

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-11

# 空天飞行影响航天员脑神经功能的现状及展望

于辉<sup>1,2</sup>, 高丽娜<sup>3</sup>, 高娜<sup>3</sup>, 牛畅<sup>3</sup>, 呼延霆<sup>3</sup>, 谷良贤<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学 航天学院, 西安 710072)

(2. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(3. 西北工业大学 生命学院, 西安 710129)

**摘要:** 中国空间站的建成标志着我国载人航天“三步走”发展战略圆满实现, 未来航天员将开展常态化空天飞行并长期驻留执行科学任务。然而, 空天飞行中航天员经历超重、失重、辐射、孤立环境等变化, 直接威胁其肌骨系统、神经系统、免疫系统等功能正常发挥, 尤其是航天员脑神经功能异常将会影响其认知能力, 进而影响空间任务顺利完成。因此, 保护航天员在空天飞行中脑神经功能具有重要意义。本文以空间视角和时间视角梳理了空天飞行对航天员脑神经功能的影响, 总结了当前航天员脑神经保护现状和挑战, 并围绕目前存在的 key 问题对未来航天员脑神经保护策略进行了展望。

**关键词:** 空天飞行; 航天员; 脑神经功能; 空间任务; 长期在轨

中图分类号: V7

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

## The current status and prospects of the impact of spaceflight on astronauts' cerebral neurological functions

YU Hui<sup>1,2</sup>, GAO Lina<sup>3</sup>, GAO Na<sup>3</sup>, NIU Chang<sup>3</sup>, HUYAN Ting<sup>3</sup>, GU Liangxian<sup>1</sup>

(1. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(3. School of Life Sciences, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:** The completion of the Chinese space station marks the successful realization of China's three-step development strategy for manned spaceflight. In the future, astronauts will routinely conduct spaceflights and remain in space for long-term stay to execute scientific missions. However, during spaceflight, astronauts are exposed to challenges such as hypergravity, microgravity, radiation, and isolation. These conditions directly threaten the normal functionality of their musculoskeletal, neurological, and immune systems. Notably, abnormalities in astronauts' cerebral neurological functions can impact their cognitive abilities, potentially jeopardizing the successful completion of space missions. Therefore, safeguarding the cerebral neurological functions of astronauts during spaceflight is of paramount importance. This paper examines the influence of spaceflight on astronauts' cerebral neurological functions from both spatial and temporal perspectives. It summarizes the current state and challenges of protecting these brain functions. Centering on the key issues at hand, this paper also offers a forward-looking perspective on future strategies for protecting astronauts' cerebral neurological functions.

**Key words:** spaceflight; astronaut; cerebral neurological functions; space missions; long-term stay

收稿日期: 2023-10-27; 修回日期: 2024-04-27

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(D5000220170); 2023年西北工业大学研究生培养质量提升工程项目(2023KC0136)

通信作者: 呼延霆(1984-), 男, 博士, 副教授。E-mail: huyanting@nwpu.edu.cn

引用格式: 于辉, 高丽娜, 高娜, 等. 空天飞行影响航天员脑神经功能的现状及展望[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-11.

YU Hui, GAO Lina, GAO Na, et al. The current status and prospects of the impact of spaceflight on astronauts' cerebral neurological functions[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-11. (in Chinese)

## 0 引言

载人航天是航空航天领域的重要发展方向之一,中国空间站的建成是我国载人航天工程的重要里程碑,标志着我国载人航天“三步走”发展战略的顺利实施,推进了我国航空航天事业进入黄金发展时期,也为未来更复杂和长期的空间探索奠定了坚实的基础<sup>[1]</sup>。随着我国空间发展战略的需求和空间站的投入使用,航天员将常态化进行空天飞行并长期驻留于空间站执行多领域、多层次的空间科学任务。在空天飞行中,航天员经历一系列极端条件的变化,包括发射升空、在轨飞行、返航着陆等过程,伴随着超重、失重、辐射、密闭孤立等环境影响,可能会使航天员的生理和心理发生一定变化,对航天员身体健康产生一些影响<sup>[2]</sup>。航天员身体的各个系统,如超重和失重状态可能会导致肌骨系统的力学改变和功能下降<sup>[3-4]</sup>;高辐射环境则可能影响免疫系统,使航天员更容易受到疾病和感染的侵害<sup>[5]</sup>;孤立封闭的环境则可能导致心理健康问题,比如焦虑和抑郁等<sup>[6]</sup>。其中最为关键的是对航天员脑神经功能的影响,直接关系到空间任务的顺利执行。

由于脑神经功能直接关联到人的认知能力和决策过程,任何因素对其影响都可能产生严重的后果<sup>[7]</sup>。在空天飞行中,航天员在超重、失重状态下会导致大脑中血液分布发生变化,这可能影响到大脑皮质的活动,从而对认知功能和反应能力产生不良影响,如空间定向、记忆力和决策能力可能会出现一定程度的削弱。此外,长期处于失重环境还可能导致神经元的形态和功能发生改变。辐射环境也会直接损害脑细胞,甚至引起神经退行性疾病<sup>[8]</sup>。在与地球相对孤立的太空环境中,心理压力也可能会影响神经功能,导致精神状态的波动<sup>[6]</sup>,以上多种极端的环境因素对于航天员在空天飞行中是极其危险的。因此,保护航天员在空天飞行中脑神经功能的正常发挥具有极其重要的意义。

本文首先从空间视角切入分析航天员在不同飞行阶段面临的脑神经挑战,如超重、失重、辐射和孤立环境的影响,并从时间视角梳理孤立密闭和昼夜节律失衡下的神经健康问题;同时,回顾航天员脑神经保护的现状与防治措施,并针对目前

存在的问题对未来保护策略进行展望,以期航天员在空天飞行中脑神经保护和空间任务的顺利执行提供新思路、新方向。

## 1 空间视角下空天飞行影响航天员脑神经功能

在空天飞行的整个过程中(如图1所示),航天员脑神经功能将面临着多方面的挑战。从空间视角来分析,航天员在发射升空阶段的极大加速度和压力造成的超重会对脑神经系统产生瞬时压力;进入太空后,失重、辐射、密闭环境会对脑神经系统产生持续性影响;返回地球阶段,航天员也会经历从急速俯冲造成的超重到重新适应地面正常重力的变化,可能导致平衡障碍、眩晕等。本部分主要从超重、失重、辐射、密闭环境对航天员脑神经功能的影响分别展开综述。



图1 空天飞行中航天员面临的极端条件  
Fig. 1 Extreme conditions faced by astronauts during spaceflight

### 1.1 超重对航天员脑神经功能的影响

在空天飞行中航天员与战斗机飞行员所经历的重力变化是不同的。战斗机飞行员在飞行中经历短暂但强烈的高G力作用,主要对心血管系统产生压力,导致血液从大脑流向身体其他部位,可能造成短暂的意识丧失(G力昏厥)<sup>[9]</sup>。长时间或频繁地经历高G力可能对飞行员的视力和大脑造成压力;而在空天飞行中,航天员会经历两种极端的重力环境变化:失重和超重,这对其脑神经功能产生显著影响。总体来讲,体液分布随重力变化的动态变化会影响其颅内压的升降,而脑部微环境细胞可以感受到其体液流动带来的机械刺激。这种力学感知与细胞膜上的机械敏感离子通道、

细胞骨架以及细胞与基质之间的相互作用有关,此过程涉及到的基本公式包括:

1) 体液动态的变化可以通过液体静力学的基本公式描述<sup>[10]</sup>,即:

$$P = \rho gh \quad (1)$$

式中: $P$ 为液体的静压; $\rho$ 为液体的密度; $g$ 为重力加速度; $h$ 为液体的高度。

该公式可解释颅内流体(如脑脊液)的行为,尤其是在不同姿势和外部条件下。脑脊液环绕在大脑和脊髓周围,提供保护和营养支持。首先颅内液体的压力会随着液体柱的高度( $h$ )改变而改变。例如,当航天员经历空天飞行的超重或失重时,脑脊液的高度会发生变化,从而影响颅内压。过高或过低的颅内压都可以影响到脑内的血流动力学,对神经元产生不利影响,如影响细胞代谢、血液循环和神经信号传递。通过理解液体静力学的基本原理,研究人员可以更好地分析和预测在不同物理环境下(包括失重环境)颅内流体对生物细胞的影响,这对于航天医学和神经科学领域的研究具有重要意义。

2) 体液的流动性可以通过牛顿的黏度方程来描述<sup>[11]</sup>,即:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2)$$

式中: $\tau$ 为剪切应力; $\mu$ 为流体的动力学黏度; $du/dy$ 为流体速度 $u$ 关于垂直方向 $y$ 的梯度,表示剪切速率,这描述了剪切应力与速率之间的关系。

在研究脑脊液动力学时,牛顿粘度方程可以帮助理解颅内流体(主要是脑脊液)的流动特性(脑脊液的流动受其粘度和脑室系统内的压力梯度驱动)和流体动力学的变化。脑脊液的流动性影响颅内压力分布。不正常的流动(可能由增加的粘度或流动通路的阻塞引起)可能导致颅内压力异常,这对细胞环境产生显著影响。主要是颅内流体动力学的异常可能影响脑内血流,进而影响细胞的氧气和养分供应。长期的颅内压力异常和脑脊液循环障碍可能导致神经细胞损伤或功能障碍。

3) 细胞对力学刺激响应可以描述为<sup>[12]</sup>

$$F = k \cdot \Delta x \quad (3)$$

式中: $F$ 为作用在细胞上的力; $k$ 为细胞的弹性常数或刚度; $\Delta x$ 为细胞形态的变化或位移。

该公式可解释和理解脑内细胞如何响应由颅内流体动态(如脑脊液流动和压力变化)引起的力学刺激。颅内流体的压力变化可能导致脑细胞的形变。这种形变与作用在细胞上的力成正比,且与细胞的弹性常数(或刚度)成反比。不同类型的脑细胞(如神经元、胶质细胞)可能具有不同的弹性常数,这影响它们对颅内压力变化的响应方式。在颅内压力异常(如脑积水或外伤后脑肿胀)的情况下,细胞可能超出其弹性限度,导致永久性损伤。

具体来讲,首先在发射升空阶段,飞行器加速产生的惯性力使航天员处于超重状态,这种超重环境对航天员的大脑产生压迫,影响视觉、大脑功能与判断能力。超重环境根据其方向的不同,会引发不同的生理反应。纵向超重过载,即头一盆向超重,及横向超重过载,即胸—背向超重,对人体产生较大的影响。在纵向超重的环境下,大脑受到的压迫更加严重,导致视觉障碍、大脑功能障碍,以及反应和认知能力的降低<sup>[13]</sup>。特别是在横向超重的情况下,航天员可能遭受呼吸困难、胸部疼痛、心血管系统承受巨大的压力氧饱和度下降等问题。对大脑的影响尤为显著,可能导致大脑血流量减少<sup>[14-15]</sup>,对神经元的功能产生负面影响,引发头晕、头痛等症状。在一些极端情况下,例如+G超重环境,航天员甚至可能遭受精神紊乱和意识丧失;在+3G超重下,表现为周边视力丧失、灰化和昏厥;在持续+3G加速期间,由于中枢缺氧引起,并且前庭系统上G负荷的增加可能导致视觉追踪性能下降<sup>[16]</sup>。在飞行器完成其轨道任务并开始降落至地面的过程中,航天员将面临极大的过载压力。这一过程中的过载程度及持续时间取决于航天器的再入角度和动力状态。在正常的返回情况下,航天员通常会经历最多4g~5g的过载,而航天器的过载通常不会超过3g。然而,在非正常情况下,如紧急返航情况,航天员可能承受高达8g~15g甚至更高的过载压力<sup>[17]</sup>。在超重达到大约4g时,可能会引发意识丧失,并伴有缺氧引起的脑电图减慢,出现脑部疲劳和认知功能下降等问题。上述超重环境对航天员脑神经功能的影响不仅仅限于飞行阶段。

其次,失重是空间环境中最常见物理状态,可影响航天员的多个生理系统特别是神经系统产生

一系列复杂的变化。由于缺少地球上的重力刺激,航天员会经历神经连接的结构与功能变化,这会影响到其学习、记忆以及适应能力。这种环境下,身体的周围神经感觉系统会受到剥夺,限制了它接收外部刺激的能力,神经发生可塑性变化降低了其认知功能。失重状态还会对航天员的认知功能造成严重影响<sup>[18]</sup>。研究发现,这种状态下的航天员可能会遭遇注意力缺陷、工作记忆减退、空间认知降低、集中注意力困难、反应时间延长及任务执行困难等问题<sup>[19]</sup>。长时间处于这样的环境中,航天员的认知功能可能会持续下降,影响到其空间任务的执行能力。当前,研究者主要通过细胞、动物、航天员以及地面模拟失重人体,围绕脑神经系统展开研究。研究表明,失重可以在细胞层面改变细胞形态和功能,促进干细胞向神经元的分化。在动物模型上揭示,失重环境能够降低下丘脑中5-羟色胺2A受体基因的表达<sup>[20]</sup>,这一多巴胺系统的变化可能导致神经运动损伤。更为严重的是,长期的失重状态会导致神经元损伤、树突棘和突触丧失以及神经炎症<sup>[21]</sup>,这些都会进一步导致认知和行为缺陷。前庭系统也会受到影响,与海马体萎缩和空间记忆损伤相关的前庭通路的外周病变可能会长期存在,甚至变为永久性损伤<sup>[22]</sup>。

总之,重力改变的影响下航天员脑部微环境体液分布发生了变化,不仅影响神经信号传递、大脑皮层的活动以及记忆和认知功能,还影响了脑部细胞之间的信号传递和细胞骨架的形态,最终导致脑神经功能出现障碍。此外,重力变化(超重与失重)对航天员脑神经功能的影响不仅仅限于飞行阶段。其影响可能是长期的,对航天员的工作效率、身体健康和执行任务的安全性都构成潜在威胁。

## 1.2 空间辐射对航天员脑神经功能的影响

空天飞行中辐射环境对航天员脑神经功能构成了极大的挑战和威胁,特别是高能量的离子辐射,如质子和重离子,具有强大的穿透力,能够穿透航天器的防护层并直接影响人体的生物组织<sup>[23]</sup>。

从分子层面来看,空间辐射可导致细胞DNA的损伤。进而引起机体细胞凋亡,导致大脑中神

经元的数量下降,从而影响神经网络的稳定性和功能性<sup>[24]</sup>。这种损伤不仅限于神经元,还包括支持性的胶质细胞,如星形胶质细胞和小胶质细胞,这些细胞在调节神经元健康和维持神经系统平衡中起着至关重要的作用。除了直接损伤细胞外,空间辐射还会引发大量的炎症反应。这种炎症反应会导致大量的氧化应激,这是因为辐射会激活多种炎症因子和信号通路,导致免疫细胞的激活和趋化,以及多种炎症介质的释放<sup>[25]</sup>。这些反应会进一步损伤神经组织,影响神经元的活动和生存,从而导致认知功能的改变,如记忆力下降、运动功能受损和行为的异常<sup>[26]</sup>。此外,空间辐射还可能影响血脑屏障的完整性和功能。血脑屏障是大脑与外界环境的重要屏障,一旦其通透性增加,就可能允许外周免疫细胞和其他大分子物质进入大脑,进一步加剧神经炎症的发展和神经组织的损伤。近年来研究表明,航天员长时间处于辐射环境,其神经系统的衰老速度可能会加快,而且其患神经退行性疾病<sup>[27]</sup>的风险将增加,如阿尔茨海默病。这些疾病通常会伴随着记忆力丧失、认知能力下降、运动功能障碍等临床表现,严重影响患者的生活质量。

综上所述,空间辐射对航天员脑神经功能的影响是多方面且深远的。它不仅能够直接损伤神经元和胶质细胞,还能够通过激发炎症反应、影响血脑屏障来间接影响神经系统的健康状态,给航天员的健康带来严重威胁。因此,对于未来空天飞行来说,深入研究空间辐射对脑神经功能的影响机理,以及开发有效的防护措施具有重要意义。

## 1.3 空间密闭孤立环境对航天员脑神经功能的影响

航天员在空天飞行中,不仅要面对极端的外部环境,还要应对由于长时间密闭孤立带来的心理压力<sup>[28]</sup>。飞行器密闭环境给航天员带来了极大的挑战,对其脑神经系统造成不利影响,从而影响到操作相关的神经认知能力,甚至危及空间任务的完成和航天员的健康。

孤立和人际关系的问题是这种环境中的主要压力源,不仅可能影响航天员的情绪和认知能力,还可能导致适应性和不适应的应对方式和策略的变化,甚至产生精神病理症状或障碍<sup>[29]</sup>。研究表

明,在空天飞行的过程中,长时间处于密闭孤立环境的航天员容易出现抑郁、失眠、易怒、焦虑、疲劳以及认知能力下降等症状。空间密闭环境不仅仅是物理上的隔离,更重要的是心理层面的孤立,特别是感知到的社会孤立,即个体感觉到的孤独。这种感知孤立对人类心理健康会产生重大负面影响。人们在这种环境中可能面临各种心理压力和挑战,记录在人类成年人中的感知孤立的神经生物学和行为影响包括焦虑、敌意增加、社交退缩、睡眠碎片化和白天疲劳增加。此外,这种孤立还可能导致血管阻力增加、基因表达改变、免疫力降低、冲动控制下降以及消极情绪和抑郁症状的增加<sup>[30]</sup>。

为深入研究社会孤立和密闭环境对航天员脑神经功能的影响,各国研究者采用了多种地面模拟环境,例如潜艇、极地站和模拟太空舱。上述模拟环境提供了对长期隔离和孤立状态下人类行为和心理反应的研究平台,获得了丰富的研究数据,其中在模拟太空舱 MARS105 和 MARS500 实验中模拟长期太空任务的条件,研究者分析了航天员在日常活动中的个人行为、视觉互动、面部表情和身体接触等非语言行为。研究结果显示,随着模拟任务进行,航天员表现出行为模式的变化,这些变化与任务的不同阶段和时间长度有关。此外,该研究还发现个人行为和社会互动行为在长期密闭环境下呈现出周期性变化,反映了航天员对此类环境的适应过程<sup>[31-32]</sup>。

另一项模拟太空密闭的水下环境研究发现:长期的社会孤立可能会导致情绪恶化和行为问题,进而影响生产力和人际关系。该研究对大脑的神经生物学和行为效应进行了深入分析,揭示了这些压力因素可能导致的认知和情绪状态的显著下降,包括孤独感、焦虑、偏执和抑郁。该研究还表明,这些影响在一定程度上呈线性剂量—反应关系,即随着暴露于长期密闭环境时间的延长,行为和认知影响的程度也随之增加<sup>[33]</sup>。

因此,为了确保航天员的心理健康,需要研发有效的心理干预和支持措施,以帮助他们应对这些压力,并减轻其对脑神经系统的不良影响。此外,航天员的心理健康状况也应该得到持续的监测和评估,以便及时发现和处理可能出现的问题,确保空间任务的顺利完成。

## 2 时间视角下空天飞行影响航天员脑神经功能

全面考量空天飞行对航天员所产生的多维度压力,除空间因素外另一个不可忽视的因素就是时间维度对其脑神经功能的影响。在地球的生态系统中,人类的生物钟被天然的昼夜循环所调节,保障人体处于正常生理状态,而在长期的空天飞行中,航天员将面临昼夜节律的紊乱以及长时间在轨的挑战<sup>[34]</sup>,这无疑会对其脑神经系统带来进一步的考验(如表 1 所示)。

表 1 时间视角下空天飞行对航天员脑神经功能的影响

Table 1 Time-viewed effects of spaceflight on astronauts' cerebral neurological functioning

因素	作用模式	对脑神经功能的影响
生物钟	人体内部存在内在时间系统,调节昼夜节律	失重、微重力及不规则的光照条件等,干扰航天员生物钟,出现睡眠障碍,大脑的神经活动和警觉水平受到影响,引起脑神经功能紊乱
激素调节	激素水平的变化调节昼夜节律	影响免疫功能、代谢调节等,进一步影响脑神经功能正常发挥
精神状态	长期心理状况不佳、注意力不集中、情绪波动	会产生焦虑、压抑,导致航天员的决策能力下降,对任务的投入度减少,进而影响脑神经功能
认知功能	持续长时间在轨的高工作负荷和压力	反应时间延长,信息处理能力下降,大脑认知功能受损,脑神经功能紊乱

### 2.1 昼夜节律紊乱对航天员脑神经功能的影响

在地球上,昼夜节律为人类带来了稳定的生理和行为模式,而在空天飞行中,由于缺乏自然光

线和明暗交替,这种稳定性被打破,导致了航天员昼夜节律的紊乱。这种紊乱不仅影响其生物钟,更对他们的脑神经功能造成了直接和间接的影响。

首先,昼夜节律紊乱直接干扰了航天员的睡

眠—清醒周期,直接影响脑神经功能。在太空中,由于缺乏自然光线,航天员必须依靠人造光源来维持昼夜节律。这意味着他们可能在不适当的时间感到清醒或困倦,导致入睡难、睡眠时长少和睡眠质量差。长时间的睡眠剥夺会影响到脑的神经递质的平衡,例如:血清素、多巴胺<sup>[35]</sup>等,这些神经递质对情绪、记忆和认知功能起着关键作用。因此,持续的睡眠紊乱会导致情绪波动、记忆减退和认知能力下降。其次,昼夜节律的紊乱可能进一步影响航天员的注意力、反应时间和认知功能。这种间接的影响源于生物钟对于人体多种生理过程的调控作用。人体的生物钟由内部时钟和外部刺激共同作用而形成,是一个涉及多种生物化学和神经学机制的复杂系统<sup>[36]</sup>。昼夜节律紊乱会破坏这种平衡,导致多种生物化学反应的改变,这种改变进一步影响到脑的功能。例如,松果体通过分泌褪黑素来调节生理节律<sup>[37]</sup>,这种荷尔蒙对身体的昼夜节律有重要影响。在空天飞行中,由于昼夜节律的紊乱,褪黑素的分泌可能受到影响,导致航天员的清醒—睡眠模式发生变化。这种变化可能会影响到大脑的神经递质水平,从而影响到

情绪和认知功能。长期的生物钟紊乱可能导致多种健康问题,例如:心血管疾病、内分泌失调和免疫系统功能下降<sup>[38]</sup>。

总之,昼夜节律对于航天员的脑神经功能具有重要影响。在太空环境中,昼夜节律的紊乱对航天员的睡眠、情绪和认知功能带来了直接和间接的挑战。为了保障航天员健康、提高工作效率,必须采取有效的措施来调整和维持航天员的昼夜节律。

## 2.2 空天飞行中航天员脑神经功能的时间累积效应

时间累积效应在空天飞行中是考虑航天员脑神经功能变化的一个关键因素(如表2所示),在短期太空飞行(持续时间从几天到几周的任务)中,航天员首先面临的是重力环境的剧烈变化,这可能立即对其脑神经系统产生影响。例如,在人类早期的宇宙飞船任务:美国的“阿波罗”计划和俄罗斯的“联盟”短期任务,最常见的是空间适应综合症<sup>[39]</sup>,包括头晕、恶心、方向感丧失等症状。

表2 空天飞行中航天员脑神经功能的时间累积效应

Table 2 The cumulative effect over time on astronauts' brain and neurological functions during spaceflight

空间任务	经历时间	问题	
短期飞行	进入太空的8~12小时内	出现航天运动病,主要症状为不适、恶心、呕吐、头痛、厌食、昏睡等	
	神州十三号载人飞船 进入太空的前24个小时内	航天员能明显感觉到血液在流向头部	
	着陆到着陆后48~72小时内	感觉器将异常信号传入中枢,形成前庭、视觉、运动觉等信号冲突,引起功能紊乱。出现眩晕、步态不稳、恶心、呕吐等。	
神州十四号载人飞船	驻留6个月	心理状态、情绪反应、人际沟通等方面可能出现适应不良问题。	
神州十三号载人飞船	驻留6个月	航天员的骨骼和肌肉会趋于萎缩,立位耐力下降,大脑的前庭系统也会出现紊乱,方向感错乱。头痛,颅压增高,视觉损害。	
神州十二号载人飞船	驻留3个月	骨代谢紊乱,导致骨丢失; 神经科:颅压增高、视觉损害、头痛; 肌肉萎缩,心血管功能障碍,消化系统紊乱。	
长期飞行	美国宇航员斯驻留国际空间站	驻留340天	体重下降、颈动脉扩张、DNA甲基化水平变化、肠道菌群改变等;经常性头晕、头疼等,前庭系统紊乱;以及认知能力下降,脑脊液压迫大脑,迫使大脑形态发生变化造成脑损伤 <sup>[41]</sup> 。
	美国宇航员国际空间站任务	驻留665天	人体体液在微重力环境下会上流至头部,可能给眼睛带来压力并导致视力问题。
	前苏联航天员“礼炮”七号空间站	驻留211天	典型的抑郁症状(易怒、快感缺乏、睡眠障碍等) <sup>[42]</sup> 。
	礼炮”六号空间站	驻留174天	抑郁、焦虑等心理障碍症状 <sup>[43]</sup> 。
美国空间站“太空实验室”	驻留84天	嗜睡和抑郁的迹象 <sup>[44]</sup> 。	

这些症状通常是由于内耳前庭系统对失重环境的适应过程中发生的功能性变化所引起的。然而随着国际空间站、中国空间站的建立和使用,长期太空飞行(持续时间从几个月到一年甚至更长的任务)中,航天员长期暴露于失重环境可能导致脑内液体分布的改变,这不仅可能影响脑压力,还可能改变脑血流动力学,从而对脑功能造成潜在的长期影响。例如,有研究显示长期太空飞行可能导致脑容量和形态的变化,这些变化可能与认知功能下降相关<sup>[40]</sup>。长期飞行的研究对于了解和准备未来更长期的太空探索至关重要。航天员还需要面对持续的工作压力和任务导向的高要求。长时间在轨工作对航天员的脑神经功能产生了多重影响。

首先,长时间空天飞行导致航天员的认知功能受损。航天员在空天飞行中需要完成复杂且高风险的任务,这要求他们始终保持高度的注意力和警觉性。但在持续的高工作负荷和压力下,他们的注意力可能会分散,反应时间延长,信息处理能力下降。这种状态下,即便是简单的任务也可

能导致错误,而产生不可逆转的后果。此外,长时间的工作也会导致航天员的工作记忆受损,这对于需要持续记忆和应用信息的任务来说是致命的<sup>[45]</sup>。除了对认知功能的影响,长时间在轨的社交隔离、单调的工作任务和高压力环境也会对航天员的情绪状态产生影响。人类作为社交动物,与他人的交往和互动是保持心理健康的关键。在空天飞行中,航天员长时间被限制在一个封闭的空间中,与同伴的交往也受到限制,这可能导致他们感到孤独和焦虑。另外,长时间的高压环境也会使他们感到压抑。这种情绪波动可能会导致航天员的决策能力下降,对任务的投入度减少,甚至可能导致抑郁症状<sup>[46]</sup>。

综上所述,时间累积的空天飞行对航天员的脑神经功能,尤其是长时间的在轨环境产生了深远的影响(如图2所示)。这些影响不仅仅限于空间任务执行,也可能影响到航天员回到地球后的生活。为了保护航天员的健康和安全,必须对这些影响进行深入的研究,并采取有效的预防和干预措施。

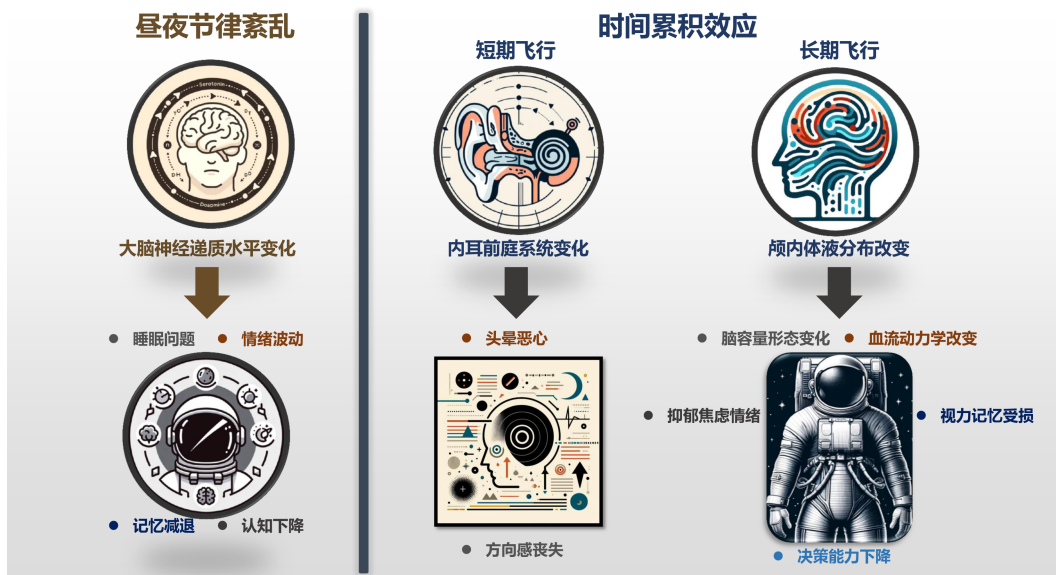


图2 时间视角下空天飞行影响航天员脑神经功能示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the effects of spaceflight on astronauts' brain neurological functions from a temporal perspective

### 3 空天飞行中航天员脑神经功能保护策略研究现状

近年来,随着人类对太空的探索步伐不断加快,特别是中国载人航天工程的实施,航天员在长

时间的空天飞行中所面临的挑战也越来越多,其中超重、失重、辐射、昼夜节律紊乱等因素对航天员的脑神经功能产生严重的负面影响。当前应对这些挑战,各国家相关研究机构已经采取了一系列的策略,旨在保护航天员的脑神经功能(如图3

所示)。

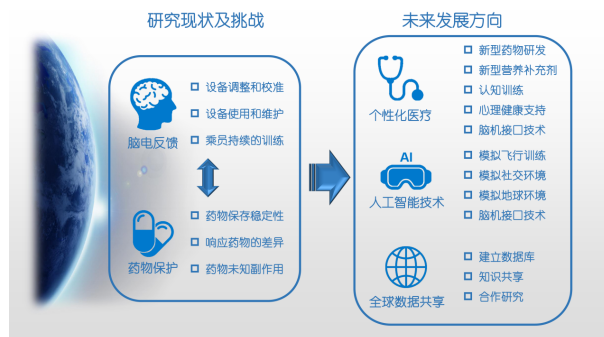


图3 空天飞行中航天员脑神经功能保护研究现状及未来发展方向

Fig. 3 Current research and future directions on the protection of astronauts' cerebral neurological functions during spaceflight

### 3.1 脑电反馈训练

脑电反馈训练是目前航天员脑神经功能保护策略中的一种重要技术。它主要是通过监测和调节脑电波活动,来帮助航天员自我调控大脑的活动<sup>[47]</sup>。当航天员的大脑活动朝向预定的目标时,他们会获得正向的鼓励,而当大脑活动偏离预定目标时,则会收到相应的警示。通过此方法,航天员可以有效提高认知能力、情绪稳定性,并缓解太空环境对脑神经功能的影响<sup>[48]</sup>。这种训练可以帮助航天员更好地应对太空中的各种不确定性和压力,从而降低其对脑神经的负面影响。例如,通过脑电反馈训练,航天员可以学习如何自我调节大脑活动来改善睡眠质量、提高身体健康和工作效率。此外,由于太空任务的高强度和长时效性,航天员可能会面临注意力分散和精神疲劳的问题。脑电反馈训练可以帮助他们提高工作效率和专注力,从而更好地完成任务<sup>[49]</sup>。

### 3.2 药物干预

除了脑电反馈训练外,药物干预也是目前被广泛研究和应用的一种保护航天员脑神经功能的策略。长时间的空天飞行可能增加航天员患上脑神经相关疾病的风险,为了应对这些问题,科学家们一直在探索能够保护航天员脑神经功能的药物。常见的有两种,第一种是氯胺酮,具有镇静、镇痛、遗忘等作用。在脑部环境发生恶性变化时,如缺血、缺氧等变化,能够产生保护脑神经功能的

作用<sup>[50]</sup>。此外氯胺酮能够减少细胞凋亡<sup>[51]</sup>,但作为一种具有神经毒性的药物,若长期高剂量作用于大脑会直接影响到航天员的行为和记忆<sup>[52]</sup>。适量使用可以缓解失眠、焦虑和抑郁等疾病的症状,从而提高航天员的工作效率和生活质量。另一种是疗效显著并且不良反应小的天然药物莱菔硫烷,具有分子靶点 Nrf2, Nrf2 可能与神经炎症、氧化应激、线粒体功能障碍、兴奋性毒性和神经元损伤等神经退行性疾病的病理事件有关。SFN 具有神经保护作用,可用于治疗创伤性脑损伤、阿尔兹海默症和帕金森病等<sup>[53]</sup>,可以改善脑神经功能,进而帮助航天员更好地应对太空环境。

### 3.3 面临的挑战

随着人类对更远星球和天体的探索,如火星,航天员可能需要在太空中停留数月甚至数年。这样的长时间空天飞行对脑神经功能的影响尚不明确。尽管脑电反馈技术虽然在地面上已有广泛的应用,但在空天飞行中的应用仍然是一大挑战,首先在太空中设备可能需要进行特殊的调整和校准,同时还会受到太空中的辐射、失重等因素的干扰<sup>[54]</sup>从而降低其精确性;其次,为了使航天员能够充分利用脑电反馈技术,他们需要经过持续的训练。这可能意味着他们需要花费大量的时间来进行训练,而这在紧张的太空任务中可能是需要更有效的训练方式;另外,空间飞行器(包括载人飞船、空间站)的有限空间,复杂的电器环境以及与地球环境的其他差异都可能使脑电反馈设备的使用和维护变得更加困难。例如,设备可能需要特殊的设计来适应太空环境,这可能会增加其复杂性和成本。

在药物干预策略方面,面临的主要问题首先是在太空环境中,药物的保存可能会面临一系列问题。药物可能受到太空辐射的影响,导致其效力降低或变质,而且太空环境中的温度、湿度和其他条件可能与地面条件有很大的差异,这可能影响药物的保存稳定性。其次,由于太空环境和地面环境的生理差异,航天员对药物的吸收、代谢和排泄可能与地面不同。这意味着航天员在太空中使用药物可能需要不同的剂量或使用方式。第三,在太空中,由于身体对药物的反应可能会有所不同,某些药物的副作用可能被放大,或者出现一



些在地面上没有的新的副作用。这可能会增加航天员的健康风险,并影响他们完成任务的能力。

综上所述,尽管脑电反馈技术和药物干预策略已在空天飞行中航天员脑神经保护中发挥了重要作用,但仍然面临许多挑战和问题,这需要各国航空航天机构、研究者和医学专家共同努力,对这些策略进行进一步的研究和改进,以保护航天员在空天飞行中的脑神经功能的健康。

## 4 结论与展望

空天飞行中,航天员经历从发射和返回超重、长期在轨失重、辐射、节律改变、孤立密闭等过程,均可影响其脑神经健康和认知能力。该领域对于航天员的脑神经保护已取得一定进展,然而对相关影响机制的理解还不够全面。例如,力学刺激的变化(超重、失重)可能会影响视听觉系统和运动控制,但具体的影响模式和可行的神经保护策略尚未阐明;辐射对神经系统的有效防护方法亟待更深入的研究。此外,在节律失调、封闭环境中,航天员可能面临心理压力和情绪困扰,也需要更多防护、干预措施的研发。

针对上述的不足和挑战,未来研究将从以下三个方面深入展开:

1) 个性化医疗和干预措施:开发新型的药物和营养补充剂,用于保护和修复航天员的脑神经系统;设计认知训练计划,以增强航天员的适应能力;提供心理健康支持和咨询服务,以缓解心理压力;以及使用先进的数据分析方法(如脑机接口技术),以实时监测航天员的神经和认知状况。

2) 人工智能技术的应用:虚拟现实技术和增强现实技术的使用,模拟空天飞行环境,对航天员以进行预先的认知和心理训练;提供模拟的社交环境或心理治疗,如冥想、放松训练等;模拟地球环境,如自然风光、家庭等,以缓解航天员心理压力。

3) 全球数据共享和合作:通过收集全球范围内关于航天员神经健康的数据,建立数据库,从而促进各国和机构之间的知识共享和合作研究,将加速有效干预措施的探索和应用。

综合来看,航天员在空天飞行中面临的脑神经和认知挑战是复杂和多层次的,需要跨学科的研究和全球性的合作来解决。尽管现有的研究存

在不少不足,但随着科学技术的不断进步,我们相信未来将会有更多高效、个性化的解决方案出现,有效地解决航天员在空天飞行中所面临的脑神经和认知挑战以确保航天员在长期太空任务中的健康安全和空间任务的顺利执行。

## 参考文献

- [1] 高雅丽. 空间科学与应用:持续产出重大科技成果[J]. 科学新闻, 2023, 25(4): 39-41.  
GAO Yali. Space science and applications: continuing to produce major scientific and technological achievements[J]. Science News, 2023, 25(4): 39-41. (in Chinese)
- [2] 纪依澜, 赵德明, 王菲, 等. 模拟失重实验动物模型的建立与评价[J]. 中国实验动物学报, 2023, 31(1): 106-111.  
JI Yilan, ZHAO Deming, WANG Fei, et al. Establishment and evaluation of an experimental animal model simulating weightlessness[J]. Chinese Journal of Laboratory Animals, 2023, 31(1): 106-111. (in Chinese)
- [3] 王艺璇. 模拟失重通过 lncRNA ODSM/miR-139-3p/ELK1 通路抑制成骨细胞功能及骨形成[D]. 西安: 中国人民解放军空军军医大学, 2023.  
WANG Yixuan. Simulated weightlessness inhibits osteoblast function and bone formation via lncRNA ODSM/miR-139-3p/ELK1 pathway[D]. Xi'an: People's Liberation Army Air Force Medical University, 2023. (in Chinese)
- [4] 于露, 韩标, 李昊, 等. 超重环境对骨组织生物力学性能和形态结构的影响[J]. 医用生物力学, 2022, 37(6): 1044-1049.  
YU Lu, HAN Biao, LI Hao, et al. Effects of overweight environment on biomechanical properties and morphology of bone tissue[J]. Medical Biomechanics, 2022, 37(6): 1044-1049. (in Chinese)
- [5] 侯斐, 姜伟. 多组学时代下的航天员健康风险研究[J]. 科学, 2023, 75(3): 19-23, 69.  
HOU Fei, JIANG Wei. Astronaut health risk study in the multi-omics era[J]. Science, 2023, 75(3): 19-23, 69. (in Chinese)
- [6] 郭静利, 郝永建, 张阳东, 等. 某部 317 名全封闭环境驻训官兵心理健康状况调查[J]. 解放军预防医学杂志, 2020, 38(2): 78-80.  
GUO Jingli, HAO Yongjian, ZHANG Yangdong, et al. A survey on the mental health status of 317 officers and soldiers stationed in a closed environment in a certain department[J]. PLA Journal of Preventive Medicine, 2020, 38(2): 78-80. (in Chinese)
- [7] ADAIR D, TRUONG D, ESMAEILPOUR Z, et al. Electrical stimulation of cranial nerves in cognition and disease[J]. Brain Stimulation, 2020, 13(3): 1-12.
- [8] 牛侨. 探究环境因素损害神经机制, 尝试预防性干预措施[J]. 环境与职业医学, 2023, 40(3): 237-238.  
NIU Qiao. Exploring the mechanism of neurological damage

- by environmental factors and trying preventive interventions [J]. *Environmental and Occupational Medicine*, 2023, 40(3): 237-238. (in Chinese)
- [9] RANGEL M V D, DE SA G B, FARINATTI P, et al. Neuro-Cardiovascular Responses to Sympathetic Stimulation in Fighter Pilots[J]. *Aerosp Med Hum Perf*, 2023, 94(10): 761-769.
- [10] REID L. An Introduction to Biomedical Computational Fluid Dynamics[J]. *Adv Exp Med Biol*, 2021, 1334: 205-22.
- [11] NATH S K, DEBNATH D, CHATTERJEE K, et al. Accretion Flow Properties of EXO 1846-031 during Its Multi-peaked Outburst after Long Quiescence [J]. *Astrophys J*, 2024, 960(1):1-15.
- [12] KOSKO E. Foundations of Solid Mechanics[J]. *Can Aeronaut Space J*, 1966, 12(1): 30.
- [13] BADALI C, WOLLSEIFFEN P, SCHNEIDER S. Under pressure—the influence of hypergravity on electrocortical activity and neurocognitive performance [J]. *Exp Brain Res*, 2023, 241(9): 2249-2259.
- [14] KONISHI T, KURAZUMI T, KATO T, et al. Changes in cerebral oxygen saturation and cerebral blood flow velocity under mild +Gz hypergravity [J]. *J Appl Physiol*, 2019, 127(1): 190-197.
- [15] SAEHLE T. Cerebral Hemodynamics During Exposure to Hypergravity (+Gz) or Microgravity (0 G)[J]. *Aerosp Med Hum Perform*, 2022, 93(7): 581-592.
- [16] CHEUNG B, HOFER K. Degradation of visual pursuit during sustained +3 Gz acceleration[J]. *Aviat Space Environ Med*, 1999, 70(5): 451-458.
- [17] 马爱军, 黄晓慧. 载人航天环境模拟技术的发展[J]. *航天医学与医学工程*, 2008, 21(3): 224-232.  
MA Aijun, HUANG Xiaohui. Development of Manned Space Environmental Simulation Technology [J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2008, 21(3): 224-232. (in Chinese)
- [18] VAN OMBERGEN A, DEMERTZI A, TOMILOVSKAYA E, et al. The effect of spaceflight and microgravity on the human brain [J]. *J Neurol*, 2017, 264(Suppl 1): 18-22.
- [19] 曲丽娜, 陈海龙, 王婷梅, 等. 航天模拟失重环境所致学习记忆障碍的分子机制研究[C]// 中国生理学会内分泌代谢、比较生理与应激生理学术会议. 沈阳: 中华医学会, 2017: 112-115.  
QU Lina, CHEN Hailong, WANG Tingmei, et al. Research on the molecular mechanism of learning memory impairment caused by spaceflight simulated weightlessness environment [C]// Proceedings of the Chinese Physiological Society Endocrine Metabolism, Comparative Physiology and Stress Physiology Colloquium, Shenyang: , 2017:112-115. (in Chinese)
- [20] 王玲, 袁天晨, 吴丽瑶. 模拟太空环境应激损伤及防护相关动物实验研究进展[J]. *中国实验动物学报*, 2022, 30(4): 589-596.  
WANG Ling, YUAN Tianchen, WU Liyao. Progress of animal experiments related to stress injury and protection in simulated space environment [J]. *Chinese Journal of Laboratory Animals*, 2022, 30(4): 589-596. (in Chinese)
- [21] RANJAN A, BEHARI J, MALLICK B N. Cytomorphometric Changes in Hippocampal CA1 Neurons Exposed to Simulated Microgravity Using Rats as Model [J]. *Front Neurol*, 2014, 5: 77.
- [22] STAHN A C, KUHN S. Brains in space: the importance of understanding the impact of long-duration spaceflight on spatial cognition and its neural circuitry [J]. *Cogn Process*, 2021, 22(1): 105-114.
- [23] 裴海龙. G0期细胞对空间重离子辐射抗性的机理研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(近代物理研究所), 2015.  
PEI Hailong. Mechanistic study on the resistance of G0 phase cells to space heavy ion radiation [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Modern Physics), 2015. (in Chinese)
- [24] 杨东方. 巨噬细胞迁移抑制因子敲减能够减少脊髓损伤后氧化应激导致的神经细胞 parthanatos 死亡[D]. 中国医科大学, 2020.  
YANG Dongfang. Macrophage migration inhibitory factor knockdown reduces neuronal parthanatos death caused by oxidative stress after spinal cord injury [D]. China Medical University, 2020. (in Chinese)
- [25] SHI K, TIAN D C, LI Z G, et al. Global brain inflammation in stroke [J]. *Lancet Neurol*, 2019, 18(11): 1058-66.
- [26] 雷润宏. 重离子辐射神经损伤的旁效应研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.  
LEI Runhong. Research on the paracrine effect of heavy ion radiation nerve injury [D]. Beijing University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [27] NEHA K, HAIDER M R, PATHAK A, et al. Medicinal prospects of antioxidants: A review [J]. *Eur J Med Chem*, 2019, 178: 687-704.
- [28] MARAZZITI D, ARONE A, IVALDI T, et al. Space missions: psychological and psychopathological issues [J]. *CNS Spectr*, 2022, 27(5): 536-40.
- [29] DESAI R I, LIMOLI C L, STARK C E L, et al. Impact of spaceflight stressors on behavior and cognition: A molecular, neurochemical, and neurobiological perspective [J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2022, 138: 104676.
- [30] CACIOPPO J T, CACIOPPO S, CAPITANIO J P, et al. The neuroendocrinology of social isolation [J]. *Annu Rev Psychol*, 2015, 66: 733-67.
- [31] YIN Y, LIU J, FAN Q, et al. Long-term spaceflight composite stress induces depression and cognitive impairment in astronauts—insights from neuroplasticity [J]. *Translational Psychiatry*, 2023, 13(1).
- [32] TAFFORIN C. The Mars-500 crew in daily life activities: An ethological study [J]. *Acta Astronautica*, 2013, 91: 69-76.

- [33] DESAI R I, LIMOLI C L, STARK C E L, et al. Impact of spaceflight stressors on behavior and cognition: A molecular, neurochemical, and neurobiological perspective [J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2022, 138.
- [34] MHATRE S D, IYER J, PUUKILA S, et al. Neuroconsequences of the spaceflight environment [J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2022, 132: 908-35.
- [35] LEE J Y, JUN H, SOMA S, et al. Dopamine facilitates associative memory encoding in the entorhinal cortex [J]. *Nature*, 2021, 598(7880): 321-6.
- [36] FAHRENKRUG J. [The brain's biological clock][J]. *Ugeskr Laeger*, 2018, 180(36).
- [37] 郑毅. 去甲肾上腺素通过 circR-WNK2/AANAT 通路调控大鼠松果体褪黑素合成与分泌的分子机制[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- ZHENG Yi. Molecular mechanism of norepinephrine regulation of rat pineal melatonin synthesis and secretion through circR-WNK2/AANAT pathway [D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese)
- [38] LIU F, CHANG H C. Physiological links of circadian clock and biological clock of aging[J]. *Protein Cell*, 2017, 8(7): 477-88.
- [39] MARSHALL-GOEBEL K, DAMANI R, BERSHAD E M. Brain Physiological Response and Adaptation During Spaceflight[J]. *Neurosurgery*, 2019, 85(5): E815-E21.
- [40] HUANG A S, STENGER M B, MACIAS B R. Gravitational Influence on Intraocular Pressure: Implications for Spaceflight and Disease [J]. *Journal of Glaucoma*, 2019, 28(8): 756-64.
- [41] GARRETT-BAKELMAN F E, DARSHI M, GREEN S J, et al. The NASA Twins Study: A multidimensional analysis of a year-long human spaceflight [J]. *Science*, 2019, 364(6436).
- [42] WANG Y, WU R, ZHOU R. Psychological Issues in Human Spaceflight: From Individual Psychology to Human Interactions [J]. *Advances in Psychological Science*, 2014, 22(8).
- [43] GATTI M, PALUMBO R, DI DOMENICO A, et al. Affective health and countermeasures in long-duration space exploration[J]. *Heliyon*, 2022, 8(5): e09414.
- [44] MANZEY D, LORENZ B, POLJAKOV V. Mental performance in extreme environments: results from a performance monitoring study during a 438-day spaceflight[J]. *Ergonomics*, 1998, 41(4): 537-59.
- [45] 范晓丽, 赵朝义, 罗虹, 等. 基于 2-back 任务下 ERP 特征的脑力疲劳客观评价研究[J]. *生物医学工程学杂志*, 2018, 35(6): 837-844.
- FAN Xiaoli, ZHAO Chaoyi, LUO Hong, et al. Research on objective evaluation of brain fatigue based on ERP characteristics under 2-back task [J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2018, 35(06): 837-844. (in Chinese)
- [46] OLUWAFEMI F A, ABDELBAKI R, LAI J C, et al. A review of astronaut mental health in manned missions: Potential interventions for cognitive and mental health challenges[J]. *Life Sci Space Res (Amst)*, 2021, 28: 26-31.
- [47] 张力新, 郝鑫宇, 刘爽, et al. 脑电反馈放松训练系统研究及有效性验证 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(9): 199-205.
- ZHANG Lixin, HAO Xinyu, LIU Shuang, et al. Research and validation of effectiveness of electroencephalographic feedback relaxation training system [J]. *Journal of Instrumentation*, 2019, 40(9): 199-205. (in Chinese)
- [48] 魏玲. 情绪调控的脑电动态特性分析及脑电反馈系统研究[D]. 上海: 上海大学, 2016.
- WEI Ling. EEG Dynamic Characterization of Emotion Regulation and Research on EEG Feedback System [D]. Shanghai: Shanghai University, 2016. (in Chinese)
- [49] 陈泉宇, 随力, 李丽. 脑电神经反馈训练在提高工作记忆中应用的研究与挑战 [J]. *中国医学物理学杂志*, 2022, 39(8): 987-91.
- CHEN Xiaoyu, SUI Li, LI Li. The research and challenges of using EEG neurofeedback training to improve working memory [J]. *Research and challenges of electroencephalographic neurofeedback training in improving working memory [J]. Chinese Journal of Medical Physics*, 2022, 39(8): 987-991. (in Chinese)
- [50] CARDONA-ACOSTA A M, BOLANOS-GUZMAN C A. Role of the mesolimbic dopamine pathway in the antidepressant effects of ketamine [J]. *Neuropharmacology*, 2023, 225: 109374.
- [51] XU X, XU Y, ZHANG Q, et al. Porcine epidemic diarrhea virus infections induce apoptosis in Vero cells via a reactive oxygen species (ROS)/p53, but not p38 MAPK and SAPK/JNK signalling pathways[J]. *Vet Microbiol*, 2019, 232: 1-12.
- [52] 章天豪, 黄诗茜, 徐峰, et al. 氯胺酮神经保护与神经毒性的研究进展[J]. *临床麻醉学杂志*, 2022, 38(7): 752-756.
- ZHANG Tianhao, HUANG Shiqian, XU Feng, et al. Research progress on neuroprotective effect and neurotoxicity of ketamine[J]. *J Clin Anesthesiol*, 2022, 38(7): 752-756. (in Chinese)
- [53] UDDIN M S, MAMUN A A, JAKARIA M, et al. Emerging promise of sulforaphane-mediated Nrf2 signaling cascade against neurological disorders[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 707: 135624.
- [54] MARIANO B, PAOLO G, ANTONIO A. The biomedical challenge associated with the Artemis space program [J]. *Acta Astronautica*, 2023, 212.

(编辑:马文静)