-0.14}$	1.79 ± 0.12	...	<9.6	<10	Liv18	
K2-269	b	$4.14497^{+0.00082}_{-0.00062}$	...	<2.5	$0.18^{+0.28}_{-0.14}$	1.59 ± 0.13	...	<5.9	<8.6	Liv18b	
K2-66	b	5.06963 ± 0.00081	5.9 ± 1.3	6.48 ± 1.17	$0.10^{+0.12}_{-0.07}$	2.75 ± 0.16	16.0 ± 4.0	17.9 ± 3.2	4.69 ± 1.31	How25	How25
Kepler-21	b	2.785780 ± 0.000030	2.41 ± 0.49	$2.13^{+0.25}_{-0.35}$	$0.07^{+0.10}_{-0.05}$	1.600 ± 0.020	6.7 ± 1.4	$5.66^{+0.65}_{-0.96}$	$7.61^{+0.96}_{-1.28}$	LM16	BR24
Kepler-65	b	2.1549209 ± 0.0000086	1.0 ± 1.0	<3.2	$0.14^{+0.23}_{-0.11}$	1.419 ± 0.031	$2.4^{+2.4}_{-1.6}$	<7.1	<14	Mil19	Mil19
	c	5.859697 ± 0.000093	1.5 ± 1.2	<2.6	$0.14^{+0.20}_{-0.10}$	2.576 ± 0.056	5.4 ± 1.7	<8.1	<2.7		
	d	8.13167 ± 0.00024	1.2 ± 1.1	<2.3	$0.27^{+0.25}_{-0.21}$	1.557 ± 0.059	4.14 ± 0.79	<7.5	<11		
	e	258.8 ± 1.5	19.1 ± 1.8	$18.85^{+1.11}_{-1.45}$	$0.24^{+0.05}_{-0.12}$	...	$207.5^{+17.8}_{-17.5}$	212^{+11}_{-14} [a]	...		
Kepler-126	b	10.495678 ± 0.000017	0.1 ± 1.9	<2.4	$0.12^{+0.23}_{-0.10}$	$1.460^{+0.057}_{-0.071}$	4.1 ± 7.1	<8.9	<16	Mor16	Wei24
	c	21.869676 ± 0.000054	0.3 ± 1.5	<1.5	$0.16^{+0.26}_{-0.13}$	1.56 ± 0.11	1.3 ± 7.0	<7.1	<11		
	d	100.28287 ± 0.00017	7.0 ± 3.0	<2.2	$0.16^{+0.24}_{-0.12}$	2.461 ± 0.064	55 ± 23	<17	<6.4		
开普勒-129	b	15.791937 ± 0.000036	2.3 ± 1.4	<3.6	$0.14^{+0.23}_{-0.12}$	2.321 ± 0.046	10.2 ± 6.2	<15	<6.8	Mor16	Wei24
	c[c]	82.20001 ± 0.00043	3.2 ± 1.2	<5.4	$0.17^{+0.18}_{-0.13}$	$2.449^{+0.073}_{-0.055}$	25.3 ± 9.3	<39	<15		
	d	1936 ± 25	90.0 ± 1.9	$91.62^{+1.30}_{-1.70}$	0.07 ± 0.02	...	2015 ± 43	1986^{+29}_{-35} [a]	...		
开普勒-145	b	22.950623 ± 0.000099	...	<4.1	$0.17^{+0.25}_{-0.13}$	2.32 ± 0.23	34^{+25}_{-11}	<21	<10	Ofi25	Ofi25
	c	42.882480 ± 0.000081	...	<11	$0.14^{+0.20}_{-0.10}$	3.86 ± 0.23	$25.1^{+9.4}_{-6.0}$	<73	<7.6		
Kepler-538	b	81.73778 ± 0.00013	2.09 ± 0.47	1.74 ± 0.39	$0.11^{+0.14}_{-0.08}$	2.219 ± 0.038	12.9 ± 2.9	$10.8^{+2.4}_{-2.8}$	5.47 ± 1.22	May19	Bon23
	c[b]	117.7610 ± 0.0022	... <0.74		$0.15^{+0.27}_{-0.12}$	$0.616^{+0.053}_{-0.065}$	...	<5.0	<134	FP18	
TOI-1411	b	1.4520527 ± 0.0000017	1.55 ± 0.93	<1.7	$0.15^{+0.27}_{-0.12}$	1.203 ± 0.048	2.0 ± 1.2	<2.0	<6.4	Pol24	Pol24

注：参考文献缩写：Thy23 = Thygesen 等（2023）；CG22 = Castro-González 等（2022）；Liv18 = Livingston 等（2018b）；Liv18b = Livingston 等（2018a）；How25 = Howard 等（2025）；LM16 = López-Morales 等（2016）；Mil19 = Mills 等（2019）；Mor16 = Morton 等（2016）；Ofi25 = Ofir 等（2025）；May19 = Mayo 等（2019）；FP18 = Fulton 和 Petigura（2018）；Pol24 = Polanski 等（2024）；BR24 = Beard 等（2024）；Wei 24 = Weiss 等（2023）；Bon23 = Bonomo 等（2023）。$R_p^{\rm lit}$是已发表的 $R_P/R_\star$（来源见半径参考文献列；对于 K2-66 b，则为其半径本身）乘以我们采用的 $R_\star$（表 1）。$K^{\rm lit}$ 和 $M_p^{\rm lit}$ 来自质量参考文献列中的论文，每个系统列出一次；但 Kepler-65 b–d 的 $K^{\rm lit}$ 除外（Wei24）。K、M_P 和 ρ_p 是 95% 上限（<），其中 $K/\sigma_K \leq 3$.[a] 非凌星，最小质量为 $M_P \sin i$。[b] 未确认候选体（KOI-365.02）。[c] $K/\sigma_K = 3.0$，略低于探测阈值。

附录 C：噪声模型选择和高斯过程超参数

表 C.1：径向速度噪声模型的贝叶斯模型比较网格。

目标	N_{pl}	poly0	poly1	poly2	+高斯过程 poly0	+高斯过程 poly1	+高斯过程 poly2
K2-182	1	0.0†	-5.6	-7.6	-0.1	-5.7	-8.9
K2-184	1	-2.6†	-2.9	-3.9	0.0	-0.4	-1.2
K2-244	1	0.0†	-1.4	-1.8	-0.1	-1.4	-1.8
K2-269	1	-0.1†	-1.5	-2.9	0.0	-1.5	-2.9
K2-66	1	-45.0	-7.0	-7.9	-0.3†	0.0	-0.2
Kepler-126	3	0.0†	-8.3	-15.9	-0.1	-7.9	-13.1
开普勒-129	3	0.0†	-3.4	-1.5	-1.3	-1.3	-2.3
开普勒-145	2	0.0†	-1.5	-0.7	0.0	-1.3	-0.8
Kepler-21	1	-105.5	-98.3	-172.1	-11.2	0.0†	-36.6
Kepler-538	2	-3.9†	-13.2	-34.0	0.0	-8.6	-13.6
Kepler-65	4	0.0†	-14.8	-49.0	-0.7	-6.3	-9.0
TOI-1411	1	-1.0†	-9.4	-16.5	0.0	-6.8	-14.3

注释。 $\Delta\ln\mathcal{Z}$ 表示多约化目标在各自最高证据模型下、相对于该模型给出的各数据处理结果的平均值。† 标记该模型根据第 5 节的简约性规则所采用。

表 C.2：Kepler-21 和 K2-66 的准周期高斯过程超参数后验分布。

目标	η_1 （振幅） [米 秒$^{-1}$]	η_2 (时间尺度) [d]	η_3 (旋转) [d]	η_4 (平滑度)
K2-66	$27.8^{+11.2}_{-7.7}$	303^{+116}_{-110}	$27.75^{+1.16}_{-1.08}$	$6.63^{+2.24}_{-2.46}$
Kepler-21	$4.2^{+0.6}_{-0.5}$	42^{+436}_{-24}	$13.50^{+0.03}_{-0.60}$	$0.63^{+0.19}_{-0.12}$

附录D：径向速度管线比较

图 D.1 比较了开普勒-21 的各处理流程时间序列；开普勒-21 是多管线框架的示例（完整径向速度模型见图 2）。图 D.2 展示了所有多约化目标的亚海王星的四种数据处理结果的质量后验分布。

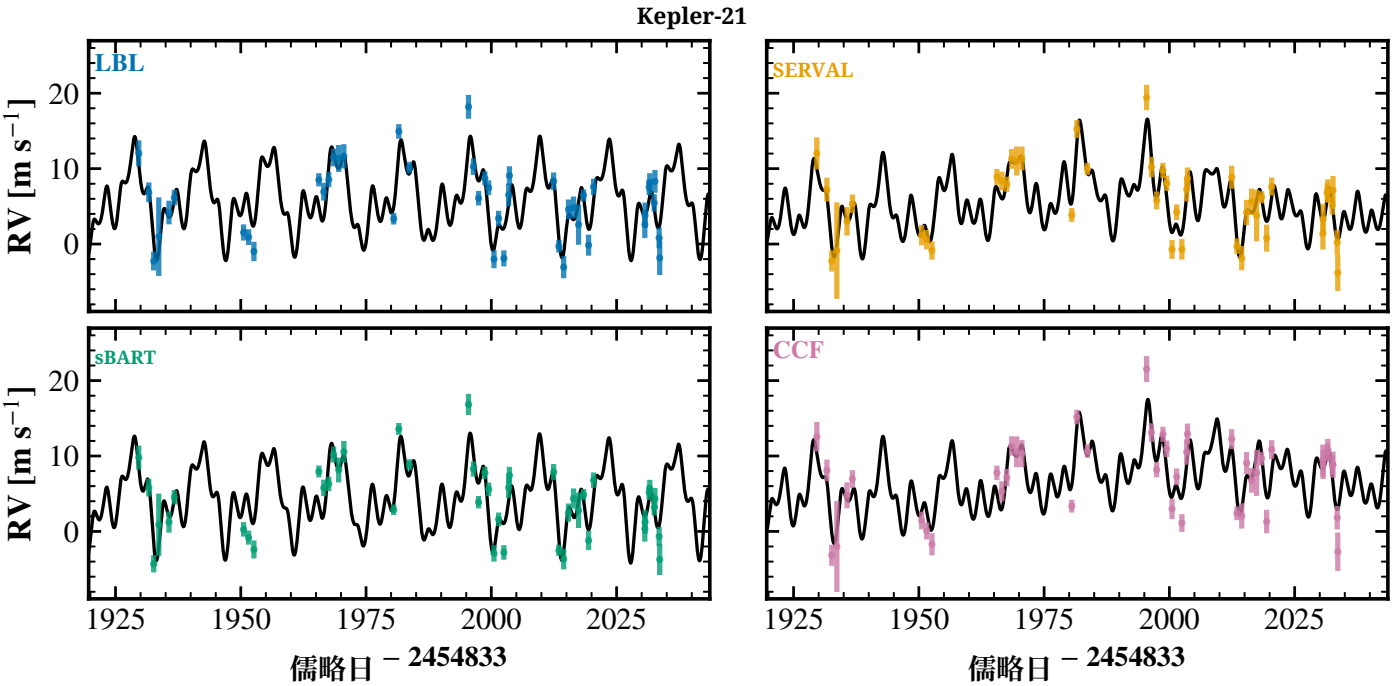
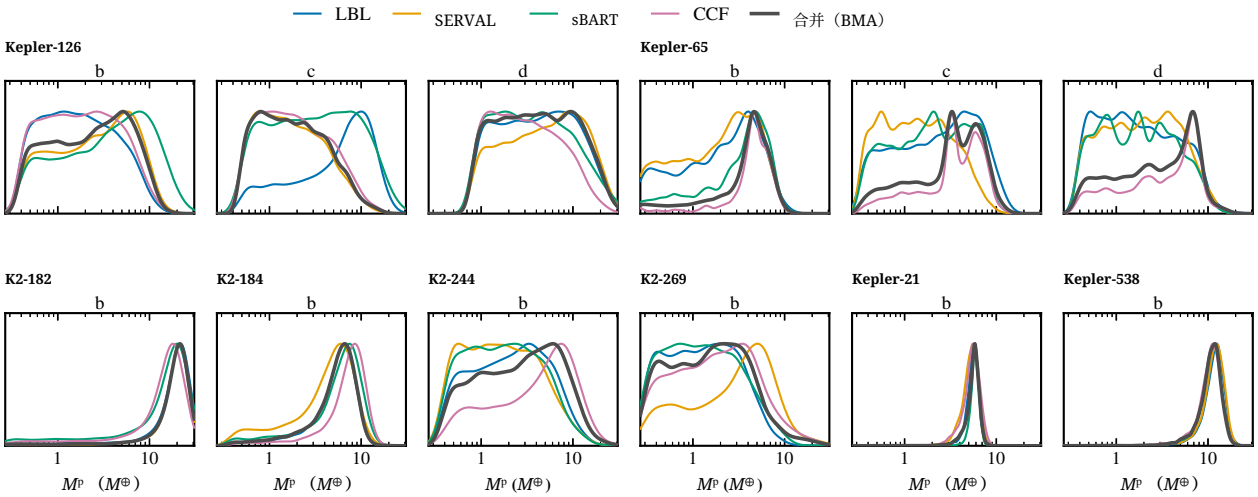


图 D.1：开普勒-21 在最密集的 130 天窗口内，各处理流程分别得到的 HARPS-N 径向速度时间序列，每条序列均使用其自身的模型（开普勒模型+高斯过程 + 线性趋势）。在所有数据处理结果中均恢复出了准周期活动信号。包含 HIRES、APF 和 NEID 径向速度的拟合所采用的堆叠权重分别为 $w_{\rm sBART}$ = 58%、$w_{\rm SERVAL}$ = 42%、$w_{\rm LBL}$ = 0% 和$w_{\rm CCF}$ = 0%。



图D.2：完整数据集中，八个多重约化系统在每种数据处理方案下亚海王星的质量后验分布，灰色表示叠加后验分布。对于已探测到的行星（Kepler-21 b、Kepler-538 b、K2-182 b），各数据处理结果一致；差异主要体现在未探测事件中约束不足的尾部。