

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 嫦娥五号月壤氩同位素比暗示过剩 $^{40}\text{Ar}$ 可能来源于地球风

赵莉<sup>1,3</sup>, 李立武<sup>1\*</sup>, 王先彬<sup>1</sup>, 曹春辉<sup>1</sup>, 汤庆艳<sup>2</sup>

1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 油气资源研究中心, 兰州 730030;

2. 兰州大学 资源环境学院, 兰州 730030;

3. 兰州城市学院 石油工程学院, 兰州 730070

月壤中的  $^{40}\text{Ar}$  过剩现象, 是指  $^{40}\text{Ar}$  的含量显著高于预计的太阳风俘获和  $^{40}\text{K}$  衰变产生的量。传统观点认为, 这种过剩的  $^{40}\text{Ar}$  主要来源于月球内部  $^{40}\text{K}$  衰变产生的  $^{40}\text{Ar}$ 。这些  $^{40}\text{Ar}$  挥发到月球表面后, 被太阳辐射电离, 部分离子被月壤所俘获。然而, 根据月球表面的物理条件, 月表大气分子平均自由程较大, 太阳风在月表大气中的射程也较长, 这使得原子和分子之间较难发生碰撞, 从而降低了  $^{40}\text{Ar}$  被电离并重新注入月表的可能性。本文对嫦娥五号月壤样品实施了分段加热脱气 Ar 同位素组成测试, 加热温度范围为 200~1300°C。通过分析  $^{36}\text{Ar}$  和  $^{40}\text{Ar}$  的相互关系, 探讨月壤中  $^{40}\text{Ar}$  过剩的原因。测试结果表明, 可能存在两种类型的  $^{40}\text{Ar}$ , 即与  $^{36}\text{Ar}$  相关的和与  $^{36}\text{Ar}$  不相关的  $^{40}\text{Ar}$ 。与  $^{36}\text{Ar}$  不相关的  $^{40}\text{Ar}$  主要来源于月壤中  $^{40}\text{K}$  的衰变, 而与  $^{36}\text{Ar}$  相关的  $^{40}\text{Ar}$  可能主要来自地球风的贡献。理论研究认为, 太阳中  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值约为  $10^{-4}$ , 远低于  $^{36}\text{Ar}$  含量。因此, 太阳风注入不足以解释嫦娥五号月壤中  $^{40}\text{Ar}$  的来源。嫦娥五号月壤样品的测试结果显示,  $^{40}\text{Ar}$  的总含量显著高于预计的太阳风俘获和  $^{40}\text{K}$  衰变产生的量,  $^{40}\text{Ar}$  过剩达到了 10 倍以上。分段加热脱气实验中, 中温阶段 (600~1100°C) 释放的  $^{40}\text{Ar}$  含量占总  $^{40}\text{Ar}$  含量的大部分, 且  $^{36}\text{Ar}$  和  $^{38}\text{Ar}$  的含量也主要在此温度区间内。这一现象表明, 中温阶段释放的氩气主要来自太阳风的作用。由于  $^{36}\text{Ar}$  主要来自于太阳风注入, 推测与  $^{36}\text{Ar}$  相关的  $^{40}\text{Ar}$  也可能来自太阳风。然而, 太阳风中的  $^{40}\text{Ar}$  含量远低于  $^{36}\text{Ar}$  含量,

因此这部分  $^{40}\text{Ar}$  可能来自地球风。地球风可能是月壤中过剩  $^{40}\text{Ar}$  的主要来源。太阳风扫过地球磁层外, 拾取地球外逸气体分子并与太阳风混合加速, 形成地球风。地球风将地球大气中的  $^{40}\text{Ar}$  注入到月球表面的土壤中。月球背面基本不受地球风的影响, 嫦娥六号在月球背面着陆并带回月壤样品, 对其观测分析有望能够进一步验证月壤中过剩  $^{40}\text{Ar}$  是否来源于地球风。加热脱气过程中, 700°C 时  $^{40}\text{Ar}$  的释放量显著高于预期, 这可能是由于距月壤表面某特定深度产生了  $^{40}\text{Ar}$  的聚集。重离子注入固体材料时, 离子和能量总是沉积在其射程末端, 形成纳米气泡。这些纳米气泡可能对混有地球组分的太阳风  $^{40}\text{Ar}$  产生表面溅射, 从而将这部分  $^{40}\text{Ar}$  保存在气泡中。地球风离子能谱较宽, 大部分地球风  $^{40}\text{Ar}$  的速度可能略低于同时注入太阳风  $^{36}\text{Ar}$  的速度, 导致  $^{40}\text{Ar}$  注入月壤深度比  $^{36}\text{Ar}$  的浅, 从而在稍低的温度下释放出来。通过对嫦娥五号月壤样品的详细测试和分析, 本文提出了多项论据论证地球风是月壤中过剩  $^{40}\text{Ar}$  的主要来源。这一发现不仅有助于深入理解月壤中 Ar 同位素的来源和分布, 也为进一步研究地球与月球之间的物质交换提供了新的视角。未来的研究可以进一步通过对月球背面月壤样品的分析, 验证地球风对月壤中  $^{40}\text{Ar}$  过剩的贡献, 从而为地月系统的演化研究提供更全面的科学依据。

**关键词:** 嫦娥五号; 月壤; 氩同位素; 分段加热; 地球风

基金项目: 中国科学院兰州资源环境科学大型仪器区域中心功能开发技术创新项目 (2021g106)

第一作者简介: 赵莉 (1989-), 博士 (在读), 研究方向: 气体地球化学. E-mail: zsyzhaoli@126.com

\*通信作者简介: 李立武 (1967-), 研究员, 研究方向: 气体地球化学测试技术及相关研究. E-mail: llwu@lzb.ac.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 镓 (Ga) 同位素在地球科学中的进展与挑战

陈思钰, 朱光有\*

长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

随着高精度同位素质谱分析技术和化学纯化方法的迅速发展, 非传统金属同位素在地球科学领域的研究取得了显著突破。镓 (Ga) 因其独特的地化性质, 引起了地球化学界的高度关注。为推动 Ga 同位素地球化学体系的进一步完善, 本文对 Ga 同位素在地球科学中的研究进展与挑战进行了系统梳理, 包括 Ga 同位素的地球化学性质、实验测试方法、储库与循环、分馏机理及地质应用。总结如下: (1) Ga 是一种稀有分散元素, 在自然界中主要以  $\text{Ga}^{3+}$  出现, 主要分布在铝土矿中; 作为类铝 (Al) 元素, Ga 和 Al 的化学性质相似, 但与 Al 不同, Ga 有两种稳定同位素:  $^{69}\text{Ga}$  (60.10%) 和  $^{71}\text{Ga}$  (39.90%)。 (2) 基于改进后的化学分离纯化方法和多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS), Ga 同位素组成 ( $\delta^{71}\text{Ga}$ ) 分析日益准确, 数据精度可优于 0.04‰。 (3) 现有研究对 Ga 同位素在地幔、地壳、海洋、陨石等主要储库中的分布及分配进行了定量分析, 并初步建立了 Ga 同位素的地球化学循环模型。 (4) Ga 同位素分馏机制主要受风化、高温蒸发、吸附作用的控制。风化过程中,  $^{69}\text{Ga}$  相对于  $^{71}\text{Ga}$  更倾向于保留在土壤中,  $\delta^{71}\text{Ga}$

值随深度 (从基岩到地表) 减小, 范围为  $\sim 0.18\text{‰}$ ; 高温蒸发过程中钙-铝富集包体 (CAIs) 表面冷凝时与气体发生交换, 导致 Ga 同位素的显著分馏,  $\delta^{71}\text{Ga}$  低至  $-3.56\text{‰}$ ; 吸附过程中, Ga 从溶液到表面转移和含 Ga 晶体沉淀过程中的配位变化会导致 Ga 同位素的分馏; 环境的氧化还原状态也有可能造成 Ga 同位素组成的变化。 (5) Ga 同位素在示踪地表风化、探索天体演变、揭示岩浆起源与演化过程中的矿物分离和成分变化、反应吸附和沉淀过程、追踪与 Al 相关的地球化学过程、表征海陆环境变化等方面的应用已取得一定的进展。未来, 加强 Ga 同位素分馏机制研究、探究各储库 Ga 同位素组成与其迁移路径和动力、完善 Ga 同位素高精度测试体系、拓展 Ga 同位素的应用及其与其他同位素的联用等相关理论与实验工作还需要进一步强化。本综述旨在增进对 Ga 同位素在地球科学领域的全面认识, 为未来研究提供思路。

**关键词:** 镓 (Ga) 同位素; Ga 储库与循环; 同位素分馏; Ga 同位素测试; 地质应用

基金项目: 陈思钰 (2003-), 女, 在读硕士研究生, 地质资源与地质工程。E-mail: chensiyu8603@126.com

\*第一/通信作者简介: 朱光有 (1973-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事非传统同位素地球化学与深层油气地质成藏研究。

E-mail: zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 联合地震学和矿物学约束火星内部结构和成分

赵晨阳, 毛竹\*

中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

深空探测是我国重要的科学战略, 以探测太阳系内行星和卫星的起源和演化、开发利用行星资源为核心目标。火星作为深空探测的重点研究星球, 明确火星内部的结构和物质组成对理解火星的形成和演化、揭示行星宜居性发展规律至关重要。联合 InSight 火星探测任务的地震数据与高温高压矿物实验数据, 约束了火幔转换带的铁含量、温度及矿物成分。通过三阶 Birch-Murnaghan 状态方程和欧拉有限应变理论, 结合地震学和矿物学数据, 构建了

火幔转换带在高温高压条件下的矿物学模型。研究采用贝叶斯卷积神经网络 (BCNN) 进行反演分析, 结合高温高压实验数据与火星地震数据, 优化了铁含量和温度的反演结果。与前人的研究相比, 反演精度得到了提升, 为深入探讨火星内部物质组成提供了新的方法和视角。

**关键词:** 火幔转换带; 铁含量; 贝叶斯卷积神经网络; 火幔温度

第一作者简介: 赵晨阳 (2002-), 硕士研究生, 研究方向: 行星内部物理. E-mail: zhaochenyang@mail.ustc.edu.cn

\*通信作者简介: 毛竹 (1982-), 教授, 研究方向: 高温高压矿物学. E-mail: zhumao@ustc.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 月球斜长岩的钙同位素组成

王文科, 李欣\*, 刘芳, 安亚军, 张兆峰

成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

月球斜长岩是由斜长石(含量>90%)的岩浆岩构成,广泛分布于月球高地,研究斜长岩对理解月球早期形成及月球演化历史具有重要意义。现有成因模型主要包括:(1)岩浆洋结晶;(2)地幔混杂;(3)局部熔融与 KREEP(富钾、稀土元素和磷物质)再分布;(4)多阶段合成模型(整合初始结晶、幔-壳相互作用、晚期 KREEP 同化)。近期理论模型(包括热扩散动力学、top-down 固化、三端元混合、KREEP 物质同化)与放射性成因 Sr-Nd 同位素证据表明,月球斜长岩的形成可能受多阶段、多源岩浆过程控制。此外,富钙斜长石( $An>90$ )的存在与斜长岩年龄的不一致性,制约着对月球岩浆洋模型的理解。月球斜长岩以钙长石为主,钙同位素( $\delta^{44/40}\text{Ca}$ )具有分布广泛、对行星早期分异敏感等优势。为深入解析月球斜长岩成因,本研究系统测定了 13 块月球长石质角砾岩陨石中 14 个钙长石单矿物(斜长石含

量>90%)、26 个斜长岩碎屑(镁铁质矿物含量>10%)及 13 个长石质基质的钙同位素组成。结果显示,钙长石单矿物的  $\delta^{44/40}\text{Ca}$  值为 0.68‰~0.94‰(平均值为 0.78‰~0.15‰, 2SD,  $n=18$ ),与我们的前期研究结果(0.75‰~0.13‰,  $n=4$ )一致。斜长岩碎屑的  $\delta^{44/40}\text{Ca}$  值为 0.59‰~0.99‰(平均值为 0.78‰~0.21‰, 2SD,  $n=26$ ),与岩屑中镁铁质矿物(橄榄石、辉石、钛铁矿)含量无相关性,部分岩屑呈现  $\delta^{44/40}\text{Ca}>0.90$ ‰,显示同位素异质性存在。长石质基质的  $\delta^{44/40}\text{Ca}$  值为 0.56‰~0.95‰(平均值为 0.79‰~0.27‰, 2SD,  $n=13$ ),与斜长岩碎屑变化范围相当,同样存在约 0.4‰分馏。总体而言,斜长岩碎屑与长石质基质的钙同位素组成相似且具有约 0.4‰分馏,表明钙同位素对探讨月球斜长岩成因方面具有重要意义。

**关键词:** 月亮; 斜长岩; 钙同位素

第一作者简介:王文科(1999-),博士研究生,研究方向:同位素地球化学。E-mail: wwk@stu.cdut.edu.cn

\*通信作者简介:李欣(1975-),副研究员,研究方向:同位素地球化学。E-mail: xlisu@cdut.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 嫦娥五号年轻玄武岩的成因：进展与挑战

田恒次\*

中国科学院 地质与地球物理研究所, 地球与行星物理学科中心, 北京 100029

火山活动是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。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 Ga 年前仍存在岩浆活动, 这一结果刷新了人类对月球岩浆活动和热演化历史的认知。研究发现, 嫦娥五号年轻玄武岩具有富集稀土元素和低  $Mg^\#$  指数特征, 是一种新类型的玄武岩。自 2021 年 7 月第一批科研样品发放

以来, 国内数十个研究团队围绕玄武岩的成因开展了系统研究, 取得了一批研究成果。然而随着研究深入, 玄武岩的成因却变得扑朔迷离, 学界针对玄武岩的起源深度、源区组成、岩浆过程等方面提出了多个不同的模型。3 年多来, 本人深度参与了嫦娥五号样品的研究, 本次汇报将回顾嫦娥五号玄武岩成因的研究进展以及面临的挑战。

**关键词:** 嫦娥五号; 玄武岩成因; 进展与挑战

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 月球火山穹隆热-力学生长机制研究

陈雨超, 黄倩\*

中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 武汉 430071

月球火山穹隆作为月球浅部岩浆活动的直接产物, 其形成机制与月壳热演化历史密切相关。穹隆的形态特征(如高度与基底宽度比)及分布规律为揭示月球内部浅部岩浆的热-力学过程提供了关键约束。传统的月球火山学研究多基于火山形貌及其喷发产物的成分分析, 而对火山穹隆生长过程中的岩浆相变和运移特征等热-力学性质缺乏系统性的探讨。本研究通过数值模拟手段, 聚焦岩浆上升、冷却与结晶过程中的热-力学耦合效应, 旨在阐明穹隆形成的临界条件及其对月壳热状态的响应规律。采用计算流体力学(CFD)方法, 构建多物理场耦合模型, 涵盖岩浆流动、热传导和相变结晶等过程。模型输入参数包括: 1) 岩浆物性参数: 基于 Apollo 和嫦娥样品数据约束的玄武质岩浆粘度和结晶潜热; 2) 月壳结构参数: 依据 GRAIL 重力数据反演的月壳厚度及微波数据热导率垂向梯度; 3) 边界条件: 底部源自热流模拟月幔部分熔融区的持续热输入。数值模拟通过 Ansys Fluent 实现, 采用自适应

网格加密技术捕捉岩浆前锋的热-力学耦合界面。通过参数敏感性实验, 系统分析岩浆补给速率和月壳脆-韧性转换深度等对穹隆生长模式的调控作用。模拟将揭示浅部岩浆房的补给机制, 提出穹隆生长模型, 解释其表面环形断裂的分布规律; 通过对比不同热流条件下穹隆冷却速率, 揭示月壳热导率对穹隆形成时间差异的影响, 为反演区域热历史提供新指标; 通过对比穹隆高宽比与岩浆粘度以及月壳强度的相关性, 验证穹隆分类(如 Marius Hills 型穹隆与 Gruithuisen 型穹隆)的热-力学成因差异。本研究预期建立月球火山穹隆热力学演化的数值框架, 阐释浅部岩浆活动与月壳热状态的动态反馈机制, 为未来嫦娥七号等任务的实地探测结果(基于宽波段红外光谱矿物成像分析仪和月面穿透雷达)提供理论预测模型。

**关键词:** 月球火山穹隆; 热力学耦合; 计算流体力学; 浅部岩浆房; 月壳热演化

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFA0715100)

第一作者简介: 陈雨超, 博士研究生, 研究方向: 行星遥感与火山活动. E-mail: cyc1114@foxmail.com

\*通信作者简介: 黄倩, 副教授, 研究方向: 行星遥感地质和地球物理. E-mail: qianhuang@cug.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 月球太空风化的纬度效应及其对单质铁成长机制的启示

卢学金, 陈剑, 曹海军, 凌宗成\*

山东大学 空间科学与技术学院, 山东 威海 264200

太空风化作用普遍存在于月球等无大气天体表面。在太阳风粒子和微陨石的不断轰击下, 月球物质产生了一系列物理和化学变化, 导致可见/近红外波段出现了暗化(反射率降低)、红化(光谱斜率变陡, 即反射率随着波长的增加而增加)和矿物吸收特征减弱(光谱吸收深度变浅)等光谱效应。这些光谱效应来自于月壤中亚微米尺寸的金属单质铁, 通常由还原、热分解等过程产生, 根据粒径范围可分为较小的纳米铁( $< \sim 50$  nm)和较大的微米铁( $> \sim 50$  nm)。纳米铁对可见波段具有明显的吸收, 而对近红外波段的吸收弱于可见部分, 因此造成了光谱斜率变陡的光谱效应(红化)。当纳米铁颗粒通过不断聚合成长为更大粒径的微米铁时, 对全波段的反射率均有吸收, 因此其特殊的“红化”作用便会消失, 以暗化和减弱吸收特征的作用为主。前人根据 Clementine 多光谱数据揭示了月球月壤光谱存在纬度效应, 即在高纬度地区月壤光谱反射率更亮, 并表明这种光谱效应与高纬度地区较弱的太阳风通量相关, 因此前人提出了月球太空风化作用随着纬度的升高而逐渐减弱的机制。然而, 导致这种光谱效应以及单质铁的形成机制尚不明确。因此, 本研究针对全月玄武岩和磁异常区域(月球漩涡)开展了光谱参数分析, 旨在揭示月壤光谱的纬度效应及其形成机制。本研究利用月亮女神号 MI 多光谱数据对月球正面月海玄武岩区域( $30^{\circ}\text{S}-60^{\circ}\text{N}; 90^{\circ}\text{W}-90^{\circ}\text{E}$ )的光谱参数进行了统计分析。为了保证分析结果不受地形和撞击坑溅射物的影响, 在分析中没有考虑地形坡度 $>1.0^{\circ}$ 和光学成熟度(OMAT) $>0.25$

的像元。利用月船一号 M3 高光谱数据对 Reiner Gamma 漩涡区域进行光谱参数分析。结果表明, MI 750 nm 的反射率随着纬度的降低而变暗, 与前人利用 Clementine 的数据结果一致。MI 1550 nm 的反射率同样随着纬度降低而变暗, 且变化程度大于 750 nm 的反射率。因此, 相比高纬度区域, 低纬度区域呈现出较暗的反射率和较平的光谱斜率。对的反演结果进行统计, 纳米铁含量在纬度  $0\sim 45^{\circ}$  范围内变化较小( $\sim 0.55\%$ ), 而微米铁含量则随着纬度的降低从 $\sim 0.8\%$ 单调增加至 $\sim 1.1\%$ 。此外, 本研究对月球漩涡结构的暗带区域进行了光谱参数分析, 该区域也出现了光谱反射率和光谱斜率的变化。在暗带中心, 光谱更暗、斜率更平坦, 而亮纹区域的光谱则更亮、斜率更陡。

月球玄武岩的光谱纬度效应和漩涡区域的光谱效应共同揭示了太阳风通量对月表物质的改造作用。因此, 本研究认为在月壤达到成熟状态后, 将进入后成熟阶段(post-mature)。在该阶段中, 太阳风通过注入  $\text{H}^+$  产生的铁原子通过奥斯瓦尔德熟化作用吸附在已经存在的纳米铁, 导致纳米铁粒径的进一步增加, 月壤中单质铁的平均粒径会逐渐变粗。本研究揭示了太阳风注入作用促进纳米铁粒径变粗的机制, 并提出单质铁的粒径应当是表征月壤风化程度的重要指标之一。

**关键词:** 月球; 太空风化; 太阳风; 可见近红外光谱; 单质铁

基金项目: 国家自然科学基金(123B2046, 42102280, 42402231)

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 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 氟在月球火山玻璃珠成分熔体中的扩散

张力, 颜晗, 李万财, 倪怀玮\*

中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

作为最接近原始月球岩浆的样品, 月球火山玻璃珠经历了显著程度的去气作用。要恢复其初始氟含量需要氟扩散系数数据, 但目前尚未进行实验测定。我们在 0.5 GPa 压力和 1673~1883 K 温度条件下于活塞圆筒压机中进行了氟在四种合成的月球玄武质熔体 (成分分别对应月球绿色、黄色、橙色和红色玻璃) 中的扩散偶实验。通过电子探针测量的氟扩散曲线显示, 熔体的氟扩散系数从绿色到黄色到橙色再到红色呈温和递增趋势, 这归因于 Si+Al 的摩尔分数的逐渐降低。月球熔体中的氟扩散系数比羟基扩散系数低 2~7 倍, 但比地球熔体的氟扩散系数至少高 2~10 倍。

我们建立了一个适用于地球和月球熔体的氟扩散系数普适经验模型, 可在缺乏实验数据时作为有效估算依据。应用新测得的氟扩散系数对已报道的阿波罗绿色玻璃珠中的氟丢失曲线进行模拟分析, 得出其初始氟含量为  $12 \times 10^{-6}$ ~ $14 \times 10^{-6}$ 。假设岩浆破碎前去气作用有限, 推算月幔源的氟含量为  $0.7 \times 10^{-6}$ ~ $1.6 \times 10^{-6}$ 。尽管月球内部的氟丰度低于地球内部, 但仍处于显著可测水平。

**关键词:** 月球火山玻璃珠; 去气; 氟扩散系数; 喷发前氟含量

第一作者简介: 张力 (1991-), 特任副研究员, 研究方向: 实验岩石学. E-mail: zl12345@ustc.edu.cn

\*通信作者简介: 倪怀玮 (1981-), 教授, 研究方向: 实验岩石学. E-mail: hwni@ustc.edu.cn



• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 灶神星玄武质熔体中 Ga、Mo、W 的扩散

李逸凡<sup>1</sup>, 张力<sup>1</sup>, 倪怀玮<sup>1,2\*</sup>

1. 中国科学技术大学 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026;
2. 中国科学技术大学 深空探测实验室/地球和空间科学学院, 合肥 230026

灶神星 (4 Vesta) 是小行星带内质量第二大的小行星, 保存有与地球类似的圈层结构, 是研究太阳系早期行星分异过程的绝佳载体。在灶神星的核幔分异过程中, 亲铁元素在核幔物质之间能否达到分配平衡取决于元素在岩浆熔体中的扩散系数, 但目前并没有对灶神星熔体中亲铁元素扩散系数的相关研究。作为亲铁元素, Ga、Mo、W 是灶神星形成和分异过程中的重要示踪元素。本研究利用气动悬浮激光加热手段合成灶神星玄武质熔体成分 (与 polymict eucrite Macibini 相同) 玻璃初始样品, 在 1300~1600°C 以及 0.5~1 GPa 的条件下于活塞圆筒压机进行 Ga、Mo、W 的扩散偶实验。通过 LA-ICP-MS 测量实验产物中 Ga、Mo、W 的浓度曲线, 可以用误差函数进行拟合。实验结果表明, 压力对扩散系数的影响可以忽略; 三

种元素的活化能基本相同 (189~13) kJ/mol, 在相同温度下, 三种元素扩散系数差别不大, 序列为  $D_{\text{Ga}} > D_{\text{Mo}} > D_{\text{W}}$ 。灶神星熔体的 Ga、Mo、W 扩散系数比地球熔体高出 1~3 个数量级, 这与灶神星熔体极高的解聚合度相关。综合目前数据, 我们建立了适用于灶神星熔体和地球熔体成分的 Ga、Mo、W 扩散系数普适经验模型。由于玄武质熔体中 Ga、Mo、W 的扩散系数比 Fe 慢 2~4 倍, 因此 Ga、Mo、W 在核幔之间的分配可能难以达到热力学平衡。根据  $D_i/D_{\text{Si}}$  (其中  $i$  代表其他元素) 比值与轻重同位素扩散分馏经验因子  $\beta$  值的关系, 估计 Ga、Mo、W 的  $\beta$  值约为 0.095。

**关键词:** 灶神星; 扩散系数; 核幔分异; 动力学效应

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB 41010204)

第一作者简介: 李逸凡 (1999-), 博士研究生, 研究方向: 实验岩石学。E-mail: liyifan0529@mail.ustc.edu.cn

\*通信作者简介: 倪怀玮 (1981-), 教授, 研究方向: 实验岩石学。E-mail: hwni@ustc.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 地球风化对于 Eucrite 化学组成的影响

白晓琪<sup>1</sup>, 康晋霆<sup>2\*</sup>, 李欣<sup>1</sup>, 刘芳<sup>1</sup>, 安亚军<sup>1</sup>, 张兆峰<sup>1</sup>

1. 成都理工大学, 成都 610059;

2. 中国科学技术大学, 合肥 230026

灶神星是小行星带中最大的分异型行星,也是地球上发现最多的无球粒陨石—“HED”陨石(Howardite-Eucrite-Diogenites)的母体。灶神星的增生分异过程非常迅速,发生在太阳系形成之初的 5 Ma 内,同时 HED 陨石也是太阳系内最古老的岩浆岩之一(岩浆结晶年龄约为 4.43~4.55 Ga),是研究太阳系早期行星分异和岩浆演化的重要样品。目前对 Eucrite 和 Diogenite 的研究显示其主量元素组成均一,然而稀土元素(REE)变化较大,对于该现象的解释仍存在较大争议。造成这一现象的原因在于大量的 HED 陨石均为沙漠陨石,受到了不同程度的风化作用。相比于主量元素,微量元素更容易在风化过程中发生迁移,对理解 HED 陨石的形成过程造成了干扰。针对这一问题,本次实验以 10 块 Eucrite 陨石作为研究对象,进行了岩相学以及地球化学分析。在通过岩相学明确风化程度的基础上,对样品先后进行

Milli-Q 水淋洗和 5%醋酸溶液淋滤,分别收集到 MQ 水淋滤液、醋酸淋滤液以及残留物进行元素含量测定。二次风化物如碳酸盐、磷酸盐、粘土矿物,和极少量原生硅酸盐矿物会在醋酸淋滤下释放到溶液中。不同风化程度的 Eucrite 淋滤液 REE 含量存在明显差异,风化程度越高,淋滤液 REE 总体含量越高,但总体 REE 配分模式类似,未发现个别稀土元素解耦现象。对于南极陨石和降落型陨石,残留相的 REE 和全岩相似,反映风化程度较低。而沙漠型陨石的残留相中轻稀土含量相对于全岩显著偏低,重稀土含量相对于全岩略微偏低,说明风化过程中重稀土相对轻稀土不易迁移。下一步我们将调查风化过程中稀土同位素组成是否存在变化及原因。

**关键词:** 灶神星; Eucrite; 地球风化; 化学组成; 稀土元素

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(42330102)

第一作者简介: 白晓琪(2003-), 本科(在读), 研究方向: 行星化学. E-mail: 202201170126@stu.cdut.edu.cn

\*通信作者简介: 康晋霆(1991-), 副教授, 研究方向: 金属稳定同位素. E-mail: kjt@ustc.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 类地行星挥发分早期增生与演化

王文忠\*

中国科学技术大学, 合肥 230026

挥发分在行星形成与演化过程中扮演了关键角色, 直接影响地球宜居环境的形成。相较于早期太阳系物质, 硅酸盐地球具有类似的难溶性元素丰度, 但明显亏损挥发性元素。理解地球挥发分的增生机制对于研究类地行星的起源与可宜居性演化至关重要。当前有两种主要假说解释地球挥发分的来源: 一种认为地球初始增生物质贫挥发分, 硅酸盐地球的挥发分主要来自后期增生的富挥发分物质, 这一过程发生在地核形成之后, 称为“后期增生模型”; 另一种则认为地球初期增生物质富含挥发分, 当前的挥发分亏损是早期演化过程导致的, 称为“早期演化模型”。挥发性元素 (如 S、Se、Te) 的同位素可用于示踪其来源和演化, 前提是明确增

生过程中的同位素分馏机制。然而, 由于行星形成演化过程常在高温高压条件下进行, 实验测定同位素分馏挑战很大。本研究通过第一性原理计算, 确定了行星增生演化过程中的 S、Se、Te 同位素分馏。研究发现, 早期星胚熔融挥发使得星胚富集轻 S、重 Se 和重 Te 同位素; 而核幔分异并未导致显著影响 S、Se、Te 同位素分馏。这一结果与地球的观测结果十分吻合, 表明地球在吸积初始阶段就增生了大量的挥发性元素, 后续的星胚演化过程重塑了地球的挥发份储库。

**关键词:** 早期星胚挥发; 核幔分异; 同位素分馏; 挥发分; 第一性原理计算

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 含“水”火星的核-幔分异: Ni 和 Co 元素的约束

翟宽, 郭新转\*

中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081

水是火星科学研究的重点内容之一,也是评估火星宜居性的重要指标。现今火星壳层非常干燥,水的含量仅为  $(73\sim 290)\times 10^{-6}$  (Mc Cubbin 等, 2012)。火星形成初期,火星内部可能是富水的,水的含量最高可达 3.5% (Black 等, 2022; Clesi 等, 2016)。多种同位素证据表明火星核-幔分异成核作用在太阳系形成后约 7~15 Ma 内完成,因此,火星内部的“水”很可能参与了火星的核-幔分异过程。亲铁元素常用于示踪类地行星的核-幔分异过程,其在金属核硅酸盐间的分配行为受氧逸度影响较大。Ni 和 Co 元素是火星核的重要组成成分,也是典型的亲铁元素,它们的分配系数都随着温度、压强和氧逸度的升高而降低。水是火星内部重要的挥发分和氧化剂。在火星核-幔尚未完全分离阶段,原始火星内部的水与

金属铁的反应极有可能提升了火星内部的氧逸度,可能会改变 Ni 和 Co 在金属和硅酸盐间的分配。我们将水含量与氧逸度的变化结合起来,在 4~10 GPa 条件下进行了不同水含量条件下 ( $\leq 2\%$ ) 亲铁元素 Ni 和 Co 在金属和硅酸盐间的分配实验,系统地研究了 Ni 和 Co 的分配系数与温度、压力、氧逸度、水含量之间的关系。基于 Ni 和 Co 在金属和硅酸盐间分配系数的结果,我们认为水能显著减小火星岩浆洋的深度,含 2% 水的火星岩浆洋比不含水的岩浆洋浅约 400 km。我们结合水-铁反应的机理与火星幔 FeO 含量的约束,建立了含“水”火星核-幔分异形成火星核的多阶段模型。

**关键词:** 火星; 水; 氧逸度; 核-幔分异

基金项目: 国家自然科学基金项目 (4207051)

第一作者简介: 翟宽 (1992-), 博士后, 研究方向: 实验地球化学。E-mail: zhaikuan@mail.gyig.ac.cn

\*通讯作者: 郭新转 (1979-), 研究员, 研究方向: 实验岩石学、矿物物理学。E-mail: gxzhuan@mail.gyig.ac.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## X 射线精细结构吸收谱在火星陨石中的应用

邵慧敏, 刘洋\*

中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190

依托日本高能加速器研究机构的同步辐射光源 Photon Factory 9A 光束线站, 本研究运用 X 射线吸收精细结构 (XAFS) 手段, 针对辉玻无球粒火星陨石里的铁元素展开了系统性探究, 其核心目的在于挖掘出该元素在母体冷却进程里所留存的氧逸度相关信息。实验选择了三块颇具典型性的火星陨石样本, 分别为 NWA 13327、NWA 8657 以及 NWA 6963, 它们皆属于玄武岩质 Shergottites, 有着独特的矿物构成与地质背景。实验借助同步辐射 X 射线源, 把 X 射线

能量调至与样品内铁元素内壳层电子能量相匹配的程度, 进而实现对铁氧化态的高灵敏度监测。研究主要聚焦于熔长石与单斜辉石这两类矿物。最终结果显示, 熔长石于冷却环节呈现出较还原的氧逸度特性。借由 XAFS 技术, 本研究为洞悉 Shergottites 的形成环境以及火星内部的氧化还原状况开拓了新的视角。

**关键词:** 辉玻无球粒火星陨石; X 射线精细结构吸收谱; 氧逸度

第一作者简介: 邵慧敏 (1994-), 中科院特别研究助理, 研究方向: 天体化学。E-mail: shaohuimin@nssc.ac.cn

\*通信作者简介: 刘洋 (1984-), 研究员, 研究方向: 行星遥感。E-mail: yangliu@nssc.ac.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 克里普玄武岩成因对月球早期内部物质循环过程的限定

杨晶<sup>1</sup>, 杜蔚<sup>1,2\*</sup>, 李瑞<sup>1</sup>, 鞠东阳<sup>1,3</sup>, 钱煜奇<sup>4</sup>,  
黄葳<sup>1,4</sup>, 刘建忠<sup>1,2</sup>, 刘耘<sup>1,2,5</sup>

1. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081;
2. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 香港大学, 中国香港 999077;
5. 成都理工大学 行星科学国际研究中心, 成都 610059

克里普是月球岩浆洋演化最后阶段的残余物, 富含包括放射性生热元素 U、Th、K 在内的不相容元素。因此, 富集克里普成分的月球样品具有独特的地球化学特征, 是示踪月球内部物质循环过程的重要媒介。然而, 包括原生克里普玄武岩在内的富克里普成分样品的岩石学成因, 特别是其母岩浆是在何时以何种方式获得克里普成分仍然没有确切结论, 因此急需对除 Apollo 返回样品之外的新的月球样品中的富克里普成分岩石样品进行研究。嫦娥五号任务于 2020 年降落于风暴洋北部, 远离 Apollo 和 Luna 任务采样区。通过对嫦娥五号月壤粉末光片样品 CE5C0800YJFM00101GP 的观察, 在其中发现了极少量的富克里普成分的外来撞击溅射物。结合矿物组成和主微量元素分析、原位 U-Pb 年代学分析, 以及遥感数据分析, 这些富克里普物质的原岩被限定为位于雨海撞击盆地西北缘的克里普玄武岩, 并于约 33 Ga 年前经撞击作用熔融形成冲击熔体并溅射到嫦

娥五号采样点。热力学模拟计算显示至少有 1%~5% 的克里普成分加入到了深度约为 200 km 的月幔源区当中, 随后源区发生低程度部分熔融形成了克里普玄武岩的母岩浆。同时, 样品研究和遥感数据显示克里普玄武岩基本产出在雨海盆地边缘和风暴洋克里普地体周边, 这意味着克里普玄武质岩浆活动和月球的大型地质构造运动具有密切的联系。该研究表明, 在月球早期, 位于壳幔边界的克里普物质下沉至月幔深部, 而月幔深部的部分熔融又将克里普带回至岩石圈, 甚至穿越构造运动在月壳中形成的裂隙喷发至月表形成克里普玄武岩。而存在于富克里普物质中的生热元素在月壳和月幔中的再循环和不均匀分布可能是造成月球热状态和月壳建造-改造过程存在差异的原因。

**关键词:** 早期月球; 克里普; 物质迁移; 月幔组成

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42441822, 42373041)

第一作者简介: 杨晶 (1986-), 副研究员, 研究方向: 行星科学. E-mail: yang-jing@mail.gyig.ac.cn

\*通信作者简介: 杨晶 (1986-), 副研究员, 研究方向: 行星科学. E-mail: yang-jing@mail.gyig.ac.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 火星硫酸复盐的光谱学研究

张睿泽<sup>1</sup>, 石二彬<sup>2</sup>, 曾小家<sup>2</sup>, 鞠恩明<sup>1</sup>, 凌宗成<sup>1</sup>, 辛艳青<sup>1\*</sup>

1. 山东大学空间科学研究院, 山东 威海 264209;

2. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081

火星表面广泛分布的硫酸盐矿物（如硫酸镁、硫酸铁、硫酸钙）记录了复杂的水岩相互作用历史。近期原位探测发现多种含混合阳离子的硫酸盐矿物，暗示火星可能存在硫酸盐复盐。此类复盐的形成机制与矿物结构特征可为重建火星的沉积环境、水文循环及气候演化提供关键约束。此外，铁的硫酸盐与氧化物在火星表层广泛存在，而 Mn 作为氧化还原敏感元素，其在沉积物形成与改造过程中的赋存状态及结晶特征尤为复杂，对揭示火星表层风化作用、地下水活动及宜居性演变具有重要意义。本研究针对火星硫酸盐复盐的识别问题，采用高温

固相反应法与水溶液缓慢蒸发法，成功合成七种硫酸镁复盐及五种铁锰硫酸复盐，并系统建立其拉曼光谱与红外光谱数据库。实验结果表明，不同复盐的拉曼特征峰位与中红外吸收带具有显著差异，可有效区分阳离子类型及结晶水含量。这些独特的光谱特征可为火星轨道探测（如 TES、THEMIS）与就位探测（如 SHERLOC）提供重要参考，并为解析火星表层物质循环、水活动历史及宜居性演化提供新依据。

**关键词:** 火星; 复盐; 硫酸盐; 光谱学

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1931211, 41972322); 山东省自然科学基金项目 (ZR2023QD157); 中国博士后科学基金项目 (2022M721916); 国家航天局民用航空航天技术预研项目 (D020102)

第一作者简介: 张睿泽, 硕士研究生, 研究方向: 行星光谱学。E-mail: 202317810@mail.sdu.edu.cn

\*通信作者: 辛艳青, 高级实验师, 研究方向: 行星光谱学。E-mail: yqxin@sdu.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 碳质球粒陨石成分假说和原行星盘演化

邓正宾\*, 田元元

中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

作为未分异小行星的可能主要岩石类型, 球粒陨石被认为是原行星盘演化阶段的“沉积岩”, 聚集了该阶段不同热作用条件下的产物, 例如难熔包裹体、球粒、基质等组分。其中, 不同组别的球粒陨石中各组分的占比变化显著, 例如不同碳质球粒陨石组别中球粒组分的比例变化为约 0~80% (CL > CO > CV > CR > CM > CK > CI), 普通球粒陨石中球粒组分占比甚至可达 90% 以上。长期以来, 关于碳质球粒陨石存在一个“球粒-基质化学成分互补”的假说, 该假说具体表现为: (1) 球粒组分往往具有比 CI 组别碳质球粒陨石 (几乎不含球粒的组别) 更高的 Mg/Si 比值, 而基质组分的比值偏低; (2) CV、CR、CO、CM、CK 和 CL 组别的碳质球粒陨石在全岩上却具有和 CI 组别的 Mg/Si 比值却基本一致, 即使它们有着截然不同的球粒对基质组分的比。来自该假说最直接的指示是原行星盘中存在多个局部空间近似封闭的储库, 每个储库中前体物质经高温作用改造后形成球粒组分, 热改造形成的气相部分则构

成基质组分。然而, 天文观测和数值模拟表明, 原行星盘中存在有剧烈的径向和轴向上的物质搬运, 保留多个近似封闭的储库有一定难度; 另外, 碳质球粒陨石的基质组分中存在热不稳定的前太阳系颗粒物, 表明其基质组分不完全代表热改造作用形成的气相部分。也有学者认为该互补性系碳质球粒陨石在母体中经历热变质和水改造的结果, 抑或是该互补性根本不存在, 即碳质球粒陨石仅仅是高温球粒组分跟类似 CI 组别碳质球粒陨石的尘埃物质之间物理混合的产物。这里我们针对 CV、CR、CO、CM、CK 和 CL 多组别的碳质球粒陨石样品, 开展了一系列基于激光剥蚀的高分辨率元素组成测量和小质量样品湿法高精度金属同位素组成测量等方面的工作尝试, 来检验所谓的“球粒-基质化学成分互补”的假说, 为原行星盘演化提供制约。

**关键词:** 原行星盘; 碳质球粒陨石; 球粒和基质; 化学成分互补假说; 元素和同位素组成



• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## (Fe、Ca、Mg) S 饱和条件下水星岩浆中的硫溶解度

吴何三<sup>1</sup>, 倪怀玮<sup>1,2</sup>, 刘康<sup>1\*</sup>

1. 中国科学技术大学 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026;
2. 中国科学技术大学 深空探测实验室, 合肥 230026

S 是水星内部最丰富的挥发分, 研究其在水星岩浆中的溶解度对于我们认识水星内部 S 的分布和演化具有重要意义。虽然不少证据表明水星地幔中可能存在大量的 MgS、CaS 等硫化物, 但水星地幔硫化物成分对于硫溶解度的影响并没有得到很好的约束。基于此, 我们利用活塞圆筒压机开展了一系列在不同温度、压力、硫化物成分条件下的水星岩浆-硫化物相平衡实验。实验温度范围为 1300~1500°C, 压力范围为 0.5~2 GPa。硫化物的成分变化采用 FeS、MgS 和 CaS 混合控制, Fe/(Fe+Mg+Ca) 比值的变化范围为 0~1。实验采用石墨样品舱, 氧逸度通过调控 Fe-Si

合金成分控制在 IW-4-IW-5 值附近。实验结果显示: (1) MgS 和 CaS 的加入会大大提升硫溶解度, 并且 MgS 的提升作用强于 CaS; (2) 温度可以促进硫溶解度的提升, 压力基本不影响硫溶解度 (1~2 GPa 压力范围内)。我们正在尝试通过结合前人的实验数据, 综合考虑温度、压力、氧逸度、熔体成分、硫化物成分等因素的影响, 提出更加适用于水星岩浆的硫溶解度模型, 为认识水星地幔熔融过程中硫的行为和制约水星地幔硫化物组成提供重要依据。

**关键词:** 水星; 硫含量; 硫化物组成

第一作者简介: 吴何三 (2001-), 硕士研究生, 研究方向: 实验岩石学. E-mail: whs164830@mail.ustc.edu.cn

\*通信作者简介: 刘康 (1995-), 博士后, 研究方向: 实验岩石学. E-mail: lk2017@ustc.edu.cn

· 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 ·

## 小安的列斯群岛弧前大洋沉积物的 Ce 同位素特征

赵正捷, 李欣\*, 张兆峰, 刘芳, 安亚军

成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

作为稀土元素中丰度最高的元素, 铈 (Ce) 因独特的+3/+4 可变价态特性而显著区别于其他稀土元素, 其氧化还原敏感性使其成为重建古环境与物质循环过程的重要示踪工具。尽管传统研究已广泛利用铈异常 (Ce/Ce\*) 和价态分布解析环境演化, 但 Ce 稳定同位素体系的运用仍少。近年来 Ce 稳定同位素分析测试方法得到了发展, 在现有研究基础上拓宽样品种类将有助于理解 Ce 稳定同位素的分馏机理及其储库分布特性, 丰富其地质应用。本研究选取了来自小安的列斯群岛弧前区域的大洋深钻计划 (DSDP) 的样品, 旨在认识该地沉积序列中不同组分海洋沉积物中的 Ce 稳定同位素组成特征 ( $\delta^{142}\text{Ce}$ , 以 NIST SRM 3110 为标样)。该岛弧自渐新世以来一直活跃, 南北

段岩性、厚度具有梯度差异, 沉积物成分、来源复杂。其中位于北段的大洋深钻计划 543 站点的样品远离南美大陆, 以远洋放射虫粘土为主, 上部样品可见火山灰层, 表明小安的列斯群岛的火山物质参与, 样品  $\delta^{142}\text{Ce}$  值为  $-0.008\text{‰}\sim 0.221\text{‰}$  (平均值为  $(0.058\pm 0.081)\text{‰}$ , 2SD,  $n=42$ ); 南段 144 站点的样品则以生物成因碳酸钙和来自南美洲大陆的陆源浊积岩为主, 由浅到深夹杂有白垩石、泥灰岩、黑色页岩和碎屑石英等, 样品  $\delta^{142}\text{Ce}$  值为  $0.004\text{‰}\sim 0.205\text{‰}$  (平均值为  $\delta^{142}\text{Ce}=0.047\text{‰}\sim 0.104\text{‰}$ , 2SD,  $n=16$ )。

**关键词:** 铈同位素; 大洋沉积物; 小安的列斯群岛; 大洋深钻计划

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42330102)

第一作者简介: 赵正捷 (002-), 硕士研究生, 研究方向: 同位素地球化学。E-mail: zzj@stu.cdut.edu.cn

通信作者简介: 李欣 (1975-), 副研究员, 研究方向: 同位素地球化学。E-mail: xlisu@cdut.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 月球波得月溪地区月壤厚度估算及物质溯源

曾学进<sup>1</sup>, 刘建忠<sup>1,2\*</sup>, 朱凯<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081;

2. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

波得月溪地区位于月球正面中低纬度地区, 月海和高地交界地带, 经历过多次大规模火山喷发和玄武岩熔岩流充填, 月壤中保存了丰富的地质信息和月球资源, 研究该区域月壤厚度与来源对理解月球区域演化历史和资源利用方面具有重要意义。本研究利用遥感数据, 对波得月溪地区的月壤厚度进行了定量分析, 并探讨了月壤的可能来源。基于月球勘测轨道飞行器 (LRO) 获取的影像数据, 结合 Kaguya 矿物绘图仪 (MI) 探测获得的光谱数据以及 1: 250 万月球全月地质图, 将研究区域自西向东划分为中低钛月海玄武岩区—火山碎屑岩区—低钛月海玄武岩区三个不同的地质单元, 由于小天体撞击到月球表面时穿透表面的月壤撞击到深处的月岩时由于硬度的变化会

使得撞击坑的坑底发生明显的变化, 因此可以通过选择合适的撞击坑根据坑缘直径和坑底直径的比较反演出当地的月壤厚度同时结合地质图以及撞击坑溅射物沉积模型, 分析月壤的潜在来源。研究发现波得月溪不同区域的月壤厚度明显不同, 其中火山碎屑岩区域月壤厚度 (12.13 m) 较玄武岩区域月壤 (6.15 m) 更厚; 研究区域内月壤来源主要为区域内部玄武岩和火山碎屑岩的风化产物, 但在部分地区可见明显的来自哥白尼撞击坑的溅射物, 对于反演区域地质演化历史有重大意义。

**关键词:** 波得月溪; 月壤厚度; 月壤来源; 区域地质演化

第一作者简介: 曾学进 (2001-), 硕士研究生, 研究方向: 行星科学. E-mail: zengxuejin23@mails.ucas.ac.cn

\*通信作者简介: 刘建忠 (1968-), 研究员, 研究方向: 月球与行星地质方面. E-mail: liujianzhong@mail.gyig.ac.cn

· 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 ·

## Cr、Sr 同位素指示嫦娥 5 号玄武岩母岩浆的 Al 亏损特征

张英男<sup>1</sup>, 王梓威<sup>1</sup>, 沈骥<sup>1</sup>, 胡依阳<sup>1</sup>, 何小庆<sup>2</sup>, 俞樨<sup>1</sup>, 刘岢城<sup>1</sup>,  
孙家淮<sup>1</sup>, 杨兵<sup>1</sup>, 秦礼萍<sup>1\*</sup>

1. 中国科学技术大学 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026;

2. 安徽理工大学 碳中和科学与工程学院, 合肥 231131

火山活动对于维持类地行星的宜居性具有重要的意义, 分析嫦娥 5 号采样返回的玄武岩显示月球的火山活动可以持续到距今 20 Ga 以后。同时, 放射性同位素也指示其岩浆源区并非传统认知的富集放射性产热的 U、Th 和 K 元素的 KREEP 源区。理解这一源区的特征和形成机制对我们揭开月球年轻火山活度的驱动机制具有重要意义。因此, 我们通过对嫦娥样品多种金属元素的稳定同位素研究来制约嫦娥 5 号玄武岩的源区特征。对嫦娥 5 号玄武岩的元素和同位素分析结果显示, 相对于其他 Apollo 样品和月球陨石, 嫦娥 5 号玄武岩的 Mg<sup>#</sup>和 Cr 含量均较低, 同时伴随着显著偏负的 Cr 同位素分馏, 暗示其经历了较高级别的镁铁质矿物分离结晶 (如橄榄石和辉石), 与其高度富集的微量元素特征一致。其中玄武

岩碎屑 CE5C0000YJYX052 的 Cr 同位素分馏可达 -0.5‰, 这一显著的 Cr 同位素分馏指示嫦娥 5 号玄武岩在侵位前经历了较高级别的分离结晶。然而区别于 Cr 同位素, 嫦娥 5 号玄武岩的 Sr 同位素并未发生分馏, 指示其长石并未发生显著分离结晶。这种结晶序列特征与阿波罗高钛和低钛玄武岩均存在较大差异。Cr 和 Sr 同位素的分配行为指示嫦娥 5 号玄武岩在结晶过程中斜长石存在结晶推迟的情况。嫦娥 5 号玄武岩质岩浆中斜长石结晶的推迟可能是由于嫦娥 5 号玄武岩的母岩浆相对于阿波罗 12 和 15 采集的低钛玄武岩岩浆具有更低的 Al 含量。

**关键词:** Cr 同位素; Sr 同位素; 嫦娥 5 号玄武岩; 岩浆分离结晶

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42241102, 41930216, 42441837)

第一作者简介: 张英男 (1993-), 副研究员, 研究方向: 天体化学. E-mail: zynld@ustc.edu.cn

\*通信作者简介: 秦礼萍 (1978-), 教授, 研究方向: 天体化学. E-mail: lpqin@ustc.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 内太阳系的吸积: Pebble Accretion 还是 Grand Tack?

周游\*

成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

理解从外太阳系向内太阳系的物质和水的输运动力学, 对于解析类地行星的形成过程至关重要。大迁移 (Grand Tack) 和卵石吸积 (Pebble Accretion) 这两种主要模型分别提供了不同的框架来解释内太阳系的形成。然而, 究竟哪种模型在该吸积过程中占据主导地位, 仍然存在较大争议。本研究旨在利用内太阳系的总物质量和水含量作为约束条件, 评估大迁移和卵石吸积模型在该区域吸积过程中的作用。

我们使用 N 体数值模拟方法 (N-body method), 构建 3 种大迁移情景与 2 种卵石吸积模型, 分析它们在太阳系生成物质和水的能力。研究表明, 卵

石吸积模型在内太阳系产生的物质量远高于大迁移模型, 约为其 10~14 倍 ( $20.58 M_{\oplus} \sim 28.6 M_{\oplus}$ )。在水的生成能力方面, 卵石吸积模型的效率也显著高于大迁移模型, 最高可达 20 倍 ( $122.17 M_{\oplus O}$ )。(大迁移模型对应的数值是多少?) 总体而言, 卵石吸积模型所生成的物质和水远超当前观测到的水平, 而大迁移模型的结果更接近当前的内太阳系状况。这表明, 卵石吸积在内太阳系的形成过程中可能并未占据主导地位。

**关键词:** Grand Tack; Pebble Accretion; 内太阳系的形成

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 月球背面和正面岩浆结构的不对称性

韩喆<sup>1</sup>, 曾罡<sup>1\*</sup>, 惠鹤九<sup>1,2,3</sup>, 李宇<sup>1</sup>, 韩紫嫣<sup>1</sup>, 欧阳文昕<sup>1</sup>, 张岳<sup>1</sup>,  
赵凯<sup>4</sup>, 谷渊涛<sup>5,6</sup>, 陆现彩<sup>1</sup>, 王汝成<sup>1</sup>

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023;

2. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心, 合肥 230036;

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

4. 中国科学院 紫金山天文台, 行星科学重点实验室, 南京 210023;

5. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210023;

6. 河南工程学院 资源与环境学院, 郑州 451191

月球的背面与正面具有明显的“二分性”特征, 其重要表现之一为月海玄武岩在背面的分布远远少于正面, 暗示月球内部岩浆活动存在差异。为了证实这一推论, 我们从嫦娥六号返回的月背样品中挑选了一块具有明显单斜辉石扩散环带的高钛玄武岩屑进行研究。通过运用单斜辉石温压计、结晶模拟和扩散年代学等方法, 我们发现该样品源自一个比嫦娥五号和阿波罗 12 号低钛玄武岩更浅 ( $> \sim 180$  km) 的低钛源区。大多数单斜辉石的扩散时间相对一致 ( $113 \pm$

21 d), 我们认为在月背壳幔边界存在一个单一的岩浆储库, 早期从低钛岩浆中结晶的单斜辉石在此停留, 而后被新注入的高钛岩浆捕获并发生扩散。与正面相比, 月球背面简单的岩浆结构支持了月球内部结构“二分性”的存在, 并为月球表面观察到的差异提供了潜在解释。

**关键词:** 月背; 月海玄武岩; 扩散年代学; 岩浆结构

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42322202), 中央高校基本科研业务费资助项目 (2024300389)

第一作者简介: 韩喆 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 幔源岩浆岩石学. E-mail: zhehan@smail.nju.edu.cn

\*通信作者简介: 曾罡 (1985-), 副教授, 研究方向: 岩石学. E-mail: zgang@nju.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 天体撞击过程与撞击历史研究

肖智勇\*

中山大学 行星环境与宜居性研究实验室, 广州 519000

撞击作用是天体形成和演化过程中的重要地质营力, 撞击通量影响天体表面的改造速率和宜居性演化, 同时也是使用撞击坑统计估算地外天体表面模式年龄的基础。内太阳系天体可能经历了相似的撞击历史, 其中月球的地质活动和表面风化速度最弱, 最完整地记录了太阳系形成以来的撞击历史, 且月球是唯一开展过采样返回的类地天体。因此, 月球是标定内太阳系撞击历史的基础参照。我国正在推进中的探月工程四期、国际月球科研站、载人登月、火星采样返回探测, 以及国外正在实施的月球和深空探测任务, 均将刻画天体撞击过程、建立撞击通量作为首要科学目标之一。

Apollo、Luna 和嫦娥五号已建立了 15 个月球撞击通量的定标点。现有的样品年龄和表面撞击坑空间密度观测共同说明月球在形成之初的 10 Ga 遭受了极高的撞击频率, 而大约 36 Ga 以来的撞击频率较低且趋于稳定。但是, 所有定标点的同位素年龄和撞击

坑坑群的观测密度均存在普遍不一致。针对观测约束不确定性的问题, 数十年的研究揭示了两个共识性的原因: 背景二次坑的污染程度不详、弹道溅射物沉积模式的预测不足。解决这两个难点问题已超越了样品分析和坑群统计的研究范畴, 与撞击过程的物理机理紧密相关; 而撞击过程伴随着极高的应变速率和极端温压环境, 解析撞击机理是行星地质学研究的重要内容。

本报告将重点介绍近年来在月球表面的撞击机理和撞击历史研究方面的新进展, 尤其是基于我国嫦娥探月工程自主获取的科学数据独立完成的新发现。针对目前撞击过程和撞击历史研究领域的关键科学问题, 展望了未来月球探测任务有望取得的突破方向。

**关键词:** 天体撞击; 撞击历史; 撞击坑; 月壤; 年代学

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## K/Pg 界线黏土成因 ——来自丹麦 Stevns Klint 剖面的启示

廖世勇<sup>1\*</sup>, 李晔<sup>1</sup>, Birger Schmitz<sup>2</sup>

1. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210023;

2. Lund University, Lund, Sweden 221001

K/Pg 界线地层记录了海洋和陆地的一系列同步灭绝事件, 导致了包括恐龙在内的大约四分之三的物种灭绝, 被认为与 6600 万年前尤卡坦半岛的希克苏鲁伯撞击事件密切相关。典型的海相 K/Pg 界线以一个数毫米厚的红色富黏土层为标志, 含有冲击石英和蚀变微球粒, 直接覆盖在晚白垩世马斯特里赫特阶地层之上, 紧接着被数十毫米的层理发育的深色富有机质层状黏土覆盖。K/Pg 界线红色及上覆富有机质黏土是地质记录中研究最多的层位之一, 被广泛用来示踪陨石撞击过程, 以及后继的生态和环境效应。然而由于经历复杂的成岩物理化学过程, 以及后期风化作用影响, K/Pg 界线黏土成因仍然存在很大争议。

本研究以经典的丹麦 Stevns Klint 剖面 K/Pg 界线黏土层位研究对象, 开展了系统的原位岩相学工作, 追踪撞击相关物质组合。同时展开全岩单矿物分离研究, 示踪黏土源岩。首次在红色黏土层中发现了撞击玻璃蚀变成因的海绿石球粒, 其成分与占主体的蒙脱石黏土成分差异明显, 显示以蒙脱石为主体的红

色黏土层可能并非前人认为的来自蚀变的撞击玻璃。重矿物丰度、成分和年代学谱图研究发现, 红色黏土层与上覆层状富有机质黏土在物源上并无明显差异, 主要应来自邻近 Sveconorwegian 和 Sudetes 地区。然而, 界线红色黏土与上覆层状富有机质黏土在微陨石来源铬铁矿丰度上差异明显, 后者显著增加。这种微陨石来源铬铁矿丰度的增加难以用陆源物质输入变化解释, 而更可能与海啸导致的远海物质向陆迁移有关。由于陆源物质输入的减少, 远海沉积物中微陨石来源铬铁矿在内的地外物质丰度将相对近岸增高。陨石撞击导致的海啸在向陆传播的过程中, 将使得更为富集微陨石来源铬铁矿的远海沉积物向陆搬运并在近岸快速沉积。本研究可能首次在远离撞击点的 K/Pg 界线沉积中识别到海啸沉积。上述研究同时也表明, K/Pg 界线红色及上覆富有机质黏土的沉积时间可能非常短暂, 为小时-天量级, 而非前人认为的几十到数千年。

**关键词:** K/Pg 界线; 红色黏土; 成因



• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 月球撞击玻璃珠储水的二分特性

胡森\*

中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029

月表水的发现激起了就位利用月球水资源的热情, 更是 Artemis 和嫦娥七号任务的探测的主要目标。嫦娥五号 (CE5) 返回月壤中的撞击玻璃珠被确证可以储存 2000  $\mu\text{g/g}$  的太阳风成因水, 其储存机制是太阳风注入后的扩散作用将太阳风成因水保存在撞击玻璃珠中。这种储水机制能否推广至整个月面是值得验证的重要科学问题。本文通过嫦娥六号 (CE6) 月壤返回的撞击玻璃珠, 通过测量水和氢同位素及其在撞击玻璃珠中的分布特征, 结

合撞击玻璃珠的化学成分, 发现月壤中的撞击玻璃珠的太阳风成因水与成分强依赖, (1) CE6 玄武质撞击玻璃珠与 CE5 相比具有更低的太阳风成因水含量, (2) 斜长质撞击玻璃珠与玄武质撞击玻璃珠相比, 完全没有发现太阳风成因水的痕迹。这些发现为理解月表水的储存、成因和迁移提供了新认知。

**关键词:** 月球; 水; 撞击玻璃珠

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## Ni 同位素揭示钛辉无球粒陨石母体的挥发份亏损历史

朱柯\*

中国地质大学(武汉), 武汉 430074

钛辉无球粒陨石 (Angrite) 是一类罕见的无球粒陨石, 以富钙辉石、富钙橄榄石和钙长石为主要矿物组成。其母体——钛辉无球粒陨石母体 (Angrite Parent Body, APB) 被认为是太阳系内挥发分最为贫乏的分化小行星之一, 其 K/U 和 Rb/Sr 比值较 CI 球粒陨石分别低约 100 倍和 1000 倍。揭示 APB 的形成和演化历史对于理解太阳系岩质行星及小行星的挥发分丢失机制具有重要意义。本研究通过高精度镍 (Ni) 同位素分析, 系统研究了不同类型的钛辉无球粒陨石 (火山型、深成型、橄榄岩型) 样品, 以探讨 APB 的热演化历史及其极端挥发分亏损的成因。结果表明, 深成钛辉无球粒陨石 (如 NWA 12934、NWA 14758) 具有较高的 Ni 含量 ( $2000 \times 10^{-6} \sim 5000 \times 10^{-6}$ ), 其  $\delta^{60/58}\text{Ni}$  值 (0.202 ‰~0.028 ‰) 接近球粒陨石。而火山型钛辉无球粒陨石 (如 D'Orbigny、SAH 99555) Ni 含量较低 ( $20 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ ),  $\delta^{60/58}\text{Ni}$  值变化范围较大 (-0.470 ‰~0.262 ‰), 其中部分样品 (如 NWA 12774) 呈现显著轻的 Ni 同位素组成。此外, 橄榄岩型钛辉无球粒陨石 (NWA 8535) 及火山型钛辉无球粒陨石中的巨

晶橄榄石 (A-881371, A-12209) 显示出超球粒陨石的  $\delta^{60/58}\text{Ni}$  值 (0.422 ‰~0.655 ‰), 这三个 APB 的储库 (深成型, 火山型, 橄榄石) 应该分别代表了 APB 核-幔-壳的 Ni 同位素组成。结合 Ni 的地球化学性质及其在分异型行星体中的行为, 我们推测 APB 的 Ni 同位素组成受到高能撞击事件的显著影响。首先, APB 的核的 Ni 同位素组成基本保持球粒陨石特征, 反应了核幔分异不造成 Ni 同位素分馏。然而, 地幔物质的超球粒陨石  $\delta^{60/58}\text{Ni}$  值可能是由撞击事件导致的高温蒸发所引起的。高温条件下, 较轻的 Ni 同位素更易逸散, 而残余物相对富集重 Ni 同位素。其次, 火山型钛辉无球粒陨石中观察到的轻 Ni 同位素组成可能源于撞击挥发物的部分再凝结过程。在高温蒸发后, Ni 气体在冷却过程中重新凝结到 APB 表面, 导致表层物质的 Ni 同位素组成偏轻。这一过程与先前钛辉无球粒陨石 K 和 Rb 同位素研究中提出的部分再凝结机制相一致。

**关键词:** 钛辉无球粒陨石; Ni 同位素; 挥发份亏损; 高能撞击

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 分异天体晚期吸积矿物残留的发现及意义

张爱铖<sup>\*</sup>, 杜天然, 张浪, 刘晓文

南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

晚期吸积假说 (Late Veneer Hypothesis) 认为类地行星和分异小行星在发生金属-硅酸盐分离之后吸积了球粒陨石物质。这些球粒陨石物质的加入对于认识类地行星和分异小行星的早期演化具有重要意义。然而, 该假说主要依赖于部分硅酸盐样品中强亲铁元素的富集及其未分异的分配模式。本文报道在一块非角砾岩型灶神星陨石 NWA 8326 中, 一个硫化物颗粒包裹了一个约 300 纳米大小的金属颗粒。该金属颗粒

呈现富集 Ir、W、Ru 和 Rh 等强亲铁元素特征。这是富 W 难熔金属颗粒在非角砾岩型分异样品中的首次报道, 代表了分异天体晚期吸积的首个矿物学证据。该富 W 金属颗粒的存在对于研究分异天体早期的 W 同位素模式年龄具有重要影响。

**关键词:** 富 W 难熔金属; 晚期吸积假说; 灶神星陨石; W 同位素模式年龄; 分异天体

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 火星液态水活动历史和宜居条件演变：进展和问题

肖龙\*

中国地质大学（武汉）行星地质与深空探测湖北省重点实验室，武汉 430074

火星作为太阳系内地球之外宜居环境最好的行星，其液态水活动历史和宜居条件的演变一直是行星科学和天文学领域的研究热点。液态水不仅是生命存在的必要条件，也是塑造火星地貌和地质演化的重要因素。本报告将从火星液态水活动的地质记录出发，阐述火星表面谷网、湖泊和古海洋等与

液态水活动相关研究的成果，结合气候模拟和实验分析，探讨火星宜居条件的研究进展和存在的问题。

**关键词：**火星；液态水；古海洋；宜居条件；地外生命

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

## 毅力号多载荷分析： 揭示火星杰泽罗沉积扇上部巨石矿物学特征

黄文博，辛艳青\*

山东大学（威海）空间科学与技术学院，山东 威海 264209

美国 NASA 的毅力号（Perseverance）火星车于 2021 年 2 月 18 日成功降落在火星杰泽罗（Jezero）撞击坑（18.4° N, 77.7° E），至今已运行近 4 年，完成了 5 个阶段的科学探测任务，依次覆盖撞击坑坑底、沉积扇边缘、沉积扇上部、边界单元及撞击坑边缘。在此过程中，毅力号搭载的四台光谱载荷——SuperCam、Mastcam-Z、SHERLOC 和 PIXL——发挥了关键作用。其中，Super Cam 具备激光诱导击穿光谱（LIBS）、拉曼光谱和可见-近红外光谱功能；Mastcam-Z 具备多光谱成像能力；SHERLOC 具备拉曼光谱功能；PIXL 具备 X 射线荧光光谱（XRF）功能。此外，四个载荷均配备相机，为深入研究杰泽罗撞击坑的表面物质组成、岩石成因及区域地质演化提供了重要依据。在第三阶段探测任务（沉积扇上部）期间，毅力号穿越了一片遍布形态不规则、尺寸从厘米至米级不等的巨石区域。Mastcam-Z 的高光谱成像分析表明，该区域的巨石可分为富橄榄石巨石与富辉石巨石两类。针对富橄榄石巨石的代表 Falcon Lake，毅力号在其表面钻磨形成了 Lake Haiyaha（LH）。SuperCam-LIBS/可见-近红外/拉曼、SHERLOC-拉曼及 PIXL-XRF 的分析结果表明，该岩石基质主要由富镁橄榄石（ $For_{73}$ ；占比>70%）组成，同时含有少量次生矿物（蛇纹石和呈块状横切岩石的 Mg/Fe-碳酸盐和硫酸盐），岩石无明显表面涂层。相比之下，富辉石巨石的代表（Mount Meeker）钻磨坑 Dragon's Egg Rock（DER）展现出显著不同的矿物学特征。多载荷

分析揭示，DER 岩石基质以富铝辉石（低钙辉石；>50%）为主，同时伴有橄榄石、Fe-Cr-Ti 氧化物、陨磷钙钠石和铁磷酸盐。此外，岩石内发育次生矿脉，主要由烧石膏组成，并可能含有硬石膏、石膏、硫酸钠或 Ca-Na 硫酸盐复盐。值得注意的是，Mount Meeker 表面具有明显的红棕色涂层，其主量元素的分布趋势与岩石基质相似（ $SiO_2 > TFeO > Al_2O_3$ ），表明涂层可能与基质成分密切相关。矿物学分析结果显示，两类巨石与杰泽罗撞击坑坑底的 Séítah 组（富铁橄榄石）和 Máaz 组（富高钙辉石和长石）无直接联系，更可能起源于杰泽罗撞击坑西部的 Nili 高原上的橄榄石-碳酸盐单元和更远处的低钙辉石单元，或者是杰泽罗撞击坑边缘的区域性橄榄石单元和含低钙辉石的基性岩盖层。这些巨石的组成特征与洪水侵位相一致，表明其可能在不同玄武质原岩演化后由后期洪水或冰的作用搬运至现今位置。在搬运过程中或更早，巨石经历了不同程度的水蚀变或热液蚀变，导致次生矿物的形成。随后，在长期干旱环境下，富辉石巨石的表面逐渐积累了悬浮于火星大气中的玄武质颗粒，最终形成红棕色涂层。沉积扇上部巨石的形成和搬运过程记录了火星晚期水文活动与区域地质演化的重要信息，为理解杰泽罗撞击坑及其周边地区的地质演变提供了关键证据。

**关键词：**火星；毅力号；杰泽罗西部沉积扇；巨石；矿物

第一作者简介：黄文博（2004-），本科，研究方向：行星光谱学。E-mail: 2080466358@qq.com

\*通信作者简介：辛艳青（1984-），硕士导师，研究方向：行星光谱学。E-mail: yqxin@sdu.edu.cn