arXiv:2601.14719v1 [physics.space-ph] 21 Jan 2026

用于原位制氧的月壤模拟物的物理化学性质

Alyssa Ang De Guzman[a,b], Anish MathaiVarghese[b,d], Saif Alshalloudi[a], Lance Kosca[b,c], KyriakiPolychronopoulou[b,c],Marko Gacesa[a,b,*]

[a]哈利法大学物理系，阿布扎比，邮政信箱*127788*，阿联酋[b]哈利法大学催化与分离中心（*CeCaS*），阿布扎比，邮政信箱*127788*，阿联酋[c]哈利法大学机械与核工程系，阿布扎比，邮政信箱*127788*，阿联酋[d]哈利法大学化学与石油工程系，阿布扎比，邮政信箱*127788*，阿联酋

摘要

永久性月球定居点将依靠从月壤中原位制氧，以满足生命保障和推进需求。尽管月球物质中氧含量丰富，但氧以化学键合的形式存在于金属氧化物中，其可提取性在很大程度上取决于月壤组成和处理策略。本研究采用扫描电子显微镜结合能量色散X射线光谱、X射线衍射、Brunauer-Emmett-Teller比表面积与孔结构分析，以及氢气程序升温还原，对代表月球高地和南极的高保真月壤模拟物进行了验证和表征。这些模拟物在矿物学和成分上与采回的阿波罗和嫦娥样品高度吻合，并确认钛铁矿是最易还原的含氧相。然而，尽管钛铁矿含量较低，块体高地模拟物仍表现出良好的还原行为，这归因于分布广泛的含铁硅酸盐和玻璃相，以及影响气固相互作用的表面和微观结构性质。采用气体（H_2, CH_4, 和CO_2）及水进行的吸附实验表明，矿物学非均质性和孔隙可达性会影响它们在模拟物中的吸附量。这些结果表明，真实月壤中的氧提取行为取决于整体月壤响应，而非仅由钛铁矿含量决定；这支持在月球原位资源利用系统中采用全月壤处理策略进行制氧。

关键词：月壤、模拟物、氧提取、原位资源利用

1. 引言

随着全球对建立长期月球驻留的兴趣日益增长，制定稳健的原位资源利用（ISRU）策略变得至关重要。在所有原位资源中，氧尤为重要，既可用于生命保障，也可作为推进系统的氧化剂。月球蕴藏着丰富的氧，阿波罗样品中的氧含量约为45重量百分比，主要结合在钛铁矿、橄榄石、辉石和斜长石等矿物中Sibille（2020年）。然而，氧并非易于获取，必须通过能量密集型化学或电化学过程将其释放出来 D. Green 和 Kleinhenz（2019）。因此，月球制氧的可行性很大程度上取决于月壤组成、矿物学以及适当提取路径的选择。

月壤通常分为月海

*通讯作者电子邮箱：marko.gacesa@ku.ac.ae (Marko Gacesa)

和高地类型，反映了月球的主要地质地形。月海风化层具有玄武质特征，且钛铁矿相对富集，因此非常适合采用氢还原制氧方法 Sargeant 等（2020b）。相比之下，高地风化层广泛分布于月球表面的大部分区域，在极区尤为重要；其具有长石质、富斜长岩特征，通常含有极低含量的钛铁矿 Slabic 等（2024）；McKay et al. (1991)。因此，完全依赖钛铁矿还原的氧提取策略可能并不适用于高地和极区部署，从而推动了人们对熔融月壤电解、等离子体辅助提取以及全月壤处理方案等替代方法的关注 Schreiner（2015）。近期对返回的阿波罗和嫦娥五号样品的分析进一步凸显了月壤的矿物学复杂性和非均质性。阿波罗高地土壤以斜长石为主，即使在细粒级中，钛铁矿含量通常也低于 2 vol% Taylor 等（2010）；而嫦娥五号样品虽采集自月海区域，却包含富含钙质斜长石和富镁镁铁质矿物的高地岩屑 Wang（2022）。这些发现表明，氧提取系统必须应对混合矿物组合，而非理想化的富钛铁矿原料。作为回应，新一代高保真月壤模拟物已经开发出来，以更好地再现特定月球地形的矿物学和物理化学性质 Zou 等（2024）；Sun 等（2017）。早期模拟物往往已停产、保真度不足，或不适用于先进的原位资源利用测试，尤其是在氧提取和增材制造方面 Isachenkov 等（2022）。

除了作为地质类比物之外，高保真模拟物还为评估月壤组成、微观结构和表面性质如何影响原位资源利用相关条件下的气固相互作用、可还原性和挥发物处理提供了实用平台。在此背景下，关键问题不仅在于某种模拟物是否符合月球组成，还在于它揭示了哪些适用于钛铁矿稀缺区域的可行制氧策略。

在本研究中，我们验证并表征了月球高地模拟物 LHS-1 和 LHS-2，以及月球南极模拟物 LSP-2，采用扫描电子显微镜-能量色散X射线光谱、X射线衍射、BET比表面积和孔隙结构分析，以及氢气程序升温还原（TPR）进行研究。通过结合化学、结构和纹理表征与还原和吸附测量，我们评估了整体月壤处理在钛铁矿含量较低的情况下，在多大程度上仍能支持氧提取行为。结果表明，块体高地模拟物，尤其是 LHS-2，表现出良好的气固相互作用和还原行为，这主要源于分散分布的含铁硅酸盐和玻璃相，而非单独依靠钛铁矿。这些发现为高地和极地原位资源利用架构中氧提取路径的选择与优化提供了依据；在这些架构中，原料真实性和系统稳健性至关重要。

2. 材料与方法

本研究采用 Exolith 生产的高保真月壤模拟物，以准确代表月球南极（LSP-2）和高地（LHS-1 和 LHS-2）区域的不同土壤类型 Easter 等人（2024）；Long-Fox 等人（2023）。本研究中提及的 LHS-1、LHS-2 和 LSP-2 均指该制造商的产品。

所用模拟物的物相组成见表1 Space Resource Technologies (2023a,b,c)。需要注意的是，LHS-1 和 LHS-2 的成分相似。两种模拟物的粒径不同：LHS-1 的平均粒径为 100 μm，而 LHS-2 为 60 μm。根据 Exolith 的规格，辉石也可能被称为古铜辉石。

表1：已报告的模拟物矿物组成。

组分	LHS-1 和 LHS-2（重量百分比）	LSP-2（重量百分比）
斜长岩	74.4	90.0
富玻璃玄武岩	24.7	10.0
钛铁矿	0.4	–
橄榄石	0.2	–
辉石	0.3	–

为表征这些模拟物，采用扫描电子显微镜-能量色散X射线光谱（SEM-EDX）检查粒径、形貌和表面形貌。检查使用带有集成式能量色散 X 射线探测器的$ThermoFisher$ Phenom-XL 台式扫描电子显微镜进行。

如图 1 所示，采用扫描电子显微镜-能量色散 X 射线能谱元素映射，以颜色映射的信号强度直观呈现元素分布。碳和金的信号分别是由导电安装胶带和溅射镀膜过程产生的伪影，并非模拟物材料的固有成分。排除这些伪影后，能量色散 X 射线能谱元素映射在模拟物颗粒中识别出六种主要元素：氧、硅、钾、镁、铝和钙。

扫描电子显微镜-能量色散 X 射线能谱元素映射显示，颗粒尺度上存在显著的矿物学非均质性：富氧的硅酸盐和玻璃质基质包围着离散分布的富镁和富铝颗粒。在这一尺度上未观察到成分连续的大块钛铁矿区域，这表明含铁和含钛相（若存在）可能粒径细小且空间分散。颗粒形貌整体以棱角状为主，且存在粒间孔隙而非颗粒内部孔隙度；这一特征与块体模拟物测得的低 BET比表面积和介孔尺度孔径在定性上相符。这种非均质且分散的相分布，也与氢气程序升温还原过程中观察到的宽泛、多步还原行为相一致，相关讨论见第3.2节。

为进一步验证矿物组成，尤其是可能存在但低于SEM-EDX检测限的物相，使用配置为高分辨率物相鉴定的$Malvern\ \ Panalytical$衍射仪，对未经处理的LHS-1、LHS-2和LSP-2模拟物样品及其组成组分进行了粉末X射线衍射（XRD）分析。

对收到的粉末样品，在 2θ 至 5°范围内记录了XRD结果。使用$X'Pert\ HighScore$处理原始衍射图谱，在峰拟合、矿物相鉴定以及不同模拟物成分的比较分析之前，采用背景扣除和K-α_2 剥离算法。阿波罗16号样品#64501（引自Taylor等（2019））被用作LHS-1和LHS-2中高地月壤组成的基准。所有衍射图谱均通过施加恒定的 2θ 偏移进行零点位移校正，以补偿峰比较期间的仪器漂移（Hulbert和Kriven（2023））。

确认模拟物的保真度后，采用布鲁瑙尔–埃米特–特勒（BET）分析评估LHS-2及其组成矿物的比表面积特性。使用$Micromeritics\ 3Flex$ 表面分析仪，在77开尔文下进行N_2 吸附–脱附测量。测量前，在高真空条件下将样品于 200 ℃活化12小时。由于LHS-1的成分与LHS-2相似，因此未将其纳入BET分析。后者粒径更小，因此表面积暴露更大，相应地气体吸附能力也更强。此外，还在 25℃、最高1 bar的条件下，对材料进行了CO_2, N_2,H_2,和CH_4 的气固相互作用实验，并在 25℃、相对湿度为100%的条件下测量了材料的水吸附等温线。

最后，使用$Micromeritics\ AutoChem$ 进行程序升温还原（TPR），以表征固体与反应气体之间的化学相互作用，并量化固体与氧之间相互作用的强度。在氢气程序升温还原实验中，样品先在流动氩气中预处理1小时，从环境温度开始，在10分钟内升至300 °C的峰值温度。样品包括两种模拟物混合物（LHS-2、LSP-2）及其各自的矿物相（钛铁矿和橄榄石）。所有样品均在900 °C下还原。此外，在氧提取的背景下，需要指出的是，钛铁矿还原一直被认为是氧提取效率最高且最直接的方法之一 Sargeant 等（2020b）；Ramachandran等（2006），因此预计这些含钛铁矿模拟物的TPR结果也会得出类似结论。

3. 结果与讨论

验证模拟物的首要目的是确认其矿物学保真度，同时确定其性质如何影响氧气提取行为及潜在效率。元素面分布（扫描电子显微镜-能量色散X射线光谱）和物相鉴定（X射线衍射）可确立模拟物的基准保真度。BET比表面积和

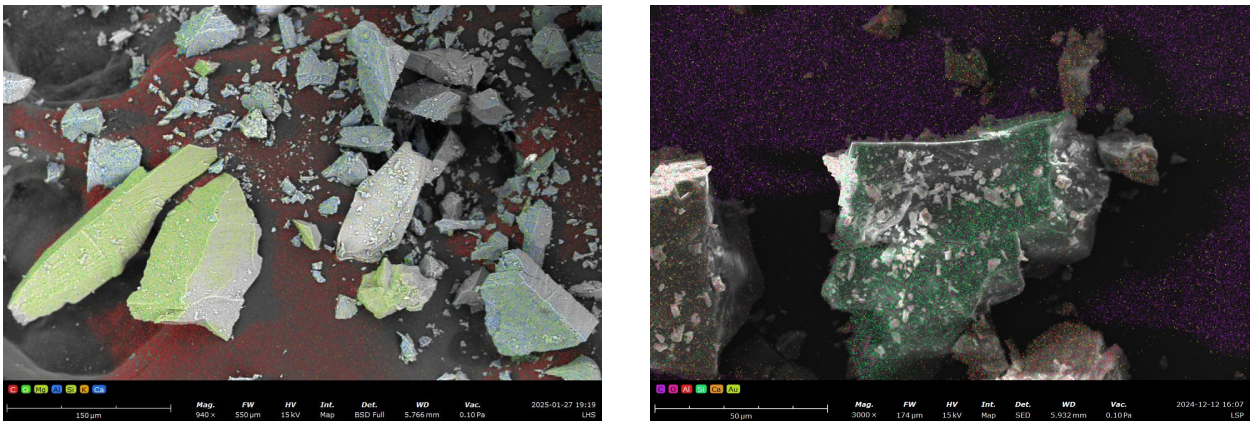

图 1：月壤模拟物的 EDX元素分布图：(a) LHS-2（左）和 (b) LSP-2（右）。

程序升温还原可揭示与释氧和氧气捕获相关的织构特征及热响应表面特性。

3.1. 模拟物验证结果

除绘制 LHS-2 和 LSP-2 的元素组成总体分布图外，扫描电子显微镜-能量色散X射线光谱还可分别筛选出每种模拟物中各个单个元素的分布图。如图 2 所示，能量色散X射线光谱元素分布图显示，LHS-2 中含有大量硅和氧，而且这两种元素可能以键合形式存在，因为它们出现在相同相中。硅和氧是主要元素，反映出斜长岩和玄武岩（SiO_2）的广泛存在。这种成分与月壤的矿物学框架相符；月壤主要由长石质和玄武质岩性构成 Mckay and Ming (1990); Zhang等（2021）。斜长岩构成高地地壳的主体，主要由富钙斜长石（An93- 97）和少量镁铁质相组成，其形成源于月球岩浆洋凝固过程中的分离结晶和浮力上升 Wakita 和 Schmitt （ 1970 ）； Pernet-Fisher 等（2017）。相比之下，月海玄武岩代表富含辉石和钛铁矿的地幔来源熔体，其氧化亚铁和 TiO_2含量较高，这一点已见于阿波罗岩相学研究 Isaacson等（2011）以及近期的嫦娥号玄武岩分析 Yin等（ 2025）。我们确认了钛铁矿的通过X射线衍射物相鉴定确认了 LHS-1 和 LHS-2 中存在钛铁矿；尽管其总体含量较低，但这一结果与已报告的模拟物成分一致。

因此，初步而言，扫描电子显微镜-能量色散X射线光谱分析表明，LHS-2的元素特征与月球高地月壤高度吻合，支持其作为模拟物用于原位资源利用测试的适用性。

图3还展示了LSP-2的EDX元素分布图，显示硅（Si）和氧（O）在相同相中浓度一致。这些元素分布证实了玄武岩和斜长岩的存在，与南极-艾特肯盆地所观察到的矿物学混合长石质-玄武质成分一致 Zhang等（2025）。此外，嫦娥六号任务的近期分析表明，该区域的月壤约由93%的当地月海玄武岩组成，另含少量来自高地斜长岩和地幔的物质 Cui等（2024）。

为验证成像结果的定性结论，表2列出了通过能量色散X射线光谱测得的 LHS-2 和 LSP-2 的元素浓度。正如预期，两种材料均含有较高含量的氧和硅，这与月壤富硅酸盐的特性一致。氧在两个样品中均占主导地位（$\sim$ 74 原子百分比），这反映了氧作为氧化物和硅酸盐矿物主要组分的作用，Robinot 等人（2025）。这也与

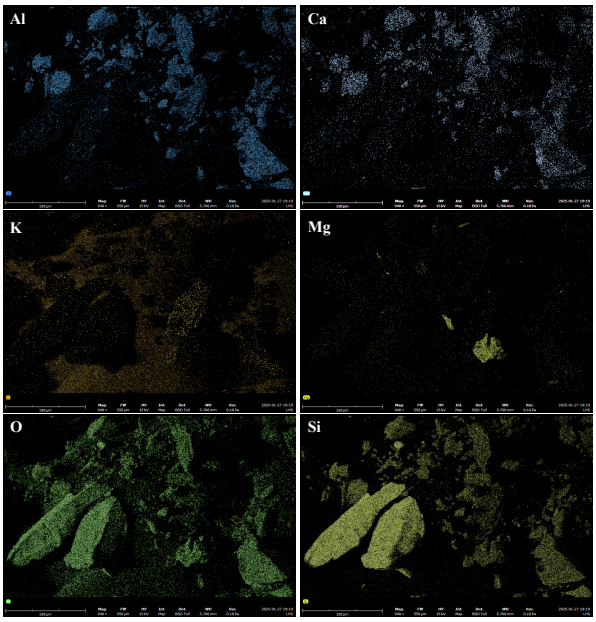

图2：LHS-2模拟物的EDX元素分布图。

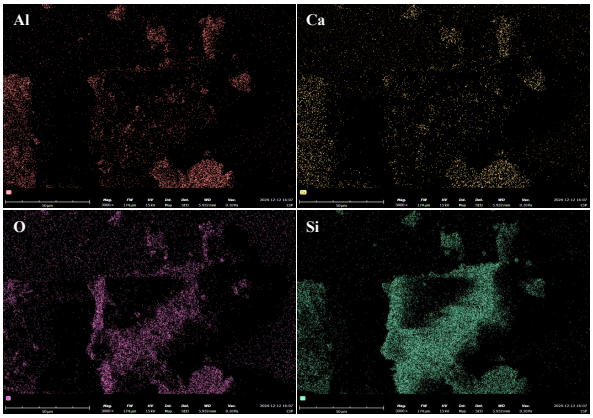

图3：LSP-2模拟物的EDX元素分布图。

模拟物制造商最初提供的成分相符，如表1所示。

LHS-2 的硅含量显著偏高（16.4 原子百分比，23.8 重量百分比），这与月球高地土壤的矿物学特征十分吻合，其中斜长石和辉石较为常见（Taylor，1972年）。这种组成也与采集到的月壤样品相当。相比之下，LSP-2 的铝含量较高（17.8 原子百分比，25.9 重量百分比），表明其中存在月球高地物质中常见的铝硅酸盐相。LSP-2 的硅含量较低（4.8 原子百分比，6.7 重量百分比），与富长石月球地形相似。

LHS-2中含有少量钙、钾和镁，而后两种元素在LSP-2中不存在或低于检出限。这些差异处于预期范围内，反映了不同月球区域所观测到的月壤组成多样性（Mckay and Ming (1990)）。

总体而言，扫描电子显微镜-能量色散X射线光谱的定性和定量分析均表明，LHS-2和LSP-2的元素组成特征与月壤高度吻合，支持在原位资源利用研究中使用高保真模拟物。有关单独矿物扫描电子显微镜–能量色散X射线光谱表征的更多细节，请参见附录。

如图4所示，对收到的粉末进行X射线衍射（XRD），从而能够将LHS-1的衍射图谱与月球相关矿物进行比较，包括斜长岩、玄武岩、钛铁矿、橄榄石和辉石。LHS-1（绿色）与斜长岩（橙色）和辉石（青色）的峰高度重叠，表明其中含有大量斜长石相和辉石相；这两种矿物确实是月球高地风化层中的主要矿物 McKay et al. (1991)。阿波罗16号任务的样品64501（黑色）也显示出大面积重叠，细微差异可能归因于粒度分布和微晶效应等因素 Li et al. (2022)。

表2：LHS-2和LSP-2模拟物的元素浓度。

元素	LHS-2（原子百分比）	LHS-2（重量百分比）	LSP-2（原子百分比）	LSP-2（重量百分比）
O	74.418	61.486	74.749	61.924
Si	16.419	23.818	4.795	6.695
Al	5.458	7.601	17.836	25.942
Ca	2.529	5.236	2.621	5.439
K	0.502	1.014	–	–
Mg	0.673	0.845	–	–

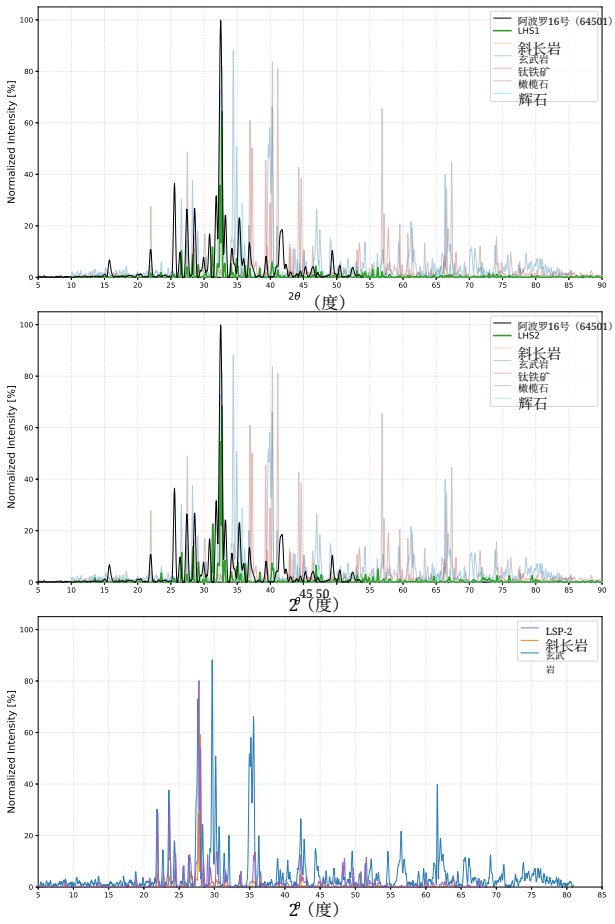

图4：LHS-1（顶部）、LHS-2（中部）、LSP-2（底部）及其组成矿物的X射线衍射图谱。

中间面板展示了LHS-2的矿物学特征。其衍射图谱（绿色）同样与斜长岩（橙色）和辉石（青色）高度吻合，证实其中存在斜长石相和辉石相，与月球高地物质相符。与钛铁矿、橄榄石和玄武岩的峰略有重叠，表明其中含有微量铁钛氧化物和镁铁质硅酸盐，进一步证明了该模拟物的保真度 Robinot 等人（2025）。LHS-1和LHS-2所得图谱的峰位和相对强度均与阿波罗16号样品高度吻合，证实二者具有很高的矿物学保真度。

最后，图4底部的X射线衍射图谱将LSP-2（紫色）的衍射谱与斜长岩（橙色）和玄武岩（蓝色）的衍射谱进行了比较，后两者是月壤的两种关键矿物组分。LSP-2与斜长岩的峰位高度吻合，表明其中斜长石占主导地位，这是月球高地物质的典型特征。此外，与玄武岩的谱线重叠表明其中含有镁铁质相，这是月海区域的典型特征（Salem 等人）。

3.2. 含氧相和还原行为

3.2.1. 氢气 *TPR* 还原行为

钛铁矿（$FeTiO_3$）是月球矿物中效率最高的氧源，在氢还原条件下可实现1.10重量百分比的表观氧产率。该结果与美国国家航空航天局应用化学实验室 Muscatello （ 2017 年）的研究，以及 Sargeant 等人近期采用 ProSPA 定制装置开展的研究结果一致。Sargeant 等人（2020a）和 Reiss 等人（2019）的研究均表明，在900 °C下通过氢还原，富钛铁矿月壤的产氧量最高可达1–2重量百分比，其反应如下：

$$FeTiO_3 + H_2 \rightarrow Fe + TiO_2 + H_2O \qquad (1)$$

这证明了钛铁矿是目前已知效率最高的氧源，并支持将高保真模拟物用于研究。报告的重量百分比处于既有文献所记载的范围内，见 Sargeant 等（2020b）。

LHS、LSP 和钛铁矿对应的程序升温还原曲线如图 5 所示。程序升温还原中观察到的还原行为与 X 射线衍射鉴定出的可还原铁钛氧化物（如钛铁矿）相符，即使其总体浓度较低也是如此。

在月球风化层的矿物组成中，月球高地土壤（LHS）因广泛分布于月球表面，成为原位制氧的一种实用次级来源。尽管根据程序升温还原（TPR）推算，其氧产率仅约为 0.02 重量百分比，但 LHS 的体积丰度或可弥补其提取效率有限的不足。此外，月球南极（LSP）模拟物的氧提取量为 0.01 重量百分比。这些数值是通过 TPR 得出的：对热导检测器信号进行基线校正，在还原区间内积分，并使用按样品质量归一化的校准响应将

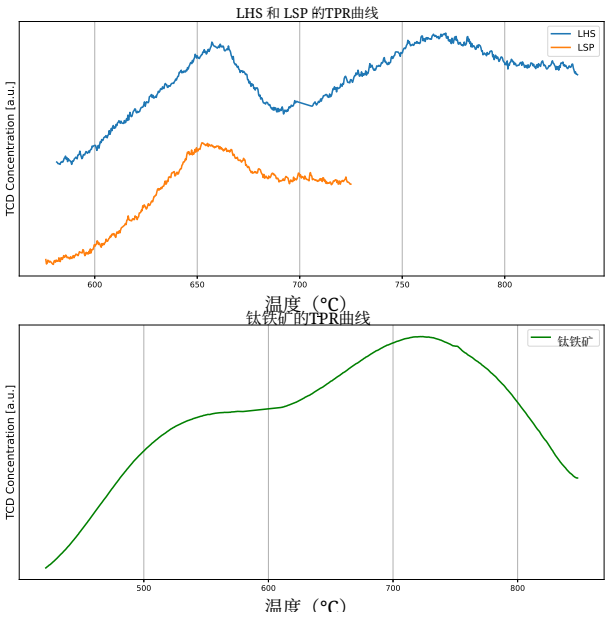

图5：LHS 和 LSP（上图）及钛铁矿（下图）的TPR曲线。

积分面积换算为氧的含量。

尽管程序升温还原广泛用于催化剂表征和氧定量，但该技术本身存在局限性 Dabbawala et al. (2023)。热导检测器的基线漂移会扭曲信号解读，而气体成分的交叉敏感性可能干扰程序升温还原测量中的氢气准确检测 Munteanu et al. (2008)。升温速率的变化会显著影响峰分辨率和还原曲线。此外，还原动力学深受材料物理化学特性的影响，尤其是粒径、晶粒尺寸和比表面积等因素 Baysal et al. (2021)。

还需要注意的是，使用氢气（H_2）的还原路径会生成水（H_2O）作为中间产物，而非直接生成气态氧。虽然这增加了一个处理步骤——水电解，以释放可供呼吸的 O_2, ，但也带来了战略优势。水是一种双重用途资源：它可以分解为氢气和氧气，用作火箭燃料（LH_2/LOX），也可直接用于生命保障、农业和辐射屏蔽 Sargeant 等（2020b）；Wang 等人（2025）。此外，还原反应中使用的氢气可通过电解步骤回收，从而实现节约氢气的闭环过程——鉴于氢气在月球上十分稀缺，这一点至关重要 Tewes 等人（2020）。

水也比气态氧更容易储存、运输和处理，尤其是在低温或加压系统中。然而，电解可能需要大量电力，因为研究表明，低重力条件会降低其效率，并可能限制其在任务可用能源范围内的实用性 Burke et al. (2024)。因此，选择这种方法还是直接提氧过程（例如熔融月壤电解），将取决于具体的任务架构、可用能源以及期望的产品组合 Guerrero-Gonzalez a nd Zabel (2023); Schreiner（2015）。

3.2.2. 织构性质与气固可及性

除了化学可还原性外，物理性质和表面性质也会影响与氧提取相关的气固相互作用。表3汇总了通过77开尔文下的N_2 吸附-脱附等温线测得的月壤模拟物织构性质。钛铁矿的比表面积（3.195 m^2/g）和介孔尺度平均孔径（21.05 nm）均为最高，表明其在气固相互作用中具有相对较高的表面可及性。虽然BET法测定的表面积和孔隙参数无法直接预测氧化物产氧量，但它们可用于描述表面可及性和传输路径，进而影响气固相反应动力学，尤其是在反应早期阶段或表面可及性限制反应速率的条件下 Bui等人（2022年）。

表3：在77开尔文下测得的月壤模拟材料的织构性质。

样品	表面积 ($m^2\,g^{-1}$)	孔体积 (厘米^3 克$^{-1}$)	平均孔径（纳米）
斜长岩	0.572	0.0195	136.53
玄武岩	0.599	0.0133	88.55
钛铁矿	3.195	0.0168	21.05
LHS-2	0.349	0.0151	26.83
橄榄石	1.056	0.0107	40.68
辉石	0.388	0.0131	135.52

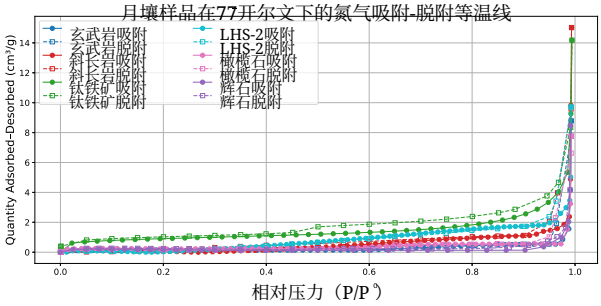

图6：月壤模拟材料在77开尔文下的氮气吸附-脱附等温线。

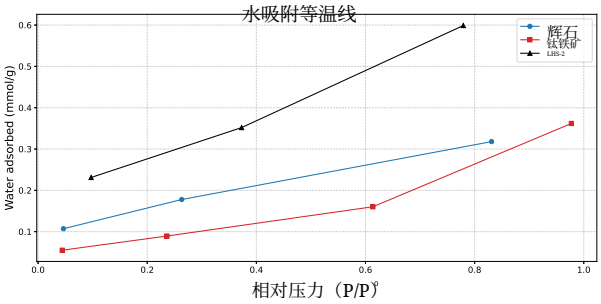

图7：月壤模拟材料在 25 °C 下、相对湿度最高达 100% 时的水吸附等温线。

面可及性和传输路径，进而影响气固相反应动力学，尤其是在反应早期阶段或表面可及性限制反应速率的条件下 Bui等人（2022年）。

斜长岩和辉石的比表面积相对较低（分别为0.572和0.388 m2/g），平均孔径较大（∼ 135nm），这表明孔体积中较大部分分布在较大的孔隙中，而非具有较高的内部比表面积。玄武岩和LHS-2的比表面积同样较低（分别为0.599和0.349 m2/g）；值得注意的是，尽管LHS-2的BET比表面积较低，其介孔尺度平均孔径仍达到26.83 nm，这与块体模拟材料因团聚、孔堵塞或混相粉末中的堆积效应而导致内部比表面积可及性有限的情况相符。橄榄石表现出中等的织构性质（1.056 m2/g；40.68 nm），与其相较于其他硅酸盐相具有中等表面可及性相符。

3.2.3. 气体吸附行为及其原位资源利用相关影响

氮气吸附-脱附等温线（图6）揭示了不同模拟物之间存在显著的吸附行为差异，这表明除比表面积外，其他因素（即表面化学、活化状态、孔结构可及性及分布差异）也在决定气体亲和性方面发挥重要作用（Ma等人，2025）。这种行为与涉及非热等离子体处理、真空条件下挥发物捕集，以及还原或电解后的中间气体处理步骤的原位资源利用方案相关，因为气固相互作用会影响工艺性能。

综合来看，这些结果表明，尽管钛铁矿仍是化学还原过程中反应性最强的相，但在原位资源利用相关条件下，LHS-2 凭借其矿物学复杂性和孔结构特征，可能在吸附或捕集相关应用中具有优势（Petkov 等人，2024）。

表4中报告的选择性数值对应于简单的吸附量比（q_{CO_2}/q_{gas}），该数值由 1 bar、 25°C 下的单组分吸附得出，而非热力学选择性或基于混合物的选择性。

尽管 LHS-2 的 BET比表面积相对较低，但其 CO_2 吸附量最高（0.044 毫摩尔/克），略高于斜长岩（0.042 毫摩尔/克）。这表明，LHS-2 中的 CO_2 吸附主要受表面化学和微观结构非均质性影响，而非仅由比表面积决定。相比之下，斜长岩的 CO_2/N_2 吸附量比最高，这是因为 N_2 吸附量极低，而非 CO_2吸附容量异常高。玄武岩也表现出较高的 CO_2/N_2比值，原因是 N_2 吸附量有限。钛铁矿的 CO_2 吸附量较低，而 N_2 吸附量相对较高，因此 CO_2/N_2 选择性较低，这与其在这些条件下对 CO_2 的亲和力有限相符。附录中提供了模拟物在 25°C 下、压力最高达 1 bar 时对 CH_4,N_2, H_2, 和 CO_2 的其他气体吸附等温线结果。

LHS-2 对 CO_2 相较于 N_2, H_2, 表现出中等选择性

表4：月壤模拟材料在 25 °C时的气体吸附性能。

样品	CO_2 （毫摩尔/克）	N_2 （毫摩尔/克）	H_2 （毫摩尔/克）	CH_4 （毫摩尔/克）	CO_2/N_2	CO_2/H_2	CO_2/CH_4
斜长岩	0.042	0.0019	0.0034	–	22.11	12.35	–
玄武岩	0.033	0.0018	0.0073	–	18.33	4.52	–
钛铁矿	0.018	0.0083	0.0049	–	2.17	3.67	–
LHS-2	0.044	0.0160	0.0063	0.0142	2.75	6.98	3.10
橄榄石	0.012	0.0029	0.0024	–	4.14	5.00	–
辉石	0.022	0.0063	0.0145	0.0068	3.49	1.52	3.24

和 CH_4, ，这反映出其绝对吸附容量较高，同时对多种气体的吸附相对缺乏选择性。这种行为与其矿物学复杂性和非均质表面化学相符；这些特征更有利于多气体吸附，而非强烈的分子选择性。

大多数样品对 H_2 和 CH_4 的吸附量通常较低；然而，辉石表现出相对较高的 H_2 吸附量和中等程度的 CH_4 吸附，表明在这些测量条件下，其孔隙结构或表面化学性质更易容纳较小的气体分子。

图7显示了这些材料在 25°C、相对湿度最高达 100% 条件下的水吸附等温线。

4. 结论与建议

本研究对代表月球高地和月球南极区域的高保真月壤模拟物进行了验证与表征，旨在为真实原位资源利用条件下的氧提取策略提供参考。X射线衍射和扫描电子显微镜-能量色散X射线光谱分析结果共同证实，LHS-1、LHS-2 和 LSP-2 模拟物的矿物组成和元素组成特征总体上能够代表返回的阿波罗和嫦娥样品，支持将其用作实验室规模原位资源利用研究中的月壤实验类比物。

氢气程序升温还原证实，钛铁矿是最易还原的含氧相，这与先前的研究结果一致。然而，本研究的一项关键发现是，整体高地模拟月壤，尤其是 LHS-2，表现出良好的表观释氧和气固相互作用特性，尽管其钛铁矿含量较低。这种特性源于分布广泛的含铁硅酸盐和玻璃相的共同作用，以及影响还原和吸附过程的表面性质与微观结构性质。这些结果表明，真实月壤中的氧提取行为受整体月壤响应支配，而非仅由钛铁矿含量决定。

BET比表面积和气体吸附分析表明，各个矿物相的比表面积较低；钛铁矿具有较高的可及性，但对 CO_2 的亲和力有限，且硅酸盐气体吸附量并不随比表面积增加而增大。这些结果凸显了矿物学复杂性和微观结构非均质性对于调控原位资源利用加工相关气固相互作用的重要性。在此背景下，与依赖广泛矿物选矿的策略相比，全月壤处理方法在系统简易性和稳健性方面可能具有优势，尤其适用于钛铁矿稀少的月球高地和极区部署（Shaw等（2022））。

当前模拟物以及返回的月球样品的一项主要局限，是无法充分复现空间风化月球表面；后者受到太阳风辐照、微流星体轰击和挥发物滞留的影响。L. Vander Wal（2008）；Denevi等（2023）。要进一步提高原位资源利用测试的保真度，必须解决这些影响；最终验证则需要在月球表面开展原位实验。

基于这些发现，我们建议未来研究优先关注以下几个方面：(i) 将整体

月壤氧提取行为与反应器尺度及系统级分析相结合，以评估工艺性能和运行权衡；(ii) 开发新一代模拟物，纳入依据月球极地任务数据获得的空间风化效应；(iii) 采用高保真模拟物评估新兴的原位资源利用方法，例如基于非热等离子体的方法 Alhemeiri 等（2024），同时继续优化成熟工艺，包括钛铁矿还原 Zou 等（2024）。此外，进一步研究月壤的矿物学性质和织构性质，可能有助于阐明其在促进与未来原位资源利用应用相关的气固反应方面所具有的潜在催化作用或动力学作用 Zhong 等（2023）。

总之，尽管没有任何模拟物能够完全再现月球环境，本研究证明，高保真月壤类似物对于连接实验室实验与月球原位资源利用系统设计具有重要价值。所获得的见解，尤其是关于整体月壤行为作用的认识，为制定稳健且适应性强的制氧策略奠定了基础，以支持人类在地球之外长期驻留。

致谢

A.A.D.、L.K. 和 M.G. 感谢哈利法科技大学通过项目 #8474000740-RIG-2024-045 和 # 8474000486-ESIG-2023-015 提供资助。作者感谢哈利法大学提供设施和机构支持，并感谢 CeCaS基金（RC2-2018-024）提供使用设施和基础设施的机会。

参考文献

Alhemeiri, N., Kosca, L., Gacesa, M., Polychronopoulou, K., 2024. 通过等离子体二氧化碳催化推动地球及太空应用中的原位资源利用。《二氧化碳利用杂志》85, 102887. doi:10.1016/j.jcou.2024.102887.

Baysal, Z., Kirchner, J., Mehne, M., Kureti, S., 2021年。氢气还原钛铁矿型FeTiO3的研究。《International Journal of Hydrogen Energy》46，4447–4459。doi:10.1016/j.ijhydene.2020.10. 266。

Bui, M.、Nagapudi, K.、Chakravarty, P.，2022年。使用反气相色谱法测定易发生相变的水合物-无水物体系的BET比表面积。《AAPS PharmSciTech》23，237。doi:10.1208/s12249-022-02395-6。

Burke, P.、Nord, M.、Hibbitts, C.、Berdis, J.，2024。低重力条件下的电解建模：从月球及更广阔空间的原位资源中制取氧。《Frontiers in Space Technologies》5。doi:10.3389/frspt.2024.1304579。

Cui, Z.、Yang, Q.、Zhang, Y.Q.、Wang, C.、Xian, H.、Chen, Z.、Xiao, Z.、Qian, Y.、Head, J.W.、Neal, C.R.、Xiao, L.、Luo, F.、Chen, J.、He, P.、Cao, Y.、Zhou, Q.、Huang, F.、Chen, L.、Wei, B.、Wang, J.、Yang, Y.N.、Li, S.、Yang, Y.、Lin, X.、Zhu, J.、Zhang, L.、Xu, Y.G.，2024。嫦娥六号从月球背面取回的样品中含有距今28.3亿年的玄武岩。《科学》386，1395–1399。doi:10.1126/science.adt1093。出版者：美国科学促进会。

D. Green, R., Kleinhenz, J., 2019。《原位资源利用（ISRU）：就地取材》。

Dabbawala, A.A., Elmutasim, O., Baker, M.A., Siakavelas, G., Anjum, D.H., Charisiou, N.D., Hin- der, S.J., Munro, C.J., Gacesa, M., Goula, M.A., Polychronopoulou, K., 2023。利用 Ni/Co-Al2O3 嵌入式介孔二氧化硅纳米复合催化剂，通过油酸加氢脱氧提高柴油类烃的选择性：实验与密度泛函理论方法。《应用表面科学》640，158294。doi:10.1016/j.apsusc. 2023.158294。

Denevi, B.W., Noble, S.K., Christoffersen, R., Thompson, M.S., Glotch, T.D., Blewett, D.T., Garrick-Bethell,I.,Gillis-Davis, J.J.,Greenhagen, B.T., Hendrix, A.R., Hurley, D.M., Keller, L.P., Kramer, G.Y., Trang, D., 2023. 月球上的空间风化。《矿物学与地球化学评论》89, 611–650. URL:

https://doi.org/10.2138/rmg.2023.89.14, doi:10.2138/rmg.2023.89.14. _eprint: h t t p s://pubs.geoscienceworld.org/msa/rimg/article-pdf/89/1/611/6072958/rmg.2023.89.14.pdf. Easter, P., Long-Fox, J., Britt, D., Brisset, J., 2024. 粒度分布对月壤模拟物安息角的影响。《空间研究进展》。 Guerrero-Gonzalez, F.J., Zabel, P., 2023. 原位资源利用生产工厂系统分析：从月壤中提取金属和氧。《宇航学报》203, 187–201. doi:10.1016/j.actaastro. 2022.11.050. Hulbert, B.S., Kriven, W.M., 2023. 采用平面面积探测器的德拜–谢乐几何构型粉末X射线衍射样品位移校正。《应用晶体学杂志》56, 160–166. doi:10.1107/S1600576722011360. 出版商：国际晶体学联合会。 Isaacson, P.J., Sarbadhikari, A.B., Pieters, C.M., Klima, R.L., Hiroi, T., Liu, Y., Taylor, L.A., 2011. 月岩与矿物表征联盟：对月海玄武岩进行的解构及综合矿物学、岩石学和光谱分析。《陨石学与行星科学》46, 228–251. doi:10.1111/j.1945-5100.2010.01148.x. Isachenkov, M., Chugunov, S., Landsman, Z., Akhatov, I., Metke, A., Tikhonov, A., Shishkovsky, I., 2022. 用于原位资源利用研究的新型月球高地和月海模拟物表征。《伊卡洛斯》376, 114873. doi:10.1016/j.icarus.2021.114873. L. Vander Wal, R., 2008. 月尘的化学、电学和机械反应性：模拟与表征。技术报告 NASA/CR—2008-215431。国家空间探索研究中心，格伦研究中心，俄亥俄州克利夫兰。 Li, R., Zhou, G., Yan, K., Chen, J., Chen, D., Cai, S., Mo, P.Q., 2022. 专用月壤模拟物的制备与表征，用于月球低重力模拟。《国际矿业科学与技术杂志》32，1–15。doi:10. 1016/j.ijmst.2021.09.003。 Long-Fox, J.M., Landsman, Z.A., Easter, P.B., Mill- water, C.A., Britt, D.T., 2023. 月壤模拟物 LHS-1 和 LMS-1 的岩土力学性质。《空间研究进展》71，5400–5412。doi:10.1016/j.asr.2023.02.034。 Ma, H., Fu, H., Tong, Y., Umar, A., Hung, Y.M., Wang, X., 2025. 二氧化碳捕集与分离材料的进展：可持续应用的新兴趋势、挑战与前景。《碳捕集科学与技术》15，100441。doi:https: // doi.org/10.1016/j.ccst.2025.100441。Mckay, D., Ming, D., 1990. 月壤性质，载于：《土壤科学进展》。Elsevier。第19卷，页449–462。doi:10.1016/ S0166-2481(08)70360-X。iSSN：0166-2481。 McKay, D.S., Heiken, G., Basu, A., Blanford, G., Simon, S., Reedy, R., French, B.M., Papike, J., 1991. 月壤。《月球资料手册》567，285–356。 Monshi, A., Foroughi, M.R., Monshi, M.R., 2012. 使用X射线衍射更准确地估算纳米晶粒尺寸的修正谢乐方程。《世界纳米科学与工程杂志》2，154–160。doi:10.4236/wjnse.2012.23020。Munteanu, G., Miclea, C., Segal, E., 2008. 程序升温还原中动力学参数评估的误差。《热分析与量热学杂志》94, 317–321。doi:10.1007/s10973-008-8998-y。 Muscatello, T., 2017. 从矿物中提取氧，载于：美国国家航空航天局应用化学实验室。Pernet-Fisher, J.F., Joy, K.H., Martin, D.J.P., Donaldson Hanna, K.L., 2017. 评估月球高地的冲击状态：对月壳斜长岩岩石成因与年代学的启示。《科学报告》7，5888。doi:10. 1038/s41598-017-06134-x。出版方：自然出版集团。

Petkov, M.P., Wilkerson, R.P., Voecks, G.E., Rick- man, D.L., Edmunson, J.E., Effinger, M.R., 2024. 真空烧结过程中选定的高地和月海月壤模拟物释放的挥发物比较。《行星与空间科学》252, 105982。doi:10.1016/j.pss.2024.105982。

Ramachandran, N., Willenberg, H., Volz, M., 2006. 月壤中钛铁矿的氢还原，载于：Space 2006。美国航空航天学会。AIAA SPACE论坛。doi:10.2514/6.2006-7482。

Reiss, P., Kerscher, F., Grill, L., 2019. 钛铁矿和 NU-LHT-2M 与氢气和甲烷还原反应的热重分析。发展新的太空经济。

Robinot, J., Rodat, S., Abanades, S., Paillet, A., Cowley, A., 2025. 月壤原位氧提取综述：重点关注太阳能热和激光真空热解。《航天学报》234, 242–259. doi:10.1016/j.actaastro.2025.05.008.

Salem, I.B., Sharma, M., Kumaresan, P., Karthi., A., Howari, F.M., Nazzal, Y., Xavier, C.M., . 利用月球遥感数据研究波西多尼乌斯底部断裂撞击坑的形态与矿物学特征。MDPI doi:https://doi.org/10.3390/rs14040814.

Sargeant, H.M., Abernethy, F.A.J., Anand, M., Barber, S.J., Landsberg, P., Sheridan, S., Wright, I., Morse, A., 2020a. 静态系统中钛铁矿氢还原用于月球表面原位资源利用演示的可行性研究。《行星与空间科学》180, 104759。doi:10.1016/j.pss.2019.104759。

Sargeant, H.M., Abernethy, F.A.J., Barber, S.J., Wright, I.P., Anand, M., Sheridan, S., Morse, A., 2020b. 钛铁矿氢还原：朝着在月球表面开展原位资源利用演示迈进。《行星与空间科学》180, 104751。doi:10.1016/j.pss.2019.104751。

Schreiner, S.S., 2015年。熔融月壤电解反应器建模及原位资源利用系统的优化。硕士论文，麻省理工学院。收录日期：2015年9月17日T17:44:44Z。

Shaw, M., Humbert, M., Brooks, G., Rhamdhani, A., Duffy, A., Pownceby, M., 2022年。月球表面的矿物加工与金属提取——挑战与机遇。《矿物加工与冶金评论》43, 865–891。doi:10.1080/08827508.2021.1969390。出版商：泰勒-弗朗西斯出版集团_电子印本：https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1969390。

Sibille, L., 2020年。《月壤氧和金属提取新兴技术的现状与系统分析》，内华达州拉斯维加斯。NASA技术报告服务器作者所属机构：东南大学研究协会 NASA技术报告服务器文档 ID：20205002032 NASA技术报告服务器研究中心：肯尼迪航天中心（KSC）。

Slabic, A., Technology, J., Gruener, J.E., Rickman, D.L., Sibille, L., Oravec, H.A., Edmunson, J., Keprta, S., 2024。《月壤模拟物用户指南》A版。

Space Resource Technologies，2023a。LHS-1月球高地模拟物情况说明书。技术报告 003-01-001-1223。Space Resource Technologies。网址：https://spaceresourcetech.com/collections/lunar-simulants/products/lhs-1-lunar-highlands-simulant。技术数据表。

Space Resource Technologies，2023b。LHS-2 月球高地模拟物：情况说明书。技术报告 001-11-001-1223。Space Resource Technologies。网址：https://spaceresourcetech.com/collections/lunar-simulants/products/lhs-2-lunar-highlands-simulant. 技术数据表。

Space Resource Technologies, 2023c. LSP-2 月球南极模拟物：情况说明书。技术报告 001-12-001-1223。Space Resource Technologies。网址：https://spaceresourcetech.com/collections/lunar-simulants/products/lsp-2-lunar-south-pole-simulant. 技术数据表。

Sun, H., Yi, M., Shen, Z., Zhang, X., Ma, S., 2017年。开发一种新型可控月尘模拟物：BHLD20。《行星与空间科学》141，17–24。doi:10.1016/j.pss.2017.04.010。

Taylor, G.J., 1972年。《月球高地的成分：来自斜长岩岩屑和玻璃中斜长石模态含量与规范含量的证据》。Earth and Planetary Science Letters 16, 263–268。doi:https://doi.org/10.1016/0012-821X(72)90200-2。

Taylor, G.J., Martel, L.M., Lucey, P.G., Gillis-Davis, J.J., Blake, D.F., Sarrazin, P., 2019。《采用定量X射线衍射分析对月壤进行模态分析》。《地球化学与宇宙化学学报》266, 17–28。doi:10.1016/j.gca.2019.07.046。

Taylor, L.A., Pieters, C., Patchen, A., Taylor, D.H.S., Morris, R.V., Keller, L.P., McKay, D.S., 2010年。《月球高地土壤的矿物学和化学表征：关于无大气天体土壤空间风化的见解》。Journal of Geophysical Research: Planets 115。doi:10.1029/2009JE003427。

Tewes, P., Holquist, J., Bower, C., Kelsey, L., 2020年。原位资源利用衍生的水净化与氢氧生产（IHOP）组分开发。

Wakita, H., Schmitt, R.A., 1970年。月球斜长岩：稀土元素及其他元素丰度。《科学》170，969–974。出版商：美国科学促进会。

Wang, C., Zhang, G., Wang, Y., Song, L., 2025。实现长期月球居住的月球环境与原位资源利用综述。《星系》13，103。doi:10.3390/galaxies13050103。出版商：多学科数字出版研究所。

Wang, S.J., 2022年。利用TIMA-SEM-EPMA首次定位并表征嫦娥五号角砾岩中的月球高地岩屑。《原子光谱学》43，351–362。doi:10.46770/AS.2022.030。

Yin, C., Chen, J., Fu, X., Cao, H., Lu, X., Liu, Y., Li, J., Chi, S., Zeng, X., Ling, Z., 2025. 嫦娥六号玄武岩的岩石成因及其对年轻月球背面火山活动的启示。《天体物理学杂志快报》981，L2。doi:10.3847/2041-8213/ adaf20。出版方：美国天文学会。

Zhang, H., Zhang, X., Zhang, G., Dong, K., Deng, X., Gao, X., Yang, Y., Xiao, Y., Bai, X., Liang, K., Liu, Y., Ma, W., Zhao, S., Zhang, C., Zhang, X., Song, J., Yao, W., Chen, H., Wang, W., Zou, Z., Yang, M., 2021. 嫦娥五号任务返回月球样品的粒径、形态和成分。《中国科学：物理学 力学 天文学》65, 229511. doi:10.1007/s11433-021-1818-1.

Zhang, M., Fa, W., Jia, B., 2025. 嫦娥六号采样点月壤的来源与演化。《自然·天文学》9, 813–823. doi:10.1038/s41550-025-02525-7.

Zhong, Y., Low, J., Zhu, Q., Jiang, Y., Yu, X., Wang, X., Zhang, F., Shang, W., Long, R., Yao, Y., Yao, W., Jiang, J., Luo, Y., Wang, W., Yang, J., Zou, Z., Xiong, Y., 2023. 利用月球土壤进行原位资源利用，以高效供应地外燃料和氧气。《国家科学评论》10, nwac200. doi:10.1093/nsr/nwac200.

Zou, Y., Wu, H., Chai, S., Yang, W., Ruan, R., Zhao, Q., 2024. 基于嫦娥五号返回样品研制并表征PolyU-1月壤模拟物。《国际矿业科学与技术杂志》34, 1317–1326. doi:10.1016/j.ijmst.2024.08.006.