

太阳系天体熔岩管探测研究现状

余星阳¹, 王江¹, 黄俊¹, 赵健楠^{1,2}, 赵佳伟¹, 肖龙¹

(1. 中国地质大学(武汉)行星科学研究所, 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)地质探测与评估教育部重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 由火山熔岩流动和冷却过程形成的熔岩管已经在太阳系多个天体表面被发现, 成为了认识类地行星火山活动和热历史的窗口。同时, 由于熔岩管内部具有恒温 and 防辐射的特点, 也是未来人类探测活动或地外生存的天然庇护所, 因此具有极为重要的科学和工程应用价值。总结了熔岩管的形成机制、探测和识别方法, 月球和火星等太阳系不同天体表面熔岩管的分布, 探讨了熔岩管探测的科学意义和应用前景, 提出地球熔岩管是开展行星熔岩管类比研究和探测的重要对象, 并进而介绍了熔岩管类比研究的理论和方法, 为未来地外熔岩管的探测提供理论依据和模拟实验支撑。

关键词: 熔岩管; 火山活动; 太阳系; 行星探测

中图分类号: P184

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)04-0313-15

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230163

引用格式: 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.

Reference format: SHE X Y, WANG J, HUANG J, et al. Research status of lava tube exploration in the solar system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(4): 313-327.

引言

太空探索为人类拓展地球以外的空间、发展科学技术、获取太空中宝贵的资源提供了新的视角^[1-5]。然而, 地外天体的环境通常极其恶劣, 存在极端的温度变化、频繁的微陨石群撞击、高强度的宇宙辐射。人类如果想在其它星球上长期生存, 首先必须找到或建立一个安全、稳定、长期的庇护所^[6]。

洞穴可以为人类提供抵御恶劣环境的天然庇护。在早期的人类演化历史中, 洞穴就扮演着重要的角色^[7-8]。不但帮助人类抵御外部恶劣天气和野兽侵扰, 洞穴内部相对稳定的温度也有助于在不同季节生存下来^[9]。熔岩管洞穴作为一种特殊类型的洞穴, 是由火山活动流动的熔岩流固结所形成的地下中空管道, 在地球的玄武岩岩浆区广泛发育着熔岩管, 而且目前已经在月球和火星发现了有完整地下熔岩管洞穴存在的证据^[10-11]。

随着中美欧等国家与地区将载人登月计划提上日程, 月球熔岩管洞穴因为防辐射、恒温等诸多优点被多次列为未来月球基地的优先考虑的区域^[12-15]; 此外熔岩管洞穴的上述优点使其有可能成为探寻火星生命遗迹的最佳场所^[16-19]; 熔岩管的形成与目标天体火山活动密切相关, 还是了解金星、水星等类地天体火山活动

和热演化过程的绝佳窗口^[20-21]。

尽管人类自20世纪60年代以来已经发射了超过250个探测器来对太阳系内各类天体进行探测, 但直至今日人类对于太阳系天体的次表层和内部结构的了解仍相当有限^[19]。因此掌握地外熔岩管洞穴的具体分布及主要特性对于人类未来太空探索和理解天体次表层结构显得尤为必要。

本文将首先对熔岩管的形成机制和主要探测手段进行介绍, 并根据目前的探测结果总结熔岩管在太阳系内各天体的分布, 最后会具体探讨开展熔岩管探测的科学意义和主要方法, 为未来地外熔岩管的探测提供理论依据和模拟实验支撑。

1 熔岩管形成机制

熔岩管是由火山口流出的熔岩所形成的天然管道^[22]。喷出的岩浆在地表流动过程中, 黏度较低的玄武质岩浆边流动边冷却, 这种流动中的岩浆冷却在地表形成了一层固结的外壳, 这个外壳就像一个绝热保护层, 降低了内部岩浆的降温速率(图1)。这使得内部岩浆可以在高温状态下持续流动, 甚至可以流动数百至上千km的距离, 直到岩浆源头停止供给, 形成了一个中空的管道, 即熔岩管^[18,23-24]。

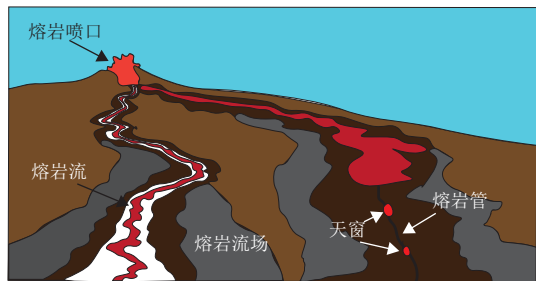


图1 熔岩管与熔岩流(修改自USGS^[1])

Fig. 1 Lava tube and lava flow (Modified from USGS^[1])

当熔岩管刚开始形成时,通常呈现近似圆形,但随着熔岩不断注入并逐渐冷却凝固,管道底部开始逐渐被填满。同时,熔岩管的两侧通常会显示出不同高度的熔岩流痕迹,而底部可能保留着各种熔岩流动过程中的特征,比如绳状构造等^[24]。

熔岩管的直径和延伸长度与岩浆的性质以及天体表面的环境(如重力、温度、大气环境等)密切相关^[25]。在地球上,熔岩管的延伸距离一般为十几千米,横截面的直径一般为几米。然而,在月球和火星等重力较低的天体上,熔岩管的规模可能更大。根据美国圣杯(GRAIL)轨道器对月球浅部重力的探测显示,月球和火星上的熔岩管直径和深度理论上可达数百米,长度甚至达数十千米^[26]。

此外,后续的岩浆活动、构造变动或撞击事件可能会影响熔岩管的形态。新的火山喷发可能会积聚岩浆并覆盖原有的熔岩管底部,构造运动可能导致熔岩管的位移和断裂,而撞击事件可能造成熔岩管的掩埋或坍塌,撞击产生的溅射物也可能会进一步深埋熔岩管。

熔岩管的形成和演化是一个复杂的过程,受到岩浆的性质、地表环境和后续地质事件的影响。通过对熔岩管的研究,可以深入了解目标天体的地质活动和行星表面特征的演变。

2 熔岩管的主要识别方法

初始形成的熔岩管通常深埋于地表之下,因此很难被直接发现。当熔岩管发生部分塌陷后,才暴露出内部洞穴空间,被世人所见。在地外天体上,由于塌陷熔岩管洞穴的形貌、内部空间导致的重力异常、洞穴内部和外部环境的差异,使得通过光学地形影像、重力异常和探地雷达等方法对地下熔岩管探测成为可能。

2.1 光学地形影像识别

根据光学地形影像数据对地外天体的熔岩管进行识别主要通过两种方式:

第一种是根据类似蜿蜒呈槽状的连续塌陷进行识

别^[18,27]。根据熔岩管的形成机制,其本身即为弯曲的线性通道,如果熔岩管的顶部太薄或者不足以支撑目标天体的引力作用,就会出现熔岩管部分坍塌甚至整段熔岩管垮塌暴露的情况,见图2,坐标:34.7°N,316.6°E,塌陷链长约50 km,图2(a)为塌陷链,图2(b)为塌陷链中的局部形态,图2(c)为高程剖面图,高程数据基于SLDEM2015(+LOLA)。

第二种可能的识别方法是通过观察洞穴“天窗”或陷坑来判别(见图3)。这些洞穴式天窗与普通的小型撞击坑(直径小于15 km)有着显著的不同,普通小型撞击坑底部具有相对简单的碗状形态^[28],而熔岩管天窗是小天体撞击击穿上覆岩石而露出地下中空的熔岩管,或其它地质活动导致顶部塌陷形成的洞穴,下部与熔岩管相连^[24]。

因此,这些洞穴的底部是深陷的或不规则形态的,其深度与直径之比远大于普通小型撞击坑。另外,熔岩管的塌陷口一般具有向内倾斜的斜坡,斜坡外缘不会有隆起,而撞击坑的外缘会有明显的隆起和溅射物的堆积。除了天窗之外,有些熔岩管内塌陷物质堆积到了天窗口,形成了斜坡^[24]。

虽然目前大多被发现的熔岩管天窗都是先根据光学地形影像数据识别出来的^[27],但光学地形影像数据在探测熔岩管方面仍存在较大限制:首先是影像数据分辨率的问题,如果分辨率不够高,熔岩管可能会难以识别;不同天体的地貌差异巨大,熔岩管可能呈现出各种形状和特征;光照条件也会对地表特征的可见性产生重要影响,熔岩管可能会因为光照角度的不同而在图像中产生阴影,影响其可识别性;此外对于没有“天窗”开口的熔岩管,很难单纯通过光学影像进行识别;即使对于有“天窗”开口的熔岩管,也很难借助光学影像数据判断出熔岩管的具体规模。

2.2 重力异常探测

当地下存在空洞时会对局部的重力场造成影响,通过仪器探测会出现“质量亏损”的情况,借助这种方法不但可以对有天窗开口的熔岩管的具体规模进行评估,还可以对没有天窗开口的熔岩管进行探测^[29-30],即理论上是可以检测到完整的地下熔岩管道。

Chappaz等^[31]根据美国圣杯(GRAIL)轨道器对月球浅部重力探测得到的重力场数据,从中筛选出具有质量异常的目标信号,根据梯度测量和互相关性分析,对月球马利厄斯山地区的熔岩管规模进行了估算,见图4,图4(a)为马利厄斯山天窗区域的自由空气重力异常;图4(c)为马利厄斯山天窗区域的布格重力异常;图4(b)为马利厄斯山天窗区域重力异常

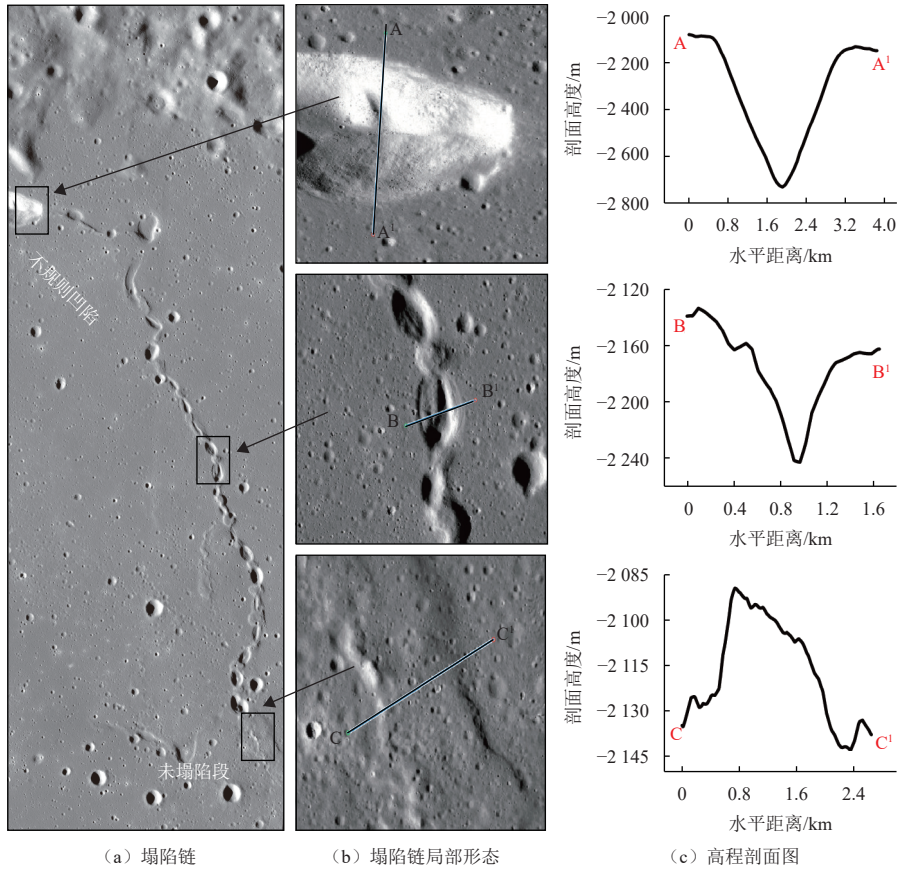


图 2 月球格罗特胡森撞击坑附近疑似为熔岩管连续塌陷
 Fig. 2 A suspected continuous collapse of a lava tube near the lunar

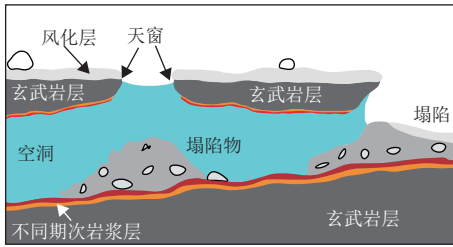


图 3 熔岩管模式图
 Fig. 3 Lava tube pattern diagram

相关性分析（暖色对应质量不足，冷色对应质量过剩）；图 4（d）为马利厄斯山区域的地形高程图（红点为熔岩管天窗），估算结果认为马利厄斯山区域的熔岩管长达约 60 km。

然而只有几到几十千米规模的熔岩管才会产生明显的质量异常信号，对于小型熔岩管很难通过重力异常数据进行判别^[31]；此外，对于与熔岩管具有相似形态特征（如月溪）或由于其他原因导致质量亏损的（如大型地下断层）^[32]，都会阻碍对熔岩管的识别。

2.3 探地雷达

探地雷达（Ground-Penetrating Radar, GPR）也提

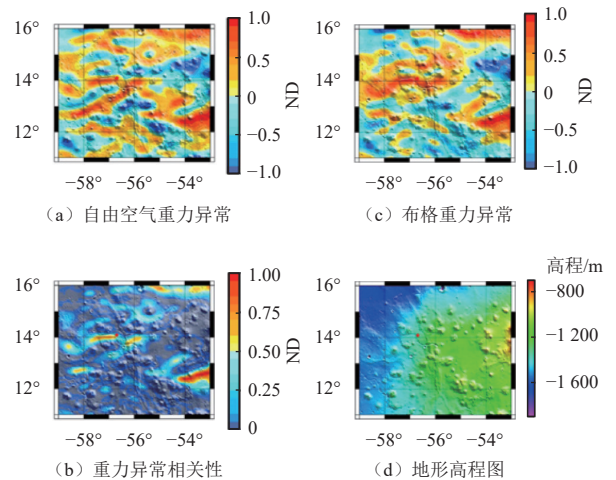
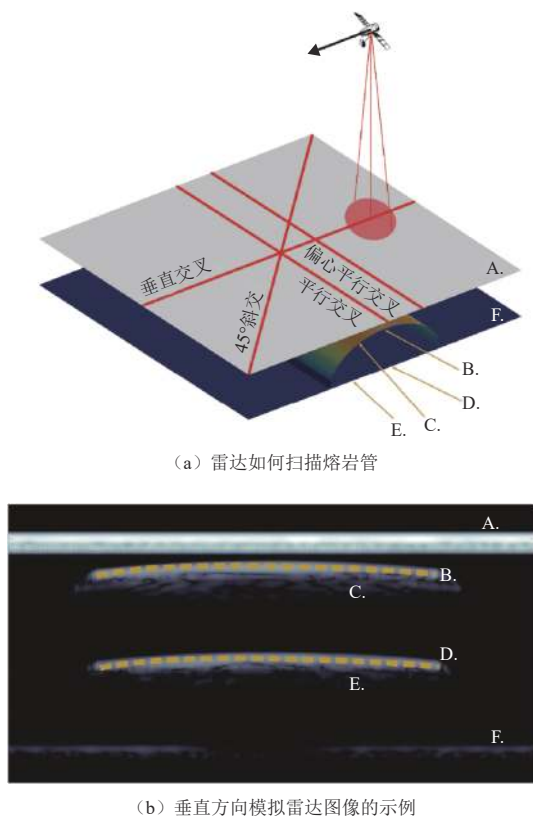


图 4 根据重力异常对马利厄斯山熔岩管的规模进行估算^[31]，认为马利厄斯山存在从天窗向西延伸 60 km 的大型熔岩管
 Fig. 4 Estimation of lava tube scale on Marius Hills based on gravity anomalies^[31]. It is believed that there is a large lava tube extending 60 kilometers westward from the skylight in Marius hills

供了另一种测量地下结构的方法^[32]。通过探地雷达对天体的次表层结构探测的方式大致可以分为两种：轨道雷达探测器和原位探地雷达^[33]。

探地雷达可以对地下的熔岩管进行探测，主要是

因为与周围土壤或岩石相比,熔岩具有较高的电导率,通过探地雷达使用高频率且通常被极化的无线电波,将电波发射入地表之下。当电磁波撞击到埋在地表下的物体或到达介电常数变化的边界时,天线接收到的反射波会记录下反射回波的讯号差异,从而判断地下是否有熔岩管存在,见图5:图5(a)说明了雷达如何扫描熔岩管,图5(b)展现了垂直方向模拟雷达图像的示例^[34]。



注: A: 行星表面; B: 熔岩管的顶部; C: 管壁; D: 管道的中心部分; E: 管道的其余部分; F: 从模型导出的地下特征

图5 Carr等提出通过雷达探测地下熔岩管的简化模型^[34]

Fig. 5 Carr et al. proposed a simplified model for detecting underground lava tubes by radar^[34]

目前,雷达探测技术已在行星探测方面广泛应用。Kaku等^[32]基于月球雷达探测仪(Lunar Radar Sounder, LRS)首次提出了月球马利厄斯山地区存在完整熔岩管的证据;丁春雨等^[34]首次利用“嫦娥三号”月球车上携带的探地雷达发现“嫦娥三号”着陆区下方可能存在高度约3.1 m的空洞^[33]。

然而轨道雷达探测器虽然覆盖面积大、可以快速获取目标天体的浅层地下雷达图像,但是数据存在多解性,对于具有相似形态的地下结构还需要做进一步分析^[36];原位探地雷达拥有更高的分辨率,可以对熔岩管的具体形态进行高精度探测但是探测范围有限^[37]。

所以未来对地外天体熔岩管的探测可以先通过光学影像数据和重力异常初步确定熔岩管的方位,再进行原位雷达探测以确定熔岩管的具体形态和基本物理参数。

2.4 热异常探测

由于独特的几何形状以及顶部坍塌后,塌陷口下部的堆积物与顶部土壤层表现出不同的热物理性质导致熔岩管天窗成为了热阱,与周围区域在温度上显示出差异。Horvath等^[35]对月球勘测轨道飞行器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)上携带的Diviner辐射计(该仪器已经连续11年对月球表面温度进行测量)对静海和智海熔岩管的测量结果进行分析表明,静海和智海的熔岩管天窗表现出较高的热辐射,见图6(250 m/像素)^[35],结果显示静海和智海的熔岩管天窗较周边区域呈现出较高的热辐射。

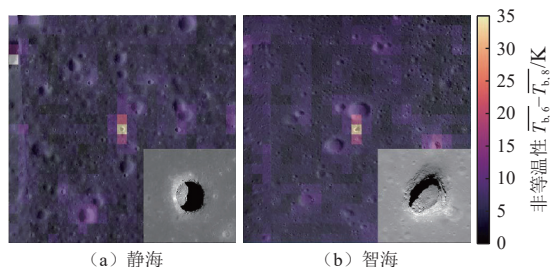


图6 静海和智海21:00—04:00点(当地太阳时间)温度变化平均值
Fig. 6 Average temperature change of Mare Tranquillitatis and Mare Ingenii from 9 pm to 4 am (Local Solar Time, LST)

在月夜洞穴温度要比周围区域高出约173 °C。随后根据Diviner的测量数据进行物理建模发现在月球赤道附近有风化层^[38]覆盖的管道开口在白天的温度高达146 °C,而开口之外处于永久阴影区的管道部分则保持着近乎恒定的16.85 °C。熔岩管的这种特性使得未来可以通过热异常探测来对未知的熔岩管进行识别。

3 熔岩管在太阳系不同天体上的分布

3.1 地球

地球是研究地外熔岩管的唯一类比对象。地球本身就有着丰富的熔岩管系统,作为太阳系火山活动最剧烈的天体之一^[24],地球上的熔岩管不仅形态多样且分布广泛:

中国:五大连池、镜泊湖、海南岛;美国:纽伯里国家火山公园、月球陨石坑国家纪念碑和保护区、熔岩床国家公园、夏威夷火山岛;

韩国:济州岛;日本:富士山;澳大利亚:乌达拉火山国家公园;新西兰:奥克兰火山;厄瓜多尔:科隆群岛;意大利:埃特纳火山;

西班牙: 加那利群岛; 葡萄牙: 亚速尔群岛; 刚果民主共和国: 尼亚穆拉吉拉火山; 肯尼亚: 利维坦洞穴;

坦桑尼亚: 乞力马扎罗山; 沙特阿拉伯: Umm Jirsan。

从赤道的夏威夷再到靠近北极的冰岛都发育着熔岩管, 中国熔岩管则主要分布在东北以及琼州岛地区。

地球熔岩管的长度从几至几十千米不等^[39], 宽度和高度集中在0.5~30 m, 从地表下几厘米到几十米的

深度都存在熔岩管。已知地球最长最深的熔岩管是夏威夷岛基拉韦厄的 Kazumura 洞穴, 全长 65.5 km, 深 1 102 m^[40]。

受火山岩浆的喷发速率、熔岩流动的陆地表面坡度以及熔岩自身的物质组成和相关流变学因素, 地球熔岩管呈现出多种形态(见图7): 图7(a)为单个蜿蜒或笔直的管道; 图7(b)为编织状管道, 具有分支及连接点; 图7(c)为不同级别的多层次管道, 存在垂直连接点; 图7(d)为不同层次的编织状管道^[41]。

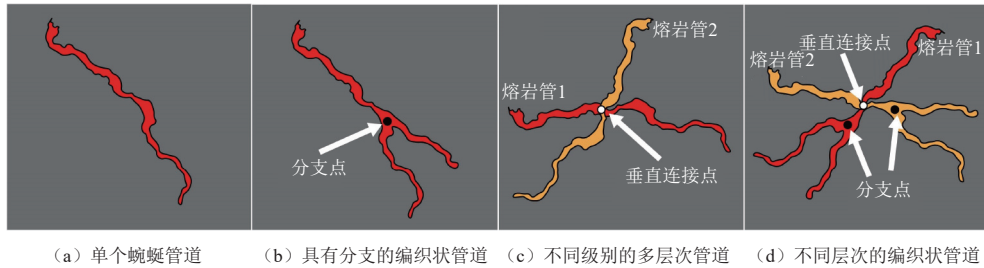


图7 地球熔岩管的主要形态

Fig. 7 Main forms of lava tubes on Earth

此外地球上的熔岩管具有十分显著的保温作用, 无论是夏季高温还是冬季低温, 洞内的温度始终保持近乎恒定的状态^[21]。地球熔岩管内还存在着微生物群落和水冰^[6], 可以作为地外熔岩管生命探测和水冰探测的类比对象。

3.2 月球

2009年日本“月球轨道飞行器”(Selene)携带的地形相机(TC)以10 m/像素的分辨率对月球表面进行成像, 在马利厄斯山地区发现了月球首个熔岩管天窗, 随后Haruyama等^[10]再次对月球轨道飞行器(Selene)传回的影像进行检查, 在月球的静海区域和智海区域又发现了两个大型熔岩管天窗。之后“月球勘测轨道飞行器”(LRO)以0.5~2 m/像素的分辨率对大部分月球表面进行成像, 目前在月球表面已经发现了300多个洞穴^[41]。

然而这300多个洞穴中有200多个因为规模太小而无法辨认是否存在有横向通道^[41], 所以目前只有21个被认为可能是地下熔岩管的入口(图8), 其中16个分布在月海区域, 5个分布在高地区域^[42]。月球部分熔岩管的基本参数见表1。

3.3 火星

火星与地球具有相似的地球化学成分和地质活动历史^[41], 在火星的表面也广泛分布着玄武岩火山活动的痕迹^[43]。然而火星的火山活动主要集中在两个地区: 萨西斯和艾丽丝米^[44]。地球上最大的火成岩省(西伯利

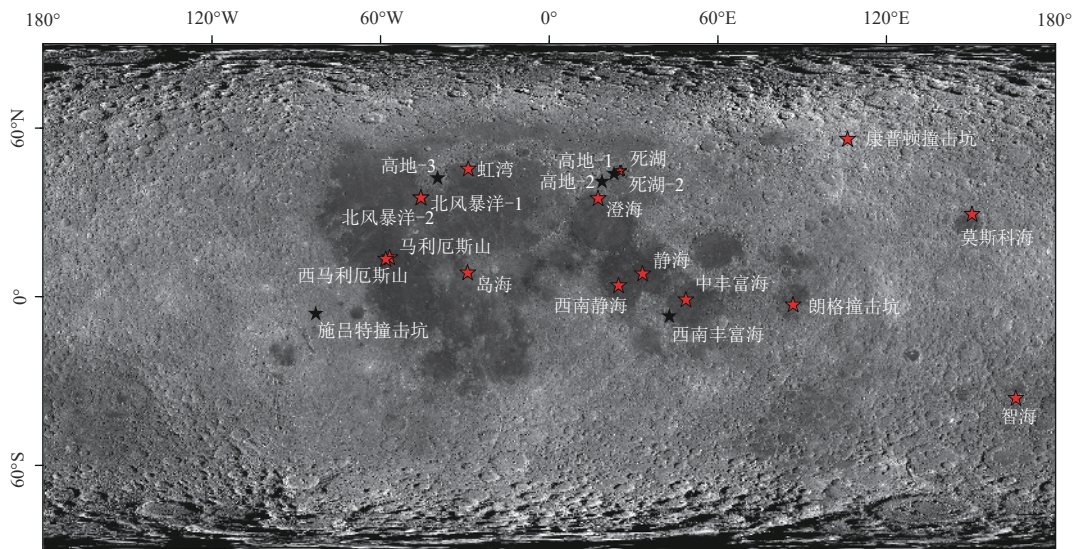
表1 月球部分熔岩管的基本参数

Table 1 Basic parameters of lava tubes on the Moon

名称	纬度	经度	深度/ m	直径/m	区域	图像ID
静海	8.335 5°N	33.222 0°E	105	100 × 88	月海	M126710873R
马利厄斯山	14.091 7°N	303.229 9°E	40	55 × 49	月海	M155607349R
智海	35.949 4°S	166.055 9°E	55	104 × 71	月海	M1227298727R
北风暴洋-1	35.409 7°N	314.360 2°E	54	157 × 108	月海	M1341498389L
死湖	44.960 8°N	25.611 9°E	60	>165 × 110	月海	M126759036L
西南丰富海	6.752 1°S	42.759 5°E	51	19 × 15	高地	M1315099773L
西南静海	4.143 8°N	24.687 1°E	25	32 × 26	月海	M1345757107L
朗格撞击坑	2.702 4°S	86.780 0°E	5	14 × 12	月海	M119285915R
施吕特撞击坑	5.839 5°S	276.950 0°E	57	37 × 23	高地	M1328836141R
高地-1	43.966 2°N	23.083 6°E	27	41 × 37	高地	M1254078933R
高地-2	41.156 3°N	18.820 6°E	>24	34 × 27	高地	M1241199272R
高地-3	42.394 1°N	320.307 6°E	27	45 × 41	高地	M1175681573L

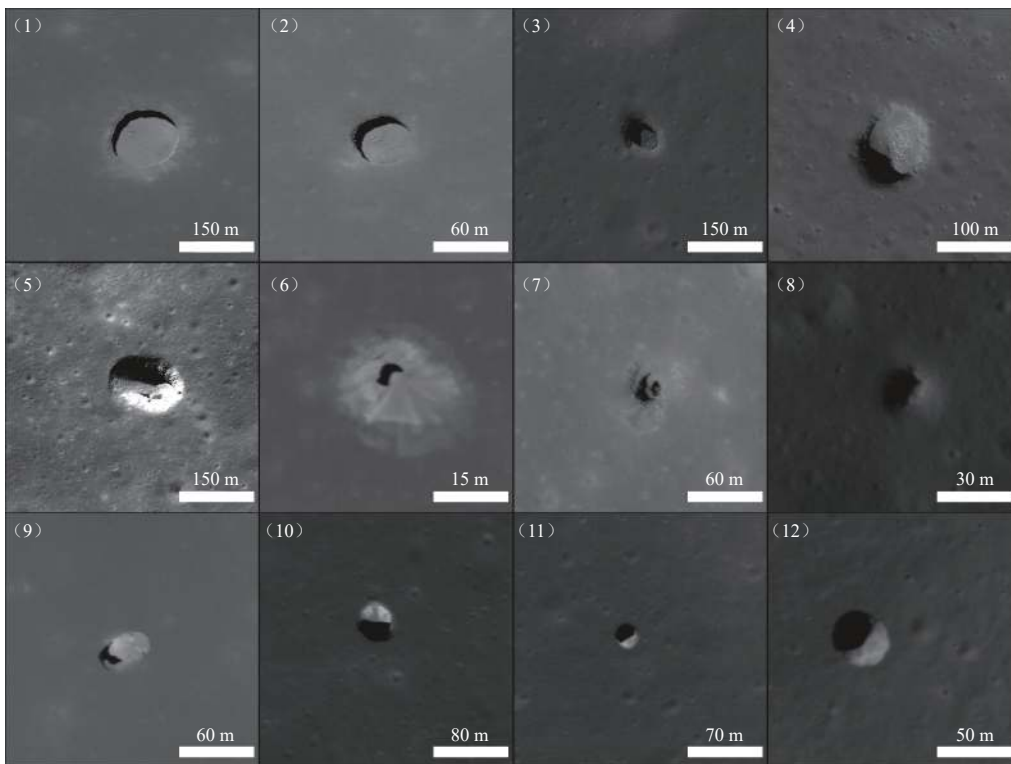
亚地盾)面积约为700万km², 而火星上萨西斯火成岩省的面积约占火星表面积的25%, 在萨西斯地区单个熔岩流的长度可达数百km, 厚度达数十m, 凸显了火星上熔岩管网络巨大的潜力^[45-46]。借助火星探测器传回的影像数据, 目前在火星上已经发现了超过1 162个洞穴(图9)^[47], 且主要集中在萨西斯火成岩省的大型火山的侧面^[48]。

根据Cushing整理的火星全球洞穴候选目录(Mars Global Cave Candidate Catalog, MGC³)^[49]中, 将火星



注：月海熔岩管：红色五角星；高地熔岩管：黑色五角星。

(a) 洞穴分布



注：(1) 静海；(2) 马利厄斯山；(3) 智海；(4) 北风暴洋-1；(5) 死湖；(6) 西南丰富海；(7) 西南静海；(8) 朗格撞击坑；(9) 施吕特撞击坑；(10) 高地-1；(11) 高地-2；(12) 高地-3。

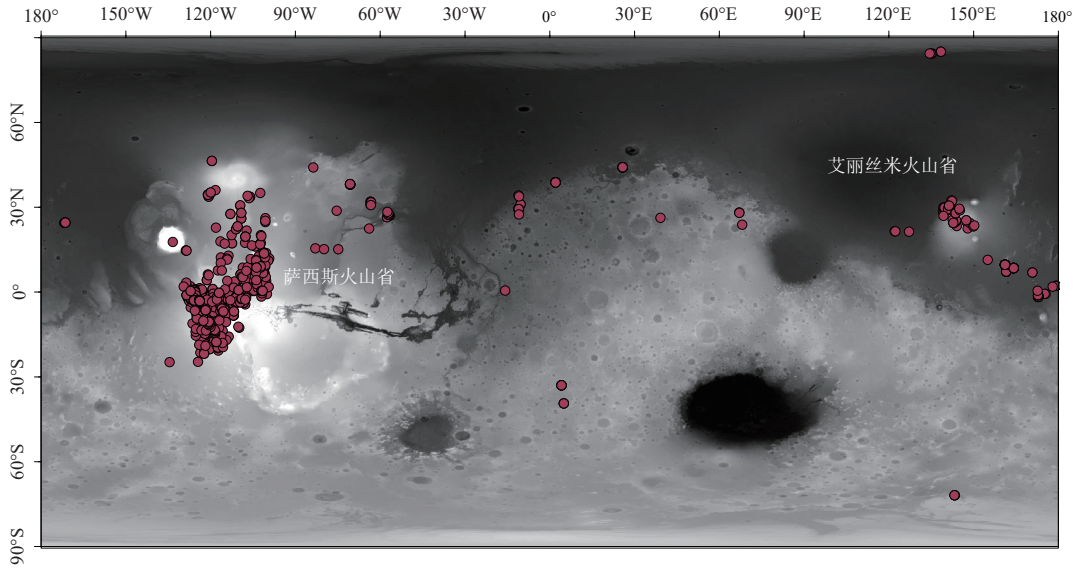
(b) 形态

图8 月球熔岩管洞穴分布及形态

Fig. 8 Distribution and morphology of lunar lava tube caves (Mare lava tube: red five-pointed star; highland lava tube: black five-pointed star)

的洞穴划分为了几种形态：①熔岩管天窗，地下熔岩管顶板塌陷形成的坑洞；②非典型坑 (Atypical Pit CraterS, APCs)，形状特殊，孤立存在且通常拥有垂直壁的坑洞；③小型无边坑 (Small Rimless PitS, SRPs)，小而浅的无边塌陷坑；④针状小孔洞 (pinholes)，小而清晰的孔洞，宽度只有几像素；⑤悬崖壁上的裂缝

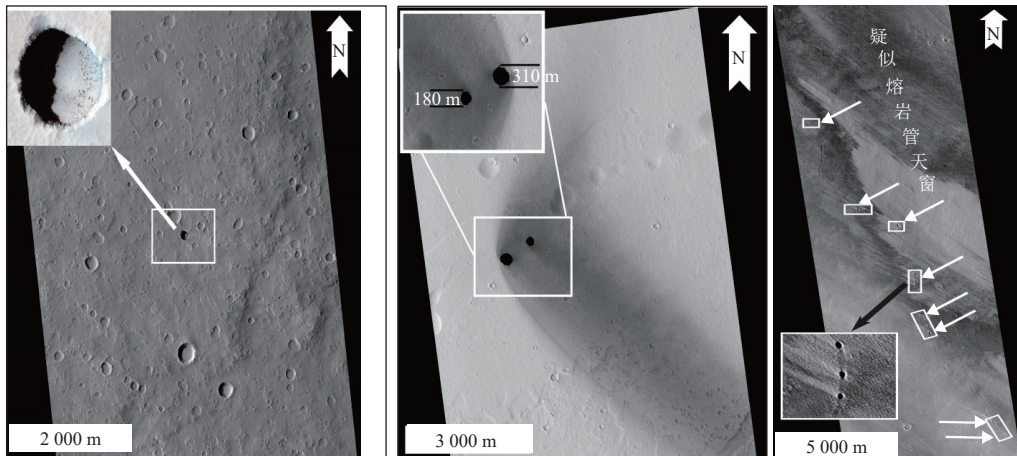
(lateral entrances on cliffs)。见图10：图 (a) 坑直径约130 m，坐标：23.210°N，149.909°E；图 (b) 坑直径分别为180 m和310 m，坐标：17.244°N，247.575°E；图 (c) 坑坐标3.069°S，236.062°E；图 (d) 是由“好奇号” (Curiosity) 桅杆相机 (Mastcam) 拍摄的位于盖尔撞击坑东部悬崖的一个门型裂缝。



注: 数据来源: Mars Global Cave Candidate Catalog (MGC³) v1 Cushing; 洞穴表示为暗红色圆点。

图 9 火星全球候选洞穴的分布

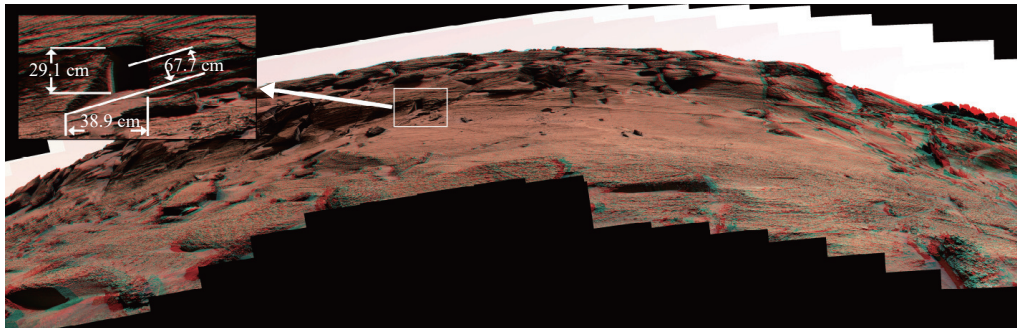
Fig. 9 Distribution of global candidate caves on Mars



(a) 艾丽丝米山东南侧的一个非典型坑 (APC)

(b) 萨西斯地区的暗色无边坑

(c) 阿尔西亚山附近疑似为熔岩管的连续塌陷



(d) 位于盖尔撞击坑东部悬崖的一个门型裂缝

注: 来源HIRISE影像数据。

图 10 火星洞穴类型

Fig. 10 Types of Martian caves

此外, 赵健楠等^[48]在火星萨西斯东南部识别出了 38 个疑似熔岩管的蜿蜒山脊并利用高分辨率图像和地

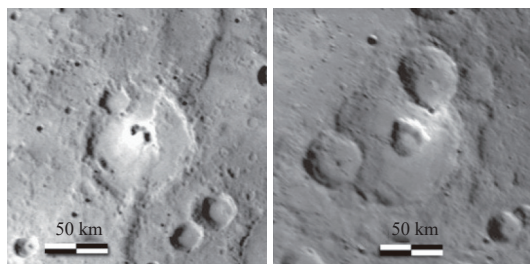
形数据分析了它们的形态和分布特征。这些蜿蜒山脊的横截面形状主要有圆形、双脊形和平顶形 3 种, 并伴

有分支、顶部裂隙、塌陷坑等其他特征。

3.4 其它类地天体

除了地球、月球和火星外,在其它类地天体如水星、金星和木卫一上也都经历了长期的火山活动,且都以低黏度的玄武岩岩浆为主,在这些天体的表面也发现了可能与地下熔岩管相关的塌陷或线性结构。

水星的表面与月球很相似,呈现出类似的平原和大量的撞击坑,显示着数十亿年来地质都处于非活跃状态^[50]。Spudis^[51]曾根据“水手10号”(Mariner probe-10)传输的数据将水星表面地形划分为4类:多坑平原(Intercrater plains)、撞击坑(Craters)、盆地(Basins)和平坦平原(Smooth plains)。其中约占水星表面27%的平坦平原的主要组成物质是火成岩,暗示着与熔岩管的某种联系。随后“信使号”(Messenger)以26 m/像素的分辨率对水星的表面进行观测^[52],在水星火山活动区域也发现了一些塌陷结构(图11)。



(a) 水星格林卡火山口长20 km,宽8.5 km的肾状塌陷 (b) 水星未命名环形山(35.7°N, 249.4°E)中的小型塌陷

图 11 水星发现的塌陷结构^[52]
Fig. 11 Collapse structures discovered on Mercury^[52]

金星作为地球的姊妹星,无论是它的质量、体积还是与到太阳的距离,均与地球相似,然而来自麦哲伦号(Magellan)在1990—1991年的探测结果显示在金星浓厚的大气层之下是大量且广泛的火山活动,拥有广阔的裂谷带和数千座火山,80%的表面都有熔岩流流动的遗迹^[53],如此广泛的熔岩流区域可能有熔岩管的存在。Melville等^[54]在检查过“麦哲伦号”传回的数据后在金星表面发现了许多坑链结构(图12)。

此外在木卫一上也探测到了疑似熔岩管的结构。由木星引力造成的强大潮汐加热作用^[55],使木卫一成为太阳系中最活跃的天体,目前在木卫一上已发现的活火山有400余座^[56]。来自“伽利略号”(Galileo)的影像显示在木卫一表面存在有大量熔岩流,见图13,由伽利略号轨道飞行探测器在距木卫一表面1.5万km处拍摄,其中有包括长度超过300 km的阿马拉尼流和长度超过100 km的普罗米修斯流^[56],这些区域都极有可能发育着熔岩管。

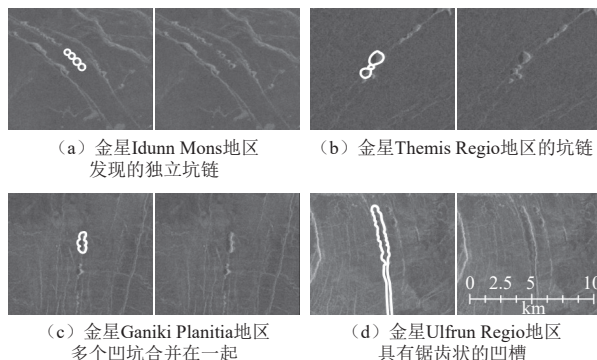
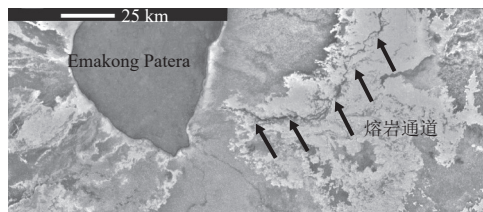


图 12 金星上的部分坑链^[53]
Fig. 12 Part of the crater chain on Venus^[53]



注:来源NASA/JPL/University of Arizona.
图 13 木卫一Emakong Pater(巨大暗色火山口)附近发现的熔岩通道
Fig. 13 Lava channel discovered near Io's Emakong Pater (huge dark caldera)

4 熔岩管的探测意义和利用价值

4.1 科学研究意义

揭示目标天体的火山活动和热演化历史。太阳系内所有类地行星、月球和巨行星的多个卫星以及矮行星都经历过或正在经历不同形式的火山活动^[57],而熔岩管的形成与目标天体的火山活动密切相关。岩浆的物质组成、地下岩石的性质和目标天体的重力效应等都会影响熔岩管的形成过程及规模,因此根据熔岩管内部的矿物岩石组成以及熔岩管的规模可以推测当时的火山活动历史^[24]以及天体的重力变化。

此外洞穴的天窗侧壁暴露了完整的表壤-破碎层-基岩完整的剖面(图14),保留了岩浆活动随时间推移

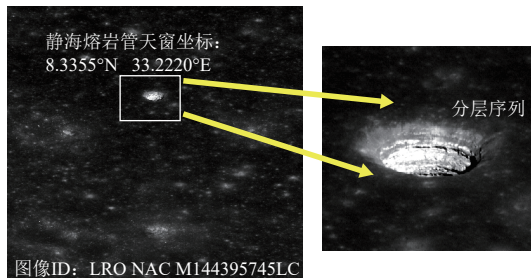


图 14 静海熔岩管天窗呈现出层状序列,保留了岩浆活动随时间推移成分变化的矿物学记录^[58]
Fig. 14 Mare Tranquillitatis lava tube skylight shows a layered sequence, retaining a mineralogical record of compositional changes in magma activity over time^[58]

移发生改变矿物学记录。而完整熔岩管洞穴内部的矿物未遭受到撞击和太阳风改造等情况, 保存状态较为新鲜, 这是以往样品中所没有的。

记录撞击改造与空间风化历史。大型撞击作用可能会导致地下完整熔岩管发生破碎变形或完全坍塌暴露, 而撞击作用的溅射物或者小型撞击也可能会击穿熔岩管的顶部形成天窗, 从而保留早期撞击作用的改造历史。熔岩管天窗坑壁的分层序列不仅保留了火山活动的矿物学记录, 还记录着数十亿年来太阳风和宇宙射线的空间风化历史。

天体生物学意义。熔岩管内部稳定的物理化学条件增强了次生矿物的沉淀和微生物的生长^[18], 这可能使其成为保存生命迹象的理想地点。由于洞穴环境更能免受表面风化的影响, 因此与典型的表面沉积物相比, 洞穴沉积物中的生物特征可能得到更好的保存^[59]。洞穴还往往会延迟埋藏成岩作用带来的变化, 从而有可能在更长的时间内保存生物特征。此外火星上洞穴的次生矿化记录, 可能保留了火星过去水活动的历史^[60]。洞穴还可以防止紫外线辐射, 并在一定程度上防止沙尘暴、强风等其它恶劣天气, 因此地下洞穴可能比目前火星表面的大部分地区更适合未来人类居住^[61]。

4.2 特殊环境和利用价值

恒定的内部温度和稳定的内部结构。地外天体表面的温度变化幅度极大, 从月球夜晚的 $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到月昼的 $106\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[62], 火星的 $-128\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, 如此大的温差变化幅度不利于未来月球和火星的探测活动。Horvath等^[35]的研究结果表明月球熔岩管内部始终处于一个近乎 $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒定温度的状态, 无论是对于探测仪器的运作还是人类居住, 这都是一个十分合适的温度, 见图15, 红色曲线为熔岩管顶部月面温度, 蓝色和绿色曲线分别为位于北纬 15° 、直径和深度均为 50 m 的马利厄斯

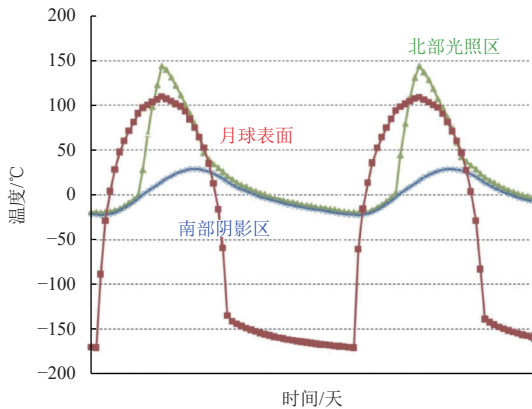


图 15 月球表面温度和塌陷熔岩管底部温度对比图^[24]

Fig. 15 Comparison of lunar surface temperature and the temperature at bottom of a collapsed lava tube^[24]

山洞穴底部无光照与有光照区的温度随时间的变化 (假设洞穴底部和表面都覆盖了一层约 2 cm 的风化层, 其反照率为 0.1 , 热发射率为 0.9)。

此外Theinat等^[63]也通过数值模拟等方法对地外熔岩管的稳定性进行了评估: 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; 而当顶板厚度大于 100 m 时, 即使宽度为 $1\text{ }000\text{ m}$ 的熔岩管也可以保持稳定状态 (图16)。

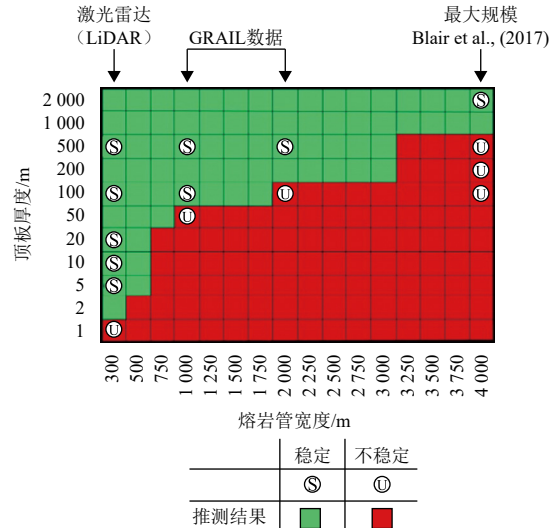


图 16 不同宽度和顶部厚度的熔岩管的稳定性^[63]

Fig. 16 Stability of lava tubes with different widths and top thicknesses^[63]

防止太空辐射和微陨石撞击。太空中的辐射主要为银河宇宙射线 (GCRs) 和太阳高能粒子 (SEP)。地球厚厚的大气层和强大的磁场可以保护生物免受高能粒子的伤害, 地球表面受宇宙射线辐射的平均剂量约为 $0.39\text{ mSv}\cdot\text{yr}^{-1}$ ^[64]。但在地球的磁场之外, 如何屏蔽来自太空的高能辐射是一个十分重要的问题。Naito等^[64]借助蒙特卡罗 (Monte Carlo) 模拟工具分别对月球表面和月球熔岩管内部的辐射剂量进行了估算 (图17), 图17表明熔岩管内部可以屏蔽大部分的宇宙射线辐射。月球表面的银河宇宙射线剂量高达 $416.0\text{ mSv}\cdot\text{yr}^{-1}$, 太阳高能粒子的剂量则达到 $2\text{ }190\text{ mSv/event}$; 相比之下, 月球熔岩管内的宇宙银河射线剂量要小于 $1\text{ mSv}\cdot\text{yr}^{-1}$ 。

除高能粒子轰击外, 宇航员地外活动时还需躲避微陨石撞击。根据Mandeville等^[65]的模拟研究发现, 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% , 而熔岩管的顶板厚达数米到数 10 m , 可以有效屏蔽微陨石的撞击。

可能赋存挥发分或水冰。水是最受关注的地外资源, 不仅是人类生存所必需, 还能作为推进剂的原料^[24], 在月球和火星上获取水被认为是人类地外长期可持续居住的关键^[60]。

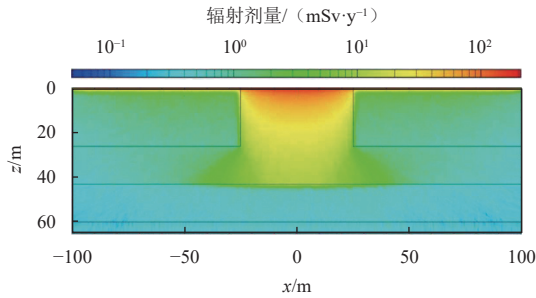


图 17 有垂直孔洞的熔岩管的宇宙射线辐射剂量分布^[64]

Fig. 17 Cosmic ray radiation dose distribution in a lava tube with vertical holes^[64]

地球上熔岩管内部的湿度普遍高于外部^[60,66], 水常以滴水、水池、溪流或冻结成冰的形式存在于洞穴之中^[18]。例如, 即使在地球最干旱的地区之一智利阿塔卡马沙漠, 也在地下洞穴中发现了水的痕迹^[67]。洞穴也有利于冰的沉积和保存, 在一些洞穴中即使地表温度提升到冰点之上, 洞内冰的保存依然不会受到影响^[68]。在中国镜泊湖熔岩管洞穴内部常年存在水冰。而在地外天体中, 火星熔岩管内部是最有可能存在保存水冰甚至液态水的地方。

观天探地的窗口。地下熔岩管洞穴除了本身记录着天体地质演化过程外, 还是建立地外天文台的独特场所。相较于地球, 在月球建造太空望远镜不但可以免受大气干扰和光污染^[69], 月球长达两周的黑夜也可以提供更加充足的观测时间。此外红外和射电观测仪器对温度和湿度的稳定性要求较高, 而熔岩管洞穴内的温度和湿度要比月球表面更加稳定^[18], 这有助于维持观测设备的性能; 洞穴也提供了额外的保护, 可以降低设备受到尘埃、辐射和其他自然环境因素的危害。

永久的地外庇护所。地外原位资源利用(In-Situ Resource Utilization, ISRU)和原位建造已经得到多国政府和机构的重视^[70]。从地球使用运载火箭向月球运输物资十分昂贵, 仅将1 kg的物资运送到月球表面就需要花费约120万美元^[71], 所以从长期规划来看月球原位资源利用十分重要。而地下熔岩管洞穴作为天然的庇护所, 可以减少从地球运送建造月球基地所需的各种大量组件的昂贵费用。目前各国已经制定了专门的熔岩管探测模拟方案, 利用机器人探明地下洞穴的结构从而方便未来人类驻扎。

风险与挑战。熔岩管天窗一般是由于构造运动或者撞击作用等导致熔岩管顶板坍塌所形成的, 在月球和火星上也不乏熔岩管发生整段坍塌的情况, 熔岩管稳定性和安全性的评估对于未来利用熔岩管作为地外庇护所至关重要; 此外熔岩管天窗坍塌后, 天窗底部

会堆积大量石块, 对于利用机器人来对熔岩管内部结构探测具有一定的挑战, 熔岩管天窗侧壁的陡峭以及锋利程度也会对探测工作造成影响; 探测机器人进入熔岩管洞穴内部后通讯可能会受到干扰, 尤其是在地球上进行远程操控, 通信会出现延迟, 在部署机器人进行熔岩管洞穴内部探测工作时需要重点考虑。

5 地面类比研究和模拟验证方法

5.1 地球熔岩管类比研究

在熔岩管探测的地面验证技术方面, 美国、欧洲、日本等国家和地区的研究人员已经在地球火山熔岩管区域开展了相关探测技术的地面验证实验。

在地外熔岩管探测中, 需要解决的重要问题之一是对地下熔岩管进行识别检测。Miyamoto等^[72]开发了一种新型的带屏蔽天线的频率步进探地雷达系统(steped-frequency ground penetrating radar), 它可以进行高空间分辨率和大穿透深度的测量; Olhoft等^[73]在夏威夷基拉韦厄(Kilauea)火山的Mauna Ulu火山口附近的熔岩管区域利用探地雷达开展了熔岩管测量验证, 包括表面反射测量, 熔岩管内的周向和纵向测量, 以及熔岩管和表面之间的透射测量; Rowell等^[74]利用探地雷达(100 Mhz)对美国爱达荷州南部的月球国家纪念碑(Moon National Monument)火山地区的地下熔岩管道进行了成像, 以确定探测熔岩管和其他熔岩流特征的方法的有效性, 用于了解火山喷发期间活跃的熔岩输送机制, 估计月球和火星的熔岩管形态(图18)。

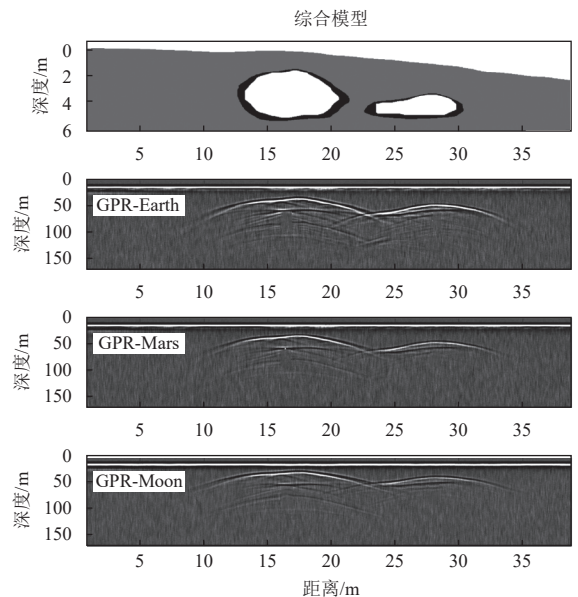


图 18 美国加州熔岩床国家纪念碑瓦伦丁洞穴的形态剖面及 GPR 测量模型^[75]

Fig. 18 Morphological section and GPR measurement model of Valentine Cave, Lava Beds National Monument in California, USA^[75]

虽然当前已开展了部分熔岩管空间展布探测方法的地面验证, 但其并未开展对熔岩管地面验证区域等遴选, 未能针对地外熔岩管的特征遴选出最为相似的熔岩管。另一方面, 上述工作主要验证探地雷达、激光扫描仪等单个设备, 这些现有成果尚不能直接用于地外熔岩管探测任务, 同时也尚未开展熔岩管探测方案的综合验证。

5.2 探测技术验证

熔岩管内部结构构建。对地外熔岩管洞穴探测中最核心的内容是获取熔岩管内部三维空间的地形地貌和物质成分。目前地外熔岩管洞穴探测主要是环绕天体低轨飞行的轨道器利用高分辨率全景相机和重力仪等设备对熔岩管周围环境特征进行探索。迄今为止, 尚未有国家对地外熔岩管进行原位探测。为了能够对熔岩管内部进行探测, 可采取洞穴智能机器人进入熔岩管内部, 自主探测熔岩管三维几何信息与物质成分。为了克服熔岩管中的低光照/无光照条件, 并实现精确的洞穴内部三维制图, 使用主动遥感的激光雷达 (LiDAR) 作为主要探测载荷是较被动光学手段更优的选择。

同时相比光学空间二维成像, 多光谱激光雷达可对熔岩管内部进行空间和光谱三维同时成像, 在一定的空间分辨率下, 获取宽谱段范围内岩石独特的连续特征光谱, 对岩石的精细分类和识别具有突出的优势。由于塌陷熔岩管内部恒定较低的温度和封闭的环境, 在此环境中可能存在水。根据水在波长532 nm附近具有强反射峰^[76]、在波长1 064 nm附近具有强烈的吸收峰等光谱特性, 研制对应波段的多光谱激光雷达载荷探测水也极为重要。

掩埋熔岩管探测模拟。地下熔岩管可能具有不同的形状, 如圆形、椭圆形、不规则形状等, 获知熔岩管不同形态规模在探地雷达上的反射信号将有助于对地下掩埋熔岩管的探测。

中国地质大学 (武汉) 行星科学研究所联合了多家单位对位于海口市的七十二洞、仙人洞和卧龙洞等多个熔岩管洞穴进行了以雷达为主的探测活动, 获得了多个熔岩管在雷达信号上的显示图像, 并根据测量到的熔岩管形态参数对海口市多个熔岩管进行三维可视化处理以及壁面计算等工作 (图19), 为月球、火星等类地天体上熔岩管的研究提供类比参考和实验支撑。

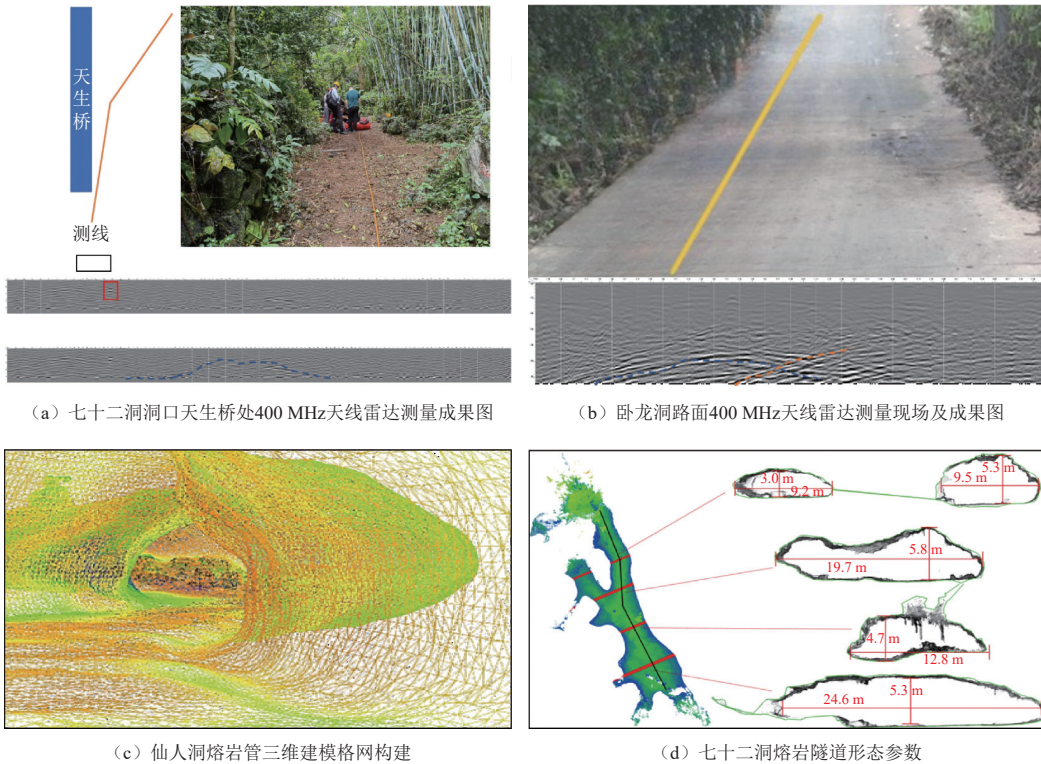


图 19 海口熔岩管洞穴雷达探测及三维可视化^[77]

Fig. 19 Haikou lava tube radar detection and three-dimensional visualization^[77]

环境因子测量。地球物理勘探方法是探测未知地域地质构造的核心手段。面对地外熔岩管探测中存在

的地形复杂、难接触等多种约束条件, 磁法勘探可用于研究熔岩管的结构。

马里兰大学帕克分校 (The University of Maryland), 美国国家航空航天局 (National Aeronautics Space Administration, NASA) 和北亚利桑那大学 (Northern Arizona University) 联合开展了地球熔岩管实验, 通过磁调查和激光雷达映射熔岩管的结构和空间范围^[78], 分析揭示了熔岩管磁异常强度和熔岩管的深度、横截面积等几何比例之间的线性相关性。

天窗坑壁采样。熔岩管洞穴天窗岩壁陡峭, 很好地暴露了表层土壤和下部基岩的原始剖面结构, 是获取多种科研样品的绝佳窗口。同时由于土壤层结构松散, 而基岩强度很大, 不管是无人或者有人开展洞穴岩壁的采样都存在一定的困难, 需要进行系统的技术攻关和验证。

考虑到近乎垂直的天窗岩壁以及数10 m的深度, 系留系统 (Tethered Systems) 是迄今为止研究最广泛的^[27]。虽然熔岩管天窗的边缘并不锐利, 但其倾斜的漏斗状以及表面松散的风化层使得任何接触式探测都有可能造成机械不稳定, 从而导致上覆沙尘崩塌或者落石, 对探测造成巨大影响^[79]。而系留系统主要由起重机和微型漫游机器人组成, 通过起重机的吊臂将微型漫游机器人缓缓放入天窗中, 从而避免与坑壁发生不必要的接触。为此NASA在MoonDiver任务中提出了一种系留两轮漫游车Axel, 旨在对月球熔岩管进行探测^[80]。

6 结 论

本文总结了熔岩管的形成机制及目前主要的探测手段, 并详细介绍了熔岩管在地球、月球和火星上的主要分布区域, 最后具体探讨了开展熔岩管探测的科学意义以及地球类比研究对于理解地外熔岩管的重要性。

目前虽然已经在月球上查证了10多个直径数10 m的熔岩管天窗, 但它们的地下结构及规模尚不清楚。此外月球上还可能直径更小和易于进入的熔岩管洞穴。后续月球探测应当将熔岩管的分布、埋深和空间延伸作为任务目标, 并将进入熔岩管内部进行探测和取样作为重点, 实现人类首次对地外天体的系统探测, 获得月球火山活动和后期改造多方面的重大科学突破, 为未来利用月球熔岩管奠定基础。对于火星表面的熔岩管, 对其内部环境的研究将对地外生命探测具有重大科学意义, 同时也是未来火星基地建设需要优先开发的区域。

参 考 文 献

- [1] USGS. What is a Shield Volcano? [EB/OL]. (2023-09-02). <https://www.usgs.gov/articles/000/shield-volcanoes.htm>.
- [2] LEDERBERG J. Exobiology: approaches to life beyond the Earth[J]. *Science*, 1960, 132(3424): 393-400.
- [3] LIM S, PRABHU V L, ANAND M, et al. Extra-terrestrial construction processes—Advancements, opportunities and challenges[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(7): 1413-1429.
- [4] WHITE F. The overview effect: space exploration and human evolution[M]. [S. l.]: AIAA, 1998.
- [5] RAPP D. Use of extraterrestrial resources for human space missions to Moon or Mars[M]. New York: Springer, 2013.
- [6] DING J, XIE G, GUO L, et al. Karst cave as terrestrial simulation platform to test and design human base in lunar lava tube[J]. *Space: Science & Technology*, 2022(1): 489-499.
- [7] STRAUS L G. Caves: a palaeoanthropological resource[J]. *World Archaeology*, 1979, 10(3): 331-339.
- [8] ROKSANDIC M, MIHAILOVIĆ D, MERCIER N, et al. A human mandible (BH-1) from the Pleistocene deposits of Mala Balanica cave (Sićevo Gorge, Niš, Serbia)[J]. *Journal of Human Evolution*, 2011, 61(2): 186-196.
- [9] BARRETT L, GAYNOR D, RENDALL D, et al. Habitual cave use and thermoregulation in chacma baboons (*Papio hamadryas ursinus*)[J]. *Journal of Human Evolution*, 2004, 46(2): 215-222.
- [10] HARUYAMA J, HIOKI K, SHIROA M, et al. Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(21): L21206: 1-5.
- [11] CUSHING G E, TITUS T N, WYNNE J J, et al. THEMIS observes possible cave skylights on Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(17): 17201: 1-5.
- [12] VOCK A, NILSSON T. Holistic outpost design for lunar lava tubes[J]. *ArXiv Preprint*, 2022(2): 1-12.
- [13] GREELEY R. Lava tubes and channels in the lunar Marius Hills[J]. *The Moon*, 1971, 3(3): 289-314.
- [14] MAGHAREH A, GOMEZ D, DYKE S J, et al. Resilience for permanent extraterrestrial habitats[C]//Proceedings of the 48th Lunar and Planetary Science Conference. Texas: LPI, 2017: 19-23.
- [15] DYKE S J, BOBET A, RAMIREZ J, et al. Resilient extraterrestrial habitat engineering[C]//Proceedings of 49th Annual Lunar and Planetary Science Conference. Texas: LPI, 2018 (2083): 2882.
- [16] PERKINS S. Lava tubes may be havens for ancient alien life and future human explorers[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(30): 17461-17464.
- [17] POPA R, SMITH A R, POPA R, et al. Olivine-respiring bacteria isolated from the rock-ice interface in a lava-tube cave, a Mars analog environment[J]. *Astrobiology*, 2012, 12(1): 9-18.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] GREELEY R. Lava tubes in the solar system[C]// Proceedings of Sixth international symposium on vulcanospeleology. Hilo, Hawaii: [s. n.], 1991: 1-8.
- [21] 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.
- [22] VON EHRENFRIED M D, VON EHRENFRIED M D. Terrestrial cave and lava tube research[J]. From Cave Man to Cave Martian: Living in Caves on the Earth, Moon and Mars, 2019: 49-81.
- [23] CRUIKSHANK D P, WOOD C A. Lunar rilles and Hawaiian volcanic features: Possible analogues[J]. *The Moon*, 1972, 3(4): 412-447.
- [24] 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 LONG, HUANG JUN, ZHAO JIAWEI, et al. The significance and preliminary ideas of lunar lava tube cave detection[J]. *Science in China: Physics, Mechanics, Astronomy*, 2018, 48(11): 86-99.
- [25] CALVARI S, PINKERTON H. Formation of lava tubes and extensive flow field during the 1991–1993 eruption of Mount Etna[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B11): 27291-27301.
- [26] BLAIR D M, CHAPPAZ L, SOOD R, et al. The structural stability of lunar lava tubes[J]. *Icarus*, 2017, 282: 47-55.
- [27] WHITTAKER W. Technologies enabling exploration of skylights, lava tubes and caves[C]//*Astrobotic Technology*. Pittsburgh: [s.n.], 2012: 1-51.
- [28] MELOSH H J, IVANOV B A. Impact crater collapse[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1999, 27(1): 385-415.
- [29] THURBER C H, SOLOMON S C. An assessment of crustal thickness variations on the lunar near side-Models, uncertainties, and implications for crustal differentiation[C]//*Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: [s. n.], 1978: 1-17.
- [30] BILLS B G, FERRARI A J. A lunar density model consistent with topographic, gravitational, librational, and seismic data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(8): 1306-1314.
- [31] 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.
- [32] 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): 1-7.
- [33] 林红磊, 丁春雨, 许学森, 等. 月球就位光谱和雷达遥感科学研究进展[J]. *地球与行星物理论评*, 2021, 52(4): 373-390.
- LIN HONGLEI, DING CHUNYU, XU XUESEN, et al. Progress in scientific research on lunar placement spectroscopy and radar remote sensing[J]. *Reviews of Earth and Planetary Physics*, 2021, 52(4): 373-390.
- [34] 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(02): 228-242.
- DING C Y, FENG J Q, ZHENG L, et al. Application of radar detection technology in lunar exploration[J]. *Astronomical Research and Technology*, 2015, 12(02): 228-242.
- [35] 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): 1-9.
- [36] DING C, FENG J Q, ZHENG L, et al. A review of applications of radar-detection techniques in lunar explorations[J]. *Astronomical Research & Technology-Publications of National Astronomical Observatories of China*, 2015, 12(2): 228-242.
- [37] QIU X, DING C. Radar observation of the lava tubes on the Moon and Mars[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(11): 2850.
- [38] 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: 163-176.
- [39] BUNNELL D. Caves of Fire: inside america's lava tubes[M]. USA: National Speleological Society, 2008: 144.
- [40] ALLRED K, ALLRED C. Development and morphology of Kazumura cave, Hawaii[J]. *Journal of Caves and Karst Studies*, 1997, 59: 67-80.
- [41] 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): 1-39.
- [42] WAGNER R V, ROBINSON M S. Occurrence and origin of lunar pits: observations from a new catalog[C]//*Proceedings of 52nd lunar and planetary science conference*. Online: LPI, 2021 (2548): 2530.
- [43] GLAZE L S, ANDERSON S W, STOFAN E R, et al. Statistical distribution of tumuli on pahoehoe flow surfaces: analysis of examples in Hawaii and Iceland and potential applications to lava flows on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005: 1-14.
- [44] WERNER S C. The global martian volcanic evolutionary history[J]. *Icarus*, 2009, 201(1): 44-68.
- [45] PETERS S I, CHRISTENSEN P R, CLARKE A B. Lava flow eruption conditions in the Tharsis volcanic province on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(7): 1-29.
- [46] SAM L, BHARDWAJ A, SINGH S, et al. Small lava caves as possible exploratory targets on Mars: analogies drawn from UAV imaging of an Icelandic lava field[J]. *Remote Sensing*, 2020: 1-30.
- [47] BAIONI D, HAJNA N Z, WEZEL F C. Karst landforms in a Martian evaporitic dome[J]. *Acta carsologica*, 2009, 38(1): 175-184.
- [48] ZHAO J, HUANG J, KRAFT M D, et al. Ridge-like lava tube systems in southeast Tharsis, Mars[J]. *Geomorphology*, 2017, 295: 831-839.
- [49] CUSHING G, OKUBO C. Description of the Mars Global Cave Candidate Catalog (MGC3) PDS Archive [J]. 2017,3: 3708.
- [50] FASSETT C I, KADISH S J, HEAD J W, et al. The global population of large craters on Mercury and comparison with the Moon[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011: 1-6.
- [51] SPUDIS P D, GUEST J E. Stratigraphy and geologic history of Mercury[J]. *Mercury*, 1988,5: 118-164.
- [52] GILLIS-DAVIS J J, BLEWETT D T, GASKELL R W, et al. Pit-floor craters on mercury: evidence of near-surface igneous activity[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 285(3-4): 243-250.
- [53] DAVEY S C, ERNST R E, SAMSON C, et al. Hierarchical clustering of pit crater chains on Venus[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2013, 50(1): 109-126.
- [54] MELVILLE G P. Lava tubes and channels of the Earth, Venus, Moon and Mars[J]. 1994(7): 1-175.
- [55] VEEDER G J, DAVIES A G, MATSON D L, et al. Io: Heat flow from small volcanic features[J]. *Icarus*, 2015, 245: 379-410.
- [56] DAVIES A G, KESZTHELYI L P, WILLIAMS D A, et al. Thermal signature, eruption style, and eruption evolution at Pele and Pillan on Io[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E12): 33079-33103.
- [57] XIAO L, HUANG J, XIAO Z, et al. Volcanism in the Solar System[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023(1): 1-22.
- [58] XIMENES S W, ELLIOTT J O, BANNOVA O. Defining a mission architecture and technologies for lunar lava tube reconnaissance[M]The

- 5th NASA/ASCE Workshop, California: Aerospace Division of ASCE, 2012: 344-354.
- [59] GOLDBERG P, SHERWOOD S C. Deciphering human prehistory through the geoarcheological study of cave sediments[J]. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews: Issues, News, and Reviews*, 2006, 15(1): 20-36.
- [60] LEE P. Habitability of lava tubes on the Moon and Mars: lessons from Earth[J]. 2018, 10: 1-17.
- [61] MARI N, GROEMER G, SEJKORA N. Potential futures in human habitation of martian lava tubes[J]. *Mars: A Volcanic World*, 2021(5): 279-307.
- [62] 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.
- [63] THEINAT A K, MODIRIASARI A, BOBET A, et al. Lunar lava tubes: Morphology to structural stability[J]. *Icarus*, 2020, 338: 113442.
- [64] 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.
- [65] MANDEVILLE J C, BARITEAU M. Cosmic dust and micro-debris measurements on the MIR space station[J]. *Advances in Space Research*, 2001, 28(9): 1317-1324.
- [66] PRESCOTT R D, ZAMKOVAYA T, DONACHIE S P, et al. Islands within islands: bacterial phylogenetic structure and consortia in Hawaiian lava caves and fumaroles[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 1-20.
- [67] WYNNE J J, TITUS T N, DIAZ G C. On developing thermal cave detection techniques for Earth, the Moon and Mars[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 272(1-2): 240-250.
- [68] OHATA T, FURUKAWA T, HIGUCHI K. Glacioclimatological study of perennial ice in the Fuji ice cave, Japan. Part 1. Seasonal variation and mechanism of maintenance[J]. *Arctic and Alpine Research*, 1994, 26(3): 227-237.
- [69] BANDYOPADHYAY S, LAZIO J, STOICA A, et al. Conceptual ideas for radio telescope on the far side of the Moon[C]//Proceedings of 2018 IEEE Aerospace Conference. [S. l.]: IEEE, 2018: 1-10.
- [70] ELLERY A. Sustainable in-situ resource utilization on the moon[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 184: 104870.
- [71] JONES H W. Much lower launch costs make resupply cheaper than recycling for space life support[C]//Proceedings of International Conference on Environmental Systems (ICES-2017). [S. l.]: ICES, 2017: 1-16.
- [72] 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(2): 1-5.
- [73] OLHOEFT G R, SINEX D B, SANDER K A, et al. Hot and cold lava tube characterization with ground penetrating radar[C]//Proceedings of Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar. [S. l.]: SPIE, 2000, 4084: 482-487.
- [74] ROWELL C R, PIDLISECKY A, IRVING J D, et al. Characterization of lava tubes using ground penetrating radar at Craters of the Moon National Monument[J]. Idaho, USA: CREWES Research Report, 2010, 22: 1-18.
- [75] WHELLEY P, CROWN D A, BELL E, et al. Considerations for lava tube exploration[C]//Proceedings of AGU Fall Meeting Abstracts. 2020, 2020: P063-04.
- [76] BUTT M A, FOMCHENKOV S A, KHONINA S N. Modeling of a narrow band pass filter for Bathymetry light detection and ranging (LIDAR) system[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 917(6): 062004.
- [77] LI J, YANG B, CHEN Y, et al. Evaluation of a compact helmet-based laser scanning system for aboveground and underground 3d mapping[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2022, 43: 215-220.
- [78] BELL JR E, SCHMERR N, YOUNG K, et al. Field mapping and modeling of terrestrial lava tube magnetic anomalies as an analog for lunar lava tube exploration and prospecting[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, 127(6): 1-26.
- [79] MIAJA P F, NAVARRO-MEDINA F, ALLER D G, et al. RoboCrane: a system for providing a power and a communication link between lunar surface and lunar caves for exploring robots[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 192: 30-46.
- [80] KERBER L, NESNAS I, KESZTHELYI L, et al. Moon diver: A discovery mission concept for understanding the history of the mare basalts through the exploration of a lunar mare pit[J]. *New Views of the Moon 2-Asia*, 2018, 2070 603: 1.

作者简介:

余星阳(2000-),男,硕士生,主要研究方向:行星地质学。

通信地址:武汉市洪山区鲁磨路388号,中国地质大学(武汉)地球科学学院(430074)

E-mail: xingyangshe@cug.edu.cn

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(武汉)地球科学学院(430074)

E-mail: longxiao@cug.edu.cn

Research Status of Lava Tube Exploration in the Solar System

SHE Xingyang¹, WANG Jiang¹, HUANG Jun¹, ZHAO Jiannan^{1,2}, ZHAO Jiawei¹, XIAO Long¹

(1. Planetary Science Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Key Laboratory of Geological Survey and Evaluation of Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: Lava tubes, formed by the flow and cooling processes of volcanic lava, have been discovered on the surface of several heavenly bodies in the solar system and have become a window into the volcanic activity and thermal history of Earth-like planets. At the same time, lava tubes have extremely important scientific and engineering applications because of their thermostatic and radiation-proof interiors, which are also natural shelters for future human exploration activities or extraterrestrial survival. In this paper, the formation mechanism, detection and identification methods of lava tubes, and the distribution of lava tubes on the surface of different heavenly bodies in the solar system were summarized, the scientific significance and application prospects of lava tube detection were discussed. It was proposed that the Earth's lava tubes are the most important objects for planetary lava tube analogical studies and detection, and the theory and methodology of the analogical studies of lava tubes were introduced, to provide theoretical basis and simulation experimental support for future exploration of extraterrestrial lava tubes.

Keywords: lava tubes; volcanic activity; solar system; planetary exploration

Highlights:

- The formation of extraterrestrial lava tubes is closely related to the volcanic activity of celestial bodies.
- Extraterrestrial lava tubes can currently be identified based on optical terrain image recognition, radar, gravity anomalies and thermal anomalies.
- Extraterrestrial lava tubes are not only natural shelters, but may also hold the remains of ancient life.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]