

编者按:深空探测是国家综合国力的集中体现,也是各航天大国科技竞争的制高点。自2007年嫦娥探月工程顺利实施以来,我国已经成为全球第二次探月热潮里的中坚力量。嫦娥五号采样工程的成功,使人类在间隔44年后再一次获得来自月球的珍贵样品,标志着中国探月工程上了更高的台阶。海量探测数据的获取和月球样品的返回,将为月球形成演化等重大科学问题的研究提供新的视角与支撑。放眼未来,我国月球极区探测、载人登月和月球科研站建设已经列入规划,工程探测和科学研究的目标已从“认识月球”逐步向“开发月球”“利用月球”转变。对于月球土壤样品的研究,中国科学院地球化学研究所具有良好的基础,曾对来自Apollo的月壤样品进行过详细的研究,本次针对嫦娥五号样品,该所承担了月壤特性及其形成演化历史等方面的研究工作。为让广大科技工作者和社会公众了解这一工作进展,本刊特邀地球化学所李阳博士撰文介绍相关情况,后续工作本刊还将进行跟踪报道。

## 嫦娥五号返回样品的科学研究前景

□ 李阳,郭壮

2020年12月17日凌晨,我国嫦娥五号首次携带月球“土特产”顺利返回预定着陆点,宣告我国探月工程“绕、落、回”三步战略目标完美收官。此次任务通过钻取和表取两种方式圆满完成月球采样任务,共带回不同深度月球样品1731g,标志着中国成为地外样品返回量仅次于美国的深空探测大国。

嫦娥五号的月球采样点远离美国6次Apollo任务和苏联3次Luna任务的采样位置,其独特的年代学和岩石学特征使其具有重要的科学研究价值。嫦娥五号采集的样品来自月球正面风暴洋北部的吕姆克山脉区域,该地区以强烈富集钾(K)、稀土(REE)、磷(P)和钍(Th)等不相容元素并且广泛分布玄武质熔岩为特征,属于月球三大地体之一的风暴洋KREEP地体。已有的月球玄武岩样品(包括月球陨石以及Apollo和Luna返回样品)的结晶年龄均大于29亿年,此次嫦娥五号采集的月球样品是目前已知的最年轻

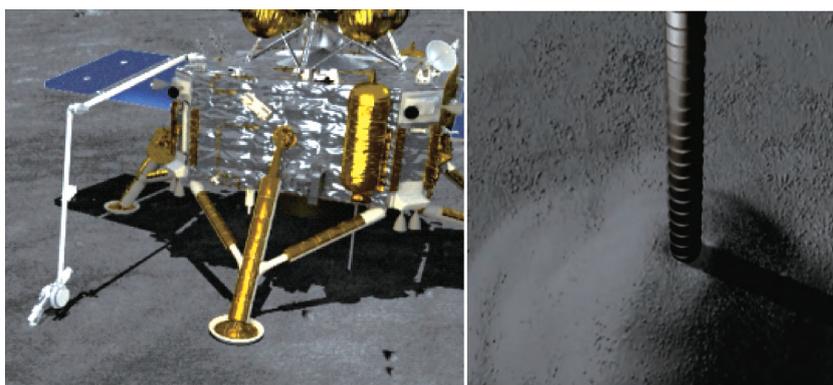


图1 嫦娥五号月表采样方式示意图(图片来源:央视新闻)

(<20亿年)的月海玄武岩类型。

这些典型特征决定了嫦娥五号样品的研究重点在于其较年轻的形成年龄及其独特的地球化学特征,预期将在以下方面取得重大的科学突破:

◆月球上水的赋存状态是目前月球研究的热点问题之一,其不仅决定了星体的演化过程也对确定太阳系水的来源具有重要意义。之前对古老月海玄武岩样品的研究已经明确了早期月幔储库中挥发分物质的含量。对本

次年轻月海玄武岩火山玻璃中挥发分元素进行定量研究,综合对比前人研究结果,可以获得不同地质时期月幔中挥发分含量的变化,以此来认识月幔挥发分的演化规律并对水的来源进行合理判断。

◆目前人类返回的月球样品仅代表月表不足5%的区域,已有的月球地质年代划分主要是通过撞击坑频率定年得到。月坑频率法只能获得月球重大地质事件的相对年代信息,必须辅

第一作者简介:李阳(1984-),理学博士,中国科学院地球化学研究所副研究员,中国科学院青年创新促进会会员。主要从事无大气固态天体表层物质形成与演化过程研究,太空资源开发与利用以及电子显微分析技术研发。在*Geochimica et Cosmochimica Acta*, *Journal of Geophysical Research-Planets* 等杂志发表论文30余篇,获中国授权发明专利5项,贵州省自然科学二等奖1项。主持或参与国家自然科学基金、中国科学院战略性先导科技专项等多个项目。在嫦娥五号样品研究中主要承担月壤微观特性、太空风化作用过程等研究工作。E-mail: liyang@mail.gyig.ac.cn.



图2 嫦娥五号返回舱携带月球样品返回预定着陆点(图片来源:央视新闻)

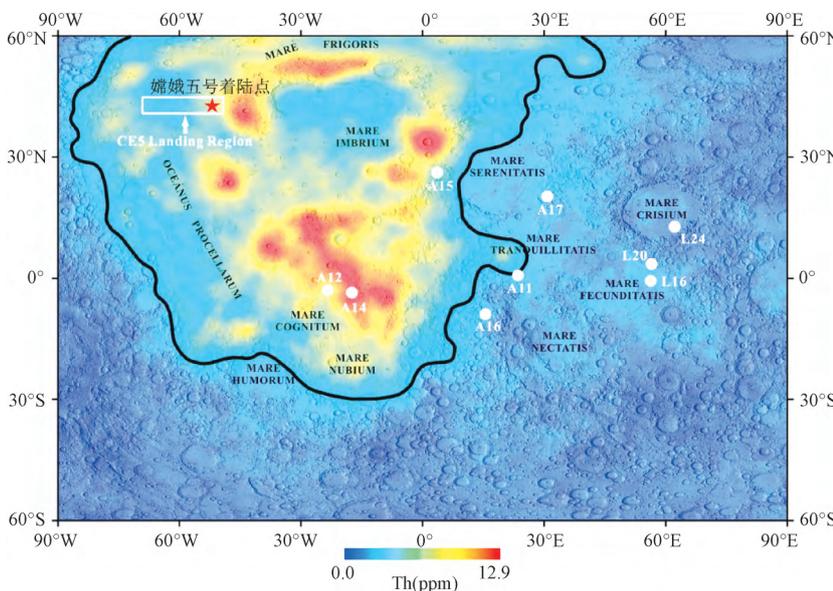


图3 嫦娥五号月球着陆点位置及 Apollo 和 Luna 采样点位置 (底图来源:AGU 出版社)

之以月球原位样品的同位素绝对年龄加以验证。Apollo 以及 Luna 返回样品已经提供了月球 39 亿年至 30 亿年的绝对年龄信息,但是目前仍然缺失大于 40 亿年以及更年轻的月球样品绝对年龄数据,这极大地约束了我们对撞击坑频率统计定年曲线的可信度以及对月球岩浆作用持续时间尺度的认识。嫦娥五号采集的年轻月海玄武岩样品可以提供珍贵的绝对年龄信息来限定月球年轻区域撞击坑频率定年的准确性,并可以确定月球后期演化过程中内动力地质作用活跃的时间。

◆ Apollo 返回样品中斜长岩的发现揭示了月球早期全球性岩浆洋的存在。KREEP 则是岩浆洋演化后期残余岩浆的结晶产物,目前月球 KREEP 分布特征的不确定性极大的限制了我们对于 KREEP 组分形成机制的认识。嫦娥五号返回样品中这类元素的富集有助于我们深入认识 KREEP 组分与其他类型岩石的相关性,进而细化早期月球岩浆洋的演化过程。

◆ 目前普遍认为月球在 30 亿年之后基本处于僵死状态,内动力地质作用基本为零,主要受到由外部营力为

主导的陨石或微陨石撞击改造,这些作用的改造使得月球表层普遍覆盖有厚达数十米的细粒风化层物质。嫦娥五号年轻的岩心样品返回对我们研究太阳系内近 20 亿年的撞击通量变化、月壤成熟速率、太阳风演化、宇宙射线作用具有重要意义,可以为构建月球表层物质时空演化模型提供真实可靠的原位数据支撑。

◆ 月球样品中玄武岩是铁磁性矿物(FeNi, 纳米级单质铁)的主要载体,这些矿物可以很好的记录古剩磁信息,此前 Apollo 以及 Luna 返回的月球样品记录了 40 亿年至 30 亿年月球古磁场信息,对嫦娥五号样品的分析,可以获得 20 亿年以后月球局部磁场信息,该方面的研究有助于系统理解月球核发动机的历史以及月球轨道偏转。

◆ 钛铁矿,稀土元素等是人类利用月球的重要资源,嫦娥五号采样区域同时富集这两类物质。对嫦娥五号样品的研究有助于我们深入了解月球重要资源的富集机制,对后续我国载人登月任务的开展以及月球基地建设具有指导意义。氦-3 作为重要的清洁核反应原料广泛存在于月壤物质中,嫦娥五号返回样品中氦-3 含量的测定有助于我们对全月氦-3 储量进行评估。

◆ 月球表面作为天然的高真空实验室,月壤物质中保存有大量的撞击作用信息。通过对嫦娥五号样品的微区矿物学研究有助于我们理解超高速撞击过程以及常见矿物的高温高压相变特征,进而反演月球表面的撞击改造历史。

从 2017 年开始,中国国家航天局与欧洲航天局陆续开展了 4 次月球探测研讨会,并成立了联合研究团队拟对嫦娥五号返回样品展开合作研究,旨在让有限的月球样品发挥出最大的科学研究价值,贡献于全世界行星科学的研究。嫦娥五号是我国首次地外样品返回任务,未来我国将会飞往更远的天体去采集样品。本次对嫦娥五号样品采取的分析研究手段以及科学意义的思考可以为将来地外样品的研究积累实际经验。