第 44 卷　第 3 期
2026 年 9 月

天　文　学　进　展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 44, No. 3
Sept., 2026

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2026.03.02

凌星法探测系外行星进展

胡泉泉 [1,2]，葛　健 [1]

(1. 中国科学院 上海天文台，上海 200030；　2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院，北京 100049)

摘要： 近年来，随着空间测光望远镜的成功运行和数据分析方法的不断改进，凌星法在系外行星探测领域取得了显著进展，产生了一系列的重要发现。介绍凌星法的基本原理、已经运行的主要地面和空间望远镜、数据分析方法的演变以及未来的研究方向；讨论凌星法在探测类太阳恒星周围的宜居类地行星方面独特的优势，以及机器学习方法等新兴技术在数据处理中的应用和发展；最后展望了未来随着新一代空间望远镜的发射和数据分析技术的进步，包括人工智能的应用，有望依靠凌星法首次发现绕着类太阳恒星的宜居类地行星。

关键词： 系外行星；测光；凌星法

中图分类号： P141.2　**文献标识码：** A

1 引　言

凌星法（transit method）通过监测恒星亮度随行星经过恒星前方时产生的周期性亮度下降来探测系外行星，此方法已成为当前探测系外行星最有效的方法之一[1]。系外行星的发现和表征，以及对它们所属种群的统计规律的研究，对于理解行星系统的形成和演化，寻找潜在宜居世界以及宇宙中的生命现象等均具有重要意义。图 1 为使用不同方法确认的系外行星数量。

1999 年，HD 209458 b 成为首个被确认存在凌星现象的系外行星。该行星最初通过径向速度法被发现[2]，随后由 Charbonneau 和 Henry 领导的两个团队独立观测到其凌星现象[3, 4]，观测结果显示行星经过恒星前方时产生约 1.7% 的恒星亮度的周期性下降。这项发现首次实现了对系外行星半径和密度的直接测量，确立了凌星法的实用性。

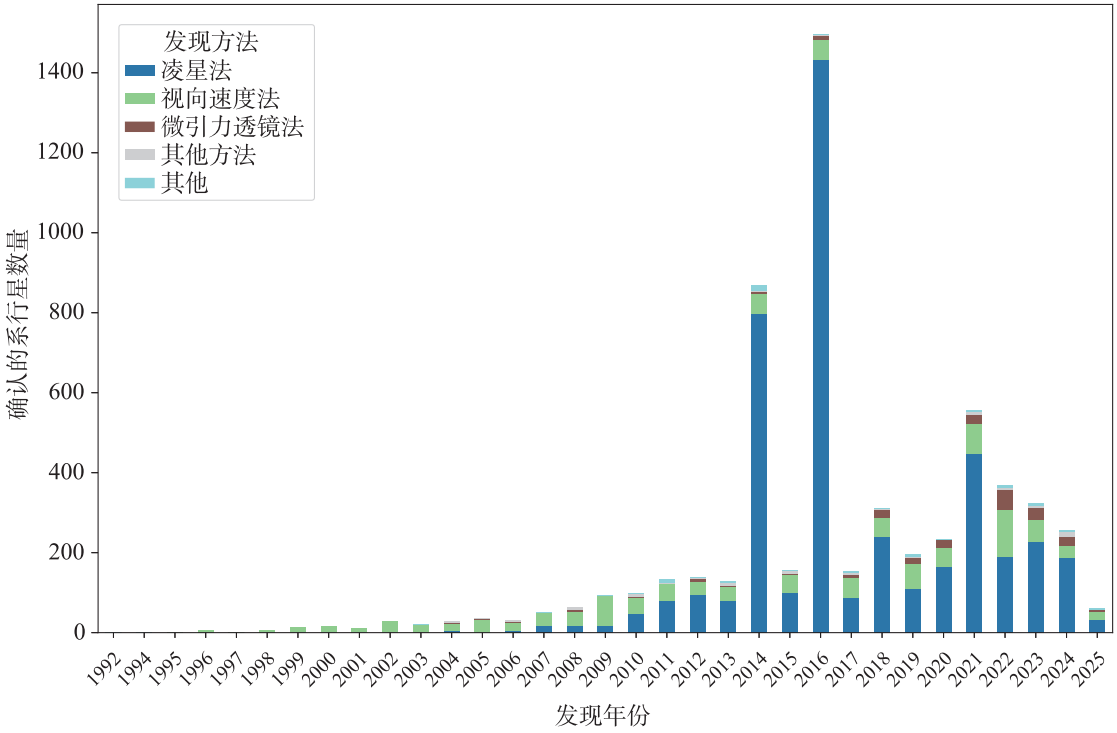
2002 年，OGLE 项目利用凌星法直接发现了行星 OGLE-TR-56b[5]，这是首次通过凌星法直接探测到系外行星，标志着凌星法从验证工具转变为独立的发现手段。

近年来，CoRoT、Kepler、TESS、CHEOPS 等空间望远镜的成功运行在系外行星的搜寻领域发挥了关键作用。这些卫星能够在太空中避开地球大气层的干扰，持续长时间地观测大

收稿日期： 2025-08-26；　**修回日期：** 2025-12-27

资助项目： 太空探源专项

通讯作者： 葛健, jge@shao.ac.cn



注：在 Kepler 任务之前，系外行星的发现主要依赖于视向速度法。Kepler 任务的成功运行使得凌星法成为主流探测方法。在 2014 和 2016 年确认的系外行星数量较之前的数量猛增，其均来自 Kepler 的发现。数据来源于 NASA Exoplanet Archive[1]。

图 1　每年发现的系外行星数量（截至 2025 年 5 月 9 日）

量恒星，从而获取超高精度的恒星光变数据，极大推动了系外行星的发现与研究。

Kepler 望远镜任务是天基望远镜中最成功的系外行星探测任务之一。Kepler 任务由美国 NASA 主导，于 2009 年 3 月发射，凝视一个名为“Kepler 区域”的太空区域，监测大约 17 万颗 FGKM 型主序星[6]。Kepler 卫星发现了 2 784 颗已认证的系外行星[1]，并揭示了宇宙中行星的多样性。例如 Kepler 卫星发现了约 90% 有行星的系统中存在轨道周期大部分在太阳系水星轨道以内的，且大小介于地球和海王星（约 4 倍地球大小）之间的超级地球和亚海王星[7–11]；这些发现核实了早期径向速度巡天发现的这一短周期、以超级地球和亚海王星为主的行星种群[7, 12]。Kepler 还发现了 300 多颗半径小于 1.25 倍地球半径的类地行星，但大多数的轨道周期短于 30 d[13]，其中包括 2 颗位于红矮星（M dwarfs）宜居带内的类地行星，Kepler-186f[14] 和 Kepler-1649c[15]。

由于航天器的姿态控制系统发生故障，Kepler 任务于 2013 年结束，并由 K2 取代[16]。K2 项目利用两台反作用轮并借助太阳辐射压实现姿态平衡，转而沿黄道面依次观测一系列定域视场。K2 采用周期约为 80 d 的 Campaign（C0–C19）模式，并通过客座观测（GO）计划由社区遴选目标，使科学主题从系外行星进一步拓展到恒星物理、星团、超新星、太阳系小天

体与微引力透镜等[16]。针对仅有两台反作用轮指向带来的系统效应，K2 发展了多种去趋势（detrending）方法，使光度精度尽可能接近原始 Kepler 水准，其中包括自平场（SFF）与像素级去相关（EVEREST）等[17–19]。在系外行星方面，K2 更偏向较亮且较近的宿主星，观测到了多个具有代表性的系统，例如近邻 M 矮星 K2-3 的三行星与位于宜居带的 K2-18b，并在专门的 Campaign 9 中实现了空间望远镜的微引力透镜行星探测与地-天联合视差测量，为行星种群与大气表征奠定了关键基础[20–22]。

PLATO 计划于 2026 年发射，采用 26 台相机进行宽场、长时基的高精度测光，将凌星探测与恒星震动学相结合，聚焦明亮近邻的类太阳恒星，以发现并精准表征宜居带内的类地行星，并为后续的大气观测提供理想目标[23, 24]。系外地球（Earth 2.0，简称 ET）巡天计划于 2028 年发射，载荷为 6 台凌星望远镜加 1 台微引力透镜望远镜，长期锁定含原 Kepler 视场在内的致密恒星区，目标是探测绕着类太阳恒星运转的宜居地球大小的类地行星，即地球 2.0 或系外地球，并测量它们的发生率，同时通过微引力透镜拓展对长周期与自由漂移行星的种群搜寻，并测量流浪地球的发生率[25–28]。

在数据分析方法方面，传统的 BLS 算法（box least squares）[29]在分析凌星信号方面发挥了重要作用，能够有效识别周期性的盒状信号。然而，由于 BLS 算法假设模型较为简单，难以有效处理非标准的凌星形状或噪声干扰。为克服此问题，近年来提出了 TLS 算法（transit least squares）[30]，该算法采用更真实的凌星模型，大幅提高了探测小型类地行星信号的灵敏度。此外，深度学习算法逐渐成为凌星探测领域的重要研究方向。卷积神经网络（CNN）和递归神经网络（RNN）等深度学习模型，能够从复杂且含噪的光变曲线中自动学习并提取凌星特征，实现更高精度、更高效率的系外行星识别[31–36]。这些算法尤其适用于天基卫星提供的海量数据。

当前，传统算法与深度学习方法的混合分析策略正进一步提升凌星法的探测能力，先进的数据处理方法和即将发射的空间望远镜（如 PLATO、ET 等）将为系外行星的发现和研究提供更强大的支持。未来，凌星法有望在寻找类地行星和宜居行星方面取得更大突破，助力人类探索宇宙的奥秘。

2　凌星法的基本原理

凌星法（transit method），又被称为掩星法或凌日法，是探测系外行星最常用且高效的方法之一。其基本原理是：当一颗行星从其主恒星前方经过时，从观测者的角度看，行星会暂时遮挡住一部分恒星的光，导致恒星的亮度出现周期性的、微弱的下降。通过精确测量这种光变，我们便能推断出行星的存在及其多项物理参数。

图 2 展示了行星（小黑点）围绕其主恒星（大黄星）公转的过程。当行星运行到恒星与观测者之间时，便发生了“凌星”事件。下方的光变曲线（light curve）记录了恒星亮度的变化。在凌星发生时，曲线会呈现一个“U”形或“V”形的下降。

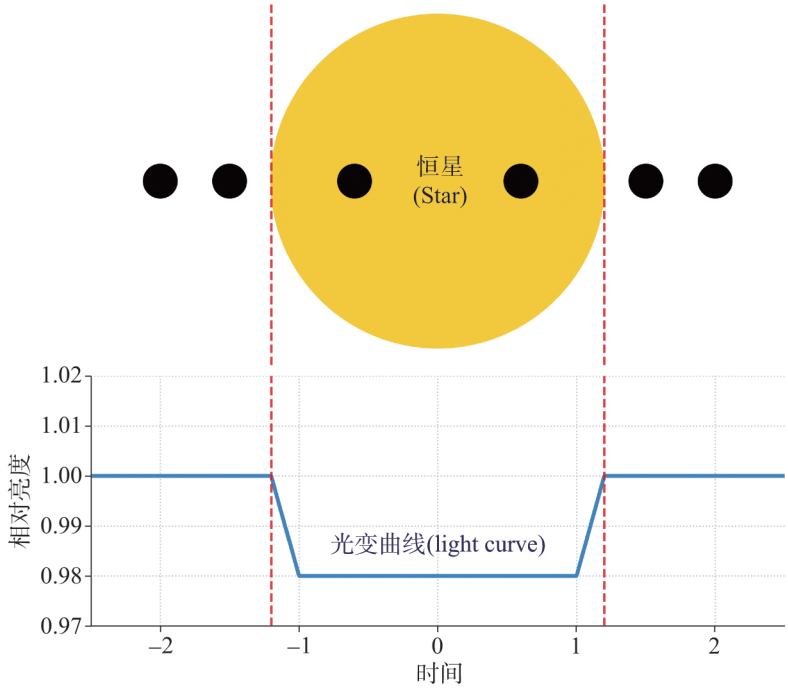


图 2　行星的凌星法原理示意图

2.1 凌星深度 (transit depth)

凌星深度是指由行星遮挡而引起的恒星亮度的最大下降幅度。它直接反映了行星与恒星的相对大小。假设恒星和行星都是完美的球体，并且恒星表面亮度均匀，那么凌星深度可以近似表示为行星与恒星的半径平方比，其基本公式为：

$$\delta = \frac{\Delta F}{F_0} = \left(\frac{R_\mathrm{p}}{R_\mathrm{s}}\right)^2, \tag{1}$$

其中，δ 是凌星深度（无量纲），ΔF 是恒星亮度的下降量，F_0 是恒星未被遮挡时的原始亮度，R_p 是行星的半径，R_s 是恒星的半径。

根据公式 (1)，如果已知主恒星的半径（通常可以通过光谱分析等方法估算），就可以通过测量凌星深度来计算出系外行星的半径。这是凌星法能够确定行星大小的关键。

2.2 凌星周期 (transit period)

凌星事件是周期性发生的。连续两次凌星事件中心点之间的时间间隔，就是行星的轨道周期：

$$P = t_{n+1} - t_n, \tag{2}$$

其中，P 是凌星周期，也即行星的公转周期，t_n 是第 n 次凌星事件发生的时间，t_{n+1} 是第 $n+1$ 次凌星事件发生的时间。

一旦确定了轨道周期 P，结合开普勒第三定律，我们就可以计算出行星的轨道半长轴（即行星到其主恒星的平均距离）。

开普勒第三定律的公式形式为：

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G(M_s + M_p)} a^3. \tag{3}$$

由于行星的质量 M_p 通常远小于恒星的质量 M_s（$M_p \ll M_s$），公式 (3) 可以简化为：

$$P^2 \approx \frac{4\pi^2}{GM_s} a^3, \tag{4}$$

其中，a 是行星的轨道半长轴，G 是万有引力常数，M_s 是恒星的质量。

因此，通过测量凌星周期并估算恒星的质量，我们就能精确地确定行星轨道的大小。

2.3 凌星持续时间 (transit duration)

凌星持续时间是指从行星开始进入恒星盘面到完全离开恒星盘面的总时间。它与恒星的半径、行星的轨道周期和轨道倾角（行星轨道平面与观测者视线的夹角）等因素有关。假设轨道为圆形且轨道倾角为 90°，即边缘穿越，一个简化的估算公式则为：

$$D \approx \frac{P \cdot R_s}{\pi a}, \tag{5}$$

其中，D 是凌星持续时间，P 是轨道周期，R_s 是恒星半径，a 是轨道半长轴。通过对光变曲线的详细拟合，凌星的持续时间和形状还能提供关于轨道倾角等更丰富的信息。

3 经典的地面凌星望远镜

3.1 SuperWASP

SuperWASP（Wide Angle Search for Planets，宽视场行星搜索计划）是由英国领衔、多个学术机构共同参与的国际性系外行星巡天项目，旨在利用凌星法（transit photometry）搜寻绕着太阳系外恒星运行的行星。

SuperWASP 项目是一个用于探测系外行星的超广角高频次巡天观测系统。该系统由位于两个天文台址的相同望远镜阵列构成：其一为位于西班牙拉帕尔马岛（La Palma）的 SuperWASP-N，另一为位于南非萨瑟兰（Sutherland）的 WASP-South。

每个阵列均由 8 台完全自动化的广角相机组成。每台相机配备一具 200 mm f/1.8 的长焦镜头，有效通光口径为 11.1 cm。相机后端搭载一块 2 048×2 048 像素的 e2v 背照式 CCD。这一组合使得单台相机的视场约为 60.84 平方度，单个像元尺度为 13.7″。单个台址的 8 台相机阵列可瞬时覆盖约 482 平方度的天区。在典型的观测模式下，SuperWASP 会对每个天区连续进行两次 30 s 的曝光，观测之间有数秒的读出时间。整个阵列完成一次对所有预定天区的完整巡天观测约需 10 min，即其观测节奏（cadence）约为 10 min[37]。

项目于 2004 年投入科学运行，截至 2025 年 8 月 21 日已确认发现约 200 颗系外行星[38]，已成为迄今最成功的地面系外行星搜索计划之一[37]。

3.2 HATNet

HATNet (Hungarian-made Automated Telescope Network，匈牙利自动望远镜网络) 是一个旨在通过凌星法探测系外行星的地面全自动巡天项目，由天文学家 Gáspár Bakos 等人发起，并于 2003 年正式投入常规科学观测。该网络由一系列全自动、小口径、超广角望远镜组成。其核心部分 HATNet-N (北天网络) 最初在美国亚利桑那州的弗雷德·劳伦斯·惠普尔天文台 (FLWO) 和夏威夷的亚毫米波阵列 (SMA) 址点，部署了 6 台望远镜，后期扩展至包含以色列维兹天文台 (Wise Observatory) 在内的 7 台望远镜。每台望远镜均采用一套有效口径为 11 cm 的 f/1.8 远摄镜头系统。HATNet 的探测器系统经历过一次重要升级：在望远镜观测初期（2003–2007 年）相机配备一块 2 048×2 048 像素的 CCD 探测器和 I_C 滤光片。在此配置下，单个像元的尺度约为 14″，单机视场约为 67 平方度。自 2007 年 9 月起，系统升级为 4 096×4 096 像素的 CCD 探测器，使单个像元尺度提升至约 9.2″，视场扩大至 112 平方度。随后，自 2008 年 7 月起，观测滤光片统一更换为 Sloan r 波段滤光片。

在观测策略上，HATNet 对选定的天区进行高频次时域采样，单次曝光时间通常为 2～3 min，持续整夜监测。其主要科学目标是发现亮度在 8～13 mag 范围内的恒星周围的凌星系外行星[39, 40]。截至 2025 年 8 月 21 日，其已发现并发布的系外行星总数为 70 颗[41]。

3.3 KELT

KELT（Kilodegree Extremely Little Telescope, 千度极小望远镜）巡天项目由俄亥俄州立大学、范德堡大学、利哈伊大学及南非天文台联合运行。项目采用双站布局，分别位于北美和南半球，并配备全自动超宽视场小口径望远镜系统。项目中的每台望远镜口径为 4.2 cm，视场却高达 676 平方度，与其他巡天项目相比，具有更大的覆盖范围，适合监测亮星。KELT 项目的核心目的是填补传统径向速度巡天（通常偏向亮星）与多数地面凌星巡天（偏向较暗星）的“亮星空白带”，其目标是发现视星等介于 8～10 mag 的亮星系外行星。KELT 项目于 2003 年提出，KELT 北站望远镜于 2005 年在美国亚利桑那州首次投入运行，KELT 南站望远镜于 2009 年在南非萨瑟兰投入运行[42]。由于硬件老化，北站望远镜已于 2022 年退役，而南站望远镜仍在继续开展常规科学观测[43]。截至目前，KELT 项目已发现并确认 26 颗系外行星[44]。

3.4 国内相关巡天项目

中国在地基系外行星凌星探测领域已部署了多项具有鲜明地域特色的观测项目。在南极冰穹 A (Dome A) 地区，凭借极夜期间极长的连续观测窗口，研究人员利用中国之星小望远镜阵 (CSTAR) 和南极巡天望远镜 (AST3) 获取了高精度的时域测光数据。例如，Wang 等人[45]在 2015 年对 CSTAR 2008 年的数据集进行了详尽分析；Zhang 等人[46]在 2019 年利用 AST3-II 的观测数据，在 TESS 卫星南天连续观测带 (CVZ) 内成功发现 116 颗系外行星候选者。然而，受限于目前南极台址缺乏具备高精度径向速度测量能力的设备，上述候选者的进一步确认工作仍面临挑战。

此外，依托青海冷湖赛什腾山优越的台址条件，南京大学时域天文台 (TiDO) 已成为国内该领域的又一重要设施。凭借冷湖地区极佳的视宁度和高晴夜率，TiDO 拟开展基于地面的大视场系外行星凌星观测。其科学目标主要聚焦于对空间望远镜发现的行星候选者（尤其是气

态巨行星）进行地面后随测光，以进一步约束并刻画其物理性质[47]。

4 凌星空间望远镜的发展

与地面望远镜相比，空间望远镜在凌星探测上最大的优势是摆脱了地球大气的影响。没有闪烁、吸收和天气遮挡，测光精度能极大提升，从而捕捉地面难以分辨的“类地球”级别微弱光度变化。因此越来越多的凌星任务选择将望远镜送入太空轨道，以实现更高的测光精度和更稳定的观测环境。

4.1 CoRoT

2006 年发射的 CoRoT（Convection, Rotation and planetary Transits, 对流、自转和行星凌星）是由法国主导的空间望远镜项目[48]，主要目标是通过凌星法寻找系外行星并研究恒星内部结构。

CoRoT 载荷为一台等效口径约 27 cm 的离轴无遮拦反射望远镜，并配有多级遮光筒以抑制地球反射杂散光；其有效视场约为 2.7°×3.05°，视场一分为二，分别服务于系外行星与星震学。它是首个通过星震的测量从太空探测系外行星凌星的任务，发现了多颗系外行星，包括首颗被凌星法和高精度径向速度联合证实的约 6 倍地球质量的类地行星 CoRoT-7b[49]。CoRoT 望远镜除了发现系外行星外，还通过对恒星光变的周期性测量和恒星震动的精确测量，提供了恒星内部结构和演化的重要信息，推动了星震学的发展[50]。截至目前，CoRoT 项目已发现并确认 37 颗系外行星[51]。

4.2 Kepler

于 2009 年 3 月发射的 Kepler 专注于天鹅座和天琴座方向一个名为“Kepler 区域”的固定天区，在任务初期监测了超过 15 万颗恒星[6]，后期则发布了对约 19.7 万颗恒星的监测数据[52]。Kepler 望远镜是一台空间施密特望远镜，其有效通光口径为 0.95 m，主镜直径为 1.4 m。望远镜拥有一个巨大的视场，覆盖约 115 平方度的天区，通过长期稳定的凝视观测，捕捉周期性的亮度变化。这对搜寻轨道周期较长、接近类太阳恒星宜居带的类地行星非常有利，因为要探测到它们的存在至少需要观测 3 次凌星事件。因此，Kepler 专注于一个天区，旨在实现持续观测，最大化探测到类太阳恒星周围的类地行星，尤其在宜居带内的地球 2.0，同时也支持对较长轨道周期的系外行星的发生率和分布特征等进行统计分析和研究。

截至 2025 年 8 月 21 日，Kepler 共发现了 2 784 颗确认的系外行星，以及 1 979 颗系外行星候选者[1]。根据 Kepler 巡天对不同大小系外行星的分类定义[53]：类地行星或亚地球是半径小于 1.25 倍地球半径的系外行星；超级地球为半径介于 1.25 倍和 2 倍地球半径之间的系外行星；亚海王星则为半径介于 2 倍和 4 倍地球半径之间的系外行星。在已认证的行星中，Kepler 共发现确认了 834 颗超级地球，1 217 颗亚海王星，390 颗类地行星或亚地球，包括两颗绕着红矮星转的宜居类地行星，Kepler-186f[14]和 Kepler-1649c[15]。

尽管 Kepler 找到了红矮星周围的宜居类地行星，但它们的宜居性目标还存在较大争议。与太阳等 G 型主序星相比，红矮星（M 型主序星）系统的辐射和物理环境呈现出根本性的

差异，这对其行星系统的长期宜居性构成了多重且严峻的挑战。首先，红矮星宜居带紧邻主星[54]，如此近的距离几乎必然使行星被潮汐锁定（tidally locked），导致其一面永昼，一面永夜[55]。这种极端的热量分布可能导致大气在寒冷的永夜面冻结并坍缩。但也有研究指出，一种被称为“云反馈”（cloud feedback）的机制可能更为关键：永昼面的强烈日照会形成稳定、高反射率的云层，有效反射星光以冷却地表，从而在更大范围内使得这种行星气候稳定[56]。

然而，更大的威胁来自于红矮星的剧烈活动。在其生命初期，红矮星会经历长达数亿年的超高光度和高活动性的“前主序”阶段。在此期间，位于现今宜居带内的行星会遭受远超地球所经历的辐射，可能导致其原始水储量被完全蒸发和剥离，造成不可逆的“早期失水”[57]。即便行星能够幸存至红矮星的稳定主序阶段，其恒星活动性在 X 射线和紫外线（XUV）波段的辐射通量，仍然比太阳高几个数量级[58]。更为致命的是，红矮星会频繁爆发出强大的耀发（flares）和相关的日冕物质抛射（CMEs）。这些事件不仅通过加热驱动大气逃逸，其伴随的高能质子事件（proton events）还会严重破坏行星大气中的臭氧层等保护性化学物质，使行星表面暴露在致命的紫外线辐射之下。例如，对我们最近的邻居比邻星 b（Proxima Centauri b）的观测和模拟表明，它经受的耀发事件足以在短时间内显著改变其大气化学，对其维持生命的能力构成了严重威胁[59, 60]。

综上所述，尽管红矮星行星在数量上占据主导地位，但从潮汐锁定引发的极端气候，到贯穿其一生的、从早期失水到持续大气剥离和化学污染的剧烈恒星活动，都对生命的存在和演化构成了根本性的障碍。

由于航天器的姿态控制系统故障，Kepler 任务于 2013 年结束，并由 K2 项目取代[16]。具体故障为两个飞轮失效，导致航天器无法继续保持精确的姿态控制，继续凝视 Kepler 天区。

4.3 K2

K2 任务是美国国家航空航天局（NASA）为延续 Kepler 空间望远镜科学观测而启动的延续性项目。由于 Kepler 在 2013 年失去了第二个反应轮，无法维持原有的三轴稳定姿态，NASA 工程团队提出了一种创新的控制策略：通过将望远镜沿黄道平面（ecliptic plane）定向，使太阳光压与航天器轴向对称，从而借助有限的姿态控制资源维持足够的指向精度。这一策略使得 K2 任务于 2014 年正式启动，成为 Kepler 望远镜的“第二生”[16]。

与 Kepler 专注于单一区域、长时间连续监测不同，K2 采用了巡天式观测模式，将全天分为多个“观测活动”（Campaign），每次持续约 80 d，覆盖了银河系平面、星团、近邻星系等多样化的天区。K2 任务的科学目标也更加广泛，除了继续利用凌星法寻找系外行星外，还包括恒星震动学、恒星演化、超新星爆发监测、星际介质以及太阳系天体的观测等领域[61, 62]。

尽管 K2 在观测稳定性和精度上略逊于原始 Kepler 任务，其所获取的数据依然极具科学价值。截至 2025 年 8 月 21 日，K2 发现了 547 颗已认证的系外行星，此外还提供了 976 颗系外行星候选者[1]，推动了星震学[63]、恒星旋转年代学[64]等多方面天体物理学的进展。该任务于 2018 年正式结束，标志着 Kepler 望远镜完成其全部科学使命。K2 的成功展示了工程创新与科学探索的紧密结合，也强化了社区主导科学目标选择的合作模式，成为空间天文任务适应性与延续性的典范[22]。

4.4 TESS

TESS（Transiting Exoplanet Survey Satellite，凌星系外行星巡天卫星）是美国 NASA 于 2018 年 4 月发射的空间望远镜任务，旨在寻找系外行星。其主要科学目标是通过寻找地球附近、围绕明亮的宿主恒星的系外行星，帮助后续进行更深入的后随观测和研究[65]。TESS 望远镜由四台广角望远镜组成，TESS 望远镜每台望远镜的口径为 10 cm，视场为 24°×24°，四台望远镜指向不同的相邻天区构成一个观测“扇区”，每个观测“扇区”的覆盖面积约为 24°×96°。卫星在单一扇区驻留约 27 d 后转向下一个扇区，从而一年内可以覆盖约 88% 的天空，这一覆盖面积约为 Kepler 任务的 400 倍[65]。在黄道两极附近，由于多个扇区相互重叠，可提供数月的连续基线，对发现周期更长的行星尤为关键。

TESS 的整体设计使得它能够在较短的时间内高效扫描广阔的空间，特别适用于发现周期较短、位于主序星附近的系外行星。与 Kepler 任务相比，TESS 采用了更为广泛的巡天策略，快速发现大量行星候选者，而不像 Kepler 任务那样专注于深入探测轨道周期较长的类地行星[65]。截至 2025 年 8 月 21 日，TESS 已经发现了 686 颗系外行星，此外还提供了 4 687 个系外行星候选者[1]。

4.5 CHEOPS

CHEOPS（CHaracterising ExOPlanet Satellite，系外行星特征探测卫星）是欧洲空间局（ESA）主导的一项空间望远镜任务，于 2019 年 12 月 18 日发射升空。与 K2 和 TESS 等致力于大规模搜索新行星的巡天任务根本不同，CHEOPS 是一项“后随观测”（follow-up）任务，其核心科学目标并非发现大量新行星，而是对已知的、围绕邻近明亮恒星运行的系外行星进行极其精确的物理参数表征[66]。

CHEOPS 搭载了一台口径为 32 cm 的望远镜，采用定点观测策略，精确指向已知的系外行星系统。通过在行星凌星期间进行高时间分辨率和高信噪比的光度测量，CHEOPS 能够以前所未有的精度确定行星的半径。将这一精确半径与通过地面望远镜径向速度法测得的行星质量相结合，科学家可以推算出系外行星的平均密度，从而为揭示其内部结构、组成成分和形成演化机制提供关键依据[66]。该任务的一个标志性成果是精确刻画了“超热木星”WASP-189 b 的物理特性，揭示了其不对称的凌星光变曲线和由恒星引力导致的扁率[67]。

尽管 CHEOPS 的主要任务是表征而非发现，但在其观测过程中，也独立发现了一些新的系外行星或对已有系统内的行星进行了确认。截至 2025 年 8 月 21 日，CHEOPS 已发现了 3 颗已认证的系外行星[1]。CHEOPS 的成功运作展示了小型、目标驱动型空间任务在系外行星科学研究中的独特价值和高效性。

4.6 PLATO

PLATO（PLAnetary Transits and Oscillations of stars，行星的凌星与恒星的振荡）是欧洲空间局（ESA）规划于 2026 年发射的一项开创性空间望远镜任务。其主要科学目标是通过凌星法大规模搜索和研究太阳系外行星，尤其是在类太阳恒星宜居带内运行的类地行星，并精确测定其半径、质量、密度和年龄，从而将太阳系内的行星置于更广阔的背景下进行比较[23]。

为实现这一目标，PLATO 将装备一套独特的相机阵列，由 26 台望远镜组成。其中包括

24 台正常读出速度相机，以 25 s 的读出频率对约 24 万颗亮度高于 13 mag 的恒星进行持续观测[68]；另有 2 台导星相机，以 2.5 s 的更高频率观测亮星并用于航天器的精确制导。每台望远镜的孔径为 12 cm，通过特殊的阵列排布，所有相机的组合视场高达约 2 250 平方度，其中所有相机完全重叠的视场为 301 平方度[23]。这种设计使其能够长时间监测大片天区，以极高的时间分辨率和光度精度记录恒星的光变曲线。

与前辈如 Kepler 和 TESS 不同，PLATO 的突出特点是结合了精密的恒星震动学测量与行星凌星探测。这使得 PLATO 不仅能发现行星，还能极大提升对其母星半径（精度优于 2%）、质量（优于 10%）和年龄（优于 10%）的测定精度。当 PLATO 的观测数据与地面望远镜的径向速度测量相结合时，将为行星的质量和平均密度提供前所未有的高精度测量[23]。因此，PLATO 将专注于寻找距离地球较近、适合后续大气层光谱分析的行星系统，是人类寻找潜在宜居世界和地外生命的关键一步。此外，PLATO 任务还将在恒星演化、星团物理和银河结构等方面提供重要的观测数据，预计将成为 21 世纪 20 年代中后期最具影响力的系外行星与恒星研究项目之一。

4.7 ET

系外地球（ET）巡天空间任务，由天文学家葛健发起、中国科学院上海天文台牵头，联合中国科学院多家研究机构共同推进的空间系外行星探测项目，旨在寻找与地球类似、位于类太阳恒星宜居带内的“地球 2.0”。这项任务将采用凌星法对 Kepler 以及临近天区开展大视场、超高精度空间凝视测光观测，搜寻系外行星，包括类地行星和地球 2.0，同时也采用微引力透镜法对银河系核心区开展大视场、高灵敏度的测光观测，搜寻冷行星和流浪行星（包括流浪类地行星），并测定各类行星的发生率[25–28]。

ET 卫星计划搭载 7 台望远镜，将被发射至日-地拉格朗日 L2 点运行。其中 6 台 28 cm 口径的望远镜将组成一个凌星巡天阵列，共同监测一片高达 550 平方度的天区（包含 Kepler 望远镜曾经的观测视场），通过高精度光度测量来搜寻行星凌星信号。另外一台 35 cm 口径的望远镜是专门的微引力透镜望远镜，它将对银河系中心方向一块约 4 平方度的天区进行高频率测光观测，搜寻微引力透镜事件。

该任务的科学目标是双重的：凌星望远镜阵列旨在发现数以万计的新系外行星，其中包括寻找系外地球；而微引力透镜望远镜则专注于探测那些距离恒星较远、难以通过凌星法发现的“冷行星”以及在星际空间中自由漂浮的“流浪行星”。通过这两种互补的探测方法，ET 任务将首次对从近距离轨道到自由空间的类地行星进行大规模普查[25, 26, 69]。

这一任务不仅承载着中国在天文学与空间天文领域迈入国际前沿的战略目标，也有望在系外行星统计学、恒星物理、宜居性评估以及地外生命探索等领域取得突破性成果，是中国在深空探测和空间科学方面的重要里程碑项目。

随着以 ET 等任务为代表的新一代空间望远镜的部署，以及数据分析技术的持续进步，我们预期凌星法在系外行星探测领域将迎来关键性突破。新一代望远镜具备的高测光精度与长期连续观测能力，为探测轨道周期更长、尺寸更小的类地行星奠定了基础。尤为重要的是，ET 这样的卫星通过锁定与 Kepler 同样的天区，可以与 Kepler 等历史巡天项目的数据进行联合分

析，能够构建起长达十年以上的超长观测基线。这种跨任务的数据融合策略，有望有效识别并确认那些因轨道周期过长（例如长达两年）而未能在单一任务窗口内认证的单一凌星事件（single-transit events）。结合机器学习等先进算法在微弱信号识别与非周期性事件挖掘方面的应用，我们将能够显著提升对长周期、特别是位于宜居带内的小质量行星的探测完备性。这一系列进展不仅将推动我们发现更多潜在的“第二地球”，更有望实现对类地行星种群的系统性普查，从而为揭示其在银河系中的统计分布规律、丰度及其与宿主星属性的内在关联提供坚实的观测依据。

表 1 展示和对比了不同空间望远镜的主要性能参数。

表 1　CoRoT、Kepler、TESS、PLATO 与 Earth 2.0 (ET) 主要参数对比

任务名称	镜头口径/cm	镜头数量	单次观测天区	监测目标个数	用于凌星的目标星等/mag
CoRoT	27	1[70]	$2.7^\circ \times 3.05^\circ$ [71]	≈ 160 000[72]	11~16[51]
Kepler	95	1[73]	115 (°)^2[74]	≈ 197 000[52]	≤ 16[6]
TESS	10.5	4[65]	$24^\circ \times 96^\circ$[65]	≈ 200 000[65]	4~13[65]
PLATO	12	24[23]	$48.5^\circ \times 48.5^\circ$[23]	≤ 1 000 000[23]	4~16[23]
Earth 2.0 (ET)	28	6[69]	550 (°)^2[69]	≈ 2 000 000[69]	≤ 17[69]

5　凌星法在绕着类太阳恒星的宜居类地行星探测中的应用和独特优势

5.1　类太阳恒星周围的宜居类地行星的信号规模与空间望远镜的必要性

类太阳恒星通常定义为 F5V 到 K5V 类型的恒星，它们的有效温度约为 6 500～4 400 K、质量约为 1.4～0.7 $M_\odot$、半径约为 1.5～0.7 $R_\odot$[75–80]。

由于这些恒星的质量和半径较红矮星大，同时宜居带离恒星的距离较远，大约 0.4 AU（K5V）～3 AU（F5V）或者轨道周期为 100 d（K5V）～900 d（F7V）[81]，类太阳周围的宜居类地行星的凌星和多普勒的视向速度信号比红矮星周围的宜居类地行星的信号要弱很多，比如质量为 1 $M_\oplus$ 的宜居星绕着 M5V、K5V、G5V 和 F5V 矮星的视向速度的幅度分别大约为 0.7 m/s、0.15 m/s、0.09 m/s 和 0.06 m/s，而凌星深度分别约为 2×10^{-3}、1.7×10^{-4}、8.4×10^{-5} 和 4.5×10^{-5}。考虑到目前地面视向速度光谱仪的最高精度约为 0.5 m/s[82]和测光精度约为 2×10^{-5}[83]，地面 RV 更难探测到类太阳恒星周围的宜居类地行星，相反，空间超高精度测光更有利搜寻类太阳恒星周围宜居类地行星的凌星信号。因此，本节将具体阐述凌星在这方面的应用和优势。

凌星信号的凌星深度取决于行星与宿主星的半径比值的平方。由于宜居类地行星的物理特点，行星半径较巨行星小一个数量级，其凌星信号极其微弱。以地球-太阳系统为例，其凌星深度为：

$$\delta = \left(\frac{R_\oplus}{R_\odot}\right)^2 \approx 8.4\times10^{-5}, \tag{6}$$

其中，$R_{\oplus}$ 和 $R_{\odot}$ 分别为地球和太阳的半径，即约 6 371 km 和 696 340 km。

考虑到行星宜居物理条件，宜居类地行星的半径最大值约 1.25 $R_{\oplus}$[53]，而其宿主恒星由于宜居带位置的限制，通常为 G 型或 K 型主序星，半径约为 0.7 $R_{\odot}$～1.2 $R_{\odot}$[84]。因此，宜居类地行星的凌星深度也和地球相似，在 10^{-4} 量级，远小于大多数已发现的凌星系外行星。

对于地基观测而言，对此类信号的有效探测面临着根本性的物理限制。地球大气层引入的随机折射效应，即大气闪烁（atmospheric scintillation），会产生大幅度的光度噪声[85]。地面望远镜受其影响，测光精度在 10^{-4}～10^{-3} 之间。例如，在 30 min 时间尺度上，对 20 000 颗亮星进行观测，NGTS 望远镜的测光精度约为 4×10^{-4} [86]，无法满足对类地行星凌星信号的检测需求。此外，大气消光（atmospheric extinction）的变化、气象条件的不确定性以及地球的昼夜更替，共同阻碍了进行长时间、高占空比（high duty cycle）连续时序测光的可能性，而这对于捕捉完整的凌星轮廓和探测长周期行星又是必不可少的。

空间望远镜排除了大气扰动的影响，能够实现更高的测光精度和更稳定的观测环境。Kepler 空间望远镜的设计目标是在 6.5 h 的观测中，12 mag 的类太阳恒星的差分测光精度（CDPP）达到 2×10^{-5}[87]。此外，空间望远镜可在轨道上连续盯守同一视场数月乃至数年，且不受昼夜交替限制，极大提高了发现长周期或多行星系统的机会。这些因素共同奠定了空间望远镜在系外行星凌星领域的核心地位。

因此，将凌星望远镜部署于外层空间，是实现类地行星凌星探测的技术必然与先决条件。空间望远镜，如 Kepler 与 TESS 任务所验证的，通过规避地球大气层的全部干扰效应，其光度测量精度能够达到 10^{-5} 量级的水平，这使得探测 8.4×10^{-5} 的凌星信号并获得高信噪比成为可能。在稳定的空间环境中，探测精度的主要限制因素转变为仪器自身的稳定性和来自目标源的光子噪声。更重要的是，空间平台能够对选定的天区执行长期不间断的高频次时序观测，确保了对具有不同周期和持续时间的凌星事件的完整捕捉。

5.2 不同凌星项目之间的可继承性

凌星法由于其长时间观测、大天区观测以及产出标准化光变曲线的特点，在不同观测设备之间具有良好的数据可继承性。具体而言，凌星法能够对同一目标进行多次重复观测，并生成光变曲线，将这些光变曲线进行标准化处理后，可以在不同项目中进行比较和联合分析，形成更长时间基线的观测数据集。随着越来越多的新一代空间望远镜和地基观测设施投入使用，凌星法的这一特性将成为跨任务、跨平台协作的基础。

由于从光变曲线中检出凌星信号的信噪比和观测总时长成正比，不同任务之间的观测数据可以通过联合分析来提升对微弱信号的检测能力。例如，Kepler 和 ET 等任务可以对同一目标进行长期监测，形成超过十年的观测基线，从而显著提高对长周期类地行星的检出率。因此，凌星法不仅提升了单一任务的科学产出，还为跨任务数据的综合分析提供了坚实的基础，促进了国际间的合作与数据共享。

5.3 凌星法与视向速度法的协同作用

通过将凌星法和视向速度法结合，研究人员可以获得行星的质量近似值和半径，从而进一步推导出其平均密度（$\rho = \dfrac{3M}{4\pi R^3}$）。这种质量-半径的结合使得我们可以推测行星的组成。

例如，如果一颗行星的质量和半径接近地球的标准值，我们可以推测该行星可能是岩质的；而如果质量相同但半径较大，那么它更可能是气体巨行星[88]。

凌星法与视向速度法在系外行星的探测和研究中发挥着重要的协同作用。凌星法通过测量行星经过恒星前方时引起的光变（凌星深度）来提供关于行星的基本信息，尤其是行星的半径和轨道周期。通过对多个凌星事件的观察，可以推测出行星的轨道周期和半径。然而，除了少数具有 TTV（transit timing variation）效应的行星外，凌星法无法直接提供行星的质量，且容易受到假阳性信号的干扰。因此，凌星探测产出的候选者通常需要借助地基视向速度法的后随观测来进行证认，以确证其行星本质。

此时，视向速度法不仅承担了证认任务，还能弥补凌星法在质量测量上的不足。视向速度法通过测量恒星因行星引力作用而产生的微小运动（即恒星的径向速度变化），可以推导出关于行星质量的约束。严格来说，由于观测视线方向与行星轨道平面法线之间存在未知的夹角 I（即轨道倾角），该方法直接测得的是行星真实质量 M 与倾角正弦值的乘积 $M \sin I$。因此，视向速度法通常给出的是行星的质量下限。特别地，当行星和恒星之间的引力作用较强时（譬如对于大质量或近轨道的系外行星），视向速度法能够非常有效地测量这一参数。

6 光变曲线的分析方法

6.1 对光变曲线的预处理

从 NASA Exoplanet Archive 获取的系外行星数据[1]显示，系外行星的半径往往远小于其宿主恒星的半径。根据 NASA Exoplanet Archive 对所有已有数据的恒星系统进行统计，系外行星的半径与其宿主恒星的半径之比平均为 0.04。而凌星信号是由于行星在其轨道上经过恒星前方时遮挡了部分恒星光线而导致的，其深度与行星半径与恒星半径之比的平方成正比。由于大多数系外行星的半径远小于恒星的半径，因此凌星信号的深度通常非常微弱，尤其是对于类地行星而言，信号深度往往在 0.01% 左右，这使得其凌星信号在光变曲线中极易被噪声淹没。

虽然天基望远镜相较于地基望远镜具有更高的观测精度，但在实际观测中，仍然会受到多种因素的影响，如恒星活动噪声、卫星抖动、仪器漂移和仪器噪声等，这些因素会导致光变曲线中出现趋势和噪声。因此，在进行凌星信号分析之前，必须对光变曲线进行预处理，以去除这些干扰信号[89]。

Kepler 任务旨在实现前所未有的测光精度，以探测类地行星凌星信号，其数据处理流程是后续巡天任务的典范，我们以 Kepler 卫星的数据处理流程为例展示光变曲线预处理过程[73, 74]。一般来说，对于望远镜产生的光变曲线的预处理分为两个部分。第一个部分是像素级数据校准（pixel-level calibration），即对原始图像数据进行初步的仪器系统效应校正；第二个部分是科学处理，也称为搜索前数据状态调节（pre-search data conditioning, PDC），其核心是去除后续步骤中可能影响凌星信号探测的系统性趋势[90]。前者主要是针对 CCD 像素级的测量误差进行校正，而后者则主要是针对由望远镜漂移、温度变化和恒星活动等共同造成的系统性变

化和趋势进行处理。

像素校准是处理 Kepler 数据的第一步，目的是把原始图像转换成能准确测量亮度的数据。这个过程会先去除图像中固定的本底噪声，然后再做一个针对暗电流随时间变化的修正；接着校正 CCD 信号非线性响应的部分；还要尽可能补偿暗电流和修复拖尾。

这其中，暗电流是由于 CCD 硅晶格的热扰动引起，即使在没有入射光的情况下也会产生电子，形成一种噪声信号。由于暗电流的强度与温度高度相关，而航天器的温度会发生细微波动，因此必须对其进行精确矫正，以避免温度变化引入虚假的光度信号[91]。校正通常利用 CCD 上被物理遮罩的“暗像素”（masked pixels）来完成，这些像素只记录暗电流，从而可以建立模型并从科学图像中减去。

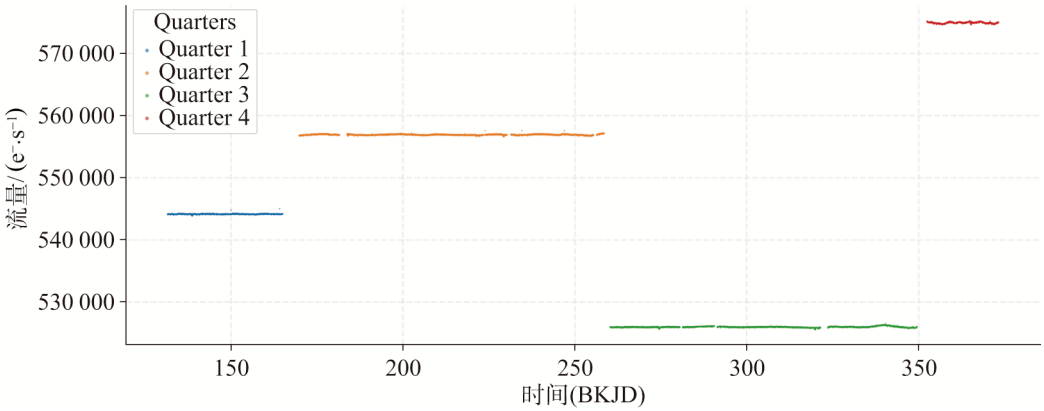
拖尾是指在 CCD 读出过程中产生的一种图像伪影。由于 Kepler 使用的 CCD 没有机械快门，在电荷从感光区快速转移到存储区的读出过程中，感光区仍在接收星光。这导致明亮天体的光子会在电荷转移的方向上（即 CCD 的列方向）留下一道微弱的光迹，污染该列所有像素的测量值[91]。为了修正这一效应，Kepler 利用了 CCD 上被称为“拖尾测量区”（smear collateral rows）的特殊像素行来量化拖影的强度，并将其从科学数据中扣除，从而恢复受污染像素的真实亮度。完成这些步骤后，才能得到经过精确校准的像素级数据，用于后续的光变曲线提取。

最后，对整个图像进行平场矫正，减少探测器响应不一致性。这些步骤完成后，就可以进入亮度分析：先检测并处理背景中因为宇宙射线造成的闪光，再估算并扣除整个场景的背景光强；然后找出并剔除宇宙射线造成的异常点。接下来，算法会确定每颗星光点的位置，并选定最佳的像素集合，常见的方法是最佳孔径法。最佳孔径法实施这样的像素级光度提取策略：先在目标星周围生成一系列候选孔径（像素组合或连续半径），然后利用噪声模型评估每个孔径在单位时间内的信号-噪声比（或残差、RMS 等指标），最终选择能最大化光度精度、同时最小化背景与邻星污染的那一个孔径，并用它汇总每张帧上的星光通量[74]。把这些星光通量作为每颗星的基本光变曲线，为后续寻找行星凌星做准备。

图 3 展示了一个典型的 Kepler 目标 Kepler-10 在经过像素级校准后使用最佳孔径产生出的原始光变曲线。可以看到，尽管已经校正了像素级的系统误差，但光变曲线中仍然存在明显的系统性趋势和噪声；此外，不同 Kepler 季度之间光变曲线还存在明显的基线偏移和不连续跳变，这些是由于望远镜姿态调整后恒星像在探测器不同的位置（探测器量子效率和响应不同）以及热环境变化等引起的。这些都需要在后续的预处理步骤中进一步去除和校正。

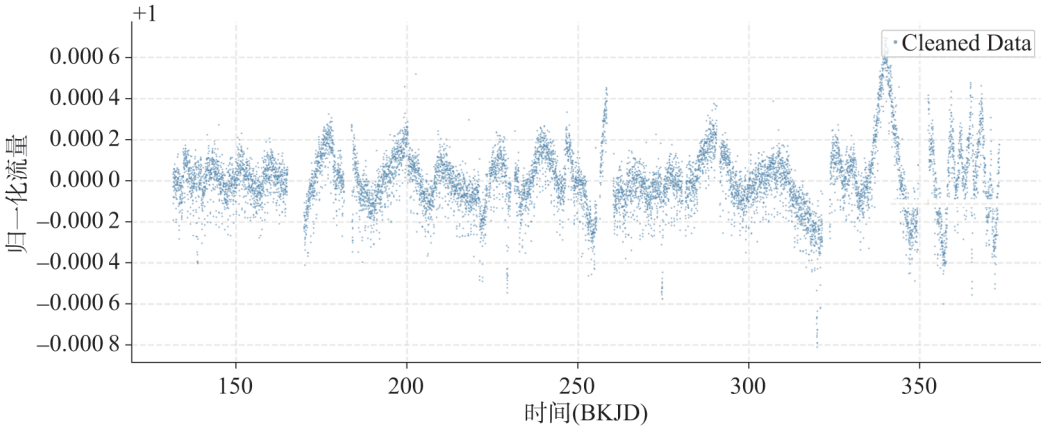
获得光变曲线之后，预处理进入第二部分。典型地，预处理的第二部分首先需要统一不同观测季度的基线水平，并去除显著的离群值。图 4 展示了经过基线校正和离群值去除后的 Kepler-10 光变曲线。

由于光变曲线中可能存在系统性趋势和噪声，因此需要对其进行 Cotrending（共趋势）和 Detrending（去趋势）处理。Cotrending 是指通过分析多颗恒星的光变数据，提取共通的系统性成分，从而校正观测误差；Detrending 则是指通过数学方法去除光变曲线中的系统性变化，以便更好地识别凌星信号。



注：不同季度用不同颜色区分时间覆盖范围。原始光度数据展示了未处理 Kepler 光变曲线的典型特征，包括系统趋势、恒星变化性和离群点。流量单位为每秒电子数（e-/s），时间采用 Kepler 儒略日（BKJD）。

图 3　Kepler-10 来自 Kepler 望远镜连续四个季度的原始光变曲线



注：采用 5-sigma 裁剪算法去除离群点。然后将每个季度的光变曲线归一化到平均流量为 1，以便于比较不同观测时期的数据。来自仪器效应和恒星变化性的系统趋势仍然可见，将在后续步骤中处理此趋势。所有季度使用统一颜色显示。

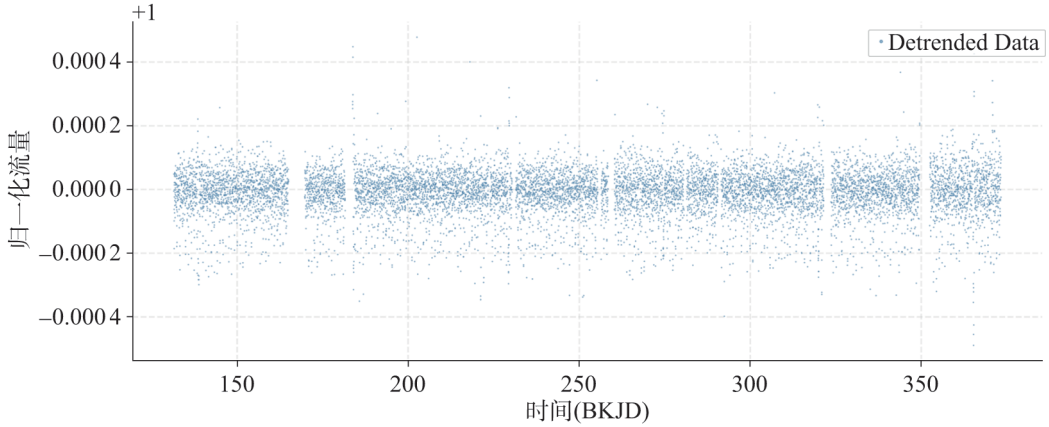
图 4　Kepler-10 经过离群点去除和归一化处理后的光变曲线

Cotrending 和 Detrending 通常是配合使用的，它们分别针对不同来源的系统性变化。Cotrending 用于应对源自望远镜仪器或姿态控制等全局性系统误差，这些误差会同时影响一组恒星的光变曲线[92]。通过分析多个恒星的光变数据，提取共通的系统性成分（如 Kepler 中的共趋势基向量 CBVs[90]），然后从目标星中剥离这些成分以校正观测误差。Cotrending 在清除整体观测环境影响方面尤为有效，但若选取的参考星不匹配目标星，或 CBV 模型构建不当，可能会引入过拟合，误抹真实信号[92]。

Detrending 主要处理与单颗恒星相关的物理或观测效应，如恒星本身的活动、旋转调制

或个别观测中的光学畸变。方法上，它常采用多项式拟合、滤波器（如 Savitzky-Golay[93]）或高斯过程回归[94]，在单一目标星的光变曲线上移除缓慢变化的趋势。虽然有效，但容易在凌星信号与趋势变化时间尺度接近时，部分削弱甚至误删凌星信号[89]。理想的数据处理流程通常先应用 Cotrending 清除整体图像系统误差，再进行 Detrending 精细处理局部物理趋势，从而最大程度保留凌星信号。

在标准的 Kepler 数据管道中，输出供终端用户使用的 PDC 光变曲线已经经过 Cotrending 处理；因此用户只需要进一步进行 Detrending 处理。图 5 展示了经过 Detrending 处理后的 Kepler-10 光变曲线。可以看到，经过预处理后，光变曲线中的系统性趋势和噪声得到了显著的抑制，凌星信号变得更加明显。



注：Detrending 窗口长度为 0.5 d。Detrending 过程去除了长期趋势，同时保留了短时凌星信号。系统变化显著减少，揭示了凌星特征和残余光度噪声。该 Detrending 数据集作为凌星搜索算法的输入。

图 5 Kepler-10 使用 Wōtan[95]中实现的 biweight 滤波方法获得的 Kepler-10 Detrending 光变曲线

由于光变曲线在实际情况中面临复杂的噪声和趋势问题，预处理的具体方法和参数设置往往需要根据数据的特性进行调整。对于不同类型的光变曲线，可能需要采用不同的 Cotrending 和 Detrending 方法和参数，因此现在也有使用机器学习方法来自动化选择和优化预处理参数的研究[96]。这可能是未来光变曲线预处理的一个重要发展方向。

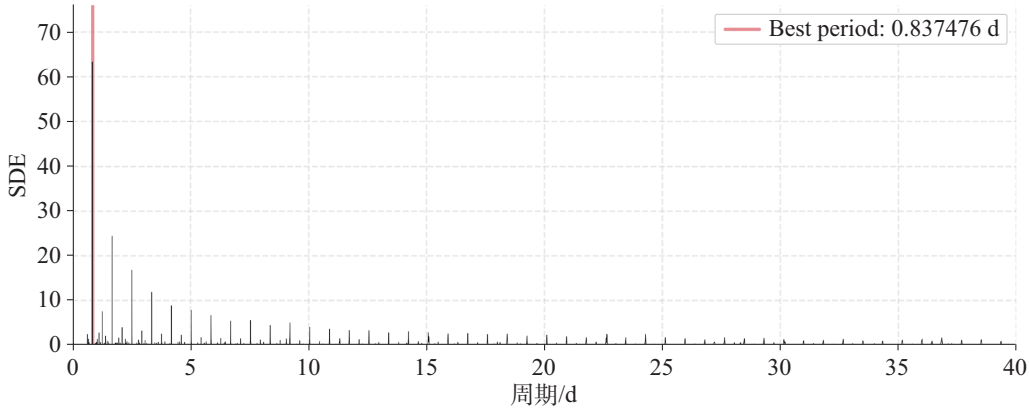
6.2 从光变曲线中提取凌星信号

在光变曲线预处理完成后，提取凌星信号是通过测光探测系外行星中的关键步骤。由于凌星信号通常微弱且易受噪声影响，研究者们开发了多种先进算法来提高检测的灵敏度和准确性。

传统的 Box Least Squares (BLS) 算法[29]是最早用于凌星信号检测的方法之一。该算法通过对光变曲线进行周期性拟合，寻找最佳的“方形盒子”形状来匹配观测数据。BLS 算法在 Kepler 任务中被广泛应用，成功识别了大量系外行星候选者[30]。然而，由于其假设模型较为简单，难以有效处理非标准的凌星形状或噪声干扰，因此在某些情况下可能会漏检或误检[30]。

Transit Least Squares (TLS) 算法由 Heller 等人[30]于 2019 年提出，是一种改进的凌星信号检测方法。TLS 算法基于更复杂的模型，考虑了恒星的边缘暗化效应（limb darkening）和行星凌星的进出时段，旨在提高对小型行星的检测能力。TLS 用物理上更真实的凌星模型替代了 BLS 的方形模板，在检测浅度、小行星信号时更加灵敏且能有效减少模板失配引起的假信号。通过对试验持续时间范围做物理约束并采用高效排序算法，TLS 尽其所能地提高了计算速度，但其算法实现毕竟更为复杂，导致了其在速度上不具备优势。TLS 算法在 Kepler 和 TESS 数据集上均表现出色，成为当前凌星信号检测的主流方法之一[36, 97]。

图 6 展示了使用 TLS 算法对 Kepler-10 Detrended 光变曲线进行凌星搜索后生成的凌星信号强度图。可以看到，图中存在一个显著的峰值，表明在该周期处存在一个强烈的凌星信号。这个峰值对应于已知的超级地球 Kepler-10b，其轨道周期约为 0.837 d。通过这种方式，TLS 算法能够有效地从光变曲线中提取出凌星信号，帮助研究人员识别和确认系外行星的存在。



注：图中不同的峰对应凌星信号出现在该周期的强度。峰值越高，表示此处凌星信号越显著。约 0.837 d 处的主导峰（红色竖线标记）对应于已知的超级地球 Kepler-10b。

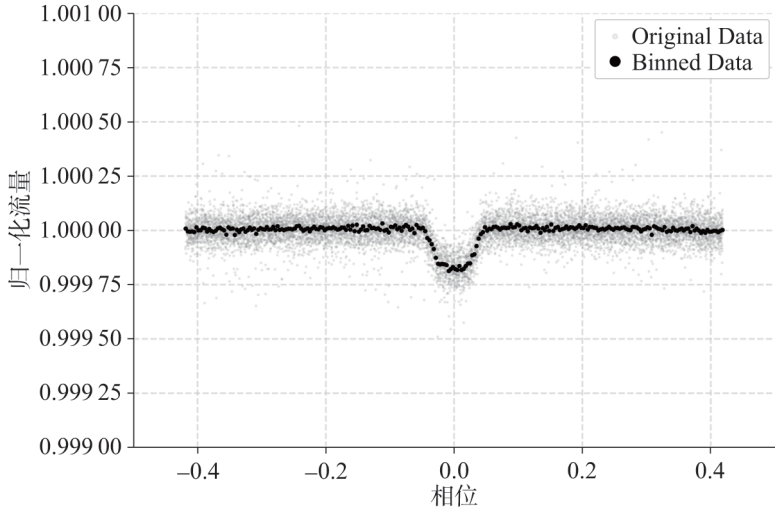
图 6　使用 TLS 算法[30]对 Kepler-10 Detrended 光变曲线进行凌星搜索后生成的 Kepler-10 凌星信号强度图

另一种方法是 SIDRA（Signal Detection using Random-Forest Algorithm），这是一种基于机器学习的盲检测算法。由 Mislis 等人[98]于 2015 年提出，SIDRA 使用随机森林分类器对光变曲线进行自动分类。该算法在模拟数据和 Kepler 数据集上均表现出高于 90% 的成功率，能够有效识别凌星信号，尤其在低信噪比的情况下优于传统方法。

虽然机器学习方法在从原始光变曲线中进行凌星信号检测中取得了显著进展，但目前被广泛应用的仍然是基于传统统计方法的算法。而在传统方法检测到可能的凌星信号后，机器学习方法则广泛被应用于后续的校验和分析中。

例如，Kepler 的官方科学处理管道（Science Processing Pipeline[74]）首先使用基于匹配滤波的算法（如 TPS, Transit Planet Search）从海量光变曲线中筛选出凌星候选信号，即阈值穿越事件（Threshold Crossing Events, TCEs）。而 TESS 任务使用 SPOC（Science Processing Operations Center[99]）管道找到 TESS 关注目标（TESS Objects of Interest, TOIs）[100, 101]。

在通过多种方法从光变曲线中检测到凌星信号后,通常会对这些信号进行相位折叠(Folding)和分箱(Binning)平均处理,以增强信噪比并更清晰地展示凌星特征。图 7 展示了对 Kepler-10 光变曲线进行相位折叠和分箱处理后的结果。



注: 以 0.838 d 为周期对 Kepler-10 光变曲线进行相位折叠和分箱处理。灰色点表示单个相位折叠测量值,黑色点显示按光度不确定性加权的分箱数据(300 个箱)。在相位 0.0 附近可以清楚地看到深度约为 2×10^{-4} 的对称凌星特征。折叠和分箱程序增强了信噪比,并证明了凌星检测在多个轨道周期上的一致性。

图 7 Kepler-10b 的相位折叠和分箱平均操作后的光变曲线

6.3 机器学习方法在凌星信号分析中的应用

在使用传统方法从光变曲线中检测到可能的凌星信号后,机器学习方法被广泛应用于后续的校验和分析中。由于凌星信号通常非常微弱且易受噪声干扰,传统方法在检测过程中可能会产生大量的假信号(false positives)。为了提高检测的准确性,研究人员引入了机器学习技术来对候选信号进行分类和验证。

在凌星信号检测中,机器学习方法,尤其是深度神经网络方法(如 Astronet [31]),是在通过已有的统计学方法检测到可能的凌星信号后,机器学习方法再对这些有限的候选信号进行分类,以区分真实的行星信号和各种假信号,这一过程被称为候选者“审查”[31]。

Astronet[31] 及其后续演进 ExoNet[32]、Astronet-Triage[102] 等是该领域主要的深度学习模型,它们通过对 Kepler 和 TESS 任务的数据进行分类,帮助快速准确地识别可能的系外行星候选者。Astronet 最初在 Kepler 数据上进行了训练,随着后续版本的更新(如 Astronet-K2[33] 和 Astronet-Triage[102]),其性能不断提高,特别是在提高准确率和召回率方面,能够从 Kepler、K2、TESS 等多种系外行星望远镜的光变曲线中识别出更多的潜在行星候选者。

7 对光变曲线的多样化分析

除了对在光变曲线中检测到的凌星信号进行分析外，近年来还出现了一些新的方法来进行不凌星的系外行星的检测。典型方法包括 TTV 和 TDV（Transit Duration Variation）等方法。

TTV 方法基于的原理为：如果一个系统只有一颗行星，那么其凌星中心时刻应该是以一个确定性的周期性函数不断出现的。然而，如果系统中存在多颗行星，那么它们之间的引力相互作用会导致凌星中心时刻出现周期发生变化。通过对凌星中心时刻进行精确测量，可以推断出系统中存在多颗行星的证据[103]。在 Kepler 任务时，TTV 方法首次得到验证，发现了 Kepler-9 系统中存在多颗行星的证据[104]。TTV 方法的优点在于它给了我们一个新的视角来研究原先很难被发现的行星系统，尤其是那些凌星信号非常微弱的行星系统。基于对动力学模型的分析，TTV 方法可以推导出行星的质量、轨道参数等信息[105]。

截至 2025 年 8 月 21 日，有 469 颗已认证的行星显示出 TTV 效应。其中 39 颗系外行星由 TTV 方法首次发现[1]。TTV 方法成为了系外行星研究中一个重要的工具。

除了凌星中心时刻的微弱改变，也有研究指出，行星在凌星时的持续时间也会受到其他行星的引力影响而发生变化，这个现象被称为 TDV。TDV 是指行星在凌星时的持续时间相对于其平均值的偏差。TDV 可以用来探测行星系统中的其他行星，并且可以提供关于这些行星质量和轨道参数的信息[106]。但 TDV 的振幅通常较小，多数系统的 TDV 幅度在秒级[107]，因此需要高精度的测量才能检测到。目前我们缺乏足够的观测数据来验证 TDV 方法的有效性。但随着高精度的空间望远镜（如 TESS[65]、PLATO[24]和 ET[25]）的发射，TDV 方法得到了更广泛的关注，并有望在未来的系外行星研究中发挥重要作用[108]。

8 展望与总结

我们在 6.3 节中提到，机器学习方法在凌星信号的检测和分类中发挥着重要的作用。但是由于计算能力和算法设计的限制，当前普遍使用的机器学习方法都需要结合传统的数据处理管道（如 Kepler 使用的 SOC 数据处理管道[74, 109]和 TESS 使用的 SPOC 管道[99]）共同使用。其中机器学习方法主要集中在对传统方法检测到的候选信号进行分类和验证上，典型的例子如 Nigraha[110]使用卷积神经网络对传统方法 TLS 检测到的候选信号进行分类。

但随着数据处理技术的不断进步和计算性能的不断发展，开始有研究使用 GPU 直接处理并折叠原始的光变曲线信号，而不是使用预处理折叠好的光变曲线，从而更高效地从时间序列数据中提取凌星信号特征。如 GPFC 方法[35, 36]利用了 GPU 的并行计算能力，使数据处理速度极快，在处理 Kepler 望远镜数据时，比传统方法的运算速度提升了 3 个数量级。在精度方面，GPFC 方法能够达到比传统方法更高的精度，同时显著提高了召回率，尤其是在检测信号微弱、难以用传统方法识别的系外行星时表现出色。值得一提的是，GPFC 方法已成功应用于 Kepler 数据，并发现了 5 颗大小介于地球和火星之间的超短周期系外行星，它们的轨道周期均小于 1 d。得益于算法和计算设备的进步，这样的方法通过端到端的学习方式，可能

成为未来凌星信号检测的主流方法。我们将有机会仔细、彻底搜索已有数据中被遗漏的微弱信号，从而发现更多小型系外行星。

我们预计，随着机器学习和深度学习方法在光变曲线分析中更进一步的应用，凌星信号的检测效率和准确性将得到显著提升。

近年来系外行星领域的研究热度持续上升，相关研究呈现出稳步的增长趋势。这一趋势反映了凌星法和系外行星日益受到研究者关注。近年来也将有多台用于凌星探测或相关研究的空间望远镜发射[23, 25, 111, 112]，这将带来海量数据，因此我们预计未来凌星法在系外行星探测中的应用将更加广泛和深入。

随着系外行星科学进入精细化刻画与宜居性探索的新阶段，中国也已布局了多项具有国际竞争力的空间探测任务，旨在从不同技术路径突破类地行星探测的瓶颈。Zhou 等人[113]系统回顾了空间系外行星探测的进展，指出未来任务将向更高精度、更长基线和更多波段发展，其中 ET 和“近邻宜居行星巡天计划”(CHES) 是当前主要推进的科学卫星项目。

在凌星法探测方面，Wang 等人[114]详细评估了 ET 任务的凌星巡天能力，该任务计划利用大视场空间望远镜阵列，对 Kepler 天区及邻近天区进行超高精度的光度监测，旨在发现大量宜居带内的类地行星样本，从而揭示地球大小行星的统计规律。

而在高精度天体测量方面，Ji 等人[115]提出了 CHES 计划，该任务拟通过微角秒级（μas）的空间天体测量技术，对太阳系近邻（约 10 pc 范围内）的 FGK 型恒星进行普查。

Ji 等人[116]在 2024 年进一步阐述了 CHES 的科学目标与技术指标，指出该任务有望首次发现近邻类太阳恒星周围的宜居带“地球孪生星”，并直接测量其真实质量和三维轨道参数，这将填补现有视向速度法和凌星法在近邻长周期类地行星探测上的空白。这些空间任务的实施，有望显著提升中国在系外行星科学前沿领域的国际地位。

本文讨论了凌星法的基本原理、主要空间望远镜的发展历程、数据分析方法的演变以及未来研究方向的探讨，重点介绍了相较于其他方法，凌星法在发现类地系外行星方面的独特优势。

即将发射的空间望远镜（如 PLATO 和 ET）的重要科学目标都包括寻找类地宜居行星[23, 25]，随着未来空间望远镜的发射和数据分析技术的不断进步，我们有望在未来依靠凌星法发现类地宜居行星，推动系外行星研究的发展。

参考文献：

[1] NASA Exoplanet Archive. NASA Exoplanet Archive. https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu. 2025
[2] Mazeh T, Naef D, Torres G, et al. The Astrophysical Journal, 2000, 532: L55
[3] Henry G W, Marcy G W, Butler R P, et al. The Astrophysical Journal, 2000, 529: L41
[4] Charbonneau D, Brown T M, Latham D W, et al. The Astrophysical Journal, 2000, 529: L45
[5] Sasselov D D. The Astrophysical Journal, 2003, 596: 1327
[6] Batalha N M, Borucki W J, Koch D G, et al. The Astrophysical Journal, 2010, 713: L109
[7] Howard A W, Marcy G W, Johnson J A, et al. Science, 2010, 330: 653
[8] Borucki W J, Koch D G, Basri G, et al. The Astrophysical Journal, 2011, 736: 19
[9] Lissauer J J, Fabrycky D C, Ford E B, et al. Nature, 2011, 470: 53

[10] Howard A W, Marcy G W, Bryson S T, et al. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2012, 201: 15
[11] Batalha N M. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 111: 12647
[12] Bonfils X, Delfosse X, Udry S, et al. Astronomy & Astrophysics, 2013, 549: A109
[13] Thompson S E, Coughlin J L, Hoffman K, et al. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2018, 235: 38
[14] Quintana E V, Barclay T, Raymond S N, et al. Science, 2014, 344: 277
[15] Vanderburg A, Rowden P, Bryson S, et al. The Astrophysical Journal Letters, 2020, 893: L27
[16] Howell S B, Sobeck C, Haas M, et al. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2014, 126: 398
[17] Vanderburg A, Johnson J A. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2014, 126: 948
[18] Luger R, Agol E, Kruse E, et al. The Astronomical Journal, 2016, 152: 100
[19] Luger R, Kruse E, Foreman-Mackey D, et al. The Astronomical Journal, 2018, 156: 99
[20] Crossfield I J M, Petigura E, Schlieder J E, et al. The Astrophysical Journal, 2015, 804: 10
[21] Montet B T, Morton T D, Foreman-Mackey D, et al. The Astrophysical Journal, 2015, 809: 25
[22] Henderson C B, Poleski R, Penny M, et al. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2016, 128: 124401
[23] Rauer H, Catala C, Aerts C, et al. Experimental Astronomy, 2014, 38: 249
[24] Rauer H, Aerts C, Cabrera J, et al. Exp. Astron., 2025, 59: 26
[25] Ge J, Zhang H, Zang W, et al. ET White Paper: To Find the First Earth 2.0. https://arxiv.org/abs/2206.06693, 2022
[26] Ge J, the ET collaboration. The Innovation, 2022, 3: 100271
[27] Ge J, Chen W, Chen Y, et al. Chinese Journal of Space Science, 2024, 44: 400
[28] Ge J, Zhang H, Zang W, et al. Proceedings of SPIE: Space Telescopes and Instrumentation 2024: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. 2024: 18
[29] Kovács G, Zucker S, Mazeh T. Astronomy & Astrophysics, 2002, 391: 369
[30] Heller R, Rodenbeck K, Hippke M. Astronomy & Astrophysics, 2019, 625: A31
[31] Shallue C J, Vanderburg A. The Astronomical Journal, 2018, 155: 94
[32] Ansdell M, Ioannou Y, Osborn H P, et al. The Astrophysical Journal Letters, 2018, 869: L7
[33] Dattilo A, Vanderburg A, Shallue C J, et al. The Astronomical Journal, 2019, 157: 169
[34] Yu L, Vanderburg A, Huang C, et al. The Astronomical Journal, 2019, 158: 25
[35] Wang K, Ge J, Willis K, et al. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2024, 528: 4053
[36] Wang K, Ge J, Willis K, et al. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2024, 534: 1913
[37] Pollacco D, Skillen I, Cameron A, et al. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2006, 118: 1407
[38] SuperWASP. SuperWASP Exoplanets. https://www.superwasp.org/exoplanets/. 2025
[39] Bakos G Á, Noyes R W, Kovács G, et al. Proceedings of the International Astronomical Union, 2008, 4: 21
[40] Bakos G Á. Handbook of Exoplanets. Springer International Publishing, 2018: 957
[41] HATNet. The HATNet Exoplanet Survey. https://hatnet.org/planets/. 2025
[42] Pepper J, Kuhn R B, Siverd R, et al. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2012, 124: 230
[43] Harre J V, Smith A M S, Barros S C C, et al. Astronomy & Astrophysics, 2023, 669: A124
[44] KELT. Kilodegree Extremely Little Telescope (KELT). https://astronomy.osu.edu/ISL/instruments/kelt. 2025
[45] Wang S, Zhang H, Zhou X, et al. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2015, 218: 20
[46] Zhang H, Yu Z, Liang E, et al. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2019, 240: 17
[47] 余周毅, 周济林, 刘慧根, 等. 青海科技, 2023, 30: 13
[48] Moutou C, Deleuil M, Guillot T, et al. Icarus, 2013, 226: 1625
[49] Léger A, Rouan D, Schneider J, et al. Astronomy & Astrophysics, 2009, 506: 287
[50] Mosser B, Belkacem K, Goupil M J, et al. Astronomy and Astrophysics, 2010, 517: A22
[51] Deleuil M, Aigrain S, Moutou C, et al. Astronomy & Astrophysics, 2018, 619: A97
[52] Mathur S, Huber D, Batalha N M, et al. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2017, 229: 30
[53] Fressin F, Torres G, Charbonneau D, et al. The Astrophysical Journal, 2013, 766: 81
[54] Kasting J F, Whitmire D P, Reynolds R T. Icarus, 1993, 101: 108
[55] Barnes R. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2017, 129: 509
[56] Yang J, Cowan N B, Abbot D S. The Astrophysical Journal, 2013, 771: L45
[57] Luger R, Barnes R. Astrobiology, 2015, 15: 119

[58] P. Loyd R O, France K, Youngblood A, et al. The Astrophysical Journal, 2016, 824: 102
[59] Anglada-Escudé G, Amado P J, Barnes J, et al. Nature, 2016, 536: 437
[60] MacGregor M A, Weinberger A J, Loyd R O P, et al. The Astrophysical Journal Letters, 2021, 911: L25
[61] Chaplin W J, Lund M N, Handberg R, et al. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2015, 127: 1038
[62] Espinoza N, Brahm R, Jordán A, et al. The Astrophysical Journal, 2016, 830: 43
[63] Reed M D, Baran A S, Telting J H, et al. Open Astronomy, 2018, 27: 157
[64] Santos Â R G, Godoy-Rivera D, Finley A J, et al. Front. Astron. Space Sci., 2024, 11: 1
[65] Ricker G R, Winn J N, Vanderspek R, et al. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2014, 1: 014003
[66] Benz W, Broeg C, Fortier A, et al. Experimental Astronomy, 2020, 51: 109
[67] Lendl M, Csizmadia S, Deline A, et al. Astronomy & Astrophysics, 2020, 643: A94
[68] Matuszewski F, Nettelmann N, Cabrera J, et al. Astronomy & Astrophysics, 2023, 677: A133
[69] Ge J, Zhang H, Zhang Y, et al. In: Coyle L E, Perrin M D, Matsuura S, eds. Space Telescopes and Instrumentation 2024: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. SPIE, 2024: 45
[70] Buey J T, Bernardi P, Decaudin M, et al. In: Grycewicz T J, Marshall C J, eds. Focal Plane Arrays for Space Telescopes II. SPIE, 2005: 4
[71] Auvergne M, Bodin P, Boisnard L, et al. Astronomy & Astrophysics, 2009, 506: 411
[72] Damiani C, Meunier J C, Moutou C, et al. Astronomy & Astrophysics, 2016, 595: A95
[73] Koch D G, Borucki W J, Basri G, et al. The Astrophysical Journal, 2010, 713: L79
[74] Jenkins J M, Caldwell D A, Chandrasekaran H, et al. The Astrophysical Journal, 2010, 713: L87
[75] Valenti J A, Fischer D A. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2005, 159: 141
[76] Wright J T, Marcy G W, Butler R P, et al. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2004, 152: 261
[77] Petigura E A, Howard A W, Marcy G W. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110: 19273
[78] Bastien F A, Stassun K G, Basri G, et al. The Astrophysical Journal, 2016, 818: 43
[79] Pecaut M J, Mamajek E E. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2013, 208: 9
[80] Eker Z, Soydugan F, Soydugan E, et al. The Astronomical Journal, 2015, 149: 131
[81] Kopparapu R K, Ramirez R M, SchottelKotte J, et al. The Astrophysical Journal, 2014, 787: L29
[82] Pepe F, Cristiani S, Rebolo R, et al. Astronomy & Astrophysics, 2021, 645: A96
[83] Gilliland R L, Chaplin W J, Dunham E W, et al. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2011, 197: 6
[84] Schwieterman E W, Kiang N Y, Parenteau M N, et al. Astrobiology, 2018, 18: 663
[85] Osborn J, Föhring D, Dhillon V S, et al. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 452: 1707
[86] Bayliss D, O' Brien S M, Bryant E, et al. In: Holland A D, Beletic J, eds. X-Ray, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy X. SPIE, 2022: 45
[87] Borucki W J, Koch D, Basri G, et al. Science, 2010, 327: 977
[88] Müller S, Baron J, Helled R, et al. Astronomy & Astrophysics, 2024, 686: A296
[89] Hippke M, David T J, Mulders G D, et al. The Astronomical Journal, 2019, 158: 143
[90] Smith J C, Stumpe M C, Van Cleve J E, et al. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2012, 124: 1000
[91] Van Cleve J E, Caldwell D A. No. KSCI-19033-002, Moffett Field, CA: NASA Ames Research Center, 2016: 1
[92] Mislis D, Pyrzas S, Alsubai K A, et al. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016, 465: 3759
[93] Twicken J D, Chandrasekaran H, Jenkins J M, et al. In: Radziwill N M, Bridger A, eds. Software and Cyberinfrastructure for Astronomy. SPIE, 2010: 1U
[94] Aigrain S, Foreman-Mackey D. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2023, 61: 329
[95] Hippke M, David T J, Mulders G D, et al. AJ, 2019, 158: 143
[96] Morvan M, Nikolaou N, Tsiaras A, et al. The Astronomical Journal, 2020, 159: 109
[97] Armstrong D J, Osborn A, Adibekyan V, et al. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2023, 524: 5804
[98] Mislis D, Bachelet E, Alsubai K A, et al. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 455: 626
[99] Jenkins J M, Twicken J D, McCauliff S, et al. Chiozzi G, Guzman J C, eds. Software and Cyberinfrastructure for Astronomy IV. SPIE, 2016: 3E
[100] Twicken J D, Jenkins J M, Seader S E, et al. The Astronomical Journal, 2016, 152: 158
[101] Guerrero N M, Seager S, Huang C X, et al. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2021, 254: 39

[102] Tey E, Moldovan D, Kunimoto M, et al. The Astronomical Journal, 2023, 165: 95
[103] Agol E, Steffen J, Sari R, et al. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2005, 359: 567
[104] Holman M J, Fabrycky D C, Ragozzine D, et al. Science, 2010, 330: 51
[105] Lithwick Y, Xie J, Wu Y. The Astrophysical Journal, 2012, 761: 122
[106] Kipping D M. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2009, 396: 1797
[107] Damiani C, Lanza A F. Astronomy & Astrophysics, 2011, 535: A116
[108] Rodenbeck K, Heller R, Gizon L. Astronomy & Astrophysics, 2020, 638: A43
[109] Twicken J D, Clarke B D, Bryson S T, et al. In: Radziwill N M, Bridger A, eds. Software and Cyberinfrastructure for Astronomy. SPIE, 2010: 23
[110] Rao S, Mahabal A, Rao N, et al. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, 502: 2845
[111] Barclay T, Quintana E V, Colón K, et al. 2025 IEEE Aerospace Conference. IEEE, 2025: 1
[112] NASA Astrophysics Data System. NASA Astrophysics Data System. https://ui.adsabs.harvard.edu. 2025
[113] Zhou J, Xie J, Ge J, et al. Chinese Journal of Space Science, 2024, 44: 5
[114] Wang W, Zhai M, Zhao G, et al. Research in Astronomy and Astrophysics, 2023, 23: 095028
[115] Ji J H, Li H T, Zhang J B, et al. Research in Astronomy and Astrophysics, 2022, 22: 072003
[116] Ji J, Li H, Zhang J, et al. Chinese Journal of Space Science, 2024, 44: 193

Recent Advances in Exoplanet Detection Using the Transit Method

HU Quanquan[1,2], GE Jian[1]

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In recent years, with the successful operation of space-based photometric telescopes and the continuous improvement of data analysis methods, the transit method has made remarkable progress in the field of exoplanet detection, leading to a series of important discoveries. This review introduces the basic principles of the transit method, major operational ground-based and space-based telescopes, the evolution of data analysis techniques, and future research directions. It also discusses the unique advantages of the transit method in detecting potentially habitable Earth-like planets around Sun-like stars, as well as the application and development of emerging technologies, such as machine learning, in data processing. Finally, it provides an outlook on the future, highlighting that with the launch of next-generation space telescopes and continued advances in data analysis techniques, including the application of artificial intelligence, the transit method may lead to the first discovery of a habitable Earth-like planet orbiting a Sun-like star.

Key words: exoplanets; photometry; transit method