



月壤样品研究进展

谷渊涛^{1,2}, 杨瑞洪³, 耿焕⁴, 王倩³, 惠鹤九^{4,5*}

1. 河南工程学院环境与生物工程学院, 郑州 451191;

2. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023;

3. 探月与航天工程中心, 北京 100190;

4. 南京大学地球科学与工程学院, 月球与行星科学研究所, 南京 210023;

5. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

* 联系人, E-mail: hhui@nju.edu.cn

2021-10-06 收稿, 2022-01-14 修回, 2022-01-17 接受, 2022-01-18 网络版发表

国家国防科技工业局民用航天技术预先研究项目(D020206)和江苏省博士后科研资助计划(2021K049A)资助

摘要 月壤是研究无大气天体表面过程和月球演化的重要样品。自Apollo时代以来,月壤的相关研究如成因、组分及性质等均已取得了重要进展,并已对早期研究成果进行了详细总结和论述。随着嫦娥5号月壤样品的返回,关于月球样品的研究在我国获得前所未有的关注,亟需总结近年来月壤研究的重点领域及相关成果。本文基于月壤形成的过程,即继承的内部物质和遭受的外部改造,从月壤记录的太空风化作用和月球地质演化两方面综述了月壤研究的前沿成果。依据外部作用(太阳风、宇宙射线、陨石等)对月壤的改造,从以下四部分内容论述了太空风化作用对月壤组成的影响,即月壤中的水、挥发分、纳米相矿物、微陨石和陨石碎片。另一方面,月壤继承的月球内部物质均可用于月球演化研究,基于此总结讨论了全月壤、火山玻璃及岩屑的研究进展。最后,根据未来建设月球科研站的需要,从矿产资源、水和能源及月壤成型等方面概述了月壤资源利用的相关研究。通过总结月壤研究的主要成果,有助于发掘月球科学的前沿领域,为我国月壤样品的研究提供科学依据。

关键词 月壤, 太空风化作用, 月球演化, 月壤资源利用

月壤(lunar soil)是月表土(regolith)的细粒部分,是固体月球与太阳系物质和能量之间的边界^[1],因此月壤是获取月球内部和外部相关信息的重要来源(图1)^[2,3]。月壤继承了下伏基岩的物质组分,可用于研究月球内部物质组成及月球的起源与演化;同时,月壤也记录了外来物质和能量的信息(如陨石、太阳风、宇宙射线等),对反演太阳系演化及宇宙射线的性质等具有重要意义。但是,月壤的这两个特性也决定了其相关研究的复杂性,主要体现在以下三方面:首先,月壤的主要物质来源极为复杂,混合了来自不同区域的物质。月壤的早期研究基本上确定了月壤是三类主要物质的混合物,

即高地岩石和角砾岩、克里普岩(KREEP)以及月海玄武岩和火山玻璃^[1]。其次,外部高能粒子可以对月壤产生重要的影响。月表的真空环境有利于月壤接受太阳风、地球风、宇宙射线的辐射及改造。太阳风和宇宙射线可以显著改变月壤的氢、碳、氮及稀有气体(氦、氖、氩)等挥发分含量和同位素组成^[1,4,5]。此外,微陨石撞击作用也能够明显改变月壤组成及性质。微陨石撞击可使月壤发生翻耕作用(gardening),改变月壤的成熟度及暴露年龄;并且微陨石这类外来物质也可以改变月壤的矿物组成和地球化学成分^[6-8]。由此可见,月壤在月球乃至太阳系的起源与演化相关研究中具有

引用格式: 谷渊涛, 杨瑞洪, 耿焕, 等. 月壤样品研究进展. 科学通报, 2022, 52: 1579–1596

Gu Y T, Yang R H, Geng H, et al. Geological processes and products recorded in lunar soils: A review (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 52: 1579–1596, doi: 10.1360/TB-2021-1039

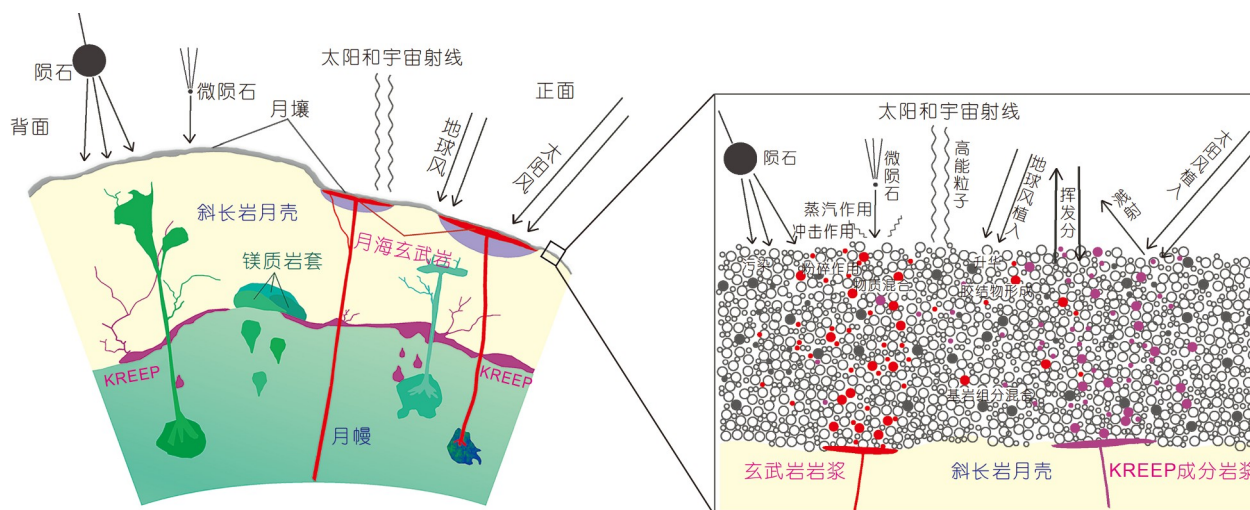


图1 月壤的太空风化作用及对内部物质组分继承的示意图. 修改自文献[2,3]

Figure 1 The complex space weathering processes that transformed materials from lunar interior to soil on the surface. Modified from Refs. [2,3]

重要的价值.

自Apollo时代以来,月壤的矿物和地球化学组成特征、物理性质、成壤过程、成熟度及其资源与环境等均取得了重要进展.月壤的主要组成矿物是辉石(斜方辉石、单斜辉石)、斜长石、橄榄石及钛铁矿,月表不同区域的月壤主要组成矿物有明显差异.嫦娥5号月壤的主要组成矿物是辉石和斜长石,而钛铁矿和橄榄石含量较少,这与典型的月海玄武岩矿物组成较为一致^[9].Apollo 16号任务是针对远离月海盆地的长石质高地进行取样的计划,因此Apollo 16号月壤的主要成分来自高地斜长岩,主要组成矿物为斜长石(可达98%)^[1].月壤在化学成分上也表现出相似的规律,嫦娥5号月壤含有较低含量的 SiO_2 和碱性($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)成分、中等含量的 TiO_2 和 Al_2O_3 以及较高含量的 FeO ,接近于月海玄武岩^[9].这些均表明月壤继承了下伏基岩的主要物质组分.此外,受陨石和微陨石的撞击、宇宙射线和太阳风的持续不断轰击、月表的大幅温差变化等因素影响,月壤具有不同于地球土壤的形成过程,从而表现出不同的物理特性^[10].与Apollo和Luna月壤相比,嫦娥5号月壤具有更小的平均粒径和中值粒径(均在 $50\text{ }\mu\text{m}$ 左右)^[9,11],意味着嫦娥5号月壤的成熟度更高.嫦娥5号铲取的月壤样品堆积密度(bulk density) ($\sim 1.2\text{ g/cm}^3$)小于Apollo月壤,而真密度(true density) ($\sim 3.2\text{ g/cm}^3$)处于Apollo月壤密度范围内,低于月海玄武岩,但高于Apollo 12号和14号月壤^[9,12].这些物理性质上的差异反映了嫦娥5号月壤具有不同的源区特征

及演化过程.

2005年之前的月球研究成果,包括月壤相关研究成果,已在*New Views of the Moon*进行了详细的总结和论述,其中文译本《月球新观》(国土资源部探月研究小组译)也已于2012出版.自2006年至今,月球研究进入了一个新阶段,取得了一系列重要成果.鉴于月壤的复杂性,本文所讨论的月壤物质主要指细粒的月表土及角砾,包括黏结物、岩屑、单矿物颗粒、玻璃(细粒的火山玻璃及撞击玻璃),以及角砾岩中的岩屑.在限定月壤范畴的基础上,基于近年月壤研究的重点,本文主要总结了两个方面的月壤研究成果: (1) 太空风化作用在月壤中的体现, (2) 月壤对月球演化研究的贡献.这些相关的总结和讨论将为后续的样品研究和月球探测提供科学依据. Apollo和Luna月壤物理性质(包括颗粒组成、密度、孔隙度、电磁性质、压缩性和抗剪性等)、月壤演化及资源概况等方面的总结已较为详尽^[1,6,12],本文不再赘述.

1 月壤的太空风化作用

太阳风、宇宙射线以及陨石撞击等作用使月壤的物质组成及性质均发生了明显变化,这些过程被称为太空风化.太空风化作用的结果是月壤变得“成熟”(即黏结物含量增加、高能粒子轨迹密度增大、太阳风注入离子浓度升高、颗粒变细),这是一个累积效应^[1].这些效应主要包括陨石撞击引发的物质破碎、成岩、熔融和蒸发作用,溅射物和撞击蒸发物的冷凝作用,太阳

系和银河系宇宙射线及太阳风离子/粒子的注入, 宇宙射线作用激发的表面原子溅射作用, 陨石物质和熔结碎屑的堆积作用^[1]。

太阳风含有大量的低能粒子(1 keV AMU^{-1} (atomic mass unit), 主要为 H^+), 通过溅射或注入影响颗粒微米范围的表面, 产生75~150 nm厚的无定形环带^[13]。虽然地球大气因磁场保护, 很难与太阳风作用发生大量丢失, 但当月球位于特定的地月位置时, 地球大气可以注入月球表面, 并与近地侧乃至远地侧的月壤颗粒发生相互作用^[14,15]。太阳耀斑和银河系宇宙射线中的高能粒子($1\text{ MeV}\sim 10\text{ GeV AMU}^{-1}$)则能穿透至月表土数厘米甚至数米的深度^[16]。宇宙射线辐射产生的核反应不仅能够改变天体样品中的挥发分组成, 也会改变金属同位素的组成^[17]。陨石撞击可导致月岩破碎成颗粒物质并相互混合, 也能使月壤颗粒发生部分熔融和蒸发, 为再沉积作用提供物质基础^[18]。由此可见, 太空风化对月壤的作用十分复杂且效应显著, 本文主要从以下四个方面论述这些外部因素对月壤的改造。

1.1 月壤中的水

自确认月球物质含水以来, 月球水(本文指月球矿物或玻璃中以分子水(H_2O)、羟基(OH)以及分子氢(H_2)存在的结构氢)的研究一直受到密切关注^[19-25]。近些年的研究表明, 月壤中的水主要有三个来源: 一是月球内部的水, 这些水已在月球不同岩石的磷灰石、火山玻璃、橄榄石包裹体和斜长石中测得^[24,25]; 二是太阳风粒子注入形成的水^[26,27]; 三是宇宙射线核反应形成的水^[28,29]。月壤原岩中来自月球内部的水主要以分子水(H_2O)、羟基(OH)甚至分子氢(H_2)的形式存在于名义上无水矿物(如橄榄石、辉石、斜长石)、火山碎屑物(如火山玻璃珠、橄榄石包裹体)及含水矿物磷灰石中^[25]。名义上无水矿物和火山碎屑玻璃中的水含量一般较低, 如月球长石水含量为不超过21 ppm^[23,30] ($1\text{ ppm}=1\text{ }\mu\text{g/g}$), 火山玻璃珠水含量一般小于75 ppm^[21,29,31,32]。磷灰石是目前测得的月球物质中水含量最高的物相, 其水含量可高达1.67%^[33]。由于月球内部水的研究进展已有详细介绍^[25], 本文主要讨论月壤颗粒中外来来源的水。

氢同位素比值(D/H 或 δD)是判断月球水来源的常用指标, 但是宇宙射线成因的 D/H 随时间变化, 使得月球样品 D/H 的解译复杂化。宇宙射线可以改变返回的地外样品和暴露年龄较长的陨石中原生水的氢同位素比值^[2]。准确的宇宙成因D和H的产率对于校正宇宙射线

贡献的 D/H 比值至关重要, 尤其是D的产率。因此, 在利用 D/H 判断月表水的来源时, 首先要准确知道月球表面物质D的产率。月表宇宙成因D的丰度取决于宇宙射线的辐照时间和生成D的速率, 最新估算的宇宙成因D的产率为 $(2.171\pm 0.111)\times 10^{-12}\text{ mol/(g Ma)}$, 是以往估算产率 $((0.92-1)\times 10^{-12}\text{ mol/(g Ma)})$ 的两倍多^[28]。因此, 宇宙射线辐射产生的D可显著改变长期暴露在月球表面宇宙射线下的贫水月球样品($\leq 50\text{ ppm}$)的 D/H 值, 如火山玻璃珠和斜长石^[24,29,32]。月壤撞击熔融玻璃的氢和锂同位素研究显示D和 ^6Li 之间存在明显的相关性, 表明这些撞击熔融玻璃中几乎所有的D都是宇宙射线粒子的核反应产生的^[27]。但是, 对富水样品($\geq 1000\text{ ppm}$), 如橄榄石熔体包裹体和磷灰石, 则影响不大^[28,29,34]。月壤均位于月球表面, 因此宇宙射线成因氢同位素的校正必不可少, 而校正后的 D/H 比值可以用来确定月表水的来源。

月表土与玄武岩中的易挥发元素(氢、碳、氮)含量对比显示月表土的氢含量远高于玄武岩(图2)^[35], 证实了月壤中氢具有非常明显的外部来源特征。太阳风粒子注入形成的水一般表现出D的高度亏损, $\text{D/H} < 10^{-7}$ 或 $\delta\text{D} \approx -1000\text{‰}$ ^[36]。Apollo样品中的撞击熔融玻璃含有200~300 ppm的 H_2O , 远高于火山玻璃珠中的 H_2O 含量。另外撞击熔融玻璃的 $\text{D/H} < 10^{-4}$, 这表明撞击熔融玻璃中的氢可能有一半或更多来自太阳风注入, 少量是宇宙射线高能粒子的核反应产生, 还有一少部分可能来自彗星或陨石^[26]。行星际辉石颗粒边缘无定形带中小囊泡的水被证明是太阳风粒子作用的产物^[13], 但是在月壤矿物颗粒的小囊泡中并没有明确地发现水^[37]。月球矿物绘图仪(M³)的近红外反射探测表明月表水的丰度随纬度而增加, 可达500~750 ppm, 并且含水量与月壤成熟度呈正相关, 这与太阳风注入氢是月球表面水的主要来源这一结论相一致^[38]。通过月壤中氮-氩同位素数据估计的月表微陨石撞击通量显示含水宇宙尘埃的持续涌入可能是过去1000年来月球表面重要的水源, 但陨石撞击、光解和溅射等月表过程可能会降低这个水源的重要性^[39]。

太阳风粒子注入月壤颗粒形成的水由于其特殊成因表现出不稳定性, 在月表真空环境中受温度和辐射的驱动可以发生分解、逃逸和迁移^[40]。月球表面的水含量在一天内变化可达~200 ppm, 月表羟基的形成和迁移被证实是动态的, 很可能是太阳风溅射和/或其他温度相关过程的结果, 并显著影响月表水的分布^[38]。由

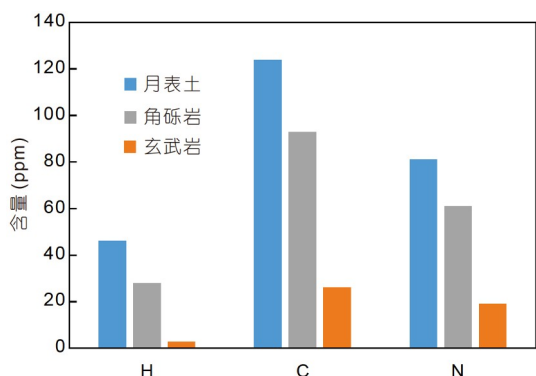


图2 月表土、角砾岩与玄武岩中氢、碳、氮元素含量对比. 数据来源于文献[35]

Figure 2 Comparison of hydrogen, carbon and nitrogen contents between lunar surface materials and basalts. Data are from Ref. [35]

于月球全球性的岩浆活动很早就已经停止^[3], 因此不同年代形成的月壤颗粒可能受到了不同时代太阳风粒子的注入, 而古老的月壤颗粒可能记录了太阳风粒子的长期演化史. 此外, 由于月壤成分的复杂性(既含有岩浆结晶产物, 也存在撞击熔融玻璃、火山玻璃)及不同来源OH/H₂O在月壤中分布的差异性, 月壤颗粒中水的来源仍是未来月球研究的重要课题.

1.2 月壤中的挥发分

近年来月球科学研究的一个关键驱动力是确定月球表面的水冰和挥发物的来源, 并了解地-月系统中水和挥发分的起源^[41,42]. 除氢以外, 月壤还含有多种其他易挥发成分, 如碳、氮、氟、硫、氯及稀有气体(氦、氖、氩等). 与氢类似, 月壤中挥发分的来源也主要有月球内部、太阳风或宇宙射线^[43-45], 但不同挥发分在月壤中的含量及主要来源均不相同.

月表土中的碳含量可高达280 ppm, 不同探测任务返回的月壤的平均碳含量为100~150 ppm; 月壤和撞击角砾岩中的氮含量在4~209 ppm之间, 比月球原生岩石中的氮含量高1~2个数量级^[34,46]. 月表土和角砾岩中的碳和氮含量明显高于玄武岩(图2), 并且月表土中碳和氮丰度存在耦合增加, 表明碳和氮可能有共同来源^[34,46-48]. 月壤的碳同位素分析显示月壤比月球玄武岩($\delta^{13}\text{C}$ 为~-25‰)更富集¹³C, 其平均 $\delta^{13}\text{C}$ 为~10‰^[34,49]. 相比于现在的太阳风($\delta^{15}\text{N}$ 为-407‰±7‰)和初始太阳($\delta^{15}\text{N}$ 为-383‰±8‰)的氮同位素特征, 月壤中的大部分氮($\delta^{15}\text{N}$ 在-54.5‰~+123.3‰之间)很可能来自月球内部($\delta^{15}\text{N}$ 在+100‰~+160‰之间), 少量来自太阳风粒子注入^[38]. 另一方面, 月表玄武岩的碳、氮同位素分析表明

月表物质既含有源于月球内部的碳和氮, 也含有宇宙成因(由散裂反应形成)的碳和氮^[50]. 这些同位素数据证实了月壤中的碳和氮是重的月球内部组分和轻的太阳风注入组分以及宇宙成因组分的混合^[14,38,51-53].

氟的研究相对较少, 月壤中氟的含量为9~520 ppm, 与其他挥发分一样, 氟在月壤中的含量比岩石中的高^[34], 说明月壤中的氟有外部来源. 月壤中氯的含量为0.6~270 ppm, 与月壤的成熟度没有明显关系^[30,54]. 以角砾岩66095为例, 氯的分布很不均匀, 与针铁矿和磷酸盐的分布关系密切, 其中针铁矿的氯含量可达0.90 wt%~4.18 wt%^[55,56](wt%, 质量分数). 另外, 月壤中的 $\delta^{37}\text{Cl}$ 为+5.6‰~+15.7‰, 与月壤的成熟度无明显关系^[54,55]. 因此, 月壤中氯同位素分馏很可能不是源于月球的外部作用, 而极有可能是月球岩去气过程导致的^[54,55].

月表土及角砾岩中的硫含量为470~1500 ppm, 与月海玄武岩中的硫含量相近^[46,57]. 角砾岩中的富硫化物碎屑的硫含量可达0.4 wt%~1.24 wt%, 明显高于角砾岩的全岩硫含量^[58,59]. 月海玄武岩的硫同位素比较均一($\delta^{34}\text{S}$ = +0.58 ± 0.05‰), 而月壤富集硫的重同位素($\delta^{34}\text{S}$ 在4‰~17‰之间), 并且成熟月壤比不成熟月壤(以 I_s/FeO 为指标)更富集硫的重同位素^[34,60]. 月壤中硫的重同位素富集与其成熟度的相关性证实了陨石撞击后的蒸发作用或离子溅射过程可导致硫同位素分馏, 其中轻同位素发生丢失^[61,62].

早期研究证明月球返回样品所含的稀有气体(He、Ne、Ar等)是高能粒子注入的^[1,63,64], 其来源主要是太阳风和宇宙射线, 这两个来源的贡献改变了暴露在月球表面的月壤和岩石的稀有气体特征^[1,3]. 月壤和风化角砾中的稀有气体含量远高于玄武岩(图3), 证实了太阳风和宇宙射线对月壤中稀有气体的贡献. 月表土中稀有气体的同位素组成也有明显差异, ³He、²¹Ne和³⁸Ar的浓度极低(~10⁻¹² mol/g), 而放射成因和捕获构成的⁴He、²²Ne、³⁶Ar和⁴⁰Ar具有相对较高的浓度^[2,65]. 月壤的氖同位素组成表明稀有气体(²¹Ne/²²Ne = 0.0313~0.0333, ²⁰Ne/²²Ne = 11.48~12.43)可能主要源于太阳风(²¹Ne/²²Ne_{sw} = 0.03361±0.00018, ²⁰Ne/²²Ne_{sw} = 14.001 ± 0.042)注入^[53,66]. 对于一些较大的矿物颗粒, 随深度增加, 矿物内部通过太阳风注入的稀有气体减少, 而宇宙射线成因组分增加, 但总氦的浓度显著降低. 此外, 太阳系宇宙射线(Solar cosmic rays, SCR)的氖同位素产率明显高(4倍)于银河系宇宙射线(galactic cosmic rays, GCR), 对于³He和³⁸Ar也是如此^[2]. 月壤中不同物

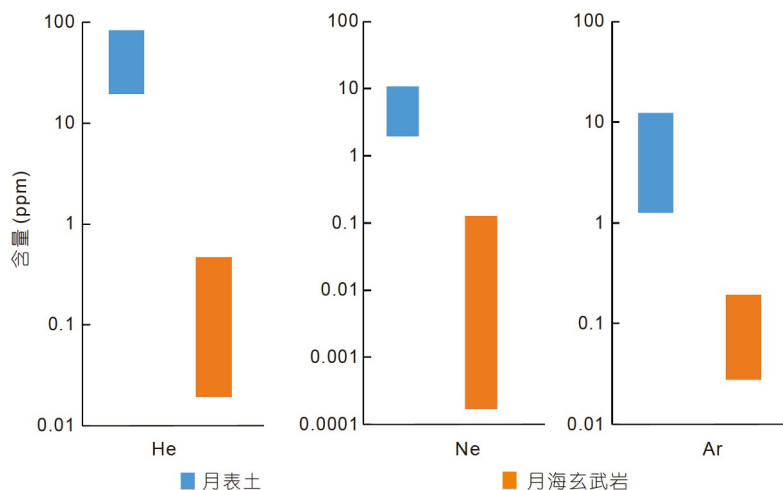


图3 月表土与月海玄武岩中稀有气体含量对比。数据来源于文献[46]

Figure 3 Comparison of noble gas contents between lunar surface materials and mare basalts. Data are from Ref. [46]

质的稀有气体含量也有差异,硅酸盐玻璃受太阳风辐照影响最小,而铬铁矿和钛铁矿的颗粒边缘缺陷丰富,可捕获较多的氦^[36]。

月壤中的氧主要来自月球内部,即月球原岩,也存在少量来自太阳或地球的氧^[67,68]。月壤中金属颗粒的氧同位素数据显示太阳风粒子(能量粒子)中的氧可注入到金属颗粒表层几百纳米的深度,而地球风可将地球大气中的氧注入到月表土几十纳米的深度^[67,69]。月壤颗粒贫¹⁶O的同位素组成与地球上层大气的氧同位素组成相似,表明地球氧可能改变了月壤颗粒表层中的氧同位素组成,反之这些月壤颗粒也可能记录了数十亿年来地球大气层的氧同位素组成变化^[67]。

1.3 纳米相矿物

月壤太空风化作用形成的纳米相铁(npFe)在月壤中主要有两种赋存位置:颗粒表面的无定形环带和撞击熔融玻璃^[1,16]。太空风化作用使月壤颗粒表面形成无定形环带,这些环带富含铁纳米相包裹体,例如npFe⁰和npFeS^[16,70]。铁纳米相包裹体可能有两种形成方式^[71]:月壤硅酸盐/氧化物颗粒经太阳风注入氢的还原作用形成^[72];太阳风粒子溅射或微陨石撞击引发蒸汽沉积作用所形成^[73,74]。月壤斜长石颗粒表面npFe的铁同位素组成表明,相比于斜长石颗粒、月表土及火成岩,颗粒表面无定形环带中的铁更富集重同位素($\delta^{56}\text{Fe}$ 可达0.71‰),并且越成熟、越细粒的月壤越富集铁重同位素^[75,76],这可能是因为成熟细粒的月壤颗粒比表面积更大,且积累npFe的时间更长。这也证明了大量存在的

npFe可以导致月壤比火成岩具有更高的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 。另一方面,无定形环带中铁重同位素的富集可用热逃逸模型来解释,即蒸发相中铁的轻同位素更易逃逸至太空(蒸汽温度可达2750~3000 K)。因此, npFe中铁同位素较重证实了npFe起源于太阳风粒子溅射/微陨石撞击产生的蒸汽沉积过程,而非太阳风注入氢导致的还原作用^[71]。月壤撞击熔融玻璃中的npFe可能来自于颗粒表面的无定形环带,通过之后的撞击熔融过程进入玻璃黏结物^[77]。除npFe外,硅酸盐颗粒表面可出现硅的氧化物纳米颗粒(npSiO_x),其大小约为10~25 nm,一般比颗粒表面的npFe(直径范围约为1~10 nm,平均为~3 nm)大,但撞击熔融玻璃中的npFe颗粒尺寸则大得多,直径可达数百纳米^[7,78]。npSiO_x常与npFe共存,二者成因也较为类似,均可形成于微陨石撞击产生的熔体中^[79]。

月壤颗粒表面的大多数纳米相包裹体是金属铁(npFe⁰),但npFe的氧化态研究证实月壤颗粒表面的富铁包裹体中有一部分铁被氧化了,Fe²⁺和Fe³⁺都存在于这些纳米相中^[78,80,81]。npFe的氧化程度与月壤成熟度之间的关系表明随着月壤的成熟度增加,氧化态呈增加趋势,证实了太空风化可以氧化npFe。不同矿物的npFe研究表明,铁的氧化态与矿物密切相关,低铁含量矿物(如斜长石)表面的npFe⁰更易于氧化^[82]。纳米相包裹体颗粒外部和内部的氧化态也有差异,外部(平均~3 nm)主要由Fe²⁺组成,而内部主要由Fe⁰组成。不成熟月壤中胶结质玻璃的npFe颗粒大量存在这种核还原/壳氧化结构^[81]。因此, npFe的氧化过程可能是氧原子从包围npFe颗粒的富氧基质扩散到这些纳米颗粒表面所驱动的。

在长时间的氧化条件下,铁原子可能从纳米颗粒核部向外扩散到表面与含氧玻璃基质发生氧化还原反应,导致npFe颗粒核部产生空位,形成空心核^[81,83]。这种npFe空心颗粒主要出现在成熟的月壤中,如月壤79221。npFe周围硅酸盐玻璃中的氧可将Fe⁰氧化为Fe²⁺,以FeO的形式存在,但这种氧化过程并不足以形成在一些纳米相中观察到的Fe³⁺。如果这种氧化机制可以形成Fe³⁺,则周围玻璃基质中也应观察到大量的Fe³⁺,但事实并非如此^[81]。另一种可能更为合理的机制是太阳风将氢注入月壤颗粒后,部分Fe²⁺可被氢还原形成Fe⁰,部分Fe²⁺可与H₂O(氢与氧结合形成)反应形成Fe³⁺^[81],这和月壤胶结质玻璃中存在水相一致^[26]。

月壤矿物颗粒表面npFe的大量存在可导致月表光学性质的变化,在可见光到近红外(visible and near-infrared, VNIR)波长范围内光谱会变暗和变红,矿物特定吸收带发生衰减^[7]。太空风化作用引起的月球表面光学变化高度依赖于纳米相颗粒的大小和数量。光谱变红是<~10 nm npFe颗粒导致的,而变暗是较大的(>~50 nm)颗粒造成的^[84,85]。因此,成熟度指标 I_s/FeO 也体现了npFe在太空风化中的重要角色, I_s 反映了npFe在4~33 nm大小范围内的丰度,该比值与光学性质和暴露测量值相关,如太阳风注入粒子的浓度^[1,82]。

1.4 微陨石和陨石碎片

月球保存着近40亿年撞击作用的记录,撞击作用对月球的改造主要体现在撞击坑形态、月外物质、月球物质的抛射以及撞击引起的变质和熔融作用。月表大型撞击作用(月海撞击坑的形成)主要发生在30~40亿年范围内,这些早期撞击体通量在30亿年前很大,随时间延续迅速减小;在之后的30亿年期间,撞击体通量相对恒定^[86,87]。月表残存的陨石碎片为地-月系统的撞击体来源和通量提供了直接依据。Apollo 16号返回的角砾岩中古老的球粒陨石(>34亿年)碎片一般含有较高的镁质组分,指示了早期陨石可能有较一致的源区,其也是月海盆地形成阶段常见的地-月系统撞击物源区,但较年轻的陨石碎片(<34亿年)成分则更为复杂,如月壤12037中的碳质球粒陨石、月壤10084中的铁陨石、月壤15601中的顽辉石球粒陨石等^[44,86,88,89]。

近30亿年来月球的大型撞击体通量减小,而月球的岩浆作用也急剧减少至基本消失,微陨石撞击(通过粉碎、熔融和汽化)成为月球表面风化的一个主要机制^[87]。微陨石是直径不足1 mm的星际物质(“尘埃”),它

们的撞击作用能对月球表面产生重要影响(图1)。每年约有80 g/km²的微陨石降落至月球表面,这样的撞击通量可使月表岩石和土壤受到严重侵蚀,侵蚀速率可达1~2 mm/Ma^[87]。微陨石撞击主要搅动月表土最上部的月壤,因此控制了月表1 mm范围内月壤颗粒的停留时间^[4]。微陨石撞击不仅导致月壤颗粒的破碎和混合,同时也使得月壤发生部分熔融和挥发,为再沉积作用提供挥发性物质^[18]。因此,微陨石在一定程度上改变了月壤的化学成分及性质。月壤在月表暴露的时间越长,微陨石的翻耕作用越明显^[6],并且随着月壤成熟度的增加,黏结玻璃的丰度总体上呈上升趋势,而矿物颗粒数量普遍减少(图4),表明微陨石撞击对月壤的强烈改造作用。由此可见,微陨石的持续撞击一方面可为月球带来月外物质,改变月壤的成分及同位素特征,另一方面也会导致月球表面挥发性物质的逃逸以及可能的再沉积作用^[5,44]。

月球表面的太空风化作用对月壤的改造全面且复杂,太阳风、宇宙射线及微陨石撞击作用改变了月壤的物理、化学特性。值得注意的是,太空风化作用对月壤中的常见物质,如火山玻璃、撞击熔融玻璃、矿物颗粒等,有不同的效应^[36]。因此,月壤的太空风化作用研究可将这些不同成分之间的异同点联系起来,以探讨太空风化对月壤改造的综合效应。

2 月壤对月球演化研究的贡献

月球被认为是由原地球和一个火星大小的原行星(Theia)之间发生碰撞溅射出的物质经过撞击吸积形成,这个大撞击模型比较合理地解释了月球相对于地球的低铁含量和挥发性元素的亏损^[90,91]。而地球和月球的很多元素具有一致的或相似的同位素组成(如氧、镁、硅、钾、钙、钛、铬等)^[92~98],证实了地球和月球之间的成因关系。这些研究可以用月球原岩,也可以利用月壤中的岩屑。相比于月海玄武岩、斜长岩等岩石,全月壤更能代表其形成区的月表平均成分。Apollo和Luna计划的大部分月壤样品含有三个成分类别的物质,所有的月海月壤均含有非月海物质,而高地月壤则含有不同含量的月海物质^[1]。月壤的稀土元素含量显示返回的月壤样品继承了月球的内部物质,即长石高地物质、月海玄武岩和KREEP岩(图5)^[99~120]。月壤的全岩分析、火山玻璃以及岩屑均可体现月壤对月球内部物质的继承,其相关研究对于探索月球演化有其独特意义。

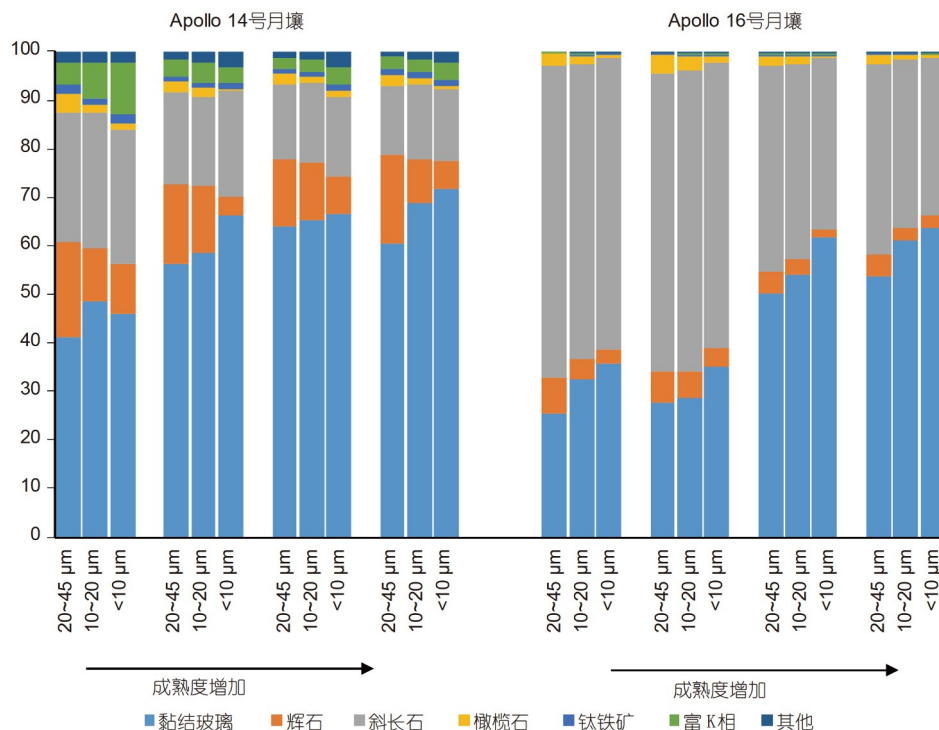


图4 高地月壤细粒组分的成分特征. 修改自文献[6]

Figure 4 Compositions of fines in lunar highlands soils. Modified from Ref. [6]

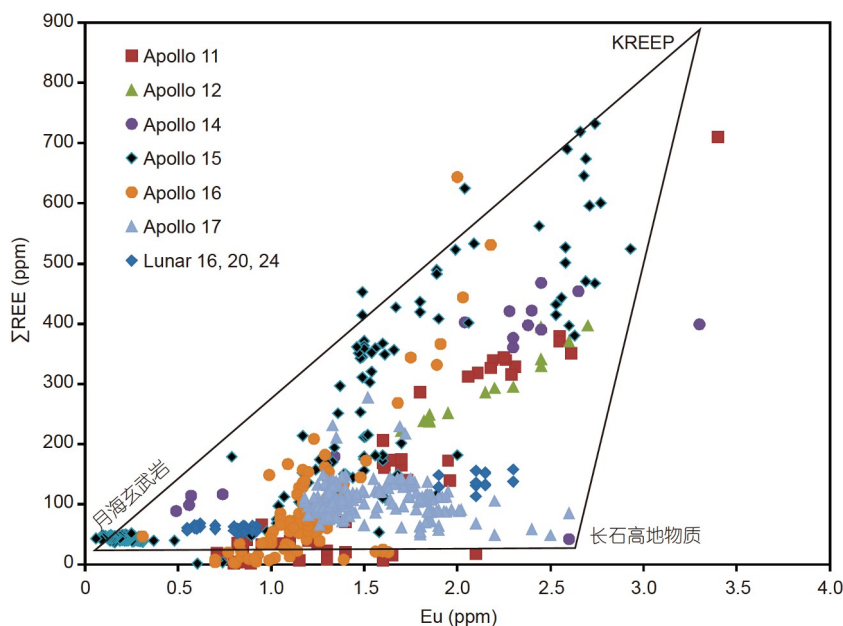


图5 以铕和稀土元素总含量绘制的月壤成分三角形图. 数据来源于文献[99~120]

Figure 5 The mixing triangle of lunar soils using Eu and ΣREE concentrations. Data are from Refs. [99~120]

2.1 月壤的全岩分析

20世纪70~90年代进行的月壤全岩成分分析获得了大量的月壤化学成分数据^[1]. 月壤的全岩分析最初主

要应用于月壤成因及物理性质(如粒度、成熟度等)研究. 不同地点返回的月壤样品成分有明显差异(图5), 因此可根据化学成分及采样区地质特征判断月壤成因.

Apollo 15返回的月壤的稀土成分覆盖了大部分值域(图5),这主要是因为其着陆点位于高地和月海交界区域,月海和非月海物质比例差异可以很大.嫦娥5号着陆区位于玄武岩地体,月壤的全岩分析表明其化学成分接近于月海玄武岩,证实其主要由本地玄武岩的风化作用形成^[9].月壤成分随成熟度的变化关系体现了月球表面的撞击混合作用.成熟度低的月壤(如月壤12032、15531、61221、67511)与附近的成熟月壤在成分上有明显差异,而相同区域(如Apollo 12和16着陆区)的成熟月壤则具有相似的化学成分^[1].月壤成分随粒径的变化则体现了撞击混合过程、矿物属性及熔结碎屑的分馏作用^[11].月壤FeO和MgO的丰度随粒度减小(90~10 μm)而降低,而CaO、 Al_2O_3 、 Na_2O 和 K_2O 的丰度则增加,这一趋势在月海月壤和月海月壤中均有体现,反映了长石更易被撞击作用粉碎^[6,121,122].不同的是随粒度减小,两种月壤的熔结物表现出不同的变化趋势:月海月壤中的熔结物更富集斜长石,而高地月壤中的熔结物则更富集镁铁质成分^[6].上述研究表明月壤成分既依赖于下伏岩体单元的成分特征,也受撞击混合作用的影响.

随着化学成分及同位素组成分析精度的提高,月壤的全岩分析对追踪月壤成因和探索月球演化有重要价值.Luna计划返回的月壤及其单矿物颗粒(橄榄石、辉石、黏结物)的铁同位素分析表明成熟月壤的细粒组分和粗粒组分之间的铁同位素组成存在明显差异,但是亚成熟月壤和未成熟月壤的铁同位素差异较小^[123].黏结玻璃的 $\delta^{57}\text{Fe}$ 比单矿物的高,说明黏结玻璃中含有大量的纳米铁,且在撞击熔融过程发生了铁的部分蒸发.此外,化学成分相当于极低钛玄武岩的Luna 24月壤的粗粒组分 $\delta^{57}\text{Fe}$ 值为 $0.08\text{‰} \pm 0.04\text{‰}$,明显低于高钛和低钛玄武岩的 $\delta^{57}\text{Fe}$ 值,与镁质岩套的 $\delta^{57}\text{Fe}$ 值几乎相同^[123].这一结果与月球岩浆洋分异过程中的铁同位素演化模型一致,即重铁同位素是由物质源区决定的,而非岩浆演化过程的同位素分馏导致的^[123,124].随着岩浆结晶过程的进行, $\delta^{30}\text{Si}$ 呈现出逐渐增加的趋势($\delta^{30}\text{Si}$ 与 SiO_2 含量呈正相关),表明岩浆的结晶分异可造成硅同位素分馏^[125],这种分馏效应有助于研究月壤硅酸盐矿物的来源.钙在行星吸积和早期分异过程中不会进入行星内核,且受汽化作用影响较小,因此其同位素分馏可能并非由行星内部分异过程或蒸汽作用引起^[126-128].月球玄武岩的 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 比斜长岩大,且 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 与CaO、 Al_2O_3 含量呈负相关,而与MgO含量呈正相

关^[128],表明月壳和月幔分异可造成钙同位素分馏.综上所述,对比性地分析月球各岩体单元(如高/低钛玄武岩、KREEP岩、高地斜长岩等)表面的月壤硅、钙、铁等同位素特征有助于探讨月壤的成因及物质来源.

2.2 火山玻璃

月壤中的火山玻璃珠是火山喷发产物.火山玻璃珠中挥发分的高精度分析首次证明月球内部的高挥发性元素(包括水)并没有完全丢失,确定了来自月球深部的原始岩浆含挥发性物质^[21,31,129,130].月壤中各类火山玻璃珠和橄榄石熔体包裹体中挥发性元素的同位素分析表明月球岩浆中氢、碳、氟、硫、氯的同位素组成与地球玄武岩浆接近,因此地球和月球内部的挥发性元素可能有共同的起源^[29,130].

月球和地球易挥发元素的含量差异,证实了月球早期经历了严重的去气作用.火山玻璃珠核部到边缘的挥发分含量(水、氯、氟、硫)急剧减少表明挥发分来自月球内部并受岩浆喷发过程去气作用的影响^[21].扩散去气模型计算出玻璃珠损失了约19%的硫、45%的氟、57%的氯和98%的水^[21],可见初始岩浆是相对富水的.挥发分的丢失量和这些元素的键能一致,氟、硫、氯的键能强,挥发性较弱,而氢、碳的键能弱挥发性较强.火山玻璃珠的去气程度也取决于它们的冷却速度,Apollo 17橙色玻璃珠的加热热容变化,显示其冷却速率为 101 K/min ^[131].这个冷却速率反映了月球火山玻璃珠可能是在火山爆发释放的气体介质中冷却的,而并非在真空中冷却,意味着月球早期(35亿年左右)可能存在短暂的大气层^[131].火山玻璃珠中的挥发性元素含量均低于全月壤或撞击熔融玻璃(图6),一方面反映了岩浆演化过程中的去气作用,另一方面也可能是因为月壤中存在大量的太阳风注入的挥发分(如氢和碳),从而导致全月壤和火山玻璃中氢和碳的差异比较显著.因此,研究月球挥发分演化时最好能够同时考虑到水和其他多种挥发分.

火山玻璃珠内挥发分的同位素特征一般不会被月球浅层物质污染而发生改变^[129].因此,月壤火山玻璃珠和橄榄石熔体包裹体中挥发分的同位素特征可用于探索月球岩浆的结晶分异过程.Apollo 15和17号任务返回的火山玻璃及橄榄石熔体包裹体中的硫同位素组成显示 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围很大($+1.6\text{‰} \sim -14\text{‰}$),且 $\delta^{34}\text{S}$ 值与硫含量呈正相关^[129]. $\delta^{34}\text{S}$ 大幅变化的原因不可能是太阳风注入、火山玻璃珠表面的气体凝结或宇宙射线的

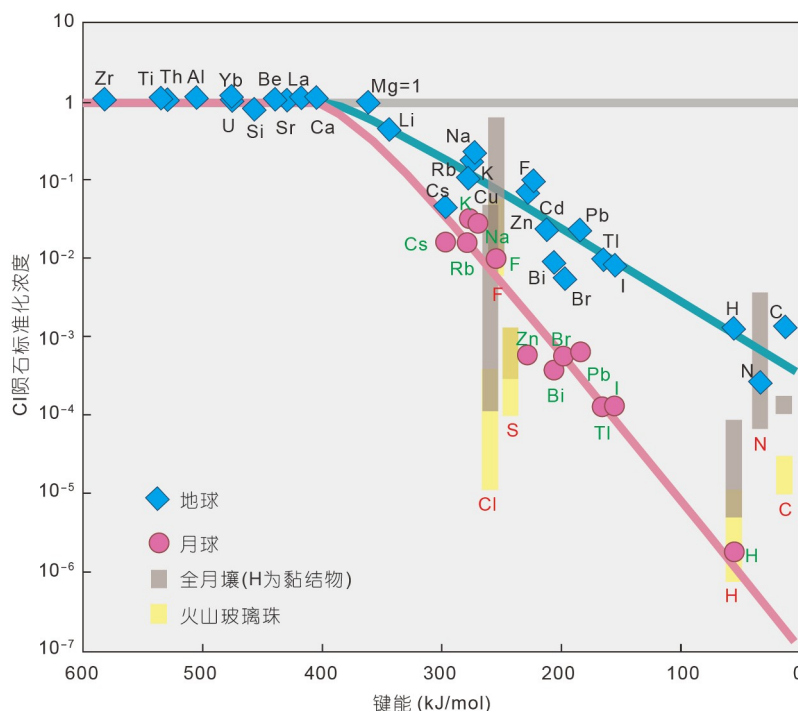


图6 月球全月壤与火山玻璃珠中的挥发分含量对比。蓝色线代表地球的元素含量, 红色线代表月幔的元素含量。地球数据源于文献[132], 月球数据源于文献[133]; 全月壤及火山玻璃珠中的挥发分含量源于文献[21,26,34,46]; 键能依据Albarède等人^[134]的选择(源于文献[135]), 挥发分含量进行了CI陨石标准化^[136]

Figure 6 Comparison of volatile contents between lunar soils and volcanic glass beads. The blue line represents the element contents of Earth, and the red line represents the element content of lunar mantle. The Earth data is derived from Ref. [132], and the lunar data is derived from Ref. [133]. The volatile contents in lunar soil and volcanic glass beads are derived from Refs. [21,26,34,46]. Bond energy is according to the selection of Albarède et al.^[134] (from Ref. [135]), and volatile contents was normalized to CI meteorite^[136]

散裂反应。太阳风注入深度和玻璃珠表面的气体凝结深度均小于 $2\text{ }\mu\text{m}$ ^[137~139], 而同位素分析均在玻璃珠核部, 距离玻璃珠表面 $70\sim 240\text{ }\mu\text{m}$ 。此外, 尽管散裂反应对 $\delta^{33}\text{S}$ 和 $\delta^{36}\text{S}$ 有一定影响, 但并没有检测到散裂反应对 $\delta^{34}\text{S}$ 产生影响^[60]。火山碎屑沉积物中的硫同位素组成的最大值^[129]与月海玄武岩较均一的硫同位素组成($\delta^{34}\text{S} = +0.58\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$)^[60]一致。因此, 月球岩浆的硫同位素特征很可能受多个岩浆过程影响, 包括月核的分离、岩浆洋的结晶分异作用以及岩浆形成、运输和喷发过程中的去气作用^[129]。

2.3 岩屑

月壤中的岩屑主要源于原地的月球岩石, 记录了原岩形成的相关信息。部分岩屑也可能在其他位置形成, 之后在撞击作用下发生纵向/侧向运移至本区域^[140]。地球上为数众多的月球角砾岩陨石, 尽管其形成源地不能确定, 但它们的成分代表着其源地点的月壤成分, 其中的岩屑可为我们提供大量月球未采样

区的信息^[141]。

关于月球角砾岩陨石中的斜长岩岩屑研究发现, 其主微量元素含量变化与经典的月球岩浆洋模型并不一致^[8]。微量元素分析显示单一岩浆的结晶分异作用难以形成稀土元素丰度差异高达40倍的高地斜长岩, 暗示着高地斜长岩的形成与不同源区的物质相关, 即月幔部分熔融熔体以及urKREEP熔体交代原始斜长质月壳形成了高地斜长岩^[8]。这个模型同时很好地解释了斜长岩年龄和初始 c_{Nd} 较大的变化范围^[142,143]。月球角砾岩67215中斜长岩岩屑的岩石学、地球化学和同位素年代学研究显示该岩屑与月球高地亚铁斜长岩套有明显的岩石学和地球化学亲缘关系, 其Sm-Nd同位素年龄为 $4.46 \pm 0.04\text{ Ga}$, 这很可能是亚铁斜长岩的最早结晶年龄, 为早期月壳的凝固提供了可靠依据^[144]。岩屑的矿物组成对于探索其成因及同位素系统是否受到其他事件扰动十分有用。Apollo 14角砾岩中斜长岩岩屑的石英和锆石主微量元素及同位素分析发现该岩屑可能来自地球, 或者形成于40亿年前月球上 $30\sim 70\text{ km}$ 深的

一个异常氧化的岩浆环境^[145]。角砾岩14303和14083中长石质岩屑的Pb-Pb同位素等时线年龄约为3.92 Ga, 但其中的锆石颗粒显示结晶年龄为4.33~4.35 Ga, 这表明岩屑在雨海撞击形成过程中发生了U-Pb同位素体系重置^[146]。部分岩屑的克里普源的²³⁸U/²⁰⁴Pb值高达6000~6500, 明显高于年轻克里普玄武岩^[147], 表明月球克里普源的成分变化很大, 可见关于月球长石质岩屑的研究也可用于追踪月幔成分的差异性特征^[146]。

尽管Apollo计划返回了大量的月海玄武岩, 但月壤中的玄武岩岩屑在研究月球岩浆的多样性方面有不可替代的作用。月球玄武岩可分为橄榄石、辉石、钛铁矿及长石质玄武岩^[148]。玄武岩岩屑的岩石学和主微量地球化学分析显示月壤12003中也含有橄榄石、辉石和钛铁矿玄武岩, 以及极少的长石质玄武岩^[149]。月壤12023中的玄武岩岩屑成分差异也十分明显, 其中一个岩屑与Apollo 12玄武岩类型在矿物学和成分上均有不同, 其橄榄石中稀土元素含量较低^[149]。另外两个岩屑的Mg#有明显差异, 也有岩屑与长石质玄武岩成分相似, 证实了月壤的成分差异可能是由不同的玄武岩熔岩流混合形成^[149,150]。嫦娥5号月壤中玄武岩岩屑的最新研究显示月球在20亿年前仍存在岩浆作用, 造成月球火山活动长期持续的原因并非源区富集放射性生热元素导致月幔部分熔融^[151-153], 也不是因为月幔含水量高而导致熔点降低^[154], 因此需要其他机制来解释这一科学发现。综上所述, 月壤中的玄武岩岩屑具有化学成分的多样性, 可为系统性研究月幔演化提供重要样品。

月球内部物质在全月壤、火山玻璃珠及岩屑中均有所体现。由于月壤组分类型多样, 在利用月壤探索月球内部物质的相关信息时, 可对月壤中的不同类型物质进行相应研究。火山玻璃珠可用于分析月球早期岩浆去气作用和挥发分内部来源方面的研究, 岩屑、全月壤分析则对于探讨月壤成因、物质来源及月球表面过程有重要的指示作用。

3 月壤的资源利用

月球资源开发是进一步探测火星乃至太阳系的关键一步, 人类全面进入太阳系探测时可利用月球表面的原材料^[155]。月壤作为月球最表层物质, 与下伏“基岩”相比, 其浅表、未固结、细粒属性使月壤更易于获取和利用^[1]。月壤资源根据其应用方向可分为两类: 矿产资源, 如铁、钛、镁、铝及稀土元素等; 水和能源, 如氧、氢、氦及核能(铀、钍)等。本文基于月壤资源原

位利用探讨了各种月壤成型技术的特点和可行性。

3.1 矿产资源

月壤主要由硅酸盐玻璃以及各种岩石、矿物碎片组成, 其成分范围从玄武岩到斜长岩, 可包含少量陨石成分, 其化学成分主要由SiO₂、Al₂O₃、FeO、TiO₂、MgO和CaO这6种氧化物构成, 具有极大的提取潜力^[156-158]。其中, 部分矿产资源如钛、铁、铝等的提取可应用于月球基地建设、空间技术发展、生活基础等方面, 其副产物氧气和人类所必需的水也可从中获取^[156,158]。大多数矿产资源并没有在月壤中高度富集, 以钛为例, 月壤的4种主要组成矿物(橄榄石、辉石、斜长石、钛铁矿)中只有钛铁矿含有超过50%的TiO₂, 辉石可含有少量的钛, 而橄榄石和斜长石几乎不含钛^[155,159]。因此, 从月壤中提取金属矿产时, 应注意按矿物类型提取, 可从钛铁矿中提取钛、铁, 从橄榄石中提取镁, 从辉石中提取锰、铁、铬等。

月壤含有一定的稀有金属资源, 如钍、稀土、锆等^[1,12,155]。月壤中的这些元素可能主要源于月球的克里普岩, 磷酸盐矿物可能也是稀土元素的来源之一。例如, 白磷钙矿含高达4%的Ce₂O₃^[12,155]。目前关于月壤稀土元素提取的研究较少, 且月壤中稀土元素分布不均(稀土含量与月壤分布区域关系密切), 多数地区较为贫乏^[1,155]。需要指出的是, 目前月壤矿产资源仍处于探索阶段, 其原位提取和利用的难度极大, 尚不具备开发前景。

3.2 水和能源

月壤含有较多的太阳风注入的挥发分, 其中氢可能是月球上最重要的元素之一, 决定了水的来源^[155]。实验表明, 太阳风成因的氢和氦可通过将月壤加热至适当温度(350~600°C)而提取出来, 氢一旦被释放出来, 就可能与月壤中的钛铁矿发生反应生成水^[160,161]。月球两极永久阴影区存在大量的水冰资源, 这些水冰资源可能来自于太阳风成因水, 由于受到月表温度控制而发生迁移, 部分最终在月球永久阴影区中保存下来^[162,163]。从这些区域提取水应该比从月壤中提取氢要简单一些, 需要的能量也更少^[155]。

长期深空探测的未来将取决于空间生产能力, 特别是氧气的生产能力^[156]。钛铁矿是氧的主要来源, 橄榄石和辉石次之^[155,160]。月壤样品、火山玻璃珠和极区水冰沉积物均能释放氧, 通过对月壤进行高温还原反

应制造氧的产率主要与样品中的 Fe^{2+} 含量相关,富钛铁矿的月壤样品和富铁的玻璃样品,可产生更多的氧^[155,160]。月球上的氧气可以通过热化学还原反应、电化学过程从月壤中或水冰沉积物中提取^[156,164,165]。

月壤中储存着低浓度但普遍存在的 ^3He ,其与D及自身发生聚变反应有可能被开发为能源。 ^3He 在月壤中的浓度极低,但其转换能量的效率较高,因此,月壤中的 ^3He 资源可能会在核聚变开发方面扮演重要角色^[155]。月球表面上部3 m内约含有 10^9 kg的 ^3He ^[166],可作为长期供应的能量源。另外,月壤中也含有铀、钍等生热元素,其提取和利用也可对人类深空探测提供能源。

3.3 月壤成型

近年来,各种基于原位资源利用的月壤成型方法应运而生。根据颗粒黏结方式可将成型方法分为混凝土浇筑成型、3D打印成型和烧结成型等,这些成型技术均可用于评估利用月壤建造月球基地的潜在可能性^[167]。混凝土成型技术受限于月球表面高真空、大温差、液态水稀缺等条件,难以应用于月球基地建设^[167,168]。3D打印技术因其能直接建造出任何形状的实体建筑而在建筑领域广受关注。利用D-shape、微挤出式墨水3D打印、激光3D打印等增材制造工艺已成功将模拟月壤原料打印成型^[167,169,170]。其中,激光3D打

印以激光为热源对月壤进行烧结,并通过计算机辅助,可以制造出其他成型方法无法实现的复杂结构件,可作为未来月壤成型的有效手段之一^[167]。真空条件下的模拟月壤高温烧结实验发现随温度变化,烧结样品结构发生了明显改变,在高温时($>1050^\circ\text{C}$)可形成大量孔隙,降低了成型件的力学强度^[171]。微波烧结技术通过对样品进行快速均匀加热,从而不会引起样品开裂或在样品内形成热应力,有助于提高成型件的机械性能,并且在月球上可将太阳能或核聚变能转化成微波热能^[172],因此,微波烧结有望成为月球资源利用中最佳的烧结加热技术。

4 结语

本文概述月壤对太空风化作用和月球演化研究的贡献,厘清了近年来月壤研究的主要方向和相关进展。随着嫦娥5号样品的返回,我国的月球研究引起了前所未有的关注,相关研究的总结和讨论为后续的月球样品研究和月球探测计划提供基础。嫦娥5号返回的样品就是月壤,而嫦娥5号着陆区是年轻的玄武岩区域^[152,153,173],因此嫦娥5号月壤样品可用来探讨年轻的岩浆作用过程,以及近20亿年月壤所经受的撞击作用过程。早期月壤样品的研究总结为实现嫦娥5号返回样品研究价值的最大化有重要的借鉴意义。

致谢 感谢审稿专家对本文初稿提出的宝贵修改意见。

参考文献

- 1 Lucey P, Korotev R L, Gillis J J, et al. Understanding the lunar surface and space-Moon interactions. *Rev Mineral GeoChem*, 2006, 60: 83–219
- 2 Pieters C M, Noble S K. Space weathering on airless bodies. *J Geophys Res Planets*, 2016, 121: 1865–1884
- 3 Xu X, Hui H, Chen W, et al. Formation of lunar highlands anorthosites. *Earth Planet Sci Lett*, 2020, 536: 116138
- 4 Füre E, Zimmermann L, Deloule E, et al. Cosmic ray effects on the isotope composition of hydrogen and noble gases in lunar samples: Insights from Apollo 12018. *Earth Planet Sci Lett*, 2020, 550: 116550
- 5 Füre E, Zimmermann L, Saal A E. Apollo 15 green glass He-Ne-Ar signatures – In search for indigenous lunar noble gases. *Geochem Persp Lett*, 2018, 1–5
- 6 O'Brien P, Byrne S. Physical and chemical evolution of lunar mare regolith. *J Geophys Res Planets*, 2021, 126: e06634
- 7 Pabari J P, Nambiar S, Shah V, et al. Lunar regolith and water ice escape due to micrometeorite bombardment. *Icarus*, 2020, 338: 113510
- 8 Taylor P A, Kahanpää H, Weng W, et al. On pressure measurement and seasonal pressure variations during the Phoenix mission. *J Geophys Res Planets*, 2010, 115: E02002
- 9 Li C, Hu H, Yang M F, et al. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission. *Natl Sci Rev*, 2022, 9: nwab188–10
- 10 Zheng Y C, Ouyang Z Y, Wang S J, et al. Physical and mechanical properties of lunar regolith (in Chinese). *Mineral Petrol*, 2004, 24: 14–19 [郑永春, 欧阳自远, 王世杰, 等. 月壤的物理和机械性质. *矿物岩石*, 2004, 24: 14–19]
- 11 Carrier W D I, Olhoeft G R, Mendell W. Physical properties of the lunar surface. In: Heiken G, Vaniman D T, French B M, eds. *Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon*. Houston: Cambridge University Press, 1991. 357–474

- 12 Ouyang Z Y. Introduction to Lunar Science (in Chinese). Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005 [欧阳自远. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社, 2005]
- 13 Bradley J P, Ishii H A, Gillis-Davis J J, et al. Detection of solar wind-produced water in irradiated rims on silicate minerals. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111: 1732–1735
- 14 Ozima M, Seki K, Terada N, et al. Terrestrial nitrogen and noble gases in lunar soils. *Nature*, 2005, 436: 655–659
- 15 Wei Y, Zhong J, Hui H, et al. Implantation of Earth's atmospheric ions into the nearside and farside Lunar soil: Implications to geodynamo evolution. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e86208
- 16 Keller L P, McKay D S. The nature and origin of rims on lunar soil grains. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, 61: 2331–2341
- 17 Liu J. Cosmogenic effects on chromium isotopes in meteorites (in Chinese). Doctoral Dissertation. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019 [刘佳. 陨石中铬同位素的宇宙射线辐射效应. 博士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2019]
- 18 Fu X H, Zou Y L, Zheng Y C, et al. Space weathering processes and effects on the moon (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2011, 31: 705–715 [付晓辉, 邹永廖, 郑永春, 等. 月球表面太空风化作用及其效应. 空间科学学报, 2011, 31: 705–715]
- 19 Clark R N. Detection of adsorbed water and hydroxyl on the Moon. *Science*, 2009, 326: 562–564
- 20 Pieters C M, Goswami J N, Clark R N, et al. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M³ on Chandrayaan-1. *Science*, 2009, 326: 568–572
- 21 Saal A E, Hauri E H, Cascio M L, et al. Volatile content of lunar volcanic glasses and the presence of water in the Moon's interior. *Nature*, 2008, 454: 192–195
- 22 Sunshine J M, Farnham T L, Feaga L M, et al. Temporal and spatial variability of lunar hydration as observed by the Deep Impact spacecraft. *Science*, 2009, 326: 565–568
- 23 Hui H, Peslier A H, Zhang Y, et al. Water in lunar anorthosites and evidence for a wet early Moon. *Nat Geosci*, 2013, 6: 177–180
- 24 Hui H, Guan Y, Chen Y, et al. A heterogeneous lunar interior for hydrogen isotopes as revealed by the lunar highlands samples. *Earth Planet Sci Lett*, 2017, 473: 14–23
- 25 Hui H J. Water in the lunar interior: A review (in Chinese). *Bull Mineral, Petrol Geochem*, 2017, 36: 706–713 [惠鹤九. 月球内部水的研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36: 706–713]
- 26 Liu Y, Guan Y, Zhang Y, et al. Direct measurement of hydroxyl in the lunar regolith and the origin of lunar surface water. *Nat Geosci*, 2012, 5: 779–782
- 27 Stephant A, Robert F. The negligible chondritic contribution in the lunar soils water. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111: 15007–15012
- 28 Füre E, Deloule E, Trappitsch R. The production rate of cosmogenic deuterium at the Moon's surface. *Earth Planet Sci Lett*, 2017, 474: 76–82
- 29 Saal A E, Hauri E H, Van Orman J A, et al. Hydrogen isotopes in lunar volcanic glasses and melt inclusions reveal a carbonaceous chondrite heritage. *Science*, 2013, 340: 1317–1320
- 30 Mills R D, Simon J I, Alexander C M O D, et al. Water in alkali feldspar: The effect of rhyolite generation on the lunar hydrogen budget. *Geochem Persp Lett*, 2017, 3: 115–123
- 31 Chen Y, Zhang Y, Liu Y, et al. Water, fluorine, and sulfur concentrations in the lunar mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 2015, 427: 37–46
- 32 Füre E, Deloule E, Gurenko A, et al. New evidence for chondritic lunar water from combined D/H and noble gas analyses of single Apollo 17 volcanic glasses. *Icarus*, 2014, 229: 109–120
- 33 Tartèse R, Anand M, Joy K H, et al. H and Cl isotope systematics of apatite in brecciated lunar meteorites Northwest Africa 4472, Northwest Africa 773, Sayh al Uhaymir 169, and Kalahari 009. *Meteorit Planet Sci*, 2014, 49: 2266–2289
- 34 McCubbin F M, Vander Kaaden K E, Tartèse R, et al. Magmatic volatiles (H, C, N, F, S, Cl) in the lunar mantle, crust, and regolith: Abundances, distributions, processes, and reservoirs. *Am Miner*, 2015, 100: 1668–1707
- 35 Fegley B J, Swindle T D. Lunar volatiles: Implications for lunar resource utilization. In: Lewis J S, Mathews M S, Guerrieri M L, eds. *Resources of Near-earth Space*. Tucson: University of Arizona Press, 1993. 367–426
- 36 Huss G, Nagashima K, Burnett D, et al. A new upper limit on the D/H ratio in the solar wind. *Proc Lunar Planet Sci/Proc Lunar Planet Sci*, 2012, 43: 1709
- 37 Burgess K D, Stroud R M. Phase-dependent space weathering effects and spectroscopic identification of retained helium in a lunar soil grain. *Geochim Cosmochim Acta*, 2018, 224: 64–79
- 38 Li S, Milliken R E. Water on the surface of the Moon as seen by the Moon Mineralogy Mapper: Distribution, abundance, and origins. *Sci Adv*, 2017, 3: 1701471
- 39 Füre E, Marty B, Assonov S S. Constraints on the flux of meteoritic and cometary water on the Moon from volatile element (N-Ar) analyses of single lunar soil grains, Luna 24 core. *Icarus*, 2012, 218: 220–229
- 40 Zeng X D, Tang H, Li X Y, et al. Research review and significance of lunar water originated from solar wind (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2018, 33: 473–482 [曾献楮, 唐红, 李雄耀, 等. 月表太阳风成因水的研究现状和意义. 地球科学进展, 2018, 33: 473–482]

- 41 Li S, Lucey P G, Milliken R E, et al. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2018, 115: 8907–8912
- 42 National Research Council. Report on the Scientific Context for the Exploration of the Moon. Washington: The National Academies Press, 2007
- 43 Ivanov A V. Volatiles in lunar regolith samples: A survey. *Sol Syst Res*, 2014, 48: 113–129
- 44 Joy K H, Tartèse R, Messenger S, et al. The isotopic composition of volatiles in the unique Bench Crater carbonaceous chondrite impactor found in the Apollo 12 regolith. *Earth Planet Sci Lett*, 2020, 540: 116265
- 45 Lucey P G. The poles of the Moon. *Elements*, 2009, 5: 41–46
- 46 Haskin L A, Warren P H. Lunar chemistry. In: Heiken G, Vaniman D T, French B M, eds. *Lunar Sourcebook: A user's guide to the Moon*. Houston: Cambridge University Press, 1991, 357–474
- 47 Mathew K J, Marti K. Lunar nitrogen: Indigenous signature and cosmic-ray production rate. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 184: 659–669
- 48 Müller O. Solar wind nitrogen and indigenous nitrogen in Apollo 17 lunar samples. *Proc Lunar Planet Sci*, 1974, 5: 1907–1918
- 49 Kaplan I R, Smith J W. Concentration and isotopic composition of carbon and sulfur in Apollo 11 lunar samples. *Science*, 1970, 167: 541–543
- 50 Mortimer J, Verchovsky A B, Anand M, et al. Simultaneous analysis of abundance and isotopic composition of nitrogen, carbon, and noble gases in lunar basalts: Insights into interior and surface processes on the Moon. *Icarus*, 2015, 255: 3–17
- 51 Marty B, Hashizume K, Chaussidon M, et al. Nitrogen isotopes on the Moon: Archives of the solar and planetary contributions to the inner solar system. *Space Sci Rev*, 2003, 106: 175–196
- 52 Marty B, Chaussidon M, Wiens R C, et al. A ^{15}N -poor isotopic composition for the solar system as shown by genesis solar wind samples. *Science*, 2011, 332: 1533–1536
- 53 Mortimer J, Verchovsky A B, Anand M. Predominantly non-solar origin of nitrogen in lunar soils. *Geochim Cosmochim Acta*, 2016, 193: 36–53
- 54 Sharp Z D, Shearer C K, McKeegan K D, et al. The chlorine isotope composition of the moon and implications for an anhydrous mantle. *Science*, 2010, 329: 1050–1053
- 55 Shearer C K, Sharp Z D, Burger P V, et al. Chlorine distribution and its isotopic composition in “rusty rock” 66095. Implications for volatile element enrichments of “rusty rock” and lunar soils, origin of “rusty” alteration, and volatile element behavior on the Moon. *Geochim Cosmochim Acta*, 2014, 139: 411–433
- 56 Burger P V, Shearer C K, Sharp Z D, et al. Driving fumarole activity on the Moon 1. Chlorine distribution and its isotope composition in “Rusty Rock” 66095. Implications for the petrogenesis of “Rusty Rock,” origin of “rusty” alteration, and volatile element behavior on the Moon. *Proc Lunar Planet Sci*, 2013, 44: 2812
- 57 Gibson Jr. E K. Volatile elements, carbon, nitrogen, sulfur, sodium, potassium and rubidium in the lunar regolith. *Phys Chem Earth*, 1977, 10: 57–62
- 58 Norman M D, Keil K, Griffin W L, et al. Fragments of ancient lunar crust: Petrology and geochemistry of ferroan noritic anorthosites from the Descartes region of the Moon. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 831–847
- 59 Shearer C K, Burger P V, Guan Y, et al. Origin of sulfide replacement textures in lunar breccias. Implications for vapor element transport in the lunar crust. *Geochim Cosmochim Acta*, 2012, 83: 138–158
- 60 Wing B A, Farquhar J. Sulfur isotope homogeneity of lunar mare basalts. *Geochim Cosmochim Acta*, 2015, 170: 266–280
- 61 Kerridge J F, Kaplan I R, Petrowski C, et al. Light element geochemistry of the Apollo 16 site. *Geochim Cosmochim Acta*, 1975, 39: 137–162
- 62 McEwing C E, Thode H G, Rees C E. Sulphur isotope effects in the dissociation and evaporation of troilite: A possible mechanism for ^{34}S enrichment in lunar soils. *Geochim Cosmochim Acta*, 1980, 44: 565–571
- 63 Wieler R. Noble gases in the solar system. *Rev Mineral Geochem*, 2002, 47: 21–70
- 64 Zou Y, Xu L, Ouyang Z. Noble gases in the lunar regolith. *Chin J Geochem*, 2003, 22: 361–368
- 65 Zhang C T, He H Y, Miao B K. Study progress and prospect of noble gas and cosmic exposure age for lunar meteorites (in Chinese). *Bull Mineral Petrol Geochem*, 2018, 4: 588–600, 638, 795 [张川统, 贺怀宇, 缪秉魁. 月球陨石稀有气体和宇宙暴露年龄研究进展与展望. *矿物岩石地球化学通报*, 2018, 4: 588–600, 638, 795]
- 66 Pepin R O, Schlutter D J, Becker R H, et al. Helium, neon, and argon composition of the solar wind as recorded in gold and other Genesis collector materials. *Geochim Cosmochim Acta*, 2012, 89: 62–80
- 67 Terada K, Yokota S, Saito Y, et al. Biogenic oxygen from Earth transported to the Moon by a wind of magnetospheric ions. *Nat Astron*, 2017, 1: 26
- 68 Ireland T R, Holden P, Norman M D, et al. Isotopic enhancements of ^{17}O and ^{18}O from solar wind particles in the lunar regolith. *Nature*, 2006, 440: 776–778
- 69 Hashizume K, Chaussidon M. A non-terrestrial ^{16}O -rich isotopic composition for the protosolar nebula. *Nature*, 2005, 434: 619–622
- 70 Noguchi T, Nakamura T, Kimura M, et al. Incipient space weathering observed on the surface of Itokawa dust particles. *Science*, 2011, 333: 1121–1125

- 71 Wang K, Moynier F, Podosek F A, et al. An iron isotope perspective on the origin of the nanophase metallic iron in lunar regolith. *Earth Planet Sci Lett*, 2012, 337-338: 17–24
- 72 Housley R M, Grant R W, Paton N. Origin and characteristics of excess Fe metal in lunar glass welded aggregates. *Proc Lunar Planet Sci*, 1973, 4: 2737
- 73 Hapke B. Darkening of silicate rock powders by solar wind sputtering. *Moon*, 1973, 7: 342–355
- 74 Hapke B, Cassidy W, Wells E. Effects of vapor-phase deposition processes on the optical, chemical, and magnetic properties of the lunar regolith. *Moon*, 1975, 13: 339–353
- 75 Moynier F, Albarède F, Herzog G F. Isotopic composition of zinc, copper, and iron in lunar samples. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70: 6103–6117
- 76 Wiesli R A, Beard B L, Taylor L A, et al. Space weathering processes on airless bodies: Fe isotope fractionation in the lunar regolith. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 216: 457–465
- 77 Basu A, Wentworth S J, McKay D S. Occurrence and distribution of Fe⁰-globules in lunar agglutinates. *Proc Lunar Planet Sci*, 2001, 32: 1942
- 78 Keller L, Clemett S J. Formation of nanophase iron in the lunar regolith. *Proc Lunar Planet Sci*, 2001, 32: 2097
- 79 Gu L, Zhang B, Hu S, et al. The discovery of silicon oxide nanoparticles in space-weathered Apollo 15 lunar soil grains. *Icarus*, 2018, 303: 47–52
- 80 Joy K H, Visscher C, Zolensky M E, et al. Identification of magnetite in lunar regolith breccia 60016: Evidence for oxidized conditions at the lunar surface. *Meteorit Planet Sci*, 2015, 50: 1157–1172
- 81 Thompson M S, Zega T J, Becerra P, et al. The oxidation state of nanophase Fe particles in lunar soil: Implications for space weathering. *Meteorit Planet Sci*, 2016, 51: 1082–1095
- 82 Burgess K D, Stroud R M. Coordinated nanoscale compositional and oxidation state measurements of lunar space-weathered material. *J Geophys Res Planets*, 2018, 123: 2022–2037
- 83 Cabot A, Puentes V F, Shevchenko E, et al. Vacancy coalescence during oxidation of iron nanoparticles. *J Am Chem Soc*, 2007, 129: 10358–10360
- 84 Lucey P G, Noble S K. Experimental test of a radiative transfer model of the optical effects of space weathering. *Icarus*, 2008, 197: 348–353
- 85 Noble S K, Pieters C M, Keller L P. An experimental approach to understanding the optical effects of space weathering. *Icarus*, 2007, 192: 629–642
- 86 Joy K H, Zolensky M E, Nagashima K, et al. Direct detection of projectile relics from the end of the lunar basin-forming epoch. *Science*, 2012, 336: 1426–1429
- 87 Stoffler D, Ryder G, Ivanov B A, et al. Cratering history and lunar chronology. *Rev Mineral Geochem*, 2006, 60: 519–596
- 88 Quaife W, Bunch T, Wrigley R. Impact metamorphism of lunar surface materials. *Science*, 1970, 167: 671–672
- 89 Jolliff B L, Korotev R L, Haskin L A. An iridium-rich iron micrometeorite with silicate inclusions from the Moon. *Proc Lunar Planet Sci*, 1993, 24: 729–730
- 90 Cano E J, Sharp Z D, Shearer C K. Distinct oxygen isotope compositions of the Earth and Moon. *Nat Geosci*, 2020, 13: 270–274
- 91 Taylor S R, Pieters C M, MacPherson G J. Earth-Moon system, planetary science, and lessons learned. *Rev Mineral Geochem*, 2006, 60: 657–704
- 92 Wiechert U, Halliday A N, Lee D C, et al. Oxygen isotopes and the Moon-forming giant impact. *Science*, 2001, 294: 345–348
- 93 Armaytage R M G, Georg R B, Williams H M, et al. Silicon isotopes in lunar rocks: Implications for the Moon's formation and the early history of the Earth. *Geochim Cosmochim Acta*, 2012, 77: 504–514
- 94 Wang K, Jacobsen S B, Sedaghatpour F, et al. The earliest lunar magma ocean differentiation recorded in Fe isotopes. *Earth Planet Sci Lett*, 2015, 430: 202–208
- 95 Young E D, Kohl I E, Warren P H, et al. Oxygen isotopic evidence for vigorous mixing during the Moon-forming giant impact. *Science*, 2016, 351: 493–496
- 96 Zambardi T, Poitrasson F, Corgne A, et al. Silicon isotope variations in the inner solar system: Implications for planetary formation, differentiation and composition. *Geochim Cosmochim Acta*, 2013, 121: 67–83
- 97 Zhang J, Dauphas N, Davis A M, et al. The proto-Earth as a significant source of lunar material. *Nat Geosci*, 2012, 5: 251–255
- 98 Lugmair G W, Shukolyukov A. Early solar system timescales according to ⁵³Mn-⁵³Cr systematics. *Geochim Cosmochim Acta*, 1998, 62: 2863–2886
- 99 Laul J C, Papike J J. The lunar regolith-comparative chemistry of the Apollo sites. *Proc Lunar Planet Sci*, 1980, 11: 1307–1340
- 100 Laul J C, Papike J J, Simon S B, et al. Chemistry of the Apollo 11 Highland component. *J Geophys Res*, 1983, 88: B139–B149
- 101 Beatty D W, Hill S M R, Albee A L, et al. The petrology and chemistry of basaltic fragments from the Apollo 11 soil-I. *Proc Lunar Planet Sci*, 1979, 10: 41–75
- 102 Simon S B, Papike J J, Laul J C. The Apollo 14 regolith: Petrology of cores 14210/14211 and 14220 and soils 14141, 14148, and 14149. *J Geophys Res*, 1982, 87: A232–A246

- 103 McKay D S, Bogard D D, Morris R V, et al. Apollo 16 regolith breccias: Characterization and evidence for early formation in the mega-regolith. *J Geophys Res Solid Earth*, 1986, 91: 277–303
- 104 Fruchter J S, Kridelbaugh S J, Robyn M A, et al. Breccia 66055 and related clastic materials from the Descartes region, Apollo 16. *Geochim Cosmochim Acta*, 1974, 2: 1035–1046
- 105 Finkelman R B, Baedeker P A, Christian R P, et al. Trace-element chemistry and reducing capacity of size fractions from the Apollo 16 regolith. *Proc Lunar Planet Sci*, 1975, 6: 1385–1398
- 106 Boynton W V, Baedeker P A, Chou C L, et al. Mixing and transport of lunar surface materials-Evidence obtained by the determination of lithophile, siderophile, and volatile. *Proc Lunar Planet Sci*, 1975, 6: 2241–2259
- 107 Warren P H, Taylor G J, Keil K, et al. Seventh Foray: Whitlockite-rich lithologies, a diopside-bearing troctolitic anorthosite, ferroan anorthosites, and KREEP. *J Geophys Res*, 1983, 88: B151–B164
- 108 Wänke H, Baddenhausen H, Dreibus G, et al. Multielement analyses of Apollo 15, 16, and 17 samples and the bulk composition of the moon. *Geochim Cosmochim Acta*, 1973, 2: 1461–1481
- 109 Taylor S R, Gorton M P, Muir P, et al. Composition of the Descartes region, lunar highlands. *Geochim Cosmochim Acta*, 1973, 37: 2665–2683
- 110 Korotev R L. Geochemistry of grain-size fractions of soils from the Taurus-Littrow valley floor. *Proc Lunar Planet Sci*, 1976, 7: 695–726
- 111 Korotev R L. Comparative geochemistry of Apollo 16 surface soils and samples from cores 64002 and 60002 through 60007. *J Geophys Res*, 1982, 87: A269–A278
- 112 Korotev R L, Kremser D T. Compositional variations in Apollo 17 soils and their relationship to the geology of the Taurus-Littrow site. *Proc Lunar Planet Sci*, 1992, 22: 275–301
- 113 Philpotts J A, Schuhmann S, Kouns C W, et al. Origin of Apollo 17 rocks and soils. *Geochim Cosmochim Acta*, 1974, 2: 1255–1267
- 114 Steele A M, Colson R O, Korotev R L, et al. Apollo 15 green glass: Compositional distribution and petrogenesis. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56: 4075–4090
- 115 Galbreath K C, Shearer C K, Papike J J, et al. Inter- and intra-group compositional variations in Apollo 15 pyroclastic green glass: An electron- and ion-microprobe study. *Geochim Cosmochim Acta*, 1990, 54: 2565–2575
- 116 Von Gunten H R, Krähenbühl U, Grütter A, et al. Trace and major elements in grain-size fractions of separated minerals and agglutinates of soil 70160 and implications on their origin. *Proc Lunar Planet Sci*, 1978, 9: 2269–2286
- 117 Blanchard D P, Budahn J R. Chemistry of orange/black soils from core 74001/2. *Proc Lunar Planet Sci*, 1978, 9: 1969–1980
- 118 Hughes S S, Delano J W, Schmitt R A. Chemistries of individual mare volcanic glasses: Evidence for distinct regions of hybridized mantle and a KREEP component in Apollo 14 magmatic sources. *Proc Lunar Planet Sci*, 1990, 20: 127–138
- 119 Ryder G, Lindstrom M, Willis K. The reliability of macroscopic identification of lunar coarse fines particles and the petrogenesis of 2–4 mm particles in Apennine Front sample 15243. *Proc Lunar Planet Sci*, 1988, 18: 219–232
- 120 Hubbard N J, Rhodes J M, Gast P W, et al. Lunar rock types: The role of plagioclase in non-mare and highland rock types. *Geochim Cosmochim Acta*, 1973, 2: 1297–1312
- 121 Papike J J, Simon S B, Laul J C. The lunar regolith: Chemistry, mineralogy, and petrology. *Rev Geophys Space Phys*, 1982, 20: 761–826
- 122 Taylor L A, Pieters C, Keller L P, et al. The effects of space weathering on Apollo 17 mare soils: Petrographic and chemical characterization. *Meteoritics Planet Sci*, 2001, 36: 285–299
- 123 Okabayashi S, Yokoyama T, Hirata T, et al. Iron isotopic composition of very low-titanium basalt deduced from the iron isotopic signature in Luna 16, 20, and 24 soils. *Geochim Cosmochim Acta*, 2020, 269: 1–14
- 124 Sossi P A, Moynier F. Chemical and isotopic kinship of iron in the Earth and Moon deduced from the lunar Mg-Suite. *Earth Planet Sci Lett*, 2017, 471: 125–135
- 125 Savage P S, Georg R B, Williams H M, et al. Silicon isotope fractionation during magmatic differentiation. *Geochim Cosmochim Acta*, 2011, 75: 6124–6139
- 126 Simon J I, DePaolo D J. Stable calcium isotopic composition of meteorites and rocky planets. *Earth Planet Sci Lett*, 2010, 289: 457–466
- 127 Valdes M C, Moreira M, Foriel J, et al. The nature of Earth's building blocks as revealed by calcium isotopes. *Earth Planet Sci Lett*, 2014, 394: 135–145
- 128 Wu W, Xu Y G, Zhang Z F, et al. Calcium isotopic composition of the lunar crust, mantle, and bulk silicate Moon: A preliminary study. *Geochim Cosmochim Acta*, 2020, 270: 313–324
- 129 Saal A E, Hauri E H. Large sulfur isotope fractionation in lunar volcanic glasses reveals the magmatic differentiation and degassing of the Moon. *Sci Adv*, 2021, 7: 4641
- 130 Wetzel D T, Hauri E H, Saal A E, et al. Carbon content and degassing history of the lunar volcanic glasses. *Nat Geosci*, 2015, 8: 755–758
- 131 Hui H, Hess K U, Zhang Y, et al. Cooling rates of lunar orange glass beads. *Earth Planet Sci Lett*, 2018, 503: 88–94
- 132 McDonough W F, Sun S. The composition of the Earth. *Chem Geol*, 1995, 120: 223–253

- 133 O'Neill H S C. The origin of the moon and the early history of the earth—A chemical model. Part 1: The moon. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 55: 1135–1157
- 134 Albarède F, Albalat E, Lee C T A. An intrinsic volatility scale relevant to the Earth and Moon and the status of water in the Moon. *Meteorit Planet Sci*, 2015, 50: 568–577
- 135 Luo Y R. Comprehensive Handbook of Chemical Bond Energies. Boca Raton: CRC Press, 2007
- 136 Lodders K. Solar system abundances and condensation temperatures of the elements. *Astrophys J*, 2003, 591: 1220–1247
- 137 Ding T P, Thode H G, Rees C E. Sulphur content and sulphur isotope composition of orange and black glasses in Apollo 17 drive tube 74002/1. *Geochim Cosmochim Acta*, 1983, 47: 491–496
- 138 Hashizume K, Chaussidon M, Marty B, et al. Solar wind record on the Moon: Deciphering presolar from planetary nitrogen. *Science*, 2000, 290: 1142–1145
- 139 Thode H, Rees C. Sulphur isotopes in grain size fractions of lunar soils. *Proc Lunar Planet Sci*, 1976, 7: 459–468
- 140 Jolliff B L, Haskin L A, Korotev R L, et al. Scientific expectations from a sample of regolith and rock fragments from the interior of the lunar South Pole-Aitken basin. *Proc Lunar Planet Sci*, 2003, 34: 1989
- 141 Korotev R L. Lunar geochemistry as told by lunar meteorites. *Geochemistry*, 2005, 65: 297–346
- 142 Borg L E, Gaffney A M, Kruijer T S, et al. Isotopic evidence for a young lunar magma ocean. *Earth Planet Sci Lett*, 2019, 523: 115706
- 143 Borg L E, Gaffney A M, Shearer C K. A review of lunar chronology revealing a preponderance of 4.34–4.37 Ga ages. *Meteorit Planet Sci*, 2015, 50: 715–732
- 144 Norman M D, Borg L E, Nyquist L E, et al. Chronology, geochemistry, and petrology of a ferroan noritic anorthosite clast from Descartes breccia 67215: Clues to the age, origin, structure, and impact history of the lunar crust. *Meteoritics Planet Sci*, 2003, 38: 645–661
- 145 Bellucci J J, Nemchin A A, Grange M, et al. Terrestrial-like zircon in a clast from an Apollo 14 breccia. *Earth Planet Sci Lett*, 2019, 510: 173–185
- 146 Nemchin A A, Jeon H, Bellucci J J, et al. Pb-Pb ages of feldspathic clasts in two Apollo 14 breccia samples. *Geochim Cosmochim Acta*, 2017, 217: 441–461
- 147 Snape J F, Nemchin A A, Bellucci J J, et al. Lunar basalt chronology, mantle differentiation and implications for determining the age of the Moon. *Earth Planet Sci Lett*, 2016, 451: 149–158
- 148 Neal C R, Hacker M D, Snyder G A, et al. Basalt generation at the Apollo 12 site, Part 1: New data, classification, and re-evaluation. *Meteoritics*, 1994, 29: 334–348
- 149 Snape J F, Joy K H, Crawford I A, et al. Basaltic diversity at the Apollo 12 landing site: Inferences from petrologic examinations of the soil sample 12003. *Meteorit Planet Sci*, 2014, 49: 842–871
- 150 Alexander L, Snape J F, Crawford I A, et al. Searching for nonlocal lithologies in the Apollo 12 regolith: A geochemical and petrological study of basaltic coarse fines from the Apollo lunar soil sample 12023,155. *Meteorit Planet Sci*, 2014, 49: 1288–1304
- 151 Tian H C, Wang H, Chen Y, et al. Non-KREEP origin for Chang'e-5 basalts in the Procellarum KREEP Terrane. *Nature*, 2021, 600: 59–63
- 152 Che X, Nemchin A, Liu D, et al. Age and composition of young basalts on the Moon, measured from samples returned by Chang'e-5. *Science*, 2021, 374: 887–890
- 153 Li Q L, Zhou Q, Liu Y, et al. Two-billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'e-5 basalts. *Nature*, 2021, 600: 54–58
- 154 Hu S, He H, Ji J, et al. A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang'e-5. *Nature*, 2021, 600: 49–53
- 155 Duke M B, Gaddis L R, Taylor G J, et al. Development of the Moon. *Rev Mineral Geochem*, 2006, 60: 597–655
- 156 Rasera J N, Cilliers J J, Lamamy J A, et al. The beneficiation of lunar regolith for space resource utilisation: A review. *Planet Space Sci*, 2020, 186: 104879
- 157 Crawford I A. Lunar resources. *Prog Phys Geography-Earth Environ*, 2015, 39: 137–167
- 158 Li C, Wei K X, Li Y, et al. Research progress on *in-situ* resources utilization of lunar surface minerals (in Chinese). *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2020, 51: 3289–3299 [李琛, 魏奎先, 李阳, 等. 月球表面矿产资源原位利用研究进展. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51: 3289–3299]
- 159 Ouyang Z Y, Zou Y L, Li C L, et al. Prospect of exploration and utilization of some lunar resources (in Chinese). *Earth Sci*, 2002, 27: 498–503 [欧阳自远, 邹永廖, 李春来, 等. 月球某些资源的开发利用前景. 地球科学, 2002, 27: 498–503]
- 160 Allen C C, Morris R V, McKay D S. Oxygen extraction from lunar soils and pyroclastic glass. *J Geophys Res Planets*, 1996, 101: 26085–26095
- 161 Gibson Jr E, Johnson S M. Thermal analysis-inorganic gas release studies of lunar samples. *Proc Lunar Sci Conf*, 1971, 2: 1351–1366
- 162 Jia Y Z, Qin L, Xu L, et al. Lunar water-ice exploration (in Chinese). *J Deep Space Exp*, 2020, 7: 290–296 [贾瑛卓, 覃朗, 徐琳, 等. 月球水冰探测. 深空探测学报, 2020, 7: 290–296]
- 163 Schorghofer N, Taylor G J. Subsurface migration of H₂O at lunar cold traps. *J Geophys Res Planets*, 2007, 112: E02010
- 164 Lomax B A, Conti M, Khan N, et al. Proving the viability of an electrochemical process for the simultaneous extraction of oxygen and production of metal alloys from lunar regolith. *Planet Space Sci*, 2020, 180: 104748

- 165 Schlüter L, Cowley A, Pennec Y, et al. Gas purification for oxygen extraction from lunar regolith. [Acta Astronaut](#), 2021, 179: 371–381
- 166 Taylor L, Kulcinski G. Helium-3 on the Moon for fusion energy: The Persian Gulf of the 21st century. *Solar Syst Res*, 1999, 33: 338
- 167 Song L, Xu J, Tang H, et al. Research progress of the simulated lunar soil molding (in Chinese). *Acta Mineral Sin*, 2020, 40: 49–59 [宋蕾, 徐佼, 唐红, 等. 模拟月壤成型研究现状. *矿物学报*, 2020, 40: 49–59]
- 168 Sun X Y, Ye B X, Wang H L, et al. Feasibility analysis of 3D printed concrete structure based on lunar soil composition and lunar environment (in Chinese). *Concrete*, 2021, 3: 23–26 [孙晓燕, 叶柏兴, 王海龙, 等. 基于月壤成分和月球环境的3D打印混凝土结构可行性分析. *混凝土*, 2021, 3: 23–26]
- 169 Cesaretti G, Dini E, De Kestelier X, et al. Building components for an outpost on the lunar soil by means of a novel 3D printing technology. [Acta Astronaut](#), 2014, 93: 430–450
- 170 Taylor S L, Jakus A E, Koube K D, et al. Sintering of micro-trusses created by extrusion-3D-printing of lunar regolith inks. [Acta Astronaut](#), 2017, 143: 1–8
- 171 Song L, Xu J, Fan S, et al. Vacuum sintered lunar regolith simulant: Pore-forming and thermal conductivity. [Ceramics Int](#), 2019, 45: 3627–3633
- 172 Tang H, Wang S J, Li X Y, et al. A preliminary design for producing construction materials for the lunar base: Microwave sintering ilmenite of lunar soil (in Chinese). *Acta Mineral Sin*, 2009, 29: 229–234 [唐红, 王世杰, 李雄耀, 等. 月壤钛铁矿微波烧结制备月球基地结构材料的初步设想. *矿物学报*, 2009, 29: 229–234]
- 173 Jia M, Yue Z, Di K, et al. A catalogue of impact craters larger than 200 m and surface age analysis in the Chang’e-5 landing area. [Earth Planet Sci Lett](#), 2020, 541: 116272

Summary for “月壤样品研究进展”

Geological processes and products recorded in lunar soils: A review

Yuantao Gu^{1,2}, Ruihong Yang³, Huan Geng⁴, Qian Wang³ & Hejiu Hui^{4,5*}¹ School of Environmental and Biological Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China;² School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;³ Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100190, China;⁴ Lunar and Planetary Science Institute, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China;⁵ CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, Hefei 230026, China* Corresponding author, E-mail: hhui@nju.edu.cn

Lunar soil is an important material to study the surface processes on airless bodies, and the geological evolution of the Moon. Since the Apollo era, considerable progresses in lunar soil research have been achieved, including the origin, composition, and properties of the soil. The results from early research have already been summarized and reviewed. With the lunar soil samples returned by the Chang'E-5 mission, all research concerning the Moon has drawn unprecedented attention in China. Therefore, it is timely to summarize the latest advances related to lunar soil research. The lunar soils represent the interior materials that were modified by external processes after formation. This paper reviews the latest achievements of lunar soil from two aspects: the space weathering and the lunar evolution. The space weathering of lunar soil includes the interaction between the soil on the Moon's surface and the materials and energy (such as meteorites, solar wind, and cosmic rays) outside of the Moon, which has also recorded the evolution of the solar system. The effects of space weathering on the surface of the Moon are discussed with respect to the water, volatiles (carbon, nitrogen, oxygen, fluorine, sulfur, chlorine, and noble gas), nanophase minerals (npFe and npSiO_x), and micrometeorites and meteorite fragments in lunar soil. The contents of water in lunar soil are much higher than those of basalt. However, the water in lunar soil is much more depleted in deuterium than that of basalt. This striking contrast suggests that hydroxyl in the lunar soil mainly results from the implantation of hydrogen ions in the solar wind. On the other hand, volatiles in lunar soil could have originated from various sources, including lunar interior, solar wind, cosmic rays, and even Earth wind. The contributions of the sources for each volatile are different, evidenced by the isotopic composition of the respective volatile. The npFe grains in lunar soil can alter the surface optical spectra of the Moon. It has been demonstrated that the npFe grains are the product of vapor deposit generated by charged particle pattering and/or micrometeorite impact followed by re-condensation of metallic iron. Micrometeorite impacts have not only caused crushing and mixing of lunar soil particles, but also resulted in partial melting and volatilization of lunar soil, leading to the escape and possible redeposition of volatiles on the lunar surface and thus increasing the maturity of lunar soil. Therefore, the npFe concentration is often used as a parameter to represent the maturity of the lunar regolith. On the other hand, the lunar soil can be used to study the evolution of the Moon. This paper mainly reviews the bulk compositions of lunar soil, and the volcanic glasses and lithic clasts as well. The last-60-year study of lunar soil has revealed the main contributors of the soil on the Moon. The chemical and isotopic compositions of bulk soil can be used to reveal the genesis and trace the material sources of lunar soil. The volcanic glasses in lunar soil are products generated by magmatism on the Moon and have recorded the magmatic processes and the mantle compositions. The glass beads with various compositions (and thus colors) in lunar soil are intensively studied to explore the crystallization differentiation and degassing processes of early lunar magma. The lithic clasts have unique scientific significance in revealing the origin and evolution of the parent rocks of lunar soil, in which, anorthosite clasts can be utilized to explore the formation of the lunar crust, whereas basalt clasts play an irreplaceable role in studying the diversity of lunar magma and the evolution of the lunar mantle. Finally, this paper summarizes the related research on the utilization of lunar soil as resources, including metal, and water as well as energy (such as helium, uranium, and thorium), and lunar soil molding. The early study on lunar soil can provide important references for studying the soil samples returned by Chang'E-5 mission. Therefore, this review could facilitate the ongoing research of lunar soil and future lunar exploration of China.

lunar soil, space weathering, lunar evolution, utilization of lunar soil resourcesdoi: [10.1360/TB-2021-1039](https://doi.org/10.1360/TB-2021-1039)