

2016 年空间科学与应用发展综述

国际空间站第 45/46 次和第 47/48 次长期考察任务在技术开发与验证、人体研究、教育活动和推广、生物学与生物技术、物理科学及地球与空间科学 6 大研究领域开展了 317 项科学研究实验，本文就整体研究情况及各领域研究进展和新变化进行综合论述。

一、科学研究与应用概况

在这 4 次长期考察任务中，美国国家航空航天局 (NASA)、俄罗斯联邦航天局 (Roscosmos)、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 大研究领域资助开展的实验项目数如表 1 所示。实验数据来源包括 NASA 和俄罗斯能源火箭航天集团公司国际空间站项目数据。

表 1 各航天局实验开展情况(因存在合作项目，总项目数小于各航天局项目数之和)

	技术开发 与验证	人体 研究	教育活动 和推广	生物学与 生物技术	物理 科学	地球与 空间科学
NASA	47	26	53	20	19	10
Roscosmos	17	20	5	11	2	8
JAXA	8	7	1	16	7	4
ESA	8	12	1	3	6	2
CSA	2	4	0	0	0	0

在第 45 ~ 48 次长期考察任务开展的全部 317 项实验中，NASA 资助的实验达 175 项，技术类实验最多，其次为教育类实验。Roscosmos 共资助 63 项实验，其中人体研究和技术类实验最多。其他各航天局也开展了多项研究，其中 JAXA 在生物学与生物技术研究方面、ESA 和 CSA 在人体研究方面的实验项目数相对较多。在全部 317 项实验中有 97 项为新实验，其中 78 项由 NASA 资助，技术类、教育类和生物学与生物技术领域的新实验最多。

二、科学研究与应用进展

(一) 技术开发与验证实验

1. 研究概况

技术开发与验证实验共计 82 项，其中 27 项为新实验，NASA 和 Roscosmos 分别资助了 25 项和 2 项新实验。

2. 研究进展和新变化

NASA 资助了 5 项小卫星和控制技术研究方向的新实验。“纳米机架 - 微型 X 射线太阳光谱仪立方体卫星”实验从国际空间站发射一颗立方体卫星，以 0.15 keV 的能量分辨率测量 0.5 ~ 30 keV 的太阳软 X 射线光谱。“纳米机架 - 网络和运行验证卫星”实验从国际空间站释放 2 颗纳卫星，验证纳卫星群技术，测试通信概念。“纳米机架 - LEMUR - 2 立方体卫星”实验利用国际空间站和造访航天器来发射立方体卫星，作为遥感卫星星座的一部分，开展全球船舶跟踪和天气监测。“纳米机架 - Kaber 任务 - 1 - NovaWurks 公司 - 卫星单元初步证明和教训”实验验证前沿的超集成卫星单元 (HISat) 技术概念，利用多个独立的小“卫星单元”(sat-let) 组装成卫星。“纳米机架 - CADRE 立方体卫星”实验从国际空间站发射一颗立方体卫星，研究高层大气在太阳能作用下密度、风和温度的变化。

NASA 资助了 3 项航天器和轨道环境研究方向的新实验。“同步位置保持、轨道预定、再定向实验卫星 - 系绳验证”实验研究由“追赶者 - 系绳 - 目标”组成的系统的稳定方法和策略,改进移除空间碎片或捕获其他行星上的科学样本等所需的计算机程序。“射频识别自主后勤管理”实验测试一种基于射频的库存控制系统,可跟踪国际空间站内的所有物品。“国际空间站机器人外部氨泄漏定位器”实验将验证商用压力传感器和质谱仪是否可以有效地探测航天器外部泄漏位置,并快速确认泄漏是否修复成功。

NASA 资助了 2 项空气、水和表面监测研究方向的新实验。“水质监测套件”可检测国际空间站供应水中的微生物、活性二氧化硅和有机物质。“个人二氧化碳监测器”实验验证能够在数星期至数月时间里,持续采集航天员二氧化碳暴露数值的系统。

NASA 资助了 2 项航空电子设备和软件研究方向的新实验。“自主任务运行 EXPRESS 机架 2.0 项目”测试存储科学实验的 EXPRESS 机架的一键控制系统,可以通过一键功能自主开启、配置、关闭或重启 EXPRESS 机架。“遥科学资源工具包的飞行验证”软件包旨在简化国际空间站上的软件运行。

NASA 资助了 2 项测试实验硬件研究方向的新实验。“助手:研究沉浸式可视化功能”实验采用免提、可穿戴式远程协助系统,在航天员执行任务时通过高清晰三维全息图提供信息和协助,测试是否能够提高航天员在开展日常科学和运行工作时的效率。“便携式在轨 3D 打印机”实验验证可在轨加工塑料物品的自动 3D 打印机。

NASA 资助了 2 项生保系统和居住研究方向的新实验。“长期吸附剂测试台”实验将干燥剂和二氧化碳吸附剂长期暴露于国际空间站的空气中(如一年),然后送返地球分析其污染程度和吸附能力损耗。“小型运动设备”实验验证小型机器人作动器是否能够为航天员锻炼健身提供动力和阻力,从而降低未来长期空间任务

所需的健身设备的尺寸和重量。

NASA 还资助了其他 9 项新实验。(1)“国际空间站上的全球自动识别系统”实验利用安装在国际空间站上的天基自动识别系统(AIS)接收系统来获取和传播船舶信息。(2)“采用剪切增稠液体 - 盔甲(STF - Armor™)和自愈复合物的改进型微流星体和轨道碎片防护舱外活动航天服”实验旨在评估新型舱外活动航天服材料在空间极端环境下的稳定性和有效性。(3)“航天器火灾实验 - 1”实验在“天鹅座”飞船返程期间在空舱内开展大型燃烧实验,测量火焰的蔓延、氧气使用等情况。(4)“生物分子测序仪”实验将首次验证在轨开展 DNA 测序的可行性。(5)“通用电池充电器”实验将为国际空间站上的各类电池提供一种新型通用充电系统。(6)“纳米机架 - Gumstix 微型计算机在低地球轨道的性能评估”实验测试 Gumstix 微处理器是否可以承受国际空间站外的辐射环境。(7)“壁虎爪”实验测试一种仿壁虎粘着夹持器件是否可以适用于严苛的空间环境。(8)“毕格罗”太空舱测试与国际空间站对接的实验性扩展式舱段的性能。(9)“相变热交换器”实验旨在提升相变热交换器的技术成熟度水平。

Roscosmos 资助了 2 项新实验。“回路 - 2”实验测试机器人遥控技术,未来可用于执行太阳系探测任务。“修复”实验测试薄膜热控涂层粘贴技术,确保在空间飞行时,薄膜材料可以牢固粘合在待修补表面。

此外,“机器人航天员”、“机器人加注任务”、“ESA - 触觉”等 55 项实验继续开展。

(二) 人体研究实验

1. 研究概况

人体研究实验共计 69 项,其中新实验有 6 项。

2. 研究进展和新变化

ESA 资助了 2 项骨骼和肌肉生理学研究方向的新实验。“空间

中骨质疏松的早期发现-2”实验旨在发现航天员回到地面之后是否还会发生骨丢失，并确定返回后多久骨丢失得以恢复。“肌肉活检”实验旨在采集、分析和了解空间飞行前后人骨骼肌中快缩肌和慢缩肌的一氧化氮合酶表达的数据。

CSA 资助了 2 项新实验。“骨髓研究”实验研究微重力对骨髓的影响，测量空间任务前后骨髓中脂肪的变化，以及白细胞和红细胞功能的变化。“空间中的文化、价值和环境适应性”实验针对多国航天员共同开展长期空间任务这一空间环境，评估航天员在文化、价值和心理方面的适应性。

NASA 资助了 1 项新实验。“监测任务期间药物使用、症状和不良反应的剂量跟踪应用程序”实验利用安装在 iPad 上的剂量跟踪应用程序来采集航天员在任务期间的药物使用信息。

JAXA 资助了 1 项新实验。“利用对 48 小时心电图的分析研究长期微重力暴露对心脏自主神经功能的影响——一年期”实验旨在研究人体精确的生物钟在空间飞行中的变化情况，评估利用动态心电图测量的连续 48 小时的休息和放松间隔，以及利用 Acti-watch 测量的睡/醒节律。

此外，“空间飞行颅内压及相关视觉障碍的无创评估”等 63 项实验继续开展。

(三) 教育活动和推广实验

1. 研究概况

教育类实验共计 60 项，其中 26 项为新实验。

2. 研究进展和新变化

NASA 资助了 25 项新实验，其中 23 项利用纳米机架开展，研究内容非常宽泛，涉及流体、材料等物理学研究，动植物、蛋白质、微生物等生物学研究，传热、电容器等技术类研究等，研究热点包括开展空间种植以获得食物来源等。另 2 项新实验分别是：“西红柿-美国”实验将为教师和学生提供从地面获得的和经历过

空间环境或模拟空间环境的两类种子进行对比种植研究；“空间中的基因”实验将测试聚合酶链反应是否可以用于在国际空间站上研究 DNA 的变化。

Roscosmos 资助了 1 项新实验。“国际 - 莫斯科航空学院 - 75”将超微型卫星“suitsat”安置在废旧航天服“海鹰 - M”上，向莫斯科航空学院发送语音信息和图像，使高校获得关于航天器控制方面的管理经验。

此外，“Sally Ride 中学生学习地球知识计划”、“地球之窗”等 34 项实验继续开展。

(四) 生物学与生物技术实验

1. 研究概况

生物学与生物技术实验共计 50 项，其中新实验有 22 项。

2. 研究进展和新变化

NASA 资助了 15 项新实验。大分子晶体生长研究方向有 5 项新实验。“空间科学促进中心 - 蛋白质晶体生长”系列研究开展了 3 项新实验：“使能基于结构的药物设计的蛋白质结晶学”实验研究微重力环境下的结晶过程是否会得到更加均匀、溶剂含量更少的共晶；“微重力对膜蛋白与一种医学相关化合物共结晶的影响”实验旨在利用国际空间站的微重力环境生长出更大、更好的人体膜蛋白共晶；“微重力下生长用于制药的单克隆抗体结晶”实验旨在生长极高品质的单克隆抗体。“光学显微镜模块 - 生物物理学”系列研究开展了 2 项新实验：“微重力蛋白质结晶中的大分子运输效应”实验通过研究微重力下单个蛋白质分子的运动来研究微重力下蛋白质结晶质量高于地面的原因；“将生长速度分布作为生物晶体样品在微重力下生长质量的预测指标”实验通过在地面上的观测研究预测哪种晶体会在微重力下生长得更好。

NASA 在细胞生物学研究方向资助了 3 项新实验。“微重力对干细胞分化心肌细胞的影响”实验将人类诱导多能干细胞分化而

成的心肌细胞在国际空间站上培育一个月，研究微重力对心肌细胞生理学和基因表达的影响。“微-9-微重力下依赖于氨媒介代谢调节适应和细胞分化生存的酵母菌群落”实验研究微重力对酵母细胞生物学的影响，为治疗微重力相关疾病提供新的研究目标。“成骨细胞基因组学和代谢的重力调节”实验通过对比成骨细胞和破骨细胞的基因表达，测试磁悬浮是否准确模拟了微重力下的自由落体条件。

NASA 在植物生物学研究方向资助了 3 项新实验。“微重力下幼苗生长的转录和转录后调控”实验研究根和枝条发育涉及的基因表达的最初步骤。“蔬菜硬件-03”实验利用 Veggie 植物生长设施培育一种名为 Tokyo Bekana 的甘蓝，将在轨收获样本并送返地面进行测试。“纳米机架-藻类生长与修复”实验测试一种小球藻生长室，研究如何在微重力下改善光合作用和生长条件。

NASA 在微生物学研究方向上资助了 2 项新实验。“罐中生物学研究-微重力下的天然产物”实验将生长可产生有价值的天然产物并能够抵抗空间辐射环境的微生物。“罐中生物学研究-23”实验旨在验证 NASA 基因实验室参考实验的在轨操作过程，并生成 2 种原核模式生物(枯草芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌)的高质量组学数据集。

NASA 在动物生物学研究方向上资助了 2 项新实验。“微-10-微重力对曲霉菌次生代谢产物的影响-有潜力改善航天员健康的新型药物发现方法”实验研究微重力如何影响构巢曲霉的生长、基因表达、生理反应和代谢产物。“啮齿类动物研究-3-Eli Lilly 公司-暴露于长期空间飞行中的小鼠利用肌肉生长抑制素预防骨骼肌萎缩和无力的评估”实验研究空间中肌肉骨骼系统的分子和物理变化。

JAXA 资助了 5 项新实验。“JAXA 低温蛋白质晶体生长”实验利用反扩散技术或渗透法生长生物大分子晶体，目标是实现在微

重力环境中以低温生长高质量蛋白质晶体。“空间中小鼠的转录组分析和生殖细胞发育分析”实验研究在空间中生活一个月的雄性小鼠的器官基因表达模式变化，及其后代 DNA 的变化情况。“航天员暴露在国际空间站空气环境中的真菌学评估——一年期”实验评估吸入和附着在皮肤上的微生物的风险，确定国际空间站上的真菌过敏源。“利用真实的微重力条件研究由重力控制的植物生长和发育”实验研究在微重力下，生长素在豌豆和玉米幼苗生长中的作用，从而了解重力是如何影响植物发育的。“空间中的亚洲草药-2016”实验通过对比在地面和空间微重力条件下生长的草药，对比芳香成分变化的差异。

ESA 资助了 2 项新实验。“Rho 家族 GTP 酶在重力感应和反应中的作用”实验旨在确定当体外细胞培养物暴露于失重条件下，Rho 家族 GTP 酶功能的变化。“球状体”实验研究微重力对内皮细胞功能的影响，包括血管形成、细胞增殖和凋亡，从而区分地面模拟微重力和空间飞行微重力造成的不同影响，并研究血管内皮生长因子对内皮细胞的保护作用。

此外，“JAXA 蛋白质晶体生长”、“蔬菜硬件-01-验证测试”等 28 项实验继续开展。

(五) 物理科学实验

1. 研究概况

物理科学实验共计 32 项，其中新实验有 14 项。

2. 研究进展和新变化

NASA 共资助了 11 项新实验。流体物理研究方向的新实验共计 4 项。“微通道扩散”实验旨在了解在微重力环境下微粒如何与其所处的微通道表面相互作用，重点了解物理和静电约束如何影响微粒在微通道中的扩散传输。“填充床反应器”实验研究气体和液体同时通过填充了多孔介质的柱状物时的行为。“零汽化损耗储罐”实验利用一种实验液体测试采用主动散热和强制喷射混合

的方法来控制挥发性液体储罐的压力。“被动热交换先进研究”实验研究新型轴向槽热管的性能，这种被动、轻质器件可以提高材料的热交换能力。

NASA 在材料科学研究方向上资助了 3 项新实验。“岩层 -1”实验设施将一系列风化层模拟物质暴露于国际空间站的微重力环境下，通过视频图像研究风化岩层、尺寸分类、颗粒迁移等，并在风化层样本返回地面后开展进一步研究，旨在为了解小型、无大气天体的风化层行为提供新的基础性信息。“材料科学实验室 - 样品盒组件”实验重点研究烧结过程中的致密化和形变，发现可预测在地面重力和微重力条件下各种组分的液相烧结体成型后的密度、形状和性质的科学机制。“纳米机架 - 地球富集的绒面薄膜光伏”实验评估基于碳纳米管的铜锌锡硫绒面光伏电池在外部空间环境中的性能。

NASA 在复杂流体研究方向上资助了 2 项新实验。“先进胶体实验 - 温度控制 -1”实验利用 Janus 粒子开展自组装研究。“先进胶体实验 - 加热 -2”实验研究可稳定胶体混合物的纳米粒子晕技术，了解胶体粒子浓度对晕的相互作用的影响。

NASA 在燃烧科学研究方向上资助了 2 项新实验。“冷焰研究”实验研究纯烃类燃料、生物燃料以及混合物燃料液滴的低温燃烧行为。“固体的燃烧和熄灭 - Milliken 公司”实验测试阻燃棉织物在微重力下的阻燃性能。

JAXA 资助了 2 项新实验。“沸腾两相流的界面行为和传热特性”实验研究微重力环境下沸腾流体的传热特性。“电磁悬浮炉”实验以无容器加工技术处理材料从而降低缺陷，研究氧化物、半导体、绝缘体和合金等在高温加工中的行为。

ESA 资助了 1 项新实验。“材料科学实验室 - 样品盒组件 - 批次 2b - ESA”实验旨在研究金属合金凝固过程中不同相是如何组织结构的。

此外，“等离子体晶体-4”、“火焰熄灭实验”等 18 项实验继续开展。

(六) 地球与空间科学实验

1. 研究概况

地球与空间科学领域共开展了 24 项实验，其中 2 项为新实验。

2. 研究进展和新变化

NASA 资助了 1 项新实验。“流星成分测定”是第一个从空间对进入地球大气层的流星的化学成分进行观测的实验，可从空间对流星开展持续性观测。该实验将研究流星尘埃的物理和化学性质，如尺寸、密度、化学成分等，并能够据此提供造成流星雨的母彗星/小行星的信息。

Roscosmos 资助了 1 项新实验。“栎林”实验在国际空间站平台利用可视设备和光谱测量监测手段，验证森林资源清查方法，以确定自然和人为因素对森林覆盖率的影响，实验后期使用高光谱和红外设备。

此外，“阿尔法磁谱仪-02”、“全天 X 射线成像监测仪”、“沿海海洋超光谱成像仪”等 19 项实验继续开展。

三、结束语

2016 年，国际空间站继续开展涵盖 6 个研究领域的大规模科研应用活动，致力于解决未来载人深空探索所面临的各种问题和挑战，获得新的重大的科学发现，并为地面的生产生活带来效益。

多项实验项目引发广泛关注。于 2016 年 4 月初运抵国际空间站、5 月底成功展开的“毕格罗”可扩展式活动模块是国际空间站的首个充气式太空舱。与传统太空舱相比，充气式太空舱体积小、重量轻、造价更为便宜，可大幅节省发射燃料、降低发射成本。

NASA 和毕格罗宇航公司在 11 月宣布该模块按照预期运行良好,按计划将完成为期 2 年的验证任务,如果能经受住空间环境的严苛考验,充气式太空舱极有可能成为人类未来空间基地的基本形态。NASA 利用“天鹅座”货运飞船的返程期间开展了迄今最大型的空间人为火灾实验“航天器火灾实验”,研究微重力环境下火灾是如何蔓延的,以降低对航天器发生火灾这一长期空间探索任务中最为令人担心的情况的风险。“生物分子测序仪”实验利用 Min-ION 微型测序仪成功完成首次微重力条件下的 DNA 测序,标志着人类迎来“在空间对活体生物进行基因测序”的新时代,这项可能改变游戏规则的技术开启了全新的空间基因组学和系统生物学研究领域。“阿尔法磁谱仪-02”研究团队于 12 月发布了运行 5 年来的观测和研究进展,迄今已采集超过 900 亿条宇宙线数据,改变了人类对宇宙线的认识。

通过本文对国际空间站过去一年开展的科学研究实验项目以及最新、最受瞩目的科研成果的全面回溯,希望为我国空间站应用规划提供借鉴和参考。

(中国科学院科技战略咨询研究院)