

## 2016 年国外航天员系统发展综述

2016 年，国际空间站第 46 ~ 50 长期考察组执行驻站任务，乘组任务包括人体研究、生物学和生物技术、物理学研究、地球科学研究以及教育活动。国际空间站第 46/47 考察组成员俄罗斯航天员尤里·马连琴科进行了第 6 次航天飞行，累计在轨飞行时间达到 827 天。国际空间站第 47/48 乘组成员 NASA 航天员杰夫里·威廉姆斯执行了他的第 4 次任务，累计在轨驻留时间达到 534 天，成为了美国在轨驻留时间最长的航天员。国际空间站首批一年期任务乘组安全返回，航天员斯科特·凯利返回后圆满退役。NASA 人体研究计划取得多方面研究进展，美俄欧开展各类地面模拟试验，助力未来更长期航天飞行和深空探索。

### 一、航天员圆满完成年度飞行及训练任务

#### (一) 国际空间站一年期任务乘组安全返回

2016 年 3 月 2 日，国际空间站首批一年期飞行乘组按计划安全返回，这是国际空间站组建以来连续飞行时间最长的一次任务，共计飞行 340 天，斯科特·凯利也成为单次驻留太空时间最长的美国航天员。

驻站期间，科研人员获取乘组在长期微重力环境下生理和心理的变化数据，用来评估长期航天飞行对人的影响，并识别航天员在小行星、火星或更远长期驻留任务中所面临的生物医学和心理学挑战，为未来深空载人任务做准备。

尽管 NASA 航天员斯科特·凯利与俄罗斯航天员米哈伊尔·

科尔尼延科在太空停留了 340 天，但是与他们任务相关的科学研究将会持续三年以上的時間。

## （二）欧洲航天局顺利开展航天员洞穴训练

2016 年 7 月 1 日—7 日，来自中国、俄罗斯、日本、欧洲航天局 (ESA) 和美国等 5 个航天机构的 6 名航天员在意大利撒丁区 800 米深的地下岩洞，共同参与完成了 ESA 组织开展的洞穴训练课程。洞穴训练旨在训练航天员在多元文化团队内，在具有危险性和陌生环境下如何安全有效地开展工作。6 名航天员依靠自己的技能、团队合作和地面控制来实现任务目标，从而训练他们的领导力、服从性、团队协作以及决策能力。

参训的每位航天员都有自己的职责。日本航天员星出彰彦和 NASA 航天员理查德·阿诺德共同担任探险任务指令长，在任务中途进行交接轮岗。中国航天员叶光富担任团队的数据工程师并承担勘测工作，同时俄罗斯航天员谢尔盖·弗拉基米罗维奇负责摄录影像资料。ESA 航天员佩德罗·迪克担任探险队内研究环境科学、地质学和微生物的科学家，而 NASA 航天员杰西卡·迈尔是生物学家。

## （三）NASA 航天员开展海底训练任务

“宝瓶座”是世界上唯一的海底实验舱，2016 年 7 月，一支由航天员、工程师和科学家组成的队伍，即极端环境任务实施 (NEEMO) 第 21 期探险队，再次潜入大西洋海底探险，开展为期 16 天的海底训练，为未来的深空探测任务和火星旅程做准备。

训练中，探险队员生活在海底的“宝瓶座”居住舱中，模拟航天员在微重力环境下的生活和工作，正如航天员在国际空间站或是未来前往小行星和其他行星的飞船中那样。在“宝瓶座”里，NEEMO-21 探险队员利用最先进的水下导航和科学工具，有条不紊地模拟火星勘探。队员们进行各种研究和操作，包括测试一个迷你的 DNA 测序仪和一台远程医疗设备。在模拟太空行走时，队

员们收集海洋生物学和地质学研究的样本，测试管理操作软件，并参与珊瑚修复工程。在进行这些工作时，通信延迟也是测试任务之一，这与探测火星所会遇到的情况相似。

NASA 航天员瑞德·威斯曼指挥 NEEMO - 21 任务的前 8 天行动，NASA 航天员梅甘·麦克阿瑟指挥 NEEMO - 21 任务的后半段，她生活在居住舱中全程参与 16 天的行动。ESA 航天员马蒂亚斯·毛瑞尔和麦克阿瑟一起全程参与行动。无创医疗技术公司首席医疗技术人员马克·格洛法参与前 8 天的行动。佛罗里达州人机认知研究科学家和海军研究生院研究员诺尔·杜托·伊特仅加入后 8 天的行动。

#### **(四) 多名航天员获得国家奖励**

2016 年，5 名俄罗斯航天员因突出贡献而在克里姆林宫受到表彰。俄罗斯第 4 位女航天员叶莲娜·谢罗娃，及一起在太空工作的同事奥列格·阿尔捷米耶夫经受住了复杂和长期的太空飞行考验，被授予“俄罗斯英雄之星”和“俄罗斯联邦航天员 - 飞行员”称号。航天员 - 飞行员亚历山大·萨莫库佳耶夫、亚历山大·斯科沃尔佐夫、马克西姆·苏拉耶夫在国际空间站执行任务期间表现出高度的勇气和敬业精神，被授予 4 级“为祖国服务”勋章和“俄罗斯联邦英雄”称号。

美国航天员布赖恩·达菲和斯科特·帕拉津斯基入选美国航天员名人堂，由此加入美国航天英雄的精英群体。另外，还有 2 名 NASA 航天员迈克尔·埃拉迪奥·洛佩斯 - 阿莱格里亚和丹尼尔·塔尼被授予俄罗斯“太空探索功勋”奖章。洛佩斯 - 阿莱格里亚曾完成了 4 次航天飞行，总的飞行时间超过 257 天，完成 67 小时舱外活动，是美国航天员舱外活动次数纪录保持者，在国际空间站共进行 10 次舱外活动。丹尼尔·塔尼了曾完成两次航天飞行，期间进行了 6 次舱外活动。

## (五) NASA 新一批航天员招募申请人过万

2015 年 12 月, NASA 宣布开始公开招募新一批航天员, 截至 2016 年 2 月 18 日, NASA 官网共收到来自世界各地的 18300 份申请, 申请人数打破 2012 年创下的纪录。申请者必须是美国居民, 并且要有工程学、生物、物理、计算机或数学的学士学位。他们必须要有 3 年的相关工作经验或者至少 1000 小时驾驶喷气机飞行经验。NASA 不单要求申请者有强健的体魄, 还必须具有相当的领导力与团队协作能力。

NASA 的航天员选拔委员将会用 18 个月来逐一浏览申请, 根据计划, 将从这 18300 名申请者中选出 8~14 人参加航天员培训班, 录取率只有不到 0.08%。这些航天员可能要驾驶三种 NASA 正在研发的飞船, 包括 NASA 用于深空探索的“猎户座”飞船。

## 二、人体研究计划取得多方面研究进展

### (一) 空间辐射项目

#### 1. 进行与辐射引起中枢神经系统损伤有关的行为变化研究

美国加州大学开展的中枢神经系统(CNS)损伤研究表明低至 50~100 mGy 类空间带电粒子照射, 可以引起神经元结构的改变和突触数量减少, 这将导致神经网络连通性功能的下降。

此外, 东弗吉尼亚医学院理查德·布里顿博士的一项研究表明, 这些剂量与连接到海马体和前额叶皮层记忆过程受损有关, 如“新物体识别”和“对象到位”行为测量试验中表现的那样。成熟的雄性大鼠暴露于 1 GeV/n 铁粒子三个月后, 在 5 个“注意定势转移”复杂任务中, 其中有 4 个出现损害。

纽约医学院伯特利克·斯坦顿博士的研究结果强调辐射可引起海马体新成人神经元的减少和与兴奋性和突触强度控制有关神经元的电性能改变, 也可能损害任务时间表中神经元的网络性能。

这些结果对航天员发病率的重要意义还没有得到解释，动物模型与人之间基本的结构和机制很相似。

中枢神经系统的证据报告“辐射暴露引起急性和延迟中枢神经系统影响的风险”，对以前 2009 年的版本进行了更新，并由人体研究计划(HRP)常设审查小组进行审查。成立了一个 CNS 工作组来考虑暴露到太空重离子后对航天员行为和绩效的影响。该工作组包括行为健康与绩效(BHP)人员，以帮助了解辐射引起的变化与行为紊乱的相互作用，了解其他的空间因素，例如，隔离、限制和睡眠剥夺如何引起或加重行为障碍。

## 2. 空间辐射研究中心开展低剂量质子暴露的急性效应研究

深空旅行与空间辐射暴露有关，其中包括质子和重离子，它们以部分的光速移动，因此很难或不可能进行屏蔽。同时，高剂量的质子可以引起不良的急性健康反应，在很大程度上低剂量质子急性影响的风险是未知的。此外，最近地球上辐射暴露的证据表明，心脏和血管系统对电离辐射反应比以前认为的更敏感。这些发现使人们高度关注深空探测任务时，质子和重离子暴露对心血管的不利影响。

NSBRI 领导的空间辐射研究中心(CSRR)由 4 所大学的小组组成，他们的任务是确定低剂量质子暴露的急性健康作用，以及质子和重离子对心血管健康的影响。对于急性效应的研究，雄性小鼠暴露于低剂量的质子中，可以引起细胞凋亡的增加或眼睛视网膜程序细胞的死亡。CSRR 计划接下来的工作是确定质子是否可以改变视网膜的脉管系统。目前的研究还包括对皮肤、骨髓和心脏组织的急性作用。

CSRR 还研究对组织退行性的影响，已经表明小鼠暴露于氧离子环境两周后，骨髓干细胞数目减少。也观察到在暴露到“光氧”或<sup>16</sup>O 离子两周后，心脏中出现数以百计的蛋白质表达。在暴露 3 个月后，用高分辨率的超声观察到心脏功能的改变。此外，

暴露于氧离子环境下，也可引起鼠心脏和视网膜血管内皮细胞血管内皮功能几个标记物的改变。

CSRR 目前正在研究氧离子对视网膜血管、心脏功能和结构、DNA 表观遗传变化的影响，暴露时间多达 9 个月。最后，研究小组还测量尿液样品中代谢物，作为辐射暴露的潜在生物标志物。

## (二) 乘员健康防护措施项目

### 1. 测量颅内压(ICP)的无创 Vittamed 仪获准临床应用

NASA 认为，视力障碍颅内压(VIIP)综合征是航天员重要的健康风险。这种综合症与微重力暴露有关，表现为视觉灵敏度和眼构造的变化。在一些情况下，发现飞行后脑脊液压力(通过创伤的脊椎抽液方法测得)升高，认为航天员出现的这种综合症可能是由于颅内压升高引起的。

NASA 寻求一种安全、无创的方法，测量太空飞行期间航天员的颅内压。为此，NSBRI 评估若干新兴的医疗技术，确定了一种有前途的设备，它通过一个闭合的眼睑，将超声波发射到眼。该 Vittamed ICP 仪是立陶宛发明的，到美国进行临床评价。埃里克·贝莎德博士和他的重症监护专家团队，比较了 Vittamed 仪的测量值与标准用损伤性方法腰穿测量值的异同点。

用 Vittamed 仪得出的测量值与用损伤性方法得出的测量值有良好的一致性。该装置的小型化版本目前已被批准用于欧盟临床，食品和药物管理局(FDA)正在审批中。这项技术不仅可以检测航天员航天期间的脑压，也可用于地球上的患者。

来自一年期任务的数据仍然还在分析之中，但初步的结论显示，航天飞行期间并没有发生病理性的颅内压大幅增高。但是 VIIP 首席科学家迈克尔·斯坦格认为，颅内压增高仍然是导致 VI-IP 的原因之一，这种增高是轻微的、缓慢的。可以确定，太空中眼睛后部的脊髓液发生了聚积，但现在并不理解导致这一情况的原因。静脉压升高或淋巴引流的变化可能隔开了眼后部的液体，

因此导致了“间隔室综合症”。

空间站目前还在使用更多的超声技术进行非侵入式检测。比如，超声扫描视神经鞘直径，或是用超声技术检测大脑中动脉的搏动指数，来监测颅内压状况。这两项检测都与地面高颅内压患者进行对照，但还需要进一步的研究来了解这种非侵入式技术在正常颅内压范围内的检测准确性。

## 2. OCT 研究证明飞行后出现眼部改变

长期微重力飞行返回后，航天员出现不同程度的视盘肿胀和视网膜血管外层褶皱。眼睛后部的这些变化使用临床眼底镜检查可以观察到，但这些方法的定量是主观的和可变的。临床仪器如光学相干断层成像术(OCT)可以观察到眼的后面，并具有定量的良好重复性。

休斯敦大学尼姆西·佩特博士进行的此项研究，可以定量地确定国际空间站长期飞行航天员飞行后视神经头部(ONH)厚度和周围视网膜组织厚度的变化。使用定制的软件，分析15名国际空间站航天员的光学相干断层成像术(OCT)扫描。在此项航天员的研究中，ONH总视网膜厚度是500微米，飞行后更厚。同样，同一区域视网膜神经纤维层的厚度增加。虽然ONH加厚，飞行后相对于周围组织的ONH位置更深了。

通过对30只眼进行分析，只有7只眼脉络膜皱褶程度高于轻度。这些结果表明，微重力可以引起视神经机械力作用的改变，造成ONH水肿和周边视网膜组织增厚。必须进行纵向研究，研究飞行期间这些变化的时间过程和航天员飞行后重新暴露到重力环境后的变化。

## 3. 癌症患者志愿参与 ICP 抛物线飞行研究

航天员在长期ISS任务期间出现了视觉的变化。当人站立在地球上，重力将血液拉向脚部，但是在平躺时，血液均匀地分布在全身，特别是朝向头部。在微重力环境下，血液的分布被认为

是稍微向脑转移。这种假设导致 NASA 的科学家们推测颅内压增加，引起眼部结构的压缩和折叠，造成视力模糊。此外，有人认为，力量型锻炼和国际空间站大气中少量二氧化碳的增加会加剧此变化。

为了了解这个复杂的问题，NSBRI 支持的研究人员完成了一系列实验，通过放置在白血病患者头部的一个特殊端口，测量在地球上体位改变和抛物线飞行时脑内压力的变化。此外，还测量受试者呼吸中二氧化碳增加和进行力量型运动时的脑内压力。被试者在癌症治疗时，有一根心室导管插到她的脑内。她的志愿服务为测量微重力条件下的 ICP 提供了一个独特的机会。

这些实验显示，当被试者在地球上直立坐位时，相对于平躺，颅内压是很低的。在微重力环境下，颅内压实际上低于受试者平躺在地球上时，但仍比地球上直立姿势时大得多。另外，二氧化碳不影响颅内压。但是，在进行 Valsalva 力量型运动时，可以引起颅内压的明显增高。而且，证明收缩期间呼吸可以是一个简单而有效的对策。

这些实验的最终结论是，微重力不会导致颅内压的长时间病理性增加。但是，由于国际空间站缺乏重力，颅内压会持续地高于地球上正常直立姿势时的压力，通常人在地球上一天中三分之二的时间是处于直立状态。

#### 4. 飞行和模拟功能任务测试(FTT)完成并递交最终报告

此项研究由约翰逊航天中心(JSC)神经科学实验室主持，目标是了解航天对功能实验性能的影响，这些功能实验的性能代表了关键探测任务的作业，并确定是关系到绩效的关键生理因素。

FTT 由 7 个功能测试和一组相应、跨学科测量组成，其目的是研究航天对感觉运动、心血管和肌肉适应的影响。测量了太空飞行和卧床前后航天飞机和 ISS 乘员及 70 天头低位卧床(有或没有运动)被试者的变化。卧床模拟可以允许研究者研究身体支



撑卸载和缺乏航天引起前庭功能改变时的人体变化。

结果显示所有对姿势平衡动态控制有更大需求的被试者绩效下降最大。使用性能上的这些变化在感觉运动实验中也出现平行、类似下降，这些感觉运动实验是专门评价姿态平衡控制的。卧床和参加飞行的被试者在评估平衡功能实验和评估姿态稳定性的感觉运动实验中出现类似的不足，结果表明航天期间的身体卸荷在飞行后功能任务绩效和平衡控制改变中起主要作用。

与卧床对照组和太空飞行的被试者比，卧床中进行高强度间歇式阻力和有氧训练的被试者(仍在床上进行这些锻炼)，下身肌肉有明显的改善。但是，只进行有氧或阻力运动，不足以阻止动态姿势稳定性和移动性功能实验绩效的下降。这些结果表明在现有飞行中运动对抗措施的基础上，增加飞行前的感觉运动适应性训练和飞行中的平衡训练，对于减轻平衡和步态控制的下降是很重要的。

#### 5. 规范的飞行前运动试验预测月球出舱活动(EVA)时的绩效

航天环境可引起各种生理适应性，如航天生理功能失调，它表现为返回重力环境后出现生理功能的失调，也表现为航天员EVA能力下降。与长期太空飞行有关的不仅是航天员在太空行使职责的能力，而且也要耐受着陆时对他们体能的要求。研究人员考虑了两个问题：微重力后有氧运动能力的下降是否是保证任务安全的主要关注问题？此外，什么是健康要求的最低水平，特别是在长期飞行任务后，在行星上完成EVA时的最低水平是什么？

以托马斯·巴斯托博士为首的美国堪萨斯州立大学运动机能学系的科学家，正在研究采用什么样的测量方法可以最佳地预测一个人在完成一系列模拟任务时的能力，这些任务是模拟航天员在某些地方，例如在月球或火星上执行的任务。受试者完成了一系列任务，其中包括10千米的步行/跑、移动圆筒、通过由6个障碍点组成的环形道：攀登梯状物、通过灵活的圆锥体、爬楼梯、

攀登岩壁、提升设备和过障碍物(被试者低头通过与胸同高的杆)。

实验室的实验表明绩效时间的最佳预测指标是腿或手臂的临界速率和临界功率,随后是最大耗氧量( $VO_{2max}$ )。临界速度和功率代表了快跑和手臂曲柄运动的强度,它们维持时间至少 20 ~ 30 分钟,通常代表约 75% ~ 85% 最大摄氧量。这些结果将有助于 NASA 为临界功率、速度和最大摄氧量形成一个新的最低有氧适应度阈值,其可用于评估执行这些类型任务时航天员的体力。

## 6. 长期微重力导致小鼠内耳耳石重构

哺乳动物使用内耳耳石器官来探测重力,使用它所发出的信息进行空间定向和控制平衡。耳石器官由有纤毛机械敏感性的毛细胞组成,毛细胞上覆盖着被称为耳石的碳酸钙( $CaCO_3$ )生物矿物晶体,它可以对毛细胞提供机械负荷。由于耳石的密度与耳石敏感性有关,它们的生物矿化作用也不是一成不变的,重力负荷的变化可以使它们有结构重塑的风险。

在微重力环境下,由于重力消失,生物体  $CaCO_3$  的生成增加,从而增加耳石质量,这种作用被视为试图增加“系统增益”。当重新进入一个重力环境中,这种重构的反应变成不适应,对乘员的认知和使用能力产生负面影响,例如出现运动病、空间定向障碍、触及一个物体时出现下调或超调、凝视时出现眼球震颤和头晕眼花、平衡稳定性降低,包括无力完成简单的脚跟到脚趾的步行。

NASA 艾姆斯研究中心(ARC)进行耳石研究,其目的是了解强的、持续的重力负荷是否会引起耳石结构的改变。电子显微镜和聚焦离子束研磨技术被应用到观察 ISS 失重 90 天小鼠、地面 2g 离心 90 天及参加 STS - 133 和 STS - 135 飞行小鼠耳石质量的图像。

来自 ISS 小鼠耳石的图像可见个别耳石出现明显的重构,同时伴随着矿物沉积和质量的增加,进行 2 g 离心地面小鼠的耳石

质量下降。相反，在短时间的航天飞机失重飞行后，小鼠的耳石是正常的。因此，长时间太空飞行暴露可能诱发适应性机制，导致外周器官末端运动转换结构的改变，促使性能紊乱。

### 7.70 天头低位卧床研究证实多模式锻炼设备(M - MED)的有效性

M - MED 是 NSBRI 的一个原型锻炼设备，它允许使用单个设备进行阻抗和有氧运动。M - MED 调速轮功率计的一个特点是其产生阻力的固有设计，它可以在与重力无关的情况下，进行伸长和缩短运动。2015 年，使用 M - MED 完成了一项 70 天头低位卧床实验，34 名被试者分成 3 组，一组卧床期间不运动，另外两组运动。

一个运动组在卧床期间采用传统的、类似于在 ISS 上的运动，使用跑台、自行车功量计和几种阻力运动设备进行锻炼。另一个运动组在 M - MED 上进行划船和几种阻力运动。运动组的被试者每周锻炼 6 天，3 天进行阻力和有氧运动，3 天只进行有氧运动，两种运动相隔一天进行。

只卧床的被试者在卧床期间出现  $VO_{2max}$  相对线性下降，卧床后即刻下降约 25%。采用传统方法锻炼的被试者和使用 M - MED 锻炼的被试者在卧床初期  $VO_{2max}$  下降，之后有所改善，卧床实验末期，已经恢复到基线水平。对照组的被试者在卧床期间肌肉的横截面面积出现近似线性下降，导致股四头肌下降近 10%，小腿下降 26%。传统运动和使用 M - MED 运动的被试者大腿横截面维持不变，小腿横截面下降也较对照组轻。

初步结果表明与对照组比，卧床期间 M - MED 锻炼可以改善肌肉力量、尺寸、耐力、心肺功能，以及平衡和步态控制。重要的是，这些发现还表明 M - MED 锻炼不同于传统设备的锻炼，它可以使用单个设备来防止长期探测任务中肌肉萎缩和心血管失调。

至于谈到对完成功能任务、平衡和步态控制的作用，M - MED 的被试者近似于或略差于进行传统锻炼的被试者。因此，调速轮

锻炼方式是有希望的，但在确定其作为一种感觉运动对抗措施前，还需要进一步改进。

### 8. 能量移动研究提供了未来三种航天服的比较

航天服的移动性通常是通过观察单缝接头运动可完成的范围来进行验证。一个穿航天服的人对于一定动作可实现一定范围的运动，要预测合适操作时他们是如何工作的有一定的限制。能量移动研究的主要目的是确定是否一个移动的多功能实验可以作为运动试验隔离范围的一种补充方法。

JSC EVA 生理实验室和先进航天服实验室的研究者们测量了 6 名穿航天服被试者在执行身体要求高机能实验时的能量消耗，能量实验包括步行、爬楼梯、回避和搬迁物体。

该研究对两套原型行星表面 EVA 航天服，即 MK III 和背入式 (REI) 航天服，以及“星座”计划航天服的能量消耗进行了评价。每套航天服实验时，每名被试者要完成 2~3 次实验。

初步结果显示，MK III 和 REI 航天服能量消耗类似，但爬楼梯和回避运动时，REI 航天服的能量消耗较少，因为它的质量只有约 13.6 千克。“星座”计划航天服可移动的能力最小，而且是三种航天服中最小的，结果显示它在每项任务中能量消耗更高，此结果提示航天服的可移动性比航天服的质量对能量消耗的影响更大。

这些数据可以更优化今后的设计，这些设计需要采用比较昂贵、类似于飞行中重力减少的模拟装置，例如，有效反应重力卸荷系统和中性浮力实验室。最后，此结果使用时间和能量消耗作为性能的度量结果，将可以预示正在设计中功能航天服的灵活性要求。

### 9. 利用啮齿动物研究二磷酸盐对骨强度的影响

二磷酸盐是用于治疗绝经后妇女骨质疏松症的主要药物。有限的 ISS 乘员在飞行中采用二磷酸盐作为肌肉骨骼对抗措施的一

部分。一般情况下，这些药物的抗骨吸收作用可以坚持到治疗结束。目前实验设计是利用已被大家接受的成年大鼠进行地面模拟实验，大鼠在卸荷期间给予二磷酸盐治疗。

此项研究由得克萨斯州 A&M 的哈里·霍根博士负责，主要目的是检验是否大鼠在第一卸荷期间给予二磷酸盐治疗的效应将持续至第二次卸荷期间，在这两个卸荷期间是一段恢复期。另外一个目的是比较二磷酸盐、阿仑唑奈和唑来磷酸盐在两次卸荷期间防止骨丢失的作用。

大鼠卸荷 28 天后，恢复 56 天，然后再卸荷 28 天。在实验期间，每隔 28 天进行一次 CT 扫描来监测骨密度和有关的变量。骨密度变化的结果显示阿仑唑奈和唑来磷酸盐的保护作用确实可以延伸到第二个卸荷期，但变化程度不同。唑来磷酸盐的效果高于阿仑唑奈，它不仅减轻或防止骨丢失，而且实际上超过对照组。这种增强是在第一卸荷暴露期间最突出。

在研究结束时也观察股骨的变化。只有用唑来磷酸盐处理的股骨颈断裂强度更高，再次反映出该药物的良好效力。此外，用荧光染料标记方法测量骨细胞活性，可以进行骨形成率的计算。当无负载大鼠恢复到有负载情况下，骨形成率一般迅速增加，但服用二磷酸盐的大鼠，这种反应受到抑制或延迟。这项研究的主要发现是二磷酸盐治疗可产生保护效果，这种作用在给药停止后依然继续，并可以延长到第二卸荷期，但对于航天员来说，风险收益比还不能确定。

#### 10. 椎间盘(IVD)研究提示飞行后脊柱损伤风险增加

为了优化探测类任务的规划，需要通过研究来描述个人背部脊椎的变化。研究人员需要了解哪些变化有最大的风险，什么时候最可能发生风险及最好在什么时候进行干预。IVD 研究成功地证明航天员使用 ISS 的超声装置，可以实时生成达到椎间盘诊断质量的图像。

飞行前后 IVD 的研究，揭示了飞行后引起背部损伤和疼痛的可能风险因素，其中包括肌肉萎缩、疲劳增加、脊柱弯曲减少、脊柱弯曲刚度增加、骨终板不规则和骨髓发炎。

此外，数据挖掘工作揭示过去的 50 年，在 330 名航天员中，有 51 人出现髓核突出。这表明太空飞行会增加飞行后头三个月髓核突出的风险。返回一年后，风险下降到背景水平。值得注意的是，航天与髓核突出的因果关系仍然是一个悬而未决的问题，此数据对于制定潜在的缓解策略和确定进一步数据采集要求提供支持。

### 11. MPCV 运动原型的初步选择和抛物线飞行测试

先进训练理念(AEC)项目在支持多用途乘员飞行器(MPCV)训练概念的技术方面，通过了几个关键的里程碑。AEC 的支持包括发展 MPCV 训练概念和对报考者提出的概念进行初选，以及支持对 MPCV EM-1 关键设计的审查。

NASA 综合训练工作组审查了 MPCV 的 6 个训练设备概念，在概念能力满足需求的基础上，推荐了 4 个设备设想，进行有人的测试实验。这些设备将通过利益相关者建立的关键绩效进行评估。测试后，所选择的概念将进一步进行 HRP 赞助的人体工效测试，并交付 MPCV 后续飞行硬件，于 2017 年应用于 MPCV EM-2 任务。

AEC 组完成了一次抛物线飞行活动，用典型的训练概念来确定 MPCV 操作量和动态界面载荷。该组完成了 0g 状态下的有氧和抗阻力运动。此外，对 3 个感觉运动对抗措施训练的“平衡挑战”概念进行实验，神经前庭实验室还为 MPCV 提出一项新的感觉运动训练要求，这些数据对于理解 MPCV 可行性训练和推进训练装置的设计是十分关键的。

## 12. 数字航天员(DAP)开展眼组织变化及骨质丧失模型工作

一些航天员在长期飞行后出现持久的视觉退化,可能是由于颅内压的改变作用于眼组织所致。DAP 研究者建立了有限元和集总参数模型来寻求定量地描述眼部组织的变化。他们的结果表明随着眼部压力增加,筛板、视神经前部和视网膜最大压力和压缩应变增加。与数值概率分析相结合,该模型也证明个体机械性能可能是病理发展的风险因素,这是因为发现微重力时对眼部组织的拉紧程度高于地面。

深空探索飞船上的设备必须比目前在国际空间站上采用的先进抗阻力训练设备(ARED)小得多,这使得人们担忧这种设备不能提供足够的刺激来维持航天员的生理健康。DAP 开发了一个混合终极提升套件(HULK),进行下蹲、脚跟提高、单腿蹲式运动的生物机械模型,这是一个较小的勘探训练设备原型,通过模型可以计算出无法直接测量的局部肌肉和骨的载荷。2015年,DAP 首次比较了 ARED 和 HULK 产生的运动力。

### (三)探索医学能力项目

#### 1. 完成探索医疗系统演示(ESMD)计划的地面试验

NASA 计划到离地球更远的地方去探索,这对医疗系统提出了挑战,它必须保证航天员的健康和安全。探索医学能力项目通过发展 EMSD 计划——一个探索任务原型的飞行中医疗数据管理系统,来满足这种需要。2015年,ESMD 成功地进行了地面试验。

ESMD 集成了目前不同的医疗技术和信息工具,例如,电子病历卡(EMR)、辅助医疗程序系统,以及各种医疗设备。使用 EMSD 系统直观的用户界面,乘员可以检索历史医疗信息,查看标准医疗程序交互指令,并保存病人和设备生成的医学数据。使用文字、图片和视频相结合的方式,这些程序提供明确的操作指南,结果可以进行迅速有效的医疗处理和更明智地使用医疗耗材。

集成到系统的医疗设备可以自动和安全地将数据传送到患者的舱载 EMR。其结果是降低损坏或意外丢失数据的风险，有较高的数据完整性，这对于舱载和地面医疗人员是迫切需要的。提供给未来航天员一个直观的医疗界面，将通过减少对地面医务人员的依赖和提高舱载治疗效果，达到更好的治疗标准。

## 2. 灵活超声系统(FUS)顺利通过最终综合评审

FUS 是一个技术开发项目，它专门解决 NASA 今后探索任务人体内部解剖成像无创诊断能力的缺口。因为它具有便携式、低功耗以及避免使用电离辐射的优点，故选择超声作为人体内部成像技术。

使用最先进的临床超声，很难适应新的自定义扫描和治疗计算程序。FUS 处理此缺口的方法是将先进的、研究级水平的系统引入到临床诊断扫描仪。它还采用提供额外硬件能力、提供超声图像和同时用单一集成系统治疗的方法，扩展其系统功能。

FUS 于 2015 年 7 月成功通过了最后综合性的评审。评审包括 FUS 平台研究界面的整合；模态软件开发环境；辅助硬件，带有定量超声波(QUS)的声换能器。NSBRI 研究人员开发的超声检查项目包括肾结石的检测和操作，通过 QUS 检测骨密度，通过用 3D 超声成像视神经和眼球方法监测颅内压。

在 FUS 最后综合性评审前增加了 FUS 平台研制者 GE 卫生保健公司提供的关键技术设计评审。他们采用 GE 公司最近发布的产品 E95 临床平台作为 FUS 的基础。FUS 保留了 E95 临床接口的 FDA 状态，同时整合了研究界面或入口。此入口使研究者可以控制声换能器和成像参数，以使其具备开发新的和改进模式的能力。

## 3. 小企业创新研究(SBIR)奖促进医疗技术的发展

为了探索级的任务，“下一代医用制氧机”将采用真空吸附技术浓缩来自座舱的空气。这一技术将通过降低座舱中附加氧的方法，最大限度地降低发生火灾的可能性。“医用抽吸能力”将研发



一种固体/液体/气体分离器，它是使用一种粘结成泡沫的吸收剂，来俘获固体和液体，只允许气体逸出。这种技术通过减少气体容积，只留下固体和液体物质的方法，极大地减少使用医用吸引器时占用的体积。“血液智能手机诊断”技术是使用手机光学和侧流分析方法，确定各种血液生物标志物。此技术可以减少探索任务期间完成血液分析所需的质量、体积和功率。“低重力药物稳定性分析”促进光谱分析仪硬件的设计，它可以确定一种药物是否还有充足的、可以使用的有效成分。这种技术可用于探索时间超过药物保质期时，确定药物是否可以使用。

#### 4. SpaceMED 实现生物医学数据的无缝集成

许多生物医学和环境监测设备已经部署在国际空间站，它们可以评估心率、血压、超声影像、CO<sub>2</sub>和辐射水平等诸多变量。然而，几乎所有这些装置都是由不同厂家生产的，因此从未将其设计成一个可以集成工作、有同步数据流的设备，或者与之配合的决策支持或治疗设备。其结果是大部分的飞行数据首先被发送到地面控制器，进行费时的数据处理。对于探索任务来说，需要改变这种操作理念，因为通信的延迟将使地面的管理者不能及时地获得飞行中的医学和环境数据。

在 NSBRI 支持下，一组由美国马萨诸塞州总医院和哈佛医学院加里·斯特兰曼博士率领的团队开发了一个名为 SpaceMED 的原型平台作为航天医学和环境设备。这个无缝原型设备将生物医学和环境传感器与感受器、今后的程序指导、决策支持和治疗系统集成在一起。该 SpaceMED V2.2 软件交付给 ExMC，有可能部署到从空间站到行星基地的多种航天场景下。

该平台在无人干预的情况下，可以连续地“侦听”新设备的接通或插入操作，自动地收集数据，同步地收集、储存和显示数据。所有的现场和存档数据，都可以通过基于 Web 的界面，被飞行中的航天员或任何位置有互联网接口的授权用户访问。已经证明

SpaceMED 能够同时处理至少 10 个临床心电图记录，为所有设计的参考任务提供更充分的性能，它也被设计成可以与 ExMC 的 EMSD 软件集成。

#### (四) 空间人的因素和适居性项目

##### 1. 高级环境健康(AEH)研究航天环境中对人体健康的不利

AEH 的工作是分析空间探索期间，由于微生物 - 宿主相互作用的改变和遇到的粉尘和挥发性化合物对人体健康不利影响所产生的风险。2015 年，微生物 - 宿主相互作用的研究主要集中在继续进行飞行中“长期航天飞行对航天员微生物群系影响的研究”，已经完成参加试验的 9 名被试者中 6 名被试者的测试，最后一名被试者的测试于 2016 年完成。此外，一项新的为期 3 年的任务被选为 NASA 研究公告(NRA)的一部分，它将评价在地基模拟航天环境中巨细胞病毒的再活化。

为期一年的使用秀丽隐杆线虫作为模拟人感染模型的研究已经完成。该研究发现，数据提示采用培养在 NASA 旋转壁的秀丽隐杆线虫作为航天模型，并不能充分地表明航天中哪一种生物体的毒性可以发生改变。

AEH 更新了天体尘埃的研究计划，以便可以反映月球尘埃允许暴露标准的修订定义。未来的工作将侧重于评估到其他目的地时，粉尘和挥发物暴露时健康和绩效的风险。此外，粉尘研究者们还初步评估了暴露于高氯酸盐和其他与火星尘有关化学品时的潜在健康风险。

##### 2. 高级食品技术(AFT)研究 3 年贮藏期对营养的影响

长时间的航天飞行将需要供给乘员多年的生活物资，因此，航天食品必须提供合理的营养，以保障乘员的健康和绩效。AFT 的研究者测试了储藏在室温下 3 年的 109 种航天食品，以确定当前食品系统提供足够营养的能力。在食品处理后，需要确定微量营养物的最初浓度，以及它们随着时间发生的变化。

研究人员发现，处理后维生素的稳定性取决于微量营养素、食品基质以及处理方法。在日常的饮食中，只有钾、钙、维生素 K 和维生素 D 这 4 种微量营养素的水平不足。结果表明储存没有引起这些微量营养素水平的下降，而是空间食物中这些营养素有限。储存引起维生素 A、维生素 C、维生素 B1 和维生素 B6 明显的下降。因为维生素 A 和维生素 B6 在许多种食品中都有，而且初始浓度很高，所以只有维生素 B1 和维生素 C 的下降对于整体营养的缺失有意义。

钾、钙、维生素 B1、维生素 C 和维生素 K 不足的对抗措施包括改变处理方法、增加食品营养素，或重新选用具有更稳定食物基质的食物。通过服用维生素 D 丸的方法补充维生素 D。太空食品的冷藏也是延缓维生素降解的一种方法。

### 3. 优化营养，研究航天食品中的生物活性物质

生物活性物质，例如黄酮类，对人体健康有诸多益处。对于长期任务，膳食中生物活性物质的存在，可能会促进整个乘组人员的健康。

通过化学分析证明在当前飞行食品系统中，存在高番茄红素、叶黄素或  $\omega-3$  脂肪酸。但是，固醇有效性低于推荐的水平。新的货架稳定食物，如土耳其闷鱼，被成功地开发来解决生物活性物质供应的缺口。

生物活性化合物的储存稳定性，随着每种化合物和贮存温度而异。有限的存储数据表明，一些生物活性复合物，如番茄红素、叶黄素、海洋  $\omega-3$  脂肪酸和水稻甾醇，在一些平衡浓度时达到平稳水平。花青素的稳定性与储存条件密切相关。同样，绿叶蔬菜中叶黄素的稳定性也与储存条件密切相关。坚果中固醇稳定性似乎与存储期有关，与温度无关。

现在还不清楚对于火星探索任务来说，生物活性物质的保质期是否需要 5 年。这种功能设计只有假设复合物的化学稳定性可

以维持很长保质期的有利结构时才有可能实现。

#### 4. 蔬菜植物生产系统(VEGGIE)初有收获

2016 年 2 月，NASA 肯尼迪航天中心地面对照实验的蔬菜植物生长系统中生长的百日菊迎来了收获。开花植物将有助于科学家进一步了解深空任务和 NASA 火星之旅中的作物生长情况。

地面生长的百日菊并没有像国际空间站上生长的百日菊那样遭受应激，不过生长在国际空间站的百日菊在航天员和肯尼迪中心地面团队的共同努力下，在太空园丁斯科特·凯利的精心照料下，最终出人意料地取得了顺利进展，并为研究人员提供了更多关于如何在太空有效种植作物的信息，其信息之丰富超出了预期。

作为 NASA 太空生物学计划的一部分，VEGGIE 提供了大量关于植物、植物-人-微生物相互作用的信息，所获得的食用植物生产知识将有助于填补食品系统的空白和减少食品系统风险。百日菊作物所呈现给研究人员的信息，对于生长期较长的许多果蔬作物如西红柿、青椒、草莓以及豆类、花生等主要农作物将很有价值。

#### 5. 众包 App 为空间站航天员筹划食品与健康

2016 年被送到国际空间站的食物摄入追踪器(ISS FIT)是一个 iPad 应用程序，它简化了跟踪航天员膳食的方式。ISS FIT 提供了航天员饮食习惯的实时反馈，为地面保障团队的医生和研究人员提供更多信息，以保持乘员健康。该应用程序会报告航天员特别关心的营养元素，来确保足够的卡路里消耗、最小化的钠摄入量以及保持水合作用以减少肾结石的风险。

该应用程序由 NASA 的协作创新卓越中心开发，使用 TopCoder 托管的众包技术。设计用于空间站，解决方案必须符合严格的标准，在没有互联网连接的情况下提供多种用户选项和操作。该应用程序允许乘员记录空间站上的可用食物。它让航天员能够从食物清单查找工具中选取食物，利用录音、拍摄照片或扫描条形码

完成搜索和记录。

该应用程序提供关键营养素的实时信息，包括能量、钠和液体，比如能够使乘员在午饭时查看他们当日后半天是否需要消耗更多的水。液体的摄入对于水合作用相当重要，有助于减少飞行期间较常发生的肾结石风险。该应用程序替代了每周的计算机问卷，那个问卷提供的是一周膳食摄入量的估计信息。详细的数据不仅每天实时地为乘员提供帮助，还对飞行期间的饮食摄入量进行了更详细的评估，并将这些与其他健康信息相关联，如骨质疏松、视力变化等。

## 6. 乘员绩效数据项目为研究数据提供重点

由杰林·阿道夫博士负责的乘员绩效数据项目(HPDP)，正在确认可以使用的数据、指标和方法，它可以帮助科学家和管理人员寻求解决方案，减少 HRP 跟踪风险和差距。

该 HPDP 记录了现有的、可推理的和可收集的指标，用于提高乘员和乘员系统的绩效，降低成本，将风险降到最低，并可以最大限度地发挥合力。之后创建一个库资源，让研究人员、设计师和工程师可以共享数据和指标。

该 HPDP 库资源不是复制整个 NASA 现有的数据库，它包括以下信息：NASA 生命科学数据档案、航天员健康终身监测、通用机器人技术培训及乘员笔记和命令错误数据库。这些数据可以用来告知人们应将研究重点放在解决操作问题和挑战，告知和增强操作以便最大限度地提高乘员的时间效率和安全性，并告知未来载人探索计划的设计方案。

## 7. 乘员保护计划利用 THOR 模型进行数据挖掘和建模

由迈克·格恩哈特博士负责的乘员保护计划的目标是为 NASA 开发乘员保护标准，它将适用于所有未来的载人航天器。该小组为乘员约束(THOR)ATD 试验装置确认了有限元模型(FEM)，为脊柱力量和胸部偏移制定了损伤评估参考值(IARV)。

为了优化 THOR FEM，采用与脊柱正面碰撞的条件下运行，得到在两个加载方向最好的 FEM 响应。通过在不同的脊柱和正面加载条件下运行 FEM，证明它是有效的。

来自美国空军协作生物力学数据网的亚损伤人体志愿者数据、尸体的损伤实验和人体暴露实验以及与 THOR ATD 和 FEM 相匹配的配对实验，被用于制定脊柱力和胸部加压的损伤评估参考值。对于新的计划来说，这些挖掘和模型获得的数据将有助于制定新方案，并可以减少验证初始设计或修改设计所需的人体试验。

## 8. 挖掘 50 年的航天数据来预测 HNP 风险

杰夫里·萨默斯负责乘员保护计划的“椎间盘突出”研究课题，主要研究航天飞行是否会增加髓核突出(HNP)的风险。该小组分析了 330 名美国航天员在 745 次太空任务中，第一次出现 HNP 的日期，此数据跨越 55 年。51 例 HNP 分析结果表明飞行后头三个月 HNP 的风险较高，返回后一年风险降低到背景水平。

没有任何有力的证据证明飞行时间、登陆车、性别、身高、体重、身体质量指数、高性能喷气飞机驾驶对 HNP 风险有影响。值得注意的是，航天与 HNP 的因果关系仍然是一个悬而未决的问题，该数据对潜在的缓解对策提供支持，提出了进一步数据采集的要求。

因为这是一项观察性的研究，很难将许多因素的作用分开，影响了对 HNP 风险的分析 and 确定其因果关系。这些混杂因素包括：飞行时间和飞船着陆时间不同、航天员选拔标准不同、记录的是 HNP 的诊断时间而不是发生时间，以及航天中采用的对抗措施可能掩盖 HNP 的风险。补充其他合作伙伴的 HNP 报告数据及来自 IVD 的研究数据，可以更深入地了解这些影响。

## (五) 行为健康与绩效项目(BHP)

### 1. ISS 乘员受益于睡眠药物的地面研究

航天员在太空飞行中经常遇到睡眠困难。为了解决这个问题，

需要采用个性化策略来支持太空飞行乘员以及负责管理任务的地面操作人员。虽然食品和药品管理部门批准短效的睡眠药物作为治疗太空中睡眠紊乱的主要对策，但是并没有评价它们对觉醒时认知能力的影响。ISS 上每年发生的警报频率约 6 次，要求航天员们立即作出思考和反应。

NASA 飞行医生史密斯·约翰斯顿博士领导 BHP 和 JSC 航天医学部的研究人员，采用双盲、安慰剂作为对照的交叉实验设计方法进行实验。被试者 34 名，其中包括航天员、航天员候选人、飞行负责人、任务管理者和医生。被试者在受控地面状态下，观察在突然觉醒和觉醒后几小时，常用睡眠药物对一系列神经认知功能的影响。

与安慰剂相比，10 毫克剂量的扎来普隆是一种温和但药效短暂的安眠药，它可以增加警惕和工作记忆的误差。服用 5 毫克唑吡坦可以降低认知处理的速度和工作记忆性能。相比之下，10 毫克的唑吡坦可以导致觉醒后即刻和 30 分钟后几乎所有认知功能明显的负面影响。但是，不同睡眠药物的作用有很大的个体差异，一些被试者出现轻度到严重的性能缺陷，而另一些人则没有出现。

这一发现强调了航天员在太空中使用安眠药的个性化，如果航天员在服用安眠药后突然觉醒，要训练他们避免出现性能的缺陷。现在 ISS 上的航天员已经受益于这个实验报告。

此实验报告也可以用于评估其他药物的复合作用。此结果丰富了航天员和地面人员疲劳管理培训计划，进一步明确了乘员系统的健康和医疗标准及未来任务的需求。

## 2. 为适应最佳的昼夜节律和改进绩效进行蓝光研究

调整光的特性有可能成为一种安全的、非药理学的对抗措施，它可以减少空间飞行期间昼夜错位和性能缺陷带来的风险。这些优势可以通过增强蓝光来加大昼夜节律复位和保持警惕反应，或者在睡前减少蓝光，降低警觉性，便于入睡。NSBRI 资助的研究

人员制定出一种动态照明计划(DLS)来确定这些设置在优化昼夜适应、提高警觉性和性能以及提高睡眠质量上的使用时机。

布莱根妇女医院的研究人员伊丽莎白·科勒曼博士领导的小组,在高保真飞行模拟器中,进行了一系列住院病人 8 天的、完全打乱的临床实验,它模拟国际空间站的照明环境、睡眠模式和工作安排。该研究比较了使用了 DLS 和睡眠-工作日程安排中逐渐提前 8 小时出现的改变,以及睡眠-觉醒和工作日程突然“关闭”发生的改变之间的异同点。

在第一项实验中评估连续暴露于 DLS 的效果,而在第二项实验中评估间歇照明的影响。初步分析表明,逐渐和突然的转变之间无统计学差异。

### 3. 用软件工具评价 ISS 上的认知功能

挑战环境下生理和心理应激可能影响脑功能,因此持续的、高层次的认知能力对于成功地完成航天飞行至关重要。一项命名为“认知”的计算机化认知测试实验,是专门为航天员设计的。它由宾夕法尼亚大学开发,由 10 个简短的、经过验证的神经心理测验组成,可以测量与航天应激相关的认知功能。迄今为止,已经成功证明了认知作为研究工具的可行性,并可以在飞行中操作。几项验证正在努力证明认知对一般飞行应激的敏感性,例如,对于二氧化碳水平的增加。初步分析已经表明认知对睡眠剥夺的影响是敏感的。同时也在进行一项确认性的研究——比较 iPad 和 Windows 平台上与通常使用在航天操作中成套实验的敏感性。

### 4. 采用通信的自动化分析来确定乘员状态

克里斯·米勒博士等采用智能流技术,通过交易记录分析(AD ASTRA)的研究自动检测人的态度和状态。研究人员通过自动化分析原来的数据,评估个人和团队的心理状态和态度。早已证明航天员的日记是经验和态度丰富的数据来源,在任务操作中已经记录许多人际交流的情况。自动地评估这些来源,扩展了研



究的数据量，使 NASA 研究人员可以改善航天员的心理健康和绩效，同时减少了航天员必须完成的调查数量。

该项研究测试各种文本分析技术。主要的方法是仔细检查相关类别中的字数，如分组动态特性、句子长度评价、相似性与正性或负性情绪检测的语义分析。首先进行历史任务抄本和公开的飞行中航天员日记或博客的分析，随后是三个不同的航天模拟研究，包括卧床研究战役 11、HI-SEAS 和 HERA 任务。

结果表明，自动化的日记分析可以可靠地代替一些态度和情感的调查。分析结果与被试者过去、现在和将来情绪积极性明显相符。与研究态度、身体健康状态和专注于自我与他人的相关性也具有统计学显著性。

### 5. JSC 的团队培训方法得到扩展应用

美国佛罗里达大学金·史密斯-耶特斯博士领导的研究小组证明，JSC 飞行控制者认证的时间减少了 50%。这一研究结果被用来开发 JSC 飞行操作委员会(FOD)的团队汇报方法和联合作业模型，该模型被称为空间培训团队(TDT)。

团队汇报方法的目标是将 4 种团队合作能力作为有效的团队绩效和功能：信息交流、通信传送、领导/追随者和支持行为，该方法已在飞行控制模拟器中实施。FOD 正在修改它的特殊需求，扩展其技术应用，以达到实现充分受益的目的。

在 JSC 进行 TDT 方法学独创研究的同时，2015 年将其应用到多个 NASA 中心，包括对马歇尔航天飞行中心(MSFC)教官团队进行有关的训练。此外，2013 年的预备航天员(ASCAN)班也接受了 TDT 方法的培训。进行 TDT 训练的优点是可以确保 NASA 多个团队采用一致的训练方法、训练中给予更多支持、更结合实践、为改善当前任务和未来的探索任务的绩效提供可能性。

### 三、美、俄欧开展各类地面模拟试验

#### (一) 一年期火星模拟试验完成

美国夏威夷火星任务模拟试验(HI-SEAS)于8月28日顺利结束。该试验历时一年,参试人员为6名科学家,分别是美国的土壤和生态学家、飞行器驾驶员、医生(也是记者)、建筑学家和来自德国的物理学家以及法国的天体生物学家。该研究由NASA资助,目的是研究长期飞行过程中航天员面临的各种心理和医学问题。该火星模拟试验完全与外界隔离,6名参试人员长期生活在一个穹顶试验舱内。HI-SEAS栖息地坐落于莫纳罗亚火山北坡一个废弃的采石场附近,海拔2400米。它附近有一系列由火山渣堆倒塌的熔岩形成的悬崖。这里几乎没有植被,没有濒危物种,也没有考古遗址或文化遗迹。

栖息地建筑由一个圆顶结构支撑,内部为双层结构,由保罗·蓬蒂厄设计,由夏威夷的Honolulu蓝色星球基金会出资建造。建筑圆顶高为11米、直径6米,体积约384立方米。一层面积为92平方米,包括厨房、餐厅、浴室、淋浴、实验室、运动和公共空间等区域。设计理念很开放,这些区域可直通二层的睡眠区。二层阁楼的面积为39平方米,包括6个半包的卧室和浴室。试验舱采用太阳能供电。参试人员走出试验舱必须身穿航天服。

HI-SEAS研究者致力于开发有效的团队结构,并制定能够让乘组成功往返火星的策略。任务期间通过摄像机、身体移动跟踪器、电子勘测器和其他方式监测乘组。莫纳罗亚项目研究人员及其合作者研究乘组长期的凝聚力,大范围收集会影响团队绩效的认知、社交和情感因素的数据。

此次为2013年以来第4次隔离试验。第一次和第二次试验均为期4个月,第三次试验为期8个月。目前NASA正在招募选拔即将于2017年和2018年开展的8个月隔离试验的志愿者。

## (二) 载人探索研究模拟试验 (HERA) 进行 4 次 30 天载人小行星登陆模拟

HERA 也称“赫拉”试验，是 NASA 为航天员进行深空任务（如小行星或火星任务）所开展的人体研究项目中的一项，主要是在地面进行航天飞行模拟任务，可以对人在太空受到的生理和心理的影响进行模拟。

“赫拉”试验舱是一个 2 层 4 舱门居住舱，位于 NASA 约翰逊航天中心第 220 号楼。它的外观像一个垂直的圆柱体，连接着一个模拟气闸舱和卫生舱。总容积约为 148.1 立方米，分布如下：核心区（56 立方米），阁楼区（69.9 立方米）、气闸区（8.6 立方米）和卫生舱（14.1 立方米）。

“赫拉”试验舱的能力包括可以通过网络在乘组和 220 号大楼的地面控制人员之间交换研究数据和语音信息。约翰逊航天中心遥科学中心能够实时或近实时地安全地远程访问研究数据。试验舱配备了视频和音频监控系统，可利用与实际飞行相同的时间线和程序指示器来提供航天任务的模拟体验。

目前，“赫拉”试验主要模拟航天探索隔离、封闭和远距离的任务情境。本年度，“赫拉”试验进行了一系列共 4 次模拟小行星登陆任务，即 HERA-9 ~ HERA-12，乘员均为 4 名（性别组合不同），时长均为 30 天。据该试验项目经理介绍，之所以重复进行类似试验，是为了探讨特定的研究方案，了解研究数据的变化。

任务期间完成的实验包括植物栽培、盐水虾养殖，还通过 3D 打印机制造了一部分设备。乘组模拟“访问”了一个虚拟小行星，并进行了土壤和岩石采集。外部研究人员收集了很多有价值的数 据，包括团队工作模式、冲突解决以及长期隔离和封闭造成的影响。

## (三) “火星”160 任务开启

美国火星协会开启了一项新任务“火星”160 (Mars 160)，该任

务在其两个模拟研究站内进行，由一批相同的 7 人乘组进行相同的科学实验，经历相同的 80 天模拟任务——2016 年秋天在南部犹他州的火星荒漠研究站开始，2017 年夏天将继续在加拿大北部的北极研究站进行。

多国乘员包括：指令长 - 工程师，亚历山大·蒙吉特博士(法国)；执行官，村上佑介(日本)；新闻记者，阿娜斯塔西·斯蒂潘诺娃(俄罗斯)；工程师，克劳德 - 麦克·拉赫西(加拿大)；地质学家，乔纳森·克拉克(澳大利亚)；健康和安全官，安娜烈·贝蒂(澳大利亚)；生物学家，阿努什里·斯里瓦斯塔瓦(印度和英国)；地质学家，备份乘员，保罗·奈特利(美国)；生物学家，备份乘员，香农·鲁珀特(美国)。

香农·鲁珀特还担任本次任务的首席调查员，火星协会主席罗伯特·祖布林博士则担任计划负责人。任务期间，乘员们在许多与火星载人探索相同的约束下，完成地质学、古生物学和微生物学领域的探索。研究小组还执行与火星相关的工程研究，测试生物医学遥科学研究、航天服技术、出舱探索策略、航天员训练和居住舱技术。“火星”160 在两个地点开展相同的模拟任务——荒漠(Mars Desert 80)和北极(Mars Arctic 80)，意在比较两地间模拟结果的差异。

#### **(四) 俄生物医学问题研究所启动“干浸”2016 实验**

俄罗斯生物医学问题研究所于 2016 年 10 月启动了一项名为“干浸”2016 的实验，目的是在真实和模拟的低重力环境下(失重和模拟失重)，对参与运动控制系统保障的人体主要感觉系统(前庭、支撑、本体感官和视觉)在运动组织中的作用和活动特点开展研究，在上述环境下开展分别有不同器官参与的运动控制系统特性变化的对比研究。同时，在该实验框架下还进行国际空间站航天员飞前和飞后的研究项目“实地测试”增补大纲的地面模拟。

有 12 名年龄在 20 ~ 43 岁的身体健康的志愿者参与干浸实验。

科学家利用“干浸运动机能减退”作为低重力模型，该模型可以比较充分地重现失重效应之一：失去支撑。在充满水的水槽内铺上不透水的帆布，参试志愿者需要在5个昼夜期间在里面保持平卧。水温保持在33℃。5昼夜内要开展28项研究，使科学家能够细致深入地研究微重力对人体的影响。实验研究的第二部分是在失去支撑的条件下使用静态重力负荷，每昼夜参试者需要穿有轴向压力的企鹅服4个小时，压力的水平与国际空间站上使用的一致。这项研究中，科学家们将获得静态轴向负荷作为无支撑对人体运动系统和其他系统不良影响预防措施的效果的研究数据。

### **(五) 模拟火星农场首次收获西红柿和豌豆**

2016年3月，位于荷兰瓦赫宁厄大学研究中心的模拟火星农场收获了包括西红柿、豌豆、黑麦、芝麻菜、萝卜等农作物。本次实验是第二轮火星农作物栽培实验研究人员认为，第一轮实验获得的经验，为第二轮实验更大的成功做了良好的铺垫。

研究人员使用托盘作为栽培床，并在火星和月球模拟土壤中增加了有机肥料。对火星模拟土壤和月球模拟土壤的测试显示，在火星模拟土壤上种植农作物，通过适当地准备和浇灌可以获得与地球受控土壤相同的产量，而月球模拟土壤的产量比较低。此外，栽培实验在玻璃容器内完成，并且环境是严格受控的。实验室内保持模拟地球栽培环境下恒定的温度、湿度和光照条件。前期完成的两轮实验关注的是农作物的生存能力，随后的实验将重点放在适食性和食品安全方面。原因是火星土壤含有很多重金属成分，包括铅、砷和汞，研究人员需要研究收获农作物的毒素水平。目前，研究人员正在为第三轮实验寻求资金支持。

### **(六) NASA 开展火星农作物栽培实验**

NASA 肯尼迪航天中心与佛罗里达技术“巴兹·艾尔德林”空间研究所，正在模拟“火星花园”里，对农作物物种种植特性进行研究实验，为未来火星农场进行地面验证。

肯尼迪航天中心航天食品首席项目主管拉尔夫·弗里切认为，火星上并没有真正意义上的土壤，火星表面上覆盖着风化层、火山岩石碎块，根本不含有任何有机物，反而含有一些有毒化学物质，这些都给植物栽培带来了非常复杂的挑战。

佛罗里达技术研究所使用 45 千克火星模拟土壤进行实验研究，这些土壤来自夏威夷，是根据火星车的光谱数据选择的。目前这种土壤被广泛用来测试植物栽培硬件系统的性能。佛罗里达技术研究所的研究团队使用这种土壤，研究各种农作物最佳种植需要添加营养物质的种类和数量。

在 3.5 周的初步实验研究期间，研究人员进行三种生菜种植：一种使用模拟火星土壤、一种使用添加了营养成分的模拟火星土壤、一种使用普通盆栽土。实验开始时在模拟火星土壤上种植了 30 粒种子，但实验结束时只有一半存活下来。尽管它们尝起来味道并无异常，但是根并不如盆栽土壤那样强壮。初步的研究还发现，模拟火星土壤种植生菜的出芽时间比盆栽土种植生菜要晚 2~3 天，因此，了解火星农作物种植的时间线与地球的差异非常重要。

在为期 9 个月的实验期间，研究人员尝试栽培的农作物包括：小萝卜、叶甜菜、无头甘蓝、中国大白菜、雪豆、矮辣椒和西红柿，所有的都是富有营养的食物，而且更重要的是，所有的都经过测试并入选航天员食谱。

#### 四、结束语

国际空间站首批一年期乘组返回后已完成部分后续测试，美、俄两国研究人员正在处理飞行前、中、后的实验数据，初步研究结果即将面世；后续国际空间站还将可能迎来 5 批一年期乘组。为深空之旅提供安全与绩效保证的 NASA 人体研究计划已经开始设计后续任务，以确保在航天员进行长期深空探险之前对微重力

下延长驻留的情况有更充分地了解。更为多样的各类地面模拟试验也将陆续展开，进一步深化对人类星际探索活动所面临的困难与挑战的认识。

(中国航天员科研训练中心)