

深空探测生物再生生命保障系统研究进展和发展趋势

刘红^{1,2}, 姚智恺¹, 付玉明^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 生物与医学工程学院 环境生物学与生命保障技术研究所, 北京 100083;
2. 北京航空航天大学 生物医学工程高精尖创新中心, 北京 100083)

摘要: 生物再生生命保障系统是月球基地、载人登陆火星和火星基地等长时间、远距离的载人航天活动的关键技术之一。梳理了生物再生生命保障系统的理论与技术体系, 综述了自20世纪60年代至今, 俄罗斯、美国、欧洲、日本、中国等国家与组织在该领域从生物单元到系统集成研究, 再到有人密闭实验的研究进展, 以及微型水生生物系统的空间实验的尝试。提出了生物再生生命保障系统的发展路径, 指出小型陆生生态系统的空间实验是将该项技术真正应用于太空所需的关键环节, 分析了该项技术未来发展趋势及其地面应用前景。

关键词: 生物再生生命保障系统; 人工闭合生态系统; 地基实验装置; 地外长期生存

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2020)05-0489-11

DOI:10.15982/j.issn.2096-9287.2020.20191021001

引用格式: 刘红, 姚智恺, 付玉明. 深空探测生物再生生命保障系统研究进展和发展趋势[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(5): 489-499.

Reference format: LIU H, YAO Z K, FU Y M. Research status and development trend of Bio-regenerative Life Support System for deep space exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(5): 489-499.

引言

随着人类太空探索的范围不断扩大, 各航天大国近年来推出了载人月球基地以及载人登火的计划。由于这类航天任务持续时间长, 对航天员生命保障要求更高。而且星球之间距离遥远, 常规的补给成本高昂, 且技术上也难以实施。因此需要一种先进的人类在地外生存生命保障系统。生物再生生命保障系统(Bio-regenerative Life Support System, BLSS), 是以生态学原理为基础, 将生物技术与工程控制技术等有机结合, 构建由人、植物、动物、微生物组成的人工闭合生态系统。这个生态系统与地球表面的生态系统具备相同的生产者(植物)、消费者(人/动物)、分解者(微生物)结构, 可实现人所需的氧气、水、食物等生存必须的物质循环再生, 并为人提供类似地球生态系统的舒适环境。BLSS可保障人类在地外长期自治生存, 是载人深空探测的关键技术之一^[1]。BLSS中的物质循环关系如图1所示。

1 生物再生生命保障系统涉及的学科及理论和技术体系

BLSS作为一个高度集成的闭合生态系统, 是一个

多学科交叉的方向, 其理论与技术涵盖了如图2所示的诸多学科领域的前沿内容。

这些学科对BLSS的研究起到非常重要的作用: BLSS的整体物质循环、能量流动以及生物链环之间的关系需要利用生态学手段加以研究并确定; 动物作为BLSS的一个重要组成部分, 需要高效饲养以满足乘员对于动物蛋白质的需求, 因此需要动物学的理论; 同样的, 如何高效栽培植物, 并利用植物调节环境则是植物学需要研究的内容; 系统中的废水、废气、废渣以及噪声等不利因素将需要通过环境工程的手段来解决; 舱室及设备则需要通过材料学、电子信息工程等手段进行合理设计、制作与调控; 计算机科学将可以支撑舱内物质循环及能量流动的仿真实验; 空间生命科学的理论将为未来BLSS真正能够在地外星球应用提供理论基础等等。乘员在BLSS中的生理变化包括体能变化、昼夜节律等方面需要通过医学手段开展研究; 在密闭环境下, 乘员的心理变化以及利用植物园艺疗法调适心理活动则需要利用心理学理论加以解释; 乘员的日常饮食食谱需要靠营养学确定, 保证志愿者均衡膳食; 乘员的肠道微生物变化也将引发包括情绪在内的多种生理指标变化, 同时舱室内部的有害微生物

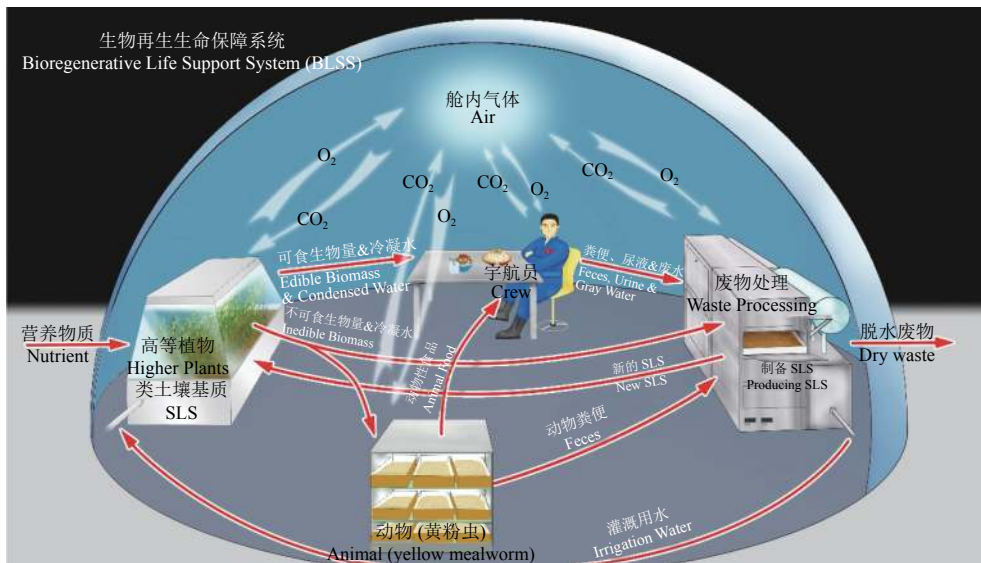


图 1 BLSS的物质循环
Fig. 1 Regenerations in BLSS

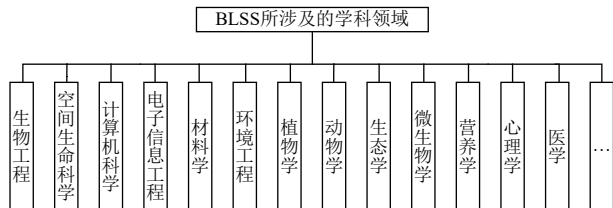


图 2 生物再生生命保障系统研究涉及的学科领域
Fig. 2 Fields of BLSS research

也会对BLSS运行造成不利影响，对舱内的废物进行高效处理利用等，则都需要结合微生物学加以研究。基于多种学科领域的知识体系与研究成果，结合BLSS实际构建、运行需求，发展出BLSS的理论与技术体系如图3所示。

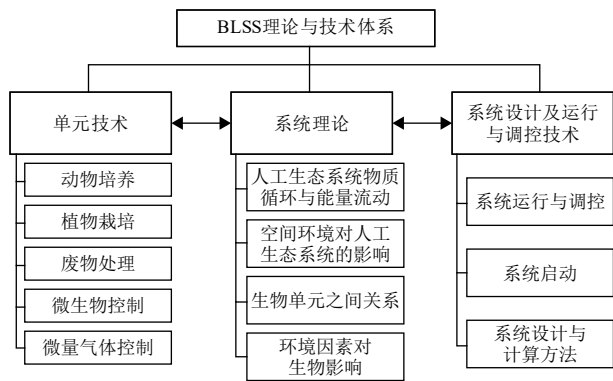


图 3 BLSS理论与技术体系
Fig. 3 Theoretical and technological system of BLSS

纵观各国在BLSS的研究发展都是从单元理论和技术到生态系统理论和技术研究。在研究建立了单元的理论和技术以及系统的设计和构建方法之后，才能进

入有人参与的生态系统实验研究阶段。世界上能够满足基本条件，开展BLSS生态系统有人实验研究的国家与地区在科技领域均具有十分重要的地位。因此构建BLSS地基实验系统，开展生态系统有人实验研究对于该项技术的发展具有重要的里程碑意义。

2 生物再生生命保障系统国内外研究进展

鉴于BLSS技术对于人类地外探索的重要性，自20世纪60年代以来，苏联/俄罗斯、美国、欧洲、日本、中国等国家和地区相继对生物再生生命保障技术开展研究，并先后建立了不同层次、多种类型的BLSS实验系统，进行了的地基模拟实验。

2.1 苏联/俄罗斯

在60年代初期，位于莫斯科的俄罗斯科学院生物医学问题研究所（Institute of Biomedical Problems, IBMP）在世界上首先组织专门部门开展封闭BLSS设计和空间应用研究。该研究所利用单细胞藻类进行了世界上第一次BLSS实验，在5 m³密闭舱内实现了“人-微藻”系统的气体90%自循环，同时发现系统内部的CO₂、CH₄浓度和微生物数量比较稳定^[2]。更进一步的BLSS大型地基综合实验系统的研究任务则由俄罗斯科学院西伯利亚分院生物物理研究所（Institute of Biophysics, IBP）承担，并很快建造了世界上第一座用于研究BLSS的大型地基综合实验装置——BIOS系统。该系统最初仅由一个12 m³的舱室构成，内部装有一个18 L的藻类培养反应器用于空气循环再生，主要进行的是气体循环封闭实验，实验过程中需要的水和

食物全部由外界提供并预先储藏在系统中。有人实验结果表明,该系统在气体循环方面可以实现部分闭合,能满足一个人约20%的物质需求。

为了进一步提高闭合性,研究人员在原系统的基础上进行了扩建,增加了 $2.5 \times 2.0 \times 1.7 \text{ m}^3$ 的植物生长舱,将系统升级为BIOS-2。植物舱在保障气体净化的同时还可以提供部分食物。经过4年的系统调试并开展了90 d的封闭实验后, BIOS-2证明了气体循环能够完全闭合,其中约25%的 O_2 由绿色植物来再生,其余部分由微藻来完成^[9]。

1972年,研究人员在上述工作的基础上建造了 300 m^3 的系统——BIOS-3(见图4),试图使物质循环实现完全闭合^[4]。BIOS-3分别于1972年、1976年、1983年冬天进行了4~6个月的“有人系统实验”。实验结果表明, 63 m^2 的植物种植面积使该系统在气、水循环方面实现完全闭合,并满足2人70%或者3人30%的食物需求,有24%的矿质元素在系统中实现了循环^[5]。同时,“有人实验”还证明了BIOS-3内的植物光合作用强度可以随着系统内环境的变化自动调整^[6]。BIOS-3在“有人实验”中实现了95%的闭合度,这一记录保持了30余年才被打破^[3,7],他们的工作为后来其他国家开展相关研究提供了有价值的参考。

此后,针对BIOS-3项目的成果,俄罗斯科学家提出对BIOS-3进行升级的计划(即BIOS-4)^[8],但最终由于多方面的原因不了了之。

尽管BIOS系统的密闭有人试验已经在20世纪80年代结束,但是其已经充分证明了构建一个基于生物再生生命保障技术的闭合生态系统的可行性。而改进BLSS各个生物单元效率,提高生物单元之间的耦合程度,完善生物单元的调控策略,进一步提高BLSS系统的闭合度与稳定性等目标是俄罗斯从事生命保障研究的科学家的长期追求^[9]。



图4 BIOS-3系统(俄罗斯)^[1]
Fig. 4 BIOS-3 system (Russia)^[1]

2.2 美国

在20世纪60年代初, BLSS的研究同样引起了美国

学者的极大兴趣。1966年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)在艾姆斯研究中心(Ames Research Center)首次召开了关于开展闭合生态系统研究的研讨会,标志着BLSS正式进入NASA的视野^[10]。

1979年, NASA启动了“受控生态生命保障系统计划”(Controlled Ecological Life Support System Program, CELSS计划),致力于全面利用生态学和生物学方法和技术系统开展生命保障研究^[11-12]。后NASA在CELSS基础上,面向月球、火星基地等任务进一步提出了先进生命保障(Advanced Life Support, ALS)理论^[13]。

此外, NASA还与一些美国大学合作进行了密闭环境下的植物栽培实验,建立了生物量生产舱(Biomass Production Chamber, BPC)在内的诸多BLSS试验装置(见图5),同时建立了系统设计数据库,计算确定了在BLSS内种植高等植物所需要的空间体积、设备重量和能耗等^[14-15]。利用生物再生式行星生命保障系统测试装置(Bio-regenerative Planetary Life Support Systems Test Complex, BIO-Plex)实验得出种植 43 m^2 的高等植物在正常情况下可以提供一个人90%的食物营养需求^[16]。



图5 NASA构建的一些BLSS地面实验系统^[20,22]
Fig. 5 BLSS ground experiment facilities established by NASA^[20,22]

1995—1997年, NASA还开展了“月球/火星生命保障试验项目”(Lunar-Mars Life Support Test Project, LMLSTP),将生物再生生命保障技术同传统的物理化学技术有机地结合起来^[17]。研究表明,高等植物与理化系统在空气再生方面具有很高的融合性。生物反应系统的水处理效果达到了航天员的饮用水标准^[18]。此外, LMLSTP项目还针对乘员心理变化开展了研究^[19]。

2010年, NASA开始了舱室演示模块深空居住舱(Habitat Demonstration Unit – Deep Space Habitat, HDU-DSH)工程,这项工程在亚利桑那州的一处沙漠中建立了一套居住舱系统,计划分阶段进行一系列有人系统试验^[20]。最近, NASA还制作了“月球温室原型”

(Prototype Lunar Greenhouse, LGH), 进一步集成新技术与新方法^[21]。

除NASA外, 美国科学家曾以直接模拟地球生物圈的方式, 尝试构建类似BLSS用以研究地球的生态变化。1986年, ALS计划提出后不久, 美国富豪Edward Bass出资两亿美元在美国亚利桑那州沙漠区兴建了举世瞩目的“生物圈2号”(Biosphere-2, 见图6)。系统占地1.3 ha, 总体积 $1.8 \times 10^5 \text{ m}^3$ ^[23]。曾有8名受试者在“生物圈2号”内进行了21个月的实验。但因不科学的设计和运行, 导致系统食物短缺、大气中氧浓度不断下降, 实验最终以志愿者被迫离开“生物圈2号”为结果宣告失败。该系统未达到基本物质(空气、水和食物)在系统水平上的质量平衡^[24-25]。科学家们检讨了实验失败的原因: 包括自然界不同于人工控制系统, 追求“大而全”的设计导致了各物种间的关系难以进行量化; “生物圈2号”内的土壤均采自同一地点, 不具有地球生态系统丰富的土壤类型; 模拟的各类生态系统的空间分布格局及大小比例不合理; 建筑材料的吸附作用导致气体失衡等等^[26]。

实际上, 正是因为自然生态系统内的生物间关系十分复杂, 因此必须全面了解BLSS系统的稳定机制, 掌握相应的调控方法, 限制系统内物种数量, 慎重设计BLSS结构, 才可能保障BLSS的成功。



图6 生物圈2号^[1]
Fig. 6 Biosphere-2^[1]

2.3 日本

1988年, 日本环境科学技术研究所(Institute for Environmental Sciences, IES)开始筹建一座密闭生态实验系统(Closed Ecology Experiment Facilities, CEEF, 见图7)。1994年该系统于青森县六所村开始动工兴建, 1998年完成。日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)随后组织了各主要研究机构和高校的研究人员, 以此系统为平台开展了大量针对BLSS技术的理论和实验研究。



图7 CEEF系统(日本)^[1]
Fig. 7 CEEF (Japan)^[1]

CEEF系统的重要特点是首次引入了动物单元——山羊。在结构上, CEEF主要由密闭植物实验舱、密闭动物饲养舱、人居住实验装置3部分构成。各装置既可以独立运作, 也能彼此组合开展研究, 系统与外界环境之间只有能量交换和信息传递^[27]。此外, 它完全采用物理化学处理设备处理废物, 各单元之间的物质交换也都通过物理化学设备进行^[28], 并利用了计算机技术分析物质循环规律^[29]。其优点是加速系统物质循环, 并且利于控制, 不足之处是忽略了微生物的重要作用, 且系统过于庞大, 需要依赖外部人员对系统进行控制。

早在2004年, CEEF项目组就提出了有人参与的2年密闭的试验。但迄今为止, CEEF仅在2005—2007年多次开展了“人-羊-高等植物”短期密闭试验^[30], 且最长连续实验时间为4周。有学者推测, 大量的物理化学单元的使用而不是依靠生物单元维持BLSS系统的稳定性是造成CEEF系统不能开展长期密闭实验的一个主要原因^[31]。

CEEF于2016年更名为EEF(Ecology Experiment Facilities), 正式放弃密闭实验计划, 但目前系统中的植物培养单元依旧在开展同位素化学分析实验, 将继续研究生态系统中物质循环的方式, 为阐述BLSS系统内物质循环的机理提供参考^[32]。

2.4 欧洲

1989年, 由欧洲航天局(The European Space Agency, ESA)、比利时、西班牙、加拿大共同资助, 正式启动了微生态生命保障系统研究计划(Micro-Ecological Life Support System Alternative, MELiSSA)^[33]。多家大学、研究所和公司等机构在ESA技术中心的统筹管理下共同开展此项研究, 并同德国、爱尔兰、荷兰和俄罗斯等多家研究机构有着密切的合作。在初始设计中, MELiSSA系统由相互连接的多个舱室组成, 主要包括: I-废物降解室, 主要由嗜热厌氧细菌反应器构成; II-光合异养食物生产室, 主要由光合异养细

菌反应器构成; III-硝化室, 主要由亚硝化细菌和硝化细菌反应器构成; IV-光合食物生产和大气再生室, 其中一部分由微藻反应器(IVA)构成, 另一部分由高等植物(IVB)构成; V-乘员室^[34]。这些舱室以及研究所需的设备由分布在欧洲的多所高校及科研机构设计建造并开展单元实验。

MELiSSA系统于2008年进入整合阶段, 计划将实验装置设在西班牙巴塞罗那大学, 原计划到2015年完成。多家高校及科研机构此前已针对系统中的物质循环^[35]、高效植物栽培^[36]等领域开展了研究, 其最终的目标是要实现系统内水、气循环的完全闭合^[37], 满足一个人100%的O₂需求和至少20%的食物需求。但是由于多方原因, MELiSSA项目至今依旧处于各个单元组件实验阶段, 未能构建一个完整系统, 也未能开展有人系统实验^[38]。

2.5 中国

我国从20世纪90年代中期开始进行BLSS方面的探索性研究, 国内诸多高校、科研院所在BLSS的国际调研分析和关键单元技术的研究上开展了大量工作, 提出了我国BLSS的研究方向和发展规划。

自2004年以来, 北京航空航天大学刘红教授科研团队系统深入地开展了BLSS研究工作, 在高等植物栽培^[39]、微藻培养^[40]、植物不可食生物量处理^[41]、水循环利用^[42]、动物筛选^[43]和类土壤基质制备^[44]等单元技术方面做了大量的研究工作。建立了“人-莴苣-藻-蚕”地面小型实验系统, 进行了我国首次有人部分参与的为期

279 d的BLSS地基模拟实验, 志愿者通过呼吸系统内空气的方式参与气体循环^[45], 模拟实验还分析了包括植物、动物、微生物和微藻在内的各物种之间的相互关系^[46-48], 为后续研究奠定了坚实的基础。2013年10月, 我国第一个BLSS地基大型有人综合试验系统——“月宫1号”建成(见图8), 包括1个植物舱, 1个综合舱, 总面积100 m², 总体积300 m³, 种植面积60 m²。2014年在“月宫1号”中完成了我国首次有人高闭度密闭实验, 实验持续了105 d, 3名志愿者栽培了21种粮食、蔬菜作物, 秸秆生物转化后培养黄粉虫, 所有人员的排泄物在系统中处理, 实现了100%的氧气循环, 100%的水循环以及55%的食物循环再生, “月宫1号”的系统整体闭合度为97%, 达到了当时的世界最高水平; 同时它也是世界上首次成功实现了“人-植物-动物-微生物”四生物链环的BLSS^[49]。2016年, “月宫1号”完成了技术升级, 具有2个植物舱, 1个综合舱, 总面积160 m², 体积500 m³, 种植面积120 m²。于2017年5月10日开始“月宫365”实验, 翌年5月15日圆满结束, 历时370 d, 创下了世界上BLSS最长连续运行时间纪录。为了研究BLSS在长时间连续运行工况下的乘员组换班、系统机电故障对系统稳定性的影响, 建立长期稳定运行调控技术, 设置了代谢水平不同的2组乘员, 分3班次交替轮班。实验结果表明, “月宫1号”的BLSS在长期运行过程中具有良好的稳定性, 系统通过自身反馈调节消除了气体扰动的影响, 具有较强的鲁棒性。志愿者栽培了35种植物, 包括粮食、蔬菜作物



图8 “月宫1号”(中国)

Fig. 8 Lunar Palace 1 (China)

和浆果, 植物生产满足乘员植物性食物100%需求, 卫生废水净化效果达到了植物灌溉标准, 尿液和固废循环利用。系统实现了在承载4名乘员的负荷下, 氧气和水100%循环, 食物再生83% (鲜重计), 系统整体闭合度达到98.2%。

研究结果为BLSS的进一步优化和进行动态系统的计算机模拟研究提供了参照, 将为BLSS在月球基地的工程应用提供实验依据和数据参考。

目前“月宫365”实验刚结束一年有余, 研究成果也正在陆续发表^[50-51]。

在“月宫1号”两次有人长期密闭实验中, 志愿者们收获粮食、蔬菜、水果和黄粉虫在系统中自己进行加

工并食用, 不可食用生物量 (如秸秆) 与人的粪便及食物残渣等废物一起采用所研发的生物技术, 处理制备各类土壤基质, 循环用于植物栽培^[52]。综合舱中人、动物和废物处理产生的二氧化碳空气, 经过净化后送达植物舱, 供植物光合作用; 植物舱产生的富氧空气经空气净化后送到综合舱供人和动物呼吸, 并提供废物处理所需氧气^[53]。植物舱中, 植物蒸腾作用产生的冷凝水通过净化后, 一部分由系统补充微量元素, 送到综合舱, 满足人的生活用水^[54]; 其余与净化后的生活废水和尿液一起用于植物栽培^[55]。由此, 形成一个闭环生命保障系统。“月宫1号”中的物质循环见图9。

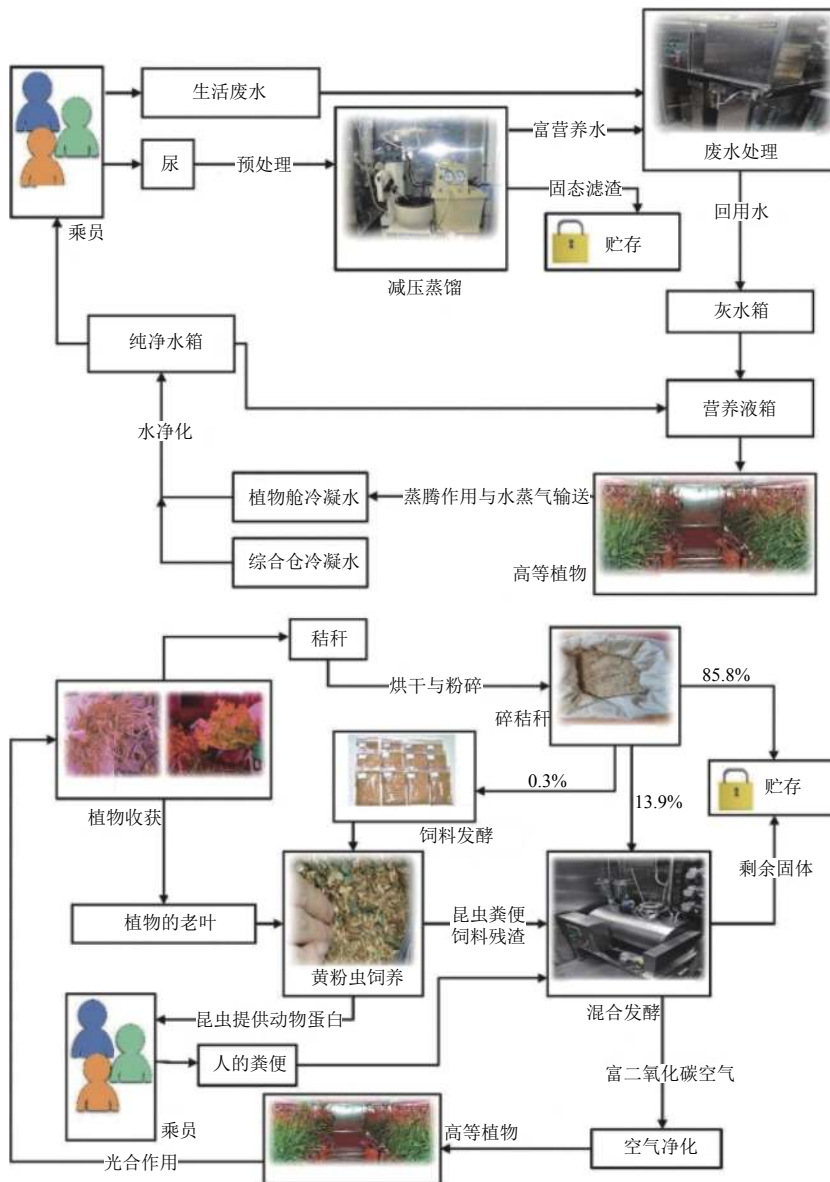


图9 “月宫1号”中的物质循环^[49]

Fig. 9 Regenerations in Lunar Palace 1

除了北京航空航天大学“月宫1号”以外，我国其它科研机构及高校亦对BLSS进行了研究。

中国航天员科研训练中心经过多年的积累，在2011年建立了小型BLSS系统，并于2012年12月1日完成了2人30 d的短期有人封闭实验。此后与深圳市合作共建“深圳市太空科技南方研究院”，开展大型BLSS地面实验装置建设与运行工作，并于2016年6月17日开展“太空180”实验，同年12月14日结束，共有4名志愿者参与，历时180 d。“太空180”实验实现了100%的氧气循环、99%的水循环以及70%的食物循环，取得了医学^[56]以及物质循环^[57]等方面的成果。此外，福建农业科学院采用水生生态系统，利用“人-红萍-鱼”生物链环开展了短期实验，也取得了一定的成果^[58]。

2.6 空间环境下开展的水生生物系统有关的实验

除了在地面上开展的“有人实验”之外，为了更好地研究空间特殊环境对于生物系统的影响，有一些小型水生生物系统进行了空间搭载实验。

1998年，Bluem等利用闭合平衡水生生物系统（Closed Equilibrated Biological Aquatic System, CEBAS）搭载于航天飞机上，借助STS-89飞行任务在世界上第一次成功完成了水生生物系统的空间飞行实验^[59]。其利用金鱼藻、剑尾鱼、光滑双脐螺等生物构建了一个小型的水生生物系统。整个实验持续了9 d，实现了生物系统的短期稳定运行，并在地面建立的对照组，研究了生物系统在失重状态下发生

的变化^[60]。

2011年，我国科学家与德国科学家联合将微型的水生生物系统搭载于“神舟8号”飞船上^[61]。在17.5 d的飞行过程中，由衣藻、小球藻、澳洲红螺等生物构建的微型生物系统。实验研究了失重环境下的群落演替现象以及各种物质的流动状况^[62]，通过设立的对照组，同样研究了失重状态对生物的影响^[63]。

迄今为止进行的空间生物系统实验都是水生生物系统实验，面向空间生命保障的陆生生态系统的空间实验尚未开展。

3 生物再生生命保障系统发展趋势

BLSS发展的最终目标是实现人类在地外的长期自治生存。现有的BLSS有人密闭实验全部为地基综合实验，而地球表面环境与外太空环境在重力、磁场、辐射等方面存在显著的不同，因此BLSS要真正应用于太空中，必须要在空间环境条件下开展陆生生态系统的实验。而目前此方面尚属空白，因此下一阶段针对其在空间环境下运行状况的研究，将成为一大重点^[64]。

针对面向月球、火星表面的BLSS建设任务，需要借助月球、火星探测器所提供的搭载资源，在月球、火星表面开展微型陆生生态系统的长期运行实验研究。通过在空间环境下和地面环境下实验数据对比，取得校正参数和模型，以用于矫正地面大型“有人实验”系统获得的参数和模型，才能建立可应用于空间的BLSS技术（图10）。

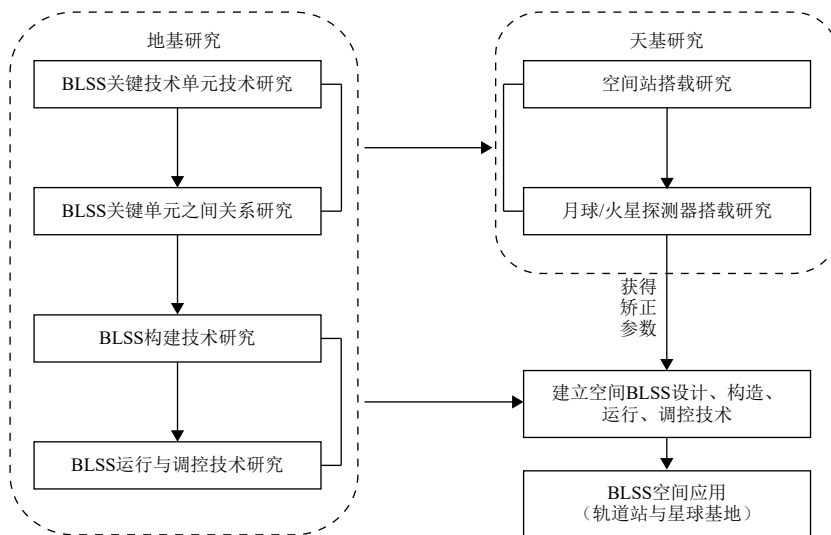


图 10 BLSS技术研究发展路径

Fig. 10 The Development Path of BLSS Technologies Research

在子系统层面，BLSS还需与月球、火星基地的实际相结合，考虑运载工具的运力需求、各生物生长周

期、设备运行环境变化、航天员身心变化及当地资源原位利用等因素，在设计上可引入大量新方法、新思

维,与已有的其他领域进展实现有机结合。例如BLSS可以利用柔性舱段技术拓展内部空间,以提供更大的生物培养区域^[65];利用杂交技术、纳米粒子^[66]、植物益生菌^[67]等培育生长周期更短、产量更高的植物;利用转基因技术培育废物处理效率更高的微生物;开展更深入的物质资源循环研究,将更多的物种引入BLSS中,不仅可以提高系统中的食物闭合度,也可以丰富舱内乘员组的食谱,进一步保证乘员组的健康^[68];利用植物园艺疗法、光周期调控以及合适的心理疏导等手段,为处于幽闭环境中的乘员组提供心理关怀^[69];基于资源原位利用的基础,合理利用目标天体当地的多种资源,减少生命保障物资运输需求^[70-71];在地外天体上运行的空间基地内环境还需要定期进行微生物清除和消毒,进行微生物的防控,以防天体与舱室之间发生交叉污染^[72-73]等等。

在实际的工程建设层面,BLSS未来需要进一步向轻量化、自动化、实时化、模块化^[74]方向发展,为人类实现地外长期自治生存这一目标提供工程基础。例如将BLSS的设备轻量化,将降低BLSS的发射成本;BLSS中的生物培养系统、农业采收系统、食物加工系统若实现高度自动化,则可以令乘员组从繁重的体力劳动中解放,更多地投身于科学研究;实时化的BLSS监测系统,结合系统运行模型,将可以预测BLSS内部物质循环、能量流动的变化情况,做到系统的实时调控及预警,维持系统的正常运行;模块化的BLSS不仅便于管理,也可以保证系统的稳定。

在地面推广与应用层面,BLSS的理论与技术成果不仅可以应用于太空,还可以应用于水下、地下的密闭舱室和荒漠科考站^[75]、边防哨所等生态脆弱、补给不便的地区,最小限度干扰当地环境,最大程度降低补给成本。其衍生技术例如植物栽培高效技术、植物秸秆等固体废弃物发酵技术也可以技术转移至民用领域,进一步提升农业效率,降低环境污染等等,具有广阔的发展前景。

同时也需看到,当前的BLSS从物种数量、能量流动情况、复杂度等方面而言,远远无法与以地球生物圈为基础的自然生态系统相比。从前哨基地到真正具有规模的永久基地乃至星球城镇,需要经过几代人甚至十几代人的努力。但我们依旧相信在未来,BLSS终 will 实现规模从小型化到大型化,物种之间的关系从简单到复杂,生态系统组成从陆生到陆生/水生结合等发展^[76-77]。

4 结束语

“地球是人类的摇篮,但人类不可能永远生活在摇篮里”。BLSS作为人类未来走向浩瀚宇宙的重要技术,涵盖了多学科的成果,具有很强的交叉性,是当前世界主要航天大国竞相开展的重要研究方向。

作为一个以人为核心的密闭生命保障系统,“有人长期密闭实验”能否开展是验证BLSS理论与技术是否正确关键,系统闭合度高低、系统内生物链环的多少是BLSS理论与技术是否先进的体现。目前最先进的BLSS已实现4人370 d的生存,闭合度达到98%,已经基本可以满足月球驻留需求。而要想真正实现月球、火星基地的建设,还需要从更多方面考虑,因地制宜发挥其作用,最大限度保障乘员能够在其中实现长期正常工作生活。同时,BLSS相关技术还可以推广,服务于地球上人们的生活。

现今的BLSS研究仅仅是个开端,还存在相当可观的发展空间,相信未来也会有更加深入而广泛的研究得到开展。只要人类探索太空的步伐不止,BLSS的发展也将永远不息。

参 考 文 献

- [1] 刘红, GITELSON I I, 胡恩柱, 等. 生物再生生命保障系统理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
LIU H, GITELSON I I, HU E Z, et al. Theory and technology of bioregenerative life support system [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [2] SHEPELEV Y. Human life support systems in spaceship cabins on the basis of biological material cycling[J]. Space Biology and Medicine, 1966: 330-342.
- [3] SALISBURY F B, GITELSON I I, LISOVSKY G M. BIOS-3: Siberian experiments in bioregenerative life support[J]. Bioscience, 1997, 47: 575-585.
- [4] SYCHEV V N, LEVINSKIKH M A, GURIEVA T S, et al. Biological life support systems for space crews: some results and prospects[J]. Human Physiology, 2011, 37(7): 784-789.
- [5] GRIBOVSKAYA I V, KUDENKO Y A, GITELSON J I. Element exchange in a water-and gas-closed biological life support system[J]. Advances in Space Research, 1997, 20(10): 2045-2048.
- [6] GITELSON I I, TERSKOV I A, KOVROV B G, et al. Life support system with autonomous control employing plant photosynthesis[J]. Acta Astronautica, 1976, 3(9-10): 633-650.
- [7] GITELSON I I, TERSKOV I A, KOVROV B G, et al. Long-term experiments on man's stay in biological life-support system[J]. Advances in Space Research, 1989, 9(8): 65-71.
- [8] BARTSEV S I, MEZHEVIKIN V V, OKHONIN V A. BIOS-4 as an embodiment of celss development conception[J]. Advances in Space Research, 1996, 18(1/2): 201-204.
- [9] DEGERMENDZH I A G, TIKHOMIROV A A. Designing artificial closed land-and space-based ecosystems[J]. Herald of the Russian Academy of Sciences, 2014, 84(2): 124-130.

- [10] DRAKE G L, KING C D, JOHNSON W A, et al. Study of life-support systems for space missions exceeding one year in duration. closed life-support system: NASA-SP-134 [R]. California, USA: Ames Research Center, National Aeronautics and Space Administration, 1966.
- [11] WALLACE J S, POWERS J V. Publications of the NASA Controlled Ecological Life Support System (CELSS) program, 1979—1989 [M]. Washington, D. C.: The George Washington University, 1990.
- [12] MITCHELL C A. Bioregenerative life-support systems[J]. *American journal of clinical nutrition*, 1994, 60: 820S-824S.
- [13] HENNINGER D L, TRI T O, PACKHAM N J C. NASA's advanced life support systems human-rated test facility[J]. *Advances in Space Research*, 1996, 18(1/2): 223-232.
- [14] WHEELER R M, MACKOWIAK C L, STUTTE G W, et al. NASA's biomass production chamber: a testbed for bioregenerative life support studies[J]. *Advances in Space Research*, 1996, 18(1/2): 215-224.
- [15] WHEELER R M, MACKOWIAK C L, STUTTE G W, et al. Crop productivities and radiation use efficiencies for bioregenerative life support[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41: 706-713.
- [16] WHEELER R M, STRAYER R F. Use of bioregenerative technologies for advanced life support: some considerations for bio-plex and related testbeds: NASA-TM-113229[R]. Florida, USA: Kennedy Space Center, National Aeronautics and Space Administration, 1997.
- [17] KLOERIS V, VODOVOTZ Y, BYE L, et al. Design and implementation of a vegetarian food system for a closed chamber test[J]. *Life Support & Biosphere Science: International Journal of Earth Space*, 1998, 5(2): 231-242.
- [18] HENNINGER D L. Isolation: NASA experiments in closed-environment living-advanced human life support enclosed system final report [M]. USA: Univelt, 2002.
- [19] HOLLAND A W, CURTIS K. Operational psychology countermeasures during the Lunar-Mars life support test project[J]. *Life Support & Biosphere Science: International Journal of Earth Space*, 1998, 5(4): 445-452.
- [20] KENNEDY K J. NASA Habitat demonstration unit project – deep space habitat overview [C]//41st International Conference on Environmental Systems. Portland, Oregon: [s. n.], 2011.
- [21] BOSCHERI G, KACIRA M, PATTERSON L, et al. Modified energy cascade model adapted for a multicrop lunar greenhouse prototype[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 50(7): 941-951.
- [22] HOSSNER L R, MING D W, HENNINGER D L, et al. Lunar outpost agriculture[J]. *Endeavour*, 1991, 15(2): 79-85.
- [23] DEMPSTER W F. Biosphere 2 engineering design[J]. *Ecological Engineering*, 1999, 13(1-4): 31-42.
- [24] NELSON M, DEMPSTER W, ALVAREZ-ROMO N, et al. Atmospheric dynamics and bioregenerative technologies in a soil-based ecological life support system: initial results from biosphere 2[J]. *Advance in Space Research*, 1994, 14(11): 417-426.
- [25] ALLEN J. Biospheric theory and report on overall Biosphere 2 design and performance[J]. *Life Support & Biosphere Science: International Journal of Earth Space*, 1997, 4(3-4): 95-108.
- [26] ALLEN J P, NELSON M, ALLING A. The legacy of Biosphere 2 for the study of biospherics and closed ecological systems[J]. *Advances in Space Research*, 2003, 37(7): 1629-1639.
- [27] MASUDA T, ARAI R, KOMATSUBARA O, et al. Development of a 1-week Cycle Menu for an Advanced Life Support System (ALSS) utilizing practical biomass production data from the Closed Ecology Experiment Facilities (CEEF)[J]. *Habitation*, 2005, 10: 87-97.
- [28] NITTA K. The CEEF, closed ecosystem as a laboratory for determining the dynam of radioactive isotopes[J]. *Advances in Space Research*, 2001, 27(9): 1505-1512.
- [29] MIYAJIMA H. Practice of simulation study for space habitation and life support systems[J]. *Eco-engineering*, 2017, 29(2): 57-64.
- [30] TAKO Y, ARAI R, TSUGA S, et al. CEEF: closed ecology experiment facilities[J]. *Gravitational and Space Biology*, 2010, 23(2): 13-24.
- [31] SYCHEV V N, LEVINSKIKH M A, GUR'EVA T S, et al. Biological life support systems for space crews: some results and prospects[J]. *Human Physiology*, 2011(7): 784-789.
- [32] TAKO Y. Habitation experiments conducted circulating materials inside “Closed Ecology Experiment Facilities”[J]. *Eco-engineering*, 2018, 30(4): 103-106.
- [33] FULGET N, POUGHON L, RICHALET J, et al. MELiSSA: global control strategy of the artificial ecosystem by using first principles models of the compartments[J]. *Advances in Space Research*, 1999, 24(3): 397-405.
- [34] JEREMY W, CÉLINE G. MELiSSA the minimal biosphere: human life, waste and refuge in deep space[J]. *Futures*, 2017, 92: 59-69.
- [35] FARGES B, POUGHON L, RORIZ D, et al. Axenic cultures of nitrosomonas europaea and nitrobacter winogradskyi in autotrophic conditions: a new protocol for kinetic studies[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2012, 167: 1076-1091.
- [36] PARADISO R, DE MICCO V, BUONOMO R, et al. Soilless cultivation of soybean for bioregenerative life-support systems: a literature review and the experience of the melissa project – food characterization phase I[J]. *Plant Biology*, 2014, 16(1): 69-78.
- [37] LASSEUR C, BRUNET J, DE WEEVER H, et al. MELiSSA: the European project of closed life support system[J]. *Gravitational and Space Biology*, 2010, 23(2): 3-12.
- [38] HENDRICKX L, DE WEVER H, 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: 77-86.
- [39] HU E Z, TONG L, HU D W, et al. Mixed effects of CO₂ concentration on photosynthesis of lettuce in a closed artificial ecosystem[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37: 2082-2086.
- [40] HU D W, LIU H, YANG C, et al. The design and optimization for light-algae bioreactor controller based on artificial neuralnetwork-model predictive control[J]. *Acta Astronautica*, 2008, 63: 1067-1075.
- [41] YU C Y, LIU H, XING Y D, et al. Bioconversion of rice straw into soil-like substrate[J]. *Acta Astronautica*, 2008, 63: 1037-1042.
- [42] YANG C L, LIU H, LI M, et al. Treating urine by Spirulina platensis[J]. *Acta Astronautica*, 2008, 63: 1049-1054.
- [43] LI L Y, ZHAO Z R, LIU H. Feasibility of feeding yellow mealworm (*Tenebrio Molitor L*) in Bioregenerative life support systems as a source of animal protein for Humans[J]. *Acta Astronautica*, 2013, 92(1): 103-109.
- [44] KANG W L, HE W T, LI L Y, et al. Characteristics of the soil-like substrates produced with a novel technique[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 50: 1495-1500.
- [45] LI M, HU D W, LIU H, et al. *Chlorella vulgaris* culture as a regulator

- of CO₂ in a bioregenerative life support system[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 52: 773-779.
- [46] TONG L, HU D W, LIU H, et al. Gas exchange between Humans and multibiological life support system[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37: 2025-2034.
- [47] TONG L, LI M, HU E Z, et al. The Fluxes of carbon, nitrogen and water in the multibiological life support system[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 43: 91-94.
- [48] TONG L, HU D W, FU Y M, et al. Growth characteristics comparison of lettuce and silkworms in and out of the multibiological life support system[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47: 105-109.
- [49] FU Y M, LI L Y, XIE B Z, 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): 1-12.
- [50] ZHU G R, LIU G H, LIU D L, et al. Research on the hydrolysis of Human urine using biological activated carbon and its application in bioregenerative life support system[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 155: 191-199.
- [51] HAO Z K, ZHU Y Z, FENG S Y, et al. Effects of long term isolation on the emotion change of "Lunar Palace 365" crewmembers[J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(13): 881-884.
- [52] LIU D L, XIE Z, DONG C, et al. Effect of fertilizer prepared from Human feces and straw on germination, growth and development of wheat[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 145: 76-82.
- [53] DONG C, LIU G H, FU Y M, et al. Twin studies in chinese closed controlled ecosystem with Humans: the effect of elevated CO₂ disturbance on gas exchange characteristics[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 126-130.
- [54] HU D W, LI L, LIU H, et al. Design and control of rotating soil-like substrate plant-growing facility based on plant water requirement and computational fluid dynamics simulation[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 64: 269-275.
- [55] XIE B Z, ZHU G R, LIU B J, et al. The water treatment and recycling in 105-day bio-regenerative life support experiment in the lunar palace 1[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 140: 420-426.
- [56] YUAN M, CUSTAUD M A, XU Z, et al. Multi-System Adaptation to confinement during the 180-day Controlled Ecological Life Support System (CELSS) experiment[J]. *Frontiers in Physiology*, 2019, 10: 1-22.
- [57] LI T, ZHANG L C, AI W D, et al. A modified mbr system with post advanced purification for domestic water supply system in 180-day CELSS: construction, pollutant removal and water allocation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 222: 37-43.
- [58] 陈敏, 邓素芳, 杨有泉, 等. 受控生态生保系统内红萍供氧特性研究 [J]. *空间科学学报*, 2012, 32(2): 223-229.
- [59] BLUEM V. C. E. B. A. S., a closed equilibrated biological aquatic system as a possible precursor for a long-term life support system[J]. *Adv. Space Res.*, 1992, 12: 193-204.
- [60] BLUEM V, ANDRISKE M, PARIS F, et al. The C. E. B. A. S.-minimodule: behaviour of an artificial aquatic ecological system during spaceflight[J]. *Adv. Space Res.*, 2000, 26: 253-262.
- [61] PREU P, BRAUN M. German SIMBOX on Chinese mission Shenzhou-8: Europe's first bilateral cooperation utilizing China's Shenzhou programme[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 94: 584-591.
- [62] LI X Y, RICHTER P R, HAO Z J, et al. Operation of an enclosed aquatic ecosystem in the Shenzhou-8 mission[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 134: 17-22.
- [63] LI X Y, LI G B, LI D H, et al. Spaceflight microgravity reduced photosynthetic electron transport and altered energy distribution in *euglena gracilis*[J]. *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 2016, 43(9): 887-894.
- [64] FISCHER J, SCHOPPMANN K, LAFORSCH C. Life history responses and feeding behavior of microcrustacea in altered gravity-applicability in Bioregenerative Life Support Systems (BLSS)[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2017, 29(3): 241-249.
- [65] ELSABBAGH A. Nonlinear finite element model for the analysis of axisymmetric inflatable beams[J]. *Thin-walled Structures*, 2015, 96: 307-313.
- [66] GAO H, QIN Y C, GUO R, et al. Enhanced plant growth promoting role of mPEG-PLGA-based nanoparticles as an activator protein peat1 carrier in wheat (*triticum aestivum L.*)[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2018, 93: 3143-3151.
- [67] FU Y M, GAO H, LI H Y, et al. Change of growth promotion and disease resistant of wheat seedling by application of biocontrol bacterium *pseudochrobactrum kiredjianiae* A4 under simulated microgravity[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 139: 222-227.
- [68] HAO Z K, LI L Y, FU Y M, et al. The influence of Bioregenerative Life-Support System dietary structure and lifestyle on the gut microbiota: a 105-day ground-based space simulation in lunar palace 1[J]. *Environmental Microbiology*, 2018, 20(10): 3643-3656.
- [69] LI Z M, LIU H, ZHANG W Z, et al. Psychophysiological and cognitive effects of strawberry plants on people in isolated environments[J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE B*, 2020, 21(1): 53-63.
- [70] KOZYROVSKA N O, LUTVYNENKO T L, KORNIICHUK O S, et al. Growing pioneer plants for a lunar base[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37: 93-99.
- [71] GILRAIN M R, HOGAN J A, COWAN R M, et al. Preliminary study of greenhouse grown swiss chard in mixtures of compost and Mars regolith simulant [C]//29th International Conference on Environmental Systems, USA: [s. n.], 1999.
- [72] LI L, FU Y M, LIU H Development of effective and safe compound disinfectant for space cabins[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 159: 480-485.
- [73] 许心铭, 胡大伟, 付玉明, 等. 低剂量电离辐射环境下微生物群落物种多样性的产生和维持机制[J]. *深空探测学报*, 2019, 6(1): 31-36.
- XU X M, HU D W, FU Y M, et al. Formation and maintenance mechanism of species diversity in the course of microbial succession under low dose ionizing radiation[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(1): 31-36.
- [74] NELSON M, DEMPSTER M F, ALLEN J P. "Modular biospheres"—new testbed platforms for public environmental education and research[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41(5): 787-797.
- [75] POLYAKOV Y S, MUSAEV I, POLYAKOV S V, et al. Closed bioregenerative life support systems: applicability to hot deserts[J]. *Advances in Space Research*, 2010, 46(6): 775-786.
- [76] GONZALES J M. Aquaculture in Bio-regenerative Life Support Systems (BLSS): considerations[J]. *Advances in Space Research*, 2005, 43(8): 1250-1255.
- [77] YANG L M, LI H K, LIU T G, et al. Microalgae biotechnology as an attempt for Bioregenerative Life Support Systems: problems and

prospects[J]. *Journal of Chemical Technology and Bio-technology*, 2019, 94(10): 3039-3048.

作者简介:

刘红(1964-),女,教授,博士生导师,主要研究方向:特殊环境生命保障和生物安全、光生物学与光保健、肠道微生物学与精神健康、高

端植物工厂。

通讯地址:北京市海淀区学院路37号北京航空航天大学逸夫馆424(100083)

电话:(010) 82339837

E-mail:Lh64@buaa.edu.cn

Research Status and Development Trend of Bio-regenerative Life Support System for Deep Space Exploration

LIU Hong^{1,2}, YAO Zhikai¹, FU Yuming^{1,2}

(1. Institute of Environmental Biology and Life Support Technology, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Beijing Advanced Innovation Center for Biomedical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Bio-regenerative life support system (BLSS), is one of key technologies for long-term and long-distance manned space missions such as manned Mars landing and the establishment of lunar and Mars bases. The theories and technologies of BLSS are summarized. Countries and organizations including Russia, USA, Europe, Japan and China have conducted a series of research in BLSS, from bio-unit test, systematic test to manned closed experiment and aquatic micro-ecosystem experiments in space. The development path of BLSS is proposed, and it points out that small-scale terrestrial ecosystem is the key part for the application of BLSS to space. The tendency and ground application prospect of technologies derived by BLSS are analyzed as well.

Keywords: Bio-regenerative Life Support System; man-made closed ecological system; ground based experimental facility; long-term extraterrestrial life support

Highlights:

- The research status of bio-regenerative life support systems around the world are summarized.
- The key points and difficulty of bio-regenerative life support system are analyzed.
- The bio-regenerative life support system of ground based facility “Lunar Palace 1” and its achievements are presented.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]