

# 月壤特性及利用模拟月壤进行植物培养的研究进展

王思涵 李华盛 陈瑜 鹿金颖

航天神舟生物科技集团有限公司 北京 100190

**摘要:** 载人基地是月球探索的未来趋势,受控生态生保系统是载人月球基地所必需的以植物栽培为核心的功能单元。由于从地球到月球的运输费用昂贵,月壤作为月球表面最丰富的原位资源,可作为受控生态生保系统植物栽培的基质。本文综述了月壤基本特性以及国内外近年来利用月壤进行植物栽培的最新研究成果,文章简述了月壤的土壤特征与化学成分,分析了月壤不能进行植物栽培的原因,而后针对不同的实验条件,梳理了世界各国研制出的模拟月壤进行植物栽培的方法和结论,初步探索了基于月壤资源的植物栽培技术基础,有助于发掘月球科学的前沿领域,为中国未来建立月球基地计划提供初步参考依据。

**关键词:** 月壤; 植物培养; 模拟月壤; 受控生态生保系统; 微生物

随着航天事业的蓬勃发展,深空探测领域的不断深入,空间生物领域的相关研究也逐渐走进人类的视野,各国研究人员也在不断进行模拟火星、月球、卫星和空间站等空间环境中的生物适应性试验<sup>[1]</sup>。这对于了解地球生物在空间环境中的生存能力至关重要,也为未来月球、火星等近地小天体资源开发提供了科学依据。

开展载人月球探测、建立月球基地是我国载人航天发展的下一步目标。在未来月球基地建设过程中,包括消费者(人/动物)、生产者(植物/藻类/动物)、分解者(微生物)在内的地球生物发挥着重要的作用。在月球基地受控生态生保系统中,高等植物担负着系统中气体平衡、食物供给、废水净化、月壤资源利用以及改善乘员心理状态的重要职责<sup>[2-4]</sup>。然而,月球表面的极端环境对植物栽培生长形成极大的挑战,如何解决月球基地受控生态生保系统中植物生长的问题,成为月球基地建设中不可逾越的一环。因此,针对地球与月球土壤的差异,并通过月壤改良完成植物栽培成为未来月球基地建设和就地资源利用的关键核心问题。另外,研究地球生命在月壤条件下的适应性问题,也为地球生命起源与进化研究提供新思路和新方法。

## 1 月壤特性

### 1.1 月壤的特点

月球的表面几乎都被一层风化层所覆盖,这层风化层被称为月壤(lunar regolith)<sup>[5]</sup>。月壤的形成主要受到三个方面的作用:陨石撞击、空间风化和物理风化。其次,由于月表昼夜温差大,岩石热胀冷缩所引起的碎裂作用在月壤的形成过程中也起到了非常大的促进作用。

月壤通常仅指月球较细部分的表岩屑,由直径小于等于1厘米的颗粒组成,一般内含岩屑、粉尘、角砾岩和玻璃。月壤颗粒的主要组成物质包括<sup>[6-8]</sup>:

- (1) 原始结晶岩碎屑(主要为玄武岩、斜长岩、橄榄岩、苏长岩等);
- (2) 矿物碎屑(主要为橄榄石、斜长石、辉石、钛铁矿等);
- (3) 撞击角砾岩(breccia)和粘合集块岩(agglutinate);
- (4) 玻璃(包括火山玻璃和撞击玻璃);
- (5) 金属(大多为铁、钛);
- (6) 极少量的陨石碎片。

月壤形成过程与地球土壤不同,成分也存在差异,见表1。

表 1 地球土壤与月球土壤的成分区别

	地球土壤	月球土壤
矿物质	硅酸盐、磷酸盐、硫酸盐、氯化物、氧化物和氢氧化物等,占45%	二氧化硅(占50%),氦-3,氖-20、-21、-22,氩-38等核素,硅、铝、钾、钡、锂、铁、金、银、铅、锌、铜、铈、铕等
有机质	氮、磷、钾,硫、钙,微量元素等,占5%	无
空气	占12%	稀有气体
水分	占38%	无

### 1.2 月壤不利于植物栽培的原因

月球环境与地球环境存在着很大的不同，月球环境难以满足植物生长所需基本要素，具体如下 [9-10]:

(1) 月球表层土壤和岩石颗粒各种尺寸大小不一;

(2) 由于月球重力只有地球的 1/6，其低重力以及近乎真空的条件会导致细小的月壤微粒很容易被自然或人为活动扰动而悬浮在空中;

(3) 月球土壤中没有空气或仅含有少量稀有气体;

(4) 没有水分或者水分含量极少;

(5) 土壤中没有有机物;

(6) 月壤颗粒属于多棱角、多气孔结构，表面粗糙且凹凸不平，较为尖锐，可能会损害植物根系

(7) 月壤中含有大量的可溶性碱性矿物质，几乎没有酸性物质，pH 较高

月壤本身的特性给植物栽培生长造成了极大的困难，然而，近期一项最新研究为人类实现长期殖民月球的目标提供了新的可能。美国佛罗里达大学研究团队在月球土壤中种植出了拟南芥植株，证明了植物可以在月球土壤中成功发芽和生长 [11]。该研究利用阿波罗 11 号、12 号和 17 号任务期间收集的月壤土壤栽种模式植物拟南芥。结果发现，月壤中种植的拟南芥发芽率接近 100%，但生长不良，植物受到的生长胁迫严重，生长状态不及对照组（模拟月壤种植拟南芥）。该项研究证明了月壤虽可用于种植，但植物生长状态不及在模拟月壤（一种以火山灰为主要材料的土壤）中生长的拟南芥。研究团队推测，在宇宙射线和太阳风的双重作用下，月壤结构遭到破坏，且月壤中的铁颗粒诱发植物的胁迫反应，影响了拟南芥的生长发育。

### 2 模拟月壤

模拟月壤是一种合成的陆地材料，旨在近似月球风化层的化学、机械或工程特性以及矿物学和粒度分布，是月球样品的地球化学仿制品 [12]。

“阿波罗”计划之后，特别是在星座计划的开发过程中，不同组织机构的研究人员根据不同的目的需求，生产了大量的模拟月壤，其中许多都使用三个字母的缩写来区分它们，并用数字来指定后续版本。目前，模拟月壤主要包括美国的 JSC 系列、MLS 系列，日本的 MKS 系列、FJS 系列，英国的 SSC 系列，以及中国科学院的 CAS 系列和吉林大学研制的 JLU 系列等模拟月壤。JSC 系列模拟月壤是于 1994 年

由美国国家宇航局下属的约翰逊空间中心主持研制。JSC-1 是一种玻璃含量较高的玄武岩质火山灰，初始物质为旧金山附近的火山喷发的厚达数米的黑色火山灰和火山砾沉积，其成分结构接近月海的月球土壤 [13]。MLS 系列模拟月壤由美国明尼苏达大学研制。MLS-1A 是以钛含量较高的阿波罗 11 号土壤（代号 10084）的整体化学成分作为参照而生产，其主要成分来自明尼苏达州德卢斯的全结晶高钛角岩，目的是用于研究与高钛月球土壤的化学相似性。MLS-2 模拟月壤是一种月球高地月壤模拟物质，为德卢斯北美中大陆断裂的斜长岩经粉碎、研磨过筛制成 [14]。MKS-1 和 FJS-1 系列是以 Apollo 14 采样点月壤作为参照而生产出来的模拟月壤，初始物质为玄武质熔岩 [15]。英国萨里太空中心研制了 SSC 系列模拟月壤。SSC-1 颗粒相对较粗，初始物质为石英砂；SSC-2 颗粒极细，初始物质为石榴石 [16]。

到目前为止，各国已在模拟月壤中成功栽培出生菜、菠菜、豌豆 [17]、黑麦 [18] 等植物，并且完成了从“种子到种子”的全周期生命实验。由于真正的月壤较为稀缺，因此现有的针对月壤进行的植物栽培试验基本均采用模拟月壤来完成。模拟月壤具有作为作物生长的可行基质的潜力，其化学成分和部分物理性质与真实的月壤 [19] 相似，它可以较为准确地预测在真实的月球土壤中的作物反应。

### 3 月壤改良与植物栽培

月壤不含有机和水分，可以为植物利用的游离元素很少，因此月壤上无法直接种植植物。构建月球基地，就必须对其土壤进行改良，以满足植物生长的需要。正常的地球土壤是陆地表面由矿物质、有机物质、水、空气和生物组成。疏松的土壤微粒组合起来，形成充满间隙的土壤结构，这些孔隙中含有溶解溶液（液体）和空气（气体）。月球等外星球表层与早期地球表面类似，主要是大块岩石经风化作用形成的母质碎屑，这些表层仅能满足一些低等植物和微生物的生长，对于植物生长是极其不利的。另外这些表层缺乏有机物会导致保水能力降低和颗粒间无法连接固着，造成了与地球上的沙漠类似的环境，使植物容易倒伏。

在陆地土壤中，微生物在调动土壤矿物质中所含的必需元素或侵蚀促进元素方面发挥着重要作用。微生物能够促进土壤中有机含量的增加，且微生物对岩石所产生的总分解力远远超过全部动植物所具有的分解力，因此在月壤中适当引入有利的微生物可以在废物的分解和回收、形成月球风化

层中的必需元素以及稳定生态生保系统中的生态平衡方面发挥重要作用。

瓦梅林克<sup>[17]</sup>等人在模拟月壤中种植的水芹、萝卜和黑麦的种子，以切碎的新鲜的黑麦叶子作为有机质改良土壤，结果表明，黑麦和萝卜的种子的发芽率与地球土壤对照组相差不大，但总生物量仍显着低于地球土壤，表明植物残留物在一定程度上改善了月球土壤的生物利用率。瓦梅林克等人<sup>[18]</sup>又将模拟月壤与受控生态生保系统中产生的有机废物（由植物残留物、人类粪便和微生物组成）混合共发酵，以提高生物利用率。结果表明，从栽培小麦的幼苗长度来看，有机废物显著提高了模拟月壤的生物利用率。

乌克兰科学院分子遗传与发育生物学研究所利用主要成分为斜长石（anorthosite）的模拟月壤培养法国万寿菊<sup>[19]</sup>，结果植物长得很差，表明斜长石可以直接提供给万寿菊的营养很少，然而，在斜长石上接种芽孢杆菌 IMBG156 后，植物受益于细菌活性，刺激万寿菊种子萌发、植物发育良好，并最终导致接种的万寿菊开花。结果证明了类芽孢杆菌 IMBG156 能够从基底斜长岩中释放一些元素并在生长限制条件下，支持植物的生长和发育，见图 1。科宁斯等人<sup>[20]</sup>在模拟月壤中种植了仙人掌种子，并在其中添加了绿色木霉菌，结果表明，添加了微生物的模拟月壤中种子萌发率显著提高，表明该真菌提高了月球土壤的生物利用率。



图 1 利用模拟月壤种植万寿菊

在未来月球基地建设过程中，微生物承担着重要的功能。首批引进的微生物必须是一些包括藻类在内的光能自养生物，但相关的研究较少。中国航天员科研训练中心利用 CAS-1 模拟月壤进行了蓝细菌生长实验<sup>[1]</sup>，发现蓝细菌在模拟月壤上可以正常生长，表明模拟月壤对地球生物没有明显的毒性作用。武汉水生所研究人员在利用荒漠藻改造我国北

方大片荒漠化土地的研究成果基础上，提出拟以藻类构建陆生微生态系统改造外星球土壤和控制沙尘的理念，结果发表在 *Astrobiology* 杂志上，受到国内外的广泛关注，相关报道得到新华社中英文发布，取得很好的社会影响。目前来看，在月壤中添加有益微生物相关的太空农业研究较少，因此在本主题的科学探究仍有较大的挖掘空间。

#### 4 月壤改良的实施挑战与解决方案

月壤与地球上的土壤存在显著差异，因此，改良月壤使其能够种植植物是一个艰难且具有挑战性的任务。月壤的特点在于其主要由粉尘、砂级碎屑和碎石构成，缺乏有机质，因此缺少土壤的保水性、透气性，也缺少植物可吸收形态的矿物元素等，并且粗糙尖锐的月壤颗粒容易影响植物根部生长<sup>[21-22]</sup>。简而言之，月壤缺乏“壤性”，这是改良的主要难点。参考土壤改良的一些方法，针对月壤改良的初步探讨：

##### (1) 增加有机质

月壤中缺乏有机质，因此可以通过添加有机肥（粪便、秸秆等）来培养壤性<sup>[23]</sup>，亦可同时利用微生物风化作用溶解一些矿物质供植物利用，可以改善土壤结构，也能增强土壤保水保肥能力。

引入有机肥：在未来初步月球探索或月球温室中，可以考虑携带一定量的有机肥到月球，并直接将其混合到月壤中。或通过原位资源利用技术直接利用月球资源制备有机物质，研究月球上可能存在的有机物质来源，如月岩中的碳化化合物，并尝试通过化学反应或生物反应过程将其转化为可利用的有机物质。考虑到月球的极端环境，这种方法可能需要特殊的设备和工艺。

引入微生物：通过前期试验，引入一些能够在极端环境下生存的地球微生物，并尝试在月球上培养并利用它们，这些微生物可以通过分解月球上的无机物质来产生有机物质，同时改善月壤的结构和肥力。

利用植物残体：在月球温室内存种植一些适应性强的先锋植物，如藻类、苔藓等，并收获利用它们的残体。这些植物残体可以经过简单处理后作为有机肥料直接添加到月壤中，同时它们的根系还可以帮助改善月壤的结构。

月球的环境极端恶劣，如昼夜温差大、高辐射等。因此，在选择和使用上述方法时，需要充分考虑其对月球环境的适应性。考虑到月球探索或建立月球基地的成本高昂，需要评估上述方法的成本效益，并选择最具经济性和可行性的方

案。月球是一个封闭的环境系统，任何对月壤的改良都可能对其长期稳定性和生态系统产生深远影响。因此，需要深入研究这些方法的长期影响，并制定相应的监管和管理措施。

### (2) 改善月壤结构

通过添加适量的沙土或其他透气性材料，可以改善月壤的透气性和排水性能，为植物根系提供更好的生长环境。还可以考虑使用土壤改良剂来疏松土壤，改善土壤团粒结构。天津大学发现了一种月壤改良剂，改良剂成分为淀粉、凹凸棒和造纸、木材水解工业中产生废弃物磺甲基化木质素为原料，采用接枝共聚的方法制备出月壤改良材料，提高了模拟月壤缺少的有机质，还能改善月壤团聚体结构及孔隙度等指标，改良后的月壤具有丰富的有机质和微量元素，支持微生物共生，还能够保证月壤中的水分和疏松的结构，为植物生长提供条件<sup>[24]</sup>。

### (3) 提供水分与养分

月壤中缺乏可供植物直接利用的水分和养分，月壤矿物中的含水量仅在 0.0001% ~ 0.02% 之间，含量极其稀少，难以在月球原位提取利用，因此需要建立有效的灌溉系统来提供植物必要的水分。宁波材料所、航天五院钱学森实验室、松山湖材料实验室、哈尔滨工业大学和南京大学合作发现，月壤矿物由于太阳风亿万年的辐照储存了大量氢。在加热至高温后，氢将与矿物中的铁氧化物发生氧化还原反应，生成单质铁和大量水。研究团队确认 1 克月壤中大约可以产生 51 ~ 76 毫克水（即 5.1% ~ 7.6%）<sup>[25]</sup>。未来配合月球水资源及其开采策略的课题，有望解决植物在月壤中缺乏水分生存的难题。

## 5 展望

进入 21 世纪以来，航天进入到“大航天时代”的历史机遇期，月球将由探测勘察进入到开发利用的阶段。月球资源的开发利用在研究总体上处于起步阶段，属于国际新兴领域，也是一个多学科交错的研发应用平台，迫切需要各学科领域的科研人才共同努力，加强基础研究与原始创新。

月球资源开发是探测火星乃至太阳系的关键一步。植物作为生命科学和空间受控生态生保系统中的关键组成部分，利用月壤完成植物栽培有助于推动理解陆地生物学对空间探索环境的生理适应，有助于了解月壤作为地外生境植物生长基质的初步评价，并有助于扩大未来在月球基地生命支持场景中植物的选择方向。本文系统地概述了国内外研究

机构在月壤、月壤改良在植物培养方面的研究情况，厘清了近年来利用月壤完成植物栽培研究的相关进展，当前的研究结果证明了在月球生态生保系统中，原位利用月壤来种植植物是可行的，结合微生物的作用可以帮助植物从低生物利用率的基质中受益，促进植物适应月球温室的极端条件。目前的实验条件，更多的聚焦于利用模拟月壤完成植物栽培的条件探索，忽略了对于月球恶劣环境的把控。未来关于月球栽培植物的实验，将随着科技水平的提升，更多的利用真实的月壤进行试验，且会更全面的考虑植物栽培过程中不可忽略的月球环境因素。综上所述，改良月壤是一个复杂且具有挑战性的任务，需要综合考虑多种因素和方法，并不断探索和创新。随着科技的不断进步和人类对月球认知的深入，相信未来会有更多有效的改良方法被提出和应用。

### 参考文献：

- [1] 秦利锋, 艾为党, 唐永康, 等. 模拟月壤对蓝细菌生长特性的影响[J]. 载人航天, 2014, 20(6): 7.
- [2] Mitchell C A. Bioregenerative life-support systems[J]. The American journal of clinical nutrition, 1994, 60(5): 820S-824S.
- [3] Hendrickx L, Wever H D, Hermans V, et al. Microbial ecology of the closed artificial ecosystem MELiSSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative): Reinventing and compartmentalizing the Earth's food and oxygen regeneration system for long-haul space exploration missions[J]. Research in Microbiology, 2006, 157(1): 77-86.
- [4] Wang G, Chen H, Li G, et al. Population growth and physiological characteristics of microalgae in a miniaturized bioreactor during space flight[J]. Acta Astronautica, 2006, 58(5): 264-269.
- [5] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 中国宇航出版社, 2005.
- [6] Basu A, Riegsecker S E. Reliability of Calculating Average Soil Composition of Apollo Landing Sites[C]. New Views of the Moon: Integrated Remotely Sensed, Geophysical, and Sample Datasets. 20, 1998.
- [7] McKay D S, Heiken G, Basu A, et al. The Lunar Regolith[J]. Lunar Sourcebook, A User's Guide to the Moon, 1991: 285-356.

- [8] 陈意, 王则灵, 原江燕, 等. 阿波罗月壤样品 (E21) 岩石学研究及溯源 [J]. 岩石学报, 2022 (006): 038.
- [9] 谷渊涛, 杨瑞洪, 耿焕, 等. 月壤样品研究进展 [J]. 科学通报, 2022, 67 (14): 18.
- [10] Guo J-g, T Ying, H Gao, X Chen, et al. Surface microstructures of lunar soil returned by Chang'e-5 mission reveal an intermediate stage in space weathering process. *Science Bulletin*, 2022, 67 (16): 1696-1701.
- [11] Paul A L, Elardo S M, Ferl R. Plants grown in Apollo lunar regolith present stress-associated transcriptomes that inform prospects for lunar exploration[J]. *Communications Biology*, 2022, 5 (382): 1-10.
- [12] 郑永春, 王世杰, 冯俊明, 等. CAS-1 模拟月壤 [J]. 矿物学报, 2007, 27 (3): 571-578.
- [13] Marche C Q, Curtis J S, Metzger P T. Permeability of JSC-1A: a lunar soil stimulant[J]. *Icarus: International Journal of Solar Studies*, 2011, 212 (1): 383-389.
- [14] Hill E, Mellin M J, Deane B, et al. Apollo sample 70051 and high- and low-Ti lunar soil simulants MLS-1A and JSC-1A: implications for future lunar exploration[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112 (e2): 1-11.
- [15] Uesugi K, Tsuchiyama A, Nakano T, et al. 3D shape characterization and image-based DEM simulation of the lunar soil simulant FJS-1[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2009, 22 (1): 15-23.
- [16] Brunskill C, Lappas V. The effect of relative soil density on microrover trafficability under low ground pressure conditions[C]. 11th European Regional Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems. Bremen, Germany, 2009: 331-341.
- [17] Wamelink G W W, Frissel J Y, Krijnen W H J, et al. Crop growth and viability of seeds on Mars and Moon soil simulants[J]. *Open Agriculture*, 2019, 4: 509-516.
- [18] Wamelink G W, Frissel J Y, Krijnen W H, et al. Can Plants Grow on Mars and the Moon: A Growth Experiment on Mars and Moon Soil Simulants[J]. *Plos One*, 2014, 9 (8): 19-24.
- [19] Lytvynenko T, Zaetz I, Voznyuk T, et al. A rationally assembled microbial community for growing *Tagetes patula* L. in a lunar greenhouse[J]. *Research in Microbiology*, 2006, 157 (1): 87-92.
- [20] Konings-Dudin G, Butcher M, Castor-Macias J A, et al. Endomycorrhizal Fungi and *Opuntia ficus-indica* Seed Germination on a Lunar Regolith Simulant[J]. *Advances in Microbiology*, 2014, 4 (10): 616-626.
- [21] Setiawan G D, Treesubuntorn C, Krobthong S, et al. Using multi-omics approach to investigate the effect of a moon soil simulant on *Vigna radiata* seedling root and shoot growth, stress responses, and photosynthesis[J]. *Acta astronautica*, 2023, 550-563.
- [22] Yao Z, et al. Bioweathering improvement of lunar soil simulant improves the cultivated wheat's seedling length. *Acta Astronaut*. 2022b, 193:1-8.
- [23] Wamelink G W W, Frissel J Y, Krijnen W H J, et al. Crop growth and viability of seeds on Mars and Moon soil simulants[J]. *Open Agriculture*, 2019, 4(1):509-516.
- [24] 丁辉, 赵瑞, 赵梓舒, 等. 一种月壤改良剂的制备方法和应用:CN202111521986.3[P].
- [25] Xiao Chen, Shiyu Yang, Guoxin Chen et al. Massive Water Production from Lunar Ilmenite through Reaction with Endogenous Hydrogen. *The Innovation*, 2024, 5(5):1-7.

#### 作者简介:

王思涵(1995—), 19女, 蒙古族, 黑龙江省哈尔滨市人, 硕士研究生, 就职于航天神舟生物科技集团有限公司, 工程师, 研究方向: 空间植物培养, 空间植物诱变选育。