

广州地化所发现月表普遍存在并不断累积的三价铁

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/21551.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

广州地化所发现月表普遍存在并不断累积的三价铁

铁元素是能够记录太阳系氧化还原状态的关键元素之一。在阿波罗时代，科学家通过对返回的月球样品研究发现，月球样品中的铁元素主要以还原性的 Fe^{2+} 和 FeO 两种状态存在，仅含有极少量氧化性的 Fe^{3+} ($< 1 \text{ wt}\%$)，因而推测认为无大气的月球表面和其内部均呈一种极度还原的状态。尽管如此，近期对阿波罗样品的进一步分析发现了某些样品中含有更高含量的 Fe^{3+} ，例如苦橄质玻璃珠的 $\text{Fe}^{3+}/\sum \text{Fe}$ (Fe^{3+} 在总铁含量中占的比例)可达25 %。

自月球样品中发现 Fe^{3+} 以来，其赋存形式和成因受到关注。传统观点认为月球 Fe^{3+} 的形成主要有两种途径：一是月球岩浆通过脱除 H_2 和 CO 等还原性气体，使得月球岩浆氧化性提高，进而使 Fe^{2+} 和 FeO 被氧化成 Fe^{3+} ；二是包括在月球表面本身存在的，以及返回样品在转移过程中发生的次生氧化作用。此外，近期科学家通过对系川小行星返回的样品研究认为，太阳风注入过程中伴随 H_2O 生成的歧化反应也可在无大气天体表面产生 Fe^{3+} 。由此可见，传统认知将月表 Fe^{3+} 主要归因于外部因素对月球原生还原性物质的氧化。然而，作为一个典型的无大气天体，月球表面无时无刻不遭受太阳风辐照和微陨石撞击等太空风化作用；而前人研究表明，太阳风辐照和微陨石撞击等太空风化作用在月球表面主要表现为形成纳米单质铁的还原性作用。因此， Fe^{3+} 在极度还原的月球表面如何赋存、形成及演化尚无定论。

近日，中国科学院院士、中科院广州地球化学研究所研究员徐义刚与研究员何宏平共同领衔的月球科学研究团队，利用嫦娥五号样品，针对上述问题开展研究。科研团队选择了月壤中由微陨石撞击作用形成而普遍存在的凝结玻璃为研究对象，发现嫦娥五号凝结玻璃中含有大量由歧化反应而产生的 Fe^{3+} ($\text{Fe}^{3+}/\sum \text{Fe} > 0.4$)。这一发现革新了学界对于月球 Fe^{3+} 赋存形态、含量及成因的认知。

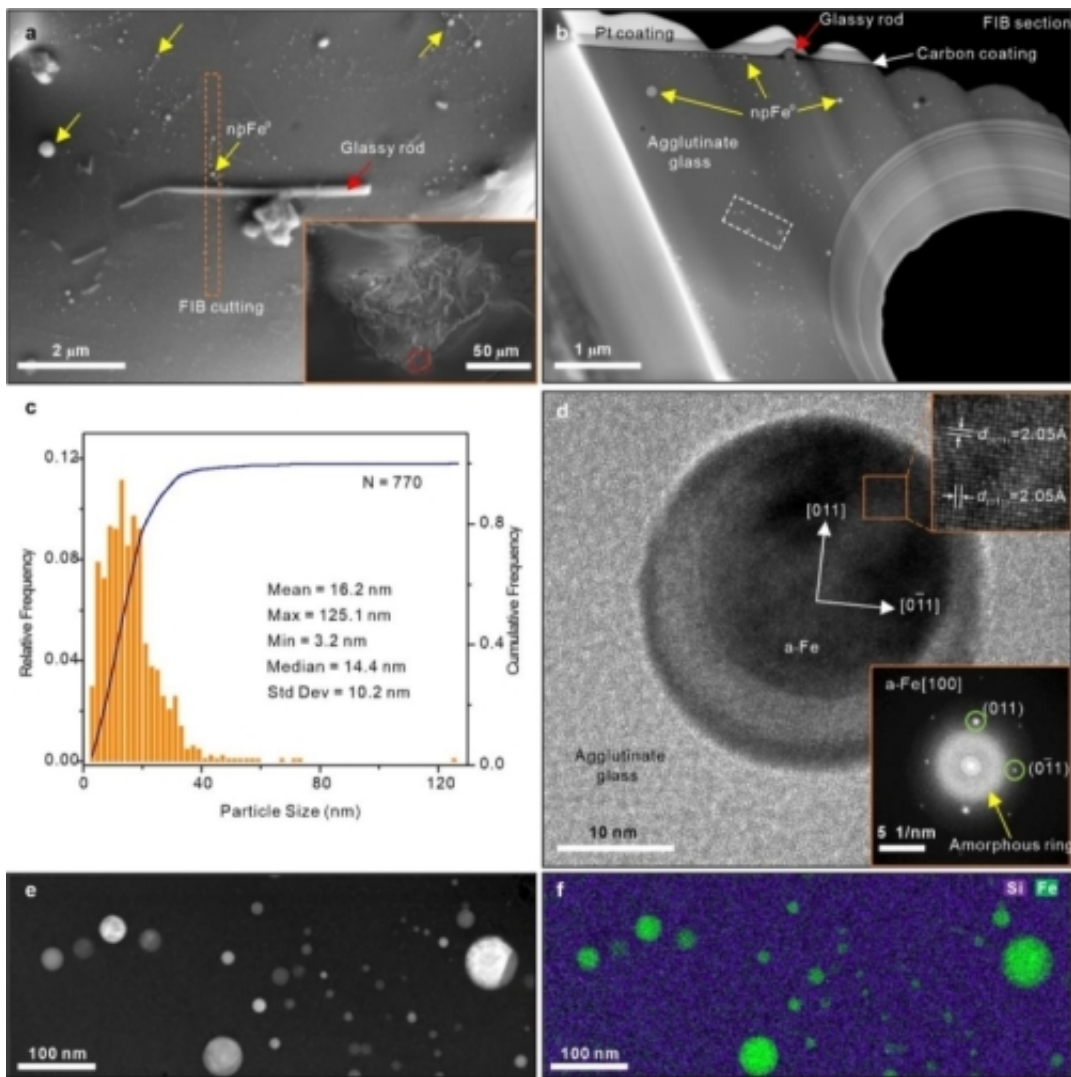
科研团队在嫦娥五号月壤样品中挑选了 $\sim 100 \mu\text{m}$ 尺寸的凝结碎屑颗粒，并通过扫描电子显微镜(SEM)对凝结颗粒表面进行详细观察。科研人员在凝结玻璃表面观察到由微陨石撞击作用产生的玻璃棒以及纳米单质铁球(图1a)。研究通过聚焦离子束(FIB)对样品进行加工，获得透射电子显微镜(TEM)可观测的薄片(图1b)。研究对凝结玻璃及其中赋存的纳米单质铁进行形态、化学成分和结构分析(图1c-f)，发现纳米单质铁为通常太空风化产生的阿尔法铁，平均尺寸为16.2 nm。

为表征嫦娥五号凝结玻璃中的三价铁含量，研究采用电子能量损失谱对样品中铁的价态进行定量分析。结果表明，样品中 $\text{Fe}^{3+}/\sum \text{Fe}$ 的平均值为0.41，高于以往研究获得的值。研究分析认为，如此高含量的 Fe^{3+} 不可能由外部氧化产生，而是凝结玻璃形成过程中 Fe^{2+} 发生歧化反应所产生(图2)。这一歧化反应可能发生在微陨石撞击形成的高温高压阶段，也可能发生在冲击熔融冷却阶段

。月表普遍存在的凝结玻璃中大量三价铁的发现，预示着月球表面存在着比人们以往认识更多的Fe³⁺，且Fe³⁺的含量会随微陨石撞击作用的持续进行而不断累积。

该研究发现的高含量的三价铁并不意味着月表环境是氧化的，这是由于本研究发现产生三价铁的歧化反应并不产生额外的氧，也不会消耗体系中的电子，仅将电子进行了重新分配。这一反应过程的发现对于探讨无大气天体表面环境铁元素的价态演化具有重要意义。

[论文链接](#)



1月9日，相关研究成果在线发表在《自然-天文学》(Nature Astronomy)上。研究工作得到中科院重点部署项目、广州地化所所长基金“嫦娥五号月球样品集成研究”和中科院青年创新促进会的支持。图1.嫦娥五号凝结玻璃中纳米单质铁的电子显微特征。a、SEM图，b、HAADF-STEM图，c、纳米单质铁的粒度统计结果，d、纳米单质铁的HRTEM图，e-f、纳米单质铁的高倍HAADF-STEM图和EDS元素面分布图。

图2.嫦娥五号凝结玻璃中微陨石撞击致纳米零价铁和三价铁的成因示意图

研究团队单位：广州地球化学研究所

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发