

中国科学基金

Bulletin of National Natural Science Foundation of China

ISSN 1000-8217, CN 11-1730/N

《中国科学基金》网络首发论文

题目：月球内部圈层结构探测及关键技术挑战
作者：张金海，林杨挺，姚振兴
DOI：10.16262/j.cnki.1000-8217.20221208.009
收稿日期：2022-03-03
网络首发日期：2022-12-10
引用格式：张金海，林杨挺，姚振兴．月球内部圈层结构探测及关键技术挑战[J/OL]．中国科学基金．<https://doi.org/10.16262/j.cnki.1000-8217.20221208.009>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

• 专题:双清论坛“月球科研站的关键科学问题” •

月球内部圈层结构探测及关键技术挑战

张金海* 林杨挺 姚振兴

中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

[摘要] 地外天体的内部结构是了解其自身演化奥秘的钥匙,能够为人们深入认识地球自身的演化规律提供重要参考。地外天体内部结构探测是光学、遥感、采样返回等深空探测任务的重要补充和拓展。阿波罗时代的月震仪为揭示月球内部的奥秘做出了卓越贡献,然而,受到当时硬件水平的限制,有关月球内部圈层结构的探测结果至今仍然存在很大争议,严重制约了月球科学的发展。我国嫦娥七号任务拟对月球南极进行探测,随后逐步建立月球科研站,期间将布设我国第一台月震仪,以探测月球内部圈层结构及状态。本文阐述了月球内部结构探测的重要意义,列举了月震仪研制和布设可能面临的困难,分析了潜在问题的应对措施,提出了后续科学研究需要关注的问题,并给出了系列建议。本文旨在激发更多学者关注和从事月球及行星内部结构探测事业,以促进我国在相关研究领域的稳步前进,争列国际学术前沿。

[关键词] 月球内部结构探测;月震仪;国际月球科研站;嫦娥七号

1 月球内部圈层结构研究的意义

类地行星的内部圈层结构与早期岩浆冷凝、密度分异和发电机等重要演化过程密切相关。探测类地行星内部圈层结构能够更加深入的理解星球早期的演化过程,了解太阳系类地行星普遍的演化规律,并从比较行星学的观点更好地审视地球自身的演化历史、现今状态和未来宿命。类地行星内部圈层结构探测是深空探测任务的重要组成部分,也是当前和未来的主要探索方向和研究领域之一^[1-4]。

月球是地球的天然卫星,也是距离地球最近的天体,因此,月球内部结构探测是人类深入认识类地行星结构的第一步。大撞击假说认为,地月体系的形成源于古地球与行星的猛烈撞击。换言之,地球和月球有共同的时间起点,但二者的演化进程却完全不同:一个至今仍然生机勃勃,而另一个却早已一片死寂。是什么导致二者具有完全不同的演化路径?除了质量和成分差异外,还有哪些关键因素在起作用?这个问题的解答需要从内部圈层结构出发开展更为深入的探测和研究。

在太阳系所有类地行星的卫星中,只有月球的



张金海 中国科学院地质与地球物理研究所研究员,地震探测技术学科组组长,研究方向为行星内部结构探测。作为骨干成员参与我国探月工程和首次火星探测任务,完成了嫦娥三号、嫦娥四号和天问一号巡视雷达探测的数据处理和成像工作。以第一或通讯作者在 *Nature*、*National Science Review*、*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 和 *Nature Astronomy* 等期刊上发表论文 40 余篇,主持嫦娥四号专项基金,主持嫦娥七号月震仪研制。曾获傅承义青年科技奖、中国科学院“院长优秀奖”和“青年创新促进会优秀会员”等称号。

体积和质量与其所围绕的行星相比十分可观。因此,月球自诞生以来一直控制着地球的潮汐作用,其作用甚至远高于太阳。据理论推算,月球的早期轨道距离地球更近,因此,其对地球的影响应该较现今更为显著。月球和地球之间的显著引力作用对于各自的演化过程中究竟起到了怎样的作用,至今仍然是未知的。月球已经被地球潮汐锁定,这使得月球永远以正面朝向地球,而且正面是以玄武岩为主的月海盆地,而背面则是斜长石为主的月陆高地。重力探测结果表明,月球背面的月亮厚度几乎是正面

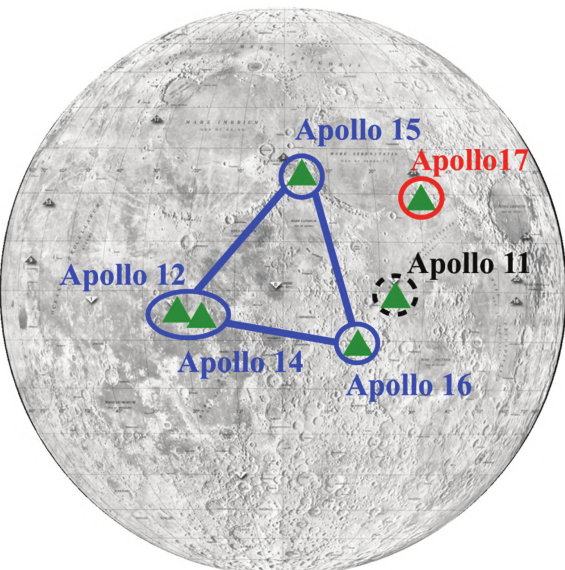


图 1 阿波罗月面着陆点的位置分布图^[6]

的两倍^[5]。月球正面和背面更深的月幔是否存在显著的二元结构仍然是未解之谜。破解这些谜团的唯一手段是对月球内部圈层结构进行全面细致的探测,从而更加深刻地理解地月体系的早期演化进程,掌握地球演化早期的外部控制因素。

2 月球内部圈层结构的研究现状及进展

2.1 地球内部结构研究十分深入,但月球内部圈层结构研究不确定性强

科学家通过地震记录已经较全面地掌握了地球内部的圈层结构,对各层的深度和物性状态等也有

很好的约束,甚至对很多地球内部的精细结构(如地幔柱、D”层等)也有较深的认识。然而,我们对其它行星的内部结构还知之甚少。举世瞩目的阿波罗计划从第一次任务起,每次登月都安装了月震仪,最终有四台月震仪形成了上千公里间距的月面台阵^[6, 7](如图 1 所示),并且持续工作了近 8 年,记录到了上万余次的月震和陨石撞击等事件,这些珍贵的记录至今仍是研究月球内部结构和月震的关键资料。但是,由于当时硬件水平的限制,阿波罗月震仪的本底噪音很大且动态范围很小,无法检测到可靠的来自月球深部微弱的关键反射震相,这使得月球内部各圈层的深度和尺寸存在很大的不确定性^[8],已有的研究成果尚未形成广泛的科学共识,甚至存在严重的学术争议(如图 2 所示),尤其是对于月核的有无及物性状态仍然缺乏有力的直接判据^[9, 10],这严重影响了对于月球早期形成和演化的深入认识,制约了月球科学研究的进展。

2.2 月球内部圈层结构是新时期月球探测的重要内容,重大成果可期

人类对月球的科学探索历程大致可以分为三个阶段:(1) 以光学望远镜和相机为主要工具的月球形貌与构造探测;(2) 以岩石地球化学为主要手段的月表物质成分分析和演化过程反演;(3) 以雷达和月震仪为主要工具的内部结构探测。前两个阶段的研究较为深入,但内部结构探测由于各种条件制约,进展相对缓慢。

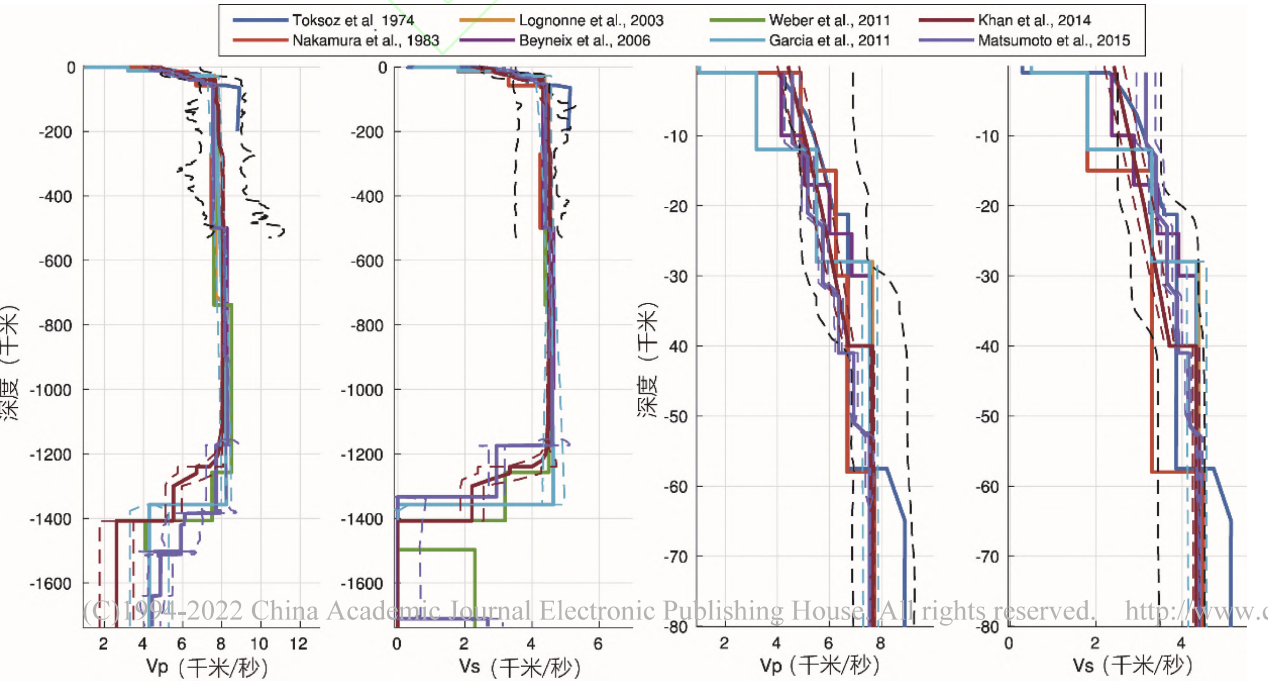


图 2 月球速度模型比较^[8]

基于轨道器的雷达探测(如美国的阿波罗 17 号 和日本的月亮女神号)可以对全月球的浅表层进行 成像^[11],但其频率较低,因而分辨率也较低,仅能分 辨几百米至公里级的层位^[12];此外,由于雷达波的 衰减严重,穿透深度有限,只能探测一公里深度的地 层,无法探测更深部的结构。我国的嫦娥三号和四 号在国际上率先实现了基于巡视器的月面雷达探 测^[13-15],其分辨率为米级乃至亚米级,但其探测范围 受到行驶路径的约束,空间覆盖有限,穿透深度仅为 数十米至数百米^[16, 17],无法探测一公里以下的深部 结构。

月震仪能够探测到来自月球深部的月震信号, 但其设计和布设均严重依赖于工程能力:(1) 必须 基于软着陆才能在月面安装月震仪;(2) 月震仪必 须能够适应月球真空、强辐照和极端温差等恶劣条 件;(3) 月震仪必须能够工作数年才能观测到足够 数量的天然月震事件。到目前为止,只有美国、苏联 和中国实现了月面软着陆,但只有阿波罗任务实现 了月震仪布设和月面组网^[6]。虽然国际上的月球探 测任务自阿波罗任务以来几乎从未间断,比如遥感 探测^[11]、轨道重力探测、巡视探测和采样返回 等^[15, 18, 19],但宽频带月震仪由于种种原因一直未能 入列。

阿波罗任务取得了一系列举世瞩目的重大突 破,但由于原始数据质量的限制并未实现月球内部 结构探测的理想目标^[10, 20]。不同研究组获得的月 壳厚度从十几公里到约 60 公里不等,月核半径则从 0 到 350 公里左右不等,二者均存在很大的不确定 性,如图 2 所示。嫦娥工程是阿波罗之后重大的系 列探月任务,取得了丰硕的探测成果,特别是在浅部 结构探测和返回样品精确定年等方面,但仍未能实 现月球内部结构探测的重任。月球内部结构探测是 未来月球探测和科学研究的突破方向,将产出系列 重大成果。

2.3 月球背面和两极是未来探测的热点区域,内部 结构是探测的重点

阿波罗任务及嫦娥三号和五号的着陆点主要集 中在月球正面的中低纬度区域,嫦娥四号首次实现 了月球背面软着陆探测。可见,月球背面是探测的 薄弱区,两极则是探测的空白区。月球背面的南 极-艾肯盆地是月球最大的撞击坑,因而是窥探月 球内部结构和物质成分的理想场所。南北极是水冰 的潜在富集地,也是同时监测月球正面和背面月震 的理想区域。我国的嫦娥七号拟着陆于月球南极,

计划开展着陆探测、巡视探测和飞掠探测,并将在着 陆器上搭载一台宽频带月震仪。后续的月球科研 站拟在月面建设科学实验设施,支持开展长期、较 大规模的月球轨道与月面探测、天文与对地观测、 基础科学实验、资源开发利用和技术验证等^[19]。 该任务已将重、磁、电、震等地球物理长期监测列 入规划,有望实现多物理场同时期、同台址联合观 测,有利于提高对地下结构和物性的综合约束力, 降低结构反演的多解性,从而获得月球科学认识上 的重大突破。

2.4 火星内部结构探测取得重大突破,月球内部结 构探测的时机已经到来

InSight 火星探测计划从 2018 年降落至今已经 观测到了一系列的火星地震事件^[21-25]。研究人员已 经利用这些事件对火星的核幔壳深度和物性等提供 了新的约束^[26-28]。随着数据的累积,有望获得更多的 突破性研究进展。

我国尚无自主开展地外星体地震波监测的工程 和研究经验。目前,我国在自主研发地面和海底 地震仪方面已经取得了重大进展^[29],并在天然地 震台网布设和海底地震监测等方面取得了较为广 泛的应用,这为研制月震仪奠定了坚实的技术基 础。通过对仪器设备和数据处理的针对性攻关,有 能力在不远的将来进行自主的地外星体监测和研 究。将首台月震仪布设到月球是深化我国深空探 测成果的重要举措,随后的月面组网则有望进一步 扩大成果产出,引领月球科学前沿,因而具有重要 意义。

3 探测月球内部圈层结构的关键科学问题 及技术挑战

3.1 关键科学问题

与月球内部圈层结构相关的关键科学问题可 大致归结为如下几点:(1) 月壳的深度及空间分布 规律;(2) 月球正面和背面的内部圈层结构差异及 成因;(3) 月球二元结构与内部圈层结构的形成有 何内在联系;(4) 月球是否有固态月核和液态外 核,如果有,其直径分别是多少;(5) 月球内部是否 存在部分熔融带,分布在什么深度范围;(6) 月球 内部圈层结构与月球发电机的起始和关闭有何关 联。

月球内部圈层结构的形成和演化与月球的地质 演化过程密切相关,深入研究月球的内部圈层结构 能够对其它学科的发展起到重要的约束和启示作

用,是推动月球科学向前发展的重要举措。

3.2 月震观测所面临的挑战

由于月球经历了长期的小行星和陨石撞击,导致月面被巨厚的月壤和溅射物所覆盖。嫦娥三号和四号的探测结果表明,月球正面的月壤和溅射物厚度可达数米^[16],而月球背面的月壤厚度高达 12 米,下伏的溅射物厚度可达 30 余米,更深处的玄武岩和溅射物可延伸至 450 米乃至更深^[17]。月球的浅部结构对于月震波的散射作用显著,导致月震波的尾波持续时间可达 3 小时之久,容易掩埋后续震相,这对于探测来自深部的微弱信号极其不利,导致震相时拾取工作十分困难。在无人探测阶段^[15],月面挖掘的工程实现难度大,而且巨厚的月壤和溅射堆积导致我们无法将月震仪布设到理想的基岩上。总之,月球浅部结构极大增加了月震仪布设和震相识别的难度。此外,每次探测任务都要兼顾和协调各方面的需求,导致着陆区选址可能对于月震仪而言未必是最佳的;尽管如此,如何在现有条件下充分论证好单台月震仪的布设仍然意义重大;同时,需要设法增加台址数量,形成分布合理的月震台网,为取得重大学术突破奠定坚实的数据基础。

3.2.1 月震仪的布设困难重重

月震仪是振动敏感型仪器,如果将月震仪布设在着陆器舱内的甲板上,它会受到着陆器内部振动的强烈干扰,还会受到着陆器自身对月面振动滤波效应的严重影响,因而很难检测到微弱的月震信号。因此,必须将月震仪布设在月面之上才能更好的实现月面耦合及高灵敏度探测。然而,月壤十分疏松,难以对月震仪进行月面耦合加固。此外,在无人布设条件下,很难实现挖掘和埋置,只能将月震仪像火星地震仪那样布设在地面之上,通过重力实现月面耦合。将月震仪布设在着陆器底部可以显著降低布设难度,但可能会面临着着陆器内部机构运动噪音的干扰;此外,着陆器反推火箭可能会在月面形成局部凹坑,这使得仪器在布设时可能会倾斜甚至倾覆,无法处于最佳的观测姿态。为此,月震仪在设计过程中必须充分考虑这些外部因素,使得仪器能够尽可能自主布设,并在各种外部条件下平稳工作。

3.2.2 月面生存条件极其严苛

月球表面的温度最高可达+123℃,而最低温度可低至-233℃,昼夜温差约 300℃^[30],这对于仪器设计提出了极高的要求。因此,月震仪的温控措

施至关重要,必须同时具备高温条件下散热和低温条件下保温的功能,务必使仪器始终处于合适的工作或存储温度范围内,才能实现持续稳定观测。在低纬度地区,月夜和月昼的时间约为 14 天,此时月夜供电是较为可行的,即月震仪可以通过电力实现自身温度调节,甚至开展月震监测;然而,在南北极地区,月夜长达 200 天,这使得太阳能发电及电能存储技术都面临极大挑战,月夜供电难度极大,如何在长时间无供电的条件下实现月震仪的安全存储是首要问题。根据嫦娥三号和四号的工程经验,可以采用同位素热源确保设备在长期低温和断电条件下不低于元器件的最低生存温度;然而,如何确保电路在正常工作时的热耗与同位素热源共同作用下仪器的上限温度不高于元器件的生存温度,成为了新的技术挑战。

3.2.3 需要长期服役累计观测月震

根据阿波罗月震检测的结果,月球上共记录到各种类型的震动事件 13058 次^[6]。为了能够积累尽可能多的月震事件,要求月震仪能够在极端条件下可靠工作尽可能长的时间,比如 8 年甚至更久,以增加单台有效记录总量及多台联合工作的有效时长。在首台月震仪单独工作的条件下,如何确保月震仪的微弱信号检测能力是观测远处月震的关键,为此,在仪器设计上务必重点关注低频带范围的性能和本底噪声,以有效监测来自月球内部圈层结构的微弱反射信号。然而,在月球极其严苛的外部条件下,如何实现月震仪的长期稳定持续工作,是摆在月震仪研发人员面前的最大难题;如何在此基础上保持与地面仪器相当的频带范围和灵敏度经久不变在技术上而言异常艰难。

3.2.4 单台月震仪数据解译

在第二台月震仪布设之前,首台月震仪必将单独工作一段时间。因此,如何从单台数据中提取微弱信号并用于月球内部的结构成像至关重要。到目前为止,针对单台地震仪的数据处理已经有了一些经验^[31-33]。这些工作能够为月球单台地震仪的数据解译提供重要的参考。月球相较火星的最大优势是没有气压变化和风的影响,因此,有望获得噪音水平更低的原始观测数据;但是,月震波的散射更加严重,尾波十分发育,震相拾取等工作较火星数据更具挑战。

3.2.5 月震定位与标定

在任务执行的起始阶段,只有单台月震仪工作,无法通过三台定位法实现准确的月震定位。此外,

由于月震仪在布设的过程中缺乏对仪器姿态的精确约束,因此,在布设后通过外部条件迅速感知月震仪的自身方位至关重要。利用已知的振动事件(火箭残骸坠落、巡视器行进和主动震源等)能为月震仪的自身方位感知提供有效约束,也有助于确立着陆区的宏观速度模型,系统提升月震的定位精度。然而,巡视器行走时产生的振动和月面主动激发震源的能量较小,无法实现远场月震的标定。利用陨石撞击带来的巨大能量实现远场月震标定,但这需要精准捕捉撞击的位置和时间,需要月球轨道光学观测或者地面光学观测的强有力支持。

4 月球内部圈层结构的研究建议

4.1 高精度月震仪长期服役及多点布设是根本前提

月震监测必须以获取足够多数量的高质量月震事件为前提。在月震探测任务执行的前期,只有一台月震仪开展工作,因此,其可识别月震的区域相对有限,必须通过增加持续观测时间来积累更多的月震数据。当前月震仪的灵敏度较阿波罗时期有质的提升,因此,单台月震仪仍能检测到数量十分可观的震级更小的月震事件,其数量将远多于阿波罗时期的检测数量。未来需要通过增加多台仪器协同组网以大幅度提升月震监测能力,提高方位角分辨率及月震定位精度,从而不断促进月球科学数据的科学产出。

建议加强支持月震仪频带宽度和本底噪声等性能指标提升及新型月震仪研发相关的仪器研制类项目,为显著提升未来月震仪的性能做好技术研发、验证和储备。

4.2 加强信号处理及数值模拟力度是重要手段

除了在硬件上确保月震仪具备高性能之外,还需要在后处理方面持续提升信号识别和增强能力,以发掘更多的有效信号,比如:利用自相关技术从尾波中提取一次波,多台之间基于地震干涉提取关键震相,基于模板匹配或者机器学习等手段识别更多的月震事件。研究地球内部结构的方法也将为研究月球内部结构奠定坚实基础,特别是基于单台或少数地震台站条件下开发的方法,因为在较长的一段时间内月震观测都会以单台或双台工作模式为主。为此,基于火星单台地震仪开发的方法更是直接为月震信号的应用提供了重要参考。

数值模拟是深入认识月震波传播规律的重要手段,需要不断提升强散射条件下月震波的模拟能力,

认识月震波的传播特征和衰减规律,从而为深入认识深部的圈层结构提供重要支撑,也能从侧面验证已有模型和探测结果的可靠性。

建议加强支持单台月震数据挖掘新方法研究和强散射条件下月震波数值模拟新方法研究相关的课题。

4.3 多学科观测和约束的综合应用是发展趋势

除了月球内部圈层结构自身的研究,还需要加强这些探测结果与地球化学^[34]、岩石学、动力学等多学科研究相结合的综合应用研究^[18],以从不同的学科视角审视研究成果的合理性,增强月球科学研究的科学性和综合性。

除内部结构之外,还有必要从统计规律上加强月震目录研究,特别是月震与地震触发规律的潜在协同性研究。众所周知,地球上的潮汐主要受月球控制;然而,日本地震发震时刻的统计研究仅发现了与太阳有关的 24 小时周期性,但并未发现与月球有关的日周期性^[35];另一方面,月球深震的发震时刻与地球和太阳的潮汐存在强关联性^[36-39],这种月震和地震触发的不对称性值得深入探究。通过开展地月同步地震联合观测,有望发现地震和月震的触发在物理机制上的共性规律和差异特性,从而取得关于地震规律的全新认识。

建议加强支持以月震数据挖掘及解译为主的多学科综合研究课题,包括数理统计方法、动力学模拟和地质过程解译等。

5 总结

由于受到软着陆、仪器性能及长期驻留等方面的限制,行星内部结构探测一直是行星探测的短板。InSight 在 2018 年才刚刚开启着陆火星开展地震探测的历史进程,它标志着行星内部结构探测的新时代已经来临,这也是阿波罗登月任务以后 50 年来第一次在地外天体成功布设高性能的地震仪。可见,月球内部结构探测所涉及的技术落差小,这为我们提供了绝佳的从跟跑到并跑的历史机遇。2021 年,嫦娥七号月震仪已经立项^[21],预期设计寿命是 8 年,频带范围为 1/120~100 Hz,后续将与月球科研站^[19]等拟布设的月震仪开展联合测量,这也将是首个高精度月震仪观测台网的雏形,有望取得关于月球内部结构和月震规律方面的新认识,完成阿波罗时期由于仪器性能限制所无法完成的探测任务。月震研究的发展潜力大,重大成果可期,有望开启行星科学

探测的新局面。

作为月球内部圈层结构探测的关键载荷,月震仪需要组网才能系统地提升月震定位精度,且台间距越大越好,持续观测时间越长越好,这有利于积累更多的科学数据,提升探测效果,促进重大科学成果产出。然而,这对于工程实现能力、仪器性能指标、月面极端环境适应性等均提出了更高的要求。必须坚定不移地自主研制月震仪,才能培养一支年轻有为的仪器研制队伍,实现技术的可持续发展和更新换代;除此之外,在科学研究方面须做好月震数据处理和服务工作,建议加强支持以单台月震仪为主的科学研究项目的支持力度,促进新方法和新手段开发,为未来月球、火星和金星的内 部结构探测储备人才和技术,引领行星内部结构探测的国际前沿。

参 考 文 献

[1] 戎昭金,崔峻,何飞,等. 我国行星物理学的发展现状与展望. 中国科学院院刊, 2019, 34(7): 760—768.

[2] 万卫星,魏勇,郭正堂,等. 从深空探测大国迈向行星科学强国. 中国科学院院刊, 2019, 34(7): 748—755.

[3] 魏勇,朱日祥. 行星科学: 科学前沿与国家战略. 中国科学院院刊, 2019, 34(7): 756—759.

[4] 魏勇. 国家需求在行星科学一级学科建设中的导向作用. 地球与行星物理论评, 2021, 52(4): 353—355.

[5] Wiczorek MA, Neumann GA, Nimmo F, et al. The crust of the Moon as seen by GRAIL. Science, 2013, 339(6120): 671—675.

[6] Nunn C, Garcia RF, Nakamura Y, et al. Lunar seismology: a data and instrumentation review. Space Science Reviews, 2020, 216(5): 1—39.

[7] 赵娜,朱培民,袁悦锋,等. 中国未来载人登月月震实验必要性和方案设计. 地质科技情报, 2012, 31(4): 137—142.

[8] 姜明明,艾印双. 月震与月球内部结构. 地球化学, 2010, 39(1): 15—24.

[9] Weber RC, Lin PY, Garner EJ, et al. Seismic detection of the lunar core. Science, 2011, 331(6015): 309—312.

[10] Garcia RF, Khan A, Drilleau M, et al. Lunar seismology: an update on interior structure models. Space Science Reviews, 2019, 215(8): 1—47.

[11] 金亚秋. 行星微波遥感理论方法与应用. 北京: 科学出版社, 2019.

[12] Lv WM, Li C, Song HJ, et al. Comparative analysis of reflection characteristics of lunar penetrating radar data using numerical simulations. Icarus, 2020, 350: 113896.

[13] Fang GY, Zhou B, Ji YC, et al. Lunar penetrating radar onboard the chang'e-3 mission. Research in Astronomy and Astrophysics, 2014, 14(12): 1607—1622.

[14] Su Y, Fang GY, Feng JQ, et al. Data processing and initial results of Chang'e-3 lunar penetrating radar. Research in Astronomy and Astrophysics, 2014, 14(12): 1623—1632.

[15] Wu WR, Li CL, Zuo W, et al. Lunar farside to be explored by Chang'e-4. Nature Geoscience, 2019, 12(4): 222—223.

[16] Zhang J, Yang W, Hu S, et al. Volcanic history of the Imbrium Basin: a close-up view from the lunar rover Yutu. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(17): 5342—5347.

[17] Zhang JH, Zhou B, Lin YT, et al. Lunar regolith and substructure at Chang'E-4 landing site in South Pole - Aitken Basin. Nature Astronomy, 2021, 5(1): 25—30.

[18] Li C, Wang C, Wei Y, et al. China's present and future lunar exploration program. Science, 2019, 365 (6450): 238—239.

[19] 裴照宇,刘继忠,王倩,等. 月球探测进展与国际月球科研站. 科学通报, 2020, 65(24): 2577—2586.

[20] 张翔,张金海. 月震研究进展与展望. 地球与行星物理论评, 2021, 52(4): 391—401.

[21] Lognonné P, Banerdt WB, Giardini D, et al. SEIS: insight's seismic experiment for internal structure of Mars. Space Science Reviews, 2019, 215(1): 1—170.

[22] Lognonné P, Banerdt WB, Pike WT, et al. Constraints on the shallow elastic and anelastic structure of Mars from InSight seismic data. Nature Geoscience, 2020, 13 (3): 213—220.

[23] 刘澜波. “洞察”号能够完成火星内部结构探测的使命吗?. 地球与行星物理论评, 2021, 52(1): 115—122.

[24] 孙伟家,王一博,魏勇,等. 火星地震学与内部结构研究. 地球与行星物理论评, 2021, 52(4): 437—449.

[25] 肖万博,王彦宾. “洞察”号火星表面地震探测中的发现. 地球与行星物理论评, 2021, 52(2): 211—226.

[26] Khan A, Ceylan S, van Driel M, et al. Upper mantle structure of Mars from InSight seismic data. Science, 2021, 373(6553): 434—438.

[27] Knapmeyer-Endrun B, Panning MP, Bissig F, et al. Thickness and structure of the Martian crust from InSight seismic data. Science, 2021, 373(6553): 438—443.

[28] Stähler SC, Khan A, Banerdt WB, et al. Seismic detection of the Martian core. Science, 2021, 373(6553): 443—448.

[29] 郝天璈,游庆瑜. 国产海底地震仪研制现状及其在海底结构探测中的应用. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3352—3361.

[30] Heiken GH, Vaniman DT, French BM, et al. Lunar Sourcebook; A User's Guide to the Moon. Cambridge: The University of Cambridge, 1991.

- [31] Panning MP, Beucler É, Drilleau M, et al. Verifying single-station seismic approaches using Earth-based data: preparation for data return from the InSight mission to Mars. *Icarus*, 2015, 248: 230—242.
- [32] Khan A, van Driel M, Böse M, et al. Single-station and single-event marsquake location and inversion for structure using synthetic Martian waveforms. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2016, 258: 28—42.
- [33] Böse M, Clinton JF, Ceylan S, et al. A probabilistic framework for single-station location of seismicity on Earth and Mars. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2017, 262: 48—65.
- [34] Jolliff BL, Wiczorek M A, Shearer CK, et al. *New Views of the Moon: Reviews in Mineralogy*. The Mineralogical Society of America Geochemical Society, 2006.
- [35] Hao JL, Zhang JH, Yao ZX. Evidence for diurnal periodicity of earthquakes from midnight to daybreak. *National Science Review*, 2018, 6(5): 1016—1023.
- [36] Lammlein DR, Latham GV, Dorman J, et al. Lunar seismicity, structure, and tectonics. *Reviews of Geophysics*, 1974, 12(1): 1.
- [37] Lammlein DR. Lunar seismicity and tectonics. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1977, 14(3): 224—273.
- [38] Nakamura Y. Farside deep moonquakes and deep interior of the Moon. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2005, 110(E1): E01001.
- [39] Saal AE, Hauri EH, Cascio ML, et al. Volatile content of lunar volcanic glasses and the presence of water in the Moon's interior. *Nature*, 2008, 454(7201): 192—195.

Detection of lunar interior structures and the challenge on its key technology

Jinhai Zhang* Yangting Lin Zhenxing Yao

Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The interior structure of extraterrestrial objects is the key to understand the mystery of their own evolution process, which can provide an important reference for us to deeply understand the evolution of the Earth. The detection of the interior structure of extraterrestrial objects will become an important supplement to deep space exploration missions such as optics, remote sensing and sample returning. The lunar seismometer in the Apollo era made outstanding contributions to revealing the mysteries of the interior of the Moon. However, due to the limitation of the hardware level at that time, there are still great disputes about the detection results of the inner spherical structure of the Moon, which seriously restricts the progress of lunar scientific researches. China is expected to explore the south pole of the Moon by Chang'E-7 mission, then to establish a lunar scientific research station, including the first China's lunar seismometer to detect the interior structure and its physical state. This paper expounds the significance of exploring lunar interior structure, lists the possible difficulties in the development and deployment of lunar seismometer, analyzes the potential countermeasures, puts forward the problems that need to be paid attention to in the follow-up scientific research, and gives a series of suggestions. This paper aims to stimulate more planetary scientists to pay more attention to the exploration of the interior structure of the Moon and planets, so as to promote China's steady progress in relevant research fields and strive for the international academic frontier.

Keywords detection on lunar interior structures; lunar seismometer; international lunar research station; Chang'E-7 mission

(责任编辑 吴征天 张强)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

* Corresponding Author, Email: zjh@mail.iggcas.ac.cn