

用于太空探索的微生物生物制造

中国科学院上海营养与健康研究所
上海生命科学信息中心
上海市生物工程学会
2023年7月

用于可持续太空探索的微生物生物制造

编者按:寻找可持续的方法以实现地球资源的独立对未来的空间探索至关重要。这不仅与建立可行的空间探索方案有关,而且与空间废物产生和地外环境保护相关。随着人们对太空探索的兴趣不断增强,任务设计和规划的连贯性和现代化的战略变得越来越重要。生物技术凭借其有效利用原位资源和从废物流中回收资源的能力,已经成为提高恢复力、灵活性和效率的一种很有前途的方法。美国和英国的研究人员 2023 年 3-4 月发表的系列综述文章,提出了利用微生物进行可持续空间探索的路线图,梳理了月球和火星上的 4 个主要任务级别,它们推动了阶段性的生物制造战略。这些技术的进步可能会对地球上建立弹性的循环生物经济产生深远影响。

生物技术作为支持人类太空探索的关键是利用当地现有资源的效率(原位资源利用)(In-situ Resource Utilization, ISRU)和利用其他任务产生的废物流和回收其自身产品的能力(闭环, LC)。随着任务的扩大,原位(生物)制造(ISM/bio-ISM)的逐步推进和更广泛实施将带来更大的独立性,使更复杂的任务设计具有扩展的可能,并最终使人类可能实现在整个太阳系中的自给自足。生物制造适合这一目的,因为高容量资源,如固定碳和氮(以及低容量但关键的资源,如矿物),可以在类似于地球生物、地球化学循环的自主系统中进行生产和回收。生物化学还提供了大量的有机化合物,通常具有无与伦比的纯度和选择性,其中许多是无法通过其他方式获得的。因此,研究人员基于地球上目前实施不同技术储备水平(TRL)的过程和技术,提出利用微生物生物制造进行可持续空间探索的路线图。

同时,微生物生物制造有望为偏远或艰苦地区的提供综合解决方案,尤其是在消耗品和耐用品供应链无法可靠运输的地区。太空生物制造对应任何可部署的系统,该系统利用生物学作为主要驱动因素,生成复杂的关键任务清单项目,例如,食品、药品和材料配方成分的从头合成。当这些项目有效集成到任务架构中时,生物基流程就可以通过提高自主性、可持续性和弹性来显著降低载人操作的风险,从而释放有效载荷能力。

1. 可持续太空探索的微生物生物技术

1.1 栖息地空气的生物修复

航天器的环境控制和生命支持系统 (ECLSS) 可以用于管理供水、大气压力和大气成分 (O_2 、 CO_2 和惰性气体)、温度和相对湿度等, 便于人类操作并提供较为舒适的生活环境。国际空间站 (ISS) 上的 CO_2 目前是从机舱空气中清除, 通过萨巴捷反应转化并回收氧气, 同时产生副产品 (甲烷) 排放到太空中。这种方式有两个缺点: 需要氢作为底物, 且需要大量能量; 氢和碳会流失, 需不断补给。如果将 CO_2 或甲烷回收到有机物中就可改善闭环并保护资源。微生物生物修复可以支持从栖息地大气中去除 CO_2 , 同时还可以补充氧气。捕获的碳可以再次循环利用并重新整合到资源循环中, 例如, 用于食品/补充剂的生物制造或被隔离用于最终用途 (图 1), 例如, 用于生物混凝土的生产或微生物电解碳捕获, 直接从空气捕获中 CO_2 可以减少对能源密集型辅助过程的需求并缩短回收循环过程。

1.2 人类废物处理和回收

人类废物的管理是太空探索面临的重要挑战。解决方案通常集中在如何处理人类废物, 例如压实、消毒和处置, 而不是回收利用。在国际空间站上, 人类排泄物被稳定干燥后排出, 在地球大气层中燃烧, 但这种处理方法并不适用于长时间的太空任务。实际上, 人类固体废物可以用于生产食品和膳食补充剂, 或作为微生物或植物生命支持系统 (LSS) 组件的营养素和肥料 (图 1)。为解决这一问题, 研究人员提出了许多物理化学方法, 例如热解或焚烧, 但微生物或可成为更好的解决方案。例如, 欧洲航天局 (ESA) 支持的 MELiSSA 项目 (微生态生命支持系统替代方案), 包含一系列互连的用于 LSS 的生物反应器, 可以利用微生物对各种类型的废物流进行升级再循环, 其中包括人类代谢终产物。

1.3 食品生产

进行长期太空任务时, 能够自给自足地生产食物是至关重要的, 也是实现任务可持续性的关键。微生物生物技术可能会显著提高空间食品生产的能力。例如, 植物微生物组在空间作物的生产中发挥着至关重要的作用。与植物相关的微生物群落为宿主提供了多种益处, 例如促进植物生长、刺激植物激素产生、控制病原体、调节免疫功能以及减轻非生物和生物压力。此外, 共生菌对于溶解环境中的

营养物质并将其转化为生物可利用的形式，以及改善土壤肥力也是必不可少的。例如，用于食品生产的氮气可以通过微生物介导的大气固氮来完成。这些技术的应用可以提高空间食品生产的效率和可持续性，使得长期空间任务成为可能。

为了在月球或火星上成功建立人类前哨基地，必须利用当地（原位）资源生产食物，如风化层。农业方法可能包括基于土壤的耕作、水培法、细胞农业等。以国际空间站的高级植物栖息地为例，创建一个类似温室的基础设施，提供足够的光照、供水、土壤养分和作物生长的其他必要参数以增强闭环系统。这些资源和其他必需品可以从其他（生物支持的）LSS 和 ISRU 舱室中获取（图 1）

1.4 药物合成

在人类探索月球或火星的背景下，拥有太空制药厂，则可以减少对地球药品供应的依赖，并提供按需制造的药品。许多随身携带的药品在往返火星任务中会过期，或者由于暴露在太空环境中而降低效力。太空环境还会改变药品的活性成分，增加降解剂或杂质的浓度。在太空中制造药品可以提高药品的稳定性和有效性，为探索深空提供更好的医疗保障。

长期以来，地球上的微生物一直被用于生产药品和高价值化学品。考虑到空间环境的极端条件和有限资源，孢子形成的细菌（可以抵抗辐射和/或干燥）、嗜极生物（可以抵抗恶劣环境）以及光自养生物（靠无机碳生存，例如蓝细菌）已被送入太空，研究它们在生物制造方面的应用潜力。需要深入研究微生物在太空中的生物制造能力和相应的加工技术，以便更好地利用它们来生产药品和化学品，满足在太空中长期任务的需求。

1.5 生物采矿

生物采矿是利用微生物从粗矿（例如风化层）和矿山废物中提取有价值的金属，以适应空间应用。化学自养菌（例如，铁和/或硫氧化微生物）可能适合在如火星或小行星等出现硫化物矿物的各种环境中进行生物采矿。具有其他营养偏好的微生物（如有机营养体）、联合体或生物工程技术可用于其他地方：月球表面主要由含饱和二氧化硅的岩石组成，硫含量普遍较低。对有机营养物有一定的需求，喂养有机微生物受到空间环境中碳供应的限制，但至少可以在一个闭环系统中得到部分满足（图 1）。关于在月球和火星条件下进行生物开采的能力和知识是稀缺的，或者说都是理论上的。在空间条件下提高地外风化层的生物浸出能力，

以及发展生物工程和合成生物学方法，对于技术的成熟至关重要。

从长远来看，探矿本质上是不可持续的，因为资源（即矿石，在采矿的情况下）不可避免地被耗尽，但生物采矿通常被认为比传统采矿更环保，这对地外应用很重要。有人提出，生物采矿反应器可以被添加到生物再生的 LSS 中，从而有助于闭环和 ISRU（图 1）。因此，在太空探索任务中，生物采矿可以成为一种可行的资源获取方法，特别是在资源匮乏和成本高昂的环境下。

1.6 结构生物制造：生物混凝土、真菌建筑

考虑到资源的稀缺，建造和维护地球以外的基础设施是一项必要且艰巨的任务。传统的建筑方法要使用大量的原材料，并且需要稳定的维护。为了使基础设施的建设和维护更具可持续性，优先选择修复而非更换，生物自愈合材料或可满足这一需求。以真菌为基础的生物技术为生产坚固耐用的结构提供了可能。真菌菌丝体可以形成密集的网络，与其它材料（如风化层）结合，形成基于菌丝体的复合物。美国航空航天局（NASA）利用菌丝体在火星和月球表面建造坚固的家具和栖息地的外墙，为太空探索提供了相关解决方案，但空间应用研究仍处于起步阶段。

1.7 能量的生物收集和储存

能源的收集和储存（如燃料）在任何偏远环境中都面临关键的挑战，尤其依赖供应链的一致性。某些厌氧细菌（如脱硫菌、土细菌等“电原体”）可以利用有机废物产生电流。微生物燃料电池（MFC）利用微生物将化学结合的能量转化为电能。微生物电合成（MES）可用于将电（回）转化为化合物，例如，能源储存。氢和甲烷也可以从其他原位资源获得，如水和无机碳，通过光合作用或光自养（如蓝藻和各种藻类）生产，产生稳定的能源载体。在许多情况下，利用电、氢、甲烷和生物燃料生产的微生物，废品和原位资源可以被升级改造，用于转换、收集和储存能源，与传统的机械-化学方法相比，产量更高，投入更少。

1.8 回收电子产品、塑料和其他废物流

目前，开发的高效封闭系统大多集中在生物废物的回收和升级利用上，而尚未探索过合成废物（如电子废物、塑料、消费品）的解决方案。有价值的金属（铁、铜、稀土元素、铝、硅、锌），包括贵金属（金、铂和铂族元素），以及某些非金属（氯、磷、氮、氧）都可以用生物学方法从金属结构和电子装置中回收得到。

从电子废物（如计算机部件、配电盘、太阳能电池板）中回收金属可以减少对补给的需求。虽然物理化学过程也可用于回收，但从成本和能源需求角度，生物浸出技术被认为是更环保和可持续的。

具有高强度和耐久性的塑料作为航天器和宇航服的组成部分，在太空活动中发挥着关键作用。大多数塑料是由来自不可再生的化石燃料中的有机聚合物组成。在太空这样没有化石燃料的环境中，塑料的回收和升级循环将非常重要。已经有研究证明，微生物可以将微塑料分解成可代谢的化合物，这个过程被称为生物降解。研究人员正在探索这些微生物过程是否也可以用于太空中的废物回收。合成生物学方法可用于规划适合地外环境的微生物途径/功能，并将塑料作为原料进行升级回收，产生有用的分子。与微生物塑料生物降解相辅相成的是塑料的微生物生产，例如生物塑料。某些微生物可以使用各种原料，包括二氧化碳、甲烷或废弃生物质，以生产生物塑料，例如聚羟基烷烃。这些工艺将通过闭环的方式提高可持续性，生物塑料比基于化石燃料的聚合物更容易被生物降解。

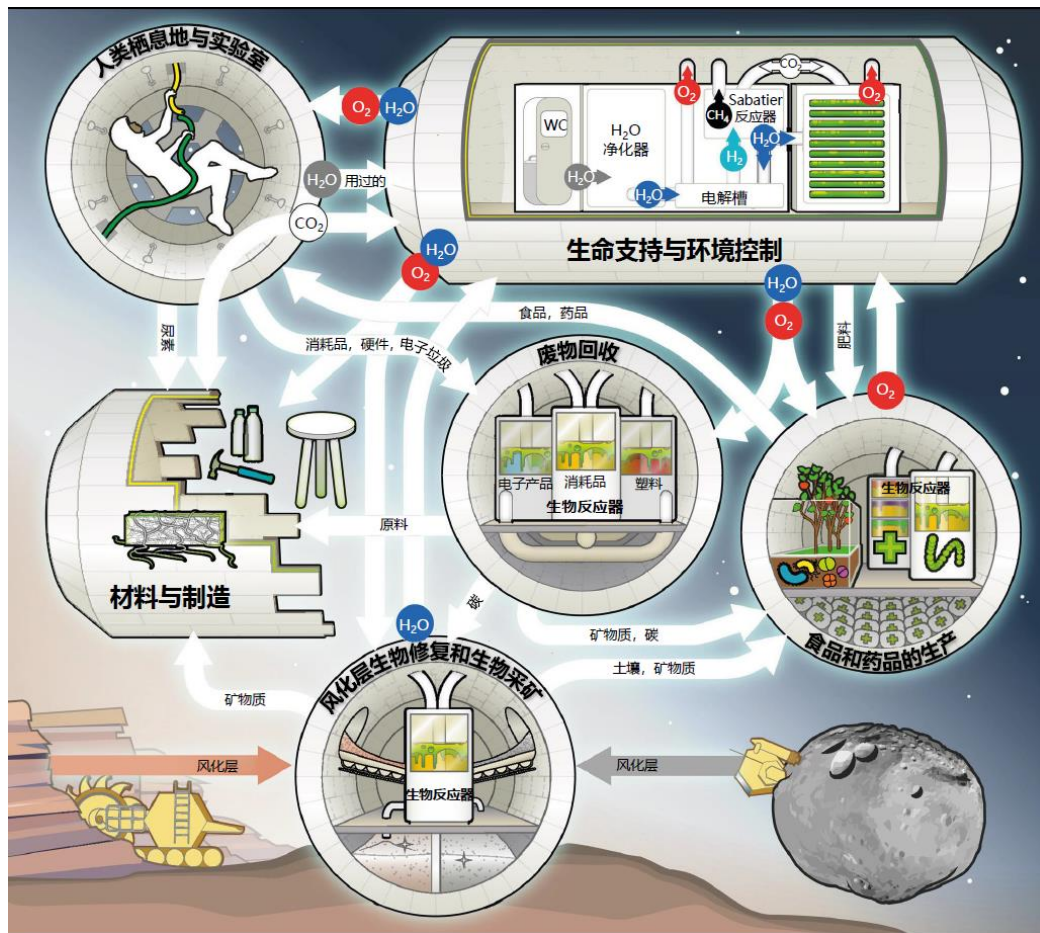


图 1 不可知空间环境中基于微生物生物技术的生命支持系统的示意图

图注：微生物包含在所有功能隔间中，包括“人类栖息地和实验室”（即人类微生物组）和那些也需要机械化学反应器的微生物。不同资源流循环利用和闭环用白色箭头表示，并辅以原位资源利用（彩色箭头）。

1.9 土壤修复

重金属和有毒化合物，例如高氯酸盐，可以从月球和火星的岩石中去除，使其能够用于土壤形成或食品生产。微生物可以结合月球和火星岩石中的特定元素，加上对有毒元素和化合物的清除（生物修复），可以提高作为植物生长基质的岩石的质量，从而极大地减少基于植物的 LSS 持续运行所需的资源。这种循环方法能够生产出维持人类在地外生活所需的食物，并将需要从地球上运输的资源降至最低。目前对这些过程在太空环境中的适用性的了解还很有限，因此，更好地解析生物修复的机制、微生物在太空环境中的行为，以及它们对土壤形成的潜力很有必要。

2. 技术需求和未来研究

上述讨论的大多数应用都需要为微生物及其支持或实现的功能提供一个受控的环境作为技术标准。微生物过程取决于许多因素，例如温度、压力、氧气供应（或缺乏）、pH 值、重力和辐射条件等。这些因素决定了以下两个方面的技术发展：（1）对生物反应器的技术需求，为特定过程提供适当的环境；（2）需要研究和了解太空环境对这些过程的影响，以确定在最大限度地减少资源、工程和操作要求的情况下实现产量最大化的方法。

从技术角度看，开发适用于太空的生物反应器是最重要的。这些反应器可能需要针对它们所支持的应用而专门设计，尽管它们之间预计会有一些共同点，包括：（1）提供并维持一个受控的环境（包括温度、压力、液体/气体成分）；（2）能够收集工程系统以及其中的微生物的生存能力和性能方面的数据（包括散装介质和气体的化学和物理状态）；（3）存在提供前体、接收产品以及连接下游处理设备的接口；（4）能够按需收集样品；（5）能够自主操作，至少是部分操作；（6）适当的封闭程度，以遵守行星保护准则。对于未来火星定居点来说，特别需要注意封闭程度。

因此，文章总结了这些技术与应用涉及的生物技术的当前技术准备水平（TRL）（图 2），同时，基于这些探讨提出了未来更加开放的研究问题：（1）

微生物技术如何提高长期深空探测任务和定居点、废物回收的可持续性，同时保护地外环境？（2）如何在遵守行星保护准则的同时进行这些过程？（3）对于每一种应用，需要哪些技术监测过程的效率？（4）在相关的重力和辐射环境中，什么样的微生物（包括转基因）和培养条件可以优化该过程？（5）实施该过程所适用的生物反应器、操作流程和基础设施的要求是什么？（6）如何从这些过程中收集、提取和精制获得组分及最终产品？

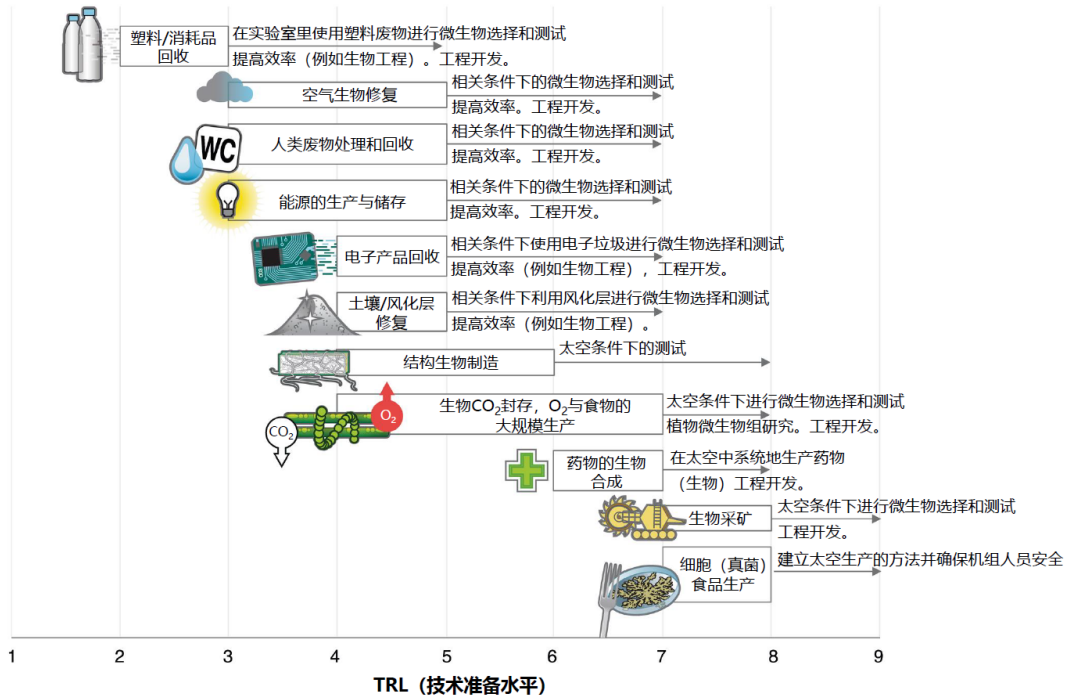


图 2 所考虑的生物技术的当前技术准备水平（TRL）的示意图

图注：箭头表示推进每种技术的 TRL 所需的特定研究和开发。TRL 的定义参考 NASA。

3. 太空生物制造方法

人类越深入太空，支持太空探索的生物驱动原位制造（ISM）就越重要：随着人类旅行的距离越远，供应链的支持变得越来越具挑战性，ISM 在资源可用、可获取和丰富的地方最为可行，例如如月球和火星（图 3b）。ISM 的生物和非生物方法的优缺点已经讨论过多次，特别是生命支持以及将人类活动扩展到地球轨道以外的辅助功能方面，但在尚未在即将到来的活动中制定基于生物制造系统的可操作路线图。需要讨论生物驱动的 ISRU 和闭环系统（LC）在不同任务类别背景下的适用性，并进行定性的技术经济分析（TEA），列出太空旅行不同任务设计场景的清单，进而为生物技术的部署和任务架构的制定做好准备，以实现载人

深空任务下一阶段的路线图。

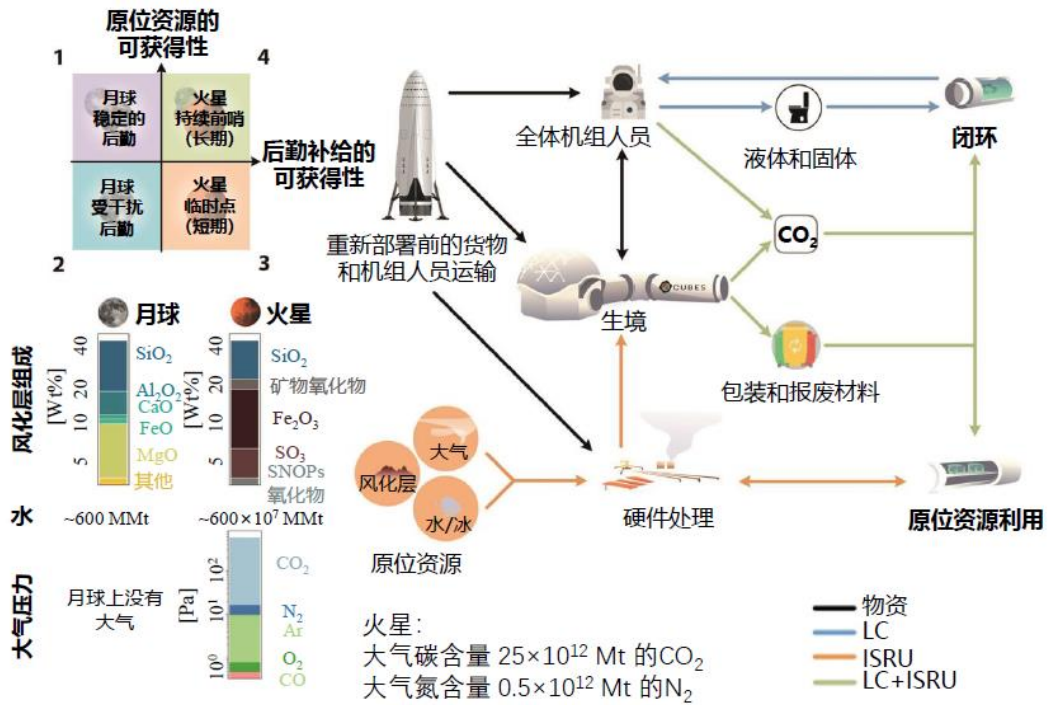


图 3 不同太空任务级别的原位生物制造 (bio-ISM) 方法

图注: (a) 中定义了针对特定情况的 1 级至 4 级太空任务, 绘制为定性谱象限, 用于提供现场资源和后勤补给。(b) 中, 以气体和固体的形式比较了月球和火星最普遍的表面可获得的原位资源, 这些资源被分解成分子 (SNOP: 硫、氮、氧、磷)。请注意, SNOP 和矿物氧化物不包括其他列出的化合物。成分和数量 (如有) 是基于当前知识的粗略估计。MMt: 百万公吨。(c) 中概述的生物制造操作概念 (CONOPS) 是针对操作模式进行了颜色编码: 从初始货物 (黑线) 出发, CONOPS 可以依靠闭环 (LC, 蓝线), 原位资源利用 (ISRU, 橙线) 或两者 (LC+ISRU, 绿线) 兼有。

3.1 操作概念: 原位生物制造模式

鉴于生物制造特别适合在食品、治疗和材料等特定领域发挥重要作用, 实现其潜力的关键挑战在于可移动原料的可用性和丰富性, 通过物流补给 (直接或从任务产品的再循环和升级循环中获得) 提供或从原位资源中获得。由于这种丰富度取决于任务目的地, 因此, 对太空任务等级进行了定性区分 (图 3a)。月球和火星上可用的原位资源如图 3b, 这有助于比较任务概况以及生物制造在多大程度上可以推动这些任务。对于每个任务等级, 不同的操作概念 (CONOPS) 都适用。这些操作概念符合特定的库存 (inventory) 需求, 因为它们与任务和机组人员需求有关, 同时也取决于 ISM 的可用资源。环境背景为 ISM 的原料和加工管

道 (LC 或 ISRU) 的规范提供了依据 (图 3c)。

每个任务等级都包括一组独特的库存物品,可能包括作为部署前货物或与机组人员一起运输的基础设施组件(例如,生境组件和家具、功能硬件/设备,以及科学设备和工具)。这些组件用于组装更大的综合居住地和生命支持系统,以及与任务目标相关、基于(生物)ISM 的 LC 或 ISRU 系统和基础设施。尽管所有这些太空任务级别在操作方面都有所不同,但它们可以作为示例,用以更好地理解生物制造策略与可能提供资源、机组人员数量/需求和后勤限制的任务特定因素的关系。

3.2 实施依赖于生物 ISM 的太空任务

一级(月球,稳定后勤)考虑类似阿尔忒弥斯的月球操作,特别是针对科学和技术探索范围较窄的少数宇航员的短期停留任务。由于时间短,后勤便捷,机组人员对食物、药品和材料的需求可以通过随身携带和从地球上补给来满足,而不是依赖生物制造等更复杂、风险更大和耗时的技术。此外,月球上缺乏原位资源(图 3b),生物制造的规模将受到供应链以及回收和 LC 能力的限制。然而,由于环境得到了很好的支持,它是证明和改进太空生物制造技术的一个理想地点,可以用来测试不同生物工艺类型的关键生物反应器系统的自动化和规模化操作(例如,用于大量营养素的岩石自养和/或腐养发酵的电和光自养(气体)生物反应器),所有这些在低重力、高压力的环境中都可能面临生理和操作方面的挑战。为此,非常适合实施和评估达到技术准备水平 5 (TRL 5) 的系统。虽然这些系统目前孤立存在或部分集成在实验室和工业环境中,但构建自动化的端到端的紧凑系统(超过 TRL 7)将是一级的关键要求,从而有意义地扩展到未来更受约束的任务架构中。

二级(月球,后勤中断)考虑了在月球上部署广泛的基础设施时先进的月球操作能力。为了增加补给之间的操作时间(并防止意外中断),增加储存设施,生物制造变得更有吸引力。鉴于月球上原料匮乏(碳和氮等生物 ISM 所需的核心理资源几乎不存在,水的可及性很差,分布也很不均匀),必须通过 LC 的工程化改造,对储存的物资进行高效利用,并对其他可用的任务产品和废物流进行高效回收。可生物降解塑料等包装材料的衍生化,以及黑水和灰水的最小处理系统,可以在供应链出现计划内或计划外中断的情况下,大幅增加预期原料,并延长生

物制造系统的运行时间。在极端条件下,能够使生物制造从复杂的蔬菜食品转变为更快、资源密集度更低的简单细胞食品生产,这对于降低风险至关重要。这些挑战需要在生物体内新的替代原料工程方面进行创新;共同设计用于生物消耗的任务材料;开发基本的废物处理系统;以及灵活的、可重新配置的生产基础设施,以应对不断变化的资源条件。适用技术包括在相关环境中进行测试的系统,并在一级操作中达到 TRL 7 以上,这些系统已准备好在任务架构中实施。

三级(火星,基本后勤)考虑了部署在火星上的基本生物制造系统,由于行星际距离的增加,后勤补给不足,但与月球相比,其原位资源的可用性更高。虽然任务设计的特点仍然是往返的小型机组人员,但资源限制带来了不同的影响。考虑到所涉及的未知因素的范围和程度,这些任务的理想设计是为各种突发事件做好准备,最大限度地提高安全性和稳定性。由于火星偏远,提供这些冗余就极具挑战性。因此,有意义的生物 ISM 是必要的,在一级和二级发展的支持下,将系统大幅扩展到 TRL 8-9。虽然部分食物、治疗剂和材料仍将来自运输,但除 LC 外,还必须实施风化层、水和大气 ISRU,以确保任务的灵活性和弹性。对食物来说,营养完整和适口性,以及质地、风味和定制形式将至关重要。为了实现任务操作的最大保真度,已经提出了一系列热塑性多用途材料,用于制造食品加工设备、外科和医疗用品、辐射屏蔽和生境组件。相关使能技术包括:大规模模块化发酵和生物工艺,优化的基因工程微生物菌株以有效生产中间体(即成分、制剂、粗聚合物),组装最终产品(即膳食、药物、制成品)的配方/加工系统。操作自动化成为库存项目日益多样化的背景。

四级(火星,发达的后勤)设想了一个成熟和综合的生物铸造厂,通过星际网络和深空前哨基地以及广泛的 ISRU 和 LC,实现必要的后勤补给。具体而言,这个级别将需要人类在火星上的持续行动,即将永久定居。这种任务设计必须部署的广泛基础设施能够生产完整多样的食品,包括各种形式和营养、全面的治疗方法、不同的散装材料和特种材料(塑料、金属、复合材料),这些材料不仅可以半自主或完全自主地方式维护基础设施,还可以扩展基础设施。需要充分开发和成熟的生物制造技术和辅助基础设施,以便随时部署定制的微生物细胞工厂,这些工厂可以进行按需设计生产。为此,在任务架构中容纳甚至需要将“空间生物基础设施”(即用于生物系统工程化改造和分析的自动化基础设施)也纳入其

中。最终,除了食品、治疗剂和材料的总库存外,还需要特种化学品和试剂的 ISM,例如用于 DNA 合成的磷酸胺,从而支持现场生物工程。

综上所述,根据太空任务级别,生物制造可以进行测试和开发(1级),也可以用作任务支持工具(2-4级)。然而,在任务架构中实施生物制造的计划付诸实施前,需要进行全面分析,比较有生物制造和没有生物制造的不同任务设计场景之间的平衡。

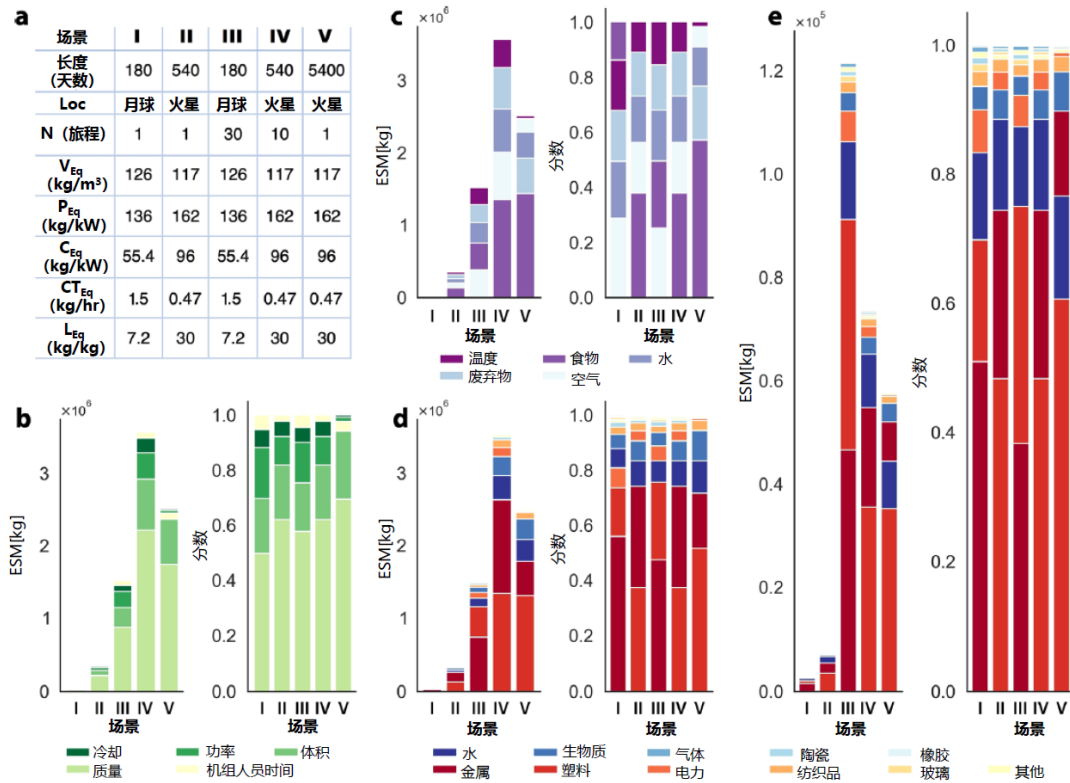


图 4 按系统类型及其组成将环境控制和生命支持系统分解为组件

图注: 库存 (inventory) 的构成以及由此产生的运营费用取决于任务设计方案。(a) 概述了 5 种示例性太空旅行场景的参数: I 和 II 分别对应使用标准地面作业持续时间前往月球和火星的单次 (N), 而 III、IV 与 V 对应全地面作业的多次/单次活动。基于这些参数和体积 (V_{eq})、功率 (P_{eq})、冷却 (C_{eq})、机组人员时间 (CT_{eq}) 和位置 (L_{eq}) 的等效系数, 可以为每个场景计算等效系统质量 (ESM)。(b)-(e) 根据对总 ESM 有贡献的费用类型 (b)、按相关资源分类的系统组件类型 (c) 以及库存项目的组成 (d 和 e), 进行库存明细的可视化。(b)-(d) 中的条形图显示了 ESM 单位的分解 (左侧, 质量[kg]) 和每个场景的分数分解 (右侧), 而 (e) 中显示了材料组成可视化方面的绝对值 (左侧, 质量[kg]) 和分数 (右侧)。有关 ESM 等效系统质量的更多信息, 请参见信息框 1。

信息框 1 任务架构的经济性、可行性和风险评估

在支持载人航天任务方面，太空生物制造系统需要证明其优于传统系统。为此，传统的任务设计必须与那些通过生物制造增强的任务设计直接具有可比性。等效系统质量 (ESM) 是一种更广泛使用的量化生命支持系统特定属性的指标。简言之，ESM 允许将质量、体积、功率和机组人员时间转换为一个单位为千克的单一度量，以预测作为费用代理的最大质量需求。ESM 已成为比较生物制造系统的标准指标，但它没有考虑风险、可持续性、可回收性、复杂性、模块性、可靠性、稳健性、弹性、准备就绪性、可扩展性或安全性等方面。

作为 ESM 的补充，人们开发了回报期 (PBT) 的概念来评估其中的一些标准。PBT 反映了成本、可回收性和经济可持续性等。PBT 在评估 ISRU 选项时很有意义，它可以将发射和部署 (生物) 制造能力的成本与一段时间内从地球持续补给的成本进行比较。在 PBT 中添加统计风险评估也有助于量化风险，保护稳健可靠的系统。例如，该概念可以确定登陆火星的统计风险，一方面是陆次数减少以降低风险，另一方面是携带 ISM 硬件的有效载荷损失比补给任务的失败更为关键。必须根据以前的任务、一般技术开发路线图和这些因素的预期学习率，仔细评估这些风险因素的统计值。通过这样可靠和可推广的分析，有助于对重要的生物制造方法进行有意义的评估。

3.3 太空任务场景和生物可用库存

用于 ISM 的 CONOPS，资源流和 LC 与 ISRU 的集成不仅因太空任务级别而异，也取决于任务设计场景。为了更定量地评估生物制造对任务设计的潜在影响，根据图 4a 建立了 5 种不同但可比较的场景。介绍的场景是以目的地 (月球或火星) 之间最大的可比性为目标设计的，因此与之前讨论的区分两个目的地技术水平开发的太空级别无关 (图 3)。任务设计场景 I 和 II 分别对应使用标准地面操作持续时间的、前往月球和火星的单次飞行。场景 III 到 V 将 5400 天的地面操作视为多次活动 (场景 III 和 IV) 或单次活动 (场景 V)。任务设计方案 I 和 III 可能对应 1 级 (或 2 级) 太空任务，而任务设计方案 II、IV 和 V 对应 3 级 (或 4 级) 任务。

通过美国国家航空航天局的“前沿生命支持规模分析工具” (ALSSAT)，对每个任务设计场景的货物库存 (环境控制和生命支持系统) 进行分析，并通过等效系统质量 (ESM) 进行比较。图 4 中的条形图通过 ESM 分解了运营费用，通过对总 ESM 的贡献 (2b 中的质量、功率、冷却、体积、机组人员时间)、按相关资源分类的系统组件类型 (2c 中的废物、食物、水、空气、热能)，以及每个场景库存项目的组成 (2d 中的结构金属、塑料、水、生物质、电力等) 进行分解。这一初步的 TEA 数据是对任务成本的初步估计，并为从货物资源的可用性

到有利于 ISM 的潜在库存项目之间建立关系提供了主要步骤，特别是通过生物制造的方式。

长时间和远距离旅行的实现需要具有最高水平的 ESM，而多次旅行比单次旅行更昂贵。同时，图 4b 显示，在所有情况下，主要费用（以 ESM 形式）将是质量本身，其次是体积。更重要的是，该分析深入了解了资源和库存差异，这将影响 ISM 在不同任务设计场景中的适用性：图 4c 显示，场景 I 和 III（月球）由空气系统主导（约 30%和 26%），而场景 II、IV 和 V（火星）由食物系统主导（约 38%、38%和 59%），这支持了图 1 中的生物制造模式分解。因此，估计约 12%-16%的总货物质量为水，相关系统占总 ESM 的约 15%-20%（图 4c）。因为在场景 I 和 II 中，水系统的质量贡献更高，所以任何采用的生物制造策略都应该针对 LC 进行水回收和再利用。在场景 I 和 III 中，空气供应和调节也是如此。在所有情况下，商品形式的最大支出（2d 和 2e）都与结构金属、塑料、水和生物量有关。最值得注意的是，图 4c 显示，每种情况下的质量和 ESM 都由金属和塑料组成的货物所主导。不幸的是，在可预见的未来，结构金属可能仍然不适合生物制造。太空探索的生物制造最常被认为是用于维持宇航员生存的食品生产或治疗药物。分析发现，材料最有可能通过 ISM 节省质量：在月球场景中，随着任务持续时间增加，塑料占总质量的比例从约 19%增加到约 37%；在火星场景中，塑料从约 48%增加到约 60%。

4. 实现太空生物制造的基本需求

4.1 为太空准备的微生物生产系统

尽管太空生物制造的概念已经提出了几十年，但其应用仍然局限于单个小规模微重力实验。为了使生物 ISM 技术能够在任务架构中实施，需要将合成生物学和生物过程工程化扩展和适应相关的（太空）环境（特别是月球和火星）。为此，必须与各自的微生物细胞工厂共同开发用于太空生物-ISM 的硬件。

为了发展太空生物 ISM 的技术准备能力，还需要来自生物学、化学、物理学和工程等各领域的科学家和工程师共同努力，在太空限制和压力下建立交叉兼容和可扩展的处理系统。生物分子、生物工艺和生物系统工程必须与资源的预处理和产品的下游加工相结合，并与任务支持基础设施和后勤相结合。协调任务专家对于在不同（太空）限制下在太空部署测试以及在公共和私营部门之间建立长

期伙伴关系至关重要。这样的基础工作需要多学科中心开展大规模、长期的科学研究。一个专门基于太空的研发中心作为相关的“实地站”，可以极大地简化和促进 TRL 基础技术成果的提高。服务提供商将在国际空间站（近期）、下一代空间站（中期），以及作为火星试验台的月球（长期）上投入和管理资源。通过指定的、可预测的发射、硬件支持等，确保太空技术的测试、原型设计和成熟。

4.2 优先发展生物 ISM 技术

生物制造战略的应用有可能降低风险并扩大载人太空探索能力。离地球越远，关键任务的生物制造就越重要。月球任务可能通过 LC、废物流的回收和再利用来补充，火星任务将需要 ISRU。为了充分利用任务供应和现场资源，必须开发先进的生物制造技术。近期的月球任务将有助于建立 LC 技术并对其进行压力测试，为火星上的长期 ISM 过程提供参考。与硬件相比，任务设计场景的技术经济评估指导了战略发展目标，也更容易实施。资源效率对于成功执行深空任务至关重要，也是一个越来越突出的标准。

刘晓 马雪晴 编译自 *Nature Communications*