

丽江中红外低温相机的性能与初步观测结果

康嘉栋^{1,2,3}, 张居甲^{1,2}, 向永源¹, 李霞⁴, 范玉峰¹, 王德清¹, 许良¹, 伦宝利¹

(1. 中国科学院 云南天文台, 昆明 650216; 2. 国际超新星中心-云南省国际超新星研究重点实验室, 昆明 650216; 3. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 101408; 4. 中国航天科工集团 北京环境特性研究所, 北京 100854)

摘要: 本文介绍了丽江中红外低温相机 (LMICC) 的性能以及初步观测结果。该仪器基于碲镉汞探测器, 工作在 $7.7\text{--}9.5\text{ }\mu\text{m}$ 大气窗口, 部署于丽江 2.4 米望远镜的耐焦平台。我们发展了一套专用的数据处理与绝对流量定标流程, 基于对亮中红外标准星的观测, 实现了精度约 5–10% 的绝对流量测量, 并成功获得了亮星的中红外光变曲线。观测同时刻画了该波段本地大气消光的特性, 揭示了其与绝对湿度的定量关系, 表明丽江站在湿度较低的干旱冬季具备优良的中红外观测条件。凭借其低温设计和稳定性能, LMICC 为丽江 2.4 米望远镜拓展了中红外波段的观测窗口, 增加了日间观测能力。

关键词: 中红外相机; 测光; 大气消光; 变星

中图分类号: P111.3 **文献标识码:** A

1 引言

中红外 (约 $5\text{--}30\text{ }\mu\text{m}$) 天文学为研究寒冷、多尘埃的宇宙提供了关键窗口, 是探测星周尘埃热辐射、行星形成环境、严重遮蔽的恒星孕育区和星系核, 以及冷星和系外行星大气的主要波段 [1–4], 对应的观测对理解恒星演化、星际介质以及吸积和质量流失过程至关重要。

中红外天文学的进步得益于一系列开创性的地面与空间观测设施。在地面, 英国红外望远镜 (UKIRT) 上的宽视场相机 (WFCAM [5, 6])、欧洲南方天文台甚大望远镜 (VLT) 上的中红外成像仪与光谱仪 (VISIR [7])、昴星团望远镜 (Subaru) 上的制冷型中红外相机与光谱仪 (COMICS [8])、双子天文台 (Gemini) 的热区相机光谱仪 (T-ReCS) 及中红外相机光谱仪 (Michelle [9]), 以及加那利大型望远镜 (GTC) 的加那利红外相机 (CanariCam [10]) 等仪器, 为高角分辨率成像、光谱和时域研究奠定了基础。在空间, 红外天文卫星 (IRAS [11])、红外空间天文台 (ISO; [12])、斯皮策空间望远镜 (Spitzer [13])、广域红外巡天探测器 (WISE [14]) 以及最新的詹姆斯·韦伯空间望远镜 (JWST [15]) 通过避开地球大气吸收与热背景的

收稿日期: YYYY-MM-DD; 修回日期: YYYY-MM-DD

资助项目: 国家重点研发计划 (2021YFA1600404), 中国科学院 B 类先导专项 (XDB1160202), 国家自然科学基金 (12173082)

通讯作者: 张居甲, jujia@ynao.ac.cn; 向永源, Xiangyy@ynao.ac.cn; 李霞, lixia207@sina.com

干扰,以前所未有的灵敏度、稳定性与巡天效率推动了该领域的变革。当前,该领域呈现出空间与地面观测互补的格局:一方面依赖空间设备(如 JWST 的中红外仪器 MIRI [16])进行超高灵敏度、高角分辨率的观测;另一方面,则依靠大型地面望远镜上配备的专用仪器(通常集成自适应光学系统),执行高对比度、高时间采样频率以及灵活的后续观测。

长期以来,我国在天文基础设施中缺乏专用中红外观测设备,制约了在相关前沿领域的布局与参与。发展自主中红外观测能力、培养红外仪器与观测人才已成为迫切需求。

本文介绍的丽江中红外低温相机(Lijiang Mid-Infrared Cryogenic Camera, LMICC)是这一方向上的重要尝试。LMICC 是我国首台投入实测的地基专用中红外相机,工作于 $7.7\text{--}9.5\ \mu\text{m}$ 大气窗口,安装于丽江 2.4 米望远镜耐焦平台 [17]。其目标是在现有条件下搭建一个稳定可靠的实验观测平台,实现地基中红外观测能力从无到有的突破,为未来更大口径红外望远镜积累关键技术经验。尽管受口径和探测模式所限,其科学深度难与国际顶级设备相比,但通过该平台可系统验证关键技术,建立完整的观测与数据处理流程,并获取首批国内自主中红外数据。LMICC 的运行不仅为丽江 2.4 米望远镜开辟了新波段,其观测策略还充分利用白天时段,提高了望远镜使用效率,标志着我国中红外地基观测能力建设迈出实质性一步。

本文结构如下:第2章介绍 LMICC 的总体设计与性能;第3章描述观测策略及数据处理流程;第4章给出初步观测结果,包括绝对流量定标、大气消光特性及 Mira 变星光变;第5章为总结与展望。

2 LMICC 仪器系统

2.1 总体设计

LMICC 的核心探测器选用法国 SOFRADIR 公司的 MITIE Camera-640L 型中波红外焦平面阵列。该探测器采用碲镉汞(HgCdTe)材料,其截止波长经过优化,完整覆盖 $7.7\text{--}9.5\ \mu\text{m}$ 工作波段。该范围位于标准 N 波段($7\text{--}12\ \mu\text{m}$)内,下文简称为 LMICC- N_s 波段。为有效抑制该波段占主导地位的仪器自身热辐射噪声,LMICC 采用了低温光学与冷光阑一体化设计方案,由低温光机械组件、红外光学、探测器与读出电子学、低温真空杜瓦与制冷系统、数据采集与控制系统、快速数据处理管线、现场定标装置及地面支持设备等子系统构成(见图1)。核心为安装在密封光学冷舱的光机组件(图2左)。这些设计为丽江 2.4 米望远镜提供了稳定、低背景且高通量的中红外成像平台,能够开展中红外绝对测光与光变监测。

在光学与成像链路上,低温杜瓦通过法兰与耐氏平台刚性连接,保证指向与稳定性。红外光学镜组作为望远镜主光路的延伸,将耐焦($F/8$)光束经缩焦转换为与探测器匹配的 $F/2$ 光束(图2右),以提高通光量并优化采样。镜组采用全反射式设计,并通过与望远镜光阑面共轭的冷光阑实现与探测器视场的 100% 匹配,使探测器只接收来自已深度冷却光学表面的辐射,最大限度屏蔽望远镜结构的热背景。整个镜组与探测器封装于真空环境中,以消除对流换热与杂散热负荷。

在热学与机械方面,系统采用分级制冷与隔振方案:光学镜组由对置式斯特林制冷机经

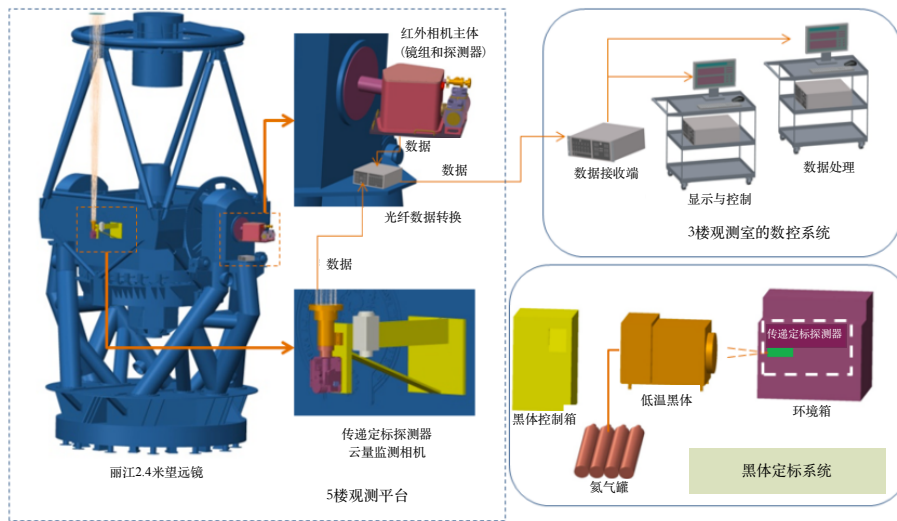


图1 中红外观测系统示意图，包括：望远镜、红外镜组与探测器、数据传输与处理以及黑体定标系统。

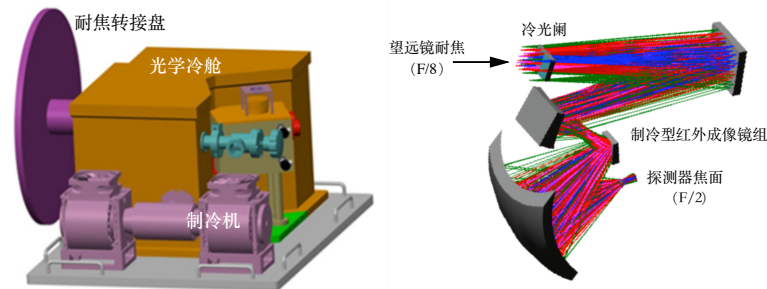


图2 红外成像系统。左：红外成像、制冷系统以及机械接口概图，右：制冷型红外镜组光路图。

柔性连接与隔振机构冷却至 $\leq -40^{\circ}\text{C}$ ，探测器工作温度约为 -200°C 量级，**温度波动范围 $\leq 2^{\circ}\text{C}$** 。分级制冷降低了各部件的辐射负荷，隔振设计在保证深度制冷的同时维持成像稳定性。为保障测量可追溯性，LMICC 集成的传递定标装置，可在现场进行系统响应的绝对定标与零点漂移监测。

2.2 主要性能参数

LMICC 的关键指标围绕定量测量需求进行设计并经实测验证。表1汇总了主要设计与实测性能。在 $7.7\text{--}9.5\text{ }\mu\text{m}$ 的工作波段，系统（含望远镜主次镜）的总光学透过率优于 75%，全视场相对畸变小于 0.5%，冷光阑效率达到 100%。上述光学指标为高通量、低杂散的成像提供了基础保障。

为满足绝对测光与跨夜一致性的需求，我们对探测器的线性度、稳定性、重复性与均匀性进行了标准化黑体测试：

- 线性度：以 10°C 为步长调整黑体温度，测量响应并建立辐射亮度—灰度曲线；经线性

表 1 LMICC 主要参数一览表

类别	参数名称与设计/测量值
总体参数	工作波段: 7.7–9.5 μm
	安装平台: 丽江 2.4 米望远镜耐焦平台
	系统总重: $\sim 111\text{ kg}$
	工作准备时间 (制冷与真空准备): $\leq 3\text{ 小时}$
光学系统	望远镜耐焦焦比: F/8
	红外镜组焦比: F/2
	系统总透过率: 77% (望远镜透过率 84%; 红外镜组透过率 92%)
	冷光阑效率: 100%
	全视场相对畸变: $< 0.5\%$
	光学部分制冷温度: $\leq -40^\circ\text{C}$
	像元比例尺: $0.64''/\text{pix}$
	视场: $6.9' \times 5.5'$
探测器	型号: MITIE Camera-640L
	类型: 碲镉汞 (HgCdTe)
	分辨率: 640×512 像素
	像元尺寸: $15\text{ }\mu\text{m}$
	数据位深: 14bit
	满阱电子数: 13.5 Me^-
	增益: $820\text{ e}^-/\text{ADU}$
	读出噪声: 2 Ke^-
	暗电流: $12\text{ Ke}^-/\text{s}$
	噪声等效温差: $\leq 20\text{ mK @}300\text{K}$
	探测器芯片工作温度: $\sim 77\text{ K }(-196^\circ\text{C})$
	机芯电子学制冷温度: $\leq -20^\circ\text{C}$
	稳定性 (8 小时): $\leq \pm 0.3\text{‰}$
	重复性 (3 天): $\leq \pm 1.97\text{‰}$
	线性度: $< 0.32\%$

拟合后, 响应相对偏差 (相对于拟合值的残差) $\leq \pm 1\%$ 。

- 稳定性: 在 20°C 黑体条件下连续工作 $\geq 8\text{ h}$, 相对漂移 $\leq \pm 0.2\%$ 。
- 重复性: 在相同条件下跨 3 天各进行 $\geq 1\text{ h}$ 测试, 测量的相对差异 $\leq \pm 0.5\%$ 。
- 均匀性: 完成非均匀性校正后, 以 -60°C 面源黑体充满视场, 中心视场内像元响应的均方根 $\sim 2\text{ ADU}$ 。

实测结果表明, 各项指标满足要求, 为后续开展**大气外绝对流量** (即校正大气消光后位于**大气层外的辐射流量**) 测量打下基础。

在热真空与运行保障方面, 光学冷舱采用动态真空方案, 工作周期内腔体压力可维持 $\leq 5\text{ Pa}$ (持续 $> 5\text{ h}$)。从系统启动到达到稳定工作温度的准备时间 $\leq 3\text{ h}$ 。外光学窗口采用防结

霜/防结露设计, 确保在不同环境湿度下的光路通透性与观测连续性。

综上, LMICC 在光学传输、探测器计量学和热真空环境控制等方面达到预期目标, 构建了稳定的中红外成像与定量测量能力, 可开展后续天文观测。

3 观测与数据处理

3.1 观测策略

地基中红外观测的核心挑战源于天空与望远镜结构产生的强烈热背景辐射。在 LMICC 工作波段, 背景辐射的总强度可达织女星流量的约 1000 倍。因此, 曝光策略与观测窗口安排旨在平衡信号与噪声。

为避免探测器在亮背景辐射下快速饱和, 同时为优化目标信噪比, 系统将单帧曝光时间固定为 $500\ \mu\text{s}$ (饱和阈值约 $900\ \mu\text{s}$)。为累积足够信号, 观测采用短曝光、连续采集、事后叠加的模式。对每个目标的一次典型观测持续 2 分钟, 以 $500\ \mu\text{s}$ 连续曝光, 生成包含超过 1000 帧原始图像的数据立方体, 供后续对齐与叠加处理。在此模式下, 系统的点源探测极限约为 $3 \times 10^{-16}\ \text{W cm}^{-2}$ (约 N 波段 5 AB 星等), 与织女星亮度相当, 因此观测目标局限于亮于 5 AB 星等的恒星。在此灵敏度下, 单次观测视场内通常仅有一颗可探测源, 无法进行视场内较差测光, 因此必须建立一套基于绝对流量标准星的定标体系。实测表明, Ns 波段的天空背景在白天与夜间的差异小于 20%。因此, 绝大多数观测被安排在白天进行, 这显著提高了望远镜的时间利用效率。仅对观测时间窗必须落在夜间的目标保留夜间观测。日间观测时, 需选择与太阳方向相反的天区, 以避免直射阳光进入光路。

非均匀性校正类似于光学观测的平场校正, 用以消除红外探测器各像元在响应效率、增益上的固有差异。每次观测序列开始前将望远镜指向相对均匀的天空背景, 采集多帧图像并取中值, 生成一幅像元响应参考图。在后续所有科学观测中, 每一帧原始数据均除以该参考图, 从而校正由像元不一致性引起的固定图案噪声。该校正直接以天光作为均匀辐射源, 与实际观测条件匹配良好, 并能适应观测中仪器温度的缓慢漂移。

绝对流量定标依赖于对已知流量的标准星进行观测。选用 UKIRT 亮红外标准星表^①中的恒星。该星表明确指出, 光谱型早于 K0 的恒星在 $10\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$ 波段均具有平滑的谱能量分布, 适合用作宽波段测光标准。我们据此选取合适的标准星 (见表 2), 并基于其 ISO 光谱数据计算出在 Ns 滤光片透射曲线内的积分流量, 作为绝对定标的基准。核心观测策略是对科学目标 (表 3) 与标准星进行交替观测。对于一个科学目标, 完整的观测序列持续 3–4 小时, 其间在不同大气质量下对该目标重复观测 4–5 次。在序列的开始、中期和结束等关键时间点, 插入对标准星的观测, 并确保标准星同样覆盖较宽的天顶距范围 (典型为 30° – 70°)。无论观测科学目标还是标准星, 每次访问都遵循相同流程: 先执行非均匀性校正, 然后进行 2–5 分钟的积分 (单帧曝光 $500\ \mu\text{s}$)。

通过上述多天顶距、多历元的标准星观测, 可在每个观测时段内同步求解出实时的大气

^①标准星列表及说明详见: <https://about.ifa.hawaii.edu/ukirt/calibration-and-standards/spectroscopic-calibration/standard-menu/>

消光系数和仪器测光零点, 最终得到目标的大气层外的绝对流量。

表 2 UKIRT 亮红外标准星

恒星	BS# ^a	光谱类型	赤经 (J2000)	赤纬 (J2000)	N 星等 (AB) ^b	Ns 波段绝对流量 ^c
HD 6860	337	M0III	01:09:43.92	+35:37:14.01	2.58	25.60
HD 29139	1457	K5III	04:35:55.24	+16:30:33.49	1.61	59.33
HD 34029	1708	G4III	05:16:41.36	+45:59:52.77	3.01	16.88
HD 39801	2061	M2Ia	05:55:10.31	+07:24:25.43	-0.44	371.56
HD 48915	2491	A1V	06:45:08.92	-16:42:58.02	3.16	14.05
HD 124897	5340	K1III	14:15:39.67	+19:10:56.67	2.32	69.26
HD 164058	6705	K5III	17:56:36.37	+51:29:20.02	3.14	14.19
HD 206936	8316	M2Iae	21:43:30.46	+58:46:48.16	1.15	83.55
HD 217906	8775	M2II	23:03:46.46	+28:04:58.03	1.97	42.03

^aUKIRT 标准星表亮星编号。

^b 来自 UKIRT 红外标准星表的 N 波段星等, 典型不确定度为 ± 0.02 星等。

^cLMICC-Ns 波段大气外绝对流量根据 ISO 光谱推导得出, 单位为 10^{-16} W/cm^2 。

表 3 目标源星表

恒星	赤经 (J2000)	赤纬 (J2000)	N 星等 (AB) ^a	Ns 波段绝对流量 ^b
IRC +10216	09:47:57.41	+13:16:43.56	-2.43	2521.76
HD 84748	09:47:33.48	+11:25:43.82	0.65	148.42
HD 120285	13:49:02.07	-28:22:03.53	0.00	294.09
HD 131873	14:50:42.33	+74:09:19.81	3.12	14.95
HD 148783	16:28:38.55	+41:52:54.04	2.13	35.89
HD 177940	19:06:22.25	+08:13:48.01	2.78	20.35
HD 181903	19:21:42.05	+17:39:59.83	3.71	8.37
HD 187796	19:50:33.92	+32:54:50.61	0.94	103.85
HIP 102082	20:41:18.27	+48:08:28.81	2.13	38.29
HD 202012	21:09:12.82	+68:29:27.23	1.75	48.73

^a 星等来自 UKIRT 或 ISO 星表, 表示目标在观测历元的亮度, 不应视为该恒星在整个演化周期内的平均亮度。

^bLMICC-Ns 波段大气外绝对流量根据 ISO 光谱推导得出, 单位为 10^{-16} W/cm^2 。

3.2 数据预处理

LMICC 的数据采集系统在数据输出前已实时完成了平场校正与暗场扣除, 该流程与标准光学 CCD 成像的数据处理实践一致 [e.g., 18]。由于观测视场中通常仅有一颗位于中心附近的亮星, 目标所在局部区域的照明与像元响应变化可忽略不计, 因此自动化的实时校正已能满足后续测光对平坦场的要求。

主要的数据处理挑战来源于探测器固有的脉冲式“椒盐”噪声与较低的信噪比, 这些因素会干扰自动化的星像检测, 有时甚至需要人工干预 [19, 20]。为在星像识别阶段有效抑制此类噪声, 我们采用中值滤波作为标准的预处理步骤。中值滤波是一种非线性数字滤波技术,

能有效去除脉冲噪声, 同时较好地保持图像边缘结构, 这使其优于均值滤波等线性平滑方法 [20]。该算法通过一个滑动核 (通常为 3×3 或 5×5 像元) 遍历图像, 对核内像元值进行排序, 并将中心像元的值替换为该序列的中值。

图 3 直观展示了中值滤波的处理效果。应用该滤波后, 自动化星像检测的成功率显著提高, 简化了后续批处理流程。但需特别注意, 经过中值滤波处理的图像不用于最终的科学分析, 因为非线性平滑会改变恒星的轮廓形态与流量 [e.g., 18, 21]。滤波图像仅作为促进星像快速、稳健识别的中间步骤, 旨在提高后续图像对齐与叠加流程的效率和精度。

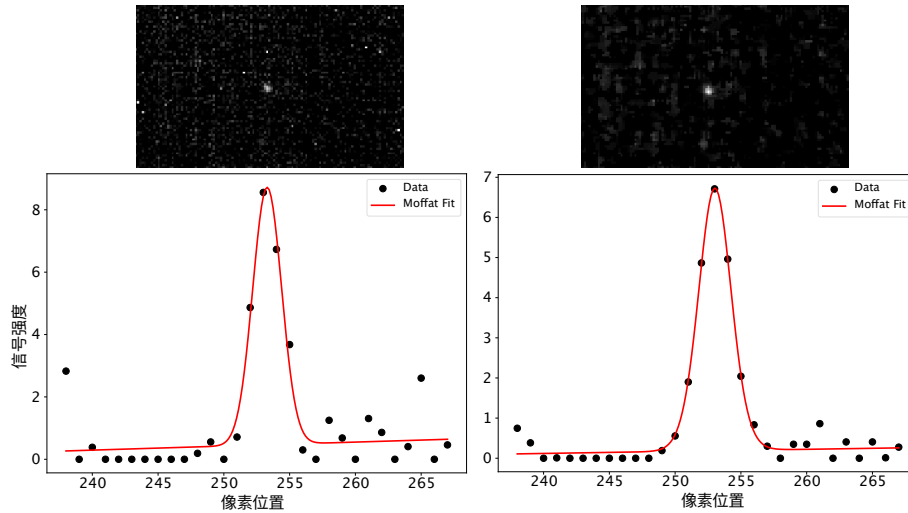


图 3 中值滤波对信号与噪声特性的影响。左、右两图分别展示了原始单帧图像及应用非线性中值滤波后, 信号与噪声成分的对比。中值滤波核尺寸为 3×3 像素。每个子图上方展示星像, 下方为其对应的拟合轮廓。

3.3 图像对齐与叠加

图像对齐与叠加流程旨在消除单帧图像中的随机抖动与偏移, 并通过叠加多帧图像提升信噪比, 最终获得更高质量的科学图像。整个流程始于一系列短曝光原始帧。首先需要进行图像对齐, 即找到所有图像相对于某一参考帧的精确位置偏差。对于本中红外系统, 初始的图像配准需通过对单帧数据的后处理完成 [22]。我们采用基于频域的互相关技术来完成这一关键步骤 [23]。具体而言, 将每帧图像与参考帧进行傅里叶变换, 并计算它们的互功率谱; 再对该谱进行逆傅里叶变换, 便可得到一幅互相关图。该图中亮度最高的像素点位置, 即指示了两幅图像之间的整体平移偏移量, 此方法是图像对齐的常用技术 [24, 25]。

为了达到亚像素级的对齐精度, 我们在上述整数偏移定位的基础上, 进一步计算互相关图峰值附近一个小区域内的强度加权质心 [23]。这个质心坐标给出了更为精细的亚像素级位移值。

在确定了每帧图像的亚像素偏移量后, 需要对图像进行重新采样, 将所有图像对齐到同一个像素网格上。我们采用双三次插值算法执行重采样 [26], 该算法能根据周围 16 个像素的值, 平滑地估算出新位置上的像素强度, 从而在平移图像时最大程度地保持细节和平滑度。

当所有帧都完成高精度对齐后,即进入图像叠加阶段。我们将所有已配准的像素进行中值组合或加权平均,生成一幅最终的主叠加图像 [18, 27]。此过程能有效平均掉单帧图像中的随机噪声,同时累积天体的真实信号,从而提升图像的信噪比。

该对齐与叠加流程的有效性通过最终叠加图像中点扩散函数 (PSF) 的质量以及信噪比进行验证 (图4)。与单帧图像中模糊、不规则的 PSF 轮廓相比,叠加后的 PSF 呈现出更光滑、对称且稳定的形态。这一结果证明,该流程有效地抑制了由望远镜跟踪误差和大气湍流引起的图像抖动与畸变,恢复了仪器在稳定条件下的本征成像能力。实测表明,对于信噪比较低的源,叠加约 100 帧所获得的图像质量提升已接近饱和;受限于读出噪声及背景的时域起伏,继续增加叠加帧数带来的改善有限 (见图4b、c 子图)。因此,一次持续约 2 分钟、产出逾千帧短曝光数据的典型观测序列,不仅能够生成用于科学分析的高质量叠加图像,其高时间采样的原始数据本身也可用于研究目标在亚分钟量级上的短时标光度变化。

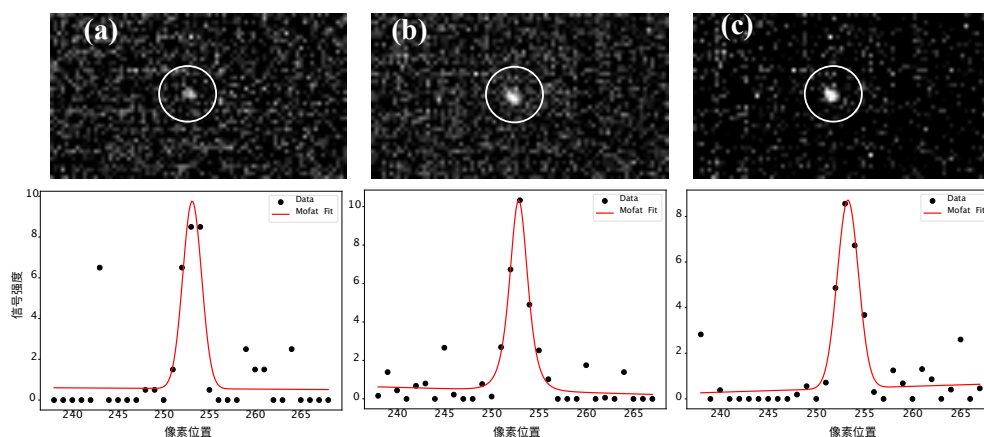


图4 图像叠加对 HD 48915 成像质量的改善。(a) 单帧原始图像; (b) 叠加 100 帧; (c) 叠加 1000 帧。每个子图上方展示星像, 下方为其对应的 PSF 拟合轮廓。各星象的信噪比分别为 4.6、8.4 和 8.5。

4 结果与分析

4.1 孔径测光

由于 LMICC 的单次观测视场内通常仅有一颗可探测的亮星, 我们采用经典的孔径测光法进行流量提取。该方法通过在目标星像周围定义一个圆形孔径来累积信号, 并在外围的环形区域内估计并扣除天空背景, 其原理简单可靠, 特别适用于此类孤立点源的测光。

为优化测光信噪比, 我们为每帧图像动态确定一个最佳孔径半径。背景天光在一个以目标为中心、内半径为 5 倍半高全宽 (FWHM)、宽度为 2 倍 FWHM 的环内进行估计。由于观测图像为离散像素网格, 在此网格上定义连续圆形孔径时, 位于孔径边缘的像素会产生部分填充问题, 使用硬边界孔径会引入系统性的流量测量误差。对于像斑尺寸较小 (比如 FWHM 为 2-5 像素) 的情况, 此误差尤为显著。为提高测光精度, 我们采用部分像素加权技术 (常

称“软孔径”)[21]，即根据像素中心与孔径中心的几何关系，对部分落入孔径的像素按其被孔径覆盖的面积比例分配权重。此举有效消除了硬边界带来的流量不连续性。最后，为修正孔径外损失的光子，我们通过分析亮星的流量累积曲线（生长曲线）确定孔径修正值，从而将孔径内测量值外推至目标的总流量[18]。

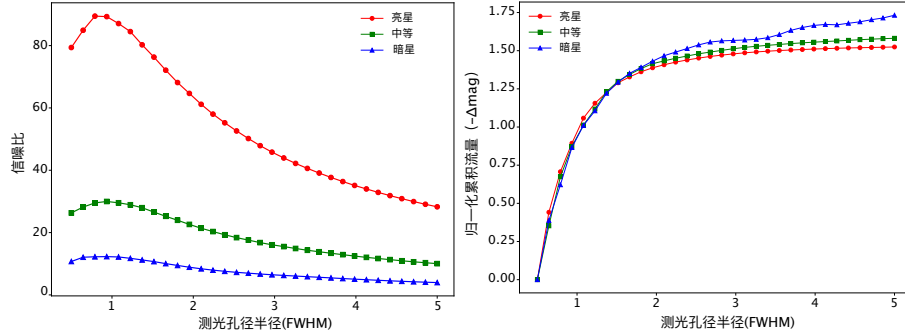


图5 明亮源 (IRC+10216), 中等亮源 (IRC +40448) 以及较暗源 (HD 202012) 单帧图像测光孔径生长曲线。左: 信噪比 (SNR) 随归一化孔径半径 (以 FWHM 为单位, 典型值为 3 个像素) 的变化。右: 归一化累积流量 ($-\Delta mag$) 随孔径半径的变化, 其中 $-\Delta mag$ 表示相对于 0.5 倍 FWHM 参考孔径的星等差, 用于表征孔径内累积的能量比例。

图5展示了不同亮度星的孔径生长曲线及其对应的信噪比变化。左图表明, 当孔径半径约为 1 倍 FWHM 时, 各类目标的信噪比均达到或接近极大值, 且该孔径所包含的能量比例基本一致。右图的累积流量曲线显示, 亮星的生长曲线平滑收敛, 可通过外推可靠获得总流量; 而暗星曲线因信噪比低、噪声影响显著, 无法稳定收敛, 表现出较大离散性。因此, 在实际处理中, 我们采用由亮星确定的最优孔径半径 (约 1 FWHM), 并基于亮星的生长曲线计算孔径修正值, 将其统一应用于所有目标。考虑到观测中视宁度、大气透过率及背景条件的变化会影响点扩散函数形态, 每小时计算一次孔径修正值, 以保证测光结果的可靠性。

4.2 定标、消光测量与验证

精确的流量定标需要对观测目标受到的大气消光进行校正。在 LMICC 工作的 Ns 波段, 大气消光主要来源于水汽和臭氧的吸收。绝对定标的核心是建立仪器测光系统与标准星系统之间的转换关系。我们利用绝对星等定标方程进行定标, 根据公式:

$$M = m + kX + Z \quad (1)$$

其中, m 为仪器星等, M 为标准星在 Ns 波段的真实星等, X 为大气质量, k 为大气消光系数, Z 为仪器零点。由于 LMICC 使用单一滤光片, 无需进行颜色项改正。

在每个观测时段, 我们对多颗 UKIRT 亮标准星在宽天顶距范围内进行重复观测。对每颗标准星的观测序列 (X, m) 进行线性最小二乘拟合, 可独立求解出该时段的 k 和 Z 。为确保结果可靠性, 我们剔除了受不稳定天气影响或拟合残差异常大的数据, 最终基于 16 个高质量观测时段、累计 150 余组有效测光数据, 构建了消光系数样本集。图6 (左) 展示了不同湿度条

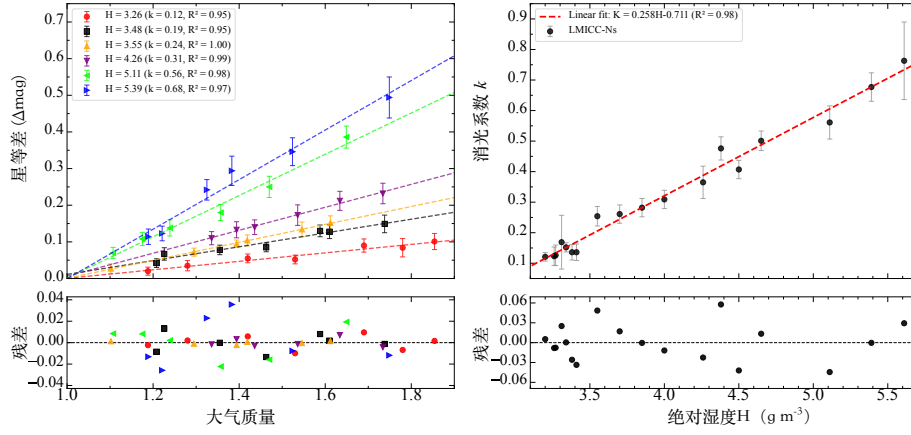


图6 丽江观测站 N_s 波段大气消光特性。左：不同绝对湿度条件下，标准星观测的仪器星等变化 (Δmag) 与大气质量的关系。虚线为线性拟合，其斜率即为对应湿度下的消光系数 k 。右：消光系数 k 与绝对湿度 H 的关系，虚线为线性拟合。图例中标注了各拟合的决定系数 R^2 。各子图下方为拟合的残差分布。

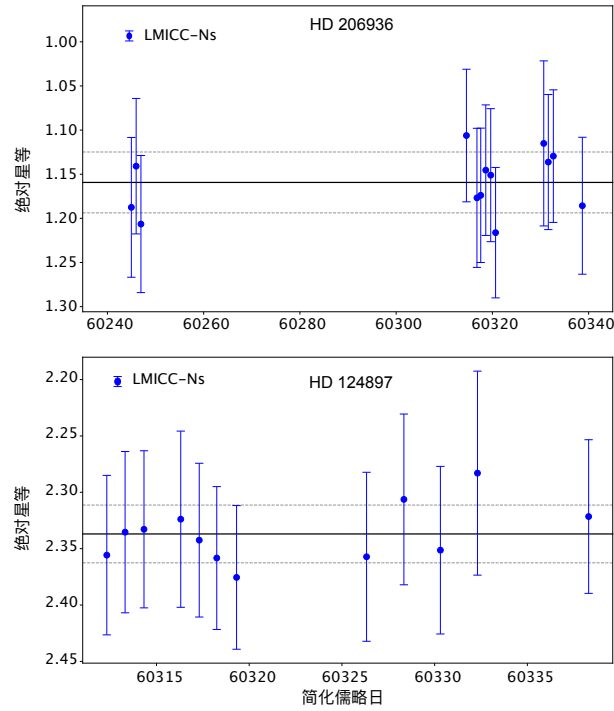


图7 标准星 HD 206936 (上图) 与 HD 124897 (下图) 的 LMICC- N_s 波段光变曲线。每一个圆点为单日多次测量的平均值，误差为多次测量的统计误差。图中实线表示 N_s 波段星等的平均值，虚线表示 ± 1 倍标准差的区间。

件下标准星仪器星等变化量和大气质量的关系及线性拟合, 其斜率即为对应湿度下的 k 值。

为深入理解本地大气透过率特性并探索实时校正的可能性, 我们将测量得到的 k 值与丽江观测站自动气象站记录的分钟级气象数据 (温度、相对湿度、气压) 进行关联分析。如图6右所示, 绝对湿度 (H) 与消光系数 (k) 之间存在定量关系: $k = 0.258H - 0.711$, 这直接印证了水汽是 Ns 波段消光的主导因素。该经验公式量化了水汽含量对中红外大气吸收的影响, 为未来在大气条件快速变化时对消光进行实时估计与校正奠定了依据。

获得 k 和 Z 后, 即可通过公式 (1) 将科学目标的仪器星等转换为大气层顶的绝对星等。为系统评估此定标流程的精度, 我们进行了内部交叉验证: 首先计算每个观测时段所有标准星定标结果的平均参数, 再用此时段平均参数对时段内每一颗标准星重新进行流量归算。分析表明, 标准星单日内的重复测量统计误差小于 ± 0.05 mag。

图7展示了我们对两颗典型标准星 HD 206936 (M2-Ia 型红超巨星) 和 HD 124897 (K 型红巨星) 的长期监测结果。在超过 100 天的观测期内, HD 206936 的 Ns 波段平均星等为 1.16 ± 0.03 mag, HD 124897 为 2.34 ± 0.03 mag, 与 UKIRT、ISO 等星表值在误差范围内一致, 印证了定标结果的可靠性。

基于全部有效时段、多颗标准星的统计分析得出, LMICC 系统对亮于 4 AB 星等 (Ns 波段) 目标的绝对流量定标精度约为 5–10%。这证实了即使在单视场、单亮星的观测限制下, 本文采用的多标准星、宽天顶距绝对定标方法, 能够可靠地获取中红外流量数据。

对消光测量结果的进一步分析揭示了丽江站中红外观测潜力存在显著的季节性差异。在绝对湿度较低时 (例如 $H \approx 3.2 \text{ g m}^{-3}$, 对应干旱的冬季), Ns 波段消光系数可低至 ~ 0.11 mag, 与丽江站 I 波段的典型消光水平相当 [28], 表明该时段具备开展高质量中红外观测的优越条件。反之, 在高绝对湿度下 (例如 $H > 5 \text{ g m}^{-3}$, 多见于雨季前后的夏初或秋初), Ns 波段消光系数可超过 0.6 mag, 其消光强度甚至大于丽江站的 U 波段 [28]。在此类高湿度条件下, 强烈的大气吸收将严重制约中红外观测的深度与精度。这一分析为在丽江站规划和优化中红外观测任务提供了关键的气象依据。

4.3 初步科学应用: Mira 变星光变监测

在验证定标流程可靠性的基础上, 我们将其应用于真实的科学目标, 以展示 LMICC 的时域监测能力。图8展示了两颗典型 Mira 变星 HD 84748 (上图) 和 HD 202012 (下图) 的多波段 (V, I, Ns) 光变曲线。 V, I 波段数据来自美国变星观测者协会 (AAVSO^①) 的长期监测, Ns 波段数据则由 LMICC 获得。Mira 变星是长周期脉动变星的经典代表, 拥有长达数个世纪的观测历史, 是研究恒星晚期演化、质量损失等物理过程的关键天体。

从光变曲线中可以清晰地观察到两个关键现象。首先, **光变幅度**存在显著的波长依赖性。**变幅**随观测波长的增加而呈现系统性减小的趋势, 即 V 波段变幅最大, I 波段次之, Ns 波段**变幅**最小。这一现象与理论预期一致, 因为较长波段的辐射源受表层脉动的影响较弱, 因此光度变化更为平缓。其次, 中红外波段成功追踪长周期光变。LMICC 获得的 Ns 波段光变曲线, 清晰地刻画了 Mira 变星缓慢的光变, 其光度的变化趋势与光学波段 (V, I) 的监测数

^① <https://www.aavso.org>

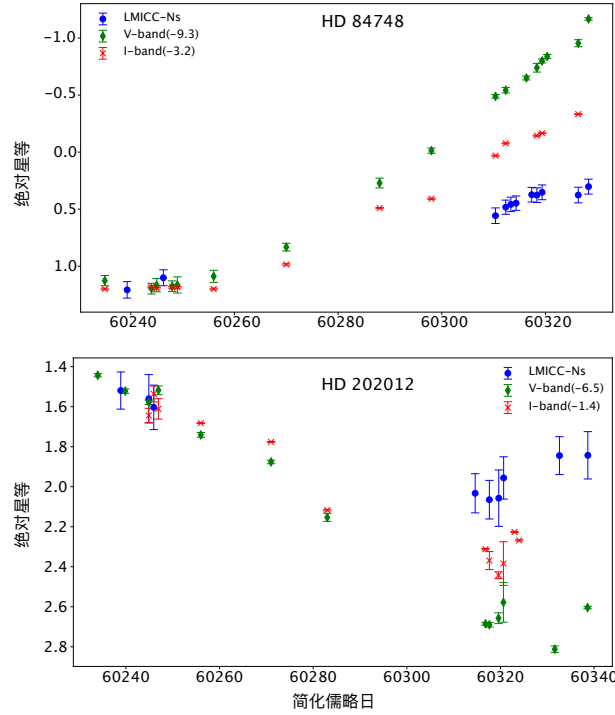


图8 Mira 变星 HD 84748 (上图) 和 HD 202012 (下图) 的 Ns 波段与光学 V 、 I (来自 AAVSO) 光度曲线; 为便于与 Ns 波段直接比较, 光学波段光变曲线在纵向上作常量平移。

据高度吻合。这直接证明 LMICC 具备开展中红外时域测光的能力, 所获数据能与光学波段数据有效衔接, 为获取更全面的恒星物理信息提供了新的观测窗口。

综上所述, 通过对标准星定标精度的验证和对 Mira 变星光变曲线的分析, 表明 LMICC 已具备产出较可靠的中红外绝对流量数据和对亮变星开展有效时域监测的能力, 其结果物理意义清晰, 且与多波段数据具良好一致性。

5 总结与展望

本文系统介绍了丽江 2.4 米望远镜中红外低温相机 LMICC 的主要性能及初步科学成果。在 $7.7\text{--}9.5\ \mu\text{m}$ 波段, 我们建立了观测策略与自动化处理流程, 实现了亮红外恒星绝对流量 5–10% 的测量精度。多历元标准星观测首次定量给出了丽江站该波段的大气消光系数, 并建立了其与本地绝对湿度的线性经验关系, 为利用实时气象数据进行消光校正提供了基础。处理流程已通过 Mira 变星光变曲线验证, 结果清晰展示了光度随波长增加、变幅从光学 (V/I) 到中红外 (Ns) 单调减小的趋势, 与理论一致。LMICC 的稳定运行在一定程度上填补了国内地基中红外观测能力的空白。低温设计有效抑制了仪器热辐射, 缩短了冷却时间并保证了长期稳定工作; 观测表明丽江站冬季中红外大气透过条件优良。

目前测量深度与精度主要受限于强烈且时空变化显著的天空和望远镜热背景, 高背景迫使积分时间缩短, 使除少数亮星外其他目标信噪比偏低, 单视场通常仅有一颗测量目标, 难以开展高精度差分光度。引入“chopping/nodding”观测模式是未来升级的方向 [7, 29]: 通过次镜在目标与邻近空天间快速切换 (chopping), 并配合望远镜较慢指向摆动交换光束位置 (nodding), 可同时去除天空及望远镜/仪器热背景及其不均匀性, 显著抑制背景涨落, 预计将探测灵敏度提升 2–3 个量级。

在灵敏度提升的前提下, LMICC 的科学能力将大幅扩展: 可观测更多更暗且更稳定的标准星, 建立更稳健的绝对流量定标与跨夜零点; 单视场可获得多颗恒星, 实现高精度差分光度研究变星与暂现源。升级后的 LMICC 有望成为中红外天体物理的重要工具, 应用拓展至星周尘埃、晚期演化恒星及河外暂现源等方向。

参考文献:

- [1] Genzel R, Cesarsky C J. ARA&A, 2000, 38: 761
- [2] Tielens A G G M. ARA&A, 2008, 46: 289
- [3] Henning T. ARA&A, 2010, 48: 21
- [4] Madhusudhan N. ARA&A, 2019, 57: 617
- [5] Dye S, Warren S J, Hambly N C, et al. MNRAS, 2006, 372: 1227
- [6] Casali M, Adamson A, Alves de Oliveira C, et al. A&A, 2007, 467: 777
- [7] Lagage P O, Pel J W, Authier M, et al. The Messenger, 2004, 117: 12
- [8] Kataza H, Okamoto Y, Takubo S, et al. Proceedings of the SPIE: Vol. 4008. 2000: 1144
- [9] Glaspey C H, Atad-Etchedgui E I, Harris J W. Proceedings of the SPIE: Vol. 2871. 1997: 1197
- [10] Telesco C M, Pina R K, Hanna K T, et al. Proceedings of the SPIE: Vol. 4841. 2003: 913
- [11] Neugebauer G, Habing H J, van Duinen R, et al. The Astrophysical Journal Letters, 1984, 278: L1
- [12] Kessler M F, Stein J A, Anderegg M E, et al. Astronomy and Astrophysics, 1996, 315: L27
- [13] Werner M W, Roellig T L, Low F J, et al. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2004, 154: 1
- [14] Wright E L, Eisenhardt P R M, Mainzer A K, et al. The Astronomical Journal, 2010, 140: 1868
- [15] Gardner J P, Mather J C, Abbott R, et al. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2023, 135: 068001
- [16] Rieke G H, Wright G S, Bunker T, et al. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2015, 127: 584
- [17] Fan Y F, Bai J M, Zhang J J, et al. RAA, 2015, 15: 918
- [18] Howell S B. Handbook of CCD Astronomy: Vol. 5. 2006
- [19] Hwang H, Haddad R A. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4: 499
- [20] Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing. 4th ed. New York, NY, USA: Pearson, 2018
- [21] Stetson P B. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1987, 99: 191
- [22] Pence W D, Chiappetti L, Page C G, et al. Astronomy Astrophysics, 2010, 524: A42
- [23] Guizar-Sicairos M, Thurman S T, Fienup J R. Optics Letters, 2008, 33: 156
- [24] Brown L G. ACM Computing Surveys, 1992, 24: 325
- [25] Lewis J P. Vision Interface. 1995: 120
- [26] Keys R G. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1981, 29: 1153
- [27] Fruchter A S, Hook R N. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2002, 114: 144
- [28] Wang C J, Bai J M, Fan Y F, et al. RAA, 2019, 19: 149
- [29] Kaufl H U, Sterzik M F, Siebenmorgen R, et al. Moorwood A F M, Iye M, eds. Proceedings of the SPIE: Vol. 4841 Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes. 2003

Characterization and Preliminary Observations with the Lijiang Mid-Infrared Cryogenic Camera

Jiadong KANG^{1,2,3}, Jujia ZHANG^{1,2}, Yongyuan XIANG¹, Xia LI⁴, Yufeng FAN¹,
Deqing WANG¹, Liang XU¹, Baoli LUN¹

(1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, 650216, China; 2. International Centre of Supernovae (ICESUN), Yunnan Key Laboratory of Supernova Research, Kunming 650216, China; 3. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 101408, China; 4. Beijing Institute of Environmental Characteristics, China Aerospace Science and Industry Corporation (CASIC), 100854)

Abstract: This paper reports the deployment and initial performance of the Lijiang Mid-Infrared Cryogenic Camera (LMICC), a new instrument that fills a domestic gap in ground-based mid-infrared astronomy of China. Commissioned at the Nasmyth focus of the Lijiang 2.4 m Telescope, the HgCdTe-based LMICC covers the 7.7–9.5 μm atmospheric window. We present a dedicated data-reduction and flux-calibration pipeline, together with initial observations of bright mid-infrared stars, achieving absolute flux measurements with an accuracy of $\sim 5\text{--}10\%$ and tracing their temporal variations. Concurrent observations of flux-standard stars are used to characterize the local atmospheric extinction, quantifying a clear dependence on airmass and absolute humidity. This analysis confirms that the Lijiang site offers favorable atmospheric transparency for mid-infrared observations during the dry winter season. The successful deployment and stable performance of the cryogenic LMICC establish a new platform for mid-infrared astronomy, with potential applications extending to daytime observations.

Key words: Mid-infrared Camera, Photometry, Atmospheric extinction, Variable star