Draft version November 25, 2026年 使用 LaTeX 排版，采用 AASTeX7.0.1 默认样式

arXiv:2611.32296v1 [astro-ph.SR] 24 Nov 2026

低质量比接触双星 FASTT1558 的测光特征分析与演化状态研究

Anurag Baruah,[1] Mayukh Pahari,[1] Kumar Pranshu,[2] Nihal Mohamed Thalakkott,[1] Kuntal Misra,[2] and Ikyatha Tummalapalli[3]

[1] *Department of Physics, Indian Institute of Technology Hyderabad, Kandi, Sangareddy 502284, India*
[2] *Aryabhatta Research Institute of Observational sciencES (ARIES), Manora Peak, Nainital 263001, India*
[3] *Department of Astronomy, Osmania University, Hyderabad 500007, India*

摘要

低质量比接触双星可能是恒星并合的前身，为理解支配质量和能量转移的物理过程提供了重要线索。本文首次基于光谱测光对 FASTT 1558 进行演化调查研究。FASTT 1558 是一颗完全食的低质量比接触双星。我们结合了使用 3.6 米德瓦斯塔尔光学望远镜获得的 TESS 和 ASAS-SN测光数据与分相光谱。基于 PHOEBE 的光变曲线建模表明，该系统的次星与主星质量比极低，为 $q = 0.1544 \pm 0.0013$，接触度高达 $f = 0.61 \pm 0.01$。分析得出的系统总质量为 $1.92 \pm 0.31\,M_{\odot}$，系统距离估计为 648.45 ± 29.85 秒差距。对长期食时的分析揭示，轨道周期明显减小，变化率为 $\dot{P} = -(3.03 \pm 0.26) \times 10^{-7}$ 天 yr^{-1}，这可能与热时标上的主星向次星质量转移有关。光谱显示，Hα 和 CaII 等效宽度随相位变化，表明色球层处于动态演化之中。采用 MESA 进行的双星演化计算在达到观测到的低质量比之前，因 L2溢出而终止。尽管质量比极端低，该系统目前仍处于达尔文稳定状态，$J_{\mathrm{spin}}/J_{\mathrm{orb}} = 0.15 \pm 0.02$。因此，FASTT 1558 为低质量比接触双星的演化模型提供了可靠的观测基准。

关键词：恒星天文学（1583）；双星（154）；接触双星（297）

1. 引言

双星或多重恒星系统构成了宇宙中恒星族群的绝大多数（H. A. Abt 1983年；D. Raghavan 等 2010年；G. Duchˆene & A. Kraus 2013年；M. Moe & R. Di Stefano 2017年；A. Prˇsa 2018年；A. Menon 等 2021年）。在银河系中，约有30%–40%的低质量恒星存在于双星构型中（A. Duquennoy & M. Mayor 1991年；P. P. Eggleton & A. A. Tokovinin 2008年；D. Raghavan 等 2010年；G. Duchˆene & A. Kraus 2013年；A. Menon 等 2021年）。由于其基本物理参数能够被精确测定，近距离双星系统是检验恒星结构与演化理论的重要实验室。多项统计研究表明，在演化相对缓慢的近距离双星系统中，大熊座W型接触双星最为常见（H. Shapley 1948年；S. M. Rucinski 1998年、2002年；M. Szymanski 等 2001年；K. Stepie´n 2006年）。在这些系统中，物质和能量通过内拉格朗日点（L1）在恒星之间重新分布，使能量得以通过公共包层从较热的分量传递至较冷的分量（L. B. Lucy 1968年a,b）。对质量较小次星的加热可驱动热弛豫振荡（TROs；L. B. Lucy 1976年；B. P. Flannery 1976年；J. A. Robertson & P. P. Eggleton 1977年；S. Qian 2001年、2003年；K. Yakut & P. P. Eggleton 2005年），使质量转移方向交替变化，并令系统反复在接触构型与近接触构型之间转换。这些振荡推动双星系统向质量比逐渐降低的方向演化（S. M. Rucinski 2001年；K. Stepie´n 2006年；K. Stepie´n & K. Gazeas 2012年；M. Peˇsta & O. Pejcha 2023年）。因此，系统最终可能遭遇达尔文不稳定性（G. H. Darwin 1879年；P. Hut 1980年），并可能导致并合

电子邮箱：ph24resch11002@iith.ac.in

双星分量的并合（R. Tylenda 等 2011年；O. Pejcha 2014年；Y.-G. Yang & S.-B. Qian 2015年；Y. Lai 等 2026年）。由于轨道周期极短且束缚能相应较高，在演化的最后阶段，公共包层无法被完全抛离，因此双星分量极有可能发生并合（R. E. Taam & E. L. Sandquist 2000年；S. Wellstein 等 2001年；D. Jiang 等 2026年）。

理论上，达尔文不稳定性的临界质量比预计位于 $q_{\rm inst} \sim 0.09$–0.038 范围内，具体取决于恒星结构、自转、金属丰度以及所采用的回转半径（F. A. Rasio 1995；L. Li & F. Zhang 2006；B. Arbutina 2009；S. S. Wadhwa 等 2021；X.-D. Zhang 2024）。然而，观测发现了一些质量比显著低于这些理论界限的接触双星，在 TYC 3801-1529-1 中甚至达到 $q \simeq 0.024$ （A. Poro 等 2026a），这凸显了理论稳定性界限与观测到的极低质量比接触双星之间尚未解决的差异。尽管已有多种理论模型用于解释接触双星的演化性质（L. B. Lucy 1976；B. P. Flannery 1976；R. F. Webbink 1977；K. Yakut & P. P. Eggleton 2005；K. Stepie´n 2006；K. Stepie´n & K. Gazeas 2012；M. Yildiz & T. Do˘gan 2013；Zhang, X.-D. 等 2020；J. Zhang 等 2026），这些系统的形成机制和长期演化仍存在持续争论（L. B. Lucy 1968a；X. Zhou 等 2016；Zhang, X.-D. 等 2020；S. Kouzuma 2023；M. Fabry 等 2023；A. Poro 等 2024b；S. S. Wadhwa 等 2024）。因此，进一步研究已知系统和研究不足的系统，对于约束其演化路径、加深我们对其形成过程及最终命运的理解至关重要。

在本研究中，我们首次对低质量比、低质量接触双星 FASTT 1558 进行了光学光谱测光分析。该系统由A. A.Henden& R.C.Stone （1998年）利用弗拉格斯塔夫天体测量扫描凌日望远镜（FASTT）发现；同时，我们还通过恒星演化建模对其演化状态进行了调查研究。FASTT 1558 曾反复出现在许多统计研究中，例如卡特琳娜巡天（CSS；A. J. Drake 等 2014年）、全天自动巡天（ASAS；G. Pojmanski 1997年）、北天变星巡天（NSVS；P.R.Wo´zniak 等 2004年；S. J. Gettel 等 2006年）、两微米全天巡天（2MASS；R. M. Cutri 等 2003年），以及近来的凌日系外行星巡天卫星（TESS；G. R. Ricker 等 2015年；A. Pr˘sa 等 2022年）、全天自动超新星巡天（ASAS-SN；B. Shappee 等 2014年；T. Jayasinghe 等 2018年）以及大天区面积多目标光纤光谱望远镜（LAMOST；A.-L. Luo 等 2015年；S.-B. Qian 等 2020年）巡天。然而，迄今尚未有关于该系统的详细光谱测光研究及其长期演化的报道。FASTT 1558 的一些基本信息列于表1。

表 1. FASTT 1558 的基本信息。

参数	数值
R.A.	$22^h33^m55^s.84$
Dec.	$+00^d24^m50^s.4$
$P_{\rm orb}$ (天)	0.477305
V（星等）	12.21
光谱型	F0

注：光谱型取自S.-B. Qian 等（2020年，其余所有参数值均来自A. J. Drake (2014年)。

光谱观测和数据分析见第2节。第3 节介绍测光观测和分析。第4 节通过数值建模讨论该双星的演化状态。最后，在第5节给出我们的研究结果及其意义，并总结本文工作。

2. 光谱观测和数据分析

2.1. 光谱数据处理

使用 ARIES-Devasthal 暗天体光谱仪和相机（AD-FOSC；A. Omar 等，2019年）进行光谱观测。该仪器安装在 3.6 米德瓦斯塔尔光学望远镜（ DOT ；B. Kumar 等，2018 年）上。仪器配备一块 4K $\times$ 4 开尔文深耗尽型 CCD，板尺为每像素 0.2″，并采用 2×2片上合并（D. Panchal 等，2023年）。

2025年11月16日，在不同轨道相位下共获取 36 条光谱，每条曝光 300 秒。观测使用 676R 光栅并配合 1.5″ 狭缝，覆盖约 450–880 nm 的波长范围。光谱数据采用图像缩减与分析设施（IRAF2.18.1；D. Tody，1986年）软件包中的标准流程进行处理，包括偏置扣除、平场校正、光谱提取和波长定标。波长定标使用 Fe-Ne 弧灯曝光完成，流量定标则通过观测分光光度标准白矮星 GD 50 实现。使用 Fe-Ne 弧灯计算得出的光谱分辨率在 700 nm 处约为 R $\simeq 700$ 。随后，使用 specutils v2.3.1 软件包对完成定标的光谱进行连续谱归一化，该软件包属于 Astropy 7.2（ Astropy Collaboration 等，2013年），从而能够在不同轨道相位下对谱线轮廓和色球层特征进行一致比较。

2.2. 光谱分析

为避免地球大气吸收特征（分子氧，O_2）造成污染，我们屏蔽了 6750-6980 ˚A 和 7460-7750 ˚A 的波长区间。图 1 展示了在连续谱归一化的 FASTT 1558 光谱中识别出的吸收特征及屏蔽的地球大气带。

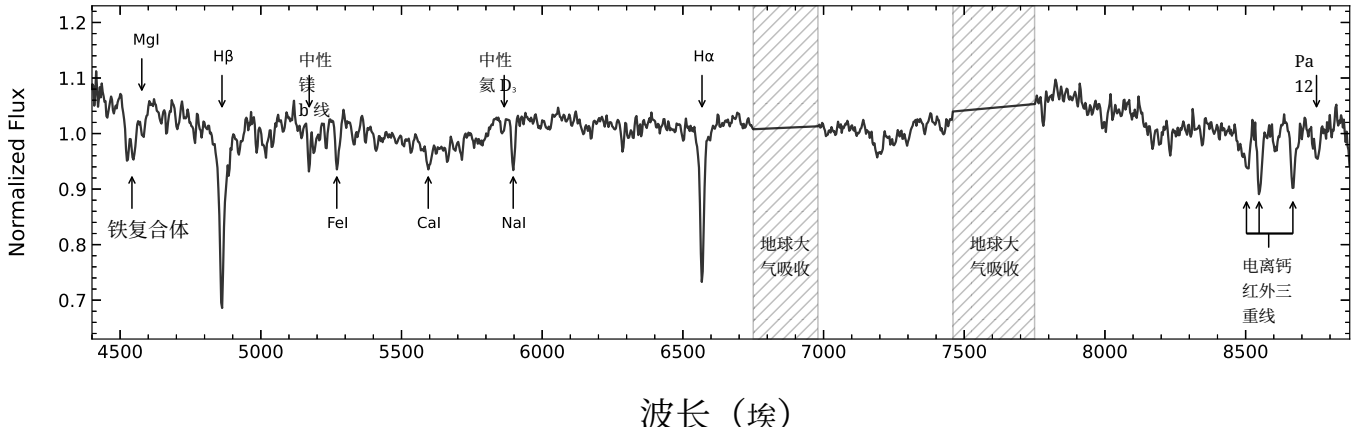

图 1. 使用 ARIES 的 3.6米 DOT 上的 ADFOSC 光谱仪获得的 FASTT 1558 光学光谱，突出显示了显著的吸收线和地球大气带。

2.2.1. *Stellar Parameter Determination*

为确定 FASTT 1558 的基本大气参数，我们采用里昂大学光谱分析软件（ULySS；M. Koleva 等 2009年）软件包。该软件逐像素 χ^2 最小化观测光谱与由插值恒星光谱库构建的模型光谱之间的差异。我们采用elodie32 flux tgm.fits插值器ULySS 中的插值器，该插值器基于 ELODIE 3.2 光谱库构建，用于在 4500–6500 ˚A 的波长范围内生成模型光谱，对应于指定的大气参数：有效温度（$T_{\rm eff}$）、表面重力（log g）和金属丰度（[Fe/H]）（Y. Wu 等 2011）。在此波长范围内，为避免对参数测定造成偏差，拟合时排除了受强色球活动影响的区域（Hβ 和 Na I 线心）。根据全部 36 条光谱得到的大气参数加权平均值及加权散布列于表2。加权平均值的不确定度未计入与光谱分辨率、所采用的模板库、连续谱归一化或双星系统光谱的复合性质有关的系统效应。这些因素可能会给所得大气参数带来额外的不确定度，在解读结果时应予以考虑。由于光谱分辨率较低，未检测到显著的波长偏移。表2 还列出了 LAMOST 和 Gaia DR3 巡天公布的参数，以供比较。

2.2.2. 色球活动与反向 P-Cygni 轮廓的检测

对于谱线诊断，我们重点关注位于 6563 ˚A 的 Hα 线和位于 8542 ˚A 的 Ca II 红外三重线（IRT）中最强的分量，因为已知它们是 F型恒星中的色球谱线。我们使用高斯轮廓拟合 Hα 和 Ca II 谱线周围的连续谱归一化光谱，以建立吸收分量的模型。为解释任何宽广的

表 2. FASTT 1558 的大气参数。列出了全部 36 条光谱的平均值，以及其他各项巡天报告的数值。

天文台	观测日期 (协调世界时)	$T_{\rm eff}$ (K)	表面重力加速度对数 [厘米/秒^2]	[Fe/H] [dex]	RV (千米每秒)	参考文献
DOT/ADFOSC	2025-11-16	6713.52 ± 34.52	4.089 ± 0.048	-0.005 ± 0.037	–	本研究
LAMOST	2017-12-06	6612.49 ± 14.50	4.079 ± 0.024	-0.125 ± 0.013	-2.42 ± 13.50	S.-B. Qian 等 (2020年)
LAMOST	2015-10-01	6607.54 ± 10.17	4.089 ± 0.015	-0.111 ± 0.008	23.24 ± 11.30	S.-B. Qian 等(2020年)
Gaia DR3	–	$6266.21^{+24.53}_{-18.40}$	3.94 ± 0.01	-0.384 ± 0.03	14.73 ± 15.35	Gaia Collaboration (2021年)

驼峰状残差，对于 Hα 区域采用线性分量与洛伦兹分量的组合，而 CaII 谱线仅使用线性分量。在图 2的上方图板中展示了拟合所得的轮廓以及相位 0.52 时的拟合比值。根据拟合模型，我们推导出相应的等效宽度（EWs），其随轨道相位的变化展示于图 2的下方图板中。Hα 和 CaII谱线的所有拟合光谱分别展示于图 12 和 13 中，同时其等效宽度数值列于表 7。

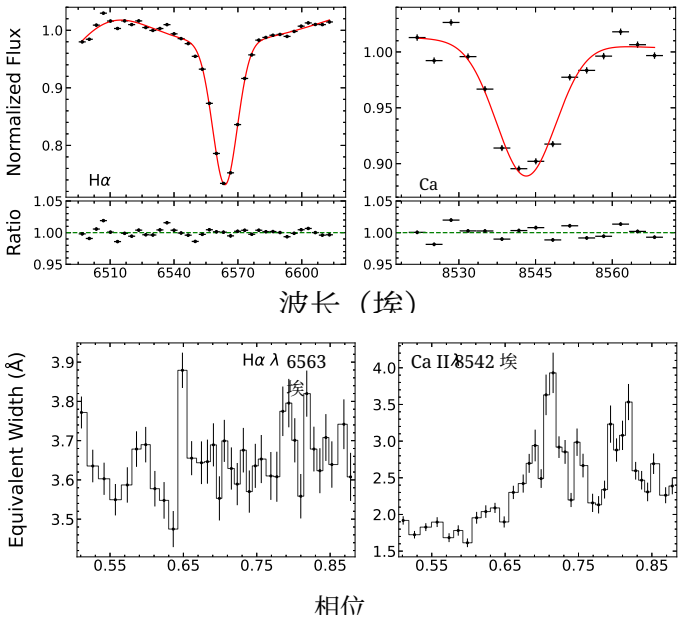

图 2. *Top*: FASTT 1558 在相位 0.52 处的 Hα （左）和 CaII （右）吸收特征。每个面板中，上部显示观测数据（黑点）及最佳拟合模型（红线），下部显示数据与模型之比。 *Bottom*: FASTT 1558 中 Hα （左）和 CaII （右）谱线的等效宽度（EW）随相位的变化。

为从下层光球中分离出色球层贡献，我们采用了`iSTARMOD` (F. Labarga 和 D. Montes 2026年所实现的光谱扣除技术。我们采用高分辨率 PHOENIX 模型光谱（T.-O. Husser 等 2013年），该光谱根据`ULySS` 拟合所得的平均参数值生成（见表2），并经卷积以匹配 ADFOSC 光谱的分辨率，作为模板。扣除前，对观测光谱和模板光谱采用一致的连续谱归一化处理，以避免产生人为的残差结构。扣除过程覆盖整个光谱范围，但排除了强地球大气带，以防止污染。全部36次观测的氢α 残差光谱均呈现反P-Cygni轮廓，这一特征在现有的两次 LAMOST 观测中也清晰可见。图3 展示了这一特征及其拟合模型（线性函数与洛伦兹函数的组合）和残差。相位为0.51时，ADFOSC 光谱中的红移分量中心位于 6570.53±0.12 ˚A，较氢 7.73±0.12 ˚线中心6562.α A偏移8 ˚A。所有光谱中均观测到类似偏移（见表7）。我们使用`scipy.optimize.curve fit` (P. Virtanen 等 2020年）对该特征进行建模，所列不确定度取自协方差矩阵的对角元素

这些不确定度由拟合过程返回，但未计入波长定标不确定度或可能存在的仪器系统效应。

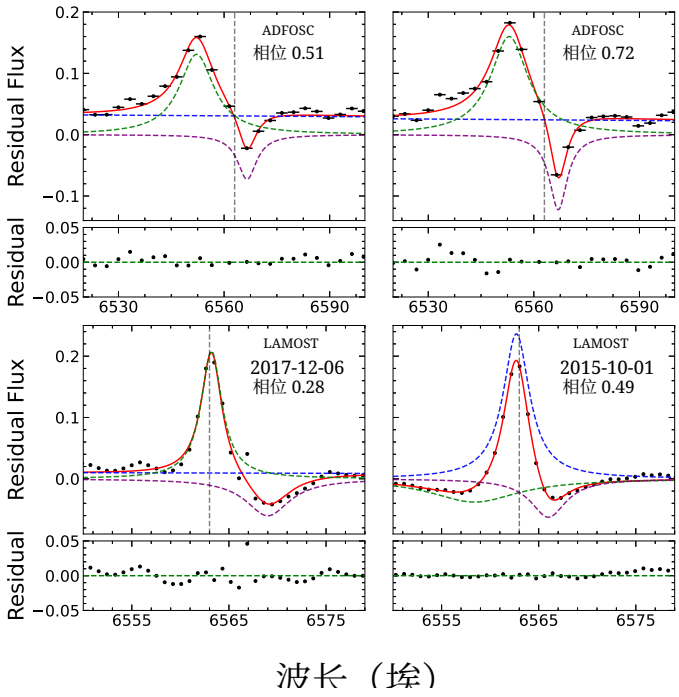

图 3. FASTT 1558 的氢α 残差光谱，其中上图为来自 ADFOSC 的光谱，下图为来自 LAMOST 的光谱。黑色数据点表示观测光谱，实红线表示由洛伦兹分量和线性分量组成的最佳拟合复合模型。垂直灰色虚线标记氢α的静止波长。下方子图显示拟合的残差。

3. 测光观测与数据分析

3.1. 测光数据处理

本研究使用了来自TESS和ASAS-SN的测光数据。TESS于2018年4月发射，是一项专为系外行星探测而优化的空间测光巡天任务。它配备了四台广视场相机，组合视场约为 $24° \times 96°$ ，并通过覆盖约600–1000 nm的宽带滤光片进行观测。TESS在第42、70、82和92扇区观测了FASTT 1558（TIC 293106548）。我们使用Python软件包 `lightkurve`（Lightkurve合作组等，2018年），从米库尔斯基空间望远镜档案馆（MAST[1]）下载光变曲线。经科学处理运行中心（SPOC）处理流程处理的光变曲线可供获取：第42和82扇区的曝光时间为600秒，第70扇区为200秒。TESS数据产品提供简单孔径测光（SAP）和预搜索数据校正SAP（PDCSAP）通量。由于分析时仅有快速浏览处理流程（QLP）的光变曲线可用，本研究未纳入第92扇区；其他扇区则使用了SPOC处理流程校正系统误差后的PDCSAP通量。

另一方面，ASAS-SN 是一项地基时域测光巡天，以几天为典型观测间隔，在 V 和 g 波段提供长期测光监测。ASAS-SN 自 2013年至2019年对 FASTT 1558（ASASSN-V J223355.87+002450.3）进行了监测。在本研究中，我们使用 ASAS-SN变星数据库[2]提供的 V波段测光数据。

[1] https://archive.stsci.edu[2] https://asas-sn.osu.edu/variables

3.2. 测光分析3.2.1.

Light Curve Solutions

我们使用 Python 代码 PHysics Of Eclipsing BinariEs（PHOEBE 2.4.; A. Prˇsa & T. Zwitter 2005; K. E. Conroy 等 2020）进行光变曲线分析。由于缺少多历元视向速度（RV）数据，我们采用 q 搜索法，根据测光数据估算质量比。FASTT 1558 是一颗完全食双星，其光变曲线形态可提供可靠的质量比估计（S. M. Rucinski 2001; T. Pribulla 等 2003; D. Terrell & R. E. Wilson 2005）。根据我们的 ADFOSC 光谱分析结果，将主极小时被掩食恒星的有效温度固定为 $T_1 = T_{eff} = 6713$ K（表 2）。我们将玻尔测反照率固定为 $A_1 = A_2 = 0.5$（S. M. Ruci´nski 1969），将引力昏暗系数固定为 $g_1 = g_2 = 0.32$（L. B. Lucy 1967），并假设恒星具有对流包层（因为 $T < 7200$ K）。临边昏暗系数根据 van Hamme 的表格，采用对数定律进行插值。随后，我们以 0.01 为步长，将质量比（q 参数）从 0.13 变化至 0.7，并针对每个取值运行 PHOEBE 程序。在此过程中，次星温度（T_2）、主星表面势（Ω_1）、主星光度（L_1）和倾角（i）等其他参数设为自由参数。将每次拟合所得的残差平方和（$\Sigma(res)^2$）相对于 q 绘于图 4。结果显示，解在 $q = 0.155$ 处收敛，该处对应于最小值$\Sigma(res)^2$ （在极小值附近采用 0.005 的步长）。q 搜索所得的相应参数即为我们的初始估计值。

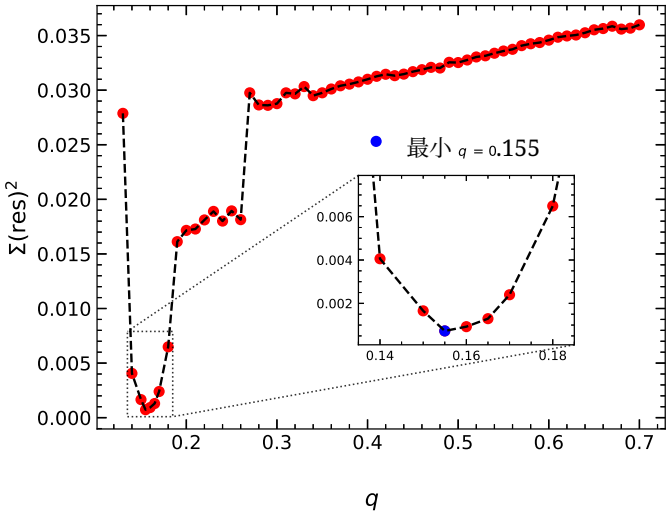

图 4。 *q-search*：平方残差和随质量比的变化。

由于最初采用的 T_1，来自光谱分析，代表两个组分的表面加权有效温度，因此我们使用以下关系重新计算各组分的温度（T. Zwitter 等 2003年；P.-E. Christopoulou & A. Papageorgiou 2013年）：

$$T_1, \text{updated} = \left(\frac{(1 + k^2) T_{eff}^4}{1 + k^2 \alpha^4} \right)^{0.25}, \quad T_2, \text{updated} = T_1, \text{updated} \times \alpha \tag{1}$$

其中，T_{eff} 表示通过光谱分析得到的有效温度，而 $k = \frac{r_2}{r_1}$ 和 $\alpha = \frac{T_2}{T_1}$ 则由初始PHOEBE 估计值获得。使用更新后的温度值、 T_1、更新后的 T_2、更新后的3（见表PHOEBE ），我们重新运行该程序。四个数据集的最终参数值及其相关不确定度，分别采用马尔可夫链蒙特卡洛（MCMC；D. Foreman-Mackey 等 2013年）分析方法独立估计，使用 32 个游走者运行 2000 步。排除最初的 90 次迭代作为预热期后，我们考察了四个数据集的接受率和积分自相关时间。诊断结果显示，各数据集的表现相似，平均接受率约为 0.54，链长度与自相关时间之比约为 50。图 5 展示了观测到的（黑点）和模型拟合的（红线）相位折叠光变曲线，以及参数的后验概率分布及其多元高斯表示

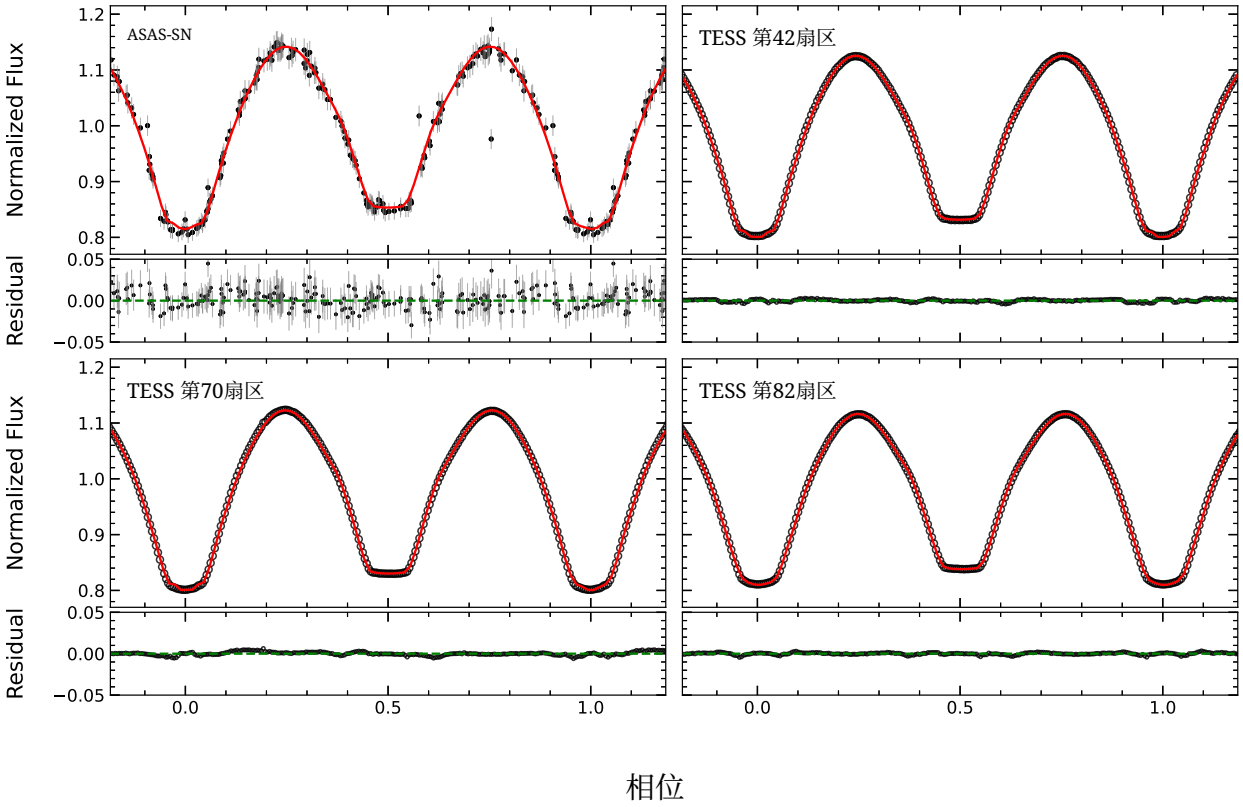

图 5. FASTT 1558 的光变曲线建模。 *Top of each panel*：观测到的（黑色圆点）和理论（红色实线）光变曲线，由 PHOEBE 模型计算得出。 *Bottom of each panel*：观测光变曲线与理论光变曲线之间的残差。

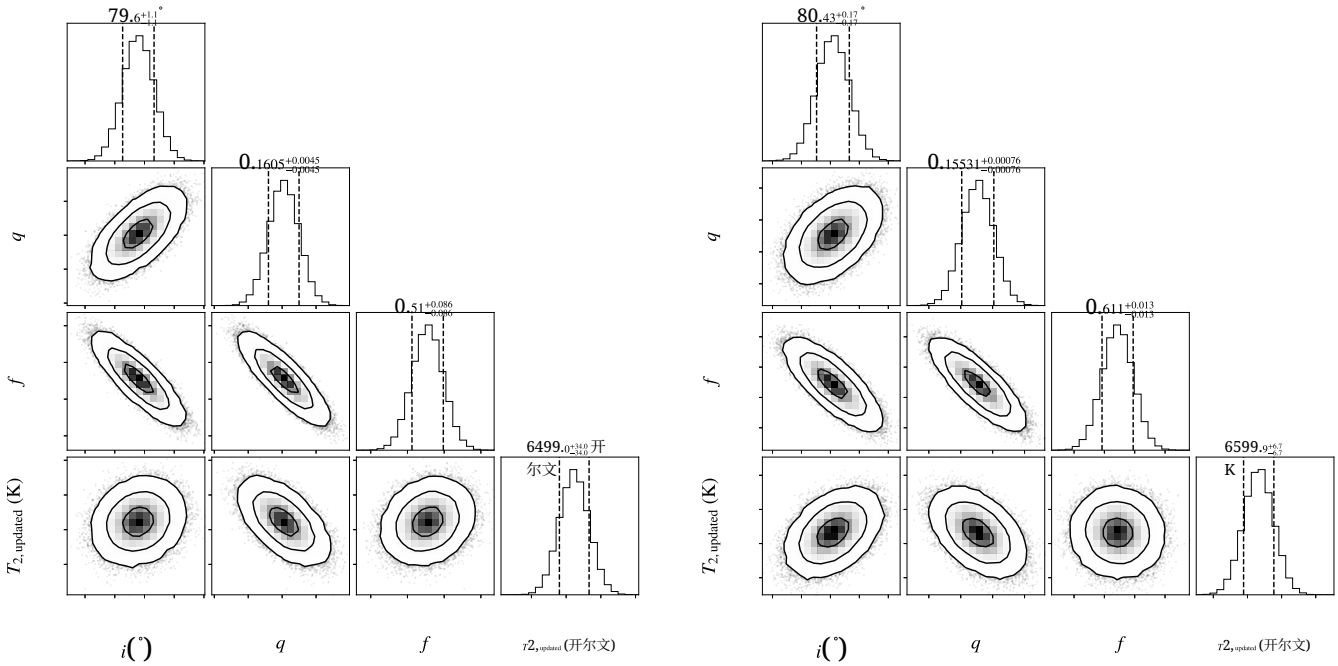

图6。 根据对 ASAS-SN（左）和 TESS 第70扇区（右）光变曲线进行马尔可夫链蒙特卡洛分析得到的模型参数后验分布。

ASAS-SN 和 TESS 70 的光变曲线见图6。测得的测光参数列于表3。

表 3. FASTT 1558 的光变曲线解。

参数	ASAS-SN	TESS-42	TESS-70	TESS-82	平均值
T_1，更新（开尔文）*	6748	6748	6748	6748	6748
T_2，更新（开尔文）	6499 ± 34	6628.4 ± 3.8	6599.9 ± 6.7	6692 ± 13	6624.63 ± 23.68
i (°)	79.60 ± 1.10	80.21 ± 0.14	80.43 ± 0.17	79.36 ± 0.27	80.16 ± 0.34
$q = M_2/M_1$	0.1605 ± 0.0045	0.1542 ± 0.0006	0.1553 ± 0.0007	0.1508 ± 0.0015	0.1544 ± 0.0013
f	0.51 ± 0.09	0.61 ± 0.01	0.61 ± 0.01	0.57 ± 0.03	0.61 ± 0.01
l_1/l_{tot}	0.837 ± 0.017	0.835 ± 0.021	0.840 ± 0.016	0.837 ± 0.019	0.837 ± 0.009
l_2/l_{tot}	0.163 ± 0.020	0.165 ± 0.021	0.160 ± 0.016	0.163 ± 0.017	0.163 ± 0.009
r_1 $(mean)$	0.567 ± 0.004	0.562 ± 0.002	0.573 ± 0.005	0.567 ± 0.002	0.567 ± 0.001
r_2 $(mean)$	0.257 ± 0.004	0.260 ± 0.001	0.263 ± 0.005	0.257 ± 0.002	0.259 ± 0.001

*：建模期间的固定参数。 f 表示填充因子，$r_{1、2}$ 表示分数半径。

为确定参数的平均值，我们采用加权平均值和散布法。加权平均值按照以下方程定义进行计算，其中 x_i 表示带有不确定度 σ_i的各次测量值。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i x_i}{\sum_{i=1}^{N} w_i} \ , \ w_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \tag{2}$$

使用定义如下的加权方差，对各次测量值围绕加权平均值的散布进行量化：

$$s_w^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^{N} w_i} \tag{3}$$

加权散布 s_w 用于表征各次测量值相对于加权平均值的离散程度；不确定度较小的测量值在计算中所占权重更大。

3.2.2. *Absolute Physical Parameters Estimation*

由于缺少径向速度曲线，双星系统的绝对物理参数可通过基于 Gaia 距离的方法（GD；D. P. Kjurkchieva 等 2019年）或经验关系（ER；L. Liu 等 2020年）推导。通过统计分析，K. Li 等(2021年)指出，使用 GD 方法推导出的参数可能不可靠，尤其对于距离较远的接触双星（Y.-X. Yu 2026年）。因此，我们采用了A. Poro 等(2024a)提出的经验关系，

$$a = (0.372^{+0.113}_{-0.114}) + (5.914^{+0.272}_{-0.298}) \times P \tag{4}$$

该关系基于一个包含 414 个系统的均一样本，适用于轨道周期短于 0.7 天的接触双星，描述了轨道周期（P）与半长轴（a）之间的关系。

恒星的半径$R_{1、2}$ 通过使用表3中给出的平均分数半径进行计算，

$$R_{1,2} = r_{1,2} \times a \tag{5}$$

总质量通过应用开普勒第三定律确定，

$$M = a^3/P^2 \tag{6}$$

其中 a 的单位为天文单位，轨道周期 P 的单位为年。使用表 3 中的半径和温度值，可计算出两个组分的光度，

$$\frac{L_{1,2}}{L_\odot} = \left(\frac{R_{1,2}}{R_\odot}\right)^2 \left(\frac{T_{1,2}}{T_\odot}\right)^4 \tag{7}$$

此外，轨道角 轨道角动量根据 Z. Eker 等人（2006年） 提出的公式进行评估 ，

$$J_{orb} = 1.24 \times 10^{52} \times M^{5/3} \times P^{1/3} \times q \times (1+q)^{-2} \tag{8}$$

所有绝对参数及其对应的不确定度均列于表4和图7 展示了不同轨道相位下各组成部分的三维表示。

表4。 FASTT 1558 的物理参数。

参数	数值
$M_1/\mathrm{M}_\odot$	1.66 ± 0.27
$M_2/\mathrm{M}_\odot$	0.26 ± 0.04
$R_1/\mathrm{R}_\odot$	1.81 ± 0.10
$R_2/\mathrm{R}_\odot$	0.83 ± 0.04
$L_1/\mathrm{L}_\odot$	6.13 ± 0.66
$L_2/\mathrm{L}_\odot$	1.19 ± 0.13
$a/\mathrm{R}_\odot$	3.19 ± 0.17
log $\mathrm{J}_{\mathrm{orb}}$ (cgs)	51.52 ± 0.12

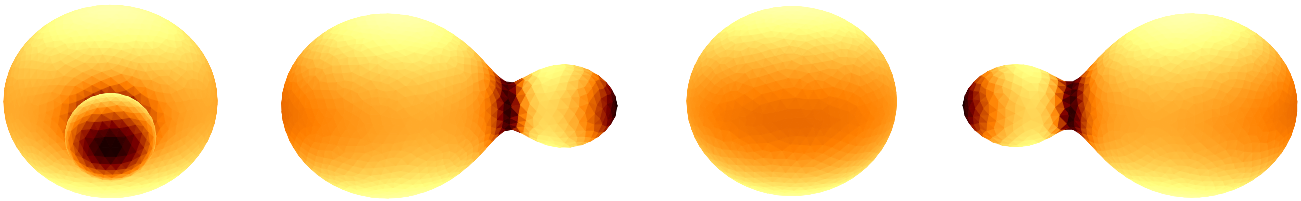

图7。FASTT 1558各组成星的三维表示 分别对应于相位0.00、0.25、0.50和0.75。

我们还推导出了组成星之间的相对能 量转移率，这与S.W. Mochnacki （1981年）的建议一致 ，

$$U_1 = \frac{r^2 t^4 - q^\alpha}{1 + q^\alpha} \tag{9}$$

$$U_2 = \log\left[\frac{r^2 t^4 - q^\alpha}{q^\alpha (1 + r^2 t^4)}\right] \tag{10}$$

其中， $r = R_2/R_1$、 $t = T_2/T_1$ 分别对应半径比和温度比，而 $\alpha = 3.42$表示质量-光度关系的指数。根据O. Demircan & G. Kahraman （1991年）提供的单星经验关系，可以估算每颗星的核光度，

$$L_0 \simeq 1.03\, M^{3.42}, \quad 0.1 \le M \le 120 \tag{11}$$

这些数值列于表5 中，并且与 U_1、 U_2 和由$L_{10}+L_{20}$所给出的log(E. Sarvari 等(2026年)的理论拟合结果一致。

表5。 FASTT 1558各组成星的核光度和相对能量转移率。

$L_{0,\ 1}$ ($L_\odot$)	$L_{0,2}$ ($L_\odot$)	U_1	U_2
5.87 ± 3.21	0.01 ± 0.005	0.19 ± 0.02	1.99 ± 0.06

3.2.3. *Determination of the distance to FASTT 1558*

利用光变曲线（LC）解得到的光度以及玻尔ometric改正（BC）估算该系统的距离。该方法基于恒星参数，能够提供物理上一致的估计值。每个组分的玻尔ometric星等按以下公式计算：

$$M_{\mathrm{bol},i} = M_{\mathrm{bol},\odot} - 2.5 \log \left(\frac{L_i}{L_\odot} \right) \tag{12}$$

其中 $M_{\mathrm{bol},\odot} = 4.74$ 为太阳玻尔ometric星等，而 L_i 为各组分的光度。V波段的玻尔ometric修正采用多项式标定计算（P. J. Flower 1996；G. Torres 2010年）：

$$BC_V = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 \tag{13}$$

其中 $x = \log T_{\mathrm{eff}}$，且 a，b，c，d，e 是对应于适当温度范围的系数。因此，各组分的绝对目视星等为：

$$M_{V,i} = M_{\mathrm{bol},i} - BC_i \tag{14}$$

在距离模数关系中，我们采用双星系统的总绝对星等，

$$m_V - M_V = 5 \log d - 5 + A_V, \tag{15}$$

其中 $m_V = 11.86$ 为最大亮度时的视星等，而 $A_V = 3.1 \times E(B-V) = 0.242$ (色 excess，$E(B-V)$为0.078）是V波段的星际消光。这些数值取自ASAS-SN数据。因此，计算得到的距离为 $d = 648_{.}45 \pm 29_{.}85$秒差距，与Gaia dsphot测量值609± 6秒差距（F. Anders等2022年）一致。推导距离的不确定度尚未计入星际消光相关的不确定度，因此该数值可能低估了总不确定度。

3.2.4. *Orbital Period Variations*

接触双星轨道周期的时间变化能够提供有关质量转移率、第三天体是否存在以及其他特性的重要信息。为量化这种变化，我们利用TESS和ASAS-SN光变曲线确定极小时间。另从VarAstro采用了四个极小时间[3]。由于TESS采用BJD时间系统，因此将HJD中的极小时间转换为BJD，所用工具为`Astropy 7.2`。TESS极小时间采用KvW方法确定（K. K. Kwee & H. van Woerden 1956年），并结合H.J.Deeg （2020年）所述的改进误差估计方法。由于覆盖2013—2019年的ASAS-SN观测并非连续，因此按照M. Azizbek 等 （2026年）的建议，将数据划分为多个150天的时间区间。将每个区间内的观测与模板（相位化TESS 82光变曲线）进行匹配，以获得极小时间。使用以下线性方程确定极小时间的计算值：

$$BJD = BJD_0 + P \times E \tag{16}$$

其中 E 为周期/历元编号。历元（BJD_0）和周期的数值取自 VarAstro（见表8 和9）。观测值减计算值（O−C）图见图8，呈向下的抛物线趋势。因此，我们使用二次多项式拟合该曲线，拟合结果列于表6。根据拟合系数，计算得出 FASTT 1558 的轨道周期变化率。然而，轨道周期表观上的长期递减（$3_{.}03 \pm 0_{.}26$） $\times\ 10^{-7}$ 天 年$^{-1}$，可能仅代表长期周期性变化的一段，这种变化可能由第三天体（J. B. Irwin 1952；T. Pribulla 等 2005年）或磁活动周期（J. H.Applegate 1992）引起。还需进一步的观测数据来验证这一解释。FASTT 1558 的计算 O−C 值列于表8 和9。

4. 通过数值模拟研究演化状态

为研究 FASTT 1558 的演化性质，我们使用恒星天体物理实验模块（`MESA v25.12.1`；B. Paxton 等 2011、2013年、2015年、2018年、2019年；A. S. Jermyn

[3] https://var.astro.cz/en/Stars

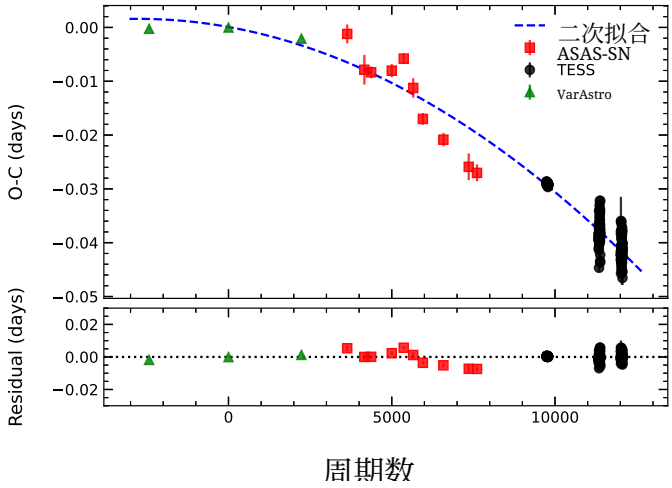

图8。展示该系统周期变化的观测值减计算值图。

表6。根据观测值减计算值图拟合和计算得到的参数。

参数	数值
a_0	(0.0000874 ± 0.00106)
a_1	(-1.09 ± 0.26) × 10^{-6}
a_2	(-1.98 ± 0.17) × 10^{-10}
$\Sigma(res)^2$	9.97 × 10^{-4}
$\dot{P}$ (天 yr^{-1})	- (3.03 ± 0.26) × 10^{-7}
$\dot{M}_1$ ($M_\odot$年$^{-1}$)	- (6.43 ± 1.35) × 10^{-8}
$^{\dagger}\dot{M}_1$ ($M_\odot$年$^{-1}$)	- (2.97 ± 0.50) × 10^{-8}

†: 非保守转移。

等 2023年）。双星在零龄主序（ZAMS）阶段的初始条件，对于决定其后续演化及最终命运至关重要。然而，目前尚无一种观测确立的程序，能够重建观测到的接触双星的初始构型。M. Yildiz & T. Doˇgan（2013年）和 M. Yıldız（2014年）等采用的半经验方法，根据当前性质推断前身星质量和双星轨道周期。但这些方法依赖于关于质量转移、质量和角动量损失以及双星相互作用起始过程的简化假设，可能无法充分代表长寿命接触双星的演化路径，并可能高估其零龄主序阶段的参数。因此，本研究在保守质量转移的假设下，针对一系列合理的初始双星构型建立 MESA模型。根据 FASTT 1558 的观测总质量（1.92 ± 0.31 $M_\odot$；见表4），我们考虑的总质量范围为 $1.6 \leq M_{\rm tot}/M_\odot \leq 2.2$。初始主星质量 $M_{1,i}$ 从 0.9 到 $1.3\,M_\odot$ 变化，步长为 $0.1\,M_\odot$；初始伴星质量 $M_{2,i}$则选取为使初始总质量保持在所采用的范围内。我们考虑范围为 $P_i \in$ (0.5, 0.9) 天的初始轨道周期，以获得 A型相互作用（M. Fabry & A. Prˇsa 2025）。我们遵循 M. Fabry & A. Prˇsa（2025）的演化框架，采用潮汐形变、能量转移和饱和磁制动的相关设定，并使用其公开提供的 MESA实现[4]。

我们的演化网格表明，低质量比接触双星的形成需要热弛豫振荡。 此外，这些振荡的幅度必须保持足够小，以防止系统在达到观测到的低质量比之前发生 L_2 溢出。尽管以往研究会在少数几次热弛豫振荡后施加截断，例如 20 次热弛豫振荡（M.Fabry & A. Prˇsa 2025），但我们并未限制热弛豫振荡的次数。相反，我们允许模型经历连续振荡，直到出现 L_2 溢出。这使我们能够研究

[4] 数字对象标识符：10.5281/zenodo.17155744

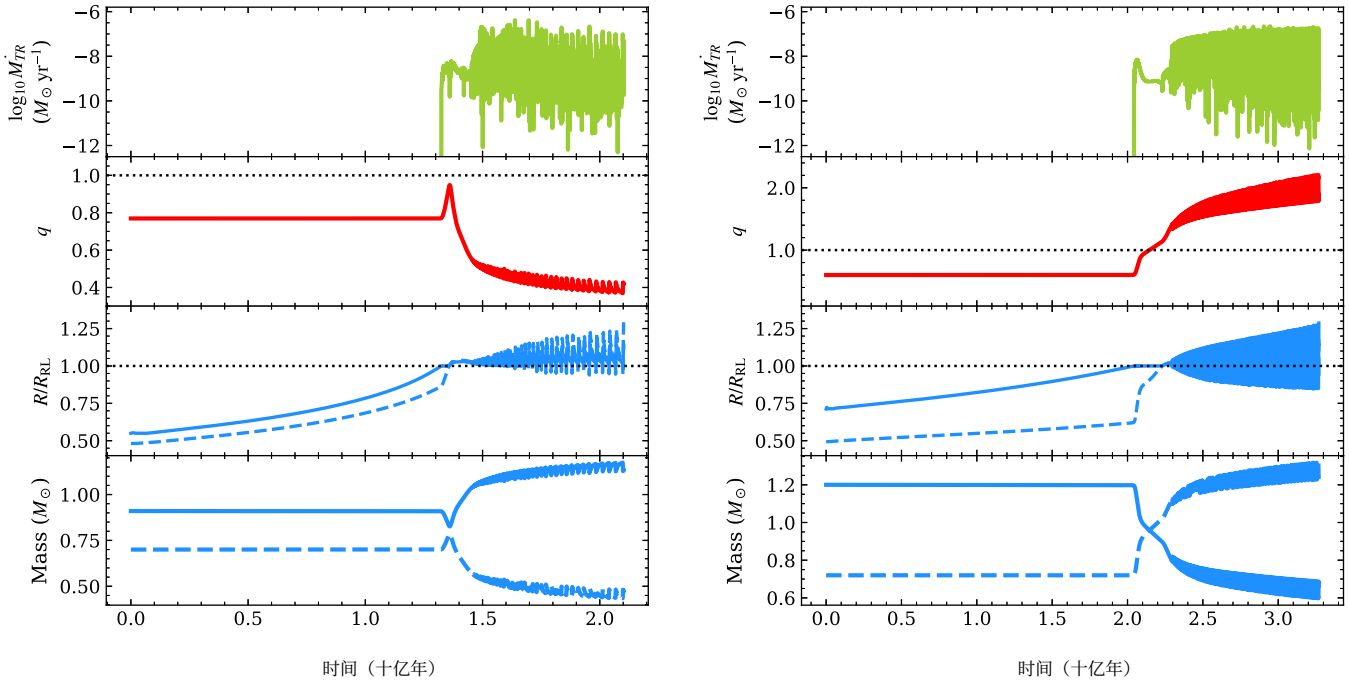

图9。 质量转移率、质量比、半径和质量演化模型。在第三和第四个面板中，实线表示主星组分，虚线表示次星组分。第二个面板中的黑色水平点线是 $q = 1.0$ 的参考线，而第三个面板中的点线表示两颗恒星均具有$R/R_L \geq 1$的时刻，即接触构型。 *Left*：具有 $M_{1,\,i} = 0.91\ M_\odot$、 $M_{2,\,i} = 0.7\ M_\odot$、 $P_i = 0.67$ 天的模型。 *Right*：具有$M_{1,\,i} = 1.20\ M_\odot$、 $M_{2,\,i} = 0.72\ M_\odot$、 $P_i = 0.67$ 天的模型。两个模型均因 L_2 溢出而终止。

持续的振荡是否能够驱动系统趋向于 FASTT 1558 等系统中观测到的质量比。然而，我们的模型均未达到 $q = 0.15$，这凸显了当前演化框架在再现质量比最极端的接触双星方面的局限性。图 9 展示了两条表现出不同热弛豫振荡行为的代表性演化序列。在第一条序列（左图）中，来自供体星的能量转移导致对流伴星显著膨胀，从而在质量比达到 $q = 1$之前，质量转移方向便发生反转。在第二条序列（右图）中，质量比发生反转：起初质量较大的组分通过向伴星转移而损失了足够的质量，最终成为质量较小的恒星。两条序列均达到 $q \simeq 0.4$ ，随后因 L_2 溢出而终止。

5. 讨论与结论

我们首次对完全食双星 FASTT 1558 进行了光谱—测光和轨道周期分析。通过 PHOEBE 进行的测光建模表明，该系统是一个低质量比接触双星，其质量比为 $q = 0.1544 \pm 0.0013$，且接触度较深，为 $f = (61 \pm 1)\%$。我们发现，该双星中温度较高的组分也是质量较大的组分，因此将该系统归类为 A型接触双星。FASTT 1558 在 $J_{\rm orb} - M_{\rm tot}$平面中的位置如图 10所示，并与已知的分离双星和接触双星一同列出。接触双星样本取自 Y.-X. Yu 等人(2022年) 和 Y.-X. Yu 等人 (2026年)，而分离双星样本取自 Z. Eker 等人 (2006年)。红色虚线表示分离—接触双星边界（P. P. Eggleton 与 L. Kisseleva-Eggleton（2006））。FASTT 1558（以三角形表示）靠近分隔质量比为 $q \leq 0.15$ 的接触双星与质量比为 $q > 0.15$的接触双星的边界，因此属于观测到的质量比最低的系统之列。需要指出的是，该边界是质量比的一个经验阈值，用于区分两个接触双星观测族群，而不是与达尔文不稳定性相关的理论临界限。

我们根据自旋角动量与轨道角动量之比，研究该系统的动力学稳定性，

$$\frac{J_{spin}}{J_{orbit}} = \frac{1+q}{q}[(k_1 r_1)^2 + (k_2 r_2)^2 q]. \tag{17}$$

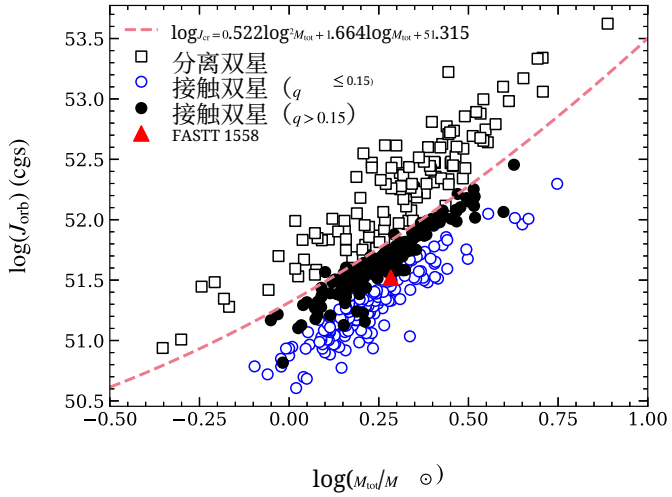

图10. FASTT 1558在log $J_{\rm orb}$ 与log $M_{\rm tot}$关系图中的位置。分离双星以空心方框表示，而具有 $q > 0.15$ 和 $q \leq 0.15$ 的接触双星分别以实心圆和空心圆表示。根据我们的分析，FASTT 1558具有 $q = 0.1544$。

该 J_{spin}/J_{orbit} 值为 0。15 ± 0.02（$< \frac{1}{3}$，达尔文稳定；G. H. Darwin 1879年；P. Hut 1980年）表明该系统具有动力学稳定性。这里，k_1^2 和 k_2^2 的值分别取为 0.06 和 0.10，这是 A. Poro 等（2026b）针对极低质量比接触双星提出的取值，用于考虑次星的强烈洛希畸变。

我们的轨道周期分析表明，周期正在以（-3.03 ± 0.26）× 10^{-7} 天 年$^{-1}$的速率减小。周期减小可能是由磁制动（MB）及其相关的角动量损失造成的，利用以下公式（D. H. Bradstreet & E. F. Guinan 1994年；A. Panchal & K. Li 2026年）可对其进行评估，

$$\frac{dP}{dt} \approx -1.1 \times 10^{-8} \frac{(1+q)^2}{q} (M_1 + M_2)^{-\frac{5}{3}} k^2 (M_1 R_1^4 - M_2 R_2^4) P^{-\frac{7}{3}}. \tag{18}$$

取回转 k^2 为0.06（L. Li & F. Zhang 2006年），并采用我们分析得到的其他参数值，可得 $\dot{P}$ =（-1.92 ± 0.63）× 10^{-7} 天 年$^{-1}$。正如M. Fabry & A. Prˇsa （2025年）所讨论的，对于低质量接触双星，磁制动可能处于饱和状态，因此由 P 得到的数值将是周期衰减率的上限，因为D.H. Bradstreet & E. F. Guinan （1994年）的方法没有考虑饱和磁制动的影响。因此，磁制动导致轨道周期减小的速率小于观测到的周期减小率。另一种机制是由引力波辐射（GWR）驱动的角动量损失。正如M. E. Lohr 等（2012年）所建议的，结合U. Kolb （2010年）和R. W. Hilditch （2001年）中的公式，

$$\frac{\dot{P}}{P} = 3\frac{\dot{J}}{J} = -1.27 \times 10^{-8} \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^{1/3} M_\odot^{5/3}} \left(\frac{P_{\rm orb}}{\rm h}\right)^{-8/3} \ {\rm yr}^{-1} \tag{19}$$

我们得到 $\dot{P}$ =(−3.13 ± 0.59) × 10^{-12} 天 年$^{-1}$，这比我们观测到的数值低近5个数量级。因此，我们预计磁制动（MB）和引力波辐射（GWR）不会产生显著贡献。

为解释观测到的周期下降率，我们考察了从主星向次星的质量转移机制，以及通过外拉格朗日点 L 从系统中损失质量（和角动量）的机制。我们分别采用 R.W. Hilditch (2001年) 和 K. K. Kwee (1958年) 给出的保守质量损失和非保守质量损失公式，

$$\frac{\dot{P}}{P} = \frac{3\dot{M}_1 (M_1 - M_2)}{M_1 M_2} \tag{20}$$

$$\frac{\dot{P}}{P} = 3\dot{M}_1 \left[\frac{(M_1 + M_2)}{M_1 M_2} \frac{d^2}{a^2} - \frac{M_2}{M_1 (M_1 + M_2)}\right] \tag{21}$$

其中 d 是从双星质心到 L_2的距离，我们估算出质量转移率 M_1，该质量转移率可用于再现观测到的 P 数值，见表6。主星的热时标可表示为：

$\tau_{th} = \frac{GM_1^2}{R_1 L_1} = (7.83 \pm 2.67) \times 10^6$ 年。因此，热质量转移率 $M_1/\tau_{th} = (2.12 \pm 0.43) \times 10^{-7}$ M⊙yr^{-1}为保守质量转移率的 ~ 3.33 倍，这表明质量转移很可能是在热（开尔文–亥姆霍兹）时标上发生的。

通过对 FASTT 1558 的 ADFOSC 光谱进行分析，我们确定了该双星的大气参数。这些参数与先前报道的 LAMOST 和 Gaia DR3 数值基本一致。我们首次通过分析众所周知的色球诊断谱线 Hα 和 CaII，研究了该系统的色球活动。图 2所示 Hα 和 CaII谱线等效宽度的时间变化，揭示了一个动态演化的成线区。观测到的变化可能由温度变化、压力或密度效应，以及双星表面的不均匀性（斑点或谱斑）造成（K. Biazzo 等 2006年；T. Mitnyan 等 2020年）。PHOEBE 光变曲线模型无需进行斑点建模，这表明观测到的光谱变化可能并非完全由大尺度光球斑点造成。在所有观测中，色球 Hα 谱线均呈现反向 P Cygni 型轮廓，这可能暗示物质沿视线转移（L.-Y. Zhang 和 S.-H. Gu 2008年）。然而，仅凭这一观测特征并不能确定内落是其明确的物理起源。鉴于光谱分辨率有限，且缺少更高分辨率的光谱观测，这一解释仍属推测，有待进一步研究。我们注意到，光谱扣除程序中存在的系统不确定度，包括模板失配、连续谱归一化、仪器分辨率匹配以及残余地球大气污染，也可能对观测到的轮廓有所影响。对于这类低分辨率光谱，我们无法可靠地探测波长位移（测得的位移通常小于一个仪器分辨单元）。因此，36 条 ADFOSC 光谱中红移分量模型位移的变化（见表 7）也可能反映了光谱扣除程序的不确定度。此外，轮廓的发射分量和吸收分量的等效宽度均表现出随时间变化的特征，表明色球具有动态性。

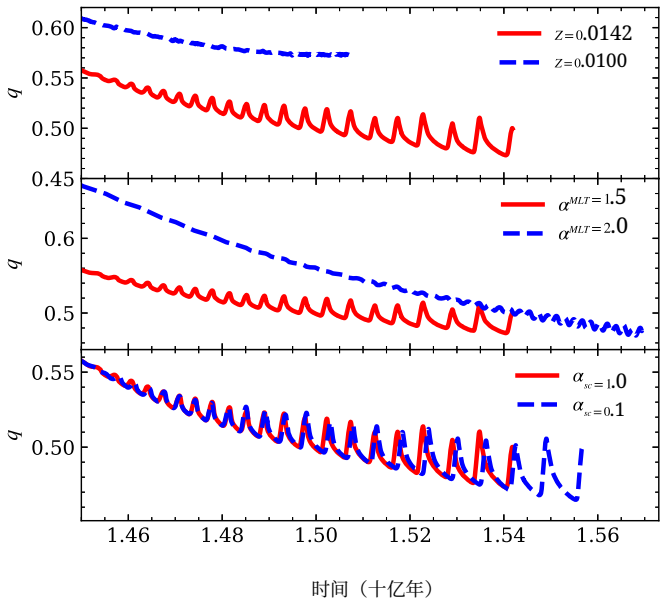

图11. 在不同金属丰度和微观物理处理设定下的质量比演化，其中 $M_{1,\,i} = 0.91\ M_\odot$, M_2 L_2 $_{,\,i} = 0.7\ M_\odot$, $P_i = 0.67$天。低金属丰度 Z 的模型（上图）因溢出而终止。混合长度参数较高的模型 α_{MLT}（中图）比红色实线表示的默认模型稍晚开始热弛豫振荡，而半对流效率参数较低的模型 α_{sc}（下图）则没有这种延迟。

我们在 MESA 中计算了一组双星模型网格，涵盖一系列初始质量和轨道周期，并采用了关于潮汐形变、质量和能量转移以及饱和磁制动的参数化方案。我们的演化计算结果与热弛豫振荡在推动接触双星向逐渐减小的质量比发生长期演化这一已提出的作用相一致。然而，没有任何模型演化至观测系统所推断的低质量比 $q \sim 0.15$；相反，当供体星达到 L_2 溢出时，模型便终止。为研究演化路径对所采用物理假设的敏感性，我们还进一步探讨了金属丰度以及

图 11所示的对流和半对流处理方法的影响。实线红色曲线对应于M.Fabry&A.Prˇsa（2025）提出的默认参数化方案，该方案用于我们的计算；而虚线蓝色曲线则展示了通过修改单个参数得到的代表性模型。尽管这些变化在一定程度上改变了演化行为，但在我们的计算所涵盖的时间尺度内，质量比并未快速下降。鉴于热弛豫振荡阶段的高计算成本，图 11中这些附加模型的终止判据设定为经历 20 次热弛豫振荡，而第 4 节的主演化网格则计算至 L_2 溢出。因此，我们无法排除这样的可能性：某些初始双星参数组合或不同的物理参数化方案，可能产生能够达到观测低质量比的演化路径。对相关参数空间进行更广泛的探索，包括对自转和恒星混合的参数化方案，超出了本研究的范围，将另行开展研究。

极低质量比接触双星的演化为双星演化模型提供了严格的检验。FASTT 1558 等系统是检验支配接触双星演化的物理参数化方案的重要观测基准。要确立接触双星如何达到如此低的质量比并最终趋于并合，持续努力使演化模型与这类极端系统相协调至关重要。

致谢

我们衷心感谢匿名审稿人提出的建设性意见和建议，这些意见和建议帮助我们提升了稿件的清晰度和质量。A.B. 感谢 Dr. Matthias Fabry 在本研究 FASTT 1558 期间提出的深刻见解并给予宝贵支持。A.B. 感谢印度政府科学技术部（DST）授予其 INSPIRE奖学金（IF230384），并感谢海得拉巴印度理工学院物理学系提供的研究设施。

观测设施：TESS、ASAS-SN、DOT:3.6m（ADFOSC）

软件：IRAF（D. Tody 1986）、astropy（Astropy Collaboration 等 2013）、scipy（P. Virtanen 等 2020）、lightkurve（Lightkurve合作组等 2018）、ULySS（M. Koleva 等 2009）、iSTARMOD（F. Labarga 和 D. Montes 2026）、PHOEBE（A. Prˇsa 和 T. Zwitter 2005）、MESA（B. Paxton 等 2011）。我们使用语言模型 ChatGPT-5 协助重组并润色了稿件中的几句话。

作者贡献

A.B.：撰写——初稿、可视化、方法学、调查研究、形式分析、概念化。**M.P.**：撰写——审阅与编辑、指导、资源、项目管理。**K. P.**：调查研究——观测、稿件修订。**N. M. T.**：可视化、调查研究。**K. M.**：指导、稿件修订。**I.T.**：调查研究。

参考文献

Abt, H. A. 1983年，《天文学与天体物理学年评》，21，343，数字对象标识符：10.1146/annurev.aa.21.090183.002015Anders, F.、Khalatyan, A.、Queiroz, A. B. A. 等 2022年，《天文学与天体物理学》，658，A91，数字对象标识符：10.1051/0004-6361/202142369Applegate, J. H. 1992年，《天体物理学杂志》，385，621，数字对象标识符：10.1086/170967Arbutina, B. 2009年，《皇家天文学会月报》，394，501，数字对象标识符：10.1111/j.1365-2966.2008.14332.xAstropy Collaboration、Robitaille, T. P.、Tollerud, E. J. 等 2013年，《天文学与天体物理学》，558，A33，数字对象标识符：10.1051/0004-6361/201322068

Azizbek, M., Liying, Z., Linjia, L., 等 2026年，arXiv 电子预印本，arXiv:2607.17650。https://arxiv.org/abs/2607.17650Biazzo, K., Frasca, A., Catalano, S., & Marilli, E.2006年，《天文学与天体物理学》，446，1129，数字对象标识符：10.1051/0004-6361:20053213Bradstreet, D. H., & Guinan, E. F. 1994年，载于《太平洋天文学会会议系列》第56卷《相互作用双星》，A. W. Shafter 编，第228页；Christopoulou, P.-E., & Papageorgiou, A. 2013年，《天文学杂志》，146，157，数字对象标识符：10.1088/0004-6256/146/6/157Conroy, K. E., Kochoska, A., Hey, D., 等 2020年，《天体物理学杂志增刊》，250，34，数字对象标识符：10.3847/1538-4365/abb4e2

Cutri, R. M., Skrutskie, M. F., van Dyk, S., 等 2003年, VizieR在线数据目录：2MASS全天点源目录 (Cutri+ 2003)；Darwin, G. H. 1879年, 《伦敦皇家学会会刊》, 29, 168, 数字对象标识符：10.1098/rspl.1879.0028；Deeg, H. J. 2020年, 《星系》, 9, 1, 数字对象标识符：10.3390/galaxies9010001；Demircan, O., & Kahraman, G. 1991年, 《天体物理与空间科学》, 181, 313, 数字对象标识符：10.1007/BF00639097；Drake, A. J., Graham, M. J., Djorgovski, S. G., 等 2014年, 《天体物理学杂志增刊》, 213, 9, 数字对象标识符：10.1088/0067-0049/213/1/9；Duchˆene, G., & Kraus, A. 2013年, 《天文学与天体物理学年评》, 51, 269, 数字对象标识符：10.1146/annurev-astro-081710-102602；Duquennoy, A., & Mayor, M. 1991年, 《天文学与天体物理学》, 248, 485；Eggleton, P. P., & Kisseleva-Eggleton, L. 2006年, 《天体物理与空间科学》, 304, 75, 数字对象标识符：10.1007/s10509-006-9078-z；Eggleton, P. P., & Tokovinin, A. A. 2008年, 《皇家天文学会月报》, 389, 869, 数字对象标识符：10.1111/j.1365-2966.2008.13596.x；Eker, Z., Demircan, O., Bilir, S., & Karatas, Y. 2006年, 《皇家天文学会月报》, 373, 1483, 数字对象标识符：10.1111/j.1365-2966.2006.11073.x；Fabry, M., Marchant, P., Langer, N., & Sana, H. 2023年, 《天文学与天体物理学》, 672, A175, 数字对象标识符：10.1051/0004-6361/202346277；Fabry, M., & Prˇsa, A. 2025, 《天体物理学杂志》, 995, 19, 数字对象标识符：10.3847/1538-4357/ae1612；Flannery, B. P. 1976年, 《天体物理学杂志》, 205, 217, 数字对象标识符：10.1086/154266；Flower, P. J. 1996, 《天体物理学杂志》, 469, 355, 数字对象标识符：10.1086/177785；Foreman-Mackey, D., Conley, A., Meierjurgen Farr, W., 等 2013年, emcee：MCMC锤子, 《天体物理学源代码库》, 记录编号 ascl:1303.002 http://ascl.net/1303.002；Gaia Collaboration. 2021年, 《天文学与天体物理学》, 649, A1, 数字对象标识符：10.1051/0004-6361/202039657；Gettel, S. J., Geske, M. T., & McKay, T. A. 2006年, 《天文学杂志》, 131, 621, 数字对象标识符：10.1086/498016；Henden, A. A., & Stone, R. C. 1998年, 《天文学杂志》, 115, 296, 数字对象标识符：10.1086/300174；Hilditch, R. W. 2001年, 《近密双星导论》；Husser, T.-O., Wende-von Berg, S., Dreizler, S., 等 2013年, 《天文学与天体物理学》, 553, A6, 数字对象标识符：10.1051/0004-6361/201219058；Hut, P. 1980年, 《天文学与天体物理学》, 92, 167；Irwin, J. B. 1952年, 《天体物理学杂志》, 116, 211, 数字对象标识符：10.1086/145604；Jayasinghe, T., Kochanek, C. S., Stanek, K. Z., 等 2018年, 《皇家天文学会月报》, 477, 3145, 数字对象标识符：10.1093/mnras/sty838；Jermyn, A. S., Bauer, E. B., Schwab, J., 等 2023年, 《天体物理学杂志增刊》, 265, 15, 数字对象标识符：10.3847/1538-4365/acae8d；Jiang, D., Chen, K., Li, J., 等 2026年, 《天体物理学杂志》, 998, 232, 数字对象标识符：10.3847/1538-4357/ae3720 Kjurkchieva, D. P., Popov, V. A., Eneva, Y., & Petrov, N. I. 2019年, 《天文学与天体物理学研究》, 19, 014, 数字对象标识符：10.1088/1674-4527/19/1/14 Kolb, U. 2010 年 , 极端环境天体物理学 Koleva, M., Prugniel, P., Bouchard, A., & Wu, Y. 2009年, 《天文学与天体物理学》 , 501, 1269, 数字对象标识符 : 10.1051/0004-6361/200811467 Kouzuma, S. 2023年, 《天体物理学杂志》, 958, 84, 数字对象标识符：10.3847/1538-4357/ad03e1 Kumar, B., Omar, A., Maheswar, G., 等 2018年, 列日皇家科学学会公报, 87, 29 Kwee, K. K. 1958年, 《荷兰天文学公报》, 14, 131 Kwee, K. K., & van Woerden, H. 1956年, 《荷兰天文学公报》, 12, 327 Labarga, F., & Montes, D. 2026年, 《天文学杂志》, 171, 15, 数字对象标识符: 10.3847/1538-3881/ae173e Lai, Y., Li, K., Murillo, R. M., 等 2026年, arXiv 电子预印本, arXiv:2608.28066, 数字对象标识符：10.48550/arXiv.2608.28066 Li, K., Xia, Q.-Q., Kim, C.-H., 等 2021年, 《天文学杂志》, 162, 13, 数字对象标识符：10.3847/1538-3881/abfc53 Li, L., & Zhang, F. 2006年, 《皇家天文学会月报》, 369, 2001, 数字对象标识符：10.1111/j.1365-2966.2006.10462.x Lightkurve合作组, Cardoso, J. V. d. M., Hedges,C., 等 2018年, Lightkurve：使用 Python 对开普勒和 TESS 时间序列进行分析, 天体物理学源代码库, 记录编号 ascl:1812.013 http://ascl.net/1812.013 Liu, L., Qian, S., Li, K., 等 2020年, 《天体物理与空间科学》, 365, 71, 数字对象标识符: 10.1007/s10509-020-03784-8 Lohr, M. E., Norton, A. J., Kolb, U. C., 等 2012年, 《天文学与天体物理学》, 542, A124, 数字对象标识符 : 10.1051/0004-6361/201219158 Lucy, L. B. 1967年, 《天文学杂志》, 65, 89 Lucy, L. B. 1968年, 《天体物理学杂志》 , 151, 1123, 数字对象标识符 : 10.1086/149510 Lucy, L. B. 1968年, 《天体物理学杂志》, 153, 877, 数字对象标识符: 10.1086/149712 Lucy, L. B. 1976年, 《天体物理学杂志》 , 205, 208, 数字对象标识符 : 10.1086/154265 Luo, A.-L., Zhao, Y.-H., Zhao, G., 等 2015年, 《天文学与天体物理学研究》, 15, 1095, 数字对象标识符：10.1088/1674-4527/15/8/002 Menon, A., Langer, N., de Mink, S. E., 等 2021年, 《皇家天文学会月报》, 507, 5013, 数字对象标识符: 10.1093/mnras/stab2276 Mitnyan, T., Szalai, T., B´odi, A., 等 2020年, 《天文学与天体物理学》, 635, A89, 数字对象标识符: 10.1051/0004-6361/201937214 Mochnacki, S. W. 1981年, 《天体物理学杂志》, 245, 650, 数字对象标识符：10.1086/158841 Moe, M., & Di Stefano, R. 2017年, 《天体物理学杂志增刊》, 230, 15, 数字对象标识符：10.3847/1538-4365/aa6fb6 Omar, A., Kumar, T. S., Krishna Reddy, B., Pant, J., & Mahto, M. 2019年, arXiv 电子预印本, arXiv:1902.05857, 数字对象标识符：10.48550/arXiv.1902.05857 Panchal, A., & Li, K. 2026年, 《天文学杂志》, 171, 347, 数字对象标识符：10.3847/1538-3881/ae5f8f Panchal, D., Kumar, T. S., Omar, A., & Misra, K. 2023年, 《天文望远镜、仪器与系统》, 9, 018002, 数字对象标识符: 10.1117/1.JATIS.9.1.018002

Paxton, B., Bildsten, L., Dotter, A., 等 2011年, 《天体物理学杂志增刊》, 192, 3, 数字对象标识符: 10.1088/0067-0049/192/1/3Paxton, B., Cantiello, M., Arras, P., 等 2013年, 《天体物理学杂志增刊》, 208, 4, 数字对象标识符: 10.1088/0067-0049/208/1/4Paxton, B., Marchant, P., Schwab, J., 等 2015年, 《天体物理学杂志增刊》, 220, 15, 数字对象标识符: 10.1088/0067-0049/220/1/15Paxton, B., Schwab, J., Bauer, E. B., 等 2018年, 《天体物理学杂志增刊》, 234, 34, 数字对象标识符: 10.3847/1538-4365/aaa5a8Paxton, B., Smolec, R., Schwab, J., 等 2019年, 《天体物理学杂志增刊》, 243, 10, 数字对象标识符 : 10.3847/1538-4365/ab2241Pejcha, O. 2014年, 《天体物理学杂志》, 788, 22, 数字对象标识符: 10.1088/0004-637X/788/1/22Peˇsta, M., & Pejcha, O. 2023年, 《天文学与天体物理学》, 672, A176, 数字对象标识符: 10.1051/0004-6361/202245613Pojmanski, G. 1997年, 《天文学报》, 47, 467, 数字对象标识符: 10.48550/arXiv.astro-ph/9712146Poro, A., Paki, E., Alicavus, F., & Michel, R. 2026年a, 《天体物理学杂志》, 998, 108, 数字对象标识符: 10.3847/1538-4357/ae3375Poro, A., Poggiani, R., Foroutanfar, A., 等 2026年b, 《天文学与天体物理学》, 710, A49, 数字对象标识符: 10.1051/0004-6361/202558462Poro, A., Tanriver, M., Michel, R., & Paki, E. 2024年a, 《太平洋天文学会刊》, 136, 024201, 数字对象标识符: 10.1088/1538-3873/ad1ed3Poro, A., Tanriver, M., Sarvari, E., 等 2024年b, 《天文学与天体物理学研究》, 24, 045018, 数字对象标识符: 10.1088/1674-4527/ad30b2Pribulla, T., Chochol, D., Tremko, J., & Kreiner, J. M. 2005年, 收录于《太平洋天文学会会议系列》第335卷《天体物理学中的光时效应：O-C 图的成因与解决方法》, 编辑：C. Sterken，103 Pribulla, T., Kreiner, J. M., & Tremko, J. 2003年, 斯卡尔纳特普莱索天文台文集, 33, 38 Prˇsa, A. 2018年, 食双星的建模与分析：PHOEBE 的理论与设计原理，数字对象标识符: 10.1088/978-0-7503-1287-5Prˇsa, A., & Zwitter, T. 2005年, 《天体物理学杂志》, 628, 426, 数字对象标识符: 10.1086/430591Prˇsa, A., Kochoska, A., Conroy, K. E., 等 2022年, 《天体物理学杂志增刊》, 258, 16, 数字对象标识符: 10.3847/1538-4365/ac324aQian, S. 2001年, 《皇家天文学会月报》, 328, 914, 数字对象标识符: 10.1046/j.1365-8711.2001.04921.xQian, S. 2003年, 《皇家天文学会月报》, 342, 1260, 数字对象标识符: 10.1046/j.1365-8711.2003.06627.xQian, S.-B., Zhu, L.-Y., Liu, L., 等 2020年, 《天文学与天体物理学研究》, 20, 163, 数字对象标识符: 10.1088/1674-4527/20/10/163Raghavan, D., McAlister, H. A., Henry, T. J., 等 2010年, 《天体物理学杂志增刊》, 190, 1, 数字对象标识符: 10.1088/0067-0049/190/1/1Rasio, F. A. 1995年, 《天体物理学杂志快报》, 444, L41, 数字对象标识符: 10.1086/187855 Ricker, G. R.、Winn, J. N.、Vanderspek, R. 等 2015年, 《天文望远镜、仪器与系统》，1，014003，数字对象标识符: 10.1117/1.JATIS.1.1.014003 Robertson, J. A. 与 Eggleton, P. P. 1977年, 《皇家天文学会月报》，179，359，数字对象标识符: 10.1093/mnras/179.3.359 Ruci´nski, S. M. 1969年, 《天文学报》，19，245 Rucinski, S. M. 1998年, 《天文学杂志》，116，2998，数字对象标识符：10.1086/300644 Rucinski, S. M. 2001年, 《天文学杂志》，122，1007，数字对象标识符：10.1086/321153 Rucinski, S. M. 2002年, 《太平洋天文学会刊》，114，1124，数字对象标识符：10.1086/342677 Sarvari, E.、Poro, A.、Michel, R. 等 2026年, 《太平洋天文学会刊》，138，034203，数字对象标识符：10.1088/1538-3873/ae4a4d Shapley, H. 1948年，载于《哈佛天文台专著》，第7卷，249 Shappee, B.、Prieto, J.、Stanek, K. Z. 等 2014年，载于《美国天文学会会议摘要》，第223卷，236.03 Stepie´n, K. 2006年, 《天文学报》，56，199，数字对象标识符：10.48550/arXiv.astro-ph/0510464 Stepie´n, K. 与 Gazeas, K. 2012年, 《天文学报》，62，153，数字对象标识符: 10.48550/arXiv.1207.3929 Szymanski, M.、Kubiak, M. 与 Udalski, A. 2001年, 《天文学报》，51，259，数字对象标识符: 10.48550/arXiv.astro-ph/0110314 Taam, R. E. 与 Sandquist, E. L. 2000年, 《天文学与天体物理学年评》，38，113，数字对象标识符：10.1146/annurev.astro.38.1.113 Terrell, D. 与 Wilson, R. E. 2005年, 《天体物理与空间科学》，296，221，数字对象标识符: 10.1007/s10509-005-4449-4 Tody, D. 1986年，载于《国际光学工程学会（SPIE）会议系列》，第627卷，《天文学仪器 VI》，编者：D. L. Crawford，733，数字对象标识符：10.1117/12.968154 Torres, G. 2010年, 《天文学杂志》，140，1158，数字对象标识符：10.1088/0004-6256/140/5/1158 Tylenda, R.、Hajduk, M.、Kami´nski, T. 等 2011年, 《天文学与天体物理学》，528，A114，数字对象标识符：10.1051/0004-6361/201016221 van Hamme, W. 1993年, 《天文学杂志》，106，2096，数字对象标识符: 10.1086/116788 Virtanen, P.、Gommers, R.、Oliphant, T. E. 等 2020年, 《自然·方法》，17，261，数字对象标识符: 10.1038/s41592-019-0686-2 Wadhwa, S. S.、De Horta, A.、Filipovi´c, M. D. 等 2021年, 《皇家天文学会月报》，501，229，数字对象标识符：10.1093/mnras/staa3637 Wadhwa, S. S.、Landin, N. R.、Arbutina, B. 等 2024年, 《皇家天文学会月报》，535，2494，数字对象标识符：10.1093/mnras/stae2511 Webbink, R. F. 1977年, 《天体物理学杂志》，215，851，数字对象标识符：10.1086/155422 Wellstein, S.、Langer, N. 与 Braun, H. 2001年, 《天文学与天体物理学》，369，939，数字对象标识符: 10.1051/0004-6361:20010151 Wo´zniak, P. R.、Vestrand, W. T.、Akerlof, C. W. 等 2004年, 《天文学杂志》，127，2436，数字对象标识符：10.1086/382719 Wu, Y.、Singh, H. P.、Prugniel, P.、Gupta, R. 与 Koleva, M. 2011年, 《天文学与天体物理学》，525，A71，数字对象标识符：10.1051/0004-6361/201015014 Yakut, K. 与 Eggleton, P. P. 2005年, 《天体物理学杂志》，629，1055，数字对象标识符：10.1086/431300

Yang, Y.-G. 与 Qian,S.-B. 2015年，《天文学杂志》，150，69，数字对象标识符：10.1088/0004-6256/150/3/69Yıldız, M. 2014年，《皇家天文学会月报》，437，185，数字对象标识符：10.1093/mnras/stt1874Yildiz, M. 与 Doˇgan,T. 2013年，《皇家天文学会月报》，430，2029，数字对象标识符：10.1093/mnras/stt028Yu, Y.-X.、Li, Q.、Huang, H.-P.、Hu, K. 与 Xiang, F.-Y. 2022年，NewA，91，101695，数字对象标识符：10.1016/j.newast.2021.101695Yu, Y.-X.、Liu, X.-T.、Meng, Z.-B. 等 2026年，《天文学杂志》，171，254，数字对象标识符：10.3847/1538-3881/ae4fb9

Zhang, J., Qian, S.-B., Zhu, L.-Y., & Li, X.-Z.2026年，《天文学与天体物理学杂志增刊》，282，17，数字对象标识符：10.3847/1538-4365/ae21ceZhang, L.-Y., & Gu,S.-H. 2008年，《天文学与天体物理学》，487，709，数字对象标识符：10.1051/0004-6361:200809688Zhang, X.-D. 2024，《科学报告》，14，13011，数字对象标识符：10.1038/s41598-024-63833-yZhang, X.-D., Qian, S.-B., & Liao,W.-P. 2020年，《皇家天文学会月报》，492，4112，数字对象标识符：10.1093/mnras/staa079Zhou, X., Qian, S.-B., Zhang, J., 等 2016，《天体物理学杂志》，817，133，数字对象标识符：10.3847/0004-637X/817/2/133Zwitter, T., Munari, U., Marrese, P. M., 等 2003年，《天文学与天体物理学》，404，333，数字对象标识符：10.1051/0004-6361:20030446

附录

表 7. FASTT 1558 的 Hα 和 CaII 谱线测得的等效宽度。观测于2025年11月16日进行。$\Delta\lambda_{\mathrm{H}\alpha,\ \mathrm{chrom}}$ 表示红移分量相对于 Hα 静止系线心（6562.8 ˚A）的位移，数据来自色球光谱。误差以 1σ 不确定度表示。

Time (印度标准时间)	BJD	相位	Hα EW (Å)	Ca II EW (Å)	$\Delta\lambda_{\mathrm{H}\alpha,\text{色球}}$ (Å)
19:17:48.850	2460996.077236	0.511038	3.77 ± 0.04	1.92 ± 0.06	7.73 ± 0.12
19:28:25.196	2460996.084601	0.526467	3.64 ± 0.04	1.72 ± 0.05	7.65 ± 0.11
19:39:01.719	2460996.091967	0.541900	3.60 ± 0.04	1.83 ± 0.05	4.34 ± 0.07
19:49:38.064	2460996.099332	0.557330	3.55 ± 0.04	1.90 ± 0.07	7.88 ± 0.10
20:00:48.229	2460996.107087	0.573579	3.59 ± 0.05	1.68 ± 0.06	8.09 ± 0.11
20:09:24.565	2460996.113063	0.586098	3.68 ± 0.05	1.78 ± 0.07	8.16 ± 0.11
20:18:00.914	2460996.119039	0.598618	3.69 ± 0.05	1.61 ± 0.06	8.00 ± 0.11
20:26:37.241	2460996.125014	0.611137	3.58 ± 0.05	1.96 ± 0.08	7.94 ± 0.12
20:35:13.590	2460996.130990	0.623656	3.55 ± 0.05	2.04 ± 0.09	7.93 ± 0.12
20:43:49.938	2460996.136965	0.636176	3.47 ± 0.05	2.09 ± 0.07	8.19 ± 0.12
20:52:26.455	2460996.142943	0.648700	3.88 ± 0.04	1.90 ± 0.08	8.25 ± 0.10
21:01:02.806	2460996.148919	0.661219	3.66 ± 0.04	2.30 ± 0.09	8.19 ± 0.11
21:10:15.396	2460996.155314	0.674618	3.64 ± 0.05	2.42 ± 0.12	8.27 ± 0.11
21:15:51.737	2460996.159206	0.682773	3.65 ± 0.06	2.70 ± 0.13	8.47 ± 0.10
21:21:28.087	2460996.163099	0.690928	3.69 ± 0.05	2.94 ± 0.22	5.37 ± 0.06
21:27:04.432	2460996.166991	0.699083	3.55 ± 0.06	2.49 ± 0.13	5.46 ± 0.06
21:31:40.803	2460996.170190	0.705784	3.70 ± 0.05	3.63 ± 0.28	5.37 ± 0.06
21:38:17.137	2460996.174777	0.715394	3.63 ± 0.05	3.93 ± 0.28	8.42 ± 0.08
21:43:47.953	2460996.178605	0.723415	3.59 ± 0.05	2.92 ± 0.15	8.15 ± 0.08
21:49:29.812	2460996.182561	0.731704	3.68 ± 0.06	2.85 ± 0.16	8.36 ± 0.09
21:55:06.138	2460996.186454	0.739859	3.57 ± 0.05	2.20 ± 0.10	5.37 ± 0.06
22:00:42.471	2460996.190346	0.748014	3.64 ± 0.06	2.99 ± 0.19	8.28 ± 0.06
22:06:18.816	2460996.194239	0.756169	3.65 ± 0.06	2.67 ± 0.16	8.36 ± 0.06
22:15:16.671	2460996.200463	0.769210	3.61 ± 0.06	2.16 ± 0.12	9.01 ± 0.08
22:20:53.022	2460996.204356	0.777365	3.61 ± 0.06	2.13 ± 0.12	7.55 ± 0.08
22:26:29.337	2460996.208248	0.785520	3.77 ± 0.06	2.34 ± 0.12	6.71 ± 0.06
22:32:05.696	2460996.212141	0.793675	3.80 ± 0.06	3.23 ± 0.25	7.65 ± 0.06
22:37:42.026	2460996.216033	0.801830	3.70 ± 0.06	2.88 ± 0.16	6.95 ± 0.08
22:43:18.352	2460996.219925	0.809985	3.56 ± 0.06	3.08 ± 0.20	6.92 ± 0.09
22:48:54.687	2460996.223818	0.818140	3.82 ± 0.06	3.53 ± 0.25	6.80 ± 0.07
22:55:36.753	2460996.228471	0.827888	3.68 ± 0.06	2.60 ± 0.12	7.44 ± 0.07
23:01:13.094	2460996.232363	0.836043	3.62 ± 0.06	2.47 ± 0.13	6.70 ± 0.07
23:06:49.433	2460996.236256	0.844198	3.71 ± 0.06	2.31 ± 0.13	6.75 ± 0.06
23:12:25.753	2460996.240148	0.852353	3.64 ± 0.06	2.69 ± 0.14	7.17 ± 0.09
23:23:42.025	2460996.247974	0.868750	3.74 ± 0.06	2.26 ± 0.11	6.81 ± 0.07
23:29:58.039	2460996.252326	0.877867	3.61 ± 0.06	2.39 ± 0.11	6.80 ± 0.10

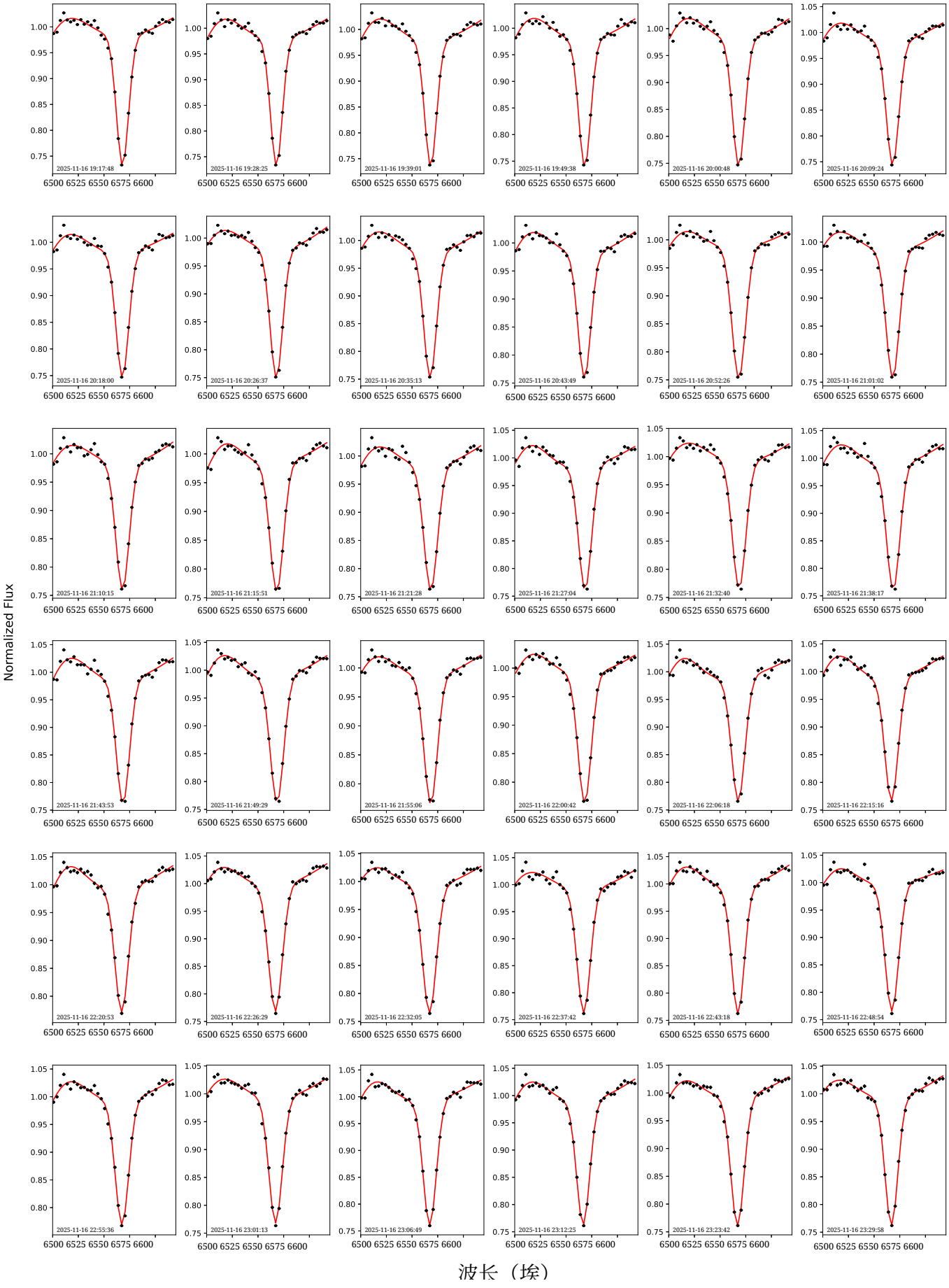

图 12. 氢α 吸收线及拟合模型。

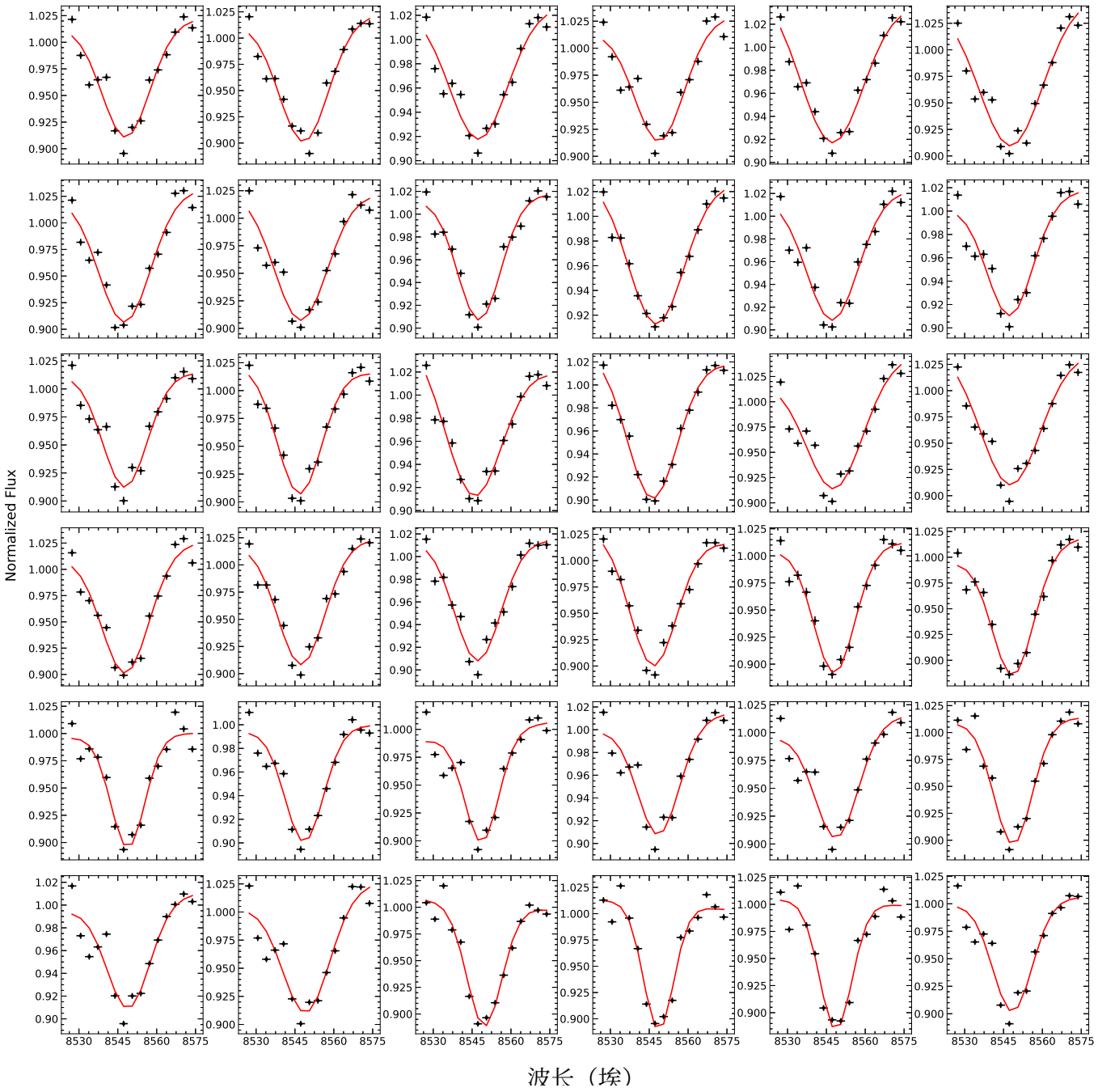

图13. CaII 吸收线及拟合模型。

表8。 主极小值时刻 和FASTT 1558的O−C值。极小值时刻是在减去2,400,00后报告的 0.

食时 (BJD)	误差 (BJD)	O-C (天)	历元编号 (天)	食时 (BJD)	误差 (BJD)	O-C (天)	历元编号 (天)
*56534.5058	0.0017	-0.0004	3637	60224.5156	0.0006	-0.0356	11368
*56785.0843	0.0027	-0.0071	4162	60224.9907	0.0009	-0.0378	11369
*56883.8860	0.0011	-0.0083	4369	60225.4682	0.0010	-0.0377	11370
*57185.0657	0.0012	-0.0080	5000	60225.9438	0.0008	-0.0393	11371
*57359.7616	0.0011	-0.0057	5366	60226.4214	0.0006	-0.0390	11372
*57499.1292	0.0018	-0.0110	5658	60226.9011	0.0009	-0.0367	11373
*57639.9284	0.0011	-0.0169	5953	60227.3753	0.0009	-0.0397	11374
*57941.1041	0.0012	-0.0208	6584	60227.8566	0.0008	-0.0358	11375
*58310.0558	0.0025	-0.0259	7357	60228.3326	0.0010	-0.0371	11376
*58430.8128	0.0016	-0.0270	7610	60228.8131	0.0005	-0.0339	11377
†53637.7419	-	-0.0002	-2432	60229.2862	0.0008	-0.0381	11378
†54798.5479	-	0	0	60229.7627	0.0012	-0.0389	11379
59447.9472	0.0001	-0.0287	9741	60230.2401	0.0010	-0.0388	11380
59448.4247	0.0001	-0.0286	9742	60230.7174	0.0007	-0.0388	11381
59448.9018	0.0001	-0.0287	9743	60231.1955	0.0007	-0.0379	11382
59449.3792	0.0001	-0.0286	9744	60231.6725	0.0007	-0.0383	11383
59449.8565	0.0001	-0.0287	9745	60232.1495	0.0008	-0.0386	11384
59450.3334	0.0001	-0.0291	9746	60232.6271	0.0010	-0.0383	11385
59450.8108	0.0001	-0.0289	9747	60533.8028	0.0008	-0.0421	12016
59451.2881	0.0001	-0.0290	9748	60534.2798	0.0007	-0.0424	12017
59461.7884	0.0001	-0.0294	9770	60534.7573	0.0009	-0.0422	12018
59462.2660	0.0001	-0.0291	9771	60535.2335	0.0009	-0.0433	12019
59462.7433	0.0001	-0.0291	9772	60535.7111	0.0007	-0.0430	12020
59463.2207	0.0001	-0.0289	9773	60536.1892	0.0008	-0.0422	12021
59463.6978	0.0001	-0.0292	9774	60536.6671	0.0009	-0.0416	12022
59464.1753	0.0001	-0.0290	9775	60538.5740	0.0005	-0.0439	12026
59464.6526	0.0001	-0.0290	9776	60539.0546	0.0008	-0.0406	12027
59465.1299	0.0001	-0.0290	9777	60539.5297	0.0008	-0.0428	12028
59465.6071	0.0001	-0.0292	9778	60540.0080	0.0009	-0.0418	12029
59466.0847	0.0001	-0.0289	9779	60540.4860	0.0007	-0.0411	12030
59466.5618	0.0001	-0.0291	9780	60540.9617	0.0007	-0.0428	12031
59467.0393	0.0001	-0.0289	9781	60541.4395	0.0011	-0.0423	12032
59467.5164	0.0001	-0.0290	9782	60542.3929	0.0008	-0.0435	12034
59467.9932	0.0001	-0.0296	9783	60542.8717	0.0013	-0.0420	12035
59468.4709	0.0001	-0.0291	9784	60544.7817	0.0012	-0.0412	12039
59468.9483	0.0001	-0.0291	9785	60545.7363	0.0007	-0.0412	12041
59469.4256	0.0001	-0.0291	9786	60546.2121	0.0009	-0.0427	12042
59469.9027	0.0001	-0.0293	9787	60546.6932	0.0005	-0.0389	12043
59470.3800	0.0001	-0.0293	9788	60547.1657	0.0009	-0.0436	12044
60209.2380	0.0010	-0.0394	11336	60547.6447	0.0009	-0.0420	12045
60210.1928	0.0006	-0.0392	11338	60548.1221	0.0009	-0.0419	12046
60210.6684	0.0008	-0.0409	11339	60549.0771	0.0011	-0.0416	12048
60211.1476	0.0008	-0.0391	11340	60549.5533	0.0009	-0.0427	12049
60211.6244	0.0013	-0.0395	11341	60550.0317	0.0008	-0.0415	12050
60212.1024	0.0008	-0.0388	11342	60550.5082	0.0008	-0.0423	12051
60212.5805	0.0009	-0.0380	11343	60550.9828	0.0005	-0.0451	12052
60213.0576	0.0008	-0.0382	11344	60551.4615	0.0005	-0.0437	12053
60213.5349	0.0008	-0.0383	11345	60551.9402	0.0009	-0.0422	12054

食时 (BJD)	误差 (BJD)	O-C (天)	历元编号 (天)	食时 (BJD)	误差 (BJD)	O-C （天）	历元编号 （天）
60214.0118	0.0008	-0.0387	11346	60552.4189	0.0013	-0.0409	12055
60214.4905	0.0011	-0.0373	11347	60553.3717	0.0009	-0.0427	12057
60214.9662	0.0014	-0.0389	11348	60553.8491	0.0009	-0.0426	12058
60215.4437	0.0008	-0.0387	11349	60554.3262	0.0008	-0.0428	12059
60215.9205	0.0006	-0.0392	11350	60555.2817	0.0009	-0.0419	12061
60216.3981	0.0009	-0.0389	11351	60555.7584	0.0007	-0.0426	12062
60216.8761	0.0008	-0.0382	11352	60556.2381	0.0013	-0.0401	12063
60217.3527	0.0010	-0.0389	11353	60556.7141	0.0011	-0.0414	12064
60222.1255	0.0007	-0.0391	11363	60557.1917	0.0008	-0.0411	12065
60222.6034	0.0009	-0.0386	11364	60557.6647	0.0024	-0.0455	12066
60223.5591	0.0010	-0.0375	11366	60558.1466	0.0009	-0.0408	12067
60224.0363	0.0009	-0.0376	11367	60559.0992	0.0008	-0.0428	12069

*: ASAS-SN 数据。 †: VarAstro数据。其他所有数据均来自 TESS。

表9。 次星极小值时刻及 FASTT 1558 的 O−C值。极小值时刻为减去 2,400,000 后的结果。

食时 (BJD)	误差 (BJD)	O-C (天)	历元编号 (天)	食时 (BJD)	误差 (BJD)	O-C (天)	历元编号 (天)
†54798.7869	-	0	0	60228.0919	0.0008	-0.0395	11375
†55864.6069	-	0.0021	2233	60228.5744	0.0022	-0.0343	11376
59448.1858	0.0001	-0.0292	9741	60229.0486	0.0008	-0.0374	11377
59448.6631	0.0001	-0.0292	9742	60229.5311	0.0003	-0.0322	11378
59449.1406	0.0001	-0.0290	9743	60230.0039	0.0013	-0.0366	11379
59449.6178	0.0001	-0.0291	9744	60230.4803	0.0011	-0.0376	11380
59450.5724	0.0001	-0.0291	9746	60230.9515	0.0004	-0.0436	11381
59451.0499	0.0001	-0.0289	9747	60231.4403	0.0004	-0.0323	11382
59451.5269	0.0001	-0.0292	9748	60231.9064	0.0004	-0.0434	11383
59461.5504	0.0001	-0.0291	9769	60232.3848	0.0009	-0.0422	11384
59462.0276	0.0001	-0.0292	9770	60534.0432	0.0014	-0.0406	12016
59462.5050	0.0001	-0.0292	9771	60534.5196	0.0051	-0.0416	12017
59462.9821	0.0001	-0.0293	9772	60535.0001	0.0069	-0.0383	12018
59463.4596	0.0001	-0.0291	9773	60535.4798	0.0005	-0.0359	12019
59463.9368	0.0001	-0.0292	9774	60535.9552	0.0008	-0.0379	12020
59464.4142	0.0001	-0.0291	9775	60536.9020	0.0006	-0.0457	12022
59464.8914	0.0001	-0.0293	9776	60537.8593	0.0008	-0.0430	12024
59465.3689	0.0001	-0.0291	9777	60538.3433	0.0005	-0.0363	12025
59465.8461	0.0001	-0.0292	9778	60538.8191	0.0005	-0.0378	12026
59466.3236	0.0001	-0.0289	9779	60539.7681	0.0014	-0.0433	12028
59466.8007	0.0001	-0.0291	9780	60540.7301	0.0005	-0.0360	12030
59467.2778	0.0001	-0.0294	9781	60541.2041	0.0007	-0.0393	12031
59467.7553	0.0001	-0.0292	9782	60541.6793	0.0009	-0.0414	12032
59468.2324	0.0001	-0.0294	9783	60542.6320	0.0022	-0.0433	12034
59468.7099	0.0001	-0.0292	9784	60543.1079	0.0006	-0.0447	12035
59469.1871	0.0001	-0.0293	9785	60545.0202	0.0010	-0.0417	12039
59469.6646	0.0001	-0.0291	9786	60545.9732	0.0019	-0.0433	12041
59470.1418	0.0001	-0.0292	9787	60546.4523	0.0008	-0.0415	12042
60209.4779	0.0011	-0.0385	11336	60546.9268	0.0034	-0.0443	12043
60210.9089	0.0012	-0.0395	11339	60547.4078	0.0009	-0.0406	12044
60211.8664	0.0008	-0.0366	11341	60547.8866	0.0010	-0.0391	12045
60212.3390	0.0011	-0.0413	11342	60548.3578	0.0009	-0.0452	12046
60215.1994	0.0007	-0.0447	11348	60548.8386	0.0015	-0.0417	12047
60215.6874	0.0007	-0.0341	11349	60549.3169	0.0010	-0.0406	12048
60216.1592	0.0006	-0.0395	11350	60549.7939	0.0011	-0.0410	12049
60216.6396	0.0009	-0.0364	11351	60550.2738	0.0010	-0.0384	12050
60217.1129	0.0006	-0.0404	11352	60550.7525	0.0005	-0.0370	12051
60222.8458	0.0007	-0.0352	11364	60551.7067	0.0005	-0.0374	12053
60223.3253	0.0005	-0.0329	11365	60555.9996	0.0004	-0.0403	12062
60223.7956	0.0009	-0.0400	11366	60556.4755	0.0018	-0.0417	12063
60225.7064	0.0019	-0.0384	11370	60557.4252	0.0004	-0.0465	12065
60226.1872	0.0018	-0.0348	11371	60557.9112	0.0013	-0.0379	12066
60226.6657	0.0005	-0.0337	11372	60558.3864	0.0011	-0.0400	12067
60227.1423	0.0008	-0.0344	11373	60558.8624	0.0019	-0.0413	12068

†: VarAstro数据。所有其他数据均来自TE SS.