

月球熔岩管天窗探测研究进展

胡国平* 汤慧蕾 陈一平 张吴明

(中山大学遥感科学与技术学院 珠海 519082)

摘要: 火山时期由流动熔岩冷却凝固形成的月球熔岩管, 因其坚硬外壳能够为管内提供稳定、安全的内部环境, 被视为未来月球基地建立的理想地点之一。然而熔岩管埋藏地下数百米至数公里, 难以直接探测。目前主要依赖雷达与重力异常探测技术, 但轨道雷达探测的分辨率不足以分辨相似形态的地下结构, 原位探地雷达存在探测范围有限、易受到近场干扰等问题。重力异常探测则难以精准识别南北走向或亚公里级规模的熔岩管。天窗是识别熔岩管的关键标志, 可通过光学影像和红外辐射探测热异常进行识别。但光学影像受光照条件制约, 难以完整获取天窗的三维几何结构; 红外辐射数据受探测深度与分辨率限制(320 m×160 m), 难以捕捉深层热异常及约束坑底物质成分。针对天窗探测方法的技术难点, 该文探讨了被动微波探测天窗热异常的可行性, 利用其穿透性强、对介电性质敏感的优势, 能够深入探测次表层热特征并有效约束坑底物质成分。然而, 现有被动微波遥感数据在分辨率(公里级)上难以满足对百米级天窗热异常的精准探测。如何提升微波对百米级天窗的识别能力成为当前技术亟须突破的瓶颈之一。

关键词: 熔岩管探测; 天窗探测; 热异常探测; 被动微波遥感; 月球基地

中图分类号: TP722.6

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2026)x-0001-16

DOI: 10.12000/JR25190

CSTR: 32380.14.JR25190

引用格式: 胡国平, 汤慧蕾, 陈一平, 等. 月球熔岩管天窗探测研究进展[J]. 雷达学报(中英文), 待出版. doi: 10.12000/JR25190.

Reference format: HU Guoping, TANG Huilei, CHEN Yiping, *et al.* Advances in lunar lava tube skylight detection[J]. *Journal of Radars*, in press. doi: 10.12000/JR25190.

Advances in Lunar Lava Tube Skylight Detection

HU Guoping* TANG Huilei CHEN Yiping ZHANG Wuming

(School of Geospatial Engineering and Science, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: Formed by the cooling and solidification of flowing lava during volcanic activity, lunar lava tubes are considered promising candidates for future lunar bases due to their stable and protective roofs. However, these tubes are typically buried hundreds of meters to kilometers beneath the surface, making direct detection extremely difficult. Current detection methods mainly rely on radar and gravity anomaly analysis. However, the resolution of orbital radar is insufficient to distinguish similar subsurface structures, whereas in situ lunar penetrating radar is limited by a small detection range and vulnerability to near-field interference. Gravity anomaly detection also performs poorly when identifying tubes oriented north-south or with roofs narrower than a kilometer. Skylights serve as critical indicators for locating subsurface tubes and can be identified through optical imagery and infrared radiation thermal anomalies. However, optical images are constrained by illumination conditions, making full three-dimensional reconstruction of skylights difficult. Infrared data are

收稿日期: 2025-09-26; 改回日期: 2026-02-08; 网络出版: 2026-04-09

*通信作者: 胡国平 hugp5@mail.sysu.edu.cn *Corresponding Author: HU Guoping, hugp5@mail.sysu.edu.cn

基金项目: 广东省珠江人才计划青年拔尖人才(2023QN10H526), 广东省珠江人才计划领军人才(2021CX02S024)

Foundation Items: Young Top Talents of Guangdong Pearl River Talent Program (2023QN10H526), Leading Talents of Guangdong Pearl River Talent Program (2021CX02S024)

责任编辑: 何姿 Corresponding Editor: HE Zi

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

further limited by penetration depth and spatial resolution (320 m×160 m), which hinders the detection of subsurface thermal anomalies and the assessment of the thermophysical properties of materials at the pit floor. To address these challenges, this paper explores the feasibility of detecting skylight thermal anomalies using microwave radiation. Owing to its penetration capability and sensitivity to dielectric properties, this approach can probe subsurface thermal features and effectively determine the material composition of the pit floor. However, a significant scale disparity exists between the kilometer-scale resolution of current data and the relatively small size of skylights. Therefore, enhancing the detection capability of passive microwave methods for 100-m-scale skylights remains a critical issue that requires immediate attention.

Key words: Lava tube detection; Skylight detection; Thermal anomaly detection; Passive microwave remote sensing; Lunar base

1 引言

月球作为离地球最近的天体,一直是资源勘探、科技实验和深空探索的重要前沿阵地^[1-3]。随着各国探月工程的持续推进,相较于阿波罗等早期月球探测任务所获取的基础数据,现代月球探测任务(如月球勘测轨道飞行器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)、重力重建与内部结构实验室(Gravity Recovery and Interior Laboratory, GRAIL)及嫦娥系列)成功获取了更高精度的多源探测数据,推动月球研究进入全新阶段。为了深入探测月球,各国相继提出了月球基地建设的规划和设想^[4,5]。月球基地作为深空探测的前哨站与补给站,不仅能够利用月球独特的环境优势长期开展就位观测,还可在月表就地提取水冰、生产燃料等物资,构建深空探测的补给点,降低深空任务风险,为人类迈向火星乃至更远星际打下基础。因此月球基地建设成为未来月球探测的必然选择。

然而月球表面环境极其恶劣,为月球基地选址带来了巨大的挑战。首先,月球表面由于缺乏大气层的保护,长期暴露在来自太空的各种辐射中,形成了复杂的混合辐射环境,对人类开展月表活动构成了严重威胁^[6,7]。其次,月表的昼夜温度波动范围可达300°C^[8,9],这一极端的温度变化无法满足生物的生存条件。此外,宇航员在月球表面活动时,还需要躲避频繁的微陨石群撞击^[10,11]。太空辐射、极大的昼夜温差以及微陨石撞击等因素共同作用,进一步加剧了人类在月球上长期生存的困难。因此月球基地的选址需要规避上述极端环境带来的风险,而月球熔岩管洞穴能够提供抵御恶劣环境的天然庇护,为人类长期驻留月球提供长期、安全、稳定的条件,成为未来建立月球科研站的重要选址之一^[12,13]。

作为月球基地的候选区域之一,月球熔岩管的形成机制与地球熔岩管相似。火山喷发期间,大量高温、低黏度的玄武质岩浆从火山口涌出,流动熔

岩与外部环境之间存在的显著温差,导致熔岩流的外层流动时冷却凝固,形成一层坚硬的外壳,此时熔岩管为近圆形的管道结构。随着时间推移,底部逐渐被熔岩填充,外壳不断加厚,显著降低了内部熔岩的热量散失,从而维持了熔岩的高温流动性。最终,岩浆断流,残留熔岩逐渐排空,形成了顶部呈圆形或半圆形、底部较为平坦的管状构造,即为熔岩管^[14](如图1^[15]所示)。相较于地球,月球的低重力环境和较为稳定的地质环境使得月球熔岩管更容易保持完好^[16]。

因其形成机制,熔岩管具备坚硬外壳,可为月球基地提供相对稳定的内部环境,能有效抵御太空辐射和微陨石撞击,并能维持恒定的温度条件^[17-19]。现有数值模拟研究揭示了熔岩管可具备极高的结构稳定性,但其稳定性高度依赖于顶板厚度、管道宽度与岩体抗拉强度等参数的特定组合。Blair等人^[20]利用数值模拟等方法分析熔岩管的稳定性,发现顶层厚度为500 m时,熔岩管宽度可达5 km;在极端理想条件下,仅2 m厚的薄顶板理论上也能支撑起1 km宽的熔岩管。随后,Theinat等人^[17]采用了更符合实际的低抗拉强度岩石参数进行修正,计算表明:对于宽度为300 m的熔岩管,顶板厚度达1 m即可保持稳定状态;而当顶板厚度

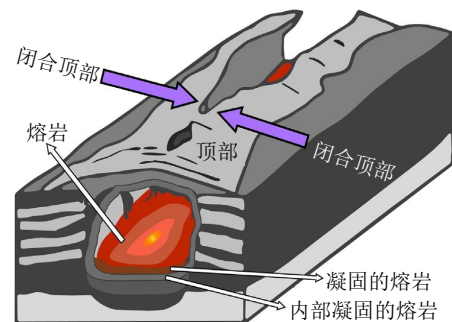


图1 熔岩管形成过程示意图^[15]

Fig. 1 Schematic diagram of the formation process of a lava tube^[15]

大于100 m时，即使宽度为1000 m的熔岩管也可以保持稳定状态。在满足特定几何尺寸与岩体强度等条件的前提下，熔岩管具备结构上的长期稳定性。这使得熔岩管巨大、稳固的地下空间被视为人类建设基地的理想场所，而其厚重的玄武岩顶板则构成了抵御月表极端环境的天然屏障。Naito等人^[6]通过估算月表与熔岩管内部的辐射剂量发现，月表的射线剂量高达 $416.0 \text{ mSv} \cdot \text{yr}^{-1}$ ，而月球熔岩管内的射线剂量小于 $1.0 \text{ mSv} \cdot \text{yr}^{-1}$ ，说明熔岩管具备良好的宇宙射线屏蔽能力。国际辐射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)规定公众暴露的辐射剂量不超过 $1.0 \text{ mSv} \cdot \text{yr}^{-1}$ ，这表明熔岩管内部的辐射环境已接近人体可接受的辐射安全标准，能够为未来人类居住提供天然、安全的环境，从而有效规避宇宙辐射带来的健康风险。此外，Horvath等人^[21]的研究表明，月球熔岩管始终处于约 17°C 恒定温度的状态，满足人类生存所需的热环境条件。另外，模拟研究表明，宇航服和1 cm厚度的铝板暴露在月球表面一年，被粒子击穿的概率分别为8%和30%^[10]，而熔岩管深埋于地下，其上方覆盖的月壤与玄武岩可以有效屏蔽微陨石的撞击^[20]。熔岩管内部相对稳定、安全的环境是未来月球基地建设的关键条件，因此，定位月球熔岩管并探测熔岩管内部环境，不仅有助于理解其内部结构与环境特征，也对未来载人月球任务与长期驻留计划具有重要的科学意义与应用价值。

熔岩管主要分布于月海地区，部分位于高地区域，少量分布于月球北极。其分布多集中在天窗、月溪附近。通过高分辨率光学影像对大部分月表洞穴成像，目前已经在月球表面发现了300多个洞穴，然而其中有200多个因为规模太小而无法辨认是否存在横向通道^[21,22]，经过进一步核实确认，存在21个潜在的熔岩管天窗，其中，16个分布在月海区域，如静海(Mare Tranquillitatis)和智海(Mare Ingenii)等区域，5个分布在高地区域^[23]。此外，在月球北极的菲洛劳斯环形山(Philolaus)撞击坑底部也发现了3个可能的熔岩管洞穴^[24]。这些潜在天窗被认为是熔岩管存在的间接证据。此外，Chapaz等人^[25]结合重力异常分析，推测月海区域可能存在11条长达数十至数百公里的熔岩管结构。这些熔岩管部分为已知月溪的延伸，部分与天窗塌陷坑邻近。虽然目前已识别出多个可能的熔岩管候选结构，但真正被确认的熔岩管数量仍然较少，其分布特征有待进一步的探测和研究。

近年来，已有大量综述文章阐述了月球熔岩管

探测的研究进展，但现有文献多以熔岩管为探测核心，天窗仅作为一种辅助性的间接标识被提及，在方法论述上，也未明确将探测方法区分为直接探测与间接探测两类。然而，天窗作为连接月表与地下熔岩管的唯一天然通道，不仅揭示了熔岩管的内部环境线索，更是未来探测器进入管内开展原位探测及基地建设的重要通道，具有极高的探测价值与应用前景。基于此，本文在系统梳理现有技术的基础上，将探测方法明确划分为对熔岩管的直接探测与通过探测天窗间接探测熔岩管两类，并深入阐述天窗探测方法的原理、应用优势与内在局限。针对当前天窗探测中存在的技术瓶颈，本文将进一步探讨利用被动微波遥感探测天窗热异常的可行性，旨在为后续月球熔岩管识别与勘测提供新的技术视角与解决方案。

2 现有熔岩管探测方法

地球上的熔岩管长度大致在几米到数十公里不等，其宽度和高度则在 $0.5 \sim 30.0 \text{ m}$ 变化，深度从地表下几厘米到几十米不等^[26]。由于月球的重力大约为地球重力的六分之一，月球熔岩管的长度、宽度、高度等几何参数会呈现几何倍数的增长(如表1^[15,25]所示)。月球熔岩管深埋于地下，埋藏深度通常在月表以下数百米至数公里处^[27]。由于熔岩管深埋地下，不易直接探测，需要利用地下空洞与周围介质的介电差异以及空洞导致的质量亏损现象，采用雷达探测与重力异常探测两种方法，实现对地下熔岩管的定位与规模评估。

2.1 雷达探测

近年来，雷达探测技术已广泛应用于月球熔岩管探测的研究中。雷达主要是通过发射极化电磁波，利用熔岩与周围介质(如土壤或岩石)的导电性差异探测地下目标。当电磁波穿透地表后，若遇到熔岩管结构或介电特性突变的界面时，会形成反射回波信号。接收天线通过捕捉反射波的振幅、相位及传播时间等参数差异，结合介电常数突变界面的电磁响应特征，即可识别出熔岩管的存在^[28]。根据载荷的搭载平台，雷达可以分为轨道雷达与原位探地雷达，二者在探测深度、分辨率及覆盖范围上各具优势，分别适用于不同探测阶段的任务需求。轨道雷达可实现大范围探测，快速获取月球浅层地下的雷达图像。Kaku等人^[29]基于月球雷达测深仪(Lunar Radar Sounder, LRS)获取的大量月球雷达数据，在马里厄斯丘陵区域探测到了特殊的雷达回波，并将这种回波模式作为完整熔岩管存在的证

表1 部分潜在月球熔岩管参数^[15,25]
 Tab. 1 Basic parameters of some potential lava tubes^[15,25]

地点	纬度	经度	几何参数(m)	深度(m)
马利厄斯丘陵(Marius Hills)	14.2°N	303.3°E	最小宽度: 370	-
	13.00°N~15.00°N	301.85°E~304.01°E	-	-
	13.096°N	57.056°W	-	-
	13.603°N	58.047°W	-	-
	14°N	302°E	宽度: 400 长度: 6×10^4	200~300
	14.3°N	57.5°W	宽度: 9×10^3 长度: 6×10^4 高度: 55	605
夏普月溪(Rima Sharp)	35°N~40°N	311°E~316°E	宽度: 2×10^3 长度: 7.5×10^4	600
麦兰月溪(Rima Mairan)	36°N	314°E	宽度: 3.5×10^3 长度: 1.7×10^5 高度: 550	7500
麦兰-吕姆克(Mairan-Rumker)	41°N	309°W	长度: 9×10^4	-
	41°N	306°W	长度: 1.8×10^5	-
阿里斯塔克月溪(Rimae Aristarchus)	27°N	313°E	宽度: 3.75×10^3 长度: 6×10^4 高度: 600	-
施勒特尔延伸(Schröter Extension)	24°N	306°W	长度: 6×10^4	-
渥拉斯顿陨石坑(Wollaston D)	35°N	311°W	长度: 8×10^4	-
赫歇尔E坑(Herschel E)	33.5°N	324.5°W	长度: 2×10^4	-

据。此后, Donini等人^[30]基于熔岩管电磁特性的仿真模型, 提出了一种定位熔岩管位置并且估计其规模的新方法, 并进一步指出深度学习与迁移技术的引入有望提升雷达数据自动解译效率。尽管目前的轨道雷达探测器探测范围大, 但深度分辨率不足(LRS的深度分辨率为75 m), 导致数据存在多解性, 对于具有相似形态的地下结构识别需要进一步分析^[30]。

相比之下, 探地雷达(Ground-Penetrating Radar, GPR)则侧重于局部区域的高精度探测^[17], 能够有效弥补轨道雷达探测的不足。Ding等人^[31]利用探地雷达在嫦娥三号导航点N106~N108间发现一处疑似地下空洞的雷达回波特征, 通过模拟电磁波在介质中的传播, 估计该空洞高度约3.1 m。目前月面原位探地雷达探测数据有限, 地球火山地区的GPR熔岩管探测类比研究为验证GPR探测熔岩管的可行性提供了支撑。美国NASA“TubeX”项目在加州Lava Beds国家纪念碑利用100 MHz GPR清晰识别了Skull Cave和Valentine Cave熔岩管的顶部反射波, 并结合数值模拟证实了该方法在月球熔岩管探测中的适用性^[32]; 日本研究团队在富士山区域利用带屏蔽天线的步进频率GPR系统, 通过反射波的相位反转识别熔岩管界面, 估

算了熔岩管的深度与垂直维度, 与实地测量结果一致, 验证了GPR在复杂火山地形中探测熔岩管结构的有效性^[33]; 徐懿等人^[34]在海南海口石山火山群利用400 MHz高分辨率GPR开展了类比探测, 不仅实现了对浅埋熔岩管层位界面的清晰成像, 还验证了基于遗传算法反演管壁介电常数的可靠性。这些基于地球类似地质环境的实证研究, 系统验证了GPR对熔岩管形态结构与物性参数的探测能力。

原位探地雷达虽然能够对局部熔岩管进行高精度探测, 弥补了轨道雷达分辨率不足导致的多解性以及无法探测小型熔岩管的缺点, 但探地雷达的探测范围有限^[35], 且在近场探测模式下, 雷达回波信号的振幅容易受到散射、几何传播和发射-接收天线之间耦合的干扰^[31]。因此在未来的雷达探测熔岩管任务中, 轨道雷达与原位探地雷达的联合观测将成为主流, 通过轨道遥感实现大尺度区域筛查与目标识别, 再结合探地雷达开展高精度、高分辨率的就位探测, 联合反演提升三维建模精度, 为月球熔岩管的探测研究提供坚实基础。

2.2 重力异常探测

当地下存在空腔时, 会引起局部重力场的异

常。通常，重力异常主要分为自由空气重力异常和布格重力异常两类。其中，自由空气重力异常是通过从测量中减去平均月球重力场得到的，反映了地下密度变化和地形起伏的影响。而布格重力异常则是通过地形校正从自由空气重力场中减去了地形的重力贡献来计算的，只反映地下密度变化的影响^[36,37]。若仪器探测到经地形校正后的布格重力异常数据中存在显著的“质量亏损”现象，则可判定为地下空腔，从而发现熔岩管，该方法适用于探测大型熔岩管(即空间尺度在公里级的熔岩管)内部结构。

Chappaz等人^[38]在2014年基于GRAIL重力数据，在夏普月溪区域发现了一处长约75 km，宽约2 km的熔岩管，正演模拟得到的深度约为月表以下600 m。2017年，Chappaz和Sood等人^[25]在马利厄斯丘陵区域发现了一处长约60 km，宽约400 m，埋深为月表以下200~300 m的熔岩管。Zhu等人^[39]同样基于GRAIL卫星数据，在月球马利厄斯丘陵区域探测到一处潜在熔岩管，其规模为长60 km、宽9 km、高55 m，埋深605 m。此外，郑翀^[40]利用重力-密度反演的的方法构建了风暴洋北部麦兰月溪区域的三维密度结构模型，通过模型研究了此区域熔岩管的几何特征，麦兰月溪区域的熔岩管横截面为宽3.5~4.0 km、高宽比为1:3的弓形，埋深于地下大约7.5 km，长度约为170 km。

重力异常探测不仅能够探测到大型熔岩管的位置，还能够对熔岩管的几何参数进行全面评估。然而由于GRAIL探测器的运行轨道是南北走向的，其重力梯度值存在南北条带状误差，导致重力探测对东西走向的熔岩管更为敏感，而对南北走向的弱重力异常结构辨识能力有限。同时，对于数公里级尺度的大型熔岩管探测，重力异常探测具有显著优势^[27]。然而，许多熔岩管属于小型熔岩管，其规模仅为百米级(顶部宽度为亚公里级或整体规模为百米级的结构)，这一尺度远小于当前重力模型所能分辨的精度(4.5 km×4.5 km)。因此，现有月球重力场模型在探测小尺度熔岩管方面仍存在显著局限性^[28]。

综上所述，虽然现有的探测月球地下熔岩管的方法已成功应用于熔岩管探测，但仍存在不足：轨道雷达深度分辨率不够，导致数据存在多解性，而探地雷达则存在探测范围有限、易受到近场干扰的问题。重力异常探测广泛应用于大尺度的地下熔岩管识别与规模评估，但受限于数据的南北条带误差，易忽略南北走向的地下熔岩管，且月球重力场模型的分辨率(公里级)难以满足小规模(百米级)的

熔岩管探测需求。在此背景下，熔岩管顶部因塌陷形成的天窗结构，在光学影像中具备形态可识别性，且具有可观测的温度异常特征，成为间接推断与定位地下熔岩管的关键线索。依靠识别熔岩管塌陷形成的天窗结构，从而间接识别与定位熔岩管，是对直接探测手段的一种重要补充。

3 现有熔岩管天窗探测方法

天窗是指由于陨石等天体的撞击作用、地质构造运动、地震及自身重力等因素，引发熔岩管顶部塌陷而形成的开口结构^[41](如图2所示^[36])。作为熔岩管与月面之间的天然连接通道，天窗不仅是地下熔岩管的月面标识，还是熔岩管内部探测任务的物理入口，为识别和探测地下熔岩管提供了有效的观测依据^[26]。以上两种地下熔岩管探测的方法虽然不能直接对天窗进行探测，但能够初步圈定地下熔岩管的大致范围，根据天窗与熔岩管的潜在联系，快速聚焦天窗可能出现的空间范围，提高了天窗探测的效率。而针对已发现的天窗区域，能够利用上述两种方法判断天窗邻近范围内是否存在潜在的熔岩管，从而判断天窗是否与周边熔岩管相连，验证该天窗是否可能是周围熔岩管的物理入口^[39]，这对于熔岩管天窗探测具有重要的辅助作用。

目前，月球熔岩管天窗的探测方法主要有光学影像识别和热异常探测两种。天窗直径大概在数十米到数百米不等(如表2^[41]所示)，且天窗与普通撞击坑的几何形态有显著差异，美国月球勘测轨道器通过搭载的窄角相机高分辨率成像仪(Narrow Angle Camera, NAC)以0.5 m/像素的分辨率对大部分月表坑洞进行高分辨率成像，通过分析影像中特征明显的坑洞形态，能够实现潜在天窗快速定位与识别。天窗在自身几何结构以及塌陷物独特的热物理性质两种因素的影响下，与周围月壤区域相比，表

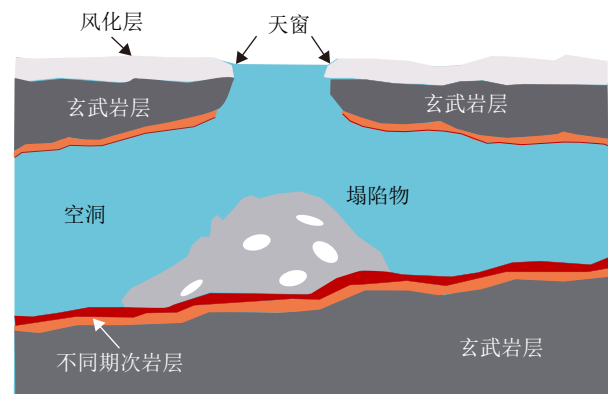


图2 熔岩管模式图^[36]

Fig. 2 Lava tube pattern diagram^[36]

现出显著的热异常现象, 基于这一温差特征, 利用红外辐射探测温度异常区, 进而识别天窗。

3.1 光学影像识别

天窗尺寸较小, 直径范围大约在数十米至数百米之间^[23], 需要利用高分辨率光学影像识别坑洞的形貌特征以区分天窗与小型撞击坑。如图3所示, 前者因撞击击穿或顶板塌陷形成, 底部通常是深陷或呈不规则形态的, 深径比较大, 塌陷口一般具有内倾斜坡结构, 塌陷口常伴生塌落物堆积; 而撞击坑则表现为浅碗状形态, 并具有明显的坑缘隆起和溅射物分布特征^[11,37]。这些形貌差异为通过高分辨率光学影像识别天窗提供了依据。

2009年, 基于月女神探测器(SELENE)搭载的地形测绘相机(Terrain Camera, TC)数据(10 m/像素), 在马利厄斯丘陵发现了直径为65 m的垂直洞穴, 疑似是熔岩管表面塌陷形成的天窗^[11,42]。

2010年, 在静海和智海区域又识别出两个疑似天窗^[43]。Robinson与Wagner等人^[44,45]使用月球勘测轨道器(LRO)搭载的NAC的高分辨率影像(0.5 m/像素), 利用PitScan阴影检测算法成功识别出多个潜在的天窗, 其中16个分布在月海区域, 5个分布在高地区域。大多数情况下, 坑壁与坑底存在悬垂结构, 且可能有熔岩管连接, 月球勘测轨道器的斜向观测证实了静海天窗坑底有约20 m的地面延伸, 也证实了熔岩管的存在^[46]。

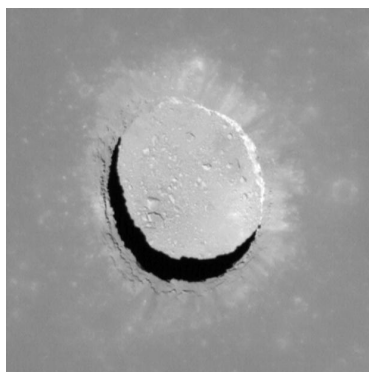
然而, 阴影的存在使得精确测量天窗深度较为困难, 需要利用不同时间点的数据、交叉验证不同角度和光照条件下的数据, 减小阴影带来的不确定性, 提高天窗深度估算的准确性^[42]。此外, 虽然可以利用斜向成像确认熔岩管是否存在, 但光学影像无法提供除了天窗之外的高度信息, 因此难以确定与之相连的熔岩管高度是否增大或减小, 这限制了对熔岩管结构的了解。

为此, 还可结合数字地形模型(Digital Terrain

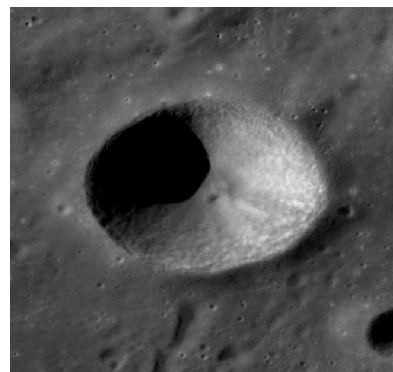
表 2 月球部分熔岩管天窗参数^[41]

Tab. 2 Basic parameters of skylights on the Moon^[41]

名称	纬度	经度	深度(m)	直径(m)
静海(Mare Tranquillitatis)	8.3355°N	33.2220°E	105	100×88
马利厄斯丘陵(Marius Hills)	14.0917°N	303.2299°E	40	55×49
智海(Mare Ingenii)	35.9494°S	166.0559°E	55	104×71
北风暴洋-1 (Northern Oceanus Procellarum-1)	35.4097°N	314.3602°E	54	157×108
死湖(Lacus Mortis)	44.9608°N	25.6119°E	60	>165×110
西南丰富海(Southwest Mare Fecunditatis)	6.7521°S	42.7595°E	51	19×15
西南静海(Southwest Mare Tranquillitatis)	4.1438°N	24.6871°E	25	32×26
施吕特陨石坑(Schlüter Crater)	5.8395°S	276.9500°E	57	37×23
高地-1 (Highland-1)	43.9662°N	23.0836°E	27	41×37
高地-2 (Highland-2)	41.1563°N	18.8206°E	>24	34×27
高地-3 (Highland-3)	42.3941°N	320.3076°E	27	45×41



(a) 月球熔岩管天窗
(a) Lava tube skylight



(b) 月球陨石坑
(b) Lunar crater

图 3 月球熔岩管天窗与月球陨石坑的形态对比图

Fig. 3 Morphological comparison between lava tube skylight and lunar crater

Model, DTM), 对天窗表面、坑壁、坑底、露出部分的地下熔岩管进行三维重建, 从而勘探天窗内部的形貌特征。Wagner和Robinson^[47]利用月球勘测轨道器窄角相机的多角度光学影像选取控制点, 使用成像仪和光谱仪集成软件(Integrated Software for Imagers and Spectrometers, ISIS)的束平差工具(Jigsaw)进行三维坐标解算生成点云, 并结合高分辨率DTM进行校准, 最终生成了静海天窗、马利厄斯丘陵天窗、智海天窗等6个代表性坑洞的三维网格模型, 并获得了坑洞的几何参数。以静海天窗为例(图4), 其坑口直径约100 m×88 m, 深度约133 m, 坑壁上部为几乎垂直的壁面, 下部则呈现悬垂特征, 底部则呈现为岩块与细粒物质混合的坡面。尽管能够利用光学影像的立体像对进行塌陷天窗的三维建模, 但光学影像仅可见表面的信息, 无法完整还原地下熔岩管的三维形态, 因此, 需要结合轨道雷达(如合成孔径雷达、雷达探测仪)和重力异常等地球物理探测方法, 对地下通道的空间延伸、规模及内部结构进行补充探测与建模^[35], 以实现对接岩管系统的全面认知。

3.2 红外辐射热异常探测

光学影像具有高空间分辨率, 能够通过其提供的清晰几何形态, 精准辨别坑洞的形貌特征, 从而区分天窗与普通撞击坑。然而光学影像受阴影限制, 不仅难以反映天窗内部结构, 还无法验证地下是否有连接熔岩管。在此背景下, 热异常探测的引入突破了光学影像识别对形态、光照条件的依赖性, 能够通过模拟熔岩管连接下的天窗内部温度, 若模拟温度与观测温度较为吻合, 就能间接揭示熔岩管的存在, 弥补了光学影像无法揭示是否有熔岩管相连的缺陷, 为熔岩管天窗探测提供了新视角。

2010年, Haruyama等人^[43]基于热平衡计算方法并考虑天窗周围月表的反照率, 对静海天窗连接的熔岩管内部温度进行估算。结果表明, 在不同反照率条件下, 温度范围为13~16°C。Nesnas等人^[48]进行物理建模发现, 在月球赤道附近有风化层覆盖的熔岩管天窗, 在白天的温度高达146°C, 而熔岩管内部的温度可稳定维持在约16.85°C, 这一独特的热异常特征可作为识别熔岩管的重要依据。

为了评估地下熔岩管对月表热辐射的影响, 并验证利用红外辐射探测熔岩管的可能性, Horvath等人^[21]构建了一维热物理模型, 使用了标准的月壤热物理属性, 包括随深度变化的密度和导热率等参数^[49], 将底部边界条件设为290 K, 旨在模拟地下熔岩管温度(月表以下5 m深处)对表面温度的影响。模拟结果表明, 由于月壤的热绝缘作用^[11], 熔岩管(>5 m深)通过热传导对月表温度的影响仅为0.1 K, 远低于Diviner的检测阈值, 难以直接通过红外辐射探测到熔岩管的存在。相比之下, 天窗作为熔岩管顶部塌陷的开口, 能够提供更多熔岩管温度信息, 是热异常探测中可观测的关键表面特征。

月球勘测轨道飞行器(LRO)上搭载的Diviner辐射计能够在50~75 K的范围内测量表面亮度温度(精度在±3 K以内), 大于75 K时, 测量精度为±1 K, 能够在所有当地时间和所有位置获得准确的温度读数(永久阴影区域除外^[50]), 是红外辐射探测的重要数据来源。

为了探究天窗是否存在可观测的温度异常现象, Horvath等人^[21]利用Diviner数据的通道6和通道8, 测量了静海和智海天窗所在像素的月球表面温度(Lunar Surface Temperature, LST)。通过计算晚上9点至凌晨4点这一时间段内两个通道的平均温度差值, 发现静海和智海的熔岩管天窗与周围区

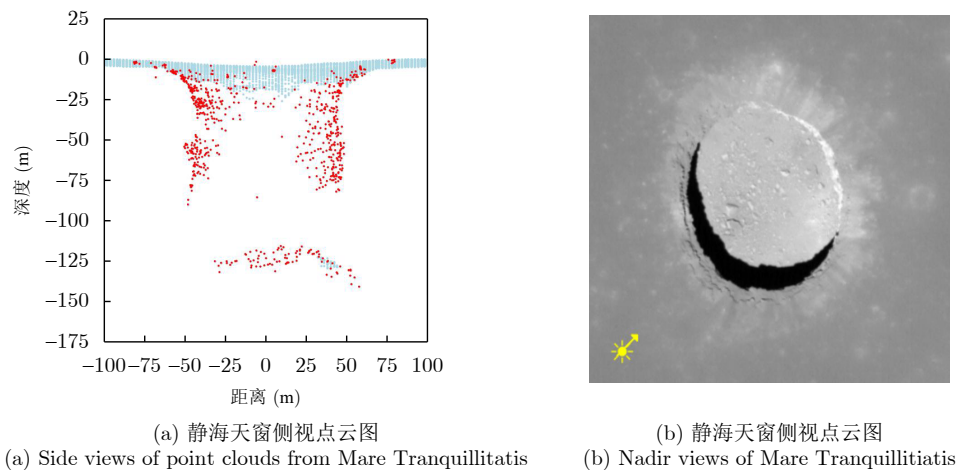


图4 静海天窗的三维点云侧视图与俯视图

Fig. 4 Side view of the full 3D point cloud and nadir view of the Mare Tranquillitatis

域相比表现出较高的热辐射, 约高出30 K(见图5)。然而Diviner的空间分辨率(轨道高度50 km时, 分辨率为 $320\text{ m}\times 160\text{ m}$)远大于天窗的直径(静海天窗直径约为100 m), 加上探测器运动引起的拖尾效应(Smearing effect), 二者共同导致了单一像素内混合了天窗与周边背景区域的热辐射信号, 因此Diviner数据并不能准确反映天窗的真实温度。为了提高数据的准确性, Horvath等人^[21]基于Diviner探测器的二维角响应函数, 综合考虑轨道运动引起的信号拖尾(包括热响应拖尾和积分时间拖尾), 对航天器观测过程中因拖尾效应、天窗与背景信号产生的信号混合进行建模。具体方法是: 首先通过仪器的2D角响应函数、热响应拖尾以及积分时间拖尾, 建模航天器运行过程中的信号拖尾(二维有效视场)。再将“天窗-背景”二分模型(天窗区域为1, 其余为0)与探测器二维有效视场进行卷积, 生成表征天窗位于不同视场位置时对观测信号贡献的查找表。随后, 建立“天窗温度+背景温度”混合模型, 即模拟温度=查找表 \times 天窗温度 + (1-查找表) \times 背景温度。通过对天窗温度、经度和纬度等参数进行三维网格搜索, 最小化模型预测值与实际Diviner观测值的卡方统计量, 反演出最优的天窗亚像素温度及其置信区间。反演结果显示静海处的天窗夜间温度高达283 K, 显著高于周围背景(约100 K), 最佳拟合温度集中于250~290 K。由此可知, 天窗存在温度异常现象, 但无法通过Diviner准确观测到这种异常现象, 需要通过建立探测器特性影响下的信号模型, 并结合反演, 才能从混合信号中有效分离出天窗的贡献, 最终实现对天窗温度异常的准确识别。

虽然已经证实天窗存在显著的温度异常现象, 但造成该现象的具体成因尚不明确。结合过往研究, 可以推测天窗热异常的形成主要受到两方面因

素的影响: 一方面, 通过对天窗的高分辨率影像进行分析^[44], 发现天窗的塌陷物是月岩与少量月壤的混合物, 导致塌陷物与周边纯月壤区域产生热惯量差异, 影响了坑底的昼夜温度变化。另一方面, 从天窗的形成机制来看, 温度异常还可能与其复杂的地下构造(如相互连通的熔岩管)引起的热辐射过程有关^[21]: 熔岩管天窗属于半封闭空间, 且天窗深度较深、开口直径小, 来自外部的太阳辐射进入天窗内, 经坑壁与悬垂结构的多次反射与散射, 使得天窗内部能够高效吸收并保留辐射能量, 显著减少热量散失, 最终形成独特的温度异常现象。

为了进一步探究天窗温度异常的形成机制, 可构建热传导模型, 模拟复杂地下结构及物质组成对其温度分布的影响。将模拟结果与观测温度进行对比, 若二者吻合, 则能验证模型的合理性, 进而为熔岩管的存在提供关键支撑, 并为约束塌陷物成分提供可靠证据。热传导模型分为一维、二维、三维3类。一维热传导模型仅考虑垂直方向的热传导, 简化了来自坑壁、熔岩管等真实地形影响下的辐射效应, 而天窗的温度分布又受到地下复杂几何结构及多维辐射过程的显著影响, 因此一维热传导模型不适用于模拟具有复杂几何结构的天窗温度异常现象。

二维模型突破了一维模型仅考虑垂直热传导的局限, 构建了无限延伸的、对称规则二维地下结构, 考虑东西向连接的熔岩管以及东西向坑壁对天窗内部的热辐射影响, 并设置了不同的塌陷物成分, 从而能够高效地模拟熔岩管天窗内部的平衡状态温度, 旨在揭示熔岩管天窗内部的长期稳定温度情况。Horvath等人^[21]对静海(33.2220°E , 8.334°N)构建了4种2D热模型, 分别是连接了任意长度的熔岩管、坑底为纯月岩的天窗模型(图6(a)), 连接了任意长度的熔岩管、坑底为纯月壤的天窗模型(图6(b)),

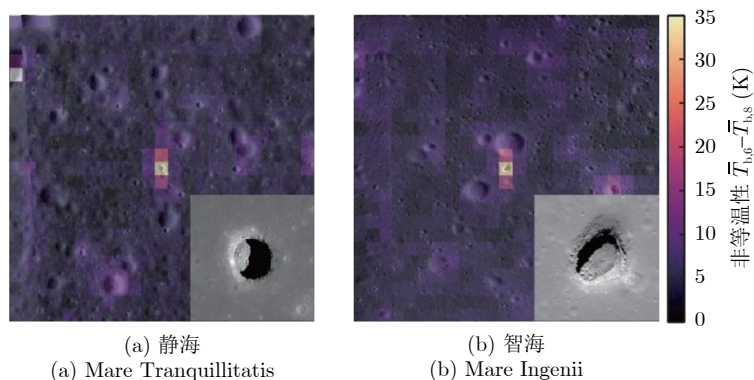


图5 静海和智海21:00-04:00点(当地太阳时间)通道6与通道8的温度变化平均值差值

Fig. 5 The average temperature change difference between channel 6 and channel 8 of Mare Tranquillitatis and Mare Ingenii from 9 pm to 4 am (Local Solar Time, LST)

未连接熔岩管、坑底为纯月岩的天窗模型(图6(c))以及未连接熔岩管、坑底为纯月壤的天窗模型(图6(d))。对于模型材料的热物理性质, Horvath使用了月壤^[49]和月球玄武岩^[51]的标准热物理性质, 每个模型都将月岩设置为主体材料, 并覆盖了5 m月壤。此外, 对于所有模型都设置了18 mW/m²的内部热流^[49]以及适当的太阳运动(在模型表面垂直平面上以1 AU (Astronomical Unit)的距离圆周运动)。

模型结果表明(图7), 所有模型组合在平衡状态下的温度都保持在230 K以上。然而, 连接了延伸熔岩管与未连接熔岩管的模型之间的温差很小, 且纯岩石或纯月球土壤组成的天窗之间的温差仅为25 K。这表明熔岩管天窗存在显著稳定的热异常, 但仅根据二维模型模拟的天窗温度难以判断天窗是否连接了地下熔岩管, 也无法约束坑底塌陷物的物质组成。此外, 将模型结果与Diviner数据进行比较发现: 坑底塌陷物为纯月岩的模型结果(260~270 K)与Diviner反演的最佳拟合亚像素温度结果(250~290 K)在大部分时段吻合度高, 这证实该二维热模型能够在一定程度上复现天窗区域的温度特征。但值得注意的是, 在凌晨2点与凌晨4点两个时间点, 模拟温度与观测温度存在明显偏差, 说明二维热传导模型对于天窗温度模拟的精确程度仍存在

不足。其核心原因在于, 二维热模型中仅仅模拟了东西向(连接了熔岩管方向)的平衡温度, 忽略了三维结构中多面墙体之间的辐射传热, 简化了太阳在三维空间中的实际运动轨迹, 导致该模型无法预测真实的、完整的天窗内几何结构下的温度分布情况。

要揭示天窗热异常机制、量化真实天窗地下结构与物质组成的影响、并最终实现熔岩管地下结构的间接探测, 必须构建三维热物理模型。三维热传导模型的构建, 不仅可以完整还原天窗的悬垂结构、坑壁坡度、坑底坍塌物分布等真实几何特征, 让热传导和辐射交换的模拟更加贴合实际^[52,53], 还可以模拟太阳运动导致的坑内光照差异^[21], 还原不同方位(南北壁、东西壁)和深度的温度动态变化。构建三维模型时, 可通过调整所连熔岩管深度等未知几何参数、设定坍塌物成分来模拟猜想的天窗地下结构, 若模拟数据精度达标, 即可推断猜想的地下结构与坍塌物成分具有合理性, 进而间接验证熔岩管的存在。这一特性恰好弥补了光学影像难以完整揭示天窗内部结构的问题。

4 基于被动微波遥感技术的熔岩管探测分析

不同于主动雷达与重力探测主要关注地下几何

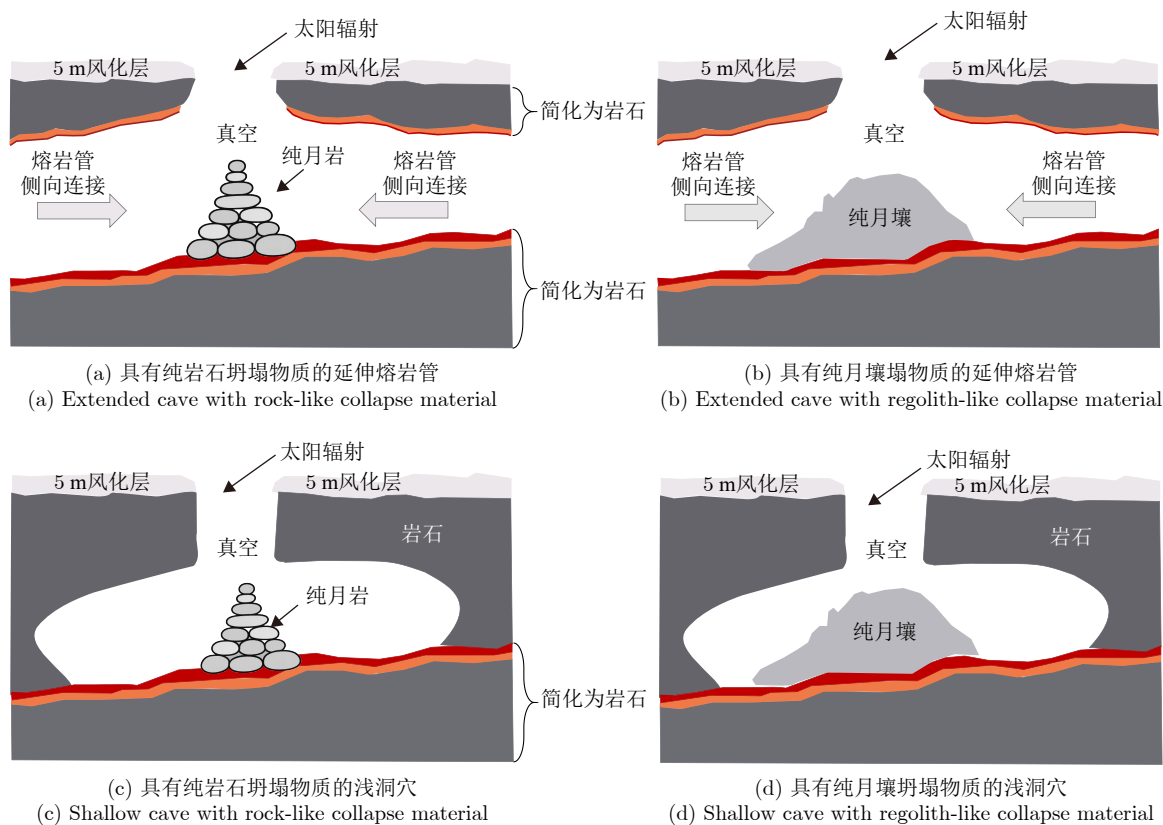


图6 具有不同坍塌物质成分的延伸熔岩管与浅洞穴几何模型

Fig. 6 Geometric models of extended lava tubes and shallow caves with different collapse materials

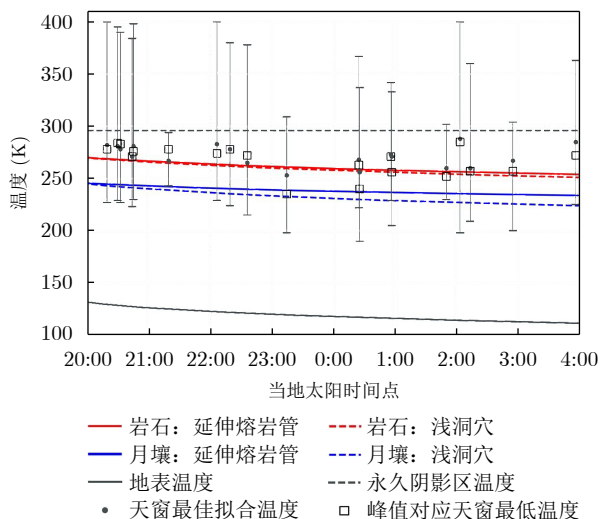


图7 2D热模型(线)与静海天窗夜间最佳拟合温度(点)

Fig. 7 2D thermal models (lines) compared to Tranquillitatis pit temperatures derived from night-time Diviner Data (points)

结构与质量分布,被动微波遥感的核心在于接收来自月球表面及次表层物质的辐射能量。微波辐射计所观测到的亮度温度(Brightness Temperature, T_B)并非表面物理温度,而是不同深度温度的加权积分,这赋予了被动微波遥感两大优势:穿透性以及介电性质的敏感性,使得微波能够反映次表层物质的介电性质与热物理状态,从而为熔岩管天窗的识别开辟了新路径。

被动微波遥感的穿透性有效弥补了现有光学与红外手段在探测深度上的不足。目前光学影像识别、红外辐射受限于穿透深度,仅能反映月球表面的信息,无法穿透月壤层探测月球次表层信息。由于月壤具有极强的热绝缘性,深部地下熔岩管(深度 > 5 m)向上传导的热信号到达月表时已衰减至极其微弱的水平(< 0.1 K),且其引起的地表浅层(< 20 cm)温度扰动幅度极小^[21],导致红外遥感难以直接捕捉到深部热异常信号。相比之下,微波辐射计观测到的亮度温度是不同深度物理温度剖面 $T(z)$ 的加权积分($T_B = \int_0^{\infty} W(z)T(z)$), $W(z)$ 为权重函数,这表明微波具备穿透月壤层的能力,能够有效获取次表层深处的温度与温度梯度信息。且被动微波的穿透深度与频率有关,Zheng等人^[54]量化了微波频率与深度的关系,指出3 GHz低频信号可穿透数米深的月壤,而37 GHz高频信号主要反映表层数厘米信息。利用微波对月壤的穿透性,Lv等人^[55]构建了多层平行分层模型,量化了月壤厚度变化对观测亮温的影响,从而实现对全球月壤厚度的有效反演。除了月壤厚度,利用微波的穿透性还能进一步揭示月壤内部的垂直分层结构。Zou等人^[56]

利用CE-2的多频段数据将浅表层精细划分为强风化层($RA < 0.20$)、弱风化溅射物层($RA > 0.50$)和古月壤层($RA 0.20 \sim 0.50$) 3层结构,进一步解析了月壤厚度内部的精细地层结构。此外,微波的穿透性在探测深部热异常方面也表现出独特的优势。Sieglar等人^[57]利用嫦娥一号、嫦娥二号微波数据在月球背面Compton-Belkovich区域探测到源自月表以下数米至数十米的花岗岩岩体热异常。针对极区深部微弱热信息的提取,Wei等人^[58]利用低频(3.0 GHz)与高频(19.35 GHz和7.00 GHz)亮温的比值方法,有效抑制了浅表层季节性温度波动的干扰,成功反演了月球南极永久阴影区的深部背景热流。在极区次表层结构探测方面,Feng等人^[59]利用高频微波(37.00 GHz和19.35 GHz)对浅表层的穿透性,揭示了南极冷阱区域近地表存在低密度结构,但对于探测深度更深的3 GHz低频数据与模拟值之间存在的显著偏差,并未进行充分的讨论。而Zheng等人^[60]进一步利用了3 GHz低频数据对深层信息的穿透性,成功约束了深层密度,利用多频微波与红外数据,实现了对极区永久阴影区浅表到深部的垂直温度剖面与密度结构的反演。这说明利用不同频率微波的穿透特性差异,可获取月球次表层的信息,从而有效反演月壤厚度、次表层结构与温度分布。

除探测深度的局限外,红外辐射探测还存在一定不足。红外辐射探测天窗主要依赖物理温度差异,易受混合像元热辐射的干扰,无法明确区分天窗坑底是裸露岩石还是覆盖了月壤^[20]。针对这一难题,被动微波能够利用其对介电性质的高度敏感性,为明确天窗坑底物质成分提供科学依据。根据微波辐射传输理论,微波亮温不仅取决于物理温度剖面,还受介质的介电常数影响($T_B = \int_0^{\infty} W(z)T(z)$),主要取决于各层的层厚、层间反射系数以及吸收系数等因素,而物质的介电常数、介电损耗角正切是反射系数、吸收系数的决定性因素之一。相关模拟与观测研究证实^[61,62],月球岩石具有较高的介电常数实部和虚部,远高于普通月壤,这一差异会显著影响微波的反射率、吸收率,影响不同深度的辐射贡献权重(即权重函数分布),最终导致岩石在观测数据中呈现出显著区别于月壤的亮温特征。基于这一机理,Wei等人^[63]与Yang等人^[64]利用嫦娥二号(CE-2)多频段微波亮温差异,成功将表面岩石与次表层岩石的辐射贡献进行了分离,实现了对月球次表层岩石丰度的反演。说明利用被动微波对介电性质的敏感性,能够有效识别出天窗坑底的岩石成分。

为了从机理上验证微波探测天窗热异常的敏感性与可行性，本文基于微波辐射传输模型，模拟了天窗坑底岩石与背景月壤在不同频段下的亮温差异。根据Diviner数据的亚像素反演显示，静海天窗的最佳拟合温度集中在250~290 K，且坑底塌陷物为纯月岩的热模型模拟结果也证实其温度维持在相近的高温水平，因此本文选取250 K作为天窗坑底岩石的温度进行模拟。而月壤物理温度剖面则通过一维热模型结果计算得到。结果显示(图8)，由于背景月壤表层温度的剧烈波动与天窗内部的持续高温特性形成对比，亮温差在夜间至清晨达到峰值(130~140 K)，且高频通道(如 37.00 GHz)因穿透深度浅、对表层低温更敏感而表现出比低频通道更强的亮温差；即便在正午温差最小时，亮温差都维持在80 K以上。

虽然天窗与背景的亮温差异显著，但在实际微波辐射计观测中，受限于微波观测数据较粗糙的分辨率(在3 GHz的空间分辨率约为25 km，在其他频率约为17.5 km^[65])，直径仅约100 m的天窗辐射信号会被背景噪声所掩盖。为了量化这一效应，本文对不同分辨率积分下的天线温度差(ΔT_A)进行分析，反映了在特定分辨率下，辐射计实际接收到由天窗贡献的有效辐射信号强度，结果如图9所示。图中蓝色虚线标示的0.5 K代表了嫦娥二号微波辐射计的温度灵敏度阈值。随着分辨率的提升，目标信号的面积占比迅速增加。当空间分辨率优化至1.2 km时， ΔT_A 超过现有的微波辐射计探测阈值(0.5 K)，这意味着在此分辨率下，天窗产生的热辐射信号已足以被仪器有效识别。当分辨率进一步细化至250 m时， ΔT_A 提升至10 K以上。

上述结果表明，优化微波数据的空间分辨率、

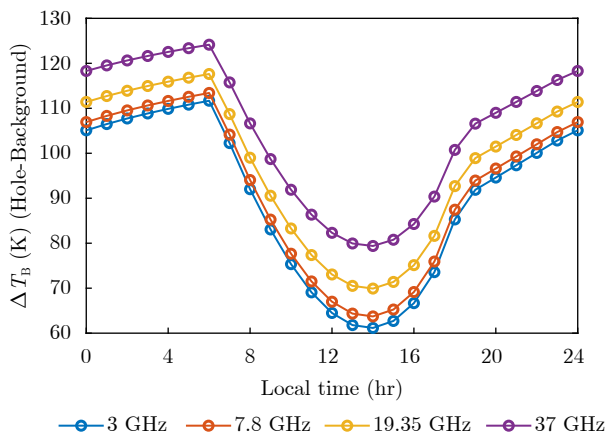


图 8 天窗与背景月壤微波亮度温度差变化图

Fig. 8 Microwave brightness temperature difference between skylight and surrounding regolith

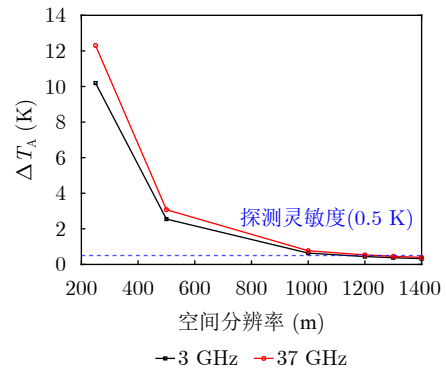


图 9 不同空间分辨率下的天线温度差

Fig. 9 Antenna temperature difference under different spatial resolutions

发展超分辨率反演算法，对于实现被动微波探测熔岩管天窗热异常具有重要意义。近年来，关于被动微波数据的超分辨率重建技术研究已取得了显著进展。Zhu等人^[66]利用地理神经网络加权回归与空间加权神经网络，通过引入影响亮温变化的物理参数(高程数据、岩石丰度数据)，构建了结合地理加权回归与空间加权神经网络的GNNWR模型捕捉参数与亮温之间随空间变化的映射关系，成功将CE-2微波亮温制图分辨率提升至约2 km。Chi等人^[67]提出了一种基于双重注意力机制的生成对抗网络(Dual-Attention Super-Resolution Generative Adversarial Network, DA-SR-GAN)，成功将卫星被动微波数据的空间分辨率提升了4倍，并将亮温重构误差(RMSE)控制在1 K以内。虽然现有研究成果在分辨率提升倍数上已逐步接近天窗探测的需求，但需要明确的是，超分辨率重建本质上依赖于模型从大量样本中学习到的空间模式和多尺度特征相关性，对现有信号进行细化与增强，无法凭空生成原始观测数据中完全缺失的高频信息。因此，重建信号的有效性严格受限于观测系统的物理属性与先验数据的精度边界。首先，重建信号受限于观测系统的硬件特性(如传感器的固有分辨率)，在观测数据稀疏或存在时间缺口的区域，模型恢复高频细节的能力会下降且不确定性显著增加。其次，重建信号精度无法超越引入的关键物理参数的分辨率上限。此外，重建过程严格遵循热传导方程与辐射传输方程所描述的物理机制，以保证重建信号的物理合理性。因此，在结合超分辨率重建算法与多源数据融合，提升微波遥感对熔岩管天窗的识别能力时，必须充分考虑超分辨率重建的边界条件。

值得注意的是，上述模拟均建立在将天窗温度简化为恒定250 K温度的假设之上。然而，在真实的月球环境中，受坑底熔岩管结构、地形遮挡及光照变化等多重因素影响，天窗内部的实际物理温度

场呈现复杂的动态变化特征,而非单一恒定值。本文旨在从机理出发,验证微波探测的可行空间分辨率区间,而针对天窗复杂几何条件下的精确三维热建模与天线温度仿真,将在后续工作中进一步开展,以实现更贴近真实场景的精确论证。

为了直观展示上述各探测手段的特性差异与技术指标,各类探测方法的原理以及优劣势对比归纳于表3,典型熔岩管及天窗探测仪器的主要参数详见表4。

5 结语

由火山熔岩流动和冷却过程形成的熔岩管,因其坚硬外壳的存在,内部具有能够抵御太空辐射与微陨石撞击、恒温等特点,被视为月球科研站的理想候选地点之一,具有极大的探测价值。但熔岩管埋藏于地下,深度在月表下数百米至数公里,不易直接探测。

目前熔岩管探测有两种方法,一种方法是利用熔岩管内部与其他介质的介电差异进行雷达探测,另一种方法是通过空洞区域的重力异常现象识别大

型熔岩管(公里级)。然而,轨道雷达虽然观测范围大,但是分辨率不足以分辨具有相似形态的地下结构,具有多解性,原位探地雷达则适用于高精度的熔岩管探测,但探测范围有限,并且在近场探测模式下,雷达回波信号的振幅容易受到散射、几何传播和发射-接收天线之间耦合的干扰。此外,重力异常探测受限于轨道运行方向及空间分辨率(公里级),容易忽略南北走向和规模较小(顶部宽度为亚公里级)的熔岩管。

天窗是熔岩管塌陷形成的开口结构,作为熔岩管与外界连接的通道,揭示了熔岩管内部形貌、环境特点,因此通过天窗定位熔岩管成为重要的熔岩管探测手段。天窗直径范围大致在数十米至数百米之间,可以利用高分辨率光学影像辨别天窗与小型撞击坑的几何形态差异,如深径比较大、塌陷口具有斜坡、下部与熔岩管相连等,从而实现对天窗的有效识别。光学影像虽能依据几何形态识别天窗,但光学影像中,天窗内部受阴影遮挡,无法获得完整的天窗三维几何结构,难以直接推断天窗下部是否连接熔岩管。红外辐射探测可以利用天窗的地下

表 3 探测方法对比表
Tab. 3 Comparison of detection methods

方法	探测方式	原理	优势	局限性
轨道雷达	直接探测	介电常数差异界面产生反射回波	探测范围大	深度分辨率较低;存在多解性
探地雷达	直接探测	介电常数差异界面产生反射回波	高精度探测;局部/小型熔岩管	探测范围有限;易受近场干扰
重力异常探测	直接探测	质量亏损检测	能探测到深埋于大型熔岩管(公里级)可估算熔岩管的几何参数	不适用于探测南北走向及小型(百米级)的熔岩管
光学影像识别	探测天窗间接探测	几何形态特征判别	数据分辨率高;特征直观清晰	受光照条件影响,无法提供完整的天窗内部的形态结构
红外辐射热异常探测	探测天窗间接探测	温度异常识别	突破光照限制;可间接揭示熔岩管的存在	无法甄别坑底热物理特性探测深度有限
被动微波探测	探测天窗间接探测	次表层温度梯度与介电识别	穿透数米月壤次表层;区分天窗坑底物质成分	空间分辨率极低(公里级)

表 4 典型熔岩管及天窗探测仪器主要参数
Tab. 4 Main parameters of typical instruments for lava tube and skylight detection

仪器名称	频段/波段	分辨率
月球雷达测深仪(LRS)	5 MHz	深度分辨率: 75 m (真空) 深度分辨率: 150 m (经旁瓣压缩)
嫦娥三号/四号测月雷达	低频通道: 60 MHz 高频通道: 500 MHz	低频通道深度分辨率: 米级 高频通道深度分辨率: 优于0.3 m
重力重建与内部结构实验室(GRAIL)	Ka波段	1200 阶次(4.5 km×4.5 km)
月球勘测轨道器窄角相机(LRO NAC)	全色(可见光波段)	0.5 m/像素
红外滤波辐射计(Diviner)	热红外波段	沿轨道方向320 m 垂直轨道方向160 m (轨道高度50 km)
微波辐射计	3.00, 7.80, 19.35, 37.00 GHz	3 GHz 的空间分辨率约为25 km 其他频率约为17.5 km

几何结构和坑底物质组成导致的天窗温度异常，间接推断天窗的地下结构，这弥补了光学影像难以直接探测地下熔岩管的缺陷。然而受限于红外辐射计(Diviner)的空间分辨率(320 m×160 m)以及较浅的探测深度，不仅无法直接准确观测天窗的温度，也无法精准捕捉由塌陷物成分差异、下部空腔结构引起的次表层温度梯度异常。

鉴于现有红外辐射探测的局限，未来的天窗探测研究首先需要突破空间分辨率的瓶颈，以减少信号混合效应，实现对天窗温度的精确观测与坑底物质成分的精准约束；其次，构建更符合真实特征的三维热物理模型，以精细模拟复杂几何结构对热辐射的影响，从而精准约束天窗地下结构及物质成分；此外，引入具备穿透性的探测手段(如被动微波)，捕捉天窗区域的次表层温度梯度异常，旨在突破现有红外辐射仅限表层探测的瓶颈、实现从单纯的表面热异常识别向次表层温度特征与介质辨别探测的延伸。

被动微波探测利用微波的穿透能力及对介电性质的敏感性，通过捕捉由地下结构与塌陷物成分差异引起的次表层温度梯度异常及介电差异来识别天窗。其优势在于能突破红外探测仅限表层探测的瓶颈，深入探测次表层热特征并有效区分坑底岩石与月壤的物质成分。然而，现有轨道微波数据的空间分辨率通常较低(公里级)，难以直接精准获取百米级尺度的天窗信号。鉴于现有微波遥感数据的空间分辨率限制，未来月球熔岩管探测任务亟须在载荷硬件设计上取得突破，从硬件层面上提升空间分辨率，以满足对百米级天窗热异常的直接分辨需求。在此基础上，通过优化数据空间分辨率、发展超分辨率反演算法及多源数据融合技术，对突破微波探测空间分辨率瓶颈，显著提升微波探测对微小尺度天窗热异常的识别精度具有重要意义。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

参 考 文 献

- [1] CRAWFORD I A, ANAND M, COCKELL C S, *et al.* Back to the moon: The scientific rationale for resuming lunar surface exploration[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 74(1): 3–14. doi: [10.1016/j.pss.2012.06.002](https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.06.002).
- [2] LIU Jianjun, ZENG Xingguo, LI Chunlai, *et al.* Landing site selection and overview of China's lunar landing missions[J]. *Space Science Reviews*, 2021, 217(1): 6. doi: [10.1007/s11214-020-00781-9](https://doi.org/10.1007/s11214-020-00781-9).
- [3] XU Lin and OUYANG Ziyuan. Scientific progress in China's lunar exploration program[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2014, 34(5): 525–534. doi: [10.11728/cjss2014.05.525](https://doi.org/10.11728/cjss2014.05.525).
- [4] SMITH M, CRAIG D, HERRMANN N, *et al.* The Artemis program: An overview of NASA's activities to return humans to the moon[C]. 2020 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, USA, 2020: 1–10. doi: [10.1109/AERO47225.2020.9172323](https://doi.org/10.1109/AERO47225.2020.9172323).
- [5] CESARETTI G, DINI E, DE KESTELIER X, *et al.* Building components for an outpost on the lunar soil by means of a novel 3D printing technology[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 93: 430–450. doi: [10.1016/j.actaastro.2013.07.034](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.034).
- [6] NAITO M, HASEBE N, SHIKISHIMA M, *et al.* Radiation dose and its protection in the Moon from galactic cosmic rays and solar energetic particles: At the lunar surface and in a lava tube[J]. *Journal of Radiological Protection*, 2020, 40(4): 947–961. doi: [10.1088/1361-6498/abb120](https://doi.org/10.1088/1361-6498/abb120).
- [7] DOBYNDE M I and GUO Jingnan. Radiation environment at the surface and subsurface of the moon: Model development and validation[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(11): e2021JE006930. doi: [10.1029/2021JE006930](https://doi.org/10.1029/2021JE006930).
- [8] WILLIAMS J P, PAIGE D A, GREENHAGEN B T, *et al.* The global surface temperatures of the moon as measured by the Diviner lunar radiometer experiment[J]. *Icarus*, 2017, 283: 300–325. doi: [10.1016/j.icarus.2016.08.012](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.08.012).
- [9] DURGA PRASAD K. Thermophysical Behavior of the Lunar Surface[M]. CUDNIK B. Encyclopedia of Lunar Science. Cham: Springer, 2023: 1209–1226. doi: [10.1007/978-3-319-14541-9_200](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14541-9_200).
- [10] MANDEVILLE J C and BARITEAU M. Cosmic dust and micro-debris measurements on the MIR space station[J]. *Advances in Space Research*, 2001, 28(9): 1317–1324. doi: [10.1016/S0273-1177\(01\)00403-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00403-3).
- [11] MALLA R B and Brown K M. Determination of temperature variation on lunar surface and subsurface for habitat analysis and design[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 107: 196–207. doi: [10.1016/j.actaastro.2014.10.038](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.10.038).
- [12] VOCK A and NILSSON T. Holistic outpost design for lunar lava tubes[OL]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.17100>. 2022.
- [13] KALITA H, QUINTERO A, WISSING A, *et al.* Evaluation of Lunar Pits and Lava Tubes for Use as Human Habitats[M]. VAN SUSANTE P J and ROBERTS A D. Earth and Space 2021. Reston: American Society of Civil Engineers, 2021: 944–957. doi: [10.1061/9780784483374.086](https://doi.org/10.1061/9780784483374.086).
- [14] DRAGONI M, PIOMBO A, and TALLARICO A. A model for the formation of lava tubes by roofing over a channel[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995,

- 100(B5): 8435–8447. doi: [10.1029/94JB03263](https://doi.org/10.1029/94JB03263).
- [15] FENG Yujie, PAN Pengzhi, TANG Xuhai, *et al.* A comprehensive review of lunar lava tube base construction and field research on a potential earth test site[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 34(9): 1201–1216. doi: [10.1016/j.ijmst.2024.06.003](https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2024.06.003).
- [16] 郑翀, 邓青云, 叶茂, 等. 月球熔岩管探测研究现状与发展方向[J]. 前瞻科技, 2024, 3(1): 100–108. doi: [10.3981/j.issn.2097-0781.2024.01.008](https://doi.org/10.3981/j.issn.2097-0781.2024.01.008).
ZHENG Chong, DENG Qingyun, YE Mao, *et al.* Research status and development direction of lunar lava tube exploration[J]. *Science and Technology Foresight*, 2024, 3(1): 100–108. doi: [10.3981/j.issn.2097-0781.2024.01.008](https://doi.org/10.3981/j.issn.2097-0781.2024.01.008).
- [17] THEINAT A K, MODIRIASARI A, BOBET A, *et al.* Lunar lava tubes: Morphology to structural stability[J]. *Icarus*, 2020, 338: 113442. doi: [10.1016/j.icarus.2019.113442](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113442).
- [18] SHE Xingyang, WANG Jiang, XU Weiyang, *et al.* Research on the impact of extraterrestrial lava tube environments on human survival and countermeasures[J]. *Space Habitation*, 2025, 1(1): 100002. doi: [10.1016/j.spaceh.2024.100002](https://doi.org/10.1016/j.spaceh.2024.100002).
- [19] 肖龙, 黄俊, 赵佳伟, 等. 月面熔岩管洞穴探测的意义与初步设想[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48(11): 119602. doi: [10.1360/SSPMA2018-00025](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00025).
XIAO Long, HUANG Jun, ZHAO Jiawei, *et al.* Significance and preliminary proposal for exploring the lunar lava tubes[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2018, 48(11): 119602. doi: [10.1360/SSPMA2018-00025](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00025).
- [20] BLAIR D M, CHAPPAZ L, SOOD R, *et al.* The structural stability of lunar lava tubes[J]. *Icarus*, 2017, 282: 47–55. doi: [10.1016/j.icarus.2016.10.008](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.10.008).
- [21] HORVATH T, HAYNE P O, and PAIGE D A. Thermal and illumination environments of lunar pits and caves: Models and observations from the Diviner lunar radiometer experiment[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(14): e2022GL099710. doi: [10.1029/2022GL099710](https://doi.org/10.1029/2022GL099710).
- [22] WYNNE J J, MYLROIE J E, TITUS T N, *et al.* Planetary caves: A solar system view of processes and products[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, 127(11): e2022JE007303. doi: [10.1029/2022JE007303](https://doi.org/10.1029/2022JE007303).
- [23] WAGNER R V and ROBINSON M S. Occurrence and origin of lunar pits: Observations from a new catalog[C]. 52nd Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Texas, USA, 2021: 2530.
- [24] LEE P. Possible lava tube skylights near the north pole of the moon[C]. 49th Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Texas, USA, 2018: 2982.
- [25] CHAPPAZ L, SOOD R, MELOSH H J, *et al.* Evidence of large empty lava tubes on the moon using GRAIL gravity[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(1): 105–112. doi: [10.1002/2016GL071588](https://doi.org/10.1002/2016GL071588).
- [26] SAURO F, POZZOBON R, MASSIRONI M, *et al.* Lava tubes on earth, moon and mars: A review on their size and morphology revealed by comparative planetology[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 209: 103288. doi: [10.1016/j.earscirev.2020.103288](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103288).
- [27] 周昶宇, 周米玉, 徐聿升, 等. 月面形貌勘察重建及其在熔岩管探测中的应用与展望[J]. 前瞻科技, 2024, 3(1): 34–48. doi: [10.3981/j.issn.2097-0781.2024.01.003](https://doi.org/10.3981/j.issn.2097-0781.2024.01.003).
ZHOU Changyu, ZHOU Miyu, XU Yusheng, *et al.* Lunar topographic survey and reconstruction and its application in lava tube exploration[J]. *Science and Technology Foresight*, 2024, 3(1): 34–48. doi: [10.3981/j.issn.2097-0781.2024.01.003](https://doi.org/10.3981/j.issn.2097-0781.2024.01.003).
- [28] 丁春雨, 封剑青, 郑磊, 等. 雷达探测技术在探月中的应用[J]. 天文研究与技术, 2015, 12(2): 228–242. doi: [10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20141113.005](https://doi.org/10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20141113.005).
DING Chunyu, FENG Jianqing, ZHENG Lei, *et al.* A review of applications of radar-detection techniques in lunar explorations[J]. *Astronomical Research and Technology*, 2015, 12(2): 228–242. doi: [10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20141113.005](https://doi.org/10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20141113.005).
- [29] KAKU T, HARUYAMA J, MIYAKE W, *et al.* Detection of intact lava tubes at Marius hills on the moon by SELENE (Kaguya) lunar radar sounder[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(20): 10155–10161. doi: [10.1002/2017GL074998](https://doi.org/10.1002/2017GL074998).
- [30] DONINI E, CARRER L, GEREKOS C, *et al.* An unsupervised fuzzy system for the automatic detection of candidate lava tubes in radar sounder data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 4501319. doi: [10.1109/TGRS.2021.3062753](https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3062753).
- [31] DING Chunyu, XIAO Zhiyong, and SU Yan. A potential subsurface cavity in the continuous ejecta deposits of the Ziwei crater discovered by the Chang'E-3 mission[J]. *Earth, Planets and Space*, 2021, 73(1): 53. doi: [10.1186/s40623-021-01359-7](https://doi.org/10.1186/s40623-021-01359-7).
- [32] ESMAEILI S, KRUSE S, JAZAYERI S, *et al.* Resolution of lava tubes with ground penetrating radar: The TubeX project[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, 125(5): e2019JE006138. doi: [10.1029/2019JE006138](https://doi.org/10.1029/2019JE006138).
- [33] MIYAMOTO H, HARUYAMA J, KOBAYASHI T, *et al.* Mapping the structure and depth of lava tubes using ground penetrating radar[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): L21316. doi: [10.1029/2005GL024159](https://doi.org/10.1029/2005GL024159).
- [34] 徐懿, 陈锐, 黄汉钧, 等. 探地雷达对天体熔岩管探测技术类比研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(4): 365–373. doi: [10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230138](https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230138).
XU Yi, CHEN Rui, WONG Honkuan, *et al.* Analog study of ground-penetrating radar technology for lava tube detection[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2024,

- 11(4): 365–373. doi: [10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230138](https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230138).
- [35] QIU Xiaohang and DING Chunyu. Radar observation of the lava tubes on the moon and mars[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(11): 2850. doi: [10.3390/rs15112850](https://doi.org/10.3390/rs15112850).
- [36] WIECZOREK M A, NEUMANN G A, NIMMO F, *et al.* The crust of the moon as seen by GRAIL[J]. *Science*, 2013, 339(6120): 671–675. doi: [10.1126/science.1231530](https://doi.org/10.1126/science.1231530).
- [37] ANDREWS-HANNA J C, ASMAR S W, HEAD III J W, *et al.* Ancient igneous intrusions and early expansion of the moon revealed by GRAIL gravity gradiometry[J]. *Science*, 2013, 339(6120): 675–678. doi: [10.1126/science.1231753](https://doi.org/10.1126/science.1231753).
- [38] CHAPPAZ L, HOWELL K C, and MELOSH H J. Strategies for detection of buried empty lava tubes with GRAIL data[C]. AIAA SPACE 2014 Conference and Exposition, San Diego, USA, 2014: 4371. doi: [10.2514/6.2014-4371](https://doi.org/10.2514/6.2014-4371).
- [39] ZHU Ke, YANG Meng, YAN Xingyuan, *et al.* GRAIL gravity gradients evidence for a potential lava tube at Marius hills on the moon[J]. *Icarus*, 2024, 408: 115814. doi: [10.1016/j.icarus.2023.115814](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115814).
- [40] 郑翀. 基于重力场的月球典型浅层结构研究[D]. [博士论文], 武汉大学, 2023.
ZHENG Chong. A research on lunar shallow typical structure using gravity field[D]. [Ph.D. dissertation], Wuhan University, 2023.
- [41] 余星阳, 王江, 黄俊, 等. 太阳系天体熔岩管探测研究现状[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2024, 11(4): 313–327. doi: [10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230163](https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230163).
SHE Xingyang, WANG Jiang, HUANG Jun, *et al.* Research status of lava tube exploration in the solar system[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2024, 11(4): 313–327. doi: [10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230163](https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230163).
- [42] HARUYAMA J, HIOKI K, SHIRAO M, *et al.* Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(21): L21206. doi: [10.1029/2009GL040635](https://doi.org/10.1029/2009GL040635).
- [43] HARUYAMA J, HARA S, HIOKI K, *et al.* New discoveries of lunar holes in mare tranquillitatis and mare ingenii[C]. 41st Lunar and Planetary Science Conference, Texas, USA, 2010: 1285.
- [44] WAGNER R V and ROBINSON M S. Distribution, formation mechanisms, and significance of lunar pits[J]. *Icarus*, 2014, 237: 52–60. doi: [10.1016/j.icarus.2014.04.002](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.04.002).
- [45] WAGNER R V and ROBINSON M S. PitScan: Computer-assisted feature detection[C]. Planetary Science Informatics and Data Analytics Conference, St. Louis, USA, 2018: 6051.
- [46] ROBINSON M S, ASHLEY J W, BOYD A K, *et al.* Confirmation of sublunarean voids and thin layering in mare deposits[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 69(1): 18–27. doi: [10.1016/j.pss.2012.05.008](https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.05.008).
- [47] WAGNER R V and ROBINSON M S. Lunar pit morphology: Implications for exploration[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, 127(8): e2022JE007328. doi: [10.1029/2022JE007328](https://doi.org/10.1029/2022JE007328).
- [48] NESNAS I A D, KERBER L, SELLAR G, *et al.* Moon diver: Exploring a pit’s exposed strata to understand lunar volcanism[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 211: 163–176. doi: [10.1016/j.actaastro.2023.05.042](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.05.042).
- [49] HAYNE P O, BANDFIELD J L, SIEGLER M A, *et al.* Global regolith thermophysical properties of the moon from the Diviner lunar radiometer experiment[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2017, 122(12): 2371–2400. doi: [10.1002/2017JE005387](https://doi.org/10.1002/2017JE005387).
- [50] PAIGE D A, SIEGLER M A, ZHANG J A, *et al.* Diviner lunar radiometer observations of cold traps in the moon’s south polar region[J]. *Science*, 2010, 330(6003): 479–482. doi: [10.1126/science.1187726](https://doi.org/10.1126/science.1187726).
- [51] BANDFIELD J L, GHENT R R, VASAVADA A R, *et al.* Lunar surface rock abundance and regolith fines temperatures derived from LRO Diviner radiometer data[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2011, 116(E12): E00H02. doi: [10.1029/2011JE003866](https://doi.org/10.1029/2011JE003866).
- [52] PESCAGLIA S, BARBIERI R, BORTOLATO G, *et al.* Analysis of the thermal environment in the LuNaDrone exploration mission of lunar lava tubes[C]. 2023 IEEE 10th International Workshop on Metrology for AeroSpace, Milan, Italy, 2023: 241–246. doi: [10.1109/MetroAeroSpace57412.2023.10189980](https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace57412.2023.10189980).
- [53] WILCOSKI A X, HAYNE P O, and ELDER C M. Thermal environments and volatile stability within lunar pits and caves[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, 128(7): e2023JE007758. doi: [10.1029/2023JE007758](https://doi.org/10.1029/2023JE007758).
- [54] ZHENG Yongchun, CHAN K L, TSANG K T, *et al.* Analysis of Chang’E-2 brightness temperature data and production of high spatial resolution microwave maps of the moon[J]. *Icarus*, 2019, 319: 627–644. doi: [10.1016/j.icarus.2018.09.036](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.09.036).
- [55] LV Meng, MAO Qianyun, ZHENG Wenchao, *et al.* Re-evaluation of lunar regolith thickness using relative microwave brightness temperature of Chang’E-2 microwave radiometer[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2025, 22: 4501305. doi: [10.1109/LGRS.2025.3564908](https://doi.org/10.1109/LGRS.2025.3564908).
- [56] ZOU Chen, HU Guoping, YANG Wei, *et al.* Near-surface stratigraphic structure of the regolith revealed using Chang’E-2 microwave brightness temperature data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2025, 18: 8696–8705. doi: [10.1109/JSTARS.2025.3545779](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2025.3545779).

- [57] SIEGLER M A, FENG Jianqing, LEHMAN-FRANCO K, *et al.* Remote detection of a lunar granitic batholith at compton-Belkovich[J]. *Nature*, 2023, 620(7972): 116–121. doi: [10.1038/s41586-023-06183-5](https://doi.org/10.1038/s41586-023-06183-5).
- [58] WEI Guangfei, LI Xiongyao, GAN Hong, *et al.* Retrieval of lunar polar heat flow from Chang'E-2 microwave radiometer and Diviner observations[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2023, 10: 1179558. doi: [10.3389/fspas.2023.1179558](https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1179558).
- [59] FENG Jianqing and SIEGLER M A. Reconciling the infrared and microwave observations of the lunar south pole: A study on subsurface temperature and regolith density[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(9): e2020JE006623. doi: [10.1029/2020JE006623](https://doi.org/10.1029/2020JE006623).
- [60] ZHENG Wenchao, WANG Xin, LV Meng, *et al.* Inversion of the vertical temperature profile and the density of the lunar PSR using Chang'E-2 microwave radiometer data and Diviner data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025, 63: 5300212. doi: [10.1109/TGRS.2024.3524792](https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3524792).
- [61] WEI Guangfei, LI Xiongyao, GAN Hong, *et al.* A new method for simulation of lunar microwave brightness temperatures and evaluation of Chang'E-2 MRM data using thermal constraints from Diviner[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2019, 124(5): 1433–1450. doi: [10.1029/2018JE005858](https://doi.org/10.1029/2018JE005858).
- [62] MENG Zhiguo, LEI Jietao, XIAO Zhiyong, *et al.* Re-evaluating influence of rocks on microwave thermal emission of lunar regolith using CE-2 MRM data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 4505112. doi: [10.1109/TGRS.2021.3112673](https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3112673).
- [63] WEI Guangfei, BYRNE S, LI Xiongyao, *et al.* Lunar surface and buried rock abundance retrieved from Chang'E-2 microwave and Diviner data[J]. *The Planetary Science Journal*, 2020, 1(3): 56. doi: [10.3847/PSJ/abb2a8](https://doi.org/10.3847/PSJ/abb2a8).
- [64] YANG Wei, HU Guoping, YANG Fan, *et al.* Inversion of the lunar subsurface rock abundance using CE-2 microwave brightness temperature data[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(20): 4895. doi: [10.3390/rs15204895](https://doi.org/10.3390/rs15204895).
- [65] ZUO Wei, LI Chunlai, and ZHANG Zhoubin. Scientific data and their release of Chang'E-1 and Chang'E-2[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2014, 33(1): 24–44. doi: [10.1007/s11631-014-0657-3](https://doi.org/10.1007/s11631-014-0657-3).
- [66] ZHU Mingwen, CAI Zhanchuan, WU Sensen, *et al.* High-resolution lunar brightness temperature model based on Chang'E-2 MRM data and spatially weighted neural network[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025, 63: 5301113. doi: [10.1109/TGRS.2025.3555624](https://doi.org/10.1109/TGRS.2025.3555624).
- [67] CHI J, PARK J, and KIM H C. Enhancing passive microwave brightness temperature using dual-attention SRGAN[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2025, 18: 22784–22797. doi: [10.1109/JSTARS.2025.3603856](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2025.3603856).

作者简介

胡国平, 副教授, 主要研究方向为微波遥感、微波辐射测量建模以及微波数据的反演与处理技术。

汤慧蕾, 硕士生, 主要研究方向为微波遥感、物理温度模拟。

陈一平, 教授, 主要研究方向为图像处理、车载(移动)激光雷达数据分析和地理空间人工智能。

张吴明, 教授, 主要研究方向为摄影测量与遥感、激光雷达点云处理及其应用。

(责任编辑: 于青)