



## 评述

## 空间脑科学研究的回顾与展望

肖毅<sup>1</sup>, 陈晓萍<sup>1</sup>, 许潇丹<sup>1</sup>, 李澄宇<sup>2</sup>, 蒲慕明<sup>3,4\*</sup>, 陈善广<sup>1,5\*</sup>

1. 中国航天员科研训练中心, 人因工程全国重点实验室, 北京 100094;

2. 临港实验室, 上海 200031;

3. 中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心, 上海 200031;

4. 上海脑科学与类脑研究中心, 上海 201602;

5. 中国载人航天工程办公室, 北京 100081;

\* 联系人, E-mail: mpoo@ion.ac.cn; shanguang\_chen@126.com

收稿日期: 2022-12-15; 接受日期: 2023-02-22; 网络版发表日期: 2023-11-13

国家自然科学基金(批准号: T2192930, 72071185)、科技创新2030-“脑科学与类脑研究”重大项目(批准号: 20302022ZD0208500)和专项研究(批准号: 20-163-12-ZT-001-006-04)资助

**摘要** 人类大脑是自然界最复杂的系统之一。大脑结构与功能之谜是人类认识自身的终极疆域, 对于推动科技创新发展与人类文明进步具有极其重要的意义。载人航天是现代科技革命的重要领域之一, 美国、俄罗斯等航天大国已利用空间资源开展脑科学研究。我国空间站的建设, 将提供空间脑科学研究的系统创新平台, 极大地推进中国空间脑科学计划进程。本文综述了在空间环境或模拟空间环境下, 脑发育及生物学机制、认知规律与机制、生物节律和睡眠对脑功能的影响、群脑协同等方面的空间脑科学研究进展, 并简述和展望了我国空间脑科学研究的发展方向。

**关键词** 空间环境, 脑科学, 失重, 脑发育, 认知, 群脑协同

随着世界各国脑研究计划的相继启动和实施, 全球脑科学研究热潮方兴未艾。2013年以来, 美国和欧盟相继启动“脑计划”(BRAIN Initiative)和“人脑计划”(Human Brain Project)。目前美国脑计划2.0版本已启动。2016年后日本、加拿大、韩国和澳大利亚等国也纷纷启动了国家层面的脑研究计划。2023年, 我国脑科学计划也进入了实施阶段。脑科学研究已经成为世界科技创新发展的战略制高点<sup>[1,2]</sup>。

脑科学的发展, 为载人航空气空间脑科学(space brain science)研究提供了重要的科学导向和技术支撑。利用近地轨道开展的空间脑科学研究有力地保障了空

间站航天员健康、高效工作, 也将为后续载人登月、深空探测等提供重要支撑。国际空间站和中国空间站的建立, 可提供在地球上几乎不存在或难以长期保持同一状态的特殊近地空间环境条件, 包括失重或微重力、空间辐射等。这对于加深对生命起源和进化的认识, 解析脑发育、脑结构和脑功能领域的科学难题具有重要意义。自1962年“东方”3号空间飞行开始至2010年国际空间站ISS的26期试验截止, 空间脑科学领域已经开展了420项空间认知神经科学实验<sup>[3-6]</sup>。最具有里程碑意义的是, 2019年Science期刊发表了国际空间站以美国主导完成的空间生命科学领域著名的“双胞胎

引用格式: 肖毅, 陈晓萍, 许潇丹, 等. 空间脑科学研究的回顾与展望. 中国科学: 生命科学, 2024, 54: 325-337

Xiao Y, Chen X P, Xu X D, et al. Space brain research: progress and prospect (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2024, 54: 325-337, doi: 10.1360/SSV-2022-0196

太空实验”<sup>[7]</sup>, 对分别位于空间站和地球上的一对双胞胎宇航员进行了基因水平和认知能力等涉及10个不同领域方向的检测分析, 其中对认知等脑科学的研究对未来空间脑科学研究和相关任务规划等战略制定具有重要意义。鉴于此, 我国也开始推动实施空间站阶段的脑科学研究计划。

## 1 空间脑科学

空间环境主要包括微(变)重力、空间辐射、特殊环境节律等自然环境因素, 空间密闭、光照等人造物理环境因素, 以及航天员乘组在太空环境下构成的微型社会环境等<sup>[8-12]</sup>。

脑科学是研究脑的结构和功能的科学, 包括从分子、细胞、环路、系统层面解析大脑结构和功能原理, 解析脑的发育过程、神经信息的处理机制、神经环路的工作原理、大脑对外界和内在信息的认知以及产生各种行为的机制等。脑科学在环路和系统层面对认知过程的理解, 为认知神经科学<sup>[13]</sup>提供了生物学基础。神经系统遍布全身, 作为神经系统的中枢, 大脑与身体各组织系统有密切的交互作用。近年来, 大脑与免疫、心血管、代谢、肠道系统交互作用的研究, 已渐成为脑科学研究的重要内容。

空间脑科学是指在空间环境下研究脑结构和功能的科学, 探索空间环境下大脑的工作原理、规律和机制, 并针对性地研究保护脑的措施和技术方法等。由于空间环境的特殊性和研究条件限制, 空间脑科学又有其独特性。随着人类探索太空事业的蓬勃发展, 空间脑科学将成为脑科学研究领域非常重要的一部分, 不可替代, 不可或缺。

在地球重力环境下, 人类大脑是几千万年灵长类演化过程所塑造而成的, 是最为精密、复杂的生物系统。这个地球重力条件下构建的系统所具有的各种分子细胞和生理学特性, 神经环路结构和功能, 感知觉、记忆、注意、情绪、抉择、合作等认知心理行为, 在空间微重力环境下会发生怎样的变化, 亟待通过空间脑科学研究去揭示。空间脑科学研究对揭示人类在空间环境的生存和工作能力, 理解重力环境下大脑的结构与功能产生的基本原理具有重大意义。

除微重力外, 空间辐射、特殊环境节律、密闭环境等也是空间脑科学研究需要考虑的重要因素。由于

空间资源条件限制, 空间脑科学研究平台研制和实验设计等有更大的挑战和更加精准的要求。

综上所述, 空间脑科学具有环境因素独特、科学意义重大、研究资源宝贵、创新要求极高等显著特点。

## 2 空间脑科学研究进展

本文重点关注空间环境或模拟空间环境条件下脑发育及其生物学机制、脑感知和情绪等认知变化规律和机制、生物节律和睡眠对脑功能的影响, 以及群脑协同等方面的脑科学研究进展。

### 2.1 空间脑发育及其生物学机制研究

针对空间环境或模拟空间环境对神经系统发育的影响及机制, 从分子、细胞、组织、器官、系统等不同层面, 过去已开展了各类研究。

(1) 分子、细胞水平研究。细胞和类器官组织方面的研究表明, 微重力环境对神经细胞、人胚胎干细胞的类脑组织、小脑超微结构、神经纤维生长等存在影响<sup>[14-20]</sup>。空间环境使新生神经元的成熟过程延迟<sup>[14]</sup>, 采用空间站细胞成像系统, 记录神经干细胞分化成新生神经元的过程, 发现新生神经元产生了异常的轴树突结构<sup>[15]</sup>。细胞学研究显示, 微重力对神经细胞的膜流动性、膜电位、动作电位等均有重要影响<sup>[16]</sup>。微重力使大鼠前庭球囊毛细胞突触总量减少, 带状突触密度增加<sup>[18,19]</sup>。辐射也对神经发育存在影响。2014年有研究报道了辐射导致神经干细胞一些基因产生突变<sup>[21]</sup>。我国研究发现短期停留在200公里轨道高度的小鼠神经干细胞的生存能力显著下降<sup>[22]</sup>。

(2) 器官、系统水平研究。NASA于2019年在轨开展了“微重力对人类脑类器官的影响”研究, 探索微重力如何影响脑细胞的基本功能, 包括生存、迁移和代谢, 以及神经网络的形成。该研究把已经存活了一个月的“脑类器官”送到国际空间站并在轨停留27天。尽管尚未见到该项研究结果的公开报道, 但在轨开展脑类器官研究不仅可以促进脑类器官技术的发展, 更有助于解决更多关于研究人脑所面临的难题。NASA最近研究成果显示, 人胚胎干细胞源的类脑组织细胞球体比正常重力下明显增大。前脑神经元标志基因表达

降低,而后脑神经元标志基因表达增高<sup>[17]</sup>。这表明,微重力至少在干细胞分化路径上改变了神经元“头-尾轴”(rostral-caudal axis)的选择。

航天飞行对小脑超微结构也存在影响。研究发现航天飞行24小时后,成年大鼠中枢神经系统出现支持神经元可塑性的超微结构变化,包括细胞及分子层面的变化<sup>[23]</sup>。空间飞行条件下相关神经实验研究表明,在失重环境下迅速发生突触重塑,两类毛细胞及两处囊斑中的突触变化具有差异性<sup>[19]</sup>。飞行后神经系统再适应问题的研究结果表明,在轨期间显著降低的重力加速度引起了椭圆囊敏感性的上升调节,恢复至正常敏感性的时间进程与报道中所见航天员返航后的前庭定向障碍减弱、平衡能力改善等具有一定的对应关系。

现有研究表明,微重力对平衡等神经系统发育存在影响。重力缺失影响脑中神经联结的发育,但这种效应并不针对重力感应器本身,受影响最大的区域为前庭神经核与小脑。对在微重力中度过部分早期发育阶段的大鼠海马体结构和功能评估结果表明,微重力对认知地图功能及其细胞基质的影响极为微弱,且发育期间由微重力造成的差异为短暂现象,返回地面迅速恢复至正常状态,但该变化是否与在轨时间有关目前还没有明确结论<sup>[3]</sup>,需要进一步探讨。

最近俄罗斯科学家两次将果蝇发射到国际空间站,第一次发射了10只果蝇幼虫,在国际空间站停留20天;第二次发射了45只成年雄性果蝇,约10天后返回地球。返回地球后,这些果蝇的运动能力得到增强——运动频率加快,持续时间变长,速度也更快<sup>[24]</sup>。这可能表明太空飞行使昆虫的中枢神经系统被激活,并且果蝇在发育过程中越早处于太空条件下,这些变化就越强烈,但这种变化能持续多久尚不明确。

(3) 人体大脑形态、结构变化研究。Demertzi等人<sup>[25]</sup>首次阐释了长期空间飞行(6个月)后航天员大脑形态和连接结构改变。相比飞行前,飞行后航天员运动皮层和小脑之间前庭和运动相关区域、默认模式网络内部的静息态功能连接显著降低。此外,航天员在运动想象任务中辅助运动区域激活水平高于飞行前。这些变化可以解释前庭功能和运动控制能力的降低。Roberts, Alperin, Koppelmans, Ombergen等团队的研究也表明,长期航天飞行导致大脑结构发生显著变化,额叶和顶叶受到的影响最大<sup>[26-29]</sup>。Kramer等人<sup>[30]</sup>通过磁共振

对航天员大脑进行检查,首次观察到航天员大脑的运动中心和其他区域适应太空生活的过程,而且在适应航天飞行过程中,11名航天员大脑内白质的体积平均增加了约26 mL,神经细胞之间的连接特性也发生了变化。同时,发现除了大脑中央沟的大小有些变化外,其余的变化在航天员返回地球大约7个月后完全消失。这表明神经组织没有发生根本性变化或者大脑结构没有出现不可逆性变化。

另据Spacedaily报道([http://www.spacedaily.com/reports/Spaceflight\\_changes\\_the\\_shape\\_of\\_astronauts\\_brains\\_999.html](http://www.spacedaily.com/reports/Spaceflight_changes_the_shape_of_astronauts_brains_999.html)),美国密歇根大学的科学家对比了27位航天员飞行前、后的大脑核磁共振图像,结果显示,航天员大脑不同部位的灰质体积变化趋势不同,有的区域减少,有的区域增加。大片区域的灰质体积减少,这可能与脑脊液在太空中的重新分配有关。与平衡和腿部运动有关区域的灰质体积增加,这是因为航天员需要连续学习如何适应微重力,这也是大脑神经可塑性的一个具体体现。而且在太空飞行时间越长,这种变化就越明显。

长期空间飞行会导致脑积水,2017年Roberts等人<sup>[28]</sup>发表了长期航天飞行导致脑积水的突破性研究。该研究结果表明,空间飞行6个月后,脑内变化比飞行几周者更为显著,包括脑室容积增加、小脑扁桃体上移及脑沟回变窄等,推测该变化与相邻静脉结构受压和脑脊液流出产生的阻力改变相关<sup>[31]</sup>。Kramer等人<sup>[30]</sup>找到了大脑的形状和结构发生变化与脑脊液在失重条件下表现有关的新证据。目前科学家将其归因于:神经系统的运动中心和其他区域需要适应失重条件下的运动和导航,而且大脑中脑脊液的积聚情况需要重新分布。

空间脑发育及生物学机制领域的研究进展为脑积水、帕金森病和阿尔茨海默症<sup>[32]</sup>等疾病机制的认识以及新治疗方法的探索提供了新途径。由于技术条件限制,该领域相关研究还存在一定的局限性。目前还缺乏长期空间环境影响胚胎和成体神经发育的研究,对于人类脑器官以及非人灵长类动物脑发育的研究也还很欠缺。未来应利用先进的干细胞和神经科学技术,结合干细胞和脑类器官、小鼠和狨猴动物以及人体开展实验,系统性地研究空间环境对神经发育和可塑性的影响,揭示空间环境下独有的神经发育规律与机制。



## 2.2 空间环境下认知变化规律和机制研究

空间环境下的多种因素会影响人的认知功能(图1)<sup>[7,11,32~47]</sup>, 增加在轨任务风险. 为此, 美国、俄罗斯航天大国开展了空间环境下认知能力变化规律及机制研究.

(1) 感知研究. 科学家们从行为绩效与认知神经层面对空间环境下的视觉、听觉、味嗅觉以及空间感知、眼手协调控制等变化开展了大量研究<sup>[11,33]</sup>.

研究发现视觉、味嗅觉存在变化<sup>[9,11,37~39,45,48]</sup>. 长期飞行环境下, 视功能(屈光度、视神经、眼球扁平率)存在持久损伤<sup>[36,40,46,48]</sup>, 且有不可恢复的风险, 其原因可能与第三脑室内脑脊液体积增加有关<sup>[30,34,37]</sup>. 体液头向分布造成的被动鼻充血引起味觉和气味敏感度下降<sup>[3~7,9,11]</sup>.

空间感知方面, 研究显示微重力下前庭和视觉线索相互矛盾导致前庭眼反射的紊乱, 这对眼球运动、注视和空间定位产生直接影响<sup>[36,46,49,50]</sup>. 此外, 航天员

在权衡定向线索时存在可塑性<sup>[50]</sup>. 重力参照系框架的缺失会导致对空间线索心理表征的扭曲. 在轨环境中个体更容易将高度高估, 深度低估. 闭眼画necker立方体(视错觉透视体), 高度画得更短, 深度更长. 在轨环境下个体更容易将体积低估(大约低估20%). 这些结果对于改善空间飞行任务中的人员绩效具有很重要的作用<sup>[3~7,9]</sup>. ESA采用虚拟现实与脑电记录联合的方式研究了感觉不对称的神经机制, 揭示了自发脑电与感觉不对称性存在相关性, 而且事件相关电位也发生了变化<sup>[51]</sup>.

运动感知方面, 空间飞行的早期阶段, 本体感觉异常会影响运动灵活性, 但触觉可补偿<sup>[50,52]</sup>. 由于下肢活动降低, 人的运动皮层兴奋性增加<sup>[53]</sup>. 微重力适应期本体感受改变, 导致各种形式的感觉-运动不一致, 例如, 肢体位置意识障碍和不正确的动作姿势<sup>[36]</sup>. 由于缺乏引力, 视觉线索与垂直前庭/身体线索之间不匹配, 导致产生“空间晕动病”<sup>[54]</sup>. 空间飞行导致运动协

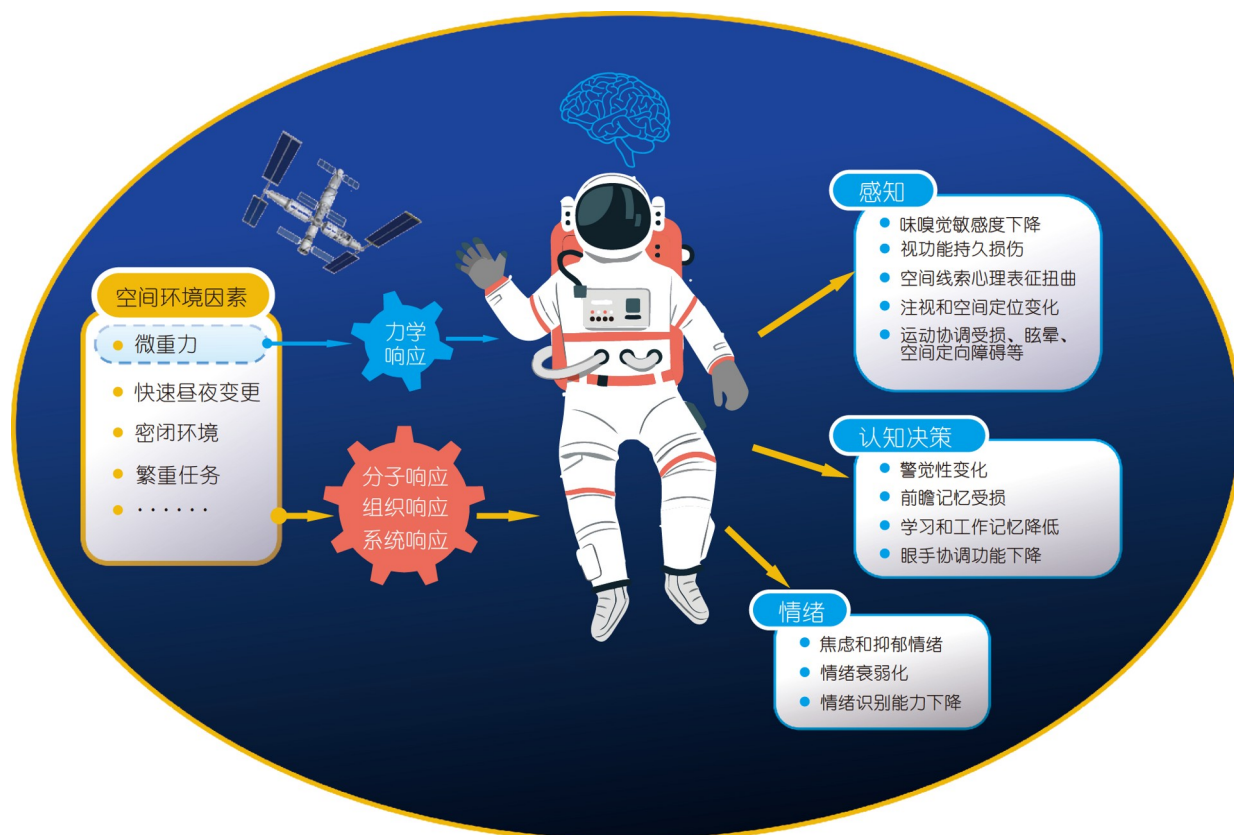


图1 空间环境下认知变化规律和机制研究

Figure 1 Studies on cognitive changes and the underlying mechanisms in space environment

调受损、眩晕、空间定向障碍, 以及返回地球后的感知错觉<sup>[55]</sup>。为此, 加拿大航天局一直在开展“长期微重力对自我运动感知的影响(错觉诱发)”研究, 旨在确定微重力对航天员视觉解释运动、方位和距离的能力的干扰程度, 以及这些能力如何在太空中适应并在返回地球后再次发生变化<sup>[50]</sup>。该项目<sup>[50]</sup>最新研究发现, 大脑对视觉信息的反应可以改变一个人对重力方向的感知。

(2) 认知、决策研究. 研究表明, 长期飞行导致认知能力受损, 包括记忆障碍、注意力集中性、警觉性下降等<sup>[3-7,9,11,36,41,48]</sup>。

注意和记忆方面, NASA在轨开展了大量的警觉性测试, 有些研究结果表明在轨情况下航天员的警觉性(持续性注意)发生变化。在记忆方面, “和平”号空间站的研究结果表明, 失重环境可降低学习记忆和工作记忆能力; NASA相关研究结果表明, 前瞻记忆损伤对飞行安全构成重大威胁。根据美国宇航局艾姆斯研究中心关于航空飞行驾驶舱中前瞻记忆需求的研究报告, 有很多事故是由于前瞻记忆失效导致的。头低位卧床实验发现, 卧床期间和卧床后个体前瞻记忆的反应准确度、检查时钟的频率下降。前瞻记忆的损害可能是由于有氧运动的缺乏或者是前额叶皮层的结构变化<sup>[5,11,36,41,48]</sup>, 而前额叶皮层结构变化本质上是重力缺失引起的, 但其内在机理还需要深入探讨。

精细化操作和操作技能方面, 美国NASA与加拿大航天局合作进行的空间感知运动缺陷调查(Perceptual Motor Deficits in Space, PMDIS)测试结果发现, 在轨手协调性丧失可能是认知过载的压力等各方面因素造成的, 包括感知觉的稳定性、空间病等, 而不一定是失重环境对大脑产生影响的结果。在轨研究发现, 飞行期间的运动控制能力、需要精细手动操作的不定跟踪能力下降, 精细运动任务(点击、拖拽、形状描绘和夹点旋转)精确性降低, 反应时延长。这些变化可能会影响未来乘组登陆行星表面后执行基于计算机的设备操作的精确性<sup>[3-7,9,11,45]</sup>。

决策方面, 在轨及地面卧床模拟实验开展了决策任务测试。NASA开发了一套综合性的认知神经评价工具Cognition, 采用气球模拟风险任务(balloon analog risk task, BART)评价风险决策。在卧床实验中采用Iowa赌博任务来测试志愿者的决策功能。任务绩效表明, 卧床前后的得分没有显著差异, 但是, 卧床期间的

志愿者不能随着任务的进展而调整自己的选牌策略, 这与卧床前的志愿者结果不同<sup>[3-6,9]</sup>, 卧床前可以随着任务进展调整策略。

国内借助神九、神十任务<sup>[11]</sup>、天宫实验室任务和空间站任务开展了一系列在轨认知能力测试研究, 包括对感知觉、注意、记忆、决策、眼手协调性等多种基本认知能力和决策特性的测试研究, 取得了大量基础数据, 为后续空间站实施相关研究奠定了坚实基础。

(3) 情绪研究. 航天员空间飞行面临着繁重的作业压力以及失重、隔离、狭小等环境应激因素和睡眠障碍, 并给心理上带来衰弱、抑郁等应激反应。以往研究发现, 尽管空间飞行状态下心境障碍比较罕见, 但是个体体会发生比较明显的焦虑和抑郁情绪<sup>[56]</sup>。

航天心理专家和医生认为对长期飞行任务的航天员产生较大影响的精神心理综合征, 其典型症状包括疲劳、易怒、情绪不稳定、注意力集中困难、坐立不安、知觉高度敏感、心悸、血压不稳定、虚弱、精力和积极性下降、睡眠困难、食欲不振等, 该综合征被认为是长期密闭隔离环境可能引发的最严重的心理问题<sup>[57-61]</sup>。空间研究发现, 长期空间飞行中出现情绪衰弱化现象, 通常发生在空间飞行数周之后。

单调的噪音和振动是造成压力的来源。乘组表示他们在无意识地听取环境声音变化所表明机械故障时会感到紧张<sup>[54]</sup>。此外, 自动推进器以及船体因温度变化而膨胀和收缩等, 都可能对睡眠带来挑战<sup>[62]</sup>, 这反过来可能又导致疲劳、警惕性下降和产生应对的压力。

MARS 500项目探索了长期空间飞行的情绪变化规律与调节机制。研究发现, 志愿者的积极情绪成分在任务期间出现了显著下降, 任务第99天到达积极情绪最低点, 成熟型情绪防卫机制与积极情绪之间存在正性相关<sup>[62]</sup>。

情绪对认知也存在影响。一项新研究发现, 在模拟失重环境下生活近2个月, 将对人的认知能力产生负面影响, 且短期的人工重力对抗可能无法消除。另一方面情绪识别也出现问题, 受试者更容易将面部表情识别为愤怒, 而不太可能将其识别为快乐或中性。而且对执行长期飞行任务航天员的研究结果与地面模拟研究情况非常相似。航天员正确解读情绪的能力可能会随着飞行时间的推移而减弱<sup>[57]</sup>。情绪研究的相关发现和

结论已经应用于航天员的心理状态干预等方面的实践中。

尽管在认知和决策领域已开展了较多空间环境下的认知研究, 尤其对本体感、空间运动病、精细操作能力、情绪等方面取得的众多研究结果已经应用于航天员在轨适应性训练和干预, 以及在轨人机交互设计等方面<sup>[3~7,9]</sup>, 但受伦理和技术条件等限制, 长期空间飞行导致的认知能力下降在机制层面的研究还有待进一步突破。未来结合开展非人灵长类空间脑科学研究, 将有助于深入系统地阐明空间环境下的认知规律与机制, 并开展防护与干预技术研究。

## 2.3 空间环境下生物节律与睡眠的改变及其对脑功能影响研究

长期空间环境下的多种因素, 包括微重力、快速光暗交替、不规律的作息安排、密闭环境以及缺乏社会接触等, 都可能影响生物节律, 进而引起认知行为和情绪等脑功能的改变, 导致航天员健康受损和工作绩效降低<sup>[63]</sup>。

一些模式生物的行为在微重力条件都会发生明显的改变, 例如, 沙漠甲虫的活动节律周期和活动模式在微重力和持续光照条件下活动周期会缩短, 莱哈衣藻的趋光运动节律振幅会显著升高<sup>[64,65]</sup>。我国科学家发现, 果蝇在经历13天的空间飞行后其生物钟系统的输出通路基因表达发生了改变<sup>[66]</sup>。

地面头低位卧床实验揭示, 长期的模拟时钟效应可导致心率节律的振幅显著降低, 且排尿、排便节律也发生明显改变<sup>[67]</sup>。在轨模式动物及航天员的生物节律研究也揭示了体温、血压、心率及警觉度节律会出现改变, 但是不同研究的结果缺乏一致性, 因此需要进行更系统的研究<sup>[68,69]</sup>。在各种环境因素中, 微重力影响节律变化的分子机制迄今尚不清楚。

生物钟与睡眠具有相互调节作用, 生物钟调节睡眠稳态, 而睡眠的改变也会反过来影响生物节律<sup>[70,71]</sup>。在空间环境下, 航天员的睡眠也会出现显著改变<sup>[72~76]</sup>, 包括睡眠时长和睡眠结构。Dijk等人分析了5名航天员在16天或10天太空任务之前、期间和之后情绪和认知表现的变化, 在此期间, 航天员每天的睡眠时间仅为大约6.5小时<sup>[72]</sup>。此外, 在轨航天员通常入睡潜伏期的时间比在地球的时间长, 并且体温节律与睡眠-觉醒周期会出现失同步化变化<sup>[73,75,77]</sup>。除了睡眠时间缩短外, 睡

眠结构也会发生变化。短期空间任务中, 慢波睡眠和快速眼动睡眠量减少, 快速眼动潜伏期缩短和唤醒次数增加。长期飞行中, 睡眠和深度睡眠阶段的潜伏期显著延长。从空间返回后, 睡眠潜伏期和快速眼动潜伏期非常短, 快速眼动睡眠的百分比显著升高, 特别是在着陆后的第一次睡眠记录期间<sup>[76]</sup>。

生物节律紊乱和睡眠障碍也是影响情绪和认知的重要因素<sup>[78,79]</sup>。睡眠障碍(睡眠时间不足或睡眠质量不足)的后果可能包括思维能力、警觉性和判断能力下降, 以及免疫系统紊乱, 这可能会影响航天员<sup>[74,80,81]</sup>的在轨工作效率。在Gemini-7短期飞行任务中, NASA首次报告使用脑电图(electroencephalogram, EEG)检测到航天员睡眠障碍, 而在之后的中长期飞行任务中, 航天员表现出更为明显的睡眠问题。疲劳、生物节律紊乱等引起航天员焦虑、抑郁等负面情绪, 并增加了明显的厌烦、易怒和抵触情绪, 引发了乘组内部及乘组与地面飞行控制人员之间的人际冲突。据轶事报道, 在阿波罗和联盟号任务中, 有两名航天员所表现出的异常情绪及行为改变, 严重影响了乘组的飞行任务, 且在返回地面后仍需接受精神干预和心理治疗<sup>[3~7,9,37]</sup>。火星520天的任务表明, 限制和隔离可能导致昼夜节律、睡眠和警惕性<sup>[82]</sup>的不同缺陷。

在Gemini-7项目建立了一个用于检测果蝇神经系统中与昼夜节律相关的基因表达的方法。该研究可增进人们对空间飞行如何通过改变昼夜节律进而影响大脑功能的理解, 从而帮助科学家做好保障近地轨道及以远长期任务乘员健康的准备<sup>[3,11]</sup>。

空间环境下生物节律及睡眠的变化及其对脑功能影响的机制尚不清楚, 神经环路分析等先进脑科学技术的发展, 将推进节律、睡眠变化对脑认知功能影响的机制等空间脑科学研究。此外, 目前主要采用光调节和药物进行在轨睡眠干预, 后续可在深入研究的基础上进一步探索对生物节律与睡眠变化导致的脑认知功能改变的干预方法和技术。现代社会中约有1/3的人存在节律紊乱、睡眠障碍问题, 因此, 对于航天员节律和睡眠的研究也将有助于改善大众的节律、睡眠和健康。

## 2.4 群脑协同研究

团队协同是人类工作的重要模式和交互方式, 也



是空间站任务的重要作业模式,开展团队协作问题研究对于提升飞行乘组相互关系,改善其社会心理问题,提高其作业绩效具有重要意义.为此,美国、俄罗斯等开展了动物社交行为、团队协作心理学等相关研究<sup>[83~95]</sup>.

俄罗斯应用卫星搭载实验开展了壁虎空间实验研究,研究发现壁虎在飞行过程中,不仅保持附着位置,而且表现出正常的觅食、探索和社会行为.但是其社会互动与在地面控制组中观察到的互动存在一些区别,如整体活动水平降低,攻击性行为减少<sup>[94,95]</sup>.后续可进一步研究微重力、密闭、生物节律对群居性动物社交行为的影响.

国际航天领域一直关注乘组协同工作问题,探讨影响团队协作的因素,从而为后续针对性措施提供依据.美国和俄罗斯通过南极实验等地面模拟研究以及在轨实验等研究表明<sup>[83~91]</sup>,乘组结构、人际关系和团体社会心理学问题是影响团队协作的重要因素.长时间受限、隔离和通信延迟等极端条件要求乘员具备较高水平的人际关系处理能力、自主工作能力和适应不可预见困难的能力.因此,乘组团队的构成和成员特质的搭配都成为确保任务成功的重要因素.研究表明,乘组异质性影响团队合作和工作绩效水平,包括乘组的人数、性别、国籍、语言、职业背景、文化差异以及团体动态领导风格等<sup>[96,97]</sup>.其中,文化差异引发的人际沟通问题也越来越受到重视.1981~1990年的长期航天飞行任务的回溯性研究发现,跨文化差异引起40起人际关系问题,其中至少有5次严重影响了空间任务本身.

乘员之间的互动,即乘组内部的人际关系影响着整个团队的表现和任务的成败<sup>[98,99]</sup>,而团队凝聚力、领导力和时间适应性是主要影响因素.乘组人员之间的合作、协调和沟通是提高团队绩效的基本元素.团队绩效和个人健康与领导水平呈正相关,领导水平则需要具备多个领域的知识.

此外,相比于乘组内部之间,乘组与外界的关系,尤其是与地面控制人员之间更易产生矛盾.俄罗斯和美国都报道过航天员与地面指挥之间发生的敌对现象<sup>[96,97]</sup>.

因此,2016年NASA发布长期飞行任务航天员选拔的回溯性综述报告中推荐任务团队的选拔流程分三步进行:任务及其所需的关键知识、技术、能力及其

他特质(Knowledge, Skills, Abilities, Other characteristics, KSAOs)分析;KSAOs选项的重要性评级,以筛选可有效预测绩效水平的指标;筛选并验证合适的KSAOs评价方法.相应地,NASA推荐在选拔和组内中应关注:团队导向、团队技能及社会技能、交流沟通、跨文化能力、领导力及跟随力、一般心理能力与团队认知能力等.而在方法层面,除传统的自我报告式调查、生物数据、结构化面试、情景判断测试、团队任务观察等,还推荐引入更多无干扰的测量手段,如佩戴可穿戴式社会性测量设备以获取个体间的临近和交互状态,抽取交互语言进行词法和语义分析以评测压力、情绪、社会氛围并避免虚假表现.

空间站团队协作问题的研究成果已经应用于乘组选拔、乘组内协同和天地协同训练方面.不过,目前尚缺乏有关在轨飞行中团队协作神经机制研究的报道,而这是未来值得关注的研究领域.

### 3 中国空间脑研究规划

空间环境下存在多重影响脑功能损伤的风险因素,随着人类探索太空的脚步越来越远,开展空间脑科学研究成为确保航天员健康生活、高效工作的前提.空间脑科学相关研究成果对于人类认识、治疗脑疾病等都具有重要价值.另一方面,空间环境对于设备体积、质量、功耗要求极高,可推动脑科学研究设备技术的发展;而且,针对特殊环境下人员状态的监测、调节和干预也将有助于其他脑科技的发展.

中国空间脑科学研究计划将围绕脑科学研究本质,充分考虑空间环境特点,结合现有科学技术和未来发展趋势,按照认识规律、揭示机制、最终服务应用的思路,规划部署中国空间脑科学研究项目.

#### 3.1 空间环境下脑发育的生物学机制

神经系统发育规律和机制的研究是脑科学研究核心领域之一,对于认识大脑功能正常与异常、大脑损伤与再生具有重要意义.空间特因环境对神经系统发育、脑遗传特性、大脑损伤与再生的影响规律及其机制研究在国际上都是未知的前沿领域.对其系统性深入研究能够极大增进中长期空间飞行对大脑发育和损伤修复影响的认识,提供大脑再生和损伤修复的创新解决方案.本方向旨在探索和揭示长期空间特因环境

对神经细胞基因表达调控、组织功能、神经系统发育和脑遗传特性的影响规律和机制。

### 3.2 空间环境下机体稳态的神经环路及调节机制研究

空间失重环境、异常昼夜节律以及不规律作息所致的生物节律紊乱和睡眠质量下降, 将导致人体产生情绪、认知改变和作业绩效下降等问题。针对上述因素和问题, 本方向主要研究模式生物和人体生物内稳态、节律、睡眠的变化规律及其神经调控网络机制; 从结构和功能联接图谱入手, 阐明空间特因环境对睡眠-觉醒转换与维持产生影响的神经环路机制; 揭示生物节律相关的内源性物质对睡眠-觉醒及其认知的影响规律与调控原理, 建立空间特因环境对生物节律影响的评估体系; 揭示睡眠-觉醒干预新靶点, 提出睡眠-觉醒调控新理论和非侵入、无创性干预新手段。

### 3.3 空间环境下脑认知变化规律、机制与调控原理

人类大脑在进化和发育的过程中均处于地球重力环境空间, 所塑造的脑认知功能均受到重力空间的影响。空间环境提供了独一无二的重力编码因素缺失的研究场景, 为探索大脑认知原理开辟了全新的角度, 具有重要科学意义, 同时对如何在长期空间特因环境下采取恰当措施保证大脑功能正常运作具有重要理论指导意义。本方向以获取长期空间特因环境下基本认知能力的时变规律、天地差异, 揭示脑认知的基本原理, 探索维持和增强认知能力的神经生物学原理为目标。

### 3.4 空间环境下群脑协同机制

团队协同是空间站任务的重要作业模式, 探索群脑协同机制为理解团队协同原理和提升协同效果提供重要支持。空间特因环境为研究协同合作的认知行为和作用机制提供了独特环境。本方向主要研究长期空间特因环境下失重、辐射、昼夜节律快速变化等多重空间特因环境对群脑在轨协同、天地协同的影响; 从

宏观与微观层次出发, 挖掘空间特因环境下的群体协同脑信息加工的特点、规律与机制; 阐释空间特因环境下群脑协同增强的脑机制; 建立适用于空间特因环境的群脑辅助决策、脑力协同增强的群脑协同技术体系。

### 3.5 空间脑科学研究平台

以支撑空间脑科学研究四大研究方向为目标, 研制脑科学动物实验、群脑协同研究实验平台、空间脑调控等空间脑科学研究平台; 实现动物自动化养育、在体检测与实时调控, 人体实时检测与调控; 构建国际领先的脑科学空间实验平台, 为揭示人类认知功能, 社会行为的神经生物学和脑神经环路机制, 构建从神经元到全体行为的脑机制模型提供设备和技术支撑。

## 4 结语

综上所述, 随着世界各国脑计划的启动和航天科技的迅猛发展, 空间脑科学研究已成为航天医学和生命科学研究的热点, 也必将成为各国抢占科技前沿的制高点。

宇宙生命起源与人类思维产生是人类两大未解之谜。空间脑科学研究将为深入认识生命起源、进化规律和人类智慧形成等提供独特视角。中国空间脑科学研究计划作为国家太空实验室的重要组成部分, 将系统开展基础性、前瞻性、探知性空间脑科学研究, 从整体、组织器官、细胞分子等多层次、多尺度探索空间环境因素和时间效应下神经发育、脑认知和群脑协同等变化规律与机制, 解析神经环路及调节机制, 阐释空间环境下多因素交互作用对脑结构与功能的影响及其对环境的适应性和调节机制, 发展脑功能防护措施, 确保我国载人航天任务的成功。同时, 空间脑科学研究平台的建立, 将推进我国脑科学研究从地面拓展到太空, 也将丰富脑科学研究理论和开创新技术, 深化对大脑和脑疾病的认识, 探索健康维护与疾病防治新方法, 造福大众健康。

## 参考文献

- 1 Poo M M. The future of brain science (in Chinese). Psychol Commun, 2019, 2: 80-83 [蒲慕明. 脑科学的未来. 心理学通讯, 2019, 2: 80-83]



- 2 Tian L, Zheng J L, Xiong L Z, et al. Current status and prospects in brain research projects (in Chinese). *Chin J Anesthesiol*, 2021, 41: 8–11 [田莉, 郑加麟, 熊利泽, 等. 脑科学研究计划的现状与展望. *中华麻醉学杂志*, 2021, 41: 8–11]
- 3 Information of Manned Space (in Chinese). No. 6 2020, Dec 2020 [载人航天信息. 2020年12月, 2020年第6期]
- 4 Ruttle T, Tatebrown J. Annual highlights of results from the international space station: October 1, 2015–October 1, 2016. 2016, NASA/TP-2017-219791
- 5 International Space Station Research Results Accomplishments: an analysis of results from 2012-2014 Addendum—October 2016. NASA Space Station Research Results Library. 2016
- 6 International Space Station Research Results Accomplishments: an analysis of results from 2012-2014 Addendum—June 2017. NASA Space Station Research Results Library. 2017
- 7 Garrett-Bakelman F E, Darshi M, Green S J, et al. The NASA Twins Study: a multidimensional analysis of a year-long human spaceflight. *Science*, 2019, 364: eaau8650
- 8 Chen S G. Technology of Manned Space (in Chinese). Beijing: China Astronautic Publishing House, 2018 [陈善广. 载人航天技术. 北京: 中国宇航出版社, 2018]
- 9 Chen S G, Jiang G H, Wang C H, et al. Advance in space human factors engineering (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2015, 21: 95–105 [陈善广, 姜国华, 王春慧. 航天人因工程研究进展. *载人航天*, 2015, 21: 95–105]
- 10 Chen S G, Li Z Z, Ge L Z, et al. Research progress and development suggestions on human factors engineering (in Chinese). *Bull Natl Nat Sci Found China*, 2021, 35: 203–212 [陈善广, 李志忠, 葛列众, 等. 人因工程研究进展及发展建议. *中国科学基金*, 2021, 35: 203–212]
- 11 Chen S G, Wang C H, Chen X P, et al. Study on changes of human performance capabilities in long-duration spaceflight (in Chinese). *Space Med Med Eng*, 2015, 28: 1–10 [陈善广, 王春慧, 陈晓萍, 等. 长期空间飞行中人的作业能力变化特性研究. *航天医学与医学工程*, 2015, 28: 1–10]
- 12 Zhou Y, Wang Y, Rao L L, et al. Disrupted resting-state functional architecture of the brain after 45-day simulated microgravity. *Front Behav Neurosci*, 2014, 8: 200
- 13 Tang X W. Introduction to Brain Science (in Chinese). Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006 [唐孝威. 脑科学导论. 杭州: 浙江大学出版社, 2006]
- 14 Cepeda C, Vergnes L, Carpo N, et al. Human neural stem cells flown into space proliferate and generate young neurons. *Appl Sci*, 2019, 9: 4042
- 15 Olenych S. Time-lapse imaging of neural stem cells exposed to microgravity on the international space station. *Micros Today*, 2020, 28: 26–29
- 16 Kohn F P M. High throughput fluorescent screening of membrane potential and intracellular calcium concentration under variable gravity conditions. *Microgr Sci Technol*, 2013, 25: 113–120
- 17 Mattei C, Alshawaf A, D’Abaco G, et al. Generation of neural organoids from human embryonic stem cells using the rotary cell culture system: effects of microgravity on neural progenitor cell fate. *Stem Cells Dev*, 2018, 27: 848–857
- 18 Ross M D. Changes in ribbon synapses and rough endoplasmic reticulum of rat utricular macular hair cells in weightlessness. *Acta Oto-Laryngol*, 2000, 120: 490–499
- 19 Sultemeier D R, Choy K R, Schweizer F E, et al. Spaceflight-induced synaptic modifications within hair cells of the mammalian utricle. *J Neurophysiol*, 2017, 117: 2163–2178
- 20 Wiedemann M, Kohn F, Rösner H, et al. Self-organization and Pattern-formation in Neuronal Systems Under Conditions of Variable Gravity: Life Sciences Under Space Conditions. Berlin: Springer, 2011
- 21 Cucinotta F A, Alp M, Sulzman F M, et al. Space radiation risks to the central nervous system. *Life Sci Space Res*, 2014, 2: 54–69
- 22 Cui Y, Han J, Xiao Z, et al. Systematic analysis of mRNA and miRNA expression of 3D-cultured neural stem cells (NSCs) in spaceflight. *Front Cell Neurosci*, 2018, 11: 434
- 23 Holstein G, Martinelli G. The Effect of Spaceflight on the Ultrastructure of the Cerebellum. 2003, 20030068212
- 24 Kamyshev N G, Besedina N G, Bragina J V, et al. Behavioral changes in *Drosophila* males after travel to international space station. *Acta Astronaut*, 2020, 176: 567–575
- 25 Demertzi A, Van Ombergen A, Tomilovskaya E, et al. Cortical reorganization in an astronaut’s brain after long-duration spaceflight. *Brain Struct Funct*, 2016, 221: 2873–2876
- 26 Alperin N, Bagci A M, Lee S H. Spaceflight-induced changes in white matter hyperintensity burden in astronauts. *Neurology*, 2017, 89: 2187–2191
- 27 Koppelmans V, Bloomberg J J, Mulavara A P, et al. Brain structural plasticity with spaceflight. *NPJ Microgravity*, 2016, 2: 2

- 28 Roberts D R, Albrecht M H, Collins H R, et al. Effects of spaceflight on astronaut brain structure as indicated on MRI. *N Engl J Med*, 2017, 377: 1746–1753
- 29 Van Ombergen A, Jillings S, Jeurissen B, et al. Brain tissue-volume changes in cosmonauts. *N Engl J Med*, 2018, 379: 1678–1680
- 30 Kramer L A, Hasan K M, Stenger M B, et al. Intracranial effects of microgravity: a prospective longitudinal MRI study. *Radiology*, 2020, 295: 640–648
- 31 Lev M H. The long-term effects of spaceflight on human brain physiology. *Radiology*, 2020, 295: 649–650
- 32 Yagi-Utsumi M, Yanaka S, Song C, et al. Characterization of amyloid  $\beta$  fibril formation under microgravity conditions. *NPJ Microgravity*, 2020, 6: 17
- 33 Yang J J, Liang R, Wan B K, et al. Research progress on the mechanisms and effects of microgravity on cognitive function of brain (in Chinese). *Chin J Aerosp Med*, 2019, 30: 8 [杨佳佳, 梁蓉, 万柏坤, 等. 微重力环境对脑认知功能的影响及机制研究进展. 中华航空航天医学杂志, 2019, 30: 8]
- 34 Alperin N, Bagci A M. Spaceflight-induced visual impairment and globe deformations in astronauts are linked to orbital cerebrospinal fluid volume increase, in Intracranial Pressure & Neuromonitoring XVI. *Acta Neurochir Suppl*, 2018, 126: 215–219
- 35 Bock O, Weigelt C, Bloomberg J J. Cognitive demand of human sensorimotor performance during an extended space mission: a dual-task study. *Aviat Space Environ Med*, 2010, 81: 819–824
- 36 Kanas N, Manzey D. *Space Psychology and Psychiatry*. 2nd ed. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008
- 37 Lee A G, Tarver W J, Mader T H, et al. Neuro-ophthalmology of space flight. *J Neuroophthalmol*, 2016, 36: 85–91
- 38 Mader T H, Gibson C R, Pass A F, et al. Optic disc edema, globe flattening, choroidal folds, and hyperopic shifts observed in astronauts after long-duration space flight. *Ophthalmology*, 2011, 118: 2058–2069
- 39 Mader T H, Gibson C R, Pass A F, et al. Optic disc edema in an astronaut after repeat long-duration space flight. *J Neuroophthalmol*, 2013, 33: 249–255
- 40 Moore S T, Dilda V, Morris T R, et al. Long-duration spaceflight adversely affects post-landing operator proficiency. *Sci Rep*, 2019, 9: 2677
- 41 Palinkas L A, Suedfeld P. Psychological effects of polar expeditions. *Lancet*, 2008, 371: 153–163
- 42 Roy-O'Reilly M, Mulavara A, Williams T. A review of alterations to the brain during spaceflight and the potential relevance to crew in long-duration space exploration. *NPJ Microgravity*, 2021, 7: 5
- 43 Stahn A C, Kühn S. Brains in space: the importance of understanding the impact of long-duration spaceflight on spatial cognition and its neural circuitry. *Cogn Process*, 2021, 22: 105–114
- 44 Takács E, Barkaszi I, Czizler I, et al. Persistent deterioration of visuospatial performance in spaceflight. *Sci Rep*, 2021, 11: 9590
- 45 Van Ombergen A, Jillings S, Jeurissen B, et al. Brain ventricular volume changes induced by long-duration spaceflight. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2019, 116: 10531–10536
- 46 Vessel E A, Russo S. Effects of reduced sensory stimulation and assessment of countermeasures for sensory stimulation augmentation. 2015, NASA/TM-2015-218576
- 47 Zwart S R, Mulavara A P, Williams T J, et al. The role of nutrition in space exploration: implications for sensorimotor, cognition, behavior and the cerebral changes due to the exposure to radiation, altered gravity, and isolation/confinement hazards of spaceflight. *Neurosci Biobehav Rev*, 2021, 127: 307–331
- 48 Hilbig R, Bock O, Gollhofer A, et al. Sensory motor and behavioral research in space. In: *SpringerBriefs in Space Life Sciences*. Cham: Springer, 2017. 86
- 49 Harris L R, Jenkin M, Jenkin H, et al. The effect of long-term exposure to microgravity on the perception of upright. *NPJ Microgravity*, 2017, 3: 3
- 50 Clement G, Wood S J. Rocking or rolling—perception of ambiguous motion after returning from space. *PLoS ONE*, 2014, 9: e111107
- 51 McManus M, Harris L R. When gravity is not where it should be: How perceived orientation affects visual self-motion processing. *PLoS ONE*, 2021, 16: e0243381
- 52 Weber B, Riecke C, Stulp F. Sensorimotor impairment and haptic support in microgravity. *Exp Brain Res*, 2021, 239: 967–981
- 53 Hupfeld K E, McGregor H R, Reuter-Lorenz P A, et al. Microgravity effects on the human brain and behavior: dysfunction and adaptive plasticity. *Neurosci Biobehav Rev*, 2021, 122: 176–189
- 54 Suedfeld P, Steel G D. The environmental psychology of capsule habitats. *Annu Rev Psychol*, 2000, 51: 227–253
- 55 Butz M, Wörgötter F, van Ooyen A. Activity-dependent structural plasticity. *Brain Res Rev*, 2009, 60: 287–305

- 56 Mulcahy R A, Blue R S, Vardiman J L, et al. Screening and mitigation of layperson anxiety in aerospace environments. [Aerosp Med Hum Perform](#), 2016, 87: 882–889
- 57 Liu Q, Zhou R L, Zhao X, et al. Acclimation during space flight: effects on human emotion. [Mil Med Res](#), 2016, 3: 15
- 58 Nicolas M, Sandal G M, Weiss K, et al. Mars-105 study: Time-courses and relationships between coping, defense mechanisms, emotions and depression. [J Environ Psychol](#), 2013, 35: 52–58
- 59 Sandal G M, Leon G R, Palinkas L. (2006). Human challenges in polar and space environments. In: Amils R, Ellis-Evans C, Hinghofer-Szalkay H, eds. *Life in Extreme Environments*. Dordrecht: Springer, Amils R, Ellis-evans C, Hinghofer-Szalkay H. *Life in Extreme Environments*. Dordrecht: Springer, 2007. 399–414
- 60 Suedfeld P. Invulnerability, coping, salutogenesis, integration: four phases of space psychology. *Aviat Space Environ Med*, 2005, 76: B61–B66
- 61 Stuster J W. Bold endeavors: behavioral lessons from polar and space exploration. *Gravit Space Biol Bull*, 2000, 13: 49–57
- 62 Wang Y, Chen S G, Wu B, et al. Psychological problems of astronauts in long-duration spaceflight (in Chinese). *Psychol Tech Appl*, 2013, 1: 40–45 [王跃, 陈善广, 吴斌, 等. 长期空间飞行任务中航天员出现的心理问题. *心理技术与应用*, 2013, 1: 40–45]
- 63 McPhee J C, Charles J B, National Aeronautics and Space Administration. *Human Health and Performance Risks of Space Exploration Missions: Evidence Reviewed by the NASA Human Research Program*. Houston: National Aeronautics and Space Administration, 2009
- 64 Mergenhagen D, Mergenhagen E. The expression of a circadian rhythm in two strains of *Chlamydomonas reinhardtii* in space. [Adv Space Res](#), 1989, 9: 261–270
- 65 Hoban-Higgins T M, Alpatov A M, Wassmer G T, et al. Gravity and light effects on the circadian clock of a desert beetle, *Trigonoscelis gigas*. [J Insect Physiol](#), 2003, 49: 671–675
- 66 Ma L, Ma J, Xu K. Effect of spaceflight on the circadian rhythm, lifespan and gene expression of *Drosophila melanogaster*. [PLoS ONE](#), 2015, 10: e0121600
- 67 Liang X, Zhang L, Wan Y, et al. Changes in the diurnal rhythms during a 45-day head-down bed rest. [PLoS ONE](#), 2012, 7: e47984
- 68 Luo R, Huang Y, Ma H, et al. How to live on mars with a proper circadian clock? [Front Astron Space Sci](#), 2022, 8: 236
- 69 Guo J H, Qu W M, Chen S G, et al. Keeping the right time in space: importance of circadian clock and sleep for physiology and performance of astronauts. [Mil Med Res](#), 2014, 1: 23
- 70 Möller-Levet C S, Archer S N, Bucca G, et al. Effects of insufficient sleep on circadian rhythmicity and expression amplitude of the human blood transcriptome. [Proc Natl Acad Sci USA](#), 2013, 110: E1132–E1141
- 71 Reichert C, Maire M, Schmidt C, et al. Sleep-wake regulation and its impact on working memory performance: the role of adenosine. [Biology](#), 2016, 5: 11
- 72 Dijk D J, Neri D F, Wyatt J K, et al. Sleep, performance, circadian rhythms, and light-dark cycles during two space shuttle flights. [Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol](#), 2001, 281: R1647–R1664
- 73 Flynn-Evans E E, Barger L K, Kubey A A, et al. Circadian misalignment affects sleep and medication use before and during spaceflight. [NPJ Microgravity](#), 2016, 2: 15019
- 74 Mizuno K, Matsumoto A, Aiba T, et al. Sleep patterns among shift-working flight controllers of the International Space Station: an observational study on the JAXA Flight Control Team. [J Physiol Anthropol](#), 2016, 35: 19
- 75 Czeisler C A, Gooley J J. Sleep and circadian rhythms in humans. [Cold Spring Harb Symp Quant Biol](#), 2007, 72: 579–597
- 76 Santy P A, Kapanka H, Davis J R, et al. Analysis of sleep on Shuttle missions. *Aviat Space Environ Med*, 1988, 59: 1094–1097
- 77 Barger L K, Flynn-Evans E E, Kubey A, et al. Prevalence of sleep deficiency and use of hypnotic drugs in astronauts before, during, and after spaceflight: an observational study. [Lancet Neurol](#), 2014, 13: 904–912
- 78 Goel N, Basner M, Rao H, et al. Circadian rhythms, sleep deprivation, and human performance. [Prog Mol Biol Transl Sci](#), 2013, 119: 155–190
- 79 McClung C A. Circadian rhythms and mood regulation: insights from pre-clinical models. [Eur Neuropsychopharmacol](#), 2011, 21: S683–S693
- 80 Bell-Pedersen D, Cassone V M, Earnest D J, et al. Circadian rhythms from multiple oscillators: lessons from diverse organisms. [Nat Rev Genet](#), 2005, 6: 544–556
- 81 Bechtold D A, Gibbs J E, Loudon A S I. Circadian dysfunction in disease. [Trends Pharmacol Sci](#), 2010, 31: 191–198
- 82 Basner M, Dinges D F, Mollicone D, et al. Mars 520-d mission simulation reveals protracted crew hypokinesia and alterations of sleep duration and timing. [Proc Natl Acad Sci USA](#), 2013, 110: 2635–2640
- 83 Vinokhodova A G, Gushin V I. Study of values and interpersonal perception in cosmonauts on board of international space station. [Acta](#)



- [Astronaut](#), 2014, 93: 359–365
- 84 Johnson P J, Asmaro D, Suedfeld P, et al. Thematic content analysis of work-family interactions: Retired cosmonauts' reflections. [Acta Astronaut](#), 2012, 81: 306–317
- 85 Clement J L, Boyd J. Operating the ISS: cultural and leadership challenges. In: 56th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law. Fukuoka. 2005
- 86 Kanas N, Ritscher J. Leadership issues with multicultural crews on the international space station: lessons learned from Shuttle/Mir. [Acta Astronaut](#), 2005, 56: 932–936
- 87 Kanas N A, Salnitskiy V P, Ritscher J B, et al. Human interactions in space: ISS vs. Shuttle/Mir. [Acta Astronaut](#), 2006, 59: 413–419
- 88 Boyd J E, Kanas N, Gushin V I, et al. Cultural differences in patterns of mood states on board the International Space Station. [Acta Astronaut](#), 2007, 61: 668–671
- 89 Boyd J, Kanas N, Salnitskiy V P, et al. Cultural and language backgrounds of international space station program personnel. In: 57th International Astronautical Congress. Valencia. 2006
- 90 Kanas N A, Boyd J, Saylor S A. Do psychosocial decrements occur during the 2nd half of space missions? In: 57th International Astronautical Congress, Valencia. 2006
- 91 Clement J L, Boyd J E, Kanas N, et al. Leadership challenges in ISS operations: lessons learned from junior and senior mission control personnel. [Acta Astronaut](#), 2007, 61: 2–7
- 92 Kanas N A, Salnitskiy V P, Ritscher J B, et al. Psychosocial interactions during ISS missions. [Acta Astronaut](#), 2007, 60: 329–335
- 93 Kanas N, Salnitskiy V, Boyd J, et al. Crewmember and mission control personnel interactions during International Space Station missions. *Aviat Space Environ Med*, 2007, 78: 601–607
- 94 Barabanov V, Gulimova V, Berdiev R, et al. Object play in thick-toed geckos during a space experiment. *J Ethol*, 2015, 33: 109–115
- 95 Barabanov V M, Gulimova V I, Berdiev R K, et al. Individual features of play behavior in thick-toed geckos in weightlessness and normal gravity conditions. [Life Sci Space Res](#), 2019, 22: 38–46
- 96 Kanas N, Manzey D. Space Psychology and Psychiatry (in Chinese). Bai Y Q, Wang A H, transl. Beijing: China Aerospace Press, 2009 [尼克·卡纳斯, 迪特里希·曼蔡. 航天心理学与精神病学. 白延强, 王爱华, 译. 北京: 中国宇航出版社, 2009]
- 97 Burke S, Moavero J, Feitosa J. Toward an Understanding of Training Requirements for Multicultural Teams in Long-Duration Spaceflight. Boca Raton: CRC Press, 2020. 171–193
- 98 Vakoch D A. Psychology of Space Exploration: Contemporary Research in Historical Perspective. Scotts Valley: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2011
- 99 Salas E, Tannenbaum S I, Kozlowski S W J, et al. Teams in space exploration: a new frontier for the science of team effectiveness. [Curr Dir Psychol Sci](#), 2015, 24: 200–207

## Space brain research: progress and prospect

XIAO Yi<sup>1</sup>, CHEN XiaoPing<sup>1</sup>, XU XiaoDan<sup>1</sup>, LI ChengYu<sup>2</sup>,  
POO MuMing<sup>3,4</sup> & CHEN ShanGuang<sup>1,5</sup>

*1 National Key Laboratory of Human Factors Engineering, China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China;*

*2 Lingang Laboratory, Shanghai 200031, China;*

*3 Center for Excellence in Brain Science and Intelligence Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China;*

*4 Shanghai Center for Brain Science and Brain-Inspired Technology, Shanghai 201602, China;*

*5 China Manned Space Agency, Beijing 100081, China;*

The human brain is one of the most complex systems in nature. Exploring the structure and function of the brain is an ultimate frontier for humans to understand themselves, and it is of great significance to the development of scientific and technological innovation, as well as the progress of human civilization. Manned spaceflight is an important field of modern scientific and technological revolution, and space giants including the United States and Russia have used space resources to carry out brain research. The construction of China Space Station will provide a systematic platform for space brain research. This review summarizes the progress previously made on brain development, cognitive functions, effects of biological rhythm and sleep on brain function, and multi-brain interaction mechanisms, in real or simulated space environment. We also provide a brief summary and perspective on the space brain science project in China.

**space environment, brain science, weightlessness, brain development, cognition, group brain synergy**

**doi:** [10.1360/SSV-2022-0196](https://doi.org/10.1360/SSV-2022-0196)