

· 专题:双清论坛“月球科研站的关键科学问题” ·

月球火山活动及热演化历史研究进展*

肖龙^{1**} 钱煜奇¹ 乔乐² 张锋³ 杨蔚⁴ 黄俊¹

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院,武汉 430074

2. 山东大学(威海)空间科学与物理学院,威海 264209

3. 中国科学院国家空间科学中心/空间天气学国家重点实验室,北京 100190

4. 中国科学院地质与地球物理研究所/地球与行星物理院重点实验室,北京 100029

[摘要] 火山喷发和岩浆侵入活动是月球最主要的内动力地质作用。自阿波罗计划实施以来,新的遥感探测数据和样品研究显示,月球的火山活动时限可从40亿年前延续到十几亿年前,月海玄武岩化学性质复杂,挥发分可能参与了月球环形凹陷穹丘和不规则月海斑块的形成。嫦娥5号样品研究确认了月球火山活动至少延续到了距今20亿年左右,而这些年轻火山岩源区可能并不富集克里普元素,且水含量也不高。目前月球火山学研究的主要问题包括:何种机制导致月球的火山活动能够持续发生?如何解释风暴洋克里普地体及月球演化模型中克里普组分的意义?月球内部月幔性质的横向不均一性,以及水等挥发性组分在月球热演化历史中的作用等,这都是未来月球科学探测应该关注的重要主题。

[关键词] 火山活动;火山地貌;火山岩类型;热演化历史;探测目标;月球

月球火山活动受源区性质、壳幔结构、构造背景等因素控制^[1-3],其空间分布是月球内部热状态的反映,是研究月球热演化历史的重要窗口,因此也是月球探测的主题。近20年来的全月遥感探测获得了大量高光谱分辨率和高空间分辨率的成分和影像数据,对全月火山岩的空间分布、火山地貌、火山岩性质和形成年龄等方面,都取得了很大的进展。Hiesinger等^[4]利用高分辨影像数据,对全月火山岩单元进行了撞击坑统计定年,提出了月球火山活动可能持续到距今10亿年的新认识,颠覆了以往基于阿波罗样品所认为的月球火山活动结束于距今30亿年前的认识^[5,6]。我国科学家利用嫦娥1号和2号干涉成像光谱仪数据和伽马光谱仪等数据,获得了月海玄武岩区的元素与矿物组成^[7,8];利用嫦娥3号红外光谱仪数据、粒子诱导X射线光谱仪数据和探月雷达数据获得了雨海北部埃拉托逊纪玄武岩单元的矿物组成和次表层结构^[9-11]。



肖龙 中国地质大学(武汉)教授,从事行星地质和比较行星学方向的教学和科研工作,承担国家自然科学基金和国防科工局民用航天技术预先研究项目多项,在地球地幔柱构造、月球和火星地质研究方面取得多项新成果,发表学术论文200余篇,获国家自然科学基金二等奖1项,省部级自然科学奖一等奖3项。

嫦娥5号任务开启了我国行星科学研究的新时代。我国科学家对嫦娥5号预选着陆区进行了详细的地质学、地貌学、年代学、火山学研究^[12-17],为我国首次月球采样返回任务的样品分析提供了地质背景。通过嫦娥5号样品的研究,我国科学家证实了月球火山活动可以持续到20亿年左右^[18,19],月幔源区并不富集克里普^[20],水含量也不高^[21]。嫦娥5号样品新的发现提出了月球年轻玄武岩源区月幔性质、热源和熔融机制等新的问题。

近年来在月球火山学方面的一个重要进展是,

收稿日期:2022-03-29;修回日期:2022-05-08

* 本文根据第302期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email: longxiao@cug.edu.cn

本文受到国家重点研发计划(2020YFE0202100)、国家自然科学基金项目(41830214)和山东大学(威海)青年学者未来计划资助。

新发现了一种特殊火山地貌环形凹陷穹丘^[22],这是一种被负地形环绕的低矮穹窿构造,广泛分布于月海玄武岩流表面,与多种火山形貌和机构存在空间相关性^[23],并建立了其泡沫岩浆成因理论模型^[24]。此外,某些环形凹陷穹丘可能形成于哥白尼纪(即10亿年内),对认识月球热演化模型提供了新的约束和参考^[25]。同时,开展了对不规则月海斑块的系统性研究^[26],认为其可能形成于古老(>30亿年)火山口的熔岩湖过程,并伴随着晚期超高孔隙度岩浆物质的喷发。这些新的研究进展显示岩浆中有大量挥发性组分的存在,为重新认识月球深部物质组成和热演化历史提供了新的证据。

本文在对月球火山活动类型、形成时间和热演化研究进展进行总结的基础上,提出了未来探测和研究的初步设想,以期对月球火山活动和热演化历史的科学探测规划提供参考。

1 月球火山活动类型

月球火山活动喷发产物总体上以玄武岩为主,缺乏地球上较为常见的花岗岩、闪长岩等岩石类型,但是在月球样品及遥感数据中,也探测到了一些富硅质的喷发产物。与地球玄武岩相比,月球火山作用产生的玄武岩最主要的特点就是非常大的Ti元素含量变化范围(TiO₂最高可达14 wt%),从而成为划分月球玄武岩的最主要依据。类似于地球及其他类地天体,月球上的火山活动也受到了包括岩浆物质成分及物理性质及喷发通量等一系列因素的影响,表现出多样化的喷发形式和火山地貌特征。总体来讲,月球火山活动的喷发形式可分为爆裂式喷发和溢流式喷发。爆裂式喷发由于岩浆挥发分含量较高,产物的扩散性较强,一般以火山碎屑岩的形式覆盖在月表,地形起伏特征不太明显,包括不同规模大小的火山碎屑堆积物和较小的火山锥等。而溢流式喷发的岩浆挥发分含量较低,从火山口溢流而出的岩浆会充填在火山口附近的月表,形成地形特征明显且形态各异的火山地貌特征,包括充填在月表很多大型盆地内部的月海熔岩流、小型的火山穹窿及熔岩流长时间侵蚀月表基岩形成的蜿蜒型月溪等。近年来,基于全新遥感探测数据分析及理论建模研究,目前对月球火山活动的喷发形式和地貌特征已经有了较为系统的认知^[2, 27],本文简要介绍对

两类特殊火山地貌的研究进展。

1.1 火山地貌类型

除了前人已经认识到的月海熔岩流、月溪、富硅穹窿和火山碎屑沉积地貌外,近年来对不规则月海斑块(Irregular Mare Patch, IMP)和环形凹陷穹丘的研究进展较大。该火山地貌首先发现于月球正面的幸福湖(Lacus Felicitatis)^[28],后续被正式命名为Ina。Ina内部分布了几十个球根状的山丘单元,且表现出非常新鲜的形貌及光谱特征,使得很多科学家将其解释为月球非常年轻地质活动的产物^[29]。这一成果引起了更多科学家的兴趣,Braden等^[30]对LROC NAC影像进行了全月搜寻,发现了70个类似Ina的构造,并将其命名为不规则月海斑块,而Qiao等^[31]建立了一个更新的含有91处不规则月海斑块构造的数据库,并从地质背景及内部构造的角度,对月球不规则月海斑块进行了分类。

对于月球不规则月海斑块构造的地质成因,目前已经基本确定其是火山成因的,但是具体成因机制却存在较大争议。Braden等^[30]利用LROC高分辨率影像数据,对月球不规则月海斑块进行了形貌学、上覆撞击坑统计等分析,认为其可能是近100 Ma以来火山喷发的产物,显著年轻于传统观点认为的月球火山活动结束时间(约1 Ga左右)^[4],并对当前月球热演化模型提出了质疑^[32]。而Qiao等^[26, 31, 33, 34]对代表性不规则月海斑块的地质特征进行了详细分析,并结合对地球火山建造的比较行星学分析,认为月球不规则月海斑块构造可能形成于月球古老熔岩湖过程(>3 Ga),并伴随着超高孔隙度岩浆物质的喷发,而可能不是近期地质活动的产物。然而,目前关于月球不规则月海斑块构造的详细地质特征及成因机制,仍存在一系列问题有待未来探测任务及科学研究去解决,包括其全月空间分布特征、地质背景信息、形成年龄、定量物理性质等。

20世纪70年代,科研人员在整理阿波罗时期拍摄的照片时首次注意到一种奇特的月貌特征,将其称为环形凹陷构造^①。它们最明显的特征是形似环形沟槽,但限于当时影像数据质量、分辨率的限制和缺乏地形数据,难以确定其精确的形貌特征,并将其假想为熔岩孤丘(被熔岩流包围的地形)或火山喷口或挤出熔体或熔岩流动过程中形成的某种构造。直到2017年,基于新获取的LROC NAC高分辨率

① Schultz PH, Greeley R, Gault DE. Degradation of Small Lunar Surface Features// 7th Lunar Science Conference, 1976; Abstract # 1270

影像($\sim 0.5 \sim 2$ m/pixel)和地形数据,科研人员于月球正面的静海中部地区发现了成群分布的被环形凹陷围绕的穹窿构造(图 1b),将其命名为环形凹陷穹丘(Ring-Moat Dome Structure, RMDS),并展开了大范围搜索和系统性调研^[22]。截至 2020 年,已在月球正面和背面的月海地区识别出 RMDS 数量超过 8 000 个^[23]。

对环形凹陷穹丘的研究为理解月球火山作用和月海玄武岩流在月表的热动力学展布过程提供了新的视角。统计结果显示它们平均直径和高度分别约 200 米和 3.5 米,环形凹陷深度可达数米和宽度约几十至上百米^[23]。具有与周围玄武岩相近的成分,但穹窿形态又预示着形成 RMDSs 的熔岩具有相对较高的粘滞度。基于对月球表面环境(低重力和近真空环境)和火山喷发机制的认识^[2, 27, 35],结合对地球上溢流玄武岩膨胀增生过程的理解^[36, 37],建立了环形凹陷穹丘的泡沫岩浆理论成因模型^[24]。该模型将 RMDSs 归因于岩浆流动过程中压强驱使下破壳而出的含高挥发分(主要指水)岩浆,包含一系列过程:表面快速冷凝成壳、内部岩浆缓慢冷却、结晶、挥发分释放并增压、撑破上覆岩壳、熔岩溢出后的质量加载和地形压降等。后续研究发现一些 RMDSs 与小型撞击坑(直径为 100~300 米)存在叠覆关系,撞击坑形貌侵蚀年代学研究揭示小型撞击坑的年龄在 10 亿年内,预示着月球上可能存在 10 亿年内的年轻火山作用,对现有月球热演化模型提出了挑战^[25]。也有学者提出了浅部岩浆侵入模型^①和月壤

的月震诱发模型^[38],但仅限于目前的臆想猜测,缺乏地球物理模型的约束和支持。总之,对环形凹陷穹丘的深入认识有助于理解月球源区性质和岩浆、火山动力学过程与机理,为认识月球热演化提供了一个重要窗口。

1.2 火山岩成分类型

月球火山活动最主要的方式就是通过溢流式喷发活动将大量的熔岩流充填在地势较低的大型盆地内部,其主要的产物就是月海玄武岩,这也一直是月球火山活动的研究主体。目前已经从月面采集了多种玄武岩样品。根据 TiO_2 含量,前人将阿波罗返回的月海玄武岩分为三大类,即高钛($\text{TiO}_2 > 6$ wt%)、低钛($1 \text{ wt}\% < \text{TiO}_2 \leq 6$ wt%)和极低钛玄武岩($\text{TiO}_2 \leq 1$ wt%)(图 1)。继而再根据 Al_2O_3 含量,分为高铝($\text{Al}_2\text{O}_3 > 11$ wt%)和低铝玄武岩($\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 11$ wt%);最后再基于 K 元素的含量,分为高钾($\text{K} > 2000$ ppm)和低钾玄武岩($\text{K} \leq 2000$ ppm),共 12 种可能类型的月海玄武岩^[39],但实际样品中只有其中的 6 种。Fagan 等^[40]认为 Ti 在月海玄武岩样品的分类体系中应该占据特殊的位置,于是进一步提出了月海玄武岩基于 TiO_2 含量的“四分”法,将原来的低钛玄武岩($\text{TiO}_2 = 1-6$ wt%)重新分为低钛($\text{TiO}_2 = 1-4$ wt%)和中钛($\text{TiO}_2 = 4-6$ wt%)两个类别,月海玄武岩因此便被重新分为 16 个类型。目前已获得的月海玄武岩样品也只包括了 16 种可能类型中的 8 种^[40]。基于光谱遥感解译的认识,嫦娥三号着陆点的玄武岩可能是中钛低铝高钾

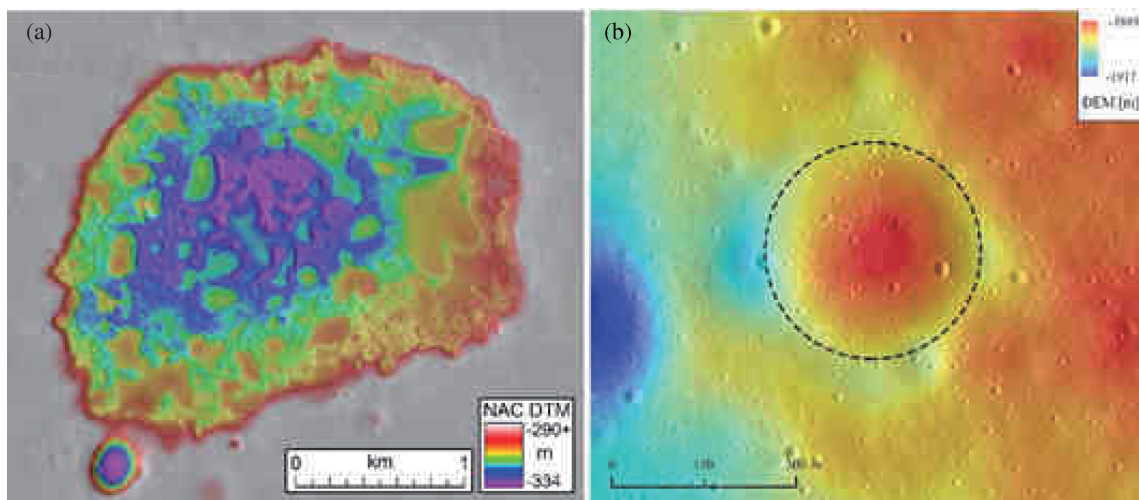


图 1 月海不规则月海斑块的代表—Ina 构造(a)和位于月球静海地区的一代表性环形凹陷穹丘构造(b)。

类型^[9],这是阿波罗样品中所没有的。嫦娥5号获得的玄武岩 TiO₂ 含量为 5%左右,属于中高钛玄武岩过渡类型^[41]。

与采集到的月球玄武岩不同,陨石中玄武岩的 TiO₂ 含量分布是连续变化的,显著不同于“阿波罗”样品揭示的月海玄武岩的高钛—低钛“双峰式”模式,且以低钛为主(1 wt% ≤ TiO₂ ≤ 5 wt%,峰值在 2—3 wt%),高钛玄武岩(TiO₂ > 6 wt%)的数量极少。这一现象也与遥感揭示的月球玄武岩以低钛玄武岩为主的认识一致^[42],进一步说明了“阿波罗”采样点未能覆盖不同化学类型的火山单元。可见,“阿波罗”样品采样范围的局限性,使得月海玄武岩 TiO₂ 含量与年龄之间关系(高钛玄武岩普遍比低钛玄武岩古老,月海玄武岩的 TiO₂ 含量随时间的演化而逐渐降低)的真实性也受到质疑。很多低钛—极低钛玄武质陨石(如 Kalahari 009、Y/A/M/M 系列等)的年龄比“阿波罗”高钛玄武岩还要古老^[43]。

遥感光谱探测数据也不断发现新的玄武岩类型,尤其是位于上述 TiO₂ 含量间隙的中钛玄武岩类型,揭示月球玄武岩的 TiO₂ 含量几乎是连续变化的,而样品数据反映的 TiO₂ 含量间隔是由于采样范围的局限性导致的^[42]。而全月玄武岩单元的撞击坑统计定年及物质成分分析发现,这些玄武岩的年龄与其成分之间并不存在简单的相关性,高钛

玄武岩和低钛玄武岩可以同时期喷发,并没有观测到样品数据揭示的“早期高钛、晚期低钛”的“成分—年龄”趋势^①,说明月海玄武岩并不存在简单的“时间—成分”相关性,而实际可能是“空间—时间—成分”关系的多样性。

2 火山活动空间分布

月海玄武岩是月球火山喷发的主要产物,覆盖了月表约 18.1%的面积,总喷发量达到了约 1×10^7 km³,约占月壳总体积的 1%左右^[44, 45]。这些月海玄武岩大多分布在月球正面大型盆地内部(图 3),如风暴洋、雨海、冷海、澄海、孤海、知海、云海、湿海、静海、酒海、危海等,形成了广袤的熔岩平原。月海玄武岩在月球背面分布较少,主要集中在“南极—艾肯”盆地和东海盆地内部,在“南极—艾肯”盆地之外有少量分布,如莫斯科海。月海玄武岩的成分随空间也有一定变化,高钛玄武岩主要分布在月球正面东部、风暴洋中部和雨海西北部,其余地区以中低钛玄武岩为主^[46]。在月球风暴洋中部,月海玄武岩具有随年龄变小,钛含量增加及橄榄石含量增加的趋势^[47, 48]。

月海玄武岩分布的二分性可能与月球正背两面月壳厚度的差异有关,背面较厚的月壳抑制了岩浆的上升^[2, 35]。此外,月海玄武岩的空间分布也与风暴洋克里普地体相关,大部分月海玄武岩都分布在

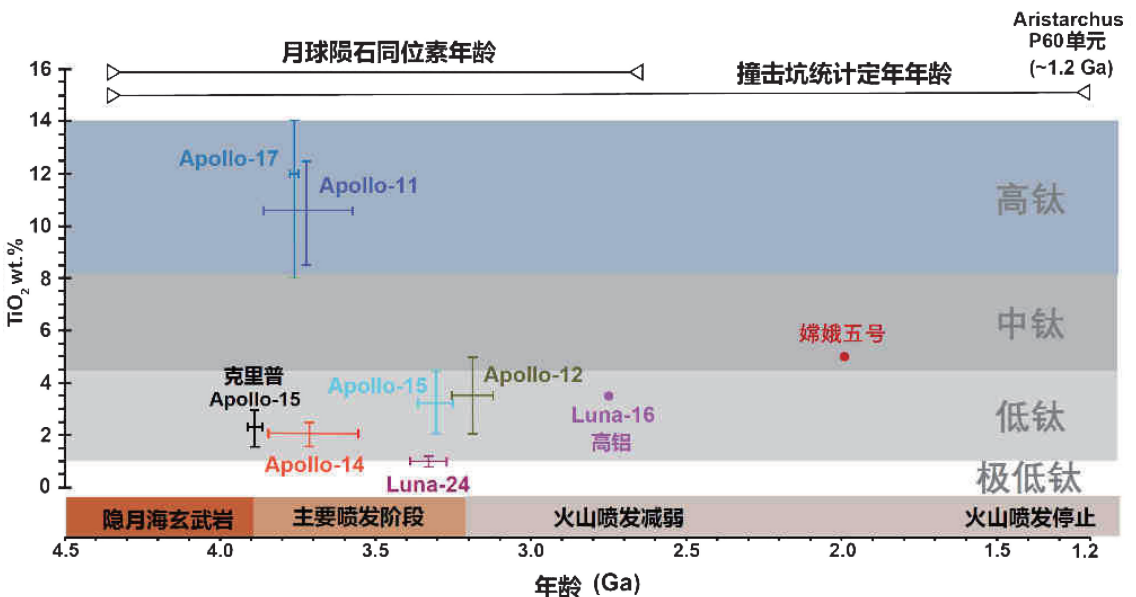


图 2 月海玄武岩岩性及年龄(玄武岩样品年龄来自^[6],成分来自^[45],撞击坑统计定年年龄来自^[4])

① Hiesinger H, Head JW, Wolf U, et al. Lunar Mare Basalts: Mineralogical Variations with Time// 32nd Lunar and Planetary Science Conference, 2001; Abstract #1826

风暴洋克里普地体内部。风暴洋克里普地体内部较高的放射性生热元素可能是其富集月海玄武岩的首要原因^[49]，但该观点受到了嫦娥 5 号样品结果的挑战^[18-20]。

除此之外，近来月球火山活动研究的主要进展集中在年轻月海玄武岩、不规则月海斑块和月球环形凹陷穹丘等可能的月球年轻火山活动产物上。月球年轻火山活动除被“嫦娥 5 号”采集之外，其采样并不充分，急需采样返回任务进行制约^[5, 50]。

月球年轻玄武岩 (<20 亿年) 主要分布在月球正面的风暴洋克里普地体中部，尤其是阿里斯塔克斯高原周围^[4](图 3)。其中最年轻的月海玄武岩单元为 P60，位于阿里斯塔克斯高原南部，面积约为 55 701 km³。该单元为月球上最年轻的月海玄武岩单元，因而备受关注，并被定为美国无畏号和 ISOCHRON 任务的主要探测单元。

Qiao 等^[31]在汇总整理前人研究的基础上，在月球表面识别出了 91 处不规则月海斑块。静海西部是不规则月海斑块最为集中的地区，共发育了 35 处不规则月海斑块。该地区位于风暴洋克里普地体内部，以富集铀、钍、钾等放射性生热元素为特征。另一处不规则月海斑块较为集中的地区为格卢泰瑟 E 和 M 撞击坑附近，共发育了 18 处不规则月海斑块，该地区也以具有较高含量的放射性放热元素为特征。目前为止，Qiao 等^[31]并没有发现不规则月海斑块分布的明显规律，无法确定与附近发育的火山构造是否存在联系。除此之外，Qiao 等^[31]还统计了不规则月海斑块所在月海玄武岩单元的年了，发现 69 个不规则月海斑块周围月海玄武岩的年龄在 30 亿~37.3 亿年之间，与全月月海年龄的峰值(33 亿~

38 亿年)同期；仅有 8 个在雨海西南部及 1 个在孤海西北部的不规则月海斑块发育在较年轻的月海玄武岩之上。

月球环形凹陷穹丘主要分布于静海、丰富海、风暴洋、湿海、云海和雨海等盆地内部的熔岩平原上^[22, 23]。虽然环形凹陷穹丘体型较小，但数量巨大，全球性搜索还在持续。随着识别和搜索任务的进一步扩大，目前已识别出环形凹陷穹丘数量超过 1 万个。值得注意的是，在环形凹陷穹丘聚集区还发现一些其它火山机构，比如火山穹窿、火山锥、地堑、月溪、不规则月海斑块等。环形凹陷穹丘与这些地貌的共存关系说明了他们之间存在某种联系，进一步支持环形凹陷穹丘的火山成因理论模型^[24]。此外，表面含有环形凹陷穹丘的玄武岩单元具有不同的年龄，跨度可达二十多亿年，从十几亿年至 38 亿年左右^[4]。根据建立的熔岩流膨胀模型^[24]，环形凹陷穹丘应该与所处玄武岩流同时期形成的，但一些环形凹陷穹丘与小型撞击坑的叠覆关系显示他们可能形成于哥白尼纪(<10 亿年)^[25]，解决这一矛盾需要在逐步完成全球搜索的情况下对其展开后续深入研究。

3 火山活动时间

建立月球火山活动的年代学格架，是理解月球热演化历史的前提条件。月球火山活动的时限主要通过两种方法确定，一种是同位素定年，对月球返回样品或月球陨石中的月海玄武岩进行 K-Ar、Ar-Ar、Rb-Sr、Sm-Nd、Pb-Pb 等同位素分析，获得玄武岩的结晶年龄；另一种是撞击坑统计定年，通过统计月球表面各玄武岩单元的撞击坑大小一频率分布，利用

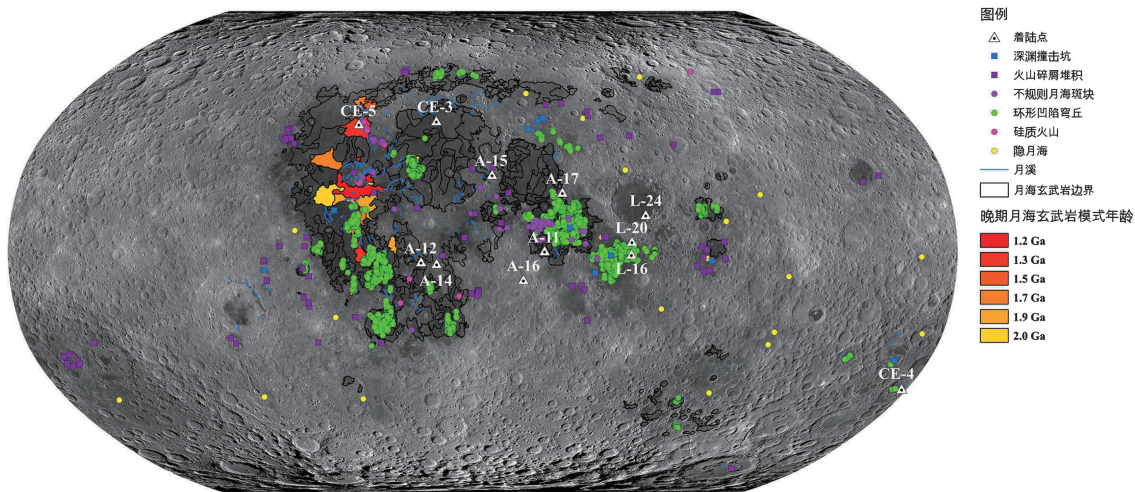


图 3 月球火山活动产物空间分布图

撞击年代学曲线,获得玄武岩单元的形成年龄。这两种方法互为补充,共同揭示月球火山活动的历史。

目前,共有 97 个月海玄武岩样品有发表的同位素年代学结果,共 220 个数据。其中最老的样品为 Kalahari 2009 极低钛玄武质角砾岩, Pb-Pb 等时线年龄为 $4.369 \pm 0.007 \text{ Ga}$ ^[51]。最年轻的样品为嫦娥 5 号中低钛玄武岩岩屑^[20, 41],两个独立的工作对于其中的富锆矿物进行了定年,给出了一致的 Pb-Pb 等时线年龄,分别为 $2.011 \pm 0.05 \text{ Ga}$ ^[18]和 $2.030 \pm 0.004 \text{ Ga}$ ^[19]。

由于采样返回任务覆盖范围有限,撞击坑统计定年法是其重要补充。根据 Hiesinger 等^[4]的结果,月球火山活动主要发生在 $4.0 \sim 1.2 \text{ Ga}$ 。与同位素年代学结果不同的是,撞击坑定年揭示的月球火山活动峰值只有一次,发生在 $4.0 \sim 3.5 \text{ Ga}$,其后火山活动规模逐渐减弱,直到最终停止^[2, 35]。月球火山活动的起始时间,很可能要早于 4.3 Ga ,不过被晚期大撞击事件的产物所覆盖,并在月球表面形成了广为分布的隐月海^[45]。阿波罗-14 号铝质低钛玄武岩和 Kalahari 2009 陨石就可能来自于隐月海。另一方面,阿里斯塔克斯高原南部的 P60 单元 (1.2 Ga)是最年轻月海玄武岩单元,表明月球的大规模火山活动可能结束于距今约 10 亿年左右。不过近来的研究认为不规则月海斑块^[30]和月球环形凹陷穹丘^[25]可能具有小于 100 Ma 的年龄,表明月球火山活动结束的比原来想象的更迟,不过相关年代学结果仍然存在争议^[25, 31]。迄今为止,嫦娥 5 号玄武岩是返回的最年轻的月海玄武岩样品,同位素年龄约为 2.0 Ga ^[18, 19],与撞击坑统计定年结果相仿^[15, 52]。

综合同位素和撞击坑定年结果,月球火山活动主要发生于 $4.3 \sim 2.0 \text{ Ga}$,并在雨海纪达到峰值,在 3.5 Ga 后强度逐渐减弱。总体上,高铝、克里普和高钛玄武岩仅在早期形成,低钛玄武岩贯穿始终。

4 月球热演化历史

主流观点认为,太阳系形成后的 $\sim 50 \text{ Ma}$,一个火星大小的天体 Theia 和原始地球发生巨大撞击,撞击的溅射物在地球轨道通过吸积作用形成了原始月球。撞击作用产生的巨大能量导致月球发生了全球性的熔融,形成了深达数百千米的岩浆洋^[54, 55]。随着时间的推移,岩浆洋逐渐冷却,发生结晶分异。

最早结晶的密度相对较大的橄榄石和辉石等镁铁质矿物,它们下沉到岩浆洋的底部形成月幔堆晶岩。在岩浆洋结晶比例到 $\sim 75\%$ 的时候,密度相对较小的斜长石开始结晶并上浮到岩浆洋的上部形成原始的斜长质月壳。随后钛铁矿,富铁辉石和铁橄榄石等共同结晶下沉,覆盖在早期镁铁质月幔堆晶岩上方。最后小于 1% 的岩浆洋富集了不相容元素和生热元素,包括 K、REE、P、U 和 Th,称为 urKREEP。由于密度的差异,月幔发生了翻转,形成了初始的月幔对流,从而导致了后期不同成分玄武岩源区的产生。岩浆洋结晶分异过程中月幔翻转时间大约在 4.3 Ga 。

在月球壳—幔—核结构形成之后,火山喷发和岩浆侵入活动成为其最主要的内动力地质作用。在月球地质历史早期,月壳和岩石圈较薄,月球内部温度较高,月球整体处于伸展的应力状态^[55],岩浆的形成、岩墙的上升及喷发较为容易^[35],在月球表面喷发形成了大量玄武岩熔岩平原。月壳中巨大的伸展构造^[56],尤其是包围风暴洋克里普地体的岩墙^[57],很可能是风暴洋克里普地体早期火山活动的喷发通道。隐月海可能代表月球火山喷发最早的产物,开始于 $\sim 4.3 \text{ Ga}$ 。月球火山喷发的峰值出现在晚雨海纪,形成了月球表面大多数火山单元,包括玄武岩平原,火山杂岩体如吕姆科山^[58]。雨海纪活跃的火山活动也使底辟等过程更可能发生,形成了月球表面少量分布的硅质火山^[59]。

随着月球的逐渐冷却,月壳和岩石圈逐渐增厚,月球内部的温度也随之降低,月球整体应力状态由伸展逐渐变为整体收缩^[55]。这一时期,形成了大量以月海皱脊为代表的收缩构造^[60],岩浆的形成和岩墙的上升和喷发也受到抑制,月球火山活动逐渐减弱^[2],并在距今约 10 亿年左右,大规模的火山活动基本结束。月球正反两面的不均一性,暨正面月壳较薄且发育风暴洋克里普地体,背面月壳较厚,对月球火山活动也存在着深刻的影响。这反映在岩墙在月球正面更容易上升侵位,而在月球背面则更难。月球正面发育了月球上最主要的火山单元,在月球背面仅有少量发育,主要分布在南极—艾肯盆地和东海盆地内部。月球火山活动的结束时间也不同,月球正面,尤其是风暴洋克里普地体中部和雨海西南部,在临近哥白尼纪仍然发育有成规模的玄武岩月海单元,但是月球背面大规模月海喷发在距今约 30 亿年前基本上已经结束^[4]。

存在的主要问题是,20 亿年以来火山样品只来自风暴洋东北部一个点,即嫦娥 5 号采回的样品。目前对这类年轻火山岩的热源和产生机制尚不清楚。火山岩所反映的月幔性质在空间上的变化也有待进一步研究。此外,目前对月球火山活动的研究都是建立在月海玄武岩之上,月球上还有部分非月海玄武岩,它们可能反映了不一样的月球火山活动历史,能够为月球热演化提供重要补充。

5 未来探测目标建议

目前已经返回的月球样品局限在月球正面部分区域,不能完全反映月球火山活动历史,使对月球热演化历史的整体面貌的认识具有一定局限性。月球火山活动和热演化历史方面存在的问题,需要通过实施着陆和采样返回等月球探测计划才能解决。未来需要重点关注的探测主题包括月球火山活动的时间跨度、火山岩空间分布的深部控制因素、特殊火山地貌的成因、火山岩中记录的深部月幔性质,以及不同时间和空间月幔熔融—岩浆上升—火山喷发的控制因素等。

月球火山活动一老一新两个问题需要早日得到回答。月球最早火山活动形成的隐月海玄武岩大部分被后期撞击溅射物或火山岩所掩埋,需要在遥感探测基础上选择可能的隐月海玄武岩区域进行着陆和采样。而年轻火山岩的探测取样依然很有必要,需要利用嫦娥 5 号样品标定后的年代学曲线,对火山岩单元进行重新定年,确定最年轻的玄武岩单元并开展探测和采样返回。

对特殊意义的火山地貌单元进行就位探测意义重大,包括月海区的熔岩管洞穴,不规则月海斑块、环形凹陷穹丘、火山穹隆和火山碎屑沉积等,获得对月球火山岩性质的系统性认识。考虑到熔岩管洞穴暴露了完整的火山岩露头,是采集原位样品的最好窗口剖面,对于研究火山喷发序列和岩浆演化具有特别重大的意义,可以作为优先探测目标。

克里普岩仍然是月球早期分异和后续火山活动的重要研究对象,需要利用遥感探测数据确定可能的纯克里普岩出露区域,进而部署就位探测和取样返回。考虑到探测技术能力的不断进步,未来的探测活动应该考虑一次任务实现多点探测,通过长距离的多目标探测^[61],实现对大区域范围内火山岩浆活动的系统性、全局性认识。

参 考 文 献

- [1] Wilson L, Head JW. Eruption of magmatic foams on the Moon: formation in the waning stages of dike emplacement events as an explanation of “irregular mare patches”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2017, 335: 113—127.
- [2] Head JW, Wilson L. 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*, 2017, 283: 176—223.
- [3] Xiao L, Head J. Geological characteristics of the moon. (2020-02-28)/[2022-03-29]. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190647926.013.90>
- [4] Hiesinger H, Head JW, Wolf U, et al. Ages and stratigraphy of lunar mare basalts: A synthesis. // Ambrose WA, Williams DA. *Recent Advances and Current Research Issues in Lunar Stratigraphy*. Boulder: Geological Society of America, 2011, 477: 1—51.
- [5] Tartèse R, Anand M, Gattacceca J, et al. Constraining the evolutionary history of the moon and the inner solar system: a case for new returned lunar samples. *Space Science Reviews*, 2019, 215(8): 1—50.
- [6] Merle RE, Nemchin AA, Whitehouse MJ, et al. Pb-Pb ages and initial Pb isotopic composition of lunar Meteorites: NWA 773 clan, NWA 4734, and Dhofar 287. *Meteoritics & Planetary Science*, 2020, 55(8): 1808—1832.
- [7] Wu YZ. Major elements and Mg # of the Moon: results from Chang'E-1 Interference Imaging Spectrometer (IIM) data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 93: 214—234.
- [8] Zhu MH, Ma T, Chang J. Chang'E-1 gamma ray spectrometer and preliminary radioactive results on the lunar surface. *Planetary and Space Science*, 2010, 58(12): 1547—1554.
- [9] Ling ZC, Jolliff BL, Wang AL, et al. Correlated compositional and mineralogical investigations at the Chang'e-3 landing site. *Nature Communications*, 2015, 6: 8880.
- [10] Xiao L, Zhu PM, Fang GY, et al. A young multilayered terrane of the northern Mare Imbrium revealed by Chang'E-3 mission. *Science*, 2015, 347(6227): 1226—1229.

- [11] Zhang JH, 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.
- [12] Qian YQ, Xiao L, Zhao SY, et al. Geology and scientific significance of the rümker region in northern Oceanus procellarum: China's Chang'E-5 landing region. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2018, 123 (6): 1407—1430.
- [13] Wu B, Huang J, Li Y, et al. Rock abundance and crater density in the candidate Chang'E-5 landing region on the moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2018, 123 (12): 3256—3272.
- [14] Yue Z, Di K, Liu Z, et al. Lunar regolith thickness deduced from concentric craters in the CE-5 landing area. *Icarus*, 2019, 329: 46—54.
- [15] Qian YQ, Xiao L, Head JW, et al. Young lunar mare basalts in the Chang'e-5 sample return region, northern Oceanus Procellarum. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 555: 116702.
- [16] Qian YQ, Xiao L, Wang Q, et al. China's Chang'e-5 landing site: Geology, stratigraphy, and provenance of materials. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 561: 116855.
- [17] Qiao L, Chen J, Xu LY, et al. Geology of the Chang'e-5 landing site: constraints on the sources of samples returned from a young nearside mare. *Icarus*, 2021, 364: 114480.
- [18] Che XC, Nemchin A, Liu DY, et al. Age and composition of young basalts on the Moon, measured from samples returned by Chang'e-5. *Science*, 2021, 374(6569): 887—890.
- [19] Li QL, Zhou Q, Liu Y, et al. Two-billion-year-old volcanism on the moon from Chang'e-5 basalts. *Nature*, 2021, 600(7887): 54—58.
- [20] Tian HC, Wang H, Chen Y, et al. Non-KREEP origin for Chang'e-5 basalts in the procellarum KREEP terrane. *Nature*, 2021, 600(7887): 59—63.
- [21] Hu S, He HC, Ji JL, et al. A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang'e-5. *Nature*, 2021, 600 (7887): 49—53.
- [22] Zhang F, Head JW, Basilevsky AT, et al. Newly discovered ring-moat dome structures in the lunar maria: possible origins and implications. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(18): 9216—9224.
- [23] Zhang F, Head JW, Wöhler C, et al. Ring-moat dome structures (RMDSs) in the lunar maria: statistical, compositional, and morphological characterization and assessment of theories of origin. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2019, 125(7): e2019JE005967.
- [24] Wilson L, Head JW, Zhang F. A theoretical model for the formation of Ring Moat Dome Structures: products of second boiling in lunar basaltic lava flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2019, 374: 160—180.
- [25] Zhang F, Head JW, Wöhler C, et al. The lunar mare ring-moat dome structure (RMDS) age conundrum: Contemporaneous with Imbrian-aged hostlava flows or emplaced in the Copernican?. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126: e2021JE006880.
- [26] Qiao L, Head J, Wilson L, et al. Ina pit crater on the Moon; Extrusion of waning-stage lava lake magmatic foam results in extremely young crater retention ages. *Geology*, 2017, 45(5): 455—458.
- [27] 乔乐, 陈剑, 凌宗成. 月球火山作用的地貌学特征. *地质学报*, 2021, 95(9): 2678—2691.
- [28] Whitaker EA. Lunar color boundaries and their relationship to topographic features; a preliminary survey. *The Moon*, 1972, 4(3/4): 348—355.
- [29] Schultz PH, Staid MI, Pieters CM. Lunar activity from recent gas release. *Nature*, 2006, 444(7116): 184—186.
- [30] Braden SE, Stopar JD, Robinson MS, et al. Evidence for basaltic volcanism on the Moon within the past 100 million years. *Nature Geoscience*, 2014, 7(11): 787—791.
- [31] Qiao L, Head JW, Ling ZC, et al. Lunar irregular mare patches: classification, characteristics, geologic settings, updated catalog, origin, and outstanding questions. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, 125 (7): e2019JE00636.
- [32] Ziethe R, Seiferlin K, Hiesinger H. Duration and extent of lunar volcanism: comparison of 3D convection models to mare basalt ages. *Planetary and Space Science*, 2009, 57 (7): 784—796.
- [33] Qiao L, Head JW, Xiao L, et al. The role of substrate characteristics in producing anomalously young crater retention ages in volcanic deposits on the Moon: Morphology, topography, subresolution roughness, and mode of emplacement of the Sosigenes lunar irregular mare patch. *Meteoritics & Planetary Science*, 2018, 53 (4): 778—812.

- [34] Qiao L, Head JW, Wilson L, et al. The cauchy 5 small, low-volume lunar shield volcano: evidence for volatile exsolution-eruption patterns and type 1/type 2 hybrid irregular mare patch formation. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, 125 (2), doi. org/10. 1029/2019JE006171.
- [35] Wilson L, Head JW. Generation, ascent and eruption of Magma on the Moon: new insights into source depths, Magma supply, intrusions and effusive/explosive eruptions (Part 1: theory). *Icarus*, 2017, 283: 146—175.
- [36] Hon K, Kauahikaua J, Denlinger R, et al. Emplacement and inflation of pahoehoe sheet flows: observations and measurements of active lava flows on Kilauea Volcano, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin*, 1994, 106 (3): 351—370.
- [37] Self S, Thordarson T, Keszthelyi L. Emplacement of continental flood basalt lava flows. *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism*. Washington, D. C. : American Geophysical Union, 2013: 381—410.
- [38] Fitz-Gerald B. The origin of Rima Moat Domes. *Lunar Section Circular*, 2021, 59: 14—28
- [39] Neal CR, Taylor LA. Petrogenesis of mare basalts: a record of lunar volcanism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(6): 2177—2211.
- [40] Fagan AL, Neal CR. A new lunar high-Ti basalt type defined from clasts in Apollo 16 breccia 60639. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 173: 352—372.
- [41] Li CL, Hu H, Yang MF, et al. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission. *National Science Review*, 2021, 9(2): nwab188.
- [42] Giguere TA, Taylor GJ, Hawke BR, et al. The titanium contents of lunar mare basalts. *Meteoritics & Planetary Science*, 2000, 35(1): 193—200.[LinkOut]
- [43] Joy KH, Arai T. Lunar Meteorites: new insights into the geological history of the Moon. *Astronomy & Geophysics*, 2013, 54(4): 4. 28—4. 32.
- [44] Head JW III, Wilson L. Lunar mare volcanism: Stratigraphy, eruption conditions, and the evolution of secondary crusts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(6): 2155—2175.
- [45] Whitten JL, Head JW. Lunar cryptomaria: physical characteristics, distribution, and implications for ancient volcanism. *Icarus*, 2015, 247: 150—171.
- [46] Lucey PG, Blewett DT, Jolliff BL. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, 105(E8): 20297—20305.
- [47] Zhang XY, Wu YZ, Ouyang Z, et al. Mineralogical variation of the late stage mare basalts. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2016, 121 (10): 2063—2080.
- [48] Staid MI, Pieters CM. Mineralogy of the last lunar basalts: results from Clementine. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E11): 27887—27900.
- [49] Jolliff BL, Gillis JJ, Haskin LA, et al. Major lunar crustal terranes: surface expressions and crust-mantle origins. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, 105(E2): 4197—4216.
- [50] Board SS, Council NR. *The Scientific Context for Exploration of the Moon*. Washington, D. C. : National Academies Press, 2007.
- [51] Snape JF, Curran NM, Whitehouse MJ, et al. Ancient volcanism on the moon: insights from Pb isotopes in the MIL 13317 and kalahari 009 lunar Meteorites. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 502: 84—95.
- [52] Jia MN, Yue ZY, Di KC, et al. A catalogue of impact craters larger than 200 m and surface age analysis in the Chang'e-5 landing area. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 541: 116272.
- [53] Warren PH. The Magma ocean concept and lunar evolution. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1985, 13: 201—240.
- [54] 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.
- [55] Solomon SC, Head JW. Lunar mascon basins: lava filling, tectonics, and evolution of the lithosphere. *Reviews of Geophysics*, 1980, 18(1): 107—141.
- [56] Andrews-Hanna JC, Asmar SW, Head JW 3rd, et al. Ancient igneous intrusions and early expansion of the Moon revealed by GRAIL gravity gradiometry. *Science*, 2013, 339 (6120): 675—678.
- [57] Andrews-Hanna JC, Besserer J, Head III JW, et al. Structure and evolution of the lunar Procellarum region as revealed by GRAIL gravity data. *Nature*, 2014, 514(7520): 68—71.
- [58] Zhao JN, Xiao L, Qiao L, et al. The Mons Rümker volcanic complex of the Moon: a candidate landing site for the Chang'E-5 mission. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2017, 122(7): 1419—1442.
- [59] Glotch TD, Lucey PG, Bandfield JL, et al. Highly silicic compositions on the moon. *Science*, 2010, 329 (5998): 1510—1513.

[60] Yue ZY, Di KC. Hydrocode simulation of the impact melt layer distribution underneath Xiuyan Crater, China. *Journal of Earth Science*, 2017, 28(1): 180–186.

[61] Zhao SY, Qian YQ, Xiao L, et al. Lunar mare fecunditatis: a science-rich region and a concept mission for long-distance exploration. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): 1062.

Advances in the Study of Lunar Volcanism and Thermal Evolution

Long Xiao^{1*} Yuqi Qian¹ Le Qiao² Feng Zhang³ Wei Yang⁴ Jun Huang¹

1. *School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074*

2. *School of Space Science and Physics, Shandong University, Weihai 264209*

3. *State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*

4. *Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract Volcanic eruption and magmatic intrusion are the main endogenic geological processes on the Moon. Since the Apollo program, newly obtained remote sensing data and sample analysis have shown that the lunar volcanic activity lasted from 4 billion to more than 1 billion years ago. The chemical compositions of lunar basalts are complex, and volatiles may have played a major role in the formation of the lunar ring moat-dome structures and irregular mare patches. Chang'e-5 samples confirmed that lunar volcanism continued at least 2 billion years ago, and that the mantle source of these young basalts is not rich in KREEP or water. The main remaining significant questions in lunar volcanology include: what are the mechanisms responsible for the persistence of lunar volcanic activity? How to explain the significance of the Procellarum-KREEP-Terrane and its role in the lunar evolution? The lateral heterogeneity of the lunar mantle and the role of volatile components in the thermal evolution of the Moon are important topics for future lunar exploration.

Keywords volcanic activity; volcanic landform; volcanic rock type; thermal evolution; exploration targets; the moon

(责任编辑 刘敏 姜钧译)

* Corresponding Author, Email: longxiao@cug.edu.cn