

· 专题:双清论坛“月球科研站的关键科学问题” ·

对我国月球科研站开展特定固体月球动力学研究的一些思考^{*}

石耀霖^{1, 2**}

胡才博^{1, 2**}

张怀^{1, 2}

陶莎^{1, 2}

支羽萧^{1, 2}

金一民^{1, 2}

张君策^{1, 2}

1. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049

2. 中国科学院 计算地球动力学重点实验室, 北京 100049

[摘要] 我国在月球探测空间技术方面近年来取得了里程碑性的突破,在科学研究方面也将开展国际月球科研站的研究和部署,此时确定一些既有重大科学意义、又在我国目前研究基础上具备可行性,能够培养队伍、取得突出成果的关键科学问题十分重要。本文仅对我国拟建设的国际科研站在固体月球动力学研究方面的一些关键科学问题提出一些设想。在几年时间内,建议开展月球现今热状态的国家自然科学基金重大项目类研究,通过它培养科研队伍,在地球物理、大地测量、地球化学、矿物学、高温高压实验、地球动力学等学科交叉和集成研究中取得突出进展;在十几年时间内,可以进行月震学的研究和部署,如果能在月震台站布设技术方面做出原始创新,则能在月球内部结构、组成和状态的研究中取得里程碑性的进展;最后,在几十年的时间内,开展熔岩管洞穴科研站的先导性研究,为在月球上建立长期有人科研站奠定基础。期待国家自然科学基金委员会发挥顶层设计和队伍组织作用,建立多学科融合平台,助力实现我国月球科学研究跨越式发展。

[关键词] 固体月球动力学;月球科学站;月震;月球热演化;月球熔岩管

月球和行星探测是科学研究的重要前缘,承担着探索宇宙奥秘和寻找人类宜居新场所的重任。我国月球与深空探测虽然起步晚,但起点高。在大英百科全书列举的空间探测的46项里程碑性事件中,美国占了24项,前苏联和俄罗斯占15项(其中俄罗斯1项)、欧盟占5项、日本1项、中国1项,但中国的1项是所有里程碑事件中最新的一个,即2019年1月3日嫦娥4号登上月球背面^①。大英百科全书列举的目前最活跃的十个开展空间探测的国家中,中国排在美国之后的第二位^②。这些都反映了外空探测中,我国虽然起步较晚,但当下发展迅速。在空间探测技术方面,我国已经跻身世界领先行列;但在行星科学研究方面,还有待进一步地发展和赶超。我



石耀霖 中国科学院大学教授,中国科学院院士,发展中国家科学院院士。从事固体地球物理、地球动力学研究。



胡才博 中国科学院大学地球与行星科学学院副教授。从事固体地球物理、地球动力学研究。

国准备进行的国际月球科研站的规划和建设,将是

收稿日期:2022-03-24;修回日期:2022-05-24

* 本文根据第302期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email: shiyl@ucas.ac.cn; hucb@ucas.ac.cn

本文受到国家自然科学基金项目(41774106)的资助。

① <https://www.britannica.com/science/space-exploration/Major-milestones>

② <https://www.aerospace-technology.com/features/featurethe-10-countries-most-active-in-space-4744018/>

我国月球和行星科学研究的又一个重要里程碑。

我国科学研究要取得原创性的突破,关键在于培养世界一流的科研人才,提升高瞻远瞩的洞察力和踏实攻坚的科研实力,部署关键科学观测项目,取得并消化分析第一手的科学资料,最终实现科学研究的重要进展。月球研究是近年来我国取得突出进展的项目,可以作为一个重要的突破点。本文仅对我国月球科研站在固体月球研究方面值得部署的一些关键科学问题提出一些设想。

1 月震学的原始创新布局和研究

研究月球内部结构需要综合利用电磁、重力、热学、放射性、以及形变和应力等多种地球物理手段进行观察和研究,但如同地球内部结构研究中的地震学一样,月震学方法是最得力的研究手段。这里包括对月震本身机理、破裂过程和特征的研究,以及利用月震波透视对月球内部结构、状态的研究。迄今为止,全部月震资料都是美国在 Apollo 计划中先后布设的四个能成功工作的月震观测系统持续从 1969 年到 1977 年传输回地球的资料^[1]。通过 20 世纪 70 年代的分析和本世纪以来运用先进方法的再分析,最近已识别出 13 058 个月震事件^[1]。其中,除了人工撞击的 9 次,及部分无法分类的 3 323 次事件外,根据震源深度及形成原因,可以分成四类:深源月震 7 400 次、浅源月震 28 次、陨石撞击 1 743 次和热成因型月震 555 次^[1]。其中浅源月震的震级最大,而深源月震发生的次数最为频繁。利用这些资料,人们初步了解了月球径向分层的结构(图 1)。月球半径 1 737 km,其中,月核半径约为 330 ± 20 km^[2],只有月球半径大小的 20% 左右。内核的半径为 240 ± 20 km。最下层的月幔为部分熔融层,外半径约为 480 km(厚度 ~ 150 km),月亮厚度约 50 km^[2]。

浅源月震发生在 200 km 深度以内,数量少,记录期间仅识别出 28 次,但其震级大,估计等效体波震级在 3.6 到 5.8 之间^[5],且具有高应力降,28 个浅源月震中有 11 个应力降大于 10 MPa,有的甚至大于 100 MPa^[1, 5, 6]。深源月震发生在约 700 ~ 1 200 km 深度,由于月球重力加速度小于地球,所以相当于承受地球上 100 ~ 135 km 深度的围岩压力^[7],与地球上比较浅的中源地震(深度 70 ~ 300 km)类似。深源月震具有三个显著的特点:其发生时间具有周期性,周期为 The nodical month 27.21 天(或 The anomalistic month 27.55 天),与月球绕

地球运行恒星月时间 27.3 天几乎一致;震级小(不超过 3 级);且震源位置丛集成月震“窝子”^[8],已识别出的 7 400 次深源月震事件中有 7 083 次属于丛集事件^[1]。与地球上浅源、中源和深源地震在俯冲带连续分布不同,浅源月震与深源月震之间(200 ~ 700 km 深度之间)明显存在无月震发生的地带。

对于浅源月震的生成机制,看似没有太大的争论,一般是认为月球冷却收缩而造成水平挤压下的逆掩断层月震。但是仔细考察一下,有些研究者并没有真正透彻理解水平压应力的形成机理。例如, Watters 等^[9]强调月球径向收缩会导致月球表层的水平压应变。有的科普文章把月球内部冷却和收缩比喻为月球像葡萄干一样萎缩,与葡萄柔软的表皮不同的,仅仅是月球的外壳是脆性的从而导致逆掩断层断裂。这里一种常见的误解是认为温度降低、有压缩应变,就一定会产生压缩热应力,其实这样简单的提法是不准确的。一根金属棒均匀冷却,温度降低了 ΔT 。如果它可以不受约束地自由收缩,则只产生缩短变形,并不会产生应力,自然也不会发生压性破裂;如果金属棒两端被约束完全不能变形,则会因降温而产生引张的总应力 $\sigma = \alpha E \Delta T$,其量级超过抗张强度时甚至会引起张裂。对于三维球体,如果均匀冷却自由变形,整个球体缩小,周长也缩短,球表层会有径向和水平压缩应变,但不会有水平压应力产生,也不会有逆掩断层或褶皱变形。如果一个球体内部尚未冷却,而只是表浅层位冷却,表层倾向

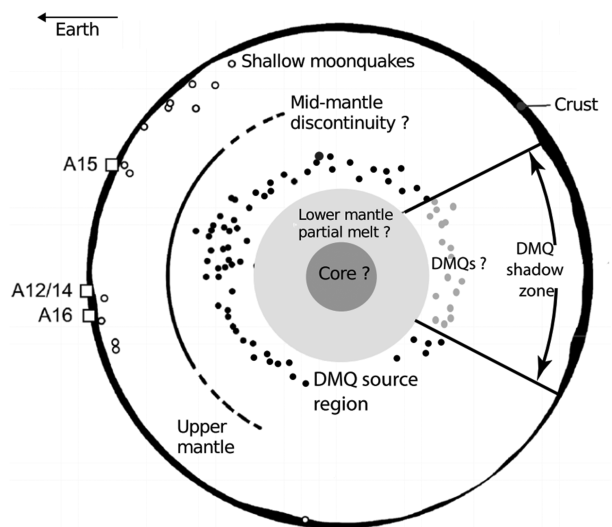


图 1 月球内部结构和月震活动剖面示意图(非真实比例)(显示了月球固体内核、流体外核和部分熔融的下月幔,固体月幔上面覆盖着月亮。与近地正面相比,远地背面的月亮要厚得多。还显示了月震台站检测到的浅源月震震源和深源月震丛集的窝子在 0° 子午线上的投影^[3, 4])

于收缩但受内层牵制而不能自由完全收缩,表层会产生水平拉张应力和张裂,如同人们在地球上看到的玄武岩柱,剖面上被许多裂纹切割成六面体,或者在干旱季节泥塘表层首先脱水干燥收缩后,表层会形成张性龟裂。只有在球体内部温度冷却量大于表层冷却量时,球体表层在内部收缩拖曳下,才会产生水平的挤压应力和逆掩断层^[10]。此外,有人认为潮汐应力对浅源月震发生和月表逆掩断层陡坎地貌形成也可能做出了贡献^[11]。

深源月震发生的周期性显示了与月球的潮汐应力密切相关^[7, 12, 13]。张贝等^[14]的计算表明,地球在月球上造成的潮汐应力最大的区域,如果没有月幔底部部分熔融区,则会是在外核之上的数百千米区域内;如果外核之上存在接近 200 km 的部分熔融区,则潮汐应力最大的区域则是在部分熔融带之上的数百千米范围之类内。月震学证据表明存在部分熔融区,而深源月震分布也恰好在部分熔融层上约 400~500 km,与潮汐应力最大区域吻合(图 2)。有的学者认为深源月震破裂就是完全由于潮汐应力引起的^[7],但潮汐差应力最大值约 50 kPa^[14],这与深源月震的应力降估值近似^[7],但远小于造成深源月震岩石按库伦—摩尔准则脆性破裂所需的差应力,而对相当地球上 100~135 km 深度的岩石破裂机制仍为脆性破裂,潮汐应力可能仅仅提供了触发条件,并不足以成为主导深源月震发生的构造成因。深月震似乎不太可能是在如此大的静岩围压下,仅由潮汐应变能的释放引起的。潮汐应力必须叠加在更大的长期应力上,而可能产生这种长期应力的最合理机制似乎是热收缩^[15]。Frohlich 和 Nakamura^[16]详细讨论了深源月震与中源地震之间的比较。就压力

而言,深源月震对应于 100~135 km 深度的中源地震,深源月震与中源地震表观还具有一些共同特征:发生的压力—温度条件接近、都在高度局部化的地震窝子中丛集发生、以及地震学中常用的描述震级—频度关系的 b 值分布类似。但把具有板块构造运动的中源和深源地震的可能成因用于解释没有板块运动的深源月震的发生机理是困难的^[7]。深源地震可能与相变有关,但现今月球深部的温度、压力变化极其缓慢,不太可能因为相变而重复诱发深源月震。尽管深源月震显示了与潮汐触发密切相关,但确切原因仍不清楚。Saal 等^[17]认为流体(尤其是水)的存在解释了这一机制。Frohlich 和 Nakamura^[16]则倾向于部分熔融的熔体。

陶莎等^[18]的研究对浅源和深源月震成因的构造应力来源给了统一的解释,并能解释浅源和深源月震中间为什么被无震带隔开。他们的工作表明:月表的平均温度基本受太阳辐射和月球散失热量控制,在岩浆洋凝固后的漫长地质历史时期浅层温度降低十分有限;月核存在流体向固体相变时释放的潜热的影响,温度降低也有限;最大的降温速率发生在月幔中部。该处月幔因此倾向于有最大的收缩,但受月球表浅冷却变形较小层位的牵制,不能随意收缩,而产生张应力;月球表浅层位虽然倾向于只有微小的冷却收缩,但在中下月幔更强烈收缩的拖曳下,被迫发生了更大的收缩,诱生出水平的压应力。从月表到深部,水平应力经过了从很大的压应力(利于发生逆掩断层月震)、减小到接近为 0 的很小的应力(对应无震区)、再到中下月幔的较大的张应力(利于正断层月震的发生)的复杂过程。计算表明,冷的月亮和上月幔黏滞系数低,热应力长期积累可以达

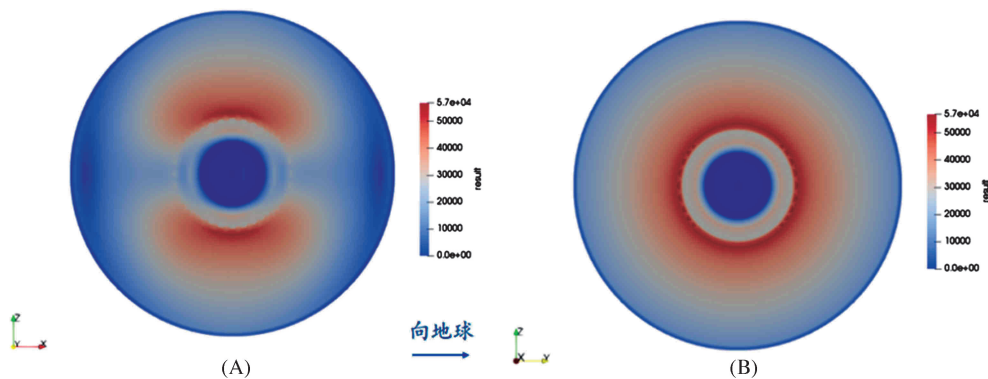


图 2 地球在月球上引起的潮汐应力最大剪应力分布图。(A) 沿 0° 子午线的剖面,地球位于右侧方向。
(B) 沿 90° 子午线的剖面,即从地球看过去的状况。潮汐应力最大的区域在部分熔融层上方,与深源月震所在深度大体吻合(据张贝等,2016)^[14]。

到数百兆帕的水平挤压,这是浅源月震可以有高达100 MPa 应力降的原因;深源月震区的月幔岩石处于高温高压下,黏滞系数低,热应力一边积累、一边松弛,达到动态平衡,差应力维持在 ~ 1 MPa 左右,这也是深源月震应力降仅仅能达到50 kPa 的道理。深源月震区岩体围压可以达到数 GPa,1 MPa 的差应力显然仍然不足以产生脆性破裂,因此深震发生还必须在存在高压流体的环境,而月幔最下部的部分熔融层恰好提供了向上扩散迁徙的熔岩和挥发性流体,它们也许在中下月幔汇聚成类似地球的岩浆囊,形成了震源窝子,造成月表以下700~1 200 km 范围内丛集发生可以被潮汐应力触发的深震。这一研究预测深源月震机制与浅源月震的逆掩断层不同,应该是正断层。由于月球最多只有四个台站的观测资料,这种预测目前尚无法得到P波初动震源机制解的验证,但Koyama和Nakamura^[19]通过对高质量月震记录的S波偏振和P波S波振幅比分析,认为深源月震的震源机制明显不是走滑月震,而是倾滑月震,与预测吻合,但他们的工作尚无法区分是逆断层或正断层。

我国筹建月球科研站,月震学研究应该是头等关键任务之一。可以有三个层次的部署。第一个层次是沿用国际应有先例的方法,例如人工布设几台月震仪开展持续的月震观测,但需要分批次部署在几个新的地点。月球上不同部位有不同的结构和特征,这样以取得新的认识。特别是台址设置在月球正面的边缘地区,例如南极、北极,乃至月球背面。这有助于我国获得最新的一手的月震波形记录资料,将填补目前我国月震波形记录研究的空白,在月球内部结构研究中取得突出的成果。

第二个层次是在月震仪的部署上有大的突破,从月球正面扩展到月球背面;突破美国Apollo的多次部署月震观测系统的思路,我国应该一次性部署尽量多的月震仪。量变可以引起质变,覆盖全全球的台网不仅可以提供更精确的月震参数,如震源位置、发震时刻和震源机制,更可以首次实现对月球的高质量层析成像和横向不均匀性研究,取得里程碑式的科学成果。这些月震仪的布设,不能再依靠人工在月面一台台布设,关键是必须研发出从环月低空飞行器上以气动向后抛撒式布设月震仪器的新方法,实现硬着陆条件下仪器系统能受保护不被摧毁。如果月震仪采用微机电系统MEMS(Micro Electro-Mechanical Systems)传感器^[20, 21],放置时没有对传统摆式地震仪找准水平、垂直方向的严格要求,仪器

系统偏心悬置于特别研制的易裂解高弹性材料球壳保护层内,在球体弹跳滚动着陆并不倒翁式最后静止后,在月球日夜高低温交替作用下球状保护外壳迅速裂解,实现月震仪系统的贴着月面和投入工作。这种方法如果能实现,不仅可以用于月震仪布设,还可能推广到其他多种观测仪器,引起综合月面观测系统革命性的变化。

第三个层次是通过月震波的多种仪器综合观测进行月震相关研究。首先值得考虑的是钻孔应变仪,目前国际上尚没有行星探测中使用过,它可以超宽频记录岩体内应变/应力变化,包括月震波、固体潮汐和地应力长期变化^[22]。如果我国能够率先在月球上布设成果,将取得震撼性成果。重力仪在美国Apollo 17任务中曾经部署过,但没有成功,目前美国在火星探测中已经部署。我国如果可以首次在月球上成功部署重力仪也将是突出的成就。它除了观测月球引力如何随时间变化,还可以研究潮汐作用、月震及探索月球自由震荡等现象,物理学家也可以用于引力波探测。分布式光纤声波传感器(Distributed Acoustic Sensing, DAS)^[23]如果能在月震观测中首次应用也是很有意义的工作。这些观测手段的综合观测,可以覆盖不同的频段、侧重不同的物理量、全方位地对月震进行综合观测和研究,有望取得突破性的科学成果。

地震学的研究,虽然主要依赖仪器,但还可以利用文献资料的古地震记录,没有历史记录,则可以从地貌、探槽等进行考古地震学(Archaeoseismology)研究^[24]。月球上仪器记录的时间和资料十分有限,人们在月球上也已经开始开展考古月震学方面研究。Kumar等^[25]利用照片和地形资料,发现月球上有几米到十几米大小的石块从山坡滚落留下的痕迹,而且这些滚石痕迹距离一些被解释为逆掩断层造成的陡坎不远,他们认为这是古月震造成的。更加量化的研究古月震的发震年代、震中位置和震级大小是我国月震学中可以开展工作的又一个方向。月震事件中还包含有热事件,研究不同环境下月球岩石热状态和热应力变化,了解热事件成因也是一个值得关注的方向。

月球科学研究的许多突破有赖于空间技术和观测技术的突破,例如前面提到的三个层次的工作。但在实施这些工作之前,目前几年乃至十几年内,首先要开展人才队伍建设,对美国Apollo 20世纪70年代的资料及分析方法进行熟悉和了解,特别在单台和少量台站下利用月震波记录如何深度分析研

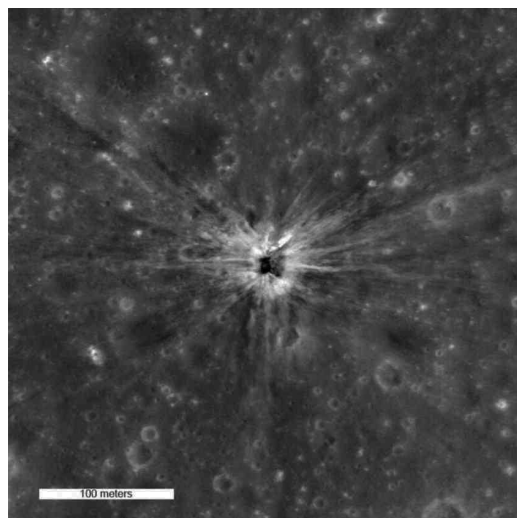
究。例如,据中国科学院地质与地球物理研究所张金海研究员分享,可以仅用单个台站观测陨石撞击事件的亮光以确定月震发震时间和位置,从而对月壳结构进行精细研究,利用废弃航天器撞击月面也是类似的方法(图 3)。在布设的地点上,扩展到过去没有布设过台站的地方;在布设的数量上逐步积累,达到能够同时有几十台观测的规模。最后就能全面了解月震分布,精确测定月震参数,通过层析成像等方法,对一个月球内部径向分层和横向不均匀特征取得突破性的进展。

2 月球现今热状态的多学科综合性研究

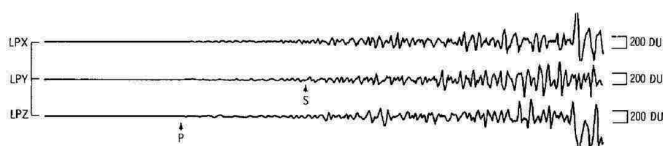
对于行星和月球来说,以热能为主的内能,是驱动它们内部动力学过程的能源。地球的地幔热对流,驱动着板块运动,造成了地震、火山、地质构造运动和变质过程。月球早期可能存在过岩浆洋^[27-29]、月幔对流^[30]。外来的大规模陨石撞击的动能,除了短时间的影 响,也会有一部分造成岩石熔融、变质,转化为热能等内能,在后续的长时间内影响月球的演化。内力作用与陨石撞击等外力作用一起塑造着月球的演化历史。月球的热演化历史是了解月球演化过程中重要的一环。而为了研究月球演化、特别是热演化的历史,首先要比较确切的了解现今月球

内部的热状态。月球演化假说是否能解释现今热状态的形成过程是该假说是否合理的一个重要判据。目前对月球内部温度分布,人们已经开展了不少研究,但仍存在相当程度的差别(图 4)。

研究月球内部温度的一种重要方法是基于对月球内部月震波速、电导率等的认识,通过理论或实验方法,找出能够满足观测约束的月球深部组成和温度分布。月球一维的密度、P 波、S 波速度结构是研究月球内部问题的重要基础^[36-38]。Lognonné 等^[39]利用约 60 个月震和浅表撞击事件的 P 波和 S 波记录反演了月球的内部结构,并推测月幔深度为 350 km 和 600 km 的温度分别可达 700 °C 和 990 °C。Gagnepain-Beyneix 等^[40]使用月震学方法反演月幔波速—深度变化,考虑了 8 个前人提出的月幔矿物组成模型,最终形成他们认为最恰当的温度—深度曲线,发现深度 337 km 处温度为 1 100 K,737 km 深度温度为 1 500 K,核幔边界约为 1 700 K。Kuskov and Kronrod^[41]利用月震学资料得到两种可能的月幔温度分布,分别为: $T(^{\circ}\text{C}) = 435 + 800[1 - \exp(-0.0035(H - 58))]$ 和 $T(^{\circ}\text{C}) = 465 + 1\,280[1 - \exp(-0.0013(H - 58))]$ 。第一种模型估计的核幔边界温度约为 1 500 K,第二种模型估计的核幔边界约为 1 800 K。十一年后,他们^[32]根据不同化学成分



(A)



(B)

图 3 (A) 1970 年 4 月 14 日阿波罗 13 号土星 4B 末级火箭在纬度 -2.55° , 东经 -27.88° 撞击月球, 形成直径约 30 米的撞击坑。(B) 阿波罗 12 号月震仪站对该撞击的三个正交分量的记录, P 波和 S 波的到达时间用箭头标明^[26]。

模型的月震 P 波和 S 波速度进一步发展了重建月地幔温度剖面的新方法,即在考虑相变、非谐性和非弹性效应的情况下,借助吉布斯自由能和地幔物质状态方程的最小化来实现逆问题的求解过程。他们^[32]建立了对月球地幔成分和温度分布的地球物理和地球化学约束,月幔组成为橄榄石+单斜辉石+石榴石或橄榄石+斜方辉石+单斜辉石+石榴石类型的矿物组合,上地幔亏损低挥发性氧化物,下地幔则富含低挥发性氧化物,得到月幔随深度 H 的温度分布公式为: $T(^{\circ}\text{C}) = 351 + 1718[1 - \exp(-0.00082H)]$ 。按此公式核幔边界温度约为 1800 K。Nimmo 和 Faul^[42]则利用月震波和月球潮汐的阻尼特征进行研究,使用橄榄石聚集体的实验室实验提供的约束,模拟月球内部的温度、品质因子 Q 和潮汐洛夫数。他们的模型中,2/3 的产热元素在地壳中,而月幔相对较冷,不需要一个部分熔融的深层月幔,核幔边界温度接近 1600 K^[42]。除了月震

资料外,电磁资料也是了解月球内部的重要地球物理手段。Khan 等^[33]通过月球地球物理数据(平均质量和惯性矩、潮汐洛夫数和电磁探测数据)的反演,结合相位平衡计算来确定月球深部的化学组成、物理结构和温度状态。认为在 1200 km 深度处的当前温度 $\geq 1600^{\circ}\text{C}$ (1873 K)。Karato^[31]从月球的电导率和月震及潮汐 Q 值对月球深部温度和含水量进行估计,估算了干燥的及不同含水量(0.001%、0.01%、0.1%)模型的月球温度-深度剖面,但他倾向于不太干的月球模型,认为月幔的含水量与地球软流圈的含水量相似,但月球内部在相同深度比地球冷。可以看出,目前对月球内部热状态、温度与深度的曲线,学术界还存在一定的分歧,主要原因在于不同学者选择的观测数据不同(月震记录、月球岩石岩性、月球岩石电导率、潮汐 Q 值等),选择的反演方法不同(单场反演、多场联合反演等)。还需要进一步积累更多的多物理场观测资料,搜集更多的月球岩石样品资料,才能够更准确地反演月球内部热状态,对月球温度与深度曲线进行更好的约束。

确定月球温度的另一途径就是需要找到其它准则对深部温度进行约束。例如月震学、重力学、大地测量学等发现铁的月核存在固体内核和液体外核,则如果在高温高压下测定了月核深度压力下铁的熔点(纯铁约为 1900 K),则可以估算出月核有关界面的大致温度上限。说是上限,是因为月核不是纯铁,可能含有镍及硫等会显著地降低熔融温度,例如 Fe-Si-S 组成的效应就被详细讨论过^[43, 44],一些研究者认为月核温度可能在 1603~1743 K (1330~1470 $^{\circ}\text{C}$)左右。而且可能造成月球的固体内核不像地球一样从地心向外生长,而是从月球核幔边界凝固后,再像雪花一样下沉形成固体内核^[45]。Belashchenko 和 Kuskov^[46]利用分子动力学模型认为月核含硫量在 0%~18%,温度不超过 2500 K,压力不超过 5 GPa,并且模拟得到的月核液态部分的 P 波速度与 Apollo 计算月震观测和解释结果一致。月幔底层也被认为存在部分熔融,如果了解不同压力下月幔矿物的固相线和液相线温度,也就可以了解其温度状态,这里同样面临着需要确定月幔矿物组成的问题,图 5 给出两个典型模型的估计。按 TWM(Taylor Whole Moon)模型,核幔边界固相线温度达到 1700 $^{\circ}\text{C}$ (1973 K),按 LPUM(Lunar Primitive Upper Mantle)模型,核幔边界固相线温度达到 1750 $^{\circ}\text{C}$ (2023 K)。它们均高于来自月球核幔边界最高温度的约束。一种假说是月球岩浆洋在

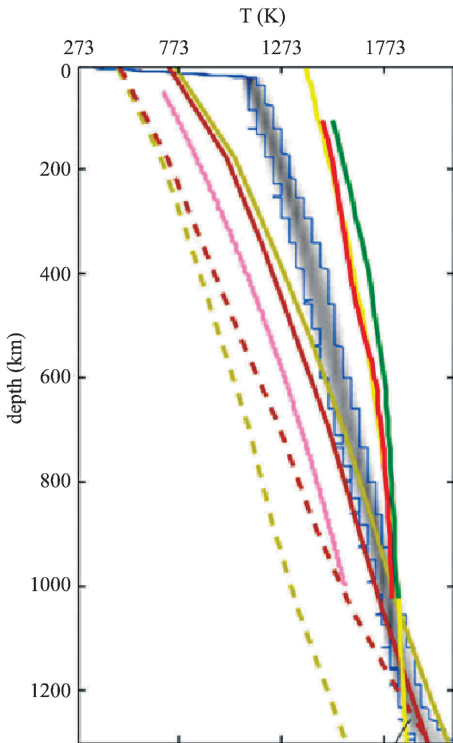


图 4 若干月球内部的温度剖面:橙色实线为假设月幔为干橄榄石、棕色实线为干斜方辉石、橙色虚线对应含水 0.01%的橄榄石,棕色虚线对应含水 0.01%的斜方辉石^[31];粉色实线为 Kuskov 和 Kronrod^[32]利用月震波速等提供的月幔温度。蓝线表示 Khan 等^[33]从电导率估算温度的 95% 的上下可信区间。红色、绿色和黄色线分别显示了不同月幔组成模型下的固相线:红线和绿线分别对应 Longhi^[34]的月球原始上地幔和 Taylor Whole Moon(TWM)月幔组成,黄线对应橄榄岩月幔^[35]。

结晶过程中,在地壳斜长岩下方形成的 TiO_2 含量高的月球岩浆熔体,其密度范围从 $3.25 \sim 3.45 \text{ g/cm}^3$,富含 FeO 和 TiO_2 的层可能会下沉到地幔底部。Khan 等^[4]估计月球 1200 km 深度富含 TiO_2 的岩石固相线温度约 1500°C ,而 1200 km 深度处的当前温度 $\geq 1600^\circ\text{C}$,从而在月球核幔边界上部形成部分熔融层(厚度 $150 \sim 200 \text{ km}$),熔体相在 $4.5 \sim 4.6 \text{ GPa}$ 的压力下呈中性浮力。岩浆洋在翻转时结晶形成堆积堆,将产热元素携带到下月幔中,有助于为该深度富含 TiO_2 的月幔物质提供热量使温度达到固相线以上。Mallik 等^[47]也认为在月球岩浆洋结晶的最后阶段,在轻的斜长石月壳下方产生了富含铁钛的堆积物,由于重力不稳定性导致月幔翻转,这些累积物沉入月幔深处,这种堆积物与月幔物质的同比混合物在 2 GPa 和 4.5 GPa 下部分熔融温度在 $1310 \sim 1700^\circ\text{C}$ 。在月幔最下层形成部分熔融层,部分熔融层熔体的密度范围还需要进一步的约束。他们估计了两种可能的情况:如果部分熔体在核幔边界(Core-mantle Boundary, CMB)处呈中性浮力,则实验获得的部分熔融程度与温度之间的关系表明,在 CMB 处压力温度范围下,对应 $5\% \sim 30\%$ 部分熔融程度。这可以用来更好地约束月球内部的热结构,月幔底部温度限制在 $1330 \sim 1470^\circ\text{C}$ ($1500 \sim 1750 \text{ K}$)

之间;如果部分熔体相对于月幔轻而具有浮力,它们可以通过地幔上升,甚至有可能作为月球玄武岩喷发。笔者认为,月球冷却至今天,核幔边界部分熔融体可能有部分能上升到 700 km 以下的不同深度,形成岩浆囊而成为深源月震窝子,但不大可能穿透处于水平挤压应力下的上月幔和月壳到达月表。富钛月球熔体密度研究也表明,在该深度以下深度越大密度越小,具备浮力;但该深度以上熔体密度随深度减小而减小,不再具备向上渗透的浮力^[48]。

研究行星内部热状态,热学理论和实测研究是另一重要方面,月球演化历史中热对流和热传导影响着月球的热历史和现状。月球热学研究中重要的一环是测量月表热流密度^[50]。最简单的情况下是假定热状态已经接近稳态,从浅部推测深部温度状态。地球上往往假定一、二百千米厚的岩石圈温度分布已经达到了稳态,根据地表热流密度以及岩石圈各层的热传导系数和放射性产热率,可以计算岩石圈内温度随深度的增加情况。对于月球上达到 1200 km 的深度是否仍能采用已经冷却达到稳态的假定需要谨慎,但稳态温度估计起码可以提供一个月球现今深部热状态的下限。不过要注意到不同深度的产热率和热传导系数的确定仍有不确定性,这种不确定性会导致深度越大、温度误差也越大,需要结合深部的一些温度约束,如月幔底层的固相线温度、月核的铁合金的熔点温度,来进行计算,应该可以提供更好的结果,地球上开展过的类似工作可以作为参考^[51]。

上面介绍了一些不同方法建立的月球温度剖面,从热传导物理角度来交叉考察这些剖面是研究工作的重要一环。例如, Jiang 和 Yao^[52]就进一步以 Hood 和 Sonett^[53]根据电导率—温度关系确定的月幔模型的温度深度分布中位数作为参考,假定月幔已经基本达到稳态,根据热传导方程反演了月球分层产热率。放射性元素随深度的变化是否得到月球化学和动力学研究的支持,还需要进一步的交叉研究。整个月球显然仍在继续冷却过程中,没有达到稳态。月球随深度的差异性冷却过程与现今观测到的不同深度的月震分布存在紧密联系。阿波罗计划布置的月震台网,7、8 年的时间内观测到 28 个浅源月震,最大的达到 5.8 级。虽然浅源月震数量不多,但一个 5.8 级月震释放的弹性波能量等于大约 16 000 个 3 级月震的能量,因此这一个浅源月震释放能量已经远远大于同期全部深源月震释放的能量总和。而浅源月震折算成每百万平方千米每年地震

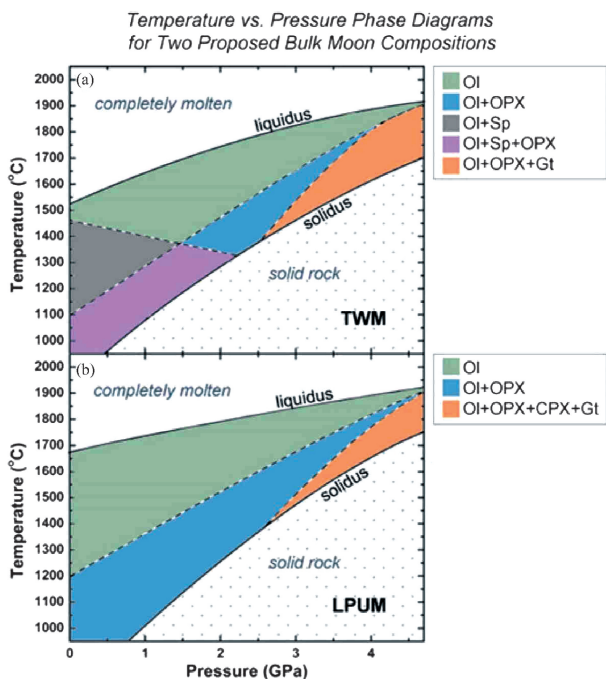


图5 两种月幔组成的温度与压力相图。(A) TWM 模型; (B) LPUM 模型。分别给出了液相线、固相线和矿物组成曲线。OI:橄榄石、OPX:斜方辉石、CPX:单斜辉石、Sp:铬尖晶石、Gt:石榴石。^[49]

累计数目,与美国中部板内地震活动性的强度大体相当(图6)。所以虽然月震与板块构造驱动的地震活动无法比较,但月球仍然不是一个已经死去的星球。在月球上发现了一些叶状陡坎(Lobate Scarp),它们被解释为新近的逆掩断层活动的痕迹,也是月球存在一定程度的构造活动的另一种证据^[9,54,55]。另外,月球形状、地貌起伏是认识月球动力学的重要参数^[56,57],对于极浅表的月球热事件有直接的触发作用。需要进一步研究月球随深度的差异性冷却过程与现今观测到的不同深度的月震分布之间动力学联系。

月球现今热状态和应力状态的研究,热传导机制的作用需要得到着重考虑。但对整个月球的演化历史的研究,特别是初期最活跃并决定了现今月球诸多基本特征的运动过程研究中,热对流机制是最重要的一环。Zhang等^[30,60]进行了三维月幔对流的模拟研究,对岩浆洋凝固和翻转后的演化模型进行量化的研究,对月球长期热演化的重要特征,包括翻转的含钛铁矿堆积层(IBC)在月球核幔边界、月海玄武岩的生成、月核硫含量和内核半径、月球古磁场以及现今的月幔结构尝试给与统一的系统性解释。他们研究还把月核和月幔的温度状态联系在一起考虑,而不仅仅局限于月幔。

总之,月球的起源和演化是全世界月球研究中的重大科学问题,但解决该问题需要长期的多方面的努力。我国月球科学整体研究水平与欧美比较尚有差距的情况下,可以选择研究月球现今热状态作为一个突破口。一个成功的模型需要从地球物理、地球化学、高压高温岩石实验、地球动力学等多学科的角度,交叉考察该模型能否完整解释各方面的观测结果。借助于国家自然科学基金项目,恰恰可以集合我国多学科力量、部署月球内部热状态研究的月球科研重大项目、培养行星科学专业人才,促进我国月球科研的发展。

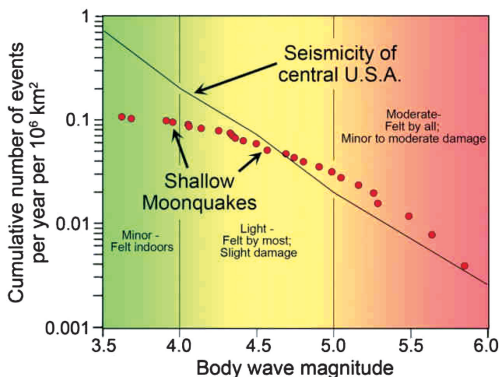


图6 浅源月震和美国中部板内地震活动性比较^[58,59]

3 月球熔岩管洞穴作为未来的月球基地的先导研究

虽然未来十几年内,月球科研站恐怕还只能建立在月表,但未来长期有人的科研基地建设最适宜的地点,应该是月球上已有的熔岩管洞穴。地球上的熔岩管是当熔岩流部分冷却凝固成固体,在侧面和顶部已能形成坚固的支撑,但内部仍为液态的熔岩并随后流出而留出空间形成熔岩管(图7)。由于玄武岩浆黏滞系数低、易于流动,所以地球上熔岩管多存在于玄武岩流中,见于冰岛,美国的夏威夷、爱达荷州、北加州等地,我国的五大连池、海南岛等地也普遍存在。这些管状洞穴宽度通常从几米到二、三十米,一些地方可以达到约30 m的直径、超过25 km的长度^[61]甚至达到65 km的长度(夏威夷的Kazumura洞穴)^[62]。熔岩管局部洞顶坍塌而形成天窗,可以提供进入熔岩管洞的通道。

地球熔岩管洞尺寸有限,月球熔岩管洞因重力仅为地球的1/6,从结构稳定性来说,可能大很多^[63,64]。甚至有人认为5 km跨度的熔岩管洞也是稳定的,可以容纳下费城。但这种计算没有考虑熔岩管形成时热应力会削弱其强度^[65]。计算的前提也假定一次熔岩流厚度达数千米,而Du等^[66]根据41个月海陨石坑的分析,认为月海玄武岩厚度从33 m到455 m不等,中位值为105 m。固然也许有更大规模和更大厚度玄武岩流的存在,但认为月球玄武岩熔岩管洞穴尺度可以达到5 km恐怕仍过于夸张。目前环绕月球卫星GRAIL重力资料观察到的重力欠缺显示熔岩管的宽度大约也只有1~2 km^[67]。月球上已发现了200多个疑似熔岩管洞穴,月球勘测轨道器已对200多个坑进行了成像,这

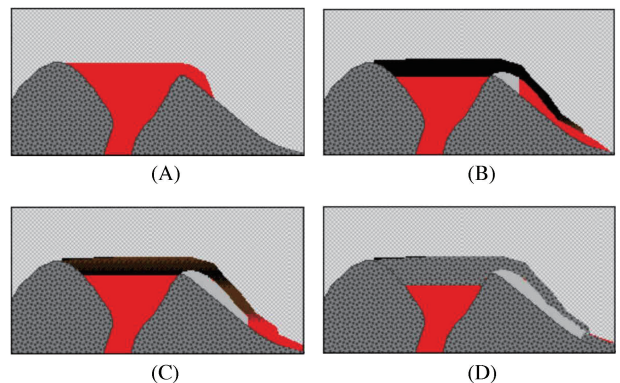


图7 熔岩管洞穴形成过程示意图。红色区域表示液态的熔岩流,灰色表示固态的围岩,黑色表示新凝固的固体盖层,内部空白的区域表示熔岩管的空间

些坑是进入地下空隙或洞穴的天窗,直径从约5米到900多米不等。还有月球熔岩流形成的细沟,其未塌陷的部分表明可能存在熔岩管隧道长约2 km,宽约360 m。SELENE月球雷达在Marius山也认为检测到了近百米尺度的熔岩管^[68]。为了准确探测类似空的月球熔岩管的大小和位置,前人开发了两种不同的利用重力观测资料的探测技术,一种是重力梯度法^[69-72],一种是互相关法^[73, 74]。

月球表面的环境十分恶劣。由于月球缺乏大气和磁场,月球表面直接且持续地暴露在银河宇宙射线粒子(Galactic Cosmic Ray, GCR)和太阳高能粒子(Solar Energetic Particles, SEPs)中。这些带电粒子与月球表面材料相互作用,还会产生中子和伽马射线等二次辐射。月球没有大气,陨石、包括微陨石的撞击对科研站也会造成风险。熔岩管可以使常驻人员得到充分的保护。月壤对人类健康有潜在威胁,熔岩管内也可以远离月壤。由于日夜接受太阳辐射热的差别的效应,月表赤道附近月球表面日夜温差可达300℃,而在熔岩管内可以终年保持恒定的温度。阿波罗计划中两次月热流密度测量表明,月壤下数十厘米维持在恒定温度,约-20℃^[50]。理论计算估计月球赤道地下平均温度为206 K(-67℃),两极地下平均温度为98 K(-175℃)^[75]。美国于2009年6月18日发射月球勘测轨道飞行器LRO(Lunar Reconnaissance Orbiter),其Divener辐射计在涵盖整个纬度、经度、不同时间和季节的太阳和红外波长下获得了约2500亿个校准辐射测量,系统地绘制了月球温度分布图。其中月球赤道平均温度为215.5 K,两极平均温度为93.91 K,相差121.59 K,与计算结果基本吻合^[76]。月球熔岩管内坡度估计大约在0.4°~6.5°之间^[61],参照地球熔岩管内的情况,应该可以提供通畅的通道,适于作为大型的考察基地。总之,熔岩管内利于建设包括农业在内的生存宜居环境,作为常驻人员的栖息地,后勤贮存基地,不受太阳风暴影响的通讯基础设施等。月球两极地区为未来找水、冰的可能地区,地球上一些洞穴内有常年不化的冰而形成冰洞并不罕见^[77],靠近两极的熔岩管内如果因为常年的低温也能保存有水、冰^[78],可以为未来科学站提供更宜居的条件。

国际上对在月球熔岩管内建立考察基地的讨论已经进行了许多讨论,我们国家也应把相关研究提到日程上来。包括利用光学照片、重力、雷达等手段寻找玄武岩熔岩管洞穴;选择合适的地点在未来登月考察;研发进入熔岩管洞穴和开展考察的手段,例

如轮式月球车还是多足机器人的选择。另外,熔岩管内的玄武岩体没有受到宇宙射线、太阳风、陨石和微陨石撞击的影响,可以保留更原始的形态,因此对月表和熔岩管内取样的比较研究,对月球演化和月表过程都可以取得更深入的认识。

4 小 结

月球科研站工作的推进对带动我国行星科学的整体发展及人才队伍建设意义重大,结合我国已规划及未来规划的探测任务,超前部署月球科研站相关的科学研究十分重要,这些在我国科学界已经形成共识。在固体月球研究方面,本文建议开展月球内部现今热状态的研究,这是可以在几年之内开展起来的国家自然科学基金重大项目一类的研究,通过它培养队伍、取得学科交叉的突出进展。在十几年内则可以进行月震学的部署和研究,如果能在月震台站布设方面做出原始创新,则能在月球研究中再次取得里程碑性的突破。最后,在几十年的时间内,开展熔岩管洞穴科研站的先导性研究,期待自然科学基金委发挥顶层设计和队伍组织作用,建立多学科融合平台,助力实现我国月球科学研究跨越式发展。

参 考 文 献

- [1] Nunn C, Garcia RF, Nakamura Y, et al. Lunar seismology: a data and instrumentation review. *Space Science Reviews*, 2020, 216(5): 1-39.
- [2] Weber RC, Lin PY, Garner EJ, et al. Seismic detection of the lunar core. *Science*, 2011, 331(6015): 309-312.
- [3] Wicczorek MA. The constitution and structure of the lunar interior. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 60(1): 221-364.
- [4] Khan A, Connolly JAD, Pommier A, et al. Geophysical evidence for melt in the deep lunar interior and implications for lunar evolution. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2014, 119(10): 2197-2221.
- [5] Oberst J. Unusually high stress drops associated with shallow moonquakes. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1987, 92(B2): 1397.
- [6] Binder AB, Oberst J. High stress shallow moonquakes: evidence for an initially totally molten moon. *Earth and Planetary Science Letters*, 1985, 74(2/3): 149-154.
- [7] Kawamura T, Lognonné P, Nishikawa Y, et al. Evaluation of deep moonquake source parameters: implication for fault characteristics and thermal state. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2017, 122(7): 1487-1504.
- [8] Bulow RC, Johnson CL, Bills BG, et al. Temporal and spatial properties of some deep moonquake clusters. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(E9): E09003.

- [9] Watters TR, Robinson MS, Beyer RA, et al. Evidence of recent thrust faulting on the moon revealed by the lunar reconnaissance orbiter camera. *Science*, 2010, 329(5994): 936—940.
- [10] 金一民, 陶莎, 石耀霖. 使用三维黏弹性模型计算月球冷却产生的热应力, 中国科学院大学学报, 2022, doi: 10.7523/j.ucas.2022.059.
- [11] Watters TR, Robinson MS, Collins GC, et al. Global thrust faulting on the Moon and the influence of tidal stresses. *Geology*, 2015, 43(10): 851—854.
- [12] Weber RC, Bills BG, Johnson CL. Constraints on deep moonquake focal mechanisms through analyses of tidal stress. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, 114(E5): E05001.
- [13] Weber RC, Bills BG, Johnson CL. A simple physical model for deep moonquake occurrence times. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2010, 182(3/4): 152—160.
- [14] 张贝, 张怀, 石耀霖. 基于数值模拟的潮汐应力触发月球深震机制的探讨. 中国科学院大学学报, 2016, 33(1): 82—88.
- [15] Minshull TA, Gouly NR. The influence of tidal stresses on deep moonquake activity. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1988, 52(1/2): 41—55.
- [16] Frohlich C, Nakamura Y. The physical mechanisms of deep moonquakes and intermediate-depth earthquakes: how similar and how different?. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, 173(3/4): 365—374.
- [17] 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.
- [18] 陶莎, 石耀霖, 朱伯靖. 月球冷却过程中热应力与月震产生机理关系的初步分析. 地球物理学报, 2022, doi: 10.6038/cjg2022P0672.
- [19] Koyama J, Nakamura Y. Focal mechanism of deep moonquakes// Lunar and Planetary Science Conference, 11th, Houston, TX, March 17—21, 1980, Proceedings. Volume 3. New York: Pergamon Press, 1980, 1855—1865.
- [20] Peng CY, Chen Y, Chen QS, et al. A new type of tri-axial accelerometers with high dynamic range MEMS for earthquake early warning. *Computers & Geosciences*, 2017, 100: 179—187.
- [21] D'Alessandro A, Scudero S, Vitale G. A review of the capacitive MEMS for seismology. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019, 19(14): 3093.
- [22] 李富珍, 任天翔, 池顺良, 等. 基于钻孔应变观测资料分析远震造成的动态库仑应力变化. 地球物理学报, 2021, 64(6): 1949—1974.
- [23] 宋政宏, 曾祥方, 徐善辉, 等. 分布式光纤声波传感系统在近地表成像中的应用 I: 主动源高频面波. 地球物理学报, 2020, 63(2): 532—540.
- [24] Sintubin M. Archaeoseismology. *Encyclopedia of earthquake engineering*, 2013, 1—17.
- [25] Kumar PS, Mohanty R, Lakshmi KJP, et al. The seismically active lobate scarps and coseismic lunar boulder avalanches triggered by 3 January 1975 (MW 4.1) shallow moonquake. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(14): 7972—7981.
- [26] Ewing M, Latham G, Press F, et al. Seismology of the moon and implications on internal structure, origin and evolution. *Highlights of Astronomy*, 1971: 155—172.
- [27] Elkins-Tanton LT, Burgess S, Yin QZ. The lunar Magma ocean: Reconciling the solidification process with lunar petrology and geochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 304(3/4): 326—336.
- [28] Carlson RW. Analysis of lunar samples: implications for planet formation and evolution. *Science*, 2019, 365(6450): 240—243.
- [29] Maurice M, Tosi N, Schwinger S, et al. A long-lived magma ocean on a young Moon. *Science Advances*, 2020, 6(28): eaba8949.
- [30] Zhang N, Parmentier EM, Liang Y. A 3-D numerical study of the thermal evolution of the Moon after cumulate mantle overturn: The importance of rheology and core solidification. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, 118(9): 1789—1804.
- [31] Karato SI. Geophysical constraints on the water content of the lunar mantle and its implications for the origin of the Moon. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 384: 144—153.
- [32] Kuskov OL, Kronrod VA. Geochemical constraints on the model of the composition and thermal conditions of the Moon according to seismic data. *Physics of the Solid Earth*, 2009, 45(9): 753—768.
- [33] Khan A, MacLennan J, Taylor SR, et al. Are the Earth and the Moon compositionally alike? Inferences on lunar composition and implications for lunar origin and evolution from geophysical modeling. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006, 111(E5): E05005.
- [34] Longhi J. Petrogenesis of picritic mare magmas: constraints on the extent of early lunar differentiation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(24): 5919—5934.
- [35] Hirschmann MM. Mantle solidus: Experimental constraints and the effects of peridotite composition. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2000: 1, doi: 10.1029/2000gc000070.
- [36] Garcia RF, Gagnepain-Beyneix J, Chevrot S, et al. Very preliminary reference Moon model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2011, 188(1/2): 96—113.
- [37] Garcia RF, Gagnepain-Beyneix J, Chevrot S, et al. Erratum to “very preliminary reference moon model”. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2012, 202/203: 89—91.
- [38] Garcia RF, Khan A, Drilleau M, et al. Lunar seismology: an update on interior structure models. *Space Science Reviews*, 2019, 215(8): 1—47.
- [39] Lognonné P, Gagnepain-Beyneix J, Chenet H. A new seismic model of the Moon: implications for structure, thermal evolution and formation of the Moon. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 211(1/2): 27—44.

- [40] Gagnepain-Beyneix J, Lognonné P, Chenet H, et al. A seismic model of the lunar mantle and constraints on temperature and mineralogy. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2006, 159(3/4): 140—166.
- [41] Kuskov OL, Kronrod VA. Constitution of the Moon: 5. Constraints on composition, density, temperature, and radius of a core. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1998, 107(4): 285—306.
- [42] Nimmo F, Faul U. Lunar mantle temperature structure from seismic and geodetic observations and laboratory dissipation experiments// 43rd Lunar and Planetary Science Conference (2012), 2012.
- [43] Malavergne V, Toplis MJ, Berthet S, et al. Highly reducing conditions during core formation on Mercury: implications for internal structure and the origin of a magnetic field. *Icarus*, 2010, 206(1): 199—209.
- [44] Chabot NL, Wollack EA, Klima RL, et al. Experimental constraints on Mercury's core composition. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 390: 199—208.
- [45] Breuer D, Rueckriemen T, Spohn T. Iron snow, crystal floats, and inner-core growth: modes of core solidification and implications for dynamos in terrestrial planets and moons. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2015, 2: 39.
- [46] Belashchenko DK, Kuskov OL. Molecular-dynamic modeling of thermodynamic properties of the lunar Fe-S core. *Doklady Earth Sciences*, 2015, 460(1): 37—40.
- [47] Mallik A, Ejaz T, Shcheka S, et al. A petrologic study on the effect of mantle overturn; implications for evolution of the lunar interior. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 250: 238—250.
- [48] Fuqua H. A multi model investigation of the global interior structure of the Moon. Berkeley: University of California, 2017.
- [49] Elardo SM, Draper DS, Shearer CK Jr. Lunar Magma Ocean crystallization revisited: bulk composition, early cumulate mineralogy, and the source regions of the Highlands Mg-suite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(11): 3024—3045.
- [50] Langseth MG, Keihm SJ, Peters K. Revised lunar heat-flow values// Lunar Science (Houston, TX), Conference Proceedings, 1976, 7: 3143—3171.
- [51] 孙玉军,董树文,范桃园,等. 中国大陆及邻区岩石圈三维流变结构. *地球物理学报*, 2013, 56(9): 2936—2946.
- [52] Jiang CZ, Yao S. 1D geothermal inversion of the lunar deep interior temperature and heat production in the equatorial area. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2019, 289: 106—114.
- [53] Hood LL, Sonett CP. Limits on the lunar temperature profile. *Geophysical Research Letters*, 1982, 9(1): 37—40.
- [54] Watters TR, Weber RC, Collins GC, et al. Shallow seismic activity and young thrust faults on the Moon. *Nature Geoscience*, 2019, 12(6): 411—417.
- [55] Banks ME, Watters TR, Robinson MS, et al. Morphometric analysis of small-scale lobate scarps on the Moon using data from the Lunar Reconnaissance Orbiter. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, 117, E00H11, doi:10.1029/2011JE003907.
- [56] 刘经南,魏二虎,黄劲松,等. 月球测绘在月球探测中的应用. *武汉大学学报·信息科学版*, 2005, 30(2): 95—100.
- [57] Dickey JO, Bender PL, Faller JE, et al. Lunar laser ranging: a continuing legacy of the Apollo program. *Science*, 1994, 265(5171): 482—490.
- [58] Oberst J, Nakamura Y. A seismic risk for the lunar base// Proceedings of the 2nd NASA Conference on Lunar Bases and Space Activities, 1988: 231—233.
- [59] Weber, R, Neal CR, Grimm, et al. The scientific rationale for deployment of a long-lived geophysical network on the Moon. *Bulletin of the AAS*, 2021, 53(4), doi: 10.3847/25c2cfef.674dcfdf.
- [60] Zhang N, Dygert N, Liang Y, et al. The effect of ilmenite viscosity on the dynamics and evolution of an overturned lunar cumulate mantle. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(13): 6543—6552.
- [61] Greeley R. Lava tubes and channels in the lunar Marius Hills. *The Moon*, 1971, 3(3): 289—314.
- [62] Pipan T, Culver DC. Chapter 107 - Shallow subterranean habitats// *Encyclopedia of Caves* (Third Edition, Pages 896-908). Academic Press, 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-814124-3.00107-2.
- [63] Blair DM, Chappaz L, Sood R, et al. The structural stability of lunar lava tubes. *Icarus*, 2017, 282: 47—55.
- [64] Theinat AK, Modiriasari A, Bobet A, et al. Lunar lava tubes: Morphology to structural stability. *Icarus*, 2020, 338: 113442.
- [65] 李镇村,石耀霖,张泽阳,等. 熔岩管冷却过程中的热应力计算. *中国科学院大学学报*, 2016, 33(3): 412—420.
- [66] Du J, Fa WZ, Wiczorek MA, et al. Thickness of lunar mare basalts: new results based on modeling the degradation of partially buried craters. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2019, 124(9): 2430—2459.
- [67] Chappaz L, Sood R, Melosh HJ, et al. Evidence of large empty lava tubes on the Moon using GRAIL gravity. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(1): 105—112.
- [68] 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. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(20): 10155—10161.
- [69] Cordell L. Gravimetric expression of graben faulting in Santa Fe country and the Espanola Basin, New Mexico// *Guidebook to Santa Fe Country*, New Mexico Geological Society. Socorro: New Mexico Geological Society, 1979: 59—64.
- [70] Butler DK. Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities. *Geophysics*, 1984, 49 (7): 1084—1096.

- [71] Sharpton VL, Grieve RAF, Thomas MD, et al. Horizontal gravity gradient: an aid to the definition of crustal structure in North America. *Geophysical Research Letters*, 1987, 14 (8): 808—811.
- [72] Andrews-Hanna JC, Asmar SW, Head JW III, et al. Ancient igneous intrusions and early expansion of the Moon revealed by GRAIL gravity gradiometry. *Science*, 2013, 339 (6120): 675—678.
- [73] Chappaz L, Melosh H, Howell K, and the GRAIL mission team. Surface and buried lava tube detection with GRAIL data// 45th Annual Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands, Texas; LPI contribution, 2014; No. 1777, p. 1746.
- [74] Chappaz L, Sood R, Melosh H, and Howell K. Buried empty lava tube detection with GRAIL data, (2014-01)/[2022-05-24]. https://engineering.purdue.edu/people/kathleen.howell.1/Publications/Conferences/2014_AIAA_ChaSooMelHow.pdf.
- [75] Paige DA, Foote MC, Greenhagen BT, et al. The lunar reconnaissance orbiter diviner lunar radiometer experiment. *Space Science Reviews*, 2010, 150(1/2/3/4): 125—160.
- [76] Williams JP, Paige DA, Greenhagen BT, et al. The global surface temperatures of the Moon as measured by the Diviner Lunar Radiometer Experiment. *Icarus*, 2017, 283: 300—325.
- [77] Yang SH, Shi YL. A review of Chinese Ice Caves// *Earth Crust*. London; IntechOpen, 2019.
- [78] Lee P. Habitability of lava tubes on the Moon and Mars; Lessons from Earth// *KIP Articles*. Dubai; Dubai Future Foundation MBR Space Settlement Challenge, 2019; 5844.

Some Thoughts on the Special Research of Solid Lunar Dynamics in China's Lunar Scientific Research Station

Yaolin Shi^{1, 2*} Caibo Hu^{1, 2*} Huai Zhang^{1, 2} Sha Tao^{1, 2}
Yuxiao Zhi^{1, 2} Yimin Jin^{1, 2} Junce Zhang^{1, 2}

1. *College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*
2. *The Key Laboratory of Computational Geodynamics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract China has made a landmark breakthrough in lunar exploration space technology in recent years, and will also carry out the deployment and research of international lunar scientific research stations. At this time, it is very important to determine some key scientific issues that are not only of great scientific significance, but also feasible on the basis of China's current research, which can cultivate research teams and achieve outstanding results. This paper only puts forward some ideas on the key scientific problems in the research of solid lunar dynamics at our international scientific research station. In a few years, we can carry out the major project research of National Natural Science Foundation of China (NSFC) on the current thermal state of the Moon. Through it, we can cultivate teams and make outstanding progress in the interdisciplinary of geophysics, geodesy, geochemistry, mineralogy, high temperature and high pressure experiment, geodynamics and other disciplines. In more than ten years, the deployment and research of lunar seismology can be carried out. In particular, if the original innovation in the deployment technology of lunar seismological stations can be made, landmark progress can be made in the research of the internal structure, composition and state of the Moon. Finally, the pilot research of lava tube cave research station will be carried out in several decades, so as to lay the foundation for the establishment of long-term manned research station on the Moon. NSFC is expected to play the role of top-level design and team organization, establish a multi-disciplinary integration platform, and help realize the great leap forward development of China's lunar scientific research.

Keywords solid lunar dynamics; lunar scientific station; lunar earthquake; lunar thermal evolution; lunar lava tube

(责任编辑 魏鹏飞 姜钧译)