

中国航天医学进展^{*}

袁 明 姜世忠

(航天医学工程研究所 北京 100094)

摘 要 航天医学是随着载人航天事业的发展而兴起的一门特种医学学科。随着人类对太空的不断探索,从学科创建至今的短短几十年时间取得了巨大的发展。我国的载人航天工程于 20 世纪 90 年代初启动,但航天医学发展的历史却可追溯到 50 年代末。特别是近 10 年来,我国载人航天工程的启动为航天医学的发展带来了重大机遇。目前,我国首次载人航天飞行已获圆满成功,首飞航天员也已安全、健康地重返地球,航天医学专家们与航天员一同经受住了首次载人航天飞行的考验。本文简要介绍了我国航天医学的基础研究和应用研究,以及取得的进展,并展望了今后将面临的挑战和机遇。

关键词 航天医学; 模拟失重

中图法分类号 V7

The Progress of Chinese Space Medicine

YUAN Ming JIANG Shizhong

(Institute of Space Medico-Engineering, Beijing 100094)

Abstract Space medicine is a new special medicine which is rising with the development of manned space program and has acquired great development during the space exploitation since established. In the early of 1990s, manned space flight program was initiated in china. However, the history of development for Chinese space medicine commenced in 1950s. Especially during the past ten years, the initiation of Chinese manned space flight program has brought great opportunity to Chinese space medicine. Presently, the first manned space flight has acquired consummation in china. Space medical specialists have experienced the trial of the first manned space flight as well as the first Chinese astronaut who has landed safely and healthily. During the past 40 years, the area of research in Chinese space medicine has gradually expanded, including the subjects such as gravitational physiology, cell and molecular biology, space environmental medicine, space psychology and space implemental medicine et al. The studies in Chinese space medicine are developing steadily. In the following Chinese manned space program, many difficulties will be more complex and need to be resolved for the success of spaceflight program. At the same time, this is also a challenge to the Chinese scientist. The article will briefly introduce the basic and applicational research of Chinese space medicine including their progress and give the outlook of their challenge and opportunity in the future.

Key words Space medicine, Simulated weightlessness

^{*} 国家载人航天工程资助课题

2004-10-15 收到原稿, 2005-05-08 收到修定稿

1 引言

航天医学学科于 1950 年在美国航空学会的第 21 届年会上被获准建立,从此航天医学学科在医学界得到正式承认.我国航天医学的发展起始于 20 世纪 50 年代.1968 年,我国建立了航天医学工程研究所,开始了系统的空间医学研究.上世纪 40 年代末和 50 年代初期,美国和苏联的航空医学专家们在人类能否在航天飞行的恶劣环境中生存的问题上有明显的分歧.一些著名的医学专家认为,飞行中人的心血管、肌肉、骨骼和免疫系统将失去其功能,从而危害到航天员的健康和生命;还有一些医学专家则认为,人类可以适应航天飞行中的失重环境,人类的航天飞行是可行的.为证实人类航天飞行的可行性和安全性,美、苏两国的医学专家们进行了一系列载有动物的飞行实验,结果表明动物可以适应飞行中的失重环境.这些动物实验为人类进入太空奠定了基础.1961 年,苏联宇航员加加林乘“东方 1 号”飞船进入太空,开创了载人航天的新纪元.至今,已有 400 多名字航员遨游过太空.事实证明,人类可以适应航天飞行中的微重力环境,在失重状态下生存并工作.然而,在航天飞行中,失重虽然对航天员的危害没有最初预计的那么严重,但是在采取了多种防护措施的情况下,仍会对航天员的身体健康产生危害.这些危害主要表现为立位耐力不良,运动能力下降,空间运动病,航天贫血症和衰老等.航天医学的使命正是要研究失重对航天员产生的不利影响及危害机理,并寻找对抗这些不良影响或危害的防护措施,保障航天员在太空中的身心健康,维持其良好的工作能力,以及重返地球后的再适应能力.为此,我国的航天医学工作者进行了大量的研究工作,并取得了许多进展.

2 国内航天医学研究现状

2.1 航天基础医学研究领域

2.1.1 失重对生理系统的影响及其机理探讨

国外在多年的载人航天飞行中,通过长期的观察和研究,已经证实失重会对人体的生理系统产生明显影响,主要包括心血管系统,前庭系统,血液系统,骨骼、肌肉系统和免疫系统等.为了确保我国载人航天飞行的圆满成功,保障航天员在飞行中能够健康、安全地生活和工作,我国的航天医学工

作者通过地面模拟失重研究,就航天飞行对航天员生理系统可能造成的影响进行了深入探讨.

1. 心血管系统

失重心血管生理是我国失重生理研究开始较早,研究较广泛、深入.通过在地面对人和动物的模拟失重研究,不仅对失重时心血管系统的变化及其机理进行了深入的探讨,也为今后载人航天飞行时各种防护措施的应用提供了许多有价值的参考资料.失重对心血管系统的影响主要是导致心血管功能失调,主要表现为运动能力下降和立位耐力不良.立位耐力不良是飞行后航天员常表现出的症状之一.国外对其产生机理也进行了广泛深入的研究,但至今仍未得到统一的结论.

为了探讨立位耐力不良的发生机理,沈羨云等^[1]比较了卧位组和坐位组受试者在实验 15 天后的立位耐力和压力感受器反射增益,结果显示在实验结束起床后的立位耐力测试中,卧位组受试者的立位耐力明显下降,压力感受器反射增益变化明显;而坐位组受试者立位耐力未发生明显变化,压力感受器反射增益变化也很小.据此,他们认为压力感受器反射功能的改变,特别是中枢神经系统调节功能的变化是导致模拟失重后立位耐力下降的主要原因.郑军^[2]、丁兆平^[3]等的研究结果也表明,模拟失重确可导致压力感受器反射功能发生改变.

动脉系统血管的结构及功能与立位时的心血管调节有着密切的联系.近年来,对失重或模拟失重状态下动脉系统血管结构、功能的变化研究较多.第四军医大学张立藩等^[4]的研究表明,尾吊模拟失重可以引起大鼠不同部位动脉血管发生截然相反的可塑性变化.在身体后部可引起血管萎缩性结构重塑,反应性升高且收缩反应性降低,血管周围神经支配减弱;在身体前部则可引起肥大性结构重塑,收缩反应性升高且神经支配增强.近期,张立藩教授指导的研究小组首次报道了血管组织局部肾素血管紧张素系统^[5]及平滑肌细胞离子通道重塑机制^[6]可能参与了模拟失重下血管适应性变化的调节过程.据此他们认为,模拟失重所引起的心血管外周效应器改变可能是造成飞行后立位耐力不良的重要原因之一.孙磊等^[7]对尾吊大鼠肺动脉的舒张功能进行了评价,结果表明尾吊 7 天可导致大鼠肺动脉内皮细胞释放 NO 增强,肺动脉的舒张功能增强.汪德生^[8]等观察模拟失重时体肺循环动脉血管内皮细胞 NO 合酶 mRNA 表达随时间变化的过程,结果表明模拟失重对体肺循环内皮细胞 eNOS mRNA 和 iNOS

mRNA 的影响趋势相似, 而对肺循环动脉影响趋势不同. 模拟失重对 eNOS mRNA 和 iNOS mRNA 表达的影响是体肺循环动脉局部调节功能降低的征兆之一, 而局部调节功能降低可导致外周阻力储备减少, 从而可能对模拟失重后立位耐力降低的发生有贡献. 近年来, 我们对模拟失重后动脉收缩功能的信号转导通路研究时发现, 尾吊模拟失重可导致大鼠股动脉中 ERK1/2 含量和磷酸化水平发生改变, 影响 MAPK/ERK 信号转导通路^[9]; 也可导致血管中与钙敏化相关的激酶 ROK 功能发生异常^[10], 并已证实这些改变对尾吊后大鼠股动脉收缩反应性的下降有贡献. 通过这些形态、机能和分子生物学层次的研究, 目前国内航天医学工作者已对失重状态下动脉系统血管功能、结构的改变与立位耐力不良的关系及其机理有了较深入的认识.

2. 前庭系统

空间运动病是航天飞行初期影响航天员的最主要生理变化. 因此我国航天医学工作者对空间运动病的发病机理进行了深入的研究. 目前, 对于空间运动病的发病机理的假说众多, 其中得到多数人认可的假说有神经失匹配学说、血液再分配学说和耳石不对称学说. 裴静琛等在破坏猫的半规管后对耳石的反应特点进行了研究, 结果证明耳石与半规管之间的调制作用及耳石和半规管功能有不对称的相互影响. 杨天德等^[11]分析了视动刺激和头动对运动病的交互作用, 认为航天运动病症状的严重性可能同视觉错觉与头动(或身体运动)的组合方式有关. 据此, 我国航天医学专家提出了空间运动病发生的耳石-半规管不对称学说和视-前庭调制学说, 补充了神经失匹配学说的内容.

3. 血液系统

我国失重血液学研究自 20 世纪 90 年代开展, 重点是观察模拟失重对人和动物的红细胞及血液流变性的影响. 多年的研究结果表明, 模拟失重状态下, 人、兔和鼠的红细胞数量及其血液流变性均发生了明显的改变^{[12]–[14]}, 主要表现为红细胞变形能力下降, 膜流动性降低, 脆性增加; 血液中异型红细胞比例增加; 血液流变性降低, 血脂升高, 血管内皮损伤等.

4. 骨骼和肌肉系统

国外研究表明, 失重对骨骼、肌肉系统均会产生不利影响. 在骨骼系统, 失重可引起骨质丢失, 这些危害是影响长期载人航天的最重要因素之一. 在国内, 沈士良等观察到尾吊模拟失重后, 大鼠的骨

长度、直径、骨皮质厚度和骨形成率等均明显低于对照组. 大鼠被尾吊不同的时间后, 崔伟等^[15]在观察椎骨骨质和其生物力学特性时发现, 随着低动力时间的不同, 大鼠出现了矿盐再分布和矿盐丢失现象. 在肌肉系统, 失重造成骨骼肌萎缩的问题, 国外已经进行了许多研究. 然而其研究主要是静态地观察悬吊后动物肌肉系统的变化. 在失重对骨骼肌的影响方面, 我国学者偏向于动态观察其变化的过程. 崔健等^{[16],[17]}观察了尾吊大鼠 30 天内比目鱼肌的变化, 得到了比目鱼肌的生物力学特性, 形态学结果以及比目鱼肌肌蛋白和肌张力的动态变化规律. 近年来, 随着分子生物学的发展, 国内对失重后骨骼肌萎缩的分子机制进行了深入研究, 冯汉忠等^[18]对尾吊大鼠比目鱼肌肌钙蛋白 I 异构体的转化进行了研究, 发现雄性尾吊大鼠抗重力肌(比目鱼肌)的肌钙蛋白 I 异构体转化时间为 14 天.

5. 免疫系统

航天飞行时许多特殊的环境因素都可引起免疫系统功能发生改变. 我国在失重环境下免疫学的研究上起步较晚, 目前主要进行了模拟失重对免疫系统的影响及其机理探讨方面的工作. 国外已证实航天因素对免疫系统有不良的影响. 我国对免疫系统的研究, 除了进一步证实这种影响外, 主要工作放在失重对免疫系统影响的产生机理及防护措施研究上. 汪涛等^[19]探讨了短期模拟失重、电离辐射及两者复合因素对大鼠免疫功能的影响和免疫功能改变的原因, 结果表明, 尾吊 7 天后, T 淋巴细胞增殖能力明显降低; 单次 2Gy ⁶⁰Co 全身照射 3 天后, T 淋巴细胞增殖能力明显下降; 电离辐射和模拟失重复合因素作用 3 天后, T 淋巴细胞增殖能力下降; 各因素作用后 3 天, 大鼠垂体内的 β -内啡肽明显降低, 其变化趋势同免疫功能的降低基本同步, 表明免疫功能的降低与 β -内啡肽的减少有关.

2.1.2 空间分子生物学研究

1998 年, 航天医学工程研究所创建了航天细胞分子生物学实验室, 开始了我国空间分子生物学的系统研究. 细胞的模拟失重方法一般采用水平回转器对培养的特定细胞进行回转. 我国的空间分子生物学研究虽然起步较晚, 但由于所研究的对象具有针对性, 力量投入较大, 近年来也已经取得了许多成果. 国内空间分子生物学研究目前主要以心肌细胞、成骨细胞和免疫细胞作为实验材料, 通过回转或搭载返回式卫星进行模拟失重或失重刺激, 以便系统地研究微重力对细胞形态、结构、细胞骨架和

基因表达所产生的影响,并深入探讨其发生的分子机制,最终目的是寻找防护药物的作用靶点,明确细胞学药物防护方案,为今后长期载人航天时采取科学、合理的防护措施提供理论依据.1999年,我国曾利用ESA返回式卫星在法国IBIS上搭载了3对成骨细胞,进行了为期15天的空间飞行实验,以探讨空间飞行对成骨细胞(ROS17/28)增殖、结构和功能的影响及槲皮素的防护效果.结果显示在空间飞行条件下,槲皮素能有效地促进成骨细胞增殖,并部分对抗微重力对成骨细胞骨架的解聚作用.同时,在地面模拟失重条件下的研究也取得了类似的结果^[20].司少艳^[21]等研究模拟失重条件下T淋巴细胞功能改变的机制,结果表明模拟失重可以通过抑制IL-2基因转录抑制IL-2的产生,IL-2和Bcl-2基因对模拟失重引起的T淋巴细胞功能的降低起一定作用.目前,国内航天医学工作者在失重或模拟失重条件下成骨细胞生长、细胞骨架、基因表达和自由基等研究领域正开展大量的工作.

2.1.3 航天环境医学研究

我国航天环境医学是在航空医学的基础上发展起来的,早在20世纪60年代初就开始了探索性研究.在30多年的航天医学工程研究实践中,为促进航天环境医学的发展,建造了一些必备的地面模拟装置.例如航天器内环境模拟舱,可容纳5人进行持续1个月的实验;低压变温实验舱,可模拟座舱压力、温湿度环境,用于压力应急和高低温环境应急的人体效应及防护研究;静态和动态染毒实验舱,用于动物的急、慢性染毒实验;人体振动台,声环境实验室及无反射微波辐照室等设备.为了对我国载人航天器的工程设计提供医学和卫生学实验依据,国内航天医学工作者对噪声、振动、高温、微波辐射、有害气体等航天飞行中危害航天员的环境因素进行了许多探索性的工作.何延年^[22]等研究了高强噪声对豚鼠听功能的影响,结果表明115dB(A)噪声短时间暴露可造成听器损伤.梁宏^[23]等就低浓度CO的神经行为毒理学效应及限时最大容许浓度进行了研究,结果表明低浓度CO对小鼠的运动神经和植物神经功能及学习记忆功能均有影响,并表现出迟发性特点.赵亚丽等探讨了热应激对纹状体多巴胺(DA)介导的磷脂酰肌醇(PI)信号转导系统的影响,结果表明,热应激可能激活了DA介导的PI信号转导系统, $[Ca^{2+}]_i$ 升高可能经D2R介导,用D2R拮抗剂可提高机体耐热性.张峰等就小鼠受不同剂量 γ 射线照射后,血液和心肌细胞凋亡

相关基因P53mRNA和Bcl-2mRNA水平的变化,以及心肌细胞凋亡数与辐射剂量间的量效关系进行了研究,发现0.5—2.0Gy的 γ 射线照射后,血液细胞和心肌细胞存在明显凋亡现象,且与辐射剂量呈正相关,并伴有P53基因mRNA水平的明显增高,证明辐射剂量与心肌细胞凋亡数存在一定的量效关系.

2.2 航天应用医学研究领域

除了研究航天飞行对人体造成的不良影响并探讨其产生的机理外,航天医学的使命还包括寻找对抗这些不良影响的防护措施.这里的防护措施是一个广义的概念,不仅包括具体的物理、药物防护措施,还包括航天员在生理和心理上对航天飞行中各种不利环境影响的易感性评定,选拔生理和心理耐受能力强的航天员执行航天飞行任务.

2.2.1 航天心理学

航天心理学是在航空心理学基础上由于载人航天的实现而逐渐形成、发展起来的一个新的心理学分支,主要研究航天人-机-环境系统中航天员心理活动发生、发展规律.其实践性较强,旨在揭示和掌握航天条件下,航天员心理活动的发生、发展规律,并据此对航天员进行选拔、训练、心理保健和支持等工作,保障航天员安全、健康、高效率地工作,确保航天任务的圆满完成.国外载人航天的实践证明,短期飞行的航天员虽不会发生严重的心理障碍,但可出现不少的心理问题,例如视知觉改变,失重定向错觉,时间知觉改变,空间姿势位置觉改变,超常体验,情绪变化和性格改变等.这些心理现象对航天员的正常工作生活可产生不良影响.因此,我国在对航天员的选拔和训练时一直十分重视航天员的心理素质和心理训练.在航天员的选拔上,不仅要淘汰对航天环境因素耐受有明显或潜在缺陷的人,还须考虑航天员对航天环境因素的反应性.为了减轻航天环境应激源对人的影响,航天工程技术人员在航天器的设计上采用了许多新技术和新方法,以降低环境应激源如噪声、振动、辐射、有害气体等的作用强度.此外,航天医学工作者根据人体具有可塑性和适应性的特点,对航天员进行航天环境耐受性和适应性训练,利用各种飞行模拟器或实物进行飞行操作技能模拟训练,以达到增强航天员的应激耐力和适应性的目的.

2.2.2 医学防护措施研究

研究表明,失重或模拟失重可对人体的多个生理系统造成不良影响.因此,防护措施的研究一直是

国外航天医学工作的重点和热点. 我国在这一领域内也开展了许多工作, 某些工作还具有中国特色.

1. 对抗立位耐力不良的措施

立位耐力不良是航天员飞行后常表现的症状之一, 其对抗措施国内外都在积极研究, 以保障航天员的健康和安全. 姜世忠等^[24]就四肢加压套带在对抗模拟失重对心血管系统影响中的作用进行了研究, 结果表明套带加压能有效阻止头低位卧床模拟失重产生的立位耐力下降. 蒋昌林等^[25]为验证套带的防护效果, 观察了套带组受试者不使用套带时的心血管脱适应变化. 结果表明停止使用持续加压套带将引起心血管脱适应, 卧床后期四肢使用持续加压套带4天能有效阻止立位耐力下降. 姚永杰^[26]等研究了下体负压(LBNP)对抗21天HDT-6卧床模拟失重所致立位耐力不良的效果, 结果表明, 21天头低位卧床后将导致受试者立位耐力显著降低, 而下体负压能够有效地对抗头低位卧床导致的立位耐力下降. 我国航天医学工作者以中国的医学理论和实践为依据, 提出了有中国特色的立位耐力不良对抗措施. 侯书礼等^[27]的研究结果表明, 气功对于改善被试者卧床中的心血管反应和减少卧床后立位耐力降低均有一定对抗效果. 张静雪等^[28]观察了低氧、气功的防护效果, 结果表明气功、吸低氧有明显对抗21天卧床影响的效果, 同时卧床中吸氧还有提高起床后立位耐力的作用.

2. 对抗空间运动病的措施

空间运动病的防护措施是国内外学者努力攻关的难题. 我国对于空间运动病的防治主要以中医学的辨证施治和经络学说为指导, 采用了中药、耳穴刺激、磁穴按摩等方法进行研究. 陈可翼等曾发现中国清朝宫廷秘方“平安丹”具有减少猫运动病发病率的效果, 提示中药的应用对于防止或减轻运动病的发生是有可能的. 童伯伦等^[29]探讨了耳穴电脉冲刺激抗运动病的效果, 结果表明耳穴电脉冲刺激防治运动病总有效率为33.3%, 对中等耐力者的防护有效率达66.7%.

对于航天飞行中骨丢失的防护, 近年研究表明, 维生素K对骨质丢失有改善作用. 黄大威等^[30]就维生素K对模拟失重大鼠骨质的影响进行了研究, 结果表明维生素K可以改善尾吊大鼠的骨代谢和骨结构, 减少骨丢失, 提高骨生物力学性能, 降低骨折危险度.

航天飞行返回时的着陆冲击对体会产生不良影响, 严重时甚至危害到航天员的生命安全. 因此,

着陆冲击对人体的影响及防护措施研究一直倍受关注. 刘炳坤等^[31]就不同体位着陆冲击时人体动态响应的变化进行了研究, 结果表明在承受峰值10g, 作用时间50ms的半正弦脉冲的着陆冲击时, 人体对抗着陆冲击的最佳体位角为50°.

3. 航天员医学监督与医学保障

航天飞行的医监和医保工作主要是保障航天员的身体素质和良好的工作能力; 发现航天员在特殊环境下的生理和心理变化, 并寻找有针对性的预防措施. 这项工作开始于制定选拔及训练航天员的大纲, 结束于航天飞行任务的完成. 医学保障主要指航天员的健康保障, 训练中的医学预防措施及各阶段的医学检查措施, 其目的是使航天员在训练、工作中保持良好的工作能力. 医学监督包括飞行前、飞行中及飞行后3个过程. 总的来说, 航天员医监、医保的任务就是要对航天员的健康状况进行评价和保障, 在航天飞行中收集、处理航天员的生理参数, 并制定航天员工作休息制度. 自我国载人航天工程启动以来, 我国已建立了一支优秀的航天医师队伍, 负责航天员的选拔、训练, 以及各项制度的制定.

3 载人航天发展带来的挑战和机遇

我国已实现首次载人航天飞行的圆满成功. 按照我国载人航天的发展目标, 今后将逐步实现出舱活动, 与目标飞行器进行交互对接, 建立长期有人留守的太空站, 甚至未来的登月计划. 这些目标的实现不仅对载人航天的工程科技人员带来了巨大的挑战, 也给航天医学科技工作者带来了挑战.

今后我国载人航天事业的发展将会对航天医学保障提出更高的要求, 同时也会给我国航天医学的发展提供一个更好的研究平台. 虽然国内航天医学的发展已经取得了一些成果, 但由于绝大多数研究是在地面模拟失重状态下完成的, 结果必然与太空飞行中微重力暴露时的真实情况有所偏差. 载人航天飞行中医学实验的开展将弥补地面模拟实验的缺陷, 获得空间生命科学研究中更直接、更真实的结果, 从而推动空间生命科学的发展. 同时, 由于微重力环境的特殊性, 用于生命科学研究的仪器、设备为适应环境的要求不得不进行某些改进, 甚至重新设计、制造. 因此, 载人航天的发展必将促进医学实验装备的研制, 这些实验平台的建立和完善将更好地促进我国空间生命科学的发展.

出舱活动是我们下一步即将实现的目标。在这一目标实现之前,将面临一个新的难题——如何预防航天减压病的发生。航天减压病是指环境压力降低时溶解在机体内的氮气过饱和游离出来形成气泡所导致的综合症状。出舱活动过程中,减压病的发生不仅会导致出舱任务的失败,甚至危害航天员的生命安全。因此,深入探讨航天减压病的发生机理,寻找对抗减压病的预防措施,是摆在我们面前的一个迫切而重要的问题。

在太空建立我国自主研发的空间站是我国载人航天的一个重要目标,太空站建成后必将有航天员长期留守。此时,长期失重对航天员的影响将是所面临的重大问题,如何对抗长期失重对航天员造成的不良影响也将是近期工作的主要任务。对于长期失重可能对航天员造成的不良影响,国外载人航天实践已做过许多观察和研究。这些不良影响主要有航天员返回地球后发生的立位耐力不良、骨质丢失、运动能力下降、抗重力肌萎缩、衰老等。国内对这些不良影响的研究目前主要是在地面采用模拟失重的方法进行的,范围涉及机理探讨和对抗措施。空间站的建立将给航天医学研究提供一个真实的微重力环境,进行的医学实验可以验证地面模拟失重状态下医学研究的成果。因此,长期载人航天飞行的实现将对我国航天医学的发展起到巨大的推动作用。

近10年来,随着载人航天工程的启动,我国的航天医学研究发展迅速。回顾过去,在先辈们的不懈努力下,航天医学有了今日的成果。未来,我国的载人航天事业将不断前进,机遇与挑战将并存于航天医学的发展过程中。把握机遇,促进航天医学的发展,使人类能够更加安全、健康地和平开发、利用太空资源将是我们共同的目标。

参考文献

- [1] Shen Xianyun, Sun Yazhi, Xiang Qiulu *et al.* The study of baroreceptor reflex function before and after bed rest. *Chin. J. Appl. Physiol.*, 1987, 3(4):279—284. in Chinese (沈溪云, 孙亚志, 向求鲁等. 卧床前后压力感受性反射机能变化的研究. 中国应用生理学杂志, 1987, 3(4):279—284)
- [2] Zheng Jun, Zhang Lifan, Zhang Rong *et al.* Assessment of responsiveness of spontaneous baroreceptor-heart rate reflex under gravitational stress. *Space Med. Med. Eng.*, 1998, 11(5):347—351. in Chinese (郑军, 张立藩, 张荣等. 重力应激下自发性压力感受器-心率反射反应性的评定. 航天医学与医学工程, 1998, 11(5):347—351)
- [3] Ding Zhaoping, Zhang Lifan, Chen Jie *et al.* Altered responsiveness of arterial baroreflex after 90-day simulated weightlessness in rats. *Chin. J. Appl. Physiol.*, 1993, 9(4):300—304. in Chinese (丁兆平, 张立藩, 陈杰等. 90天模拟失重大鼠动脉压力反射性的改变. 中国应用生理学杂志, 1993, 9(4):300—304)
- [4] Zhang Lifan. Plastic changes of structure, functional and perivascular innervation of arterial vasculature during simulated weightlessness. *Space Med. Med. Eng.*, 1998, 11(3):215—219. in Chinese (张立藩. 模拟失重大鼠动脉血管结构、功能及神经支配的可塑性变化. 航天医学与医学工程, 1998, 11(3):215—219)
- [5] Bao Junxiang, Meng Qingjun, Zhang Lening *et al.* Changes in protein expression of angiotensinogen and angiotensin II type 1 receptor in vascular tissues of simulated weightlessness rats. *Chin. J. Aeros. Med.*, 2003, 14(1):1—4. in Chinese (暴军香, 孟庆军, 张乐宁等. 模拟失重大鼠动脉组织血管紧张素原及血管紧张素 II 型受体蛋白表达的变化. 中华航空航天医学杂志, 2003, 14(1):1—4)
- [6] Fu Z J *et al.* Differential activation of potassium channels in cerebral and hindquarter arteries of rats during simulated microgravity. *Am. J. Physiol. Heart Circ Physiol.*, 2004, 287(4):H1505—H1515
- [7] Sun Lei, Wang Desheng, Ren Wei *et al.* Changes in vasoreactivity of rat pulmonary artery after 7d tail-suspension. *Space Med. Med. Eng.*, 2001, 14(1):1—5. in Chinese (孙磊, 汪德生, 任维等. 尾部悬吊 7d 大鼠肺动脉反应性的变化. 航天医学与医学工程, 2001, 14(1):1—5)
- [8] Wang Desheng, Sun Lei, Dong Jianwen *et al.* The dynamic changes of NOS mRNA in endothelial cells of aortae and pulmonary arteries in rats under tail suspension. *Space Med. Med. Eng.*, 2001, 14(5):318—322. in Chinese (汪德生, 孙磊, 董建文等. 尾部悬吊大鼠胸主动脉、肺动脉内皮细胞一氧化氮合酶 mRNA 表达的动态变化. 航天医学与医学工程, 2001, 14(5):318—322)
- [9] Yuan Ming, Jiang Shizhong, Li Zhili. Changes of ERK1/2 in femoral arteries of tail-suspended rats and their effects on contractility. *Space Med. Med. Eng.*, 2004, 17(1):24—29. in Chinese (袁明, 姜世忠, 李志利. 尾吊大鼠股动脉中 ERK1/2 含量的变化及对收缩功能的影响. 航天医学与医学工程, 2004, 17(1):24—29)
- [10] Li Zhili, Yuan Ming, Jiang Shizhong. Role of Rho kinase in contraction of rat femoral arteries after 14d tail suspension. *Space Med. Med. Eng.*, 2004, 17(5):330—333. in Chinese (李志利, 袁明, 姜世忠. ROK 在 14d 尾吊大鼠股动脉收缩中的作用. 航天医学与医学工程, 2004, 17(5):330—333)
- [11] Yang Tiande, Pei Jingchen. Interaction of optokinetic stimuli and head movements on motion sickness and analysis of its mechanism. *Space Med. Med. Eng.*, 1991, 4(1):11—18. in Chinese (杨天德, 裴静琛. 视动刺激和头动对运动病的交互作用及其机制分析. 航天医学与医学工程, 1991, 4(1):11—18)
- [12] Shen Xianyun. The effects of spaceflight on hematological system. *Space Med. Med. Eng.*, 1994, 7(4):309—312. in Chinese (沈溪云. 航天对血液系统的影响. 航天医学与医学工程, 1994, 7(4):309—312)

- [13] Shen Xianyun *et al.* Influence of simulated weightlessness on hematological system of rabbit. *Space Med. Med. Eng.*, 1996, 9(3):198—203. in Chinese (沈羡云等. 模拟失重对兔血液系统影响的研究. 航天医学与医学工程, 1996, 9(3):198—203)
- [14] Xiang Qiulu, Shen Xianyun, Meng Jingrui. Changes of blood rheology during simulated weightlessness in rabbits. *Chin. J. Appl. Physiol.*, 1989, 5(4):364—370. in Chinese (向求鲁, 沈羡云, 孟京瑞. 模拟失重时兔血液流变学变化. 中国应用生理学杂志, 1989, 5(4):364—370)
- [15] Cui Wei, Shi Zhizhen, Zheng Qiang. Effect of suspension time on mass and biomechanical properties of vertebra in rats. *Space Med. Med. Eng.*, 1996, 9(3):190—194. in Chinese (崔伟, 史之祯, 郑强. 不同悬吊时间对大鼠椎骨骨质和生物力学特性的影响. 航天医学与医学工程, 1996, 9(3):190—194)
- [16] Cui Jian *et al.* The function of soleus muscle in rats after simulated weightlessness and the analysis of changes in tissue structure. *Beijing Biomed. Eng.*, 1993, 12(3):164—169. in Chinese (崔健等. 模拟失重大白鼠比目鱼肌功能和组织结构变化分析. 北京生物医学工程, 1993, 12(3):164—169)
- [17] Zhu Junming, Cui Jian, Jiang Cheng *et al.* Observation of dynamic changes of rat soleus during tail suspension. *Space Med. Med. Eng.*, 1992, 5(1):49—54. in Chinese (朱俊铭, 崔健, 蒋程等. 尾吊大鼠比目鱼肌特性动态变化过程观察. 航天医学与医学工程, 1992, 5(1):49—54)
- [18] Feng Hanzhong, Yu Zhibin, Xie Manjiang *et al.* Transition of soleus troponin I isoforms and atrophy of testis in tail-suspended rats. *Space Med. Med. Eng.*, 2001, 14(3):172—176, in Chinese (冯汉忠, 余志斌, 谢满江等. 尾悬吊大鼠比目鱼肌肌钙蛋白 I 异构体的转化与睾丸萎缩. 航天医学与医学工程, 2001, 14(3):172—176)
- [19] Wang Tao, Yang Guanghua, Wen Xianglan. Effects of simulated weightlessness and radiation on immune function and β -Endorphin production in pituitary in rats. *Space Med. Med. Eng.*, 1995, 8(4):257—261. in Chinese (汪涛, 杨光华, 温香兰. 模拟失重和辐射对大鼠免疫功能和垂体 β -内啡肽含量的影响. 航天医学与医学工程, 1995, 8(4):257—261)
- [20] Xiong Jianghui, Li Yinghui, Nie Jieli *et al.* Effect of quercetin on the cytoskeleton of rat cardiac myocytes cultured in vitro under simulated microgravity. *Acta Zoologica Sinica*, 2003, 49(1):98—103. in Chinese (熊江辉, 李莹辉, 聂捷琳等. 槲皮素对模拟微重力条件下体外培养大鼠心肌细胞骨架的影响. 动物学报, 2003, 49(1):98—103)
- [21] Si Shaoyan, Wang Tao, Yang Guanghua. Study on mechanisms of T lymphocyte function changes in mice under simulated weightlessness in terms of IL-2 and Bcl-2 gene transcription. *Space Med. Med. Eng.*, 1998, 11(4): 254—257. in Chinese (司少艳, 汪涛, 杨光华. 从 IL-2 和 Bcl-2 基因转录水平探讨模拟失重鼠 T 淋巴细胞功能改变的机制. 航天医学与医学工程, 1998, 11(4):254—257)
- [22] He Yanjun, Li Daoode, Zheng Suxian. Effects of short time high intensity noise on hearing organ in guinea pigs. *Space Med. Med. Eng.*, 1999, 12(3):217—219. in Chinese (何延军, 李道德, 郑素贤. 短时间高强度噪声对豚鼠听器的影响. 航天医学与医学工程, 1999, 12(3):217—219)
- [23] Liang Hong *et al.* Effect of low concentration carbon monoxide on the neurobehavior function in mice. *Space Med. Med. Eng.*, 1999, 12(5):318—322. in Chinese (梁宏等. 低浓度一氧化碳对小鼠神经行为功能的影响. 航天医学与医学工程, 1999, 12(5):318—322)
- [24] Jiang Shizhong *et al.* Effects of extremity cuffs against physiological changes induced by head-down bedrest. *Space Med. Med. Eng.*, 1998, 11(3):211—214. in Chinese (姜世忠等. 加压套带对抗头低位卧床模拟失重生理影响的作用. 航天医学与医学工程, 1998, 11(3):211—214)
- [25] Jiang Changlin, Jiang Shizhong, Li Jianjun *et al.* Effects of extremity cuffs as a countermeasure against the cardiovascular deconditioning during 21d head-down bedrest. *Space Med. Med. Eng.*, 1999, 12(5):364—367. in Chinese (蒋昌林, 姜世忠, 李建军等. 21d 头低位卧床过程中套带对抗心血管脱适应的作用. 航天医学与医学工程, 1999, 12(5):364—367)
- [26] Yao Yongjie, Wu Xingyu, Sun Xiqing *et al.* Countermeasure effect of lower-body negative pressure against orthostatic intolerance induced by 21d -6° head down tilt in humans. *Space Med. Med. Eng.*, 1999, 12(2):97—100. in Chinese (姚永杰, 吴兴裕, 孙喜庆等. 下体负压对抗 21d 头低位卧床后立位耐力不良的研究. 航天医学与医学工程, 1999, 12(2):97—100)
- [27] Hou Shuli. Chinese Qigong and Space Medicine. *Qigong Sci.*, 1999, (9):4—6. in Chinese (侯书礼. 中国气功与航天医学. 气功与科学, 1999, (9):4—6)
- [28] Zhang Jingxue *et al.* A Study on the counteracting effect of hypoxia and qigong on simulated weightlessness and orthostatic tolerance after bedrest. *Space Med. Med. Eng.*, 1997, 10(1):18—22. in Chinese (张静雪等. 低氧、气功对抗卧床模拟失重和卧床后立位耐力的观察. 航天医学与医学工程, 1997, 10(1):18—22)
- [29] Tong Bolun, Pei Jingchen, Zhu Tianwei *et al.* A study on the counteracting effect of ear-points stimulation on motion sickness. *Space Med. Med. Eng.*, 1989, 2(4):249—252. in Chinese (童伯伦, 裴静琛, 朱天威等. 耳穴刺激抗运动病的研究. 航天医学与医学工程, 1989, 2(4):249—252)
- [30] Huang Dawei, Wan Yumin, Xie Liqin. Effects of vitamin K on bone metabolism in tail-suspended rats. *Space Med. Med. Eng.*, 2001, 14(5):346—349. in Chinese (黄大威, 万玉民, 谢力勤. 维生素 K 对尾吊大鼠骨代谢的影响. 航天医学与医学工程, 2001, 14(5):346—349)
- [31] Liu Bingkun *et al.* Human dynamic response to landing impact in selected body orientation. *Space Med. Med. Eng.*, 2001, 14(2):121—123. in Chinese (刘炳坤等. 不同体位着陆冲击对人体的动态响应. 航天医学与医学工程, 2001, 14(2):121—123)