

· 专题:双清论坛“月球科研站的关键科学问题” ·

# 月球南极—艾特肯盆地的形成与早期撞击历史<sup>\*</sup>

邱凯昌<sup>1\*\*</sup>

肖智勇<sup>2\*\*</sup>

林杨挺<sup>3</sup>

岳宗玉<sup>1</sup>

1. 中国科学院空天信息创新研究院/遥感科学国家重点实验室,北京 100101

2. 中山大学大气科学学院,珠海 519082

3. 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]** 月球撞击构造完整地记录了内太阳系的小天体撞击历史,是研究撞击历史和撞击通量的最好样本。南极—艾特肯(SPA)盆地是月球上最大最古老的撞击盆地,其形成时间是重建月球演化历史的关键节点。SPA盆地的形成与早期撞击历史的研究,对于揭示月球外动力演化历史、建立月球演化的精确时间标尺、理解太阳系天体轨道动力学演化以及地球宜居环境演化等具有重大科学意义,是月球科学的突破口之一。本文梳理了SPA盆地等早期重大撞击事件的形成时间、SPA盆地的形成过程及全球响应、早期小天体的撞击通量等关键科学问题。提出了在月球科研站任务背景下的研究建议,并倡议采样返回与样品定年、遥感数据撞击坑统计分析、撞击成坑数值模拟相结合的研究方法。

**[关键词]** SPA盆地;早期撞击通量;撞击坑统计定年;撞击成坑数值模拟;月球科研站;采样返回

## 1 月球早期撞击历史研究意义

天体之间的碰撞贯穿了太阳系的形成和演化,撞击作用是天体形成和演化过程中最重要的外动力地质过程,与板块起源、生命起源等重大科学问题息息相关。内太阳系天体经历了相似的小天体撞击历史,但在地球上已难觅踪迹。月球作为地球唯一的天然卫星,其表面布满了大大小小的撞击坑,最完整地记录了内太阳系的撞击历史<sup>[1]</sup>。

月球早期重大撞击事件形成的大型撞击盆地对月亮和上月幔的结构和组成产生了深远影响,是月球动力演化过程中的关键事件,其中,南极—艾特肯(South Pole-Aitken, SPA)盆地是月球上最大最古老的撞击盆地,其形成时间是重建月球演化历史的关键节点,也是研究月球撞击历史的时间起点<sup>[2]</sup>。

月球是唯一开展过定点采样的地外天体,基于美国的阿波罗(Apollo)任务和苏联的月球号(Luna)任务返回样品的同位素年龄和月球遥感图像撞击坑密度统计,已经建立了撞击坑统计定年方法,成为月



**邱凯昌** 中国科学院空天信息创新研究院研究员、博士生导师,遥感科学国家重点实验室新型遥感探测研究室主任。嫦娥三号、四号任务科学研究核心团队成员,天问一号火星探测任务科学目标先期研究团队成员,国际摄影测量与遥感学会“行星遥感与制图”工作组组长。



**肖智勇** 中山大学教授,博士生导师。主要从事撞击过程和撞击历史研究,参与中国嫦娥探月工程、天问一号火星探测任务和NASA MESSENGER水星探测任务。发表学术论文100余篇,论文被引用2000余次。曾入选中国科协青年人才托举工程和国家级重大人才工程。

球等地外天体表面定年的主要工具。小天体撞击通量的准确标定,是撞击坑统计定年的基础,并且与撞击体类型的变化一起,指示了太阳系天体运行轨道的动力学演化<sup>[1,3]</sup>。

由于Apollo和Luna着陆采样区地表面年龄分布的局限(主要在40亿~30亿年之间),以往建立的

收稿日期:2022-02-28;修回日期:2022-04-29

\* 本文根据第302期“双清论坛”讨论的内容整理。

\*\* 通信作者,Email:dike@radi.ac.cn;xiaozhiyong@mail.sysu.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(41941003,41972321)和中国科学院战略性先导科技专项项目(XDB41000000)的资助。

月球年代函数用到的 Apollo 和 Luna 样品年龄在 30 亿年和 10 亿年间还有很大的空白区间,导致该函数存在一定的不确定性;嫦娥五号首次采集了最年轻的月海玄武岩(20 亿年),填补了这个空白,为验证和改进月球年代函数提供了一颗珍贵的“金钉子”,一定程度上保证了年轻区域定年的准确性<sup>[4-6]</sup>。因此,未来对月球撞击历史的重建和月球演化精确时间标尺的构建,最重要的是要确定大于 38 亿年前的早期撞击通量、SPA 等主要撞击盆地的形成时间,这既是月球科学研究的关键问题,也是未来月球探测任务应着力实现的重要科学目标。

总之,SPA 盆地的形成与早期撞击历史的研究,对于揭示月球外动力演化历史、建立月球演化的精确时间标尺、理解太阳系天体轨道动力学演化以及地球宜居环境演化具有重大科学意义。本文概述了月球撞击历史研究的进展,分析关键科学问题与研究挑战,并以月球科研站任务<sup>[7]</sup>为背景提出研究建议。本文所梳理的关键科学问题和提出的研究建议,希望对我国月球科研站任务的科学目标论证、探测任务规划、关键技术预先攻关以及返回样品和探测数据的科学研究布局等提供参考,而月球科研站任务的实施将为月球 SPA 盆地的形成与早期撞击历史的研究提供直接的支撑。

## 2 月球撞击历史研究进展

### 2.1 大型撞击盆地的定年

撞击盆地是坑缘直径大于 200 km 的撞击构造,代表了月球上撞击能量最大的地形产物。和直径较小的撞击构造相比,撞击盆地的形成过程伴随着更

大的挖掘深度、更多熔融物和更严重的坍塌改造<sup>[8]</sup>。使用月球轨道激光测高仪(Lunar Orbiter Laser Altimeter, LOLA)获得的地形数据,在月球上共发现了 60 处直径大于 200 km 的撞击盆地(图 1)。月球撞击盆地形成时,强烈撞击作用向月球内部注入了巨大的能量,造成的热扰动、构造扰动、物质混合熔融和溅射物堆积,可在很长的地质时间尺度上引发区域甚至全球的地质响应。因此,撞击盆地的定年,撞击盆地的形成过程及其对岩浆活动、壳层结构和浅表层物源的影响等,一直是月球科学研究的重要内容。

基于遥感数据解译的撞击盆地之间的新老关系,美国的阿波罗和苏联的月球号探测任务选取了一些能刻画早期撞击历史的关键撞击盆地,采集了疑似代表这些盆地形成事件的样品<sup>[3]</sup>(图 1)。Stöffler 等<sup>[3]</sup>论述了一些盆地的年龄数据,例如,遥感解译认为阿波罗 14 号着陆点可能位于东海盆地的撞击溅射物中,月壤角砾岩样品记录的~38 亿年的同位素年龄可能是东海盆地的形成时间;阿波罗 15 号位于雨海盆地的东侧坑缘,样品中~39.2 亿年的同位素年龄可能是雨海盆地的形成时间;阿波罗 16 号位于酒海盆地的西侧的溅射物中,样品中~41 亿年的同位素年龄可能是酒海盆地的形成时间。但是,这些样品的事件归属均存在长期的争论,不同的样品分析方法和/或测年对象得到的年龄数据的事件代表性也是月球样品分析的难点。

使用撞击坑统计定年的方法<sup>[1]</sup>,前人已根据撞击盆地的内部和溅射物上累积的撞击坑的大小—频率分布估算其形成的模式年龄<sup>[10]</sup>。但是,坑群的模

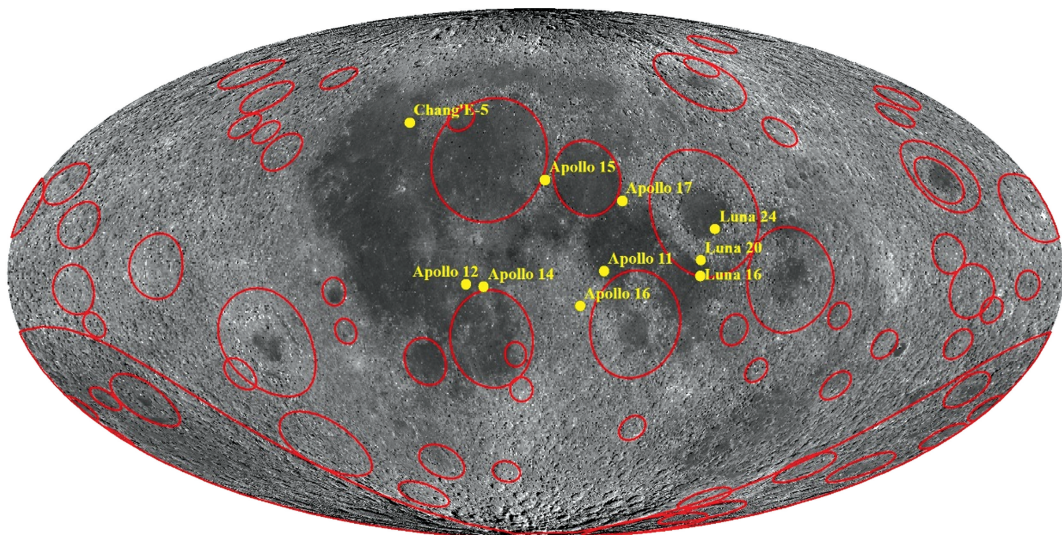


图 1 月球撞击盆地及着陆采样点分布图(盆地数据来源<sup>[9]</sup>,底图为摩尔威德投影的 LROC WAC 全球影像图)

式年龄与撞击坑统计定年方法所假设的撞击通量相关,而撞击通量的厘定又和关键撞击盆地的形成年龄相关<sup>[3]</sup>。因此,使用撞击坑统计定年估算撞击盆地的模式年龄在理论和应用假设上存在相互依赖的根本悖论。另外,撞击坑统计定年方法的理论基础和实际操作也受其他因素的影响,例如二次坑对撞击坑统计定年方法的影响未知、溅射物覆盖<sup>[10]</sup>和撞击均衡等效应一定程度上影响了该方法的准确度<sup>[11]</sup>。

## 2.2 月球撞击通量与轨道动力学

月球高地上的撞击坑密度远高于月海,直径>300 km的撞击盆地几乎都形成在月海之前;月海的主要年龄范围在~36亿年左右,代表了>3/4的月球历史。因此,月球在形成之初的首个10亿年内的撞击频率和强度远比之后的高<sup>[12]</sup>。根据月球撞击盆地遥感观测得到的新老关系,可确定在酒海盆地与东海盆地形成之间,月球上至少产生了14个大型的撞击盆地<sup>[13]</sup>。这和东海盆地形成后几乎没有新的盆地形成产生截然反差。因此,从撞击盆地的形成时间序列来看,月球早期(也即岩浆洋分异结束至大约36亿年前后)的撞击通量远比月海形成之后的更高。这些密集的盆地撞击发生在行星系统形成之后,因此被称之为晚期大轰击(Late Heavy Bombardment, LHB)<sup>[14]</sup>。

关于LHB发生的通量变化主要存在两个端元假说,以及大量介于二者之间的观点<sup>[14, 15]</sup>。一个观点认为LHB是太阳系形成过程中行星持续发生残余星子增生的结果,也即晚期增生(Late Veneer)的过程,因此45亿年以来的撞击历史遵从指数递减的递变规律<sup>[11]</sup>。另一个观点则认为月球上大部分撞击盆地等的形成集中在~39亿年前后较短的一段时间,也即LHB的发生形式可能是灾变式的、密集的撞击(Cataclysm Bombardment)<sup>[16]</sup>。引起这两个端元假说的重要缘由是样品溯源具有多解性。由于缺乏明确的事件地质背景,根据已有的样品年龄的信息无法完全说明LHB的存在形式<sup>[14]</sup>。

月球早期的撞击历史与太阳系天体形成之初的轨道演化息息相关。冥王星特殊的轨道性质表明太阳系形成之初,巨行星可能发生过大规模的轨道迁移<sup>[17]</sup>,扰动了太阳系内、外的小天体,造成短暂升高的撞击通量。前人注意到月球高地、火星南部高地和水星严重撞击区域的撞击坑大小、频率分布(Size-frequency Distribution, SFD)高度相似,推算其撞击体的SFD与主带小行星的SFD相似;月海、火星北

部平原、水星平坦平原和金星上的撞击坑的SFD高度相似,其撞击体的SFD与近地小行星的SFD相似;这两类撞击坑的SFD截然不同<sup>[18]</sup>。因此,内太阳系天体经受的撞击体可能来自两种不同的源区。但是,轨道动力模型从当前太阳系天体的轨道结构出发,反演早期的轨道演化,缺乏关于太阳系早期结构的定标参数。厘定月球早期的撞击通量,将是约束太阳系天体早期轨道演化的重要突破口。

## 2.3 月球撞击年代学

月球表面撞击坑的大小—频数关系具有一定的规律。更重要的是,具有不同年龄的地质单元中,撞击坑的统计分布规律是相似的,表征这种撞击坑大小分布一般规律的公式就是产率函数,常用的有德国柏林自由大学Gerhard Neukum教授1983年建立的产率函数<sup>[19]</sup>、Gerhard Neukum等人<sup>[1]</sup>2001年提出的产率函数等。通过对Apollo和Luna样品代表的地质单元的撞击坑统计、撞击岩石样品的同位素定年,从而得到这些地质单元撞击坑分布规律与同位素年龄的关系。Gerhard Neukum<sup>[19]</sup>将其表示为一个指数函数与一个线性函数之和的形式,这个函数就是月球年代函数。对于月面其他地质单元撞击坑分布统计,利用年代函数,即可获得相对准确的形成年龄。

然而Apollo和Luna采集的玄武岩样品年龄老于30亿年,幸运的是,嫦娥五号返回样品的同位素定年结果,得到着陆区玄武岩的形成年龄为20.3亿年<sup>[4]</sup>,Yue等<sup>[6]</sup>已经利用这个重要的数据点更新了月球的年代函数。但是,对于大于38亿年的更古老事件的定年,仍然存在很大的不确定性。解决这一问题的关键是未来月球探测任务中采集到SPA盆地等早期重大撞击事件的岩石样品。

轨道动力演化模型已约束了不同天体间的撞击频率和撞击速度的差别<sup>[20]</sup>。因此,月球撞击坑统计定年的方法已被转换至其他类地行星,并广泛用于行星地质学研究。另外,同一天体存在不同的撞击坑产率函数和年代函数,且各自均有一定的适用范围,其中最常用的Neukum撞击坑产率函数适用于直径在10 m至300 km的撞击坑<sup>[1]</sup>。

## 2.4 月球撞击坑形成机理与数值模拟

当超高速运动的小天体接触月球表面时,在极短时间内它将会以冲击波的形式强烈挤压其前方的物质,之后冲击波向陨石尾部和靶体周围迅速传播。冲击波的强度远超过陨石和靶区物质的强度,从而

引起陨石和靶体物质的破裂,甚至导致物质的液化和气化。当快速移动的冲击波到达陨石尾部时,在自由面处将形成传播方向相反的稀疏波,它将受到强烈压缩的陨石和靶体物质卸载到零压状态,这个稀疏波和冲击波综合作用的结果就是将靶体物质挖掘出来并溅射到周围,从而形成了碗型的瞬时撞击坑<sup>[8]</sup>。随后,由于重力作用,瞬时撞击坑部分的坑壁将会坍塌滑落到坑内,在坑底形成一个透镜状堆积体;如果撞击坑的直径较大,这个塌陷过程将会非常壮观,从而形成复杂撞击坑。除此之外,在重力作用下撞击坑地形的缓慢塌陷,后期撞击溅射物覆盖,以及太阳风、微陨石等小型撞击对撞击坑形态的长期改造,使撞击坑形态发生了缓慢的改造,直至消失。

目前,数值模拟是研究撞击坑形成机制的重要手段之一。在基于有限体积法的数值模拟过程中,首先将真实空间网格化,将物理量分别布置在网格中心或者网格节点上,构成计算空间;在一定的边界条件下,在计算空间求解质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、描述物质偏应力的本构方程、以及描述物质热力学参量之间关系的状态方程。撞击过程中涉及到的物质是非常复杂的,因此模拟中用到的本构方程和状态方程越全面,得到的结果就越可靠。目前对撞击坑的数值模拟程序中,常用的本构方程是弹塑性本构方程。然而弹塑性方程中的强度与物质的性质密切相关,描述强度的模型有破裂模型<sup>[21]</sup>、孔隙模型<sup>[22]</sup>、热软化模型<sup>[23]</sup>等。在状态方程方面,适应超高温、超高压的状态方程包括解析形式的 Tillotson 状态方程以及查找表形式的 ANEOS 状态方程<sup>[8]</sup>等。

## 2.5 SPA 盆地的研究进展

SPA 盆地的区域地质和地球物理特征表明,月球高地斜长岩地体的表层月壳物质可能主要是 SPA 盆地的撞击溅射物<sup>[2]</sup>。SPA 内部的地球化学特征,记录了受 SPA 形成时所改造的壳幔物质的分布、早期撞击盆地及其溅射物的作用以及内部岩浆活动等长期地质活动等复杂信息<sup>[24]</sup>。这些地质单元的划分和成因机制研究,不仅有助于完善对月球内部成分和结构的认识,也是月球动力演化多样性研究的重要方面<sup>[25]</sup>。

目前,对 SPA 盆地形成过程和后期演化的研究还存在一些根本问题。例如,根据撞击坑统计定年和月球样品同位素年龄的研究认为,SPA 盆地大约形成在 42 亿~43 亿年前<sup>[10, 26]</sup>。但是,这些方法所固有的不确定性(如样品归属和事件指代性多解、未

知的早期撞击通量)需要独立验证。另外,前人试图从 SPA 盆地的地形、地球化学和地球物理等特征出发,结合撞击过程数值模拟的结果,重建 SPA 形成之初的物质分布,划分 SPA 形成后的地质产物<sup>[24]</sup>。除此之外,在许多基础科学问题上依然存在大量的未知,例如 SPA 的熔融物的空间分布、几何尺寸和成分特征不详,SPA 内隐月海和月海的覆盖范围和幔源性质研究不足,撞击溅射物对 SPA 内外物质改造的影响未知等<sup>[25]</sup>。嫦娥四号着陆在 SPA 盆地内部,着陆点位置靠近理论计算的 SPA 的瞬时坑和熔融岩浆湖的边缘<sup>[27]</sup>。玉兔 2 号原位探测获得了大量的地质数据,巡视区的表面物质溯源和成分研究,反映了 SPA 盆地形成及演化过程中撞击熔融岩浆湖的结晶分异、后期反复撞击改造和多期次玄武岩喷发填充等复杂地质过程<sup>[28-30]</sup>;此外,在一个小型新鲜撞击坑中识别出了年龄在 1 个百万年以内的碳质球粒陨石撞击体残留物,为撞击体成分与类型变化研究提供了重要信息<sup>[31]</sup>。

SPA 的形成影响了全球地质演化,撞击模拟表明,月球背面的北半球高地物质可能主要来自 SPA 挖掘的下月幔物质<sup>[2]</sup>,为未来探寻月球岩浆洋分异的原始壳物质添加了额外的挑战。SPA 盆地的对跖区为月球正面的高钛玄武岩,前人提出 SPA 形成后产生了长时间的对跖效应,撞击产生的高温异常和热化学不稳定性与同时期进行的月幔重力翻转共同作用,驱动了月球内部的物质迁移,导致月球正面和背面的地球化学不对称性<sup>[32]</sup>。因此,从 SPA 的关键地质单元上获取原位样品以厘定 SPA 的形成细节,将是月球地质研究不可或缺的重要工作。

## 3 研究挑战与关键科学问题

### 3.1 研究挑战

尽管月球撞击历史的研究已取得多方面的进展,但对早期撞击历史的研究还存在一些关键性的挑战,主要表现在以下三个方面。

首先,缺少 SPA 等早期重大撞击事件的样品。要确定这些重大撞击事件的时间,核心是要采集到相应的撞击熔融物。一方面,由于长期地质演化造成的复杂地质背景,基于遥感数据确定着陆区域并识别早期撞击熔融物为采样做准备存在很大困难。另一方面,实施采样返回工程任务,特别是在极区及月球背面古老区域着陆采样,无论是无人采样或有人采样在工程上都具有很大的挑战。以 SPA 盆

地为例,由于其撞击规模最大、最古老,经历了长期反复的后期撞击改造和多期次玄武岩喷发填充等,如何发现并确认 SPA 古老撞击的熔融物?在 SPA 盆地特殊位置和复杂地形条件下,如何能最安全、精确地着陆并采集到撞击熔融物?这些无疑在科学、技术、工程上都具有很大的挑战。

其次,撞击坑形成过程的数值模拟是定量研究撞击作用和撞击历史研究的重要手段,而 SPA 盆地规模巨大,其形成过程的数值模拟具有明显的挑战。撞击体的大小、物质组成、撞击速度、撞击角度、月球靶区的平面和垂直结构、靶区物理性质等众多要素,对 SPA 撞击事件的结果都有重要的影响。如何准确地确定这些要素,使模拟结果与实际的遥感观测相吻合?如何用遥感观测到的 SPA 盆地当前的形貌和物质,验证 SPA 撞击模拟正确性?只有这些挑战性的问题得到解决,才能准确地模拟 SPA 盆地的形成过程,深化对撞击过程和全球响应的认识,并为确定着陆采样区提供撞击熔融物空间分布等关键信息。

此外,月球遥感数据的撞击坑精确统计,是将精确测定的样品同位素年龄应用于标定早期撞击通量的关键,由于古老复杂区域撞击坑退化、饱和、二次坑等问题以及遥感数据的多样性与不确定性,撞击坑精确统计具有很大的挑战性。对于采样区域撞击坑大小一频率分布的统计,直接影响所建立年代函数的精度,对于非采样的代表性区域撞击坑大小一频率分布的精度统计,有助于改进产率函数的精度。遥感图像的分辨率、几何变形、获取图像时的光照条件、二次坑的识别、退化状态、撞击坑的量测方法等,对于从遥感图像解译、量测和统计撞击坑都有较大的影响,需要采用及研制新的技术提高古老复杂区域撞击坑统计的精度和可靠性。

### 3.2 关键科学问题

我们梳理出以下关键科学问题,这些关键问题的解决,有赖于月球科研站等月球探测任务的支撑,将大大推动月球科学的发展。

(1) SPA 盆地等早期重大撞击事件的形成时间。月球形成和基本固化之后,其整个演化历史可以划分为基于内部圈层结构的磁场发电机运行、岩浆活动和构造运动等内动力演化,以及小天体撞击和太阳辐射驱动的外动力演化两大部分。SPA 盆地的形成时间是月球演化由内动力为主向内外动力并重转变的关键节点,也是研究月球撞击历史的时间起点。SPA 盆地形成之后,酒海盆地、雨海盆地、

爱拉托逊和哥白尼撞击坑等重要撞击事件构筑了月球地层的基本框架。虽然 Apollo 和 Luna 的一些样品被解释为来自这些重大撞击事件,但其事件代表性存在普遍争议,尤其是 38 亿年以前的撞击历史不确定、争议最大,对于 LHB 是否发生以及发生的形式、内太阳系是否存在过两种或三种不同类型的撞击体源区等重大问题也难以确定。因此,SPA 盆地等早期重大撞击事件的同位素定年是月球科学的关键科学问题,更是月球撞击历史研究的核心关键问题。

(2) SPA 盆地的撞击条件、形成过程及全球响应。作为月球上最大最古老的撞击盆地,SPA 盆地的形成是月球动力演化的一个关键转折点。前期的模拟研究认为,SPA 成坑过程剥除了月壳并挖掘到了月幔达 100 km,月壳及月幔物质溅射到背面高地广大的区域,其影响波及到月球全球。SPA 盆地的形成与全球二分性、三大地体的形成等重大问题也有密切关系。由于缺少 SPA 撞击熔融物样品,不仅其准确的形成时间未知,对其撞击条件和形成过程也缺乏准确的认识和足够的验证。因此,SPA 盆地的撞击条件、形成过程及全球响应成为月球撞击历史研究的关键科学问题。对这一问题的解决,有赖于采样、撞击成坑数值模拟、遥感数据解译分析等研究手段的结合。

(3) 早期小天体的撞击通量。目前,月球早期(大于 38 亿年)小天体撞击通量不确定,严重制约了撞击坑统计定年的适用性和准确性,因此早期小天体的撞击通量成为精确重建月球撞击历史的核心关键问题。确定早期小天体的撞击通量,有赖于采样区及非采样的代表性区域遥感数据的撞击坑精确统计以及基于样品年龄的精确标定。采集 SPA 盆地等早期重大撞击事件样品并精确测定同位素年龄,使其成为月球地层的“金钉子”,同时对这些重大撞击事件的指代地质单元上的撞击坑进行精确统计,并将两者相结合,有望获得精确标定的早期小天体的撞击通量,从而重建月球的撞击历史,建立国际上可靠性最高的撞击坑统计定年方法。

## 4 研究建议

### 4.1 SPA 盆地的形成时间

未经后期改造的 SPA 盆地形成时产生的撞击熔岩是标定其形成时间的关键。SPA 盆地形成后,内部经历了严重的地质改造,但是 SPA 盆地的整体地形和成分分带特征保存至今。这意味着高

分辨率的三维地质填图将是寻找未受改造的 SPA 盆地的撞击熔岩的可行方法。在未来的月球轨道器探测任务中,针对性的布置高分辨率探地雷达、重力场和物质组成等探测任务,将提升高分辨率表面遥感数据的反演维度,定位适合采样的撞击熔融区域。

#### 4.2 SPA 盆地的形成机制与全球响应

前期研究表明,对于 SPA 盆地形成过程的模拟,内部温度剖面结构对这种规模撞击事件的影响非常大。所以,还要结合 SPA 的地质年龄建立合适的温度剖面。另外,SPA 盆地是倾斜撞击形成的椭圆结构,因此须使用三维数值代码更好地模拟其形成过程。SPA 撞击事件将月壳全部剥除,在盆地中心露出月幔,但是重力场数据显示这里仍然存在 30 km 的月壳,这一月壳与其他区域的月壳在结构和成分上的异同对于揭示月球早期内部结构具有重要意义,值得进一步研究。

SPA 撞击事件可产生巨厚的溅射席,而且这些溅射席中还会含有月幔物质。在盆地中央的月幔物质熔融后会出现再次分异,但是在 SPA 盆地周围的溅射席上的月幔物质由于其规模较小难以出现分异,因此可能更容易在 SPA 盆地周围找到挖掘出的月幔物质。除此之外,SPA 还对其对跖点—即月球正面雨海盆地附近,造成了一定程度的影响,包括在内部产生构造薄弱带从而为后期玄武岩喷发提供通道<sup>[32]</sup>,引起月球内部富含放射性元素的物质迁移<sup>[33]</sup>等。这些初步的认识需要在后期的研究中加以验证和定量分析。

#### 4.3 月球早期撞击历史

对 SPA 内部的不同地貌和成分单元,开展基于地形退化和撞击饱和的高精度的撞击坑统计定年工作,将是定位 SPA 内最古老的原位物质的有效手段。

为确定 SPA 形成后的月球早期撞击历史,采集关键撞击盆地(如酒海、东海、雨海)未经后期改造的撞击熔岩将是解决现有争议的唯一渠道。继续深入开展月球撞击盆地的高分辨率地质填图工作,是定位采样单元的必然研究。这些样品不仅将彻底厘定撞击盆地的形成序列和早期撞击通量,并记录撞击体信息,从而共同为约束早期撞击体来源和太阳系天体的早期轨道迁移提供观测制约。

上述重要研究内容的建议直接针对关键科学问题的解决。除此之外,与上述建议密切相关的一些科学或技术问题也值得研究。例如,目前高分辨率

遥感观测的新撞击坑通量能否用于校正年代函数?依据月球样品和撞击坑统计建立的年代函数扩展到水星、金星和火星后如何验证其可靠性?遥感观测的撞击坑通量能否与小天体轨道动力学的预测对比验证?撞击坑退化等形貌特征如何用于对单个撞击坑定年?这些问题的研究是对 SPA 盆地的形成与早期撞击历史的研究的拓展,对于月球和行星科学的发展也具有重要研究价值。

## 5 结 语

随着我国月球科研站任务的实施以及广泛的国际合作,月球撞击历史和撞击通量的研究将走向深入。通过布局 SPA 盆地的形成时间、SPA 盆地的形成机制与全球响应、月球早期撞击历史等重要研究课题,基于采样返回与样品定年、遥感数据撞击坑统计分析、撞击成坑数值模拟等多学科多种研究方法的有机结合,有望系统性解决 SPA 盆地等早期重大撞击事件的形成时间,建立系统的月球地层“金钉子”,解决 SPA 盆地的形成及全球响应、早期小天体的撞击通量等关键科学问题,取得重大科学成果。这将成为我国月球探测任务相较于 Apollo 和 Luna 任务的突破性成果,对于揭示月球外动力演化历史、建立月球演化的精确时间标尺、理解太阳系天体轨道动力学演化将具有决定性的贡献。

## 参 考 文 献

- [1] Neukum G, Ivanov BA, Hartmann WK. Cratering records in the inner solar system in relation to the lunar reference system. Space Sciences Series of ISSI. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001: 55—86.
- [2] Melosh HJ, Kendall J, Horgan B, et al. South Pole-Aitken Basin ejecta reveal the Moon's upper mantle. *Geology*, 2017, 45(12): 1063—1066.
- [3] Stoffler D. Cratering history and lunar chronology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 60(1): 519—596.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Yue ZY, Di KC, Wan WH, et al. Updated lunar cratering chronology model with the radiometric age of Chang'e-5 samples. *Nature Astronomy*, 2022, 6(5): 541—545.

- [7] 裴照宇, 刘继忠, 王倩, 等. 月球探测进展与国际月球科研站. *科学通报*, 2020, 65(24): 2577—2586.
- [8] Melosh HJ. *Impact cratering: a geologic process*. New York: Oxford University Press, 1989.
- [9] Head JW III, Fassett CI, Kadish SJ, et al. Global distribution of large lunar craters: implications for resurfacing and impactor populations. *Science*, 2010, 329(5998): 1504—1507.
- [10] Orgel C, Michael G, Fassett CI, et al. Ancient bombardment of the inner solar system: reinvestigation of the “fingerprints” of different impactor populations on the lunar surface. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2018, 123(3): 748—762.
- [11] Xiao ZY, Werner SC. Size-frequency distribution of crater populations in equilibrium on the Moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2015, 120(12): 2277—2292.
- [12] Hartmann WK. Lunar cratering chronology. *Icarus*, 1970, 13(2): 299—301.
- [13] Fassett CI, Minton DA. Impact bombardment of the terrestrial planets and the early history of the Solar System. *Nature Geoscience*, 2013, 6(7): 520—524.
- [14] Bottke WF, Norman MD. The late heavy bombardment. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 619—647.
- [15] Hartmann WK. History of the terminal cataclysm paradigm: epistemology of a planetary bombardment that never (?) happened. *Geosciences*, 2019, 9(7): 285.
- [16] Tera F, Papanastassiou DA, Wasserburg GJ. Isotopic evidence for a terminal lunar cataclysm. *Earth and Planetary Science Letters*, 1974, 22(1): 1—21.
- [17] Malhotra R. The origin of Pluto’s peculiar orbit. *Nature*, 1993, 365(6449): 819—821.
- [18] Strom RG, Malhotra R, Xiao ZY, et al. The inner solar system cratering record and the evolution of impactor populations. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2015, 15(3): 407—434.
- [19] Neukum G. *Meteorite bombardment and dating of planetary surfaces*. Washington, D. C.: National Aeronautics and Space Administration, 1984.
- [20] Marchi S, Mottola S, Cremonese G, et al. A new chronology for the moon and mercury. *The Astronomical Journal*, 2009, 137(6): 4936—4948.
- [21] Collins GS, Melosh HJ, Ivanov BA. Modeling damage and deformation in impact simulations. *Meteoritics & Planetary Science*, 2004, 39(2): 217—231.
- [22] Wünnemann K, Collins GS, Melosh HJ. A strain-based porosity model for use in hydrocode simulations of impacts and implications for transient crater growth in porous targets. *Icarus*, 2006, 180(2): 514—527.
- [23] Ohnaka M. A shear failure strength law of rock in the brittle-plastic transition regime. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(1): 25—28.
- [24] Moriarty DP III, Pieters CM. The character of south pole-aitken basin: patterns of surface and subsurface composition. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2018, 123(3): 729—747.
- [25] Pieters CM, Head JW. Sampling the South Pole-Aitken basin: Outstanding issues and opportunity for international lunar exploration// 53rd Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas: LPI Contribution, 2022.
- [26] Garrick-Bethell I, Miljković K, Hiesinger H, et al. Troctolite 76535: a sample of the moon’s south pole-aitken basin?. *Icarus*, 2020, 338: 113430.
- [27] Huang J, Xiao ZY, Flahaut J, et al. Geological characteristics of von kármán crater, northwestern south pole-aitken basin; Chang’E-4 landing site region. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2018, 123(7): 1684—1700.
- [28] Lin HL, He ZP, Yang W, et al. Olivine-norite rock detected by the lunar rover Yutu-2 likely crystallized from the SPA-impact melt pool. *National Science Review*, 2019, 7(5): 913—920.
- [29] Li CL, Liu DW, Liu B, et al. Chang’E-4 initial spectroscopic identification of lunar far-side mantle-derived materials. *Nature*, 2019, 569(7756): 378—382.
- [30] Gou S, Di KC, Yue ZY, et al. Forsteritic olivine and magnesium-rich orthopyroxene materials measured by Chang’e-4 rover. *Icarus*, 2020, 345: 113776.
- [31] Yang YZ, Li S, Zhu MH, et al. Impact remnants rich in carbonaceous chondrites detected on the Moon by the Chang’e-4 rover. *Nature Astronomy*, 2022, 6(2): 207—213.
- [32] Schultz PH, Crawford DA. Origin of nearside structural and geochemical anomalies on the moon// Ambrose WA, Williams DA. *Recent Advances and Current Research Issues in Lunar Stratigraphy*. Boulder, CO: Geological Society of America, 2011, 141—159.
- [33] Zhang N, Ding M, Zhu MH, et al. Lunar compositional asymmetry explained by mantle overturn following the South Pole-Aitken impact. *Nature Geoscience*, 2022, 15(1): 37—41.

## Formation of South Pole-Aitken Basin and Early Impact History of the Moon

Kaichang Di<sup>1\*</sup>      Zhiyong Xiao<sup>2\*</sup>      Yangting Lin<sup>3</sup>      Zongyu Yue<sup>1</sup>

1. *State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*

2. *School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082*

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

**Abstract** The bombardment history of the inner solar system is uniquely recorded on the Moon by the ubiquitous impact craters, which are best samples for studying impact history and flux. The South Pole-Aitken (SPA) basin is the largest and oldest impact basin, whose formation time is a pivotal point in reconstructing the history of the Moon's evolution. Studies of SPA formation and early impact history of the Moon are of great significance in revealing the endodynamic evolution history of the Moon, constructing an accurate time scale of lunar evolution, understanding the celestial orbital dynamics in the solar system and evolution of the Earth's habitable environment. The studies could lead to breakthroughs in lunar science. The key scientific issues in the field are sorted out, including the formation times of SPA basin and other early major impact events, the SPA impacting condition, process and global responses, early impact flux, etc. We propose the research themes in the context of the lunar research station program, and promote synergistic use of the research methods of sample return and radiometric dating, crater statistical analysis using remote sensing data, and numerical simulation of impact crater formation.

**Keywords** SPA basin; early impact flux; surface dating from crater SFD; numerical simulation of impact cratering; lunar research station; sample return

(责任编辑 魏鹏飞 姜钧译)

\* Corresponding Author, Email: dika@radi.ac.cn; xiaozhiyong@mail.sysu.edu.cn