

基于载人月球探测关键科学问题 的前沿交叉研判研究报告

基于载人月球探测关键科学问题的前沿交叉研判研究 项目组

国家自然科学基金委与中国科学院联合资助



报告撰写组

项目负责人

李献华
中国科学院地质与地球物理研究所

项目主要参加人员

林杨挺、杨蔚、张辉、张金海、胡森、林红磊、杜爱民、贺怀宇、岳宗玉、苟盛、何雨旸

中国科学院地质与地球物理研究所

刘建忠、李雄耀、刘耘、杨晶、曾小家
中国科学院地球化学研究所

刘洋、徐琳、张贤国、郭弟均
中国科学院国家空间科学中心

何宏平、王桂琴、朱建喜
中国科学院广州地球化学研究所

曹晋滨、刘红
北京航空航天大学

惠鹤九、张爱铨
南京大学

肖龙、黄俊
中国地质大学（武汉）

秦礼萍、汪毓明
中国科技大学

邸凯昌、刘广
中国科学院空天信息创新研究院

肖智勇
中山大学（珠海）

康志忠
中国地质大学（北京）

龙勉
中国科学院力学研究所

邓元勇
中国科学院国家天文台

凌宗成
山东大学（威海）

法文哲
北京大学

张兆峰
成都理工大学

张鹏、牟伶俐
中国科学院空间应用工程与技术中心

摘要

月球探测是解开地月系统起源之谜的关键，也是人类迈向深空探测的第一站。过去十几年间，中国探月工程（嫦娥工程）取得举世瞩目的成就：成功突破并掌握了抵达月球表面并采样返回的工程能力；更以人类首次月球背面着陆巡视探测、首次获取月球风暴洋克里普地体最年轻火山样品等历史性突破，显著深化了人类对月球演化的认知。在此基础上，中国提出在 2030 年前实现首次载人登月，充分发挥航天员的优势开展月球探测。未来还将进一步协同有人与无人任务，开展全月球的综合科考，并开启月球应用研究的新时代。本报告剖析了载人探月的优势，同时注重与无人探测的协同效应，凝练出可能取得重大突破的基础性月球科学问题，提出关键工程技术需求，为规划未来探月目标奠定重要基础。同时，基于月球探测历程和发展趋势的分析，提出我国月球科学探索与应用研究的发展思路和政策建议。

Abstract

Lunar exploration is deemed crucial for uncovering the origins of the Earth-Moon system and is the first step for advancing humanity's exploration of deep space. Over the past decade, the Chinese Lunar Exploration Program (CLEP), also known as the Chang'e (CE) Project, has achieved remarkable milestones. It has successfully developed and demonstrated the engineering capability required to reach and return from the lunar surface. Notably, the CE Project has made historic firsts with the landing and on-site exploration of the far side of the Moon, along with the collection of the youngest volcanic samples from the Procellarum KREEP Terrane. These achievements have significantly enhanced our understanding of lunar evolution. Building on this foundation, China aims to achieve its first crewed lunar landing by 2030, leveraging astronauts' advantages to advance lunar exploration. Moving forward, the country will further integrate crewed and uncrewed missions to conduct comprehensive scientific investigations across the entire Moon, marking a new era of scientific exploration and utilization of the Moon. This report explores the benefits of crewed lunar exploration while leveraging synergies with robotic exploration, refining fundamental lunar scientific questions that could lead to significant breakthroughs and proposing the respective engineering and technological requirements. This research lays a crucial foundation for defining the objectives of future lunar exploration, emphasizing the importance of crewed missions and offering insights into potential advancements in lunar science.

I 目录

摘要	I
Abstract	II
1.载人探月科学与应用研究的战略价值	1
1.1 国家战略的科学引领和目标实现	1
1.2 科技发展的前沿和制高点	1
1.3 推动国民经济与社会可持续发展	2
1.4 促进行星科学与地球科学交叉融合，推动自然科学学科发展	2
2.关键科学问题	4
2.1 月球外动力演化历史	5
2.1.1 辐射粒子与月表相互作用及月面大白斑成因之谜	5
2.1.2 月壤剖面记录的陨石撞击和太阳辐射历史	7
2.1.3 大型撞击盆地的形成与影响	10
2.2 月球内动力演化历史	12
2.2.1 月球火山活动的时空变化与月幔源区的长期演化	12
2.2.2 风暴洋克里普地体的形成与改造	14
2.2.3 下月壳的物质组成与改造	16
2.3 月球内部结构	18
2.3.1 月球磁场发电机的起停与月表磁异常的成因	18
2.3.2 多物理场约束下的月球内部结构	20
2.4 月球地层剖面与“金钉子”确立	23
2.5 月球原位资源利用	24
2.6 月基平台利用	26
2.6.1 月基宏观地球现象监测	27
2.6.2 月基天文学	27
2.6.3 月面生命科学	28
2.6.4 月面基础物理实验	28

3.我国及国际的研究基础与条件.....29

 3.1 该领域国际发展现状与趋势、我国的国际地位29

 3.2 我国及国际上该领域目前的投入29

 3.3 我国开展该领域研究的优势与劣势30

4.我国在该领域的发展思路与政策建议.....31

 4.1 队伍建设31

 4.2 平台与能力建设31

 4.3 国际合作政策32

 4.4 制度建设、法规建设、环境建设32

 4.5 组织保障33

 4.6 有效资助机制与政策建议33

参考文献.....35

1. 载人探月科学与应用研究的战略价值

近代人类文明的发展经历了大航海时代、航空航天时代，每一次新时代的开启都产生了科学技术和经济的巨大进步与变革。当前，人类已开始了由近地空间向地月空间和深空疆域拓展的新时代，处在新的历史变革关头。阿波罗计划的巨大成功和深远影响，很大程度上取决于该计划所获取的科学发现和研究成果。我国成功实施了嫦娥工程的“绕、落、回”探测任务，成为第三个从月球表面采样并安全返回的国家。月球与深空探测是我国科技发展的重大战略，我国已正式发布载人探月的初步方案，计划在 2030 年前实现载人登月开展科学探索。

载人探月的科学和应用研究是工程的科学牵引和目标实现，具有重大的战略价值。同时，我国载人探月也面临巨大挑战，前有阿波罗计划这座“高山”，后有阿尔忒弥斯计划的对比。如何发挥载人探月的优势及其与嫦娥工程的协同，使我国率先成为月球科学探测与应用研究的强国，是我国行星科学和地球科学工作者迫切需要思考的重大问题。

1.1 国家战略的科学引领和目标实现

习近平总书记指出，“探索浩瀚宇宙，发展航天事业，建设航天强国，是我们不懈追求的航天梦”。载人探月的科学与应用研究是实现这一目标的关键环节，是其科学牵引和成果实现。阿波罗载人登月计划的科学成果，构建了现代月球科学框架。半个多世纪后，在新一轮月球探测的高潮中，充分利用载人月球探测的优势，开展月球科学研究，将为人类知识积累贡献中国智慧。

科学探索与应用研究并重是新时期月球探测的新转变。月球是人类长期可持续发展的新疆域，是人类走出地球这个摇篮进入深空的基地和跳板；月球具有独特的环境要素，是一个不同于人造地球卫星的超级平台，有望为对天观测、对地观测、以及生命科学和基础物理实验等领域的新突破提供关键支撑。同时，月球资源的原位利用成为新的技术增长点，是建设和运营月球基地的基础。

1.2 科技发展的前沿和制高点

以载人探月为代表的月球与深空探测一直是科学发现的前沿和制高点。阿波

罗载人探月取得了认识月球的十大发现[ref-1]，建立了月球形成与演化的主要理论和假说。然而，阿波罗和月球号计划的 9 次着陆采样，仅代表月面上很小的区域（约 4~8%），且集中在月球正面低纬度范围。嫦娥 5 号在远离已有采样点的区域采集了最年轻的玄武岩，取得了对年轻火山活动颠覆性的新发现。新一轮的月球探测，特别是载人探月将实现对月球认识的新突破，建立新的月球科学体系，是实现空间科学与技术强国的突破口。

空间技术是支撑人类在地月及更远空间活动的基础与安全保障。行星科学发展的一个重要特点是与空间技术之间的相互支撑，月球探测的科学与应用研究是载人月球探测的科学牵引和目标实现。阿波罗时代为载人登月研发了一系列技术，包括更强大和安全可靠的火箭和发射系统、高效可靠的能源系统、先进航天器的设计和制造技术、以及精确和实时的深空导航和测控通信等。新时期载人探月工程的实施，将对空间技术的发展产生巨大的推动作用。

1.3 推动国民经济与社会可持续发展

载人探月可对国民经济与社会的发展起到巨大的推动作用。阿波罗登月计划在高峰期间，参与人数超过 30 万人，所产生的 3000 多项专利技术，有 1000 多项转化为民用成果，长期经济收益比可达到 1:7~8 [ref-2]。阿波罗登月展现了美国代表人类开拓太空的进取精神，其巨大的社会效应是其他工程所不能比拟的 [Monastersky, 2009]。我国载人探月也将带动科学技术的全链条进步，产生巨大的社会效益，极大激发青少年的科学兴趣，提高全民族的科学素养、自豪感和凝聚力，体现我国作为大国的担当。

1.4 促进行星科学与地球科学交叉融合，推动自然科学学科发展

现代月球形成理论认为，月球形成于一个原行星与初始地球的大碰撞[Canup and Asphaug, 2001; Stevenson, 1987; Wiechert et al., 2001]，这一事件也深刻地改造了地球。同时，地球早期的历史痕迹遭受了强烈的后期改造，甚至完全抹除。相反，地月系统早期的小行星撞击和太阳辐射历史等，基本完好地记录在月球上。月球探测的新发现和成果，为认识地球的形成和演化提供了新的视角[Day et al., 2007; Dickey et al., 1994; Jacobson et al., 2014; Johnson et al., 2022; Lagos et al., 2008;

Schönbächler et al., 2010; Wood and Halliday, 2005; Yuan et al., 2023]。

载人探月的科学与应用研究，具有突出的多学科交叉特点。月球科学和地球科学研究不论在技术和平台上，还是在研究方法和思想上都具有很大的相似性。基于载人探月的科学研究，特别是协助航天员开展月面地质考察、样品采集、以及对返回样品的实验室分析和探测数据解译，既是地球科学工作者的机遇，也是其历史使命。载人探月的科学研究将促进我国行星科学与地球科学的交叉融合，推动地球科学的发展进入新的阶段。除了行星和地球科学，还包括天文学、生命科学、物理学等领域。同时，月球应用领域除了空间技术之外，涉及能源、通讯、智造、材料、原位资源等一系新技术的研发。

2.关键科学问题

月球是人类探测最多、认识最为深入的地外天体。但是，由于工程和技术制约，我们对月球的认识还有五大不足：（1）时间上局限于“中年”而不识“一老一少”，（2）空间上止于“月球正面中央”而未能涉足“月球背面与南北两极”，（3）深度上浮于“表面”而无法深入“内部”（深层月壤与月幔），（4）样品都是“飞来石或转石”而没有“原产状岩石”，（5）探测区域“零星散布”而缺少“线与面的整体和连续性”（如熔岩流与不同地层）。针对这些不足梳理月球形成与演化的关键科学问题，通过关键技术的攻关和探测方案的创新，我国载人月球探测有望取得重大突破，建立新的现代月球理论体系。

我国载人月球探测工程可分为两大阶段。第一阶段为首次载人探月，着陆区限定在月球正面南北纬 20 度范围之内，与阿波罗计划和月球号采样点相似，并位于风暴洋克里普地体（PKT）内。嫦娥 5 号着陆区在正面北纬 43 度，也属于 PKT 地体，但形成时间较阿波罗月岩年轻约 10 亿年。在此背景下，如何实现我国首次载人探月的科学突破，面临着重大挑战。第二阶段仍在论证，将开展大区域的月球科学考察，包括研发功能强大的月面移动实验室，首次实现千公里级的月表穿越探测。同时，结合重点区域的单次任务和嫦娥工程无人探测，构建全月球尺度的长期监测网络。通过这一阶段的任务实施，我国月球探测能力将达到空前的先进水平，为建立新的月球科学体系提供关键的技术支撑和保障。月面移动实验室将具有强大的月面移动能力和航天员短期驻留条件，还将具有沿途开展原位探测，以及样品采集、处理和制备、分析等能力。因此，需要针对上述两阶段的工程约束和优势，充分考虑有人和无人探月任务的优势互补，梳理载人探月的关键科学问题。

新时期月球探测的另一突出变化，是科学探索与应用研究并重，这也是人类向地月空间及深空拓展的必然。同地球轨道相比，月球具有超高真空、平台稳定、低震动、低重力和弱磁场等特性，为天文观测、地球宏观现象监测、基础科学实验等提供了独一无二的平台。同时，为了支撑月球基地的长期持续运营，保障航天员的月面生存与活动，还需要开展月球原位资源利用和月面生命科学研究等。

2.1 月球外动力演化历史

2.1.1 辐射粒子与月表相互作用及月面大白斑成因之谜

粒子辐射是决定地球和火星等宜居环境的主要外动力，是研究地-月-日空间环境的重要内容。同时，月面环境及其变化是未来建设和运营月球基地的关键要素，是航天员月面活动的安全保障。月面辐射环境与月表的相互作用，主要包括不同空间和时间条件下的月面入射粒子（组成、能量和通量）、月表地形地貌和电磁场、以及月壤物性和组成（图 1）。

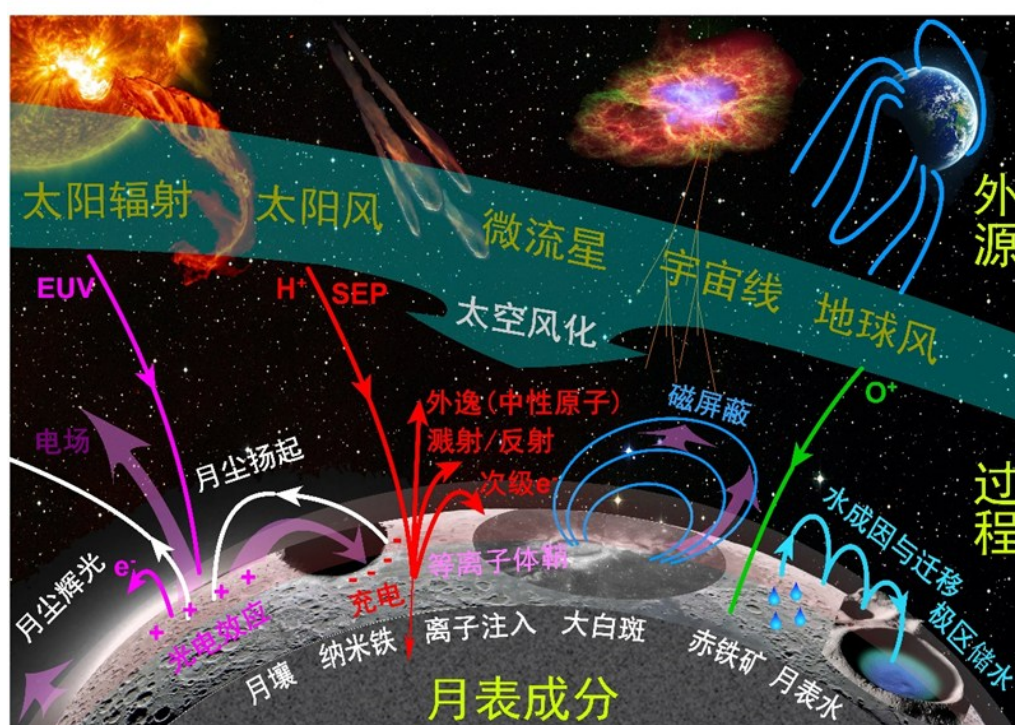


图 1. 粒子与月表的相互作用示意图。辐射粒子包括太阳 EUV、太阳风和高能粒子、宇宙线、微流星、以及可能的地球风；产生的效应包括月尘的迁移（扬起与辉光）、次级辐射、月表成分和物性的改变（大白斑、月壤、纳米铁、H 和 He 等离子注入）；这些过程的效应受月表的电场和区域磁异控制。

关键科学问题包括：

（1）大白斑的成因：在各种粒子的长期轰击下，月表物质（即月壤）的微观形貌、晶体结构、物质组成和物性等发生改变（即太空风化）。太空风化的一个显

著结果是改变月壤的光学特性。月球高分辨光学影像显示，月面上一些区域存在大白斑(swirl)[Denevi *et al.*, 2016; Hemingway and Garrick-Bethell, 2012]，其在同一期次的熔岩流表面呈现出复杂的亮度结构，其成因是月球表面涉及多学科交叉的未解之谜。

(2) 月面磁异常的精细结构和成因：月球没有全球性的内禀磁场，但局部存在磁异常，强度达上百 nT，可有效阻挡太阳风，形成局部的屏蔽环境。磁异常的探测数据主要来自卫星探测，而缺少异常区迷你磁层的三维结构。月面磁异常的成因尚无共识，有观点认为磁异常对太阳风的屏蔽是产生大白斑的原因，但两者在空间分布上并非完全的对应关系[Richmond and Hood, 2008]；也有观点认为磁异常的出现与小行星撞击有关，但两者在空间上并无明显的关联。

(3) 月面环境的时空变化：月球表面持续受到太阳风和太阳高能粒子、宇宙线等的直接轰击，但这些粒子的组成、通量和速度是什么？在月球表面不同经纬度、不同地貌地形上如何随时间变化？这些粒子，特别是高能粒子和宇宙线如何与月表物质相互作用？产生的次级粒子的组成和通量等，都是待解之谜。

(4) 月尘的扬起和迁移：阿波罗登月航天员曾看到月球地平辉光，被解释为漂浮尘埃对太阳光的散射。但是，不论是月球轨道的遥感探测[Horányi *et al.*, 2014; 2015]，还是巡视探测和着陆采样，均未观测到自然条件下月尘的漂浮和迁移现象。月球表面是否存在月尘的自然扬起和迁移？自然扬起月尘的粒度分布、高度和通量是多少？月尘扬起所需要的外部条件是什么？月球辉光现象的产生机制？

(5) 地球风的存在与否：地球电离层/高层大气上行的粒子共同组成了地球磁层中的粒子流，同太阳风一起轰击月球表面，即“地球风”。根据理论模型，地球风的成分主要为 H^+ 、 O^+ 、 NO^+ 、 N^+ 、 O^{2+} 等离子，而太阳风由 H^+ 和 He^+ 离子组成。但是，月球表面是否受到地球风的辐射，本身就是有待验证的科学问题[Ozima *et al.*, 2005]。地质历史上，月球曾经更靠近地球，对地球风辐射有何影响？能否从月壤剖面检测出地球风，并据此反演地球大气组成和古磁场的变化信息？

研究现状：(1) 月球大白斑成因有磁异常对太阳风粒子偏转产生的太空风化差异说、彗星撞击暴露次表层新鲜月壤说、以及月尘迁移导致的月壤颗粒分离说等。轨道探测表明，大白斑与磁异常在空间分布上有一定的相关性，大白斑区域总体风化程度较低、较为明亮，且亚铁吸收峰较强，既支持太空风化差异说，也可解释为

更微细或长石质月尘的覆盖。目前，磁异常区域、大白斑明暗条带之间在物质组成和太空风化特征方面，都没有原位探测；（2）月面磁异常的精细结构和成因。目前仅从轨道探测识别出磁异常区域，缺少磁场原位探测，磁异常的精细结构只是基于月表与太阳风相互作用的简单建模；（3）月面环境的时空变化。由于空间粒子与月面的相互作用，导致月面辐射环境与地月空间辐射环境的显著差异。目前的探测缺少对月面空间粒子成分、能量和通量、特别是次级粒子的长期监测；（4）月尘的扬起和迁移。月球辉光的形成之谜一直未解，通常被认为是月尘扬起的结果，但无观测证实。嫦娥3号、4号巡视探测也未发现降尘对光学传感器和太阳能电池板有明显影响；（5）地球风的存在与否。该科学问题主要基于理论预测和模型构建。月船1号M³光谱数据给出的月表水分布和赤铁矿存在证据[Li et al., 2020]，可解释为地球风氧离子对月球表面的轰击，但缺少原位探测的验证。

重要意义：月表辐射粒子及其与月壤的相互作用不仅是亟待解决的空间科学基础问题，同时也是支撑月球探测、特别是未来月球科研站建设和长期运营的关键因素。辐射粒子与月表物质的相互作用，很大程度上改变了月表物质的特性，是正确解译遥感探测数据、获得全月表物质组成和物性的基础，也是反演月壤剖面记录的月表暴露历史的基础。轰击月表的粒子中太阳风H⁺和He⁺离子占主要成分，并注入月壤，是重要的月球资源。开展月表环境综合探测，有望解开大白斑成因、磁异常成因及其精细结构、月尘扬起和迁移、地球风存在与否、以及早期地球大气组成和磁场等科学谜题。

2.1.2 月壤剖面记录的陨石撞击和太阳辐射历史

影响地月系统演化的主要外动力为陨石撞击和太阳辐射。早期小行星撞击规模大且通量高，直接影响了地-月系统的地质构造演化，其撞击通量变化主要以撞击坑分布规律的形式记录在月表。晚期小行星撞击通量低，但仍是决定地球宜居环境要素之一。小行星撞击的通量变化与行星轨道演化相关，是太阳系动力学演化的关键记录。同时，撞击坑统计被广泛用于月球等天体地质单元的定年。小行星撞击相关的信息，还以撞击熔融玻璃珠、残留的小行星碎片等形式保存在月壤中。其中，通过分析小行星的碎片可了解小行星的类型分布。另一方面，月壤剖面的样品曾在不同时期暴露在月表，遭受各种辐射粒子的轰击。因此，理论上月壤剖面完整记录

和保存了 40 多亿年以来，地月空间的小行星撞击、太阳和宇宙线辐射、以及重大的天文事件等信息（图 2）。

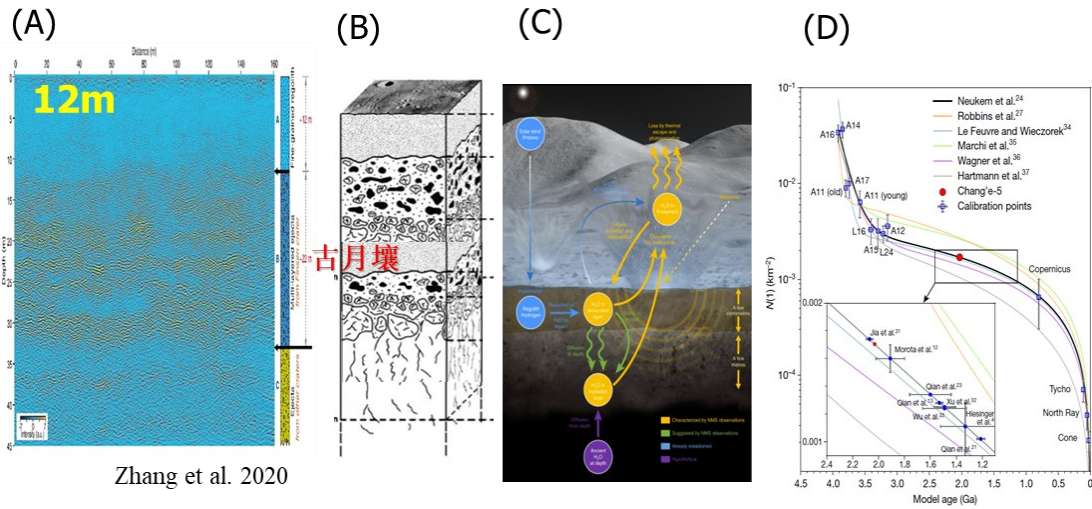


图 2. 月表记录的地-月系统的外动力演化历史。A) 雷达探测到的月壤和浅层结构 [Zhang et al., 2020]; B) 月壤和浅层结构示意图[Heiken et al., 1991]; C) 太阳风注入在月壤中的循环[Schörghofer et al., 2021]; D) 撞击月球的小行星通量变化[Li et al., 2021]。

关键科学问题包括：

(1) 月壤形成过程与物质来源和混合机制。月壤由太空风化形成，小行星撞击不仅会造成物质的溅射堆积，也会挖掘抛射。虽然月壤剖面记录了相应区域的小行星撞击和空间粒子辐射历史，但月壤剖面的物质存在显著的相互混合。例如，哥白尼和第谷等年轻撞击坑辐射条纹与下伏古老月壤是如何混合？揭示月壤的形成过程和物质的混合，是反演月壤剖面历史记录的基础。

(2) 撞击地月系统的小行星类型及其随时间的变化。相对于八大行星，小天体的轨道不稳定，可以从小行星带或柯伊伯带演变为近地小天体，并撞击地月系统 [DeMeo and Carry, 2014]。太阳系动力学模拟表明，早期木星等巨行星曾发生轨道的迁移，将外太阳系的小行星向内弹射，而内太阳系的小天体向外弹射 [Morbidelli et al., 2005; Tsiganis et al., 2005; Walsh et al., 2011]。这一机制被用于解释 39 亿年的晚期重轰击假说 (Late Heavy Bombardment) [Gomes et al., 2005]。结合月球撞击坑/盆地的分布，通过对月壤钻孔剖面 and 不同月表年龄的月壤样品中小行星碎片的分析，将揭示 40 多亿年以来，撞击地月系统的小行星类型分布及其随时间的演化规律，构建太阳系动力学演化模型。

(3) 早期太阳的辐射特征及其随时间的演变：月球表面记录了现代太阳风和太阳高能粒子与月表物质相互作用。不仅如此，完整的月壤岩芯样品记录了长达 40 亿年以来的辐射环境信息，是独一无二的太阳样品收集器和记录仪。通过分析完整月壤剖面的样品，将获得 40 多亿年以来太阳辐射强度和组成的可能变化。

(4) 宇宙线辐射历史和高能天文事件：高能宇宙线与月表物质发生核反应，形成放射性或稳定同位素。太阳系近临超新星等爆发，可能向太阳系抛射富中子的核素，沉降在月球表面。因此月壤剖面可以记录 40 多亿年以来，太阳系是否存在近临高能天文事件。

(5) 太阳风氢的注入与月表水的迁移和循环：太阳风的注入是月表水（各种形式的氢）的重要来源之一。但是，太阳风的 H^+ 离子如何与月壤物质作用，转变为何种形式并被固定下来？氢注入与加热丢失的过程和动力学机制？氢在月壤剖面垂直方向、以及纬度方向的是否存在迁移等都不清楚。

研究现状：月壤的厚度与月表年龄正相关，嫦娥 4 号着陆区的年龄约为 36 亿年，月壤厚度约 12 米[Zhang et al., 2020]。显然，阿波罗计划所钻取的月壤岩芯（最大长度为 3.05 米）仅代表一小段月壤剖面，对其分析显示了最上部 1 米内样品物性与深度的相关性，而更深部的月壤较为均匀，可能反映了早期更为强烈的混合作用。月壤剖面的物质迁移和混合还缺少定量模型的约束。

月壤的研究主要集中在两方面，即太阳的物质组成和太空风化作用。月壤中太阳富 ^{16}O 的氧同位素组成的发现，颠覆了长期以来有关太阳系氧同位素异常的认识[Guo et al., 2022; Hashizume and Chaussidon, 2005; McKeegan et al., 2011]。太空风化使月壤矿物颗粒表层产生玻璃化、纳米铁、三价铁、铜硫化物沉积和 He 气泡等[Gu et al., 2022; Gu et al., 2023; Li et al., 2022]，改变了月表物质的可见和近红外光谱特征。轨道光谱探测表明，月壤中太阳风 H 的注入可能是月表水最重要的来源，且含量有向高纬度升高的趋势[Li and Milliken, 2017]。但水在月壤深度剖面垂向、以及不同纬度区域之间的迁移和循环机制等仍是认识空白。强亲铁元素的示踪表明，月壤中加入了约 1% 的小行星物质[Zong et al., 2022]，但目前只找到很少的小行星残留碎片[Li and Milliken, 2017]；宇宙线与月表物质的相互作用仍局限于宇宙成因放射性核素及其所反映的暴露年龄和历史。

重要意义：月壤是月球表面最具有特殊性、且是全球分布的物质。迄今为止几

乎所有月球遥感探测的直接对象是月壤（尤其是轨道探测）。另一方面，月壤（钻孔岩芯）记录了最完整的长达 40 亿年以来，不同尺度（百公里至次微米）小天体的撞击、各种辐射粒子与月表的相互作用。这些外动力作用不仅是地球等类地行星早期的重要演化动力，更是决定宜居环境及其演化的关键因素。此外，月壤也是月球原位资源利用的主要对象，上述关键科学问题的研究，对工程实施提供了重要的支撑。

2.1.3 大型撞击盆地的形成与影响

小天体撞击是行星演化的重要动力之一，已识别出直径大于 200 公里的撞击盆地有 74 个左右[Neumann *et al.*, 2015]，其中最大的 SPA 盆地长轴达 2400 公里，深度约 12 公里。撞击事件对月表的形貌和物质组成产生强烈的改造，特别是撞击盆地事件的影响是全球性的，挖掘和抛射出月球的深部物质[Melosh *et al.*, 2017]，撞击产生的瞬时坑导致月球物质发生大规模的混合和熔融，影响深度可达 400 公里[Melosh *et al.*, 2017]。撞击事件与火山活动密切相关，强烈的冲击波还能影响撞击对跖点的地质构造活动（图 3）。

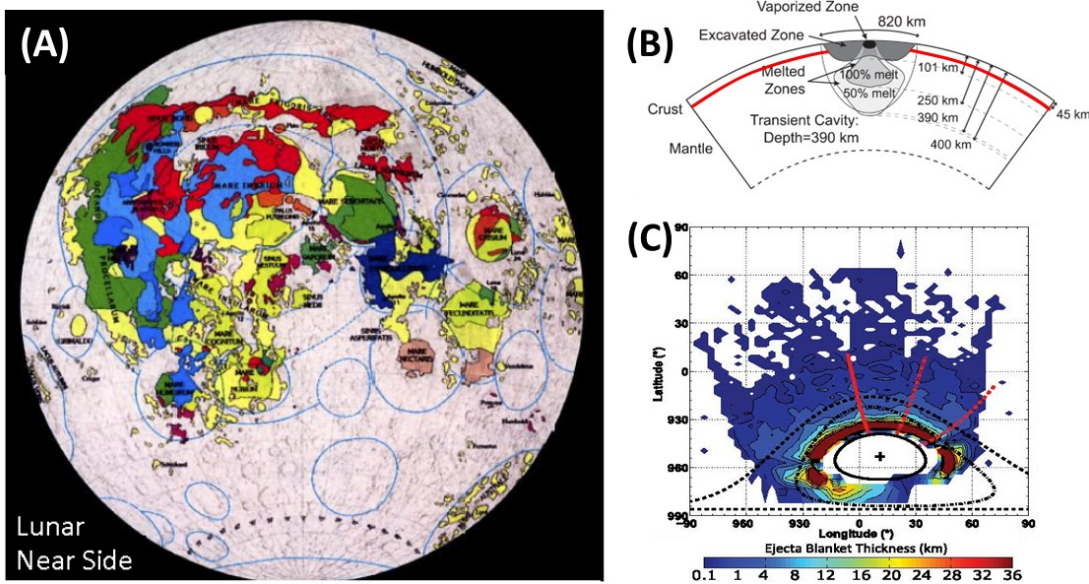


图 3. 大型撞击盆地的形成与影响。A) 撞击盆地与月海玄武岩充填的空间关系[Dhingra, 2018]; B) 大型撞击对月亮和上月幔物质组成的改造[Hurwitz and Kring, 2014]; C) 撞击事件的挖掘和溅射对月表物质迁移和混合的作用[Melosh *et al.*, 2017]。

关键科学问题包括：

(1) 大型撞击盆地的形成机制：包括撞击盆地的三维结构、中央峰和环形山的物质组成与形成机制；盆地的挖掘深度，盆地基底的岩石组成和构造，玄武岩的充填及其与盆地形成事件的联系；重力异常与盆地构造的关系；溅射毯和辐射纹的空间分布和物质组成等。

(2) 大型撞击事件对早期月球演化的影响：撞击事件对月亮，甚至月幔物质的挖掘、混合和熔融改造；环雨海盆地的富 Th 条带分布与雨海盆地形成事件的关联；超大型撞击在对跖点区域可能产生的影响，特别是 SPA 盆地的形成与风暴洋成因和 PKT 地体形成之间是否存在关联。

(3) 是否存在 39 亿年晚期重轰击事件：许多撞击盆地的年龄集中在 39 亿年左右，但是由于后期撞击事件的叠加和改造，相当多的撞击盆地在地形地貌特征上并不明显，需要尽可能识别出所有的撞击盆地。在此基础上，需要测定主要撞击盆地的同位素年龄，厘定最早期的撞击通量，从而确定晚期重轰击事件的存在与否。

研究现状：对大型撞击盆地的认识主要基于轨道遥感探测，包括地形地貌、物质组成分布、重力场等。强烈撞击事件可能改变月球的孔隙度[Huang *et al.*, 2022]，撞击盆地大小分布与月球的厚度和温度相关[Miljković *et al.*, 2013]。大型撞击事件可能揭露出月幔物质，在一些撞击盆地周边分布富橄榄石物质[Miljković *et al.*, 2015]。但是，迄今尚未对撞击盆地进行横贯剖面的巡视探测，更没有开展相应样品的采集，无法对轨道探测结果进行就位探测验证，更不能基于样品分析获得新认识。例如，GRAIL (Gravity Recovery and Interior Laboratory) 卫星探测识别出质量瘤及其分布[Melosh *et al.*, 2013]，其成因和影响并不清楚。中央峰和环形山可能形成于撞击压力卸载后深部物质的反弹，但也有模拟计算表明可能是残留撞击体物质[Yue *et al.*, 2013]。另外，绝大部分撞击盆地形成时间缺少同位素定年，需要采集更多盆地的撞击熔融样品，以精确测定它们的形成时间。

重要意义：开展大型撞击盆地的穿越探测，从而获得典型撞击盆地的三维结构标准模型，揭示早期撞击事件对月球火山活动和构造运动的影响，建立月表物质的搬运和混合模式等。撞击盆地形成的同位素年龄确定，还将厘清地月空间最早期的小天体撞击通量，标定古老(>40 亿年)地质构造单元的撞击坑定年模型，判定是否存在 39 亿年晚期重轰击事件，并对太阳系行星轨道动力学演化给出关键的制约

参数。

2.2 月球内动力演化历史

2.2.1 月球火山活动的时空变化与月幔源区的长期演化

月海玄武岩喷发是月球最重要的火山活动，活动规模反映了月球的热状态和热演化历史。同时，玄武岩是月幔源区部分熔融的产物，携带了月幔物质组成、状态等信息，是月球深部的探针（图 4）。

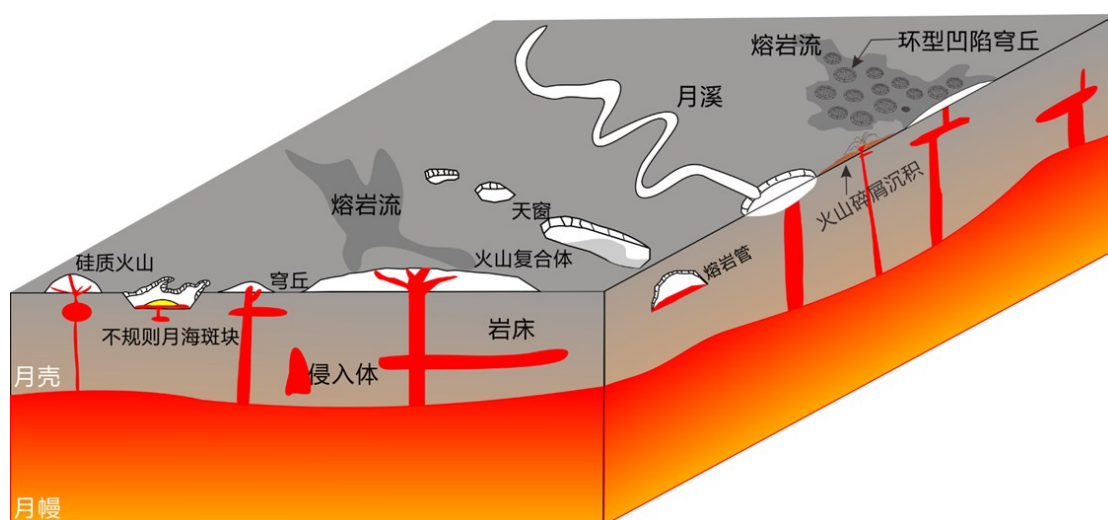


图 4. 月球火山活动。各种类型的火山活动及相关构造。这些火山的岩浆源自月幔的部分熔融，携带了月幔深部信息。

阿波罗计划返回了约 30 亿~39 亿年喷发的玄武岩样品，我国嫦娥 5 号返回了迄今最年轻（20.3 亿年）的月海玄武岩。撞击坑统计定年还显示月球表面大规模火山活动至少持续到距今约 10 亿年前，小规模火山活动甚至晚至数亿年前。此外，所有的采样返回任务均着陆于月球正面，而月球具有明显的二分结构，即正面以月海玄武岩为主（占月海玄武岩总面积的 94%），背面以高地斜长岩为主。除玄武岩之外，轨道探测还发现了特殊类型的火山喷发产物，但迄今还未对其开展原位探测和采样返回。

关键科学问题包括:

(1) 玄武岩熔岩的结晶过程与分异作用: 玄武岩岩浆在喷出月表冷却和分异

结晶过程中，水和挥发分很可能发生强烈的去气丢失，并伴随相关同位素分馏。由于缺少对同一熔岩流的系统探测和垂向剖面采样，对其结晶分异过程、水和挥发分的去气作用等缺少实际观测和样品的制约，玄武岩喷发过程的基本问题仍不清楚。

（2）玄武岩浆的形成与演化：月海玄武岩的喷发强度随时间减弱，嫦娥 5 号样品的研究将其喷发时间从 30 亿~39 亿年延续到 20.3 亿年前[Li *et al.*, 2021]。科学问题包括月球上最古老和最年轻玄武岩的年龄？不同类型玄武岩的形成深度和机制？其部分熔融、分异结晶过程、喷发和冷却过程及其伴随的同位素分馏是怎样的？玄武岩的类型、规模等随时间的变化规律及其机制等？

（3）特殊火山地貌的形成机制：不规则月海斑块（Irregular Mare Patch）可能代表了极为年轻（约 1 亿年）的小规模火山活动[Braden *et al.*, 2014]，或是雨海纪富含挥发分火山口的塌陷[Qiao *et al.*, 2019; Stopar *et al.*, 2019]。科学问题包括富硅质火山穹隆的形成机制和意义？月球上是否存在花岗岩等高度分异的岩石[Siegler *et al.*, 2023]？阿波罗样品的火山玻璃，其母岩浆非常富含水和挥发分物质[Saal *et al.*, 2008]。轨道探测发现波得月溪等区域分布有暗色火山碎屑堆积（Dark Mantle Deposit）[Head and Wilson, 2017]，其光谱特征显示可能富水[Milliken and Li, 2017]，它们的组成特征和形成机制？同一地质构造单元火山喷发模式发生转变的机制？月表一些盾形火山[Spudis *et al.*, 2013]的形成深度和成因等。

（4）月球火山活动时空分布的不均一性：月球最显著的特征之一是正面与背面的显著差异，但产生该不均一性的原因是什么？是否反映了正面与背面内部结构和热历史的差异，且与生热放射性元素分布相关？

（5）月幔源区的物质组成及其时空演化：基于对玄武岩形成与演化的深入认识，将更准确地反演其月幔源区的地球化学特征。在此基础上，通过对不同时空分布玄武岩的探测，将揭示月幔的物质组成及其时空演化，包括玄武岩岩浆熔出对月幔源区物质组成的改变？月幔源区是否存在去气脱水过程？不同区域间月幔物质组成的异同性和产生机制等？

研究现状：目前所有的采样任务都集中在月球正面很有限的区域，且未在原产状的玄武岩剖面露头进行探测和采样，也没有对同一熔岩流沿流动方向开展系统的探测和采样，很大程度制约了对月球火山活动的认识。嫦娥 5 号返回的月壤样品中岩屑主要（>90%）来自着陆区上覆玄武岩，其中不同结构的岩屑代表了不同

深度（不同冷却速率）的样品[Tian *et al.*, 2023]，但仍无法恢复确切的空间关系。对着陆点区域小范围采样，很难获得对同一区域多期次火山活动的认识，也无法揭示同一地质构造单元内月幔源区的演化。基于阿波罗和嫦娥月球样品的研究，估算出的月幔源区水含量变化范围达近 2 个数量级，除此之外，未能发现其时空变化规律[Hu *et al.*, 2021]。古老的玄武岩（隐月海玄武岩）、月球背面的玄武岩、火山碎屑岩、不规则月海斑块构造、富硅质岩等[Nemchin *et al.*, 2009]都是就位探测和采样的空白。

重要意义：火山活动是月球内动力演化的最主要外在表现，是研究月球深部物质组成和热演化的重要窗口。阿波罗计划的着陆点主要在月球正面低纬区域的 PKT 地体，采集的样品多为玄武岩，年龄在 30-39 亿年。嫦娥 5 号采集了 1.731kg 月壤，从中发现了迄今为止最年轻的玄武岩（20.3 亿年），已有的研究成果颠覆了对年轻火山活动和克里普岩的认知[Chen *et al.*, 2023]。显然，通过对重点地区（如波得月溪）和月球地质大剖面的火山活动开展系统、全面的探测和采样返回，将解决月球火山活动的一系列重要科学问题。

2.2.2 风暴洋克里普地体的形成与改造

基于 Th 的分布，结合 FeO 和 TiO₂ 等含量，Jolliff 等[2000]将月球划分为风暴洋克里普地体（PKT）、斜长岩质高地地体（FHT）、以及南极艾肯盆地（SPA）三大地球化学省。PKT 地体主要由雨海盆地和风暴洋组成，是月球上最重要的月海玄武岩分布区和最富 Th 区域（图 5）。生热的放射性元素 Th 富集，还被解释为该区域月海玄武岩发育的热量来源[Borg *et al.*, 2004]，但是这一传统模型受到嫦娥 5 号样品研究成果的挑战。嫦娥 5 号着陆的月幔源区并无富集克里普特征，岩浆的高 Th 等放射性元素含量是岩浆演化的结果[Tian *et al.*, 2021]。PKT 地体异常年轻玄武岩的形成仍是未解之谜[Chen *et al.*, 2023]。此外，克里普主要是富集 K、REE、P 和其他大离子不相容元素的化学组成信号，主要存在于月海玄武岩和撞击熔岩。月球岩浆洋假说预测壳幔间存在克里普（KREEP）岩，但仅在阿波罗 12 月岩和 SaU 169 月球陨石中发现一些可能的克里普岩屑[Liu *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2012]。

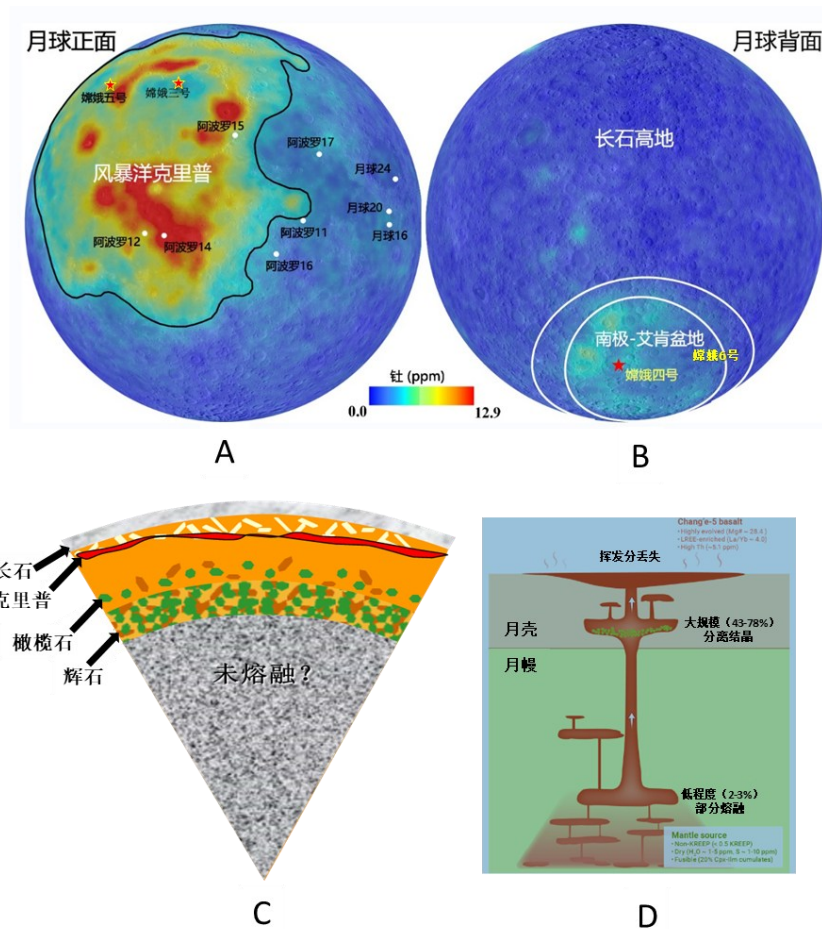


图 5. 风暴洋克里普地体的形成与改造。A-B) 月表 Th 含量的分布，及其反映的风暴洋克里普地体，正面与背面的显著差异反映了月球的二分性。C) 月球岩浆洋假说，解释克里普组分产生的机制；D) 岩浆的部分熔融和分异结晶过程也可产生类似克里普特征[Chen *et al.*, 2023]。

关键科学问题包括：

(1) 克里普岩的存在与否：根据月球岩浆洋假说，初始月球由全球性岩浆覆盖，岩浆深度达数百公里[Warren, 1985]。岩浆洋的分异结晶形成了月幔与月亮，并在壳幔之间残留了克里普岩。克里普岩存在与否，是月球岩浆洋假说的关键证据。

(2) 风暴洋的成因：风暴洋是 PKT 的主要构成单元，但其成因存在争议。是由一次或多次撞击叠加形成[Nemchin *et al.*, 2009]？还是 SPA 盆地撞击事件在对跖点的作用结果[Zhang *et al.*, 2022]？月海玄武岩充填于撞击盆地和撞击坑，但整个风暴洋区域在形貌上，并未显示由一个巨型撞击盆地或数个撞击盆地复合构成的特征[Andrews-Hanna *et al.*, 2014]。

(3) 风暴洋克里普地体的空间分布与成因：雨海盆地周边的富 Th 环带，被解释为挖掘和溅射的深部克里普物质，但风暴洋的 Th 分布具有完全不同的特征 [Lawrence *et al.*, 2000]。而嫦娥 5 号样品研究表明，高 Th 和其他不相容元素含量也可以是岩浆高度分异的结果，可以同克里普组分无关。因此，需要重新探讨 PKT 地体的成因。

研究现状：PKT 地体的提出和划分，是基于环绕探测的 Th 含量分布和阿波罗月球样品的研究结果。但在阿波罗计划实施时代，并没有 PKT 地体的概念，更无针对该问题的探测任务。克里普仍是一种假设的端元组分，尚未发现该类岩石。嫦娥 5 号样品研究表明，高度的岩浆分异也可以产生类似克里普的化学组成特征 [Tian *et al.*, 2021]。因此，需要重新审视 Th 含量空间分布的地质构造意义、月球岩浆洋假说、以及 PKT 地体的矿物岩石地球化学特征及成因。此外，风暴洋的形成对 PKT 地体的形成和改造至关重要，但其成因存在争议。GRAIL 卫星的探测揭示了环绕 PKT 地体的重力异常呈现多边形的形态特征 [Andrews-Hanna *et al.*, 2014]，与超大型撞击盆地假说不吻合。

重要意义：尽管 PKT 地体是研究最为广泛和深入的区域，但随着研究的深入却发现更多的问题，特别是嫦娥 5 号样品的研究，引出对克里普岩存在与否的质疑，并可能需要重新厘定 PKT 地体的空间分布。因此，针对 PKT 地体的地质构造、Th 和其他元素含量的空间分布，开展重点区域（如最富集 Th，且富 FeO 或贫 FeO）和地质大剖面的系统探测和采样，有望解决 PKT 地体的形成机制、月球不均一性的成因，修正月球固化结晶过程，取得月球科学的突破性认识。

2.2.3 下月壳的物质组成与改造

月球岩浆洋的分异结晶形成壳-幔圈层结构，已知上月壳为月表出露的高地斜长岩，但对下月壳的认识还很有限，通常认为镁质岩套等深成岩是下月壳的代表性岩石，可能记录了原始月亮早期经历的改造作用，是理解月亮形成与演化的关键，对探究月亮二分结构的成因具有重要意义（图 6）。

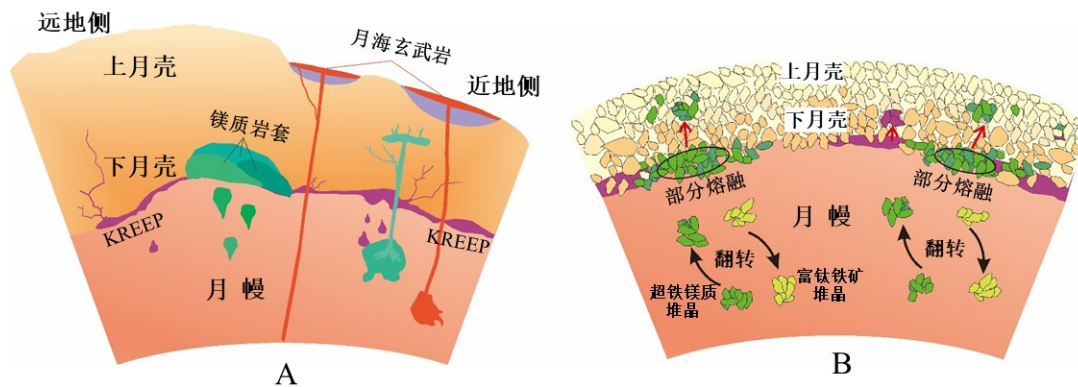


图 6. 下月壳的物质组成与改造。A)月球岩浆洋分异结晶形成的月球正面与背面的壳层结构与玄武岩的形成；B)月幔翻转及相关的下月壳部分熔融改造[Xu *et al.*, 2020]。

关键科学科学问题包括：

(1) 月壳的物质组成剖面：月壳的平均厚度为 50 公里，其中高地区域的月壳达 70 公里，月海区域月壳平均厚度约为 8 公里。月球岩浆洋模型中提出了原始月壳物质组成的理论模型，但缺少精细的月震数据，也未开展 SPA 盆地的系统采样，月壳的物质组成模型仍有待验证。

(2) 镁质岩套的成因：镁质岩套形成于月壳下部，具有高的镁指数 ($Mg\# > 85$)，但同时又富集不相容元素[Shervais and McGee, 1998]，这与传统的岩浆分异结晶矛盾，被认为可能混染了克里普组分[Prissel Tabb *et al.*, 2016; Shearer and Papike, 2005]。其形成机制包括上浮斜长石携带的粒间熔体、克里普与超基性月幔熔体的混合[Papike *et al.*, 1997; Shervais and McGee, 1998]、早期月幔熔体与原始月壳的反应等[Nelson *et al.*, 2021]。另一方面，根据岩浆洋模型，斜长岩月壳的形成时间早于下月壳镁质岩套，但同位素定年结果显示二者的年龄基本重合[Borg *et al.*, 2017; Borg *et al.*, 2015]，且初始 ϵNd 值也在同一范围，这与原始月壳和流体/熔体的反应模型相矛盾。

(3) 富橄榄石/镁尖晶石深成岩成因：遥感数据显示富橄榄石和富镁尖晶石岩石的广泛分布[Pieters *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2017]，这些岩相通常被认为来自月幔或者与月幔上涌熔体相关[Prissel Tabb *et al.*, 2016]。但是，返回样品和月球陨石中很少见到这两类岩石。这两类深成岩的成因尚有很大争议，甚至存在月外成因假说[Yue *et al.*, 2013]。

(4) 月亮形成年龄：月球的核幔分异时间约为 45.1 亿年[Halliday and Kleine, 2006]，该时间是月亮形成年龄的上限；苏长质斜长岩的橄榄和辉石 Sm-Nd 同位素的年龄为 44.56 亿年[Norman et al., 2003]，而最古老的月球锆石年龄 44.2 亿年[Nemchin et al., 2009]，后者是月亮形成年龄的下限。但是， ^{146}Sm - ^{142}Nd 灭绝核素体系估算的月亮形成年龄为 43.52 亿年[Rankenburg et al., 2006]，且高地岩石 Sm-Nd 和 Rb-Sr 年龄也主要分布在 43.4-43.7 亿年[Borg et al., 2015]，月亮形成年龄仍未达成共识。

研究现状：阿波罗样品中深成岩所占比例低于 5%，主要采自阿波罗 16 着陆区。全月球的光谱数据揭示了大型撞击坑和一些撞击盆地中央峰、SPA 盆地基底等区域分布有镁质岩套等深成岩[Moriarty and Pieters, 2018; Wieczorek and Zuber, 2001]，但迄今尚未采样返回。模拟实验和计算表明，月球的初始成分，特别是水和挥发分的含量对岩浆洋的结晶过程有明显的影响，进而改变月壳的厚度和物质组成[Lin et al., 2017]。基于月壳厚度的约束，模拟结果倾向于岩浆洋具有较低的 Al_2O_3 含量和较浅的深度。在物质组成方面，月球背面斜长岩中镁铁质矿物的 Mg# 比正面的平均高 8%，并且放射性生热元素 Th 等集中分布在月球正面。现有的模型不能解释已有的观测数据。

重要意义：下月壳的物质组成和改造仍是有待突破的重大科学问题。现有认识的不足很大程度在于样品的匮乏。因此，对富橄榄石、富尖晶石等深成岩出露区域的系统探测和采样，将揭示下月壳的物质组成、厘清下月壳的改造过程、阐明岩浆洋演化和月球二分结构的形成机制。

2.3 月球内部结构

2.3.1 月球磁场发电机的起停与月表磁异常的成因

偶极磁场是联系行星内部动力学演化与表面和空间过程的纽带，是行星内核状态和运动的表现，与热演化历史密切相关，一直是地球和行星科学的重要研究内容。另一方面，强烈的撞击作用也可产生磁化或退磁作用，是月表空间环境要素(图 7)。

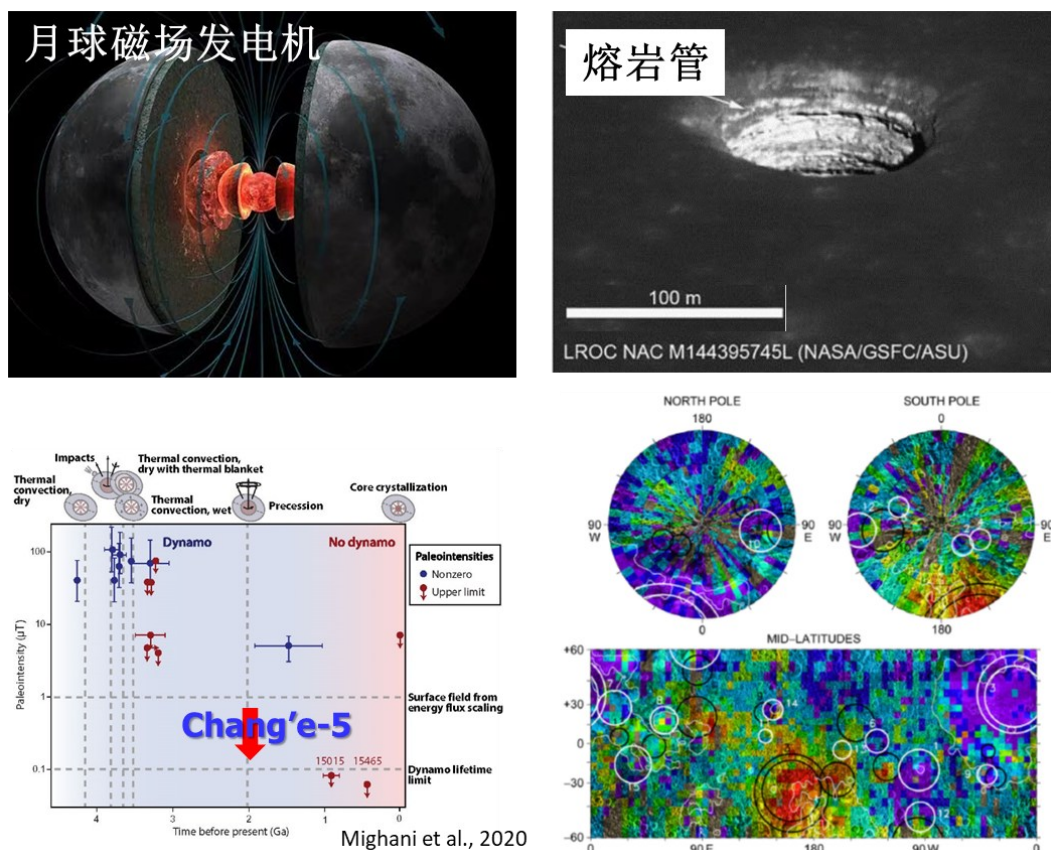


图 7. 月球磁场发电机的起停与月表磁异常的成因. A)月球磁场发电机模型(Credit: Hernán Cañellas (provided by Benjamin Weiss)); B)熔岩管，可能记录月球偶极磁场三维信息的原产状岩石露头；C)月岩的剩磁强度[Mighani *et al.*, 2020]；D)磁异常与撞击盆地分布[Mitchell *et al.*, 2008]。

关键科学问题包括：

(1) 月球是否存在过偶极磁场，磁场的方向如何：阿波罗月岩记录的剩磁表明，早期月球很可能存在磁场发电机，产生一个类似地磁场的偶极磁场。但已有的剩磁分析结果只能给出古磁场的强度，不能得到其方向信息。严格意义上，只有获得同一时期不同地点记录的磁场矢量信息，才能确定是否存在一个全球性的偶极磁场。另外，月球偶极磁场的方向完全未知。

(2) 月球磁场是否发生倒转，倒转频率：地球磁场的一个重要特性是倒转。月球早期如果也有一个工作着的磁场发电机，是否也曾发生磁场倒转？发生倒转的频率、产生的原因等，都是仍未探究的重大科学问题。

(3) 月球偶极磁场的起停时间：阿波罗玄武岩的年龄分布在 30-39 亿年区间，

其冷却过程所记录的也是该时期月球磁场的强度。更早时期月球是否存在偶极磁场？月球磁场发电机启动的时间？月球偶极磁场强度随时间的变化规律和趋势？月球磁场发电机停止的时间？

（4）磁异常区域的磁场精细结构：通常认为月表磁异常与强烈的撞击作用有关[*Wieczorek et al.*, 2012]，撞击形成的高能离子流可产生磁化，而高温作用则造成退磁[*Oran et al.*, 2020]。受轨道（>30 km 高度）探测的空间分辨率限制，缺失磁异常的精细三维结构，制约了对磁异常产生机制的认识。同时，磁异常与月表大白斑之间的成因联系，也依赖于磁异常精细结构探测。

研究现状：对阿波罗样品的剩磁分析表明，月球至少在 40 亿到 35.6 亿年间曾存在一个偶极磁场[*Oran et al.*, 2020; *Weiss and Tikoo*, 2014]，有过一个运动状态的液态金属核，但是该磁场发电机的驱动力有不同的模型[*Le Bars et al.*, 2011]。阿波罗玄武岩样品的形成年龄落在相对狭窄的 30-39 亿年区间，无法对更古老、更年轻的月球磁场进行约束，不能确定月球磁场发电机的启动和停止时间。虽然一些撞击熔岩有可能记录更年轻的磁场，但冲击事件本身可能对样品消磁或磁化。另一方面，所有采集的月球岩石都是转石或飞来石，没有对原产状岩石露头进行原位磁场探测，也无定向岩石样品的三维剩磁测量结果，对早期月球偶极磁场的方向完全不清楚，更无法研究月球磁场是否也曾倒转这一重要问题。轨道探测发现了许多区域的磁异常现象[*Acuña et al.*, 1999; *Mitchell et al.*, 2008]，但由于轨道高度所限，而无法获得更精细的结构。月表一些磁异常区域，其空间分布与撞击盆地有一定的相关性，但也存在无关联的情形[*Hood and Artemieva*, 2008]。撞击事件对磁场的影响还有待探测和研究。

重要意义：由于磁场探测和返回样品的局限，关于月球磁场的认识存在很多问题，而利用载人探月的优势，有望取得突破。例如，对更古老和更年轻玄武岩的探测和采样返回，将最终确定月球磁场发电机的起止时间；对原产状岩石露头的磁场探测和定向岩石采集，将首次确定月球偶极磁场的方向，最终确定月球磁场发电机工作的证据，还有望发现月球磁场可能发生倒转事件。

2.3.2 多物理场约束下的月球内部结构

月球内部结构不仅起源于月球的形成过程，而且控制和影响月球的长期演化，

是最重大的月球科学问题之一。月球岩浆洋假说预测在月球壳-幔之间存在原始克里普岩，并由于重力失稳发生月幔翻转，产生横向不均一性。月球表面具有显著的二分性，但尚不清楚正面与背面的深部是否也存在不均一性。月球内部结构的探测是回答这些问题的重要途径，包括重、磁、电、震、热等地球物理技术手段的应用，其中最关键是月震的探测（图 8）[Briaud et al., 2023; Chenet et al., 2006; Garcia et al., 2019; Khan et al., 2013; Nakamura et al., 1973]。

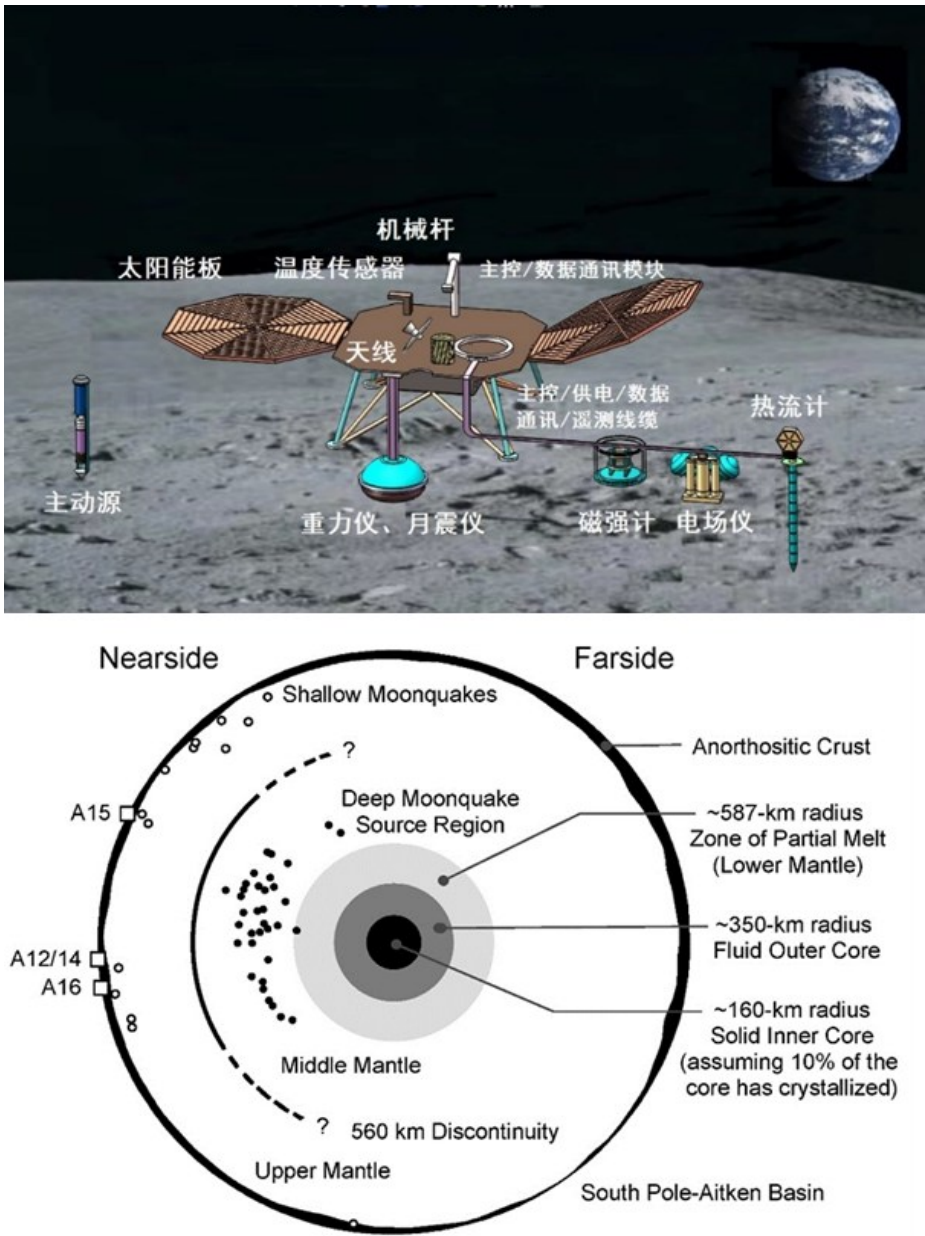


图 8. 多物理场约束下的月球内部结构。上图：在未来探月任务中布设重磁电震热等探测器；下图：阿波罗任务布设的月震仪位置、月震发生位置、以及月球内部结构的框图

[Wieczorek et al., 2006]。

关键科学问题包括：

(1) 月壳的厚度和结构：GRAIL 卫星的探测给出月壳厚度的全球分布，揭示了深部的构造，特别是 PKT 地体周边的多边形重力异常。但这些深部构造需要新的月震数据限定，而已有月壳厚度的月震探测仅限有月球正面区域。

(2) 月幔的结构：除壳幔界线之外，特别需要厘清壳幔之间是否存在原始克里普岩层，以及月幔是否发生翻转，并由此产生的横向不均一性。阿波罗月震台站的探测数据显示在~500 公里处存在 P 波和 S 波的速度变化，还需要更精确的月震探测证实，包括该速度变化的地质意义是什么？是否存在不连续面？深源月震(>700km, 峰值为 900-1000km)发生的机制是什么？

(3) 月核的大小、状态和组成：月球具有一个相对很小的金属核，但准确的大小、成分和状态、以及是否存在一个熔融的外核等还不清楚。此外，如何基于月球密度、转动惯量、以及月球经过地球磁尾产生的磁场扰动等，对月球金属核的大小和状态做进一步约束？

研究现状：月球内部探测不仅困难，且实施的任务很少，是认识月球的薄弱环节。阿波罗任务布设的月震仪受限于当时的技术水平和台站数量，仅探测到月球正面的一些月震信号，月壳厚度的估计从 65-75 公里，修正到 45 公里和 30-38 公里。GRAIL 卫星对月球的重力场进行了精细探测，给出的月壳厚度约为 35-43 公里 [Wieczorek et al., 2013]，并发现了 PKT 地体的多边型重力异常 [Andrews-Hanna et al., 2014]、月球古老岩浆侵入和早期扩张 [Andrews-Hanna et al., 2013]。阿波罗任务中对着陆区的热流进行了探测，但探测深度有限，不能排除太阳辐射影响。磁场的探测数据主要来自轨道器，空间分辨非常有限。而阿波罗月岩样品的剩磁分析发现，早期月球可能存在内禀磁场，但无法获得磁场的方向信息。

重要意义：月球内部结构还有大量未解之谜，是月球科学的突破方向。月球内部结构的研究，在技术上很大程度上依赖于地球物理仪器台网的布设和长期监测，而仪器的安装和调试等，正是载人探月的两大优势之一。月球壳-幔圈层在三维空间上的探测，将对月球岩浆洋假说、月球二分性在深部的延展等取得关键证据。借助月壤超深钻取（嫦娥四号着陆区的月壤厚度）布设温度传感器，有望获得最准确的热流数据，为月球热演化提供最重要的参数。此外，月球地质大剖面科考，将首

次获得重要地质区域的深部结构信息。

2.4 月球地层剖面与“金钉子”确立

综合月球形成与演化的一系列重大事件，厘清它们在时空上的相互关系，并通过重大和全球性事件样品的同位素定年，确定它们的绝对年龄。月球重大标志性事件主要有玄武岩喷发、撞击盆地和大型撞击坑的形成。玄武岩的溢流面积可超过 10 万平方公里，但分布有局域性；撞击盆地和大型撞击坑的溅射物几乎可以覆盖全球。因此，早期形成的撞击盆地、年轻的哥白尼和第谷撞击坑等的溅射物，是很好的地层标志，可以成为月球地层年代的“金钉子”（图 9）。

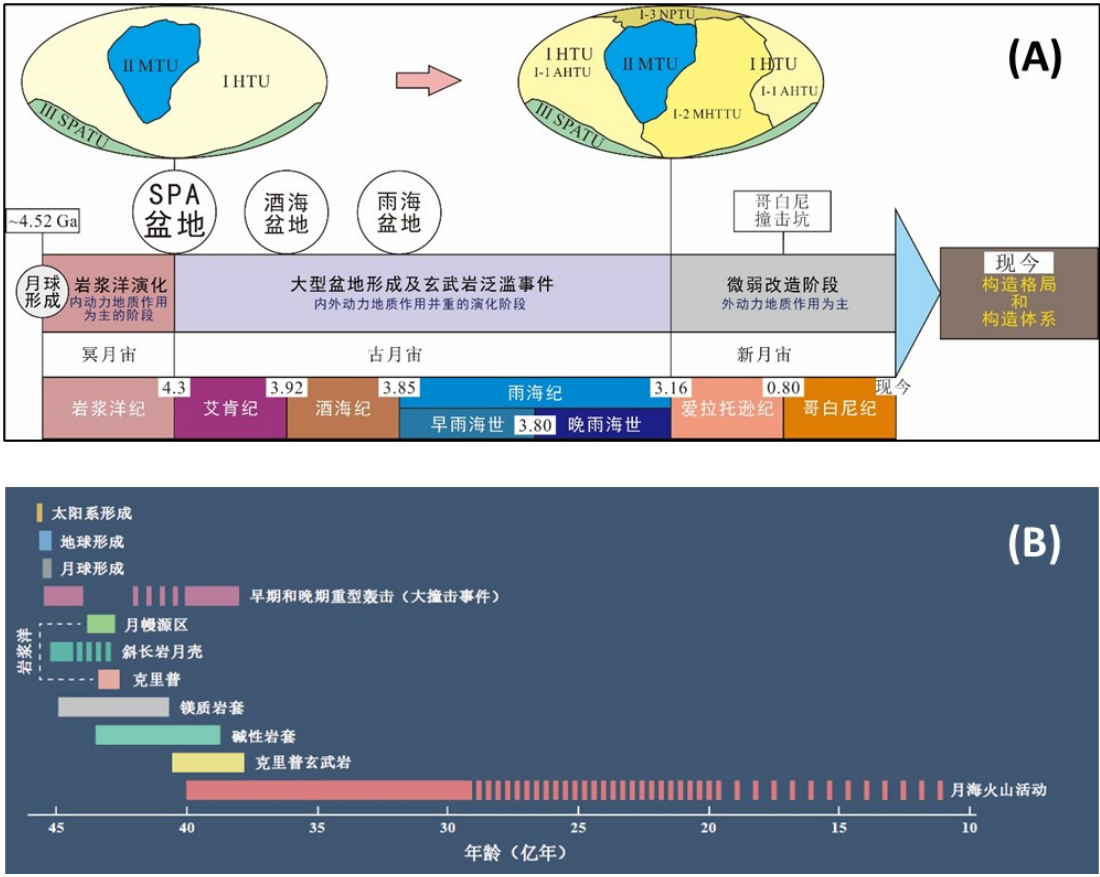


图 9. 月球地层剖面与“金钉子”确立。A) 月球重大演化阶段和主要地层单元划分[Lu et al., 2022]; B) 月球主要岩石类型的形成时间[杨蔚 and 潘梓凌, 2023]。

关键科学问题包括：

(1) 月球 40 多亿年历史的地质构造演化剖面：如何识别重大地质构造事件，

以及同一撞击盆地和大型撞击坑的溅射物在大区域、甚至全月球的分布？如何识别同一区域深度地质剖面所代表的地质构造事件，并构建该区域地质演化历史？

(2)“金钉子”的同位素定年：如何识别各重大地质事件的定年样品，特别是在该事件中重新熔融结晶的岩石？如何区分后期叠加事件的影响？以上问题都依赖于不同类型事件样品的同位素年龄测定。

研究现状：美国地质调查局基于阿波罗样品的研究成果，以及上世纪 90 年代以来获取的高分辨、高精度环绕探测数据，绘制了全月球 1:500 万月球地质图。以酒海和雨海盆地、哥白尼撞击坑等作为事件界线，划分月球的地质演化年表。在此基础上，我国学者绘制了 1:250 万的全月地质图，提出将 SPA 盆地的形成作为最古老的事件界线。目前存在的最主要问题是这些重大事件绝对年龄的测定，而根本原因是同位素定年样品的来源有争议。嫦娥 6 号首次着陆于 SPA 盆地内的阿波罗撞击坑[Zeng *et al.*, 2023]，从返回样品中识别出 SPA 盆地形成的撞击熔岩是准确测定 SPA 盆地年龄的关键。

重要意义：月球地层剖面的建立，将厘清月球地质构造演化的时间序列，更好地揭示不同事件之间的因果关系，全面理解月球的演化历程。月球地质大剖面的综合探测，将通过穿越一系列重大地质构造单元，建立最完整的月球地层剖面。同时，对关键撞击盆地和撞击坑的撞击熔岩样品采集，将首次对这些重要撞击盆地和撞击坑进行同位素定年，建立月球地层剖面的“金钉子”，成为月球演化历史的时间坐标。

2.5 月球原位资源利用

月球原位资源利用是新的研究方向，是建设和运营月球科研站的基础。从利用的角度看，月球资源包括位置资源（特别是空间极其有限的特殊位置，例如极区的撞击坑沿高地、熔岩管天窗）、太阳能（包括温差）、物质资源（如水和各种形式的氢、³He、钛铁矿等），以及建筑材料等（图 10）。

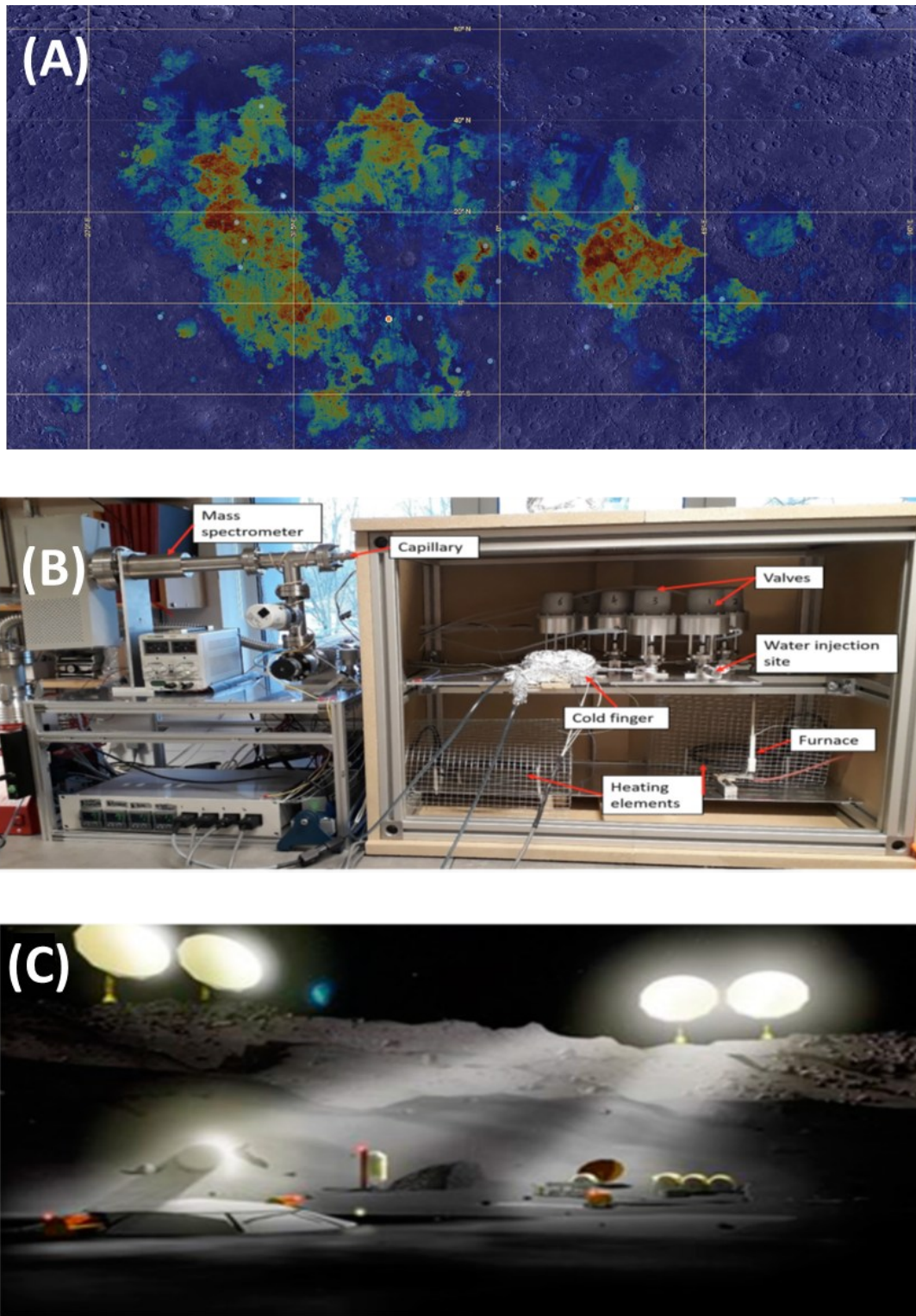


图 10. 月球原位资源利用。A) TiO_2 资源的空间分布 (<https://quickmap.lroc.im-ldi.com/>) ;
B) 月球资源利用关键技术的地面验证实验；C) 月球极区永久阴影区水冰开采的示意图。B,
C 引自[Zhang et al., 2023]

科学问题和关键技术包括：

(1) 潜在原位资源及其存在形式、空间分布和富集机制：月球可利用的资源及其储量、存在形式和空间分布？物质资源在特定区域富集的机制？例如永久阴影区水冰和月壤水（包括各种氢）的赋存形式、含量及其空间分布（深度、纬度）、来源和形成机制等。

(2) 原位资源利用关键技术：包括永久阴影区水冰的开采技术，月壤中水、氢气和挥发分的提取分离技术，月壤的粒度分选和矿物分选（如钛铁矿）技术；月表环境下制氢制氧技术；月壤固化和建造技术等。

研究现状：当前对月球可利用的资源尚未达成共识，对原位资源利用更多是一些技术方案的提出、关键技术的验证等，包括永久阴影区水冰开采工程方案、玄武岩熔融电解制 O_2 方案和纤维制备方案、月壤 3D 打印试验等。在关键技术攻关上，由于采用模拟月壤，一些验证实验（如太阳风注入气体的提取）的有效性不能得到很好地证明。

重要意义：月面原位制备水，不仅提供了重要的生保物质，而且水电解产生的 H_2 、 O_2 气体可作为深空探测火箭的燃料。月壤中的 3He 可作为未来核聚变的燃料，以及超低温的制冷等。月壤固化可为月球基地建造提供基础材料。

2.6 月基平台利用

月球正面永远面向地球，是开展对地球宏观观测的最佳平台。月表高真空、低重力和弱磁场、几乎无月震的超宁静环境、以及月球背面超低的电磁环境，提供了独一无二的天文观测平台，也是开展基本物理实验、生命科学研究的新平台与环境。月基平台利用是未来月球科研站的重要目标之一，但这是一个长期、渐近的过程，并与空间技术的发展相辅相承。当前的研究重点包括如何发挥月基平台的优势，在此基础上结合科学技术的发展趋势和人类社会可持续发展的需求，制定发展路线，开展关键技术的攻关和应用验证（图 11）。

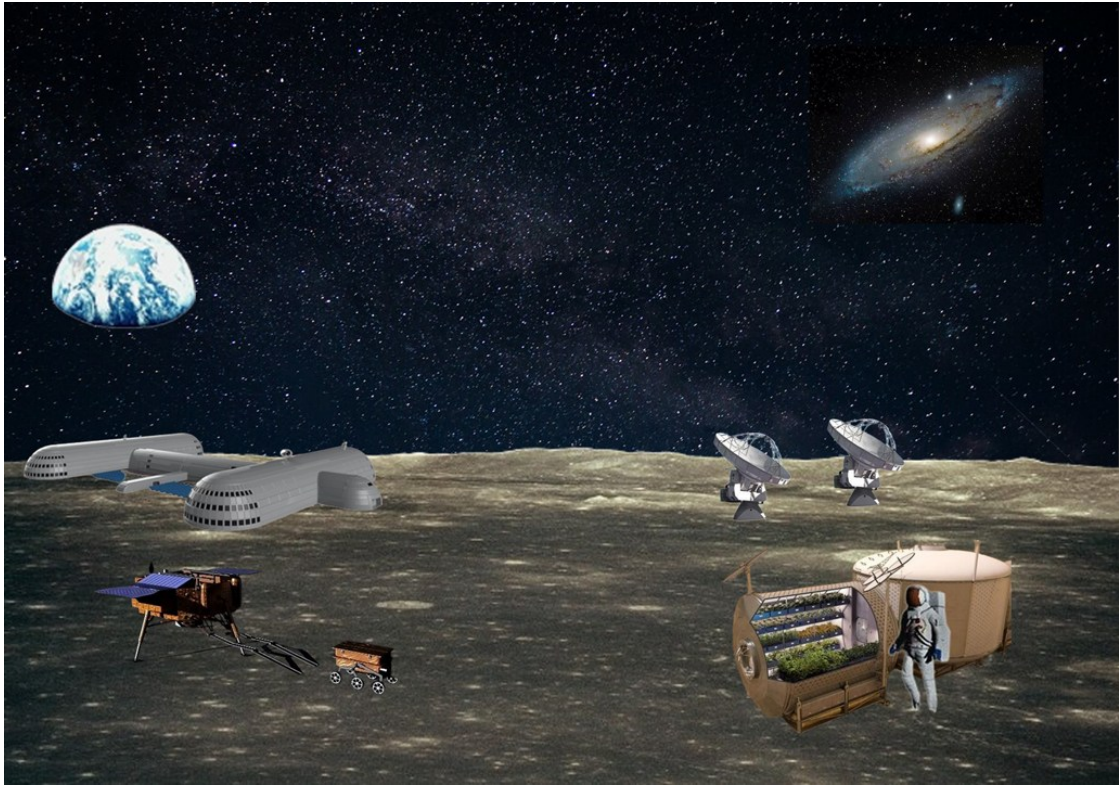


图 11. 月基平台利用示意图。基于月球特殊的环境，开展宏观地球科学观测、天文观测、以及生命科学和基础科学实验。

2.6.1 月基宏观地球现象监测

（1）能量收支平衡与全球气候变化：太阳辐射及其与地球的相互作用是决定全球气候变化的关键因素。相对于人造卫星和地面气象站观测等，月基对地观测可以在全球尺度上进行时间连续、空间一致的长时间观测，准确获取地球全球的能量收支状态及其与全球气候变化之间的关系。

（2）固体地球动态变化：包括固体地球潮汐、板块运动及大陆变形、冰川均衡调整等。月基观测能够解决目前卫星遥感仅获取区域尺度地表形变的局限，揭示全球尺度固体地球动态变化差异性的时空特性。同时，结合地球-月球-太阳之间的相对关系，可揭示全球尺度固体地球的形变机制。

2.6.2 月基天文学

（1）未知的天体超长波电磁辐射：包括宇宙早期的演化历史、宇宙线的起源

与传播、等离子体的传播过程。

(2) 太阳/恒星磁活动的精细物理过程：日冕加热的本质、太阳爆发活动的物理机制；太阳系空间天气演化规律及其对生命系统的影响。

(3) 系外行星宜居性：不同类型恒星的磁活动变化规律、剧烈耀发辐射特性和星冕物质抛射特性；各种恒星和行星系统中，宿主恒星剧烈磁活动产生的电磁辐射、粒子辐射和物质抛射对行星的影响。

(4) 宇宙未知物理过程：包括引力波源和辐射的物理起源、宇宙中特殊元素的谱线辐射、超新星物理机制，并搜寻暗物质湮灭的证据。

(5) 反物质的起源：探测脉冲星和黑洞双星中的正负电子湮灭谱线特征研究。搜寻和发现新一类 MeV 伽玛射线脉冲星天体，首次对伽玛射线脉冲星进行偏振观测。

2.6.3 月面生命科学

(1) 月面生态学：解决人员长期月面驻留的生物再生和生命保障问题。涉及原位资源利用、系统平衡调节、物种对月面特殊环境的适应性机理、植物栽培与食物生产技术等。

(2) 空间环境生物学效应问题：包括月面空间辐射、低重力、亚磁等多因素环境对人体和哺乳动物的影响，解决人员长期月面驻留的健康防护、地球物种的地球外生存问题。

(3) 生命科学与人体研究技术基础：包括原位监测、检测和数据获取技术，生物样品保持和保存技术，微型实验系统等，为月面生命科学与人体研究提供技术支撑。

2.6.4 月面基础物理实验

(1) 月面复杂环境条件下的超冷原子物理、量子低温物态及其特异性质。

(2) 空间高精度的时频系统性能，用于重要基础物理常数和与广义相对论检验相关的前沿研究。

(3) 低重力复杂等离子体的三维物质结构与动力学过程，微观复杂过程物理机制与统计规律。

3.我国及国际的研究基础与条件

3.1 该领域国际发展现状与趋势、我国的国际地位

月球与深空探测已成为国际前沿和热点，特别是美国提出的阿尔忒弥斯计划不仅要载人重返月球，并将月球作为载人登陆火星的踏板。除了科学探索，月球原位资源利用已成为新的热点，月球探测逐步从单次任务的短期探测，发展为建设科考站/基地，向长期连续的综合观测转变。

我国的嫦娥工程不仅逐步具备了全月面到达和采样返回的能力，特别是人类历史上首次在月球背面着陆，在月球科学上也不断取得新发现。嫦娥 5 号对已知最年轻的月海玄武岩采样返回，将月球火山活动时间延长 8~10 亿年，改写了月球岩浆活动和热历史等认识，展示了我国在月球探测和科学研究领域的的能力，大大提升了国际影响力。

过去 20 年，我国无论是深空探测能力，还是月球科学研究水平，都取得了长足进步。但相比美国仍然存在较大差距[张腾飞 *et al.*, 2023]。例如：我国在月球科学研究方面的论文数量逐年提升，目前论文数超过 3000 篇，居世界第二，但我国的月球科学研究仍然存在“三少”问题：（1）优秀论文少，我国每百篇论文产出重要论文数仅 0.9 篇，而美国高达 4.0 篇；（2）顶尖学者少，目前排名前 10 的高产和重要影响力作者均来自美国。从论文发表的时间看，其中 3 位作者起步于阿波罗时代（1969~1972 年），5 位作者起步于重返月球阶段（1991~1998 年），说明月球科学研究严重依赖于深空探测任务的实施；（3）学术期刊少，发表论文数排名前 10 的期刊，美国占 8 个，英国占 2 个。

3.2 我国及国际上该领域目前的投入

月球科学产出与国家在该领域的投入密不可分。据资料显示，1960 年至 1973 年间，美国在阿波罗计划上花费了 258 亿美元（含 25 亿美元科学研究经费，约占 10%），换算为 2020 年的购买力，阿波罗项目总消耗约为 2570 亿美元。到 2025 年，阿尔忒弥斯计划的总成本将达 930 亿美元（含月球科学研究经费 29.6 亿美元）。

我国嫦娥工程实施初期，没有专门安排科学研究经费，这影响了科学成果的产

出，也无法稳定月球科学的研究队伍。近年来，这一状况已逐步改善，例如：科工局联合自然科学基金委一起部署项目群，对嫦娥 4 号、5 号和天问一号任务的科学研究进行了专项资助；探月工程四期专门编制了科学研究的经费预算。

在管理上，国家基金委增设了行星地质、行星物理和行星化学等学科代码，以加强对月球和行星科学的支持。在人才培养方面，行星科学升级为一级学科，一些大学开始招收行星专业本科生，开设更系统的行星科学课程。在研究平台方面，已建成高水平的物质分析平台，但还需针对月球和地外样品的特殊要求，研发相关的分析技术和标样等。

3.3 我国开展该领域研究的优势与劣势

我国的举国体制有利于开展深空探测协同攻关；现有庞大的地球科学研究队伍为转型行星科学提供了机遇；已建设有高水平的物质分析平台可为月球样品研究提供支撑。

我国行星科学起步较晚，目前研究队伍难以支撑未来大量深空探测任务的科学研究需求；地球科学与月球科学的交叉融合较低；月球科学研究与深空探测工程技术交叉融合不足；一定程度上受限于美国已有研究框架，仍需提升科学与技术的创新力。

4.我国在该领域的发展思路与政策建议

4.1 队伍建设

我国行星科学的发展不平衡、不充分、不完备，成为制约我国迈向深空探测强国的瓶颈。开展行星科学学科建设，培养一流的行星科学人才，引领我国自然科学研究体系的转型，服务深空探测国家战略，已迫在眉睫。

应当优先支持有条件、有优势的研究所和高校率先建成行星科学一级学科，继而带动相关高校共建中国行星科学人才培养体系，形成多个研究中心。同时，推动地球科学向行星科学方向融合，合理布局教育体系，扩大高校和院所相关专业的设置。重视科学和工程复合型人才培养，重视青年领军人才和科研团队的建设，逐步建成行星科学高水平人才梯队，引领未来深空探测计划，推动我国早日成为行星科学和深空探测强国。

4.2 平台与能力建设

我国行星科学起步晚，在基础研究平台方面，与美国、欧洲和日本仍存在较大差距。根据行星科学发展的特点和需要，建议 3 个方面加强行星科学研究平台建设。

(1)月球样品保存、处理、制备平台。地外样品的保存和处理是巨大的技术挑战，例如月球和小行星样品都来自于高真空环境，极易受地球大气中水和氧的蚀变。尽管嫦娥工程已建立了月球样品处理设施，但现有设施无论是规模上还是功能，都无法满足未来载人月球探测采集大量月球样品的需求。第一，应支持具有一定条件研究机构建立地外样品实验室，提前为载人月球探测的样品研究做好准备；第二，开展地外样品保存、处理、制备相关的关键技术研发，提升分析测试能力和科学研究水平。

(2)月球物质分析平台。有些地外样品的成分极为复杂且颗粒微细，这对分析技术提出极高的要求，实验室需具备超高空间分辨的微区分析能力，以及超低微量高精度分析能力。我国各研究机构已经构建了一些物质分析平台，但建立在这些仪器上的分析方法主要针对地球样品。因此，建议通过整合和补充，建立专门服务于

行星物质的分析实验平台，并持续开展超高空间分辨和超低微量分析技术的研发。

（3）月球探测载荷研制平台。基于重点科学探测任务，突破高性能传感器、特种材料、弱信号提取与重建等核心技术，实现关键载荷的国产化，提出并研制月球探测的新型载荷。

4.3 国际合作政策

随着全球化进程加深、国际话语权争夺日益激烈。积极开展科技合作有助于抓住国际秩序重塑机遇，构建新型国际科技关系。在未来世界经济实力“东升西降”的发展态势下，应当加强国际化科研环境建设，开展多层次、多主体国际科技合作，支持鼓励民间组织和企业等非政府主体积极开展国际科技合作交流。建设会议论坛和网络论坛，定期召开高层次学术会议，开展国内外学术交流，不定期通过小规模专业学术会议开展交流，随时通过网络讨论区进行交流。鼓励科学家“走出去”，参与国际组织和事务，加强交流；同时支持“引进来”，让更多的国际知名科学家参与到我国的载人月球探测工程，开展从载荷研制/搭载、任务论证、样品和数据分析等全链条合作。同时，作为国际上主要的深空探测大科学计划发起和组织方，应当深度参与深空探测国际技术标准和规则制定，提升国际话语权和规制权。

4.4 制度建设、法规建设、环境建设

（1）平衡顶层设计与自由探索的关系。载人月球探测既是国家战略任务，需从顶层规划和组织任务，保障其能够有序地实施。同时，任务的学术和国际影响力，取决于最终的科学成果产出。因此，在任务的顶层设计与科学家的自由探索之间，需要保持平衡，既保障任务的圆满成功，也能够最大化科学成果产出，提升国家影响力。

（2）保护知识产权，促进开放讨论。强调实施知识产权强国战略，并在行星科学和深空探测领域落实。建议建立白皮书制度，保护科学家的原创想法和知识产权，鼓励科学家深入参与载人月球探测工程的科学目标论证、先期研究、地面科学验证、数据采集、载荷研制等。

（3）以科学目标的实现作为任务的评价标准。深空探测的最终目的还是提升人类对深空和宇宙的认识，要实现从航天大国到航天强国的发展，需要逐步将任务

的评价标准从工程的成功实施转变到科学目标的实现。

(4) 完善技术与科学的贡献评价体系。建立全面的、多元化的科研绩效评价标准，针对不同的工作性质，进行有差异性的分类评价机制。例如：行星科学重在原始性创新，制定评价标准时应本着鼓励探索、宽容失败的指导思想，具体情况具体分析，鼓励“十年磨一剑”，引入中长期考评机制；深空探测工程的绩效评价则需要结合工程任务的需求，把关键技术创新的突破，重大工程的实现等要素作为主要的评价标准。

4.5 组织保障

我国当前的月球探测由两大系统构成，即无人探月的嫦娥工程系列与载人探月。无人和有人探测有各自的优势，例如无人可以着陆于高风险区域，而载人探月首先要确保航天员的安全，但后者在样品采集和仪器安装调试等方面有很大的优势。无人与有人探月是我国月球探测的两种工程途径，需要在国家层面构建由专家和领导机构组成的委员会，统一规划我国的月球探测与应用研究发展路线、工程实施方案。

建议参考美国和欧洲的合作模式，由领域内院士、专家组成稳定的专业学术工作组/委员会，依托行星科学联盟，通过组织学术活动，比如定期发布学科发展指南、指导重大项目研究、开展学科发展交流、争取各方支持和资源、推介高水平成果，对未来行星科学探测任务的目标和着陆区选择、样品和数据分析、科学目标论证、载荷需求等进行长期的规划和论证，根据各任务的科学目标和经费需求，对任务进行优先级排序。

4.6 有效资助机制与政策建议

(1) 加大支持行星科学的原创性和创新性研究，加大国家对行星科学基础研究的投入力度，建立健全多元化的资助机制，带动和提升地方与企业的科技投入水平，为行星科学的发展提供稳定环境。

(2) 加强探测任务相关的科学研究经费支持，在未来深空探测任务中匹配相应比例的研究经费，保障科学研究的开展和成果的实现。

(3) 设立论证和预研究相关的资助，鼓励更多科学家参与到任务前期的论证

和预研究。

（4）加强行星科学青年人才资助的力度，在项目遴选时向青年科学家倾斜，鼓励青年人才参与深空探测工程任务。

（5）进一步优化科研经费管理部门对于行星科学项目的集中受理、同行评议、项目考核。在一项覆盖 564 位行星科学和深空探测研究者的调查问卷中，约 99% 的受访者认为应该集中管理行星科学项目资助，其中，71% 的受访者认为需要成立新学科（41%）或归属地球科学（30%）来管理。考虑到现阶段行星科学整体研究队伍还较小，在地球科学部增设专门的行星科学受理、资助渠道应是当前最可行的举措[杨蔚 et al., 2024]。

参考文献

- Acuña, M. H., et al. (1999), Global Distribution of Crustal Magnetization Discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER Experiment, *Science*, 284(5415), 790.
- Andrews-Hanna, J. C., et al. (2013), Ancient Igneous Intrusions and Early Expansion of the Moon Revealed by GRAIL Gravity Gradiometry, *Science*, 339(6120), 675-678.
- Andrews-Hanna, J. C., et al. (2014), Structure and evolution of the lunar Procellarum region as revealed by GRAIL gravity data, *Nature*, 514(7520), 68-71.
- Borg, L. E., et al. (2017), Chronologic implications for slow cooling of troctolite 76535 and temporal relationships between the Mg-suite and the ferroan anorthosite suite, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 201, 377-391.
- Borg, L. E., et al. (2015), A review of lunar chronology revealing a preponderance of 4.34–4.37 Ga ages, *Meteoritics & Planetary Science*, 50(4), 715-732.
- Borg, L. E., et al. (2004), Prolonged KREEP magmatism on the Moon indicated by the youngest dated lunar igneous rock, *Nature*, 432(7014), 209-211.
- Braden, S. E., et al. (2014), Evidence for basaltic volcanism on the Moon within the past 100 million years, *Nature Geosci*, 7(11), 787-791.
- Briaud, A., et al. (2023), The lunar solid inner core and the mantle overturn, *Nature*, 617(7962), 743-746.
- Canup, R. M., and Asphaug, E. (2001), Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation, *Nature*, 412, 708-712.
- Chen, Y., et al. (2023), Chang'e-5 lunar samples shed new light on the Moon, *The Innovation Geoscience*, 1(1), 100014.
- Chenet, H., et al. (2006), Lateral variations of lunar crustal thickness from the Apollo seismic data set, *Earth and Planetary Science Letters*, 243(1-2), 1-14.
- Day, J. M. D., et al. (2007), Highly Siderophile Element Constraints on Accretion and Differentiation of the Earth-Moon System, *Science*, 315(5809), 217-219.
- DeMeo, F. E., and Carry, B. (2014), Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt, *Nature*, 505, 629.
- Denevi, B., et al. (2016), The distribution and extent of lunar swirls, *Icarus*, 273, 53-67.
- Dhingra, D. (2018), The new Moon: Major advances in lunar science enabled by compositional remote sensing from recent missions, *Geosciences*, 8(12), 498.
- Dickey, J. O., et al. (1994), Lunar Laser Ranging: A Continuing Legacy of the Apollo Program, *Science*, 265(5171), 482-490.
- Garcia, R. F., et al. (2019), Lunar Seismology: An Update on Interior Structure Models, *Space Science Reviews*, 215(8), 50.
- Gomes, R., et al. (2005), Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets, *Nature*, 435(7041), 466-469.
- Gu, L., et al. (2022), Space Weathering of the Chang'e-5 Lunar Sample From a Mid-High Latitude Region on the Moon, *Geophysical Research Letters*, 49(7), e2022GL097875.
- Gu, L., et al. (2023), Measurement of ferric iron in Chang'e-5 impact glass beads, *Earth*,

- Planets and Space*, 75(1), 151.
- Guo, Z., et al. (2022), Sub-microscopic magnetite and metallic iron particles formed by eutectic reaction in Chang'E-5 lunar soil, *Nature Communications*, 13(1), 7177.
- Halliday, A. N., and Kleine, T. (2006), Meteorites and the Timing, Mechanisms, and Conditions of Terrestrial Planet Accretion and Early Differentiation, in *Meteorites and the early solar system II*, edited, pp. 775-801.
- Hashizume, K., and Chaussidon, M. (2005), A non-terrestrial ^{16}O -rich isotopic composition for the protosolar nebula, *Nature*, 434(7033), 619-622.
- Head, J. W., and Wilson, L. (2017), Generation, ascent and eruption of magma on the Moon: New insights into source depths, magma supply, intrusions and effusive/explosive eruptions (Part 2: Predicted emplacement processes and observations), *Icarus*, 283, 176-223.
- Heiken, G., et al. (1991), *Lunar sourcebook: A user's guide to the Moon*, Cup Archive.
- Hemingway, D., and Garrick-Bethell, I. (2012), Magnetic field direction and lunar swirl morphology: Insights from Airy and Reiner Gamma, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 117(E10).
- Hood, L., and Artemieva, N. (2008), Antipodal effects of lunar basin-forming impacts: Initial 3D simulations and comparisons with observations, *Icarus*, 193(2), 485-502.
- Horányi, M., et al. (2014), The Lunar Dust Experiment (LDEX) Onboard the Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer (LADEE) Mission, *Space Science Reviews*, 185(1), 93-113.
- Horányi, M., et al. (2015), A permanent, asymmetric dust cloud around the Moon, *Nature*, 522(7556), 324-326.
- Hu, S., et al. (2021), A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang'E-5, *Nature*, 600, 49-53.
- Huang, Y. H., et al. (2022), Bombardment history of the Moon constrained by crustal porosity, *Nature Geoscience*, 15(7), 531-535.
- Hurwitz, D. M., and Kring, D. A. (2014), Differentiation of the South Pole–Aitken basin impact melt sheet: Implications for lunar exploration, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 119(6), 1110-1133.
- Jacobson, S. A., et al. (2014), Highly siderophile elements in Earth's mantle as a clock for the Moon-forming impact, *Nature*, 508(7494), 84-87.
- Johnson, T. E., et al. (2022), Giant impacts and the origin and evolution of continents, *Nature*, 608(7922), 330-335.
- Jolliff, B. L., et al. (2000), Major lunar crustal terranes: Surface expressions and crust-mantle origins, *Journal Geophysical Research*, 105, 4197-4216.
- Khan, A., et al. (2013), The lunar moHo and the internal structure of the Moon: A geophysical perspective, *Tectonophysics*, 609, 331-352.
- Lagos, M., et al. (2008), The Earth's missing lead may not be in the core, *Nature*, 456(7218), 89-92.
- Lawrence, D. J., et al. (2000), Thorium abundances on the lunar surface, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E8), 20307-20331.
- Le Bars, M., et al. (2011), An impact-driven dynamo for the early Moon, *Nature*,

- 479(7372), 215-218.
- Li, C., et al. (2022), Impact-driven disproportionation origin of nanophase iron particles in Chang'e-5 lunar soil sample, *Nature Astronomy*, 6(10), 1156-1162.
- Li, Q.-L., et al. (2021), Two billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'E-5 basalts, *Nature*, 600, 54-58.
- Li, S., et al. (2020), Widespread hematite at high latitudes of the Moon, *Science Advances*, 6(36), eaba1940.
- Li, S., and Milliken, R. E. (2017), Water on the surface of the Moon as seen by the Moon Mineralogy Mapper: Distribution, abundance, and origins, *Science Advances*, 3(9).
- Lin, Y., et al. (2012), Very High-K KREEP-Rich Clasts in the Impact Melt Breccia of the Lunar Meteorite SaU 169: New Constraints on the Last Residue of the Lunar Magma Ocean, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 85(10), 19-40.
- Lin, Y., et al. (2017), Evidence for an early wet Moon from experimental crystallization of the lunar magma ocean, *Nature Geoscience*, 10(1), 14-18.
- Liu, D., et al. (2012), Comparative zircon U–Pb geochronology of impact melt breccias from Apollo 12 and lunar meteorite SaU 169, and implications for the age of the Imbrium impact, *Earth and Planetary Science Letters*, 319, 277-286.
- Lu, T., et al. (2022), The 1: 2,500,000-scale global tectonic map of the moon, *Science Bulletin*, 67(19), 1962-1966.
- McKeegan, K. D., et al. (2011), The Oxygen Isotopic Composition of the Sun Inferred from Captured Solar Wind, *Science*, 332(6037), 1528-1532.
- Melosh, H., et al. (2017), South Pole–Aitken basin ejecta reveal the Moon's upper mantle, *Geology*, 45(12), 1063-1066.
- Melosh, H. J., et al. (2013), The Origin of Lunar Mascon Basins, *Science*, 340(6140), 1552-1555.
- Mighani, S., et al. (2020), The end of the lunar dynamo, *Science advances*, 6(1), eaax0883.
- Miljković, K., et al. (2013), Asymmetric Distribution of Lunar Impact Basins Caused by Variations in Target Properties, *Science*, 342(6159), 724-726.
- Miljković, K., et al. (2015), Excavation of the lunar mantle by basin-forming impact events on the Moon, *Earth and Planetary Science Letters*, 409(0), 243-251.
- Milliken, R. E., and Li, S. (2017), Remote detection of widespread indigenous water in lunar pyroclastic deposits, *Nature Geoscience*, 10(8).
- Mitchell, D. L., et al. (2008), Global mapping of lunar crustal magnetic fields by Lunar Prospector, *Icarus*, 194(2), 401-409.
- Monastersky, R. (2009), Shooting for the Moon, *Nature*, 460(7253), 314-315.
- Morbidelli, A., et al. (2005), Chaotic capture of Jupiter's Trojan asteroids in the early Solar System, *Nature*, 435(7041), 462-465.
- Moriarty Iii, D. P., and Pieters, C. M. (2018), The Character of South Pole-Aitken Basin: Patterns of Surface and Subsurface Composition, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123(3), 729-747.
- Nakamura, Y., et al. (1973), New Seismic Data on the State of the Deep Lunar Interior, *Science*, 181(4094), 49-51.
- Nelson, W. S., et al. (2021), Chemical heterogeneities reveal early rapid cooling of Apollo

- Troctolite 76535, *Nature Communications*, 12(1), 7054.
- Nemchin, A., et al. (2009), Timing of crystallization of the lunar magma ocean constrained by the oldest zircon, *Nature Geosci*, 2(2), 133-136.
- Neumann, G. A., et al. (2015), Lunar impact basins revealed by Gravity Recovery and Interior Laboratory measurements, *Science Advances*, 1(9), e1500852.
- Norman, M. D., et al. (2003), Chronology, geochemistry, and petrology of a ferroan noritic anorthosite clast from Descartes breccia 67215: Clues to the age, origin, structure, and impact history of the lunar crust, *Meteoritics & Planetary Science*, 38(4), 645-661.
- Oran, R., et al. (2020), Was the moon magnetized by impact plasmas?, *Science Advances*, 6(40), 11.
- Ozima, M., et al. (2005), Terrestrial nitrogen and noble gases in lunar soils, *Nature*, 436(7051), 655-659.
- Papike, J. J., et al. (1997), Evolution of the lunar crust: SIMS study of plagioclase from ferroan anorthosites, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(11), 2343-2350.
- Pieters, C. M., et al. (2011), Mg-spinel lithology: A new rock type on the lunar farside, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 116(E6).
- Prissel Tabb, C., et al. (2016), Formation of the lunar highlands Mg-suite as told by spinel, in *American Mineralogist*, edited, p. 1624.
- Qiao, L., et al. (2019), Geological Characterization of the Ina Shield Volcano Summit Pit Crater on the Moon: Evidence for Extrusion of Waning-Stage Lava Lake Magmatic Foams and Anomalously Young Crater Retention Ages, *J. Geophys. Res.-Planets*, 124(4), 1100-1140.
- Rankenburg, K., et al. (2006), Neodymium Isotope Evidence for a Chondritic Composition of the Moon, *Science*, 312(5778), 1369-1372.
- ref-1 <https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/lunar10.cfm>.
- ref-2 NASA's Apollo technology has changed history.
- Richmond, N. C., and Hood, L. L. (2008), A preliminary global map of the vector lunar crustal magnetic field based on Lunar Prospector magnetometer data, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 113(E2),.
- Saal, A. E., et al. (2008), Volatile content of lunar volcanic glasses and the presence of water in the Moon's interior, *Nature*, 454(7201), 192-195.
- Schönbächler, M., et al. (2010), Heterogeneous Accretion and the Moderately Volatile Element Budget of Earth, *Science*, 328(5980), 884-887.
- Schörghofer, N., et al. (2021), Water Group Exospheres and Surface Interactions on the Moon, Mercury, and Ceres, *Space Science Reviews*, 217(6).
- Shearer, C. K., and Papike, J. J. (2005), Early crustal building processes on the moon: Models for the petrogenesis of the magnesian suite, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(13), 3445-3461.
- Shervais, J. W., and McGee, J. J. (1998), Ion and electron microprobe study of troctolites, norite, and anorthosites from Apollo 14: evidence for urKREEP assimilation during petrogenesis of Apollo 14 Mg-suite rocks, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(17), 3009-3023.

- Siegler, M. A., et al. (2023), Remote detection of a lunar granitic batholith at Compton–Belkovich, *Nature*, 620(7972), 116-121.
- Spudis, P. D., et al. (2013), Large shield volcanoes on the Moon, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(5), 1063-1081.
- Stevenson, D. J. (1987), Origin of the moon - The collision hypothesis, *Annual review of earth and planetary sciences*, 15, 271-315.
- Stopar, J. D., et al. (2019), Ina, Moon: Geologic setting, scientific rationale, and site characterization for a small planetary lander concept, *Planetary and Space Science*, 171, 1-16.
- Sun, Y., et al. (2017), Detection of Mg-spinel bearing central peaks using M³ images: Implications for the petrogenesis of Mg-spinel, *Earth and Planetary Science Letters*, 465, 48-58.
- Tian, H.-C., et al. (2021), Non-KREEP origin for Chang'E-5 basalts in the Procellarum KREEP Terrane, *Nature*, 600, 59-63.
- Tian, H.-C., et al. (2023), Surges in volcanic activity on the Moon about two billion years ago, *Nature Communications*, 14(1), 3734.
- Tsiganis, K., et al. (2005), Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System, *Nature*, 435(7041), 459-461.
- Walsh, K. J., et al. (2011), A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration, *Nature*, 475(7355), 206-209.
- Warren, P. H. (1985), The magma ocean concept and lunar evolution, *Annual review of earth and planetary sciences*, 13(1), 201-240.
- Weiss, B. P., and Tikoo, S. M. (2014), The lunar dynamo, *Science*, 346(6214).
- Wiechert, U., et al. (2001), Oxygen Isotopes and the Moon-Forming Giant Impact, *Science*, 294, 345-348.
- Wieczorek, M. A., et al. (2006), The constitution and structure of the lunar interior, *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 60(1), 221-364.
- Wieczorek, M. A., et al. (2013), The Crust of the Moon as Seen by GRAIL, *Science*, 339(6120), 671-675.
- Wieczorek, M. A., et al. (2012), An Impactor Origin for Lunar Magnetic Anomalies, *Science*, 335(6073), 1212-1215.
- Wieczorek, M. A., and Zuber, M. T. (2001), The composition and origin of the lunar crust: Constraints from central peaks and crustal thickness modeling, *Geophysical Research Letters*, 28(21), 4023-4026.
- Wood, B. J., and Halliday, A. N. (2005), Cooling of the Earth and core formation after the giant impact, *Nature*, 437(7063), 1345-1348.
- Xu, X., et al. (2020), Formation of lunar highlands anorthosites, *Earth and Planetary Science Letters*, 536, 116138.
- Yuan, Q., et al. (2023), Moon-forming impactor as a source of Earth's basal mantle anomalies, *Nature*, 623(7985), 95-99.
- Yue, Z., et al. (2013), Projectile remnants in central peaks of lunar impact craters, *Nature Geosci*, 6(6), 435-437.
- Zeng, X., et al. (2023), Landing site of the Chang'e-6 lunar farside sample return mission

- from the Apollo basin, *Nature Astronomy*, 7(10), 1188-1197.
- Zhang, J., et al. (2020), Lunar regolith and substructure at Chang'E-4 landing site in South Pole–Aitken basin, *Nature Astronomy*, 5.
- Zhang, N., et al. (2022), Lunar compositional asymmetry explained by mantle overturn following the South Pole–Aitken impact, *Nature Geoscience*, 15(1), 37-41.
- Zhang, P., et al. (2023), Overview of the Lunar In Situ Resource Utilization Techniques for Future Lunar Missions, *Space: Science & Technology*, 3, 0037.
- Zong, K., et al. (2022), Bulk compositions of the Chang'E-5 lunar soil: Insights into chemical homogeneity, exotic addition, and origin of landing site basalts, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 335, 284-296.
- 杨蔚, and 潘梓凌. (2023), 月球 “土特产”: 从阿波罗 11 号到嫦娥 5 号, *矿物岩石地球化学通报*, 42(6), 1424-1438.
- 杨蔚, et al. (2024), 基于载人月球探测科学发展战略的学科政策研究. *中国科学院院刊*, 39(11), 1931-1943.
- 张腾飞, et al. (2023), 基于文献计量的月球科学前沿研判, *岩石学报*, 39(10), 3169-3183.