草稿版本：2026年11月24日 使用 LaTeX 双栏 样式，采用
AASTeX631 排版

arXiv:2611.31057v1 [astro-ph.EP] 23 Nov 2026

盖亚时代的黎明：利用天体测量与多普勒数据联合分析，重新研究环绕M型矮星运行的冷木星

Yifan Xuan [1] *Tianjun Gan* [2,3] *Fabo Feng* [1] *In-Gu Shin* [4] *Guang-yao Xiao* [1] *Bryant Randolph* [1] *Shude Mao* [4] *Enric Pallé* [2,3] *Pedro J. Amado* [5] *Alan P. Boss* [6] *R. Paul Butler* [6] *José A. Caballero* [7] *Jeffrey D. Crane* [8] *Zahra Essack* [9] *Hugh R. A. Jones* [10] *Juan Carlos Morales* [11,12] *Andreas Quirrenbach* [13] *Sabine Reffert* [13] *Ansgar Reiners* [14] *Ignasi Ribas* [11,12] *Malena Rice* [15] *Stephen A. Shectman* [8] *Johanna K. Teske* [6] *Sharon X. Wang* [16] 和 *Mathias Zechmeister* [14]

[1] 暗物质物理学国家重点实验室、李政道研究所与物理与天文学院，上海交通大学，中国上海 *201210*
[2] 加那利天体物理研究所（*IAC*），西班牙特内里费岛拉拉古纳 *E-38205* 天体物理系，拉拉古纳大学（*ULL*），西班牙特内里费岛拉拉古纳 *E-38206*
[4] 天文学系，西湖大学，中国浙江省杭州市 *310030*
[5] 安达卢西亚天体物理研究所，*CSIC*，西班牙格拉纳达 *Glorieta de la Astronomía s/n, 18008*
[6] 地球与行星实验室，卡内基科学研究所，美国华盛顿特区 *20015*
[7] 天体生物学中心（*CSIC-INTA*），*Camino bajo del castillo s/n*，欧洲空间天文中心校区，西班牙马德里比利亚努埃瓦-德拉卡尼亚达 *28692*
[8] 卡内基科学研究所天文台，美国加利福尼亚州帕萨迪纳 *Santa Barbara Street 813* 号，邮编 *CA 91101*
[9] 物理与天文学系，新墨西哥大学，美国新墨西哥州阿尔伯克基 *Yale Blvd NE 210* 号，邮编 *NM 87106*
[10] 天体物理研究中心，赫特福德大学，*College Lane*，英国哈特菲尔德 *AL10 9AB*
[11] 空间科学研究所（*ICE*，*CSIC*），巴塞罗那自治大学校区，*c/ Can Magrans s/n*，西班牙贝拉特拉 *E-08193*
[12] 加泰罗尼亚空间研究所（*IEEC*），*RDIT* 大楼，*PMT-UPC* 校区，西班牙巴塞罗那卡斯特尔德费尔斯 *08860*
[13] 州立天文台，海德堡大学天文中心，*Königstuhl 12*，德国海德堡 *69117*
[14] 天体物理与地球物理研究所，哥廷根乔治-奥古斯特大学，*Friedrich-Hund-Platz 1*，德国哥廷根 *37077*
[15] 天文学系，耶鲁大学，美国康涅狄格州纽黑文 *CT 06511*
[16] 天文学系与清华大学天体物理中心，清华大学，中国北京 *100084*

摘要

我们对长期光谱监测发现的、已知拥有冷木星的 M 型矮星，联合分析了地基径向速度（RVs）、依巴谷卫星中间天体测量数据以及两个历元的 Gaia天体测量数据。在包含19个系统、25颗行星的样本中，我们为11个系统中的13颗行星推导出可靠的绝对质量和轨道解，其伴星倾角不确定度低于30度。这些行星包括五颗首次测得质量的行星：GJ 328b、GJ 649b、GJ 849b和c，以及GJ 9066c。我们还将一个天体HIP 79431B重新归类为褐矮星。此外，我们将这13个冷木星系统的质量比与通过凌星、微引力透镜和直接成像方法表征的绕M型恒星运行的巨行星进行比较。在不校正探测偏差的情况下，我们发现：（1）与冷木星相比，绕M型矮星运行的高质量比热木星可能较为稀少；（2）通过径向速度观测发现的、绕M型恒星运行的本地冷木星，其质量比分布与通过微引力透镜在银河系核球发现的对应天体相似。绕质量高于 $0.65\ M_{\odot}$ 的恒星运行的冷木星往往比绕M型矮星运行的冷木星质量更大。我们的研究建立了一个本地冷木星样本，其中绕M型矮星运行的行星具有精确的质量测定结果，并揭示了即将在Gaia DR4和DR5中发现的冰山一角。

关键词： 天体测量；径向速度；巨行星；M型矮星

1. 引言

通讯作者：Tianjun Gan，Fabo Feng
tianjungan@gmail.com, ffeng@sjtu.edu.cn

迄今已发现约两千颗巨行星（Akeson 等（2013）；Christiansen 等（2025）），但其中只有很小一部分绕M型矮星运行，尽管这些低质量恒星是银河系中数量最多的恒星族群（Henry 等（2018）；Golovin 等（2023））。由于其质量比接近绕类太阳恒星运行的褐矮星，甚至某些双星系统的质量比，M型矮星周围巨行星的形成机制仍存在争议。

主流行星形成理论之一——核吸积理论——认为，行星形成始于一个固态核，随后通过快速吸积气体而成长为巨行星（Pollack 等人（1996）；Ida & Lin 2004；Mordasini 等人 2008）。多项观测证据表明，M型矮星周围的巨行星很可能是通过这一情景形成的。例如，Gan 等人（2023a）测得早型M矮星周围热木星的发生率为 $0.27 \pm 0.09\%$（另见 Bryant 等人 2023；Glusman 等人 2026），约为类太阳恒星周围发生率的三分之一（Petigura 等人 2018；Zhou 等人 2019；Beleznay & Kunimoto 2022）。在核吸积框架下，与类太阳恒星周围的原行星盘相比，M型矮星原行星盘的表面密度较低，这妨碍了足够大质量的核在盘耗散之前形成并触发失控式气体吸积（Laughlin 等人 2004；Ida & Lin 2005；Kennedy & Kenyon 2008），或可解释发生率的差异。此外，富金属宿主恒星周围更有利于形成热木星，不过这种相关性对于冷木星似乎不那么显著（Maldonado 等人 2020；Gan 等人 2025；Morales 等人 2025）。恒星金属丰度被认为与原行星盘中用于形成行星的固体物质含量相关（Santos 等人 2004；Fischer & Valenti 2005；Sousa 等人 2011）。因此，如果巨行星是通过这种自下而上的途径形成的，自然会预期富金属恒星周围有更多巨行星。尽管雪线之外尘埃丰富，核吸积在此处十分高效（Ida & Lin 2005），外侧大质量伴星仍可能激发内侧巨行星的轨道，并驱使它们向内迁移至紧凑轨道（Naoz 2016；Dawson & Johnson 2018）。Gan 等人（2026）近期的研究发现，拥有热木星的M型矮星，其恒星多星系统比例约为场M矮星的六倍，这表明高偏心率迁移可能在低质量恒星周围形成短周期凌星热木星的过程中发挥重要作用（例如，Gan 等（2022、2023b）；Jordán 等人 2022；Hartman 等（2024）；Kanodia 等人 2024；Dransfield 等人 2026；Frensch 等人 2026）。

然而，一些围绕极低质量恒星运行、具有 $M_* \lesssim 0.2\ M_\odot$ 的类木星行星，仍难以用核心吸积途径解释（例如，Morales 等 2019；Quirrenbach 等人（2022）；Bryant 等人 2025）。另一种途径——引力不稳定性（Boss 1997，2000）——被认为可能形成这类极端质量比系统。在这一情景中，引力不稳定的盘会凝聚并碎裂，在数个天文单位处形成大质量巨行星；微引力透镜和径向速度方法对这一半长轴范围较为敏感。迄今为止，围绕M型矮星运行的大多数冷木星都是通过微引力透镜发现的（Mao& Paczynski 1991；Gould & Loeb 1992），但轨道解中常存在简并，例如近距/远距简并（Griest &Safizadeh 1998），这会导致宿主星与行星间距存在相当大的不确定度。此外，在大多数情况下，微引力透镜技术测得的是行星系统的投影间距，而非真实半长轴（例如，Shin 等人 2023、2024、2026）。至于径向速度技术，通过盲测巡天也发现了少数围绕M型矮星运行的宽轨道大质量行星（例如，Butler 等（2006）；Howard 等 2010；Quirrenbach 等人（2022））。然而，要覆盖足够多的轨道相位，需要进行长期监测，这使得行星搜寻和确认的效率较低。此外，$\sin i$ 简并使径向速度探测到的行星的绝对质量无法确定，因此某些“行星”实际上是亚恒星或恒星伴星的风险始终存在（例如，Kiefer 2019；Xiao等人 2023）。

作为追踪视向运动的视向速度技术的补充，天体测量方法测量恒星在天球平面上的摆动（Curiel 等，2022年）。天体测量提供的六维运动学信息可用于确定伴星的完整轨道，从而使我们能够分辨轨道倾角，并唯一确定其真实质量。随着 Gaia DR4 即将发布，预计将发现数千颗绕低质量 M型矮星运行的宽轨道巨行星（Sozzetti 等，2014年；Perryman 等，2014年；Lammers 和 Winn，2026年），为与本地凌星热木星以及银河系核球中的微引力透镜冷木星进行比较、推断它们的形成历史，提供了绝佳样本。虽然 Gaia DR4 的时间序列天体测量数据尚未公布，但视向速度与绝对天体测量数据的联合分析已广泛应用于多项研究（例如，Brandt 等，2019年；Li 等，2021年；Feng 等，2022年；Xiao 等（2023）；An 等（2025）；Piccinini等人，2026年；Ren 等，2026年）。

在迈入 Gaia DR4 时代之前，我们重新审视了所有围绕 M型矮星、由径向速度探测到的巨行星。我们对地基长期径向速度数据以及依巴谷卫星和 Gaia 的

绝对天体测量（Perryman 等（1997）；van Leeuwen（2007）；盖亚合作组等，2018，2023）。我们测定了围绕 11 颗 M型恒星运行的 13 颗冷木星的行星绝对质量，其中五颗（GJ 328b、GJ 649b、GJ 849b 和 c，以及 GJ 9066c）的质量是首次测得的。除这些行星系统外，我们还确认，围绕 HIP 79431、由径向速度探测到的冷木星（Apps 等，2010）实际上是一个褐矮星伴星。本文其余部分安排如下：第2节介绍样本构建，并在第3节概述所用的天体测量和径向速度数据。第4 节介绍径向速度与天体测量联合拟合分析的详细过程，随后在第+5节给出各系统的结果。我们在第 6 节讨论研究发现，最后在第7节作总结。

2. 样本

为构建一个用于视向速度+天体测量联合分析的、绕行 M 型矮星的宽轨道巨行星样本，我们从 NASA 系外行星档案库（Akeson 等（2013）；Christiansen 等（2025））中检索截至世界时 2026 年 10 月 1 日的所有已确认行星清单。随后，我们根据以下筛选标准，筛选出绕行 M 型矮星且通过视向速度法发现的巨行星：

(1) 恒星质量： $M_* \leq 0.65\ M_\odot$;

(2) 恒星有效温度： $T_{\rm eff} \leq 4000\ K$;

(3) 行星最小质量： $0.2 \leq M_p \sin\ i \leq 13.6\ M_J$;

(4) 发现方法：径向速度。

除已发表的系统外，我们还纳入了一项新发现：HIP 88962b。这是一颗质量较大的巨行星，绕一颗 M0V 型恒星运行，轨道周期约为 19 年，相关内容将在另一篇论文中详细讨论（Boss 等（2026））。最终，我们的样本由 19 个系统中的 25 颗冷木星组成，所有这些行星的轨道周期均长于 30 天。

接下来，我们将行星目录与嵌入 TESS 输入星表 v8.2（TIC；_v8；Muirhead 等（2018））中的冷矮星列表（cooldwarfsStas- sun 等（2019））进行交叉匹配，以获得一组均一的恒星参数。简而言之，作者从 K_S 星等*2MASS* 星表（Cutri 等（2003）；Skrutskie 等（2006））中计算绝对星等，并利用质量—光度关系估计恒星质量（Delfosse 等（2000）；Benedict 等（2016）；Mann 等（2019））。同样，恒星半径通过Mann 等（2015）报道的经验多项式关系确定。我们采用宽带光学测光 $G_{\rm BP}$ 和 $G_{\rm RP}$ 来自*Gaia*（盖亚合作组等（2018））的数据来计算恒星有效温度 $T_{\rm eff}$，使用基于测光校准光谱的定制关系，这些关系详见Mann 等（2013）。然而，TIC 中报告的 GJ 508.2 的恒星质量和半径具有较大的不确定度，且 $T_{\rm eff}$ 未提供，可能是由于其 K_S 星等的不确定度较大。因此，我们采用Morales 等（2025）给出的恒星参数。此外，GJ 832 的有效温度取自Wittenmyer 等（2014），同样是由于 TIC 中缺少相应结果。表1列出了这 19 个系统的恒星参数。

3. 数据

3.1. 绝对天体测量数据

在本研究中，我们使用来自依巴谷卫星和 Gaia 星表的天体测量数据，包括赤经（α）和赤纬（δ）、自行（μ_α和 μ_δ），以及视差（ϖ）。具体而言，在数据可用时，我们纳入了依巴谷卫星星表数据、来自 van Leeuwen （2007年）DVD 版本的中间天体测量数据（IAD；也称为横坐标数据），以及 Gaia 第二和第三次数据发布（GDR2 和 GDR3；盖亚合作组 等 2018年，2023年）。由于 Gaia IAD 直到 2026年 12 月才会公开，我们使用 Gaia 观测计划工具[1]（GOST）获取 Gaia 的观测节奏和扫描角几何，并将其与我们的天体测量模型结合，以模拟沿扫描测量值。在对 Gaia IAD 进行建模时，我们还考虑了公开可用的 Gaia 观测间隙[2]（例如停测时段和被拒绝的观测）。

我们注意到，GDR2 和 GDR3 天体测量数据并非严格独立，因为它们所依据的观测数据有部分重叠。由于无法获得跨发布版本的协方差，我们在似然计算中将这两个星表解视为相互独立。Zhao 等（2026年）通过使用具有 Gaia 非单星轨道解的系统，对这一近似的影响进行了实证检验，发现推断出的轨道倾角不存在显著的系统性偏差。我们使用 Feng 等（2024年）[3]中推导出的推荐参数，将 GDR2 天体测量数据校准至 GDR3 参考系。这项校正减轻了两个 Gaia 星表之间的虚假天体测量偏移，并避免高估轨道天体测量信号（Feng 等 2024年；Thompson 等 2026年）。对于星等—颜色位于校准范围内的恒星——

[1] https://gaia.esac.esa.int/gost/index.jsp[2] https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr3-data-gaps[3]Python 脚本可在以下网址公开获取：https://github.com/ruiyicheng/Download_HIP_Gaia_GOST

Table 1. Stellar parameters of 19 M dwarfs hosting cold Jupiters

Target	HIP ID	$\alpha_{J2016.0}$	$\delta_{J2016.0}$	ϖ	μ_α	μ_δ	RV	G	G_{BP}	G_{RP}	M_*	R_*	T_{eff}
				[mas]	[mas yr^{-1}]	[mas yr^{-1}]	[km s^{-1}]	[mag]	[mag]	[mag]	[M$_\odot$]	[R$_\odot$]	[K]
GJ 179	22627	$04^h52^m05.90^s$	$+06°28'30.69''$	80.56 ± 0.02	153.62 ± 0.03	-306.05 ± 0.02	-8.28 ± 0.26	10.7140 ± 0.0004	12.2307 ± 0.0011	9.5074 ± 0.0007	0.364 ± 0.02	0.376 ± 0.011	3315 ± 157
GJ 317	–	$08^h40^m58.67^s$	$-23°27'09.71''$	65.88 ± 0.04	-461.34 ± 0.04	805.22 ± 0.04	87.11 ± 0.18	10.7651 ± 0.0007	12.2327 ± 0.0018	9.5689 ± 0.0009	0.421 ± 0.02	0.427 ± 0.013	3347 ± 157
GJ 328	43790	$08^h55^m07.67^s$	$+01°32'30.68''$	48.74 ± 0.02	44.94 ± 0.02	-1045.88 ± 0.01	-4.27 ± 0.13	9.2895 ± 0.0002	10.1863 ± 0.0006	8.3539 ± 0.0003	0.628 ± 0.02	0.651 ± 0.019	3923 ± 157
GJ 463	60398	$12^h22^m58.52^s$	$+64°01'56.94''$	54.45 ± 0.02	-673.12 ± 0.02	373.31 ± 0.02	8.92 ± 0.16	10.5524 ± 0.0003	11.8252 ± 0.0010	9.4291 ± 0.0004	0.472 ± 0.02	0.475 ± 0.014	3487 ± 157
GJ 508.2	65143	$13^h20^m58.67^s$	$+34°16'39.44''$	60.03 ± 0.02	483.88 ± 0.01	-297.07 ± 0.02	-35.80 ± 0.14	9.7727 ± 0.0003	10.8363 ± 0.0008	8.7456 ± 0.0004	0.54 ± 0.12	0.53 ± 0.12	3720 ± 12
GJ 649	83043	$16^h58^m08.71^s$	$+25°44'30.84''$	96.23 ± 0.02	-115.31 ± 0.02	-508.09 ± 0.03	3.76 ± 0.13	8.8236 ± 0.0004	9.9003 ± 0.0011	7.7879 ± 0.0006	0.514 ± 0.02	0.517 ± 0.015	3674 ± 157
GJ 676A	85647	$17^h30^m10.76^s$	$-51°38'16.09''$	62.58 ± 0.03	-258.76 ± 0.03	-185.12 ± 0.02	-39.82 ± 0.14	8.8669 ± 0.0003	9.8094 ± 0.0008	7.9065 ± 0.0007	0.626 ± 0.02	0.649 ± 0.02	3851 ± 157
GJ 832	106440	$21^h33^m33.90^s$	$-49°00'45.47''$	201.33 ± 0.02	-45.92 ± 0.02	-816.87 ± 0.02	12.72 ± 0.13	7.7399 ± 0.0003	8.9025 ± 0.0007	6.6626 ± 0.0005	0.437 ± 0.02	0.442 ± 0.013	3472
GJ 849	109388	$22^h09^m41.56^s$	$-04°38'27.01''$	113.44 ± 0.03	1132.58 ± 0.04	-22.16 ± 0.04	-15.61 ± 0.16	9.2372 ± 0.0007	10.6117 ± 0.0023	8.0700 ± 0.0009	0.461 ± 0.02	0.464 ± 0.014	3407 ± 157
GJ 876	113020	$22^h53^m17.79^s$	$-14°16'00.08''$	214.04 ± 0.04	957.71 ± 0.04	-673.60 ± 0.03	-2.09 ± 0.15	8.8751 ± 0.0008	10.4530 ± 0.0024	7.6437 ± 0.0011	0.337 ± 0.02	0.352 ± 0.011	3271 ± 157
GJ 1148	57050	$11^h41^m43.80^s$	$+42°45'05.67''$	90.69 ± 0.03	-575.53 ± 0.03	-89.80 ± 0.02	-8.97 ± 0.22	10.5821 ± 0.0005	12.1394 ± 0.0021	9.3610 ± 0.0010	0.344 ± 0.02	0.359 ± 0.011	3287 ± 157
GJ 3512	–	$08^h41^m19.58^s$	$+59°29'29.97''$	105.29 ± 0.03	-260.28 ± 0.02	-1279.56 ± 0.03	7.13 ± 2.45	13.0823 ± 0.0008	15.3833 ± 0.0036	11.7121 ± 0.0017	0.128 ± 0.02	0.156 ± 0.005	2902 ± 157
GJ 9066	–	$02^h00^m14.16^s$	$+13°02'38.66''$	223.73 ± 0.07	1096.46 ± 0.07	-1771.53 ± 0.06	-28.29 ± 0.25	10.6811 ± 0.0008	12.5719 ± 0.0025	9.3837 ± 0.0013	0.15 ± 0.02	0.18 ± 0.005	3102 ± 157
GJ 9773	109638	$22^h12^m36.06^s$	$+08°33'00.87''$	62.88 ± 0.02	106.38 ± 0.03	-671.15 ± 0.04	8.19 ± 0.17	10.9082 ± 0.0005	12.2297 ± 0.0017	9.7698 ± 0.0005	0.367 ± 0.02	0.378 ± 0.012	3453 ± 157
HIP 12961	12961	$02^h46^m43.23^s$	$-23°05'09.55''$	177.93 ± 0.04	294.72 ± 0.01	140.97 ± 0.01	32.49 ± 0.14	9.6029 ± 0.0003	10.4729 ± 0.0006	8.6867 ± 0.0003	0.62 ± 0.083	0.661 ± 0.069	3986 ± 125.8
HIP 79431	79431	$16^h12^m41.82^s$	$-18°52'35.24''$	75.88 ± 0.06	36.45 ± 0.03	-214.02 ± 0.02	-4.93 ± 0.19	10.2506 ± 0.0005	11.6122 ± 0.0015	9.0945 ± 0.0008	0.477 ± 0.02	0.479 ± 0.014	3420 ± 157
HIP 88962	88962	$18^h09^m33.34^s$	$-12°02'23.29''$	36.67 ± 0.01	67.01 ± 0.02	-206.82 ± 0.01	-1.31 ± 0.31	9.8511 ± 0.0005	10.7129 ± 0.0011	8.9426 ± 0.0009	0.62 ± 0.084	0.683 ± 0.068	3993 ± 122.1
TOI-756	–	$12^h48^m24.89^s$	$-45°28'13.68''$	11.61 ± 0.02	-216.50 ± 0.02	29.20 ± 0.01	15.36 ± 1.20	13.6773 ± 0.0004	14.8995 ± 0.0019	12.5804 ± 0.0009	0.506 ± 0.02	0.508 ± 0.015	3533 ± 157
TYC 2187-512-1	–	$21^h22^m06.41^s$	$+22°55'55.03''$	64.58 ± 0.02	108.77 ± 0.02	117.79 ± 0.02	5.45 ± 0.20	9.7752 ± 0.0004	10.8307 ± 0.0015	8.7556 ± 0.0006	0.498 ± 0.02	0.499 ± 0.015	3705 ± 157

Notes— [1] The right ascension, declination, parallax, proper motions, absolute radial velocity (RV), and Gaia G, G_{BP}, and G_{RP} magnitudes of the M dwarfs in our sample are adopted from Gaia DR3 (Gaia Collaboration et al. 2023);

网格中，我们根据它们的 Gaia G 星等和 $BP-RP$ 颜色应用了相应的系数。七颗红矮星在其各自星等处落在网格之外：GJ 179、GJ 317、GJ 463、GJ 1148、GJ 9066、GJ 9773 和 HIP 79431。对于这些恒星，我们改用 Feng 等(2024年) 表 1 中列出的全局校准系数：六颗恒星的 NST系数 $G \geq 10.5$ ，以及 HIP 79431 的 SS 系数（$G < 10.5$）。

对于五个没有依巴谷中间天体测量数据的系统，包括 GJ 317、GJ 3512、GJ 9066、TOI-756 和 TYC 2187-512-1，我们使用 GDR2+GDR3 数据进行分析。依巴谷卫星与 Gaia 之间的天体测量异常对应于 ~ 25 年的时间基线，主要对长周期伴星敏感（Brandt 2018年、2021年；Kervella 等 2022年；Feng 等 2024年），而 GDR2 与 GDR3 之间的短期异常对轨道周期约为 $\sim 10^3$ 天的伴星更加敏感（Xiao等人 2026a）。

3.2. 径向速度

我们使用了来自多台仪器的历史径向速度数据，包括安装在阿尔梅里亚卡拉尔阿尔托天文台3.5米望远镜上的CARMENES（Quirrenbach 等 2014年）、ESO拉西拉3.6米望远镜上的高精度径向速度行星搜寻器（HARPS）和近红外行星搜寻器（NIRPS）光谱仪（Mayor 等 2003年；Bouchy 等 2025年），以及安装在北半球3.6米意大利伽利略国家望远镜上的孪生仪器HARPS-N（Cosentino 等 2012年）、凯克一号10米望远镜上的高分辨率阶梯光栅光谱仪（HIRES）（Vogt 等 1994年；Butler 等 2017年；Teklu 等 2025年）、安装在10米霍比-埃伯利望远镜上的高分辨率光谱仪（HRS）（Tull 1998年）、安装在8.2米昴宿望远镜上的红外多普勒光谱仪（IRD）（Kotani 等 2018年）、麦哲伦克莱6.5米望远镜上的卡内基行星搜寻光谱仪（PFS）（Crane 等 2010年）、安装在上普罗旺斯天文台1.93米反射望远镜上的SOPHIE光谱仪（Perruchot 等 2008年）、麦克唐纳天文台哈伦·J·史密斯2.72米望远镜上的Tull光谱仪（Tull 等 1995年），以及安装在3.9米英澳望远镜上的伦敦大学学院阶梯光栅光谱仪（UCLES）（Diego 等 1990年）。

CARMENES观测同时使用可见光（VIS）和近红外（NIR）通道。这里我们仅使用精度更高的可见光波段数据，记为CAR-VIS。由于HIRES和HARPS分别于2004年8月（But- ler等人2006年）和2015年6月（Lo Curto等人2015年）进行了升级，导致速度零点偏移，并提高了径向速度精度，因此我们将升级前后的数据视为来自不同的仪器。我们将这些数据集分别记为HIRES-pre、HIRES-post、HARPS-pre和HARPS-post。

除公开可用的数据外，我们还报告并纳入了 GJ 179、GJ 676A、GJ 832、GJ 849、GJ 876 和 HIP 12961 的新 PFS 径向速度，以及 GJ 317、GJ 463 和 GJ 508.2 的 CARMENES 径向速度。所有 CARMENES 数据均使用光谱径向速度分析器（SERVAL；Zechmeister 等人, 2018年）进行处理，而 PFS 径向速度则通过 Butler 等人 (1996年）开发的处理流程提取。HARPS 径向速度取自标准数据处理流程测得的标头值，或取自 HARPS RVBank 档案库（Trifonov 等, 2020年；Perdelwitz等人, 2024年）。其他数据则取自文献。我们在表2中汇总了每个目标的径向速度信息。本研究使用的所有径向速度均列于表3 中，并以机器可读格式完整提供。

4. 分析

本文始终采用由正交归一三元组定义的右手坐标系 $[\hat{}x$、$\hat{}y$、$\hat{}z]$，其中 $\hat{}x$ 指向赤经增大的方向，$\hat{}y$ 指向赤纬增大的方向，而 $\hat{}z$ 指向远离观测者的方向（Feng 等 2019 的约定 III ，见Feng 等 2019）。依巴谷卫星和 Gaia 的天体测量模型也采用了这一约定（欧洲空间局 1997年；Lindegren等人 2012年）。

我们通过联合建模径向速度与依巴谷卫星-Gaia天体测量数据，约束冷木星的三维轨道。我们采用 Feng 等人（2023年）提出、随后由 Xiao等人（2024年）修订的方法；该方法已广泛用于搜寻和表征宽轨道伴星（例如，Cui等人 2026年；Wu等人 2026年；Peña等人 2026年；Xiao等人 2026b）。模型中的关键拟合参数包括七个轨道要素（轨道周期 P、径向速度半振幅 K、与偏心率及近心点幅角相关的两个参数 $\sqrt{e}\cos\omega$ 和 $\sqrt{e}\sin w$、轨道倾角 i、升交点经度 Ω，以及历元 J2017.5（JD2,457,936.875）时的平近点角M_0），五个相对于 GDR3 的质心天体测量偏移量（$\Delta\alpha*$、$\Delta\delta$、$\Delta\varpi$、$\Delta\mu_{\alpha*}$ 和 $\Delta\mu_\delta$），各径向速度仪器对应的径向速度抖动项$\sigma_{\rm jit}$，以及 Hipparcos 中间天体测量数据的天体测量抖动 $J_{\rm hip}$ 和 Gaia天体测量数据的误差膨胀因子 $S_{\rm gaia}$。随后，根据上述轨道要素推导出行星相对于宿主星的半长轴 a、行星质量 M_p、行星与宿主星的质量比 q，以及近心点通过历元 T_p。

表2. 我们样本的径向速度数据汇总

Name	仪器	$N_{\rm obs}$	$\langle\sigma_{\rm RV}\rangle$ (m s^{-1})	时间跨度 (天)	Refs	Name	仪器	$N_{\rm obs}$	$\langle\sigma_{\rm RV}\rangle$ (m s^{-1})	时间跨度 (天)	Refs
GJ 179	CAR-VIS	10	1.35	1458	1	GJ 849	CAR-VIS	60	1.53	1250	1
	HARPS-pre	22	2.73	1548	2		HARPS-N	94	0.81	944	9
	HARPS-post	4	6.49	89	2		HARPS-pre	48	0.80	2824	6
	HIRES-pre	11	4.59	1436	3		HARPS-post	47	2.17	2810	2
	HIRES-post	67	2.22	5550	3		HIRES-pre	24	3.19	2591	7
	HRS	14	8.35	1909	3		HIRES-post	111	1.52	5423	7
	PFS	21	2.63	1982	4		PFS	7	0.88	3010	4
GJ 317	CAR-VIS	47	1.90	3001	5, 4	GJ 876	CAR-VIS	70	1.45	1262	15, 1
	HARPS-pre	84	1.65	1440	6		HIRES-pre	140	2.11	2595	7
	HARPS-post	70	4.91	2746	2		HIRES-post	213	2.26	5189	7
	HIRES-pre	5	4.73	1438	7		HARPS-pre	257	0.71	4016	6
	HIRES-post	52	2.14	5484	7		HARPS-post	13	0.72	1133	6
	PFS	32	2.76	2520	8		PFS	17	1.08	2108	4
GJ 328	HARPS-N	130	0.95	1132	9	GJ 1148	CAR-VIS	76	1.48	1194	1
	HARPS-post	11	1.09	107	2		HIRES-pre	8	3.90	1496	7
	HIRES-post	4	3.65	1093	10		HIRES-post	116	2.04	5093	7
	HRS	58	6.39	3753	10	GJ 3512	CAR-VIS	227	2.82	2869	5
	SOPHIE	36	4.05	1827	11		IRD	39	3.87	1117	5
	Tull	14	5.61	346	10	GJ 9066	CAR-VIS	93	1.70	1398	16
GJ 463	CAR-VIS	165	3.68	3459	5, 4		HIRES-pre	8	3.34	1579	7
	HIRES-post	17	4.14	4377	12		HIRES-post	40	2.41	5537	7
	HRS	53	7.19	1875	12	GJ 9773	CAR-VIS	139	1.63	3050	5
GJ 508.2	CAR-VIS	32	1.52	3630	5, 4	HIP 12961	HARPS-pre	48	1.36	2226	6
GJ 649	CAR-VIS	54	1.61	399	1		PFS	50	1.42	3723	4
	HARPS-N	147	0.76	917	9	HIP 79431	HARPS-post	30	3.20	1878	2
	HARPS-post	5	0.70	112	6		HIRES-post	13	3.09	179	17
	HIRES-pre	24	1.64	1786	7	HIP 88962	PFS	48	1.73	5957	18
	HIRES-post	57	1.09	4961	7	TOI-756	HARPS-post	44	5.64	421	19
GJ 676A	HARPS-pre	128	1.14	3231	6		NIRPS	57	16.19	477	19
	HARPS-post	9	1.06	1862	6	TYC 2187-512-1	CAR-VIS	94	1.55	1293	16
	PFS	37	1.71	4279	13, 4						
GJ 832	HARPS-pre	61	0.47	3134	6						
	HARPS-post	165	1.06	2565	2						
	PFS	52	0.81	5200	4						
	UCLES	39	2.59	5465	14						

参考文献— (1) Ribas 等（2023年）；(2) ESO档案；(3) Howard 等（2010年）；(4) 本文；(5) Morales 等（2025年）；(6) Trifonov 等（2020年）；(7) Rosenthal等人（2021年）；(8) Feng 等（2020年）；(9) Pinamonti 等（2023年）；(10) Robertson 等（2013年）；(11) SOPHIE档案；(12) Endl 等（2022）；(13) Feng 等（2022年）；(14) Wittenmyer 等（2014）；(15) Trifonov 等（2018年）；(16) Quirrenbach 等（2022年）；(17) Apps 等（2010年）；(18) Boss 等（2026年）；(19) Parc 等（2025年）。

对于径向速度模型，似然函数表示为

$$\mathcal{L}_{\rm RV} = \prod_{k=1}^{N_{\rm inst}} \prod_{j=1}^{N_{{\rm RV},k}} \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_{j,k}^2 + \sigma_{{\rm jit},k}^2)}} \times \exp\left(-\frac{(v_{j,k} - \hat{v}_{j,k} - \gamma_k)^2}{2(\sigma_{j,k}^2 + \sigma_{{\rm jit},k}^2)} \right) , \quad (1)$$

其中，$N_{{\rm RV},\,k}$ 表示来自仪器 k 的测量数量，$N_{\rm RV} = \sum_k N_{{\rm RV},\,k}$，$N_{\rm inst}$ 表示仪器数量。$v_{j,\,k}$ 和 $\hat{}v_{j,\,k}$ 分别表示观测到的视向速度和预测的视向速度。γ_k 表示第 k 个仪器的径向速度偏移，而 $\sigma_{{\rm jit},\,k}$ 表示用于考虑未建模恒星噪声或仪器噪声的抖动项。

我们按照Brandt等人（2021年）对径向速度零点进行了边缘化处理。

依巴谷中间天体测量数据的似然函数可计算为

$$\mathcal{L}_{\rm hip} = \prod_{j=1}^{N_{\rm IAD}} \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_j^2 + J_{\rm hip}^2)}} \times \exp\left(-\frac{(\xi_j - \hat{\xi}_j)^2}{2(\sigma_j^2 + J_{\rm hip}^2)} \right) , \quad (2)$$

其中，$N_{\rm IAD}$ 为依巴谷中间天体测量数据的历元数，σ_j 为单次测量不确定度，$J_{\rm hip}$为抖动项。观测到的和预测的 1-D 坐标数据分别记为 ξ_j 和 ξ_j。通过将系统质心的联合运动、恒星反射运动和视差运动投影到一维扫描方

表3. 我们样本中19颗恒星的所有径向速度

BJD	视向速度 ($m\,s^{-1}$)	σ_{RV} ($m\,s^{-1}$)	仪器	天体
2457623.65553	-7.940	1.391	CAR-VIS	GJ 179
2457631.66523	-0.998	1.495	CAR-VIS	GJ 179
2457654.60721	-6.745	1.348	CAR-VIS	GJ 179
2457665.58616	-1.466	1.085	CAR-VIS	GJ 179
2457673.58261	-5.018	1.254	CAR-VIS	GJ 179
2457691.60739	-5.285	1.207	CAR-VIS	GJ 179
2457695.59637	-4.372	1.388	CAR-VIS	GJ 179
2457705.56901	-1.128	1.610	CAR-VIS	GJ 179
2457706.56513	-4.417	1.415	CAR-VIS	GJ 179
2459081.67004	37.147	1.322	CAR-VIS	GJ 179
2454807.68521	-8564.622	5.754	HARPS-pre	GJ 179
2454825.70109	-8561.922	2.131	HARPS-pre	GJ 179
2454826.67602	-8569.180	2.109	HARPS-pre	GJ 179
2454827.67585	-8563.717	1.898	HARPS-pre	GJ 179
2454828.70037	-8560.871	2.544	HARPS-pre	GJ 179

[1]本文所使用的19颗恒星的全部径向速度数据均收录于完整表格中，并可在在线文章中以机器可读格式获取。

向上，可合成坐标{v6}。在每个依巴谷中间天体测量数据历元，我们将质心天体测量数据从参考星表历元传播到依巴谷历元，并计算其与依巴谷星表天体测量数据之间的差值。将该差值加到建模的轨道反射位移上，把总和投影到依巴谷扫描方向，并将其与观测到的沿扫描方向坐标进行比较。

GDR2 和 GDR3 的似然函数可写为

$$\mathcal{L}_{\rm gaia} = \prod_{k=1}^{N_{\rm DR}} \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^5 |\Sigma_k(S^2_{\rm gaia})|}} \times \exp\left(-\frac{1}{2}(\Delta\vec{\iota}_k - \Delta\hat{\vec{\iota}}_k)^T [\Sigma_k(S^2_{\rm gaia})]^{-1} (\Delta\vec{\iota}_k - \Delta\hat{\vec{\iota}}_k)\right), \tag{3}$$

其中， $N_{\rm DR}$ 表示盖亚数据发布版本的数量（ $N_{\rm DR} = 2$ 当我们同时使用 GDR2 和 GDR3 时）， Σ_k 是盖亚星表提供的协方差， $S_{\rm gaia}$ 是盖亚误差膨胀因子。 $\Delta\vec{\iota}_k$ 是星表 k 相对于 GDR3 表示的五参数天体测量向量，例如，

$$\Delta\vec{\iota}_k \equiv ((\alpha_k - \alpha_{\rm DR3})\cos\delta_k,\ \delta_k - \delta_{\rm DR3},\ \varpi_k - \varpi_{\rm DR3},\ \mu_{\alpha k} - \mu_{\alpha \rm DR3},\ \mu_{\delta k} - \mu_{\delta \rm DR3}), \tag{4}$$

其中， $\Delta\vec{\iota}_k$ 是通过将标准五参数天体测量模型拟合到模拟扫描坐标而获得的合成天体测量向量。对于每个 Gaia 数据发布版本，我们在该版本所包含的 GOST历元处评估模型化的沿扫描方向位置，使用相应的扫描角和视差因子，并应用该版本特定的时间基线和有效观测掩码。随后，我们将标准五参数天体测量模型拟合到这些模拟的沿扫描方向位置上。

我们对大多数拟合参数采用均匀先验，但有两个例外：轨道倾角 i采用各向同性先验，相当于 $\cos i \sim \mathcal{U}(-1, 1)$；盖亚误差膨胀因子 $S_{\rm Gaia}$ 采用截断高斯先验，$S_{\rm Gaia} \sim \mathcal{TN}(1.0, 0.1_2; 1, 2)$。我们采用表 1 中的恒星质量，并在推导 a 和 M_p时使用其高斯不确定度。利用联合似然， $\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\rm RV} \cdot \mathcal{L}_{\rm hip} \cdot \mathcal{L}_{\rm gaia}$，我们通过并行退火马尔可夫链蒙特卡罗（MCMC）采样器 ptemcee 对后验分布进行采样，从而求得轨道解（ptemcee (Vousden 等，2016年）。我们采用 30 个温度、100 个行走者，每条链运行 80,000 步，以生成所有拟合参数的后验分布，并舍弃前 40,000 步作为预热期。在样本中的 19 个系统里，有 5 个系统——包括 GJ 317、GJ 3512、GJ 9066、TOI-756 和 TYC 2187-512-1——没有依巴谷卫星测量数据。因此，我们使用 Gaia天体测量数据约束它们的轨道解，即 $\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\rm RV} \cdot \mathcal{L}_{\rm gaia}$。

5. 结果

对于每个候选天体，我们都会生成一张如图 1所示的诊断图，以及一张如图B1所示的后验图。如果轨道倾角的不确定度上下限均小于 $30°$，我们就将该轨道解定义为稳健轨道解。此阈值比各向同性倾角先验中央 68% 区间的半宽（$\simeq 43°$）更严格

，并将其作为一项操作性判据，用于识别倾角受到数据有效约束的系统。总的来说，我们测得了 11 个 M矮星系统中 13 颗冷木星的稳健行星绝对质量，包括 GJ 179b（图 1）、GJ 317b（图A1）、GJ 328b（图 A2）、GJ 463b（图A3）、GJ 508.2b（图 A4）、GJ 649b（图 A5）、GJ 676Ab 和 c（图A6）、GJ832b（图 A7）、GJ 849b 和 c（图 A8）、GJ 9066c（图 A9），以及 HIP 88962b（图A11）。除这些行星系统外，我们还发现，径向速度探测到的、绕 HIP 79431 运行的冷木星实际上是绕一颗 M型恒星运行的褐矮星伴星，其轨道近乎正面朝向（图 A10）。鉴于倾角不确定性较大，GJ 317c、GJ 876b 和 c、GJ 1148b 和 c、GJ 3512b 和 c、GJ 9773b、HIP 12961b、TOI-756c 和 TYC 2187-512-1b 的结果均不明确，因此我们不将其纳入分析。我们在表4中列出具有稳健轨道解的系统的关键结果，并将在以下各小节中逐一详细讨论。所有稳健系统的后验分布均列于表 C1。

5.1. *GJ 179b*

GJ 179b 最初由Howard 等(2010年)发现，其周期为 6.26 ± 0.16 年，行星最小质量为 $M_p \sin i = 0.82 \pm 0.07\ M_J$。通过加利福尼亚遗产巡天，Rosenthal等人(2021年)重新研究了该系统，并将测量值更新为$P = 2333 \pm 36$ 天 $M_p \sin i = 0.752 \pm 0.041\ M_J$。最近，Xiao等(2023年)结合 HARPS、HIRES 和 HRS 的视向速度数据，以及来自依巴谷卫星和 GDR3 的天体测量数据，进行了完整的轨道拟合，报告的绝对质量为 $M_p = 0.95^{+0.16}_{-0.11}\ M_J$，倾角为 61^{+16}_{-13}°。在此，我们纳入来自 CARMENES 和 PFS 的视向速度测量值，并结合依巴谷卫星、GDR2 和 GDR3 的数据进行联合分析，得出更精确的质量测量值 $M_p = 0.98^{+0.16}_{-0.13}\ M_J$，倾角为 $133.0^{+7.8}_{-9.9}$°。

5.2. *GJ 317b*

Johnson 等人 （2007年) 首次报告了 GJ 317b 的发现，这是一颗最小质量为 $M_p \sin i \sim 1.2\ M_J$、运行于 693 天偏心（$e = 0.19 \pm 0.06$）轨道上的巨行星。随后，Feng 等 （2020年）、Rosenthal等人 （2021年）和 Morales 等 （2025年）将最小质量测量值分别修正为 $1.753 \pm 0.058\ M_J$、$1.853 \pm 0.037\ M_J$ 和 $1.688 \pm 0.041\ M_J$。特别是，Anglada-Escudé 等人（2012年）获得了覆盖 2.5 年的 18 次天体测量观测，并测得行星真实质量为 $2.5^{+0.7}_{-0.4}\ M_J$、倾角为 45^{+30}_{-10}°。我们的联合分析得出两个简并解，其中逆行轨道解（$M_p = 2.32^{+0.33}_{-0.28}\ M_J$，$i = 130.7^{+7.4}_{-10.1}$°）更受青睐，贝叶斯信息准则（BIC）改善了 6.709。请注意，GJ 317 还有另一颗宽轨道伴星 GJ 317c（Anglada-Escudé 等人（2012年）；Bryan 等人（2016年）；Feng 等人（2020年）；Rosenthal 等（2021年）；Morales 等（2025年））。我们的拟合结果显示，倾角的不确定性超过 30 度，我们认为这一结果不够稳健。因此，我们将这颗行星排除在最终结果之外。

5.3. *GJ 328b*

GJ 328b 的发现由 Robertson 等(2013年通过 HIRES、HRS 和 Tull 的径向速度数据宣布，这些数据覆盖了约 10 年的观测基线。研究发现，该行星的轨道周期为 4100 ± 300 天，最小质量为 $M_p \sin i = 2.30 \pm 0.13\ M_J$。近期，Pinamonti 等(2023年收集了 SOPHIE 的公开径向速度测量数据，并在 1132 天的时间跨度内获得了 131 个 HARPS-N 视向速度数据点。作者确定 GJ 328b 的最小质量为 $2.51 \pm 0.23\ M_J$，轨道周期为 3771 ± 17 天。此外，他们发现了一颗新的内侧小行星 GJ 328c，其周期为 $P = 241.8^{+1.3}_{-1.7}$ 天，且 $M_p \sin i = 21.4^{+3.4}_{-3.2}\ M_\oplus$。由于 GJ 328c 的天体测量信号可以忽略不计，我们在联合拟合中不考虑这颗内侧行星 GJ 328c。加入 2024年1月12日至 2024年4月28日期间获取的公开 HARPS-post 数据后，我们发现 GJ 328b 的质量为 $M_p = 2.31^{+0.16}_{-0.13}\ M_J$。我们的质量测量值略小于Pinamonti 等(2023年推导的最小质量，这主要是因为我们采用了比 0.63 ± 0.02 中 TIC 给出的数值更小的恒星质量，而该数值为 $0.65 \pm 0.08\ M_\odot$，后者用于 Pinamonti 等(2023年)。

5.4. *GJ 463b*

基于 HIRES 和 HRS 长达 10 年的径向速度数据，Endl 等（2022）报告称，GJ 463b 是一颗巨行星伴星，轨道周期为3448^{+110}_{-88}天，最小质量为 $1.55 \pm 0.15\ M_J$；在纳入 Morales 等（2025）收集的 CARMENES 数据后，这一结果后来更新为 $1.649^{+0.044}_{-0.045}\ M_J$。Sozzetti（2023）和 Piccinini 等（2026）均结合依巴谷卫星、GDR3 的天体测量数据，以及 HRS 和 HIRES 的视向速度数据进行了联合拟合，得出两个简并解：一个顺行轨道解（Sozzetti 得出 $M_p = 3.4 \pm 0.3\ M_J$ 27 ± 3° 2023 $M_p =$; $3.3^{+0.4}_{-0.3}\ M_J$ $27.7^{+4.6}_{-3.9}$° 2026

Piccinini 等得出 ）和一个逆行轨道解（Sozzetti（2023）得出 $M_p = 3.6 \pm 0.4\ M_J$ 和152^{+2}_{-3}°；Piccinini 等（2026）得出 $M_p = 3.4 \pm 0.4\ M_J$ 和 $152.3^{+3.9}_{-4.6}$° ）。在本研究中，我们不仅纳入了 Morales 等（2025）的 CARMENES 径向速度数据和另外 5 次测量，还

表4。关键参数　　13颗冷木星和一颗围绕M型矮星运行且具有稳健轨道解的褐矮星的参数

目标	行星质量 $[M_{\rm Jup}]$	轨道周期 [天]	半长轴 [AU]	倾角 [度]	偏心率	质量比
GJ 179b	$0.982^{+0.156}_{-0.128}$	$2318.5^{+26.3}_{-23.9}$	$2.449^{+0.048}_{-0.048}$	$133.0^{+7.8}_{-9.9}$	$0.147^{+0.033}_{-0.033}$	$0.0026^{+0.0004}_{-0.0003}$
GJ 317b[1]	$2.855^{+0.513}_{-0.477}$	$695.0^{+0.5}_{-0.3}$	$1.156^{+0.014}_{-0.029}$	$37.8^{+10.3}_{-6.9}$	$0.078^{+0.007}_{-0.009}$	$0.0065^{+0.0014}_{-0.0011}$
	$2.316^{+0.329}_{-0.283}$	$695.0^{+0.3}_{-0.3}$	$1.154^{+0.019}_{-0.019}$	$130.7^{+7.4}_{-10.1}$	$0.079^{+0.008}_{-0.008}$	$0.0052^{+0.0007}_{-0.0006}$
GJ 328b	$2.310^{+0.155}_{-0.129}$	$3766.8^{+17.6}_{-17.7}$	$4.062^{+0.045}_{-0.045}$	$96.9^{+13.0}_{-15.3}$	$0.228^{+0.015}_{-0.015}$	$0.0035^{+0.0002}_{-0.0002}$
GJ 463b[2]	$3.178^{+0.279}_{-0.274}$	$3464.6^{+21.8}_{-20.9}$	$3.496^{+0.051}_{-0.051}$	$31.1^{+3.2}_{-2.7}$	$0.138^{+0.016}_{-0.016}$	$0.0064^{+0.0005}_{-0.0005}$
	$2.919^{+0.253}_{-0.255}$	$3463.6^{+20.8}_{-19.5}$	$3.496^{+0.052}_{-0.051}$	$145.8^{+3.0}_{-3.7}$	$0.138^{+0.016}_{-0.016}$	$0.0059^{+0.0005}_{-0.0005}$
GJ 508.2b	$5.835^{+1.129}_{-1.090}$	$8591.8^{+1333.3}_{-1259.4}$	$6.661^{+0.869}_{-0.825}$	$19.2^{+3.4}_{-2.0}$	$0.530^{+0.050}_{-0.059}$	$0.0105^{+0.0015}_{-0.0015}$
GJ 649b	$0.835^{+0.223}_{-0.212}$	$600.3^{+1.5}_{-1.5}$	$1.116^{+0.014}_{-0.015}$	$18.4^{+7.4}_{-4.0}$	$0.118^{+0.040}_{-0.040}$	$0.0016^{+0.0004}_{-0.0004}$
GJ 676Ab	$5.353^{+0.244}_{-0.232}$	$1052.9^{+0.6}_{-0.6}$	$1.737^{+0.019}_{-0.019}$	$125.1^{+3.0}_{-3.3}$	$0.316^{+0.004}_{-0.004}$	$0.0082^{+0.0003}_{-0.0003}$
GJ 676Ac	$9.254^{+0.358}_{-0.360}$	$11038.6^{+1059.0}_{-720.6}$	$8.361^{+0.532}_{-0.377}$	$113.3^{+3.7}_{-4.6}$	$0.137^{+0.047}_{-0.037}$	$0.0141^{+0.0005}_{-0.0005}$
GJ 832b	$0.938^{+0.038}_{-0.038}$	$3736.7^{+13.1}_{-13.2}$	$3.580^{+0.053}_{-0.056}$	$54.1^{+2.1}_{-2.0}$	$0.013^{+0.013}_{-0.009}$	$0.0020^{+0.0001}_{-0.0001}$
GJ 849b	$0.929^{+0.056}_{-0.037}$	$1921.6^{+4.3}_{-4.3}$	$2.338^{+0.034}_{-0.035}$	$89.7^{+13.5}_{-16.0}$	$0.048^{+0.012}_{-0.012}$	$0.0019^{+0.0001}_{-0.0001}$
GJ 849c	$0.947^{+0.086}_{-0.054}$	$5873.0^{+93.4}_{-86.6}$	$4.926^{+0.090}_{-0.087}$	$93.3^{+17.3}_{-19.6}$	$0.058^{+0.024}_{-0.022}$	$0.0020^{+0.0002}_{-0.0001}$
GJ 9066c[3]	$0.296^{+0.128}_{-0.075}$	$769.4^{+3.9}_{-2.9}$	$0.875^{+0.035}_{-0.040}$	$46.5^{+28.0}_{-16.2}$	$0.467^{+0.070}_{-0.076}$	$0.0019^{+0.0008}_{-0.0005}$
	$0.404^{+0.169}_{-0.129}$	$769.4^{+3.8}_{-3.0}$	$0.874^{+0.037}_{-0.041}$	$148.6^{+9.9}_{-18.0}$	$0.461^{+0.067}_{-0.075}$	$0.0026^{+0.0011}_{-0.0008}$
HIP 79431B[4]	$31.321^{+8.459}_{-9.653}$	$109.919^{+0.008}_{-0.008}$	$0.358^{+0.005}_{-0.006}$	$176.3^{+0.8}_{-1.6}$	$0.332^{+0.010}_{-0.010}$	$0.0628^{+0.0169}_{-0.0194}$
HIP 88962b	$4.830^{+0.630}_{-0.517}$	$7054.9^{+693.3}_{-482.3}$	$6.154^{+0.461}_{-0.396}$	$90.7^{+22.1}_{-23.1}$	$0.718^{+0.032}_{-0.029}$	$0.0074^{+0.0008}_{-0.0005}$

[1] ΔGJ 317b 两种解的贝叶斯信息准则之差为 $\mathrm{BIC}_{i_b>90^\circ} - \mathrm{BIC}_{i_b<90^\circ} = -6.709$，逆行轨道（$i_b > 90^\circ$）解略占优。 [2] ΔGJ 463b 两种解的贝叶斯信息准则之差为 $\mathrm{BIC}_{i_b>90^\circ} - \mathrm{BIC}_{i_b<90^\circ} = 1.57$，顺行轨道解（$i_b < 90^\circ$）略占优。 [3] ΔGJ 9066c 两种解的贝叶斯信息准则之差为 $\mathrm{BIC}_{i_c>90^\circ} - \mathrm{BIC}_{i_c<90^\circ} = -5.24$，逆行轨道解（$i_c > 90^\circ$）略占优。 [4] HIP 79431B 是一颗褐矮星伴星。

拟合中采用的GDR2天体测量数据。然而，与Sozzetti (2023年) 和 Piccinini等人 (2026年) 一样，我们的分析无法消除轨道简并。与逆行轨道相比，我们发现顺行轨道解（$M_p = 3.18^{+0.28}_{-0.27}\ M_J$ 和 $31.1^{+3.2}_{-2.7}{}^\circ$）略占优势，贝叶斯信息准则改善了 1.57。

5.5. *GJ 508.2b*

GJ 508.2b 最近由 Morales 等（2025年）利用 CARMENES 观测得到确认。由于径向速度相位覆盖有限，作者仅报告了轨道周期（$P > 5300$ 天）、最小质量（$M_p \sin i > 1.85\ M_J$）和轨道偏心率（$e > 0.27$）的下限。假设轨道周期取下限，Morales 等（2025年）推导出行星质量为 $M_p = 6.0^{+1.7}_{-0.2}\ M_J$。加入六个新的 CARMENES 视向速度观测值后，我们的联合分析将 GJ 508.2b 的轨道周期约束为 $8591.8^{+1333.3}_{-1259.4}$ 天。尽管轨道周期仍未能得到准确测定，GJ 508.2b 的绝对质量、倾角和偏心率测得为 $M_p = 5.84^{+1.13}_{-1.09}\ M_J$、$i = 19.2^{+3.4}_{-2.0}{}^\circ$和 $e = 0.530^{+0.050}_{-0.059}$，分别。

5.6. *GJ 649b*

Johnson 等人(2010年) 报告称，GJ 649b的最小质量为 $0.328 \pm 0.032\ M_J$，轨道周期为598.3 ± 4.2 天，依据的是凯克高分辨率阶梯光栅光谱仪数据。加州遗产巡天期间收集了更多HIRES径向速度数据后，Rosenthal等人 (2021年) 将轨道周期修订为 $P = 604.8^{+3.4}_{-3.5}$天，并将行星最小质量修订为 $M_p \sin i = 0.275^{+0.022}_{-0.021}\ M_J$。最近，Pinamonti 等(2023年) 获取了全部HIRES数据以及CARMENES径向速度测量数据，并得到了更新后的数值：$P = 600.1 \pm 1.7$天和$M_p \sin i = 0.258^{+0.023}_{-0.022}\ M_J$。使用与 Pinamonti 等(2023年) 相同的径向速度数据，我们的径向速度+天体测量联合拟合得出的绝对行星质量为 $0.84^{+0.22}_{-0.21}\ M_J$，倾角为 $18.4^{+7.4}_{-4.0}{}^\circ$。

5.7. *GJ 676Ab* 和 *GJ 676Ac*

GJ 676是一个双星系统（Forveille 等，2011），其主星GJ 676A拥有四颗已确认的行星（Anglada-Escudé 与 Tuomi，2012；Sahlmann 等，2016；Feng 等，2022）。两颗较小的内侧行星GJ 676Ad和GJ 676Ae的轨道周期分别为3.6天和35.4天，均超出天体测量方法的探测极限。两颗外侧行星均为气态巨行星。GJ 676Ab的最小质量约为 $5\ M_J$，轨道周期约为1050天（Forveille 等，2011；Anglada-Escudé 与 Tuomi，2012）。Sahlmann 等（2016）获得了位置测量数据，并将倾角限制为 $45^{+21}_{-11}{}^\circ$、质量限制为 $M_p = 6.7^{+1.8}_{-1.5}\ M_J$。Feng 等（2022）得到的结果相近，分别为 $48.9^{+3.3}_{-2.8}{}^\circ$ 和 $M_p = 5.792^{+0.469}_{-0.477}\ M_J$。对于GJ 676Ac，Sahlmann 等（2016）报告其轨道周期约为7340天，并假设其轨道为圆轨道，得出最小质量为 $M_p \sin i = 6.8 \pm 0.1\ M_J$。然而，Feng 等（2022）发现其轨道实际上是偏心的（$e = 0.295^{+0.033}_{-0.049}$）。他们得出的轨道周期长得多，为 $P = 13921.4^{+1232.3}_{-1514.6}$ 天；伴星绝对质量为 $13.492^{+1.046}_{-1.127}\ M_J$，倾角为 $33.7^{+1.4}_{-1.3}{}^\circ$，这表明该伴星很可能是一颗褐矮星。在联合分析中纳入2018年之后收集的新HARPS-post数据和2021年之后获得的PFS数据后，我们确认GJ 676Ac是一颗质量很大的巨行星，绝对质量为$9.25 \pm 0.36\ M_J$。其轨道周期为 $11038.6^{+1059.0}_{-720.6}$ 天，偏心率为 $0.137^{+0.047}_{-0.037}$，轨道倾角为 $113.3^{+3.7}_{-4.6}{}^\circ$。我们还将GJ 676Ab的轨道周期、质量和倾角分别修订为 $P = 1052.9^{+0.56}_{-0.57}$ 天、$M_p = 5.35^{+0.24}_{-0.23}\ M_J$ 和 $i = 125.1^{+3.0}_{-3.3}{}^\circ$。

5.8. *GJ 832b*

GJ 832 宿主星拥有一颗巨行星，其轨道周期约为 10 年，最小质量为 $0.68 \pm 0.09\ M_J$（Bailey 等（2009）；Bonfils 等（2013））。此外，Wittenmyer 等（2014）报告了一颗内侧行星 GJ 832b，但 Gorrini 等（2022）确认该信号是假阳性。随后，Xiao 等（2023）和 Philipot 等（2023）均对视向速度以及依巴谷卫星和 GDR3 的天体测量加速度进行了类似的联合拟合，得出了 $0.80^{+0.12}_{-0.11}\ M_J$ 和 $0.990^{+0.090}_{-0.080}\ M_J$ 的绝对质量测量结果，以及 GJ 832b 的倾角 $54.9^{+6.6}_{-4.9}{}^\circ$ 和 $51 \pm 3^\circ$。最近，An 等（2025）重复了这项分析，报告了相近的质量测量结果 $M_p = 1.039^{+0.044}_{-0.043}\ M_J$，但倾角为 $131.6^{+2.7}_{-3.4}{}^\circ$，与此前不同。我们的分析结果 $M_p = 0.94 \pm 0.04\ M_J$ 和 $i = 54.1^{+2.1}_{-2.0}{}^\circ$ 与 Xiao 等（2023）和 Philipot 等（2023）的发现更为一致。

5.9. *GJ 849b* 和 *GJ 849c*

GJ 849 宿主星有两颗已确认的冷木星。内侧巨行星 GJ 849b 的最小质量约为 $0.9\ M_J$，轨道周期约为 1900 天（Butler 等（2006）；Bonfils 等（2013）；Montet 等（2014）；Feng 等（2015）；Rosenthal 等（2021）；Pinamonti 等（2023））。外侧行星 GJ 849c 最初由 Montet 等（2014）报告，其轨道周期 7068^{+6282}_{-2166} 天的不确定性很大，最小质量为 $M_p \sin i = 0.702^{+0.344}_{-0.203}\ M_J$。Rosenthal 等（2021）和 Pinamonti 等（2023）通过纳入 HIRES 和 HARPS-N 的视向速度数据，改进了轨道解。Rosenthal 等（2021）报告的轨道周期为 5750^{+130}_{-120} 天，最小质量为 $M_p \sin i = 1.079 \pm 0.053\ M_J$；Pinamonti 等（2023）测得的轨道周期为 5990^{+110}_{-100} 天，最小质量为 $M_p \sin i = 0.99 \pm 0.11\ M_J$。我们发现，GJ 849b 的真实质量为 $0.93^{+0.06}_{-0.04}\ M_J$，对应 $i = 89.7^{+13.5}_{-16.0}{}^\circ$；GJ 849c 的质量相近，为 $0.95^{+0.09}_{-0.05}\ M_J$，对应 $i = 93.3^{+17.3}_{-19.6}{}^\circ$。

5.10. *GJ 9066c*

GJ 9066 最初被报告为拥有两颗行星（Feng 等人（2020））， 但内侧冷海王星 GJ 9066b 后来被排除，确认是由恒星活动造成的假阳性（Quirrenbach 等人（2022））。关于 GJ 9066c，Feng 等(2020年) 和 Quirrenbach 等(2022年) 测得的最小质量均约为 $0.2\ M_J$。通过联合分析，我们确认 GJ 9066c 是一颗巨行星。不过，我们发现了两种简并解：顺行轨道解（$M_p = 0.30^{+0.13}_{-0.08}\ M_J$ 和 $i = 46.5^{+28.0}_{-16.2}{}^\circ$）以及逆行轨道解（$M_p = 0.40^{+0.17}_{-0.13}\ M_J$ 和 $i = 148.6^{+9.9}_{-18.0}{}^\circ$）。逆行轨道解更受支持，贝叶斯信息准则改善了 5.24。

5.11. *HIP 79431B*

Apps 等 （2010年）首次报告了环绕 HIP 79431 运行的行星，其最小质量约为 $2.1\ M_J$，轨道周期为 111.7 ± 0.7 天，偏心率为0.29 ± 0.02。我们的拟合将该伴星识别为一颗褐矮星，其真实质量为 $31.32^{+8.46}_{-9.65}\ M_J$，运行于一条近乎正面朝向的轨道上（$i = 176.3^{+0.7}_{-1.6}{}^\circ$）。拟合得到的依巴谷卫星天体测量抖动相对较大，为 $J_{\rm hip} = 22.17^{+3.17}_{-2.62}$ 毫角秒，表明在我们采用的噪声模型下，依巴谷卫星中间天体测量数据存在显著的额外散布，因此在联合拟合中的权重也相应降低。因此，推断出的质量和倾角很可能主要由 GDR2 和 GDR3 星表天体测量数据决定。利用 Gaia 自行异常和额外噪声，Destriez 等 （2026年）近期也认为 HIP 79431 很可能是一个高倾角系统，并且可能拥有两颗伴星。

5.12. *HIP 88962b*

HIP 88962b 最近通过 PFS 观测被确认是一颗偏心冷木星（Boss 等（2026））。我们的联合分析显示，该行星的轨道周期为 $7054.9^{+693.3}_{-482.3}$ 天，质量为 $M_p = 4.83^{+0.63}_{-0.52}\,M_J$，偏心率为 $e = 0.718^{+0.032}_{-0.029}$。轨道倾角确定为 $i = 90.7^{+22.1}_{-23.1}$°。

6. 讨论

6.1. 绕行*M*型矮星的巨行星质量比

在图 2 的左图中，我们展示了所有已确认且具有行星绝对质量测量值的绕行M型矮星巨行星的行星与恒星质量比随半长轴的变化。在41个凌星系统（红点）中，大多数系统的半长轴小于0.1天文单位，TOI-1899b（Cañas 等（2020））和K2-419Ab（Kanodia 等（2024））除外。此外，M型恒星周围还有8颗直接成像冷木星（蓝点），其半长轴大于10天文单位（Ducourant 等（2008）；Ireland 等（2011）；Patience 等（2012）；Delorme 等（2013）；Naud 等（2014）；Zhang 等（2021）；Gaidos 等（2022）；Walker 等（2026）），且所有行星的质量都大于 $4\ M_J$，这是观测偏差所致。在凌星和成像方法具有探测灵敏度的半长轴范围内，微引力透镜已在M型矮星周围发现了许多宽轨道冷木星，其半长轴大于 $1 \lesssim a \lesssim 10$ 天文单位（Akeson 等（2013）；Christiansen 等（2025））。然而，据报道仅有42个系统具有唯一的轨道解（绿点）。在下文分析中，我们排除了其他至少存在两个简并轨道解的系统（半透明绿点）。最后，本研究通过视向速度+天体测量联合分析所刻画的13颗绕行M型矮星的冷木星（橙色星形）的半长轴，与微引力透镜样本的半长轴范围重叠[4]。

图2右侧面板展示了围绕M型矮星运行的巨行星质量比的累积分布函数，并按探测技术着色。我们发现，M型矮星周围可能缺少高质量比热木星（另见Gan 等（2022））。大多数围绕M型恒星运行的凌星热木星，其质量比约为 10^{-3}，其中只有五颗（TOI-4201b，Gan 等（2023b）；Hartman 等（2023）；Delamer 等（2024）；TIC 46432937b，Hartman 等（2024）；TOI-2379b，Bryant 等（2024）；TOI-6303b和TOI-6330b，Hotnisky 等（2024））的质量比高于 4×10^{-3}。与此同时，根据微引力透镜和我们的视向速度 $q > 4 \times 10^{-3}$天体测量结果，冷木星系统中可能存在大量高质量比系统。我们使用+SciPy 对凌星样本与微引力透镜样本，以及凌星样本与视向速度+天体测量样本进行双样本柯尔莫哥洛夫–斯米尔诺夫检验（Virtanen 等（2020）），得到的p值分别为 2.9×10^{-3} 和 4.9×10^{-5}。因此，我们认为可以在3-4σ 置信水平上拒绝零假设，即热木星和冷木星的质量比分布相同。M型恒星周围缺少大质量热木星，很可能是由物理因素造成的。凌星法的探测灵敏度主要取决于行星半径，而非其质量。由于类木行星的半径在 $1\,R_J$ 较宽的0.2–13 M_J（Hatzes 与 Rauer（2015）；Chen 与 Kipping（2017）；Bashi 等（2017）；Edmondson 等（2023）；Müller 等（2024）的质量范围内大致集中在

此外，通过视向速度表征的M型矮星周围的冷木星+天体测量结果与微引力透镜结果呈现出类似的质量比分布，尽管这两类群体位于银河系中截然不同的区域。微引力透镜发现的行星大多位于银河系核球，这是一个由大量老年恒星组成的致密恒星场（Mao & Paczynski1991）。这种环境不同于天体测量发现的巨行星所在的环境；后者围绕银河系本地薄盘中的较年轻恒星运行，而该区域的恒星数密度低得多（Adibekyanetal.2013）。尽管质量比分布的相似性暗示，银河系环境可能不会显著影响半长轴为1至10天文单位的M型矮星周围冷木星的性质，但天体测量发现的M型矮星周围巨行星样本非常有限且具有异质性。此外，两个样本未经校正的探测完备度使得我们难以得出可靠结论。预计即将发布的Gaia DR4将带来数千颗围绕本地M型恒星运行的冷木星的发现（Perryman etal. 2014；Lammers & Winn 2026），从而提供一个优质且干净的样本，用于与凌星和微引力透镜研究结果进行比较。

[4] 对于微引力透镜样本，我们在此仅考虑投影半长轴 a_p。为了将天空中的随机几何取向考虑在内，需要乘以一个因子 $4/\pi$，以估算真实半长轴（即 $a = a_p \times(4/\pi)$）。不过，这种修正仅在统计意义上成立，并不适用于单个微引力透镜行星系统。

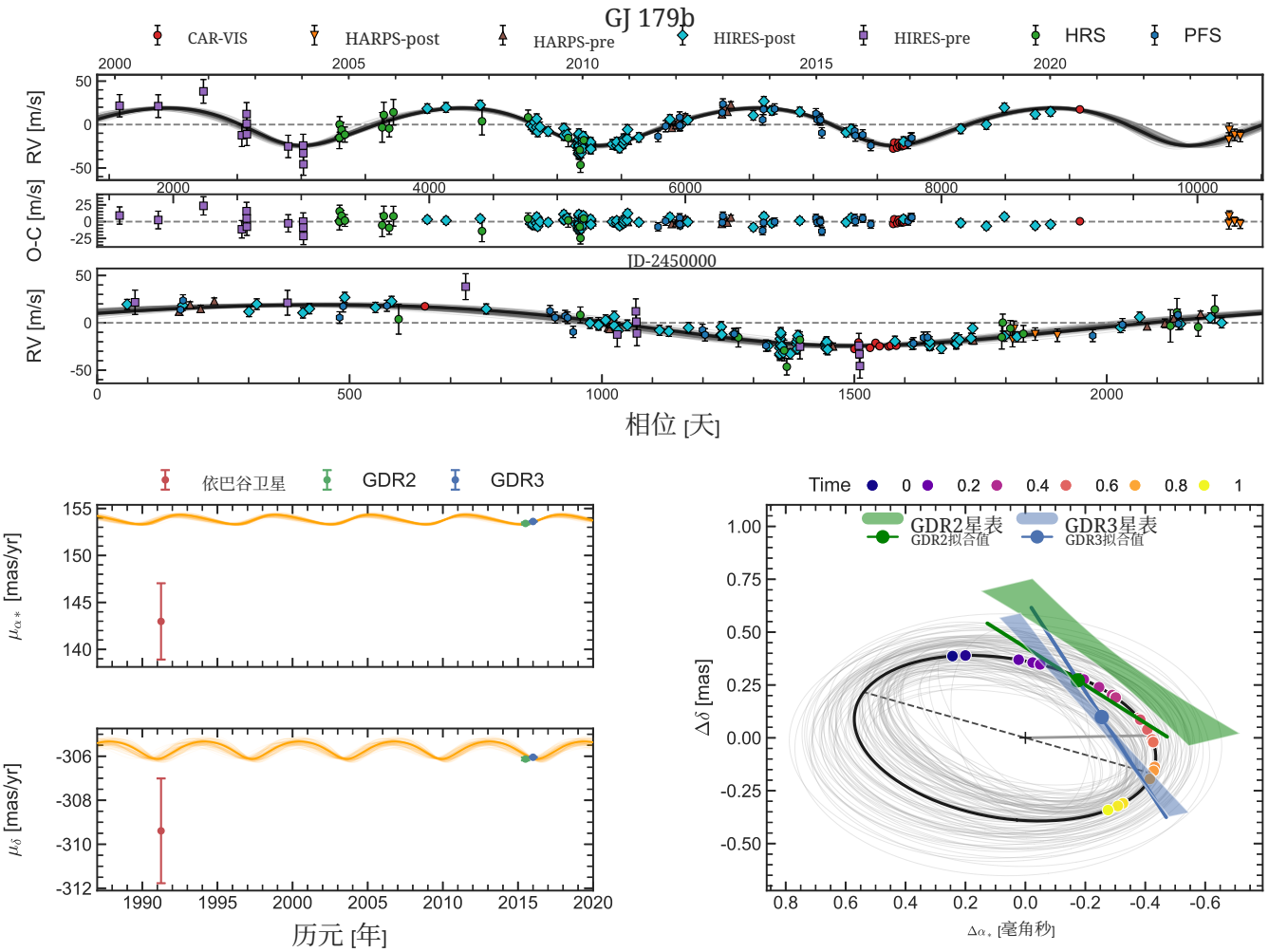

图 1. GJ 179 联合分析的视向速度与天体测量拟合结果。**(a)**上方各图：GJ 179 的视向速度拟合，包括视向速度时间序列（上）、残差（中）和相位折叠视向速度（下），黑色曲线表示最佳拟合开普勒模型。**(b)** 左下各图：联合拟合预测的 GJ 179 自行演化。上图和下图分别显示赤经和赤纬方向的分量，$\mu_{\alpha*}$ 和 μ_δ。粗紫色或橙色曲线分别表示两个倾角分支 $i_b < 90°$ 或 $i_b > 90°$的瞬时模型自行；两者均包含拟合的质心自行，以及由 GJ 179b 引起的随时间变化的反射自行。细曲线表示从 MCMC 后验分布中随机选取的轨道解。红色、绿色和蓝色点分别表示依巴谷卫星、GDR2 和 GDR3 星表中的自行及其不确定度。**(c)** 右下图：GJ 179b 引起的 GJ 179 天体测量反射轨道。加号标记系统质心。粗黑色曲线表示最佳拟合轨道，细灰色曲线表示 100 个后验抽样。绿色和蓝色阴影区域分别表示扣除质心运动后 GDR2 和 GDR3 的不确定性范围。绿色和蓝色圆圈标记 GDR2 和 GDR3 参考历元处由伴星引起的位置偏移，相关实线表示这些偏移随拟合自行偏移的演化。黑色轨道上的彩色点表示 Gaia 扫描历元处模型预测的天体测量位置，并按归一化观测时间着色，颜色由紫至黄递变。

6.2. 环绕*M*型矮星和大质量恒星运行的冷木星

图 3 展示了本研究表征的13颗围绕M型恒星运行的冷木星（橙色）的偏心率和行星绝对质量分布，这些行星的 $0.2 < M_p < 13.6\ M_J$ 半长轴大于0.5天文单位；同时还展示了177颗围绕质量更大的恒星运行的冷木星（$M_* > 0.65\ M_\odot$；灰色）恒星，它们满足相同的条件下。两个样本的偏心率分布没有明显差异。尽管探测灵敏度也会产生影响，因为恒星的天体测量位移与系统的质量比成正比，但我们发现，平均而言，围绕大质量恒星运行的冷木星往往质量也更大，其行星质量中位数为 $5.1\ M_J$；相比之下，围绕M型恒星运行的冷木星，其行星质量中位数为 $2.3\ M_J$。具体来说，13颗冷木星中有7颗（53.8%）

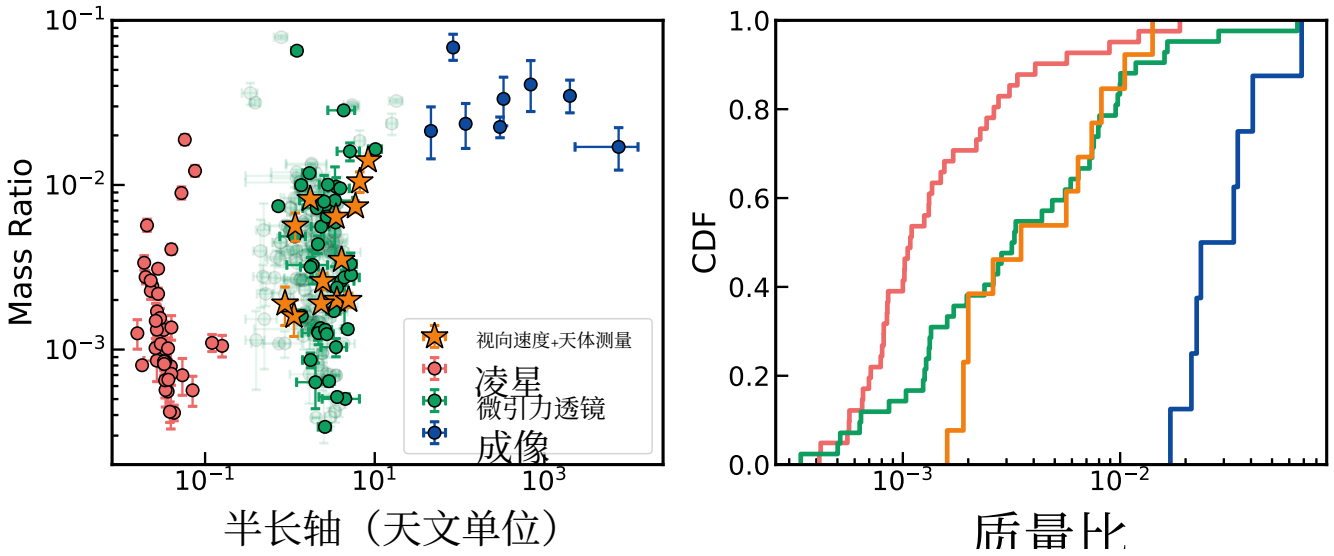

图 2. 左：所有已确认的、围绕 M型矮星运行且已测得行星绝对质量的巨行星的质量比和半长轴分布，按不同的探测与表征技术着色。本文研究的 13 颗冷木星以橙色星形标记表示。半透明的绿色圆点表示通过微引力透镜发现、但具有 ≥ 2 简并轨道解的冷木星；这些天体未纳入分析。右：围绕 M型矮星运行的巨行星的累积质量比分布函数。M型恒星周围可能较少存在大质量热木星。不考虑探测偏差时，通过微引力透镜和视向速度+天体测量表征的 M型矮星周围冷木星，其质量比分布相似。

围绕M型恒星运行的木星质量行星，其绝对质量高于1 M_J；而围绕质量更大的恒星运行的冷木星中，这一比例上升至177颗中的169颗（95.5%）。我们对围绕M型恒星和质量更大的恒星运行的冷木星质量进行了双样本Kolmogorov–Smirnov检验，得到p值为0.02，表明这两个样本并非来自同一分布。

这种特征可能是核心吸积形成过程的结果（Pollack 等人（1996））。由于 M型矮星的原行星盘质量较低（Pascucci 等人（2016）；Ansdell 等人（2016）；Manara 等人（2018）），盘消散前能够吸积的气体较少，从而导致行星质量较低。此外，大质量恒星周围可能形成多个巨行星，这得益于大质量原行星盘能够提供充足的固体物质，以形成多个致密核并触发失控吸积（Burn 等人（2021））。通过正面碰撞（Li 等人（2010）；Liu 等人（2015）），两颗低质量气态巨行星可以并合形成一颗大质量行星，这或许可以解释为何大质量恒星周围的冷木星比 M型矮星周围的质量更高。 Pan 等(2024年) 声称，行星并合途径也能在晚期M型矮星周围形成质量约为 $0.1 \sim 0.2\ M_{\odot}$的巨行星，例如 GJ 9066c（Feng 等人（2020）；Quirrenbach 等人（2022））以及 GJ 3512b 和 c（Morales 等，2025年）；标准的核心吸积机制难以解释这些行星（Liu 等人（2019）；Burn 等人（2021））。这些剧烈的动力学过程可以通过研究多个行星的相互倾角来探测并通过考察多个行星的相互倾角加以研究。

7. 结论

在本研究中，我们联合分析了长期径向速度观测发现的、拥有冷木星的19颗M型矮星的径向速度数据和Hipparcos–Gaia天体测量数据。我们获得了11个系统中13颗冷木星可靠的绝对质量，其中包括对5颗行星的首次此类测量。联合数据还表明，HIP 79431B此前因其最小质量而被认定为行星，但其真实质量为 $31.3^{+8.5}_{-9.7}\ M_{\rm Jup}$，属于褐矮星。若干系统的轨道解仍存在简并，或倾角约束较弱；Gaia DR4历元天体测量数据或许有助于解决这些问题。比较不同技术发现的绕M型恒星运行的巨行星的行星与恒星质量比后，我们发现M型矮星周围可能缺少高质量比热木星；我们的本地冷木星样本则与微引力透镜冷木星样本相似，后者的行星主要集中在银河系核球方向。这些种群比较仍属初步结果，因为样本量有限，且尚未校正探测完备性。本研究提供了一个本地M型矮星周围冷木星样本，其中行星的质量和轨道均受到良好约束；研究结果也揭示了一个更大规模冷木星种群的冰山一角，预计即将到来的Gaia DR4和DR5将发现该种群。

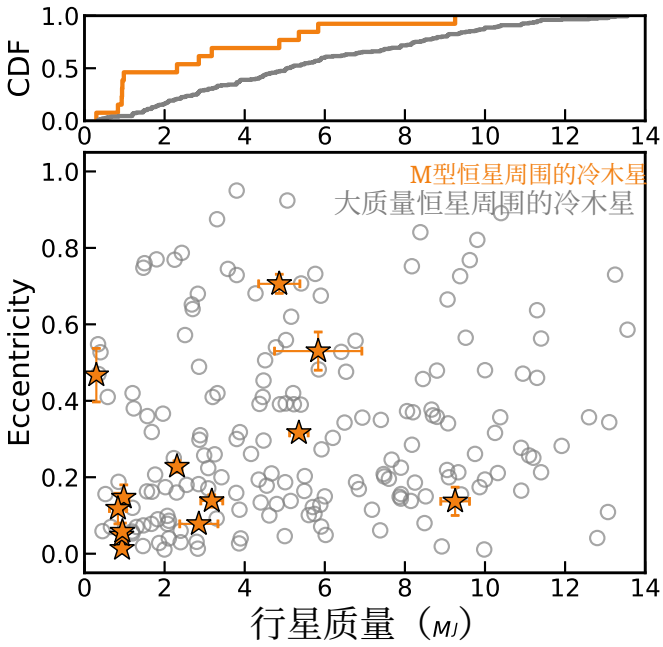

图3. 本文表征的 13 $0.65\ M_\odot \leq M_* \leq$ 177 绕M型恒星运行的冷木星（橙色，）以及绕质量更大的恒星运行的冷木星（灰色，$M_* > 0.65\ M_\odot$），数据来自NASA系外行星档案（Akeson 等（2013）；Christiansen 等，2025），其 $0.2 < M_p < 13.6\ M_J$ 和半长轴 $a > 0.5$ 天文单位。上图显示了行星质量的累积分布函数。

8. 致谢

我们衷心感谢参与本研究所用观测的PFS观测者所作的贡献，他们包括Mauro Barbieri、Jennifer Burt、Yuri Beletsky、Karen Collins、Matías Díaz、Diana Dragomir、Zahra Essack、Adina Feinstein、Erin Flowers、Shubham Kanodia、Adriana Kuehnel、Michelle Kunimoto、Ben Montet、Sam Quinn、Malena Rice、Marcelo Tala、Sam Yee和George Zhou。我们非常感谢他们为取得这些观测所付出的努力。

本研究得到中国国家重点研发计划项目（编号：2024YFA1611801和2024YFC2207700）、中国国家自然科学基金委员会（NSFC）基金项目（批准号：12473066和12573068）、上海交通大学2030计划、上海交通大学-华威大学联合种子基金2024/25-第5轮以及中智联合研究基金（CCJRF，编号：2205）的支持。中智联合研究基金由中国科学院南美天文中心（CASSACA）提供，由中国科学院国家天文台（NAOC）和智利天文学会（SOCHIAS）共同设立，旨在支持天文学领域的中智合作。本文中的计算在思源一号集群上运行，该集群由上海交通大学高性能计算中心提供支持。

T.G. 和 E.P. 感谢西班牙国家研究署（Agencia Estatal de Investigación）、科学与创新部（MCIN/AEI/10.13039/501100011033）以及欧洲区域发展基金（“建设欧洲的一种方式”）通过项目 PID2021-125627OB-C32 和 PID2024-158486OB-C32 提供的经费支持。本研究得到欧洲研究委员会资助（欧洲研究委员会高级资助项目 SPEAR，GA 101200674）。P. A. 感谢西班牙国家研究署（AEI/10.13039/501100011033）、科学、创新与大学部以及欧洲区域发展基金（“建设欧洲的一种方式”）通过以下项目提供的经费支持：(i) PID2022-137241NB-C43，资金来自欧盟“下一代欧盟”；科学、创新与大学部；复苏、转型与韧性计划；安达卢西亚自治区政府大学、研究与创新部；以及西班牙国家研究委员会；(ii) 授予安达卢西亚天体物理研究所的“塞韦罗·奥乔亚”卓越中心奖（CEX2021-001131-S）。J.C.M. 和 I. R. 感谢西班牙项目 PID2024-158486OB-C31 和 PID2025-172309OB-I00 提供的支持，项目由 MCIU/AEI/10.13039/501100011033、欧洲区域发展基金（“建设欧洲的一种方式”）以及欧洲社会基金+（ESF+）资助；还感谢由 MCIN/AEI/10.13039/501100011033 资助的卓越中心计划 María de Maeztu CEX2020-001058-M、MaX-CSIC 卓越奖 MaX4-SOMMA-ICE、加泰罗尼亚自治区政府/CERCA 计划，以及欧盟地平线欧洲计划下欧洲研究委员会（ERC）的资助（欧洲研究委员会高级资助项目 SPOTLESS；编号 101140786）。本项目由欧盟资助。本文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。欧盟及其拨款机构均不对此承担责任。

本文基于在安达卢西亚西班牙天文中心（CAHA）卡拉阿尔托观测站收集的观测数据，该观测站由安达卢西亚自治区政府和西班牙国家研究委员会（IAA-CSIC）联合运营。本文还使用了在智利拉斯坎帕纳斯天文台的 6.5 米麦哲伦望远镜收集的数据。

使用生成式人工智能工具为手稿提出语言改进建议，并协助进行部分数据分析和代码开发。所有由人工智能辅助生成的内容均由作者审阅并核实，作者

对本研究的科学内容和结论承担全部责任。所使用的生成式人工智能工具为 ChatGPT。

设施： 依巴谷卫星、Gaia、CARMENES、HARPS、HARPS-N、HIRES、HRS、IRD、NIRPS、PFS、SOPHIE、Tull、UCLES

软件： astropy（Astropy 合作组等，2013年、2018年、2022年）、corner（Foreman-Mackey，2016年）、mat-plotlib（Hunter，2007年）、NumPy（van der Walt 等，2011年；Harris 等，2020年）、pandas（pandas 开发团队，2025年）、ptemcee（Vousden 等，2016年）、SciPy（Vir-tanen 等，2020年）

附录

A. 联合分析的诊断图

图 A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7、A8、A9、A10和 A11 展示了 GJ 317、GJ 328、GJ 463、GJ 508.2、GJ 649、GJ 676A、GJ 832、GJ 849、GJ 9066、HIP 79431 和 HIP 88962 的联合拟合结果。

B. 联合分析的后验分布图

图 B1 展示了全部 12 个系统的后验分布，其中包括 11 个行星系统（GJ 179b、GJ 317b、GJ 328b、GJ 463b、GJ508.2b、GJ 649b、GJ676Ab 和 GJ 676Ac、GJ 832b、GJ 849b 和 GJ 849c、GJ 9066c 以及 HIP 88962b）和一个具有稳健轨道解的褐矮星（HIP 79431B）。完整的图组（12 幅图）可在在线期刊中查阅。

图组 1。联合分析的后验分布 sis

C. 具有稳健轨道解的系统参数

表C1汇总了所有系统的最佳拟合参数和推导参数；这些系统具有稳健轨道解，且倾角上下不确定度均小于 30 度。

参考文献

Adibekyan, V. Z., Figueira, P., Santos, N. C., 等. 2013年, 《天文学与天体物理学》, 554, A44, doi: 10.1051/0004-6361/201321520Akeson, R. L., Chen, X., Ciardi, D., 等. 2013年, 《太平洋天文学会出版物》, 125, 989, doi: 10.1086/672273An, Q., Brandt, T. D., Brandt, G. M., & Venner, A. 2025年, 《天体物理学杂志增刊》, 280, 61, doi: 10.3847/1538-4365/adfa99Anglada-Escudé, G., Boss, A. P., Weinberger, A. J., 等. 2012年, 《天体物理学杂志》, 746, 37, doi: 10.1088/0004-637X/746/1/37Anglada-Escudé, G., & Tuomi, M. 2012年, 《天文学与天体物理学》, 548, A58, doi: 10.1051/0004-6361/201219910Ansdell, M., Williams, J. P., van der Marel, N., 等. 2016年, 《天体物理学杂志》, 828, 46, doi: 10.3847/0004-637X/828/1/46Apps, K., Clubb, K. I., Fischer, D. A., 等. 2010年, 《太平洋天文学会出版物》, 122, 156, doi:10.1086/651058Astropy 合作组, Robitaille, T. P., Tollerud, E. J., 等. 2013年, 《天文学与天体物理学》, 558, A33, doi: 10.1051/0004-6361/201322068Astropy 合作组, Price-Whelan, A. M., Sipőcz, B. M., 等. 2018年, 《天文学杂志》, 156, 123, doi: 10.3847/1538-3881/aabc4fAstropy 合作组 , Price-Whelan, A. M., Lim, P. L., 等. 2022年, 《天体物理学杂志》, 935, 167,doi: 10.3847/1538-4357/ac7c74Bailey, J., Butler, R. P., Tinney, C. G., 等. 2009年, 《天体物理学杂志》, 690, 743, doi:10.1088/0004-637X/690/1/743Bashi, D., Helled, R., Zucker, S., & Mordasini, C. 2017年, 《天文学与天体物理学》, 604, A83, doi: 10.1051/0004-6361/201629922

Beleznay, M., & Kunimoto, M. 2022年, 《皇家天文学会月报》, 516, 75, doi: 10.1093/mnras/stac2179Benedict, G. F., Henry, T. J., Franz, O. G. 等。2016年, 《天文学杂志》, 152, 141, doi: 10.3847/0004-6256/152/5/141Bonfils, X., Delfosse, X., Udry, S. 等。2013年, 《天文学与天体物理学》, 549, A109, doi: 10.1051/0004-6361/201014704Boss, A. P. 1997年, 《科学》, 276, 1836, doi: 10.1126/science.276.5320.1836—。2000年, 《天体物理学杂志快报》, 536, L101, doi: 10.1086/312737Boss, A. P., Butler, R. P., Teske, J. K. 等。2026年。https://arxiv.org/abs/2611.16032Bouchy, F., Doyon, R., Pepe, F. 等。2025年, 《天文学与天体物理学》, 700, A10, doi: 10.1051/0004-6361/202453341Brandt, T. D. 2018年, 《天体物理学杂志增刊》, 239, 31, doi: 10.3847/1538-4365/aaec06—。2021年, 《天体物理学杂志增刊》, 254, 42, doi: 10.3847/1538-4365/abf93cBrandt, T. D., Dupuy, T. J., & Bowler, B. P. 2019年, 《天文学杂志》, 158, 140, doi: 10.3847/1538-3881/ab04a8Brandt, T. D., Dupuy, T. J., Li, Y. 等。2021年, 《天文学杂志》, 162, 186, doi: 10.3847/1538-3881/ac042eBryan, M. L., Knutson, H. A., Howard, A. W. 等。2016年, 《天体物理学杂志》, 821, 89, doi: 10.3847/0004-637X/821/2/89Bryant, E. M., Bayliss, D., & Van Eylen, V.2023年, 《皇家天文学会月报》, 521, 3663, doi: 10.1093/mnras/stad626

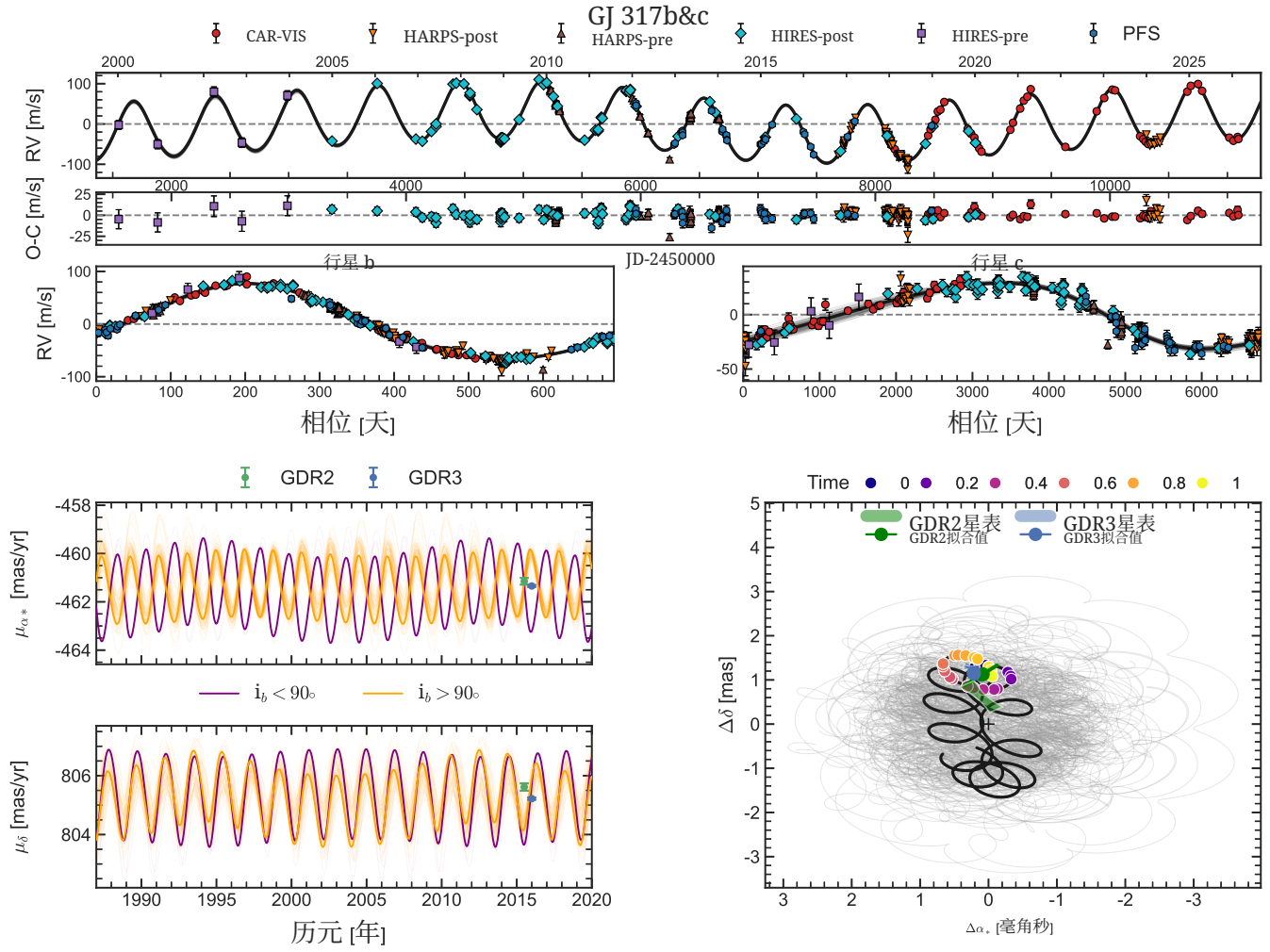

图 A1。 与图 1但对象为 GJ 317。

Bryant, E. M., Bayliss, D., Hartman, J. D. 等。2024年，《皇家天文学会月报》，533，3893，doi: 10.1093/mnras/stae2034Bryant, E. M., Jordán, A., Hartman, J. D. 等。2025年，《自然·天文学》，9，1031，doi: 10.1038/s41550-025-02552-4Burn, R., Schlecker, M., Mordasini, C. 等。2021年，《天文学与天体物理学》，656，A72，doi: 10.1051/0004-6361/202140390Butler, R. P., Marcy, G. W., Williams, E. 等。1996，《太平洋天文学会出版物》，108，500，doi: 10.1086/133755Butler, R. P., Wright, J. T., Marcy, G. W. 等。2006年，《天体物理学杂志》，646，505，doi: 10.1086/504701Butler, R. P., Vogt, S. S., Laughlin, G. 等。2017年，《天文学杂志》，153，208，doi: 10.3847/1538-3881/aa66caCañas, C. I., Stefansson, G., Kanodia, S. 等。2020年，《天文学杂志》，160，147，doi: 10.3847/1538-3881/abac67Chen, J., & Kipping, D. 2017年，《天体物理学杂志》，834，17，doi: 10.3847/1538-4357/834/1/17Christiansen, J. L., McElroy, D. L., Harbut, M. 等。2025年，《行星科学杂志》，6，186，doi: 10.3847/PSJ/ade3c2

Cosentino, R., Lovis, C., Pepe, F., 等. 2012年，载于国际光学工程学会（SPIE）会议系列，第8446卷，《地基与机载天文学仪器IV》，编者：I. S. McLean、S. K. Ramsay 和 H. Takami，84461V，doi: 10.1117/12.925738Crane, J. D., Shectman, S. A., Butler, R. P., 等. 2010年，国际光学工程学会（SPIE）会议系列，第7735卷，《卡内基行星搜寻光谱仪：集成与调试》，773553，doi: 10.1117/12.857792Cui, K., Xiao, G.-Y., Feng, F., 等. 2026年，美国国家科学院院刊，123，e2524764123，doi: 10.1073/pnas.2524764123Curiel, S., Ortiz-León, G. N., Mioduszewski, A. J., & Sanchez-Bermudez, J. 2022年，《天文学杂志》，164，93，doi: 10.3847/1538-3881/ac7c66Cutri, R. M., Skrutskie, M. F., van Dyk, S., 等. 2003年，2MASS全天点源星表。

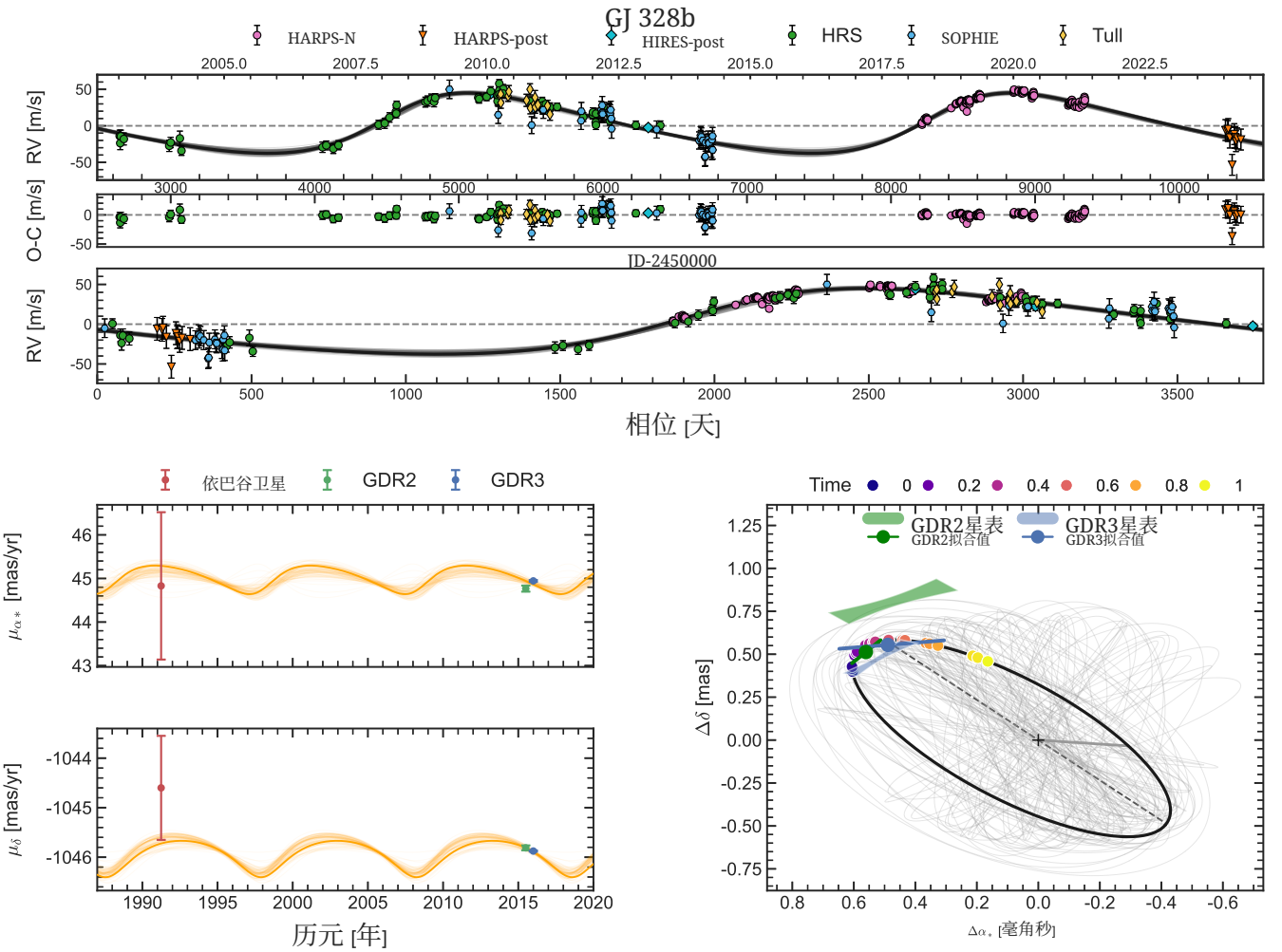

图 A2. 与图 1相同，但对应的是 GJ 328。

Dawson, R. I.,& Johnson, J. A. 2018年，《天文学与天体物理学年度评论》，56，175，doi: 10.1146/annurev-astro-081817-051853Delamer,M.,Kanodia, S., Cañas, C. I., 等. 2024年，《天体物理学杂志快报》，962,L22，doi：10.3847/2041-8213/ad1a19Delfosse,X., Forveille, T., Ségransan, D., 等. 2000年，《天文学与天体物理学》，364,217，doi: 10.48550/arXiv.astro-ph/0010586Delorme,P.,Gagné, J., Girard, J. H., 等. 2013年，《天文学与天体物理学》，553,L5，doi：10.1051/0004-6361/201321169Destriez, F., Lagrange, A.-M., Hébrard, G., 等. 2026年，arXiv 预印本，arXiv:2610.31006，doi: 10.48550/arXiv.2610.31006Diego,F., Charalambous, A., Fish, A. C., & Walker, D. D. 1990年，载于国际光学工程学会（SPIE）会议系列，第1235卷，《第七届天文学仪器专题》，编者：D. L. Crawford，562–576，doi：10.1117/12.19119Dransfield, G.,Timmermans, M., Sebastian, D., 等. 2026年，《皇家天文学会月报》，547,stag448，doi：10.1093/mnras/stag448 Ducourant, C.,Teixeira,R.,Chauvin,G.,等.2008年，《天文学与天体物理学》，477，L1，doi: 10.1051/0004-6361:20078886Edmondson, K., Norris, J., & Kerins, E. 2023年，arXiv 预印本，arXiv:2310.16733，doi：10.48550/arXiv.2310.16733Endl, M., Robertson, P., Cochran, W. D., 等. 2022年，《天文学杂志》，164，238，doi：10.3847/1538-3881/ac8e05欧洲空间局，编. 1997年，欧洲空间局特别出版物，第1200卷，《依巴谷卫星与第谷星表》。源自欧洲空间局依巴谷空间天体测量任务的天体测量与测光星表 Feng, F., Butler, R. P., Vogt, S. S., Holden, B., & Rui, Y. 2023 年，《皇家天文学会月报》，525，607，doi: 10.1093/mnras/stad2297Feng, F., Lisogorskyi, M., Jones, H. R. A., 等. 2019年，《天体物理学杂志增刊》，244，39，doi：10.3847/1538-4365/ab40b6Feng, F., Rui, Y., Xuan, Y., & Jones, H. 2024年，《天体物理学杂志增刊》，271，50，doi：10.3847/1538-4365/ad27d2Feng, F., Shectman, S. A., Clement, M. S., 等. 2020年，《天体物理学杂志增刊》，250，29，doi：10.3847/1538-4365/abb139

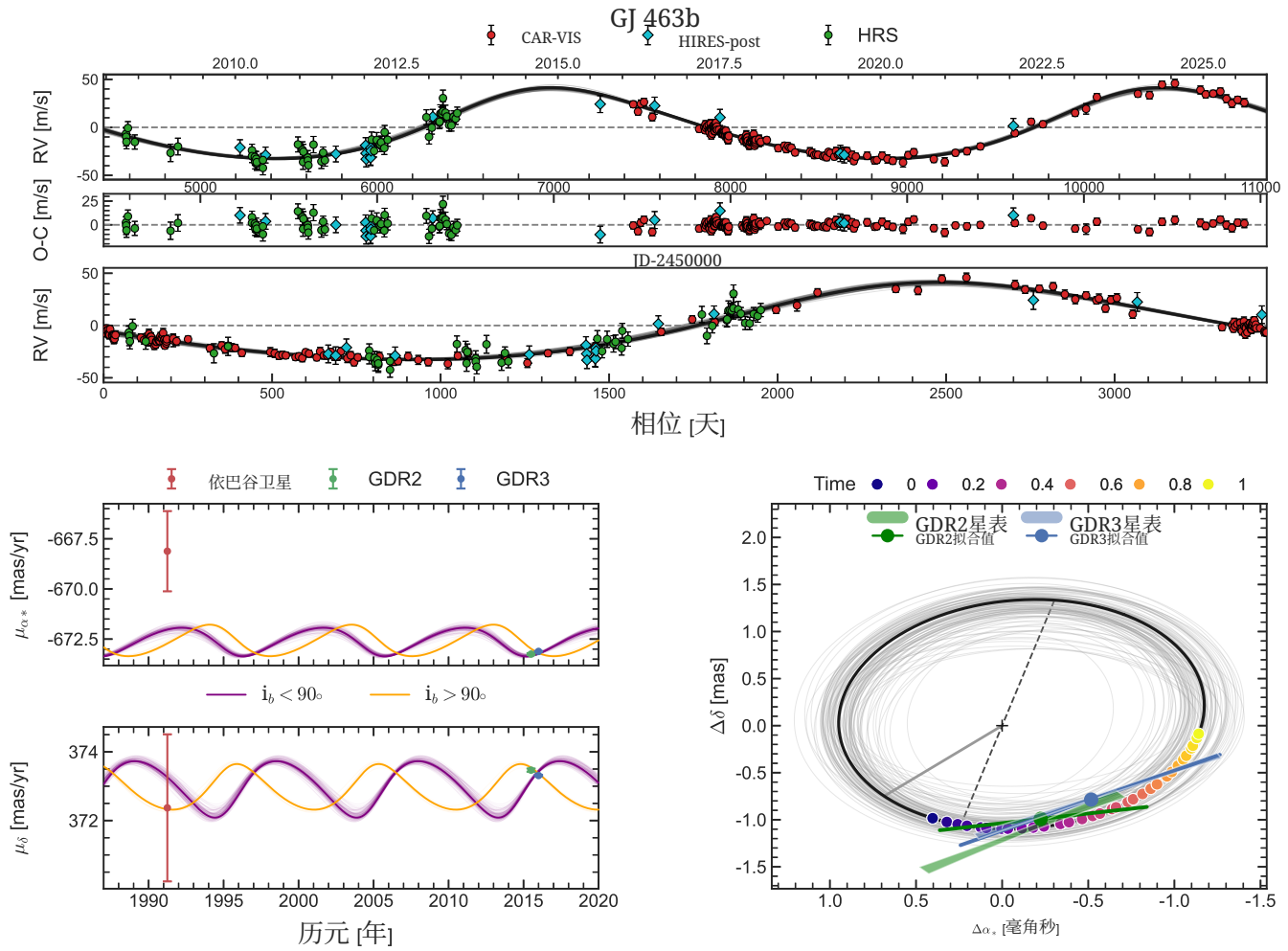

图 A3. 与图 1相同，但针对 GJ 463。

Feng, F.,Butler, R. P., Vogt, S. S., 等. 2022年, 《天体物理学杂志增刊》, 262, 21, doi: 10.3847/1538-4365/ac7e57Feng, Y.K., Wright, J. T., Nelson, B., 等. 2015年, 《天体物理学杂志》, 800, 22, doi: 10.1088/0004-637X/800/1/22Fischer, D. A.,& Valenti, J. 2005年, 《天体物理学杂志》, 622, 1102, doi: 10.1086/428383Foreman-Mackey, D. 2016年, 《开放源代码软件期刊》, 1, 24, doi: 10.21105/joss.00024Forveille,T., Bonfils, X., Lo Curto, G., 等. 2011年, 《天文学与天体物理学》, 526, A141, doi: 10.1051/0004-6361/201016034Fre nsch,Y. G.C., Bouchy, F., Lo Curto, G., 等. 2026年, 《天文学与天体物理学》, 707, A73, doi: 10.1051/0004-6361/202557656Gaia合作组, Brown, A. G. A., Vallenari, A., 等. 2018年, 《天文学与天体物理学》, 616, A1, doi: 10.1051/0004-6361/201833051Gaia合作组, Vallenari, A., Brown, A. G. A., 等. 2023年, 《天文学与天体物理学》, 674, A1, doi: 10.1051/0004-6361/202243940Gaidos, E.,Hirano, T., Kraus, A. L., 等. 2022年, 《皇家天文学会月报》, 512, 583, doi: 10.1093/mnras/stab3069

Gan, T., Theissen, C. A., Wang, S. X., Burgasser, A. J., & Mao, S. 2025, 《天体物理学杂志增刊》, 276, 47, doi: 10.3847/1538-4365/ad9c65Gan, T.,Lin,Z.,Wang, S. X., etal. 2022, 《皇家天文学会月报》, 511,83, doi: 10.1093/mnras/stab3708Gan, T., Wang, S. X., Wang, S., et al. 2023a, 《天文学杂志》, 165, 17, doi: 10.3847/1538-3881/ac9b12Gan, T., Cadieux, C., Jaha ndar, F., et al. 2023b, 《天文学杂志》, 166, 165, doi: 10.3847/1538-3881/acf56dGan, T., L'Heureux, A., Cadieux, C., et al. 2026年, 《天体物理学杂志快报》, 1006, L63, doi:10.3847/2041-8213/ae8af1Glusman, R. I., Cañas, C. I., Kanodia, S., et al. 2026年, 《天文学杂志》, 171, 146, doi:10.3847/1538-3881/ae2fbbGolovin, A., Reffert, S., Just, A., et al. 2023a, 《天文学与天体物理学》, 670, A19, doi: 10.1051/0004-6361/202244250Gorrini, P., Astudillo-Defru, N., Dreizler, S., et al. 2022, 《天文学与天体物理学》, 664, A64, doi: 10.1051/0004-6361/202243063Gould, A., & Loeb, A. 1992, 《天体物理学杂志》, 396, 104, doi: 10.1086/171700

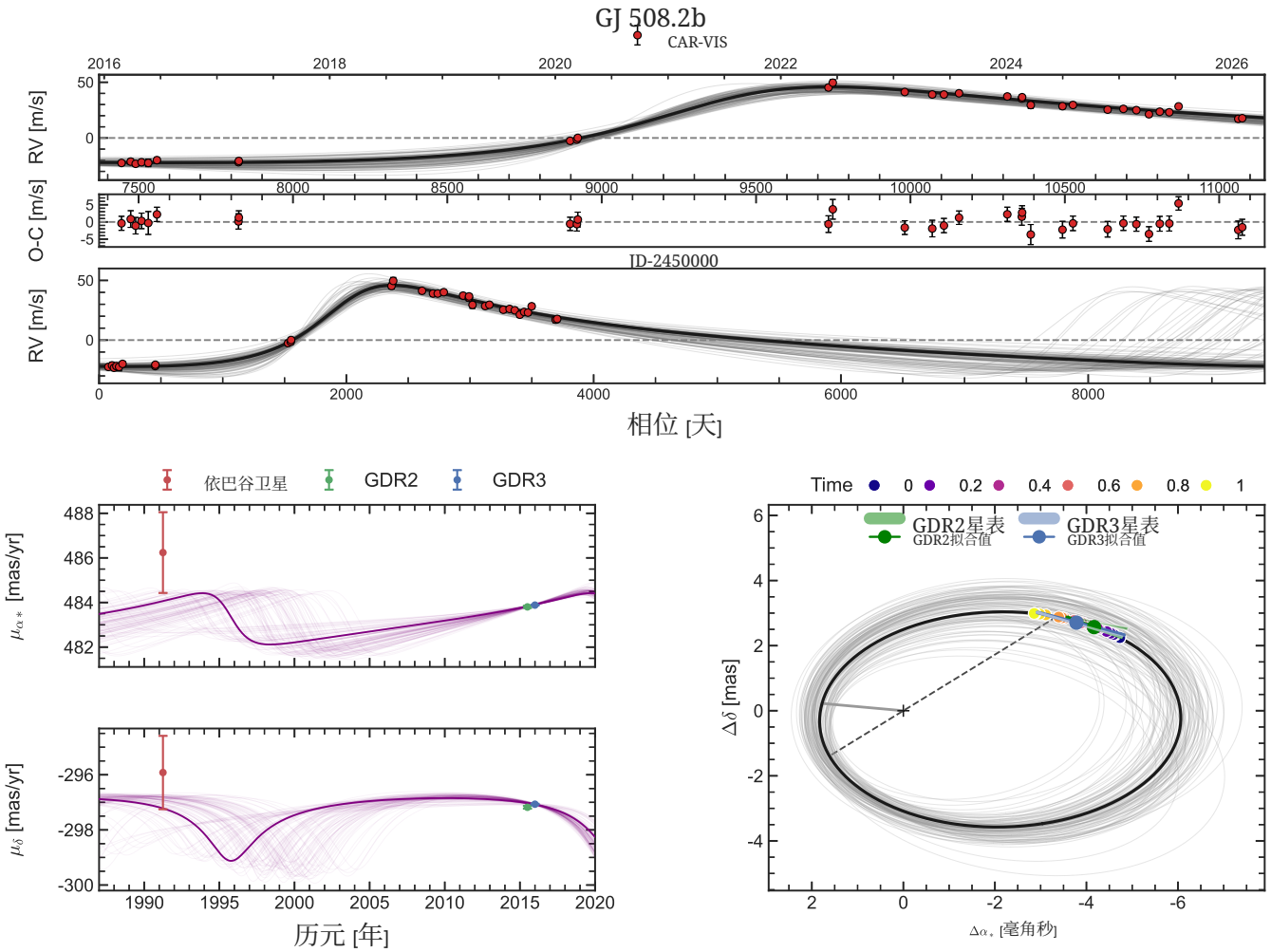

图 A4。 与图 1相同，但对应 GJ 508.2。

Griest, K., & Safizadeh, N. 1998年, 《天体物理学杂志》, 500, 37, doi: 10.1086/305729Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., et al. 2020年, 《自然》, 585, 357, doi: 10.1038/s41586-020-2649-2Hartman, J. D., Bakos, G. Á., Csubry, Z., et al. 2023, 《天文学杂志》, 166, 163, doi:10.3847/1538-3881/acf56eHartman, J. D., Bayliss, D., Brahm, R., et al. 2024年, 《天文学杂志》, 168, 202, doi:10.3847/1538-3881/ad6f07Hatzes, A. P., & Rauer, H. 2015, 《天体物理学杂志快报》, 810, L25, doi: 10.1088/2041-8205/810/2/L25Henry, T. J., Jao, W.-C., Winters, J. G., et al. 2018年, 《天文学杂志》, 155, 265, doi:10.3847/1538-3881/aac262Hotnisky, A., Kanodia, S., Libby-Roberts, J., et al. 2024年, arXiv 预印本, arXiv:2411.08159, doi: 10.48550/arXiv.2411.08159Howard, A. W., Johnson, J. A., Marcy, G. W., et al. 2010年, 《天体物理学杂志》, 721, 1467, doi: 10.1088/0004-637X/721/2/1467Hunter,J. D. 2007年, Computing in Science &Engineering, 9, 90, doi: 10.1109/MCSE.2007.55

Ida, S., & Lin, D. N. C. 2004年, 《天体物理学杂志》, 616, 567, doi: 10.1086/424830—. 2005年, 《天体物理学杂志》, 626, 1045, doi: 10.1086/429953Ireland, M. J., Kraus, A., Martinache, F., Law, N., & Hillenbrand, L. A. 2011年, 《天体物理学杂志》, 726, 113, doi: 10.1088/0004-637X/726/2/113Johnson, J. A., Butler, R. P., Marcy, G. W., 等2007年, 《天体物理学杂志》, 670, 833, doi: 10.1086/521720Johnson, J. A., Howard, A. W., Marcy, G. W., 等2010年, 《太平洋天文学会出版物》, 122, 149, doi: 10.1086/651007Jordán, A., Hartman, J. D., Bayliss, D., 等2022年, 《天文学杂志》, 163, 125, doi: 10.3847/1538-3881/ac4a77Kanodia, S., Gupta, A. F., Cañas, C. I., 等2024年, 《天文学杂志》, 168, 235, doi: 10.3847/1538-3881/ad7796Kennedy, G. M., & Kenyon, S. J. 2008年, 《天体物理学杂志》, 673, 502, doi: 10.1086/524130Kervella, P., Arenou, F., & Thévenin, F. 2022年, 《天文学与天体物理学》, 657, A7, doi: 10.1051/0004-6361/202142146

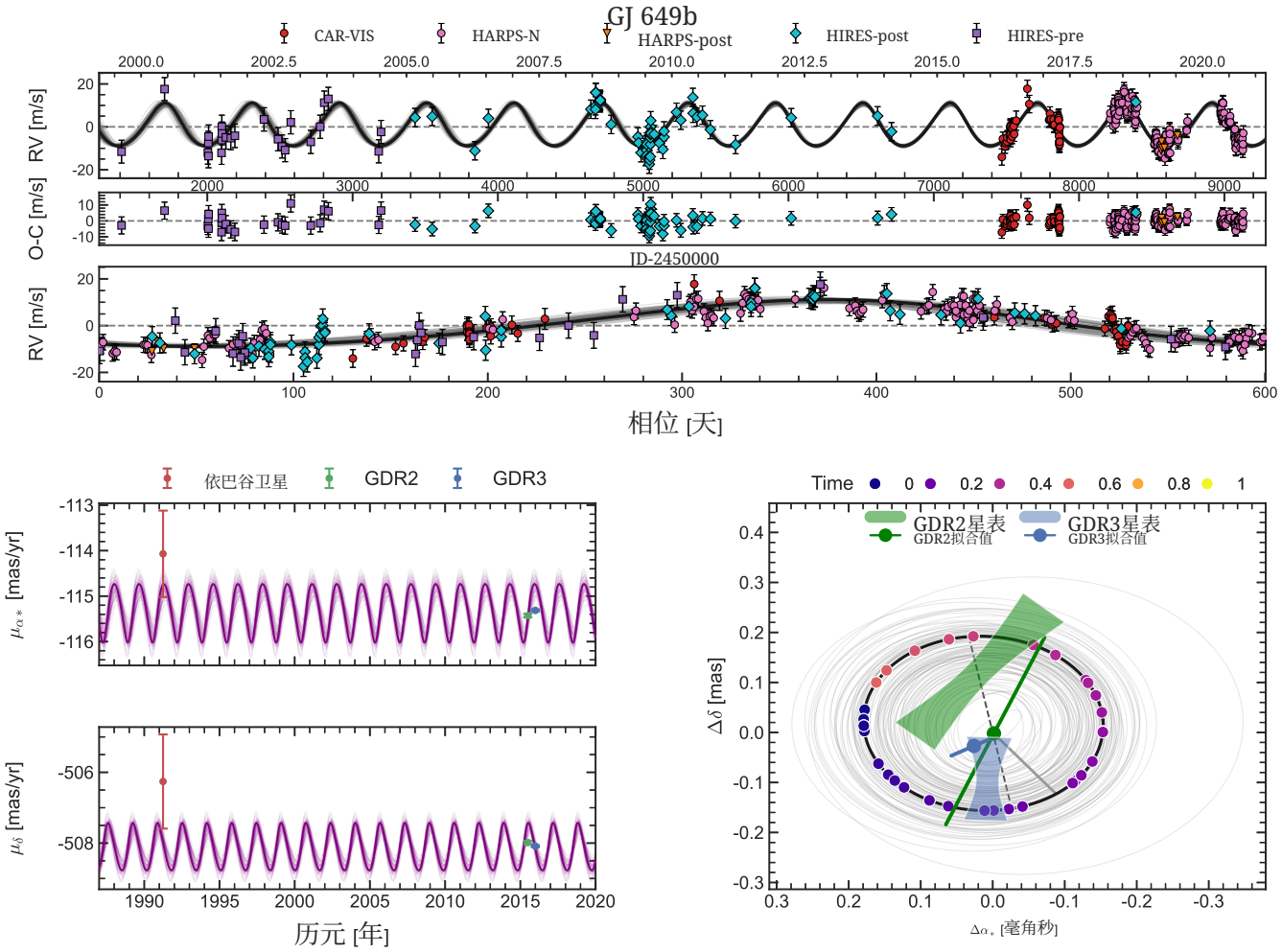

图 A5。 与图 1相同，但对应 GJ 649。

Kiefer, F.2019年，《天文学与天体物理学》，632，L9，doi：10.1051/0004-6361/201936942Kotani, T., Tamura, M., Nishikawa, J., 等。2018年，载于国际光学工程学会（SPIE）会议系列，第10702卷，《地基与机载天文仪器VII》，编者：C. J. Evans、L. Simard 和 H. Takami，1070211，doi：10.1117/12.2311836Lammers, C. 和 Winn, J. N. 2026年，《天文学杂志》，171，18，doi：10.3847/1538-3881/ae21deLaughlin, G.、Bodenheimer, P. 和 Adams, F. C. 2004年，《天体物理学杂志快报》，612，L73，doi：10.1086/424384Li, S. L.、Agnor, C. B. 和 Lin, D. N. C. 2010年，《天体物理学杂志》，720，1161，doi：10.1088/0004-637X/720/2/1161Li, Y.、Brandt, T. D.、Brandt, G. M. 等。2021年，《天文学杂志》，162，266，doi：10.3847/1538-3881/ac27abLindegren, L.、Lammers, U.、Hobbs, D. 等。2012年，《天文学与天体物理学》，538，A78，doi：10.1051/0004-6361/201117905

Liu, B., Lambrechts, M., Johansen, A.，& Liu, F.2019，《天文学与天体物理学》，632，A7，doi：10.1051/0004-6361/201936309Liu, S.-F., Agnor, C. B., Lin, D. N. C.，& Li, S.-L. 2015，《皇家天文学会月报》，446，1685，doi：10.1093/mnras/stu2205Lo Curto, G., Pepe, F., Avila, G. 等，2015，《信使》，162，9 Maldonado, J., Micela, G., Baratella, M.等，2020年，《天文学与天体物理学》，644，A68，doi：10.1051/0004-6361/202039478Manara, C. F., Morbidelli, A.，& Guillot, T. 2018，《天文学与天体物理学》，618，L3，doi：10.1051/0004-6361/201834076Mann, A. W., Feiden, G. A., Gaidos, E., Boyajian, T.，& von Braun, K. 2015，《天体物理学杂志》，804，64，doi：10.1088/0004-637X/804/1/64Mann, A. W., Gaidos, E.，& Ansdell, M. 2013年，《天体物理学杂志》，779，188，doi：10.1088/0004-637X/779/2/188Mann, A. W., Dupuy, T., Kraus, A. L.等，2019年，《天体物理学杂志》，871，63，doi：10.3847/1538-4357/aaf3bcMao, S.，& Paczynski, B. 1991，《天体物理学杂志快报》，374，L37，doi：10.1086/186066

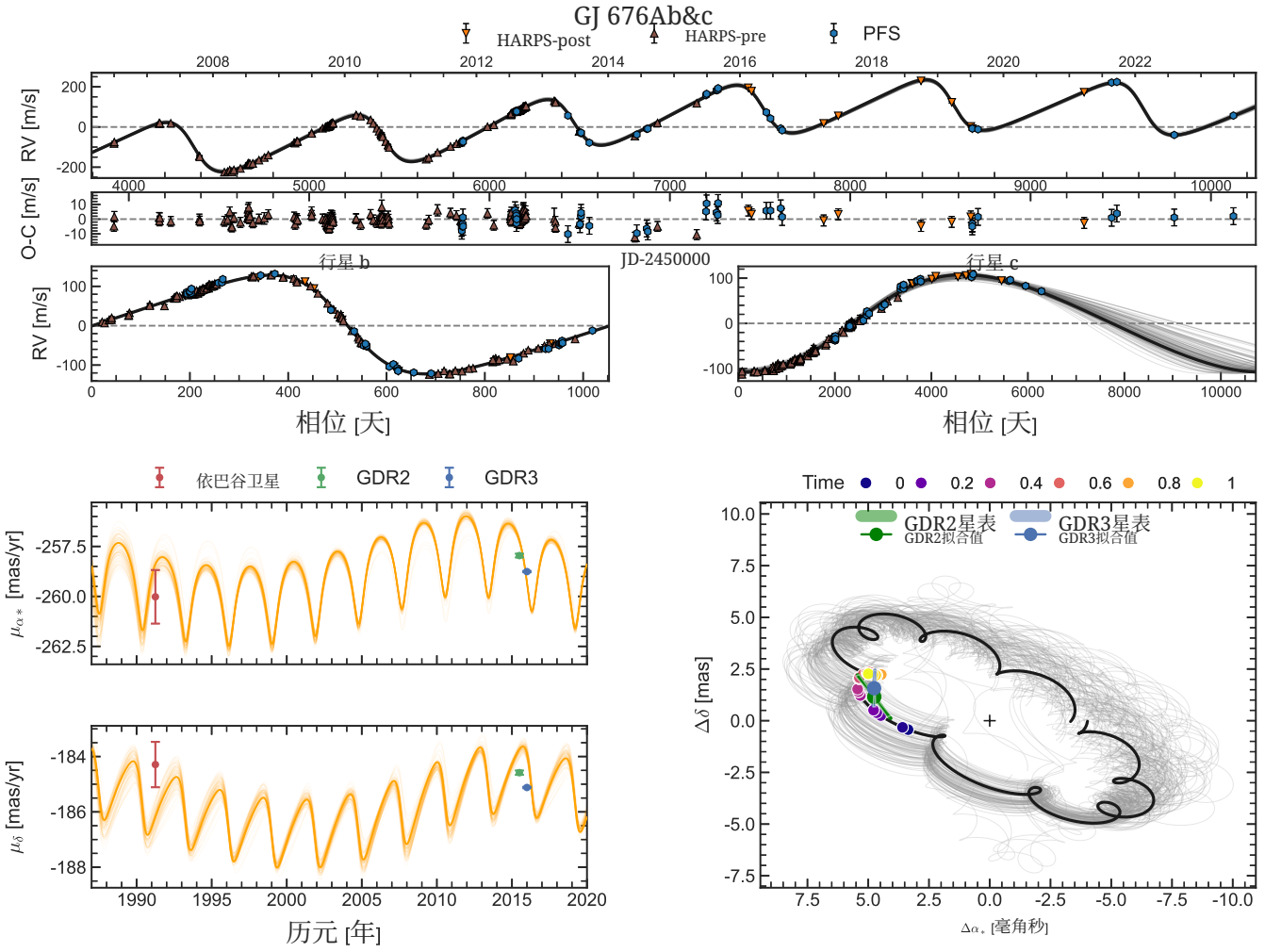

图 A6. 与图 1相同，但针对 GJ 676A。

Mayor, M., Pepe, F., Queloz, D.等, 2003, 《信使》, 114, 20 Montet, B. T., Crepp, J. R., Johnson, J. A., Howard, A. W., & Marcy, G. W. 2014年, 《天体物理学杂志》, 781, 28, doi: 10.1088/0004-637X/781/1/28Morales, J. C., Mustill, A. J., Ribas, I.等, 2019年, 《科学》, 365, 1441, doi: 10.1126/science.aax3198Morales, J. C., Ribas, I., Reffert, S.等, 2025年, 《天文学与天体物理学》, 700, A242, doi: 10.1051/0004-6361/202554992Mordasini, C., Alibert, Y., Benz, W., & Naef, D. 2008, 《太平洋天文学会会议系列》, 第398卷, 《Extreme SolarSystems》, 编者: D. Fischer、F. A. Rasio、S. E. Thorsett和A. Wolszczan, 235, doi: 10.48550/arXiv.0710.5667Muirhead, P. S., Dressing, C. D., Mann, A. W.等, 2018, 《天文学杂志》, 155, 180, doi: 10.3847/1538-3881/aab710Müller, S., Baron, J., Helled, R., Bouchy, F., & Parc, L. 2024年, 《天文学与天体物理学》, 686, A296, doi: 10.1051/0004-6361/202348690

Naoz, S. 2016, 《天文学与天体物理学年度评论》, 54, 441, doi: 10.1146/annurev-astro-081915-023315Naud, M.-E., Artigau, É., Malo, L., et al. 2014, 《天体物理学杂志》, 787, 5, doi:10.1088/0004-637X/787/1/5Pan, M.,Liu, B., Johansen, A., etal. 2024年, 《天文学与天体物理学》, 682, A89, doi: 10.1051/0004-6361/202347664Parc, L., Bouchy, F., Cook, N. J., et al. 2025年, 《天文学与天体物理学》, 702, A138, doi: 10.1051/0004-6361/202555684Pascucci, I., Testi, L., Herczeg, G. J., et al. 2016年, 《天体物理学杂志》, 831, 125, doi: 10.3847/0004-637X/831/2/125Patience, J., King, R. R., De Rosa, R. J., et al. 2012年, 《天文学与天体物理学》, 540, A85, doi:10.1051/0004-6361/201118058Peña, P. A., Jenkins, J. S., Feng, F., et al. 2026年, 《天文学与天体物理学》, 709, A213, doi: 10.1051/0004-6361/202557940Perdelwitz, V., Trifonov, T., Teklu, J. T., Sreenivas, K. R., & Tal-Or, L. 2024年, 《天文学与天体物理学》, 683, A125, doi: 10.1051/0004-6361/202348263

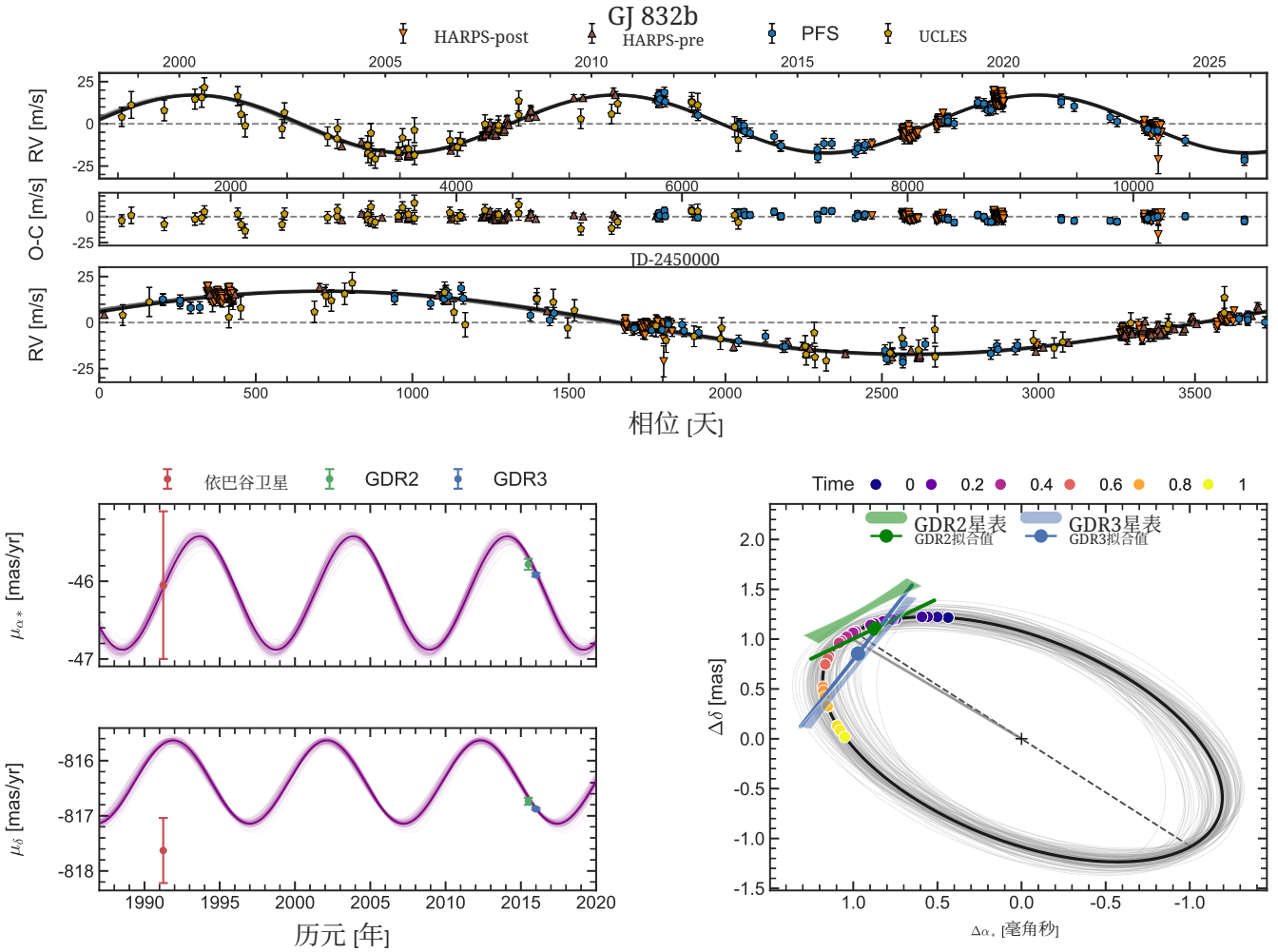

图 A7。 与图 1相同，但针对 GJ 832。

Perruchot, S., Kohler, D., Bouchy, F., et al. 2008, in 国际光学工程学会（SPIE）会议系列, Vol. 7014,《天文学地面与机载仪器 II》, ed. I. S. McLean &M. M. Casali, 70140J, doi: 10.1117/12.787379Perryman, M., Hartman, J., Bakos, G. Á., & Lindegren, L. 2014 年 ,《天体物理学杂志》 , 797, 14, doi: 10.1088/0004-637X/797/1/14Perryman, M. A. C., Lindegren, L., Kovalevsky, J., et al. 1997年,《天文学与天体物理学》, 323, L49 Petigura, E. A.,Marcy, G. W., Winn, J. N., et al. 2018年,《天文学杂志》, 155, 89, doi: 10.3847/1538-3881/aaa54cPhilipot, F., Lagrange, A.-M., Kiefer, F., et al. 2023年,《天文学与天体物理学》, 678, A107, doi:10.1051/0004-6361/202346612Piccinini, G., Petralia, A., Sozzetti, A., et al. 2026年,《天文学与天体物理学》, 707, A104, doi:10.1051/0004-6361/202556735Pinamonti, M., Barbato, D., Sozzetti, A., et al. 2023年,《天文学与天体物理学》, 677, A122, doi:10.1051/0004-6361/202346476Pollack, J. B., Hubickyj, O., Bodenheimer, P., et al. 1996,《伊卡洛斯》, 124, 62, doi: 10.1006/icar.1996.0190

Quirrenbach, A., Amado, P. J., Caballero, J. A., 等. 2014年, 载于《国际光学工程学会（SPIE）会议系列》, 第9147卷《地面与机载天文仪器 V》, 编者：S. K. Ramsay、I. S. McLean 和 H. Takami, 91471F, doi: 10.1117/12.2056453Quirrenbach, A., Passegger, V. M., Trifonov, T., 等. 2022年,《天文学与天体物理学》, 663, A48, doi: 10.1051/0004-6361/202142915Ren, L., Gan, T., Xuan, Y., 等. 2026年, arXiv 预印本, arXiv:2610.16662。https://arxiv.org/abs/2610.16662Ribas, I., Reiners, A., Zechmeister, M., 等. 2023年,《天文学与天体物理学》, 670, A139, doi: 10.1051/0004-6361/202244879Robertson, P., Endl, M., Cochran, W. D., MacQueen, P. J., 和 Boss, A. P. 2013年,《天体物理学杂志》, 774, 147, doi: 10.1088/0004-637X/774/2/147Rosenthal, L. J., Fulton, B. J., Hirsch, L. A., 等. 2021年,《天体物理学杂志增刊》, 255, 8, doi: 10.3847/1538-4365/abe23cSahlmann, J., Lazorenko, P. F., Ségransan, D., 等. 2016年,《天文学与天体物理学》, 595, A77, doi: 10.1051/0004-6361/201628854

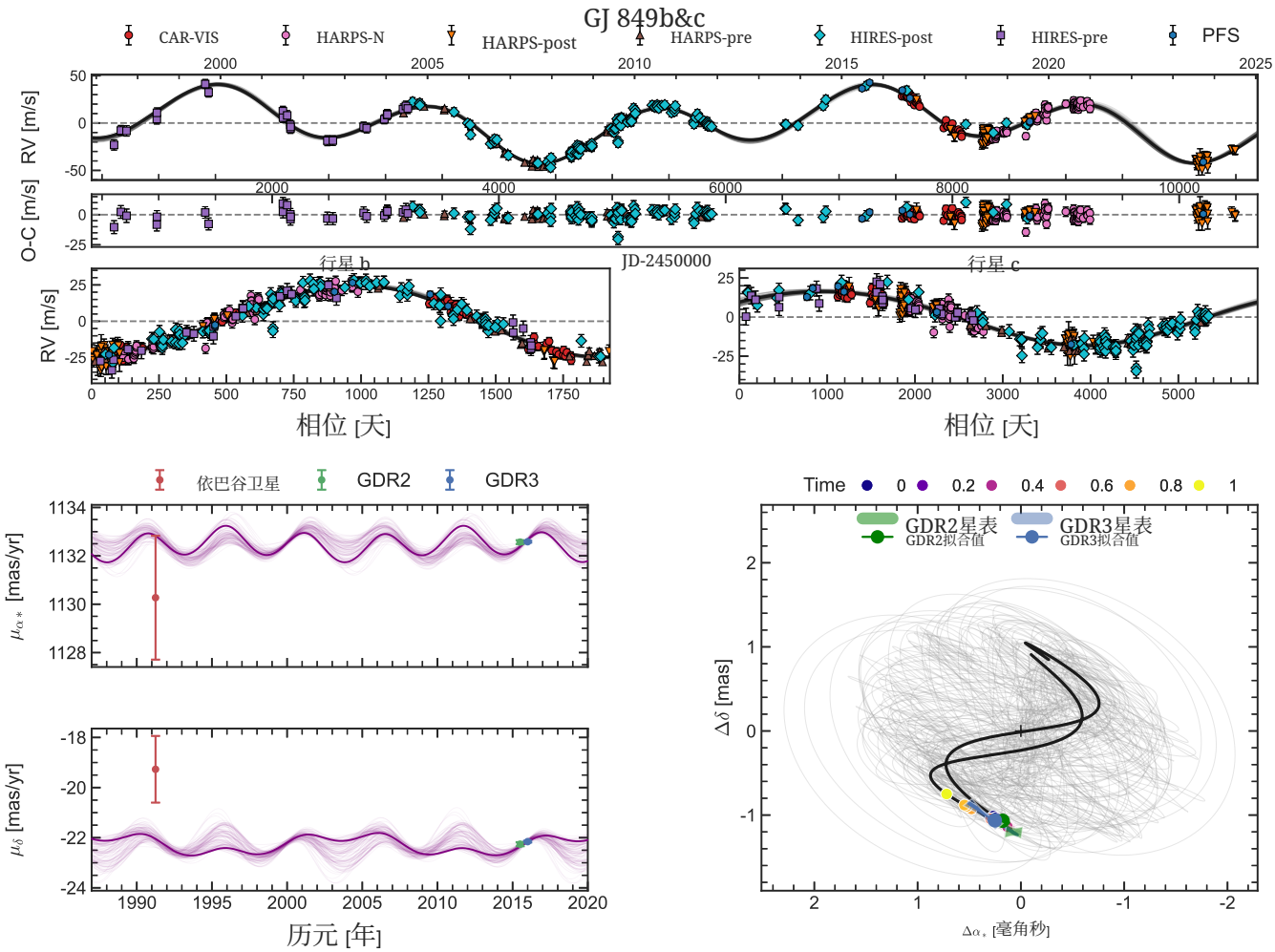

图 A8。 与图 1相同，但针对 GJ 849。

Santos, N. C., Israelian, G., 和 Mayor, M. 2004年，《天文学与天体物理学》，415，1153，doi: 10.1051/0004-6361:20034469Shin, I.-G., Yee, J. C., Zang, W., 等. 2023 年，《天文学杂志》，166，104，doi: 10.3847/1538-3881/ace96d—. 2024年，《天文学杂志》，167，269，doi: 10.3847/1538-3881/ad3ba3—. 2026年，《天文学杂志》，172，192，doi: 10.3847/1538-3881/ae9864Skrutskie, M. F., Cutri, R.M.,Stiening, R., 等. 2006年，《天文学杂志》，131，1163，doi: 10.1086/498708Sousa, S. G., Santos, N. C., Israelian, G., Mayor, M., 和 Udry, S. 2011年，《天文学与天体物理学》，533，A141，doi: 10.1051/0004-6361/201117699Sozzetti, A. 2023年，《天文学与天体物理学》，670，L17，doi: 10.1051/0004-6361/202245454Sozzetti, A., Giacobbe, P., Lattanzi, M. G., 等. 2014年，《皇家天文学会月报》，437，497，doi: 10.1093/mnras/stt1899Stassun, K. G., Oelkers, R. J., Paegert, M., 等. 2019年，《天文学杂志》，158，138，doi: 10.3847/1538-3881/ab3467Teklu, J. T., Perdelwitz, V., Butler, R. P., 等. 2025年，《天文学与天体物理学》，702，A68，doi: 10.1051/0004-6361/202555034

pandas 开发团队。2025年，pandas-dev/pandas: Pandas，v2.3.0，Zenodo，doi: 10.5281/zenodo.3509134Thompson, W., Blakely, D., Xuan, J. W., 等。2026年，《天文学杂志》，172，53，doi: 10.3847/1538-3881/ae64edTrifonov, T., Tal-Or, L., Zechmeister, M., 等。2020年，《天文学与天体物理学》，636，A74，doi: 10.1051/0004-6361/201936686Trifonov, T., Kürster, M., Zechmeister, M., 等。2018年，《天文学与天体物理学》，609，A117，doi: 10.1051/0004-6361/201731442Tull, R. G. 1998年，载于国际光学工程学会（SPIE）会议论文集，第3355卷，《光学天文仪器》，S. D'Odorico 编，387–398，doi: 10.1117/12.316774Tull, R. G., MacQueen, P. J., Sneden, C., & Lambert,D. L. 1995年，《太平洋天文学会出版物》，107，251，doi: 10.1086/133548van der Walt, S., Colbert, S. C., & Varoquaux, G. 2011年，《科学与工程计算》，13，22，doi: 10.1109/MCSE.2011.37van Leeuwen, F. 2007年，《天文学与天体物理学》，474，653，doi: 10.1051/0004-6361:20078357

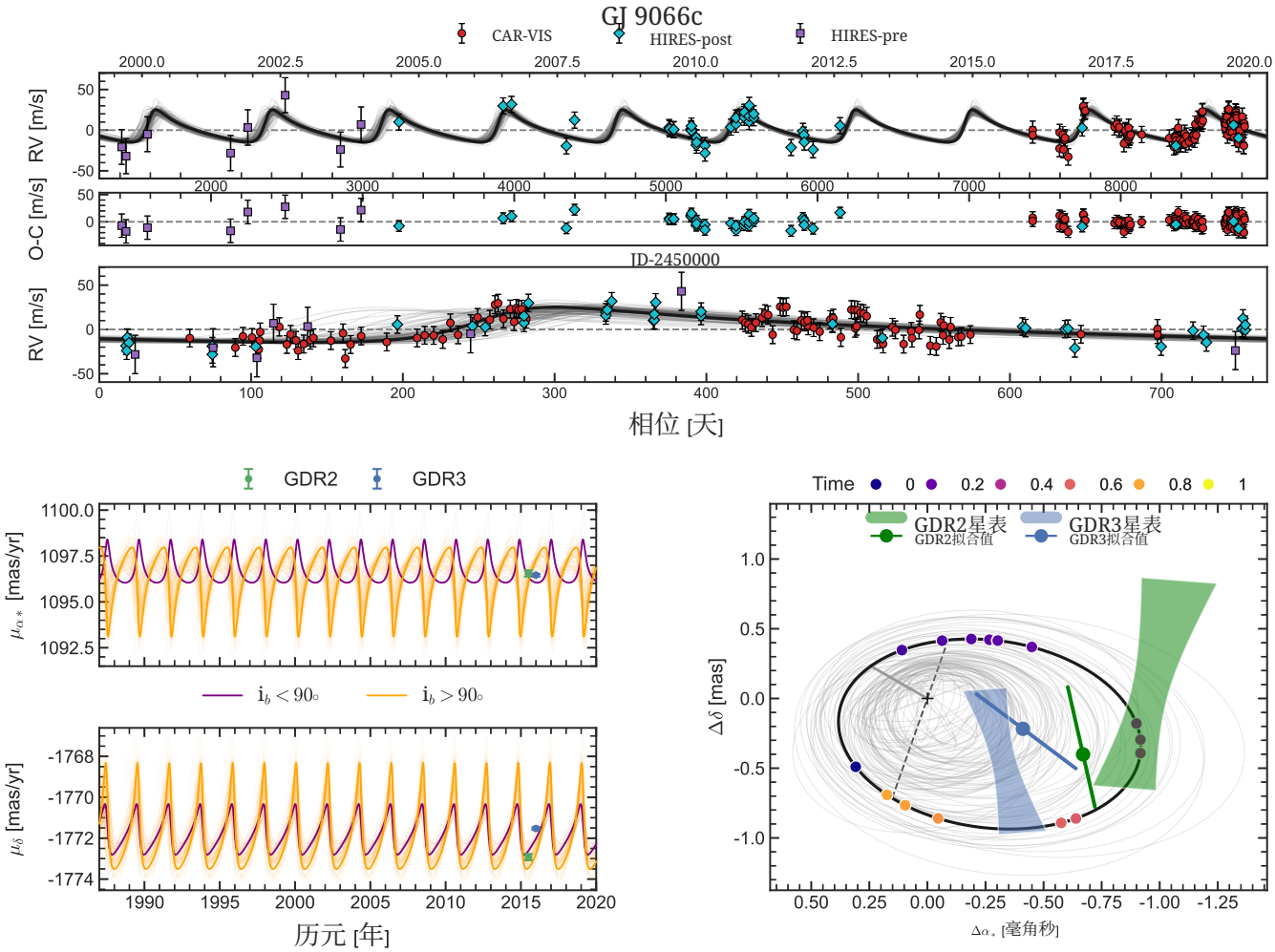

图 A9。 与图 1相同，但对象为 GJ 9066。

Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., 等。2020年，《自然·方法》，17，261，doi：10.1038/s41592-019-0686-2Vogt, S. S., Allen, S. L., Bigelow, B. C., 等。1994年，载于国际光学工程学会（SPIE）会议论文集，第2198卷，《天文学仪器学 VIII》，D. L. Crawford & E.R. Craine 编，362，doi：10.1117/12.176725Vousden, W. D., Farr, W. M., & Mandel, I. 2016年，《皇家天文学会月报》，455，1919，doi：10.1093/mnras/stv2422Walker, S. A. U., Liu, M. C., Mawet, D., 等。2026年，《天文学杂志》，171，80，doi：10.3847/1538-3881/ae267fWittenmyer, R. A., Tuomi, M., Butler, R. P., 等。2014年，《天体物理学杂志》，791，114，doi：10.1088/0004-637X/791/2/114Wu, Y., Xiao, G.-Y., Butler, R. P., 等。2026年，《天文学杂志》，171，189，doi：10.3847/1538-3881/ae40f5

Xiao, G.-Y., Feng, F., Wang, S., 等。2026a，《天体物理学杂志》，998，155，doi：10.3847/1538-4357/ae314cXiao, G.-Y., Teng, H.-Y., Huang, X., 等。2026b，《天体物理学杂志快报》，1009，L6，doi：10.3847/2041-8213/aea15eXiao, G.-Y., Liu, Y.-J., Teng, H.-Y., 等。2023，《天文学与天体物理学研究》，23，055022，doi：10.1088/1674-4527/accb7eXiao, G.-Y., Feng, F., Shectman, S. A., 等。2024，《皇家天文学会月报》，534，2858，doi：10.1093/mnras/stae2151Zechmeister, M., Reiners, A., Amado, P. J., 等。2018年，《天文学与天体物理学》，609，A12，doi：10.1051/0004-6361/201731483Zhang, Z., Liu, M. C., Claytor, Z. R., 等。2021年，《天体物理学杂志快报》，916，L11，doi：10.3847/2041-8213/ac1123Zhao, X., Wang, S., Xiao, G.-Y., 等。2026年，arXiv 预印本，arXiv:2611.14998，doi：10.48550/arXiv.2611.14998Zhou, G., Huang, C. X., Bakos, G. Á., 等。2019年，《天文学杂志》，158，141，doi：10.3847/1538-3881/ab36b5

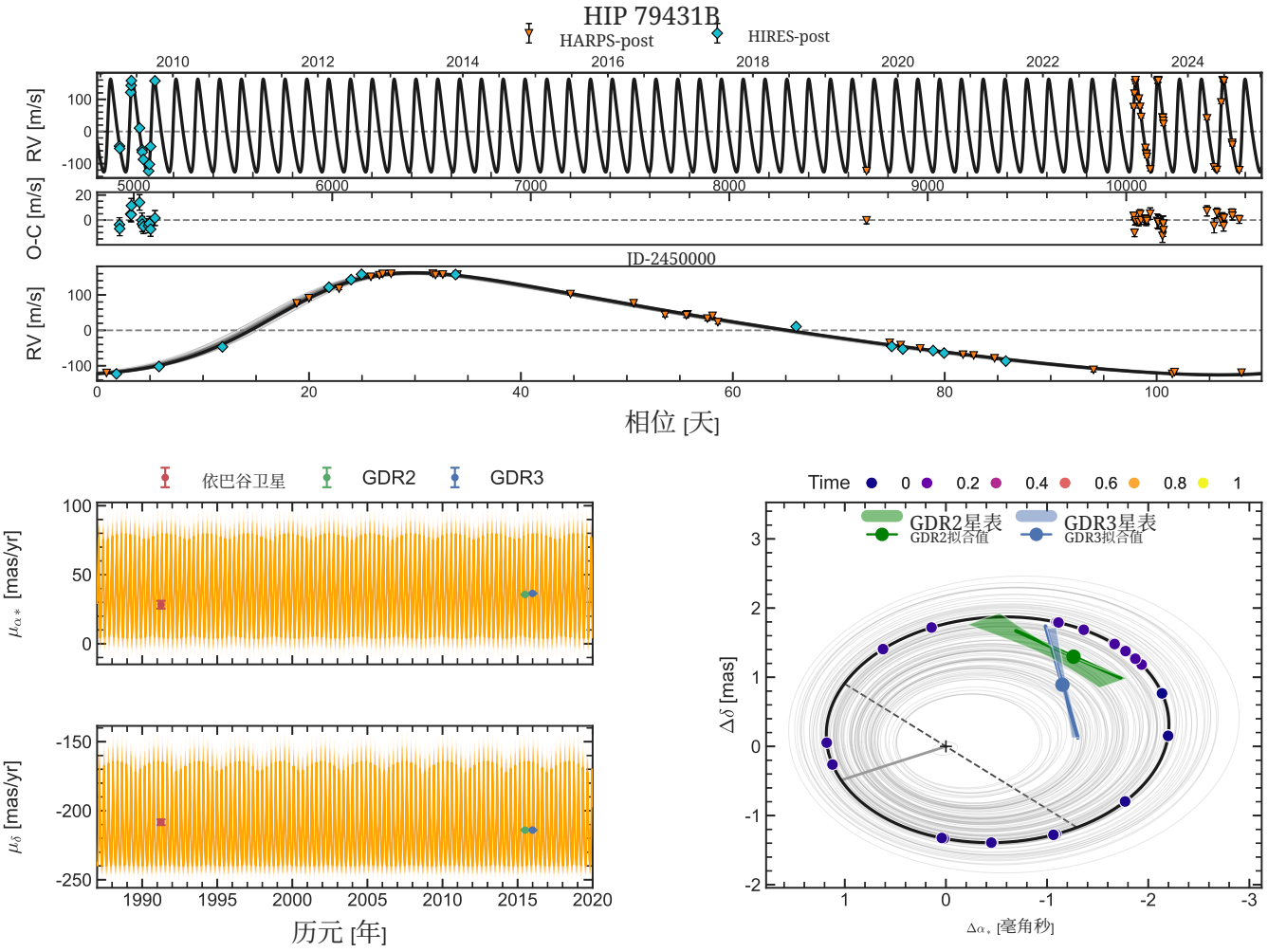

图 A10. 与图 1 相同，但对象为 HIP 79431。

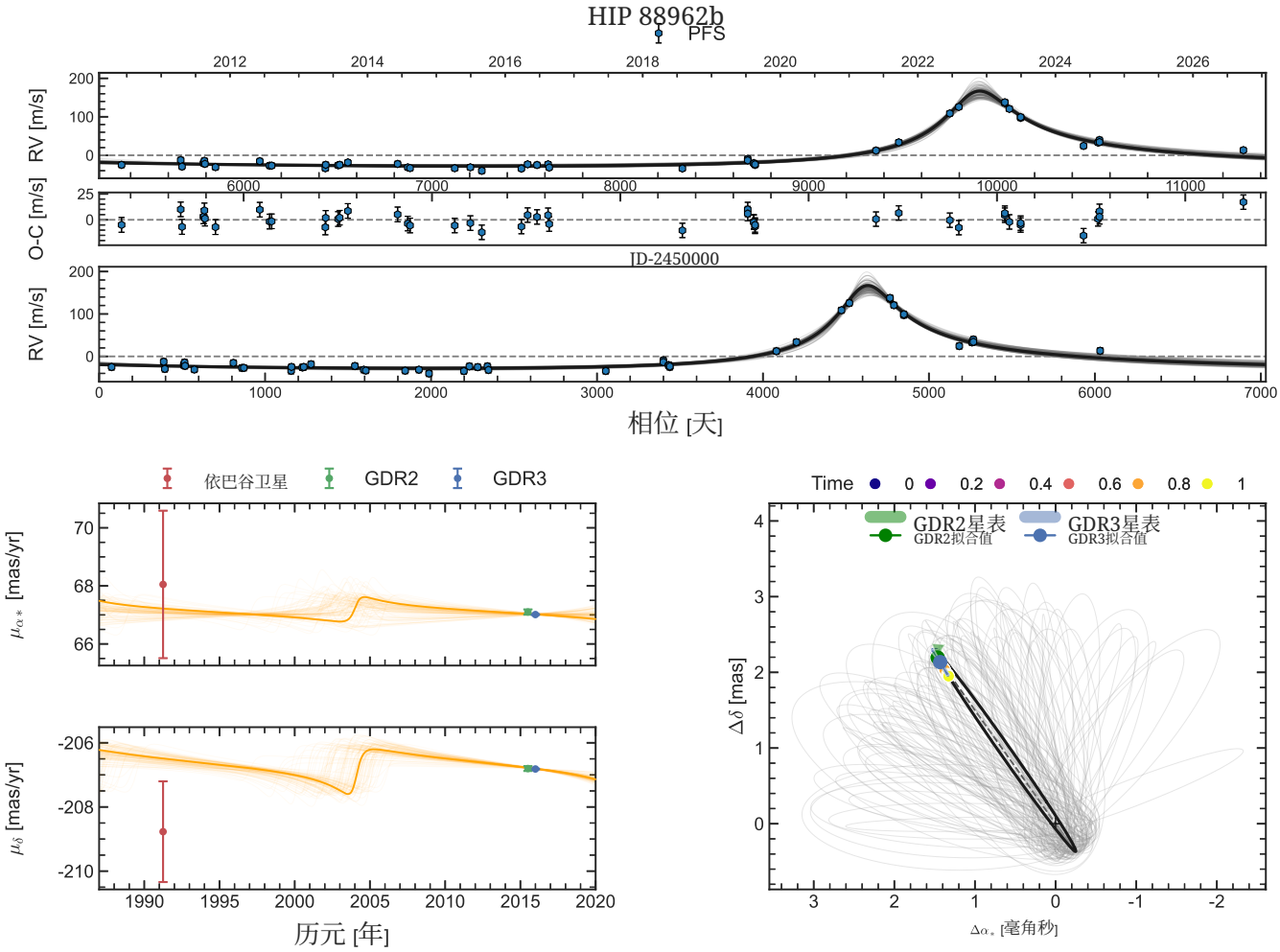

图 A11. 与图1 相同，但对应 HIP 88962。

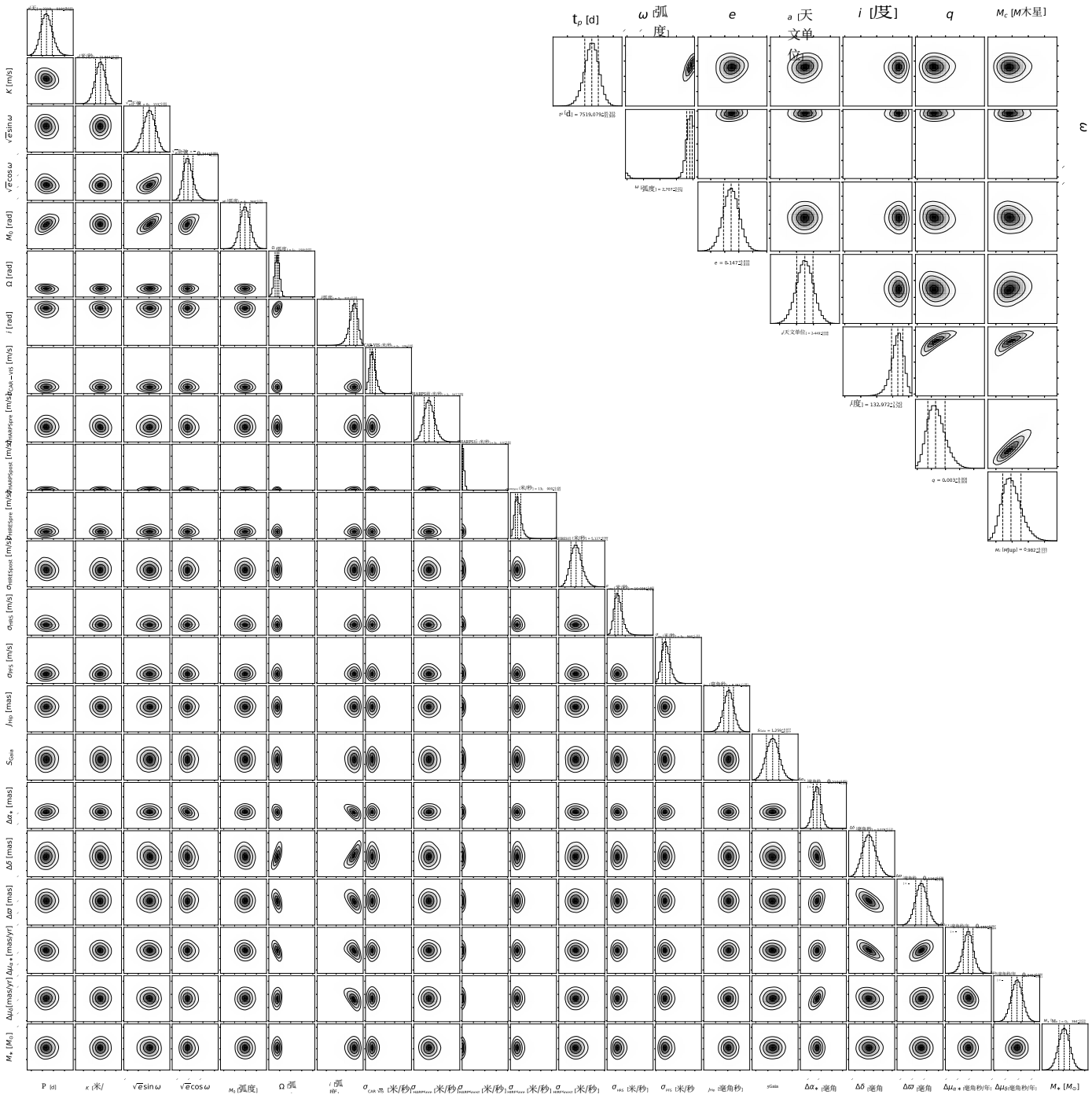

图 B1. GJ 179 系统视向速度与天体测量联合拟合所得的拟合参数（左下）和导出参数（右上）的后验分布。 t_p 的值相对于儒略日 2,450,000。完整图组（12 幅图）可在线期刊中查看。

表 C1. 所有具有稳健轨道解的系统的最佳拟合参数和导出参数

参数	GJ 179	GJ 317 ($i_b < 90°$)	GJ 317 ($i_b > 90°$)	GJ 328	GJ 463 ($i_b < 90°$)	GJ 463 ($i_b > 90°$)	GJ 508.2	GJ 649
拟合参数								
P_b (天)	$2318.5^{+26.3}_{-23.9}$	$695.0^{+0.5}_{-0.2}$	$695.0^{+0.3}_{-0.3}$	$3766.8^{+17.6}_{-17.7}$	$3464.6^{+21.8}_{-20.9}$	$3463.6^{+20.8}_{-19.5}$	$8591.8^{+1333.3}_{-1259.4}$	$600.3^{+1.5}_{-1.5}$
K_b (m s^{-1})	$21.9^{+0.7}_{-0.7}$	$71.5^{+0.5}_{-0.6}$	$71.6^{+0.6}_{-0.6}$	$40.9^{+1.7}_{-1.7}$	$36.6^{+0.8}_{-0.7}$	$36.6^{+0.7}_{-0.7}$	$34.3^{+1.4}_{-1.0}$	$9.8^{+0.3}_{-0.3}$
$\sqrt{e_b}\sin\omega_b$	$0.15^{+0.08}_{-0.09}$	$-0.01^{+0.01}_{-0.02}$	$-0.00^{+0.01}_{-0.02}$	$-0.42^{+0.03}_{-0.03}$	$-0.20^{+0.04}_{-0.04}$	$-0.20^{+0.04}_{-0.04}$	$-0.57^{+0.05}_{-0.05}$	$0.19^{+0.07}_{-0.09}$
$\sqrt{e_b}\cos\omega_b$	$-0.34^{+0.07}_{-0.05}$	$0.28^{+0.01}_{-0.02}$	$0.28^{+0.01}_{-0.01}$	$0.21^{+0.05}_{-0.05}$	$0.31^{+0.02}_{-0.03}$	$0.31^{+0.02}_{-0.03}$	$0.44^{+0.07}_{-0.09}$	$0.27^{+0.08}_{-0.11}$
$M_{0,b}$ (弧度)	$1.13^{+0.26}_{-0.24}$	$0.06^{+0.06}_{-0.05}$	$0.04^{+0.06}_{-0.03}$	$5.52^{+0.09}_{-0.09}$	$0.35^{+0.16}_{-0.15}$	$0.35^{+0.16}_{-0.15}$	$5.25^{+0.12}_{-0.15}$	$1.83^{+0.28}_{-0.36}$
Ω_b (弧度)	$1.16^{+0.24}_{-0.28}$	$1.82^{+0.14}_{-0.20}$	$4.38^{+0.39}_{-0.34}$	$3.63^{+0.34}_{-0.67}$	$2.90^{+0.09}_{-0.09}$	$1.50^{+0.11}_{-0.10}$	$2.39^{+0.17}_{-0.21}$	$3.21^{+0.25}_{-0.32}$
i_b (弧度)	$2.32^{+0.14}_{-0.17}$	$0.66^{+0.18}_{-0.12}$	$2.28^{+0.13}_{-0.18}$	$1.69^{+0.23}_{-0.27}$	$0.54^{+0.06}_{-0.05}$	$2.54^{+0.05}_{-0.07}$	$0.34^{+0.06}_{-0.04}$	$0.32^{+0.13}_{-0.07}$
P_c (天)	–	$6656.7^{+181.0}_{-170.4}$	$6777.2^{+182.8}_{-171.2}$	–	–	–	–	–
K_c (m s^{-1})	–	$30.1^{+0.8}_{-0.7}$	$30.3^{+0.7}_{-0.7}$	–	–	–	–	–
$\sqrt{e_c}$正弦ω_c	–	$0.40^{+0.02}_{-0.02}$	$0.41^{+0.02}_{-0.02}$	–	–	–	–	–
$\sqrt{e_c}$余弦ω_c	–	$-0.07^{+0.08}_{-0.05}$	$-0.08^{+0.06}_{-0.05}$	–	–	–	–	–
$M_{0,\ c}$ (弧度)	–	$1.49^{+0.17}_{-0.15}$	$1.44^{+0.14}_{-0.13}$	–	–	–	–	–
Ω_c (弧度)	–	$3.97^{+1.27}_{-3.45}$	$2.44^{+2.82}_{-1.66}$	–	–	–	–	–
i_c (弧度)	–	$1.44^{+0.82}_{-0.66}$	$1.60^{+0.63}_{-0.63}$	–	–	–	–	–
$\sigma_{\rm CAR-VIS}$ (米 秒$^{-1}$)	$2.13^{+0.95}_{-0.69}$	$2.85^{+0.26}_{-0.50}$	$2.51^{+0.50}_{-0.42}$	–	$0.37^{+0.40}_{-0.26}$	$0.39^{+0.38}_{-0.28}$	$1.67^{+0.42}_{-0.37}$	$2.78^{+0.41}_{-0.35}$
$\sigma_{\rm HARPS-N}$ (米 秒$^{-1}$)	–	–	–	$3.15^{+0.24}_{-0.21}$	–	–	–	$3.10^{+0.20}_{-0.19}$
$\sigma_{\rm HARPS-pre}$ (米 秒$^{-1}$)	$2.55^{+0.89}_{-0.80}$	$4.18^{+0.55}_{-0.26}$	$4.21^{+0.42}_{-0.39}$	–	–	–	–	–
$\sigma_{\rm HARPS-post}$ (米 秒$^{-1}$)	$5.12^{+8.44}_{-3.70}$	$0.82^{+0.88}_{-0.43}$	$0.81^{+0.80}_{-0.56}$	$14.11^{+4.29}_{-2.86}$	–	–	–	$2.47^{+1.82}_{-0.90}$
$\sigma_{\rm HIRES-pre}$ (米 秒$^{-1}$)	$13.00^{+4.44}_{-3.07}$	$10.82^{+8.98}_{-4.38}$	$11.15^{+7.99}_{-4.74}$	–	–	–	–	$4.94^{+0.97}_{-0.75}$
$\sigma_{\rm HIRES-post}$ (米 秒$^{-1}$)	$5.13^{+0.58}_{-0.52}$	$4.91^{+0.78}_{-0.57}$	$4.91^{+0.68}_{-0.58}$	$3.87^{+6.15}_{-2.70}$	$7.97^{+2.19}_{-1.69}$	$7.86^{+2.25}_{-1.68}$	–	$4.29^{+0.48}_{-0.41}$
$\sigma_{\rm HRS}$ (米 秒$^{-1}$)	$10.04^{+3.50}_{-2.63}$	–	–	$1.84^{+1.48}_{-1.26}$	$1.50^{+1.45}_{-1.04}$	$1.41^{+1.45}_{-0.98}$	–	–
$\sigma_{\rm PFS}$ (米 秒$^{-1}$)	$5.95^{+1.36}_{-1.06}$	$4.63^{+0.64}_{-0.65}$	$4.56^{+0.97}_{-0.82}$	–	–	–	–	–
$\sigma_{\rm SOPHIE}$ (米 秒$^{-1}$)	–	–	–	$11.53^{+1.73}_{-1.43}$	–	–	–	–
$\sigma_{\rm Tull}$ (米 秒$^{-1}$)	–	–	–	$5.29^{+2.57}_{-2.38}$	–	–	–	–
$\sigma_{\rm UCLES}$ (米 秒$^{-1}$)	–	–	–	–	–	–	–	–
$J_{\rm hip}$ (毫角秒)	$8.29^{+1.59}_{-1.60}$	–	–	$1.20^{+1.21}_{-0.84}$	$6.09^{+1.78}_{-2.04}$	$6.30^{+1.65}_{-2.05}$	$4.92^{+1.33}_{-1.59}$	$5.27^{+0.81}_{-0.78}$
$S_{\rm gaia}$	$1.26^{+0.08}_{-0.08}$	$1.39^{+0.06}_{-0.09}$	$1.34^{+0.08}_{-0.07}$	$1.92^{+0.05}_{-0.06}$	$1.49^{+0.07}_{-0.07}$	$1.50^{+0.07}_{-0.07}$	$1.26^{+0.08}_{-0.08}$	$1.21^{+0.08}_{-0.08}$
$\Delta\alpha*$ (毫角秒)	$-0.21^{+0.05}_{-0.05}$	$0.76^{+0.61}_{-1.71}$	$-0.34^{+1.20}_{-0.69}$	$0.36^{+0.18}_{-0.46}$	$-0.53^{+0.10}_{-0.10}$	$0.52^{+0.08}_{-0.08}$	$-3.88^{+0.34}_{-0.35}$	$0.01^{+0.02}_{-0.02}$
$\Delta\delta$ (毫角秒)	$0.08^{+0.11}_{-0.10}$	$-0.34^{+1.39}_{-0.67}$	$0.03^{+1.21}_{-0.95}$	$0.51^{+0.08}_{-0.14}$	$-0.74^{+0.09}_{-0.09}$	$0.70^{+0.10}_{-0.10}$	$2.79^{+0.44}_{-0.57}$	$-0.10^{+0.02}_{-0.02}$
$\Delta\varpi$ (毫角秒)	$-0.12^{+0.04}_{-0.04}$	$-0.00^{+0.04}_{-0.07}$	$0.10^{+0.05}_{-0.05}$	$0.01^{+0.03}_{-0.03}$	$-0.01^{+0.03}_{-0.03}$	$-0.05^{+0.02}_{-0.02}$	$0.03^{+0.02}_{-0.02}$	$-0.04^{+0.02}_{-0.02}$
$\Delta\mu_{\alpha*}$ (毫角秒 年$^{-1}$)	$-0.20^{+0.06}_{-0.07}$	$0.09^{+0.20}_{-0.25}$	$-0.10^{+0.24}_{-0.21}$	$-0.02^{+0.10}_{-0.07}$	$-0.54^{+0.06}_{-0.06}$	$-0.47^{+0.06}_{-0.06}$	$0.78^{+0.09}_{-0.12}$	$-0.00^{+0.02}_{-0.02}$
$\Delta\mu_{\delta}$ (毫角秒 年$^{-1}$)	$-0.34^{+0.06}_{-0.06}$	$-0.02^{+0.38}_{-0.21}$	$-0.10^{+0.24}_{-0.19}$	$0.01^{+0.05}_{-0.04}$	$0.28^{+0.06}_{-0.06}$	$0.38^{+0.06}_{-0.07}$	$0.36^{+0.10}_{-0.06}$	$0.06^{+0.03}_{-0.03}$
导出参数								
i_b (度)	$133.0^{+7.8}_{-9.9}$	$37.8^{+10.3}_{-6.9}$	$130.7^{+7.4}_{-10.1}$	$96.9^{+13.0}_{-15.3}$	$31.1^{+3.2}_{-2.7}$	$145.8^{+3.0}_{-3.7}$	$19.2^{+3.4}_{-2.0}$	$18.4^{+7.4}_{-4.0}$
m_b ($M_{\rm Jup}$)	$0.98^{+0.16}_{-0.13}$	$2.85^{+0.51}_{-0.48}$	$2.32^{+0.33}_{-0.28}$	$2.31^{+0.15}_{-0.13}$	$3.18^{+0.28}_{-0.27}$	$2.92^{+0.25}_{-0.26}$	$5.83^{+1.13}_{-1.09}$	$0.83^{+0.22}_{-0.21}$
q_b	$0.0026^{+0.0004}_{-0.0003}$	$0.0065^{+0.0014}_{-0.0011}$	$0.0052^{+0.0007}_{-0.0006}$	$0.0035^{+0.0002}_{-0.0002}$	$0.0064^{+0.0005}_{-0.0005}$	$0.0059^{+0.0005}_{-0.0005}$	$0.0105^{+0.0015}_{-0.0015}$	$0.0016^{+0.0004}_{-0.0004}$
a_b (天文单位)	$2.45^{+0.05}_{-0.05}$	$1.16^{+0.01}_{-0.03}$	$1.15^{+0.02}_{-0.02}$	$4.06^{+0.04}_{-0.04}$	$3.50^{+0.05}_{-0.05}$	$3.50^{+0.05}_{-0.05}$	$6.66^{+0.87}_{-0.82}$	$1.12^{+0.01}_{-0.01}$
e_b	$0.147^{+0.033}_{-0.033}$	$0.078^{+0.007}_{-0.009}$	$0.079^{+0.008}_{-0.008}$	$0.228^{+0.015}_{-0.015}$	$0.138^{+0.016}_{-0.016}$	$0.138^{+0.016}_{-0.016}$	$0.530^{+0.050}_{-0.059}$	$0.118^{+0.040}_{-0.040}$
ω_b (弧度)	$2.71^{+0.22}_{-0.28}$	$-0.03^{+0.04}_{-0.06}$	$-0.01^{+0.03}_{-0.06}$	$-1.10^{+0.11}_{-0.12}$	$-0.58^{+0.11}_{-0.10}$	$-0.57^{+0.11}_{-0.11}$	$-0.92^{+0.11}_{-0.13}$	$0.61^{+0.39}_{-0.29}$
$T_{p,\ b} - 2450000$ (儒略日)	$7519.1^{+85.9}_{-92.3}$	$7930.4^{+5.2}_{-7.0}$	$7932.3^{+3.4}_{-6.7}$	$4627.9^{+57.7}_{-60.8}$	$6737.9^{+63.8}_{-62.0}$	$6740.9^{+65.2}_{-64.3}$	$762.8^{+1213.4}_{-1301.1}$	$7762.2^{+35.0}_{-27.1}$
i_c (度)	–	$82.2^{+46.7}_{-38.0}$ [1]	$91.7^{+36.0}_{-36.0}$ [1]	–	–	–	–	–
m_c ($M_{\rm Jup}$)	–	$1.91^{+0.45}_{-0.31}$	$1.75^{+0.55}_{-0.17}$	–	–	–	–	–
q_c	–	$0.0044^{+0.0011}_{-0.0008}$	$0.0040^{+0.0012}_{-0.0004}$	–	–	–	–	–
a_c (天文单位)	–	$5.22^{+0.14}_{-0.19}$	$5.28^{+0.12}_{-0.12}$	–	–	–	–	–
e_c	–	$0.170^{+0.016}_{-0.016}$	$0.176^{+0.016}_{-0.015}$	–	–	–	–	–
ω_c (弧度)	–	$1.74^{+0.13}_{-0.19}$	$1.76^{+0.13}_{-0.13}$	–	–	–	–	–
$T_{p,\ c} - 2450000$ (儒略日)	–	$6361.9^{+124.3}_{-157.0}$	$6388.5^{+118.3}_{-116.7}$	–	–	–	–	–

[1] GJ 317c 的倾角上下不确定度均高于 30° 因此，根据我们在第 5 节中的定义，其轨道解并不稳健。

表 C1. （续）

参数	GJ 676A	GJ 832	GJ 849	GJ 9066 ($i_c < 90°$)	GJ 9066 ($i_c > 90°$)	HIP 79431	HIP 88962
			拟合参数				
P_b (天)	$1052.9^{+0.6}_{-0.6}$	$3736.7^{+13.1}_{-13.2}$	$1921.6^{+4.3}_{-4.3}$	–	–	$109.919^{+0.008}_{-0.008}$	$7054.9^{+693.3}_{-482.3}$
K_b (米 秒$^{-1}$)	$125.4^{+0.6}_{-0.6}$	$17.2^{+0.3}_{-0.3}$	$24.8^{+0.3}_{-0.4}$	–	–	$143.8^{+1.4}_{-1.3}$	$94.9^{+5.2}_{-4.3}$
$\sqrt{e_b}$正弦ω_b	$0.561^{+0.003}_{-0.004}$	$-0.01^{+0.09}_{-0.09}$	$0.21^{+0.03}_{-0.03}$	–	–	$-0.53^{+0.01}_{-0.01}$	$-0.17^{+0.03}_{-0.03}$
$\sqrt{e_b}$余弦ω_b	$0.04^{+0.01}_{-0.01}$	$-0.06^{+0.11}_{-0.06}$	$-0.05^{+0.04}_{-0.04}$	–	–	$0.22^{+0.01}_{-0.01}$	$0.83^{+0.02}_{-0.02}$
$M_{0,b}$ (弧度)	$2.53^{+0.01}_{-0.01}$	$1.28^{+2.35}_{-0.95}$	$0.38^{+0.22}_{-0.21}$	–	–	$5.56^{+0.02}_{-0.02}$	$4.55^{+0.16}_{-0.13}$
Ω_b (弧度)	$1.33^{+0.07}_{-0.06}$	$3.89^{+0.09}_{-0.09}$	$4.09^{+0.33}_{-0.34}$	–	–	$0.82^{+0.07}_{-0.09}$	$3.67^{+0.63}_{-0.59}$
i_b (弧度)	$2.18^{+0.05}_{-0.06}$	$0.94^{+0.04}_{-0.04}$	$1.56^{+0.24}_{-0.28}$	–	–	$3.08^{+0.01}_{-0.03}$	$1.58^{+0.39}_{-0.40}$
P_c(天)	$11038.6^{+1059.0}_{-720.6}$	–	$5873.0^{+93.4}_{-86.6}$	$769.4^{+3.9}_{-2.9}$	$769.4^{+3.8}_{-3.0}$	–	–
K_c (m s^{-1})	$105.8^{+2.0}_{-2.1}$	–	$17.2^{+0.6}_{-0.6}$	$18.8^{+1.9}_{-1.7}$	$18.6^{+1.8}_{-1.7}$	–	–
$\sqrt{e_c}\sin\omega_c$	$-0.37^{+0.06}_{-0.06}$	–	$-0.03^{+0.12}_{-0.10}$	$-0.54^{+0.09}_{-0.09}$	$-0.55^{+0.10}_{-0.09}$	–	–
$\sqrt{e_c}\cos\omega_c$	$-0.03^{+0.06}_{-0.06}$	–	$-0.21^{+0.06}_{-0.05}$	$0.40^{+0.10}_{-0.11}$	$0.38^{+0.10}_{-0.11}$	–	–
$M_{0,c}$ (弧度)	$1.04^{+0.20}_{-0.17}$	–	$3.60^{+0.49}_{-0.48}$	$5.68^{+0.28}_{-0.28}$	$5.69^{+0.27}_{-0.31}$	–	–
Ω_c (弧度)	$1.03^{+0.10}_{-0.12}$	–	$3.31^{+1.69}_{-1.66}$	$0.73^{+0.49}_{-0.40}$	$5.92^{+0.23}_{-0.60}$	–	–
i_c (弧度)	$1.98^{+0.07}_{-0.08}$	–	$1.63^{+0.30}_{-0.34}$	$0.81^{+0.49}_{-0.28}$	$2.59^{+0.17}_{-0.32}$	–	–
$\sigma_{\rm CAR-VIS}$ (m s^{-1})	–	–	$2.43^{+0.34}_{-0.29}$	$9.59^{+0.76}_{-0.69}$	$9.58^{+0.80}_{-0.70}$	–	–
$\sigma_{\rm HARPS-N}$ (m s^{-1})	–	–	$3.43^{+0.30}_{-0.26}$	–	–	–	–
$\sigma_{\rm HARPS-pre}$ (m s^{-1})	$3.08^{+0.26}_{-0.24}$	$1.91^{+0.21}_{-0.18}$	$1.88^{+0.26}_{-0.23}$	–	–	–	–
$\sigma_{\rm HARPS-post}$ (m s^{-1})	$3.90^{+1.84}_{-1.24}$	$2.02^{+0.14}_{-0.13}$	$4.25^{+0.58}_{-0.51}$	–	–	$3.28^{+1.01}_{-0.87}$	–
$\sigma_{\rm HIRES-pre}$ (米 秒$^{-1}$)	–	–	$3.15^{+1.29}_{-1.16}$	$21.51^{+9.04}_{-5.66}$	$21.20^{+8.66}_{-5.37}$	–	–
$\sigma_{\rm HIRES-post}$ (米 秒$^{-1}$)	–	–	$4.41^{+0.37}_{-0.33}$	$9.33^{+1.33}_{-1.05}$	$9.41^{+1.32}_{-1.09}$	$7.11^{+2.64}_{-2.02}$	–
$\sigma_{\rm HRS}$ (米 秒$^{-1}$)	–	–	–	–	–	–	–
$\sigma_{\rm PFS}$ (米 秒$^{-1}$)	$6.08^{+1.28}_{-0.99}$	$3.04^{+0.38}_{-0.31}$	$2.67^{+1.46}_{-0.86}$	–	–	–	$6.85^{+0.89}_{-0.74}$
$\sigma_{\rm SOPHIE}$ (米 秒$^{-1}$)	–	–	–	–	–	–	–
$\sigma_{\rm Tull}$ (米 秒$^{-1}$)	–	–	–	–	–	–	–
$\sigma_{\rm UCLES}$ (米 秒$^{-1}$)	–	$5.41^{+0.86}_{-0.74}$	–	–	–	–	–
$J_{\rm hip}$ (毫角秒)	$1.03^{+1.06}_{-0.71}$	$0.78^{+0.74}_{-0.54}$	$3.17^{+1.66}_{-1.79}$	–	–	$22.17^{+3.17}_{-2.62}$	$3.50^{+1.53}_{-1.87}$
$S_{\rm gaia}$	$1.07^{+0.07}_{-0.05}$	$1.36^{+0.07}_{-0.07}$	$1.20^{+0.08}_{-0.08}$	$1.46^{+0.07}_{-0.08}$	$1.45^{+0.07}_{-0.07}$	$1.09^{+0.08}_{-0.06}$	$1.07^{+0.07}_{-0.05}$
$\Delta\alpha*$ (毫角秒)	$5.17^{+0.39}_{-0.51}$	$0.95^{+0.09}_{-0.10}$	$-0.30^{+1.02}_{-0.83}$	$0.16^{+0.09}_{-0.10}$	$-0.06^{+0.14}_{-0.18}$	$-0.99^{+0.29}_{-0.25}$	$1.33^{+1.11}_{-1.50}$
$\Delta\delta$ (毫角秒)	$0.98^{+0.74}_{-0.62}$	$0.80^{+0.09}_{-0.09}$	$-0.57^{+1.23}_{-0.54}$	$-0.28^{+0.11}_{-0.15}$	$-0.31^{+0.10}_{-0.11}$	$0.73^{+0.23}_{-0.27}$	$2.18^{+0.48}_{-1.13}$
$\Delta\varpi$ (毫角秒)	$-0.03^{+0.03}_{-0.03}$	$-0.03^{+0.03}_{-0.03}$	$-0.06^{+0.03}_{-0.03}$	$-0.06^{+0.09}_{-0.09}$	$-0.05^{+0.09}_{-0.09}$	$-0.02^{+0.04}_{-0.04}$	$-0.00^{+0.01}_{-0.01}$
$\Delta\mu_{\alpha*}$ (毫角秒 年$^{-1}$)	$0.07^{+0.09}_{-0.07}$	$0.24^{+0.03}_{-0.02}$	$0.11^{+0.08}_{-0.08}$	$-0.18^{+0.10}_{-0.10}$	$-0.02^{+0.09}_{-0.10}$	$-0.06^{+0.07}_{-0.07}$	$-0.09^{+0.07}_{-0.06}$
$\Delta\mu_\delta$ (毫角秒 年$^{-1}$)	$0.66^{+0.04}_{-0.04}$	$-0.49^{+0.03}_{-0.03}$	$0.12^{+0.07}_{-0.06}$	$0.26^{+0.08}_{-0.09}$	$0.33^{+0.08}_{-0.08}$	$-0.54^{+0.18}_{-0.15}$	$-0.13^{+0.04}_{-0.04}$
			导出参数				
i_b (度)	$125.1^{+3.0}_{-3.3}$	$54.1^{+2.1}_{-2.0}$	$89.7^{+13.5}_{-16.0}$	–	–	$176.3^{+0.8}_{-1.6}$	$90.7^{+22.1}_{-23.1}$
m_b ($M_{\rm Jup}$)	$5.35^{+0.24}_{-0.23}$	$0.94^{+0.04}_{-0.04}$	$0.93^{+0.06}_{-0.04}$	–	–	$31.32^{+8.46}_{-9.65}$	$4.83^{+0.63}_{-0.52}$
q_b	$0.0082^{+0.0003}_{-0.0003}$	$0.0020^{+0.0001}_{-0.0001}$	$0.0019^{+0.0001}_{-0.0001}$	–	–	$0.0628^{+0.0169}_{-0.0194}$	$0.0074^{+0.0008}_{-0.0005}$
a_b (天文单位)	$1.74^{+0.02}_{-0.02}$	$3.58^{+0.05}_{-0.06}$	$2.34^{+0.03}_{-0.04}$	–	–	$0.36^{+0.01}_{-0.01}$	$6.15^{+0.46}_{-0.40}$
e_b	$0.316^{+0.004}_{-0.004}$	$0.013^{+0.013}_{-0.009}$	$0.048^{+0.012}_{-0.012}$	–	–	$0.332^{+0.010}_{-0.010}$	$0.718^{+0.032}_{-0.029}$
ω_b (弧度)	$1.49^{+0.01}_{-0.02}$	$-0.87^{+3.27}_{-1.80}$	$1.82^{+0.21}_{-0.21}$	–	–	$-1.18^{+0.03}_{-0.03}$	$-0.20^{+0.04}_{-0.04}$
$T_{p,b}-2450000$ (儒略日)	$7513.2^{+2.3}_{-2.3}$	$7176.5^{+565.5}_{-1402.3}$	$7819.5^{+65.8}_{-66.5}$	–	–	$7839.6^{+0.4}_{-0.4}$	$2828.8^{+487.4}_{-692.3}$
i_c (度)	$113.3^{+3.7}_{-4.6}$	–	$93.3^{+17.3}_{-19.6}$	$46.5^{+28.0}_{-16.2}$	$148.6^{+9.9}_{-18.0}$	–	–
m_c ($M_{\rm Jup}$)	$9.25^{+0.36}_{-0.36}$	–	$0.95^{+0.09}_{-0.05}$	$0.30^{+0.13}_{-0.07}$	$0.40^{+0.17}_{-0.13}$	–	–
q_c	$0.0141^{+0.0005}_{-0.0005}$	–	$0.0020^{+0.0002}_{-0.0001}$	$0.0019^{+0.0008}_{-0.0005}$	$0.0026^{+0.0011}_{-0.0008}$	–	–
a_c (天文单位)	$8.36^{+0.53}_{-0.38}$	–	$4.93^{+0.09}_{-0.09}$	$0.88^{+0.04}_{-0.04}$	$0.87^{+0.04}_{-0.04}$	–	–
e_c	$0.137^{+0.047}_{-0.037}$	–	$0.058^{+0.024}_{-0.022}$	$0.467^{+0.070}_{-0.076}$	$0.461^{+0.067}_{-0.075}$	–	–
ω_c (弧度)	$-1.65^{+0.15}_{-0.19}$	–	$-2.39^{+5.30}_{-0.54}$	$-0.94^{+0.19}_{-0.20}$	$-0.96^{+0.19}_{-0.19}$	–	–
$T_{p,c}-2450000$ (儒略日)	$6095.1^{+209.9}_{-251.8}$	–	$4572.5^{+443.6}_{-462.0}$	$7759.8^{+15.6}_{-15.8}$	$7758.0^{+15.6}_{-16.0}$	–	–