矿物岩石地球化学通报
Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry
Vol. 42 No. 3, May, 2023

嫦娥五号着陆区月壤的太空风化改造特征

李阳[1],唐红[1],徐于晨[2],谷立新[3]

1. 中国科学院 地球化学研究所,月球与行星科学研究中心,贵阳 550081;
2. 中国科学院 国家空间科学中心,空间天气学国家重点实验室,北京 100190;
3. 中国科学院 地质与地球物理研究所 地球与行星物理重点实验室,北京 100029

摘　要:月壤是月球科学与工程探测的主要目标物和承载物,也是人类认识月球的主要信息来源。太空风化作用是决定月壤形成,特别是演化过程的关键因素。本文系统总结了近两年来围绕嫦娥五号着陆区月壤的太空风化改造特征所取得的阶段性研究进展,特别是单质金属铁的多种成因机制、硫化物的风化改造特征和太阳风成因水等。上述研究成果的取得,为准确认识月壤特性,反演月壤形成与时空演化历史以及评估月壤资源特性奠定了良好的基础。最后结合我国后续月球探测工程规划,提出了新的研究方向与目标。

关　键　词:月壤;太空风化;硫化物;太阳风成因水;嫦娥五号

中图分类号:P691,P184　**文章编号**:1007-2802(2023)03-0494-06　**doi**:10.19658/j.issn.1007-2802.2023.42.068

Space weathering characteristics of lunar soil in the landing area of Chang′E-5

LI Yang[1], TANG Hong[1], XU Yu-chen[2], GU Li-xin[3]

1. *Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry CAS, Guiyang* 550081, *China*;
2. *State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*;
3. *Key Laboratory of Earth and Planetary Physics CAS, Institute of Geology and Geophysics CAS, Beijing* 100029, *China*

Abstract: Lunar soil plays a crucial role as the main target and carrier of lunar science and engineering exploration and provides essential insights for human to understand the moon. The space weathering process is a key determinant in the formation and evolution of lunar soil. This article presents a comprehensive summary of the recent research progress on the space weathering characteristics of lunar soil in the landing area of Chang′E-5, with particular emphasis on the various mechanisms of nanophase metallic iron, the weathering characteristics of sulfides, and water from solar wind. The achievements of this research have laid a solid foundation for accurately understanding the characteristics of lunar soil, reconstructing the formation and spatiotemporal evolution history of lunar soil, and evaluating lunar soil resources. Moreover, this article also outlines new research directions and objectives in line with China′s follow-up lunar exploration project planning.

Key words: lunar soil; space weathering; sulfide; water from solar wind; Chang′E-5

0　引言

月壤是月球探测主要目标,也是人类认识月球的主要信息来源。月壤的形成与演化过程涉及火山作用、小天体撞击、微陨石轰击以及太阳风辐射等内外动力地质作用的交互作用。嫦娥五号月壤是44年来人类再一次获得的月球返回样品,相比于Apollo与Luna返回样品,嫦娥五号月壤具有较高采样点纬度、较短的地质演化历史和较高的铁元素含量,因此能够让我们从不同的空间、时间以及物质组成的维度重新认识月壤的形成与时空演化历史。本文围绕嫦娥五号着陆区月壤太空风化改造特征,就月壤中单质金属铁成因机制、硫化物的风化改造特征、太阳风成因水以及月壤成熟度等方向的阶段性研究进展进行系统梳理,分析当前研究工作中存在的问题,为后续月球返回样品研究提供依据。

收稿编号:2023-089,2023-4-1收到,2023-5-4改回
第一作者简介:李阳(1984—),男,副研究员,研究方向:月球与行星科学. E-mail: liyang@mail.gyig.ac.cn.

1 太空风化的科学意义

太空风化是指发生在月球等无大气固态天体表面的一系列改造作用,包括陨石、微陨石轰击,太阳风、太阳耀斑粒子注入,银河宇宙射线辐射以及周期性热循环引起的热疲劳作用等(Pieters and Noble, 2016)。太空风化是月壤形成与改造的主要机制之一,主要通过冲击破碎、熔融胶结、气化沉积以及辐射损伤等物理化学作用改变月壤颗粒的平均粒径、晶体结构和化学组成。学术界关于太空风化的研究始于 20 世纪 50 年代,起因是地基观测发现月球表面的撞击坑呈现明亮的辐射纹特征,即在长期的空间环境改造下,随着暴露时间的增加月壤的反射光谱呈现反射率降低、特征吸收峰减弱以及连续统红移的太空风化改造特征(Pieters and Noble, 2016)。后续 Apollo 月壤的分析结果证明,其中广泛分布有胶结质玻璃和覆盖于颗粒表层的厚度约为 100 nm 的非晶质环带,以及分散于两者之中的纳米-亚微米级单质金属铁颗粒,这些太空风化特征产物不仅是影响月壤反射光谱特征的主要因素,同时也是表征月壤成熟度特征和反演月壤形成与演化过程的关键依据(Pieters and Noble, 2016)。

数十年来,随着月球遥感探测、返回样品分析及地面模拟实验等研究工作的持续开展,我们对太空风化的作用机理、特征产物和主要效应的认识也在不断加深。太阳风是太阳日冕层抛射出的高温等离子体,主要由带正电的质子和氦原子核以及带负电的自由电子组成。高速(200~800 km/s)的太阳风离子到达月球表面后,通过注入、溅射等作用使矿物颗粒表层 100~200 nm 范围发生非晶化和形成气泡结构,同时非晶质环带也是太阳风成因水的主要赋存位置(Zhou et al., 2022)。撞击月球表面的微陨石主要包括宇宙尘、月球表面微陨石的撞击速度约为 10~20 km/s,可分为贫挥发分的普通球粒陨石、无球粒陨石和铁陨石碎片,以及富挥发分的碳质球粒陨石碎片两大类。在月球表面整体干燥真空的环境下,撞击形成的等离子中氧优先发生逃逸,因此形成大量的单质金属铁和少量的铁硅合金等还原产物,但同时在局部氧化的环境下也可以形成三价铁离子及磁铁矿等氧化产物。高能的太阳耀斑、银河宇宙射线的高能粒子入射到月壤矿物中后,通过与晶格原子碰撞形成密集分布的辐射损伤径迹(Keller et al., 2021)。此外,昼夜温差导致的热疲劳作用也能够使月岩发生物理破碎形成较小粒径的岩屑。总之,高能粒子辐射和热疲劳作用过程中主要发生微观尺度的晶体结构破坏和较大尺度的机械破碎,难以整体改变月壤的矿物组成、晶体结构和元素组成,因此在月壤的形成与演化过程中起不到主导作用(Keller et al., 2021)。

2 嫦娥五号着陆区月壤的太空风化改造特征

2.1 单质金属铁的成因机制

通常认为,月球矿物中的铁元素主要以 Fe^{2+} 形式存在。由于月球表面高度真空(10^{-7}~10^{-9} Pa)且缺乏水和有机物,因此经受长期太空风化改造的月壤之中广泛分布有陨石、微陨石撞击引入或者还原形成的单质金属铁颗粒。

按照月壤中超顺磁性单质金属铁与铁元素含量的相对比值(Is/FeO),月壤的成熟度指数可以分为不成熟(Is/FeO<30)、亚成熟(30<Is/FeO<60)和成熟(Is/FeO>60)三类。根据 Apollo 月壤的研究结果,高地地区成熟月壤中单质金属铁的含量最高可达 0.7%(对应 FeO~5.0%),而对于月海地区成熟月壤中单质金属铁的含量则最高可达 1.0%(对应 FeO%~15.0%),即在不考虑陨石撞击引入和玄武岩中自身含单质铁的前提下,高地地区成熟型月壤中最多有 14%的 Fe^{2+} 能够通过太空风化的还原作用转化为 Fe^0,在月海地区这一比例最多为 7%。

单质金属铁的存在对月壤的紫外-可见和近红外波段反射光谱具有显著的改造效应,包括降低反射率、减弱矿物特征吸收峰强度以及引起光谱连续统的红移等(Pieters and Noble, 2016)。通常认为,粒径小于 10 nm 的单质金属铁主要引起光谱连续统的红移,即近红外波段的反射率相对高于紫外波段;而粒径大于 40 nm 的单质金属铁则主要引起光谱反射率的整体降低(Noble et al., 2007)。在此基础上,亦可以通过单质金属铁对反射光谱的改造程度来评估月壤的光谱成熟度(OMAT, optical maturity parameter)。因此,单质金属铁是解释月壤成熟度指数(Is/FeO)和光谱成熟度(OMAT)的基础与前提。

单质金属铁的形成过程本质上是月壤中的 Fe^{2+} 通过多种方式获得自由电子从而被还原的过程。因此 Fe^{2+} 能否获得自由电子是还原形成单质金属铁的关键,而如何获得自由电子则是成因机制研究的重点。此前 Apollo 月壤和月球陨石的研究结果表明,太空风化过程中形成的单质金属铁主要被归结于陨石、微陨石轰击引起的气化沉积作用,即陨石、

微陨石撞击产生的高温将月壤组分气化形成包括阳金属阳离子、阴离子及自由电子在内的等离子体,在此过程中 Fe^{2+} 通过捕获自由电子形成 Fe^0(Keller and McKay, 1993; Anand et al., 2004)。此外,太阳风 H^+ 注入也被认为是形成单质金属铁的原因之一(Gu et al., 2022),然而其具体的成因机制目前尚不清楚,且缺少核外电子的 H^+ 本身不具有还原性,无法直接通过电子转移将 Fe^{2+} 还原成为 Fe^0。

嫦娥五号采样区月壤的形成年龄以及空间暴露历史都小于 Apollo 月壤(Jia et al., 2022),因此有可能为单质金属铁的形成机制研究提供新的信息。郭壮等在部分铁橄榄石颗粒的表面发现了普遍存在的含气孔纳米级单质金属铁以及共存的无定形的富硅组分与富镁层(Guo et al., 2022)。电子能量损失谱分析与热力学计算的结果表明,含气孔的纳米级单质金属铁形成与受热作用下的铁橄榄石原位热分解作用,而内部的纳米级囊泡可能由 O_2 和 SiO 气体形成。此外,李琛等在铁橄榄石表明分布的亚微米级微型撞击坑底部的熔融非晶层中也发现了 Fe^{2+} 歧化反应成因的纳米级单质金属铁以及与之共存的 Fe^{3+}(Li et al., 2022a)。透射电镜分析结果表明,微撞击坑中的 np-Fe^0 均属于 α-Fe。此外电子能量损失谱表明在冲击层和非晶层的混合区存在 Fe^{3+} 峰,证明这些 np-Fe^0 形成于撞击引发的橄榄石熔体中 Fe^{2+} 的歧化反应。同时,热力学计算结果表明,撞击过程中的高压能够有效促进 Fe^{2+} 歧化反应的发生和进行。

嫦娥五号月壤中铁橄榄石热分解和 Fe^{2+} 歧化反应成因纳米级单质金属铁的发现与证实,丰富了单质金属铁的成因机制。但综合来说,单质金属铁的铁橄榄石热分解和气化沉积成因从本质上讲都是 Fe^{2+} 从 O^{2-} 得电子进而被还原,而歧化反应成因单质金属铁则是 Fe^{2+} 发生自氧化还原反应,即 $3Fe^{2+} = Fe^0 + 2Fe^{3+}$,所以是一种全新的成因机制。

2.2 硫化物的风化改造特征

嫦娥五号月壤中硫化物的含量低于 1%,为次要矿物(Li et al., 2022b),然而却呈现出了丰富的风化改造特征。Guo 等(2022)在嫦娥五号细粒月壤中发现了约 2 μm 直径的球形铁硫化物颗粒,纯金属铁触须以几乎相等的间隔从整个球形铁硫化物颗粒表面突出,内部普遍具有溶氧的特征并含有大量的亚微米级磁铁矿和纯金属铁颗粒。铁硫化物内部的亚微米级磁铁矿晶体(~100 nm)进一步通过化学和结构的综合分析得到确认。透射电镜能谱面扫描和线扫描的结果显示,球形铁硫化物颗粒内含有富氧和富铁的铁氧化物相。此外,电子能量损失谱的结果指示该铁氧化物颗粒的 Fe $L_{2,3}$ 谱介于 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 标样之间,表明球形铁硫化物颗粒内部的铁氧化物同时含有 Fe^{2+} 和 Fe^{3+},并且其比例约为 1∶2,这与磁铁矿的化学成分一致。通过球差校正透射电镜获取到的高分辨原子像以及高分辨透射电镜图像,最终确认了该氧化物颗粒与磁铁矿的晶体结构一致(Guo et al., 2022)。

综上,嵌入在球形铁硫化物颗粒中的铁氧化物颗粒被确定为亚微米级的磁铁矿晶体。结合嫦娥五号月壤中球形铁硫化物颗粒内部的复杂矿物相关系,通过热力学计算,最终得到该溶氧铁硫化物内部的磁铁矿与金属铁的共存是 FeO 共析反应的结果($4FeO = Fe_3O_4 + Fe$)。基于此类独特的铁硫化物颗粒的形貌特征及化学特征,推测该颗粒可能经历了含氧硅酸盐气体与铁硫化物熔融液滴的气-液相反应过程。硅酸盐的气化、氧的溶解及磁铁矿与金属铁颗粒相的平衡析出等典型特征,暗示嫦娥五号月壤中溶氧铁硫化物颗粒是月表的大型撞击事件的产物(Guo et al., 2022)。

硫化物是典型的易挥发性物质,行星体表面由撞击或者岩浆热作用产生的富硫蒸气对行星体表层物质具有显著的蚀变改造效应(Shearer et al., 2012)。陨硫铁是月球岩石中最常见的硫化物矿物,相比之下,含铜硫化物在月球样品中则非常罕见,化学成分数据指示月球样品中的铜硫化物主要是黄铜矿($CuFeS_2$)和方黄铜矿($CuFe_2S_3$),这些铜硫化物一般被认为是由不混溶的含铜硫化物熔体结晶而来(Taylor and Williams, 1973; Liu et al., 2022)。近年来,有学者通过化学和结构分析,在 Itokawa 返回样品中确认了外源成因的硫化铜矿物,因此,碳质球粒陨石或彗星等撞击体的并入也是地外样品中含铜硫化物的重要来源之一(Burgess and Stroud, 2021)。综上所述,目前月球样品中的铜硫化物矿物普遍缺乏结构数据的支撑,另一方面,月球表面是否存在铜硫化物矿物的多种形成机制还没有得到确认。

Guo 等(2023)通过扫描电镜-能谱仪的观察,在一个直径约 2.5 μm 的月壤颗粒表面发现了大量含有铜组分的亚微米级球形颗粒分布(Guo et al., 2023)。通过聚焦离子束切片技术以及透射电镜分析,确认了该月壤颗粒主要由自形的纯金属铁组成,并且其表面被厚度约为 100 nm 的富铜硫相物质包裹,同时,与金属铁颗粒毗邻的玻璃质表面也存

在富铜硫相的分布。透射电镜能谱面扫描和电子能量损失谱的分析结果显示,分布在玻璃质以及金属铁颗粒表面的富铜硫相物质仅由硫和铜两种元素组成,并且缺乏铁元素,这一化学特征与地外样品中常见的方黄铜矿和黄铜矿等含铜硫化物明显不同(Guo et al., 2023)。

此外,电子能量损失谱的结果也指示该铜硫相物质的 Cu $L_{2,3}$ 谱与前人获得的 Cu^{+}-Cu^{2+} 混合物类似,并且透射电镜能谱的定量分析结果也显示该铜硫相物质具有显著高的 Cu 含量。因此,所研究的铜硫相物质内部含有一定比例的 Cu^{+},并且其 Cu/S 原子比接近 2。进一步,根据不同晶带轴的高分辨透射电镜图像结果表明,这些分布于嫦娥五号月壤颗粒表面的铜硫物质与蓝辉铜矿($Cu_{1.8}S$)的晶体结构一致。综合化学成分及矿物结构的分析结果,嫦娥五号月壤颗粒表面的铜硫相物质最终被确定为蓝辉铜矿晶体(Guo et al., 2023)。

在金属铁颗粒以及相邻的玻璃质表面都观察到了蓝辉铜矿的分布,并且这些蓝辉铜矿的元素组成与基底物质明显不同,这一微观特征表明本研究中所观察到的蓝辉铜矿起源于月表的气相沉积过程。蓝辉铜矿的形成过程可以具体描述为:月球火成岩中的含铜硫化物在撞击产生的热环境中发生铜和硫元素的气化并形成局部的富铜硫蒸气,在随后的冷却过程中,这些气相组分重新沉积在月壤颗粒表面形成蓝辉铜矿晶体。

2.3　月壤太阳风改造特征及太阳风成因水

近年来,遥感光谱探测数据探测到月表广泛分布的太阳风成因水(OH/H_2O),并且月表水的含量可能与纬度、温度(日变化)存在相关性(Pieters et al., 2009; Sunshine et al., 2009; Li and Milliken, 2017)。Apollo 样品发现了月壤胶结质玻璃、火山玻璃和斜长石中水来源于太阳风注入的直接证据。美国阿波罗和苏联月球号采集的月球样品均位于低纬区域(8.97°S-26.1°N),而我国嫦娥五号的着陆点位于北纬 43.06°,并且其形成年龄约为 20 亿年(Tian et al., 2021; Li et al., 2021)。嫦娥五号采样位置和形成年龄独特,为探究月表水的含量和分布提供了全新的窗口,特别是能够对比纬度和月表温度对月表水形成和保存,这为深入认识月表水的分布、循环和迁移等提供了重要依据。

针对太阳风成因水开展了月壤颗粒中主要硅酸盐矿物(橄榄石、辉石、长石)和玻璃中水含量、状态和氢同位素的分析。Zhou 等(2022)利用红外光谱仪分析了月壤中橄榄石、斜长石和辉石的红外反射光谱,结果表明,月壤矿物普遍存在以 OH 形式存在的水,其中部分斜长石还存在 H_2O 形式的水,确定了橄榄石、斜长石和辉石的整体水含量分别为 $(152\pm14)\times10^{-6}$ ~ $(311\pm30)\times10^{-6}$、$(231\pm16)\times10^{-6}$ ~ $(385\pm27)\times10^{-6}$、$(134\pm19)\times10^{-6}$ ~ $(199\pm28)\times10^{-6}$。纳米离子探针对月壤颗粒中 H 含量和同位素(D/H)的分析表明,矿物和玻璃中的水主要分布在极表层(0~200 nm),其中水的平均含量从几千到上万 ppb 级变化,并且高度贫氘,δD 为 -77‰ ~ -992‰,接近太阳风的氢同位素值(δD ≈ -1000‰),指示矿物中的水来源于太阳风(Zhou et al., 2022; Xu et al., 2022),如图 1 所示。对比嫦娥五号和 Apollo 月壤颗粒的 H 含量剖面,可见嫦娥

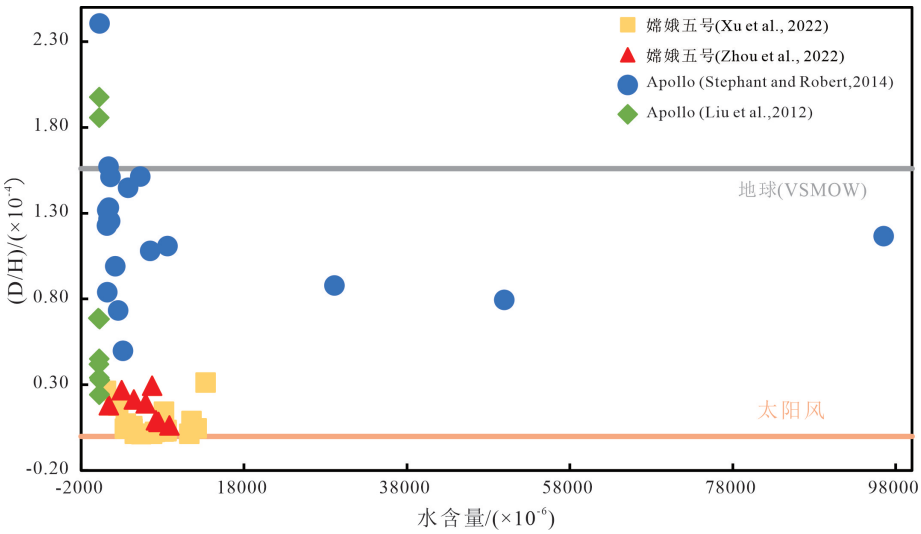

图 1　嫦娥五号与 Apollo 月壤颗粒的 H 含量剖面对比分析

Fig. 1　Comparative analysis of H content profiles of Chang'E-5 and Apollo lunar soil particles

五号样品表层 100 nm 内的 H 含量较阿波罗样品的高,这为月表水含量随纬度的变化提供了直接证据(Xu et al., 2022)。

嫦娥五号颗粒的显微结构分析表明,矿物表层均为部分非晶化和/或完全非晶化的环带,这是太阳风粒子注入矿物表面产生的辐射损伤,这也常见于 Apollo 矿物颗粒中(Keller and McKay, 1997; Zhou et al., 2022; Xu et al., 2022)。Zhou 等(2022)根据矿物表层结构和水含量的关系,发现矿物表层水含量与非晶质环带的厚度和非晶化程度总体上呈正相关,同时与下层晶体中的辐射径迹密度趋势一致,指示矿物的太阳风暴露时间是影响太阳风成因水含量最主要的因素。此外,矿物化学成分和晶体结构(即晶面方向)也是太阳风成因水形成和保存的重要影响因素。

Zhou 等(2022)结合嫦娥五号月壤矿物组成,估算出嫦娥五号地区月壤中的太阳风成因水含量至少为 170×10^{-6},显著高于月球内部的水含量(Hu et al., 2021),表明太阳风质子注入是嫦娥五号地区月壤中水的主要来源。根据遥感探测发现的月表中纬度地区太阳风成因水与月壤成熟度的正相关性(Jia et al., 2021; Li and Milliken, 2017),在月表中纬度地区,如风暴洋北部和雨海盆地,其月壤成熟度与嫦娥五号地区相似,可能存在近似含量的太阳风成因水;而风暴洋西北侧的高地地区月壤则相对成熟,月壤中可能存在更高含量的太阳风成因水。

为了探讨温度对月壤颗粒中太阳风成因水的影响,Xu 等(2022)对部分特征颗粒开展了加热实验。他们将颗粒置于 180 ℃烘箱中加热 28 h,分析颗粒表层水含量变化,结果表明,太阳风注入的 H 在颗粒表层可以稳定保存。基于加热实验分析结果,对不同温度下月壤颗粒中 H 的保存开展的数值模拟结果显示,太阳风成因水可在月表中高纬度地区得到较好的保存。利用嫦娥五号月球样品的实验数据和阿波罗已有的研究结果,构建出太阳风 H 注入与加热扩散丢失的动态平衡模型,并预测出月表高纬度区域月壤颗粒的最表层可能保存有很高含量的太阳风成因水(Xu et al., 2022)。基于该模型计算结果和月壤颗粒的粒度分布,估算出月球极区的水含量约为 560×10^{-6},这与遥感结果类似(Li and Milliken, 2017)。这为月表不同纬度/温度下,月壤颗粒中太阳风 H 的注入和迁移提供了重要的制约。

总的来说,嫦娥五号样品的分析揭示了月壤矿物和玻璃中高含量的太阳风成因水,初步评估了月表中高纬度地区太阳风成因水分布和储量,为月表水的形成机制和保存特征提供了重要参考。

3 结论

综上所述,当前围绕嫦娥五号着陆区月壤的太空风化改造特征,包括单质金属铁的多种成因机制、硫化物的风化特征以及太阳风成因水等方向已取得了阶段性的研究进展。上述研究结果的取得,丰富和完善了我们对月壤形成与时空演化特征的认识,为后续地外样品研究奠定了扎实的基础。然而,当前在嫦娥五号着陆区月壤的空间暴露历史、成熟度等方向仍存在大量的研究空白,亟需开展更加深入研究工作。此外,随着我国后续月球探测工程的持续深入,也对月壤的太空风化改造特征研究提出了新的挑战。嫦娥六号月球探测工程预计于着陆于月球南极艾肯盆地,采集并返回人类第一份月球背面的样品,该地区的地质年龄和月壤的风化暴露历史将比嫦娥五号更为古老。此外,嫦娥七号则计划着陆于月球南极并将对永久阴影区水冰等开展就位探测。而当前对于含水冰月壤的风化改造特征和成熟度评价标准几近于一无所知。因此,当前有必要基于嫦娥五号返回样品,建立月壤太空风化改造特征的研究体系,并进一步结合未来任务需求,做好前瞻布局有针对性开展预先研究,为后续探测工程和返回样品研究提供支持。

致谢:感谢国家航天局给予的嫦娥五号返回样品支持。该研究得到了该研究得到中国科学院战略性先导科技专项(XDB 41000000)、国家航天局民用航天技术预先研究项目(D020201)、中国科学院前沿科学重点研究计划(ZDBS-SSW-JSC007-10、QYZDY-SSW-DQC028)等项目的支持。

参考文献(References):

Anand M, Taylor L A, Nazarov M A, Shu J, Mao H K, Hemley R J. 2004. Space weathering on airless planetary bodies: Clues from the lunar mineral hapkeite. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 101(18): 6847-6851

Burgess K D, Stroud R M. 2021. Exogenous copper sulfide in returned asteroid Itokawa regolith grains are likely relicts of prior impacting body. Communications Earth & Environment, 2: 115

Gu L X, Chen Y J, Xu Y C, Tang X, Lin Y T, Noguchi T, Li J H. 2022. Space weathering of the Chang'E-5 lunar sample from a mid-high latitude region on the Moon. Geophysical Research Letters, 49(7): e2022GL097875

Guo Z, Li C, Li Y, Wen Y Y, Tai K R, Li X Y, Liu J Z, Ouyang Z Y. 2022. Nanophase iron particles derived from Fayalitic olivine de-

composition in Chang'E-5 lunar soil: Implications for thermal effects during impacts. Geophysical Research Letters, 49(5): e2021GL097323

Guo Z, Li C, Li Y, Wen Y, Wu Y, Jia B, Tai K, Zeng X, Li, X, Liu J, Ouyang Z Y. 2022. Sub-microscopic magnetite and metallic iron particles formed by eutectic reaction in Chang'E-5 lunar soil. Nature Communications, 13(1): 7177

Guo Z, Li C, Li Y, Wu Y X, Zhu C X, Wen Y Y, Fa W Z, Li X Y, Liu J Z, Ouyang Z Y. 2023. Vapor-deposited digenite in Chang'E-5 lunar soil. Science Bulletin, 68(7): 723-729

Hu S, He H C, Ji J L, Lin Y T, Hui H J, Anand M, Tartèse R, Yan Y H, Hao J L, Li R Y, Gu L X, Guo Q, He H Y, Ouyang Z Y. 2021. A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang'E-5. Nature, 600(7887): 49-53

Jia B, Fa W, Xie M, Tai Y, Liu X. 2021. Regolith Properties in the Chang'E-5 Landing Region of the Moon: Results From Multi - Source Remote Sensing Observations. Journal of Geophysical Research: Planets, 126(7), p. e2021JE006934

Jia B J, Fa W Z, Zhang M Z, Di K C, Xie M G, Tai Y S, Li Y. 2022. On the provenance of the Chang'E-5 lunar samples. Earth and Planetary Science Letters, 596: 117791

Keller L P, McKay D S. 1993. Discovery of vapor deposits in the lunar regolith. Science, 261(5126): 1305-1307

Keller L P, McKay D S. 1997. The nature and origin of rims on lunar soil grains. Geochimica et Cosmochimica Acta, 61(11): 2331-2341

Keller L P, Berger E L, Zhang S L, Christoffersen R. 2021. Solar energetic particle tracks in lunar samples: A transmission electron microscope calibration and implications for lunar space weathering. Meteoritics & Planetary Science, 56(9): 1685-1707

Li C, Guo Z, Li Y, Tai K R, Wei K X, Li X Y, Liu J Z, Ma W H. 2022a. Impact-driven disproportionation origin of nanophase iron particles in Chang'E-5 lunar soil sample. Nature Astronomy, 6(10): 1156-1162

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. 2022b. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission. National Science Review, 9(2): nwab188

Li Q L, Zhou Q, Liu Y, Xiao Z Y, Lin Y T, Li J H, Ma H X, Tang G Q, Guo S, Tang X, Yuan J Y, Li J, Wu F Y, Ouyang Z Y, Li C L, Li X H. 2021. Two-billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'E-5 basalts. Nature, 600(7887): 54-58

Li S, Milliken R E. 2017. Water on the surface of the Moon as seen by the Moon Mineralogy Mapper: Distribution, abundance, and origins. Science Advances, 3(9): e1701471

Liu X Y, Hao J L, Li R Y, He Y Y, Tian H C, Hu S, Li J, Gu L X, Yang W, Lin Y T. 2022. Sulfur isotopic fractionation of the youngest Chang'E-5 basalts: Constraints on the magma degassing and geochemical features of the mantle source. Geophysical Research Letters, 49(15): e2022GL099922

Noble S K, Pieters C M, Keller L P. 2007. An experimental approach to understanding the optical effects of space weathering. Icarus, 192(2), 629-642

Pieters C M, Goswami J N, Clark R N, Annadurai M, Boardman J, Buratti B, Combe J P, Dyar M D, Green R, Head J W, Hibbitts C, Hicks M, Isaacson P, Klima R, Kramer G, Kumar S, Livo E, Lundeen S, Malaret E, Mccord T, Mustard J, Nettles J, Petro N, Runyon C, Staid M, Sunshine J, Taylor L A, Tompkins S, Varanasi P. 2009. Character and spatial distribution of OH/H_2O on the surface of the Moon seen by M^3 on Chandrayaan-1. Science, 326(5952): 568-572

Pieters C M, Noble S K. 2016. Space weathering on airless bodies. Journal of Geophysical Research: Planets, 121(10): 1865-1884

Shearer C K, Burger P V, Guan Y, Papike J J, Sutton S R, Atudorei N V. 2012. Origin of sulfide replacement textures in lunar breccias. Implications for vapor element transport in the lunar crust. Geochimica et Cosmochimica Acta, 83: 138-158

Sunshine J M, Farnham T L, Feaga L M, Groussin O, Merlin F, Milliken R E, A'hearn M F. 2009. Temporal and spatial variability of lunar hydration as observed by the deep impact spacecraft. Science, 326(5952): 565-568

Taylor L A, Williams K L. 1973. Cu-Fe-S phases in lunar rocks. American Mineralogist, 58(9-10): 952-954

Tian H C, Wang H, Chen Y, Yang W, Zhou Q, Zhang C, Lin H L, Huang C, Wu S T, Jia L H, Xu L, Zhang D, Li X G, Chang R, Yang Y H, Xie L W, Zhang D P, Zhang G L, Yang S H, Wu F Y. 2021. Non-KREEP origin for Chang'E-5 basalts in the Procellarum KREEP Terrane. Nature, 600(7887): 59-63

Xu Y C, Tian H C, Zhang C, Chaussidon M, Lin Y T, Hao J L, Li R Y, Gu L X, Yang W, Huang L Y, Du J, Yang Y Z, Liu Y, He H Y, Zou Y L, Li X H, Wu F Y. 2022. High abundance of solar wind-derived water in lunar soils from the middle latitude. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 119(51): e2214395119

Zhou C J, Tang H, Li X Y, Zeng X J, Mo B, Yu W, Wu Y X, Zeng X D, Liu J Z, Wen Y Y. 2022. Chang'E-5 samples reveal high water content in lunar minerals. Nature Communications, 13(1): 5336

(本文责任编辑:刘莹;英文审校:肖保华)