

2022年国际空间站科研与应用进展

韩淋, 王海名, 范唯唯, 李国鹏, 杨帆*

中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190

摘要 国际空间站继续发挥在轨科研应用平台的重要价值。对美国 and 俄罗斯公布的国际空间站实验项目数据库及成果报告的综合统计及文本分析后发现:在2021年10月至2022年9月开展的国际空间站第66~67次长期考察任务中,美国国家航空航天局(NASA)、俄罗斯国家航天集团公司(Roscosmos)、欧洲航天局(ESA)、日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)、加拿大航天局(CSA)支持在技术开发与验证、生物学与生物技术、物理科学、人体研究、教育和文化活动、地球与空间科学6大研究领域开展了360项实验,其中新实验占比超过40%,科研应用活动十分活跃。同时,亮点科研应用新成果频现,远程控制地面机器人、在轨产生和研究超冷气泡、观测磁星等一批突出新成果吸引了全球科技界的广泛关注。通过重点分析154项新实验中代表性的新实验,以及最近发表的400余篇科研论文中的亮点新成果,综合反映国际空间站科研与应用的新进展,总体研判国际空间站正处于科研与应用高峰期,科研活动高度活跃,科研成果持续涌现,未来有望产生更多造福空间和地面的科研应用新成果。

关键词 国际空间站;长期考察任务;微重力

2022年是中国载人航天工程立项30周年。梦天实验舱于2022年11月3日成功实现平面转位,中国空间站“T”字基本构型组装完成,向着建成空间站的目标迈出了关键一步。中国空间站将成为除国际空间站之外,目前在太空之中在轨运行的第2个空间站。这样一座国家太空实验室的建成,将使科学家开展在地球上受限的空间科学实验领域的研究成为可能。接下来,中国空间站将进入为期10 a以上的应用与发展阶段,航天员将在空间站长

期驻留,开展空间科学实验和技术试验,并对空间站进行照料和维护^[1]。

国际空间站是当前在轨运行的最大的空间平台,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。国际空间站2011年基本完成组装建设,此后进入全面科研应用阶段,在技术开发与验证、生物学与生物技术、物理科学、人体研究、教育和文化活动及地球与空间科学等6大研究领域长期持续开

收稿日期:2023-02-22;修回日期:2023-04-03

基金项目:中国科学院战略研究与决策支持系统建设专项(GHJ-ZLZX-2022-09)

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. 2022年国际空间站科研与应用进展[J]. 科技导报, 2023, 41(13): 6-13; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.13.001

展丰富多样的科研实验项目,并陆续产生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。国际空间站上的科学研究与应用拓展,对于中国空间站的科研规划和项目遴选具有很高的借鉴价值。

基于美国国家航空航天局(NASA)和俄罗斯国家航天集团公司(Roscosmos)国际空间站计划网站公布的实验项目和研究设施信息^[2-3],以及NASA发布的国际空间站年度成果报告^[4],概述国际空间站2022年科研与应用活动的总体情况,重点分析6大研究领域中有代表性的新实验以反映国际空间站科研应用的新部署,通过分析亮点论文反映国际空间站科研应用的新成果,在此基础上综合研判国际空间站科研应用取得的新进展和呈现的新特点。

1 2022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来规划、实施和发布科研实验项目情况。根据对NASA和Roscosmos国际空间站计划网站公布信息的梳理结果,2021年10月至2022年3月开展的国际空间站第66次长期考察任务和2022年3—9月开展的国际空间站第67次长期考察任务在技术开发与验证、生物学与生物技术、物理科学、人体研究、教育和文化活动和地球与空间科学6大研究领域共开展了360项科研实验项目。NASA、Roscosmos、欧洲航天局(ESA)、日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)和加拿大航天局(CSA)在各领域支持开展的实验项目数量及其中新实验的项目数量见表1。

表1 各航天机构在各研究领域支持开展的实验项目数量

机构	领域						总计
	技术开发 与验证	生物学 与生物技术	物理科学	人体研究	教育和文化 活动	地球与空间 科学	
NASA	74(40)	37(24)	31(15)	24(14)	14(11)	17(9)	197(113)
Roscosmos	10(1)	15(1)	7(1)	12(0)	4(0)	7(0)	55(3)
ESA	18(6)	2(1)	9(3)	12(1)	11(2)	1(0)	53(13)
JAXA	11(8)	13(2)	11(7)	4(0)	7(5)	4(1)	50(23)
CSA	0(—)	0(—)	0(—)	5(2)	0(—)	0(—)	5(2)
总计	113(55)	67(28)	58(26)	57(17)	36(18)	29(10)	360(154)

注:括号中的数字表示新实验项目数量。

在第66~67次长期考察任务开展的全部360项实验中,NASA支持开展197项,其中技术实验最多,其次为生物和物理实验。Roscosmos、ESA和JAXA支持开展实验项目数接近,Roscosmos的生物实验、ESA的技术实验、JAXA的生物实验相对较多。CSA仅支持开展了人体研究实验。在全部360项实验中,154项为新实验,其中113项由NASA支持开展,NASA在技术领域新实验的数量最多。

2 2022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113项,其中55项为

新实验,占比近50%,NASA、JAXA、ESA和Roscosmos分别支持开展了40项、8项、6项和1项新实验(表1)。NASA支持开展的小卫星及控制技术新实验阻力离轨装置立方体卫星,测试一种可以重复展开和收回、具有可控阻力表面的装置,以调整卫星的轨道衰减率,有望提供一种近地轨道航天器更快离轨的替代方案;逃脱特殊被动姿态控制卫星实验,旨在探究可否利用充气吊杆,帮助卫星停止旋转、有效稳定姿态。通信与导航新实验立方体卫星激光红外交叉链路-航天器A,利用3U航天器测试建立从航天器到地面小型望远镜的10 Mbps下行激光通信链路;Aexa公司全息传送行为实验,利用HoloLens 2头显和HoloWizard混合现实应用程序,

开展航天员与地面人员之间的360度全息图像远程通信。辐射测量和防护新实验RadMap望远镜验证新型辐射传感技术在无人和载人航天器中的应用,助力开发结构更加紧凑的辐射探测器。生保系统和居住新实验正向渗透膜评估在国际空间站微重力条件下脲酶磷脂反应性正向渗透膜的水回收性能。JAXA支持开展的空气、水和表面监测新实验IHI-SAT立方体卫星旨在验证先进的船舶自动识别系统接收机,提高在多船舶航行海域的船舶探测率。表征实验硬件新实验人造金刚石衬底空间暴露实验观察空间恶劣环境对衬底的影响,助力高性能下一代金刚石半导体器件在未来实现空间应用。航天器材料新实验木材外空暴露旨在评估原子氧粒子对木材的侵蚀作用以及辐射环境对木材力学性能的影响,验证木材是否可用作空间建材。ESA支持开展的机器人技术新实验表面化身,利用直观界面开展多化身和多机器人协作实验评估,用于在未来行星探索任务中开展机器人资产远程控制的操作程序。生保系统和居住新实验虚拟现实-机载训练实验利用虚拟现实头显设备为航天员提供在轨训练,评估该训练方式的有效性。Roscosmos防护复合材料实验收集特定厚度聚合物基复合材料的累积辐射剂量数据。

在新成果方面,ESA支持开展的ESA-触觉-2实验(图1)旨在评估空间站上的航天员利用力反馈实时控制地面上机器人的能力。ESA和Roscosmos的研究人员^[5]研究在飞行任务之前、期间和之后的各种触觉设置如何影响瞄准操作,发现力反馈



图1 航天员在轨开展ESA-触觉-2实验
(图片来源:NASA网站)

操纵杆的低刚度支持微重力条件下的瞄准精度,个人的感觉运动技能有助于操作。该项研究为空间飞行期间安全远程操作机器人和飞行控制系统提供了关键信息。

2.2 生物学与生物技术实验

生物学与生物技术实验共计67项,其中新实验有28项,NASA、JAXA、ESA和Roscosmos分别支持开展了24项、2项、1项和1项新实验(表1)。NASA支持开展的细胞生物学新实验规律间隔簇短回文重复序列(CRISPR)空间诊断,研究测试微重力条件下基于CRISPR的基因检测方法,并与地面进行比较,有望用于未来长期空间任务中病原体 and 污染物的准确识别及太空农业;近地轨道上的肿瘤类器官建模实验验证癌前和癌细胞的在轨组织培养、共焦荧光显微镜和实时共焦图像数据传输的科学参数和操作过程;微重力下诱导多能干细胞实验研究空间环境对诱导多能干细胞(iPSC)和由iPSC产生的神经祖细胞的影响,旨在助力开发在空间中培育干细胞的相关技术。植物生物学新实验根在轨测试系统旨在使用水培和气培技术种植植物,助力在未来的深空任务中大规模生产农作物。大分子晶体生长新实验空间科学促进中心-蛋白质晶体生长-20-单克隆抗体结晶,研究在微重力下制备可用于有效治疗多种癌症的结晶单克隆抗体 pembrolizumab。2项动物生物学方向的啮齿动物研究系列新实验,分别研究飞行环境诱导小鼠视网膜血管网络重塑和胶质血管通信,以及空间飞行对组织再生的影响。JAXA支持开展的动物生物学新实验小鼠栖息地单元-7-从器官间通信网络的角度解释与年龄相关的肌肉骨骼疾病的可能机制,研究神经血管网络在与年龄相关的肌肉骨骼疾病的发病或进展中的作用,以及器官间通信因子分泌型微RNA的表达随重力变化或衰老而发生的特异性改变,帮助更好地理解机械应力传感以及肌肉和骨骼随年龄变化的新机制。ESA支持开展的动物生物学新实验加速骨骼肌老化的微重力模型,在微重力环境下对人造肌肉进行自动电刺激,以诱导收缩,研究有助于确定处于微重力条件下的航天员和地面老年人群的肌肉损失机制。Roscosmos磁

性制造实验使用磁性3D生物打印机制造冠状病毒蛋白晶体,探究微重力条件下由有机和无机材料控制三维结构形成和制造的可行性。

在新成果方面,NASA支持开展的微生物跟踪载荷系列-微生物观测-1实验对空间站微生物分布开展监测,确定了数百种微生物。Singh等^[6]发现了3种新的农杆菌菌株,这些菌株可适应营养较少的生长环境,使其比那些需要更丰富营养的菌株更有优势。对微生物的研究为制定应对方法,维护空间飞行中的航天员以及地面人们的安全生活空间提供了支持。JAXA支持开展的利用微重力条件检验重力感应器形成的细胞过程和重力感应的分子机制实验,研究微重力条件下生长的植物是否能感知重力变化。Nakano等^[7]发现,在微重力条件下利用尼龙网培育的拟南芥种子发育出卷曲的根,与在地球重力条件下相比,根系与网的纠缠程度更高,这一结果表明重力会影响根部卷曲。了解重力如何影响植物生长,有助于开发在空间中种植植物的新方法,以及在地球上培育出新的植物品种。

2.3 物理科学实验

物理科学实验共计58项,其中新实验有26项,NASA、JAXA、ESA和Roscosmos分别支持开展了15项、7项、3项和1项新实验(表1)。NASA支持开展的材料科学新实验用于原位能力的生物聚合物,研究在空间站利用牛血清白蛋白和二氧化硅混合物制备混凝土替代品,揭示微重力如何影响生物聚合物土壤复合材料的形成过程;国际空间站材料系列实验开展了2项新实验,测试空间环境对嵌入式传感器、3D打印聚合物、航天器材材料、辐射防护生物材料、碳基钙钛矿薄膜太阳能电池等各类材料和器件性能的长期影响;宝洁洗涤剂远程科学研究实验研究2种洗涤剂在微重力下的去污有效性,以及微重力对洗涤剂外观和酶稳定性的影响。流体物理新实验流体空间光学,研究微重力如何影响液体在光学元件中的展开和凝固行为,同时对大型液体空间望远镜开展概念验证;非对称锯齿和空腔增强成核驱动传输实验,检测微重力下使用微结构表面电子设备的被动冷却系统。固体燃料点火和熄灭系列实验开展了2项燃烧科学新实验,分别研究厚固

体燃料——聚甲基丙烯酸甲酯的火焰生长和熄灭特性,以及通过改变气流速度、氧气浓度、压力和外部辐射水平等参数,研究微重力下的热辅助燃烧,验证材料可燃性模型。JAXA支持利用静电悬浮炉开展多项材料科学新实验,包括测量各种氧化物的热物理性质,验证利用小功率激光清除空间碎片的可行性,观测悬浮铁-铜液态合金的冷却曲线,测量解聚硅酸盐熔体黏度和密度的温度依赖性,研究受质量传输特性和成核速率控制的热能储存和释放过程,测试准确测量高温液态金属/合金表面张力的方法等。ESA支持开展的材料科学新实验混凝土硬化,研究重力如何影响混凝土的硬化过程和性能;透明合金-凝固过程中的柱状-等轴相变实验,通过测量透明合金中扩散热和质量传输参数,确定微重力情况下晶体生长机制和物理机制。Roscosmos支持开展的基准计量实验,旨在研究微重力对镓、铜、锡、锌等金属共晶合金熔化和结晶相变特性的影响。

在新成果方面,Carollo等^[8]利用NASA冷原子实验室设施生成冷原子云,研究原子的基本行为和量子特性,并报告了这些超冷原子气泡的产生和测量结果。这些数据将为开展微重力条件下凝聚气泡状态的基本性质研究提供信息,加深对量子系统的理解。

2.4 人体研究实验

人体研究实验共计57项,其中新实验有17项,NASA、CSA和ESA分别支持开展了14项、2项和1项新实验(表1)。NASA支持开展的骨骼与肌肉生理学新实验生物制造设施——组装下一代胶原同种异体移植半月板,评估了使用生物墨水和细胞3D打印半月板或膝盖软骨组织的可行性;微重力痛感实验评估了微重力如何影响航天员疼痛感、生物力学、骨骼生理学和肌肉骨骼系统。辐射对人体影响新实验AstroRad背心人因和工效研究,评估了防辐射背心的效率和工效。人类行为和绩效新实验压力监测研究了是否可以通过持续监测基本中枢神经系统功能发现航天员的情绪困扰,结果可用于支持开发在长期空间任务中,维持航天员健康和绩效的早期干预工具。视觉新实验反射式视力测

试,利用平板电脑安装的测试软件,在空间飞行之前、期间和之后对视觉功能开展快速可靠的评估,结果有助于更好地了解失重对视觉和其他大脑功能的影响。综合生理学及营养学新实验空间尿液分析,利用专用套件和平板电脑在轨开展尿液分析,包括评估肾功能的白蛋白与肌酐比值等。CSA支持开展的视觉新实验空间飞行相关神经-眼部综合征-眼壁硬度研究,旨在确定导致航天员在长期空间任务后视力受损的空间飞行相关神经-眼部综合征是否与眼壁硬度有关。心血管和呼吸系统新实验国际空间站心肺耦合的因果分析,研究空间飞行期间心脏、呼吸和姿势对血压调节的综合影响,以及飞行任务后发生的变化。ESA支持开展的人体微生物组新实验 Ice Cubes #9.2-Maleth 2,研究糖尿病足溃疡微生物在空间和地面对照实验中的耐药性,并以多组学方式开展分析。

在新成果方面,NASA支持开展的国际空间站医疗监测实验,定期收集在轨航天员的健康数据,以测量空间飞行对人体的影响。ESA和Roscosmos的研究人员利用实验采集的数据,通过航天员在长期暴露于微重力之前和之后所采集的血液样本,评估脑组织生物标志物。Eulenburg等^[9]发现,血液中的炎症生物标志物增加,可能表明长期飞行人员的潜在风险。CSA支持开展的骨髓研究实验旨在评估空间环境对骨髓的影响,Trudel等^[10]对空间飞行贫血(即红细胞计数减少)开展研究,利用综合呼吸和血液样本精确测量作为血红蛋白降解直接指标——一氧化碳的新技术,研究发现在空间飞行任务期间红细胞的破坏持续增加,长期暴露于空间环境会加剧空间贫血。

2.5 教育和文化活动实验

教育和文化活动实验共计36项,其中18项为新实验(表1)。NASA支持开展了11项新实验,涉及使用光遗传学等技术控制鹰嘴豆生长、微重力对细菌降解塑料的影响、肠道微生物群落对抗生素的反应、辣木籽粉和铜片对大肠杆菌培养物的影响、转染技术对药物输送速率的影响、生产益生菌酸奶、航天员与学生交流互动、开展学生编程竞赛等

丰富内容。JAXA支持开展了5项新实验,包括机器人编程挑战赛、国际空间站文化宣传活动、大学生开展卫星技术开发等。ESA支持开展了2项新实验。Ice Cubes # 11-Code4Space实验利用一颗配备传感器的太空弹跳球测量加速度、时间和弹跳次数等,并与地面实验进行对照。CalliopEO实验为德国小学生提供在国际空间站运行自己编写程序的机会。

2.6 地球与空间科学实验

地球与空间科学领域共开展了29项实验,其中10项为新实验,NASA和JAXA分别支持开展了9项和1项新实验(表1)。NASA支持开展的在地观测新实验BeaverCube使用多种摄像头拍摄地球海洋地区的彩色图像,并检测云顶和海洋表面的温度,旨在提高对浮游植物密度的了解;对地观测实验利用从国际空间站拍摄的图像,研究天气和森林火灾/火山爆发等自然事件,以及农业和城市化等人文特征,以更好地了解不断变化的地球环境;地表矿物尘源调查实验使用成像光谱仪技术,观测地球干旱地区尘埃中矿物的类型和分布情况,旨在提升对矿物尘埃如何影响地球上太阳能平衡的理解;闪电和夜间电现象成像实验,旨在拍摄雷暴和多种瞬态发光事件,并与地面观测结果结合,以重建瞬态发光事件的3D结构,识别闪电的参数,并从不同的范围和角度跟踪闪电活动和云照明模式。日球层物理新实验日间大气和电离层边缘成像仪利用立方体卫星,在140~180 km高度对地球大气层边缘进行成像,以确定日间大气氧的密度变化,为了解高层大气的动力学提供新信息;使用时域阻抗探针对等离子体密度不规则性进行空间分辨测量实验,以米级分辨率测量电离层上层电子的密度变化,旨在研究高层大气中的湍流不规则性。JAXA支持开展的宇宙生物学新实验Tanpopo-日本宇宙生物学-4,通过将苔藓孢子体、微生物 *Metallophera sedula*、氨基酸和肽暴露在空间环境中6个月,研究生命的起源、运输和生存,帮助回答生命起源这一重大问题,并助力开发适应空间环境的作物。

在新成果方面,NASA支持开展的中子星内部构成探测器(NICER)(图2)对新发现的天体Swift J1555.2-5402开展观测并确定其是一颗磁星^[11]。磁星是高度磁化的中子星,通过不规则地爆发X射线和伽马射线释放出大量的磁能。对磁星爆发的观测有助于解决天文学领域的很多相关科学问题,增进对宇宙中一些最极端条件的理解。ESA支持开展的暴露-R2-生物学和火星实验(图3)将沙漠蓝藻暴露于空间和地面的火星模拟环境条件下,研究地球生物在极端环境下的生存情况。Napoli等发现^[12],空间暴露菌株的基因变异没有增加,表明菌株保留了对辐射暴露导致的、累积DNA损伤的修复能力。蓝藻有潜力用于人工生物再生生保系统,在空间任务中提供氧气和食物。NASA支持开展的国际空间站生态系统天基热辐射实验,通过测量地球表面的温度,帮助解决有关水资源可用性、植被水压力和农业用水的问题。Cooley等^[13]利用实验数据研究了具有不同植物功能类型(如草地和



图2 安装在国际空间站舱外的中子星内部构成探测器
(图片来源:NASA网站)

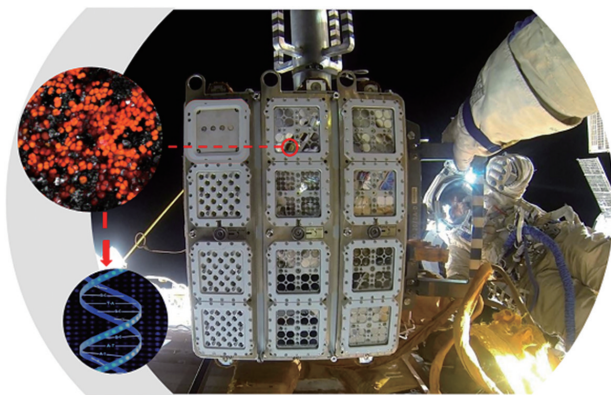


图3 暴露-R2飞行硬件
(图片来源:NASA网站)

森林)区域内和区域间的用水效率值,直接测量了植物碳吸收和水分损失之间的关系,并展示了生态系统功能是如何随气候变化的。

2.7 新科研设施

在第66~67次长期考察任务期间,4项新的科研设施投入使用。由NASA支持开发的固体燃料点火与灭火硬件是一项物理科学领域的科研设施,将作为燃烧集成机架的一个插件,为开展各类固体材料燃烧和灭火研究提供样品架、流量控制、外部辐射加热、点火器等通用基础设施。由JAXA支持开发的暴露设施单元适配器2是一项技术开发与验证领域的舱外暴露科研设施,尺寸为720 mm×500 mm×390 mm,重100 kg,最多可容纳2个有效载荷,并提供电力和通信支持。由JAXA支持开发的小型载荷支持设备是一项多用途的舱外暴露科研设施,最多可容纳8个立方体卫星级别的载荷,并提供电力和通信支持。由NASA支持开发的BioServe离心机是一项多用途科研设施,能够分离细胞培养物、DNA、蛋白质、血液、沉淀样品等不同密度的物质,支持生命、物理、材料科学等多领域研究工作。

3 结论

从实验项目和研究成果2个方面反映出1年来国际空间站科研与应用活动的新进展和新特点。

1) 在科研实验项目方面,国际空间站科研与应用活动继续保持活跃的发展态势。在2021年10月—2022年9月开展的国际空间站第66~67次长期考察任务中,NASA、Roscosmos、ESA、JAXA和CSA在6大研究领域支持开展了360项实验,其中在国际空间站首次开展的新实验有154项,占比高达43%。从机构统计来看,NASA支持开展197项实验,其中113项为新实验,2项指标均继续遥遥领先其他机构。NASA支持开展的技术实验最多,其后依次为生物和物理实验。Roscosmos、ESA和JAXA支持开展实验项目数接近,Roscosmos的生物实验、ESA的技术实验、JAXA的生物实验相对较多。CSA仅支持开展了人体研究实验。此外,4项

新的科研设施投入使用将进一步增强国际空间站的科研能力。

2) 在科研应用成果方面,2021年10月—2022年9月,基于国际空间站科研应用活动共发表400余篇论文,亮点科研成果频现,涌现出在轨控制地面机器人、发现在轨微生物菌株、揭示重力会影响根部卷曲、在轨产生和研究超冷气泡、分析航天员大脑的生物标志物、研究空间飞行贫血、观测磁星、探究蓝藻在极端环境下的生存、在轨观测水资源利用等多项突出新成果。

总体判断,当前国际空间站正处于科研应用的高峰期,结合相关规划部署,未来一段时间国际空间站有望继续通过开展各研究领域的新颖实验项目,产生更多造福空间和地面的科研应用新成果。

国际空间站的科研应用活动实践,也为中国空间站开展相关规划提供了丰富的案例参考和经验启发。(1) 空间站科研应用规划方面,要坚持充分发挥应用效益,统筹安排以推动重大科学发现、造福国计民生、使能未来探索为目标的科研项目,针对航天强国建设的总体战略需求和优先事项系统设计谋划中国空间站的科研应用蓝图。(2) 在空间站科研应用部署方面,要形成项目梯队和序列,有序推进研究实施,兼顾系列实验的持续深入和各领域研究的协调与平衡,支持新概念、新技术研究,重视研究支撑能力的建设和更新,重视国际合作。(3) 在空间站科研应用成果和影响评价方面,要遵循科研规律,充分认识到从基础研究或技术开发到实现应用效益是一个长期过程,要耐心培育研究,争取厚积薄发。

参考文献(References)

- [1] 陈城. 中国空间站将进入应用发展新阶段[N]. 光明日报, 2022-11-04(2).
- [2] NASA. Space station research explorer on NASA[EB/OL]. (2021-11-10) [2023-02-07]. https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/explorer.
- [3] Tsniimash. Программы НПИ[EB/OL]. (2021-10-18) [2023-02-07]. <https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/research-program>.
- [4] NASA. What we learned from scientific investigations on the Space Station in 2022[EB/OL]. (2023-01-28) [2023-02-07]. https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/what-we-learned-from-scientific-investigations-on-iss-2022.
- [5] Weber B, Schatzle S, Stelzer M. Aiming performance during spaceflight: Individual adaptation to microgravity and the benefits of haptic support[J]. Applied Ergonomics, 2022, 103: 103791.
- [6] Singh N K, Lavire C, Nesme J, et al. Comparative genomics of novel *Agrobacterium* G3 strains isolated from the International Space Station and description of *Agrobacterium tomkonis* sp. nov[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 765943.
- [7] Nakano M, Furuichi T, Sokabe M, et al. Entanglement of arabidopsis seedlings to a mesh substrate under microgravity conditions in KIBO on the ISS[J]. Plants, 2022, 11(7): 956.
- [8] Carollo R A, Aveline D C, Rhyno B, et al. Observation of ultracold atomic bubbles in orbital microgravity[J]. Nature, 2022, 606(7913): 281-286.
- [9] zu Eulenburg P, Buchheim J, Ashton N J, et al. Changes in blood biomarkers of brain injury and degeneration following long-duration spaceflight[J]. JAMA Neurology, 2021, 78(12): 1525-1527.
- [10] Trudel G, Shahin N, Ramsay T, et al. Hemolysis contributes to anemia during long-duration space flight[J]. Nature Medicine, 2022, 28(1): 59-62.
- [11] Enoto T, Ng M, Hu C P, et al. A month of monitoring the new magnetar Swift J1555.2-5402 during an X-ray outburst[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2021, 920(1): L4.
- [12] Napoli A, Micheletti D, Pindo M, et al. Absence of increased genomic variants in the cyanobacterium *Chroococcidiopsis* exposed to Mars-like conditions outside the space station[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 8437.
- [13] Cooley S S, Fisher J B, Goldsmith G R. Convergence in water use efficiency within plant functional types across contrasting climates[J]. Nature Plants, 2022, 8: 341-345.

Scientific research and application progress on the International Space Station in 2022

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

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

Abstract The International Space Station (ISS) continued to play its important role as an on-orbit scientific research and application platform. Comprehensive statistics and text analysis of the ISS experiments databases of the United States and Russia and annual highlights of results report showed the following findings. For the Expedition 66–67 from October 2021 to September 2022, NASA, Roscosmos, ESA, JAXA and CSA sponsored 360 experiments in six categories, including technology development and demonstration, biology and biotechnology, physical science, human research, educational and cultural activities, and earth and space science, of which new experiments accounted for more than 40%. At the same time, new scientific achievements, such as teleoperation by ISS crew to control robotic components on earth, creation and measurements of bubbles of ultracold atoms on-orbit, and observation of a magnetar, attracted widespread attention from the global science community. By focusing on representative new experiments and achievements this review comprehensively reflects the progress in the scientific research and application of ISS in this period, the progress of scientific research and application is comprehensively reflected. ISS is at the peak of scientific research and application output, with highly active research activities and continuous emergence of scientific achievements. In the future, it is expected to produce more new achievements to benefit space and Earth.

Keywords International Space Station; expedition; microgravity ●



(责任编辑 王志敏)