

DOI: 10.3724/j.1000-4734.2025.45.096

CSTR: 32252.14.j.1000-4734.2025.45.096

月球晚期重轰击假说的崩塌：来自嫦娥六号样品的证据

岳宗玉^{1*}, 苟盛¹, Gregory Michael²

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 行星科学与前沿技术重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院地球化学研究所 月球与行星科学研究中心, 贵州 贵阳 550081)

摘要：月球晚期重轰击 (Late Heavy Bombardment, LHB) 假说认为在约39亿年前月球曾发生过一次短暂但剧烈的撞击高峰, 形成了月球表面的主要大型盆地。它曾被认为是月球乃至太阳系类地天体演化的基本理论之一, 其主要依据是在Apollo和Luna任务返回的月球样品中很少有早于40亿年的撞击熔岩。然而LHB假说自从提出以来就遭受质疑, 近年更是被大多数行星科学家所摒弃, 研究人员提出了多种理论解释返回样品中早期撞击熔岩缺失的原因。因为该假说经过了多年的发展, 已经在动力学等领域出现了相匹配的理论, 从而在一些科学家脑海中形成了根深蒂固的观念。本文首先介绍了该假说的起源与发展以及有关的质疑, 然后利用我国嫦娥六号样品的外来苏长岩的定年结果等作为控制点, 构建了撞击坑年代函数, 在此基础上推导的撞击率函数进一步颠覆了LHB假说, 指出月球以及内太阳系在形成之后撞击频率快速下降, 在39亿年前左右并不存在撞击高峰。

关键词：月球; 撞击坑; 晚期重轰击; 年代函数

中图分类号：P184 **文献标志码：**A

第一作者：岳宗玉, 男, 1980年生, 研究员, 博士, 从事行星地质学研究。E-mail: yuezy@mail.iggcas.ac.cn。

Collapse of the Lunar Late Heavy Bombardment hypothesis: Evidence from Chang'e-6 samples

YUE Zongyu^{1*}, GOU Sheng¹, GREGORY Michael²

(1. Key Laboratory of Planetary Science and Frontier Technology, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang Guizhou 550081, China)

Abstract: The Late Heavy Bombardment (LHB) hypothesis proposed that around 3.9 billion years ago, the Moon experienced a brief but intense spike in impact activity, which formed major large basins on the lunar surface. The LHB hypothesis has been once considered as a foundational theory for the evolution of the Moon and other terrestrial bodies in the solar system, and it was primarily supported by the apparent scarcity of impact lavas whose ages are older than 4.0 billion years in the lunar samples returned by the Apollo and Luna missions. However, the LHB hypothesis has been questioned since its inception and, in recent years, has been largely rejected by most planetary scientists. Various kinds of theories have been proposed by researchers to explain the lack of early-stage impact lavas in the samples returned by the Apollo and Luna missions. As this hypothesis has undergone years of development, corresponding theories had emerged in fields such as dynamics, thus, some deeply rooted concepts were persistent in the minds of some scientists. In this paper, we firstly introduced the origin and development of the LHB hypothesis and its related questionings. Then we have constructed the chronological function of the impact crater on the Moon by utilizing the dating results of exotic norite clasts returned by

收稿日期: 2025-07-05。

基金项目: 中国科学院地质与地球物理研究所重点部署项目 (嫦娥六号专项) (批准号: IGGCAS-202401)。

*通信作者, E-mail: yuezy@mail.iggcas.ac.cn。

the China's Chang'e-6 mission as chronological anchors. Based on this, the derived impact frequency function further challenges the LHB hypothesis, indicating that the impact frequencies on the Moon and the inner solar system were declined rapidly after their formation, and there was no pronounced impact spike around 3.9 billion years ago.

Keywords: Moon; impact crater; late heavy bombardment; chronological function

自从嫦娥一号探测任务以来,我国陆续成功实施了多项月球与深空探测任务。这些探测任务促进了我国以月球为主要研究对象的行星科学的蓬勃发展,发表了大量的学术论文,并组织召开了许多学术会议。在这些学术会议上,经常提到的一个概念或假说就是月球“晚期重轰击”(Late Heavy Bombardment, LHB),而且很多讨论中都将它作为月球演化框架的主要基石之一,并且试图基于该框架解释得到的科学数据,而很少质疑这一假说的可靠性。事实上,这一假说自从提出就遭受了许多质疑,而且近年来与越来越多的观测事实相矛盾,许多行星科学家开始摒弃这一假说。本文旨在向国内同行介绍这一假说的提出与发展历史,以及与之相伴的质疑,并且指出这种假说与嫦娥六号样品的数据存在矛盾。本文认为,通过对该假说历史的了解能够对其可靠性有更加深入的认识,这样更有利于正确解释今后获取的科学数据,促进我国月球与行星科学的发展。

由于LHB假说已经提出了50余年,而且在地质、生物演化和太阳系动力学等多个领域中出现了相呼应的理论并得到广泛应用,从而催生了大量的文献,无疑为剖析这一假说的演化历史增加了难度,所以本文只能对该假说的重要方面进行阐述,包括LHB假说的发展历史,然后介绍与之相应的动力学模型,并梳理了建立月球撞击坑年代函数的控制点,尤其是结合我国嫦娥六号样品得到的月球南极-艾特肯盆地(South Pole-Aitken, SPA)的年龄更新月球撞击坑年代函数与月球撞击率函数,将其和LHB模型进行对比,从而定量地说明LHB是不存在的。

1 月球LHB假说的发展历史

1.1 LHB理论的提出

1973年,美国加州理工学院Fouad Tera等在月球与行星科学大会上发表了题为“A lunar cataclysm at ~ 3.95 AE and the structure of the lunar crust”的论文^[1](AE和后面的Ga都是表示十亿年的意思;注意他们在题目中使用了“cataclysm”一词)。在这篇论文中他们根据Apollo 12、14、15和16号任务返回的样品的Rb-Sr和U-Th-Pb结果,指出这些数据表明在约3.95 Ga月球表面曾发生过广泛的熔融和变质作用,并提出了两种解释:1)雨海撞击溅射物主导了他们所研究的物质;2)月球上的主要撞击事件在约40亿年前的一个相对短暂时期内达到了高峰。随后,Turner等^[2](他们引用了Tera等的文章)指出月球高地样品的年龄集中在4.05~3.88 Ga,并认为在这期间形成了3~6个大型盆地,但是还不确定这些撞击是代表月球持续增生过程的最后阶段,还是代表一次间歇性的撞击爆发。1974年2月,Fouad Tera等发表题为“Isotopic evidence for a terminal lunar cataclysm”的论文^[3](注意这次题目中加了terminal),在这篇论文中他们提出大多数月球高地的整体岩石样品的U-Pb等时线对应的变质年龄约为3.9 Ga,而且U-Pb分馏主要是由于在变质事件中Pb的挥发所致,由此他们认为在一段狭窄时间内月球发生了一次(雨海撞击)或一系列(可能还包括危海、东海以及其他几个盆地的撞击)事件,这些事件可以归因于月球在约39亿年前经历了一场灾变性撞击高峰。他们随后在月球与行星科学大会上发表类似的观点^[4]。

这就是晚期大轰击假说的雏形,从以上分析中可以看出,这些早期的研究非常谨慎地表示样品的测年结果既可以指单一的雨海撞击事件,也可以指约39亿年前发生的一系列事件,即后面提出的晚期重轰击,但此时还用“末期月球大灾变”(terminal lunar cataclysm)这个术语。然而很快就出

现了分别支持两种观点的文章, 例如Baldwin^[5]认为月球岩石的Rb-Sr、U-Pb和K-Ar年代学的大量研究工作表明许多撞击事件发生在雨海盆地形成之前, 在约39亿年前并不存在所谓“末期月球大灾变”的重大系列撞击事件。Hartmann^[6]则认为缺少早于约4.0 Ga样品的原因是月球早期撞击率下降的自然结果, 早期极高的撞击率使得绝大多数更早期的物质发生了破碎和加热, 从而难以保留下来。支持存在晚期重轰击的观点主要来自于George Wetherill, Wetherill^[7]认为月球晚期大轰击模型应被认真对待, 而且在其他类地行星表面也发生过类似的过程; 这篇会议论文以“Late heavy bombardment of the moon and terrestrial planets”为题, 首次用到“晚期重轰击”(Late heavy bombardment)这个术语, 而且得到了更广泛的应用; Wetherill^[8]再次使用该术语, 而且这两篇文章都认为在晚期重轰击之前的数亿年内地球附近的物质被转移到完全穿越火星轨道的轨道上, 在约39亿年前再返回到穿越地球轨道的轨道上来形成后期大轰击。另外, Turner^[9]仍然指出约39亿年前的这场灾变是可能代表早期撞击率近似单调下降的有效终止, 也可能是在这段期间出现撞击高峰。总体来说, 这段时期关于是否存在月球晚期重轰击存在很大争议, 也可能是因为月球早期撞击历史尚未引起重点关注。

值得一提的是, Neukum^[10]总结了不同区域的月球撞击坑分布密度, 优化了月球撞击坑产率函数(Production Function, PF), 并结合返回样品的同位素年龄得到了月球表面的撞击坑年代函数(Chronology Function, CF), 对CF的求导即为月球撞击率函数, 其结果显示为一条光滑的曲线, 表明月球撞击率在约44亿~30亿年前呈近似指数下降, 这与Hartmann^[6]推测的结果一致, 这实际上是第一次对月球早期撞击率的定量表示; 同时, Neukum^[10]指出晚期重轰击与地层数据矛盾, 因为大多数直径>20 km的撞击坑和大型盆地是在前酒海纪形成的。

对LHB假说最强烈的支持来自Graham Ryder, Ryder^[11]统计了月球样品中撞击熔岩的年龄, 指出在月球样品中没有发现早于约3.85 Ga的撞击熔岩, 而且这些具有相同年龄的撞击熔岩样品在化学成分上差异很大, 因此这段时期必定出现了一系列撞击事件, 而不是归因于一次撞击(例如雨海)或少数几个盆地撞击事件; 这篇文章明确提出月球的快速增生过程最晚在约44.5亿年前就已结束, 随后在约44.5亿~39亿年前之间撞击频率较低, 到了约39亿年前, 一次灾难性的密集撞击期开始, 并在约38.1亿年前结束, 在这段时间内, 不仅形成了大约十几个多环盆地, 也形成了几乎所有目前可见的东海盆地之前的撞击坑。

之后的研究中在谈到“晚期重轰击”时主要指Ryder^[11]所提出的上述版本, 而且影响较广。然而经过作者梳理发现, 大多数文献是根据LHB假说对相关的研究进行分析, 而明确支持LHB假说的文献并不多。Cohen等^[12]认为由约39亿年前大型盆地撞击所产生的熔融物可能在返回的月球样品中造成了年龄分布上的偏差, 因而分析了收集的月球陨石的年龄, 并据此在月球陨石样品中识别出7~9次不同的撞击事件, 而且年龄介于3.92~2.76 Ga之间, 缺乏早于3.92 Ga的撞击熔融岩记录, 所以他们认为在这个时期地月系统经历了一段短暂而强烈的轰炸期。Stöffler和Ryder^[13]也支持LHB假说, 但是语气明显软化了, 他们写道: “这些观测结果至少表明, 45亿~40亿年前的月球撞击坑形成率尚不明确, 同时为关于可能存在的晚期月球灾变事件的推测留下了空间”。Norman等^[14]对25个Apollo 16号采集的撞击熔融角砾岩样品碎片进行了高分辨率⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄谱测定, 其中有20个样品的年龄落在3.96~3.75 Ga之间, 而且根据化学组成和岩石学特征, 他们提出这些熔融角砾岩至少记录了四次不同的熔融形成撞击事件, 因此认为在较为狭窄的时间范围内月球表面发生了多次撞击, 所以存在月球晚期重轰击。Niihara等^[15]指出Apollo 16号着陆点月球撞击年龄的直方图中在约39亿年前出现了一个峰值, 与提出的LHB假说的时间估计相符, 而且四个碎片的年龄明显不同, 无法用单一撞击事件(如形成雨海盆地的撞击)来解释。

由此可见, 经典LHB假说的依据主要包括: 1) 在返回的月球样品中没有发现早于约3.9 Ga的撞击熔岩样品; 2) 多个撞击熔岩样品的年龄在3.9~3.81 Ga之间, 而且成分不同, 难以用一次撞击事件来解释。另外值得注意的是, LHB假说的内涵也在发生变化, 例如Bottke和Norman^[16]认为LHB早期版本的证据已经不可靠, 认为目前的证据至少适度支持一种“混合模型”, 即存在两个撞击阶段: 一个由残余星子引发的密集撞击的早期阶段, 在约44亿年前结束; 另一个由巨行星晚期迁移引发的密集撞击, 出现在约40亿~42亿年前。

1.2 LHB假说对其他领域的影响

Graham Ryder^[17]还将LHB扩展到地球, 认为从44亿~38亿年前的地球遭受了较少的撞击, 这为生命的起源提供了良好的条件, 而且认为生命可能起源于44亿~38.5亿年前。Kring和Cohen^[18]则将LHB扩展到太阳系的其他天体中, 在LHB期间不仅地球遭受了密集的撞击, 而且小行星带和火星也遭受了类似强度的撞击, 这表明整个内太阳系经历过一次撞击灾变事件, 而且撞击物质的来源很可能是小行星带。Charnoz等^[19]则认为LHB期间比土卫一小的土星卫星都被摧毁了, 这段时间是形成土星环系统的重要时刻。Fritz等^[20]认为LHB显著地改变了类地行星的大气层, 因此也在某种程度上塑造了类地行星的宜居性。Shibaïke等^[21]计算了LHB对太古宙大陆地壳的影响, 表明LHB并不会直接挖掘或熔化掉太古宙时期的全部大陆地壳, 因此LHB可能是当前地表未能发现太古宙岩石的主要原因, 即这些岩石仍深埋地下、未被暴露出来。Strom等^[22]统计了谷神星表面的撞击坑分布规律, 指出谷神星的撞击记录与LHB的撞击历史相符, 而这些撞击的抛射体起源于主小行星带。由此可见, LHB已被视为影响太阳系早期演化过程的重要因素, 而且还被认为与行星宜居环境的形成以及生命的起源等方面都具有密切关系。

1.3 LHB假说的质疑

尽管LHB已经影响多个研究领域, 但它也遭受了广泛的质疑。基于撞击过程中溅射物厚度分布的模型, Haskin等^[23]发现雨海撞击事件在所有Apollo采样区域的溅射物平均厚度超过数百米, 再结合雨海挖掘溅射物质的矿物特征, 提出所有Apollo任务采集到的富钍镁铁质撞击熔融角砾岩均为雨海撞击事件的产物, 因此约3.9 Ga的Apollo样品都是雨海撞击的产物。Hartmann^[24]指出LHB假说建立在“没有撞击熔岩就意味着没有撞击”的前提下, 但该前提已被小行星的数据所推翻——小行星在早期显然经历了碰撞, 但早期撞击熔岩的证据却很少。Hartmann^[24]进一步提出了“巨厚风化层演化”的概念, 认为早期撞击熔岩的缺失并不是因为当时没有撞击, 而是因为高频率的早期撞击导致这些熔岩被粉碎而未能保存下来。Chapman等^[25]认为月球撞击熔岩的采样明显存在偏差, 缺乏4.0 Ga的撞击熔岩样本并不支持前酒海纪撞击频率较低的观点。Hartmann等^[26]指出Apollo 14号着陆点采集的撞击玻璃珠样品以及低钍、非克里普月球陨石中的撞击熔岩均未显示集中于约3.9 Ga的年龄峰值, 因此这些玻璃珠与月球陨石的数据否认LHB的存在。Grange等^[27]在月球角砾岩73217中发现源自撞击熔融物的针状锆石, 其U-Pb年龄为 (4.335 ± 0.005) Ga, 认为这提供了首个显著早于LHB的撞击熔融证据, 表明月球在39亿年前就已经经历撞击, 提出月球的撞击历史由一系列强烈的轰击阶段和相对平静的低撞击通量时期交替组成。Morbidelli等^[28]根据可能的撞击体来源及其动力学衰减速率展开了模拟分析, 并结合月球撞击坑统计和月球盆地的放射性定年结果, 以及月亮和地幔中高亲铁元素的丰度数据, 认为月球早期的撞击通量在最初的十亿年内并非呈指数式递减, 也不存在一个显著而狭窄的撞击峰值出现在39亿年前(即LHB), 提出月球的撞击历史呈锯齿状变化趋势的新观点。Hopkins和Mojzsis^[29]提出了类似的观点, 他们根据Apollo 14号月球撞击角砾岩样品的锆石的

U-Pb定年与微量元素分析结果, 提出自约42.40亿年前以来, 月球经历了多次灾难性撞击事件, 这种类似“篱笆桩”式的撞击节奏更能准确描述太阳系后期形成及巨行星迁移过程中月球所经历的撞击模式。Kamata等^[30]计算了月球的热演化过程和盆地的黏弹性形变, 发现月球表面盆地形成时的月亮厚度需<30 km, 而且当时的莫霍面温度需高于1300~1400 K, 这种条件只能在岩浆洋固结之后5亿年内维持, 因此月球表面大多数盆地不可能在LHB期间(即约39亿年前)形成。Boehnke和Harrison^[31]构建了一个关于Apollo样品中⁴⁰Ar扩散的物理模型, 这种模型可以验证年龄直方图是否对应唯一的撞击历史, 结果显示, 即使输入的撞击历史并未包含撞击峰值, 得到的年龄直方图仍可显示出一个或多个年龄峰值, 或者说即便真实的撞击历史是单调下降的, 其所反映出的“表观年龄峰”也可能被误判为类似LHB的撞击事件, 因此认为单调递减的撞击通量模型足以解释目前所有月球样品中的⁴⁰Ar/³⁹Ar的年龄数据。Michael等^[32]汇总了269个K-Ar定年数据(主要使用⁴⁰Ar-³⁹Ar技术), 样品来自Apollo 14、15、16、17号和Luna 20号采集的月球高地岩石, 同时还包括了来自23块月球陨石(代表月表21个不同区域)中高地岩屑的94个定年数据, 并利用撞击“翻耕”作用对月壤中不同时代撞击熔岩分布进行定量分析, 模拟显示, 若LHB确实发生, 应当在测得的年龄分布中产生一个显著的峰值, 然而事实上除了约3.87 Ga的峰值外, 还观察到多个次级峰值, 于是得出结论认为LHB假说与样品中的年龄数据并不一致。Liu等^[33]使用蒙特卡洛方法建立了撞击熔融物扩散模型, 追踪熔融物在水平方向和深度上的分布演化, 模型结果表明在Apollo和Luna采样地点能发现大量的雨海和危海盆地熔融物, 而更早形成的澄海盆地等熔融物则在其后经历了长期的翻耕扰动而在样品中保留较少, 该模型能定量解释月球样品中出现的约3.9 Ga的撞击熔岩主要来自雨海撞击。Hartmann^[34]除了提出月球样品中出现约3.9 Ga的年龄峰值是由于采样偏差引起的之外, 还指出这些具有相似年龄的样品中之所以成分有差别是因为雨海撞击的规模太大了, 源于不同位置的初始岩石成分是不同的, 另外这些样品的年龄之所以有稍微的偏差是因为雨海撞击溅射物厚度太大, 导致底部的撞击熔岩散热时间较长, 从而测得的年龄出现稍微改变。Marks等^[35]研究了Apollo样本中的岩屑角砾岩, 发现Apollo 16的岩屑角砾岩样本60016的平均年龄约为4.304 Ga, 而LHB模型认为月球在44亿~41亿年前撞击活动较少, 这显然是矛盾的。Hartmann和Morbidelli^[36]认为月球形成之后存在强烈的撞击轰击, 使月面达到撞击饱和甚至超饱和状态, 因此最早形成的多环撞击盆地及其溅射的熔融物被随后的撞击破坏殆尽, 导致在样品中早期的撞击熔岩较少, 因此早期持续但单调递减的撞击历史更能解释月球的地质记录和样品特征。基于对来自灶神星陨石的分析, Cartwright等^[37]发现灶神星经历的是一个持续而非集中爆发的撞击历史, 认为当前基于LHB假说构建的内太阳系撞击通量模型需要修正与完善。Joy等^[38]根据月球陨石样品提出月球南极艾肯盆地年龄定为4.33~4.32 Ga, 这显然与LHB假说是矛盾的, 后者认为所有月球盆地都是在约39亿年前的一个狭窄时间窗口内形成的。

可以看出, 针对LHB假说的理论基础, 目前已经有许多资料进行了针锋相对的反驳, 主要总结为: 1) Apollo与Luna探测任务返回的样品中出现约3.9 Ga撞击年龄的峰值代表了雨海撞击的年龄, 之所以出现这个峰值是因为月球早期撞击频率非常高, 早期形成的盆地与撞击熔岩快速被随后的撞击所侵蚀; 2) Apollo与Luna探测任务返回的约3.9 Ga年龄的样品成分的差异是由于源区物质的成分不同导致的, 而测量年龄的稍微偏差是雨海撞击熔岩被埋后散热较慢导致同位素体系发生改变的原因; 3) 尽管比较稀少, 但是更早的撞击年龄在样品中确实存在的。

2 LHB理论的动力学模型

虽然LHB假说自从提出以来就不断地遭受质疑, 但是在动力学领域还出现了一些模型试图解释

其成因机制,例如,Levison等^[39]提出了月球LHB是由于天王星和海王星的形成所触发的观点。但广为大众所知的动力学模型是由法国尼斯蓝色海岸天文台在2005年《自然》杂志发表的3篇论文提出的^[40-42],在之后的研究中通常称之为尼斯模型。这种模型的计算结果表明早期太阳系中巨行星的迁移及其共振效应可触发小行星突然大量涌入内太阳系^[41],而且在适当的条件下这个事件的时间可以是行星形成后7亿年,这与LHB模型约定的时间相一致。

然而Fassett和Minton^[43]指出尼斯模型中对行星迁移过程的处理过于简化,没有考虑巨行星迁移对类地行星轨道的影响,而且他们的模拟结果表明巨行星的轨道迁移将破坏类地行星的轨道稳定性,显著提高它们的轨道离心率,甚至导致类地行星间发生碰撞,另外巨行星的轨道迁移还将导致出现大量高倾角小行星,但观测中并未发现这一特征,这些证据都表明尼斯模型存在很多问题。Kaib和Chambers^[44]也得到了类似的结论,他们以尼斯模型中三个最可能的巨行星初始构型为初始条件,模拟类地行星轨道在巨行星轨道过程中的演化,发现在模拟结果中出现与当前行星轨道结构一致的概率不足1%,这意味着巨行星轨道的迁移事件可能发生在类地行星形成之前,因此它并不是月球LHB的诱因。还有一些研究对巨行星轨道迁移的时间进行了深入分析,例如Clement等^[45]以及Clement等^[46]对类地行星形成过程中发生的巨行星轨道不稳定事件开展了数值模拟,发现这一剧烈事件很可能发生在类地行星形成之后的1亿年内,此时得到的模拟结果与实际类地行星系统在多个统计特征上高度一致。Mojzsis等^[47]和Ribeiro等^[48]也得到类似的结论,其中Mojzsis等^[47]通过数值模拟发现巨行星在年轻太阳周围的原行星星云消散后发生了径向迁移,虽然还不能准确约束这一迁移的具体时间,但是如果发生在44.80亿年之前,那么模拟结果就会与来自多种陨石类别的放射性定年数据相一致;Ribeiro等^[48]则通过对太阳系外侧的早期动力演化建模,以自洽的方式限制巨行星经历的轨道不稳定事件最可能发生的时间,结果发现除非木星向内迁移超过10个天文单位,否则轨道不稳定肯定是在太阳系形成后1亿年内发生的,这些结果都与尼斯模型有不可调和的矛盾。

除了尼斯模型之外,还有其他动力学模型试图解释LHB的动力学过程。Chambers^[49]以及Chambers^[50]提出太阳系最初有5颗类地行星,即除了当前的4颗类地行星之外,在火星与小行星带内缘之间还有一颗称为“第五行星”的类地行星,在数亿年之后,由于受到其他行星引力的扰动,其轨道变得不稳定并被移除,而且在移除过程中穿越小行星带,导致大量小行星的轨道变得不稳定,从而显著增加进入内太阳系的小行星的通量,提高月球和类地行星的撞击率。可以看出这种模型与尼斯模型的共同点是LHB形成时小行星带的轨道受到了剧烈扰动。然而Hartmann^[34]指出,对小行星带的光谱观测表明小行星主带保留了一种粗略的带状结构,这些动力学模型需要解释如何在不破坏这种带状结构的情况下而使大量小行星的轨道受到扰动,或者提供某种机制能使小行星带在受到扰动之后重新建立这种带状结构。

3 月球撞击坑年代函数控制点

虽然Tera等^[1]根据样品的同位素年龄推测可能存在LHB,Ryder^[11]强烈支持存在LHB,而且对其他领域也产生了不小的影响,但是大多数针对LHB的研究往往是定性的描述,或者以示意图的形式表示在约39亿年前撞击通量突然增加,到目前为止还没见到对这种模型的一种定量表达。Michael等^[32]依据Neukum^[10]提出的撞击坑年代函数,推导出月球撞击频率随时间的变化规律,并在约39亿年增加异常撞击频率峰值,最后再用数值方法反推得到月球撞击坑年代函数,以便于和月球表面观测到的月球撞击坑频率相比较,这可能是对是否存在LHB模型进行第一次定量的评估。由此看出,月球撞击历史的研究与月球表面撞击坑年代函数的研究密不可分。Neukum^[10]提出的月球撞击坑年代函数目前仍在广泛应用,成为当前月球乃至火星表面定年的基础;根据该年代函数得到的月

球表面撞击率具有光滑指数函数的形式, 在3.9 Ga并没有出现异常。在建立年代函数时, Neukum^[10]用到的早于3.9 Ga的控制点包括月球高地、酒海盆地、笛卡尔建造以及雨海盆地(或者弗拉摩洛哥建造), 这些控制点都和不考虑LHB假说的模型吻合。之后, 利用新的遥感数据和样品的同位素数据, 月球的撞击坑年代函数也得到了更新^[51-55], 但是这些年代函数以及由此得到的月球撞击率函数都是连续且单调递减的, 与LHB模型是矛盾的。

那么既然这些年代函数都定量地否认了LHB的存在, 为何并不能彻底否定它呢? 这主要是因为建立月球撞击坑年代函数所依赖的早于3.9 Ga的控制点存在很大争议, 下面对这些争议进行了梳理:

1) 月球高地。Neukum^[10]将月球高地年龄定义为4.35 Ga, 而且对应的直径>1 km的撞击坑密度(即 $N(1)$)为 $[(3.6\pm 1.1)\times 10^{-1}] \text{ km}^{-2}$, 但是他并没有说明撞击坑统计区域的位置, 因而难以评估这个控制点的可靠性, 而且它也被后面大多数的研究所抛弃^[13,51,53,56,57]。Werner等^[52]提出用格里马尔迪(Grimaldi)盆地代表月球最古老的地质单元, 其年龄为 $(4.456\pm 0.040) \text{ Ga}$, 对应的 $N(1)$ 值为 $(2.74\times 10^{-1}) \text{ km}^{-2}$, 但是这个值的可靠性仍然值得怀疑, 尤其是没有提供 $N(1)$ 值的误差范围。

2) 酒海盆地。Apollo 16探测任务着陆在笛卡尔建造(Descartes Formation)地质单元上, 着陆点附近应该有酒海盆地的溅射物^[58], Neukum^[10]认为酒海溅射物在着陆点的厚度可达数百米, 并根据返回样品的同位素年龄峰值推测酒海盆地的年龄为 $(4.10\pm 0.10) \text{ Ga}$, Neukum和Ivanov^[59]也认为酒海盆地的年龄为4.1 Ga, 然而, Stöffler等^[60]提出酒海盆地的年龄是 $(3.85\pm 0.05) \text{ Ga}$, Wilhelms等^[61]给出的年龄是 $(3.92\pm 0.03) \text{ Ga}$ 。总体来看, 酒海盆地的年龄相当有争议, 所以难以用做建立月球撞击坑年代函数的控制点。

3) 笛卡尔建造。笛卡尔建造与酒海盆地的年龄在许多文献中常未被明确区分, Neukum^[10]将笛卡尔建造的年龄定为 $(3.90\pm 0.10) \text{ Ga}$, Stöffler和Ryder^[13]则给出了 $(3.92\pm 0.03) \text{ Ga}$ 的年龄。然而, Le Feuvre和Wieczorek^[51]提出笛卡尔建造并非来自酒海盆地的溅射物, 而是来自雨海盆地的溅射物, 年龄为3.85 Ga; Lagain等^[56]使用了 $(3.866\pm 0.009) \text{ Ga}$ 作为笛卡尔建造的年龄。Werner等^[52]指出目前无法为该地点确定一个校准年龄。

4) 雨海盆地。Apollo 14着陆点位于弗拉摩洛哥建造(Fra Mauro Formation)边缘, 该地层由雨海盆地的喷出沉积物构成; Apollo 14返回的样品包括多种撞击熔融角砾岩, 一般认为它们是雨海撞击事件产生的物质^[61,62]。Neukum^[10]将雨海盆地的年龄定为 $(3.91\pm 0.10) \text{ Ga}$, 而Stöffler和Ryder^[13]则提出弗拉摩洛哥建造或雨海盆地的年龄为 $(3.85\pm 0.02) \text{ Ga}$, 并被Marchi等^[54]、Le Feuvre和Wieczorek^[51]、Robbins^[53]、Lagain等^[56]所采纳; 然而, 基于磷灰石的U-Pb同位素系统, Nemchin等^[63]认为弗拉摩洛哥建造或雨海盆地的年龄为 $(3.926\pm 0.003) \text{ Ga}$ 。随后, Merle等^[64]通过对Apollo 14样本14311中钙磷酸盐的U-Pb分析, 认为雨海盆地的年龄为 $(3.938\pm 0.004) \text{ Ga}$; 最近, 通过关联来自不同Apollo着陆点的多种角砾岩与雨海撞击事件, Nemchin等^[62]提出雨海盆地的年龄为 $(3.922\pm 0.012) \text{ Ga}$, 这个年龄被本研究所采用。

雨海盆地对应的 $N(1)$ 值也有争议, 主要原因是各研究所选的撞击坑统计区域不同, 最大差异接近4倍。Iqbal等^[65]详细比较了这些结果, 并分析了它们之间存在差异的原因, 最后在选取撞击坑直径为1.4~3.0 km范围的条件下, Iqbal等^[65]利用Neukum^[10]的月球撞击坑产率函数得到的 $N(1)$ 值为 $[(3.82\pm 1.07)\times 10^{-2}] \text{ km}^{-2}$, 我们认为这个结果还比较可靠。

从上面的分析可以看出, 用于建立Neukum^[10]月球撞击坑产率函数的早于3.9 Ga的控制点仅有雨海盆地的年龄还比较可信, 因此具有确定源区的早于3.9 Ga的样品对于分析LHB是否存在就显得弥足珍贵了。

4 嫦娥六号样品与月球撞击率

嫦娥六号是人类历史上第一次从月球背面返回样品的探测任务，它于2024年5月3日在中国海南文昌发射中心成功发射，6月2日着陆于月球SPA盆地的阿波罗撞击坑内，6月25日携带1935.3 g月球样品返回地球^[66]。SPA盆地是月球表面最古老的撞击盆地，其形成时间是重建月球演化历史，尤其是分析月球早期撞击历史的关键节点^[67]。数值模拟结果显示SPA盆地形成过程中的撞击熔岩可以铺满整个盆地^[68,69]，并且厚度可达数十千米以至于能够发生分异^[70]，嫦娥六号虽然着陆于玄武岩地质单元上，但由于长期的撞击翻耕作用仍然有机会采集到SPA盆地的撞击熔岩，从而可能得到其形成年龄。

嫦娥六号样品中包含多种岩屑碎片，包括本地的月海玄武岩、角砾岩、熔结物、玻璃等，非玄武岩的碎屑为研究月球SPA盆地撞击熔体提供关键线索^[66]。Su等^[71]从5 g嫦娥六号样品中分析了约1600个>200 μm的岩石碎屑，这些碎屑中含有约5%的非月海岩石碎屑，它们以苏长岩为主(>80%)，多方面的证据表明这些苏长岩是从撞击熔岩中结晶形成的，包括：1) 撞击熔融过程导致挥发分丢失，这与这些苏长岩碎屑中的钙长石含量较高、橄榄石和辉石中的磷含量较低、陨硫铁含量较低一致；2) 含有类似陨石型Ni/Co比值的Fe-Ni金属，表明受撞击体成分污染；3) 出现残余矿物碎屑与典型的撞击熔融岩结构特征。对这些苏长岩碎屑的同位素年代学研究表明在(4.25±0.005) Ga经历了一次大规模撞击事件，这次撞击事件能够穿透月球的壳幔边界，使得部分上月幔物质出现在熔岩池中；另外，着陆区的遥感观测结果^[72,73]以及着陆在SPA盆地内部的嫦娥四号探测结果^[74]，都支持它代表了SPA盆地的年龄^[71]。另外值得指出的是，用于建立月球撞击坑年代模型的其他控制点也存在一些争议，为此我们仔细梳理了之前所有控制点的信息，并且评估了它们的可靠性，表1总结了到目前为止用于建立月球撞击坑年代函数所有可靠的控制点，关于这些控制点的详细信息可参考支撑材料。

根据表1中的控制点，利用最小二乘法得到的月球撞击坑年代函数如下：

$$N(1,t) = 3.885 \times 10^{-15}(e^{7.595t} - 1) + 7.377 \times 10^{-4}t \quad (1)$$

上式中的 t 表示控制点所在地质单元的年龄 (Ga)， $N(1,t)$ 表示该地质单元累计的直径>1 km的

表1 本研究中建立月球撞击坑年代函数用到的控制点

Table 1. Calibration points used in this research for establishing the chronological function of impact crater on the Moon

着陆区及探测任务	$N(1)/\text{km}^{-2}$	年龄/Ga
雨海盆地 (Apollo 14)	$(3.82 \pm 1.07) \times 10^{-2}$	3.922 ± 0.012
金牛-利特罗月海 (Apollo 17)	$(1.06 \pm 0.21) \times 10^{-2}$	3.752 ± 0.007
静海 (Apollo 11)	$(6.64 \pm 0.561) \times 10^{-3}$	3.578 ± 0.009
雨海 (Apollo 15)	$(2.23 \pm 0.12) \times 10^{-3}$	3.281 ± 0.012
风暴洋 (Apollo 12)	$(2.34 \pm 0.05) \times 10^{-3}$	3.242 ± 0.013
澄海 (Luna 16)	$(4.32 \pm 0.01) \times 10^{-3}$	3.382 ± 0.014
危海 (Luna 24)	$(2.54 \pm 0.08) \times 10^{-3}$	3.328 ± 0.021
哥白尼撞击坑 (Apollo 12)	$(6.68 \pm 0.048) \times 10^{-4}$	0.80 ± 0.015
第谷撞击坑 (Apollo 17)	$(7.12 \pm 0.063) \times 10^{-5}$	0.109 ± 0.004
North Ray 撞击坑 (Apollo 16)	$(3.90 \pm 0.043) \times 10^{-5}$	0.0503 ± 0.0008
Cone 撞击坑 (Apollo 14)	$(2.1 \pm 0.5) \times 10^{-5}$	0.0260 ± 0.0008
北风暴洋月海 (嫦娥五号)	$(1.74 \pm 0.022) \times 10^{-3}$	2.030 ± 0.004
阿波罗坑内玄武岩 (嫦娥六号)	$(2.08 \pm 0.13) \times 10^{-3}$	2.807 ± 0.003
SPA 盆地 (嫦娥六号)	$(3.69 \pm 0.48) \times 10^{-1}$	4.250 ± 0.005

注：控制点区域相关信息见附件1。

撞击坑密度。对 t 求导, 就可得到月球表面的撞击率函数 $\phi(1, t)$:

$$\phi(1, t) = 2.951 \times 10^{-14} e^{7.595t} + 7.377 \times 10^{-4} \quad (2)$$

图1a展示了月球撞击坑年代函数以及用到的控制点, 图中的月球撞击坑年代函数是一条光滑的曲线, 由此得到的撞击率函数在3.9 Ga也没有出现任何的波动 (图1b)。如果存在LHB, 那么它将对早于3.9 Ga的两个控制点, 即SPA盆地和雨海盆地都产生影响, 因为撞击坑年代函数表示的是地质单元上累计的撞击坑数量。

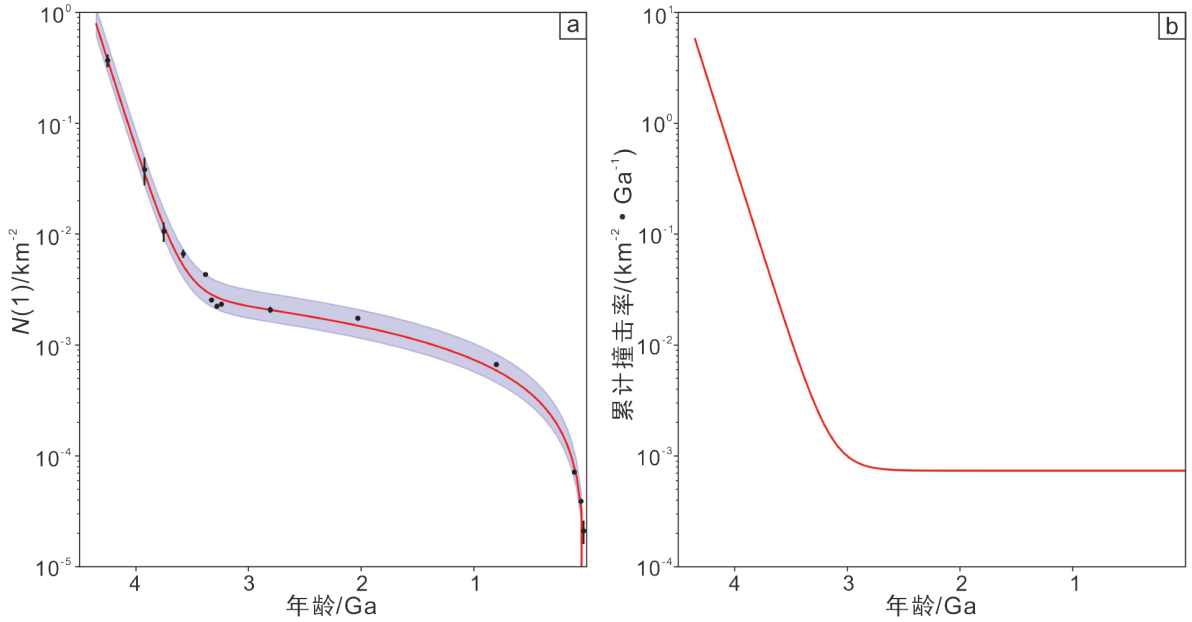


图1 月球样品控制点与拟合的撞击坑年代函数 (a) 及撞击率函数 (b)

Fig. 1. Calibration points and the fitted chronological function (a) and the impact frequency function (b) of the impact crater on the Moon

为了将LHB假说与上面的结果进行直接比较, 我们采用了Michael等^[32]所给出的定量模型, 如图2所示。因为Michael等^[32]是以直径>20 km的撞击坑分布密度显示的结果, 所以我们将前面得到的撞击坑产率函数从 $N(1, t)$ 缩放至 $N(20, t)$, 并将相应的控制点的撞击坑密度从 $N(1)$ 缩放至 $N(20)$ 。从图2中看到, 在39亿年前存在撞击通量陡增的LHB模型与雨海盆地和SPA盆地的控制点有较大偏差, 即如果存在LHB, 那么这两个控制点对应的撞击坑密度将数倍于观测到的结果。因此, 目前的观测数据表明月球形成之后撞击率较高, 但在之后的十亿多年内呈指数快速下降, 在39亿年前并没有LHB。

红色实线是根据本文方程(1)以及 $N(20)$ 与 $N(1)$ 之间关系所得到的年代学模型; 青色与黑色虚线表示根据Michael等^[32]提供的LHB模型所得到的结果, 它们分别表示不同强度的LHB假说。黑色点则表示来自Apollo和嫦娥六号样品的观测数据, 从老到新依次为SPA盆地、雨海盆地、金牛-利特罗月海及静海。

5 结论与展望

月球晚期重轰击假说起初只是对Apollo与Luna返回样品中集中出现3.9 Ga的一种可能性解释, 之后逐渐被认定为月球早期撞击历史的重要部分, 并随后尝试解释类地行星乃至太阳系的撞击历史, 而且对生命起源、类地行星宜居性演化等其他领域也产生了一定的影响, 同时出现了关于其成因机制的尼斯模型等动力学假说, 发展成一套理论体系。然而, 这种假说的理论基础是不牢固的, 而且到目前为止尚未见到一种准确的定量模型来描述该撞击峰值; 在样品中出现大量约3.9 Ga的撞

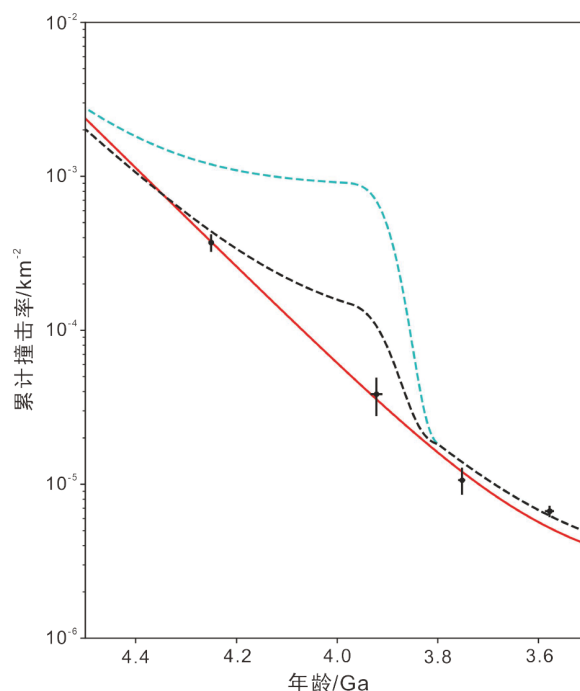


图2 本研究提出的年代学模型与LHB假说在累计撞击坑频率 $N(>20\text{ km})$ 方面的对比

Fig. 2. The comparison between the cumulative impact crater frequencies $N(>20\text{ km})$ of the chronological models proposed by this study and the LHB hypothesis

击熔岩的现象很可能是一种采样偏差，或者是月球早期撞击率极高、之后快速下降的自然结果。LHB假说没能从根本上被否定的原因在于以撞击盆地为代表的月球古老地质单元的年龄难以确定，虽然Apollo探测任务返回了少量较老的样品，但是它们对应的地质单元存在很大争议，因此我们希望在未来的月球探测任务中，能够返回更多具有明确地质单元的月球早期样品，这对于准确理解太阳系早期撞击历史具有重要的意义；为实现这种目标，我们建议在后期探测任务中针对撞击盆地等古老地质单元最好能够实行多地点采样，这样能够获取该地质单元的准确年龄。最近根据嫦娥六号任务返回的样品确定了SPA盆地的年龄为 $(4.250 \pm 0.005)\text{Ga}$ ，它必然记录了月球39亿年之前发生的撞击事件，而SPA盆地的撞击历史表明它与LHB假说是矛盾的，因此它直接动摇了LHB假说的基础，但这也正如Hartmann^[34]所讲的“科学的进步往往伴随着被广泛接受的假说的崩塌”，LHB假说的崩塌将为我们正确理解太阳系早期撞击历史奠定了基础。

附录

附件1 月球晚期重轰击假说的崩塌：来自嫦娥六号样品的证据支撑材料

附件信息参见“录用定稿”首发版附加材料

参考文献：

- [1] Tera F, Papanastassiou D A, Wasserburg G J. A Lunar Cataclysm at ~ 3.95 AE and the Structure of the Lunar Crust [A]. Lunar and Planetary Institute. Proceedings of the 4th Lunar Science Conference [C], Houston, Texas: Lunar and Planetary Institute, 1973:723.
- [2] Turner G, Cadogan P H, Yonge C J. Argon selenochronology [A]. Lunar and Planetary Institute. Proceedings of the 4th Lunar Science Conference [C], Houston, Texas: Lunar and Planetary Institute, 1973:1889.
- [3] Tera F, Papanastassiou D A, Wasserburg G J. Isotopic evidence for a terminal lunar cataclysm[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1974, 22(1): 1–21.
- [4] Tera F, Papanastassiou D A, Wasserburg G J. The Lunar Time Scale and A Summary of Isotopic Evidence For A Terminal Lunar Cataclysm [A].

- Lunar and Planetary Institute. Proceedings of the 5th Lunar Science Conference [C], Houston, Texas: Lunar and Planetary Institute, 1974:792.
- [5] Baldwin R B. Was there a “terminal lunar cataclysm” 3.9–4.0 $\times 10^9$ years ago?[J]. *Icarus*, 1974, 23(2): 157–166.
- [6] Hartmann W K. Lunar “cataclysm”: A misconception?[J]. *Icarus*, 1975, 24(2): 181–187.
- [7] Wetherill G W. Late heavy bombardment of the moon and terrestrial planets [A]. Lunar and Planetary Institute. Proceedings of the 6th Lunar Science Conference [C], Houston, Texas: Lunar and Planetary Institute, 1975:1539–61.
- [8] Wetherill G W. Evolution of the earth’s planetesimal swarm subsequent to the formation of the earth and moon [A]. Lunar and Planetary Institute. Proceedings of the 8th Lunar Science Conference [C], Houston, Texas: Lunar and Planetary Institute, 1977:1–16.
- [9] Turner G. The Early Chronology of the Moon: Evidence for the Early Collisional History of the Solar System [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1977, 285(1327): 97–103.
- [10] Neukum G. Meteorite bombardment and dating of planetary surfaces [D]; University of Munich, 1983.
- [11] Ryder G. Lunar samples, lunar accretion and the early bombardment of the Moon[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1990, 71(10): 313–323.
- [12] Cohen B A, Swindle T D, Kring D A. Support for the lunar cataclysm hypothesis from lunar meteorite impact melt ages[J]. *Science*, 2000, 290(5497): 1754–1756.
- [13] Stöffler D, Ryder G. Stratigraphy and isotope ages of lunar geologic units: Chronological standard for the inner solar system[J]. *Space Science Reviews*, 2001, 96(1): 9–54.
- [14] Norman M D, Duncan R A, Huard J J. Identifying impact events within the lunar cataclysm from ^{40}Ar – ^{39}Ar ages and compositions of Apollo 16 impact melt rocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(24): 6032–6049.
- [15] Niihara T, Beard S P, Swindle T D, et al. Evidence for multiple 4.0–3.7 Ga impact events within the Apollo 16 collection[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2019, 54(4): 675–698.
- [16] Bottke W F, Norman M D. The late heavy bombardment[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 619–647.
- [17] Ryder G. Mass flux in the ancient Earth-Moon system and benign implications for the origin of life on Earth[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2002, 107(E4): 6–1–6–13..
- [18] Kring D A, Cohen B A. Cataclysmic bombardment throughout the inner solar system 3.9–4.0 Ga[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2002, 107(E2): 4–1–4–6.
- [19] Charnoz S, Morbidelli A, Dones L, et al. Did Saturn’s rings form during the late heavy bombardment?[J]. *Icarus*, 2009, 199(2): 413–428.
- [20] Fritz J, Bitsch B, Kürt E, et al. Earth-like habitats in planetary systems[J]. *Planetary and Space Science*, 2014, 98: 254–267.
- [21] Shibaike Y, Sasaki T, Ida S. Excavation and melting of the Hadean continental crust by Late Heavy Bombardment[J]. *Icarus*, 2016, 266: 189–203.
- [22] Strom R G, Marchi S, Malhotra R. Ceres and the terrestrial planets impact cratering record[J]. *Icarus*, 2018, 302: 104–108.
- [23] Haskin L A, Korotev R L, Rockow K M, et al. The case for an Imbrium origin of the Apollo thorium-rich impact-melt breccias[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 1998, 33(5): 959–975.
- [24] Hartmann W K. Megaregolith evolution and cratering cataclysm models—Lunar cataclysm as a misconception (28 years later)[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2003, 38(4): 579–593.
- [25] Chapman C R, Cohen B A, Grinspoon D H. What are the real constraints on the existence and magnitude of the late heavy bombardment?[J]. *Icarus*, 2007, 189(1): 233–245.
- [26] Hartmann W K, Quantin C, Mangold N. Possible long-term decline in impact rates[J]. *Icarus*, 2007, 186(1): 11–23.
- [27] Grange M L, Nemchin A A, Pidgeon R T, et al. Thermal history recorded by the Apollo 17 impact melt breccia 73217[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(10): 3093–3107.
- [28] Morbidelli A, Marchi S, Bottke W F, et al. A sawtooth-like timeline for the first billion years of lunar bombardment[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 355/356: 144–151.
- [29] Hopkins M D, Mojzsis S J. A protracted timeline for lunar bombardment from mineral chemistry, Ti thermometry and U–Pb geochronology of Apollo 14 melt breccia zircons[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2015, 169(3): 30.
- [30] Kamata S, Sugita S, Abe Y, et al. The relative timing of Lunar Magma Ocean solidification and the Late Heavy Bombardment inferred from highly degraded impact basin structures[J]. *Icarus*, 2015, 250: 492–503.
- [31] Boehnke P, Harrison T M. Illusory late heavy bombardments[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(39): 10802–10806.
- [32] Michael G, Basilevsky A, Neukum G. On the history of the early meteoritic bombardment of the Moon: Was there a terminal lunar cataclysm?[J]. *Icarus*, 2018, 302: 80–103.
- [33] Liu T T, Michael G, Engelmann J, et al. Regolith mixing by impacts: Lateral diffusion of basin melt[J]. *Icarus*, 2019, 321: 691–704.
- [34] Hartmann W K. History of the terminal cataclysm paradigm: Epistemology of a planetary bombardment that never (?) happened[J]. *Geosciences*, 2019, 9(7): 285.
- [35] Marks N E, Borg L E, Shearer C K, et al. Geochronology of an Apollo 16 clast provides evidence for a basin-forming impact 4.3 billion years ago[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2019, 124(10): 2465–2481.
- [36] Hartmann W K, Morbidelli A. Effects of early intense bombardment on megaregolith evolution and on lunar (and planetary) surface samples[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2020, 55(11): 2472–2492.

- [37] Cartwright J A, Hodges K V, Wadhwa M. Evidence against a late heavy bombardment event on vesta[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 590: 117576.
- [38] Joy K H, Wang N, Snape J F, et al. Evidence of a 4.33 billion year age for the Moon's South Pole-Aitken basin[J]. *Nature Astronomy*, 2025, 9(1): 55–65.
- [39] Levison H. Could the lunar "late heavy bombardment" have been triggered by the formation of Uranus and Neptune?[J]. *Icarus*, 2001, 151(2): 286–306.
- [40] Morbidelli A, Levison H F, Tsiganis K, et al. Chaotic capture of Jupiter's Trojan asteroids in the early Solar System[J]. *Nature*, 2005, 435(7041): 462–465.
- [41] Gomes R, Levison H F, Tsiganis K, et al. Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets[J]. *Nature*, 2005, 435(7041): 466–469.
- [42] Tsiganis K, Gomes R, Morbidelli A, et al. Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System[J]. *Nature*, 2005, 435(7041): 459–461.
- [43] Fassett C I, Minton D A. Impact bombardment of the terrestrial planets and the early history of the Solar System[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(7): 520–524.
- [44] Kaib N A, Chambers J E. The fragility of the terrestrial planets during a giant-planet instability[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 455(4): 3561–3569.
- [45] Clement M S, Kaib N A, Raymond S N, et al. Mars' growth stunted by an early giant planet instability[J]. *Icarus*, 2018, 311: 340–356.
- [46] Clement M S, Deienno R, Izidoro A. Rethinking the role of the giant planet instability in terrestrial planet formation models[J]. *Icarus*, 2023, 389: 115260.
- [47] Mojzsis S J, Brasser R, Kelly N M, et al. Onset of giant planet migration before 4480 million years ago[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 881(1): 44.
- [48] De Sousa Ribeiro R, Morbidelli A, Raymond S N, et al. Dynamical evidence for an early giant planet instability[J]. *Icarus*, 2020, 339: 113605.
- [49] Chambers J E. A new dynamical model for the lunar late heavy bombardment [A]. *Lunar and Planetary Institute. Proceedings of the 33rd Lunar and Planetary Science Conference [C], Houston, Texas: Lunar and Planetary Institute, 2002:1093.*
- [50] Chambers J. On the stability of a planet between Mars and the asteroid belt: Implications for the Planet V hypothesis[J]. *Icarus*, 2007, 189(2): 386–400.
- [51] Le Feuvre M, Wieczorek M A. Nonuniform cratering of the Moon and a revised crater chronology of the inner Solar System[J]. *Icarus*, 2011, 214(1): 1–20.
- [52] Werner S C, Bultel B, Rolf T. Review and revision of the lunar cratering chronology—Lunar timescale part 2[J]. *The Planetary Science Journal*, 2023, 4(8): 147.
- [53] Robbins S J. New crater calibrations for the lunar crater-age chronology[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 403: 188–198.
- [54] Marchi S, Mottola S, Cremonese G, et al. A new chronology for the Moon and mercury[J]. *The Astronomical Journal*, 2009, 137(6): 4936.
- [55] Yue Z Y, Di K C, Wan W H, et al. Updated lunar cratering chronology model with the radiometric age of Chang'e-5 samples[J]. *Nature Astronomy*, 2022, 6(5): 541–545.
- [56] Lagain A, Devillepoix H A R, Vernazza P, et al. Recalibration of the lunar chronology due to spatial cratering-rate variability[J]. *Icarus*, 2024, 411: 115956.
- [57] Norman M D. The lunar cataclysm: Reality or "mythconception"?[J]. *Elements*, 2009, 5(1): 23–28.
- [58] Head J W. Stratigraphy of the Descartes region (Apollo 16): Implications for the origin of samples[J]. *The Moon*, 1974, 11(1): 77–99.
- [59] Neukum G, Ivanov B A. Crater size distributions and impact probabilities on earth from lunar, terrestrial-planet, and asteroid cratering data[M]// *Hazards Due to Comets and Asteroids*. University of Arizona Press, 2021: 359–416.
- [60] Stöffler D, Bischoff A, Borchardt R, et al. Composition and evolution of the lunar crust in the Descartes Highlands, Apollo 16[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1985, 90(S02): C449–C506.
- [61] Wilhelms D E, McCauley J F, Trask N J. The geologic history of the Moon [R], 1987.
- [62] Nemchin A A, Long T, Jolliff B L, et al. Ages of lunar impact breccias: Limits for timing of the Imbrium impact[J]. *Geochemistry*, 2021, 81(1): 125683.
- [63] Nemchin A A, Pidgeon R T, Healy D, et al. The comparative behavior of apatite-zircon U–Pb systems in Apollo 14 breccias: Implications for the thermal history of the Fra Mauro Formation[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2009, 44(11): 1717–1734.
- [64] Merle R E, Nemchin A A, Grange M L, et al. High resolution U–Pb ages of Ca-phosphates in Apollo 14 breccias: Implications for the age of the Imbrium impact[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2014, 49(12): 2241–2251.
- [65] Iqbal W, Hiesinger H, Borisov D, et al. Geological mapping and chronology of lunar landing sites: Apollo 14[J]. *Icarus*, 2023, 406: 115732.
- [66] Li C L, Hu H, Yang M-F, et al. Nature of the lunar far-side samples returned by the Chang'E-6 mission[J]. *National Science Review*, 2024, 11(11): nwae328.
- [67] 邱凯昌, 肖智勇, 林杨挺, 等. 月球南极—艾特肯盆地的形成与早期撞击历史 [J]. *中国科学基金*, 2022, 36(6): 880–7.
- [68] Potter R W K, Collins G S, Kiefer W S, et al. Constraining the size of the South Pole-Aitken basin impact[J]. *Icarus*, 2012, 220(2): 730–743.
- [69] Citron R I, Smith D E, Stewart S T, et al. The south pole-aitken basin: Constraints on impact excavation, melt, and ejecta[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51(14): e2024GL110034.
- [70] Vaughan W M, Head J W. Impact melt differentiation in the South Pole-Aitken basin: Some observations and speculations[J]. *Planetary and Space Science*, 2014, 91: 101–106.
- [71] Su B, Chen Y, Wang Z L, et al. South Pole-Aitken massive impact 4.25 billion years ago revealed by Chang'e-6 samples[J]. *National Science Review*, 2025, 12(6): nwaf103.
- [72] Yue Z Y, Gou S, Sun S J, et al. Geological context of the Chang'e-6 landing area and implications for sample analysis[J]. *The Innovation*, 2024, 5(5): 100663.
- [73] Jia Z Y, Chen J, Kong J Q, et al. Geologic context of Chang'e-6 candidate landing regions and potential non-mare materials in the returned samples[J]. *Icarus*, 2024, 416: 116107.
- [74] Lin H L, He Z P, Yang W, et al. Olivine-norite rock detected by the lunar rover Yutu-2 likely crystallized from the SPA-impact melt pool[J]. *National Science Review*, 2020, 7(5): 913–920.