

# “中国科学院大学生创新实践训练计划”

## 项目总结

中国科学院大学制

项目名称	行星科学			
研究方向	行星科学			
执行时间	(2022年9月-2023年6月)			
项目完成人	姓名	陈淳怡	性别/年级	女/大四
	就读高校	中国地质大学(武汉)	所属院系	资源学院
	手机	18980670218	电子邮箱	1556469768@qq.com
指导教师	姓名	单位	职称	
	徐于晨	国家空间科学中心	副研究员	
项目组成员	无			

#### 项目意义：

由于没有像地球一样的浓密大气层和全球性磁场的保护，陨石、太阳风、银河宇宙射线等来自宇宙空间的各种物质长期持续作用于裸露的月球表面，使月球表面物质的结构和成分特征发生改变的过程称为太空风化作用。

太空风化作用是指无大气天体表面连续发生的一系列物理与化学作用过程的总称，它会改变天体表面物质的微观结构与物理化学性质，导致物质原有的光学性质发生显著变化（e.g., Chapman et al., 1999; 2004）。太空风化作用的所有可能动力机制包括：微陨石轰击、宇宙与太阳高能射线照射、太阳风注入与溅射、昼夜交替热循环、紫外与可见光的辐照等，其中太阳风注入与微陨石轰击被认为是最为主要的两种风化驱动机制（Pieters & Noble, 2016）。

通过粉碎和凝聚由岩屑来源形成约 10m 厚的月壤风化层，是空间风化对月球表面效应改造的直接证据（Papike et al, 1982），其经过长期的陨石和微陨石撞击、太阳风轰击和宇宙射线辐射等作用，记录下太空风化过程，且形成大量的胶结物和纳米铁颗粒等，会对反射光谱产生影响，导致光谱数据准确解译月球表面矿物成分等信息出现阻碍。因此，通过分析月壤颗粒的宏观及微观内部结构特征及利用地球样品在还原环境模拟太空风化改造过程。在此项目中，我们利用地球样品在模拟的月表环境下实现太空风化作用的模拟，以对比“嫦娥五号”样品。“嫦娥五号”着陆点位于月球西经 51.92°，北纬 43.06° 的风暴洋北部月海玄武岩平原，雨海西侧，共采集了 1731g 的月壤和月岩。该处主要发育有埃拉托逊纪中钛玄武岩，年龄约为 1.53 Ga，东南部是该单元内部最为年轻的区域。

与太空风化改造联系紧密的参考系数如：成熟度，铁颗粒相对含量即表征月壤的成熟度，Morris 等（1978）指出  $I_{Fe}/Fe$  颗粒是土壤相对成熟度（即地表暴露年龄）的指标， $I_{Fe}$  磁性强度主要来自于 5-35 μm 粒度分数中的细粒度铁金属，后由氧化亚铁归一化，并定义了三组：(1) 未成熟 ( $0.0 \leq I_{Fe}/Fe \leq 29.0$ )；(2) 未成熟 ( $30.0 \leq I_{Fe}/Fe \leq 59.0$ )；(3) 成熟 ( $I_{Fe}/Fe \geq 60.0$ ) 土壤。另外，研究还发现月壤暴露时间越长，风化作用产物越多，基于阿波罗样品，月壤暴露时间与其成熟度指标  $I_{Fe}/Fe$  颗粒成正相关（Morris, 1976）。除此之外，pieters 等（2000）指出月壤表层遭受空间风化比地下土壤更严重（Pieters et al, 2000）。以上前人对于空间风化作用的研究主要集中在实验室返回样本和轨道遥感数据上，而缺乏对月球表面的原位光谱测量信息结合。嫦娥五号任务提供了一个机会，将从返回的样本中获得的信息与现场观测和轨道监测结合起来进行交叉验证。

空间风化作用改变原有光谱信息，使原位光谱信息产生歧义对比矿物学信息，因此必须量化空间风化度才能降低原位光谱分析与矿物学信息交叉验证时的误区。为了研究太空风化改造特征，我们利用脉冲激光轰击技术进行微陨石轰击过程的模拟，同时利用 H+注入进行太阳风离子注入的模拟，结合微陨石撞击作用模拟太空风化作用。最终利用地球样品模拟总结太空风化改造特征。

因此，我们利用地球样品中的辉石岩、辉长岩、橄榄岩中的大颗粒矿物实现微陨石撞击单颗粒的模拟，后结合注入氢离子实现月壤还原环境的太阳风作用改造，与前人“嫦娥五号”的工作结果进行对比，以总结辉石、斜长石、橄榄石颗粒受太阳风作用改造而形成的结构特征等信息。同时利用撞击试验模拟微陨石撞击作用，更系统化对太空风化改造作用有一个认识，除此之外，后期借助现有“嫦娥五号”月壤样品进行更直观垂向及横向分析对比。

#### 研究目的：

1. 通过阅读文献和相关书籍对月球的地质背景及基础知识和陨石的相关知识进行了解，为之后研究生阶段进行有关月球样品的研究奠定基础；
2. 主要对月球太空风化进行调研，包括 Apollon 返回样品太空风化情况和在地面实验室利用模拟月壤模拟太空风化过程中矿物的微观晶体结构和光谱变化情况进行调研，了解月球太空风化的研究现状；
3. 利用地球样品模拟太空风化作用，总结其相应特征，包括微陨石撞击生成纳米铁颗粒、矿物对太阳风氢离子注入的响应差异和月球表面太阳风成因水的具体行成和赋存机制等；
4. 利用嫦娥五号月壤样品，结合地球样品总结其相应特征，包括微陨石撞击生成纳米铁颗粒、矿物对太阳风氢离子注入的响应差异和月球表面太阳风成因水的具体行成和赋存机制等；
5. 掌握发射场扫描电镜 SEM、纳米离子探针 NanoSIMS、CT 等大型仪器、脉冲激光发射器等原理及使用方法；
6. 掌握实验数据等处理方法，及常用数据处理软件的使用方法，如 Image J、Origin、MATLAB、CorelDRAW 等。

#### 项目执行总结

#### 进展情况：

##### 1. 前期调研阶段（2022 年 10 月-2023 年 6 月）

(1) 在科创计划期间，同导师围绕太空风化课题内容进行了讨论，最终根据之后研究生期间的培养计划和研究方向对课题进行了调整，旨在通过科创计划对月球的地质背景进行了解，计划前期主要通过阅读文献和书籍，对月球的基础信息有一定认识，同时，对月球太空风化以及特别：微陨石方面进行调研；

(2) 阅读《月球科学概论》和《月球新观》等书籍并将主要知识进行归纳总结，同时大量阅读文献，对月球的形成、地质演化、主要岩石矿物及其分布情况等基础知识进行调研和了解，其中着重对月球太空风化进行文献调研和总结，包括 Apollon 返回月球样品太空风化情况和在地面实验室模拟太空风化过程中矿物的微观晶体结构和光谱变化情况进行调研，了解月球太空风化的研究现状；并根据研究目的进行实验方案的设计；

##### 2. 实验阶段（2022 年 6 月-2022 年 9 月）包括两个部分：太阳风改造作用实验及微陨石撞击实验

(3) 使用地球样品包括：辉长岩、辉石岩、橄榄岩等岩石其中的斜长石、辉石、橄榄石大颗粒区域进行制靶，根据前期设计的实验方法，为后期利用撞击体进行轰击模拟，大致理解受微陨石撞击后斜长石、辉石、橄榄石矿物的外貌形态改造作准备，进而进行下一步工作；

(4) 根据实验需求挑选和制备样品后，利用脉冲激光轰击装置，模拟微陨石撞击，利用氢离子注入模拟太阳风改造作用，利用纳米离子探针对氢离子注入模拟太阳风改造作用的样本各种硅酸盐矿物开展 H 同位素的分析，识别具有太阳风成因同位素的多种颗粒，获得不同颗粒中太阳风氢的含量，了解不同矿物对太阳风氢注入的响应差异；

其中太阳风改造模拟中，实验以消除样品制备过程中产生的任何有机物，抛光后的样品在丙酮中浸泡 24 小时，用乙醇清洗，然后用纯水清洗。最后，样品在~ 110°C 下烘烤 24 小时，以去除样品表面吸附的水。

1. 太阳风能范围：2-10 keV H<sup>+</sup>，太阳风能量 1 keV

2. 太阳风典型通量  $2.3 \times 10^{15} \text{ ions/cm}^2 \cdot \text{s}$

太阳风注入环境：样品利用 7keV 的 H+ 进行辐照（受仪器限制）（高于平均太阳风能量 1keV），H+注入剂量大约  $10^{15} \text{ ions/cm}^2$ ，这相当于其暴露时间约 17 年在月球上，相当于月表约 30 年，其中注入通量大约  $2.3 \times 10^{15} \text{ ions/cm}^2 \cdot \text{s}$ ，（太阳风典型通量  $2.3 \times 10^{15} \text{ ions/cm}^2 \cdot \text{s}$ ）整个过程中，真空中压强约  $5.5 \times 10^{-5} \text{ Torr}$  (Tang et al, 2021)。

(5) 使用嫦娥五号月壤样品，在光学显微镜下无损挑选月壤颗粒，对玻璃、岩屑、单矿物及金属等进行分选并记录。对样品进行挑选和制靶，根据前期设计的实验方案，利用显微红外光谱仪对挑选出的月壤颗粒进行无损光谱分析。

(6) 根据实验需求挑选部分样品，利用场发射扫描电镜对样品表面形貌进行观察和拍照，根据实验目的和仪器对样品的要求，选择需要进行纳米粒子探针的样品，并记录；后利用 FIB 聚焦离子束分析其中的形貌结构。

#### 3. 数据分析和整理阶段

最终对所测试数据进行总整理分析，并设计下一阶段实验方案。

#### 收获感受：

在科创计划期间，我在导师的指导下对月球的形成及演化、月球主要岩石矿物及其分布情况，太空风化对月球表面主要矿物的影响，同时对嫦娥五号垂向太空风化特征有了一定的初步认知，其中包括嫦娥五号任务结合原位测量与返回样品等信息确认了着陆区成熟度及月壤来源，对太空风化作用对月表改造进行了进一步研究，包括太阳风成因水，月壤颗粒表面微观结构改造等，区别于 Apollon 样品特征包括：含量，粒度大小等，嫦娥五号样品提出了关于三价铁，磁铁矿等新的成因理论，除此以外围绕外来物质撞击月表，揭示月壳组成多样性及岩浆活动多样性提供了证据，研究指示了月球上仍存在未被认识的地质单元及二氧化硅碎屑记录了一次月表撞击事件的物理化学变化过程等信息。嫦娥五号结合多种光谱分析及返回样品 SDU-ASD 数据 CE- 5 着陆点月壤为

徐光启陨石坑溅射物等。

太阳风改造实验模拟及文献调研中：其中在唐红在太阳风模拟中得出在月球硅酸盐矿物方面，矿物相和玻璃体中 OH 的形成主要与氢离子注入后产生的缺陷有关。实验中：斜长石在氢离子注入后最明显，斜方辉石和单斜辉石中可见水含量微小变化，三价铝离子在单斜辉石和斜方辉石当中，会取代硅离子以至于造成四面体中电荷不平衡，当矿物受到氢离子注入后，会利于通过捕获氢离子以形成氢氧根去抵消其中的电荷不平衡，橄榄石在氢离子注入补充硅酸四面体中的电荷空位。除此之外，由于氢离子注入后 OH/H<sub>2</sub>O 的生成很大程度上基于矿物晶体结构地的电荷不平衡，与矿物晶体相对比，玻璃体中的电荷不平衡更少，因此，更难以捕获氢离子形成 OH<sup>-</sup>/H<sub>2</sub>O。

在“嫦娥五号”工作调研中，了解到目前关于太空风化特征的进展包括：嫦娥五号月壤矿物中水富集在表层内和高度贫 D 的特征，指示了水的太阳风来源，且太阳风成因水主要分布在非晶质环带中，少量可以扩散进入内部晶体中，主要以 OH<sup>-</sup>的形式存在，少部分或以 H<sub>2</sub>O 的形式存在，进而估算出嫦娥五号着陆区月壤中的太阳风成因水含量至少为 170 ppm，嫦娥五号月壤样品整体的水 (H<sub>2</sub>O) 含量约为 46 ppm。利用嫦娥五号月壤样品证实了月壤中存在撞击成因的亚微米级磁铁矿；证实了撞击分解成因产生纳米金属铁；证实了月壤中歧化反应成因产生纳米金属铁。除此之外，利用嫦娥五号凝结玻璃发现证明其中含有大量由歧化反应产生的 三价铁离子（三价铁离子/ $\Sigma$ Fe >0.4），革新了学界对于月球 三价铁离子赋存形态、含量及成因的认识。嫦娥五号着陆区首次找到并证明受撞击过程的动力学控制，作为亚稳相在较低压条件下出现的赛石英，随温度的升高部分赛石英转变为斯石英。首次获得月球 2.0 Ga 年轻玄武岩单元上的外来火成岩碎屑组成信息，识别出了 7 颗不同于 CE-5 中钛玄武岩的火成岩碎屑，包括：高钛玻基斑状岩石碎屑、低钛玄武岩碎屑，橄榄辉石岩碎屑、镁质斜长岩碎屑 (Apollo 样品中未观察到)、高度演化岩石碎屑、富镁橄榄石碎屑和火山玻璃碎屑，其中高度演化岩石碎屑分为 A 型和 B 型，A 型岩屑的形成必然经历 SLI，B 型岩屑极有可能形成于 Em3 玄武岩分离结晶后期 (分离结晶程度~75%) 的 SLI 过程。为揭示月壳组成多样性及岩浆活动多样性提供了证据，研究指示了月球上仍存在未被认识的地质单元等。

除此之外，学习了相关实验仪器的原理和使用方法。在导师的带领下，通过实验仪器的学习，我对实验样品制备方法、进行实验的整个流程和实验当中的注意事项以及设计实验需要考虑的因素等有了初步的认识，并掌握了场发射扫描电镜 SEM、CT、纳米离子探针 NanoSIMS 等实验仪器的原理和使用方法，便于后期进行相关实验；学习了实验数据的处理方法、以及处理软件的使用方法。主要学习了图像处理、数据处理、制图的相关软件，如 Image J、Origin、MATLAB、CorelDRAW 等。

PAPIKE J J, SIMON S B, LAUL J C 1982. The lunar regolith: Chemistry, mineralogy, and petrology. *Reviews of Geophysics* [J], 20: 761-826.

PIETERS C M, NOBLE S K 2016. Space weathering on airless bodies. *Journal of Geophysical Research: Planets* [J], 121: 1865-1884.

TANG H, LI X, ZENG X, et al. 2021. Experimental investigation of structural OH/H<sub>2</sub>O in different lunar minerals and glass via solar-wind proton implantation. *Icarus* [J], 359: 114322.

经费使用	序号	科目	(元)
	1	机票(武汉至北京)	1150
	2	机票(北京至武汉)	1050
	3	样品盒	75
	4	酒店	4000
	合计		6275.00