

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 月球角砾岩陨石 NWA 7611/10480 的岩石学分析

曹海军<sup>1</sup>, 凌宗成<sup>1\*</sup>, 陈剑<sup>1</sup>, 付晓辉<sup>1</sup>, 车晓超<sup>2</sup>

1. 山东大学山东省光学天文与日地空间环境重点实验室 空间科学与物理学院, 空间科学研究院, 山东 威海 264209;

2. 中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心, 北京 102206

月球角砾岩陨石是月表物质通过撞击作用不断胶结形成的岩石, 含有多种岩石碎屑、矿物碎屑、撞击熔体和角砾岩岩屑、撞击玻璃、火山碎屑、月壤颗粒等。随着月球陨石的深入分析, 在角砾岩陨石中发现了多种新矿物和新岩屑, 如镁质斜长岩 (Tekeda 等, 2006)、镁质斜长尖晶橄长岩 (Gross and Treiman, 2011)、方辉橄榄岩 (Joy 等, 2011) 等。月球角砾岩形成于浅表层 (<10 m), 化学成分代表了月球表层或次表层的物质组成, 其矿物学和岩石学研究对于理解月壳的成因及后期的改造作用具有重要价值 (Korotev 等, 2003)。

两块不同的月球角砾岩陨石 NWA 7611 和 NWA 10480 分别发现于 2012 年和 2015 年, 早期的岩石学和矿物学研究将其划分为月球长石质月壤角砾岩, 全岩化学成分和矿物学的相似性表明 NWA 7611 和 NWA 10480 是成对的 (Korotev 等, 2021), 都包含了长石质高地物质和月海玄武岩碎屑及大量的冲击熔融岩屑。我们对这两块月球角砾岩陨石进行了初步的岩石学和矿物学分析, 理解其岩屑的成因。

本研究主要利用两块抛光的陨石薄片 (NWA 7611 和 NWA 10480) 在北京离子探针中心开展岩石学分析, 借助 CARLZEISS MERLIN 康普顿扫描电镜及 Oxford 250 能谱仪 (EDS) 获取全岩的背散射成像图 (BSE) 和元素成像图, 其工作环境为: 20 kV 加速电压, 20 nA 束流。元素成像图和 BSE 揭示这两块

月球陨石是碎屑角砾岩, 包含斜长石, 辉石 (出溶结构和环带结构均有)、富镁橄榄石 (尺寸可达 3 mm) 及大量的二氧化硅颗粒, 镶嵌在暗灰色的重结晶基质中。我们识别的岩屑主要包含: 超镁铁质岩屑 (辉长岩)、玄武岩、粗粒麻粒岩、斜长岩、高度演化的岩屑 (花岗岩、后成合晶、石英二长辉长岩/石英二长闪长岩、二氧化硅-铁橄榄共生等)、辉石岩、冲击熔融角砾岩 (重结晶、富碎屑、玻璃质、淬火结构)、火山玻璃和冲击熔脉等随机分布于基质中。所有的超镁铁质岩屑中的橄榄石和辉石都表现出高镁特征, 粗粒的麻粒岩具有高镁和低镁两种不同的特征, 可能分属于镁质麻粒岩和亚铁麻粒岩, 部分斜长岩、重结晶冲击熔融角砾岩和辉石岩也表现出富镁的趋势。从成分上来看, 富镁的岩屑其母岩可能属于月球高地岩石类型的镁质岩套岩石, 代表了早期的玄武质岩浆形成的次生月壳 (富镁的侵入岩) 受到后期的撞击挖掘。高度演化的岩屑主要包含二氧化硅、碱性长石、铁橄榄石等矿物, 具有不同的结构特征, 类似于 Apollo 样品中发现的碱性岩套岩石。然而, 月海玄武岩在成分上呈现出中铁的特征, 有可能来源于后期月幔部分熔融形成的玄武质岩浆喷发, 或者是隐月海的溅射物。综上所述, 初步的岩石学分析揭示月球陨石 NWA 7611/10480 包含亚铁斜长岩、镁质岩套、碱性岩套和月海火山物质及玄武岩碎屑, 对于理解月壳岩石类型的多样性具有重要价值。

基金项目: 国家自然科学基金 (41972322、U1931211、11941001) 和科工局民用航天预研 (D020102)

第一作者简介: 曹海军 (1993-), 博士研究生, 研究方向: 行星样品研究. E-mail: Caohj@mail.sdu.edu.cn

\*通信作者简介: 凌宗成 (1981-), 教授, 研究方向: 行星物质遥感与实验研究. E-mail: zcling@sdu.edu.cn

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 针对嫦娥样品的多同位素纯化流程

王梓威<sup>1,2</sup>, 张英男<sup>1,2</sup>, 秦礼萍<sup>1,2\*</sup>

1. 中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 合肥 230026

2. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

近些年, 随着各种探测和测量手段的进步, 人们对于的太阳系形成和演化的规律有了更进一步的认知。而在这些测量手段中, 同位素以其对太阳系物质来源, 形成年代, 和演化过程的制约能力, 受到越来越多的关注 (Qin, 2016)。作为一种无损分析, 同位素测量往往会消耗较大量的样品, 这对于很多珍惜的天体样品是很难接受的。同时对于很多特殊的天体样品, 由于其独有性 (如陨石的分步淋洗溶液, 很多富集核合成异常特征的单矿物等), 不同的同位素分析体系针对不同的样品的测量结果进行对比较难不同体系之间的相关关系 (Qin, 2011)。而本次嫦娥五号样品为 1.7kg 月壤, 其中玄武岩碎块不超过 100 mg。因此, 针对同一份样品的多同位素纯化方法可以为研究太阳系样品的同位素特征, 指示太阳系形成和演化提供重要支撑。

前人工作也曾尝试在同一流程中纯化不同元素。然而这些方法主要是针对一两个同位素体系, 并且仅

对性质相近的元素进行纯化 (Nagai, 2014; Hibiya, 2019)。为了对嫦娥五号样品进行更高程度的综合利用, 以及从多个同位素角度出发对该样品的物源, 年龄等信息进行制约, 我们建立了针对 Mg, Fe, Ca, K, Cr, Ti, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Sm, Nd, Zr, Mo, Hf, W 等元素同位素体系的分离纯化流程。

流程首先通过阴离子树脂将大离子亲石元素和部分过渡金属元素与碱金属和碱土金属元素分开, 再通过阳离子树脂在稀酸中连续淋洗的方式将碱金属, 碱土金属和部分过渡金属元素依次淋洗分离出来。最后, 对于部分高场强元素, 通过调整氢氟酸和盐酸的比例, 使用阴离子交换树脂进一步进行区分纯化。

经纯化后, 各个待测体系的回收率均能达到 90% 以上, 其中不能使用双稀释剂的体系回收率可达 97% 以上。各个体系的全流程本底均在 ng 量级。同时, 由于尽可能多的元素都被分别回收, 因此流程回收的各个元素的纯化效率也都得到了较好的保证。

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 月球极区水冰模拟及其可见近红外光谱研究

齐晓彬, 刘莉, 陈剑, 刘长卿, 曹海军, 凌宗成\*

山东大学山东省光学天文与日地空间环境重点实验室 空间科学与物理学院 空间科学研究院, 山东 威海 264209

由于月球自转轴相对黄道面法线的倾斜角较小 ( $1.54^\circ$ ), 月球极区部分撞击坑底部由于地形遮挡无法受到太阳光照射而形成永久阴影区。永久阴影区内常年处于低温状态, 为水冰的存在提供了可能。了解月球水冰的存在条件以及水冰本身的光谱学特性是我们进行月球极区探测的基础, 也是我国月球探测的重要目标之一。然而, 目前对于月球极区永久阴影区中水冰的赋存状态仍然缺少实验约束, 其含量的评估也仅限于理论计算和数值模拟, 缺乏实验室实测数据的支撑。

本研究在实验室制备不同粒径的球形水冰颗粒并收集天然形成的水冰, 与紫苏辉石矿物进行不同方式的混合 (例如将不同粒径的水冰覆盖在矿物表面、将水冰与矿物以不同质量比例均匀混合, 表 1), 模拟月球极区永久阴影区中, 由于撞击溅射作用形成的水冰和矿物相互混合的脏冰、水冰被矿物掩盖以及水与矿物混合形成的冻土等可能的的水冰存在形式, 并通过可见近红外光谱进行表征, 获得水冰的反射率光谱

数据集。初步研究发现, 除  $1.3 \mu\text{m}$ ,  $1.5 \mu\text{m}$  和  $2.0 \mu\text{m}$  外, 不同粒径的纯水冰在  $1.65 \mu\text{m}$  处也存在吸收特征, 且随着粒径的增大其吸收深度逐渐减小; 随着粒径的增加, 水冰光谱的整体反射率逐渐降低, 其  $1.5$  和  $2.0 \mu\text{m}$  处的吸收深度与水冰的相对含量之间存在明显的相关性。当水冰覆盖在辉石上时, 水冰的存在掩盖了辉石在  $1.0 \mu\text{m}$  处的吸收特征, 这种掩盖效应会随着水冰粒径的增大而减弱。当水冰与辉石均匀混合形成脏冰时, 水冰  $1.65 \mu\text{m}$  处的吸收会随着其含量的减小而减弱, 并在水冰含量低于  $50 \text{ wt.}\%$  时消失。冻土的实验则指示出水冰反射率可能与其形成时的环境温度及冷却速率有关, 在较低温下快速冷却形成的水冰具有较高的反射率。

下一步将继续丰富实验内容和方法, 期待通过数据分析为月球极区水冰的赋存形式和探测方式提供实验室约束, 并为深入理解月球的极区挥发分起源与演化提供参考。

表 1 水冰实验内容

实验编号	实验类型	实验内容	水冰粒径大小
一	纯水冰	不同粒径纯水冰光谱	$30\sim 55 \mu\text{m}$ 、 $55\sim 100 \mu\text{m}$ 、 $100\sim 300 \mu\text{m}$ 、 $300\sim 400 \mu\text{m}$ 、 $350\sim 750 \mu\text{m}$
二	水冰覆盖辉石	不同粒径水冰覆盖在辉石表面	
三	脏冰	不同质量比例的水冰与辉石混合	
四	辉石与水冰相互覆盖	1. 辉石不完全覆盖水冰 2. 辉石完全覆盖水冰 3. 辉石表面再生成水冰	$100\sim 300 \mu\text{m}$
五	冻土	1. 去离子水与辉石混合浇入液氮形成冻土 2. 去离子水与辉石混合液氮降温形成冻土	

基金项目: 国家自然科学基金 (41972322、U1931211、11941001) 和科工局民用航天预研 (D020102)

第一作者简介: 齐晓彬 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 行星载荷及光谱遥感研究. E-mail: xiaobinqi@mail.sdu.edu.cn

\*通信作者简介: 凌宗成 (1981-), 教授, 研究方向: 行星物质遥感与实验研究. E-mail: zcling@sdu.edu.cn

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 领域自适应的全连接网络对 LIBS 光谱定量 分析方法的应用研究

王晓玉, 凌宗成\*, 刘平, 刘长卿, 辛艳青, 肖阿阳

山东大学山东省光学天文与日地空间环境重点实验室空间科学与物理学院空间科学研究院, 山东 威海 264209

激光诱导击穿光谱 (LIBS) 技术是元素分析的重要手段, 可定性和定量的分析样品。其利用脉冲激光清除岩石表面灰尘及风化层, 非常适用于行星探测中岩石及土壤的分析。2012 年好奇号火星车携带首台 LIBS 载荷-化学相器 (ChemCam) 登陆火星并采集其表面元素的光谱数据。为了分析好奇号采集的火星光谱数据的元素组成, ChemCam 团队在模拟火星大气条件下应用 ChemCam 的备份样机采集了 408 种地质样品的 LIBS 光谱数据, 并基于此构建了元素成分反演模型 (Clegg 等, 2017)。我国“祝融号”火星车搭载的物质成分分析仪 (MarSCoDe) 同样采用了 LIBS 技术, 并且已成功开展相关的探测工作, 因此提高基于 LIBS 光谱的元素定量分析模型的预测精度对于解译我国获取的 LIBS 数据具有重要的应用价值。

在本研究中, 我们基于 ChemCam 光谱数据库, 构建了一个领域自适应的全连接神经网络 (DAFCN), 用于对 LIBS 光谱数据的定量分析。DAFCN 主要由输入层, 特征提取层以及输出层组成。DAFCN 的特征提取层由神经元个数分别为: 1200 - 600 - 100 的全连接层组成, 且: (1) 训练集和测试集的特征提取器共享权重; (2) 利用 Adam 优化器优化特征提取层中领域自适应的 Coral 损失函数 (Sun 等, 2016), 该损失函数能够将无标记的目

标域实现无监督下的自适应学习。该网络的训练过程为: ①将带元素成分标注的训练集作为输入训练网络; ②将训练集和测试集同时作为网络的输入, 由 Coral 损失函数计算目标域和源域在特征提取层的特征差异, 利用 Adam 优化器优化进而实现源域和目标域的领域自适应, 使测试集参与到网络的训练中提高了目标域的预测精度, 同时也有效地避免网络过拟合; ③重复过程①和②直至训练结束。完成上述训练过程后即可将测试集放入模型中得到各元素成分的预测。为了验证 DAFCN 模型的有效性, 将三层全连接神经网络作为对比方法, 参数设置与 DAFCN 一致。从所有 ChemCam 样品中选取可用的 376 种样品的光谱数据作为数据集, 选取其中 80% 的样品作为训练集, 其余样品作为测试集, 使用均方根误差 (RMSE) 作为评定模型预测精度的标准。初步实验结果表明, 提出方法的各主成分的 RMSE 均小于对比方法, 并通过各主成分元素的真值与预测值的 1:1 对比曲线可直观看出 DAFCN 模型具有更好的预测精度。

综上, 本文所提出的 DAFCN 模型可用于 ChemCam 的 LIBS 定量分析。而“祝融号”火星车采集的 LIBS 光谱数据也需要构建类似的光谱库和定量分析模型, 解译更具有挑战性, 未来还需要进行更深入的研究来完善用于 LIBS 定量分析的回归模型。

基金项目: 国家自然科学基金 (41972322、U1931211、11941001) 和科工局民用航天预研 (D020102)

第一作者简介: 王晓玉 (1994-), 博士研究生, 研究方向: 行星载荷及光谱遥感研究. E-mail: yuzhouking@163.com

\*通信作者简介: 凌宗成 (1981-), 教授, 研究方向: 行星物质遥感与实验研究. E-mail: zcling@sdu.edu.cn

• 专题 26: 深空探测与天体化学 •

## Analytical X-ray nanotomography of carbonaceous chondrites and their heated samples as a rehearsal of Hayabusa2 sample analysis

M. Sun<sup>1</sup>, A. Tsuchiyama<sup>1,2</sup>, M. Matsumoto<sup>3</sup>, Y. Fujioka<sup>3</sup>, T. Nakamura<sup>3</sup>, J. Matsuno<sup>2</sup>, A. Miyake<sup>4</sup>, S. Okumura<sup>4</sup>, N. Tomioka<sup>5</sup>, M. Ito<sup>5</sup>, Y. Kodama<sup>6</sup>, S. Rubino<sup>7</sup>, N. Nakano<sup>4</sup>, K. Uesugi<sup>8</sup>, A. Takeuchi<sup>8</sup>, M. Yasutake<sup>8</sup>

1. CAS Key laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University, Japan;

3. Graduate School of Science, Tohoku University, Japan;

4. Graduate School of Science, Kyoto University, Japan;

5. Kochi Institute for Core Sample Research, Japan;

6. Marine Works Japan Ltd., Japan;

7. Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Saclay, France;

8. JASRI/SPring-8, Japan

The Hayabusa2 spacecraft has successfully returned to Earth on 6<sup>th</sup> of Dec. 2020, carrying samples of the C-type near-Earth asteroid 162173 Ryugu. It is highly expected that the samples are similar to carbonaceous chondrites (CCs), which play a significant role in water and organic material delivery to the earth (Kitazato, 2019). SR-based X-ray nanotomography (SR-XCT) is a powerful technique to characterize nondestructively the detailed 3D structures in particular for CCs which have fine matrix.

We performed SR-XCT analyses at BL47XU of SPring-8 synchrotron facility in Hyogo, Japan. SR-XCT acquires a nondestructive three-dimensional (3D) structure including external shapes and constituent phases with high signal-to-noise ratios and high spatial resolution (~100 nm) although the maximum sample size is restricted (<~100  $\mu\text{m}$ ). We combine two types of SR-XCT (Matsumoto et al., 2019), where absorption contrast images at two different energies using imaging nanotomography system (dual-energy tomography: DET) (Tsuchiyama et al., 2013) and phase-shift contrast images using scanning-imaging X-ray microscopy (SIXM) (Takeuchi et al., 2013) are obtained. In this DET-SIXM method, we can discriminate mineral phases and organic materials from the linear attenuation coefficients (LACs) and x-ray refractive index decrement (RIDs), which is almost proportional to material density, in phase shift images. This method could be beneficial to recognize the mineralogical features and estimate the heated condition of the

asteroid Ryugu samples.

As a rehearsal of the analysis of the Hayabusa2 samples, we analyzed 34 samples by the DET-SIXM method to small particles (30~100  $\mu\text{m}$  in size) of different groups of carbonaceous chondrites: Murchison, Murray and Mighei CM chondrites, Orgueil CI chondrite, Tagish Lake and Chwichiya C-Ungrouped chondrites to understand variations in the same meteorites and among different groups. Murchison samples heated at different temperatures from 400 to 990°C for 50 hrs., Murray samples heated at 600°C for different durations from 1 to 1000 hrs. and Orgueil samples at 500°C for 50 hrs. were also analyzed to examine the effect of heating, which is expected to occur on the Ryugu samples.

We obtained the peaks of the 3D histogram of the two LAC values at 7 and 7.35 keV and RID values as the representatives of the constituent materials in each sample grain. The first peaks generally come from the matrix of the meteorites, which is mainly composed of Fe-Mg hydrous silicates (serpentine in CM and saponite and serpentine in CI). We usually obtained the second and sometimes third peaks in CM, corresponding to chilinite-cronstedtite intergrowth (TCI) or TCI-like objects, forsterite and/or enstatite and calcite. We can estimate the Mg#, degree of dehydration and porosity of matrix from the 3D peak positions, and thus we call this method “analytical X-ray nanotomography”. The Mg# has some variations among different grains of the same meteorite the three different CM meteorites has similar

Mg# in average. In contrast, the Mg# of CI is slightly smaller than that of CM.

In Murchison (CM), the matrix peak positions heated at 400°C for 50 hrs. are almost similar to the unheated samples while that at 600°C for 50 hrs. becomes rich in Fe and partially dehydrated. The peak position at 990°C for 50 hrs. suggests that this contains heavy elements like Ca as well as Fe probably due to partial melting. In Orgueil (CI), the matrix peak positions heated at 500°C for 50 hrs. shows slight increase in Fe and the degree of dehydration. In Murray

(CM), the matrix became rich in Fe and partially dehydrated at 600°C for 10 hrs. but the Mg# and the degree of dehydration were almost the same even by increasing the heating duration. Based on the above results, it is concluded that (1) we may recognize the carbonaceous chondrite groups, CM, CI and C-ungrouped, (2) we can recognize samples heated at temperatures larger than ~500°C, (3) heated samples could experience two processes: Fe-enrichment and dehydration and (4) this method is not so sensitive to estimate heating duration at least at 600°C.

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 行星光谱学的基本原理与探测应用

凌宗成\*

山东大学山东省光学天文与日地空间环境重点实验室 空间科学与物理学院 空间科学研究院, 山东 威海 264209

行星光谱学以行星表面物质成分研究为科学主题, 采用紫外、可见、近红外、热红外、X 射线、激光等各种主被动光谱学手段, 获取星表地物的元素成分、矿物组成和岩石类型等信息, 为理解行星的地质成因和演化历史提供基础数据和关键线索。伴随着人类对月球、火星、小行星等太阳系天体进行环绕、巡视、样品返回乃至载人探测, 行星光谱学因其便捷性和高效性日益受到关注, 研究内涵不断拓展, 研究内容和方法手段愈加丰富。

行星光谱学不同技术的应用一般源于实验室样品分析需求, 而后在行星遥感和就位探测中逐步找到了用武之地。例如, 在元素成分探测方面, X 射线荧光 (XRF) 技术采用 X 射线光源激发元素内层电子, 产生的元素特征 X 射线谱线可用于实验室样品的主微量元素识别和定量分析。我国嫦娥三号玉兔号月球车搭载的粒子激发 X 射线谱仪也采用了 XRF 技术获取月球表面的岩石元素成分信息。与 XRF 类似, 激光诱导击穿光谱 (LIBS) 也是一种元素分析手段。LIBS 技术采用脉冲激光轰击样品产生高能等离子体, 等离子体退化过程中产生的元素特征谱线可用于识别样品的元素成分信息。LIBS 不仅已经在实验室和工业中有了广泛的应用, 也已经被用于探测, 例如美国的好奇号搭载的化学相机 (ChemCam)、毅力号搭载的超级相机 (SuperCam)、中国祝融号搭载的火星表面成分探测仪 (MarSCoDe)

等三台 LIBS 探测载荷正在火星表面盖尔撞击坑、耶泽罗撞击坑和乌托邦平原等三个不同的地区进行探测。在矿物探测方面, 紫外可见近红外光谱是常规的行星轨道和就位遥感探测手段, 它一般采用太阳作为光源获取地物的反射光谱, 光谱的特征吸收特征一般来自矿物晶格中的 Fe、Ti 等金属离子或羟基的倍频和组合频。我国嫦娥一号干涉成像光谱仪、嫦娥三号/四号红外成像光谱仪、天问一号矿物光谱仪均采用紫外可见近红外反射光谱遥感探测模式。红外光谱特征则是源自矿物晶体的振动产生的吸收, 在行星探测中一般常用热红外发射光谱获取, 例如火星奥德赛号搭载的热发射光谱仪 (TES)、勇气号和机遇号搭载的微型热发射光谱仪 (Mini-TES) 等。拉曼光谱是采用激光作为激发源的一种晶体振动光谱手段, 其源于光散射效应产生的拉曼频移。红外光谱和拉曼光谱由于矿物晶体振动模式的选择定则存在差异, 具有较强的互补性。目前, 毅力号上搭载的超级相机 (SuperCam) 和宜居环境扫描仪 (Sherloc) 均具备拉曼光谱探测功能, 将开展火星生命痕迹和宜居环境的探测。

综上, 行星光谱学是行星科学的重要研究领域和方向, 直接关系到深空探测任务中有关行星物质成分探测方面的科学产出。本文将聚焦于各类行星光谱学手段的基本物理原理, 结合已有探测数据分析各种技术的应用优势和局限性, 并对行星光谱学在未来深空探测中的应用进行展望。

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 土卫二冰下海洋中生命关键有机分子的非生物合成

陈曦<sup>1</sup>, Andrew Bartnik<sup>2</sup>, Daniel Molland<sup>2,3</sup>, 陈至仪<sup>1</sup>, 程文瀚<sup>1</sup>,  
黄方<sup>1</sup>, 郝记华<sup>1\*</sup>

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026;

2. Blue Marble space institute of Science, Seattle, USA 98104;

3. Department of Biochemistry, University of Oxford, Oxford, United Kingdom O2138

美国国家航空航天局的卡西尼探测器在土卫二喷出物中检测到有机物和无机盐的存在, 证明土卫二海洋冰下可能存在大规模的海底热液活动, 有利于地外生命的发生。目前, 关于这些有机物的来源和合成有多种假说, 包括陨石携带、FT 反应、微生物作用、水岩反应等。厘清土卫二冰下海洋中有机物, 尤其是构成生命的关键组分的来源及稳定性, 将有助于进一步限制海洋的生物宜居性。本工作构建化学热力学的

理论模型来检验土卫二海水和洋底热液体系中的生命重要构成分子的非生物合成及稳定存在的可能性。计算结果表明, 氨基酸的非生物合成在土卫二海水中相对有利, 而在热液体系中则不可以发生。这是由于温度升高会降低氨基酸的合成反应势。除此之外, pH 的升高也将降低氨基酸的合成反应势。本项目进一步考虑海水混合和动力学分解等模型, 期望对氨基酸在土卫二海水中的合成和稳定提供进一步的制约。

基金项目: 科研启动经费 (KY2080000082) CIFAR Azrieli 全球青年学者奖学金 21 年 (BB2080008002)

第一作者简介: 陈曦 (2001-), 本科生, 研究方向: 天体生物学. E-mail: erdong@mail.ustc.edu.cn

\*通信作者简介: 郝记华 (1991-), 特任研究员, 研究方向: 天体生物学. E-mail: hao@ustc.edu.cn

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## Laboratory formation and photochemistry of covalently bonded polycyclic aromatic nitrogen heterocycle (PANH) clusters in the gas phase

Yuanyuan Yang<sup>1,2</sup>, Liping Qin<sup>1,2</sup>, Junfeng Zhen<sup>1,2\*</sup>

1. CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environment, University of Science and Technology of China Hefei 230026;

2. CAS Center for Excellence in Comparative Planetology

To examine the evolution processes of the nitrogen-containing polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) molecules occurring in interstellar environments, in this work we focus on the formation of large covalently bonded N-substituted polyaromatic species and their photochemistry behavior in the gas phase. The experimental results show large PANH (e.g. DC/acridine and DC/phenazine) cluster cations formed in a chemical reaction between large PAH (e.g. dicoronylene, DC,  $C_{48}H_{20}$ ) cations and small PANHs (e.g. acridine,  $C_{13}H_9N$ , or phenazine,  $C_{12}H_8N_2$ ) by gas-phase condensation through ion-molecule reactions. With laser irradiation, PANH cluster cations are involved in a complex photofragmentation process (e.g. dehydrogenation, HCN/CN,  $C_2$  or  $N_2$  units lost) and then form large PANH/PAH or multiple dehydrogenated molecules; in particular, the dehydrogenation of PANH clusters provides a possible

way to synthesize large nitrogen-containing graphene species (e.g.  $C_{59}N^+$  and  $C_{61}N^+$ ). Also, we perform quantum-theoretical calculations on the formation and photochemistry of DC/acridine and DC/phenazine cluster cations: two types of molecular cluster are considered (C-C and C-N bond type) and the formation pathway and dissociation energy for each isomer are determined. The experimental and theoretical findings obtained give a general molecular growth pathway toward all-benzenoid aromatic species with size ( $> 60$  C atoms) in the astrophysically relevant range, during a ground up formation process, and offer understanding of the nitrogen element effect on their chemical-evolutionary behavior. Also, studies of DC/acridine and DC/phenazine clusters (89-112 atoms,  $\sim 2$  nm in size) offer a feasible means of explanation for the formation of nanoscale dust grains (nitrogen element included) in space.

基金项目: 国家自然科学基金 (1174304)

第一作者简介: 杨园园 (1995-), 博士研究生, 研究方向: 天体化学. E-mail: yangyy@mail.ustc.edu.cn

\*通信作者简介: 甄军锋, 特任研究员. E-mail: jfzhen@ustc.edu.cn

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## Gas-phase Formation of Cationic Fullerene/Amino Acid Clusters: Evidence for the “Magic Number” Chemical Reactivity of Fullerene Cations

Xiaoyi Hu<sup>1,2,3</sup>, Deping Zhang<sup>3,4</sup>, Yuanyuan Yang<sup>1,2,3</sup>, Yang Chen<sup>3</sup>,  
Liping Qin<sup>1,2</sup>, Junfeng Zhen<sup>1,2,4\*</sup>

1. CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environment, University of Science and Technology of China, Hefei 230026;

2. CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026;

3. CAS Center for Excellence in Quantum Information and Quantum Physics, Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale, and Department of Chemical Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026;

4. CAS Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Department of Astronomy, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

An experimental and theoretical investigation on the chemical reactivity of fullerene cations ( $C_n^+$ ,  $n = [36, 60]$ ) with amino acid molecules (e.g., isoleucine,  $C_6H_{13}NO_2$ ) is performed. The results show that, in the gas phase, fullerene cations can react with amino acid molecules to form fullerene/amino acid cluster cations with high efficiency. The formation rate constants for the ion-molecule collision reactions between fullerene cations and isoleucine are estimated under the pseudo-first-order reaction condition. We find the formation rate constants increase gradually with a declining C-atom number of fullerene cations ( $C_n^+$ ,  $n = [46, 60]$ ), and depict a plateau in the reactivity for smaller fullerene cations ( $C_n^+$ ,  $n = [36, 44]$ ). More importantly, by comparing to its neighbor

fullerenes, the magic number of C-atom counts (54, 58) that process with enhanced chemical reactivity are determined. We also obtained the molecular structures and binding energies for the fullerene-monoisoleucine adducts by quantum chemical calculations, which give a good explanation for the magic number chemical reactivity and the enhanced chemical reactivity of smaller fullerene cations. We infer that our results demonstrate the importance of ion-molecule reactions to the formation of large and complex fullerene-amino acid derivatives in the ISM. The high reactivity of fullerene species may indicate that amino acid molecules or other related prebiotic compounds can accrete on small interstellar carbon dust grains.

基金项目: 国家自然科学基金 (12073027, 41625013, 21827804)

第一作者简介: 胡潇毅 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 天体化学. E-mail: huxy0214@mail.ustc.edu.cn

\*通信作者简介: 甄军锋 (1981-), 特任研究员, 研究方向: 天体化学. E-mail: jfzhen@uatc.edu.cn

• 专题 26: 深空探测与天体化学 •

## 星际大分子和星际尘埃的形成和演化研究

甄军锋<sup>1,2\*</sup>, 杨园园<sup>1,2</sup>, 胡潇毅<sup>1,2</sup>, 张聪聪<sup>1</sup>, 陈旻<sup>1</sup>, 秦礼萍<sup>1,2</sup>

1. 中国科学技术大学, 合肥 230026;

2. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

当空间气体 (Molecular cloud) 经过光解离区 (PDRs, photo-dissociation regions) 并进入空腔 (Cavity) 时, 多环芳香烃化合物 (PAHs, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) 分子团簇会发生光解解离或者在光照射下转化为稳定的多环芳香烃化合物分子, 然后通过进一步的光化学过程被破坏掉或者转化为更稳定的富勒烯分子 ( $C_{60/70}$ ) 或者其他笼型分子。

我们首次系统性的在气相条件下产生了一系列的大分子团簇 (包括多环芳香烃化合物分子团簇和富勒烯分子团簇), 并研究了他们的光化学演化特征:

在光照情况下, 这些分子团簇会经过光解解离转变为大质量的芳香类化合物分子或者进一步的光解解离形成小质量的分子和富勒烯。这些实验结果为进一步完善, 理解和构建星际空间大分子形成和演化框架提供了实验数据支持。这些新形成的大分子团簇可以看作是小尺寸星际尘埃的模型或者是大尺寸星际尘埃的主要组成部分, 为将来开展从星际大分子拓展到星际尘埃的实验研究打下了良好的基础 (Zhen, 2019, 623, A10; Zhen et al., ApJ, 2019, 887, 70; Yang et al., MNRAS, 2020, 498, 1 和 Hu et al., ApJ, 2021, 918, 81)。

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 月球陨石光片制作过程树脂发泡现象的发现

杨溢, 刘建忠\*, 谷亚亚, 任曼, 周传娇, 邓啸天

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

在将两个月球陨石样品 (NWA11474 与 NWA11273, 岩性为斜长质角砾岩) 颗粒用树脂固定制成光片的过程中, 发现部分颗粒使用三种树脂, 共制靶七次全部发泡。该现象在既有关于月球样品研究的文献中从未报导。所用树脂包括: 异氰基丙烯酸甲酯 (2 次), 聚甲基丙烯酸酯 (1 次), 环氧树脂 (4 次)。该现象不可能是因为树脂原材料变质造成的, 因为: (1) 每次月球陨石样品制靶过程中同时使用的同一批树脂, 制备的大部分月球陨石颗粒光片不发泡; (2) 不含月球陨石颗粒的空白树脂靶不发泡; (3) 每次发泡的树脂样品都是同一批月球陨石颗粒。因此, 树脂发泡现象可能是样品本身的特殊性导致。

月球陨石光片样品制备过程的树脂发泡现象不但从未有公开文献发表, 而且在以往的制靶过程中也未得到重视与控制变量地观察, 因此其具体原因不明, 正在进一步探究中。根据对样品的观察提出如下

假设: (1) 可能因为树脂与颗粒反应生成挥发分; (2) 可能因为树脂与颗粒接触过程发生反应放热, 导致树脂中部分物质沸腾; (3) 可能因为颗粒本身吸附了足够的挥发分。

实践发现不发泡的制靶方法包括至少四种: (1) 使用链烃石蜡制靶, 该方法的局限是执行电子探针、扫描电镜实验时会降低真空度; (2) 使用多层复合材料制靶, 例如气相沉积生长薄层; (3) 使用非树脂材料制靶, 例如低温合金; (4) 先制造具有印痕或铸模的空靶, 再使用玻璃丝等在印痕外围爪状镶嵌边缘固定样品颗粒。月球陨石制靶过程中的树脂发泡现象带来如下启示: (1) 不是所有的月球样品都适合用常规制靶方法所用的树脂作为光片固定基材; (2) 本次发现具有发泡现象的月球陨石样品中可能存在未知的物相。未来针对月球陨石和采样返回的月球岩石标本应当重视发泡现象, 以减少样品损失。

基金项目: 中国科学院前沿重点项目“嫦娥 5 号月球样品综合研究”(ZDBSSW-JSC007); 国家国防科技工业局民用航天技术预先研究课题“嫦娥五号着陆区地质背景与月壤特性研究”(D020201)。

第一作者简介: 杨溢 (1993-), 博士研究生, 研究方向: 月球样品矿物组合及罕见样品实验方法研究. E-mail: yangyi@mail.gyig.ac.cn

\*通信作者简介: 刘建忠 (1968-), 研究员, 博士生导师, 从事深空探测及比较行星学研究. E-mail: liujianzhong@mail.gyig.ac.cn

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 月球陨石 NWA11479 的岩石学、矿物化学及年代学研究

陈景有<sup>1</sup>, 李少林<sup>1\*</sup>, 徐伟彪<sup>2</sup>, 廖世勇<sup>2</sup>, 祝梦华<sup>1</sup>

1. 澳门科技大学月球与行星科学国家重点实验室, 澳门;

2. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210023

镁质斜长岩广泛地存在于斜长质月球陨石中, 但是在 Apollo 样品中分布有限。相比 Apollo 亚铁斜长岩样品, 遥感数据表明大部分高地月壳成分更接近镁质斜长岩, 因而镁质斜长岩对月壳的形成及演化具有重要的意义。本文中, 我们研究了富镁质斜长岩角砾的月球陨石 NWA 11479 的岩石矿物学及年代学特征。

NWA 11479 为一块复碎屑斜长质角砾岩, 岩屑主要包括镁质斜长岩、镁质麻粒岩和少量亚铁斜长岩和冲击角砾岩, 细粒基质主要由包裹矿屑的重结晶冲击熔融玻璃组成。在 An 和 Mg# 指数投图上, 大多数的斜长质岩屑落在镁质斜长岩区域。这些镁质岩屑的矿物组合、矿物化学特征与前人发现的镁质斜长岩基本一致。基质中的冲击熔融结构表明陨石原岩经历强烈的冲击作用。基质中富缺位的单斜辉石(高压相矿物)的存在表明陨石经历了冲击后快速的冷却过程, 因而冲击作用对富 U 矿物(尤其是抗冲击能力强的锆石)的 U-Pb 同位素体系影响有限。在陨石的基质中发现了四颗磷灰石和一颗锆石, 其中三颗磷灰石与辉石共生, 锆石也与辉石共生, 并包含长石包裹体, 另外一颗磷灰石呈矿屑独立分布于重结晶玻璃基质中。与磷灰石和锆石共生的硅酸盐化学特征与镁质斜

长岩一致。三颗磷灰石获得了  $4305 \pm 30$  Ma 的 Pb-Pb 平均年龄, 与锆石的谐和年龄 ( $4329 \pm 10$  Ma) 一致。因此, 我们认为磷灰石和锆石的年龄代表了其原岩镁质斜长岩的形成年龄  $4322 \pm 15$  Ma (MSWD=1.6,  $P=0.17$ )。该结果与其他高地深成岩的岩石年龄一致, 指示二次岩浆作用在 4.3~4.35 Ga 这一时间段非常活跃, 很可能反映原始富铁月球高地在这一时间段被重新改造。

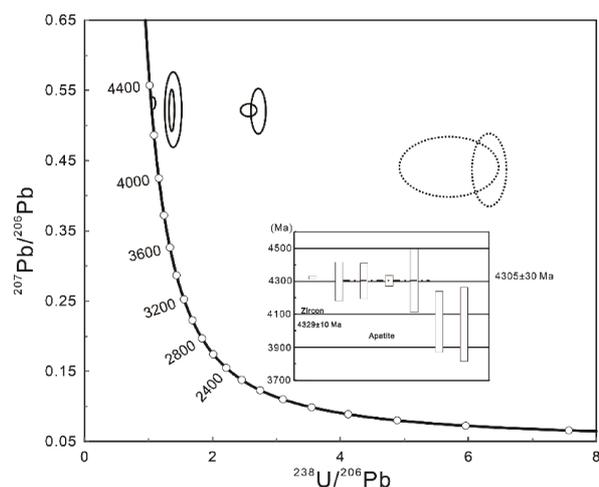


图 1 月球陨石 NWA11479 中磷灰石和锆石的年代学结果

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## LL7 型陨石的古地磁学研究对母体分异的启示

李海军, 温琛, 曹婷, 王华沛\*

中国地质大学古地磁与行星磁学实验室, 武汉 430074

陨石的古地磁学研究以及热演化模拟表明早期星子可以产生核心磁场发电机, 并可持续 10-100Myr (Wang et al., 2017; Weiss and Elkins-Tanton, 2013)。球粒陨石的母体被认为未经历过分异, 但球粒陨石的古地磁研究表明, CV 型球粒陨石 (Carpözen et al., 2011)、H 型球粒陨石 (Bryson et al., 2019)、R 型球粒陨石 (Cournède et al., 2020) 的母体存在核心磁场发电机, 表明母体为部分分异状态, 即在熔融的内部之上覆盖一层原始的球粒质物质。

LL7 型陨石的古地磁学研究能够为其母体是否为部分分异状态提供线索。LL 型球粒陨石含有较多的高矫顽力磁性矿物四方镍纹石, 相比于 H、L 型球粒陨石能更稳定的记录原生剩磁, 这与 Gattacceca and Rochette (2004) 发现 LL 型球粒陨石大都有着稳定的剩磁记录这一结果相符。7 型陨石为球粒陨石向无球粒陨石的过渡, 表明陨石经历过较高温度的热变

质作用, 其成因主要有两种: (1) 在大型撞击事件的高温作用下形成; (2) 正在进行热变质作用的星子经历撞击事件后再次升温形成 (Tait et al., 2014)。这两种成因模型基于球粒陨石母体无法达到 7 型陨石的形成温度这一假设, 而部分分异星子的出现表明球粒陨石母体能够达到硅酸盐液相线温度, 可能为 7 型陨石的成因提供新的解释。四方镍纹石是由镍纹石在 320℃ 以下冷却形成, 经历高温变质的陨石相比非平衡型陨石能够形成更多的四方镍纹石; 且 7 型陨石经历的高温已经超过铁镍金属的居里温度, 能够抹去高温变质前的剩磁, 记录从居里温度冷却时的母体磁场。

我们对一块 LL7 型陨石进行交变退磁发现其记录了稳定剩磁, 通过 REM' 方法 (Gattacceca and Rochette, 2004) 计算出其记录了约 16 $\mu$ T 的古磁场。而该磁场是否为母体核心磁场发电机产生的磁场还需进一步确认。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (42030205)

第一作者简介: 李海军 (1998-), 硕士研究生, 研究方向: 陨石古地磁学. E-mail: hjli@cug.edu.cn

\*通信作者简介: 王华沛 (1984-), 教授, 研究方向: 古地磁学与行星磁学. Email: huapei@cug.edu.cn

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 一块新发现的火星陨石 NWA 13763 的岩石矿物学特征和类型划分

张晋瑜<sup>1,2</sup>, 陈宏毅<sup>1,2\*</sup>, 谢兰芳<sup>1,2</sup>, 葛黎明<sup>1,2</sup>, 芦思洁<sup>3</sup>

1. 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541006;

2. 桂林理工大学陨石与行星物质研究中心, 广西 桂林 541006;

3. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100089

NWA13763 陨石总重量 119 g, 主要由熔长石 (36.51 vol%)、富铁普通辉石 (38.0 vol%) 和易变辉石 (8.82 vol%) 组成, 其次为熔斜长石 (4.99 vol%), 石英 (2.88 vol%)、磷灰石 (2.39 vol%) 和少量铁橄榄石、黑云母、赤铁矿、磁黄铁矿、方解石、顽火辉石、镁铝榴石、绿泥石和锆石等。陨石具有典型的岩浆分异结晶特征, 具有两种基本结构: 辉长结构和嵌晶结构。在辉长结构区, 辉石 (0.3~5.0 mm) 与半自形长石 (0.5~6.0 mm) 粒度近于相等, 相互穿插不规则排列。在嵌晶结构区, 大多数磷灰石自形程度较差, 在较大磷灰石 (0.25~0.8 mm) 矿物颗粒中嵌镶有较小的、浑圆的斜长石 (10~50  $\mu\text{m}$ ) 客晶。锆石的颗粒较小 (<10  $\mu\text{m}$ ), 且存在成分环带, 指示锆石结晶

生长过程。贫钙铁辉石 ( $\text{En}_{10.1}\text{Fs}_{70.9}$ ) 分解为蠕虫状“紫苏辉石 ( $\text{En}_{43.6}\text{Fs}_{52.4}$ ) + 铁橄榄石 ( $\text{Fa}_{96.4}$ ) + 石英”的后成合晶。大部分辉石为单斜辉石且成分极不均一, 辉石的  $\text{Fe}/\text{Mn}$  (mol) = 25.5~42.0,  $\text{Mg}^{\#}$  = 12.6~58.5,  $\text{Wo}_{9.97\sim 25.9}\text{En}_{10.5\sim 45.0}$ , 主要包括普通辉石、易变辉石, 顽辉石, 具有原始岩浆结晶成分环带, 从核部到边部 En 逐渐降低, Fs 逐渐升高。斜长石大部分转变为熔长石 ( $\text{An}_{41.6\sim 52.8}\text{Ab}_{46.4\sim 55.6}$ ), 主要为中长石。NWA 13763 含有冲击熔脉, 大部分斜长石熔长石化, 不含球粒和金属, 说明其属于无球粒陨石; 从橄榄石和辉石的  $\text{Fe}/\text{Mn}$  质和陨石的岩石学特征等综合对比, 其属于火星陨石中的辉玻无球粒陨石 (Shergottite)。该陨石的发现可为火星物质组成研究提供新的数据。

第一作者简介: 张晋瑜 (1996-), 硕士研究生, 研究方向: 陨石学与天体化学. E-mail: 714459603@qq.com

\*通信作者简介: 陈宏毅 (1980-), 博士, 正高级实验师, 研究方向: 陨石学与天体化学. E-mail: Chy@glut.edu.cn

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 岫岩陨石坑撞击成因柯石英的微结构特征与形成过程

尹锋<sup>1,2\*</sup>, Thomas G. Sharp<sup>3</sup>, 陈鸣<sup>2</sup>

1. 湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湘潭 411201;

2. 中国科学院广州地球化学研究所广东省矿物物理与材料研究开发重点实验室, 广州 510640;

3. Arizona State University, School of Earth and Space Exploration, Tempe, Arizona 85287, USA

柯石英是一种高压矿物, 最早由 Loring Coes (1953) 通过静高压实验合成。随后, 赵景德等人 (1960) 在 Meteor 陨石坑的冲击砂岩中首次发现天然柯石英, 并由此证实该坑是陨石撞击形成。从此柯石英成为陨石坑的判别标志之一, 迄今已在 30 多个陨石坑发现有柯石英。此外, 柯石英也产出在超高压变质岩、金伯利岩、以及金刚石包裹体等地方。从上述产状可知, 柯石英形成于高压环境。具体到陨石坑中的柯石英, 其成因机制有两种: 一是由石英、斯石英、玻璃等通过固态相转变(不发生熔融)形成; 二是从二氧化硅熔体中结晶形成。虽然成因机制已知晓, 但具体形成过程还需要根据柯石英产状具体分析。

岫岩陨石坑的撞击角砾岩中产出了大量柯石英。

这些柯石英主要以条状(宽 10~50  $\mu\text{m}$ )和球状(直径 5~30  $\mu\text{m}$ )两种形态产出在二氧化硅玻璃中, 两者都是多晶集合体, 由更细小的单晶柯石英(粒径 100~500 nm)组成。条状集合体从边缘到中心出现分带现象, 不同分带里的单晶柯石英的大小和密度不尽相同。而球状集合体则没有这种分带现象, 但有较多的不规则裂隙。我们认为, 上述两种产状柯石英的形成过程不同。条状类似熔融脉, 柯石英先在脉体外侧边缘由击变玻璃通过固态相变形成, 然后在脉体内侧边缘和中心从二氧化硅熔体中结晶形成。由于内侧边缘和中心的过冷度不同, 造成晶体大小和密度出现差异。球状的形成过程则相对简单, 都是固态相变形成, 其中的裂隙是玻璃和柯石英的膨胀差异造成的拉张破裂。

基金项目: 国家自然科学基金(41503062)、广东省矿物物理与材料研究开发重点实验室开放基金(GLMPM-36)、页岩气资源利用湖南省重点实验室开放基金(E21819)

\*第一及通讯作者简介: 尹锋(1986-), 副教授, 研究方向: 冲击变质与陨石坑. E-mail: fengite@hotmail.com

• 专题 26: 深空探测与天体化学 •

## 球粒陨石中金属的来源

刘焕欣, 刘金高\*

中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083

球粒陨石及其各组分的形成与演化是认识太阳系早期演化过程的关键。Fe-Ni 金属是球粒陨石中重要的组成部分,也是亲铁性元素的主要宿主。这些亲铁性元素不仅可以记录陨石母体的热演化和冷却过程,而且可以反映母体形成源区太阳星云的物质组成和氧化还原状态(Kong and Ebihara, 1997)。

球粒陨石中金属的成因包括: 1) 直接从星云中凝聚; 2) 硫化物的蒸发脱硫; 3) 富 FeO 硅酸盐的还原; 4) 富金属物质撞击再凝聚。为了探究金属在太阳系中的演化历程,必须详细厘清后期热事件(如球粒形成事件、陨石母体热变质作用以及撞击事件等)对于金属中亲铁性元素行为的影响。目前研究发现,在热变质过程中,金属中部分亲铁性元素(如 Re、Os、Ir、Ru、Pt、Rh、Pb、Au 等)随着镍的迁移而迁移,这可能是由于阳离子半径与其分配系数(铁纹石与镍纹石之间)存在相关性(Campbell and Humayun, 2003)。此外,后期事件也可能导致难熔金属元素与中

度难熔元素的解耦(Okabayashi et al., 2019)。

富金属的球粒陨石为探讨上述问题提供了条件(Weisberg et al., 2015), NWA 12273 是一块新发现于西北非的富金属、未分群(ungroup)的球粒陨石。金属约占 70 vol%, 未见细粒基质, 球粒类型主要为斑状橄榄石、斑状辉石球粒。对于金属的原位分析(LA-ICP-MS)发现, 难熔亲铁性元素(如 Re、Os、Ir 等)之间存在较好的相关性, 而且部分元素(如 Os、Ru 等)与 Ni 元素也表现出相关性。这一现象表明,除受早期挥发性控制元素分配以外,后期热变质也导致了部分元素发生迁移。铁纹石的亲铁性元素总体分布与 H 型球粒陨石和 IIE 型铁陨石中金属的成分存在一定相似性,演化程度介于二者之间。金属部分与硅酸盐部分的演化程度存在明显差异,金属部分在进入陨石母体之前,可能已经发生了一定程度的改造,之后的撞击导致金属与硅酸盐混合,这为球粒陨石中金属的形成提供了一种新的可能。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41822301, 41790451, 41730214)

第一作者简介: 刘焕欣(1992-), 博士研究生, 研究方向: 天体化学. E-mail: 3001180085@cugb.edu.cn

\*通信作者简介: 刘金高(1984-), 博士生导师, 研究方向: 放射性同位素地球化学、天体化学. E-mail: jingao@cugb.edu.cn

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 陨石样品中的 Re 和 PGEs 的离线分离纯化方法

曾玉玲<sup>1,2</sup>, 王桂琴<sup>1,3\*</sup>

1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

铂族元素(PGE)包括钌(Ru)、铑(Rh)、锇(Os)、铱(Ir)、铂(Pt)和钯(Pd)。由于铼(Re)和铂族元素同属于过渡族金属,有着相似的物理和化学性质,且<sup>187</sup>Re经 $\beta^-$ 衰变为<sup>187</sup>Os,半衰期41.6Ga,因此,Re和PGEs通常一起进行测定。对陨石样品的PGEs和Re-Os同位素体系的研究对行星的演化、形成以及核幔分异有着重要启示(Shirey and Walker, 1998; Day et al., 2010, 2016)。地球和陨石样品的PGEs纯化分离的常规方法是用树脂淋洗,然后使用质谱仪测定(Fischer-Gödde et al., 2011),这种方法化学和仪器分两次进行,时间较长,结果也不能及时获得。而使用树脂柱与测定仪器相连接的在线分离,同时测定的方法则可以避免这些不足,可以减少对样品的操作步骤和化学过程的时间,更及时地获得分析数据(Camel,

2003; Jalili, 2019)。鉴于以上情况,我们分别用两种方法对南丹陨石,吉林陨石和地质岩石标样OKUM(科马提岩)进行了PGEs和Re的化学分离和测定。

两种方法均使用AG50W阳离子树脂和HCl对样品进行纯化。样品的离线分离和测定在中国科学院广州地球化学研究所,同位素国家重点实验室完成,使用仪器为X2-serials ICP-MS(Thermo Fisher Scientific)。样品的在线分离和测定在奥地利莱奥本矿业大学分析化学实验室完成,使用仪器为NexIon 2000B ICP-MS(PerkinElmer)。

结果表明,使用两种分离方法均可很好地对陨石样品的Re和PGEs进行纯化分离,在线分离的过程本底较高,可能与树脂的重复利用相关。在线分离的方法可大大提高分析效率,获得好的重复性。

基金项目: 橄榄陨铁的Pt-Re-Os同位素成分研究及其对地球核幔边界组成的启示(D020203)

第一作者简介: 曾玉玲(1996-), 博士研究生, 研究方向: 陨石学、天体化学. E-mail: zengyuling@gig.ac.cn

\*通信作者简介: 王桂琴(1968-), 高级工程师, 研究方向: 陨石学、天体化学. E-mail: guiqinwang@gig.ac.cn

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 火星土壤粒度识别

赵思源<sup>1</sup>, 史语桐<sup>1</sup>, Suniti Karunatillake<sup>2</sup>, 肖龙<sup>1\*</sup>

1. 中国地质大学地球科学学院行星科学研究所, 武汉 430074;

2. Louisiana State University, E235 Howe-Russell, Baton Rouge, LA 70803, United States

火星表面土壤颗粒的粒度和形态对了解火星地质过程至关重要。目前, 已经有多种火星就位探测器搭载了显微相机, 并对土壤进行高分辨率的成像, 引起了广泛关注。但由于缺乏相关的工具, 大多学者不得不通过手动提取来分析土壤粒度 (Karunatillake et al., 2010; McGlynn et al., 2011)。手动识别不单费时费力, 在准确性上可能也存在着问题 (Karunatillake et al., 2014a)。在 Karunatillake 等 (2014a, 2014b) 算法基础上, 我们开发了一款半自动土壤粒度识别软件。当前软件适配了多款火星车的显微相机, 包括: 机遇号、勇气号的 MI 相机, 好奇号的 MAHLI 相机, 和毅力号的 WATSON 相机, 地球等相似的显微照片同样适用。软件主要包括以下功能: (1) 图像导入: 支持常见图像格式和以上火星显微相机的 IMG 格

式, 导入后的照片将自动进行 Gamma 校正。(2) 模糊检测 (可选): 去除照片模糊部分。(3) 前景分割 (可选): 前景指的是粒度远大于大多数土壤颗粒的石块, 通常具有较高的亮度, 可通过亮度等参数初步提取, 后续可通过较少的手动编辑得到更准确的边界。(4) 背景分割: 背景指绝大部分较小的颗粒, 可通过合并等参数调节达到较好的分割结果。(5) 土壤粒度形态统计: 该步计算每个颗粒的粒度、边长、圆度等特征, 并对粒度进行了 Wentworth 分类, 自动绘制了粒度分布曲线。(6) 数据导出: 所用到的参数、各个步骤的图像、图表、每个土壤颗粒形貌特征等信息均支持导出。目前, 软件已经测试了数十张火星显微照片的, 分割结果较好。在各项工作完善后我们十分愿意将软件发布, 并欢迎大家使用。

基金项目: 火星表面主要地质过程及生命与环境宜居性研究 (D020101)

第一作者简介: 赵思源 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 行星地质学. E-mail: siyuanzhao@cug.edu.cn

\*通信作者简介: 肖龙 (1963-), 教授, 研究方向: 行星地质学. E-mail: longxiao@cug.edu.cn

• 专题 26: 深空探测与天体化学 •

## 嫦娥四号红外成像光谱数据对南极艾肯盆地成分异常区的启示

陈剑<sup>1</sup>, 凌宗成<sup>1\*</sup>, 孙灵芝<sup>2</sup>, 乔乐<sup>1</sup>, 刘建忠<sup>3</sup>, 付晓辉<sup>1</sup>, 张江<sup>1</sup>, 李勃<sup>1</sup>,  
刘长卿<sup>1</sup>, 齐晓彬<sup>1</sup>, 卢学金<sup>1</sup>, 何志平<sup>4</sup>, 徐睿<sup>4</sup>

1. 山东大学空间科学研究院, 山东省光学天文与日地空间环境重点实验室, 威海 264209;

2. 夏威夷大学, 地球与行星科学系, 夏威夷地球物理与行星科学研究所, 檀香山 96826;

3. 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;

4. 中国科学院上海技术物理研究所, 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083

嫦娥四号着陆区位于冯·卡门撞击坑中芬森撞击坑溅射物影响的玄武岩单元, 而芬森撞击坑位于南极艾肯盆地底部的成分异常区之内, 因此玉兔二号对芬森溅射物与当地玄武岩混合物的探测为深入认识南极艾肯成分异常区的成因提供了机遇。嫦娥四号着陆区具有相对均一的矿物学特征, 介于冯·卡门玄武岩与芬森连续溅射毯成分之间, 解混分析表明嫦娥四号着陆区物质成分由~66%外来的芬森溅射物与~34%当地玄武岩组成。芬森撞击坑溅射出的南极艾肯成分异常区物质中平均斜长石

含量超过了南极艾肯盆地撞击熔融分异产物的斜长石含量, 因此形成南极艾肯成分异常区的矿物学特征需要额外的月壳物质加入。虽然撞击模拟研究认为长石质月壳已被南极艾肯撞击完全剥离, 南极艾肯撞击之后的盆地撞击事件对南极艾肯盆地底部产生了回填作用, 南极艾肯盆地形成时暴露出的月幔物质或撞击熔融产物已被月壳溅射物稀释, 矿物学与地球化学解混分析表明, 南极艾肯成分异常区表面月壤由~70%月壳物质与~30%富集 Fe 与不相容元素的物质混合而成。

表 1 嫦娥四号着陆区及其物质源区矿物学特征

地质单元	嫦娥四号	芬森溅射物	南极艾肯成分异常区	南极艾肯镁辉石环	冯卡门玄武岩	长石质上月壳
数据源	红外成像光谱仪	多谱段成像仪	多谱段成像仪	多谱段成像仪	多谱段成像仪	月球陨石
斜长石 (vol.%)	57.0	60.4	60.4	66.1	44.7	82.2
低钙辉石 (vol.%)	15.8	18.6	23.4	20.4	22.3	7.5
高钙辉石 (vol.%)	22.7	16.2	12.6	10.6	22.3	4.0
橄榄石 (vol.%)	4.4	4.8	3.7	2.8	10.6	5.9
低钙辉石/高钙辉石	0.7	1.1	1.9	1.9	1.0	1.9
斜长石 (wt.%)	51.7	54.5	54.7	61.0	39.2	78.6
低钙辉石 (wt.%)	18.1	21.6	27.0	23.7	24.7	9.0
高钙辉石 (wt.%)	24.9	17.9	13.9	11.9	23.8	4.6
橄榄石 (wt.%)	5.3	5.9	4.5	3.4	12.3	7.3
低钙辉石/高钙辉石	0.9	1.2	1.9	2.0	1.0	2.0

基金项目: 中国博士后科学基金 (2020M682164)、国家自然科学基金 (42102280)

第一作者简介: 陈剑 (1992-), 男, 博士后, 研究方向: 嫦娥工程数据解译与月球科学研究. E-mail: merchenj@sdu.edu.cn

\*通信作者简介: 凌宗成 (1981-), 男, 教授, 研究方向: 行星物质遥感与实验研究. E-mail: zcling@sdu.edu.cn

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## Fe-Mg 同位素揭示嫦娥五号玄武岩月幔源区特性

蒋云<sup>1</sup>, 康晋霆<sup>2\*</sup>, 廖世勇<sup>1</sup>, Stephen M. Elardo<sup>3</sup>, 宗克清<sup>4</sup>, 王思杰<sup>2</sup>,  
聂昌<sup>1</sup>, 李沛毅<sup>1</sup>, 殷宗军<sup>5</sup>, 黄方<sup>2</sup>, 徐伟彪<sup>1\*</sup>

1. 中科院紫金山天文台, 南京 210023;
2. 中国科学技术大学, 合肥 230026;
3. 美国佛罗里达大学, 32506;
4. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074;
5. 中科院南京地质古生物研究所, 南京 210008

月球的火山活动维持到 20 亿年前大大地刷新了我们此前对于这颗具有高表面积/体积比星球的认知。嫦娥五号样品的特性以及月幔源区性质成为科学家们研究的关键问题, 因为这有助于理解月球晚期火山活动的驱动机制。

对两个玄武岩岩屑样品(编号 CE5C0800YJ YX038)开展三维 CT 扫描, 确认岩屑样品是玄武岩, 不是撞击熔体。选取部分样品制成光片, 开展详细的岩相学和矿物学原位分析, 剩余样品溶解开展微量元素和 Fe-Mg-Sr 同位素分析。结果表明, 组成两个玄武岩岩屑的辉石、橄榄石和长石等的化学成分均与前人发表结果一致, 证实代表嫦娥五号着陆区本地的玄武岩熔岩流。全岩主量元素和微量元素表明, 嫦娥五号样品是迄今为止最演化的玄武岩(Mg#: 29, (La)<sub>N</sub>: 158), 具有高铁(FeO: 24.7 wt.%)、高钍(Th: 5.1 μg/g)和居中钛含量(TiO<sub>2</sub>: 5.75 wt.%)的特点。

铁和镁是玄武岩中的主量元素。随着分析技术的进步, Fe-Mg 同位素体系已经广泛应用于理解地球及类地行星的岩浆过程。前人研究显示, 月海玄武岩分离结晶橄榄石不会造成 Fe-Mg 同位素分馏, 因此可以作为有效的工具示踪玄武岩的源区特征。基于已获取的主微量元素及 Fe-Mg 同位素数据, 研究团队估算了嫦娥五号玄武岩的母岩浆成分, 并对月球岩浆洋冷凝结晶过程进行了模拟计算(图 1)。计算表明, 岩浆洋早期结晶的富橄榄石堆晶具有轻 Fe、重 Mg 同位素的特征, 晚期富辉石堆晶具有重 Fe、轻 Mg 同位素的特征。嫦娥五号月球样品的 Fe-Mg 同位素组成指示了其月幔源区可能为两种堆晶体的混合, 晚期结晶的富单斜辉石堆晶比例可能为 20%~30%。富集单斜辉石堆晶可以显著降低月幔的熔点, 这可能为月球晚期年轻火山活动的产生起到了十分关键的作用。

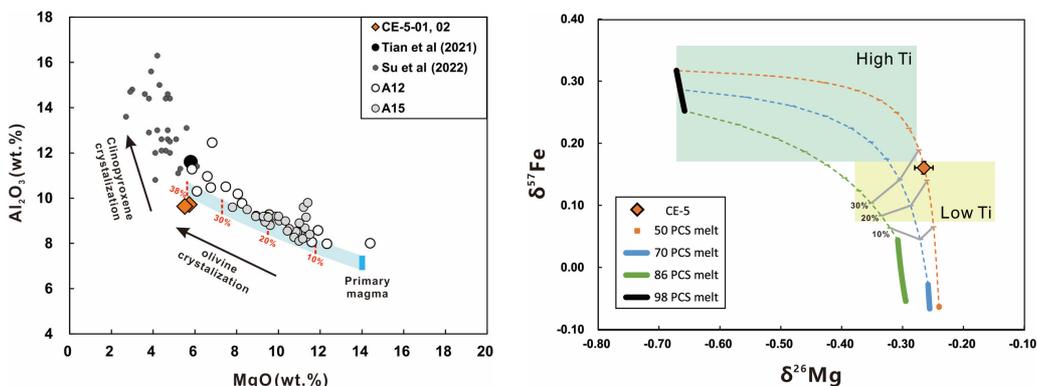


图 1 嫦娥五号玄武岩的初始岩浆推算(左)及月球岩浆洋早期和晚期堆晶体的 Fe-Mg 同位素混合计算(右)

基金项目: 科工局预研项目(D020202, D020302)、中科院行星科学先导 B 项目(XDB 41000000)、国家重点研发计划(2021YFA0716100)、国家自然科学基金(42173044, 42241146, 42073060, 41973060)、院重点部署项目(ZDBS-SSW-JSC007)及小行星基金会。

第一作者简介: 蒋云(1984-), 副研究员, 研究方向: 陨石和返回样品的岩矿学和地球化学研究. E-mail: yjiang@pmo.ac.cn

\*通信作者简介: 康晋霆(1991-), 特任副研究员, 研究方向: 岩石地球化学和行星地球化学. E-mail: kjt@ustc.edu.cn;

徐伟彪(1962-), 研究员, 行星化学和陨石学. E-mail: wbxu@pmo.ac.cn

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 木星伽利略卫星探测：关键科学问题、现状和机会

章清文<sup>1</sup>, 刘耘<sup>1,2,3\*</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

2. 成都理工大学行星科学国际研究中心, 成都 610059;

3. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

木星的伽利略卫星（即木卫一、木卫二、木卫三和木卫四）是太阳系重要的类地天体成员。由于轨道共振引发的潮汐生热，伽利略卫星普遍具有活跃的地质活动，为探讨地球早期壳幔分异、构造体制演变和生命起源提供难得的参照，一直以来是美国航空航天局（NASA）和欧洲空间局（ESA）持续关注的重要探测目标。20 世纪 70 年代以来，NASA 的“旅行者号”和“伽利略号”等对伽利略卫星的探测取得了丰富成果，包括：木卫一存在剧烈火山作用（甚至存在超镁铁质岩浆活动）和热管构造，其软流圈可能是一个现存的全球性岩浆洋；在木卫二/三表面发现大量的水平构造运动记录，而木卫二/三/四可能存在能够孕育生命的冰下海洋；木卫三存在自发磁场，是太阳系内唯一存在磁场的卫星；木卫一/二内部充分分异，而木卫三/四分异程度很低，表明分异程度随着潮汐加热增强而增加。由于现有探测数据精度不足，一些涉及类地天体热和成分演化的关键问题一直悬而未

决；抓住中国开展木星探测项目（即“天问四号”，拟于 2030 年前后发射）的历史机遇，找准突破口，有望解决这些问题，包括：（1）获取精确的红外光谱/成像和重力数据，确定木卫一的火山活动规律（尤其是岩浆温度和成分），厘清潮汐生热的位置和速率、地幔结构和熔融状态，验证所谓的“岩浆洋”是否存在，限定类地天体（如冥古宙时期的地球、水星和金星等）早期构造演化和壳幔分异；（2）获取木卫二/三/四地表形态、运动学、热流分布和重力场信息，研究水平构造运动、冰下海洋（包括冰火山）的性质和成因，反演其内部结构；（3）通过实验和数值模拟手段获取木卫三金属核的物性和热收支，有助于揭示类地天体的发电机过程和磁场成因；（4）监测伽利略卫星地表或大气的成分（如水和硫化物等）与潮汐生热、磁场演变之间的相互作用，研究类地天体挥发分的析出-逃逸过程，揭示生命宜居性的形成条件和生命起源。

基金项目：中国科学院战略性先导科技专项(B类)项目(XDB41000000)

第一作者简介：章清文（1987-），男，助理研究员，研究方向：类地天体动力学。E-mail: zhangqingwen@live.cn

\*通信作者简介：刘耘（1968-），男，研究员，研究方向：同位素地球化学、天体化学。E-mail: liuyun@vip.gyig.ac.cn

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 硅酸盐液相不混溶对嫦娥五号月壤中年轻的高度演化岩屑成因的意义

杨晶<sup>1</sup>, 鞠东阳<sup>2,3</sup>, 庞润连<sup>2</sup>, 李瑞<sup>1,3</sup>, 刘建忠<sup>1,4</sup>, 杜蔚<sup>2,4\*</sup>

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. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

3. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049;

4. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

具有高度演化成分的月球岩石虽然样品量较少, 但是它们记录了月球岩浆从玄武质到硅质演化的极端分异过程, 对月球样品的岩石学成因研究有重要意义。近年来, 遥感探测发现月表分布着一系列硅质火山穹窿(如 Mairan 穹窿等)和少量的硅质侵入岩(例如, 出露于 Aristarchus 撞击坑)。根据撞击坑统计定年结果, 其中的一些硅质岩的形成年龄要比 Apollo 返回样品和月球陨石中的高度演化岩石(年龄介于 38.8–43.2 亿年)年轻。这些相对年轻的硅质岩主要分布在风暴洋克里普地体(PKT)内, 因此先前的研究认为它们的形成与富 KREEP 源区和玄武岩底侵作用存在关联。但嫦娥五号(CE-5)任务返回了位于风暴洋北部的年轻的月海玄武岩样品, 其月幔源区贫 KREEP, 这表明 KREEP 可能并不是 PKT 内较年轻的玄武岩以及富硅岩浆形成的先决条件。此外, 月球花岗质或硅质侵入岩的成因可能与硅酸盐液相不混溶(SLI)有关, 但是岩浆结晶分异晚期发生 SLI 是否可以形成较大规模的、相互分离的“富硅”和“富铁”的熔体仍存在很大的争议。因此, 包括硅质岩在内的月球高度演化岩石的成因及其与 KREEP 的联系都需要更多的月球样品研究进行验证和约束。

经分析发现, CE-5 月壤粉末光片 CE5C0800 YJFM00101GP(简称为 01GP)中存在少量具有高度演化特征的岩屑。综合运用岩相学、矿物学、地球化学和年代学等多种分析手段, 结合热

力学计算模拟(运用 rhyolite-MELTS\_v1.0x 和 MAGFOX 分别对月球石英二长闪长岩 QMD、KREEP 玄武岩、CE-5 玄武岩进行了平衡结晶和分离结晶模拟计算), 探讨了这些高度演化岩屑的岩石学成因。研究表明, 01GP 中的高度演化岩屑可分成两类。其中, A 类岩屑形成于月壳浅部, 其母岩浆经历分离结晶和硅酸盐液相不混溶作用, 所产生的富硅熔体缓慢结晶形成侵入岩。根据遥感探测结果, 推断 A 类岩屑极有可能来自 Aristarchus 撞击坑出露的年轻的(~25–37 亿年)“花岗质”侵入岩。而 B 类岩屑, 根据热力学计算结果和钙钛锆石结晶年龄(~26 亿年), 推测其为嫦娥五号着陆区的 Em3 玄武岩经历约 75% 的分离结晶之后进入硅酸盐液相不混溶区再进一步演化而形成。本研究工作证明, 硅酸盐液相不混溶作用很可能在形成月球年轻的硅质侵入体和富铁玄武岩的后期演化过程中起到了关键作用, 并且 CE-5 月壤中存在其他较年老的(~26 亿年)玄武岩。

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDB41000000), 国家自然科学基金面上项目(41773052、41973058), 国家自然科学基金青年基金项目(41603067、42003054), 中国科学院前沿重点项目(ZDBS-SSW-JSC007-10), 国家国防科技工业局民用航天技术预先研究课题(D020201), 中国博士后基金项目(2020M680155)

第一作者简介: 杨晶(1986–), 副研究员, 研究方向: 比较行星学和天体化学. E-mail: yang-jing@mail.gyig.ac.cn

\*通信作者简介: 杜蔚(1980–), 研究员, 研究方向: 实验地球化学和行星科学. E-mail: duwei@mail.gyig.ac.cn

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## NWA 11801 月球陨石中火山玻璃的成分研究- 是否暗示了月幔柱的存在?

陈国柱, 缪秉魁\*

桂林理工大学 a. 陨石与行星物质研究中心, 行星地质演化广西高校重点实验室,  
广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541006

月球被认为是由大撞击形成的, 撞击的巨大能量使月球发生了大面积的熔化, 形成了岩浆洋。月球岩浆洋的结晶演化出了月壳和月幔的结构, 预示着月球初期演化阶段的完成。月幔柱是月幔岩浆熔体向月表运移的重要通道, 月球上的火山作用以及月海的形成可能都与月幔柱的活动密切相关, 因而月幔柱可能在月球的形成和演化过程中起到了重要的作用。然而, 月球上发现可能存在月幔柱的痕迹少之又少。目前, 有一种说法认为月海下方某些位置存在一种高密度质量瘤, 这种高密度质量瘤可能是上升的月幔柱的头部, 因其未能到达月表而使得月幔熔体在月海下方积聚形成了这个质量瘤。其次, 另一种假说认为月球表面大陨石坑的形成与上升的月幔柱有关。然而, 月球样品的缺乏和地月空间的限制无法开展深入研究, 因此月球上是否有月幔柱的存在仍然是一个谜。

本次工作, 主要是对 NWA 11801 中一颗特殊的

火山玻璃(内含橄榄石斑晶)的岩矿特征进行分析, 研究了其形成过程。首先, 利用电子探针测定了火山玻璃和橄榄石的化学成分; 接着, 利用 PRIMELT3 模拟出了原始岩浆的组分; 随后, 通过液体温度计模拟计算出了熔体可能来源于~1495 °C 和 16.7 kbar (334 km 深度), 这一结果表明, 玻璃珠的原始岩浆来自月球内部深处 (>260 km); 最后, 通过 MELTS 对熔体进行了 P-T 路径的模拟, 并利用液体温度计计算出了橄榄石开始结晶的深度~220 km (~1400 °C 和 ~11 kbar)。同时, 我们计算出玻璃珠母岩浆是从岩浆源区沿绝热路径以~40 m s<sup>-1</sup> 或 0.2 MPa s<sup>-1</sup> 的速率上升的。综上所述, 火山玻璃的母岩浆是从~334 km 深的月幔源区, 沿绝热路径以~40 m s<sup>-1</sup> 或 0.2 MPa s<sup>-1</sup> 的速率上升到月表, 可能表明了此次火山作用是岩浆熔体沿月幔柱的通道向上喷发形成的, 有可能指示了月幔柱的存在。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41173077、41776196)

第一作者简介: 陈国柱 (1993-), 博士研究生, 研究方向: 行星科学与天体化学. E-mail: guozhu@glut.edu.cn

\*通信作者简介: 缪秉魁 (1966-), 教授, 研究方向: 行星科学与天体化学. E-mail: miaobk@glut.edu.cn

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 嫦娥五号玄武岩成因及火山喷发规模研究

田恒次<sup>1\*</sup>, 杨蔚<sup>1</sup>, 陈意<sup>2</sup>, 王浩<sup>2</sup>, 林杨挺<sup>1</sup>, 李献华<sup>2</sup>, 吴福元<sup>2</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 地球与行星物理院重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

月球火山活动是月球内动力地质作用最重要的表现, 成为揭示月球内部物质组成和热演化历史的重要窗口。阿波罗和月球号返回的样品以及月球陨石的研究表明月球岩浆活动可以从 40 多亿年一直持续到 28-29 亿年, 这与理论模型估算的结果一致。然而, 陨石坑定年方法表明风暴洋克里普地体的岩浆活动可持续至 10 亿年前, 年轻的火山活动很可能蕴含了月球晚期热演化及月球如何逐步走向死亡的奥秘。在嫦娥五号任务返回样品之前, 人类对月球形成和演化的认识主要是基于美国阿波罗计划期间采集回来的样品。要想更全面地了解月球形成和演化历史, 需要有不同年代的样品, 尤其是年轻的样品。2020 年底, 我国嫦娥五号任务顺利从月球正面风暴洋北部地区

返回样品, 开启了我国行星科学研究的热潮。对嫦娥五号样品的研究证实月球直到 20 亿年前仍存在岩浆活动, 这一结果不仅刷新了人类对月球岩浆活动和热演化历史的认知, 同时也提出了新的科学问题。比如, 月球火山活动为什么持续如此之久? 年轻火山岩的月幔源区组成? KREEP 的含量和分布等科学问题。

本次汇报将围绕最新关于嫦娥五号年轻火山岩的成因开展, 主要的结论包括以下几点: (1) 嫦娥五号年轻玄武岩源区 KREEP 组分有限; (2) 首次建立玄武岩源区和演化模型; (3) 斜长石微量元素组成揭示玄武岩起源于低钛熔体; (4) 通过对嫦娥五号玄武岩中橄榄石和辉石的化学成分变化反演了玄武岩的冷却速率, 并据此估算了玄武岩的喷发厚度和喷发体积。

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 嫦娥五号月壤的光谱学和太空风化效应研究

卢学金<sup>1</sup>, 陈剑<sup>1</sup>, 凌宗成<sup>1,3\*</sup>, 刘长卿<sup>1</sup>, 曹海军<sup>1</sup>, 付晓辉<sup>1</sup>,  
乔乐<sup>1</sup>, 张江<sup>1</sup>, 刘建忠<sup>2,3</sup>

1. 山东大学空间科学研究院, 山东省光学天文与日地空间环境重点实验室, 威海 264209;

2. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081;

3. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

地球上的“风化”通常指代岩石破碎和裂解形成土壤的过程。而在月球上, 由于没有大气和强磁场的存在, 表面物质长期受到太空环境中太阳风、宇宙射线和流星体撞击等作用。这些月球上的风化过程发生在太空环境中, 因此被称为“太空风化”。太空风化过程改变了月壤的物理和化学特性, 通过还原等方式形成了金属铁颗粒 (Papike et al., 1982)。月壤中的金属铁具有很强的光学效应, 且与粒径相关。粒径较小的金属铁 (纳米铁) 通常赋存于月壤颗粒边缘, 会导致其可见近红外光谱斜率变陡 (红化)、反射率降低 (暗化) 以及矿物吸收特征减弱; 随着小粒径的金属铁逐渐聚集形成较大粒径集合体 (微米铁) 时, 红化的光谱效应减弱, 暗化和抑制吸收特征的效应仍然存在 (Hapke, 2001; Lucey and Reiner, 2011)。

人类对于月球太空风化作用的认识始于上世纪六七十年代美国 Apollo 和前苏联 Luna 任务返回的月球样品研究, 并在后续轨道卫星遥感数据研究中得到进一步深化。受先前样品采样点的时空分布约束 (主要为月球正面 9°S–27°N, 玄武岩年龄 >30 亿年), 对全月表面太空风化的认识亟待新的任务采集更为年轻、更高纬度的月球样品。2020 年 12 月 1 日, 我国嫦娥五号任务成功着陆于月球风暴洋北部 (43.06°N), 返回了迄今为止最为年轻 (~20 亿年) 且极为富铁 (FeO~22.5 wt.%) 的月海玄武岩样品 (Che et al.,

2021; Li et al., 2022), 并在采样前后对着陆区域进行了原位光谱测量, 这为研究年轻玄武岩的太空风化机制提供了契机。本研究联合采用嫦娥五号样品 (CE5C0400 YJFM00501、CE5C0600YJFM00301) 实验室光谱、月面原位光谱以及遥感光谱等多源数据, 利用 Hapke 辐射传输模型成功模拟了金属铁在月壤中的光学行为, 经多源光谱数据交叉验证, 获得了嫦娥五号着陆点风化层的纳米铁含量 (0.48±0.03 wt.%) 和成熟度指数 (~66±3.2), 表明该区域的月壤比较成熟。

根据已有的 Apollo 月壤暴露年龄与成熟度的相关性, 本研究约束出嫦娥五号月壤的宇宙暴露年龄约为 240–300 Ma, 并利用遥感数据绘制了着陆区纳米铁含量分布, 证明了嫦娥五号月壤主要来自于徐光启撞击坑的溅射物。与 Apollo 和 Luna 返回样品乃至玄武质月球陨石相比, 嫦娥五号样品是最年轻的玄武岩, 而嫦娥五号着陆点的月壤并不年轻, 其经历了数亿年的太空风化作用, 暴露年龄与 Apollo 和 Luna 任务返回的成熟月壤相近。

根据模型和已有实验研究结果, 嫦娥五号月壤中存在丰富的大粒径金属铁颗粒, 这可能是富铁的玄武岩在经历太空风化形成月壤时, 纳米铁产率更高, 且可能发生饱和聚集形成粒径更大的铁单质颗粒。

未来嫦娥五号样品的月壤暴露年代学等更多相关实验研究将有望进一步揭示这种特殊的太空风化机制。

基金项目: 国家自然科学基金 (41972322、11941001)

第一作者简介: 卢学金 (1998–), 博士研究生, 研究方向: 月球遥感光谱学. E-mail: luxuejin@mail.sdu.edu.cn

\*通信作者简介: 凌宗成 (1981–), 教授, 研究方向: 行星遥感与光谱学、行星化学、行星地质学. E-mail: zcling@sdu.edu.cn

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 冻融循环对粘土矿物的影响及对火星层状硅酸盐探测的启示

张聆汐<sup>1</sup>, 付晓辉<sup>1,2\*</sup>, 凌宗成<sup>1,2</sup>

1. 山东大学空间科学研究院, 山东省光学天文与日地空间环境重点实验室, 威海 264209;

2. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

早期火星上含有丰富的液态水, 并且气候是温暖湿润的, 而如今的火星寒冷又干燥, 冰和冰川作用是后来西方纪和亚马逊纪的主要地质因素 (Souness et al., 2012)。这样的情况表明, 随着时间的流逝, 火星上发生了巨大的环境变化。而随着火星的自转和公转, 火星表面上也会发生昼夜温差, 以及季节性的温度变化。在这种情况下, 火星上赋存的水会发生反复的冰冻和融化。

粘土矿物形成于火星诺亚纪, 是古老的次生盐类, 经历了火星后续的环境变化。其形成受到多种环境条件的影响, 如 pH、温度、水岩比、水活动持续时间等, 因此是火星环境演变的关键指示物 (Ehlmann et al., 2014; Zhong et al., 2022)。迄今为止, 通过遥感手段, 在火星表面上探测到了大量的粘土矿物赋存 (Ehlmann et al., 2014; Bishop et al., 2017); 而通过好奇号搭载 CheMin 的就位探测, 在盖尔撞击坑中发现了低结晶度的蒙皂石等无定形矿物成分, 其他河湖相样品中也检测到了弱结晶的粘土矿物 (Vaniman et al., 2014)。目前火星上大面积的矿物识别仍依赖于轨道光谱遥感, 而矿物的结晶度会

影响其晶体结构, 从而影响遥感识别结果。

粘土矿物拥有独特的层状结构, 其层与层之间能进行水分子的贮存。根据火星上温度的变化, 粘土矿物的层间水会发生反复的冻结和融化, 从而引起层状结构的膨胀与收缩。长时间的膨胀-收缩作用会破坏粘土矿物的结构, 导致体积膨胀, 甚至产生破裂, 进而影响其表征结果 (Mu et al., 2013; Chen et al., 2019)。

在此研究中, 我们拟对不同类型的粘土矿物, 在不同水岩比的条件下进行冷冻融化实验, 并对产物进行 X 射线衍射、可见近红外、拉曼光谱、扫描电镜等表征, 探究火星表面上温度变化对粘土矿物结构的影响, 将实验结果应用与火星层状硅酸盐的探测中。

经过初步实验, 水岩比分别为 1:1 和 2:1 的高岭石样品在温度 -20 °C 和 5 °C, 单次循环时间 24 h 的条件下, 进行了一周的冻融循环。X 射线结果表明, 两组高岭石样品的晶体结构并未发生显著变化, 后续还需对更多组分的粘土矿物进行更多次的冻融循环, 以探究火星温度变化对粘土矿物结构及光谱的影响。

基金项目: XM 人事基本-行星物质研究 (1100501320011)

第一作者简介: 张聆汐 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 行星矿物学. E-mail: zhanglingxi@mail.sdu.edu.cn

\*通信作者简介: 付晓辉 (1985-), 教授, 研究方向: 月球与行星表面地质过程. E-mail: fuxh@sdu.edu.cn

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

# 火星陨石 NWA 12564 的矿物岩石学和地球化学研究

张欣茹<sup>1,2</sup>, 王英<sup>1\*</sup>

1. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210034;

2. 中国科学技术大学天文与空间科学学院, 合肥 230026

NWA (Northwest Africa) 12564 是一块 2019 年在非洲西北部新发现的火星陨石。我们通过全岩氧同位素组成、硅酸盐矿物的 Fe/Mn 等一系列证据证实了它的火星来源。为了了解 NWA 12564 的形成过程及其经历的次生变质作用, 进而加深对火星岩浆演化历史的认识, 我们对其开展了详细的岩相学、全岩地球化学以及矿物微量元素分析。

从岩相学角度, NWA 12564 属于玄武质辉玻无球粒陨石 (basaltic shergottite), 主要由具有成分环带的自形-半自形普通辉石和易变辉石 (59.4 vol%,  $\text{En}_{9.8-56.8}\text{Wo}_{8.3-37.9}$ )、熔长石 (34.0 vol%,  $\text{An}_{41.9-55.7}\text{Ab}_{3.3-55.6}$ ) 以及少量铁钛氧化物、磷酸盐、磁黄铁矿、铁橄榄石 ( $\text{Fo}_{9.6-13.6}$ ) 等组成。长石质和二氧化硅玻璃的交生结构以及磷酸盐-铁橄榄石-钙铁辉石等矿物的后成合晶集合体在样品中比较常见。斜长石几乎完全转化为熔长石, 局部矿物发生熔融, 形成由冲击玻璃、残余矿物碎屑、以及球状金属硫化物等组成的冲击熔融囊。熔囊中的二氧化硅部分转化为斯石英, 在  $230\text{ cm}^{-1}$  和  $753\text{ cm}^{-1}$  等处呈现典型的拉曼光谱特征峰, 表明样品经历了强烈的冲击变质作用, 局部冲击压力高于  $\sim 30\text{ GPa}$ 。

全岩化学分析显示 NWA 12564 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{CaO}$  含量分别为 8.23 wt% 和 12.08 wt%,  $\text{Mg\#}$  [ $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})\text{ mol\%}$ ] 为 43。根据前人对玄武质辉玻无球粒陨石的分类, NWA 12564 属于镁铁质、低铝玄武岩中演化程度较高的样品。磷酸盐是 NWA 12564 中最主要的稀土元素 (REE) 载体, LA-ICP-MS 分析测得的陨磷钙钠石中 La 和 Yb 的平均含量分别为  $361\times\text{CI}$  和  $283\times\text{CI}$ , 且 REE 配分曲线较平坦。基于矿物模式丰度计算所得的全岩稀土元素含量和配分模式与通过溶液法测得的结果基本一致 [ $\text{La} = 7.08\times\text{CI}$ ;  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{CI}} = 0.96$ ] (图 1)。从 REE 分类角度, NWA 12564 属于典型的富集型辉玻无球粒陨石。

为了研究 NWA 12564 的结晶环境, 我们将辉石

的 Ti-Al 成分与实验数据进行对比, 发现普通辉石与易变辉石核部主要形成于 9.3kbar 条件下, 而边部的形成压力则低至  $\sim 1\text{kbar}$ 。辉石从核部到边部结晶压力的变化与岩浆从深部上涌至火星浅表的过程相吻合。根据钛磁铁矿-钛铁矿的共生矿物组合计算得到其平衡温度为  $737 \pm 21\text{ }^\circ\text{C}$ , 结晶的氧逸度为 QFM -2.8  $\pm$  0.4。与大部分富集型玄武质辉玻无球粒陨石相比, NWA 12564 结晶的化学环境更加还原; 在  $\log f_{\text{O}_2}$ - $[\text{La}/\text{Yb}]_{\text{CI}}$  图上, NWA 12564 与 NWA 4468 和 GRV 020090 具有高度相似性。

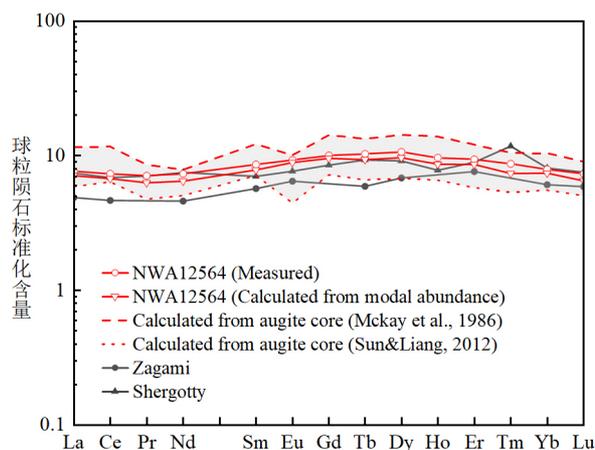


图 1 全岩及原始熔体 REE 成分, 全岩 REE 含量分别由根据模式丰度计算和通过溶液法实测得到, 熔体成分由辉石及熔体之间的分配系数推算得到

关于富集型辉玻无球粒陨石的成因, 主要的理论模型有两类: 一是认为不相容元素的富集源自火星幔部的地球化学不均一性, 另一种则认为源自岩浆上升过程中混染的富含不相容组分的壳源物质。我们依据稀土元素在辉石与玄武质熔体之间的配分关系, 利用 NWA 12564 中普通辉石核部的成分计算出平衡熔体的 REE 含量, 并与实测全岩成分进行对比 (图 1)。我们选择文献中两组不同的配分系数进行了计算, 发

基金项目: 国家自然科学基金 (41973065), 科技部重点研发专项 (2021YFA0716103)

第一作者简介: 张欣茹 (1998-), 硕士研究生, 研究方向: 天体化学. E-mail: zhangxr@pmo.ac.cn

\*通信作者简介: 王英 (1978-), 副研究员, 研究方向: 陨石学和天体化学. E-mail: y\_wang@pmo.ac.cn

现得到的平衡熔体的 REE 含量略有差别, 两种结果的平均值与全岩 REE 含量非常接近。采用 Sun & Liang (2012) 配分系数计算所得的熔体稀土配分模式与全岩相似, 而采用 McKay 等 (1986) 配分系数计算得到的结果呈现轻微的 Eu 负异常, 这很可能是因为 Eu 作为变价元素, 其分配系数受氧逸度影响较明显, 而实验和实际岩浆结晶时的氧逸度条件存在差异, 因此利用  $D_{Eu}$  估算熔体中的 Eu 含量具有较大的

不确定性。总的来说, 推算得到的 NWA 12564 母岩浆的稀土元素含量及配分模式与其全岩成分基本一致, 都呈现出与 Shergotty 和 Zagami 相似的富集型岩浆的特征。这表明 NWA 12564 很可能是火星幔部富集型岩浆在封闭条件下的结晶产物; 富集型辉玻无球粒陨石的形成是火星幔部地球化学多源性的体现。同时, NWA 12564 形成的相对还原的氧逸度条件也排除了其受到大量壳部物质污染的可能性。

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 嫦娥五号月球样品中的赛石英和斯石英

庞润连<sup>1</sup>, 杨晶<sup>2\*</sup>, 杜蔚<sup>2,3\*</sup>, 张爱铖<sup>3,4</sup>, 刘世荣<sup>5</sup>, 李瑞<sup>2,6</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081
2. 中国科学院地球化学研究所 月球与行星科学研究中心, 贵阳 550081
3. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026
4. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210046
5. 中国科学院 地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081
6. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 10049

撞击作用是月球表面物质混合的重要地质过程, 是控制月壤形成和演化的重要因素。高压矿物作为撞击事件的重要记录者, 对限定岩石受冲击的温压条件及反演撞击坑的大小具有重要意义。但是, 无论月球返回样品还是月球陨石, 极少发现高压矿物相, 限制了通过月球样品反演月表的撞击过程的研究。

在本次对嫦娥五号月壤样品的研究中, 我们发现了共生的二氧化硅的高压相——赛石英和斯石英。通过详细研究赛石英、斯石英、似 $\alpha$ -方石英的二氧化硅相及二氧化硅玻璃的形态特征及分布规律, 推断赛

石英和斯石英形成机制为固固相转变; 受撞击过程的动力学控制, 赛石英作为亚稳相在较低压条件下出现, 随温度的升高部分赛石英转变为斯石英, 因此, 该二氧化硅碎屑记录了一次月表撞击事件的升压和紧随其后的升温和降压过程。通过其形成的温压条件结合撞击条件模拟计算, 推测该二氧化硅碎屑很有可能来自嫦娥五号采样区南面的 Aristarchus 撞击坑。

本研究是首次在月球返回样品中确认发现赛石英, 为前人通过遥感数据分析提出的嫦娥五号采样区存在远处撞击坑溅射物的观点提供了重要证据。

基金项目: 中国科学院前沿重点项目“嫦娥五号月球样品综合研究”(ZDBS-SSWJSC007); 国家国防科技工业局民用航天技术预先研究课题(D020201); 国家自然科学基金青年科学基金项目(42003054); 中国博士后科学基金面上资助项目(2020M680155); 国家自然科学基金面上项目(41773052和41973058)

第一作者简介: 庞润连(1988-), 女, 博士后. 研究方向: 行星矿物学. E-mail: pangrunlian@163.com

\*通信作者简介: 杜蔚(1980-)女, 研究员, 研究方向: 实验岩石学、实验地球化学及行星科学. E-mail: duwei@mail.gyig.ac.cn

· 专题 26: 深空探测与天体化学 ·

## 月球静海地区火山穹窿的识别、地质特征及成因研究

乔乐<sup>1</sup>, James W. Head<sup>2</sup>, Lionel Wilson<sup>3</sup>, 陈剑<sup>1</sup>, 凌宗成<sup>1</sup>

1. 山东大学山东省光学天文与日地空间环境重点实验室, 空间科学研究院, 山东 威海, 264209;

2. Department of Earth, Environmental and Planetary Sciences, Brown University, Providence, Rhode Island 02912, USA;

3. Lancaster Environmental Centre, Lancaster University, Lancaster LA1 4YQ, UK.

月球火山喷发活动是月球内部能量和物质在地表的强烈释放过程, 是研究月球内部物质成分、热状态及其演化历史的重要窗口。对月球火山活动产物空间分布及地质特征的研究将为火山活动的喷发过程提供关键证据, 继而深化对月球地质及热演化历史的认知。

本文聚焦于月球正面的静海地区, 首先在全月背景下, 对静海地区火山喷发产物(月海玄武岩)的物质成分、喷发年龄等地质特征进行了总结, 发现静海部分地区喷发的玄武岩钛元素含量可达 12.6% ( $\text{TiO}_2$ ), 是月球上钛含量最高的地区之一, 具有非常大的资源就位利用潜力。同时, 静海地区绝大多数都喷发于 35 亿年之前, 是月球上最为古老的月海, 代表了月球最早期的火山作用。

本文利用最新月球轨道探测器获得月表高分辨率高精度地形及其他遥感数据, 对静海地区的火山穹窿进行了识别与分析, 发现了 280 余个新的火山穹窿, 使得静海地区成为月球火山穹窿最为富集的地区。综合空间分布及详细地质特征分析结果, 发现形成这些火山穹窿的岩浆体积规模较小、挥发分含量较低, 整个喷发过程时间较短, 且熔岩流在月表的流动及充填过程主要受到温度的控制。这与月球晚期火山活动在月球雨海地区(嫦娥三号着陆区附近)充填的大规模熔岩流明显不同, 说明月球早期火山活动可能以火山穹窿式的喷发形式为主。该发现为进一步研究月幔熔融及岩浆喷发机制、月球地质及热演化提供了重要观测约束。