

# 太空探索中的人类医学保障

朱香英, 黄定华

中国地质大学(武汉), 武汉 430074

**摘要** 近10年国外对太空探索中人身健康与安全的研究多集中在失重生理效应及其内在机制上,有关在微重力条件下人体发生的心血管功能障碍、肌肉萎缩、骨质流失、空间运动病等生理效应及其机制的研究取得了重大突破和进展。中国在这一领域的研究起步虽然较晚,但随着中国空间探索和载人航天事业的蓬勃发展,相关研究逐渐加速,在航天重力生理学、航天员医监医保、物理化学再生式环境控制医保和空间生命科学与生物技术等涉及空间人类安全与发展的相关课题上,中国取得了可喜的进展。特别是在针对失重性骨丢失开展的分子医学研究中,针对microRNA-214小核酸分子开发了治疗药物,成功减缓了模拟失重和增龄导致的成骨能力下降以及骨丢失速率,取得了突破性研究成果,为人类太空探索提供了重要医学保障。

**关键词** 空间生物学;空间医学;航天重力生理学;航天员医监医保;再生式环境控制

20世纪以来,科学技术不断提高,人类活动的领域也不断向地球外拓展。宇宙空间成为继大陆、海洋、天空之后一个新的战略制高点,世界各航天大国也纷纷加快了载人空间探索的脚步。而在实现太空旅行时,人类首先要面对并克服因恶劣太空环境而导致的人体所出现的一系列生物医学和心理方面的问题,这样才能确保人类进入太空的安全生存和可持续发展。

美国与苏联是世界上最早研究载人航天技术的国家。在阿波罗工程实现了载人登月后,美苏两国又先后把10座空间实验室和空间站送上了太空。从20世纪50年代开始,美苏两国就空间飞行

状况对航天员的生理、心理及工作能力的影响,进行了深入系统的研究,为太空中人体健康和安全问题提供了理论基础和技术保障。自20世纪80年代以来,中国也逐步开始研究空间生物学和空间医学,在“十一五”规划中,将空间生物学与生物技术列为国家重点发展技术。自2010年9月载人空间站任务正式启动后,中国加速了对空间生物学和空间医学的研究,并逐步实现了载人探测从中短期太空停留向长时间在轨实验的重大突破。中国由于在太空生物医学实验方面参与机会较少,缺乏对太空飞行人员生理功能影响的系统性观测数据,人体在太空环境中的适应与保护措施未得到有效验证。

收稿日期:2020-07-27;修回日期:2020-10-26

作者简介:朱香英,教授,研究方向为人体健康保健,电子信箱:41521338@qq.com

引用格式:朱香英,黄定华.太空探索中的人类医学保障[J].科技导报,2021,39(11):21-29;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2021.11.003

虽然相关实验研究领域有较快发展,但与美国等航天强国相比,在研究的深度与广度方面,尚存在较大差距。

## 1 国外研究现状

近 50 年来,国外航天领域对人体健康的研究大多集中于失重生理效应及其发生发展机制对于人类健康的影响、物理化学再生式环境控制的生命保障技术和航天员的医监医保 3 个方面。以此构建起一个太空环境下的完整生命保护网络,为人类进入太空提供了初步和基本的保障。

### 1.1 失重生理效应影响

研究失重生理效应的影响,目前重点是针对微重力环境下人体发生的心血管功能障碍、肌肉萎缩、骨质流失、空间运动病等生理效应和机制。国际空间站实验中已发现,长期失重可引起心血管系统障碍、心肌萎缩、收缩功能下降、骨骼系统和肌肉系统出现长期废用性改变<sup>[1]</sup>。迄今为止,对于人体骨质流失和肌肉萎缩的机理还不明确,但研究表明,骨骼钙质流失在空间工作几天后就开始出现(急性效应),并在 6 个月之后钙质流失继续发展(慢性效应);尿钙检测显示,钙质流失水平与地面的卧床实验结果相比要大得多<sup>[2]</sup>。在延长探测周期后,苏联科学家发现,在将近 1 年的太空作业周期中,人体钙质水平呈现负值<sup>[3]</sup>。同时对骨密度的测量相应也出现和钙质研究类似的结果。从医学角度看,太空飞行对骨骼的改变同人体骨骼老化类似,会对航天员生命健康带来严重影响。实验表明,在 6 个月的太空飞行中,受检航天员的髌关节和脊柱面积骨密度(areal bone mineral density, ABMD)检测值下降>10%<sup>[4]</sup>。在长时间微重力环境下,大多数宇航员的骨质每个月以 0.5%~1% 的速度流失,承重骨骨质流失则更为严重,每月可高达 2.6%<sup>[5]</sup>。在相应的对策研究中,发现摄入鱼与充足的维生素 D 有缓解人体骨质流失的作用<sup>[6]</sup>,但是国际空间站的研究数据表明,即使实施积极主动的健身措施和药物补偿方法,腰椎骨骨密度仍会以每月 0.9% 的速度继续流失,股骨的钙质流失率甚至可

以达到 1.4%<sup>[7-8]</sup>。现在认为,造成这一现象的主要原因,是由于在空间中人体没有重力的束缚,因此在进行活动时人体肌肉组织处于类似废用状态,从而导致了相关肌力和肌肉的减弱<sup>[9]</sup>。此外,在微重力条件下,人体的上身感受器官会错误地判断血量增多,导致体液水平下降,进而引发一系列心血管功能障碍<sup>[10]</sup>。不仅如此,在进入微重力环境后,大部分航天员还会发生中度到严重的空间运动症<sup>[11]</sup>,出现眩晕、疲劳、呕吐、头疼失眠和免疫力下降等一系列不适反应,从而加剧了航天员的健康危险。

虽然国际上就此开展了大量研究,提出了飞行前针对性训练和锻炼,研发了药物治疗手段,在一定程度上减轻了类似疾病对航天员的困扰,但目前关于失重对人体影响的作用机制仍不清楚。因此,既没有明确在长期星际飞行中,人体对微重力的适应能力限度,也难以彻底消除微重力环境对人体健康的影响与危害。这也成为人类进入太空并长期生活于太空的一个尚未克服的障碍。

### 1.2 空间辐射效应影响

空间辐射效应影响是限制人类对太空探索的另一个重要影响因素。迄今为止,对空间辐射效应影响机理仍缺乏有效认识,虽然航天员身体可以接受的辐射剂量和空间粒子能量谱的量化标准越来越准确,但是由于人体易感性不一样,以及辐射的多样性差异,科技界对低剂量辐射基本机制、重复剂量和适应性反应的认识还缺乏足够的认识。

近地轨道测量结果表明,人体每天受到辐射剂量约为 300  $\mu\text{Gy}$ <sup>[12]</sup>,已经超出地面专门从事放射性工作人员的安全极限,是普通公众承受水平的数十倍。在空间驻留飞行作业中,5 个月左右时间的中期数据表明,由于叠加效应,航天员承受的辐射量水平为 0.15~0.4 Sv<sup>[13-14]</sup>,剂量升级,影响更为严重。此外,研究还表明,在辐射类型不同时,即使同一个体吸收相同剂量,引起的生理变化也不相同,特别是在对生物造成损伤的程度方面。其损伤方面显示,0.01 Gy 快中子的剂量引起的人体损伤和 0.1 Gy  $\gamma$  辐射的剂量引起的损伤相当,即快中子的损伤因子为  $\gamma$  辐射的 10 倍。因此剂量当量这一物理量在辐射剂量学中产生了,以区别不同辐射类型的影响。

空间辐射效应造成的危害首位是癌症,其次是对中枢神经系统的损害。据估计,一次3年的火星作业,航天员要接受约1.0 Sv的辐射照射。尽管数据证实在此范围内的照射对人体危害较小,但同时也有证据表示使人体发生癌症的危险率增加,有资料显示航天员患上癌症的概率将增加2%<sup>[15]</sup>。

目前,国内外对评估生物数据和不同辐射风险之间相互关系的技术研究越来越多,包括分别从体内和体外实验两方面分析引起癌变的医学生理过程,并从细胞水平评估药物服用和膳食条件与辐射防护之间的潜在关系。

### 1.3 太空环境对人体近日节律的影响

昼夜节律(circadian rhythm)是指地球生命活动以约24 h为周期的变动,又称近日节律。人体生理机能、记忆思维能力、情绪及工作效率等有明显的近日节律波动。近日节律与人类的活动关系密切。人体生理节律被打乱,会导致食欲下降、工作效率降低、事故增多。施用药物时间不同,疗效也不相同;作用时间不同,其毒性表现也不一样。肿瘤细胞对X射线的敏感性也有昼夜节律差别。

地球每天的光照强度、温度和湿度等环境因素呈现的周期性波动状态形成了近日节律。不同季节和不同年份的气候也有类似、但周期更长的变化。人类在长期进化过程中,已经逐渐适应了这种变化,形成了特定的生物钟系统和生物节律,以应对环境变化的波动。其中最重要的节律就是近日节律。

引起近日节律与人体生物钟不同步的原因很多,例如照明条件、工作时间和航天环境<sup>[16]</sup>。宇航员在太空飞行过程中所处环境的光暗周期同地球表面以24 h为周期的近日节律变化不一致。载人航天器在绕近地轨道飞行时,绕地飞行1圈约需90 min,即24 h或1440 min内就要经历16个昼夜变化。此外,载人航天器在星际空间的地球引力边缘飞行时,航天器舱外一边黑暗,一边明亮,相当于在航天器的两侧,昼夜同时存在,这与人类已经适应的地球昼夜环境截然不同。航天员人体在地球表面以24 h为周期的近日节律与飞行轨道上的光暗周期之间的差别巨大,迫使航天员体内生物节律

系统必须随着轨道的光与暗周期而进行频繁调整,导致航天员的近日节律系统紊乱<sup>[17]</sup>,对航天员的生理功能产生了显著影响。1967年,美国利用“水星”号任务,首次就人在太空飞行的生物节律做过评价<sup>[18]</sup>。Gundel等<sup>[19]</sup>以体温为指标,评价了4名参加俄罗斯“和平”号空间站飞行6~8 d航天员的近日节律,与地面测量的基础体温值相比,这些航天员的体温节律时相延迟了>2 h。一名执行100 d飞行任务的航天员近日节律变化结果显示,在执行任务的前3个月维持了24 h的近日节律,在执行任务的后12 d则出现了睡眠紊乱和近日节律振幅下降<sup>[20]</sup>。近年来,关于近日节律的研究已取得较多成果,但多集中于航天中的睡眠与工作效率问题。

## 2 国内研究现状

20世纪60年代起,中国成功地发射了系列生物探空火箭,启动了以载人飞行目标的科学实验研究<sup>[21-22]</sup>。直至20世纪90年代初,中国经历了“曙光”号任务以及国家高技术研究发展计划(863计划),从航天员的生存安全、身体健康和工作能力等多角度出发,初步开展了航天员飞船生命保障系统、特殊环境因素选拔、航天环境医学及人因工程学等工程应用理论,模拟失重条件下人体生理效应等航天医学的基础研究<sup>[23-25]</sup>。1992年,国家载人航天工程正式启动,明确了任务需求,引领航天生物医学快速发展。神舟五号、六号、七号任务的圆满完成,证实了中国已具备短期飞行的医学保障能力。但由于中国航天医学实验机会相对较少,没有获得长期太空飞行对人体生理影响的系统数据,其防护措施也未能得到系统验证。2010年9月,中国空间站任务正式启动,经过10年的发展,中国已经掌握和具备了航天员长期驻留保障能力,中国正式迈入空间站时代。与此同时,近些年中国在高校系统、中国科学院系统、军队系统和国家航天局等部门,先后建立或合作建立了航天员科研训练中心、航天员健康中心、航天医学基础与应用国家重点实验室以及军事医学科学院等系列专门研究机构<sup>[26]</sup>,建成了一支由科技领军人才、学科带头人、青年骨

干组成的研究团队,从人因工程学的角度,对空间环境中涉及到医学领域的生理学、心理学、解剖学和人文管理及工程领域涉及的管理学、工程学、系统科学、劳动科学、安全科学、环境科学和工效学等诸多方面,就制约人类长期空间飞行的机制及相关的关键科学问题、长期飞行失重与辐射效应及其防护问题、先进的在轨监测与医学处置技术问题以及航天员作业能力等多种问题开展了系统研究,取得了大量重要进展,为中国载人航天提供了可靠的空间医学保障。

### 2.1 航天重力生理学与航天细胞分子生物学

航天重力问题一直是航天人的首要问题。20世纪70年代,中国在“曙光”号任务中,正式开始了以航天医学问题为目标的航天生物医学基础研究,主要针对超重对心血管系统与神经系统的调节作用。随之伴随863计划项目和载人航天工程的正式启动,对航天的研究不断系统化、深入化。20世纪90年代后期,在失重生理效应研究方面,从早期的对现象观察发展到深入的机制探讨。从细胞分子水平方面开展了航天医学问题的发生、发展机理

研究,利用成骨细胞和心肌细胞为突破口的系统研究,提出重力敏感系统—细胞骨架系统中的分子表达与调控是进行航天医学防护的关注焦点的学术观点<sup>[27-28]</sup>。2005年,神舟六号任务的完成,率先在国际上实现了空间飞行条件下心肌细胞实时研究,为进一步开展空间心血管功能紊乱的机理与防护对抗措施研究提供了细胞学依据<sup>[29]</sup>。对空间运动病、减压病和立位耐力下降3大医学问题开始了有针对性重点研究,采取了药物、适应性训练与物理预防相结合的综合防护措施<sup>[30-31]</sup>。特别是从2016年来,中国航天医学基础与应用国家重点实验室与香港中文大学、军事医学科学院等相关研究单位合作<sup>[26]</sup>,在失重性骨丢失研究领域开展分子医学研究,发现和阐释了microRNA-214小核酸分子的一种同时参与造成失重和增龄性成骨能力降低的功能,并且在实验中针对该小核酸问题开发了治疗药物,减缓了模拟失重和增龄导致的成骨能力下降以及骨丢失,取得了突破性研究成果<sup>[32-34]</sup>。如图1所示,microRNA-214小核酸分子在体外能够抑制成骨细胞活性和基质矿化<sup>[33]</sup>。

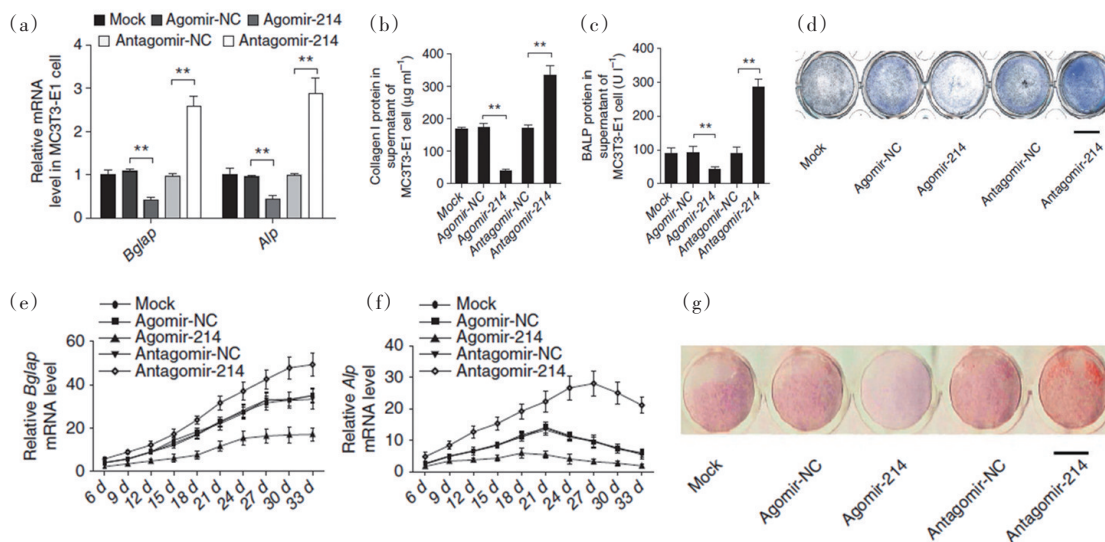


图1 microRNA-214在体外抑制成骨细胞活性和基质矿化

### 2.2 航天员医监医保

航天员医监医保研究主要集中在军事医学科学院宇宙医学研究所,在“曙光”号任务期间保障被

试者的安全,构建航天员的日常医监医保技术体系。神舟五号、神州六号的两次载人飞行,促进了航天员医监医保技术的快速发展,完善了目标体

系,明确了研究任务即通过全面监测、分析、评估航天员个体及群体健康状况,实施空间医学保障,预防和消除不良因素对航天员健康的影响,维护航天员的身心健康。依靠中国自身能力逐步发展建立了具有中国特色的航天员健康维护体系,提出了“预防性原则、实时性原则及预见性原则”的健康保障原则;利用中医药理论和方法与航天医学相结合的思路,创立了特色的航天员个性化诊疗方法,确保了航天员在飞行任务中的身体健康。通过实验研究,对航天员航天生理功能检查方法进行了优化,确定了航天员个体生理参数在各种条件下的极值范围,建立了适合中国航天员的航天生理功能评价标准体系,为适应中国人体特征的航天实时医监提供了客观依据<sup>[35]</sup>。

### 2.3 物理化学再生式环控生保技术

物理化学再生式环控生保技术是发展空间站应用的关键技术,其基本功能是对空间站密闭环境进

行控制。物化再生式环控生保系统的构成图如图2所示,它可以为宇航员提供水、氧、食物等必需物质和其他的生活保障<sup>[36]</sup>。为此,中国通过863计划预研项目对相关研究给予了长期的支持,已经形成了以空间站应用为目标、以物理化学再生式技术为核心的完整的环控生保系统技术基础和研制体系,建立了模拟空间站密闭舱的再生式环控生保系统技术试验平台,并首次进行了“3人62 d”连续的以再生式环控生保技术为主的系统集成试验。再生生保系统在试验中提供了3人100%的氧用量,32%的生活饮用水和全部的卫生用水<sup>[36-37]</sup>。通过试验,验证了物理化学再生式环控生保系统的核心技术、掌握了系统集成技术,总结了系统运行流程及规律,初步获取了指导中国未来空间站环控生保系统设计、研制的若干总体性指标,例如功耗、体积、重量、热管理参数、信息交换量等,为空间站环控生保系统的研制奠定了重要的技术基础,提供了可靠的安全保障。

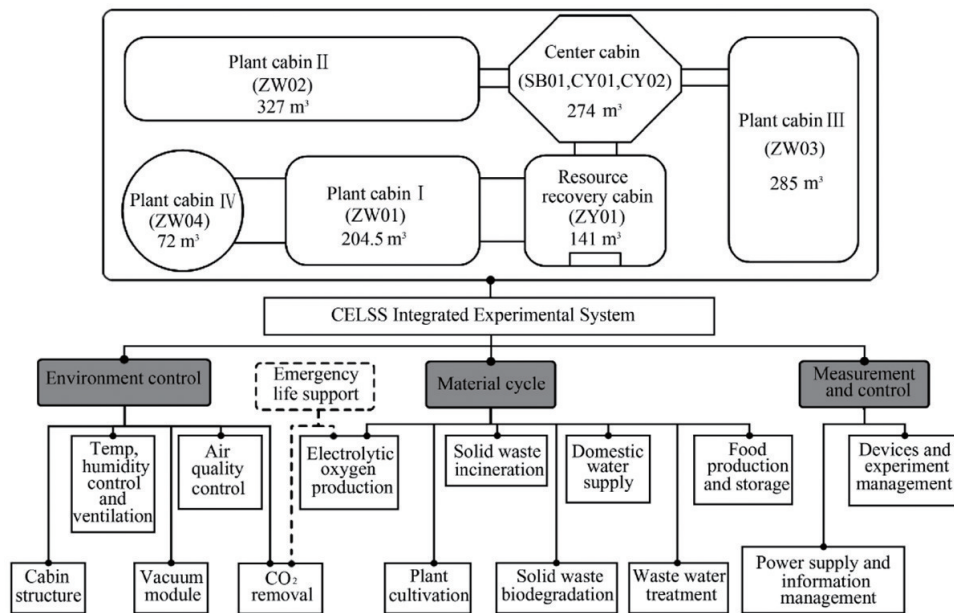


图2 物理化学再生式环控生保系统

### 2.4 空间生命科学与生物技术

空间生命科学和生物技术研究从更大的范围为航天医学发展提供了更深入和系统的支持,并呈现融合发展的趋势。空间生物技术是航天技术与

生物技术两大高科技的完美结合,美国将其列为21世纪对增强综合国力最具战略影响力的五大重点发展的高新技术领域之一。大部分空间生物学和生物技术研究都是在国际空间站(International

Space Station, ISS)平台上开展,代表着空间生物学和生物技术研究的发展方向。由于中国不是ISS计划参与国,因此基于ISS开展的空间生命科学研究数量较少。其中,邓玉林研究组围绕载人航天和空间生命科学的需求,对航天员生理生化指标监控、空间辐射生物学效应和空间生命信息探测技术进行了深入研究<sup>[38-40]</sup>。而美国、德国和俄罗斯在与

ISS相关的空间生命科学研究中心保持着领先地位。美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)在2013年9月发布“ISS十大科学成就”,评选标准包括成果发表期刊质量、受其他科学家推荐的情况、创新性以及是否给人类带来益处等方面,其中评选科研成果中与空间生命科学相关的成果见表1<sup>[41]</sup>。

表1 NASA发布“ISS十大科学成就”中与空间生命科学相关的成果

排名	科学成就	ISS上的研究或技术	学科	获选理由
1	化疗药物新型靶向输送方法目前正在用于乳腺癌临床试验	微囊化静电处理系统(MEPS)	生物/生物技术	MEPS是一项在2002年开展的生物实验,经过5年的持续研究,在2007年获得专利授权,近期有望开展临床试验
5	细菌病原体变得高致病性的途径	多项微生物实验研究项目	生物/生物技术	通过长期在空间站开展相关多个研究项目,确定细菌在空间中确实更加容易致病,结果可对空间任务和地球都带来益处
9	理解骨质疏松症的机理及开发新的治疗药物	商业生物测试模块——骨保护素对微重力下骨质维持的影响(CBTM)以及后续系列试验	生物/生物技术	商业公司AMGEN将小鼠送往空间站,研究骨保护素的效用。利用研究成果开发的新抗骨质疏松药物——Prolia已经投入市场
10	通过饮食和锻炼预防在空间中骨质流失的发生	多项人体研究实验	人体研究	这项研究是ISS数年研究累计的成果,发现通过饮食和锻炼可预防在空间中骨质流失的发生。后续将研究如何利用这项成果造福更多人

当前,由各空间大国对空间生命科学与生物技术的重视程度可知,必须不失时机地组织和实施该领域的研究<sup>[42-43]</sup>并长期坚持。2002年8月,中国空间技术研究院联合东方红公司发起并成立了中国第一个空间生物实验室——“中国空间技术研究院空间生物实验室”,承担着国家“863计划”等多项研究课题。中国空间站建成后,选择的项目应当向国际生命科学发展的前沿和今后发展趋势,考虑主要研究内容和科学方向应包括重力环境下基础生物学研究;生命体各层次对重力变化感知和适应的力学-生物学耦合机制;利用空间特殊条件,通过生物技术,获得创新的材料、药物和医疗技术等重要领域。

### 3 结论

空间生命科学与生物技术及航天医学领域已成为当今国际载人航天发展的前沿热点,呈现出融合发展的趋势,也是中国载人航天发展的重要和长远目标。当前世界各航天强国在载人航天上虽然取得了累累硕果,但仍普遍面临人员生存及健康保障等突出问题,需要进一步发展航天医学,为人类长期空间探索活动提供保障。随着对飞行实践经验的不断积累和医学研究的深入,人们对基因工程、空间环境中的人因工程学和医学保障等问题的研究越来越重视。对长期处于航天飞行中,失重、辐射、密闭隔离环境、昼夜节律改变等因素对人体

产生的不利影响的认识也越来越清晰,如其中难以避免的影响是会增加罹患疾病的风险,并严重威胁航天员的健康和安全,乃至导致空间探索任务的失败。中国未来在太空探索中的人类医学保障方面,应该不失时机地组织和实施研究,并持之以恒,布局更多相关试验和研究项目,认识空间环境中生物复杂系统中的功能调控网络,突破和提升人体在地外空间长期驻留的航天医学理论和核心技术,认识生命体各层次对重力变化感知和适应的力学-生物学耦合机制,构建空间辐射生物学效应分析模型和技术,评估空间辐射损伤和防护,及时制定生命科学和生物技术领域研究的发展规划,从而真正实现人类在可靠安全保障基础上的长期太空旅行与驻留发展。

#### 参考文献(References)

- [1] 白延强, 刘朝霞. 面向空间站工程的航天医学实验规划设想[J]. 空军医学杂志, 2012, 28(1): 53-54.
- [2] Rambaut P C, Johnston R S. Prolonged weightlessness and calcium loss in man[J]. *Acta Astronautica*, 1979, 6(9): 1113-1122.
- [3] Vorobyov E I, Gazenko O G, Genin A M, et al. Medical results of Salyut-6 manned space flights[J]. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 1983, 54(2): 31-40.
- [4] Sibonga J D. Spaceflight-induced bone loss: Is there an osteoporosis risk?[J]. *Current Osteoporosis Reports*, 2013, 11(2): 92-98.
- [5] Garcia H D, Hays S M, Tsuji J S. Modeling of blood lead levels in astronauts exposed to lead from microgravity-accelerated bone loss[J]. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 2013, 84(12): 1229-1234.
- [6] Zwart S R, Pierson D, Mehta S, et al. Capacity of omega-3 fatty acids or eicosapentaenoic acid to counteract weightlessness-induced bone loss by inhibiting NF-kappaB activation: From cells to bed rest to astronauts[J]. *Journal of Bone and Mineral Research*, 2010, 25(5): 1049-1057.
- [7] Lang T. Cortical and trabecular bone mineral loss from the spine and hip in long-duration spaceflight[J]. *Journal of Bone and Mineral Research*, 2004, 19(6): 1006-1012.
- [8] Lang T F, Leblanc A D, Evans H J, et al. Adaptation of the proximal femur to skeletal reloading after long-duration spaceflight[J]. *Journal of Bone and Mineral Research*, 2006, 21(8): 1224-1230.
- [9] Hagan R D. Deconditioning and reconditioning[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2005, 37(3): 527.
- [10] Convertino V A. Clinical aspects of the control of plasma volume at microgravity and during return to one gravity[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1996, 28(10): 45-52.
- [11] Jennings R T. Managing space motion sickness[J]. *Journal of Vestibular Research Equilibrium & Orientation*, 1998, 8(1): 67-70.
- [12] Baldwin K M. Effect of spaceflight on the functional, biochemical, and metabolic properties of skeletal muscle[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1996, 28(8): 983-987.
- [13] Rayman R B. Space physiology[J]. *Journal of the American Medical Association*, 2006, 296(2): 223-228.
- [14] Testard I, Ricoul M, Hoffschir F, et al. Radiation-induced chromosome damage in astronauts' lymphocytes [J]. *International Journal of Radiation Biology*, 1996, 70(4): 403-411.
- [15] Cucinotta F A, Durante M. Cancer risk from exposure to galactic cosmic rays: Implications for space exploration by human beings[J]. *The Lancet Oncology*, 2006, 7(5): 431-435.
- [16] Mallis M M, Deroshia C W. Circadian rhythms, sleep, and performance in space[J]. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 2005, 76(6): 94-107.
- [17] 苏洪余, 陈善广, 李建辉, 等. 空间时间生物学研究进展[J]. *航天医学与医学工程*, 2008, 21(3): 215-223.
- [18] Adey W R, Kado R T, Walter D O. Computer analysis of EEG data from Gemini flight GT-7[J]. *Aerospace Medicine*, 1967, 38(4): 345-359.
- [19] Gundel A, Polyakov V V, Zully J. The alteration of human sleep and circadian rhythms during spaceflight[J]. *Journal of Sleep Research*, 1997, 6(1): 1-8.
- [20] Monk T H, Kennedy K S, Rose L R, et al. Decreased human circadian pacemaker influence after 100 days in space: A case study[J]. *Psychosomatic Medicine*, 2001, 63(6): 881-885.
- [21] Su S N. Past, present and future development of the project of manned space medico-engineering in China[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2003, 16 (Suppl 1): 471-474.
- [22] Xu F. The achievements and prospects of Chinese spacecraft engineering[J]. *Chinese Space Science & Technology*

- gy, 2003, 23(1): 1-6.
- [23] Shen L P. Continuous target of China's manned space project and research direction of space medico-engineering[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2003, 16 (Suppl 1): 475-481.
- [24] Shen X F, Fu L, Deng Y B. Environmental control and life support system of spacecraft[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2003, 16 (Suppl 1): 543-549.
- [25] Zhang J, Xue Y, Wang Y, et al. Experiments on mice during the earth orbital flight in China[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 1995, 8(1): 53-56.
- [26] 中国载人航天工程网. 航天医学基础与应用国家重点实验室挂牌落户航天员中心[N/OL]. [2009-12-25]. [http://www.cmse.gov.cn/art/2009/12/25/art\\_912\\_20503.html](http://www.cmse.gov.cn/art/2009/12/25/art_912_20503.html)
- [27] 戴钟铨, 李莹辉, 丁柏, 等. 军事医学与特种医学——军事医学—模拟微重力诱导的细胞微丝变化影响COLIA启动子活性[J]. 中国学术期刊文摘, 2006, 12(21): 271-271.
- [28] 李莹辉, 万玉民. 空间环境的细胞分子生物学效应与防护研究[C]. 中国生物工程学会, 北京, 2007.
- [29] Li Y H. Cell and molecular biology of space medicine in the 21st century[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2003, 16 (Suppl 1): 588-592.
- [30] Miller E F I, Graybiel A. Perception of the upright and susceptibility to motion sickness as functions of angle of tilt and angular velocity in off-vertical rotation[J]. NASA Special Publication, 1973, 314(7): 995-999.
- [31] Shi H Z, Wang B Z, Gao J Y, et al. Counteracting effect of Chinese herbs on "insufficiency of spleen qi" induced by simulated weightlessness[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 1999, 12(3): 197-199.
- [32] 唐国华. microRNA调节骨丢失研究取得突破性进展[J]. 航天医学与医学工程, 2012, 25(6): 453-457.
- [33] Wang X G, Guo B S, Li Q, et al. miR-214 targets ATF4 to inhibit bone formation[J]. Nature Medicine, 2013, 19 (1): 93-100.
- [34] Wang C G, Liao Z, Xiao H, et al. LncRNA KCNQ10T1 promoted BMP2 expression to regulate osteogenic differentiation by sponging miRNA-214[J]. Experimental and Molecular Pathology, 2019, 107: 77-84.
- [35] 陈善广, 邓一兵, 李莹辉. 航天医学工程学主要研究进展与未来展望[J]. 航天医学与医学工程, 2018, 31(2): 79-89.
- [36] 张良长, 李婷, 余青霓, 等. 4人180天集成试验环控生保系统设计及运行概况[J]. 航天医学与医学工程, 2018, 31(2): 273-281.
- [37] 周抗寒, 傅岚, 韩永强, 等. 再生式环控生保技术研究及进展[J]. 航天医学与医学工程, 2003, 16(增刊1): 566-572.
- [38] Wang Y, Javed I, Liu Y H, et al. Effect of prolonged simulated microgravity on metabolic proteins in rat hippocampus: Steps toward safe space travel[J]. Journal of Proteome Research, 2016, 15(1): 29-37.
- [39] Li Y J, Li G Q, Li Y Z, et al. Development and application of an UHPLC-MS method for comparative pharmacokinetic study of phenolic components from dragon's blood in rats under simulated microgravity environment [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2016, 121: 91-98.
- [40] Wang X H, Du J X, Wang D M, et al. Effects of simulated microgravity on human brain nervous tissue[J]. Neuroscience Letters, 2016, 627: 199-204.
- [41] 王海名, 杨帆, 郭世杰, 等. 空间生命科学研究前沿发展态势分析[J]. 科学观察, 2015, 10(6): 37-51.
- [42] 袁俊霞, 印红, 马玲玲, 等. 载人航天工程中的微生物科学与技术应用[J]. 载人航天, 2020, 26(2): 237-243.
- [43] 薛红卫, 汤章城. 空间站生命科学研究的分析和思考[J]. 载人航天, 2011, 17(5): 1-6.

## Human medical support in space exploration

ZHU Xiangying, HUANG Dinghua

China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract** The overseas researches on human health and safety in space exploration have been focused on the physiological effects of weightlessness and their internal mechanisms for decades. A series of breakthroughs have been made in physiological effects and the mechanisms of diseases, including cardiovascular dysfunction, bone loss, muscle atrophy, space motion diseases, and microgravity environment. China's researches in this field started relatively late, however relevant researches have begun to accelerate gradually with the vigorous development of China's space exploration and manned spaceflight. Some gratifying progresses are made in some aspects such as space gravity physiology, astronaut medical supervision and medical insurance, physical and chemical regenerative environmental control and medical insurance, as well as space life science and biotechnology, which relate to space human safety and development. The special researches in molecular medicine are carried out for weightlessness bone loss. The therapeutic drugs are innovated for small nucleic acid molecules of microRNA-214, which successfully slow down the decline of osteogenic capacity and bone-loss rate caused by simulated weightlessness and aging. These breakthroughs provide important medical support for the human space exploration.

**Keywords** space biology; aeromedicine; aerospace gravity physiology; astronaut medical supervision and medical insurance; regenerative environmental control ●



(责任编辑 王志敏)