

# 探地雷达对天体熔岩管探测技术类比研究

徐懿<sup>1</sup>, 陈锐<sup>1</sup>, 黄汉钧<sup>1</sup>, 孟新栋<sup>1</sup>, 陈一平<sup>2</sup>, 张领<sup>1,3</sup>, 张骏<sup>4</sup>, 肖龙<sup>4</sup>

(1. 澳门科技大学月球与行星科学国家重点实验室, 澳门 999078; 2. 中山大学测绘科学与技术学院, 珠海 519082;  
3. 中山大学地球科学与工程学院, 广州 510275; 4. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074)

**摘要:** 熔岩管是建立地外天体基地首选地之一。为验证探地雷达对地外天体熔岩管探测的可行性, 使用400 MHz探地雷达对海南海口石山火山群中的七十二洞和卧龙洞进行熔岩管探测技术类比研究。结果显示: 管道上壁距离地面小于等于2 m时, 雷达可清晰显示上界面; 当熔岩管上、下界面高度小于3 m时, 雷达图可观察到上、下分界面所在位置。使用遗传算法进行雷达数据反演, 获得管壁介电常数, 并与深度法和样品测量结果对比验证了该反演算法的可靠性。通过分析发现, 样品孔隙度与介电常数存在关联性。探地雷达可有效测量地下熔岩管的内部空间信息, 并用于未来月球基地建设的准备工作。

**关键词:** 熔岩管; 探地雷达; 月球; 就位探测; 类比研究

**中图分类号:** P691

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2024)04-0365-09

**DOI:** 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230138

**引用格式:** 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.

**Reference format:** XU Y, CHEN R, WONG H K, et al. Analog study of ground-penetrating radar technology for lava tube detection[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(4): 365-373.

## 引言

建立月球科研站是人类在地外星体生存和进行资源开发的第一步, 也是中国探月四期的重要任务之一<sup>[1]</sup>, 同时被纳入多国的深空探测计划中。例如由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)主导的“阿尔忒弥斯计划”(Artemis Program), 其主要目标之一就是在2030年前在月球建立一个可持续的、长期存在的科研基地<sup>[2]</sup>。包括欧洲航天局(European Space Agency, ESA)、日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)等国家机构以及“太空技术探索”(SpaceX)等商业公司纷纷参与了这一计划。熔岩管内部的温度相对恒定<sup>[3]</sup>, 并且可以隔绝太空辐射<sup>[4]</sup>, 被认为是理想的月球基地选址<sup>[5]</sup>。

熔岩管是由高温岩浆在地表流动时的特殊过程所形成的。玄武质岩浆表面由于快速冷却而逐渐凝固, 形成了一个外部保护壳, 具有较好的绝热特性。从而使得管道内部的岩浆能以相对较慢的速度降温(沿流向大约每千米下降1℃), 在数百甚至上千千米的距离仍保持高温状态, 直到岩浆源头停止供给岩浆。最

终, 这个过程导致管道内部形成一个中空的结构<sup>[4,6-8]</sup>。熔岩管表面有时会发生坍塌现象, 这些坍塌形成的洞被称为“天窗”(图1)。宇航员可以借由“天窗”进入熔岩管内部。

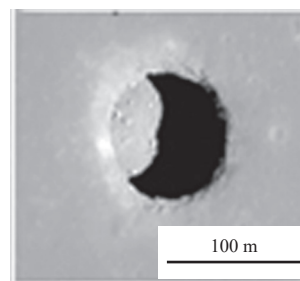


图1 月球静海“天窗”

Fig. 1 “Skylight” on the mare tranquillitatis<sup>[8]</sup>

目前主要通过各种遥感手段对月球的熔岩管开展探测研究。早期研究使用“月球轨道器”(Lunar Orbiter)和“阿波罗号”(Apollo)的照片, 寻找“天窗”的分布, 推测蜿蜒的熔岩管的存在<sup>[9]</sup>。之后, “月球勘测轨道飞行器”(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)搭载的相机进一步更新了月球可能存在的熔岩管分布。科学家们基于月球勘测轨道器窄角相机(LROC

NAC, 0.5 m/pixel) 数据准确地识别出天窗地貌<sup>[10-11]</sup>。到目前为止, 在月球上发现了300多个疑似天窗地貌<sup>[12]</sup>。“月船1号”(Chandrayaan-1) 携带的地形测绘相机(Terrain Mapping Camera, TMC) 生成的数字地形模型(Digital Terrain Model, DTM) 也发现了月球风暴洋区域的熔岩管。但是, 仅从影像数据只能获取月表的天窗分布, 对月球熔岩管的规模、走向、深度均无法判断。因此, 需要重力数据和轨道器雷达等能显示地下空间的研究手段<sup>[13]</sup>。

重力异常分析是一种广泛使用来探测行星地下结构的地球物理勘探技术。在距离恒定的条件下, 重力和质量成正比, 而存在熔岩管的地块, 地下存在较大的质量亏空。使用GRAIL数据, 在排除地形、自转和潮汐对重力的影响后, 可根据重力异常来判断月球次表层的不同地层厚度差异和空洞<sup>[14-15]</sup>。该数据显示, 月球上可能存在规模几十千米的熔岩管, 且埋深与地球上较深埋深的熔岩管类似<sup>[16]</sup>。但数据精度不高, 为百米级, 且依赖熔岩管的走向信息<sup>[15]</sup>。

Haruyama等<sup>[17]</sup>根据“月亮女神号”(Kaguya) 飞船上的地形相机(Terrain Camera, TC) 数据, 认为月球地下可能存在熔岩管。Kaku等<sup>[16]</sup>通过分析月球雷达测深仪(Lunar Radar Sounder, LRS) 的回波数据, 发现了熔岩管存在的疑似信号。但是, LRS深度分辨率一般较低, 容易受到表面杂波的影响, 且熔岩管的玄武岩上壁会呈现透镜效应, 降低熔岩管对雷达波的回波强度。Kobayashi等<sup>[18]</sup>对目标区域进行二维电磁波仿真, 认为该熔岩管疑似信号是表面杂波的聚合而导致。

为了克服行星遥感数据的限制, 国内外地质学家通过对地球熔岩管进行就位研究, 获得了大量的科学成果。因此, 对地球上熔岩管的类比研究是了解月球熔岩管的有效科学方式。其中, 美国和日本均使用探地雷达对境内的熔岩管进行了探测。但是, 由于使用的探地雷达分辨率的限制(PulseEKKO 100 MHz天线, 垂向分辨率约为0.75 m, GSSI SIR 2 200 MHz, 垂向分辨率约为0.375 m), 探测结果显示上、下界面混杂在一个反射波内, 难以区分, 且熔岩管上壁的反射波形态不清晰<sup>[19-20]</sup>。

基于地球熔岩管的比较行星学研究可以为探索地外熔岩管的形态学特征、结构强度等提供重要线索。中国分布了大量的第四纪玄武质火山岩, 前人针对其熔岩地貌、岩浆成因及演化过程开展了大量的研究, 但对其中的熔岩管却关注较少<sup>[21]</sup>。因此, 如何获取高分辨且可靠的熔岩管空间和管壁信息是目前迫切需要

解决的问题。

参考“嫦娥三号”和“嫦娥四号”探月雷达的探测频率, 本文对海口石山火山群地下的熔岩管使用400 MHz探地雷达进行扫描探测, 以获得高分辨率的熔岩管雷达图像。通过深度反演、遗传算法反演、样品检测等手段对玄武岩上壁材料的介电常数进行分析, 并基于雷达图像分析熔岩管是否存在裂隙等缺陷。将激光雷达管道上壁扫描结果与探地雷达结果进行对比, 分析了探地雷达对熔岩管探测的优势, 并对未来熔岩管探测研究提出了展望。

## 1 熔岩管探测

### 1.1 研究目标

在建立月球基地之前, 需要探测熔岩管的地下空间展布和管壁稳定性情况。探地雷达具有穿透优势可以显示地下结构和物性。根据载荷的搭载平台可以分为轨道器雷达和着陆器雷达, 月球雷达测深仪(Lunar Radar Sounder, LRS) 是一种中心频率为5 MHz的低频轨道器雷达<sup>[22]</sup>, 其观测频率带宽为2 MHz, 在真空中的深度分辨率为75 m, 考虑旁瓣压缩, 其真实深度分辨率约为150 m<sup>[18,23]</sup>。即使使用了合成孔径技术提高分辨率, 也很难完整地观测到完整的熔岩管。而且, 为可靠区分上壁的反射波与地面反射波, 熔岩管的最小埋深为几十米。美国的TubeX项目通过实验和仿真验证了发现在雷达的波长大于等于熔岩管高度时, 无法区分出熔岩管的上、下界面<sup>[19]</sup>。轨道器雷达还存在地表杂波干扰的情况<sup>[24]</sup>, 为提高雷达的分辨率和减少表面杂波的影响, 可以利用车载探地雷达执行就位探测熔岩管任务。

多个团队在地球上基于探地雷达设备进行了熔岩管的研究, 研究结果主要用于判断地面雷达是否可以探测到熔岩管结构<sup>[19-20]</sup>。对于月球基地的选址, 除了判断熔岩管的位置外, 熔岩管是否存在裂隙等缺陷, 玄武岩上壁的曲率是否满足工程建设的强度需求, 玄武岩管道的孔隙率(常通过介电常数反演) 是否过大而造成材料强度的下降, 这些问题对基地的工程安全性至关重要。

本文使用高分辨率探地雷达对海南海口的石山火山群熔岩管进行探测, 用处理后的雷达图像观察熔岩管上壁是否存在超过0.4 m宽度的裂隙<sup>[25]</sup>。同时, 得到清晰的上壁形貌, 由此判断曲率是否达标; 进而使用深度法、遗传算法和样品直接测量的方法, 约束并对比了熔岩管上壁的玄武岩的介电常数, 以判断该区域的玄武岩的介电常数在合理范围内。遗传算法属于非

线性反演方法,具有较强的鲁棒性,对初始解不敏感等优点。同时,不需要钻孔和测井数据进行反演,比较符合行星探测中有限数据采集的条件。

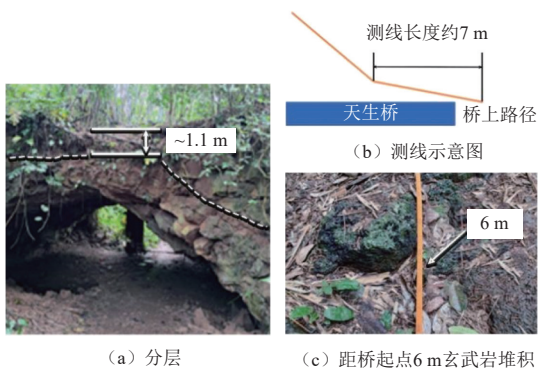
## 1.2 目标熔岩管

海口石山火山群是国内为数不多的全新世火山喷发活动的休眠火山群之一<sup>[21]</sup>。对海口熔岩管的探测内容包括外部环境和内部环境考察,内部结构、物质组成等多个方面的探测。本文使用了探地雷达对熔岩管的走向、深度,上壁形貌及组成玄武岩的介电常数展开研究。

本次实验的主要观测对象为中国海南省海口市石山镇的荣堂七十二洞天生桥(19°56'35"N, 110°12'27"E)和卧龙洞(19°54'31"N, 110°15'47"E)。其中,七十二洞天生桥是海口市石山火山群区域内大型熔岩管系统中一段呈开放式的小型管道,即由两个天窗之间的残留洞顶构成的天生桥。本次实验不仅采集了七十二洞和卧龙洞的样品,还在靠近七十二洞的仙人洞处进行了采样,所采样品均为熔岩管内部自然坠落的石块。但因仙人洞不具备扫描条件,未进行雷达实验。

七十二洞天生桥主体均由灰黑色玄武岩组成(图2(a)),洞顶沿节理崩落的岩块气孔多寡程度不一,孔隙度存在差别,说明天生桥位置的玄武岩介电常数存在微小差异。七十二洞天生桥顶部为山林小径,但路径不完全和天生桥走向平行(图2(b))。天生桥总长16 m左右。在距离起点6 m处存在大量玄武岩堆积(图2(c))。天生桥顶部存在一层堆积层,如图中虚线所示,该堆积层厚度约为1.1 m。

由于天生桥结构完全裸露,且桥上存在路径供探地雷达测量,在桥下可获得崩落的玄武岩石块样品,探测条件优异,因此选择该天生桥作为研究目标之一。



(a) 分层 (b) 测线示意图 (c) 距桥起点6 m玄武岩堆积

图2 荣堂七十二洞天生桥

Fig. 2 Rongtang Seventy-Two Cave nature bridge

卧龙洞主体均由灰黑色玄武岩组成(图3(a)),从路面到顶部最薄处厚度约2 m,洞顶崩落的岩块气孔

多寡程度同样存在差异,其玄武岩石块的介电常数应该也存在差异。“卧龙洞”顶部为水泥铺设的乡间公路,走向恰好与卧龙洞走向垂直,通过探地雷达测量可以完整地反应玄武岩上壁形貌。洞口有村民修建的台阶可供进洞考察,具备激光雷达的扫描条件。可结合激光雷达数据重建的卧龙洞形貌用于判断探地雷达对熔岩管形态探测的可靠性。



(a) 入口处玄武岩厚度



(b) 卧龙洞上方公路测线

图3 卧龙洞

Fig. 3 Wolong Cave

## 2 实验测量设置和数据处理方法

### 2.1 激光雷达扫描

本次使用的激光雷达是由中山大学提供的飞马机器人SLAM100手持激光雷达扫描仪。携带激光雷达扫描仪进入洞中采集卧龙洞整体的点云数据,得到卧龙洞的三维结构模型。手持三维激光扫描仪的数据处理采用该仪器配套的数据后处理软件进行。首先进行点云数据的解算,用以去除畸变,之后可输出拼接后的完整点云数据。进一步去噪和可视化可以得到最终的地理模型。激光雷达数据处理流程如图4所示。

### 2.2 雷达数据采集

本次探测采用的探地雷达是美国劳雷公司(GSSI)最新的探地雷达系统SIR4000。

对荣堂七十二洞天生桥使用了400 MHz的探地雷达,探测天生桥的内部情况以及观察天生桥顶部下方与空气介面所产生的反射波,结合崩落岩块的样本,推算天生桥内不同厚度处的介电常数。以干燥玄武岩为例,400 MHz天线的有效探测深度在3 m左右,即熔岩管顶壁距离地面3 m以内即可被检测。值得注意的是,400 MHz雷达在干燥的月球环境下探测深度可以

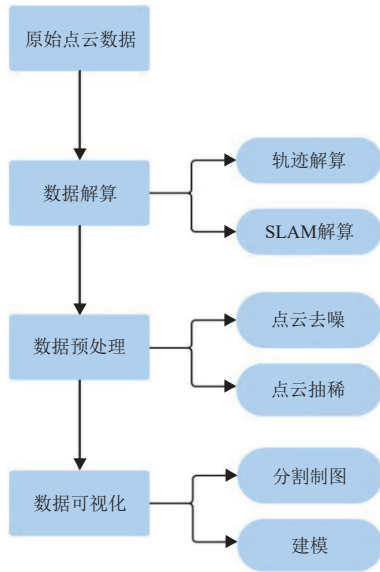


图4 激光雷达数据处理流程图

Fig. 4 LiDAR data processing flow chart

达到50 m以上<sup>[26]</sup>, 因此该频率的探地雷达可满足熔岩管的探测要求。同时, 400 MHz天线的空间垂向分辨率为0.187 5 m, 大多数情况可在主机端直接预览到地下结构体, 对数据的进一步筛选和处理提供帮助。

将探地雷达沿天生桥的起点到顶部进行连续测量, 测线全长约7 m, 测线6 m处开始出现玄武岩露头与大量堆积。

在卧龙洞区域, 使用400 MHz探地雷达沿乡村公路进行连续测量 (图3 (b)), 测线全长约20 m, 雷达给定的参数与七十二洞测量时相同, 调节时延使地表回波清晰、完整。根据测量的熔岩管深度, 雷达可以探测到管道上壁。

### 2.3 雷达数据处理

在获得探地雷达数据后, 对雷达数据进行处理。实验数据处理过程为: 数据编辑和距离归一化、时间零点调整、背景去除、滤波、增益调整, 以及最终的数据呈现 (图5)。

对数据进行去重复和距离归一化处理<sup>[27]</sup>, 识别出每道信号首波波峰位置, 去除地形影响<sup>[28]</sup>。之后采用去除平均道的方法进行水平方向上的背景去除, 即扫描数据减去矩阵数据中所有道数据的均值<sup>[29-30]</sup>。为进一步去除噪声, 提高数据信噪比, 特别是去除雷达数据中高频和低频噪声, 采用带通滤波器对数据进行滤波处理, 即对所采集400 MHz数据进行高通低通分别为100 MHz和800 MHz的FIR滤波处理。

由于电磁波在穿透地层过程中会发生损耗, 为解决数据末端信号较弱始端较强的问题, 需要对信号进行增益调整。

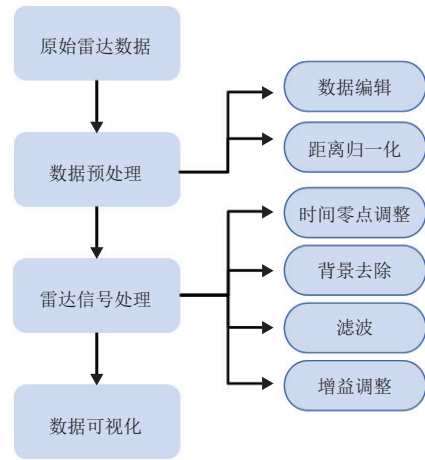


图5 探地雷达数据处理流程图

Fig. 5 Ground penetrating radar data processing flow chart

### 2.4 介电常数反演

对于介电常数的反演, 本文使用了遗传算法。该方法需产生大量仿真数据用于遗传算法反演地下物质的介电常数。本文使用了开源电磁波时域差分模拟软件gprMax (v3.16) 进行正演分析<sup>[31]</sup> (<https://doi.org/10.1016/j.cpc.2016.08.020>)。在仿真软件中, 设置了SIR4000雷达系统的400 MHz天线模型, 进一步提高仿真的真实性。在遗传算法的反演过程中需要对不同地下模型和介电常数设置进行多次FDTD正演, 在众多模型中选取比较接近实测信号的模型, 然后比较模型数据与实测数据偏差, 进行迭代, 最后获取最接近实测信号的地下模型。

电磁波在介质中传播的速度会受物质介电常数的影响

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

其中:  $c$ 为真空中光速;  $\epsilon$ 为相对介电常数。

电磁波接收的双程走时为

$$t = \frac{2d}{v} \quad (2)$$

在已知熔岩管深度 $d$ 和双程走时 $t$ 时, 可以通过式(2)计算得到电磁波在介质中的传播速度, 结合式(1)即可计算出物质的相对介电常数。

探地雷达发射的脉冲是一个具有一定时间延续度的子波 $w(t)$ , 引入褶积模型<sup>[32]</sup>, 雷达数据 $x(t)$ 可假设是由 $R_n$ 组成的地下介质反射序列 $r(t)$ 和子波 $w(t)$ 进行褶积的结果。在无噪音环境下, 雷达数据 $x(t)$ 可表达为

$$x(t) = w(t)r(t) \quad (3)$$

其中, 反射系数序列 $r(t)$ 包含多个反射系数。

$$r(t) = \{R_1, R_2, \dots, R_n\} \quad (4)$$

每个反射系数 $R_n$ 由地层介质的介电常数差异所决定。

$$R_n = \frac{\sqrt{\epsilon_n} - \sqrt{\epsilon_{n+1}}}{\sqrt{\epsilon_n} + \sqrt{\epsilon_{n+1}}} \quad (5)$$

Xia等<sup>[33]</sup>在沉积层研究中把Yilmaz等<sup>[34]</sup>的反褶积技术应用到探地雷达数据反演中, 在低电磁损耗的介质中成功得到反射系数序列。但是, 直接使用反褶积技术所得到的是呈波形的反射系数序列<sup>[33]</sup>。为得到稀疏化的反射系数序列, 本文引入遗传算法进行求解<sup>[35]</sup>, 同时反演地层的介电常数和厚度, 计算反射系数序列。为增加算法的稳定性, 本方法采用了实值编码系统<sup>[36]</sup>和自适应进化机制<sup>[37]</sup>。在遗传算法优化中, 使用的目标函数为

$$\psi = \min \left( \sum |x_r(t) - x_s(t)| \right) \quad (6)$$

其中:  $x_r(t)$  为实测波形数据;  $x_s(t)$  为反演拟合波形数据, 此目标函数是要最小化实测和合成波形数据的误差。 $x_s(t)$  由模型 $m$ 所算得的 $r(t)$ 利用式(1)计算, 模型 $m$ 可以表示为

$$m = \{\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n, h_1, h_2, \dots, h_n\} \quad (7)$$

其中:  $\epsilon_n$  为第 $n$ 层的介电常数;  $h_n$  第 $n$ 层的厚度。利用遗传算法优化模型 $m$ 即可得到稀疏化的反射系数序列。反演不同深度地层的介电常数。

为判断算法的正确性, 对采集的样品进行了介电常数测量。每个样品使用接触面的3个不同位置测量, 每个位置测量10次, 取30次测量结果的平均值。之后简单通过排水法和分析天平得到样品密度与介电常数的分布, 确保数据的可靠性。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 熔岩管结构

雷达探测结果如图6所示, 地表反射波出现在5 ns左右, 天生桥顶部下方出现明显反射波, 同时雷达探测结果揭示了探地雷达进行地表探测时熔岩管产生的反射波的振幅与相位特征。

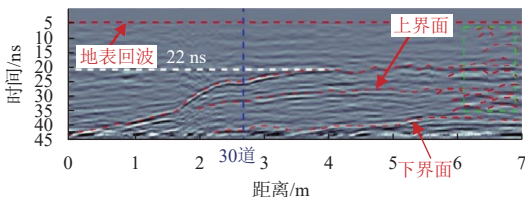


图 6 七十二洞雷达图  
Fig. 6 Seventy-Two Cave radar image

分析顶部反射波发现天生桥内部存在分层, 可能是风化导致。在距离起点2 m (即图6中横坐标2 m处)

的位置可以看到熔岩管上界面的回波。从图7中可以看出, 与日本和美国对熔岩管的探测不同, 在使用频率更高的雷达后, 可以清晰地接收到来自熔岩管上、下边界的回波。在距离起点6 m处, 与实际观测结果相同, 雷达图上绿色框中也呈现出多次散射的信号, 为玄武岩堆积造成。

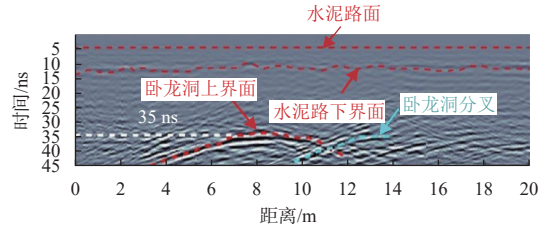


图 7 卧龙洞雷达图  
Fig. 7 Wolong Cave tube radar image

在卧龙洞探测因雷达设定参数与七十二洞探测时类似, 地表回波也出现在5 ns附近(图7), 5~15 ns可能为水泥路面。

#### 3.2 探地雷达与激光雷达结果比较

图8为卧龙洞的原始点云数据, 右侧为卧龙洞入口, 可以看到入口附近存在一条较小的分支管道。图9为处理后的洞口的三维模型数据, 也可以发现除大洞口连接的熔岩管外, 还存在一个较小的熔岩管分叉, 对应于图7中红色和蓝色的两个熔岩管上边界。

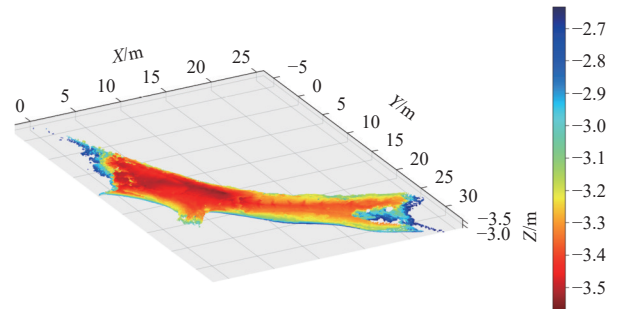


图 8 卧龙洞点云数据  
Fig. 8 Wolong lava tube point cloud data



图 9 处理后的卧龙洞洞口处三维模型  
Fig. 9 The processed 3D model of the entrance of Wolong Cave

#### 3.3 介电常数反演结果

根据实测距离, “七十二洞”天生桥的分层处距离地面约为1.1 m, 由雷达数据可知该点的双程走时约为17 ns (以表面回波为初始时间), 计算可得该处玄武岩介电常数约为5.37。同样, 计算“卧龙洞”上壁玄武

岩的介电常数,  $d$ 为2 m, 双程走时 $t$ 为30 ns, 计算得到的介电常数为5.06。

本次反演的数据使用荣堂“七十二洞”中的天生桥的实测数据, 在水平方向上数据截取于天生桥顶部厚度变化明显的区域(测线方向上2.25~3.5 m), 同时, 截取前50 ns时窗的数据, 这个时窗区域内的雷达波有比较高的信噪比使得可以进行比较有效的反演。从探地雷达的测实数据中可以看出天生桥的顶部下方存在明显反射波, 是雷达波经过岩石-空气界面时的电磁波反射, 界面上方为玄武岩层, 界面下方为空气。

反演结果(图10)大致可看出界面上方玄武岩层的介电常数约为5~8, 符合岩石样本所测得的介电常数数据<sup>[38]</sup>。界面下方的介电常数急剧下降, 符合空气层较小的介电常数。

图11是实测数据第30道的反演波形, 波形反演结果大致上与实测数据匹配, 实测与反演结果的偏差RMS = 0.2。介电常数反演结果亦表示出玄武岩层-空气界面(2.25 m处)出现急剧的下降, 有明显的堆积层-玄武岩层-空气的趋势。

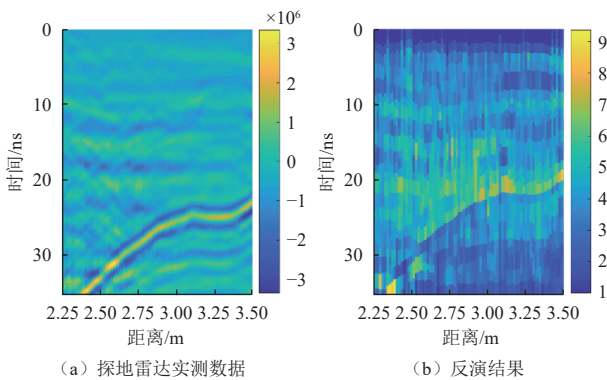


图10 遗传算法反演介电常数剖面图

Fig. 10 Dielectric constant profile inverted by genetic algorithm

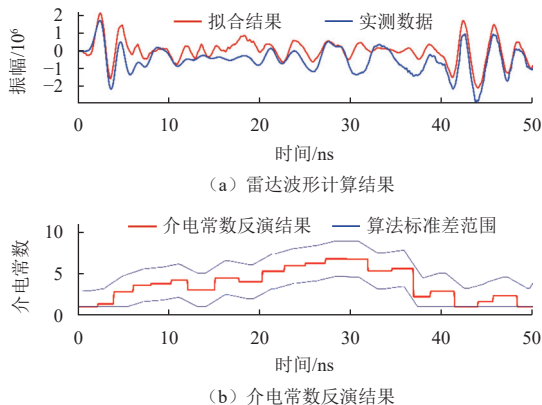


图11 单道雷达数据遗传算法反演结果

Fig. 11 Genetic algorithm inversion results of single-trace radar data

### 3.4 样品介电常数测量结果

样品表面粗糙度会导致介电常数测量误差, 因此, 对样品进行了对样品进行切割、抛光等处理, 尽量减少表面粗糙度的影响, 再进行介电常数测量。使用的测量仪器是KEYSIGHT N1500A型网络分析仪, 扫描频率为500 MHz~50 GHz。

经过切割并对切割面进行抛光后的样品如图12所示, 对玄武岩样品按采集地点进行编号, 肉眼可见不同样品有不同的气孔率。样品密度测量使用了排水法测量样品的体积, 结合分析天平测得的质量后计算样品密度。不同玄武岩样品的密度与介电常数, 记录于表1。可能因为表面气孔对体积的测量造成了影响, 导致了密度过低。因此, 我们对密度异常点进行了排除。七十二洞样品的平均介电常数为5.24, 与深度法计算得到的介电常数的相对误差为2.5%。卧龙洞样品的平均介电常数为5.47, 与深度法计算得到的介电常数的相对误差为7.4%。



图12 玄武岩样品照片及编号

Fig. 12 The photos and the numbers of basalt samples

表1 玄武岩样品的密度与介电常数

Table 1 The density and dielectric constant of basalt samples

样品编号	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	相对介电常数
卧龙洞1	2.18	5.76
卧龙洞2	2.65	5.38
卧龙洞3	2.85	5.11
仙人洞1	2.66	5.23
仙人洞2	2.72	5.32
仙人洞3	2.75	5.79
仙人洞4	2.16	5.44
七十二洞1	2.19	4.86
七十二洞2	2.97	5.38
七十二洞3	3.19	5.49

如图13所示, 两个红色的点的密度过低, 且介电常数较大, 不符合其它样品所呈现的介电常数与密度的关系, 在去除洋红色框中的异常点后, 密度与介电常数成正比关系, 即样品中含气孔越多, 介电常数越小。

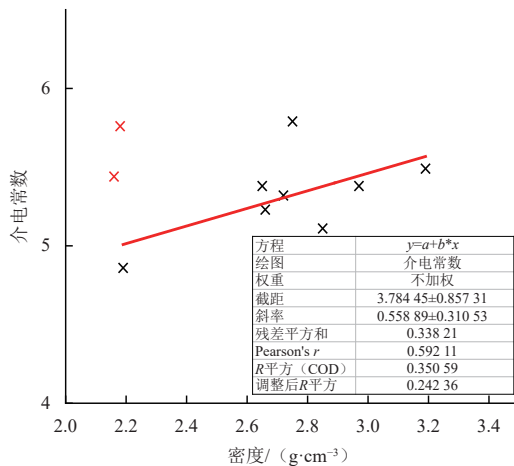


图13 样品介电常数与密度的关系

Fig. 13 The relationship between sample dielectric constant and density

## 4 结论

为月球基地建设提供理论依据,验证探地雷达对熔岩管探测可行性,拓宽熔岩管的研究方法,本文使用400 MHz探地雷达对海南海口石山火山群中的七十二洞和卧龙洞进行就位探测。通过对雷达数据去噪和增益处理,可以展示2 m埋深熔岩管(卧龙洞)顶部回波,并能区分3 m高度管道的上、下界面(七十二洞)。雷达图像与激光雷达管道内部三维扫描结果都显示在卧龙洞洞口附近存在一小段分叉。因此验证了在不进入洞穴内部情况下,探地雷达结果可以探测到该熔岩管的内部结构细节例如分叉。

此外,通过遗传算法反演了熔岩管壁物质的介电常数,并与使用实测数据的计算值以及网络分析仪测量值进行比较,确认反演方法的可行性。本工作验证了雷达技术可在一定埋深和高度条件下,有效地探测熔岩管的内部空间和地下结构,并为熔岩管的安全性评估提供参考。未来研究团队将在探地雷达对不同尺寸熔岩管的探测效果以及月球熔岩管与地球熔岩管雷达信号特征差异性等方面继续展开工作。

## 参 考 文 献

- [1] LIN X U, YONGLIAO Z O U, YINGZHUO J I A. China's planning for deep space exploration and lunar exploration before 2030[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, 38(5): 591-592.
- [2] KESSLER P, PRATER T, NICKENS T, et al. Artemis deep space habitation: enabling a sustained human presence on the Moon and beyond[C]//Proceedings of the 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). [S. l.]: IEEE, 2022.
- [3] HORVATH T, HAYNE P O, 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.
- [4] HORZ F. Lava tubes-potential shelters for habitats[C]//Proceedings of the Lunar Bases and Space Activities of the 21st CENTury. 1985: 405-412, Houston, USA, Lunar and Planetary Institute.
- [5] 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): 86-99.  
XIAO L, HUANG J, ZHAO J W, et al. Significance and preliminary proposal for exploring the lunar lava tubes[J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2018, 48(11): 86-99.
- [6] KESZTHELYI L. A preliminary thermal budget for lava tubes on the Earth and planets[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100(B10): 20411-20420.
- [7] CRUIKSHANK D, WOOD C. Lunar rilles and Hawaiian volcanic features: possible analogues[J]. *The Moon*, 1972, 3(4): 412-447.
- [8] LÉVEILLÉ R J, DATTA S. Lava tubes and basaltic caves as astrobiological targets on Earth and Mars: a review[J]. *Planetary and Space Science*, 2010, 58(4): 592-598.
- [9] COOMBS C R, HAWKE B. A search for intact lava tubes on the Moon: possible lunar base habitats[C]//Proceedings of the Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century. [S. l.]: NASA, 1992.
- [10] CUSHING G E. Candidate cave entrances on Mars[J]. *Journal of Cave and Karst Studies*, 2012, 74(1): 33-47.
- [11] HARUYAMA J, MOROTA T, KOBAYASHI S, et al. Lunar holes and lava tubes as resources for lunar science and exploration [M]. *Moon: Prospective Energy and Material Resources*, 2012: 139-163.
- [12] WAGNER R V, ROBINSON M S. Distribution, formation mechanisms, and significance of lunar pits[J]. *Icarus*, 2014, 237: 52-60.
- [13] 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.
- [14] ANDREWS-HANNA J C, BESSERER J, HEAD III J W, et al. Structure and evolution of the lunar Procellarum region as revealed by GRAIL gravity data[J]. *Nature*, 2014, 514(7520): 68-71.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] HARUYAMA J, HIOKI K, SHIROA M, et al. Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras[EB/OL]. (2009-11-1)[2023-10-20]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2009GL040635>.
- [18] KOBAYASHI T, KIM J H, LEE S R, et al. Nadir detection of lunar lava tube by Kaguya lunar radar sounder[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 59(9): 7395-7418.
- [19] ESMAELI 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.
- [20] MIYAMOTO H, HARUYAMA J I, KOBAYASHI T, et al. Mapping the structure and depth of lava tubes using ground penetrating radar[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): L21316.
- [21] 陶奎元. 中国雷琼·海口火山群·世界地质公园研究 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2012.

- [22] ONO T, KUMAMOTO A, NAKAGAWA H, et al. Lunar radar sounder observations of subsurface layers under the nearside maria of the Moon[J]. *Science*, 2009, 323(5916): 909-912.
- [23] KOBAYASHI T, KIM J H, LEE S R, et al. Synthetic aperture radar processing of Kaguya lunar radar sounder data for lunar subsurface imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 50(6): 2161-2174.
- [24] KOBAYASHI T, OYA H, ONO T. A-scope analysis of subsurface radar sounding of lunar mare region[J]. *Earth, Planets and Space*, 2002, 54(10): 973-982.
- [25] ZHANG L, XU Y, ZENG Z, et al. Simulation of Martian Near-Surface Structure and Imaging of Future GPR Data From Mars[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-12.
- [26] ZHANG H B, ZHENG L, SU Y, et al. Performance evaluation of lunar penetrating radar onboard the rover of CE-3 probe based on results from ground experiments[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, 14(12): 1633.
- [27] KRAINYUKOV A, LYAKSA I. Detection of tree roots in an urban area with the use of ground penetrating radar[J]. *Transport and Telecommunication Journal*, 2016, 17(4): 362-370.
- [28] ABD GANI A, HAMID R. Undergrounds water pipe mapping using ground penetrating radar and global positioning system[J]. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, 2018, 50(1): 1-11.
- [29] ZHANG L, LI J, ZENG Z, et al. Stratigraphy of the Von Kármán crater based on Chang'E-4 lunar penetrating radar data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(15): e2020GL088680.
- [30] ZHANG L, ZENG Z, LI J, et al. Parameter estimation of lunar regolith from lunar penetrating radar data[J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 2907.
- [31] WARREN C, GIANNOPOULOS A, GIANNAKIS I. GprMax: open source software to simulate electromagnetic wave propagation for ground penetrating radar[J]. *Computer Physics Communications*, 2016, 209: 163-170.
- [32] ROBINSON E A. Seismic time-invariant convolutional model[J]. *Geophysics*, 1985, 50(12): 2742-2751.
- [33] XIA J, FRANSEEN E K, MILLER R D, et al. Improving ground-penetrating radar data in sedimentary rocks using deterministic deconvolution[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2003, 54(1-2): 15-33.
- [34] YILMAZ Ö. Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data [M]. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2001.
- [35] HOLLAND J H. Genetic algorithms[J]. *Scientific American*, 1992, 267(1): 66-73.
- [36] GOLDBERG D E. Real-coded genetic algorithms, virtual alphabets and blocking [M]. Princeton: Citeseer, 1990.
- [37] YANG C, QIAN Q, WANG F, et al. An improved adaptive genetic algorithm for function optimization[C]//Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). [S. l.]: IEEE, 2016.
- [38] HANSEN W, SILL W, WARD S. The dielectric properties of selected basalts[J]. *Geophysics*, 1973, 38(1): 135-139.

作者简介:

**徐懿**(1981-),女,副教授,博士生导师,主要研究方向:行星地质学,基于探地雷达数据解译类地行星浅层地下结构和物性以及火星地貌的类比研究。

通信地址:澳门氹仔伟龙大马路澳门科技大学(999078)

电话:(853)88971993

E-mail:yixu@must.edu.mo

**肖龙**(1963-),男,教授,主要研究方向:行星地质学与比较行星学。

**本文通信作者。**

通信地址:武汉市洪山区鲁磨路388号中国地质大学(430074)

E-mail:longxiao@cug.edu.cn

## Analog Study of Ground-Penetrating Radar Technology for Lava Tube Detection

XU Yi<sup>1</sup>, CHEN Rui<sup>1</sup>, WONG Honkuan<sup>1</sup>, MENG Xindong<sup>1</sup>, CHEN Yiping<sup>2</sup>,  
ZHANG Ling<sup>1,3</sup>, ZHANG Jun<sup>4</sup>, XIAO Long<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China;

2. School of Geospatial and Engineering and Science, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;

3. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;

4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China))

**Abstract:** Lava tubes are one of the prime candidates for establishing extraterrestrial bases. To verify the feasibility of using ground-penetrating radar to detect lava tubes on extraterrestrial bodies, this paper first conducted a technical study to validate the detection of lava tubes using a 400 MHz ground-penetrating radar system on the Seventy-Two Caves and Wolong Cave in the Shishan Volcanic Group in Haikou, Hainan. It is found that the upper interface of the lava tube is clearly displayed when the depth of the tube is 2 m, and the radar image shows the upper and lower boundaries when the height is less than 3 meters. Additionally, the genetic algorithm is employed to inverse the dielectric constant of the lava tube's wall. The reliability of the genetic algorithm in calculating the dielectric constant is validated through comparison with results obtained from the depth method and sample measurement. Furthermore, the analysis of samples establishes a simple relationship between porosity and dielectric constant. These findings are of significant importance for assessing the underground spatial distribution and wall stability of the lava tubes, providing a reference for future lunar base establishment.

**Keywords:** lava tube; ground penetrating radar; Moon; in-situ detection; analog study

### Highlights:

- Radar technology verification experiments for extraterrestrial lava tube exploration were conducted in the Shishan Volcanic Group lava tubes in Haikou, Hainan.
- 400 MHz radar can reveal the upper and lower boundary of the lava tube when the buried depth is less than 2 m and the height is less than 3 m.
- The genetic algorithm is used to inverse the dielectric constant and porosity of tube wall, providing references of safeness of lunar base construction.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]