

利用熔岩管道建设月球农场的初步构想

谢更新^{1,2}, 韩 娅^{1,2}, 晏 铭³, 熊 鑫^{1,2}, 丁靖航^{1,2}, 武丽萍^{1,2}

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学 教育部深空探测联合研究中心, 重庆 400044;
3. 湖南大学 环境科学与工程学院, 长沙 410012)

摘 要: 总结了月球熔岩管道的天然优势和地外农场的研究进展, 概括了月球农场建立所涉及的原位资源利用关键技术, 梳理了利用熔岩管道建设月球农场的基本思路, 并提出了基于月球熔岩管道的月球农场布局规划, 总结了月球农场建设所面临的科学难题, 为利用熔岩管道建设月球农场的研究提供参考。

关键词: 月球农场; 月球熔岩管道; 月球资源原位利用

中图分类号: V467.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)05-0512-13

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20220060

引用格式: 谢更新, 韩娅, 晏铭, 等. 利用熔岩管道建设月球农场的初步构想[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(5): 512-524.

Reference format: XIE G X, HAN Y, YAN M, et al. A tentative conception of building lunar farm with lava tube[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(5): 512-524.

引 言

月球, 作为离地球最近的地外天体, 人们对它的关注自古未绝。近代以来, 随着航天技术与探测手段的进步, 月球探测迈入新的时代。从1959年开始, 各国陆续发射搭载有光谱、射线或雷达等测绘仪器的航天器或探测器, 通过星载遥感或实地勘察的方式, 获取了丰富的月球资料; 更进一步地, 通过探测器的“绕、落、回”三阶段, 人类收集到珍贵的月球土壤、岩石样

品, 深化了人们对月球的科学认识。月球探测的价值极高^[1], 在科学上, 通过研究月球的形成与演化, 为探究地球的起源和演化提供了新的思路; 在应用上, 月球具有丰富的矿产资源、能源和环境资源, 对人类的未来发展具有至关重要的作用^[2]。为了深入探测月球, 建立短期月球哨站或半永久月球基地是必须的途径^[3], 月球基地建设发展的路线见图1。在月球基地中, 食物的来源至关重要, 依靠飞船输送的成本过高, 因此建立月球农场对人类在月球基地长期生活具有重大意义。

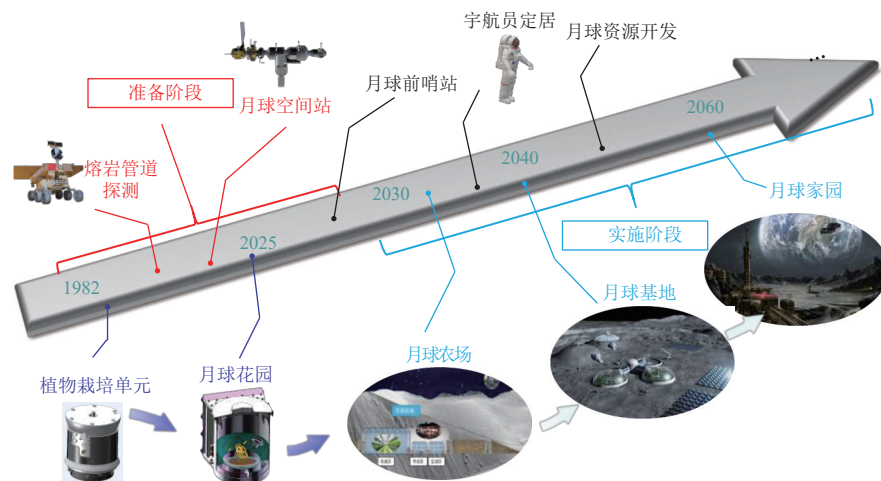


图 1 月球基地建设发展的路线
Fig. 1 The development route of lunar base construction

但是由于月球表面宽温变、高真空、强辐射和频繁陨石的极端环境, 月球农场的建设面临着耗费高、能源消耗大、对辐射和陨石防护能力要求高等困难, 即便利用原位资源在月球表面进行月球农场建造, 其工程量也是难以负担的。相比月球表面, 月球熔岩管道处于地底深处, 厚实的月壤、月岩能够有效抵御外界辐射和陨石冲击, 在熔岩管道中建立月球农场能够极大地减少建筑材料的用量。月球熔岩管道作为月球农场的理想选址点, 结合月球原位矿产资源和能源的开发利用, 建成后的月球农场可保障月球基地食物供应。本文结合月球熔岩管道和地外农场的研究现状, 简要总结了月球农场建设原位资源利用关键技术, 对利用熔岩管道建设月球农场的基本思路进行了概述, 最后提出了利用熔岩管道建设月球农场所面临的挑战。

1 研究现状

利用月球熔岩管道建设月球农场, 主要涉及到月球农场选址、月球农场植物栽培和月球农场系统环境构建这3个方面。

1.1 月球熔岩管道

月球农场的选址主要参考因素包括月球地形地貌、月面热环境、月面辐射环境、月面光照条件、微流星防护、资源利用等。月球探测资料表明, 月球极区温度变化幅度小, 其永久光照区太阳能充足, 而永久阴影区可能存在水冰, 适合作为月球农场选址点。但月球表面环境恶劣, 月球农场建造难度和防护要求极高; 而通过挖掘的方式, 在地下建造月球农场, 其工程量过多, 建造成本极高。近些年来的研究^[4]表明月球上可能存在着大量的熔岩管道(图2), 这提供了新的月球农场构建思路。

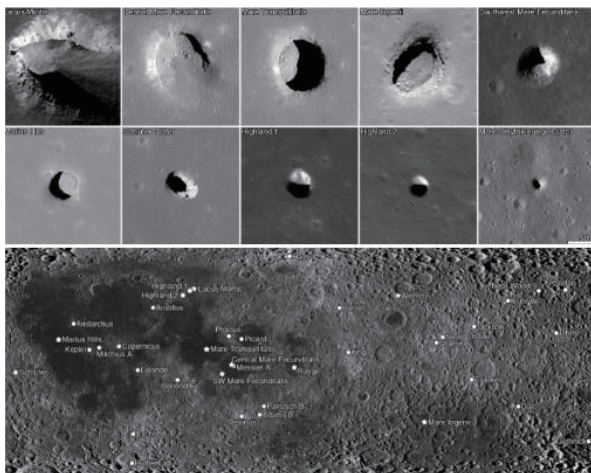


图2 月球勘测轨道器(LRO)观测到的8个天窗图像

Fig. 2 Eight skylight images observed by Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)

月球熔岩管道是早期月球火山运动形成的一种中空管道式洞穴^[5], 在顶部深厚岩石和月壤的保护下, 管道内部温差小、辐射剂量低、陨石撞击几率低^[6]。通过对比月球表面和月球熔岩管道的环境^[7](见表1), 可以发现月球熔岩管道内昼夜温差远远低于月球表面, 宇宙射线粒子的辐射强度与地球表面接近, 受到陨石撞击造成的损害更小。此外, 相比直接在月球表面修建月球农场, 在月球熔岩管道中修建月球农场更加节省建筑材料, 维持月球农场运行所消耗的能源更少。因此, 月球极区的熔岩管道是建设月球农场的理想选择^[8]。

表1 月球表面与月球熔岩管道的基本情况对比

Table 1 Comparison of basic conditions between lunar surface and lunar lava tube

基本情况	月球表面	月球熔岩管道
温度/℃	-183~127	-20~30
辐射(Sv/a)	0.3	6 m深的洞穴中模拟高能银河宇宙射线的辐射接近0 ^[9]
微流星体防护	月球正面的陨石撞击概率小于被背面	陨石撞击概率比月球表面小一个数量级
基地建设难度	高	较低

注: Sv为辐射计量单位。

1.2 空间植物栽培系统

在月面低重力、强辐射、高真空、宽温变等极端环境条件下, 植物难以生存, 需要对光照、温度、湿度、气体和水分等环境变量进行调控来满足植物的健康生长。近地轨道空间的太空环境与月面环境具有一定的相似性(重力环境具有差异性), 其空间植物栽培系统的植物选育、环境控制和参数测量等技术手段^[10]具有一定的借鉴意义。1977年, 前苏联在“礼炮6号”(Salute 6)宇宙空间站上搭载植物栽培试验装置, 让郁金香在模拟重力环境下生长; 1982年, 人们在“礼炮7号”(Salute 7)上的“太空温室”中种植兰花, 最终实现了从种子到种子的过程; 小麦、豌豆、大豆、西葫芦等植物的栽培试验相继在空间站开展, 丰富了人类在太空环境下种植作物的经验; 中国在“天宫二号”的空间实验室开展了拟南芥和水稻的植物培养实验, 实现植物“从种子到种子”的全生命周期培养; 近几十年来, 人们陆续设计了一系列的植物栽培系统, 见表2; 此外, 科学家还提出了基于WBEEP(Whole-Body Edible and Elite Plant)方法的太空理想作物改良^[11]。在低重力环境或微重力环境下, 植物与环境间的热量和物质流通会受到不利影响, 需要采取调控措施^[10]: 大气环境控制上, 进行强制通风; 水分/养分供给上, 采用营养膜技术或雾培技术。LED灯适合作为空间站中植物生长的光源, 而在月球/火星基地中LED灯可作为补光手段, 植物主要光源为月球/火星表面的太阳光。谢更新团队在月球背面通过光导管引

入月球表面自然太阳光, 实验结果表明在月球表面完全可以利用太阳自然光供给植物进行发芽^[12]。此外, 微重力不利于植物健康生长和发育, 也会对植物根际/

内生微生物群落的组成和多样性造成一定影响^[13]。通过开展空间植物栽培实验, 探究了植物水分供应、气体控制和光照控制等空间植物栽培关键技术。

表2 重要植物栽培装置或单元情况分析

Table 2 Analysis of important plant cultivation devices or units

仪器名称	国家	年份	光照		温度控制	湿度控制	气体控制	水分控制
			类型	照度/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$				
植物栽培单元 ^[14]	美国	1982	荧光灯	50~75	有(通过航天飞机控制)	无	无	有
植物栽培装置 ^[15]	美国	1997	荧光灯	>220	有(通过航天飞机控制)	有	有	有
“光”空间温室 ^[16]	俄罗斯	1990	荧光灯	约216	无	无	无	有
宇宙栽培装置 ^[17]	美国	1992	LED(红、蓝)	红光: 0~450 蓝光: 0~50	有(通过航天飞机控制)	有	有	有
先进宇宙栽培装置 ^[18]	美国	2001	LED(红、蓝)	红光: 0~550 蓝光: 0~70	有(通过国际空间站控制)	有	有	有
生物量生产系统 ^[19]	美国	2002	荧光灯	50~350	有(通过国际空间站控制)	有	有	有
欧洲模块化栽培系统 ^[20]	欧洲航天局	2006	LED(红外、白)	/	有(通过国际空间站控制)	有	有	有
高等植物培养箱 ^[21]	中国	2006	LED	>120	有	无	有	无
植物试验单元 ^[22]	日本	2009	LED(红、蓝)	110	有(通过国际空间站控制)	有	有	有
“神舟八号”封闭水生生态系统 ^[23]	中国	2011	LED	15~250	有(通过航天飞船控制)	无	无	无
蔬菜生产系统 ^[24]	美国	2014	LED(红、绿、蓝)	>350	有(通过国际空间站控制)	无	无	有
空间植物栽培装置 ^[25]	中国	2016	LED(红、绿、蓝)	105	有(通过天宫二号空间实验室控制)	有	有	有
“嫦娥四号”任务生物科普试验载荷 ^[12]	中国	2019	自然光	10 mm光导管(光量及周期不能调节)	有(通过着陆器和科普载荷控制)	无	无	无

1.3 受控生态生命保障系统

受控生态生命保障系统 (Controlled Ecological Life Support Systems, CELSS), 又称为生物再生生命保障系统 (Bioregenerative Life Support Systems, BLSS), 它是一个人工封闭的生态系统, 通过物化技术和生物再生技术对有限资源进行处理与循环, 从而构造出系统全封闭^[26]、自给自足、自主循环和物质闭合程度高的人居环境^[10], 是建立月球火星基地时长期物质循环供给问题的根本途径^[27]。自19世纪60年代以来, 世界各国陆续开展生命保障系统集成试验 (表3), 如前苏联的BIOS系列试验、美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的BPC (Biomass Production Chamber) 试验、

日本的CEEF系列试验和中国的2人30 d及4人180 d CELSS集成试验等。这些在地面开展的受控生态生命保障系统试验的最终目标是保证人类在地外环境 (空间站、月球、火星等) 中长期自主生存^[28]。要保证受控生态生命保障系统稳定运行, 大气循环、水循环、食物再生、废物循环利用等都是关键性控制环节。因此, 在地面上预先进行一系列受控生态生命保障系统试验, 来获取实验数据, 为未来外太空生命保障系统的研发提供科学依据, 都是为了将这些技术逐步运用到未来的载人深空探测, 实现未来月球、火星等地外星球基地的建立和应用。

综上所述, 月球熔岩管道是月球农场建设的绝佳选址点之一, 也是月球基地建设的理想选择, 空间植

表3 国内外重要CELSS情况分析

Table 3 Analysis of important CELSS in the world

试验平台名称	国家	试验开始年份	空间大小/ m^3	闭合度/%			试验农场		试验人数/人	持续时间/d
				氧气	水	食物	作物种类	种植面积/ m^2		
BIOS-3项目试验平台 ^[29]	前苏联	1972	315	100	100	80	小麦、油料莎草、豌豆、胡萝卜等14种	63	3	180
NASA CELSS试验平台 ^[30]	美国	1986	113	—	—	—	小麦、土豆、马铃薯、生菜	20	—	—
密闭生态实验设施 (CEEF) ^[31]	日本	2006	1365	—	—	—	水稻、大豆、花生和甜菜等23种	150	2	28
“2人30 d CELSS集成试验”试验平台 ^[32]	中国	2012	308	100	85	9.3	生菜、油麦菜、紫背天葵和苦菊4种	36	2	30
“月宫一号”试验平台 ^[33-34]	中国	2014	300	100	100	55	小麦、玉米、胡萝卜、油麦菜、草莓等21种	69	3	105
		2017	500	100	100	98	土豆、西红柿、茄子等30多种	120	4	370
“绿航星际—4人180 d CELSS集成试验”试验平台 ^[35]	中国	2016	1340	100	99	70	小麦、土豆、红薯、草莓、花生、大白菜等25种	195.36	4	180

物栽培系统验证了植物可以在低重力环境下正常生长, 而受控生态生命保障系统的研究为月球农场建设奠定基础 and 提供方案。

2 利用熔岩管道建设月球农场的原位资源利用关键技术

虽然月球熔岩管道的存在极大地降低了月球农场的建设难度, 但是还存在诸多困难亟待解决, 主要问题是原位改造、原位资源开发与利用及能源的供给。对月球熔岩管道进行改造主要有以下难点: 其一, 导光困难, 月球熔岩管道位于月面之下几十甚至上百米深处, 即使存在天窗, 自然光也很难照射进来; 其二, 搭建密闭空间困难, 不仅需要足够的材料对两端洞口进行封闭, 还要对洞壁用密封材料进行防漏处理; 其三, 月球熔岩管道内部地形复杂, 物资运输、人员流通和信息传递有很大难度。

由于月球农场建设工程量极大, 依靠地球大量输送建筑材料、能源、水和金属是极其不现实的, 而月球上储存着丰富的资源, 在月球上进行人类活动时首先应该利用原位资源, 避免远距离输送的经济损耗^[36]。如表4所示, 月球上可获得的资源来源主要是月壤、月岩和水冰, 对这3种原料进行提炼就能够获得生产生活原料, 满足人类在月球上活动所需的物质、能源需求。除了月表资源外, 独特的真空、低重力和高光能环境也是月球的关键资源。因此月球原位资源利用是月球农场建设的关键性途径。

表 4 月球的资源环境

Table 4 Resources and environment of the Moon

	资源	来源	潜在应用
月球环境	太阳辐射	太阳	能源
	真空	天然存在	材料加工
	低重力	天然存在	材料加工
月表资源	水冰	①月球撞击坑底部和南极地区 PSR 的冰; ②钛铁矿与氢反应产物	推进剂、生命保障
	氧	月壤或岩石提炼产物	推进剂、生命保障
	氢	受太阳风影响的月壤加热产物	推进剂、反应物、制水
	氦-3	月壤提取产物	热核发电
	月壤	月表天然分布	防辐射
	金属	钛铁矿、斜长石等矿物提炼产物	工厂和设备构建
	非金属	月壤或岩石提炼产物	太阳能电池和其它设备
	熔岩管	月表天然分布	热防护、辐射防护

2.1 月壤原位利用技术

月面资源中, 月壤是最容易获得的原位资源, 是未来人类建造月球农场和月球基地的重要原料。月壤原位利用技术包括利用月壤进行氧气制备、推进剂制备、月壤冶金、半导体制备、原位制造^[37]及基础建设^[38]

等方面。未经处理的月壤主要用于建筑表面覆土, 可以维持温度、屏蔽辐射和抵抗陨石冲击。此外, 月壤在微波^[39]、煅烧^[40]及激光束^[41]作用下会熔融成固体块材, 可作为月球农场建筑材料; 或通过混凝粘结技术^[42]和月壤原位增材制造(3D打印)技术^[36], 在月球表面利用月壤原位制备建筑结构材料; Hobosyan等^[43]提出了一种利用铝(镁)-聚四氟乙烯系统通过活化铝热反应固结月球表土的新方法, 以生产作为月球建筑的优质陶瓷材料; Wilhelm等^[44]利用增强干混/蒸汽注入方法来生产月球混凝土。

除了作为建筑材料, 月壤也可以作为植物栽培基质的原料。月壤与地球土壤的不同元素氧化物的比例之间存在显著差异, 且月壤不含有机质和水, 这对用月壤种植植物构成挑战。虽然月壤主要元素组成与地球土壤相似, 含有O、Si、Al、Fe、Mg、Ca等植物必需元素, 但最近的研究证实其对植物生长存在离子胁迫, 因此需要对月壤进行改良处理, 将改良月壤作为月球农场的作物栽培基质。如图3所示, 可以采用生物质、粘结剂和生物炭等材料对月壤进行物理改良。秦利锋等^[45]利用固氮蓝藻对低钛玄武质模拟月壤进行改良后, 模拟月壤中有效N含量、有机碳含量和离子态矿质元素显著提高。Yao等^[46]将模拟月壤与有机固体废物(由植物残渣、人类粪便和微生物组成)混合并共同发酵, 加快了模拟月壤的生物风化过程, 改善了模拟月壤的容重、孔隙度等理化性质。相比化学方法, 物理方法和生物方法无污染、成本低, 在月球农场建设中有优越的应用前景。

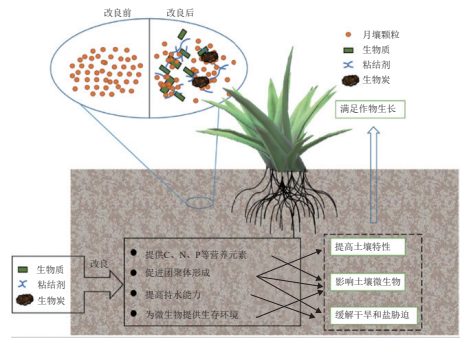


图 3 月球土壤可种植改良方法

Fig. 3 Ways to improve lunar soil for cultivation

2.2 月球能源利用技术

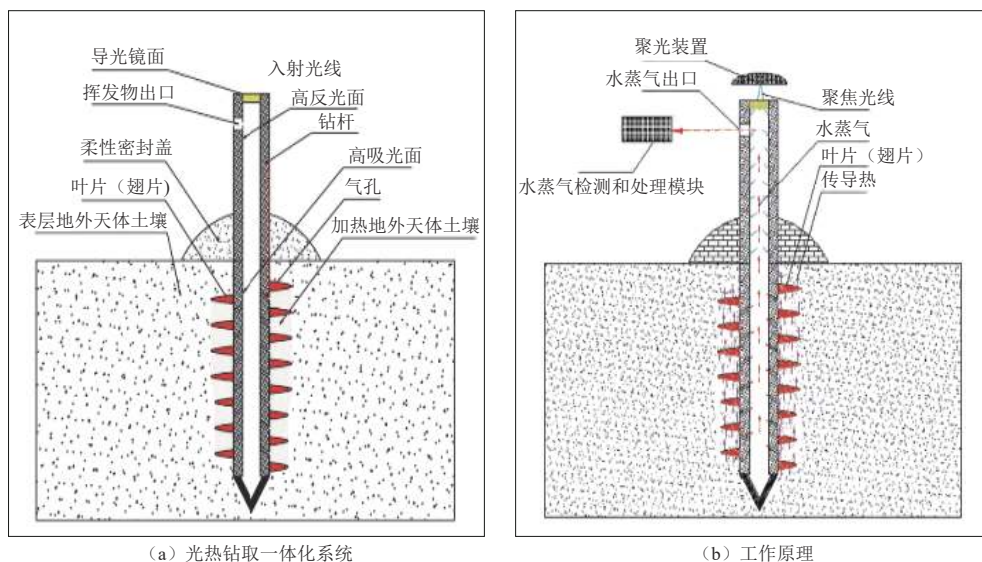
月球上能源主要有太阳能和核能。由于月球表面真空环境下太阳光辐射损耗极低以及月球永久光照区的存在, 太阳能电池阵能为月球农场提供充足的电能^[47]。目前月球上太阳能发电分为3类: 太阳能光伏发电系统^[48]、太阳能热动力发电系统^[49]和太阳能空间站。这些系统涉及到的研究很多, 主要包括月面太阳能电

站基材制备技术、月面太阳能电站系统设计与仿真试验技术、月面超大型结构模块化轻量与控制技术、月面超大功率高效发电与电力管理技术、月面超大型系统在轨制造、组装与维护技术、月面超大功率高效无线能量转化与传输技术等关键技术^[50]。任德鹏等^[51]开发出氢氧燃料电池+光伏发电装置的能源系统,用以保障月球基地的能源供给与存储。除了太阳能外,月壤中含有丰富的氦-3,它是一种非常安全的热核反应材料^[52]。通过搭建空间裂变核反应堆电源,利用月球上的氦-3可满足月球农场的能源需求,但是核反应堆整体设计要求较大的重量^[51],因此月面上小型反应堆的设计与应用是一种不错的选择。还可以利用月球熔岩管道内恒温层与月球表面巨大的温差进行发电^[53]。

2.3 月面水冰资源利用技术

水是生命之源,宇航员长期驻留月球生活,必须

保证液态水的持续稳定供应,因此月球极区永久阴影区水冰存在问题成为国际探测与研究的热点^[54]。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的月球矿物学测绘仪对月球表面水冰分布进行检测,证明了水冰存在的具体特征^[55]。此外,在月球非极地地区的火山玻璃沉积物中观察到水分子^[56]。水还是重要的化学原料,可以电解产生氢气和氧气,氢气可通过压缩处理来制备氢气燃料电池和火箭燃料,氧气是宇航员生存和生命维持的必需品。月球极区水冰资源开发利用关键技术^[57]主要有钻取一体化技术、水蒸气冷凝与微液滴收集技术、氢氧光化学合成技术、钛铁矿(FeTiO_3)的氢还原^[58]等。如图4所示,王超等^[57]详细介绍了光热钻取一体化系统,开展地面模拟试验,为月面水冰资源开发利用提供借鉴。



(a) 光热钻取一体化系统

(b) 工作原理

图4 光热钻取一体化系统与工作原理^[57]

Fig. 4 Integrated system and working principle of photothermal drilling^[57]

2.4 月面矿物原位利用技术

月球上有丰富的矿产资源,主要集中在月壤和月球矿石中。其中月壤含有Si、Ca、Al、Mg、Fe、Ti等各类矿物元素,但提炼成本过高;而月球矿石中有用成分回收率高,像月海钛铁矿和克里普岩,可以通过物理化学方法筛分、分解和还原。另外在开采月球矿产的时候要面临低重力、强辐射、微流星体撞击、极端温度变化等关键挑战。在克服挑战的基础上,月面资源原位利用关键技术包括氢气还原、碳热还原、熔岩电解、高温裂解、硫酸处理等技术。李芑等^[59]分析了月球含氧矿物的制氧方法,采用钛铁矿的氢还原来制备金属铁。张全生等^[60]提出了锂还原-LiOH电解循环技术,充分获取月球矿物中的氧气。镁合金作为

月球农场结构和组件的重要金属之一,需要将镁矿作为原位资源,结合镁的关键特性进行研究^[61]。硅酸盐如钙长石可以通过酸处理生成氧化铝和硅酸,再通过电解工艺以制取硅和铝^[48]。

3 利用熔岩管道建设月球农场的基本思路

基于月球熔岩管道的月球农场建设初步分为3个阶段,首先在月球极区寻找合适的熔岩管道,进行密闭空间构建与附属设施安置,为月球农场农业生产提供防护、能源和资源;接着在密闭空间内布设农场设施与装备,主要包括农地、环控设施和农业生产设施等;最后,通过智能控制系统来完成月球农场的环境调控和农业生产。

3.1 基于熔岩管道的密闭空间建设

虽然月球熔岩管道内环境远远优于月球表面, 但是生物还是难以生存。首先要在月球熔岩管道中构建密闭空间, 维持正常的气压环境, 作为月球农场的建设平台。其中密闭空间的气密性是关键指标, 它直接关系到后续月球农场运行的安全与稳定。建筑气密性的检测方法^[62]主要分为鼓风门法和示踪气体法。通过对比“月宫一号”、BIOS-3和美国受控生态生命保障系统等CELSS的气体泄露率^[26], 判断月球熔岩管道中密闭空间的泄露率 $<1\% \cdot d^{-1}$ 。在密闭空间构建基础上, 要对月球熔岩管道进行合理规划(见图5), 其中农场部分是关键部件, 为满足4个人对饮用水、氧气、食物和能量的需求, 农场需设置160~200 m²的植物种植面积^[35]。

接下来, 以原位资源利用技术来获取资源和能源。建筑材料主要通过月壤和月岩来制取, 隔温材料有热控涂层、多层隔热材料、气溶胶材料和智能隔热

材料等; 在月球熔岩管道天窗或出口处布设导光管, 为月球农场的生物提供光照; 设置温差发电装置利用月球熔岩管道内外温差, 或直接搭建太阳能发电装置, 或收集利用月壤中的氦-3, 为月球农场的系统运行提供能源; 在月球水冰存留处, 设置开采和净化装置, 为月球农场提供充足的水资源; 设置矿物开采和冶炼装置, 为月球农场提供金属资源和化肥。

目前主要有3种手段可以实现月球农场的建造: ①科学家/宇航员作业; ②自主机器人作业^[63]; ③机器人与人类联合作业^[64]。张志贤等^[65]对人机联合探测进行定义并尝试人机联合任务执行研究, 对人机协调系统进行优化和完善。由于月球探测过程中人力资源的宝贵和外界环境的恶劣, 人工智能技术将得到越来越广泛的应用。

3.2 月球农场结构组成

如图6所示, 月球农场主要由农业区、生活区和各

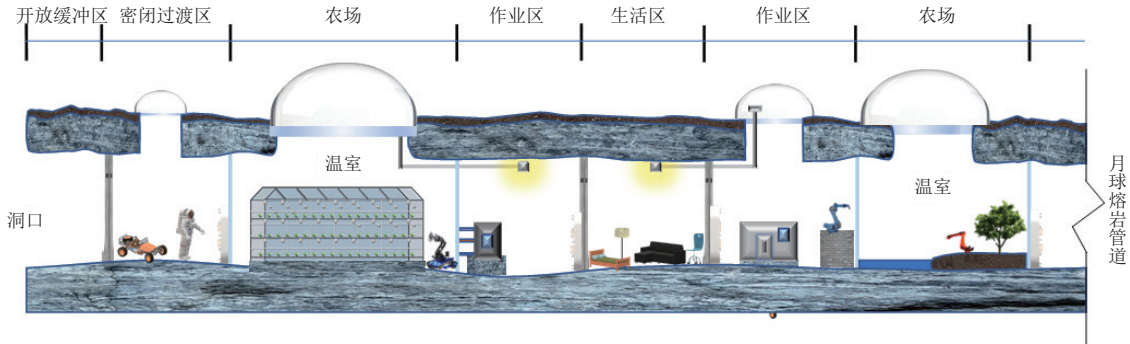


图 5 基于月球熔岩管道的月球农场/基地概念图
Fig. 5 Concept map of lunar farm/base in lunar lava tube

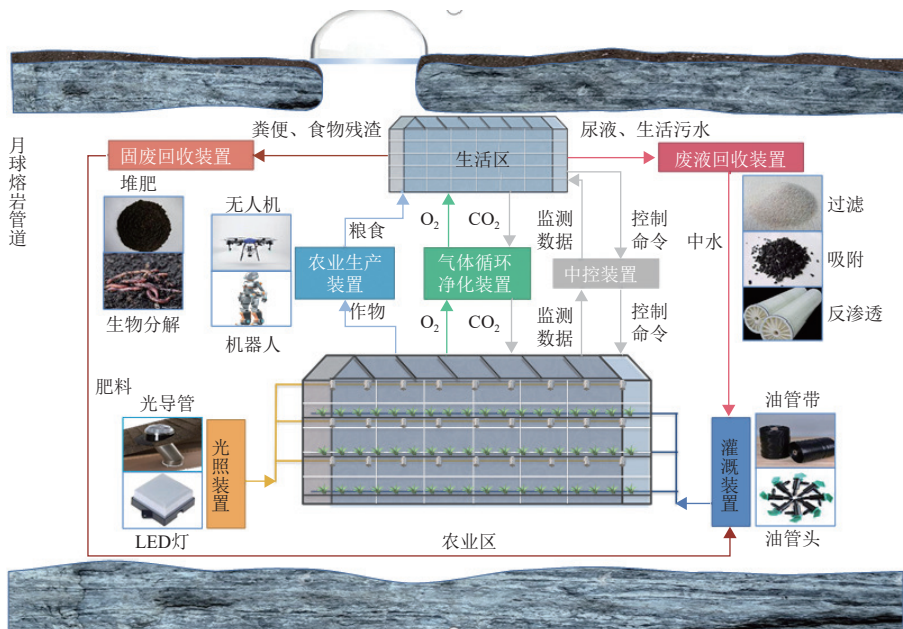


图 6 月球农场结构组成
Fig. 6 Structure composition of lunar farm

类装置设施组成,可分为生物单元和装置设施部分两类:生物单元主要是植物和微生物,装置设施单元包括固废回收装置、废液回收装置、气体循环净化装置、光照装置、灌溉装置、农业生产装置和中控装置等。

生物单元是月球农场最重要的部分,其中植物是极其关键的功能部件^[66],而微生物种群对月球农场的稳定运行有着不容忽视的积极作用^[67]。目前空间植物栽培种类多达40多种,其中20多种是可食用类型,可以作为月球农场植物选育的参考,进一步基于月球环境状况和原位资源条件,从月球农场的功能要求、环境适应性要求、农艺操作要求和设施装置要求等方面考虑植物选育的可行性^[10]。植物微生物群落有利于提高月球农场的产出,保障植物微生态系统的稳定运行,但在月球农场工程化菌群筛选的过程中要注意3个条件^[67]:对植物有利^[68],不危害人类健康^[69]以及对装置设施无影响^[70]。

根据栽培基质的不同,搭建的月球农场主要分为两种类型:无土栽培农场,以改良月壤作为作物根系支撑材料;有土栽培农场,改良月壤具备正常土壤的结构和功能。无土栽培分为无基质栽培和基质栽培,基质栽培是以草炭、蛭石、沸石等材料作为根系固定基质,通过添加营养液的方式为作物供给水分和养分,其优点是作物产量高、病虫害少、便于管理,缺点是设备要求高、作物种类有要求、能耗高和肥料费用高;有土栽培中作物需要的营养元素主要来自于土壤,相比无土栽培产量更低,但是作物种植方便、能耗低、肥料费用低。根据月球环境与资源的情况,月球农场初期搭建应以水培为主、基质栽培为辅^[28],随着月球原位资源的开发和利用,月球农场中基质栽培、土培、水培、雾培等多种栽培模式并行,用以满足人类在月球长期生存所需。

月球农场中废水回收装置极为重要。月球农场基本不产生废水,反而作为月球基地中人类产生生活污水的最终消纳地。根据来源不同,月球基地产生的废水分为冷凝废水、卫生废水和尿液废水,其中冷凝废水经多层过滤、净化后可供饮用^[71],而卫生废水和尿液废水经生化处理后可以引入月球农场。废水处理技术主要有活性炭吸附、催化、高级氧化、蒸馏、渗透膜过滤和生物处理等技术。如表5所示,各工艺在某种程度上都存在一定的缺陷,其中蒸馏法和生物法在月球农场的废水回收方面具有不错的应用前景。

月球农场肥料来源有两方面:其一是月球矿物冶

炼的化肥供给;其二是农业废弃物的资源化处理,月球农场中产生的固体废物主要有农作物残体,生活区的食品残渣和粪便。固废回收利用方法分为物理方法、化学方法和生物方法。如表6所示,固废回收技术都具有一定缺陷,因此需要将物理方法与生物方法结合起来,比如破碎+堆肥+真菌分解,来实现月球农场固废回收。此外,微生物是固废再生循环利用系统中不可缺少的物种,它的特点是个体小、繁殖快、易培养、代谢功能强,能够有效地将人体或动物排出的废物或其它非生物转化成需要的食品和氧气^[72]。

表5 废水处理技术的优缺点

Table 5 Advantages and disadvantages of wastewater treatment technology

废水处理技术	优点	缺点
加压过滤法	工艺较成熟、处理效果好	滤料要求高、能耗高
蒸馏法	能耗较低、工艺较成熟	出水氨氮和TOC偏高
高级氧化法	处理效果好	能耗高、安全性差
冻干法	处理效果好、能耗低	工作效率低
生物法	能耗低	低重力环境有影响

表6 固废回收技术的优缺点

Table 6 Advantages and disadvantages of solid waste recycling technology

固废回收方法	技术	特点
物理方法	破碎、热解、辐射处理等	能耗高,一般作为预处理
化学方法	酸处理、碱处理和高级氧化等	效率高,但可能会产生毒性污染
生物方法	堆肥、真菌分解、蚯蚓处理等	效果好、无污染,但要避免低重力环境的不利影响

农作物的光照分为自然光照和人工光照,分别依靠月球耕地中均匀布设的导光管和LED灯来满足。气体循环装置包括气体调控装置和气体净化装置,调控和净化的气体主要有O₂和CO₂,采用植物再生与物化再生相结合的方法^[73]进行气体循环是最为科学的方法之一。该方法主要是依靠月球农场中的植物进行供氧和净化二氧化碳,但当其能力不足时则启动物化再生系统。物化再生系统分为先收集后处理两部分,O₂有超标时的氧分子筛/膜分离与收集技术和不足时的水电解制氧技术、藻电池产氧技术^[74];CO₂超标时,收集方法以吸附法为主,主要有膜分离^[75]、分子筛吸附^[76]、固态胺吸附和液态胺吸附^[77]等方法,处理方法主要有Bosch法、Sabatier法和甲醇化消除化方法^[78]等。由于农

作物难以适应月球熔岩管道中的温差,除了铺设隔温层外,还要安装温控装置,包括热控涂层、多层隔热材料、热管、电加热器、无源主动式热控装置和流体循环换热装置等,对月球农场的温度进行调控。最后,还要在月球农场中布设翻耕、播种、除草和收割等装置或机器,通过自控程序或远端遥控进行农业生产。

3.3 月球农场系统运行

中控系统以自控为主、遥控为辅,主要功能分为两种:月球农场环境参数调控和生产系统调控。

月球农场环境参数主要有温度、湿度、气压、气体成分含量、光照、土壤湿度等参数,实际环境参数

设置需注意种植作物的种类、生长阶段、栽培方法等,参数选取范围可参考表7^[68]。如图7所示,通过传感监测月球农场环境,当农场环境参数不满足要求时,控制系统会命令环境控制模块来自动调整。

生产系统调控基于智能控制系统,对月球农场的作物进行播种、施肥、浇水、收割、翻土等操作。通过在月球农场部署各类传感器、风机、水泵、电动阀门、无人播种机、无人收割机、机器人、摄像头和无人机等设备,并结合滴灌技术和水-肥-药一体化技术,实现对月球农场的自动监测、数据分析和自控管理等,通过电脑远程操控农业生产设施,对月球农场进行针对性改造。

表 7 月球农场常见环境参数
Table 7 Common environmental parameters of lunar farm

栽培方法	大气环境控制							土壤环境控制			光环境控制		
	温度/ ℃	相对空气 湿度/%	大气总压/ kPa	CO ₂ 浓度/ %	O ₂ 浓度/ %	乙烯浓度/ (mg·m ⁻³)	空气速度/ (m·s ⁻¹)	湿度/ %	pH	电导率/ (mS·cm ⁻¹)	光质	光强/ (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	光周期
水培	16~25	55~85	101	0.04~0.5	18~24	<0.025	0.3~0.7	—	—	—	LED灯: 红光、蓝光	160~700	16~18
基质栽培	16~25	55~85	101	0.05~0.3	19~25	—	—	25~40	6.0~6.5	1.5~1.8	LED灯: 红光、蓝光、白光	240	16

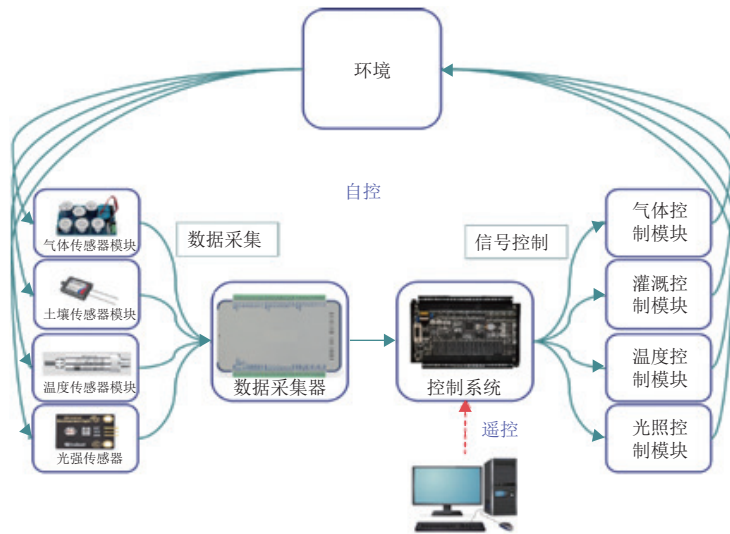


图 7 月球农场控制系统示意图
Fig. 7 Schematic diagram of lunar farm control system

4 面临的科学难题

基于月球熔岩管道的天然环境条件,综合运用月球农场建设关键技术,能够搭建以封闭式受控生态系统为平台的月球农场,建设路径如图8所示。未来,月球熔岩管道将成为月球移民的主要居住地,最终形成

以熔岩管道为脉络的月球城市;月球农场建设关键技术的创新研发将为航天技术的发展奠定坚实的基础,将大大缩短地外行星的开发进程;在月球上建立以农业生产为主的密闭受控生态系统,将极大地加强人类对生物圈运行原理的深入理解。

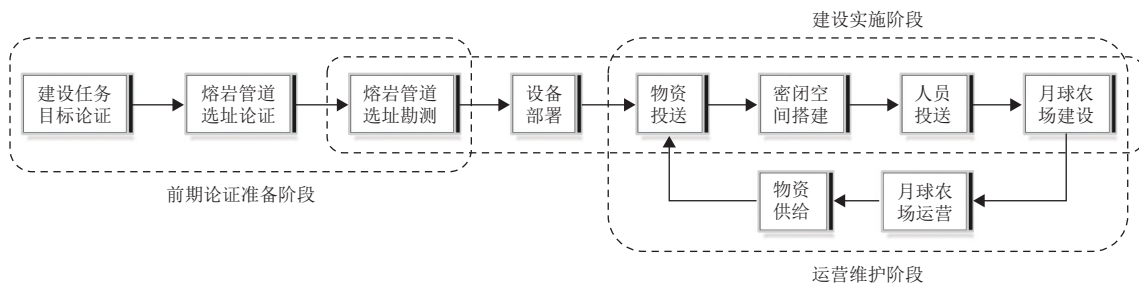


图8 月球农场建设路径

Fig. 8 Construction path of lunar farm

目前在月球熔岩管道建造月球农场还存在以下困难:

1) 缺少月球熔岩管道的实地勘察资料。由于月球熔岩管道大多位于地下深处, 传统的地球物理学探测方法很难获取准确的环境参数, 将机器人自主探测技术应用到月球熔岩管道探测上是一种有效途径。

2) 月球原位资源利用技术大多处于试验阶段。目前月壤的建材化技术存在耗水量大、能耗高等弊端; 月球表面的太阳能利用技术还要考虑到高温差和强辐射对材料的耗损; 月球极区水冰的存在形式有待进一步探测, 水冰收集净化技术的效率还需要进一步提高; 月球矿物原位利用还未考虑到低重力环境的影响。

3) 月球农场的自动化和智能化设计还处于起步阶段。月球农场作为月球基地的基础设施, 要实现全过程自动化生产、智能化调控, 从而保证食物的最大供给和避免人力资源的浪费。

4) 基于熔岩管道的月球农场建设还处于概念阶段。将地球上天然的溶洞作为月球熔岩管道模拟场地, 开展密闭受控农场研究可以获取大量试验数据, 为未来月球农场的建设提供理论基础。

5 结论

本文面向未来月球基地建设运行任务, 给出了利用熔岩管道建设月球农场的初步构想, 在分析月球生存环境的基础上, 结合空间植物栽培和受控生态生命保障系统的研究现状, 得出月球熔岩管道是月球农场理想选址点的观点; 总结了利用熔岩管道建设月球农场所涉及的原位资源利用关键技术, 包括月壤作建材和种植基质、月表太阳能和核能开发、月面水冰制取以及金属冶炼等关键技术; 提出了利用熔岩管道建设月球农场的基本思路, 从利用月球熔岩管道搭建密闭空间到农场设施装备布设, 进而启动智能控制系统实现月球农场生产运行; 同时分析了月球农场密闭空间构建的气密性要求、建材获取方式和人机联合建设

手段等要点, 概述了月球农场的设计框架, 包括植物部件、装置设施等主要结构和环境参数调控、生产系统调控等运行系统; 最后提出了利用熔岩管道建设月球农场的科学难题, 为利用熔岩管道建设月球农场提供参考。

参 考 文 献

- [1] 李大耀. 论月球资源和航天月球探测[J]. *航天返回与遥感*, 2004, 25(1): 60-64.
LI D Y. On Moon resources and lunar exploration by spacecraft[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2004, 25(1): 60-64.
- [2] CRAWFORD I A. Lunar resources: a review[J]. *Progress in Physical Geography-Earth and Environment*, 2015, 39(2): 137-167.
- [3] 杨建中, 吴琼, 于登云, 等. 无人月球科考站构建与运行关键技术初探[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(2): 111-117.
YANG J Z, WU Q, YU D Y, et al. Preliminary study on key technologies for construction and operation of robotics lunar scientific base[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(2): 111-117.
- [4] ARYA A S, RAJASEKHAR R P, THANGJAM G, et al. Detection of potential site for future human habitability on the Moon using Chandrayaan-1 data[J]. *Current Science*, 2011, 100(4): 524-529.
- [5] WAGNER R V, ROBINSON M S. Distribution, formation mechanisms, and significance of lunar pits[J]. *Icarus*, 2014, 237: 52-60.
- [6] THESNIYA P M, RAJESH V J. Encyclopedia of lunar science[M]. Cham: Springer International Publishing, 2020: 1-15.
- [7] NASER M Z, CHEHAB A I. Materials and design concepts for space-resilient structures[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2018, 98: 74-90.
- [8] MARI N, GROEMER G, SEJKORA N. Mars: a volcanic world[M]. Cham: Springer International Publishing, 2021: 279-307.
- [9] DE ANGELIS G, WILSON J W, CLOUDSLEY M S, et al. Lunar lava tube radiation safety analysis[J]. *Journal of Radiation Research*, 2002, 43: 41-45.
- [10] 唐永康, 吴志强, 董文平, 等. 空间植物栽培技术分析思考[J]. *植物生理学报*, 2020, 56(1): 1-10.
TAN Y K, WU Z Q, DONG W P, et al. Analysis and review on plant cultivation techniques in space[J]. *Plant Physiology Journal*, 2020, 56(1): 1-10.
- [11] LIU Y, XIE G, YANG Q, et al. Biotechnological development of plants for space agriculture[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1-3.
- [12] CASTELVECCHI D, TATALOVIC M. Plant sprouts on the Moon for

- first time ever [EB/OL]. (2019)[2020-06-16]. <https://www.nature.com/articles/d41586-019-00159-0>.
- [13] CUI J J, YI Z H, FU Y M, et al. Simulated microgravity shapes the endophytic bacterial community by affecting wheat root metabolism [J]. *Environmental Microbiology*, 2022, 24(8): 3355-3368.
- [14] COWLES J R, SCHELD H W, LEMAY R, et al. Growth and lignification in seedlings exposed to eight days of microgravity[J]. *Annals of Botany*, 1984, 54(S3): 33-48.
- [15] KUANG A, POPOVA A, XIAO Y, et al. Pollination and embryo development in *Brassica rapa* L. in microgravity[J]. *International Journal of Plant Sciences*, 2000, 161(2): 203-211.
- [16] ILIEVA I, IVANOVA T, NAYDENOV Y, et al. Plant experiments with light-emitting diode module in Svet space greenhouse[J]. *Advances in Space Research*, 2010, 46(7): 840-845.
- [17] MORROW R C, BULA R J, TIBBITTS T W, et al. The Astroculture(TM) flight experiment series, validating technologies for growing plants in space[J]. *Advances in Space Research the Official Journal of the Committee on Space Research*, 1994, 14(11): 29-37
- [18] LINK B M, DURST S J, ZHOU W, et al. Seed-to-seed growth of *Arabidopsis thaliana* on the International Space Station[J]. *Advances in Space Research*, 2003, 31(10): 2237-2243.
- [19] MORROW R C, CRABB T M. Biomass Production System (BPS) plant growth unit[J]. *Advances in Space Research*, 2000, 26(2): 289-298.
- [20] KISS J Z, AANES G, SCHIEFLOE M, et al. Changes in operational procedures to improve spaceflight experiments in plant biology in the European Modular Cultivation System[J]. *Advances in Space Research*, 2014, 53(5): 818-827.
- [21] 张涛, 郑伟波, 卢晋人, 等. “实践”八号卫星高等植物培养箱 [J]. *载人航天*, 2007(4): 4-6+35.
ZHANG T, ZHENG W B, LU J R, et al. "Practice" 8 satellite higher plant incubator [J] *Manned Spaceflight*, 2007(4): 4-6+35.
- [22] YANO S, KASAHARA H, MASUDA D, et al. Improvements in and actual performance of the plant experiment unit onboard Kibo, the Japanese experiment module on the international space station[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(5): 780-788.
- [23] LI X, RICHTER P R, HAO Z, et al. Operation of an enclosed aquatic ecosystem in the Shenzhou-8 mission[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 134: 17-22.
- [24] BURGNER S E, NEMALI K, MASSA G D, et al. Growth and photosynthetic responses of Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. cv. Tokyo Bekana) to continuously elevated carbon dioxide in a simulated Space Station "Veggie" crop-production environment[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2020, 27: 83-88.
- [25] 景海鹏, 陈冬, 赵丕盛, 等. 空间微重力下植物栽培水分养分控制研究[J]. *自动化学报*, 2018, 44(10): 1764-1770.
JING H P, CHEN D, ZHAO P S, et al. Investigation on water and nutrition control of plant growth under microgravity in space[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(10): 1764-1770.
- [26] 胡大伟, 付玉明, 杜小杰, 等. 生物再生生命保障地基实验系统气密性评价[J]. *载人航天*, 2016, 22(3): 399-405.
HU D W, FU Y M, DU X J, et al. Air tightness evaluation of biological regeneration life support foundation experimental system [J]. *Manned Spaceflight*, 2016, 22 (3): 399-405.
- [27] 钟剑富, 李家练, 刘厚诚, 等. 受控生态生保系统中马铃薯栽培研究进展[J]. *载人航天*, 2022, 28(2): 279-284.
ZHONG J F, LI J L, LIU H C, et al. Research progress of potato cultivation in CELSS[J]. *Manned Spaceflight*, 2022, 28(2): 279-284.
- [28] LIU H, YAO Z K, FU Y M, et al. Review of research into bioregenerative life support system(s) which can support humans living in space [J]. *Life Sciences in Space Research*, 2021, 31:113-120.
- [29] 郭双生. 长期载人航天生命保障地面模拟装置——“BIOS-3”的发展历史、现状与前景[J]. *大自然探索*, 1995(2): 36-41.
GUO S S. Development history, present situation and prospect of BIOS-3, a ground simulation device for long-term manned spaceflight life support[J]. *Nature Exploration*, 1995(2): 36-41.
- [30] 郭双生. 美国长期载人航天生命保障地面模拟装置——“BPC”的研究历史、现状与展望[J]. *大自然探索*, 1996(1): 34-40.
GUO S S. Research history, present situation and prospect of "BPC", a ground simulation device for long-term manned spaceflight in the United States[J]. *Nature Exploration*, 1996(1): 34-40.
- [31] OHYA H, OSHIMA T, NITTA K. Survey of CELSS concepts and preliminary research in Japan[J]. *Advances in Space Research : the Official Journal of the Committee on Space Research (COSPAR)*, 1984, 4(12): 271-277.
- [32] 郭双生, 董文平, 艾为党, 等. 2人30天受控生态生保系统物质流调控技术研究[J]. *载人航天*, 2013, 19(5): 67-74.
GUO S S, DONG W P, AI W D, et al. Study on material flow control technology of two person 30 day controlled ecological life support system[J]. *Manned Spaceflight*, 2013, 19 (5): 67-74.
- [33] FU Y, LI L, XIE B, et al. How to establish a bioregenerative life support system for long-term crewed missions to the Moon or Mars[J]. *Astrobiology*, 2016, 16(12): 925-936.
- [34] FU Y, YI Z, DU Y, et al. Establishment of a closed artificial ecosystem to ensure human long-term survival on the Moon[J]. *Cold Spring Harbor Laboratory*, 2021, 1(1): 1-5.
- [35] 李莹辉, 左永亮. “绿航星际”——4人180天受控生态生保系统集成试验圆满收官[J]. *国际太空*, 2017(1): 14-18.
LI Y H, ZUO Y L. "Green Aviation star" — 4 people 180 day controlled ecological life support system integration test successfully concluded[J] *International Space*, 2017(1): 14-18.
- [36] 李志杰, 果琳丽. 月球原位资源利用技术研究[J]. *国际太空*, 2017(3): 44-50.
LI Z J, GUO L L. Research on the technology of lunar in-situ resource utilization[J]. *Space International*, 2017(3): 44-50.
- [37] BONANNO A, BERNOLD L E. Exploratory review of sintered lunar soil based on the results of the thermal analysis of a lunar soil simulant [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2015, 28(4): 4014114.
- [38] HOU X, DING T, CHEN T, et al. Constitutive properties of irregularly shaped lunar soil simulant particles [J]. *Powder Technology*, 2019, 346: 137- 149.
- [39] ZHOU C, TANG H, LI X, et al. Effects of ilmenite on the properties of microwave-sintered lunar regolith simulant [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2021, 34(6): 6021006.1-6021006.8.
- [40] LIU M, TANG W, DUAN W, et al. Digital light processing of lunar regolith structures with high mechanical properties[J]. *Ceramics*

- International*, 2019, 45(5): 5829-5836.
- [41] 王超, 张光, 吕晓辰, 等. 模拟月壤激光熔融成型工艺参数试验初探[J]. *航天器环境工程*, 2021, 38(5): 575-580.
WANG C, ZHANG G, LÜ X C, et al. Experimental study of the parameters of laser melting molding process with regard to simulated lunar soil[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2021, 38(5): 575-580.
- [42] BUCHNER C, PAWELKE R H, SCHLAUF T, et al. A new planetary structure fabrication process using phosphoric acid[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 143: 272-284.
- [43] HOBOSYAN M A, MARTIROSYAN K S. Consolidation of lunar regolith simulat by activated thermite reactions [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2015, 28(4): 1-9.
- [44] WILHELM S, CURBACH M. Manufacturing of lunar concrete by steam[C]//Proceedings of Earth & Space 2014: Engineering for Extreme Environments. Guangzhou, China: [s. n.], 2014.
- [45] 秦利锋, 林启美, 薛彩荣, 等. 月球土壤的生物改良试验: 固氮蓝藻对模拟月壤肥力的影响[J]. *航天医学与医学工程*, 2020, 33(6): 497-503.
QIN L F, LIN Q M, XUE C R, et al. Bio-improving experiment of lunar soil: effect of nitrogen-fixing cyanobacteria on fertility of simulated lunar soil[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2020, 33(6): 497-503.
- [46] YAO Z, FENG J, LIU H. Bioweathering improvement of lunar soil simulat improves the cultivated wheat's seedling length[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 193: 1-8.
- [47] HAVILAND H F. The human factor in the settlement of the Moon: an interdisciplinary approach[M]. Cham: Springer International Publishing, 2021: 43-53.
- [48] ELLERY A. Generating and storing power on the moon using in situ resources[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G-Journal of Aerospace Engineering*, 2022, 236(6): 1045-1063.
- [49] LU X, MA R, WANG C, et al. Performance analysis of a lunar based solar thermal power system with regolith thermal storage[J]. *Energy*, 2016, 107: 227-233.
- [50] 雷英俊, 朱立颖, 张文佳. 我国深空探测任务电源系统发展需求[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(1): 35-40+46.
LEI Y J, ZHU L Y, ZHANG W J. Research on power system development of Chinese deep space exploration [J]. *Journal of Deep Space Exploration* 2020, 7(1): 35-40+46.
- [51] 任德鹏, 李青, 许映乔. 月球基地能源系统初步研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2018, 5(6): 561-568.
REN D P, LI Q, XU Y Q. Preliminary research on the lunar base energy system[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(6): 561-568.
- [52] WITTENBERG L J, SANTARIUS J F, KULCINSKI G L. Lunar source of He-3 for commercial fusion power[J]. *Fusion Technology*, 1986, 10(2): 167-178.
- [53] 谢和平, 李存宝, 孙立成, 等. 月球原位能源支撑技术探索构想[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(3): 1-9.
XIE H P, LI C B, SUN L C, et al. Conceptualization of in-situ energy support technology on the Moon[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(3): 1-9.
- [54] PIQUETTE M, HORANYI M, STERN S A. Laboratory experiments to investigate sublimation rates of water ice in nighttime lunar regolith[J]. *Icarus*, 2017, 293: 180-184.
- [55] HARRELL M J, SCHROEDER G S, DAIRE S A. Handbook of life support systems for spacecraft and extraterrestrial habitats[M]. Cham: Springer International Publishing, 2020: 1-23.
- [56] HONNIBALL C I, LUCEY P G, LI S, et al. Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5(2): 121-127.
- [57] 王超, 张晓静, 姚伟. 月球极区水冰资源原位开发利用研究进展[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(3): 241-247.
WANG C, ZHANG X J, YAO W. Research prospects of lunar polar water ice resource in-situ utilization[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(3): 241-247.
- [58] SARGEANT H M, BARBER S J, ANAND M, et al. Hydrogen reduction of lunar samples in a static system for a water production demonstration on the Moon [J]. *Planetary and Space Science*, 2021(5): 105287.
- [59] 李芄, 王世杰, 李雄耀, 等. 利用月球含氧矿物制取氧气的方法学比较[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2009, 28(2): 183-188.
LI P, WANG S J, LI X Y, et al. Review of oxygen production using oxygenous minerals on the Moon[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2009, 28(2): 183-188.
- [60] 张全生, 郭东莉, 夏骥. 为月球资源就地应用的LiOH电解制氧技术分析和实验观察[J]. *航天医学与医学工程*, 2013, 26(3): 211-214.
ZHANG Q S, GUO D L, XIA J. Analysis and experimental study on LiOH electrolysis process used for in-situ-resources usage of lunar mineral resources[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2013, 26(3): 211-214.
- [61] BENAROYA H, MOTTAGHI S, PORTER Z. Magnesium as an ISRU-derived resource for lunar structures[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2013, 26(1): 152-159.
- [62] 李伟, 东岩, 高强, 等. 我国建筑气密性研究现状与分析[J]. *消防科学与技术*, 2019, 38(8): 1097-1098+1101.
LI W, DONG Y, GAO Q, et al. Research status and analysis of building air tightness in China [J]. *Fire Science and Technology*, 2019, 38(8): 1097-1098+1101.
- [63] 于登云, 张哲, 泮斌峰, 等. 深空探测人工智能技术与展望[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(1): 11-23.
YU D Y, ZHANG Z, PAN B F, et al. Development and trend of artificial intelligent in deep space exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(1): 11-23.
- [64] ANDERSON R C, ADAMO D, BUCZKOWSKI D, et al. Next frontier in planetary geological reconnaissance: low-latency telepresence [J]. *Icarus*, 2021, 368: 114558.
- [65] 张志贤, 果琳丽, 戚发劼. 月面人机联合探测概念研究 [J]. *载人航天*, 2014, 20(5): 432-442.
ZHANG Z X, GUO L L, QI F R. Conceptual study on crew-robot coordinated exploration on lunar surface [J]. *Manned Spaceflight*, 20(5): 432-442.
- [66] 付玉明, 高寒, 李鸿雁, 等. 生物再生生命保障系统内的植物相关微生物研究进展[J]. *航天医学与医学工程*, 2017, 30(2): 152-156.
FU Y M, GAO H, LI H Y, et al. Research progress of microorganisms

- associated with plants in bioregenerative life support system[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2017, 30(2): 152-156.
- [67] 於娟,付玉明. 影响植物栽培的空间飞行因素[J]. *航天医学与医学工程*, 2015, 28(1): 67-73.
- YU J, FU Y M. Factors influencing plant cultivation in space flight[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2014, 27(5): 67-73.
- [68] SUN R X, YI Z H, FU Y M, et al. Dynamic changes in rhizosphere fungi in different developmental stages of wheat in a confined and isolated environment[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2022, 106(1): 441-453.
- [69] YANG J, FU Y, LIU H. Microbiomes of air dust collected during the ground-based closed bioregenerative life support experiment "Lunar Palace 365" [J]. *Environmental Microbiome*, 2022, 17(1): 1-20.
- [70] 杨建楼,付玉明,刘红. 载人航天器内腐蚀材料表面原位修护装置设计. *航天器环境工程* [J]. 2022, 39(3): 255-261.
- YANG J L, FU Y M, LIU H. Design of in situ repair device for the microbial corrosion surface material used in manned spacecraft[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2022, 39(3): 255-261.
- [71] 杨松林,丁平,赵成坚,等. 中国空间站水回收系统关键技术分析[J]. *航天医学与医学工程*, 2013, 26(3): 221-226.
- YANG S L, DING P, ZHAO C J, et al. Techniques for water reclamation system in Chinese Space Station[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2013, 26(3): 221-226.
- [72] 果琳丽,李志杰,齐玢,等. 一种综合式载人月球基地总体方案及建造规划设想[J]. *航天返回与遥感*, 2014, 35(6): 1-10.
- GUO L L, LI Z J, QI B, et al. An overall tentative plan and construction blueprint of manned lunar base[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2014, 35(6): 1-10.
- [73] 熊凯,尹永利,曹勇,等. 未来太空基地内氢气和二氧化碳消除技术研究进展[J]. *载人航天*, 2022, 28(3): 412-418.
- XIONG K, YIN Y L, CAO Y, et al. Research progress of hydrogen and carbon dioxide elimination technology in future space bases[J]. *Manned Spaceflight*, 2022, 28(3): 412-418.
- [74] FURFARO R, SADLER P, GIACOMELLI G. Mars-Lunar Greenhouse (M-LGH) prototype for bioregenerative life support systems in future planetary outposts[C]//Proceedings of 2016 International Astronautical Congress. Guadalajara, Mexico: [s. n.], 2016.
- [75] DU Z, MA Y, ZHAO H, et al. High CO₂-tolerant and cobalt-free dual-phase membranes for pure oxygen separation[J]. *Journal of Membrane Science*, 2019, 574: 243-251.
- [76] DETRELL G, GRIFUL P E, MESSERSCHMID E. Reliability versus mass optimization of CO₂ extraction technologies for long duration missions[J]. *Advances in Space Research*, 2016. 57(11): 2337-2346.
- [77] NABITY J A, KILLELEA J V, SHAFFER B A, et al. Ionic-liquid-based contactors for carbon dioxide removal from simulated spacecraft cabin atmospheres[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2020, 57(6): 1350-1361.
- [78] JADHAV S G, VAIDYA P D, BHANAGE B M, et al. Catalytic carbon dioxide hydrogenation to methanol: a review of recent studies[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2014. 92(11): 2557-2567.
- 作者简介:
谢更新(1971-),男,教授,博士生导师,主要研究方向:环境工程、环境健康与安全、空间环境、航天战略规划与管理。
通信地址:重庆大学教育部深空探测联合研究中心(400044)
E-mail: xiegengxin@cqu.edu.cn
韩娅(1995-),女,硕士,主要研究方向:土壤污染的修复与治理
通信地址:重庆大学教育部深空探测联合研究中心(400044)
E-mail: 1752690462@qq.com

A Tentative Conception of Building Lunar Farm with Lava Tube

XIE Gengxin^{1,2}, HAN Ya^{1,2}, YAN Ming³, XIONG XIN^{1,2}, DING Jinghang^{1,2}, WU Liping^{1,2}

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Center of Space Exploration, Ministry of Education, Chongqing 400044, China;

3. College of Environmental Science & Engineering, Hunan University, Changsha 410012, China)

Abstract: First, the natural advantages of lunar lava tubes and the research on extraterrestrial farms were summarized. Then key technologies for in-situ resource utilization of the moon were summarized, the basic idea for lunar farm construction in lunar lava tubes was given, and a layout of lunar farm based on lunar lava tube was put forward. Finally, the technical difficulties for lunar farm were discussed. This paper provides new reference for lunar farm construction in lava tube.

Keywords: lunar farm; lunar lava tube; in-situ resource utilization of the Moon

Highlights:

- The lunar lava tube is the ideal site for the lunar farm.
- The construction steps for lunar farm are put forward.
- A scheme for the lunar farm construction is put forward.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]