

中国空间辐射生物研究面临的挑战和机遇

胡文涛, 周光明*

苏州大学医学部放射医学与防护学院, 放射医学与辐射防护国家重点实验室, 江苏省高校放射医学协同创新中心, 苏州 215123

* 联系人, E-mail: gmzhou@suda.edu.cn



中国神州系列飞船的成功发射和天宫系列建设任务的顺利实施, 再次引发航天潮. 美国提出了重返月球、登陆火星等计划(NASA Strategic Plan 2014, www.NASA.gov), 俄罗斯、日本和印度等国也不甘落后, 欧洲甚至提出移民火星. 但是, 外太空是个混合辐照场, 空间辐射的能量高、富含高能带电(high atomic number and high energy, HZE)粒子, 对航天员的健康威胁在任何情况下都必然存在, 是任何空间探索任务都不可回避的问题. 对于登陆火星和月球殖民等长周期深空探索任务而言, 航天员面临的最大挑战是空间辐射诱导的肿瘤发生、心血管疾病等健康问题. 如果遭遇太阳粒子事件等空间灾害事件, 还将面临急性放射损伤甚至生命威胁, 这些健康威胁属于 show-stopper(搅局者)^[1], 现有空间辐射相关健康风险评估标准显然是不够的. 降低空间辐射危害评估的不确定性, 建立医学健康标准和安全评价体系, 研发有效的防护措施, 才能保障航天员的作业能力和健康安全.

空间辐射生物研究的最终目标就是通过对空间辐射诱导肿瘤发生等生物医学问题的研究, 使得人类在可接受的辐射风险下在外太空的永久存留成为可能. 为了保障中国空间站、月球基地、火星探索等空间任务的顺利推进, 空间辐射生物交叉学科研究亟待深化.

1 空间辐射环境

随着空间站、月球和火星等深空探索距离地球越来越远、任务周期越来越长, 航天员遭受的空间辐射剂量率越来越高, 国际空间站(ISS, 370 km 高度、51.6°倾角、1 g/cm² 铝屏蔽)的辐射剂量为~0.4 mSv/d, 在 ISS 工作半年遭受的总剂量约 0.072 Sv^[2]. 180 d 登月任务遭受的总剂量约为 0.17 Sv^[3]. 就火星探索任务而言, 飞行过程中辐射剂量为~1.8 mSv/d, 火星表面为~0.64 mSv/d; 180 d 火星飞行平均剂量约为 0.33 Sv, 相当于 40 次腹部 CT 扫描的总剂量^[4].

外太空辐射的分布及其随时间的变化、航天器内部辐射水平及其分布、火星表面和人体内部剂量水平、空间辐射的健康风险评估及其有效削弱方法, 都是空间辐射生物交叉学科研究亟待解决的问题.



周光明 教授, 江苏省毒理学会常务委员、国际空间研究委员会 F2 副主席、国际宇航科学院通讯院士. 先后在日本千叶大学和放射医学综合研究所, 美国布鲁克海文国家实验室和哥伦比亚大学求学. 长期从事重离子辐射生物效应及其机理研究.

2 空间辐射的来源和特点

空间辐射主要有 3 个来源: (1) 地球俘获带辐射(trapped radiation belt), 以 10 MeV 左右的质子和电子为主, 航天器舱壁可以屏蔽. (2) 太阳粒子事件(solar particle event, SPE), 太阳活动高峰期发生磁暴, 短时间发射出大剂量的中高能质子, 足以诱发急性辐射综合征. 太阳活动周期约为 11 a, 但太阳磁暴不可预测. 研制可靠的太阳粒子事件预测和预警系统是一大挑战. (3) 银河宇宙射线(galactic cosmic ray, GCR), 富含高能质子和高能重离子, 尤其是氦离子和碳、氧、镁、硅、铁等重离子. GCR 粒子的能量高, 物理措施无法有效屏蔽^[5]. GCR 的粒子丰度和能谱已经有实测数据, 但是目前人们对其生物效应的认识还远远不够.

空间辐射的特点包括: (1) 能量高. 特别是 SPE 和 GCR 辐射, 能量高达 GeV/u 量级, 物理屏蔽难于有效防护. (2) 剂量小、剂量率低. 空间辐射由于粒子丰度较低, 其剂量率虽然远高于地面本底辐射, 但是远低于经典辐射生物学关注的剂量范围, 在地面很难模拟, 因而其生物效应人们还知之甚少. (3) 富含 HZE 粒子. HZE 粒子, 特别是重离子, 属于致密电离辐射^[5], 传能线密度(LET)大、诱导难于修复的 DNA 损伤^[3,6,7], 相对生物效应(RBE)高^[8], 与 X 射线等常规低 LET 辐射的物理特性大相径庭, 人们对其生物效应研究起步较晚, 认知有限, 也很难依据现有低 LET 辐射生物学知识进行合理推测. (4) 外太空是一个混合辐照场, 存在各种不同种类的辐射; 高能粒子与航天器舱壁等材料发生核反应产生次级辐射, 使得航天器舱内形成一个

混合辐照场、(5) 多因素复合作用等。微重力、弱磁场、昼夜节律变换等其他空间环境因素与空间辐射复合作用,增加了人们认识空间辐射生物效应的难度和空间辐射风险评估的不确定性。

3 载人航天面临的空间辐射生物学问题及最新研究进展

空间辐射生物学主要研究空间高能、低剂量(率)、高LET电离辐射对人体的效应及其发生机制,为空间辐射对航天员生命健康危害的预测、预警和防护提供科学依据和应对措施。空间辐射生物学研究离不开空间辐射环境的探测、辐射与微重力等其他空间环境因素的相互作用,因此,空间辐射生物学研究属于典型的多学科交叉研究领域。

围绕航天员的作业能力和生命健康,空间辐射生物交叉学科研究重点关注:急性辐射效应与粒子品质的相关性、空间其他环境因素对急性辐射效应的影响程度、低剂量GCR辐射诱发肿瘤的风险评估以及特异性分子标志物的筛选、低剂量GCR诱发中枢神经系统损伤的风险、低剂量GCR诱发非肿瘤远后效应的风险、低剂量GCR诱发遗传性病变的风险、通过机理研究提高空间辐射风险评价的可靠性和辐射防护的有效性等。

空间辐射生物学研究已经有60余年的历史。自1961年加加林成功实现太空飞行以来,国外已有500余位航天员执行过空间探索任务。美国航空航天局(NASA)跟踪调查了美国航天员执行空间探索任务时所遭受的辐照剂量以及返回后的健康状况,发现白内障是空间辐射所导致的健康问题之一^[9]。49~54岁美国人的白内障发病率为0.3%,而执行过阿波罗任务的航天员罹患白内障的比例为29%,执行国际空间站任务超过一个月的航天员60%罹患白内障。流行病学调查结果显示,遭受辐照剂量大于8 mSv的航天员60岁时罹患白内障的相对风险是遭受剂量低于8 mSv的航天员的2.35 [1.01, 5.51]倍,差异显著。

NASA也分析了航天员罹患肿瘤的风险,跟踪调查的312名航天员中47人罹患肿瘤,是地面同年龄段对照人群的3倍^[9]。Weil等人^[10]开展大批量实验小鼠研究,发现0.1 Gy的硅离子和铁离子辐照诱导的肝癌发生率显著高于伽马射线和质子。低剂量率长期辐照可以诱导肿瘤的发生^[11],其中非靶效应可能扮演了重要角色。以辐射敏感性*Ptch1*^{+/-}小鼠为模型,辐照小鼠腹部导致脑部成神经细胞瘤的发生,是旁效应导致肿瘤发生第一个体内实验证据^[12]。NASA将可接受的辐射致癌风险水平定为辐射致死风险的3%,但是月球和火星探索任务的辐射致癌风险接近致死风险的15%^[5]。有效降低空间辐射致癌的风险对于深空探索任务而言是至关重要的。由于天基实验数据的匮乏和地基实验条件的局限,空间辐射致癌风险评估的不确定性非常高。影响空间辐射致癌效应的因素,诸如辐射品质、剂

量率、微重力和其他环境因素等的作用亟待获得可靠的实验数据支撑。

空间辐射对中枢神经系统的损伤有可能影响航天员的工作效率和任务执行力,因而颇受关注。Parihar等人^[13]通过实验研究发现,5 cGy的氧离子或钛离子足以导致小鼠神经系统不可恢复的损伤,树突棘密度显著下降。这一发现加重了人们对空间辐射影响航天员在太空的任务执行能力的担心。

生殖细胞对辐射非常敏感。空间辐射对人体生殖系统的影响关系到航天员后代的健康和未来太空移民的可能性。Mishra等人^[14]发现,5 cGy高能铁离子辐照可以导致C57BL/6小鼠体内卵泡减少57%,50 cGy几乎导致卵泡完全消失。空间辐射对人体生殖系统的影响有待深入研究。

Delp等人^[15]报道,执行过阿波罗任务的航天员人数虽然很少,但是死于心血管疾病的比例达43%,比未执行航天任务或者执行过低地轨道任务的航天员高4~5倍。动物实验表明,高能质子辐照和铁离子辐照对心脏的影响不同;心脏受到0.5 Gy质子辐照后,1月内功能提高,10个月后功能下降;0.15 Gy铁离子照射后1个月内心脏功能下降,10个月后恢复^[16]。0.1 Gy质子预照射可以激活细胞的适应性反应,降低后续铁离子辐照诱导的生物效应^[17]。但是,混合辐照诱导适应性反应还是存在协同作用,似乎跟不同粒子辐照先后作用的时间间隔有关。当时间间隔小于1 h,质子和铁离子辐照存在协同效应,诱导的细胞转化率和染色体畸变率高于两种辐照单独作用结果的叠加^[18,19]。

空间辐射的剂量率低,但是旁效应不容忽视。0.2 cGy的铁离子照射,仅有~1%的细胞被直接辐照,却可以检测到明显的蛋白羰基化,1 cGy的铁离子照射即可诱导明显的脂质过氧化,提示旁效应的存在^[20]。旁效应与辐照品质等相关^[21],其分子机制已经有诸多阐述^[22],近年来研究发现,非编码RNA等也参与旁效应信号的调控^[23]。

美国国家研究委员会(National Research Council)提出空间辐射生物学研究下一步方向包括:肿瘤发生、太阳粒子事件导致的急性辐射综合征、心血管系统疾病和白内障等退行性组织病变、辐射的急性和远后效应所导致的认知或神经失调等中枢神经系统风险、免疫力改变等。空间辐射致癌模型的建立、健康标准的建立、屏蔽措施的研发、非癌风险的界定等是目前美国空间辐射生物学研究的主要内容。

与美国类似,欧洲太空局(European Space Agency, ESA)意识到太阳系殖民必须将空间辐射风险降低到可接受的水平,因而也十分重视空间辐射生物交叉学科研究^[24]。ESA把地基模拟实验研究作为关键步骤,启动了DoReMi低剂量辐射生物学等大型科研项目。目前欧洲的空间辐射生物交叉学科研究围绕空间辐射的品质因子、剂量效应、非癌效应、低剂量辐射的剂量效应等,所有研究都密切围绕空间辐射防护这一主题。

4 空间辐射防护

辐射防护的三大基本原则是: 远离放射源、缩短暴露时间和采用屏蔽措施。对于空间探索任务而言, 前两条都不可行。第三条也存在疑问, 空间辐射能量高, 物理屏蔽措施无法完全防护。较为可行的措施包括: 选择合适的发射时机、采用药物或膳食补充剂降低辐射效应以及辐射抵抗性航天员的筛选等^[5]。发射时机的选择是现行航天任务广泛采取的措施, 尽可能避开太阳磁暴, 以防航天员发生急性辐射综合征。抗辐射药物是国内外积极研发的重点。目前已经在许多国家获得批准的药物是氨磷汀(WR-2721)。但是氨磷汀和其他巯基类化合物存在诱发恶心、呕吐、血管扩张、低血压等副作用^[25], 除了应对太阳粒子事件, 不能用于空间飞行。对于长时间空间探索任务而言, 天然抗氧化物毒性小、适合长期服用, 对辐射致癌有很好的防护效果, 是值得考虑的选择^[26,27]。从ISS返回的部分航天员超氧化物歧化酶(SOD)和总体抗氧化水平变低, 因而研制功能性食品十分必要, 通过补充维生素、褪黑素等激素、SOD等抗氧化酶类、硒等矿物元素、黄酮和多酚类植物提取物等, 来提高航天员自身抵抗辐射的能力。我国中草药资源丰富、中医药历史悠久, 利用中医药理论, 配制抗辐射功能饮料切实可行, 而且符合我国发扬中国传统文化、推广中医药的国策。另外一个可能有效降低空间辐射对航天员健康安全风险的方法是利用航天员自身的抗辐射能力。每个人的遗传背景不同、成长环境各异, 因而对辐射的抵抗力也各有不同。遴选自身抗辐射能力强的航天员, 借助功能性食品、物理屏蔽和主动防护措施, 综合内外因素全方位防护, 可能才是抵抗空间辐射的有效途径。

5 我国面临的机遇与挑战

相较于国外, 中国的空间辐射生物学研究起步晚。早期的空间辐射生物学研究集中在空间辐射与种子性状变异之间的关系^[28,29], 围绕航天员健康与安全的研究极少, 究其原因在于平台有限、经费有限和重视程度不够。

国外在空间辐射生物学研究方面的成就与其完善的实验平台是密不可分的。美国和俄罗斯合建的ISS为两国空间辐射生物学研究的发展提供了至关重要的支撑作用。ESA和日本先后依托ISS建设了专用实验舱, 成为他们开展空间辐射生物学研究的关键平台。美国禁止我国使用ISS, 客观上限制了我国空间辐射生物学研究的发展。但是, 随着中国空间站建设的顺利推进, 中国人终于拥有了自己的天基实验平台。随着ISS的寿命即将到期, 中国空间站的建立和运行不仅将大力促进我国空间辐射生物学研究的发展, 而且对国外空间辐射生物学研究的发展也将发挥重要作用。另一方面, 完善的地基实验平台也是支撑空间辐射生物学研究的决定性因素之一。美国在2003年依托布鲁克海文国家实验室的重离子加速器建成NASA空间辐

射实验室(NASA Space Radiation Laboratory, NSRL), 为美国乃至欧洲的空间辐射生物学地基模拟实验研究提供了宝贵的科研平台, 上述大部分研究成果都是在此平台上取得的。另外, 德国重离子研究中心(GSI)和日本国立放射医学研究所(NIRS)的高能粒子加速器分别为欧洲和日本开展空间辐射生物交叉学科研究提供支撑。我国目前唯一可以依托的地基重离子辐照装置是兰州重离子加速器国家实验室的重离子加速器HIRFL, 该加速器可以实现全粒子加速, 对于空间辐射生物交叉学科研究而言十分有利, 只是用户多、机时少, 使用效率有待提高。随着上海质子重离子治癌中心和武威重离子肿瘤治疗中心等单位重离子加速器的建成, 以及哈尔滨工业大学的空间环境模拟装置建成以后, 我国开展空间辐射生物交叉学科地基模拟实验研究将越来越方便。

美国NASA在2014年的预算达400亿美元(NASA Strategic Plan 2014, www.nasa.gov), 与以往基本持平, 但仍然比其他所有国家的总和还多。早在2003年, 美国启动低剂量辐射研究计划(Low Dose Research Program), 由NASA和能源部(Department of Energy, DOE)合作支持。至今为止, NASA每年支持相当数量的空间辐射生物交叉学科研究, 提供充足的经费和在NSRL进行样品辐照的质子和HZE粒子束流。中国用于空间探索的经费逐年大幅度增加, 但是我国载人航天计划前期主要任务还是以空间技术为主, 在基础生物学研究, 特别是空间辐射生物学研究方面的投入十分有限, 可以支撑的科研岗位数和研究团队有限。经费的不足制约着我国空间辐射生物交叉学科研究的广度和深度。随着中国空间站的建成和运行, 科学研究逐渐成为载人航天计划的主角, 用于基础生物学研究, 包括空间辐射生物学研究的经费将逐渐增加。

神舟和天宫系列任务尚处于低地轨道, 任务周期相对较短, 空间辐射风险尚处于现有空间医学健康标准范围之内。随着空间站、月球和火星等深空探索任务的实施, 航天员活动距离地球越来越远、周期越来越长, 航天员遭受的空间辐射剂量越来越大, 空间辐射生物交叉学科研究必然愈发受到重视。吸取国外的经验教训, 在国内外现有研究基础上, 明确具体的研究方向, 建立并完善我国空间辐射生物交叉学科研究平台, 促进我国空间辐射生物交叉学科研究的发展, 为我国载人航天事业向深空推进保驾护航^[30]。

6 今后5年建议建设重点

空间辐射生物学是一个非常有趣和有意义的研究领域。太空辐射是一个包括高能电子、质子和重离子的独特混合辐照场, 具有剂量(率)低、且叠加其他环境因素如微重力等特点。尽管目前人类对空间辐射的组成、能谱、丰度等物理特性已研究得较为清楚, 但其生物学效应却存在较大的不确定性。太空辐射的肿瘤风险、中枢神经系统和免

疫系统的损伤等非肿瘤风险是各国空间相关机构和研究人员关心的重点之一。为了有效降低对航天员辐射健康风险评估的不确定性,需要大量的基础研究数据。因此在有限的天基实验的基础上,有必要加强地基仿真模拟实验研究,以获得必需的数据。

我国空间辐射生物学研究在方法学上处于国际同等水平,但创新能力与国际同行相比,仍有差距。为了取得世界领先水平的成果,我国空间辐射生物交叉学科研究可以从以下几个方面突破:(1) 识别降低空间辐射健康风险的关键是考察 GCR 重离子的致癌风险、揭示致癌机理、发现辐射和肿瘤早期诊断的生物标志物;(2) 优化健康风险评估模型、优化风险预测和辐射防护的剂量学研究;(3) 研究空间辐射诱导心血管、中枢神经系统损伤等非癌效应的风险;(4) 研究空间辐射的个体辐射敏感性、研发提高任务返回后医疗保障水平的方法;(5) 研发有效的生物医学辐射防护措施及其原理;(6) 设计和研发空间辐射屏蔽材料和装置,以及实时辐射探测系统;(7) 通过工程设计提高推进能力,缩短输送时间,从而降低辐射暴露时间;(8) 提高重离子治癌和其他新的医学知识水平来改善地球上人们的生活质量;(9) 提高远程和隔离带医疗保障的输送能力;(10) 拓展、训练、教育下一代辐射从业人员,提高公共支持的透明度;(11) 利用空间辐射研究成果发展核事故快速应急响应技术。加强国际合作,实现上述目标,拓展空间辐射生物交叉学科研究的领域。

致谢 感谢国家自然科学基金重点项目(11335011)资助。

推荐阅读文献

- 1 Barcellos-Hoff M H, Blakely E A, Burma S, et al. Concepts and challenges in cancer risk prediction for the space radiation environment. *Life Sci Space Res*, 2015, 6: 92–103
- 2 Cucinotta F A, Kim M H Y, Willingham V, et al. Physical and biological organ dosimetry analysis for international space station astronauts. *Radiat Res*, 2008, 170: 127–138
- 3 Cucinotta F A, Durante M. Cancer risk from exposure to galactic cosmic rays implications for space exploration by human beings. *Lancet Oncol*, 2006, 7: 431–435
- 4 Zeitlin C, Hassler D M, Cucinotta F A, et al. Measurements of energetic particle radiation in transit to Mars on the Mars Science Laboratory. *Science*, 2013, 340: 1080–1084
- 5 Durante M, Cucinotta F A. Heavy ion carcinogenesis and human space exploration. *Nat Rev Cancer*, 2008, 8: 465–472
- 6 Asaithamby A, Uematsu N, Chatterjee A, et al. Repair of HZE-particle-induced DNA double-strand breaks in normal human fibroblasts. *Radiat Res*, 2008, 169: 437–446
- 7 Asaithamby A, Hu B, Chen D J. Unrepaired clustered DNA lesions induce chromosome breakage in human cells. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 8293–8298
- 8 Suzuki M, Piao C, Hall E J, et al. Cell killing and chromatid damage in primary human bronchial epithelial cells irradiated with accelerated ^{56}Fe ions. *Radiat Res*, 2001, 155: 432–439
- 9 Longnecker D E, Manning F J, Worth M H. Review of NASA's Longitudinal Study of Astronaut Health. Washington DC: The National Academies Press, 2004. 1–93
- 10 Weil M M, Ray F A, Genik P C, et al. Effects of ^{28}Si ions, ^{56}Fe ions, and protons on the induction of murine acute myeloid leukemia and hepatocellular carcinoma. *PLoS One*, 2014, 9: e104819

7 总结

国外的空间辐射生物学研究已经有 60 余年历史,而我国还处于起步阶段,为了迅速提高我国空间辐射生物学研究水平、做出创新性研究成果、保障载人航天任务向深空推进,有必要群策群力,在空间辐射生物科学问题的提炼和筛选、科研项目的论证和设计、研究平台的设计和建设和、科研经费的保障与管理、人才团队建设和培养等多方面进行创新。鉴于利用中国空间站等天基平台开展空间辐射生物研究机会少、代价高,开展顶层设计、协同创新、全链条式合作是值得探讨的模式。

第 561 次香山科学会议“空间辐射生物交叉学科研究”,针对目前国内外空间辐射生物交叉学科研究的现状,就如何推进我国空间辐射生物交叉学科研究的发展,与会专家经过两天的深入交流和讨论,提出如下建议:(1) 制定《中国空间辐射生物交叉研究十年规划》,提供持续稳定的经费支持,建立科学的管理与运行机制;(2) 针对特定任务,组织科学家进行顶层设计,开展团队协作,提高空间研究资源的利用效率;(3) 成立中国空间辐射生物交叉研究联盟,实现资源整合,强化队伍建设、学科建设和国际合作,开展科普教育,培养后备人才;(4) 将人系统、飞行器设计和空间辐射生物学基础问题交叉融合;(5) 加强地基平台建设和仿真模拟研究,实验和理论并重,平台和数据共享。

- 11 Leuraud K, Richardson D B, Cardis E, et al. Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): An international cohort study. *Lancet Haematol*, 2015, 2: e276–e281
- 12 Mancuso M, Pasquali E, Leonardi S, et al. Oncogenic bystander radiation effects in Patched heterozygous mouse cerebellum. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 12445–12450
- 13 Parihar V K, Allen B, Tran K K, et al. What happens to your brain on the way to Mars. *Sci Adv*, 2015, 1: e1400256
- 14 Mishra B, Ortiz L, Luderer U. Charged iron particles, components of space radiation, destroy ovarian follicles. *Hum Reprod*, 2016, 31: 1816–1826
- 15 Delp M D, Charvat J M, Limoli C L, et al. Apollo lunar astronauts show higher cardiovascular disease mortality: Possible deep space radiation effects on the vascular endothelium. *Sci Rep*, 2016, 6: 29901
- 16 Yan X, Sasi S P, Gee H, et al. Cardiovascular risks associated with low dose ionizing particle radiation. *PLoS One*, 2014, 9: e110269
- 17 Ramadan S S, Sridharan V, Koturbash I, et al. A priming dose of protons alters the early cardiac cellular and molecular response to ^{56}Fe irradiation. *Life Sci Space Res*, 2016, 8: 8–13
- 18 Zhou G, Bennett P V, Cutter N C, et al. Proton-HZE-particle sequential dual-beam exposures increase anchorage-independent growth frequencies in primary human fibroblasts. *Radiat Res*, 2006, 166: 488–494
- 19 Hada M, Meador J A, Cucinotta F A, et al. Chromosome aberrations induced by dual exposure of protons and iron ions. *Radiat Environ Biophys*, 2007, 46: 125–129
- 20 Li M, Gonon G, Buonanno M, et al. Health risks of space exploration: Targeted and nontargeted oxidative injury by high-charge and high-energy particles. *Antioxidants Redox Signal*, 2014, 20: 1501–1523
- 21 Yin X, Tian W, Wang L, et al. Radiation quality-dependence of bystander effect in unirradiated fibroblasts is associated with TGF- β 1-Smad2 pathway and miR-21 in irradiated keratinocytes. *Sci Rep*, 2015, 5: 11373
- 22 Hei T K, Zhou H, Ivanov V N, et al. Mechanism of radiation-induced bystander effects: A unifying model. *J Pharmacy Pharmacol*, 2008, 60: 943–950
- 23 Hu W, Xu S, Yao B, et al. MiR-663 inhibits radiation-induced bystander effects by targeting *TGFB1* in a feedback mode. *RNA Biol*, 2014, 11: 1189–1198
- 24 Durante M, Reitz G, Angerer O. Space radiation research in Europe: Flight experiments and ground-based studies. *Radiat Environ Biophys*, 2010, 49: 295–302
- 25 Boccia R. Improved tolerability of amifostine with rapid infusion and optimal patient preparation. *Semin Oncol*, 2002, 29: S9–S13
- 26 Halliwell B. The antioxidant paradox. *Lancet*, 2000, 375: 1179–1180
- 27 Bingham S, Riboli E. Diet and cancer-The European prospective investigation into cancer and nutrition. *Nat Rev Cancer*, 2004, 4: 206–215
- 28 Wei Z, Xie H, Yasuda N, et al. Calibration experiments for studying mechanism of space mutation breeding. *Nucl Sci Tech*, 2006, 29: 670–673
- 29 Yi J C, Mei M T. Suppression subtractive hybridization analysis of rice male sterility mutant ws-3-1 induced by space flight (in Chinese). *J South China Agric Univ*, 2007, 28: 70–81 [易继财, 梅曼彤. 水稻空间诱变雄性不育突变体 ws-3-1 的抑制缩减杂交分析. 华南农业大学学报, 2007, 28: 70–81]
- 30 Shang P, Huyan T, Yang Z Q, et al. Tendency and critical scientific issues of space life science in China (in Chinese). *Sci China Technol Sci*, 2015, 45: 796–808 [商澎, 呼延霆, 杨周岐, 等. 中国空间生命科学的关键科学问题和发展方向. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 796–808]

Summary for “中国空间辐射生物研究面临的挑战和机遇”

Challenges and opportunities for the space radiobiology research in China

Wentao Hu & Guangming Zhou*

Academy of Space Life Sciences, State Key Laboratory of Radiation Medicine and Protection, Collaborative Innovation Center of Radiological Medicine of Jiangsu Higher Education Institutions, Soochow University, Suzhou 215123, China

* Corresponding author, E-mail: gmzhou@suda.edu.cn

Advancing the interdisciplinary research of space radiobiology, as well as establishing a space radiation risk assessment system to provide astronauts with health risk prediction, early warning, and protection strategies are several approaches that meet the needs of long-term manned space exploration in China. At the 561st Xiangshan Science Conference, scientists engaged in relevant planning and research in the field of space life sciences in China, together with colleagues from the United States and Germany, discussed research opportunities, key research directions, planning and layout in the interdisciplinary space radiobiology research in China. The participants further proposed that a Ten-Year Plan for China's Space Radiobiology and Interdisciplinary Research be formulated, as well as providing sustained and stable financial support and establishing scientific systems of management and operation. To maximize the utilization efficiency of research resources, the participants advocated the establishment of the China Alliance for Space Radiobiology and Interdisciplinary Research with the purpose of integrating resources, strengthening team building, discipline construction and international cooperation, developing popular science education, and training reserve talents. Other proposals include integration of astronauts, aircraft design and basic issues of space radiobiology, strengthening ground-based platform construction, simulation research with an emphasis in both experimental study and theory development, and finally, construction of the data sharing platform.

This paper highlights advances in the space radiation field and proposes several major scientific issues faced by long-term manned space exploration. Space radiation-induced carcinogenesis, cardiovascular disease, central nervous system injury, reproductive system and immune-system damage are considered to be the most serious health challenges confronted by astronauts. Besides the traditional space radiation protection strategy, the meeting participants proposed some innovative strategies including choice of appropriate time window for extravehicular activities, development of Chinese herbal medicine for radioprotection, selection of astronauts based on individual radiosensitivity. The panel regarded the up-and-coming Chinese space station as the most important opportunity for the development of the radiobiology research in China and all over the world. However, some weaknesses in the current status of Chinese space radiobiological research have been identified by the panel including insufficient financial support, lack of international cooperation, and poor innovative capacity. Furthermore, the panel summarized the key space radiobiological issues, including: (1) understanding of the mechanisms of the space radiation-induced carcinogenesis and screening of biomarkers for the early diagnosis of related tumors; (2) optimization of the health risk assessment model for astronauts; (3) research of individual radiosensitivity to space radiations; (4) research and development of effective radioprotection measures; (5) design and development of space radiation shielding materials and devices, and real-time radiation detection system. Finally, the panel provided several recommendations in advancing the Chinese space radiobiological research program, including increasing funding support to provide a sustained and stable financial support structure, developing team cooperation to improve the utilization efficiency of space research resources, strengthening ground-based platform construction and simulation research.

In conclusion, this paper described both the current challenges and opportunities for space radiobiology research in China. It also provides considerable information for the Chinese science and technology program managers.

manned space exploration, space radiation, radiobiology, risk assessment, radiation protection

doi: 10.1360/N972019-00187