

2021年国际空间站科研与应用进展

韩淋, 王海名, 范唯唯, 李超, 李国鹏, 杨帆*

中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190

摘要 回顾了2020年10月至2021年10月国际空间站在技术开发与验证、物理科学、生物学与生物技术、教育和文化活动、人体研究及地球与空间科学6个领域的科研与应用情况,分析了各领域的代表性新实验,盘点了这一时期取得的亮点研究成果。分析表明,2021年国际空间站继续开展大规模的科研与应用活动,美国、日本、欧洲和加拿大的航天机构在6大研究领域支持开展了313项实验,其中在国际空间站首次开展的新实验超过40%。同时,国际空间站正处于科研与应用产出高峰期,6大研究领域都持续产出新的亮点科研成果,例如微重力生物采矿表现更好、观测地球蓝色喷流等,吸引了全球科技界的广泛关注。

关键词 国际空间站;长期考察任务;微重力

总重420 t的国际空间站是当前在轨运行最大的空间平台,同时也是一个拥有现代化科研设备,可开展大规模、多学科的基础和应用科学研究的空间实验室(图1)。国际空间站的组装建设始于1998年,初期工作主要集中在空间站建设方面;自2000年11月以来持续有人驻站,在2009年实现可支持6人长期驻站,航天员用于科学研究的时间大幅增加;2011年基本完成建设,此后进入全面应用阶段。各类科研设备载荷和长期有人驻守为在微重力环境下开展多种多样的科学研究与应用实验提供了支撑。当前,国际空间站支持在技术开发与验证、物理科学、生物学与生物技术、教育和文化活动、人体研究及地球与空间科学6大研究领域长期

持续开展丰富多样的科研实验项目,并持续产出许多重要的科学研究成果,催生重大科学发现、服务国计民生、推进未来深空探索等应用效益逐渐显现,同时促进了空间和地面上的创新应用发展。

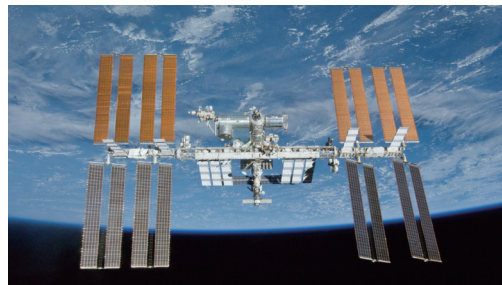


图1 国际空间站
(图片来源:NASA网站)

收稿日期:2022-02-21;修回日期:2022-04-29

基金项目:中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA15015900);中国科学院科技战略咨询研究院院长青年基金项目(E0X3731Q)

作者简介:韩淋,副研究员,研究方向为空间科技战略情报,电子信箱:hanlin@casipm.ac.cn;杨帆(通信作者),研究员,研究方向为空间科技战略情报,电子信箱:yangfan@casipm.ac.cn

引用格式:韩淋,王海名,范唯唯,等. 2021年国际空间站科研与应用进展[J]. 科技导报, 2022, 40(12): 5-12; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.12.001

2021年4月29日,中国空间站天和核心舱在海南文昌发射场成功发射^[1]。这不仅标志着中国载人航天工程“三步走”成功迈出第三步,开始建造长期有人照料的空间站,更宣告了中国开启空间站任务的新时代。中国空间站以天和核心舱、问天实验舱、梦天实验舱3舱为基本构型,按照建造任务规划,将接续实施11次飞行任务,包括3次空间站舱段发射、4次货运飞船以及4次载人飞船发射,于2022年完成空间站在轨建造。中国空间站未来科研应用规划已成为工程推进的新重点。

本文基于美国国家航空航天局(NASA)国际空间站计划网站公布的实验信息^[2]和NASA发布的国际空间站年度成果报告^[3],进行统计分析、文本挖掘、文献揭示和综合研判,概述国际空间站2021年科研与应用活动的总体情况。

1 2021年国际空间站科研应用活动概况

国际空间站按长期考察任务批次规划、实施和发布科研实验项目情况。通过对NASA国际空间站计划网站公布信息的梳理,2020年10月至2021

年4月开展的国际空间站第64次长期考察任务和2021年4月至2021年10月开展的国际空间站第65次长期考察任务在技术开发与验证、物理科学、生物学与生物技术、教育和文化活动、人体研究及地球与空间科学6大研究领域共开展了313项科学研究实验。美国国家航空航天局(NASA)、日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)、欧洲航天局(ESA)和加拿大航天局(CSA)在6大研究领域支持开展的实验项目数及其中新实验的项数如表1所示。由于俄罗斯国家航天集团公司(Roscosmos)未公布第64~65次长期考察任务实验数据,数据统计中不包括俄罗斯支持开展的空间科学实验情况。

在第64~65次长期考察任务开展的全部313项实验中,NASA支持开展200项,其中技术领域实验最多,其次为物理和生物领域实验。JAXA和ESA总实验数接近,JAXA支持的技术和生物领域实验相对较多,ESA支持的技术、人体研究、教育领域实验相对较多。CSA支持的人体研究实验相对较多。在全部313项实验中有133项为新实验,其中82项由NASA支持开展,技术、生物和教育领域的新实验较多。

表1 各航天机构在各研究领域支持开展的实验项数

机构	领域						总计
	技术开发与验证	物理科学	生物学与生物技术	教育和文化活动	人体研究	地球与空间科学	
NASA	55(23)	49(16)	43(21)	22(13)	18(5)	13(4)	200(82)
JAXA	16(12)	8(1)	13(4)	7(5)	4(0)	6(2)	54(24)
ESA	12(8)	10(2)	5(4)	12(9)	12(2)	2(1)	53(26)
CSA	1(0)	0(-)	0(-)	1(1)	4(0)	0(-)	6(1)
总计	84(43)	67(19)	61(29)	42(28)	38(7)	21(7)	313(133)

2 2021年国际空间站科研应用进展

2.1 技术开发与验证实验

技术开发与验证实验共计84项,其中43项为新实验,NASA、JAXA和ESA分别支持开展了23项、12项和8项新实验(表1),小卫星及控制技术、机器人技术等研究方向的新实验最多。

NASA的新实验Alpha实验部署一颗1U立方体卫星(1U尺寸为10 cm×10 cm×10 cm),旨在验证用于太阳帆的高逆反射材料并在轨测试下一代芯片卫星的关键功能,同时还将验证利用3D打印技术生产立方体卫星结构的可行性。自主机动的关联操作实验使用Astrobee自由飞行机器人观测空间碎片的翻滚行为,同时测试未来机器人自主对

接、脱离轨道以及在轨维修所需的多种算法。卫星蜂群和机器人机动实验通过测试多个 Astrobee 自由飞行机器人之间、机器人与货物之间以及机器人与运行环境的协调,验证自主在轨机器人服务(如组装和移动货物)能力。自主自适应护理综合系统实验使用国际空间站多种机器人,验证在航天器中使用自主机器人跟踪航天器的健康状况,转移/拆开货物,并对泄漏和火灾等关键故障做出响应等。红线风化层打印机实验利用国际空间站上的空间制造设备,在微重力下使用风化层原料开展 3D 打印,旨在帮助确定使用行星体上可用资源作为按需建造住房和其他结构的原材料的可行性。纳米流体植入物通信实验通过开展地球与国际空间站可植入式给药系统之间的远程通信,精确控制药物的释放,从而实现在微重力下执行复杂或繁琐的药物输送方案。JAXA 利用暴露实验扶手连接结构开展了 3 项新实验:(1) 空间皮肤实验测试将电子器件和传感功能集成到纺织品中的电子织物技术,将首次在轨测试织物传感器对空间环境的耐久性。(2) 天线金属网实验测试铜铝天线金属网暴露于空间环境下的耐久性,这种天线有望用于建造航天器的大型可展开反射天线。(3) 光盘空间暴露实验项目测试光盘暴露于空间环境下的耐久性,将送返地面验证存储数据是否仍能读出。空间绳系自主机器人卫星-立方体卫星电梯实验包括 3 个独立的 1U 立方体卫星,2 个卫星由 22 m 长的刚性胶带系绳相连,另一个贯穿在系绳上的卫星可来回移动,实验数据用于分析微型电梯的性能。ESA 新实验小型体温计验证一种通过计算头部或胸部的热通量来测量核心体温的新设备,以期深入了解长时间空间飞行中的人体体温调节情况。飞行员实验使用虚拟现实和基于触觉的新型人机界面,测试用于远程操作机械臂和空间飞行器的新型控制方案的有效性,旨在进一步评估特定重力下的人体工程学标准。超声波镊子实验开发基于超声波束的声镊,以允许在微重力环境中远程和非接触式操作材料。先进航天食品系统实验测试一种具备选择打浆和精细混合能力的原型食品加工设备,帮助在未来实现功能齐备的航天食品加工能力,如称重、混合、揉

捏、加热、干燥、烹饪等功能。此外,机器人加注任务-3 等 41 项实验继续开展。

在新成果方面,JAXA 支持开展的暴露实验扶手连接结构-辐射屏蔽实验,评估了空间环境如何影响使未来航天器免受宇宙线和其他类型电离辐射的材料。研究表明^[9],在聚合物材料中添加硬硼钙石可减少材料吸收的辐射量,暴露于空间辐射的样品与未暴露于这些恶劣条件下的样品没有显著差异。该材料可以为卫星技术、近地轨道空间站和高空飞机等提供更好的辐射防护,并用于某些地球上的恶劣环境。NASA 支持开展的水泥固化微重力研究实验,将水泥粉末与各种添加剂和水混合,研究凝固过程中的化学过程和微观结构,探索重力变化的影响。研究表明^[9],微重力下铝酸三钙和石膏混合物形成独特的微观结构,呈现更高的多孔性,可能影响材料强度。这些发现有助于开发用于空间建造的新材料。

2.2 物理科学实验

物理科学实验共计 67 项,其中新实验有 19 项,NASA、ESA 和 JAXA 分别支持开展了 16 项、2 项和 1 项新实验(表 1),材料科学和流体物理研究方向的新实验最多。

NASA 国际空间站材料暴露系列研究开展了 3 项新实验,对离轨材料、相变材料、辐射防护材料、混凝土、航天器材料、玻璃纤维复合材料、薄膜太阳能电池、微型光学芯片、涂层、3D 打印聚合物、纳米金属和纳米陶瓷、作物种子等进行空间环境暴露研究。轨道空气动力学研究卫星是一个 3U 的立方体卫星,将研究空气动力学和气体-表面相互作用,测量热层中的风,验证卫星在低空轨道上的空气动力学姿态和控制,以助力低阻力材料研究,设计低空航天器。空间飞行中多种生物膜生长和控制实验,探索生物膜的形成、银基消毒方法抑制生物膜的有效性、混合生物膜对不锈钢的腐蚀作用等。基于蛋白质制造人工视网膜实验评估微重力下细菌视紫红质制造系统的性能。细菌视紫红质是一种光激活蛋白,可替代眼睛受损感光细胞的功能。视网膜植入物是利用逐层静电吸附工艺制造,微重力环境可减少聚集和沉积作用,从而改进制造质量和

稳定性。气体冷焰研究实验观察采用丙烷、正丁烷和乙烷燃料的球形冷扩散火焰的化学反应,验证冷焰模型,改进对地面燃烧和火灾的理解。ESA 透明合金-METCOMP 新实验利用新戊二醇-三羟甲基氨基甲烷有机透明模型系统,原位观察包晶合金系统层状结构随时间的形成过程。电磁悬浮炉-批次3-钢连铸冷激冷却实验利用电磁悬浮炉,处理铁与碳、锰、硅、铬、钨等组成的合金样品,模拟连铸产品外表面的凝固过程。JAXA 电磁悬浮炉-快堆严重事故分析用控制棒共晶熔化材料的热物理特性新实验,首次采集模拟碳化硼和不锈钢混合物熔化行为材料的热物理性能数据,用于钠冷快堆严重事故情景模型分析。此外,冷原子实验室-玻色-爱因斯坦凝聚气泡动力学等48项实验继续开展。

在新成果方面,NASA 支持开展的火焰设计实验(图2),利用燃烧集成机架研究气体燃料球形火焰的烟尘产生与控制。研究者开展了一系列观测^[6],包括火焰增长率、燃烧器加热和火焰半径的耦合关系、火焰开始熄灭时的振荡、燃料流速和火焰温度之间的关系等。这些观测增强了对火焰行为的理解,并有助于确保航天器的安全。

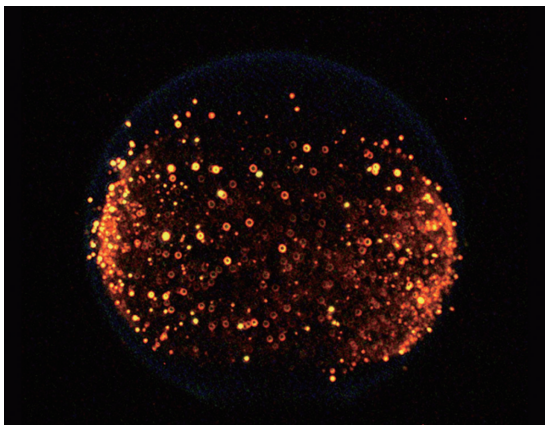


图2 火焰设计实验中点燃的火焰
(图片来源:NASA网站)

2.3 生物学与生物技术实验

生物学与生物技术实验共计61项,其中新实验有29项。NASA、JAXA和ESA分别支持开展了21项、4项和4项新实验(表1),细胞生物学、动物生物学和微生物学研究方向的新实验最多。

NASA 高等植物系列研究开展了2项新实验,一项是研究重力和空间飞行其他相关环境因素如何在基因表达水平上影响植物,以评估空间飞行中RNA对植物根、芽中基因表达的调节作用;另一项是研究野生型和突变型拟南芥在微重力环境下的生长发育能力,以及表达不同应激反应基因的能力,有望用于构建更活跃的多胺代谢途径,调整植物应对微重力逆境的能力。啮齿动物系列研究开展了2项新实验,一项是通过转基因 *CDKN1a/p21* 缺失小鼠揭示 *CDKN1a/p21* 通路在微重力诱导的骨组织再生停滞中的作用,有望助力研发应对空间组织退化的预防性治疗方法;另一项实验旨在验证与伤口愈合过程相关的手术技术设备和程序,将支持未来有关空间飞行对伤口愈合影响的后续研究的设计。工程肌肉组织作为研究肌肉减少症的新平台实验,使用胶原蛋白支架上的人类肌肉细胞模拟肌肉纤维,利用微重力条件下肌肉加速消失的特点为药物试验提供研究平台。微重力对工程心脏组织中药物反应的影响实验使用工程心脏组织,在细胞和组织水平研究重力变化对心血管细胞的影响,帮助提升对地面类似心脏问题的认识。国际空间站环境的三维微生物监测实验使用DNA测序和其他分析方法,构建整个空间站细菌和细菌产物的三维地图,在分子水平描述微生物对重力和大气成分变化的响应。仙女座计划实验评估微重力下利用MDCK细胞培养减毒流感病毒的效果,或将为地面条件下生产疫苗提供改进方法,同时有望为在微重力条件下生产生物制剂铺平道路。JAXA利用微重力环境开发先进三维器官培养系统,新实验利用先进三维器官培养系统生长器官芽并分析基因表达的变化,最终帮助建立空间三维细胞生长技术。微重力诱导的肌肉萎缩抑制剂实验,研究新概念生物材料、HSP诱导剂和泛素连接酶抑制剂等对微重力诱导肌肉萎缩的抑制作用,有望助力开发适用于航天员和老年人对抗肌肉萎缩的药物。ESA行星生物采矿新实验研究重力对液体介质中微生物与岩石相互作用的影响,以更好理解岩石微生物混合液中对流、混合等基本物理过程,为生物采矿、生命支持系统等利用风化层及岩石提供基础知识。免疫

细胞活化实验旨在了解微重力环境是否对免疫细胞和黑色素瘤细胞与磁性纳米颗粒的结合产生影响,并验证空间飞行中与纳米颗粒上载相关的基因表达上调或蛋白质活性变化。此外,啮齿动物研究-19等32项实验继续开展。

在新成果方面,ESA支持开展的生物岩实验(图3)旨在研究不同重力对岩石/微生物/液体系统的整体影响,从而对地球重力、火星重力和微重力条件下细菌/岩石相互作用进行定性和定量比较。发表在《Nature Communications》上的研究结果表明^[7],微生物在空间中可以从玄武岩中提取稀土元素,而在微重力下微生物的表现更好,其提取的钒增加了283%。这意味着未来深空探索中有望利用生物采矿技术获得所需元素。

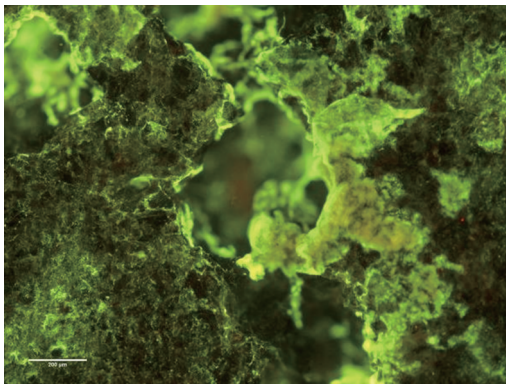


图3 飞行前的生物岩实验中生长在玄武岩上的微生物
(图片来源:NASA网站)

2.4 教育和文化活动实验

教育和文化活动实验共计42项,其中28项为新实验(表1)。

NASA支持开展了13项新实验,涉及对比空间和地面教室生长的动植物,在轨3D打印,空间环境对神经退行性疾病、航天员营养、药物有效性、免疫系统反应等影响,可能作为空间食品的生物,微重力对各类材料和结构、各种生物的影响等内容。ESA支持开展了9项新实验,涉及颗粒材料阻尼效应研究,研究不同形状的物体围绕中间轴旋转的状态、观察黏菌、暴露欧洲野花种子、在轨培育万寿菊、拍摄和魔术表演、利用小型的人体冠状动脉模型研究血流等内容。JAXA支持开展了5项新实

验,包括在轨航天员参加论坛高端对话、拍摄纪念视频和空间食品等。CSA支持开展了1项新实验,将送入空间的120万颗西红柿种子送返地面并分发给学生,与未曾送入空间的种子开展种植对比。此外,空间中的基因-6等14项实验也继续开展。

2.5 人体研究实验

人体研究实验共计38项,其中新实验7项。

NASA支持开展了5项新实验。减轻关节炎依赖性炎症——第一阶段实验评估微重力和空间辐射如何影响骨组织的生成,研究生物胶原蛋白和生物活性代谢物在空间飞行中的潜在保护作用。基于多功能可变重力平台的软骨-骨-滑膜微生理系统研究实验,基于多功能可变重力平台开发生物模型,研究空间飞行对肌肉骨骼疾病的影响,从而帮助寻找可以控制关节炎病情的药物。血白细胞计数和分类技术验证实验,在微重力下利用商用设备实现对白细胞的快速计数和分类,以验证在空间站进行血液分析和开展自主医疗的能力,满足长期飞行任务医疗保健需求。空间环境应激源对口腔生物膜生长和治疗的影响实验,研究重力对口腔细菌行为的影响,包括细菌菌落的结构、细菌对常见口腔护理剂反应的变化等,探索口腔疾病(龋齿、牙龈炎和牙周炎)的治疗方法,启发人们对微重力如何影响身体其他粘膜表面微生物群落的深入了解。表征微重力环境下的人体免疫缺陷实验,分析微重力是否能破坏免疫细胞分化的某些途径,以更好理解微重力对人体免疫系统的影响,并深入了解可能对抗由微重力引起的免疫缺陷的方法。ESA支持开展了2项新实验:一项是肌肉电刺激改善空间任务中的锻炼效果实验,旨在评估具备全身肌电刺激功能的可穿戴紧身衣对空间飞行前后航天员锻炼效果的改善情况;另一项是在空间中使用干式脑电图头带开展睡眠监测实验,旨在开发基于干式脑电图头带的有效、经济、舒适解决方案,以监测长期空间飞行任务期间航天员的睡眠。此外,空间环境加速血管老化:失重、营养和辐射的作用等31项实验继续开展。

在新成果方面,NASA支持开展的空间飞行对心血管干细胞功能的影响实验,深入探究微重力如

何影响心脏干细胞,以及控制其活动的物理和分子变化。研究结果表明^[8],空间飞行使得成年及新生的心血管干细胞的能力均得到增强,有望提升其再生、存活和增殖能力,相关发现对再生医学研究有重要意义。Roscosmos 支持开展的心脏活动和血液循环主要指标模式的综合研究实验,研究了参加2次为期6个月飞行任务的航天员的腿部静脉健康状况。研究结果表明^[9],下肢肌肉良好、足够的飞行间隔时间以及在轨体育锻炼可保障腿部静脉健康不会恶化。NASA 支持开展的生物化学检测清单实验和 CSA 支持开展的利用三维高分辨率外周定量计算机断层扫描评估空间飞行对骨质的影响实验,研究航天员在空间飞行期间小腿和手臂骨骼的微结构、密度、强度变化,以及任务时长与骨吸收和骨形成相关的生化标记物、运动之间的关系。研究结果表明^[10],骨生物标志物和运动史有助于评估骨丢失风险更大的航天员,同时飞行期间的阻力训练有助于保持骨骼强度。

2.6 地球与空间科学实验

地球与空间科学领域共开展了21项实验,其中7项为新实验(表1)。

NASA 支持开展了4项新实验。用于离子中性研究的电离层热层扫描光度计实验,对地球电离层开展二维层析成像,增进对电离层不同区域和不同扰动水平下的垂直和水平结构的了解。海狸立方体是一个3U的立方体卫星,利用多个相机拍摄地球海洋的彩色图片,探测云顶和海洋表面的温度,数据旨在增进对大气氧气生成和气候系统有重要影响的浮游植物浓度的了解,同时验证 Accion Systems 公司开发的 TILE 2 离子液体电喷射推进系统的性能。考察森林干扰的教育立方体卫星任务利用卫星搭载的多光谱和近红外相机研究火灾等大规模干扰对森林的影响。波多黎各立方体卫星纳米岩石-2 通过拍摄机械振动装置内的粒子研究低能粒子碰撞,收集导致粒子黏附、反弹、聚集的碰撞参数,为原行星盘和行星环等的形成研究提供相关数据。JAXA 支持开展了2项新实验。其中,暴露实验扶手连接结构-宇宙生物学-日本-3 实验,对3种样本开展为期1年的暴露实验,并送返地面进行

分析:研究脱氮细菌的锰含量对其暴露于太空环境后的存活率和细胞损伤的影响;对比白米和紫米种子,研究花青素对保持种子活性和 mRNA 稳定性的作用;研究蓝藻、苔藓等是否能够在火星风化层成分中生长。ESA 支持开展的 ESA-生物膜新实验比较不同金属表面在各种条件下细菌生物膜的形成和抗菌性能,包括表面光滑、具有较宽和较窄的激光加工结构的不锈钢、铜和黄铜等9种金属和合金表面样本,头葡萄球菌、抗辐射不动杆菌、金属酸铜杆菌等3种细菌,1 g(地球重力)、 μg (微重力)和0.4 g(约为火星重力)等3种重力环境,研究将为探索任务的抗菌材料选择提供参考。此外,阿尔法磁谱仪-02、在轨碳观测台-3等14项实验继续开展。

在新成果方面,俄罗斯国家航天集团公司(Roscosmos)与意大利航天局(ASI)合作开发的极端宇宙空间天文台多波长成像新仪器(Mini-EUSO)是一台用于夜间工作的多用途紫外望远镜,其观测数据可用于研究气候影响、海洋污染、地磁扰动、空间碎片和流星等。该望远镜在6个月时间里按照预期运行,观测到地球大气辉光和紫外辐射的变化,并跟踪了空间碎片和超高能宇宙线^[11]。安装于舱外的 ESA 大气-空间相互作用监测器(ASIM)用于研究强雷暴及其在地球和气候中的作用。在1篇发表于《Nature》的论文中^[12],研究人员观测到地球云层上部正负电荷区域扰动产生的放电现象——蓝色喷流。通过更好了解雷暴对地球大气层的影响,将有助于完善大气模型,更好开展气象及气候预测。

3 结论

通过对2020年10月至2021年10月国际空间站科研与应用活动最新发展情况的回顾和评估,国际空间站科研与应用发展呈现出2个新特点。

1) 从科研实验项目情况来看,国际空间站继续开展活跃的科研与应用活动,各国航天机构支持开展的实验规模和研究领域侧重点各有不同,各研究领域新实验集中的研究方向值得关注。在2020年10月—2021年10月开展的国际空间站第64~65

次长期考察任务中,美国、日本、欧洲和加拿大航天机构在6大研究领域支持开展了313项实验,其中在国际空间站首次开展的新实验达133项,占比42%,反映出国际空间站的科研与应用活动高度活跃。NASA支持开展的实验高达200项,占实验总数的64%,其中新实验有82项,占全部新实验数的62%。NASA支持开展的技术领域实验最多,其次为物理和生物领域实验。JAXA和ESA支持开展的实验规模相当,JAXA更聚焦技术和生物领域实验,ESA则更聚焦技术、人体研究、教育领域实验。CSA实验最少,相对更聚焦人体研究实验。从新实验的学科分布来看,技术和生物领域新实验最多,各研究领域中新实验最多的研究方向分别是技术领域的小卫星及控制技术方向、物理领域的材料科学方向、生物领域的细胞生物学方向、教育领域的学生开发实验方向、人体研究领域的骨骼与肌肉生理学方向、地球与空间科学领域的对地观测方向。

2) 从科研成果角度来看,国际空间站正处于科研与应用高峰期,持续产出新的亮点科研成果。2020年11月—2021年11月,基于国际空间站各项科研活动共发表400余篇论文,科研成果十分丰硕。空间飞行增强心血管干细胞能力、在聚合物材料中添加硬硼钙石可减少材料吸收的辐射量、微重力生物采矿表现更好、空间水泥研究助力实现太空建造、通过多种手段保障航天员腿部静脉健康、紫外望远镜“极端宇宙空间天文台多波长成像新仪器”(Mini-EUSO)顺利运行、评估航天员骨丢失风险、产生与控制气体燃料球形火焰的烟尘、“大气-空间相互作用监测器”(ASIM)观测蓝色喷流等突出新成果受到瞩目。未来面向运行至2030年的总体目标,国际空间站有望产出更多亮点成果,同时造福空间和地面应用。

展望未来,中国载人空间站即将完成建造,并随即进入应用与发展阶段。

参考文献(References)

- [1] 庞丹, 付毅飞, 崔爽. 成功! 中国空间站, 你好! [EB/OL]. (2021-04-29) [2022-01-25]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzI3NDI5MjI4OQ==&mid=2247621621&id_x=1&sn=4a11ac27c1ebdef41642b4b8fd488007&chksm=b1510dbdc6299cd9e44d6dd2e966022ab7c1067e8245d1096da462bd75bd728bf0d8e08f92c&mpshare=1&
- [2] NASA. Space station research explorer on NASA.gov[EB/OL]. (2021-11-10) [2022-01-25]. https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/explorer.
- [3] NASA. What we learned from the space station this past year[EB/OL]. (2021-12-22) [2022-01-25]. https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/what-we-learned-from-iss-2021.
- [4] Bel T, Mehranpour S, Şengül A V, et al. Electron beam penetration of poly (methyl methacrylate)/colemanite composite irradiated at low earth orbit space radiation environment[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(45): e51337.
- [5] Collins P J, Grugel R N, Radlińska A, et al. Hydration of tricalcium aluminate and gypsum pastes on the International Space Station[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 285: 122919.
- [6] Phillip H I, Han J L, Kendyl W, et al. Observations of long duration microgravity spherical diffusion flames aboard the International Space Station[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 229: 111373.
- [7] Cockell C S, Santomartino R, Finster K, et al. Space station biomineralization experiment demonstrates rare earth element extraction in microgravity and Mars gravity[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5523.
- [8] Camberos V, Baio J, Mandujano A, et al. The impact of spaceflight and microgravity on the human islet-1⁺ cardiovascular progenitor cell transcriptome[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(7): 3577.
- [9] Kotovskaya A R, Fomina G A, Salnikov V A. Investigations of leg veins in cosmonauts after repeated 6-month missions to the RS of the ISSy[J]. *Human Physiology*, 2020, 46(7): 776-779.
- [10] Gabel L, Liphardt A M, Hulme P A, et al. Pre-flight exercise and bone metabolism predict unloading-induced bone loss due to spaceflight[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2021, 56(4): 196-203.
- [11] Bacholle S, Barrillon P, Battisti M, et al. Mini-EUSO mission to study Earth UV emissions on board the ISS [J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 253(2): 36.
- [12] Neubert T, Chanrion O, Heumesser M, et al. Observation of the onset of a blue jet into the stratosphere[J]. *Nature*, 2021, 589(7842): 371-375.

Progress of scientific research and application progress of the International Space Station in 2021

HAN Lin, WANG Haiming, FAN Weiwei, LI Chao, LI Guopeng, YANG Fan*

Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract This paper reviews the latest scientific research and application activities of the International Space Station (ISS), to provide a reference for the scientific planning of China's space station, with the overall situation of scientific research and application activities of the ISS from October 2020 to October 2021 considered in six categories, including the technology development and demonstration, the physical science, the biology and biotechnology, the educational and cultural activities, the human research, and the earth and space science, focusing on the new experiments and achievements to reflect the scientific research and application progress during this period. It is shown that, the large-scale research and application activities are continued on the ISS in 2021, with the U.S., Japanese, European and Canadian space agencies supporting 313 experiments in six categories, including more than 40 percent of new experiments conducted on the ISS for the first time. Meanwhile, the ISS is at the peak of scientific research and application output, and all six categories continue to produce new highlight scientific results, such as the discovery that the biomining is even more effective in the microgravity conditions and the observation of the Earth's blue jets, which has attracted a wide attention from the global science community.

Keywords International Space Station; expedition; microgravity ●



(责任编辑 王志敏)