

# 月球熔岩管的雷达探测研究进展与展望

高强山<sup>1,2</sup>, 段霁桐<sup>3</sup>, 刘佳<sup>4</sup>, 薄正<sup>5</sup>, 张锋<sup>1</sup>

1. 中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室, 北京 100190;

2. 陕西地矿九〇八环境地质有限公司, 西安 710600;

3. 中国科学院空天信息创新研究院 空间信息处理与应用系统技术重点实验室(八室), 北京 100094;

4. 中国科学院地质与地球物理研究所 行星科学与前沿技术重点实验室, 北京 100029;

5. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094

**摘要:** 熔岩管是洞察月球内部地质特征、火山喷发及月壤形成演化的重要场地之一, 同时由于其内部存在温度稳定、防辐射和规避月面小天体撞击等优点, 是未来人类建立月球基地的理想场所。月球是距离地球最近的天然天体, 月球熔岩管很可能会成为人类实地探测和用作基地建设的优选目标之一。雷达是寻找和探明熔岩管的重要手段之一, 总结和归纳月球熔岩管的雷达数据研究成果对未来的月球基地建设等任务具有重要的科学和工程意义。基于雷达数据的成像结果, 本文从月表成像的合成孔径雷达(SAR)和次表层内部结构成像的雷达两个方面对月球熔岩管的回波特征进行了梳理。其中, SAR主要有利于识别熔岩管顶部塌陷而形成的陷坑等, SAR图像会因陷坑退化程度的差异而呈现特定的散射特征; 内部结构成像的雷达识别埋藏熔岩管的关键在于洞穴顶底界面回波的相位反转特征。基于此, 本文对熔岩管的未来科学和工程相关研究提出4点展望。希望文中内容为未来深空探测任务规划中涉及的月球基地选址、科考、地下空间利用等相关工作提供科学依据与参考。

**关键词:** 月球, 熔岩管, 天窗, 地基雷达, 轨道器雷达, 巡视器雷达, 后向散射, 相位反转

**中图分类号:** P2

**引用格式:** 高强山, 段霁桐, 刘佳, 薄正, 张锋. 2026. 月球熔岩管的雷达探测研究进展与展望. 遥感学报, 30(5): 1233-1248

Gao Q S, Duan J T, Liu J, Bo Z and Zhang F. 2026. The progress and prospects of radar detection research on Lunar lava tubes. National Remote Sensing Bulletin, 30(5): 1233-1248 [DOI: 10.11834/jrs.20265282]

## 1 引言

熔岩管是在地表下形成的天然管道, 在活火山时期其内含有隔热熔岩并将之搬运很远距离(Miyamoto等, 2005)。在初始阶段, 熔岩岩浆从火山口流出, 类似于河流在表面流动。熔岩在流动过程中, 由于热熔岩和外部较冷环境之间的温度差异很大, 熔岩在地表外部冷却会形成一个固结的外壳。熔岩在前进过程中, 熔岩上方的外壳会持续凝固并逐渐变厚。外壳可以起到绝热保护作用, 使得岩浆在内部保持高温状态持续流动。当火山口停止供给岩浆且流走后, 会形成中空的管道, 即为熔岩管(Léveillé和Datta, 2010; 肖龙等, 2018)。

熔岩管的形成和演化是一个复杂的过程, 并

且形成之后还会受到后续地质事件的长期影响。熔岩管在形成初期通常埋藏于地下, 后期会因顶部发生塌陷而暴露于地表, 诱导因素包括内因和外因, 内因与熔岩管顶部厚度和强度有关, 外因涉及构造活动、地震和撞击等作用(肖龙等, 2018)。塌陷使得熔岩管内部洞穴空间暴露于月表, 熔岩管顶部的塌陷位置称之为天窗, 若这种塌陷在熔岩管上连续出现, 则形成塌陷链, 若全部塌陷, 则认为形成月溪(Hurwitz等, 2013), 这些均为负地形地貌。此外, 月球上与熔岩管天窗相似的地貌是撞击熔融池内的塌陷, 与天窗可共同称之为陷坑(pit)。与碗形的撞击坑不同, 陷坑的基本形貌特征为近乎垂直的岩壁和向内倾斜的边缘(Wagner和Robinson, 2014), 天窗可认为是月球陷坑中的一种。

收稿日期: 2025-08-01; 预印本: 2025-12-19

基金项目: 深空探测实验室开放基金(编号: NKDSEL2024002); 国家自然科学基金(编号: 12273044, 62495034, 6217012512)

第一作者简介: 高强山, 研究方向为雷达数据处理以及科学应用。E-mail: qsgao2016@163.com

通信作者简介: 段霁桐, 研究方向为遥感SAR图像处理、月球雷达探测、定量反演及辐射定标。E-mail: duanjt@aircas.ac.cn

熔岩管道的大小和形状与熔岩流的物理性质、喷发速率和天体表面环境（如温度、重力、大气环境等）有关（Hulme, 1974; Calvari 和 Pinkerton, 1998）。熔岩管形成时的初始形态近似圆形，随着后续熔岩的注入、流动、冷却、凝固、底部填满等过程，管道两侧通常会显示出不同高度的熔岩流痕迹，底部保留各种熔岩流动过程中的特征，如绳状构造（余星阳等, 2024）。地球上的熔岩管延伸距离一般为十几公里，直径一般为数米。而对于重力较低的月球等天体，熔岩管的规模应该更大，重力数据反映其直径和深度在理论上达到数百米，延伸长度甚至达到几十公里（Blair等, 2017）。参考地球熔岩管分布特征，即熔岩网络管道一般由主管道和一些小的管道组成（Miyamoto等, 2005），月球熔岩管道应该具有类似网络分布特征。

月球熔岩管的稳定性应与顶部厚度（即月表至管道顶部的垂直深度）和管道宽度有关。由月球勘测轨道飞行器（LRO）影像资料观察到的150个陷坑估算出顶部厚度约为75 m，宽度在49—106 m之间（Haruyama等, 2009; Robinson等, 2012）。基于岩石静压力和泊松应力约束下的模拟研究指出（管道顶底板的高度均设置为宽度的1/3）：对于顶部厚度50 m的稳定熔岩管，其理论宽度可达到3.5 km；当熔岩管顶部厚度达到200 m时，最大宽度为5.25 km依然是稳定的；而对于顶部厚度为500 m的管道在宽度达到5 km时不会坍塌（Blair等, 2017）。

普遍认为月球火山活动持续时间很可能超过30亿年，基于热演化模型推测火山熄灭于20亿年前（Ziethe等, 2009），然而不规则月海斑块和环形凹陷穹丘等小型火山地貌的年代学研究则指出火山活动结束得应该更晚（Braden等, 2014; Zhang等, 2021），并且嫦娥五号样品中发现了约1.2亿年前火山作用形成的玻璃珠（Wang等, 2024a），不过基本都认为现今月球火山活动已经终止（Stern等, 2018），月球的熔岩管道是不活跃的。因此，鉴于月球构造活动停止、风化速率较弱以及重力较低等外在条件，空心而稳定的月球熔岩管道应该可以比地球类似熔岩管存在更长时间（Kemppe和Werner, 2003）。

月球熔岩管道稳定且内部空间大等特点使其具有多方面重要价值。首先，在地质角度看，熔岩管的性质（如矿物和岩石类型以及延长性）有助于理解地质演化历史。其次，熔岩管是建筑、储

存食物和电子设备的理想场所（Benaroya, 2017），不需要过多的工程建造量。再者，熔岩管洞穴是人类可以安全定居的理想场所，洞穴顶部能够帮助人类躲避表面诸如宇宙和太阳辐射、伽马射线、极端温度变化、月面小天体撞击等威胁（Rapp, 2006; Benaroya, 2017）。最后，熔岩管洞穴由于温度稳定而可能有利于储存水，或许是一个稳定的物理和化学环境，可能会提供保存生物特征的稳定环境（Léveillé和Datta, 2010），值得探索。此外，熔岩管天窗暴露月表的内壁提供了观察下覆基岩横截面的机会，使得观测可以直接进入月海单元层，在不进行钻探的情况下即可调查月球火山活动、月壤形成等历史，而且是进入熔岩管内部通道的理想入口（Wagner和Robinson, 2022）。

月球上的熔岩管道几乎很难通过直接观测而进行绘制，地球熔岩管的现场测绘等方法目前对月球不具有可行性。熔岩管塌陷形成的天窗、塌陷链等可通过光学影像识别（Haruyama等, 2009; 肖龙等, 2018）。熔岩管内部空洞会引起局部重力场变化，可根据重力异常探测结果的“质量亏损”现象进行分析（Chappaz等, 2017）。熔岩管道塌陷口下部与顶部月壤层表现出不同的热物理性质，与周围区域存在显著温度差异，因此热异常探测可识别熔岩管天窗等（Horvath等, 2022）。

基于雷达观测视角，熔岩管道与周围月壤或岩石存在较大电性差异，电磁波传播至熔岩管与周边介质界面时，会引起电磁波的反射或散射，回波信号可被雷达接收。因此，雷达具备探测熔岩管道的潜力，回波信号的形态、相位和介电性质等可对熔岩管进行识别与解译（Esmaeili等, 2020; Qiu和Ding, 2023）。目前，探地雷达已对地球熔岩管道开展过很多原位探测（Miyamoto等, 2005; 徐懿等, 2024），研究结果和分析方式具有借鉴价值。截止目前，识别了月球熔岩管的对月观测雷达有月亮女神号（SELENE）搭载的月球雷达探测仪LRS（Lunar Radar Sounder）（Kaku等, 2017; Donini等, 2022）和LRO搭载的微型射频仪（Mini-RF）（Carrer等, 2024），以及嫦娥3号和4号着陆器携带的巡视器雷达（Ding等, 2021; Zhou等, 2025）。此外，地基雷达阿雷西博（Arecibo）在澄海内发现了疑似被细粒风化物质填充的熔岩管塌陷链（Campbell等, 2014）。

综上所述，月球熔岩管具有重要的科学和工程

价值，雷达是探寻熔岩管的关键手段之一，总结月球熔岩管的雷达探测研究成果具有重要的科学和工程意义。根据对月观测雷达的最终成像结果，本文从两个方面分别归纳相关研究成果：即月表成像的合成孔径雷达（如Arecibo和Mini-RF）和次表层内部结构成像的雷达（LRS和嫦娥巡视器雷达）。重点总结熔岩管的散射和反射回波特征等成果与进展，并对熔岩管的未来科学和工程研究进行展望，希望对熔岩管研究的进一步发展有所帮助，对月球基地选址、地下空间利用及深空探测任务规划等未来相关工作提供科学依据与参考。

## 2 观测到月球熔岩管的雷达简介

截止目前，地基雷达、轨道器雷达和嫦娥巡视器雷达的观测数据研究成果均有涉及熔岩管或地下洞穴等，因此先简介这3类雷达的工作原理和数据解译的基本依据。

### 2.1 地基雷达

观测月球的地基雷达有很多，如国际上著名的有阿雷西博（Arecibo）雷达、干草堆（Haystack）雷达、磨石山（Millstone）雷达、金石太阳系雷达（Gold stone solar system radar, GSSR）、绿岸（Greenbank）雷达等（Campbell, 2016; Slade等, 2011; Thompson等, 2016），国内的有三亚（相控阵）、佳木斯、曲靖、FAST等雷达（李鸣远等, 2021; 王瑞刚等, 2024）。目前，仅Arecibo观测数据研究成果涉及到熔岩管，因此简介Arecibo相关情况。

Arecibo位于美国波多黎各，安装有波长为12.6 cm（S波段）和70 cm（P波段）的发射机，并与另一地的绿岸雷达组成双站雷达系统，对月球正面观测成像（Campbell等, 2007, 2010）。地基雷达由于在地球上固定位置，因此利用地月之间的相对运动关系可实现月球正面不同区域的观测成像，进而解释月表与次表层散射特征，并解译相应的形貌特征和地质信息等。

Arecibo观测月球过程可简单描述为：当雷达面向月球时，向月球发射特定频率的圆极化电磁波，遇到月表和内部介电性质不连续的界面时会发生散射与反射，然后由绿岸雷达接收后向散射回波，即同时接收左旋和右旋的圆极化回波，其中与发射信号极化方向相同的回波称为同向旋转量（SC），

相反的则称为反向旋转量（OC），这二者的极化辐射能量之比称为圆极化率（孙靖等, 2022）。

后向散射回波数据经过合成孔径雷达（SAR）等技术处理实现月表的雷达图像绘制，雷达图像的回波功率等数据可用来解释月表形貌特征等相关地质信息。月球风化层的雷达后向散射来源可分为3部分（图1）：月表岩石的散射（表面散射，surface scattering）、细粒碎屑内悬浮岩石的散射（体散射，volume scattering）和月壤与破碎基岩界面的散射（基底散射，substrate scattering），体散射和基底散射会受到风化层物质对微波损耗的强烈影响（Campbell等, 2014）。当风化层内缺乏石块且月壤厚度较大时，散射回波通常为低功率。

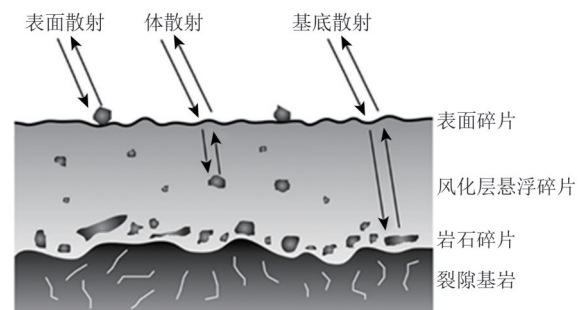


图1 月球风化层物理结构与雷达散射机制示意图  
(修改自Campbell等, 2014)

Fig. 1 Schematic of regolith physical structure and associated radar scattering mechanisms (Modified from Campbell et al., 2014)

### 2.2 轨道器雷达

轨道器雷达围绕月球轨道旋转，飞行过程中向月球发射电磁波，并接收表层与次表层产生的回波，最后根据回波特征解译表层与次表层地质特征。根据成像结果的不同，轨道器雷达可分两种：主要用于月表成像的SAR，为侧视观测方式，如Mini-RF，解释依据Arecibo的基本一致（参考图1）；主要用于次表层内部结构成像的雷达，为正下方观测方式，如LRS。Mini-RF和LRS观测数据的研究成果均涉及到天窗与熔岩管，因此对二者进行简介。

Mini-RF是美国2009年发射的LRO载荷之一，发射S波段（12.6 cm）或X波段（4.2 cm）圆极化信号，相干接收两个正交的线极化回波信号（Raney等, 2011）。利用SAR等相关技术对后向散射回波信号进行成像处理，主要科学目标是研究月球表

面的物理特性和寻找阴影区水冰物质存在的证据 (Nozette 等, 2010)。其中S波段数据覆盖了全月球67%区域 (南北极区超过99%), X波段数据只覆盖月球极少部分区域 (Cahill 等, 2014)。与地基雷达相比, 虽然解译月球形貌特征的基本方式一致, 但分辨率更高, 能识别更多较小的地貌单元。

LRS 是日本于 2007 年发射的月亮女神号 (SELENE) 轨道器的载荷之一, 主要用于探测月球的次表层内部结构 (Ono 等, 2010)。LRS 是一种连续调频波雷达 (4–6 MHz), 中心频率为 5 MHz, 波长~60 m, 当轨道器的飞行高度为 100 km 时, 沿飞行方向的月表采样间隔距离为 75 m (Ono 和 Oya, 2000; Ono 等, 2010)。如图 2 所示, LRS 天线向其所在位置的正下方发射信号, 回波信号由另外一组偶极子天线接收, 发射的雷达信号可穿透到月表以下几千米深度, 遇到月表和次表层内不连续的分界面时会产生回波 (主要为反射波), 根据记录回波信号的雷达图像可分析与解释月球次表层数公里深度范围内的内部结构信息。

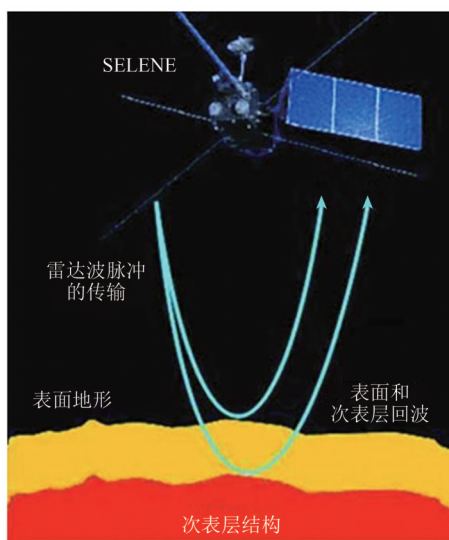


图2 月球雷达探测仪(LRS)的探测原理示意图  
(郑永春等, 2011)

Fig. 2 Schematic of lunar radar sounder detecting principle  
(Zheng et al., 2011)

由于月球高地的地形复杂, LRS 在高地区域获取的数据很难对次表层结构进行有效解释 (Ono 等, 2010)。但月海表面地形整体平坦, 有利于 LRS 数据对月海内部结构特征进行解译。LRS 识别的月海内部层位反射信号在雷达图像上呈现近似水平分布, 月海内部引起反射的介质应该是高孔隙度沉

积物, 最合理的解释是火山岩浆充填月海盆地间歇期形成的埋藏风化层, 且厚度超过 1 m (Ono 等, 2009; Oshigami 等, 2012)。因此, LRS 利于识别深藏于月海平原之下的熔岩管。

### 2.3 巡视器雷达

月球巡视器雷达是利用着陆器携带的月球车车载雷达对月表进行原位探测, 与轨道器雷达相比, 其面临的传播损耗和空间复杂电磁背景等不利因素就相对少很多。目前, 实现月球巡视器雷达探测的工程分别为美国的阿波罗 17 任务和中国的嫦娥 3 号和 4 号任务 (王瑞刚等, 2020)。不过, 中美两国的巡视器雷达工作方式有所不同。阿波罗 17 的巡视器雷达工作时, 发射天线固定在月球表面, 接收天线安装在巡视器, 随着巡视器移动而进行介电常数和损耗角正切的测量, 以及研究次表层结构的研究 (Grimm, 2018)。嫦娥 3 号和 4 号雷达则是发射天线和接收天线均安装于巡视器, 分别设置有低频 (60 MHz) 和 高频 (500 MHz) 通道, 基本工作原理如图 3 所示, 雷达发射机产生超宽带的毫微秒脉冲, 通过天线向月表之下辐射电磁脉冲信号, 若遇到同一介质分布不均匀层或不同介质的交界面、风化层中的悬浮石块等, 会产生反射、透射以及散射等, 其中返回月表的信号被接收天线记录, 经过一系列处理得到的雷达数据可用于解释巡视器路线下方的次表层月壤厚度与结构等信息 (丁春雨等, 2015)。

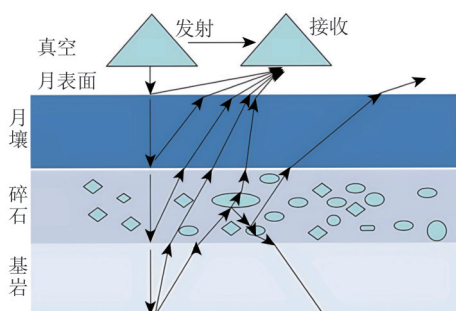


图3 嫦娥巡视器雷达工作原理示意图(修改自丁春雨等, 2015)  
Fig. 3 The working principle schematic of the Chang-E Rover Radar (Modified from Ding et al., 2015)

由于探测深度和分辨率的能力不同, 现有的研究成果表明嫦娥高频通道雷达主要对基岩之上的风化层内部结构实现了精细成像, 而低频通道雷达则对风化层之下的玄武岩基岩层实现了成像, 揭示多个期次的火山活动事件 (Xiao 等, 2015;

Cao等, 2023; Liu等, 2023)。

综上所述, 地基雷达 (Arecibo)、轨道器雷达 (Mini-RF 和 LRS) 以及巡视器雷达 (嫦娥3号和4号) 相关参数信息及对比见表1, 其中LRS和嫦娥3/4号雷达的深度信息为预估探测深度, 与最终实测数据解释的深度不尽相同, 分辨信息为雷达信号在自由空间的分辨率 ( $r_0$ )。内部结构成像雷

达的实际分辨率 ( $r$ ) 与介电常数 ( $\epsilon$ ) 有关, 计算公式为

$$r = \frac{r_0}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

例如, 假定风化层和玄武岩层的相对介电常数在4和9之间, 则LRS的垂直分辨率可估计在25 m到40 m之间 (Pommerol等, 2010)。

表1 地基雷达、轨道器雷达、巡视器雷达的相关参数信息表

Table 1 Relevant parameter table of Earth-based radar, orbiter radar and rover radar

名称	类型	成像	频率	探测深度	分辨率
阿雷西博/Arecibo	地基雷达	月表SAR成像	430 MHz(P波段)	>10 m <sup>a</sup>	~300 m/pixel <sup>b</sup>
微型射频频仪/Mini-RF	轨道器雷达	月表SAR成像	2.38 GHz(S波段)	1-2 m <sup>c</sup>	15×30 m <sup>c</sup>
月球雷达探测仪/LRS	轨道器雷达	次表层内部结构成像	5 MHz	5 km <sup>d</sup>	75 m <sup>d</sup>
嫦娥3/4号雷达	巡视器雷达	次表层内部结构成像	60 MHz	≥100 m <sup>e</sup>	~1 m <sup>e</sup>
			500 MHz	≥30 m <sup>e</sup>	0.3 m <sup>e</sup>

注: 文献参考标注 a-(Morgan等, 2016); b-(Campbell等, 2025); c-(Cahill等, 2014); d-(Ono等, 2010); e-(Li等, 2015)。

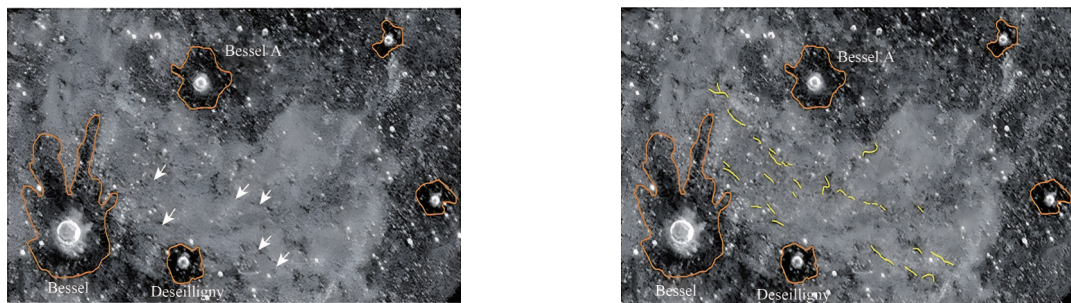
### 3 合成孔径雷达(SAR)识别的熔岩管散射特征

月球SAR主要用于月表成像, 适合分析天窗、塌陷链、月溪等暴露于月表的熔岩管塌陷地貌。地基雷达和轨道器雷达均有相关成果发表, 梳理如下。

#### 3.1 地基SAR识别的熔岩管塌陷链散射特征

Arecibo的P波段SAR图像在月球澄海内发现了一个疑似熔岩管地貌, 很可能是月海风化层物质滑动填充一系列深度较大的塌陷链而形成 (Campbell等, 2014)。该地貌在雷达图像上呈现多个暗色线性或弧形分布特征, 这些暗色线条接近平行分布,

宽度在500—800 m (图4), 分布走向垂直于西南方位, 并未处于雷达照射地形所投下的阴影区域, 因此排除雷达观测角度的原因。其中部分雷达暗色线条接近 Bessel 撞击坑, 或可将其解释为撞击坑雷达暗晕的远端溅射物 (Ghent等, 2016), 但由于整体分布并没有与 Bessel 或附近几个撞击坑呈现径向特征 (图4橙色曲线圈内的区域为雷达暗色、细粒的撞击坑溅射物), 溅射物的解释缺乏一定合理性。结合月海陷坑和次表层空洞的类比研究 (Robinson等, 2012), 较为合理的解释依然是被风化层细粒物质填充的塌陷链。地基雷达识别的澄海地区熔岩管入口已经被风化层或月壤物质填充, 其工程价值或意义应较低。



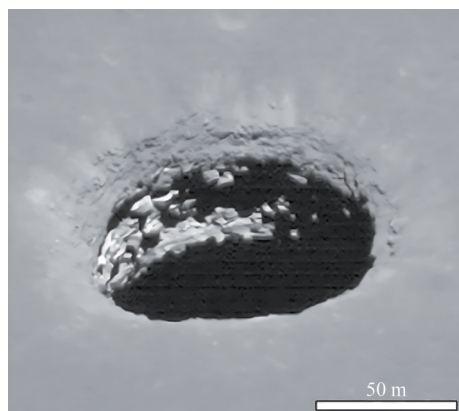
(a) White arrows denote several prominent radar-dark linear features (b) Yellow lines display radar-dark linear features

图4 澄海 Bessel 撞击坑东部区域的地基雷达 70 cm 波长 SC 图像 (修改自 Campbell 等, 2014)

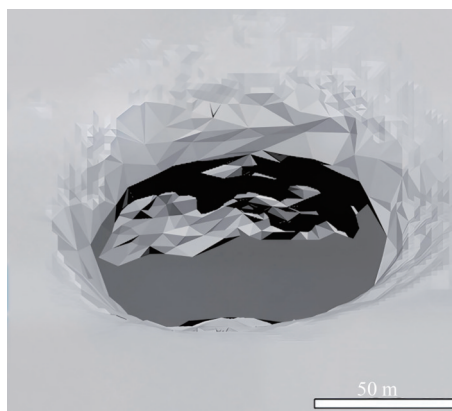
Fig. 4 Earth-based 70 cm wavelength SC-polarization radar image of east region of Bessel crater in Mare Serenitatis (Modified from Campbell et al., 2014)

### 3.2 轨道器SAR识别的熔岩管天窗散射特征

静海内的一个天窗 (8.3355°N, 33.222°E) 尚未被风化层物质滑动填充 (图5), 在轨道器雷达 Mini-RF SAR 图像中展现出独特的雷达散射特征, 应为证明天窗下方存在熔岩管道或洞穴空间的雷达证据。该天窗被认为是进入熔岩管内部空间的理



(a) NAC影像(编号 M155023632R)  
(a) NAC image (No. M155023632R)



(b) 立体模型  
(b) Stereoscopic model

图5 静海天窗(Wagner和Robinson, 2022)

Fig. 5 The skylight in Mare Tranquillitatis (Wagner and Robinson, 2022)

想候选目标之一, 其圆形洞口直径~100 m, 沿周边地形表面向下 15—30 m 深度内呈现斜坡般的漏斗状形貌, 再向下天窗坑壁接近垂直且深度在 75—80 m 之间, 是目前通过形貌测量获知最深的陷坑 (Wagner和Robinson, 2022; Carrer等, 2024), 因此具有代表性。

图6为该天窗的 Mini-RF S 波段 SAR 图像, 图中白色箭头指示雷达信号观测的入射方向, 观测角度为~48.9°。结合天窗形貌特征, 可知倾斜入射的雷达信号能够从西侧进入天窗内的悬壁和下方洞穴传播。图6 (a) 显示在紧邻天窗西侧外围出现雷达回波功率显著增强的现象, 而仅包含月表形貌的模拟探测成像结果排除了功率增强现象是由月表地形引起的可能, 熔岩管天窗的三维模拟雷达观测结果表明图6 (a) 雷达功率增强区域中较宽的亮色部分是由悬壁散射所致, 而较窄部分则可归因于下方洞穴的散射 (Carrer等, 2024)。地球轨道器 SAR 图像表明地球熔岩管天窗具有相似散射特征 (图7红色线条圈定的回波功率增强区域, 观测方向与图6白色箭头所示的相反, 红色线条圈内为雷达回波功率增强的亮色区域, 由天窗悬壁和地下通道的散射回波处理成像所致), 进一步佐证紧邻天窗一侧的回波功率增强现象是由天窗悬壁和下方熔岩管洞穴的散射所致 (Carrer等, 2024)。

此外, Mini-RF 采用简缩极化体制 (Nord等, 2009), 可采用 m-chi 极化特征参数分解方法获取雷达数据中的更多散射信息, 该方法分解得到的数据可按照 RGB 图像合成方式获得伪彩色雷达图像 (图6 (b)), 图中蓝色表示单次散射或布拉格散射

(bs), 红色表示二次散射 (db), 绿色表示体散射或随机极化散射 (vs), 而这3类颜色的合成色则表明相应的三种或两种散射类型均存在 (Raney等, 2012)。雷达图像的 m-chi 极化分解结果揭示该静海天窗次表层管道的回波包含单次和二次散射, 与熔岩管三维模型预测的散射机制结果一致 (Carrer等, 2023, 2024)。

## 4 内部结构成像雷达识别的熔岩管回波特征

用于月球次表层内部结构成像的雷达可探测埋藏的熔岩管, 并不需要熔岩管暴露于月表。目前, 实现内部结构成像的雷达有阿波罗 17 的轨道器雷达 (Porcello等, 1974)、LRS 和嫦娥 3/4 号巡视器雷达。其中, LRS 和嫦娥巡视器雷达的研究成果均对熔岩管有所涉及, 相关成果梳理如下。

### 4.1 轨道器雷达识别的熔岩管回波特征

2009 年 SELENE 搭载的地形相机在马里乌斯山 (Marius Hill) 区域拍摄到可能是熔岩管道入口的天窗照片, 被认为是首个说明月球存在熔岩管的证据 (Haruyama等, 2009), 随后又被 LRO 窄角相机 (NAC) 拍摄确认 (Robinson等, 2012)。

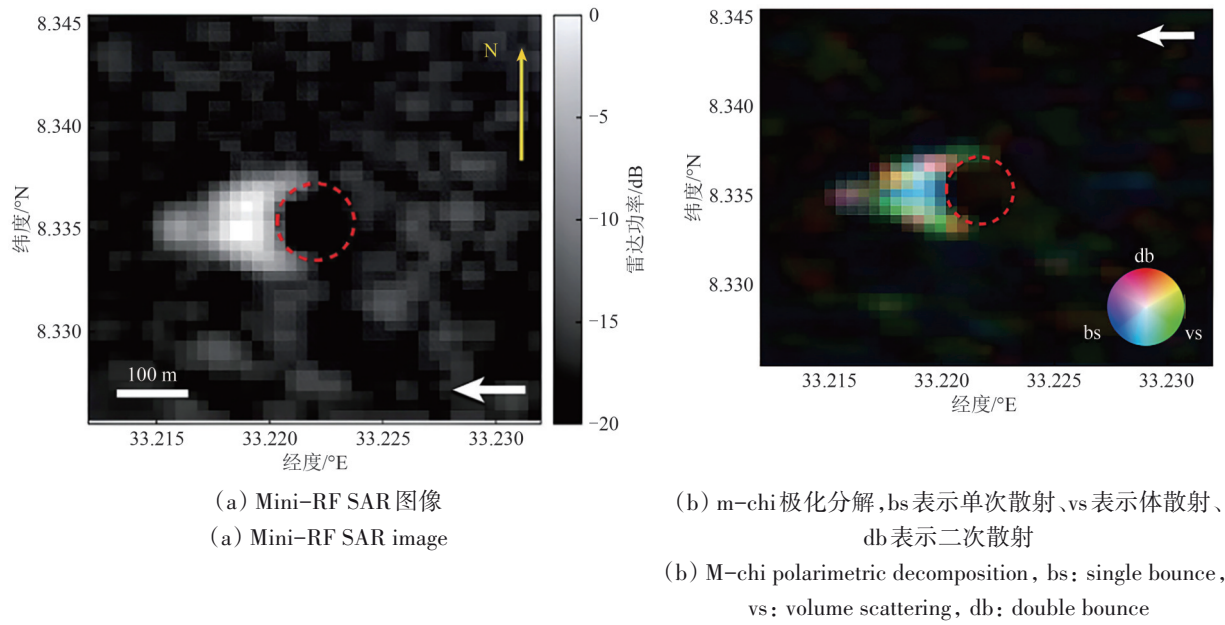


图6 静海天窗雷达图像(修改自 Carrer 等, 2024),  
Fig. 6 Radar images of the Mare Tranquillitatis skylight (Modified from Carrer et al., 2024)

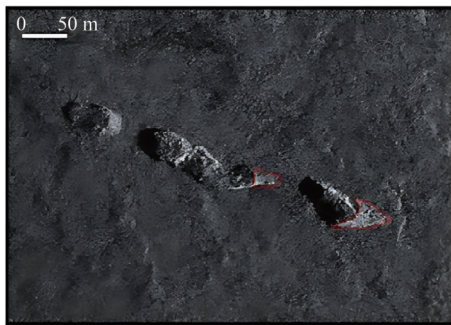


图7 西班牙兰萨罗特岛熔岩管道天窗的轨道器雷达X波段 SAR 图像(Carrer 等, 2024)  
Fig. 7 X-band SAR image a series of lava tube skylights in Lanzarote, Spain (Carrer et al., 2024)

最早报道月球熔岩管雷达回波特征的研究成果是基于LRS数据完成的(Kaku等, 2017; Haruyama等, 2017), 距离Marius天窗位置最近的LRS图像(图8和图9的黑色箭头指示位置)显示回波功率在最大峰值出现后急剧下降, 又紧接着出现次级峰值(依次对应图8中红色圆、绿色三角和蓝色方块), 被解释为月表之下熔岩管洞穴回波响应, 归纳其有以下3个特征:(1)与表面回波功率对比, 深度小于125 m次表层区域内回波功率下降超过25 dB, 该区域内若没有介电常数变化, 则指示存在一个洞穴或均质岩石的隆起;(2)深度小于225 m范围内出现次级峰值, 为熔岩管顶部或底部界面;(3)若出现小于次级峰值的第三大峰值, 则可视作非天底点的表面回波。完整熔岩管存在的回波模式

为表面回波和次级峰值之间的回波功率急剧减弱, 对应两种可能的熔岩管分布形式: 熔岩管埋深超过75 m, 顶底的高度小于75 m; 埋深超过75 m, 顶底的高度超过75 m(Kaku等, 2017)。

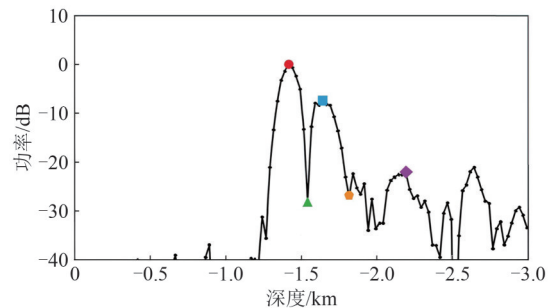


图8 与Marius天窗可能关联的熔岩管LRS回波A-scan图(修改自Kaku等, 2017)  
Fig. 8 The A-scan image of the LRS echo of the lava tube possibly associated with the Marius skylight (Modified from Kaku et al., 2017)

然而, Kobayashi等(2021)对上述熔岩管回波的3个特征提出不同看法, 指出Kaku等(2017)是在虚构的雷达工程事实上得出的结论, 总结的月表之下洞穴LRS回波特征是没有道理的, 并指出上述3个特征的本质:(1)仅仅是对表面回波主瓣的描述;(2)在超过225 m深度范围无熔岩管回波是没有道理的;(3)表面杂波(第3大峰值)可能比熔岩管回波能量更强, 因为熔岩管回波和表面杂波是独立的雷达反射/散射事件。

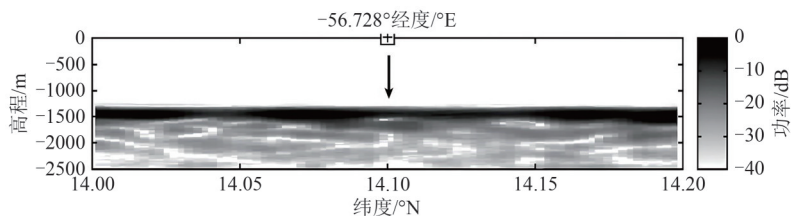


图9 Marius 区域疑似熔岩管 LRS 回波 B-scan 图(修改自 Haruyama 等, 2017)

Fig. 9 The B-scan image of the LRS echo of the suspected lava tube in Marius region (Modified from Haruyama et al., 2017)

通过高精度实测数据构建的 Marius 区域表面地形, Kobayashi 等 (2021) 采用 KiSS 模拟方法从电磁传播理论角度计算出 Marius 区域表面地形的 LRS 回波, 模拟结果与实测数据的对比 (图 10) 证明 Kaku 等 (2017) 解译的熔岩管回波实际与周边地形斜坡有关, 不确定性测试证明其所谓的熔岩管回波实际为表面杂波。

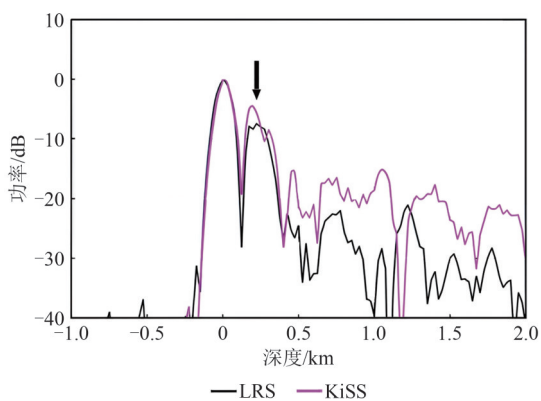
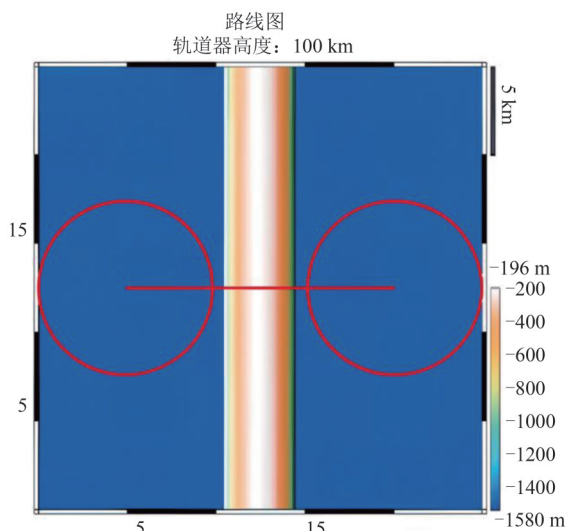


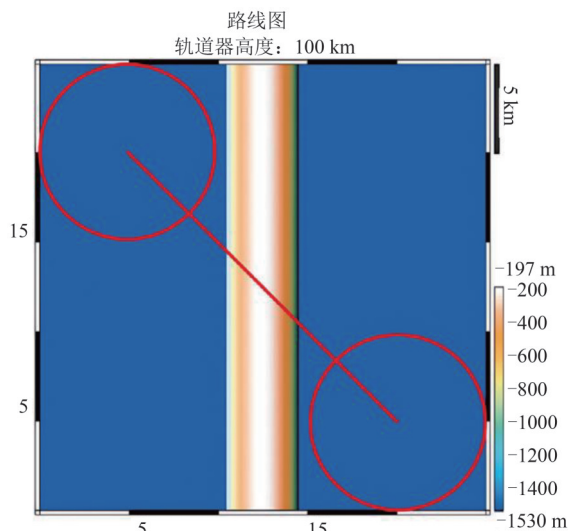
图10 Marius 区域疑似熔岩管位置的 LRS 实际观测和 KiSS 模拟结果(修改自 Kobayashi 等, 2021)

Fig. 10 The LRS observation and KiSS simulation results of the suspected lava tube location in Marius region (Modified from Kobayashi et al., 2021)

因此, 确定月表之下熔岩管洞穴的回波电磁特征不可缺少相应的模拟论证。熔岩管三维模型的模拟结果表明雷达探测熔岩管具有可行性, 且在信噪比和信杂比方面具有良好性能, 双频雷达探测仪 (10—15 MHz 和 60—65 MHz) 能够探测到大部分月球熔岩管, 仅对宽度小于 250 m 的熔岩管存在局限性 (Carrer 等, 2018)。模拟结果表明熔岩管洞穴有一个重要雷达回波响应特征, 即熔岩管顶板和底板、月表的回波具有相位反转特征 (图 11), 即洞穴顶板和底板、月表的回波相位相差  $180^\circ$  (Carrer 等, 2018)。相位反转特征是电磁波传播的基本特性之一 (Neal, 2004; Miyamoto 等, 2005), 当雷达波传播经过的介质介电常数从低变到高, 接着从高变到低, 或者从高变到低再接着从低到高, 此时在进入和穿过这种介质界面对应的回波之间存在相位反转 (Ding 等, 2021), 并且极性相反 (如图 13 (b) 中黑色箭头指示的熔岩管顶底界面回波), 该特性在识别地球熔岩管道和城市管道得到了很好的应用 (Miyamoto 等, 2005; Park 等, 2018)。对于月球熔岩管, 雷达波从真空进入月球次表层再穿过熔岩管道, 相应的介电常数变化一般是从低到高, 再从高到低, 最后又变高, 具备回波产生相位反转的条件。



(a) 雷达轨迹与熔岩管走向垂直  
(a) Radar trajectory perpendicular to lava tube



(b) 雷达轨迹与熔岩管走向斜交  
(b) Radar trajectory oblique to lava tube

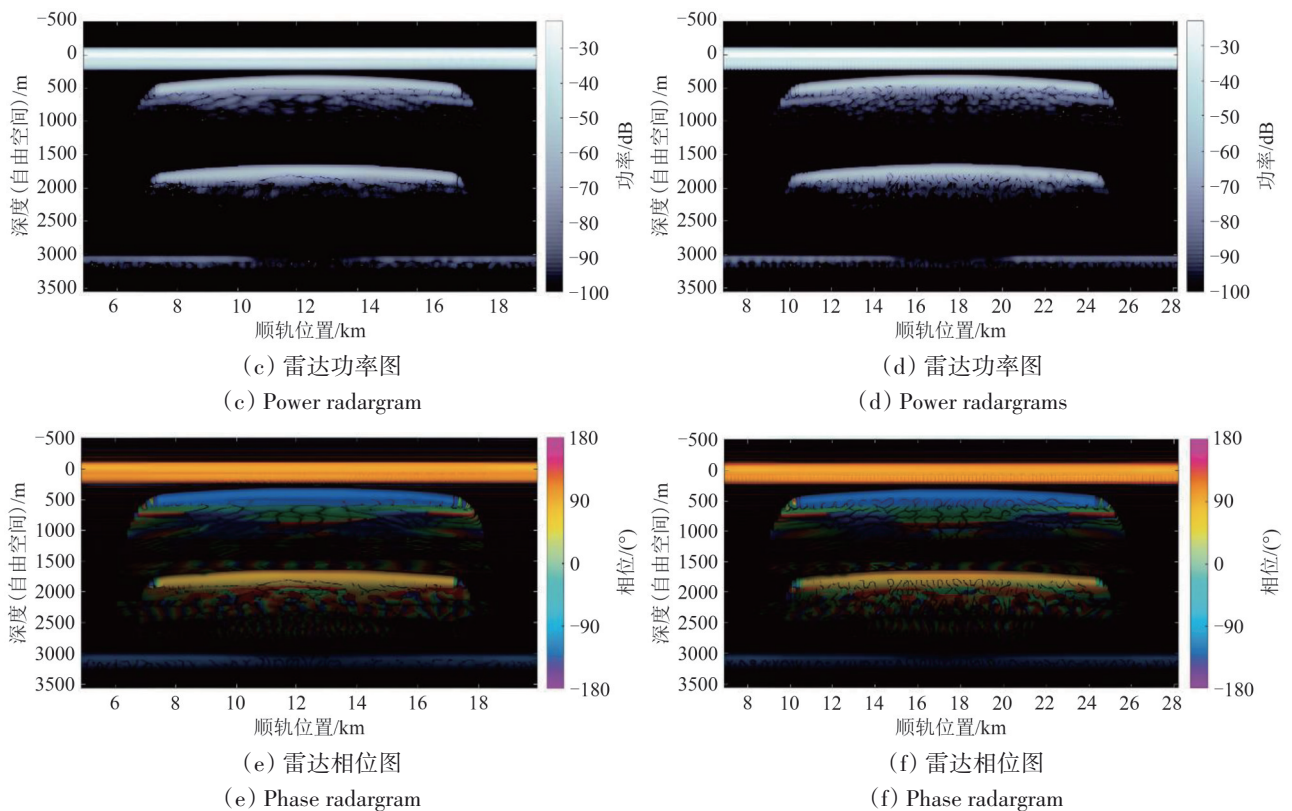


图 11 轨道器雷达探测熔岩管的模拟结果(修改自 Carrer 等, 2018)

Fig. 11 The simulation results of the orbit radar detecting lava tube (Modified from Carrer et al., 2018)

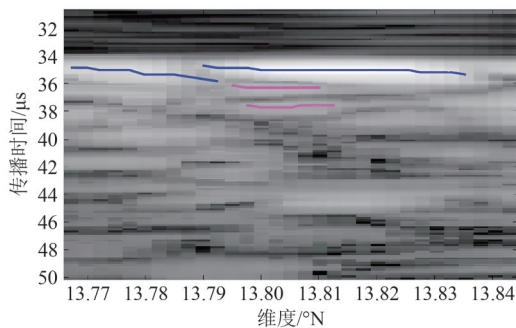


图 12 LRS 数据的自动识别结果, 表面回波为蓝色, 熔岩管回波为洋红色(修改自 Donini 等, 2022)

Fig. 12 The automatic recognition result of LRS data showing the surface echo in blue and the lava tube boundaries in magenta (Modified from Donini et al., 2022)

并且, 熔岩管上方存在撞击坑的模拟探测结果表明: 撞击坑等月表粗糙地形产生的表面杂波与熔岩管顶底界面回波的相位特征不一样, 即表面杂波不会出现相位反转的现象 (Donini 等, 2022), 表明相位反转是 LRS 等次表层内部结构成像雷达识别月表之下熔岩管道的关键特征, 从杂波中识别出熔岩管的一个强标准 (Carrer 等, 2018)。利用相位反转特征, Donini 等 (2022) 提出一个非监督自动识别 LRS 数据中的熔岩管回波响应方法,

图 12 为该方法应用于 Marius 区域的研究结果, 展示了利用相位反转特征从众多杂波干扰中识别出的熔岩管回波, 以此识别出 Marius 区域存在 20 个潜在熔岩管位置点, 不同于 Kaku 等 (2017) 分析出的 80 个以上潜在位置点。

#### 4.2 巡视器雷达识别的熔岩管

轨道器雷达 LRS 识别熔岩管的关键在于回波之间的相位反转, 嫦娥巡视器雷达识别熔岩管的方法同样利用了这一特征。Ding 等 (2021) 在嫦娥 3 号高频雷达数据中发现相位反转现象, 由此指出着陆区下方可能存在高度~3.1 m 的空洞。徐懿等 (2024) 应用主频相近 (400 MHz) 的探地雷达对地球熔岩管洞穴开展探测类比研究, 指出该频率的雷达图像可观察到小于 3 m 高度的熔岩管顶底界面。Zhou 等 (2025) 发现了嫦娥 4 号低频雷达数据中的相位反转, 并分析指出其着陆的月球背面存在约 130 m 深度的熔岩管。

相位反转特性虽然是指示埋藏熔岩管或洞穴存在的关键依据, 但并非是充分依据。例如, 两个溅射物层中间夹一个玄武岩层的月球地层也会引起雷达回波出现相位反转的现象 (Zhou 等, 2025)。

因此,更加充分确定熔岩管的存在还应考虑回波的衰减特性,若熔岩管道内为真空,则其对电磁波的衰减程度要低于管道内填充介质的情况。如图13所示,嫦娥4号巡视器雷达发现的熔岩管不仅

顶部和底部回波信号相位存在反转现象,而且其位置对应的回波损耗或衰减程度低于两侧(Zhou等,2025),相位反转和衰减程度低的两个特性更加有力地支持了熔岩管的存在。

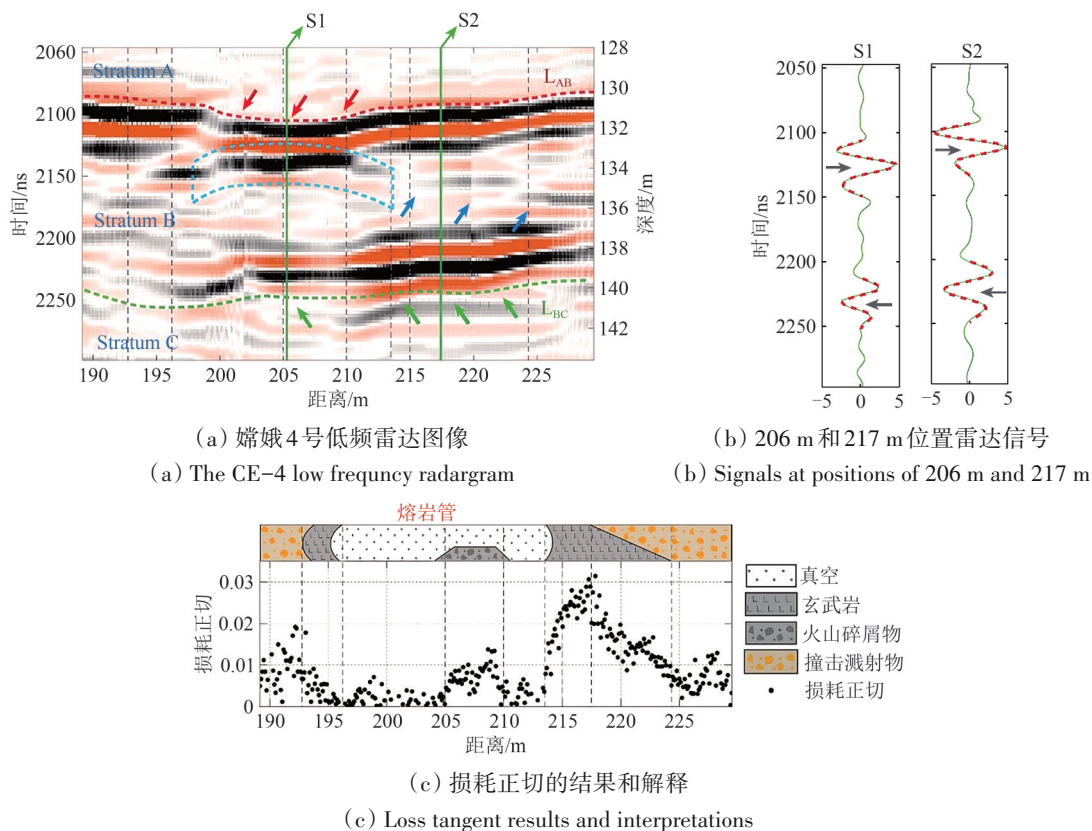


图13 嫦娥4号低频雷达解译的熔岩管(修改自Zhou等,2025)  
Fig. 13 The lava tube interpreted by CE-4 low frequency radar (Modified from Zhou et al., 2025)

## 5 未来展望

现有的对月探测雷达任务并未将熔岩管纳入初始科学目标(Nozette等,1996;Ono等,2008;Nozette等,2010;Spudis等,2010;Fang等,2014;Putrevu等,2016),而已有研究成果表明不同观测模式的雷达均可获取一些熔岩管的信息,展现了雷达探寻月球熔岩管的潜力。文献调研结果表明月球熔岩管的雷达探测研究工作依然存在不足之处,还有很多方面的工作值得继续开展。例如:

(1) 熔岩管天窗与塌陷链以及陷坑的研究可结合雷达数据开展相应的归纳分类。目前,全月球内识别的陷坑有将近300个分布于撞击熔融池内,16个处于月海内,5个位于高地区域(Wagner和Robinson,2022)。撞击熔融池中发现的陷坑主要与直径10 km以上的哥白尼纪撞击坑有关,撞击熔融池中的陷坑直径一般小于月海内陷坑,这与形成

月海的岩浆流速更快、体量更大和持续时间更长有关(Wagner和Robinson,2014)。如图14所示,已发现的陷坑可根据风化层物质填充程度而划分为不同退化阶段(Wagner和Robinson,2014,2022)。

由此可知,地基SAR识别的被风化层物质充填的塌陷链(图4)应处于高度退化阶段,而Mini-RF识别的静海天窗(Carrer等,2024)应属于初始阶段。对于月海内的陷坑,统计结果表明陷坑的退化状态与其母体的月海年龄并不存在直接联系,如退化程度低的静海天窗母体月海年龄(36亿年)就老于退化程度高的陷坑母体岛海(Mare Insularum)年龄(30亿年)(Wagner和Robinson,2022)。因此,现今月海内观察到的陷坑很大可能是月海玄武岩就位之后才形成,可能是某个撞击、地震或构造活动事件的响应,值得思考其形成是否与不同月海地区火山活动末期持续时间或结束后玄武岩冷却速率的差异有关。

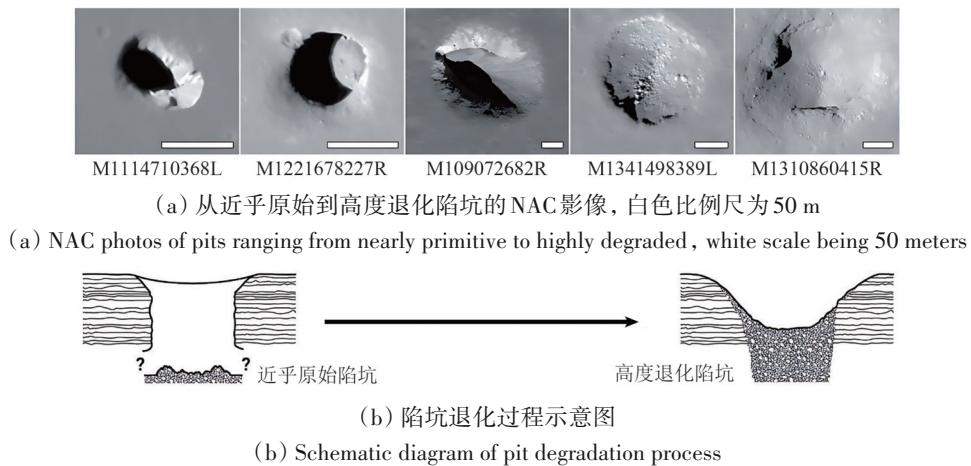


图 14 不同退化阶段的月球陷坑(修改自 Wagner 和 Robinson, 2022)

Fig. 14 Lunar pits at different stages of degradation (Modified from Wagner and Robinson, 2022)

展望未来, 应当归纳不同退化阶段陷坑在 SAR 图像中的散射特征, 并结合次表层内部结构成像的雷达数据来分析这些陷坑与熔岩管或内部洞穴空间的关联性, 或对比相近尺度撞击坑的雷达回波特征差异, 评估可能形成年龄, 进而判断是否可以指示月球一些热活动或冷缩过程的地质行为。

(2) 综合雷达数据与重力数据分析熔岩管的三维形态, 刻画空间分布范围和埋藏深度。对于这方面的工作, 月球重力卫星 GRAIL 获取的重力场数据 (Zuber 等, 2013) 和次表层内部结构成像的雷达数据应是目前较为适合的组合方式。重力场数据的梯度测量可在空间上反映熔岩管的三维分布特征 (Chappaz 等, 2017; Zhu 等, 2024), 雷达识别的熔岩管局限于其运动轨迹的下方位置, 但反映的深度信息优于重力数据。因此, 二者综合分析有望更好的解释熔岩管埋深和空间分布, 由此再结合熔岩管与其他火山形貌 (如月海) 之间的空间关系或可推演火山岩浆流动路径、规模等, 提供更多研究月球热活动的有用信息。文献总结表明目前这方面的综合研究相对较少, 未来值得投入更多努力。当然, 其他类型的雷达数据与重力场数据同样可进行综合研究, 利用各自的优势开展一些有益探索。

(3) 重点关注南极区域的东海撞击熔融沉积物。目前识别的月球陷坑大多数均处于撞击熔融池内 (Wagner 和 Robinson, 2014), 表明撞击熔融沉积物存在内部空间的可能性较大。撞击熔融物具有高孔隙特征, 形态上最接近地球的绳状熔岩流体 (Bray 等, 2010; Neish 等, 2014)。

东海盆地为月球最年轻的撞击盆地, 其撞击溅射物覆盖月球的面积区域大, 延伸范围超过 2700 km (Ghent 等, 2008), 其中南极地区发现的东海撞击熔融沉积物 (图 15 白色箭头所指区域) 厚度推测有数百米 (Campbell 等, 2010), 并且极区很多撞击坑内均沉积有该熔融物, 坑内地形有利于形成熔融池, 因此推测沉积在极区撞击坑内的东海撞击熔融物很可能有较大体积的内部空间。

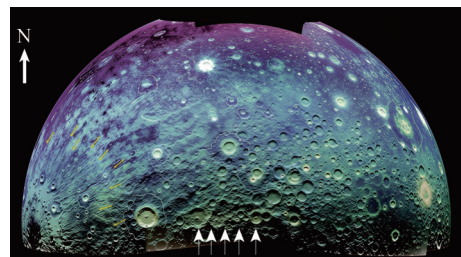


图 15 月球正面南半球的地基雷达 70 cm 波长 CPR 彩色图像, 蓝色为 CPR 低值, 黄色为高 CPR 值, 白色箭头指示了穿越极区的条纹状高 CPR 值区域 (Ghent 等, 2008)

Fig. 15 The Earth-based radar 70 cm wavelength CPR color image in the southern nearside Moon, blue indicates the low CPR value, yellow indicates the high CPR value, and the white arrows indicate the striped area with high CPR value crossing the polar region (Ghent et al., 2008)

同时, 月球南极是未来月球着陆探测和建立月球基地重要候选区 (Sharpe 和 Schrank, 2003; 裴照宇等, 2020), 南极的 Amundsen、Shoemaker、Cabeus 撞击坑附近区域是优先建议的国际月球科研站选址与探测地点 (杜省等, 2025)。即将实施的嫦娥 7 号任务轨道器和巡视器均规划搭载雷达探测设备, 其中巡视器携带的低频雷达预计探测深

度可超过 400 m (Wang 等, 2024b), 正好与推测的熔融物沉积厚度相近, 有望在南极一些撞击坑内部发现潜在的地下空间, 为物资存储和科研站选址提供更多可参考信息。

(4) 熔岩管可否作为水资源的储藏库值得探索。熔岩管内部保持温差稳定的特性是储存水冰资源的一个有利条件, 例如静海附近的熔岩管内部温度推测全年保持恒温 17 °C 左右, 其月球一整天的温差不超过 1 °C (Horvath 等, 2022)。月球风化层物质具有良好的隔热性质并且在全月球范围具有显著的一致性 (Hayne 等, 2017), 月船 3 号着陆位置的实验测量表明 8 cm 厚度风化层可使得月表温度从约 50 °C 下降到约 -10 °C (Feng 等, 2024), 熔岩管内部温度应该不受月表温度变化影响。Wilcoski 等 (2023) 指出虽然陷坑和洞穴在地质时间尺度可能不是最佳储存水冰物质的位置, 但对于人类工程任务的百年时间来说则是可行的选项, 并且若它们处于永久阴影区内则可作为有效的冷阱。嫦娥 7 号任务重要的科学目标之一是南极 (特别是永久阴影区) 水冰资源的直接认证 (Wang 等, 2024b), 其未来原位探测获取的水资源信息和雷达发现的熔岩管或隐藏洞穴等有利于进一步评估熔岩管或洞穴内部环境是否有利于储存水冰物质。

## 6 结 语

本文总结了月球雷达数据研究成果中关于熔岩管的内容, 根据成像结果, 从月表成像的 SAR 和次表层内部结构成像的雷达两个方面分别梳理关于月球熔岩管回波特征的研究成果与进展。其中, SAR 图像有利于识别暴露于月表的熔岩管顶部塌陷形貌, 其雷达回波会因为退化阶段不同而呈现特定的散射特征; 用于次表层内部结构成像的雷达可揭示隐藏于月表之下的熔岩管结构特征, 识别的关键在于熔岩管顶底界面回波的相位反转特征。现有的月球熔岩管雷达回波电磁特征研究依然不够充分, 仍然有很多方面的科学问题和工程问题值得继续深入探索, 为月球科学研究和国际月球探测任务规划提供更多信息。

## 参考文献 (References)

Benaroya H. 2017. Lunar habitats: a brief overview of issues and concepts. *Reach*, 7-8: 14-33 [DOI: 10.1016/j.reach.2018.08.002]

- Blair D M, Chappaz L, Sood R, Milbury C, Bobet A, Melosh H J, Howell K C and Freed A M. 2017. The structural stability of lunar lava tubes. *Icarus*, 282: 47-55 [DOI: 10.1016/j.icarus.2016.10.008]
- Braden S E, Stopar J D, Robinson M S, Lawrence S J, van der Bogert C H and Hiesinger H. 2014. Evidence for basaltic volcanism on the Moon within the past 100 million years. *Nature Geoscience*, 7(11): 787-791 [DOI: 10.1038/ngeo2252]
- Bray V J, Tornabene L L, Keszthelyi L P, McEwen A S, Hawke B R, Giguere T A, Kattenhorn S A, Garry W B, Rizk B, Caudill C M, Gaddis L R and Van Der Bogert C H. 2010. New insight into lunar impact melt mobility from the LRO camera. *Geophysical Research Letters*, 37(21): L21202 [DOI: 10.1029/2010GL044666]
- Cahill J T S, Thomson B J, Patterson G W, Bussey D B J, Neish C D, Lopez N R, Turner F S, Aldridge T, McAdam M, Meyer H M, Raney R K, Carter L M, Spudis P D, Hiesinger H and Pasckert J H. 2014. The Miniature Radio Frequency instrument's (Mini-RF) global observations of Earth's Moon. *Icarus*, 243: 173-190 [DOI: 10.1016/j.icarus.2014.07.018]
- Calvari S and Pinkerton H. 1998. Formation of lava tubes and extensive flow field during the 1991-1993 eruption of Mount Etna. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B11): 27291-27301 [DOI: 10.1029/97JB03388]
- Campbell B A, Campbell D B, Margot J L, Ghent R R, Nolan M, Chandler J, Carter L M and Stacy N J S. 2007. Focused 70-cm wavelength radar mapping of the Moon. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(12): 4032-4042 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.906582]
- Campbell B A, Carter L M, Campbell D B, Nolan M, Chandler J, Ghent R R, Hawke B R, Anderson R F and Wells K. 2010. Earth-based 12.6-cm wavelength radar mapping of the Moon: new views of impact melt distribution and mare physical properties. *Icarus*, 208(2): 565-573 [DOI: 10.1016/j.icarus.2010.03.011]
- Campbell B A, Ray Hawke B, Morgan G A, Carter L M, Campbell D B and Nolan M. 2014. Improved discrimination of volcanic complexes, tectonic features, and regolith properties in Mare Serenitatis from Earth-based radar mapping. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 119(2): 313-330 [DOI: 10.1002/2013JE004486]
- Campbell B A. 2016. Planetary geology with imaging radar: insights from earth-based lunar studies, 2001-2015. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 128(964): 062001 [DOI: 10.1088/1538-3873/128/964/062001]
- Campbell B A, Jawin E R and Morgan G A. 2025. Refined 70-cm earth-based lunar radar maps and a new interpretation of the Cruiger-Sirsalis cryptomare. *Icarus*, 425: 116324 [DOI: 10.1016/j.icarus.2024.116324]
- Cao H Q, Xu Y, Xu L Y, Zhang L, Bugiolacchi R and Zhang F. 2023. From Schrödinger to Von Kármán: an intriguing new geological structure revealed by the Chang'e-4 lunar penetrating radar. *Geophysical Research Letters*, 50(2): e2022GL101413 [DOI: 10.1029/2022GL101413]
- Carrer L, Castelletti D, Pozzobon R, Sauro F and Bruzzone L. 2023. A novel method for hidden natural caves characterization and acces-

- sibility assessment from spaceborne VHR SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 4500111 [DOI: 10.1109/TGRS.2022.3222991]
- Carrer L, Gerekos C and Bruzzone L. 2018. A multi-frequency radar sounder for lava tubes detection on the Moon: design, performance assessment and simulations. *Planetary and Space Science*, 152: 1-17 [DOI: 10.1016/j.pss.2018.01.011]
- Carrer L, Pozzobon R, Sauro F, Castelletti D, Patterson G W and Bruzzone L. 2024. Radar evidence of an accessible cave conduit on the Moon below the Mare Tranquillitatis pit. *Nature Astronomy*, 8(9): 1119-1126 [DOI: 10.1038/s41550-024-02302-y]
- Chappaz L, Sood R, Melosh H J, Howell K C, Blair D M, Milbury C and Zuber M T. 2017. Evidence of large empty lava tubes on the Moon using GRAIL gravity. *Geophysical Research Letters*, 44(1): 105-112 [DOI: 10.1002/2016GL071588]
- Ding C Y, Feng J Q, Zheng L, Dai S, Xing S G, Xiao Y and Su Y. 2015. A review of applications of radar-detection techniques in lunar explorations. *Astronomical Research and Technology*, 12(2): 228-242 (丁春雨, 封剑青, 郑磊, 戴舜, 邢树果, 肖媛, 苏彦). 2015. 雷达探测技术在探月中的应用. *天文研究与技术*, 12(2): 228-242 [DOI: 10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20141113.005]
- Ding C Y, Xiao Z Y and Su Y. 2021. A potential subsurface cavity in the continuous ejecta deposits of the Ziwei crater discovered by the Chang'e-3 mission. *Earth, Planets and Space*, 73(1): 53 [DOI: 10.1186/s40623-021-01359-7]
- Donini E, Carrer L, Gerekos C, Bruzzone L and Bovolo F. 2022. An unsupervised fuzzy system for the automatic detection of candidate lava tubes in radar sounder data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4501319 [DOI: 10.1109/TGRS.2021.3062753]
- Du X, Kang Z Z, Hu T, Xiao M and Li M. 2025. Application of topography analysis based on multi-source data in the construction of the International Lunar Research Station. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(2): 442-459 (杜省, 康志忠, 胡腾, 肖萌, 李默). 2025. 基于多源数据的形貌分析在国际月球科研站建设中的应用. *遥感学报*, 29(2): 42-459 [DOI: 10.11834/jrs.20233011]
- Esmaili S, Kruse S, Jazayeri S, Whelley P, Bell E, Richardson J, Garry W B and Young K. 2020. Resolution of lava tubes with ground penetrating radar: the TubeX project. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(5): e2019JE006138 [DOI: 10.1029/2019JE006138]
- Fang G Y, Zhou B, Ji Y C, Zhang Q Y, Shen S X, Li Y X, Guan H F, Tang C J, Gao Y Z, Lu W, Ye S B, Han H D, Zheng J and Wang S Z. 2014. Lunar penetrating radar onboard the Chang'e-3 mission. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 14(12): 1607-1622 [DOI: 10.1088/1674-4527/14/12/009]
- Feng Y J, Pan P Z, Tang X H, Wang Z F, Li Y X and Hussain A. 2024. A comprehensive review of lunar lava tube base construction and field research on a potential Earth test site. *International Journal of Mining Science and Technology*, 34(9): 1201-1216 [DOI: 10.1016/j.ijmst.2024.06.003]
- Ghent R R, Campbell B A, Hawke B R and Campbell D B. 2008. Earth-based radar data reveal extended deposits of the Moon's Orientale basin. *Geology*, 36(5): 343-346 [DOI: 10.1130/G24325A.1]
- Ghent R R, Carter L M, Bandfield J L, Tai Udovicic C J and Campbell B A. 2016. Lunar crater ejecta: physical properties revealed by radar and thermal infrared observations. *Icarus*, 273: 182-195 [DOI: 10.1016/j.icarus.2015.12.014]
- Grimm R E. 2018. New analysis of the Apollo 17 surface electrical properties experiment. *Icarus*, 314: 389-399 [DOI: 10.1016/j.icarus.2018.06.007]
- Haruyama J, Hioki K, Shirao M, Morota T, Hiesinger H, Van Der Bogert C H, Miyamoto H, Iwasaki A, Yokota Y, Ohtake M, Matsunaga T, Hara S, Nakanotani S and Pieters C M. 2009. Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras. *Geophysical Research Letters*, 36(21): L21206 [DOI: 10.1029/2009GL040635]
- Haruyama J, Kaku T, Shinoda R, Miyake W, Kumamoto A, Ishiyama K, Nishibori T, Yamamoto K, Kurosawa K, Suzuki A I, Crites S T, Michikami T, Yokota Y, Sood R, Melosh H J, Chappaz L and Howell K C. 2017. Detection of lunar lava tubes by Lunar Radar Sounder onboard SELENE (Kaguya)//Lunar and Planetary Science XLVIII. 1711.
- Hayne P O, Bandfield J L, Siegler M A, Vasavada A R, Ghent R R, Williams J P, Greenhagen B T, Aharonson O, Elder C M, Lucey P G and Paige D A. 2017. Global regolith thermophysical properties of the Moon from the diviner lunar radiometer experiment. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 122(12): 2371-2400 [DOI: 10.1002/2017JE005387]
- Horvath T, Hayne P O and Paige D A. 2022. Thermal and illumination environments of lunar pits and caves: models and observations from the diviner lunar radiometer experiment. *Geophysical Research Letters*, 49(14): e2022GL099710 [DOI: 10.1029/2022GL099710]
- Hulme G. 1974. The interpretation of lava flow morphology. *Geophysical Journal International*, 39(2): 361-383 [DOI: 10.1111/j.1365-246X.1974.tb05460.x]
- Hurwitz D M, Head J W and Hiesinger H. 2013. Lunar sinuous rilles: distribution, characteristics, and implications for their origin. *Planetary and Space Science*, 79-80: 1-38 [DOI: 10.1016/j.pss.2012.10.019]
- Kaku T, Haruyama J, Miyake W, Kumamoto A, Ishiyama K, Nishibori T, Yamamoto K, Crites S T, Michikami T, Yokota Y, Sood R, Melosh H J, Chappaz L and Howell K C. 2017. Detection of intact lava tubes at Marius hills on the Moon by SELENE (Kaguya) lunar radar sounder. *Geophysical Research Letters*, 44(20): 10155-10161 [DOI: 10.1002/2017GL074998]
- Kempe S and Werner M S. 2003. The Kuka'iau Cave, Mauna Kea, Hawaii, created by water erosion, a new Hawaiian cave type. *Journal of Cave and Karst Studies*, 65(1): 53-67.
- Kobayashi T, Kim J H, Lee S R and Song K Y. 2021. Nadir detection of lunar lava tube by Kaguya Lunar Radar Sounder. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(9): 7395-7418 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3033033]
- Léveillé R J and Datta S. 2010. Lava tubes and basaltic caves as astrobiological targets on Earth and Mars: a review. *Planetary and Space Science*, 58(4): 592-598 [DOI: 10.1016/j.pss.2009.06.004]
- Li C L, Liu J J, Ren X, Zuo W, Tan X, Wen W B, Li H, Mu L L, Su Y,

- Zhang H B, Yan J and Ouyang Z Y. 2015. The Chang'e 3 mission overview. *Space Science Reviews*, 190(1/4): 85-101 [DOI: 10.1007/s11214-014-0134-7]
- Li M Y, Wang Y H, Yin H L, Yue X A, Ding F, Zeng L Q, Zhao B Q, Wei Y and Ning B Q. 2021. A mosaic imaging study of the northern and southern hemispheres of the nearside of the Moon based on the Sanya Incoherent Scatter Radar. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(4): 450-458 (李鸣远, 王永辉, 尹翰林, 乐新安, 丁锋, 曾令旗, 赵必强, 魏勇, 宁百齐). 2021. 基于三亚非相干散射雷达的月球正面南北半球拼接成像研究. *地球与行星物理论评*, 52(4): 450-458 [DOI: 10.19975/j.dqyxx.2021-014]
- Liu S J, Santos L A, Ning S, Zhou F, Liu H and Hu X Y. 2023. Pattern analyses of lunar penetrating radar images at Chang'e-3, 4, and 5 landing sites: a new insight into the evolution of lunar regolith. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 128(6): e2022JE007675 [DOI: 10.1029/2022JE007675]
- Miyamoto H, Haruyama J, Kobayashi T, Suzuki K, Okada T, Nishibori T, Showman A P, Lorenz R, Mogi K, Crown D A, Rodriguez J A P, Rokugawa S, Tokunaga T and Masumoto K. 2005. Mapping the structure and depth of lava tubes using ground penetrating radar. *Geophysical Research Letters*, 32(21): L21316 [DOI: 10.1029/2005GL024159]
- Morgan G A, Campbell B A, Campbell D B and Hawke B R. 2016. Investigating the stratigraphy of Mare Imbrium flow emplacement with Earth-based radar. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 121(8): 1498-1513 [DOI: 10.1002/2016JE005041]
- Neal A. 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, 66(3/4): 261-330 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2004.01.004]
- Neish C D, Madden J, Carter L M, Hawke B R, Giguere T, Bray V J, Osinski G R and Cahill J T S. 2014. Global distribution of lunar impact melt flows. *Icarus*, 239: 105-117 [DOI: 10.1016/j.icarus.2014.05.049]
- Nord M E, Ainsworth T L, Lee J S and Stacy N J S. 2009. Comparison of compact polarimetric synthetic aperture radar modes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1): 174-188 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.2000925]
- Nozette S, Lichtenberg C L, Spudis P, Bonner R, Ort W, Malaret E, Robinson M and Shoemaker E M. 1996. The clementine bistatic radar experiment. *Science*, 274(5292): 1495-1498 [DOI: 10.1126/science.274.5292.1495]
- Nozette S, Spudis P, Bussey B, Jensen R, Raney K, Winters H, Lichtenberg C L, Marinelli W, Crusan J, Gates M and Robinson M. 2010. The lunar reconnaissance orbiter miniature radio frequency (Mini-RF) technology demonstration. *Space Science Reviews*, 150(1/4): 285-302 [DOI: 10.1007/s11214-009-9607-5]
- Ono T, Kumamoto A, Kasahara Y, Yamaguchi Y, Yamaji A, Kobayashi T, Oshigami S, Nakagawa H, Goto Y, Hashimoto K, Omura Y, Imachi T, Matsumoto H and Oya H. 2010. The Lunar Radar Sounder (LRS) onboard the KAGUYA (SELENE) spacecraft. *Space Science Reviews*, 154(1/4): 145-192 [DOI: 10.1007/s11214-010-9673-8]
- Ono T, Kumamoto A, Nakagawa H, Yamaguchi Y, Oshigami S, Yamaji A, Kobayashi T, Kasahara Y and Oya H. 2009. Lunar radar sounder observations of subsurface layers under the nearside Maria of the Moon. *Science*, 323(5916): 909-912 [DOI: 10.1126/science.1165988]
- Ono T, Kumamoto A, Yamaguchi Y, Yamaji A, Kobayashi T, Kasahara Y and Oya H. 2008. Instrumentation and observation target of the Lunar Radar Sounder (LRS) experiment on-board the SELENE spacecraft. *Earth, Planets and Space*, 60(4): 321-332 [DOI: 10.1186/BF03352797]
- Ono T and Oya H. 2000. Lunar Radar Sounder (LRS) experiment on-board the SELENE spacecraft. *Earth, Planets and Space*, 52(9): 629-637 [DOI: 10.1186/BF03351671]
- Oshigami S, Okuno S, Yamaguchi Y, Ohtake M, Haruyama J, Kobayashi T, Kumamoto A and Ono T. 2012. The layered structure of lunar Maria: identification of the HF-radar reflector in Mare Serenitatis using multiband optical images. *Icarus*, 218(1): 506-512 [DOI: 10.1016/j.icarus.2011.12.026]
- Park B, Kim J, Lee J, Kang M S and An Y K. 2018. Underground object classification for urban roads using instantaneous phase analysis of ground-penetrating radar (GPR) data. *Remote Sensing*, 10(9): 1417 [DOI: 10.3390/rs10091417]
- Pei Z Y, Liu J Z, Wang Q, Kang Y, Zou Y L, Zhang H, Zhang Y H, He H Y, Wang Q, Yang R H, Wang W and Ma J N. 2020. Overview of lunar exploration and International Lunar Research Station. *Chinese Science Bulletin*, 65(24): 2577-2586 (裴照宇, 刘继忠, 王倩, 康焱, 邹永廖, 张焯, 张玉花, 贺怀宇, 王琮, 杨瑞洪, 王伟, 马继楠). 2020. 月球探测进展与国际月球科研站. *科学通报*, 65(24): 2577-2586 [DOI: 10.1360/TB-2020-0582]
- Pommerol A, Kofman W, Audouard J, Grima C, Beck P, Mouginot J, Herique A, Kumamoto A, Kobayashi T and Ono T. 2010. Detectability of subsurface interfaces in lunar Maria by the LRS/SELENE sounding radar: influence of mineralogical composition. *Geophysical Research Letters*, 37(3): L03201 [DOI: 10.1029/2009GL041681]
- Porcello L J, Jordan R L, Zelenka J S, Adams G F, Phillips R J, Brown W E, Ward S H and Jackson P L. 1974. The Apollo lunar sounder radar system. *Proceedings of the IEEE*, 62(6): 769-783 [DOI: 10.1109/PROC.1974.9517]
- Putrevu D, Das A, Vachhani J G, Trivedi S and Misra T. 2016. Chandrayaan-2 dual-frequency SAR: further investigation into lunar water and regolith. *Advances in Space Research*, 57(2): 627-646 [DOI: 10.1016/j.asr.2015.10.029]
- Qiu X H and Ding C Y. 2023. Radar observation of the lava tubes on the Moon and Mars. *Remote Sensing*, 15(11): 2850 [DOI: 10.3390/rs15112850]
- Raney R K, Cahill J T S, Patterson G W and Bussey D B J. 2012. The *m-chi* decomposition of hybrid dual-polarimetric radar data with application to lunar craters. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 117(E12): E00H21 [DOI: 10.1029/2011JE003986]
- Raney R K, Spudis P D, Bussey B, Crusan J, Jensen J R, Marinelli W, McKerracher P, Neish C, Palsetia M, Schulze R, Sequeira H B

- and Winters H. 2011. The lunar Mini-RF radars: hybrid polarimetric architecture and initial results. *Proceedings of the IEEE*, 99(5): 808-823 [DOI: 10.1109/JPROC.2010.2084970]
- Rapp D. 2006. Radiation effects and shielding requirements in human missions to the Moon and Mars. *Mars*, 2: 46-71 [DOI: 10.1555/mars.2006.0004]
- Robinson M S, Ashley J W, Boyd A K, Wagner R V, Speyerer E J, Hawke B R, Hiesinger H and Van Der Bogert C H. 2012. Confirmation of sublunarean voids and thin layering in mare deposits. *Planetary and Space Science*, 69(1): 18-27 [DOI: 10.1016/j.pss.2012.05.008]
- Sharpe B L and Schrank D G. 2003. Malapert mountain: gateway to the Moon. *Advances in Space Research*, 31(11): 2467-2472 [DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00535-0]
- She X Y, Wang J, Huang J, Zhao J N, Zhao J W and Xiao L. 2024. Research status of lava tube exploration in the solar system. *Journal of Deep Space Exploration*, 11(4): 313-327 (余星阳, 王江, 黄俊, 赵健楠, 赵佳伟, 肖龙. 2024. 太阳系天体熔岩管探测研究现状. *深空探测学报(中英文)*, 11(4): 313-327) [DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230163]
- Slade M A, Benner L A M and Silva A. 2011. Goldstone solar system radar observatory: earth-based planetary mission support and unique science results. *Proceedings of the IEEE*, 99(5): 757-769 [DOI: 10.1109/JPROC.2010.2081650]
- Spudis P D, Bussey D B J, Baloga S M, Butler B J, Carl D, Carter L M, Chakraborty M, Elphic R C, Gillis-Davis J J, Goswami J N, Heggy E, Hillyard M, Jensen R, Kirk R L, LaVallee D, McKerracher P, Neish C D, Nozette S, Nylund S, Palsetia M, Patterson W, Robinson M S, Raney R K, Schulze R C, Sequeira H, Skura J, Thompson T W, Thomson B J, Ustinov E A and Winters H L. 2010. Initial results for the North Pole of the Moon from Mini-SAR, Chandrayaan-1 mission. *Geophysical Research Letters*, 37(6): L06204 [DOI: 10.1029/2009GL042259]
- Stern R J, Gerya T and Tackley P J. 2018. Stagnant lid tectonics: perspectives from silicate planets, dwarf planets, large moons, and large asteroids. *Geoscience Frontiers*, 9(1): 103-119 [DOI: 10.1016/j.gsf.2017.06.004]
- Sun J, Yang S, Zhou F, Ding Z H, Liu L, Cao J F, Han S T and Ping J S. 2022. The status of Earth-based radar astronomical observations of the Moon in China. *Astronomical Research and Technology*, 19(1): 29-40 (孙靖, 杨嵩, 周峰, 丁宗华, 刘磊, 曹建峰, 韩松涛, 平劲松. 2022. 我国地基雷达观测月球的现状和研究进展. *天文研究与技术*, 19(1): 29-40) [DOI: 10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20210331.006]
- Thompson T W, Campbell B A and Bussey D B J. 2016. 50 years of Arecibo lunar radar mapping. *URSI Radio Science Bulletin*, 2016(357): 23-35 [DOI: 10.23919/URSIRSB.2016.7909801]
- Wagner R V and Robinson M S. 2014. Distribution, formation mechanisms, and significance of lunar pits. *Icarus*, 237: 52-60 [DOI: 10.1016/j.icarus.2014.04.002]
- Wagner R V and Robinson M S. 2022. Lunar pit morphology: implications for exploration. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127(8): e2022JE007328 [DOI: 10.1029/2022JE007328]
- Wang B W, Zhang Q W L, Chen Y, Zhao W H, Liu Y, Tang G Q, Ma H X, Su B, Hui H J, Delano J W, Wu F Y, Li X H, He Y Y and Li Q L. 2024a. Returned samples indicate volcanism on the Moon 120 million years ago. *Science*, 385(6713): 1077-1080 [DOI: 10.1126/science.adk6635]
- Wang C, Jia Y Z, Xue C B, Lin Y T, Liu J Z, Fu X H, Xu L, Huang Y, Zhao Y F, Xu Y G, Gao R, Wei Y, Tang Y H, Yu D Y and Zou Y L. 2024b. Scientific objectives and payload configuration of the Chang'e-7 mission. *National Science Review*, 11(2): nwad329 [DOI: 10.1093/nsr/nwad329]
- Wang R G, Su Y, Hong T S, Dai S and Liu C D. 2020. A review of application of surface penetrating radar in the Moon and deep-space exploration. *Astronomical Research and Technology*, 17(4): 492-512 (王瑞刚, 苏彦, 洪天晟, 戴舜, 刘晨迪. 2020. 表层穿透雷达在月球和深空探测中的应用. *天文研究与技术*, 17(4): 492-512) [DOI: 10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20200409.001]
- Wang R G, Xia S Z, Jin S P, Su Y and Wang Z T. 2024. A review of Earth-based radar imaging of the Moon. *Radio Engineering*, 54(7): 1749-1759 (王瑞刚, 夏双志, 金松坡, 苏彦, 王紫婷. 2024. 基于地基雷达的月球成像综述. *无线电工程*, 54(7): 1749-1759) [DOI: 10.3969/j.issn.1003-3106.2024.07.018]
- Wilcoski A X, Hayne P O and Elder C M. 2023. Thermal environments and volatile stability within lunar pits and caves. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 128(7): e2023JE007758 [DOI: 10.1029/2023JE007758]
- Xiao L, Huang J, Zhao J W and Zhao J N. 2018. Significance and preliminary proposal for exploring the lunar lava tubes. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica and Astronomica*, 48(11): 119602 (肖龙, 黄俊, 赵佳伟, 赵健楠. 2018. 月面熔岩管洞穴探测的意义与初步设想. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 48(11): 119602) [DOI: 10.1360/SSPMA2018-00025]
- Xiao L, Zhu P M, Fang G Y, Xiao Z Y, Zou Y L, Zhao J N, Zhao N, Yuan Y F, Qiao L, Zhang X P, Zhang H, Wang J, Huang J, Huang Q, He Q, Zhou B, Ji Y C, Zhang Q Y, Shen S X, Li Y X and Gao Y Z. 2015. A young multilayered terrane of the northern Mare Imbrium revealed by Chang'e-3 mission. *Science*, 347(6227): 1226-1229 [DOI: 10.1126/science.1259866]
- Xu Y, Chen R, Wong H, Meng X D, Chen Y P, Zhang L, Zhang J and Xiao L. 2024. Analog study of ground-penetrating radar technology for lava tube detection. *Journal of Deep Space Exploration*, 11(4): 365-373 (徐懿, 陈锐, 黄汉钧, 孟新栋, 陈一平, 张领, 张骏, 肖龙. 2024. 探地雷达对天体熔岩管探测技术类比研究. *深空探测学报(中英文)*, 11(4): 365-373) [DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230138]
- Zhang F, Head J W, Wöhler C, Basilevsky A T, Wilson L, Xie M G, Bugliolacchi R, Wilhelm T, Althoff S and Zou Y L. 2021. The lunar mare ring-moat dome structure (RMDS) age conundrum: contemporaneous with Imbrian-aged host lava flows or emplaced in the Copernican? *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126(8): e2021JE006880 [DOI: 10.1029/2021JE006880]
- Zheng Y C, Zou Y L and Fu X H. 2011. Summary of SELENE lunar

- mission: scientific instruments and their results. *Spacecraft Engineering*, 20(3): 108-119 (郑永春, 邹永廖, 付晓辉. 2011. 月亮女神探月计划的有效载荷与科学探测综述. *航天器工程*, 20(3): 108-119) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2011.03.018]
- Zhou H Q, Feng X, Dong Z J, Ding C Y, Zhang L, Liu C and Liang W J. 2025. New insights into lava tube formation: an asymmetrical and deep case observed by Yutu-2 Radar at Lunar Farside. *The Astrophysical Journal*, 985(2): 196 [DOI: 10.3847/1538-4357/adcf18]
- Zhu K, Yang M, Yan X Y, Li W K, Feng W and Zhong M. 2024. GRAIL gravity gradients evidence for a potential lava tube at Marius Hills on the Moon. *Icarus*, 408: 115814 [DOI: 10.1016/j.icarus.2023.115814]
- Zieth R, Seiferlin K and Hiesinger H. 2009. Duration and extent of lunar volcanism: comparison of 3D convection models to mare basalt ages. *Planetary and Space Science*, 57(7): 784-796 [DOI: 10.1016/j.pss.2009.02.002]
- Zuber M T, Smith D E, Watkins M M, Asmar S W, Konopliv A S, Lemoine F G, Melosh H J, Neumann G A, Phillips R J, Solomon S C, Wieczorek M A, Williams J G, Goossens S J, Kruizinga G, Mazarico E, Park R S and Yuan D N. 2013. Gravity field of the Moon from the gravity recovery and interior laboratory (GRAIL) mission. *Science*, 339(6120): 668-671 [DOI: 10.1126/science.1231507]

## The progress and prospects of radar detection research on Lunar lava tubes

GAO Qiangshan<sup>1,2</sup>, DUAN Jitong<sup>3</sup>, LIU Jia<sup>4</sup>, BO Zheng<sup>5</sup>, ZHANG Feng<sup>1</sup>

1. State key laboratory of solar activity and space weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. Shaanxi Geology Mining 908 Environmental Geology Limited Company, Xi'an 710600, China;
3. Key Laboratory of Technology in Geo-Spatial Information Processing and Application Systems, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100194, China;
4. Key Laboratory of Planetary Science and Frontier Technology, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
5. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

**Abstract:** Lava tubes are one of the important sites for insights into the Moon's internal geological features, volcanic eruptions, and lunar soil formation history. Due to stable internal temperature, radiation shielding capabilities, and ability to avoid impacts from small celestial bodies, lava tubes are ideal locations for future human lunar base construction. The Moon is the closest natural celestial body to Earth, and lunar lava tubes are likely to become one of the preferred targets for human on-site exploration and base construction. Radar is one of the key means to detect and identify lava tubes. Summarizing the research results of radar data on lunar lava tubes has significant scientific and engineering meaning. Based on the radar imaging results, the present study reviews the echo features of lunar lava tubes from two aspects: Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging for lunar surface and radar imaging for subsurface internal structure. Among them, SAR is mainly conducive to identifying lunar pits formed by the collapse of the top of lava tubes, where SAR image exhibits specific backscattering characteristics due to the differences of pit degradation degree; the key to the internal structure imaging radar identifying hidden lava tubes is the phase inversion characteristics of the echoes from the cave top and bottom interfaces. Based on these, this paper proposes four prospects for future scientific and engineering-related research on lunar lava tubes. It is hoped that the present content will provide scientific basis and reference for related work such as sites selection, scientific exploration, and utilization of subsurface space for lunar bases in the planning of future deep space exploration missions.

**Key words:** Moon, lava tube, skylight, Earth-based radar, orbiter radar, rover radar, backscatter, phase inversion

**Supported by** Open Fund of the Deep Space Exploration Laboratory (No. NKDSEL2024002); National Natural Science Foundation of China (No. 12273044, 62495034, 6217012512)