

我国载人航天后续任务中航天医学的需求与挑战

李莹辉 万玉民 曲丽娜 刘 跃

(中国航天员科研训练中心)

摘要 针对未来长期空间飞行和星际探索面临的航天医学问题,分析论证了航天医学技术面临的任务和挑战,展望了该领域研究的新策略,以期为制定本领域未来发展方向,开展关键技术预研,进行任务优先决策提供参考依据。

关键词 航天医学问题 发展需求 健康防护 医学技术

1 引言

自 1961 年 4 月 12 日前苏联航天员加加林首次进入太空,至今已有 20 多个国家的 400 多名航天员先后进入太空。

40 多年的空间探索使人类对外层空间和生命现象有了更深刻、更本质的认识,正在从了解空间,认识空间,走向适应空间,利用空间的过程。以研究空间环境对人类身体健康的影响,保障人在空间探索中的安全、健康和有效工作为主要目标的航天医学,由于在空间探索中所具有的特殊支撑与保障作用,也伴随着探索空间、利用空间、适应空间的过程中逐步建立发展、走向成熟深入;其研究内容也从早期的空间环境对人体生理生化影响的现象观察,效应确定,发展到对空间环境影响有机体的细胞、分子乃至基因变化的机理研究和本质认识;从对空间环境的被动适应发展到采取主动的对抗防护措施,以保障航天员空间飞行期间的安全健康和有效工作。

长期飞行对航天员的影响、疾病防治和在轨医学处置等医学问题是人类全面进入太空前必须解决的问题。目前人们无法确认长期星际飞行中人对空间环境的适应能力有多强?空间环境对机体的影响与危害有多大?如何利用有效技术评价空间环境对人的影响及其发生机制?特别是在长期的高应激封闭环境,人类还将面对长期应激造成的免疫功能持续低下、孤独焦虑引发的心理障碍进而导致的生理功能失调、长期失重导致的神经系统认知变化,更增加了确保人在空间生存、健康和有效工作的复杂性和艰巨性。

未来人类进行更长期空间探索的追求对航天医学提出了更高的要求:如何在较长的空间飞行和星际探索期间,针对空间环境因素进行有效的医学防护和对抗,将空间对人的影响降低到最小程度是航天医学面临的最大挑战,也是制约人类向更深、更远、更高的外层空间探索的瓶颈因素。

2 空间探索中人类所面对的医学问题

根据空间环境因素导致的医学问题的诱发原因,可以分为以下 3 类:

(1) 微重力响应与重力再适应;

(2) 辐射导致的生物学效应;

(3) 长期空间飞行中,密闭环境、高应激引起的社会心理问题及由此诱发的生理、病理问题。

从空间环境导致的医学问题的生物学表现形式看,主要涉及水、盐电解质、内分泌代谢紊乱,心血管功能失调,失重性骨丢失,废用性肌肉萎缩,免疫功能下降,空间运动病,航天贫血症等生理病理变化。

从知识与技术的积累与发展层面,主要是从理论上揭示微重力和辐射条件下生命现象的变化特征与规律;从技术上建立发展适用于空间环境特点的健康检/监测与防护技术。

然而人类对于空间效应的本质认识还远远不能满足航天医学的需要,美俄等航天大国在经历了 40 余年的载人航天医学研究与对抗防护措施实施应用后,深刻意识到航天医学研究的复杂性、艰巨性和长期性;针对登月建基和火星探索的任务需求,NASA 应用风险管理决策理论,根据长期空间飞行中的风险大小对医学问题进行排序,以确保所从事活动的

科学有效性,确保人类实现探索空间的伟大目标。辐射生物学效应、空间骨丢失和在轨飞行的医学处置能力被分别排在风险因素的首位。

3 航天医学的热点与焦点分析

3.1 医学问题的研究现状

3.1.1 研究目标与内容

由微重力效应,辐射效应和相对孤立狭小的高应激环境导致的有机体生理病理变化是航天医学研究的永恒主题。纵观载人航天的历史,已确定有 55 种风险因素,根据航天任务的不同目标和载人航天实践积累可分为以下 3 类:

(1) 已基本解决、并形成较为成熟的防护对抗措施——主要是针对 15 天左右短期飞行出现的医学问题,如与体液急性丢失与转移、感觉系统相互作用的变化(感觉功能紊乱)、空间运动病、运动协调改变等,可通过训练、药物、膳食调整、在轨锻炼等方法,实现有效克服或对抗。

(2) 处于验证、完善阶段,为长期飞行进行的技术准备——通过地面的机理研究已经获得了大量有意义的知识,已经确定了一些有前景的对抗措施,但尚不成熟,目前国际空间站及其地基研究中

正在开展的项目,如表 1 所示。

(3) 处于探索、探知阶段,在后续飞行任务中危及航天员生命安全的可能因素——月球建基和飞赴火星前必须确认的安全健康问题,为 1000 天的人类飞行确立的重要科学目标,已经进行的项目有以人体为对象的 90 天、180 天、500 天模拟实验,涉及:

①长期飞行中人类所能承受的辐射积累的最大极限(最大耐受程度),以 95%置信度确保乘组成员的辐射风险低于长期飞行的耐受限度;

②长期飞行中和返回后骨质丢失持续恶化的最大程度,由其诱发的其他病理问题的严重程度;

③长期飞行中心血管功能的适应性和可能出现的最大严重程度;

④长期飞行中由于高应激、微生物变异、免疫功能下降导致感染疾病的风险;免疫功能的改变与控制感染能力,是否会成为长期空间飞行中一个不可接受的医学风险;

⑤其他目前尚不能确定的因素。

3.1.2 研究特点

上述医学问题可归结为需要揭示的两大领域理论问题,即微重力和辐射的生物学效应。在微重力方

表 1 2000~2007 年 NASA 资助的航天医学相关项目

项目名称	项目内容	研究周期(年)	目标
骨丢失发生机理	分别从整体、细胞、基因、蛋白质相互作用与信号途径认识	6±2	发展基于理论认识上的 对抗防护措施
骨丢失防护对抗	研究超声、锻炼、药物、力刺激、细胞治疗等措施的有效性	8±2	
废用性肌肉萎缩机理	分别从整体、细胞、基因、蛋白质相互作用与信号途径认识	6±2	发展基于理论认识上的 对抗防护措施
肌肉萎缩的防护对抗	研究超声、锻炼、药物、力刺激、细胞治疗等措施的有效性	8±2	
心脏萎缩与功能失调	分别从整体、细胞、基因、蛋白质相互作用与信号途径认识	6±2	提高立位耐力能力
血管功能机理与调节	分别从整体、细胞、基因、蛋白质相互作用与信号途径认识	6±2	
免疫功能下降与防护	分别从整体、细胞、基因、蛋白质相互作用与信号途径认识 免疫反应	8±2	发展基于理论认识上的 对抗防护措施
睡眠节律	体液调节与心理反应	4±2	
辐射效应	损伤判别方法 损伤标准 损伤危害 损伤的细胞分子机理	6±2	发展基于理论认识上的 对抗防护措施
辐射效应防护	抗氧化应激作用 饮食调节作用	6±2	降低辐射效应风险

面需要从细胞分子水平认识力学信号(重力/微重力)响应机制,揭示微重力效应本质;从系统生物学层次认识微重力条件下生命有机体的适应性调节规律,在此基础上建立医学对抗防护的理论与方法。辐射效应方面的研究,相对滞后于微重力效应研究,理论上需要从细胞分子层次认识不同/复合辐射因素导致的生物学效应;从系统生物学层面认识辐射效应导致的生理病理变化的规律特征。美俄在经历了 40 余年的载人航天医学研究与对抗防护措施实施应用后,认为必须在基于对空间环境导致的医学问题的细胞、分子损伤本质认识的基础上,才能发展针对性强的有效对抗防护措施,提出 21 世纪航天医学发展的重要目标是发展基于细胞分子知识的航天员健康在线监测、在线防护、在线诊断和在线治疗修复的战略和技术。为了实现上述发展目标,国际航天界在医学项目的支持与运行上具有以下特点:

(1) 研究方向明确,系统性和连续性强,同一主题的内容获得长期资助,以“骨丢失发生机理方向”为例,自 20 世纪 70 年代初开始,始终在该主题下进行资助,有益于理论长期积累与突破。

(2) 理论研究与公共生物学、医学关注的热点极为密切,研究的视点相对开阔,始终把公共生物学的最新知识、技术应用于航天医学特殊问题(如细胞分化理论、干细胞理论、芯片技术等),同时将空间这一特殊平台(视角)获取的成果及时反馈、促进公共生物学、医学的发展认识(如组织工程技术与平台)。

(3) 研究内容的技术起点高,强调将最新的技术成果(即使不够完全成熟)引入空间领域,倡导航天领域项目在技术、理念上占有制高点并回馈于公共社会。

(4) 空间实践机会多,系统策划和科学性高。一般提前 3~5 年组织空间实验项目,有充分的准备期。

3.2 解决航天医学问题的技术手段

理论问题的揭示必须依赖于技术的进步和有效的研究手段,因此以认识、解决航天医学问题为目标的技术、方法也已成为航天医学关注的焦点和热点。

空间环境的特殊性和载人飞行器资源的有限性制约着人们对航天医学问题的本质认识,要深刻理解和解决航天医学问题,必须发展有效的认识工具。现有航天医学问题存在许多未解之题的根本原因是缺乏认识这些问题的技术、手段,这也是国际航天医学关注和着力解决的问题。精确的监测方法是评估

航天员健康潜在危险的关键,为此美国、俄罗斯、欧洲航天局等在 2004~2025 年的运行项目和目标中资助了大量有关健康在轨监测项目,以期对航天员在轨飞行过程中的机体状态进行全方位的精确监测,准确评估航天员的健康状态和执行任务能力,采取有效对抗措施,及后续任务中必须建立和应用的在轨医学治疗与处置。强调设计、集成最新的生物医学技术并应用于航天医学任务中,形成适应于空间医学检测、监测与医学诊断技术。包括不同类型的生物传感器技术、芯片技术、纳米技术、微流控、微制造技术、生物信息学技术、计算机仿真技术、超声技术、核磁共振技术等;研究热点与生物技术发展密切相关,所有公共生物学技术的最新内容和热点都在空间项目上有所体现,关注的焦点集中于以下 3 个方面:

(1) 人体无创、精确的健康检测/监测体系,从具体技术上要求具有微量、快速、灵敏、多信息等特点,从系统功能上要求实现综合分析、智能决策。重点发展免疫传感器技术、芯片技术、超声技术、MRI 技术。

(2) 着力发展基于最新生物技术成果的环境监测技术,特别是舱内生物安全性(水、气体、微生物),实现微生物密度、种类、危害的实时在线检测和监测。

(3) 积极探索在轨医学处置技术,手术方法、特殊手术器械,特别是超声诊断技术在腹部胸部创伤、骨、韧带损伤、牙齿/窦性感染、及综合并发症等中的应用。

NASA 拥有专门的新概念研究所,每年在全球范围内征集新概念项目,期望在航天项目的设计中体现以下特点:创新思维,创新技术,最先进技术的集成与利用,使得航天技术始终走在其他技术的前列,成为名副其实的尖端技术的体现。

3.3 NASA OPBR 路线图

OPBR (Office of Biological and Physical Research) 是 NASA 专门制定航天医学-生物学研究、发布项目指南的部门。随着布什总统太空探索新计划的提出,于 2004 年及时发布了与之对应的研究计划和项目目标。在 OPBR 2004~2025 年航天发展路线图中,关注的首要目标是如何确保人类生存,在该目标下提出以下 5 个主题,并根据不同的研究目标,分别提出总体研究思路。

- 减轻和控制人的适应风险(Mitigate and manage human adaptation risks);
- 针对空间辐射环境,降低其不确定性,防止辐

射暴露(Reduce uncertainties and prevent exposure to space radiation environments);

- 维持乘员行为健康和最佳功能状态(Maintain behavioral health and optimal function of crews);
- 发展自动的医学处置能力(Develop autonomous medical care capabilities);
- 提高研究能力(Research Capabilities)。

4 我国航天医学发展的现状与挑战

我国的航天医学研究起步于 20 世纪 60 年代, 90 年代开始航天细胞与分子生物学研究。曾参与动物生物火箭实验, 创建了人体卧床、秋千、转椅等失重相关实验室, 建立了人体卧床、大鼠尾吊、视动刺激等模拟实验方法, 构建了我国航天医学基础研究的特色技术平台。具备模拟航天特殊环境和实时空间飞行条件下进行人体、动物、细胞、分子生物学研究的实验条件和技术力量; 具有开展中长期载人航天医学问题和空间生命科学相关科学问题的理论探索和创新研究的基础。为实现神舟五号、神舟六号任务中的载人航天突破提供了有力的科技支撑, 在我国实现载人航天突破, 圆千年飞天梦中做出了重要贡献。同时建立了一批具有我国自主知识产权的先进技术, 以此为支撑在航天医学领域与国际同行建立了良好的国际合作关系, 成为航天医学国际合作团队的成员。

载人航天实践中, 人是执行任务的主体, 要确保任务实现, 首先必须确保人在空间的健康生存。人类向外层空间进军的追求, 对保障人在空间的生存健康技术提出了更高要求。我们现有的技术贮备还远远不能满足我国载人航天后续发展的需要。一方面还有大量在现阶段未知和难以解决的医学问题; 另一方面航天技术具有创新思维, 创新技术特点。航天技术始终走在其他技术的前列, 是最先进技术的集成与利用, 也大大增加了其技术储备的挑战性和周期性。如何在医学防护、对抗措施方面发展具有我国自主知识产权的防护理论和对抗措施, 确保未来中长期飞行中航天员的身体健康和有效工作, 满足我国载人航天后续发展战略的需要, 使航天医学研究尽早、尽快步入国际先进行列是现阶段和今后一段时期我国载人航天必须面临的需求与挑战。

5 对我国航天医学研究与发展的建议

中国已加入到人类迈出地球摇篮、飞向宇宙太

空的行动中, 要保持载人航天的可持续发展, 确立中国在载人航天技术上应有的地位首先必须要在保障人的空间生存健康技术——航天医学上占有一席之地; 就必须在研究总体目标方向上保持长期延续性, 在应用技术方法上注重高新性, 强调自主知识产权的积累和突破, 瞄准后续目标, 加大支持力度, 以保证具有充足的技术储备和可持续发展能力, 为后续目标的实现提供坚强的技术支撑。

针对我国航天发展战略和后续航天任务提出以下建议:

(1) 在研究总体目标、方向上保持长期延续性, 在理论研究的阶段目标设计上体现系统性、深入性, 在应用的技术方法上注重高新性, 强调理论积累和突破。

航天环境是特定的, 从某种意义上讲, 航天医学问题的主题是永恒的, 空间环境导致的航天医学问题在未来 30~50 年都依然是焦点、热点。现代医学的诊断治疗是建立在基于细胞、分子的认识上发展起来的。从基于肿瘤细胞表面特异基因、蛋白分子表达的肿瘤诊断、治疗, 到细胞因子(如干扰素、白介素等)对免疫细胞的特征反应, 无一不显示出细胞分子生物学知识与技术对医学本质认识的贡献。要充分重视和发展基于细胞分子知识的航天员健康在线监测、在线防护、在线诊断和在线治疗修复的战略和技术。航天医学问题有其学科发展的特殊性、规律性, 要着眼于航天医学问题中核心理论问题潜心攻关, 形成突破, 为工程实现和医学应用提供坚实的理论支撑。

(2) 在设计理念上体现创新性, 应用新思维、新技术, 倡导新技术高科技水平, 注重天地两用性, 强调发展具有我国自主知识产权、反映我国特色的医学对抗措施。人类已从对空间环境的被动适应发展到采取主动的对抗防护措施, 现行的防护措施主要针对飞行中的生理、病理变化, 以维持恢复其功能状态为目标的功能维护型防护技术。在未来长期载人飞行中, 随飞行时间的延长, 空间环境对机体的影响已经超越了机体功能调节恢复的“阈值”, 有可能形成明显的结构性病理变化, 单纯的功能维护恢复型防护技术已无助于事, 因此必须发展既基于细胞、分子本质认识, 又可“再造”调控的防护措施, 即通过生物技术, 利用机体自身的反馈调节系统, 构建强化机体的再造功能, 形成调控式生物智能型防护措施, 以保障其空间飞行期间的安全健康和有效工作。

(下转第 23 页)

参考文献

- [1] Gampe F, Priesett K, Bentall R H, A Modular Docking Mechanism for In-orbit Assembly and Spacecraft Servicing, 19th Aerospace Mechanisms Symposium Proceeding, 1985, 59~73.
- [2] Feshe W. Automated Rendezvous and Docking of Spacecraft. Cambridge University Press, 2003, 283~335.
- [3] Gonzalez Vallejo J J, SENER Spain, syromyatnikov V S NPO Energa, Russian. Docking Mechanisms: An Overview of Different Systems. ESA Fifth European Space Mechanism & Tribology Symposium, 1992.
- [4] 娄汉文, 曲广吉, 刘济生. 空间对接机构. 北京: 航空工业出版社, 1992.
- [5] Kawano, Isao and Mokuno, Masaaki, Automated Rendezvous Docking System of Engineering Test Satellite VII, AAS97-467.
- [6] International Space Station Familiarization. Technical Report at td9702A.pdf, <http://www.isc.nasa.gov/er/seh/spaceid.htm>, July 31, 1998.
- [7] Advanced Docking System with Magnetic Initial Capture. Johnson Space Center. NASA Tech Brief, March 2004.
- [8] Keneth A B George E C. The Apollo Docking System. 5th Aerospace Mechanisms Symposium. NASA Godard Greenbelt, Md, June 15-16, 1970.
- [9] Schliesing J. Dynamic Analysis of Apollo-Salyut/Soyuz Docking. NASA TM X-58106. 7th Aerospace Mechanisms Symposium 1972, 9.
- [10] Siamak G, Matthew S, John M, John S, Tim B. Space Shuttle Docking to Mir Mission-1, AIAA-95-1196-CP.
- [11] Urgoiti E, Belikov E M SENER, Las Arenas, Vizcaya SPAIN. Docking Berthing Systems for International Space Station. A Proposal for CRV Docking and Berthing System, IAF-99-T.2.03.
- [12] Caporicci M. Human Space Transportation and Logistic Activities at ESA. 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, Florida, July 11-14, 2004.
- [13] Tobias A, Venditti F, Cable M. Docking Berthing Systems: Functions and Simulation, Proc. 2nd European In-orbit Operations Technology Symposium, Toulouse, France, 12-14 September 1989, ESA SP-297(December 1989).
- [14] Polites ME. An Assessment of the Technology of Automated Rendezvous and Capture in Space. NASA Marshall Space Flight Center, NASA/TP-1998-208528.
- [15] Michael F M, Gurpartap S S. Rendezvous and Docking for Space Exploration. 1st Space Exploration Conference: Continuing the Voyage of Discovery, Orlando, Florida, 30 January -1 February, 2005.
- [16] Potree D S., Mir Hardware Heritage. Technical Report NASA RP 1357, NASA-JSC, 1995.
- [17] Gonzalez-Vallejo J, Feshe W, Tobias A. A Multipurpose Model of Hermes-Columbus Docking Mechanism. Proceedings of the 26th Aerospace Mechanisms Symposium, 1992.

(上接第 7 页)

(3) 注重航天技术回馈于社会。航天事业造福于大众社会是航天事业的重要目标之一, 我国的航天事业尚处于起步阶段, 是政府和国民的政治、经济投入期; 若干年后, 航天技术回馈于社会, 造福于大众、促进社会技术进步的要求就会提上议事日程, 因此在相关领域的立项设计中应该充分考虑到天地两用。

面对人类进入太空前必须攻克的医学堡垒, 我们必须保证, 拥有足够的武器和知识应对这种挑战, 创建适合自己发展的生存环境, 开辟人类生存发展的新天地。◇

参考文献

- [1] Epelman S, Hamilton DR. Medical mitigation strategies for acute radiation exposure during spaceflight. Aviat Space Environ Med. 2006, 77(2):130-9.
- [2] Ilyin VK. Microbiological status of cosmonauts during orbital space-flights on Salyut and Mir orbital stations. Acta Astronaut, 2005, 56(9-12): 839-850.
- [3] La Duc MT, Kern R, Venkateswaran K. Microbial monitoring of spacecraft and associated environments. Microb Ecol, 2004, 47(2): 150-158.
- [4] Spurny F, Jadrnickova I. Some recent measurements onboard spacecraft with passive detector. Radiat Prot Dosimetry, 2005; 116(1-4 Pt 2): 228-31.
- [5] Townsend LW. Implications of the space radiation environment for human exploration in deepspace. Radiat Prot Dosimetry, 2005; 115(1-4): 44-50.
- [6] Zayzafoon M, Meyers VE, McDonald JM. Microgravity: the immune response and bone. Immunol Rev. 2005, 208: 267-80.
- [7] Gravitational and Space Biology Bulletin 18, 2005
- [8] Gravitational and Space Biology Bulletin 17, 2004
- [9] OBPR'S RESEARCH PLAN 2003 (http://spaceresearch.nasa.gov/common/docs/OBPR_Research_Plan.pdf)
- [10] 李莹辉. 二十一世纪的航天医学细胞分子生物学. 航天医学与医学工程, 2003, 16(S): 588-592