

# 月球的撞击历史及其对月表物质的改造

肖智勇<sup>1</sup>, 岳宗玉<sup>2</sup>, 谢明刚<sup>3</sup>, 丁春雨<sup>4</sup>, 杨晶<sup>5</sup>, 邸凯昌<sup>6</sup>, 胡森<sup>2</sup>, 林杨挺<sup>2</sup>

1. 中山大学 广东 珠海 519000; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所 北京 100029;  
3. 桂林理工大学 广西 桂林 541006; 4. 深圳大学 广东 深圳 518060;  
5. 中国科学院 地球化学研究所 贵阳 550081; 6. 中国科学院 空天信息创新研究院 北京 100094

**摘要:** 外来天体物质的高速撞击作用贯穿了月球形成和演化的全部历史。撞击作用是塑造月球全球地貌、改造月表物质的物理化学特征、影响月球多圈层演化的重要地质营力。月球上的撞击过程、撞击历史及其对月表物质的改造, 一直是月球科学研究的重要内容, 也是月球探测的重点研究对象。本文综述了近十年来国内、外在月球的撞击过程、撞击历史和撞击改造浅表层物质研究中的重要进展, 重点介绍了基于我国嫦娥探月工程获取的科学数据的相关研究成果, 展望了该研究的发展方向, 并对未来探测的重要观测目标提出了建议。

**关键词:** 月球; 高速撞击; 撞击坑; 月壤; 撞击熔融; 高压相变

中图分类号: P691; P184 文章编号: 1007-2802(2023)03-0462-16 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2023.42.051

## Impact history of the Moon and its modification of lunar surface materials

XIAO Zhi-yong<sup>1</sup>, YUE Zong-yu<sup>2</sup>, XIE Ming-gang<sup>3</sup>, DING Chun-yu<sup>4</sup>, YANG Jing<sup>5</sup>,  
DI Kai-chang<sup>6</sup>, HU Sen<sup>2</sup>, LIN Yang-ting<sup>2</sup>

1. Sun Yat-sen University, Zhuhai, Guangdong 519000, China;  
2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;  
3. Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China;  
4. Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;  
5. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;  
6. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

**Abstract:** The high-speed impacts by celestial materials occurred throughout the full history of formation and evolution of the Moon. Impact cratering has been the dominating force in shaping the surface topography, modifying the physical and chemical characteristics of surface materials, and affecting various evolutionary aspects of the Moon. The process and history of impact cratering and its modification of lunar surface materials on the Moon have always been important research topics of the lunar science, and also the key scientific objects of all previous lunar explorations. In this work, we briefly summarized and reviewed some interesting and important advances in researches of impact processes and impact history on the Moon and shallow surface materials modified by the impact in the past ten years, particularly provided an overview of relevant research achievements based on the scientific data obtained by the Chang'E lunar exploration project, made prospects on future research directions of the lunar science, and proposed some suggestions on future exploring important observation targets and personal recommendations for the future development of disciplines of planetary science in China.

**Key words:** Moon; the high-speed impact; impact craters; lunar regolith; impact melting; high-pressure phase transformation

收稿编号: 2023-052 2023-3-8 收到 2023-3-21 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42241108, 42273040, 1217301, 42004099)

第一作者及通信作者简介: 肖智勇(1986—), 博士, 教授, 研究方向: 内太阳系撞击过程和撞击历史. E-mail: xiaozhiyong@mail.sysu.edu.cn.

## 0 引言

在太阳系的形成和演化过程中,发生在天体表面的撞击作用是最重要的地质过程之一。撞击过程伴随着的温度、压力和应变速率都比其他地质过程高出多个数量级。在强烈溅射和混合作用下,形成了广泛分布的撞击产物,如气化物、熔融物、角砾岩、冲击变质和变形等特征(Melosh, 1989)。撞击过程虽然转瞬即逝,但撞击体向天体各圈层注入的能量,足以改变其表面和内部的物质状态,进而对天体演化产生长远的影响(Johnson et al., 2022)。

月球是地球唯一的天然卫星,也是人类走向深空的前哨站。月球表面遍布着大大小小的撞击坑。持续的撞击作用导致月壳高度破碎,影响其内部的热向外扩散的效率(Rasmussen and Warren, 1985; Zhang et al., 2013);撞击作用挖掘了深部月壳甚至月幔的物质(Zhang et al., 2022),改变其物理和化学性质(Melosh et al., 2017),并最终与浅层月壳的物质混合,形成了物源复杂的碎屑物(Wiggins et al., 2022)。在撞击作用下,月球岩石被反复破碎、翻转并接受太阳风的改造,因此每一寸月表几乎都满布着由细粒的碎屑物组成的月壤(regolith; McKay et al., 1991)。多种波段的月球探测已充分证明月壤厚度普遍大于1 m,超过了绝大部分月球遥感探测使用的电磁波的穿透深度(Shkuratov and Bondarenko, 2001; Fa and Wieczorek, 2012),已有的月球采样返回任务所获取的样品均来源于月壤层的一部分(Stöffler and Ryder, 2001)。因此,月壤是大部分月球遥感探测的实际观测对象,撞击在月壤形成过程中的具体贡献是月球科学研究的关键问题之一。我国的嫦娥三号、四号和五号探测任务,实现了人类月球和深空探测历史上的多项首次突破。例如,我国首次在着陆器和月球车上搭载探月雷达(Fang et al., 2014),精细地约束了嫦娥三号着陆区(Xiao et al., 2015; Fa et al., 2015; Zhang et al., 2015)、嫦娥四号着陆区(Lai et al., 2020; Li et al., 2020; Zhang et al., 2021b)和嫦娥五号着陆区(Su et al., 2022; Li et al., 2022b)不同深度的月球浅表层物质的物理、化学性质和内部结构,拓展了研究月壤形成和演化的观测维度。

撞击坑是记录天体表面撞击历史的印记,撞击坑的空间密度与对应地质单元的暴露时间相关。已有研究表明,内太阳系天体可能经历了相似来源

的撞击,撞击历史与太阳系天体的轨道动力演化息息相关。月球表面的风化速度极低,而且暴露了不同形成时代的物质(Wilhelms et al., 1987)。因此,在所有类地天体中,月球最完整地记录了内太阳系的撞击历史(Neukum et al., 2001)。月球是唯一开展过着陆采样的类地天体,基于美国的阿波罗(Apollo)任务和前苏联的月球号(Luna)任务返回的样品,前人将样品的同位素年龄和采样地质单元内的撞击坑空间分布联系起来,建立了撞击坑的空间密度与表面形成时间之间的经验方程(crater chronology function),或称撞击坑年代函数(Neukum, 1983)。利用该方程,可对无样品约束的其他月面地质单元开展撞击坑统计,使用观测的撞击坑密度估算相应地质单元的模式年龄,该方法被称为撞击坑统计定年方法(Neukum et al., 2001)。参考内太阳系不同天体的撞击频率和成坑的差异,该方法已从月球拓展至水星、金星、火星、主带小行星甚至柯伊伯带天体,用于估算星体的撞击历史、表面地质单元的相对和绝对年龄(Michael and Neukum, 2010)。撞击坑统计定年是行星地质研究中确定年龄的最主要工具,其基础是月面返回的样品所约束的撞击通量(Neukum et al., 2001)。已有研究发现,撞击坑统计定年方法的理论基础和技术细节上还存在大量的不确定性(Fassett and Minton, 2013; Fassett, 2016)。例如,内太阳系天体在约39亿年前的撞击频率更高,但是撞击盆地的形成频率是灾变式还是渐变式,一直存在着争议;Apollo和Luna任务返回的月表地质单元样品的形成时间主要为40~30亿年,缺乏大于40亿年或小于30亿年区域的标定性样品,因此超过50%的月球演化历史中的撞击通量是缺乏标定的(Stöffler and Ryder, 2001)。因此,修正撞击坑统计定年方法是完善太阳系撞击历史的重要研究内容,也是未来采样返回任务的重要科学目标。嫦娥五号采集了迄今为止最年轻的月海玄武岩样品(20亿年),填补了30~10亿年这一大段空白,为验证和改进月球年代函数提供了一颗珍贵的“金钉子”(Yue et al., 2022; Xie and Xiao, 2023)。

本文围绕月球的撞击过程、撞击历史及其对浅表层物质的改造研究,综述了近十年来国内外的研究进展,重点介绍了嫦娥探月工程的亮点研究成果,并针对相关研究领域存在的一些关键科学问题,指出了未来月球探测值得关注和努力的研究方向。

# 1 月球上的撞击过程

## 1.1 月球撞击构造的基本特征

月球撞击坑的典型形态特征为带有隆起坑缘的环形凹陷。不同直径、年龄和靶体物质中形成的撞击坑,具有丰富的形态和结构差异(图1)。根据撞击坑的直径范围和形态特征,一般可将月球撞击坑分为微坑(microcrater)、简单坑(simple crater)、复杂坑(complex craters)和撞击盆地(impact basin)四类(Melosh, 1989)。微坑的直径较小,一般需要借助电子显微镜在月壤颗粒表面观测(图1a)。典型的微坑内壁和坑缘附着有纹理光滑的熔融物(Neukum et al., 1970; Vedder, 1971; Melosh, 1989; Li et al., 2022a; Yan et al., 2022)。简单坑的形态与微坑类似,整体呈碗型,坑缘凸起(图1b)。在不同天体上,最大的简单撞击坑出现的直径与所在天体的重力常数呈倒数关系,在月球上约为15 km (Melosh, 1989)。简单撞击坑的底部填充了撞击过程中向下垮塌的碎屑物,其中裹挟了富含熔融物的透镜体(Melosh, 1989)。随着撞击坑直径的增大,其形态和结构特征更加复杂(图1c):由于熔融物的体积急剧增加,且大部分熔融物保存在撞击坑的内部,因此碗形的坑底被高温熔融物覆盖,逐渐变得平坦;同时,由于撞击坍塌作用加强,复杂撞击坑的坑缘-坑底的深度与直径的比值急剧降低,并在坑壁出现阶地状地貌。当撞击坑直径进一步增大时(在月球上撞击坑直径约为25 km),撞击坑的底部将出现中央隆起,形成中央峰(图1d),中央峰的高度一般低于撞击坑的坑缘;当撞击坑的直径进一步增大时(月球上约为140 km),中央峰将被中央峰环所取代(图1e)。在不同的类地天体上,具有中央峰到中央峰环的撞击坑的直径转换区间,与天体的表面重力加速度呈反比。亦即,在表面重力加速度更大的天体上,具有中央峰环的撞击坑更容易出现在较小直径的撞击坑中(Melosh, 1989)。此类坑的坑底相对平坦、发育中央峰和/或中央峰环,统称为复杂撞击坑。当撞击坑的直径再增大时,复杂撞击坑的形态和结构复杂度也进一步增大,形成了地势整体宽缓的撞击盆地(图1f)。典型的撞击盆地直径大于200 km,由多个环形地貌构成,其内环的两侧地形坡度不对称,面向坑中心的一侧较陡,另一侧则较缓,表明撞击盆地的峰环形成于盆地中心向下和向外垮塌,而不是类似于中央峰或中央峰环由坑底部物质向上隆起形成(Melosh et al., 2013)。与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、更多的熔融物和更严重的坍塌改造。使用LOLA激光测高仪获得的地形数据,在月球上共发现了60余处撞击盆地,而通过重力场数据发现的撞击盆地数可能多达280个(Featherstone et al., 2013; Neumann et al., 2015)。最近Liu等(2022)重新定义了盆地的识别标准,将盆地分为四类,并明确识别出81个撞击盆地。

## 1.2 高速撞击的物理过程

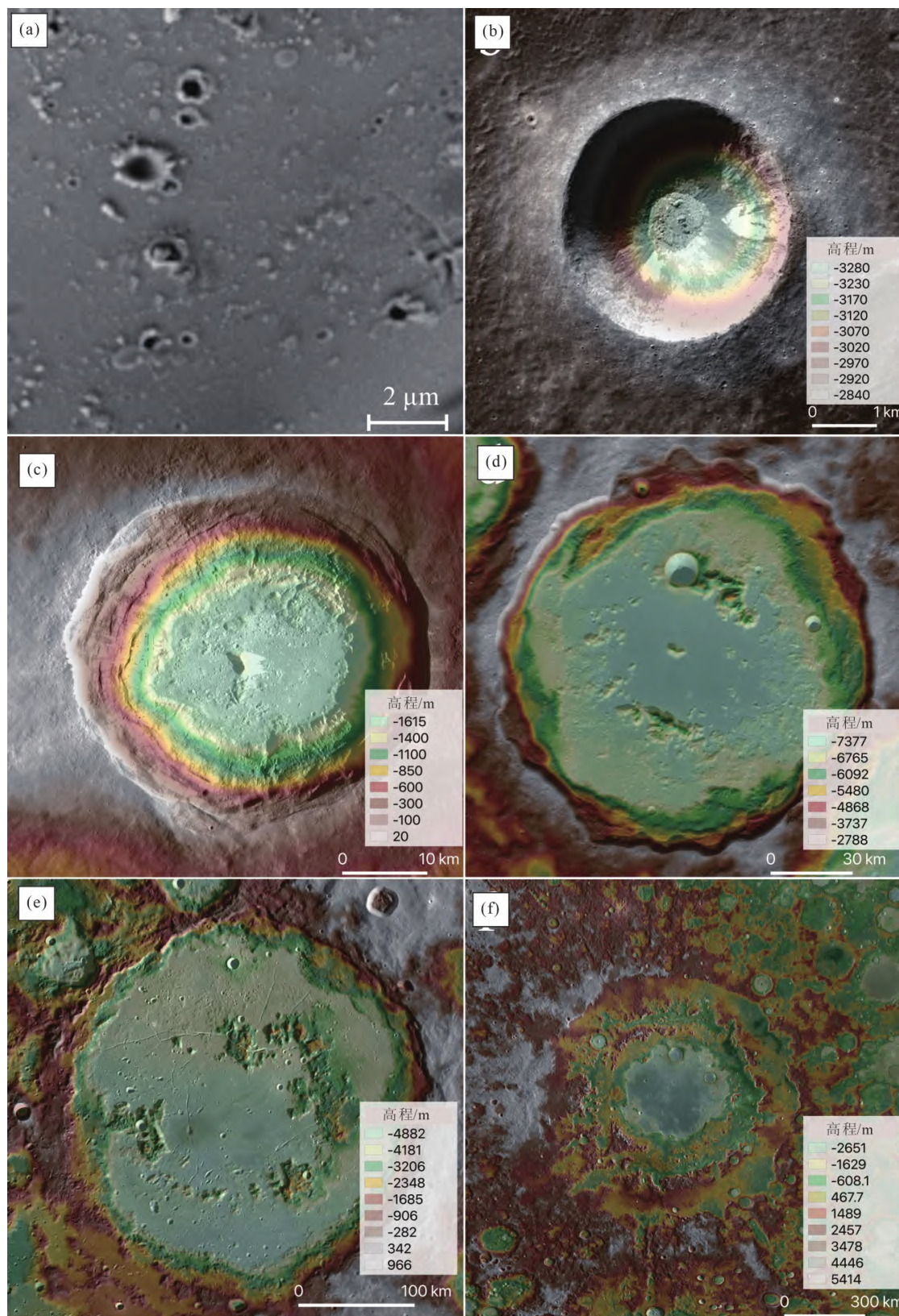
当小行星、彗星和星际尘埃超高速接触月球表面时,在极短的时间内,撞击引起的扰动以冲击波形式强烈挤压其传播前方的物质。冲击波迅速向撞击体的尾部和月球内部传播(图2a),其强度远超天体物质的强度,导致物质发生气化、液化、冲击变质和广泛破裂。当冲击波快速传播至撞击体尾部时,在自由面处则形成反向传播的稀疏波。稀疏波是张性波,其传播的载体是受到强烈压缩的撞击体和靶体物质,传播过程中将其卸载至近零压力的状态(Melosh, 1989)。冲击波和稀疏波先后加载在物质中,二者分别产生不同方向和速度的粒子运动,并共同作用最终形成撞击过程中的物质流线场。在这一过程中,撞击体和靶体的物质被挖掘溅射或推挤至深部,形成剖面形态近似碗形的挖掘腔(Melosh, 1989)。当挖掘腔的深度、直径或体积达到最大值时的结构则称为瞬时撞击坑(transient crater),顾名思义是过渡性存在的理论地物,会很快被后续过程所改造。在微坑形成过程中,瞬时坑形成后经历的改造程度较低,因此微坑的内壁一般较光滑。

在简单撞击坑的形成过程中,瞬时撞击坑的坑壁角度大于物质的休止角,处于重力不稳定状态,因此瞬时坑坑壁会立刻发生坍塌,坍塌的物质向下和向外滑落至坑内,形成坑底撞击角砾岩。

在复杂撞击坑的形成过程中,瞬时坑的深度更大,大部分参与撞击过程的物质被推挤至靶体深处,在坑底围岩中形成广泛分布的碎屑岩脉。在这一过程中,变形的靶体物质受强烈挤压后,在撞击挖掘的后期会发生大尺度的弹性反弹(Melosh and Ivanov, 1999),此时已高度破碎的靶体物质则可能经历高频振动,从而降低碎屑物之间的有效负载应力,摩擦减小,隆起物质的强度急剧减小,表现为极低黏度的运动学特性(Melosh, 1979)。因此,复杂撞击坑的形成过程中可发生快速的中央隆起。当靶体物质的振荡频率快速衰减至一定阈值时,中央隆起结束,最终形成中央峰或中央峰环(Melosh and Ivanov, 1999)。

撞击盆地形成时伴随的初始动能更大,因此更

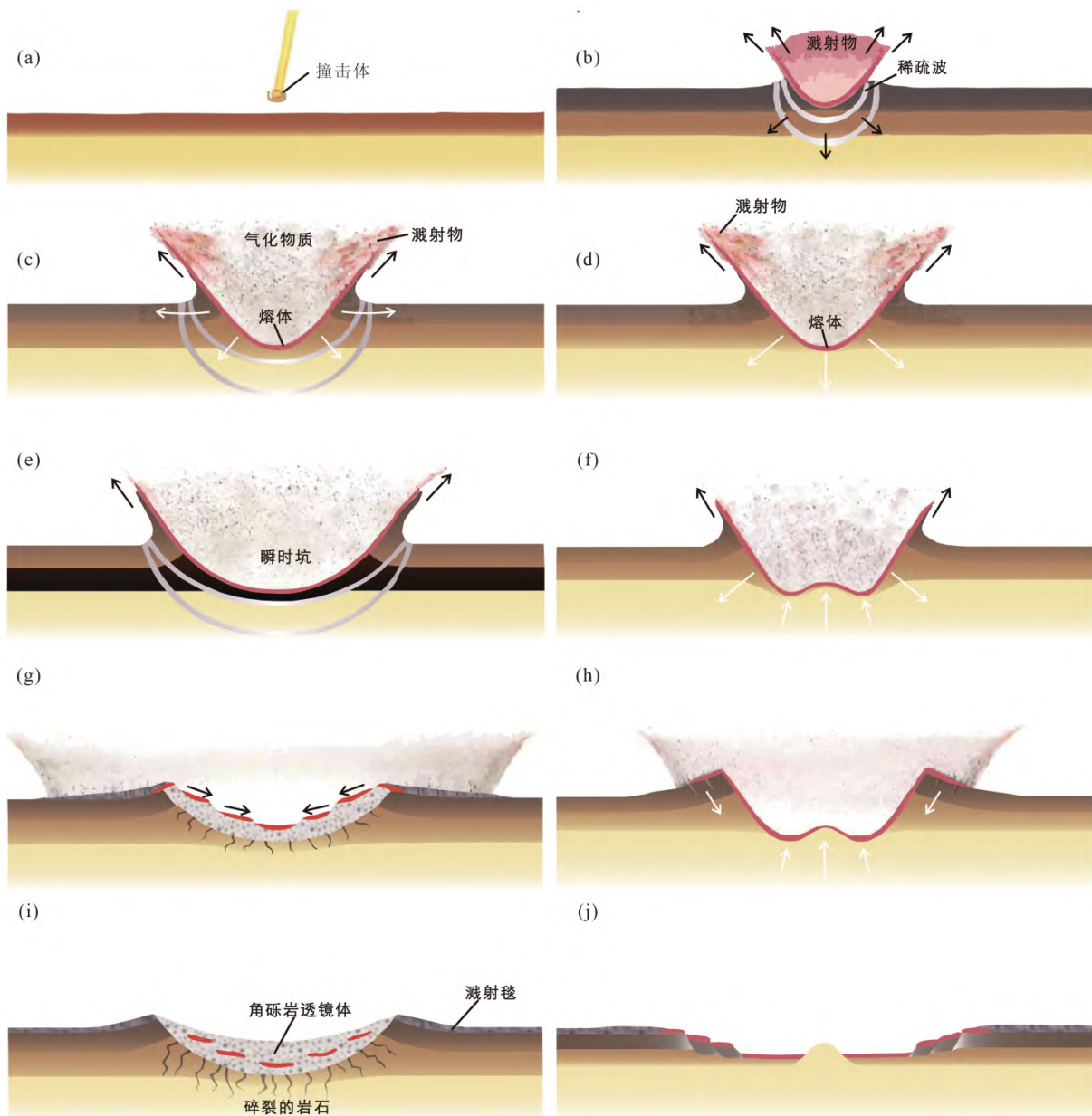




( a ) 嫦娥五号月壤颗粒表面撞击微坑 ( Yan et al. 2022 ) ; ( b ) 嫦娥四号着陆点西侧的织女撞击坑 其直径约为 3.8 km ( Xiao 2022 ) ; ( c ) 嫦娥五号采样点南侧的阿利斯塔克撞击坑 其直径约为 44 km ( Xiao 2022 ) ; ( d ) 嫦娥四号着陆点南侧的安东尼亚迪撞击坑 其直径约为 200 km ( Xiao 2022 ) ; ( e ) 月球南极的薛定谔撞击盆地 , 其直径约为 280 km ; ( f ) 月球东海盆地 其直径约为 970 km ( Xiao 2022 )

图 1 月球上不同直径撞击坑的形貌特征

Fig. 1 Morphological characteristics of different-sized impact craters on the Moon



据肖智勇(2021)。左侧为简单撞击坑、右侧为复杂撞击坑的形成过程。(a)(b) 撞击接触阶段;(c)(d) 撞击挖掘进行状态;(e)(f) 瞬时坑形成时的状态;(g)(h) 撞击坍塌进行状态;(i)(j) 最终撞击坑的形态和剖面结构

图2 月球上的撞击过程示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of impact cratering process on the Moon

多的靶体物质参与高速相变和形变过程,导致撞击过程中的中央隆起的幅度更大,隆起高度甚至可超过原始靶体表面的高程,之后陆续会发生多次坍塌和再次隆起,形成撞击盆地的多个环(Melosh et al., 2013; Johnson et al., 2016)。多环盆地的形成时间较早,彼时月球内部的热状态远比现在活跃,因此盆地形成时可驱动深部低粘度的软流层物质向坑中心移动,这一过程将在瞬时坑周围的岩体中产生较强的张应力,从而在瞬时坑的外部形成不对称的陡崖(Johnson et al., 2016)。

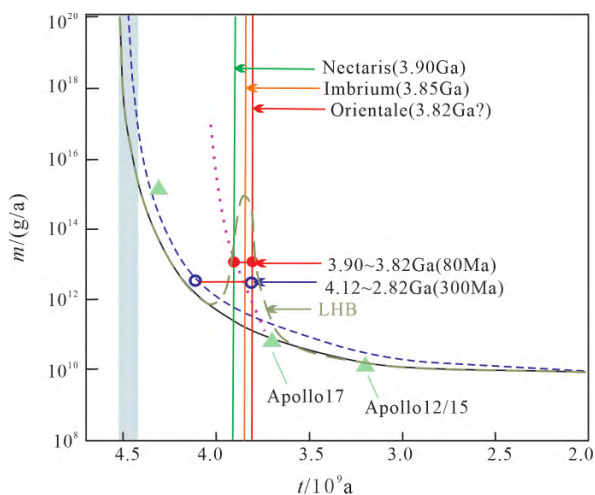
## 2 月球的撞击历史

### 2.1 38 亿年前的撞击历史

早期的遥感观测发现月球高地上的撞击坑密度远高于月海,直径大于 300 km 的撞击坑几乎都形成在月海之前(Hartmann, 1966)。月海的平均年龄在 36 亿年左右,代表了大于 3/4 的月球历史,因此月球在形成之初的 10 亿年内的撞击频率远比之后的高(Hartmann, 1970)。相似的撞击坑密度差别在火星的南部高地和北部平原、水星的严重撞击区和



平坦平原上也有发现( Strom et al. 2005, 2015)。使用撞击坑统计定年的方法,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( Orgel et al. 2018)。但是,任一坑群的模式年龄都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。因此,使用撞击坑统计定年方法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关系。假设月球高地的年龄为 43.6 亿年前,酒海盆地形成于约 41 亿年前,澄海盆地形成于约 39.8 亿年前,Neukum( 1983) 建立了适用于早期历史的年代学方程,该方程表明月球早期的撞击通量随时间快速衰减( 图 3 实线)。另外,前人尝试通过月球圈层分异后所吸积的撞击体的总质量( Ryder 2002)、高度亲铁性元素的丰度等地球化学信息,来约束早期的撞击历史( Bottke et al., 2012; Morbidelli et al. 2018)。



修改自 Koerber( 2003)。早期的撞击通量,尤其是晚期大轰击事件( Late Heavy Bombardment; LHB) 还存在大量争议,其中黑色实线和长虚线是经典的残余行星缓慢增生模型; 凸起的撞击通量模型是灾变式 LHB 示意模型。决定月球早期撞击通量的关键定标点是酒海( Nectaris)、雨海( Imbrium) 和东海( Orientale) 等撞击盆地的形成时间,但 Apollo 任务如 Apollo 15 和 17 号采集的样品普遍具有事件归属上多解的争议

图 3 月球在约 38 亿年前的撞击通量远比之后的大

Fig. 3 Impact fluxes on the Moon

Apollo 和 Luna 探测任务选取了一些能代表月球早期撞击历史的关键撞击盆地,采集了可能代表这些盆地形成的样品( Stöffler and Ryder 2001),而且这些样品的同位素年龄大多集中于 39 亿年前后( Tera et al. 1974)。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。一种解释认为撞击盆地密集地形成于大部分天体的圈层分异结束之后( 图 3),在 41~38 亿年前,故被称为晚期大轰击( late heavy bombardment, LHB; Bottke and Norman 2017)。其中,部分研究者认为月球上所有的撞击盆地都形成在约 41~38 亿年前,因此该时期的月球和其他内太阳系行星经历了一次灾难式的 LHB( lunar cataclysm; Tera et al. 1974)。

相比之下,月球陨石是撞击作用从月球表面随机溅射逃逸后降落到地球上的样品,大部分月球陨石的母坑远离人类在月球采样的地区,其中很多可能来自月球背面。对月球陨石的同位素年龄研究似乎发现了相似的盆地形成年龄,也即大型撞击事件均发生在~39 亿年前( Cohen et al. 2000)。然而,分析更多月球陨石的撞击年龄发现,大型撞击事件的时间并非集中在约 41~39 亿年间,在大于 39 亿年前至 25 亿年前均有存在。因此,早期的月球灾难撞击的假说受到广泛质疑( Hartmann, 2019; Norman 2019),并且一个无法排除的理论可能性是单次大型撞击事件足以形成覆盖全月的溅射物,而 Apollo 和 Luna 采集的大部分样品均可能是雨海盆地的溅射物。因此,早期报道的集中分布的撞击年龄,可能是同一撞击盆地的产物( Hartmann, 2019)。对月球样品的事件归属性的长期争论,是导致对早期撞击历史认识不足的重要原因。另外,基于遥感解译的撞击盆地的形成顺序以及基于样品分析的同位素年龄,均存在大量的多解性。研究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。因此,关于晚期大轰击事件的通量特点,也有观点认为 LHB 实际上并不存在,或其通量远比早期解译的低( Neukum et al. 2001; Morbidelli et al. 2018; Hartmann, 2019; Xie et al. 2021; Xie and Xiao 2023)。

为了解释晚期大轰击事件的撞击体来源,前人曾探讨过不同轨道动力学模型对小天体的输送效率,其中最著名的就是尼斯模型( NICE model)。该模型以蔚蓝色海岸天文台所在的法国城市尼斯命名,存在不同的分支版本( Gomes et al. 2005; Levison et al. 2009)。整体而言,尼斯模型认为在太阳系形成之后的首个 5 亿年内的某一时间段内,类木行星向内太阳系迁移,引力摄动导致小行星带或柯伊伯带

的天体在短时间内、大量射向内太阳系,成为早期的撞击体(Gomes et al., 2005)。但尼斯模型预测的基础假设是LHB发生的具体形式已知,因此巨行星的轨道迁移的细节主要依赖于模型参数(Chapman et al., 2007)。Strom等(2005)认为月球早期的撞击体来源于主小行星带,类木行星的晚期迁移是导致LHB灾变式形成的原因。然而,Nesvorný等(2017)通过轨道动力模拟,使用当前的主带小行星的观测数据定标其模型的初始状态,结果表明假设类木行星迁移发生在不同时间,主带小行星的撞击体数量不足以解释月球表面观测到的撞击记录。最近的动力学模拟更倾向于支持巨行星在更早期(>41亿年)发生迁移(Nesvorný et al., 2018; De Sousa Ribeiro et al., 2020)。假设月球早期的撞击通量呈缓慢衰减的趋势,Brasser等(2020)认为月球早期的撞击历史主要是小行星导致的,方能形成与Neukum的数据吻合的撞击通量。然而,Xie和Xiao(2023)考虑了撞击坑的非稀疏效应(Kneissl et al., 2016)对撞击体统计结果的影响,发现月球早期的撞击通量衰减要比之前估计的要快很多,因此支持巨行星早期迁移的模型,且Xie和Xiao(2023)预测的早期撞击体主要是残余星子,而非主带小行星。

## 2.2 38亿年以后的撞击历史

大量研究表明,月球早期的撞击通量在快速降低后,在大约36亿年前后达到近似稳定状态,且晚期的通量比之前低了几个数量级(Neukum, 1983; Neukum et al., 2001; Robbins, 2014; Yue et al., 2022; Xie and Xiao, 2023)。Robbins(2014)利用较新的遥感数据开展撞击坑统计工作,更新了月球的撞击年代方程,提出月球的撞击通量在过去~38亿年是缓慢减小的,而非恒定的。该观点与Hartmann(2019)和Quantin等(2007)的部分观点相似。然而,基于嫦娥五号样品年龄的研究,支持相对恒定的晚期撞击通量(Yue et al., 2022; Xie and Xiao, 2023)。Xie和Xiao(2023)系统更新了所有Apollo和Luna采样区的撞击坑统计结果,在更新年代学方程时,充分考虑了靶体性质、地形退化以及观测误差,所建立的撞击通量表明自~36亿年以来月球的撞击通量近似恒定,并发现与Robbins(2014)的观测结果的差异主要是由于后者未考虑地形退化因素。在过去三十多亿年,主带小行星的相互碰撞、小行星家族的新生和消亡达到近似稳态的状态(steady state; Bottke et al., 2015)。Yarkovsky-YORP效应是造成~36亿年的主带小行星转变为近地小行星的主要轨道驱动力,该效应对直径较小的天体更显著(Mor-

bidelli and Vokrouhlický, 2003; Strom et al., 2005; Bottke et al., 2006)。但是,从地质时间尺度上,Yarkovsky-YORP效应对所有直径段的小行星的输送效率都近似恒定。因此,过去~36亿年,月球和其他内太阳系行星的撞击通量近似恒定。

另一方面,在过去~36亿年以来,直径更小的撞击体的撞击通量可能发生过不同类型的转变。例如,Xie等(2021)通过观测不同年龄的月面单元上月壤的厚度,建立了月壤厚度与撞击历史的耦合模型,并通过分析发现在过去35亿年前后,百米直径以下的撞击体的大小-频率分布发生了转换,且斜率更陡,因此月壤生成的速率上升。另外,近期有研究者也发现,月球在~36亿年以来的撞击通量并非恒定,期间发生过多次显著的震荡。例如,近2.9亿年内,月球遭受的小天体撞击频率是之前的2.6倍,且该差异和地球上的撞击坑的形成年龄的分布特征相吻合(Mazrouei et al., 2019)。月壤中的撞击微玻璃球粒的同位素年龄存在多个聚集峰值,表明其可能形成于几次密集的撞击事件,也指示了非恒定的撞击频率(Zellner, 2019; Long et al., 2022)。地球上的观测数据也发现了撞击通量的变化。例如,大约4.66亿年前L型球粒陨石母体的碰撞破裂,可能是导致中奥陶纪石灰岩中L球粒物质增加两个数量级的原因(Schmitz, 2013)。造成撞击频率震荡的原因可能是主带小行星内的碰撞和碎裂,产生了大量碎片,并在较短的时间内撞向内太阳系天体。但是,小行星破碎造成的撞击通量改变只能是很短时间内的大幅增大通量,否则过去建立的年代学方程就不会呈线性的年龄-密度关系(变化幅度在1倍范围内)(Bottke et al., 2007; Xie and Xiao, 2023)。因此,小行星破碎对定年方法的整体影响较小(Williams et al., 2018)。

## 3 撞击改造月球浅表层物质的研究

### 3.1 撞击改造月表物质的矿物结构和成分

月球表面持续的撞击作用伴随着高温和高压的环境,导致原岩发生破碎、变形、熔融和汽化,其中存在丰富的矿物相变的现象(Langenhorst and Deutsch, 2012; Stöffler et al., 2018),形成丰富的撞击岩,如冲击玻璃和冲击熔融角砾。冲击过程形成的高压矿物能够限定岩石受冲击的温压条件(Gillet and Goresy, 2013)及反演撞击坑的大小(Pang et al., 2016),是撞击事件的重要记录者。对比同样遭受频繁而强烈撞击的火星和小行星等天体,月球样品中发现的高压矿物的种类和数量明显少于火星陨

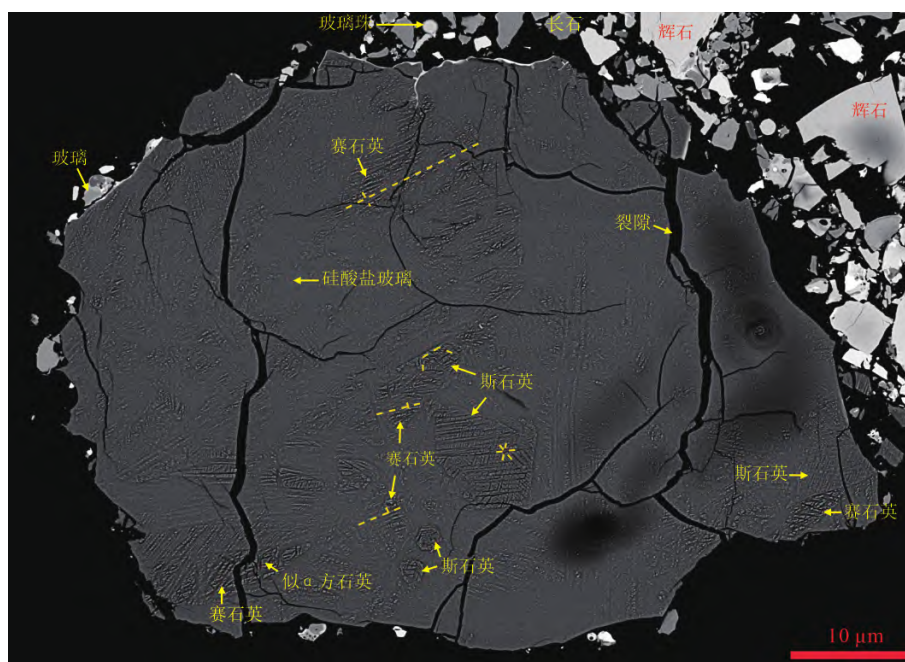
石和小行星陨石。迄今为止,在月球陨石中只观察到少量的橄榄石的高压相(林伍德石和瓦兹利石)(Barrat et al. 2005; Zhang et al. 2010)、二氧化硅的高压相(柯石英、斯石英和赛石英)(Ohtani et al., 2011; Miyahara et al., 2013; Zhang et al., 2021a)、锆石的高压相(雷锆石)(Xing et al., 2020)、钙硬玉(Zhang et al., 2021a),以及一种新的含钙铝的高压矿物 Donwilhelmsite ( $\text{CaAl}_4\text{Si}_2\text{O}_{11}$ ) (Fritz et al., 2020)。在月球返回样品中,仅在 Apollo 角砾岩(15299)中发现斯石英和疑似赛石英的二氧化硅相(Kaneko et al. 2015)。月球样品中极少量的高压矿物可能反映其与火星和小行星截然不同的撞击  $P$ - $T$ - $t$  历史,具有重要的研究意义。

最近,在嫦娥五号返回月壤样品中发现了二氧化硅的两种高压相——赛石英( $\alpha$ - $\text{PbO}_2$  结构)和斯石英(金红石型结构)(Pang et al., 2022)。在一颗近百微米的二氧化硅碎屑中观察到赛石英、斯石英、似  $\alpha$ -方石英与二氧化硅玻璃共生(图 4),其岩相、产状、晶体取向等特征指示赛石英和斯石英通过固-固相转变而形成固-固相变(图 4)。根据形成赛石英和斯石英的高温等压实验结果推测,该二氧化硅碎屑记录了一次月表撞击事件,峰值压力为 11~40 GPa。结合撞击模拟计算(Melosh, 1989)和二氧化硅高压相较差的热稳定性(Pang 等(2022)推测这颗二氧化硅碎屑可能来自 Aristarchus 撞击坑。

### 3.2 撞击改造月球的物理结构

撞击、火山和构造活动是形成和改造月球表面地貌的主要地质营力(Jaumann et al., 2012),其中撞击事件在改变月表地貌中起着主导作用。在月球形成的早期,在前酒海纪至酒海纪( $\sim 4.5 \sim 3.92$  Ga),月球表面遭受了太阳系早期形成的星子、小行星及彗星等外来物质的猛烈撞击,形成了大量的撞击盆地,构建了全球地貌格局和壳层浅部的整体结构。月球上的火山活动主要活跃在雨海纪至埃拉托逊纪之间( $\sim 3.8 \sim 3.2$  Ga),并持续到哥白尼纪( $\sim 1.0$  Ga; Qian et al., 2022),形成了覆盖月球表面  $\sim 17\%$  的月海玄武岩单元(Head, 1976)。哥白尼纪后,月球的内动力地质活动趋于结束(Hiesinger and Head III, 2006),撞击作用成为改造月球浅层物质的主要地质营力。

月壤的内部结构和厚度是约束撞击在成壤过程中的作用的基础信息。月壤内部结构和厚度观测的最直接的方法是钻孔岩心。美国的 Apollo 计划、前苏联 Luna 计划以及中国的嫦娥五号探测,均钻取了月壤样品。其中, Apollo 17 获得的月壤岩心,是迄今月表实际采样最深的钻孔,到达了月表之下  $\sim 3$  m (McKay et al., 1991),这为研究月壤内部的结构、物理特性参数特供了重要的原位观测资料。但是,迄今所有的钻孔岩心均未穿透月壤层达到基岩层,而且受限于钻孔岩心的直径(最大约



据 Pang 等(2022)。黄色虚线表示无定形二氧化硅片晶的主要出熔方向

图 4 嫦娥五号月壤样品中含赛石英(Sft)和斯石英(Sti)的二氧化硅碎屑的背散射电子图像

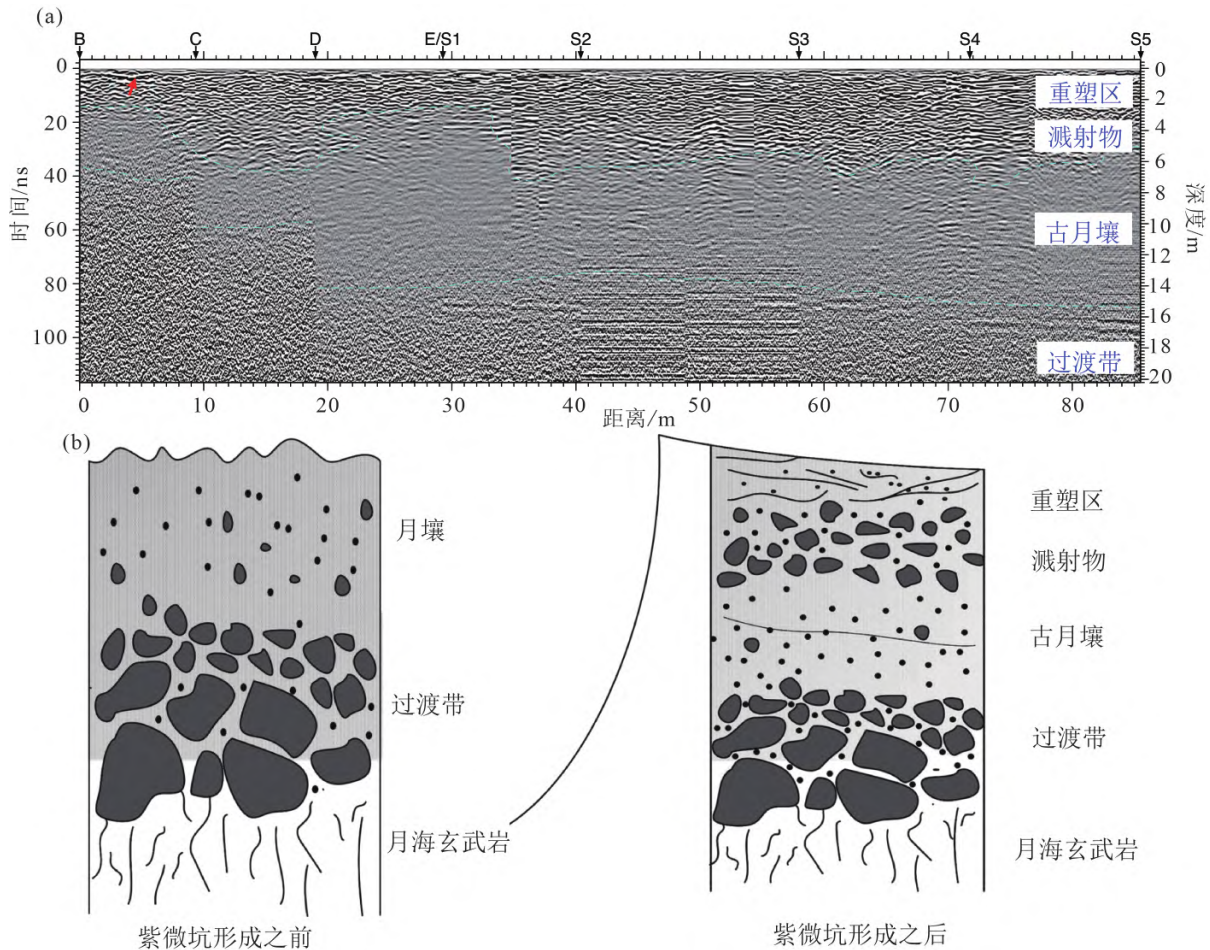
Fig. 4 SEM backscattered images of seifertite (Sft) and stishovite (Sti) in grains of the Chang' E-5 regolith sample



4 cm) 钻孔数据无法充分刻画月壤结构的侧向不均一性。相比之下,探地雷达在研究地下物质方面具有高效、高分辨率的优势,近年来已被应用于月球和火星探测。我国的嫦娥三号和四号探月任务开创性地在月球车上携带了探月雷达,分别部署于月球正面和背面,并成功测量了月球车行径路线以下的浅表层结构的长剖面(图4a),极大地增进了对撞击改造月壤的认识(Fang et al., 2014; Su et al., 2014; Fa et al., 2015; Xiao et al., 2015; Hu et al., 2019; Lai et al., 2019; Li et al., 2020; Xiao et al., 2021)。嫦娥五号月球探测任务也携带了类似的探月雷达载荷,也获得了大量的关于月球浅表层的观测数据和科学认识(Su et al., 2022)。

基于嫦娥三号、四号和五号获取的探月雷达数据,前人在月球成壤过程、月壤内部结构、撞击改造月球浅表层结构等研究方面均取得了大量新的认识。以往研究预测的月海玄武岩上的月壤厚度生

长速率约为 1.5 m/Ga(Taylor, 1982),而基于嫦娥三号和四号揭示的着陆区的月壤厚度的估算发现月壤的生成速率远大于此。嫦娥三号着陆在直径约为 450 m 的紫微撞击坑的连续溅射毯上(Xiao et al., 2015)。假设最终坑的直径约为瞬时坑的 1.3 倍,撞击理论计算推测紫微撞击坑的最大挖掘深度约为 35 m(Ding et al., 2020a)。在紫微撞击坑形成之前,该处的月壤厚度约为 8 m(Fa et al., 2014),因此紫微撞击坑击穿了月壤层,破碎并挖掘了更深的基岩物质。紫微撞击坑所挖掘出的溅射物覆盖在嫦娥三号着陆点(图 4b),溅射物的理论厚度约为 5 m(Qiao et al., 2016)。玉兔号搭载的高频雷达观测的表层~5 m 内的物质应该为紫微撞击坑的溅射物。模型预测在紫微撞击坑的溅射物中,月壤的含量占比为~23.11%,该理论预测与雷达反演的计算溅射物的介电常数为~3.2(表明溅射物是类似月壤的物质)不一致。这意味着月球上撞击坑的挖掘深



据 Fa 等(2015) 修改。(a) 嫦娥三号高频雷达图像;(b) 着陆区浅表层地质过程示意图

图 5 嫦娥三号搭载的探月雷达数据揭示的着陆区浅表层的月壤结构

Fig. 5 The structure, revealed by using data of the lunar penetrating radar onboard the Chang' E-3, of regolith on the shallow surface of the Moon in landing zone of the Yutu rover

度可能与理论预测的结果不符。另外,最近的遥感观测还发现,月球上的一些撞击事件的挖掘深度仅为之前认为的值的  $1/3 \sim 1/4$  (Sharpton, 2014),按该经验关系推算,紫微撞击坑的溅射物内的月壤含量约为  $69\% \sim 92\%$ ,该推断似乎更加与雷达观测的结果相一致(Ding et al., 2020)。

玉兔号搭载的高频探月雷达发现,嫦娥三号着陆区的月表下  $\sim 10$  m 内的物质结构可大致分为三层:第一层为细粒月壤层,厚度为  $\sim 0.74$  m;第二层为紫微撞击坑的溅射物,厚度为  $\sim 4$  m;第三层为古月壤层,厚度为  $\sim 5$  m (Xiao et al., 2015)。广义的月壤定义是月球基岩之上所有的覆盖物,而狭义的月壤定义为颗粒粒径小于  $\sim 1$  cm (欧阳自远, 2005)。按照狭义的定义,嫦娥三号得到的月壤厚度为  $\sim 0.74$  m,参考紫微撞击坑的模式年龄可估算月壤发育的速率为  $\sim 27.72$  m/Ga。若按照广义的月壤定义,嫦娥三号着陆区的总月壤厚度应为  $\sim 10$  m,上层的  $\sim 5$  m 为溅射物和细粒月壤,下层  $\sim 5$  m 为可能发育在埃拉托逊纪的玄武岩之上( $\sim 2.65$  Ga)的古月壤 (Xiao et al., 2015),因此月壤发育速率应为  $\sim 3.77$  m/Ga。上述结果都表明,从撞击溅射物中演化而来的月壤的对应生长速率远大于预期,原岩的属性(如,部分原岩已是细粒的古月壤)对月壤的生长速率影响很大。同时,由于嫦娥三号着陆区浅层内部结构受到紫微撞击坑的改造较大,其内部存在数量和尺寸未知的碎石,这增加了浅层物质的各向异性。而雷达电磁波对浅表层介质的各向异性较为敏感,在介质差异处发生散射和多次反射等现象,从而导致雷达回波高度复杂,甚至呈现出不连续的多层结构(Ding et al., 2020b)。

嫦娥四号着陆于月球背面的冯卡门撞击坑的底部(图 6a),地形数据显示其表面呈现明显的北东至南西的线性地貌(图 5b)。玉兔 2 号月球车搭载的高频探月雷达观测发现,着陆点表面以下  $\sim 40$  m 具有多层结构(图 6c):第一层为细粒月壤,厚度为  $\sim 12$  m;第二层为粗粒溅射物,厚度为  $\sim 12$  m;第三层为细粒物质与粗粒物质的交替层,厚度为  $\sim 16$  m。根据狭义月壤的定义,嫦娥四号着陆区月壤的发育在芬森撞击坑的溅射物之上(图 6a),而芬森撞击坑的年龄为  $\sim 2.0$  Ga (Chang et al., 2021),则此层月壤的生长速率为  $\sim 6$  m/Ga。而根据广义的月壤定义,位于冯卡门撞击坑底部玄武岩之上的  $\sim 40$  m 物质均为月壤。冯卡门底部的玄武岩形成于  $\sim 3.7$  Ga (Chang et al., 2021),随后又被形成于  $\sim 3.68$  Ga 的东海盆地的溅射物所覆盖 (Meyer et al., 2016; Xiao

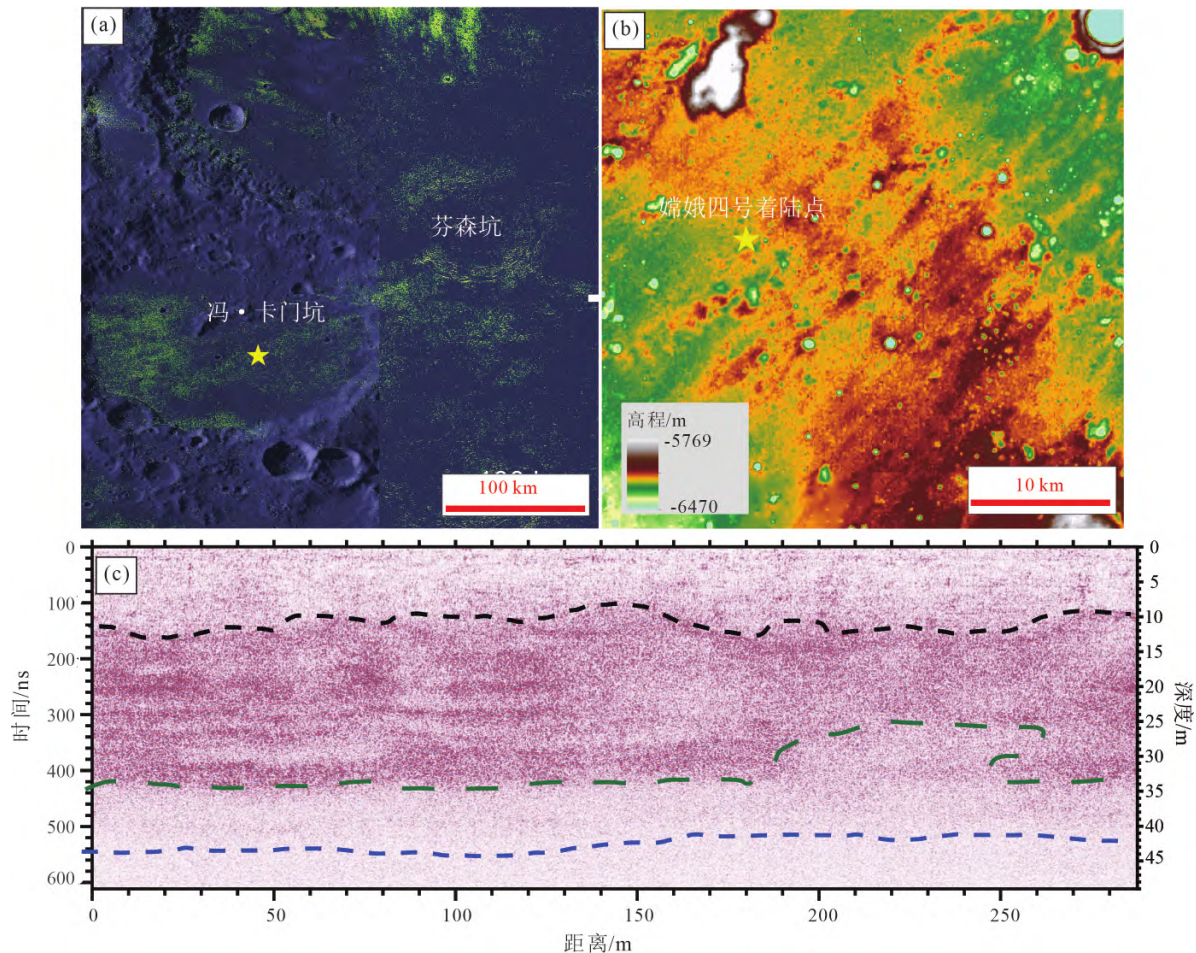
et al., 2021)。因此,嫦娥四号着陆点月壤的原岩物质并不仅仅是玄武岩,而主要是玄武岩之上的撞击溅射物。原岩属性的差异也是造成嫦娥三号和四号着陆区月壤生长速率显著差异更大的原因之一 (Xiao et al., 2021)。

嫦娥五号着陆器携带了新型的探月雷达,可获得等效长度近  $1$  m、深约  $\sim 2.5$  m 的月壤的内部结构剖面(图 7)。数据分析发现,嫦娥五号探月雷达获取的浅表层结构主要是月壤,内部存在大量的石块,但不存在明显的连续分层结构 (Su et al., 2022)。观测结果显示,月表下  $\sim 1$  m 深度内的物质主要是徐光启撞击坑的溅射物(图 7d),其内部包含碎石块堆(图 7e)。徐光启撞击坑的模式年龄( $\sim 400$  Ma; Qiao et al., 2021)与紫微撞击坑相似,但是嫦娥五号采样点位于比徐光启撞击坑更年轻的撞击坑的溅射物中(图 7d 中的 A 坑)。因此,嫦娥五号月壤的风化程度低于嫦娥三号着陆区的浅层  $\sim 1$  m 之内的月壤。

另外,探月雷达探测发现相同区域的月壤存在大量的结构不均一性。成熟的月壤物质经历了充分的混合,主要由极细粒的物质组成,因此理论上具有高度均一的物理化学性质。嫦娥四号着陆区的表面暴露时间较长,月壤的风化程度较高。但是,探月雷达数据分析发现,在嫦娥四号着陆区的成熟月壤中,普遍存在着物性的异质性 (Ding et al., 2021a; Zhou et al., 2022),特别是在高度疏松的表层月壤中,随处可见相对高密度的物质。通过联合分析玉兔二号搭载的全景相机获取的高分辨率影像数据及其衍生的地形产品,发现成熟月壤中相对高密度的物质主要是半露或全埋藏的“石块”以及小型撞击坑的坑底。基于电磁波传输的数值模拟研究发现,月球复杂的地形变化不是造成这些表层雷达回波中强反射信号的原因,看似为“石块”的物质实际上是撞击发生在成熟的疏松月壤中时,冲击压实或者熔融粘接,导致细粒月壤变得相对致密的原因 (Ding et al., 2021a)。另外,利用嫦娥四号探月雷达与数值模拟数据分析月表新鲜撞击坑块状溅射物的物理特性,发现形状类似岩块的物质实际上是低速撞击时,疏松的月壤物质发生孔隙闭合的结果,该发现意味着月壤随时间并非单调的朝着更疏松的结构演化,而是存在间歇性的密度降低事件 (Ding et al., 2020c)。

除此之外,撞击事件对月球次表层的改造也会形成一些特殊的地质特征。比如,基于高频雷达数据,在嫦娥三号着陆区月表之下  $2$  m 深度发现了一





(a) 嫦娥四号着陆区地质背景: 黄色五角星为着陆点,  $\text{TiO}_2$  含量显示芬森撞击坑的溅射物明显延伸至着陆区 (Ding et al. 2022); (b) 数字高程模型显示着陆区北东至西南方向的线性结构; (c) 高频雷达数据揭示的月表下 ~45 m 的地层结构 (Xiao et al. 2021)

图 6 嫦娥四号着陆区的地质背景和玉兔二号月球车搭载的探月雷达数据获取的雷达图像

Fig. 6 Geological background of the Chang'E-4 landing area and the radar image showing the subsurface structure of the Moon by using radar data on board the Yutu-2 lunar rover

个空洞 (Ding et al. 2021b)。该空洞可能是紫微撞击坑形成过程中挖掘破碎了基岩层, 挖掘出的破碎石块在回落月球表面之后, 在溅射毯内的侵位过程中形成了空洞结构。这一发现表明, 月球上较为普遍的存在由撞击溅射物侵位过程所形成的空洞, 这也有助于解释美国“圣杯号”(GRAIL) 任务中发现的月球浅层存在高孔隙度的原因 (Ding et al. 2021b)。同时, 雷达的观测数据也揭示了月球浅表层可能存在被埋藏的撞击坑的结构 (Zhang et al. 2021c; Zhou et al. 2021)。

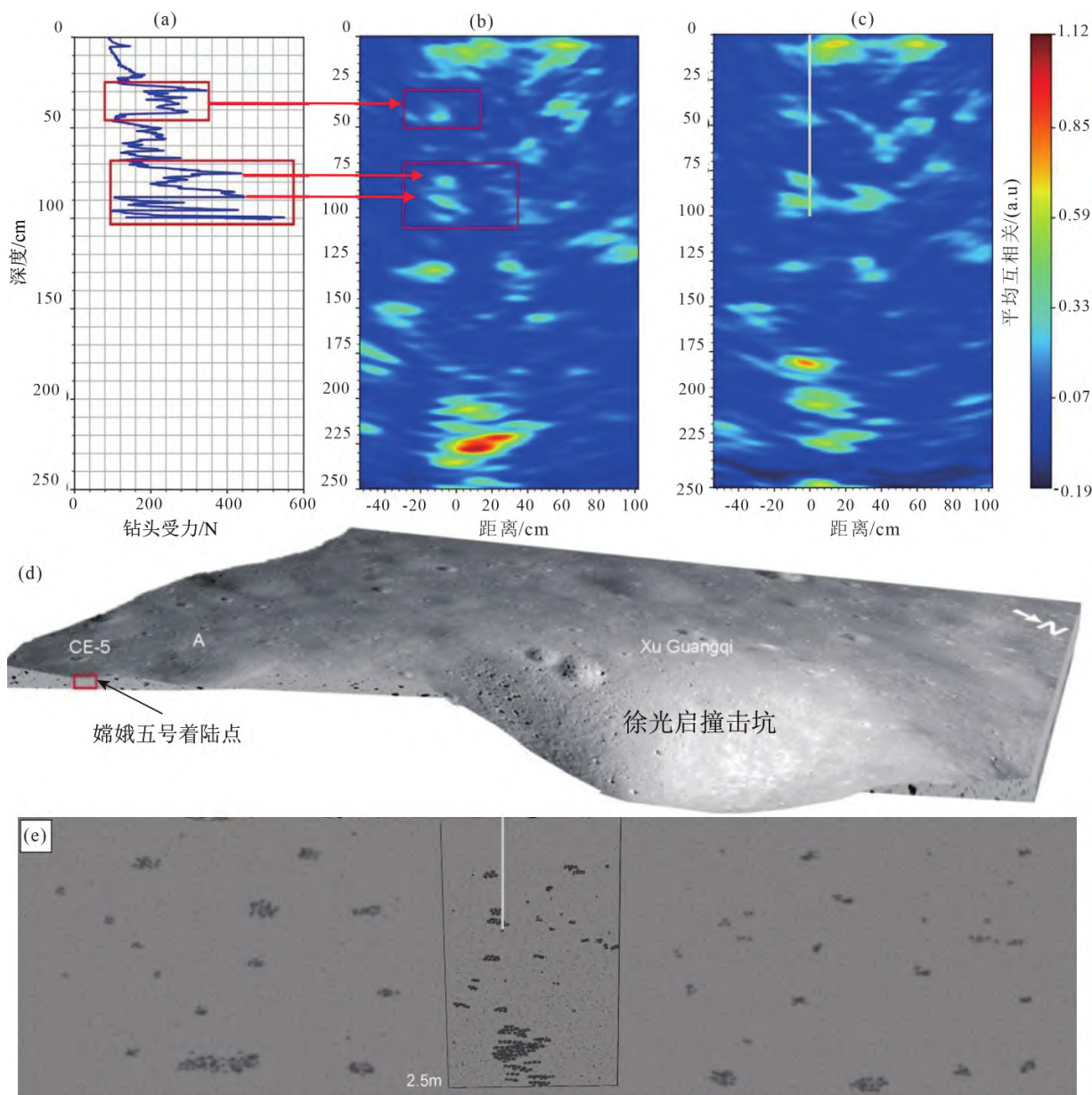
#### 4 展望

撞击过程在月球的演化过程中起到至关重要的作用。月球早期重大撞击事件形成的大型撞击盆地对月壳和上月幔的结构和组成产生了深远的影响, 是月球动力演化过程中的关键事件 (Huang et

al. 2022)。持续的撞击作用改造了月球的壳部和幔部物质的属性, 是月球地质和固体地球物理特征的重要驱动力。开展多手段结合的撞击过程观测和模拟研究, 将一直是月球科学研究的重要内容。

月球的撞击历史研究对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具有决定性的贡献。特别地, SPA (South Pole-Aitken) 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 (Bottke and Norman, 2017)。从样品分析角度获取的 SPA 盆地形成的精确时间, 将是月球撞击过程和撞击历史研究的重要进步, 也将进一步回答其他重要的月球早期演化问题。月球上的主要撞击盆地, 如酒海、雨海、东海等盆地的形成时间是标定月球撞击历史的重要节点。随着我国月球科研站任务的实





据 Su 等( 2022) 。( a) 钻孔岩心的钻头受力变化图; ( b) 钻孔之前的雷达数据成像图; ( c) 钻孔之后的雷达图像, 其中白色垂线为钻孔位置示意; ( d) 着陆区地形地貌图; ( e) 月壤探测仪数据解译的着陆区月壤内部结构示意图, 其中白色垂线为钻孔位置示意

图 7 嫦娥五号着陆区月壤探测仪观测数据及其浅表层内部结构示意图

Fig. 7 Diagrams of observation data of the lunar regolith and schematic diagram of internal structure of shallow surface beneath the Chang' E-5 landing site in the Moon

施以及广泛的国际合作的开展,月球撞击历史和撞击通量的研究将进一步深入,采集并分析这些关键撞击盆地的代表性样品,将是月球撞击通量研究的重点。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方法的有机结合,有望系统性解决南极-艾肯盆地等早期重大撞击事件的形成时间并建立系统的月球地层“金钉子”。与此同时,通过研究月球和类地行星的硅酸盐圈层内存在的亲铁元素的含量来约束晚期增生的撞击体的总质量( Morbidelli et al. ,2018) ,面临

着亲铁元素分异过程不详的影响,因此研究不同内部环境( 如温压、成分、氧逸度等) 对元素分异的影响是全面分析月球早期撞击通量的重要前提。

由于月壤是长期挖掘和混合的产物,月球样品的事件指示性上普遍存在巨大的争议( Fassett and Minton , 2013) 。月球自~38 亿年以来的撞击历史还存在大量的未知,设计并采集确切的事件样品( 如基岩而非表面风化物) 是标定此段时间内撞击历史的关键。在此类研究中,月球成壤过程,尤其是撞击对月球表面物质物理和化学性质的改造是

挖掘月壤的指示意义的基础知识。因此,基于嫦娥探月工程获取的探月雷达数据,联合高分辨率区域地质研究和数值模拟分析,是进一步完善对月壤形成和起源研究的重要方法。

致谢: 受篇幅和研究视角有限的限制,本文未尝试一一总结国内外学者在月球的撞击过程、撞击历史及其对浅表层物质改造影响研究方面的主要认识。全文一定存在大量疏漏和理解不足之处,谨以此文奉读者审阅,以期共同助力我国行星科学的发展和进步。

### 参考文献 (References):

- Barrat J A, Chaussidon M, Bohn M, Gillet P, Göpel C, Lesourd M. 2005. Lithium behavior during cooling of a dry basalt: An ion-microprobe study of the lunar meteorite Northwest Africa 479 ( NWA 479) . *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69( 23): 5597-5609
- Botke W F, Vokrouhlický D, Minton D, Nesvorný D, Morbidelli A, Brasser R, Simonson B, Levison H F. 2012. An Archaean heavy bombardment from a destabilized extension of the asteroid belt. *Nature*, 485( 7396): 78-81. doi: 10.1038/nature10967
- Botke W F, Brož M, O' Brien D P, Campo Bagatin A, Morbidelli A, Marchi S. 2015. The collisional evolution of the main asteroid belt. In: Michel P, DeMeo F E, Botke W F, ( eds. ). *Asteroids IV*. Tucson: University of Arizona Press, 701-724
- Botke W F, Norman M D. 2017. The late heavy bombardment. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 45: 619 - 647. doi: 10.1146/annurev-earth-063016-020131
- Botke W F Jr, Vokrouhlický D, Rubincam D P, Nesvorný D. 2006. The Yarkovsky and Yorp effects: Implications for asteroid dynamics. *Annual Review of Earth And Planetary Sciences*, 34: 157-191. doi: 10.1146/annurev.earth.34.031405.125154
- Brasser R, Werner S C, Mojzsis S J. 2020. Impact bombardment chronology of the terrestrial planets from 4.5 Ga to 3.5 Ga. *Icarus*, 338: 113514. doi: 10.1016/j.icarus.2019.113514
- Chang Y R, Xiao Z Y, Wang Y C, Ding C Y, Cui J, Cai Y Z. 2021. An updated constraint on the local stratigraphy at the Chang' E-4 landing site. *Earth and Planetary Physics*, 5( 1): 19-31
- Chapman C R, Cohen B A, Grinspoon D H. 2007. What are the real constraints on the existence and magnitude of the late heavy bombardment?. *Icarus*, 189 ( 1): 233 - 245. doi: 10.1016/j.icarus.2006.12.020
- Cohen B A, Swindle T D, Kring D A. 2000. Support for the lunar cataclysm hypothesis from lunar meteorite impact melt ages. *Science*, 290( 5497): 1754-1756. doi: 10.1126/science.290.5497.1754
- De Sousa Ribeiro R, Morbidelli A, Raymond S N, Izidoro A, Gomes R, Neto E V. 2020. Dynamical evidence for an early giant planet instability. *Icarus*, 339: 113605. doi: 10.1016/j.icarus.2019.113605
- Ding C Y, Cai Y Z, Xiao Z Y, Su Y. 2020a. A rocky hill on the continuous ejecta of Ziwei crater revealed by the Chang' E-3 mission. *Earth Planetary Physics*, 4( 2): 105-110
- Ding C Y, Li C L, Xiao Z Y, Su Y, Xing S G, Wang Y C, Feng J Q, Dai S, Xiao Y, Yao M J. 2020b. Layering structures in the porous material beneath the chang'e-3 landing site. *Earth and Space Science*, 7( 10): e2019EA000862
- Ding C Y, Xiao Z Y, Wu B, Li Y, Prieur N C, Cai Y Z, Su Y, Cui J. 2020c. Fragments delivered by secondary craters at the Chang' E-4 landing site. *Geophysical Research Letters*, 47 ( 7): e2020GL087361
- Ding C Y, Xiao Z Y, Wu B, Li Z J, Su Y, Zhou B, Liu K J, Cui J. 2021a. Rock fragments in shallow lunar regolith: Constraints by the lunar penetrating radar onboard the Chang'E 4 mission. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126 ( 9): e2021JE006917. doi: 10.1029/2021je006917
- Ding C, Xiao Z, Su Y, J. Cui Z J. 2020. Compositional variations along the route of Chang' E-3 Yutu rover revealed by the lunar penetrating radar. *Progress in Earth, Planets and Space*. 7 ( 1), 1-11. doi: 10.1186/s40645-020-00340-4
- Ding C Y, Xiao Z Y, Su Y. 2021b. A potential subsurface cavity in the continuous ejecta deposits of the Ziwei crater discovered by the Chang'E-3 mission. *Earth, Planets and Space*, 73( 1): 53
- Ding C Y, Xiong S T, Li J, Su Y, Huang S P. 2022. Yutu-2 radar observation of the lunar regolith heterogeneity at the Chang' E-4 landing site. *Astronomy & Astrophysics*, 664: A43
- Fa W Z, Wicczorek M A. 2012. Regolith thickness over the lunar near-side: Results from Earth-based 70 cm Arecibo radar observations. *Icarus*, 218( 2): 771-787
- Fa W Z, Liu T T, Zhu M H, Haruyama J. 2014. Regolith thickness over Sinus Iridum: Results from morphology and size-frequency distribution of small impact craters. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 119( 8): 1914-1935
- Fa W Z, Zhu M H, Liu T T, Plescia J B. 2015. Regolith stratigraphy at the Chang'E-3 landing site as seen by lunar penetrating radar. *Geophysical Research Letters*, 42( 23): 10179-10187
- Fang G Y, Zhou B, Ji Y C, Zhang Q Y, Shen S X, Li Y X, Guan H F, Tang C J, Gao Y Z, Lu W, Ye S B, Han H D, Zheng J, Wang S Z. 2014. Lunar penetrating radar onboard the Chang'e-3 mission. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 14( 12): 1607-1622
- Fassett C I, Minton D A. 2013. Impact bombardment of the terrestrial planets and the early history of the Solar System. *Nature Geoscience*, 6( 7): 520-524
- Fassett C I. 2016. Analysis of impact crater populations and the geochronology of planetary surfaces in the inner solar system. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 121 ( 10): 1900 - 1926. doi: 10.1002/2016JE005094
- Featherstone W E, Hirt C, Kuhn M. 2013. Band-limited Bouguer gravity identifies new basins on the Moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118( 6): 1397-1413. doi: 10.1002/jgre.20101
- Fritz J, Greshake A, Klementova M, Wirth R, Palatinus L, Trønnes R G, Fernandes V A, Böttger U, Ferrière L. 2020. Donwillhelmsite, [CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>11</sub>], a new lunar high-pressure Ca-Al-silicate with relevance for subducted terrestrial sediments. *American Mineralogist*, 105( 11): 1704-1711
- Gillet P, Goresy A E. 2013. Shock events in the solar system: The message from minerals in terrestrial planets and asteroids. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41: 257-285
- Gomes R, Levison H F, Tsiganis K, Morbidelli A. 2005. Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature*, 435( 7041): 466-469

- Hartmann W K. 1966. Early lunar cratering. *Icarus*, 5(1-6): 406-418. doi: 10.1016/0019-1035(66)90054-6
- Hartmann W K. 1970. Lunar cratering chronology. *Icarus*, 13(2): 299-301
- Hartmann W K. 2019. History of the terminal cataclysm paradigm: Epistemology of a planetary bombardment that never (?) Happened. *Geosciences*, 9(7): 285. doi: 10.3390/geosciences9070285
- Head III J W. 1976. Lunar volcanism in space and time. *Reviews of Geophysics*, 14(2): 265-300
- Hiesinger H, Head III J W. 2006. New views of lunar geoscience: An introduction and overview. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 60(1): 1-81
- Hu B, Wang D L, Zhang L, Zeng Z F. 2019. Rock location and quantitative analysis of regolith at the chang'e 3 landing site based on local similarity constraint. *Remote Sensing*, 11(5): 530
- Huang Y H, Soderblom J M, Minton D A, Hirabayashi M, Melosh J. 2022. Bombardment history of the Moon constrained by crustal porosity. *Nature Geoscience*, 15: 531-535
- Jaumann R, Hiesinger H, Anand M, Crawford I A, Wagner R, Sohl F, Jolliff B L, Scholten F, Knapmeyer M, Hoffmann H, Hussmann H, Grott M, Hempel S, Köhler U, Krohn K, Schmitz N, Carpenter J, Wieczorek M, Spohn T, Robinson M S, Oberst J. 2012. Geology, geochemistry, and geophysics of the Moon: Status of current understanding. *Planetary and Space Science*, 74(1): 15-41
- Johnson B C, Blair D M, Collins G S, Melosh H J, Freed A M, Taylor G J, Head J W, Wieczorek M A, Andrews-Hanna J C, Nimmo F, Keane J T, Miljkovi K, Soderblom J M, Zuber M T. 2016. Formation of the Orientale lunar multiring basin. *Science*, 354(6311): 441-444. doi: 10.1126/science.aag0518
- Johnson T E, Kirkland C L, Lu Y J, Smithies R H, Brown M, Hartnady M I H. 2022. Giant impacts and the origin and evolution of continents. *Nature*, 608(7922): 330-335. doi: 10.1038/s41586-022-04956-y
- Kaneko S, Miyahara M, Ohtani E, Arai T, Hirao N, Sato K. 2015. Discovery of stishovite in Apollo 15299 sample. *American Mineralogist*, 100(5-6): 1308-1311
- Kneissl T, Michael G G, Schmedemann N. 2016. Treatment of non-sparse cratering in planetary surface dating. *Icarus*, 277: 187-195. doi: 10.1016/j.icarus.2016.05.015
- Koeberl C. 2003. The late heavy bombardment in the inner Solar System: Is there any connection to Kuiper belt objects? *Earth, Moon, and Planets*, 92(1-4): 79-87
- Lai J L, Xu Y, Zhang X P, Xiao L, Yan Q, Meng X, Zhou B, Dong Z H, Zhao D. 2019. Comparison of dielectric properties and structure of lunar regolith at chang'e-3 and chang'e-4 landing sites revealed by ground-penetrating radar. *Geophysical Research Letters*, 46(22): 12783-12793
- Lai J L, Xu Y, Bugiolacchi R, Meng X, Xiao L, Xie M G, Liu B, Di K C, Zhang X P, Zhou B, Shen S X, Xu L Y. 2020. First look by the Yutu-2 rover at the deep subsurface structure at the lunar farside. *Nature Communications*, 11(1): 3426. doi: 10.1038/s41467-020-17262-w
- Langenhorst F, Deutsch A. 2012. Shock metamorphism of minerals. *Elements*, 8(1): 31-36
- Levison H F, Bottke W F, Gounelle M, Morbidelli A, Nesvorný D, Tsiganis K. 2009. Contamination of the asteroid belt by primordial trans-Neptunian objects. *Nature*, 460(7253): 364-366
- Li C L, Su Y, Pettinelli E, Xing S G, Ding C Y, Liu J J, Ren X, Lauro S E, Soldovieri F, Zeng X G, Gao X Y, Chen W L, Dai S, Liu D W, Zhang G L, Zuo W, Wen W B, Zhang Z B, Zhang X X, Zhang H B. 2020. The Moon's farside shallow subsurface structure unveiled by Chang'E-4 Lunar Penetrating Radar. *Science Advances*, 6(9): eaay6898. doi: 10.1126/sciadv.aay6898
- Li C L, Hu H, Yang M F, Pei Z Y, Zhou Q, Ren X, Liu B, Liu D W, Zeng X G, Zhang G L, Zhang H B, Liu J J, Wang Q, Deng X J, Xiao C J, Yao Y G, Xue D S, Zuo W, Su Y, Wen W B, Ouyang Z Y. 2022a. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission. *National Science Review*, 9(2): nwab188
- Li J, Bai L G, Liu H. 2022b. Numerical verification of full waveform inversion for the Chang'E-5 lunar regolith penetrating array radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 5903710
- Liu J W, Liu J Z, Yue Z Y, Zhang L, Wang J T, Zhu K. 2022. Characterization and interpretation of the global lunar impact basins based on remote sensing. *Icarus*, 378: 114952
- Long T, Qian Y Q, Norman M D, Miljkovic K, Crow C, Head J W, Che X C, Tartèse R, Zellner N, Yu X F, Xie S W, Whitehouse M, Joy K H, Neal C R, Snape J F, Zhou G S, Liu S J, Yang C, Yang Z Q, Wang C, Xiao L, Liu D Y, Nemchin A. 2022. Constraining the formation and transport of lunar impact glasses using the ages and chemical compositions of Chang'E-5 glass beads. *Science Advances*, 8(39): eabq2542
- Mazrouei S, Ghent R R, Bottke W F, Parker A H, Geron T M. 2019. Earth and Moon impact flux increased at the end of the Paleozoic. *Science*, 363(6424): 253-257
- McKay D S, Heiken G, Basu A, Blanford G, Simon S, Reedy R, French B M, Papike J. 1991. The lunar regolith. In: Heiken G H, Vaniman D, French B M, eds. *Lunar Sourcebook*. Cambridge: Cambridge University Press, 285-356
- Melosh H J. 1979. Acoustic fluidization: A new geologic process? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B13): 7513-7520
- Melosh H J. 1989. *Impact cratering: A geologic process*. Oxford: Clarendon Press, 253
- Melosh H J, Ivanov B A. 1999. Impact crater collapse. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 27: 385-415
- Melosh H J, Freed A M, Johnson B C, Blair D M, Andrews-Hanna J C, Neumann G A, Phillips R J, Smith D E, Solomon S C, Wieczorek M A, Zuber M T. 2013. The origin of lunar mascon basins. *Science*, 340(6140): 1552-1555
- Melosh H J, Kendall J, Horgan B, Johnson B C, Bowling T, Lucey P G, Taylor G J. 2017. South pole-Aitken Basin ejecta reveal the Moon's upper mantle. *Geology*, 45(12): 1063-1066
- Meyer H M, Denevi B W, Boyd A K, Robinson M S. 2016. The distribution and origin of lunar light plains around Orientale basin. *Icarus*, 273: 135-145
- Michael G G, Neukum G. 2010. Planetary surface dating from crater size-frequency distribution measurements: Partial resurfacing events and statistical age uncertainty. *Earth and Planetary Science Letters*, 294(3-4): 223-229. doi: 10.1016/j.epsl.2009.12.041
- Miyahara M, Kaneko S, Ohtani E, Sakai T, Nagase T, Kayama M, Nishido H, Hirao N. 2013. Discovery of seifertite in a shocked lunar meteorite. *Nature Communications*, 4: 1737



- Morbidelli A, Vokrouhlický D. 2003. The Yarkovsky-driven origin of near-Earth asteroids. *Icarus*, 163(1): 120–134
- Morbidelli A, Nesvorný D, Laurenz V, Marchi S, Rubie D C, Elkins-Tanton L, Wieczorek M, Jacobson S. 2018. The timeline of the lunar bombardment: Revisited. *Icarus*, 305: 262–276
- Nesvorný D, Roig F, Bottke W F. 2017. Modeling the historical flux of planetary impactors. *The Astronomical Journal*, 153(3): 103. doi: 10.3847/1538-3881/153/3/103
- Nesvorný D, Vokrouhlický D, Bottke W F, Levison H F. 2018. Evidence for very early migration of the Solar System planets from the Patroclus-Menoetius binary Jupiter Trojan. *Nature Astronomy*, 2(11): 878–882. doi: 10.1038/s41550-018-0564-3
- Neukum G, Mehl A, Fechtig H, Zähringer J. 1970. Impact phenomena of micrometeorites on lunar surface material. *Earth and Planetary Science Letters*, 8(1): 31–35
- Neukum G. 1983. Meteoritenbombardement und datierung planetarer oberfluchen. Habilitation dissertation for faculty membership. Munich: University of Munich Press
- Neukum G, Ivanov B A, Hartmann W K. 2001. Cratering records in the inner solar system in relation to the lunar reference system. In: Kalenbach R, Geiss J, Hartmann W K, eds. *Chronology and Evolution of Mars*. Dordrecht: Springer, 55–86. doi: 10.1007/978-94-017-1035-0\_3
- Neumann G A, Zuber M T, Wieczorek M A, Head J W, Baker D M H, Solomon S C, Smith D E, Lemoine F G, Mazarico E, Sabaka T J, Goossens S J, Melosh H J, Phillips R J, Asmar S W, Konopliv A S, Williams J G, Sori M M, Soderblom J M, Miljković K, Andrews-Hanna J C, Nimmo F, Kiefer W S. 2015. Lunar impact basins revealed by Gravity Recovery and Interior Laboratory measurements. *Science Advances*, 1(9): e1500852. doi: 10.1126/sciadv.1500852
- Norman M D. 2019. Chapter 2 – Origin of the earth and the late heavy bombardment. In: Van Kranendonk M J, Bennett V C, Hoffmann J E, eds. *Earth's Oldest Rocks*. 2nd ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 27–47
- Ohtani E, Ozawa S, Miyahara M, Ito Y, Mikouchi T, Kimura M, Arai T, Sato K, Hiraga K. 2011. Coesite and stishovite in a shocked lunar meteorite, Asuka-881757, and impact events in lunar surface. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(2): 463–466
- Orgel C, Michael G, Fassett C I, Van Der Bogert C H, Riedel C, Kneissl T, Hiesinger H. 2018. Ancient bombardment of the inner solar system: Reinvestigation of the “fingerprints” of different impactor populations on the lunar surface. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123(3): 748–762. doi: 10.1002/2017JE005451
- Pang R L, Zhang A C, Wang S Z, Wang R C, Yurimoto H. 2016. High-pressure minerals in eucrite suggest a small source crater on Vesta. *Scientific Reports*, 6: 26063
- Pang R L, Yang J, Du W, Zhang A C, Liu S R, Li R. 2022. New occurrence of seifertite and stishovite in Chang'E-5 regolith. *Geophysical Research Letters*, 49(12): e2022GL098722
- Qian Y Q, Xiao L, Head J W, Wöhler C, Bugiolacchi R, Wilhelm T, Althoff S, Ye B L, He Q, Yuan Y F, Zhao S Y. 2021a. Copernican-Aged (<200 Ma) impact ejecta at the chang'e-5 landing site: Statistical evidence from crater morphology, morphometry, and degeneration models. *Geophysical Research Letters*, 48(20): e2021GL095341
- Qian Y Q, Xiao L, Wang Q, Head J W, Yang R H, Kang Y, van der Bogert C H, Hiesinger H, Lai X M, Wang G X, Pang Y, Zhang N, Yuan Y F, He Q, Huang J, Zhao J N, Wang J, Zhao S Y. 2021b. China's Chang'e-5 landing site: Geology, stratigraphy, and provenance of materials. *Earth and Planetary Science Letters*, 561: 116855
- Qian Y, She Z, He Q, Xiao L, Wang Z, Head J W, Sun L, Wang Y, Wu B, Wu X, Luo B, Cao K, Li Y, Dong M, Song W, Pan F, Michalski J, Ye B, Zhao J, Zhao S, Huang J, Zhao J, Wang J, Zong K, Hu Z. 2022. Mineralogy and Chronology of the Young Mare Volcanism in the Procellarum-KREEP-Terrane. *Nature Astronomy*, https://doi.org/10.1038/s41550-022-01862-1
- Qiao L, Xiao Z Y, Zhao J N, Xiao L. 2016. Subsurface structures at the Chang'e-3 landing site: Interpretations from orbital and in-situ imagery data. *Journal of Earth Science*, 27(4): 707–715
- Qiao L, Chen J, Xu L Y, Wan S, Cao H J, Li B, Ling Z C. 2021. Geology of the Chang'e-5 landing site: Constraints on the sources of samples returned from a young nearside mare. *Icarus*, 364: 114480
- Quantin C, Mangold N, Hartmann W K, Allemand P. 2007. Possible long-term decline in impact rates: 1. Martian geological data. *Icarus*, 186(1): 1–10. doi: 10.1016/j.icarus.2006.07.008
- Rasmussen K L, Warren P H. 1985. Megaregolith thickness, heat flow, and the bulk composition of the Moon. *Nature*, 313(5998): 121–124. doi: 10.1038/313121a0
- Robbins S J. 2014. New crater calibrations for the lunar crater-age chronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 403: 188–198
- Ryder G. 2002. Mass flux in the ancient Earth-Moon system and benign implications for the origin of life on Earth. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 107(E4): 5022. doi: 10.1029/2001JE001583
- Schmitz B. 2013. Extraterrestrial spinels and the astronomical perspective on Earth's geological record and evolution of life. *Geochemistry*, 73(2): 117–145. doi: 10.1016/j.chemer.2013.04.002
- Sharpton V L. 2014. Outcrops on lunar crater rims: Implications for rim construction mechanisms, ejecta volumes and excavation depths. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 119(1): 154–168
- Shkuratov Y G, Bondarenko N V. 2001. Regolith layer thickness mapping of the moon by radar and optical data. *Icarus*, 149(2): 329–338
- Stöffler D, Ryder G. 2001. Stratigraphy and isotope ages of lunar geologic units: Chronological standard for the inner Solar System. *Space Science Reviews*, 96(1–4): 9–54
- Stöffler D, Hamann C, Metzler K. 2018. Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: Proposal for an updated classification system. *Meteoritics & Planetary Science*, 53(1): 5–49
- Strom R G, Malhotra R, Ito T, Yoshida F, Kring D A. 2005. The origin of planetary impactors in the inner solar system. *Science*, 309(5742): 1847–1850. doi: 10.1126/science.1113544
- Strom R G, Renu M, Xiao Z Y, Takashi I, Fumi Y, Ostrach L R. 2015. The inner solar system cratering record and the evolution of impactor populations. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 15(3): 407–434
- Su Y, Fang G Y, Feng J Q, Xing S G, Ji Y C, Zhou B, Gao Y Z, Li H, Dai S, Xiao Y, Li C L. 2014. Data processing and initial results of Chang'e-3 lunar penetrating radar. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 14(12): 1623–1632

- Su Y, Wang R G, Deng X J, Zhang Z Y, Zhou J F, Xiao Z Y, Ding C Y, Li Y X, Dai S, Ren X. 2022. Hyperfine structure of regolith unveiled by Chang' E-5 lunar regolith penetrating radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 5110414
- Taylor S R. 1982. *Planetary science: A lunar perspective*. Houston: Lunar and Planetary Institute
- Tera F, Papanastassiou D A, Wasserburg G J. 1974. Isotopic evidence for a terminal lunar cataclysm. *Earth and Planetary Science Letters*, 22(1): 1-21
- Vedder J F. 1971. Microcraters in glass and minerals. *Earth and Planetary Science Letters*, 11(1-5): 291-296
- Wiggins S E, Johnson B C, Collins G S, Jay Melosh H, Marchi S. 2022. Widespread impact-generated porosity in early planetary crusts. *Nature Communications*, 13(1): 4817. doi: 10.1038/s41467-022-32445-3
- Wilhelms D E, McCauley J F, Trask N J. 1987. *The geologic history of the moon*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1348, Washington: United States Government Printing Office
- Williams J P, Van Der Bogert C H, Pathare A V, Michael G G, Kirchoff M R, Hiesinger H. 2018. Dating very young planetary surfaces from crater statistics: A review of issues and challenges. *Meteoritics & Planetary Science*, 53(4): 554-582. doi: 10.1111/maps.12924
- Xiao L, Zhu P M, Fang G Y, Xiao Z Y, Zou Y L, Zhao J N, Zhao N, Yuan Y F, Qiao L, Zhang X P, Zhang H, Wang J, Huang J, Huang Q, He Q, Zhou B, Ji Y C, Zhang Q Y, Shen S X, Li Y X, Gao Y Z. 2015. A young multilayered terrane of the northern Mare Imbrium revealed by Chang' E-3 mission. *Science*, 347(6227): 1226-1229
- Xiao Z Y, Ding C Y, Xie M G, Cai Y Z, Cui J, Zhang K, Wang J T. 2021. Ejecta from the Orientale basin at the Chang' E-4 landing site. *Geophysical Research Letters*, 48(3): e2020GL090935. doi: 10.1029/2020GL090935
- Xiao Z Y. 2022. Mass movements related with impact craters. *Treatise on Geomorphology (Second Edition)*, 5: 433-457. doi: 10.1016/B978-0-12-818234-5.00030-4
- Xie M G, Xiao Z Y, Xu L Y, Fa W Z, Xu A A. 2021. Change in the Earth-Moon impactor population at about 3.5 billion years ago. *Nature Astronomy*, 5(2): 128-133. doi: 10.1038/s41550-020-01241-8
- Xie M G, Xiao Z Y. 2023. A new chronology from debiased crater densities: Implications for the origin and evolution of lunar impactors. *Earth and Planetary Science Letters*, 602: 117963
- Xing W F, Lin Y T, Zhang C, Zhang M M, Hu S, Hofmann B A, Sekine T, Xiao L, Gu L X. 2020. Discovery of reidite in the lunar meteorite sayh al uhaymir 169. *Geophysical Research Letters*, 47(21): e2020GL089583
- Yan P, Xiao Z, Wu Y, Yang W, Li J H, Gu L X, et al. 2022. Intricate regolith reworking processes revealed by microstructures on lunar impact glasses. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127, e2022JE007260. https://doi.org/10.1029/2022JE007260
- Yue Z Y, Di K C, Wan W H, Liu Z Q, Gou S, Liu B, Peng M, Wang Y X, Jia M N, Liu J Z, Ouyang Z Y. 2022. Updated lunar cratering chronology model with the radiometric age of Chang' E-5 samples. *Nature Astronomy*, 6(5): 541-545. doi: 10.1038/s41550-022-01604-3
- Zellner N E B. 2019. Lunar impact glasses: Probing the Moon's surface and constraining its impact history. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124(11): 2686-2702
- Zhang A C, Hsu W B, Floss C, Li X H, Li Q L, Liu Y, Taylor L A. 2010. Petrogenesis of lunar meteorite Northwest Africa 2977: Constraints from in situ microprobe results. *Meteoritics & Planetary Science*, 45(12): 1929-1947
- Zhang A C, Jiang Q T, Tomioka N, Guo Y J, Chen J N, Li Y, Sakamoto N, Yurimoto H. 2021a. Widespread tissintite in strongly shock-lithified lunar regolith breccias. *Geophysical Research Letters*, 48(5): e2020GL091554
- Zhang J H, Yang W, Hu S, Lin Y T, Fang G Y, Li C L, Peng W X, Zhu S Y, He Z P, Zhou B, Lin H Y, Yang J F, Liu E H, Xu Y C, Wang J Y, Yao Z X, Zou Y L, Yan J, Ouyang Z Y. 2015. 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*, 112(17): 5342-5347
- Zhang J H, Zhou B, Lin Y T, Zhu M H, Song H J, Dong Z H, Gao Y Z, Di K C, Yang W, Lin H Y, Yang J F, Liu E H, Wang L, Lin Y, Li C, Yue Z Y, Yao Z X, Ouyang Z Y. 2021b. Lunar regolith and substructure at Chang' E-4 landing site in South Pole-Aitken basin. *Nature Astronomy*, 5(1): 25-30. doi: 10.1038/s41550-020-1197-x
- Zhang L, Xu Y, Bugiolacchi R, Hu B, Liu C, Lai J L, Zeng Z F, Huo Z J. 2021c. Rock abundance and evolution of the shallow stratum on Chang' E-4 landing site unveiled by lunar penetrating radar data. *Earth and Planetary Science Letters*, 564: 116912
- Zhang N, Parmentier E M, Liang Y. 2013. Effects of lunar cumulate mantle overturn and megaregolith on the expansion and contraction history of the Moon. *Geophysical Research Letters*, 40(19): 5019-5023. doi: 10.1002/grl.50988
- Zhang N, Ding M, Zhu M H, Li H C, Li H Y, Yue Z Y. 2022. Lunar compositional asymmetry explained by mantle overturn following the South Pole-Aitken impact. *Nature Geoscience*, 15(1): 37-41. doi: 10.1038/s41561-021-00872-4
- Zhou H Q, Feng X, Ding C Y, Dong Z J, Liu C, Zhang Y, Meng Z G. 2021. Yutu-2 radar sounding evidence of a buried crater at Chang' E-4 landing site. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4600419
- Zhou H Q, Feng X, Ding C Y, Dong Z J, Liu C, Liang W J. 2022. Heterogeneous weathering process of lunar regolith revealed by polarimetric attributes analysis of Chang' E-4 lunar penetrating radar data acquired during the Yutu-2 turnings. *Geophysical Research Letters*, 49(13): e2022GL099207
- 欧阳自远. 2005. *月球科学概论*. 北京: 中国宇航出版社
- 肖智勇. 2021. 撞击过程和内太阳系撞击历史. *地质学报*, 95(9): 2641-2661. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021261

(本文责任编辑:刘莹;英文审校:张兴春)

## 专栏作者简介



刘洋,1984年生,美国圣路易斯华盛顿大学地球与行星科学系博士,现为中国科学院国家空间科学中心研究员、博士生导师。主要从事月球与行星科学研究,入选国家“万人计划”科技创新领军人才、中国科学院“百人计划”。担任中国探月四期首席科学家助理,中国

载人探月科学研究与应用系统论证专家组成员、天问一号首次火星探测任务和月球样品专家委员会秘书组成员。《中国科学:物理学 力学 天文学》《地球科学》《空间科学学报》和 *Earth and Planetary Physics* 等期刊编委。在 *Nature Astronomy*、*Science Advances* 等国内外高水平期刊发表论文 50 余篇,一项成果入选中央广播电视台 2022 年度中国十大科技新闻,获北京市自然科学奖二等奖(1/10)。



杨蔚,1981年生,2007年在中国科学技术大学地球化学专业获博士学位,现为中国科学院地质与地球物理所研究员、博士生导师。长期从事岩石地球化学、比较行星学、离子探针分析技术研究。2013年获国家优秀青年科学基金,2016年获中国矿物岩石地球化学学会侯德封奖。嫦娥三号、四号任务科学家团队成员,嫦娥五号月球样品使用

责任人,载人航天工程月球与行星科学专家组专家,在嫦娥三号、四号着陆区月壤物质组成,嫦娥五号月球玄武岩地球化学特征和形成机制等研究中取得系列成果。在 *Nature*、*PNAS*、*NSR* 等国内外高水平期刊发表论文 100 余篇,SCI 总引 4000 余次, h-index 33。



肖智勇,1986年生,中山大学教授、博导,行星环境宜居性研究实验室常务副主任。从事行星地质学的教学和科研。发表第一和通讯作者 SCI 论文 50 余篇,其中包括多篇 *Nature Geoscience*、*Nature Communications*、*Nature Astronomy*、*Geology*

等刊物论文。现为 *JGR-Planets* 副主编,中国科学院比较行星学卓越研究中心高级研究员。获 AOGS 杰出青年科学家和 NASA MESSENGER 团队贡献奖,入选第二届中国科协青年人才托举工程和国家重大人才工程计划。



林红磊,1992年生,中国科学院地质与地球物理所副研究员,硕士生导师。从事行星遥感研究,目前是首届月球样品专家委员会秘书处成员、嫦娥四号探月任务核心科学家团组成员,入选中国科协青年人才托举工程项目、中国科学院青促会会员,主持国家重点研发计划青年科学家项目、基金委青年项目,以第一作者在 *Science Advances*、

*NSR* 等期刊上发表论文 10 余篇。现为中国地质学会遥感地质专委会委员、中国测绘学会深空探测遥感测绘工委委员,《空间科学学报》编委、*EPP* 青年编委。



李阳,1984年生,中国科学院地球化学研究所项目研究员。主要从事月壤的形成与时空演化历史研究,在太空风化产物与光谱改造效应等方面取得多项原创性研究成果。共发表 SCI 收录学术论文 45 篇,其中以第一/通讯作者在 *Nature Communications*、*Nature Astronomy*、*Science Bulletin*、*Geochimica et Cosmochimica Acta* 等期刊上发表

论文 20 篇。现任中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心副主任、中国科学院地球化学研究所公共技术中心分中心主任,入选中国科学院特聘骨干岗位、中国科学院青年创新促进会会员,中国地质学会纳米地球科学专业委员会委员,《空间科学学报》编委等。