

编者按 习近平总书记强调,“浩瀚的空天还有许多未知的奥秘有待探索,必须推动空间科学、空间技术、空间应用全面发展”。党的二十大报告明确“加快建设航天强国”,到2035年我国将“实现高水平科技自立自强,进入创新型国家前列”。为此,由中国科学院牵头,集我国空间天文、日球层物理、月球与行星科学、空间地球科学、微重力物理与空间生命科学领域的相关优势力量,围绕极端宇宙、时空涟漪、日地全景、宜居行星、太空格物等科学主题,开展了10个学科专业的发展战略研究。为让各界了解相关学科发展战略研究的成果,积极参与思考学科发展前沿和提出具有重大科学意义的空间科学任务,《空间科学学报》联合中国科学院国家空间科学中心论证中心,策划了《至2035年空间科学学科发展战略研究》专题,本期推出专题第5篇——赵玉芬等:空间生命学科发展战略研究。

ZHAO Yufen, HUA Yuejin, LI Yiliang, SUN Yeqing, YAO Wei, ZHENG Huiqiong, HAO Jihua, YING Jianxi, CHEN Yuzong, TIAN Bing. Strategic Study for the Development of Space Life (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, 44(3): 387–399. DOI:10.11728/cjss2024.03.2024-yg07

空间生命学科发展战略研究*

赵玉芬¹ 华跃进² 李一良³ 孙野青⁴

姚伟⁵ 郑慧琼⁶ 郝记华⁷

应见喜¹ 陈宇综¹ 田兵²

1(宁波大学新药技术研究院 宁波 315211)

2(浙江大学生命科学学院 杭州 310058)

3(香港大学地球科学系 香港 999077)

4(大连海事大学环境科学与工程学院 大连 116026)

5(中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室 北京 100098)

6(中国科学院分子植物科学卓越创新中心 上海 200032)

7(中国科学技术大学地球和空间科学学院 合肥 230026)

摘要 空间生命学科是一门致力于研究在空间环境条件下生命起源、演化及其分布,生命现象及其规律的学科。该学科从理论和实验两个层面深入探讨生命起源和早期演化机制,同时也探索地外天体生命的宜居性、存在形式等基本科学问题。随着中国空间站、嫦娥工程和天问系列等大科学计划的实施,中国空间生命科学研究进入了一个高速发展阶段。本文对空间生命领域的发展态势进行了梳理,提炼出了中国未来空间生命学科的重点发展领域,并针对学科布局进行优化,旨在推动空间生命科学研究的高质量发展。

关键词 空间生命, 生命起源, 生命探索, 发展态势, 战略规划

中图分类号 V524

* 国家自然科学基金项目资助 (42388101, 92256203)

2024-05-15 收到原稿, 2024-05-25 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Strategic Study for the Development of Space Life

ZHAO Yufen¹ HUA Yuejin² LI Yiliang³ SUN Yeqing⁴ YAO Wei⁵
ZHENG Huiqiong⁶ HAO Jihua⁷ YING Jianxi¹ CHEN Yuzong¹ TIAN Bing²

1(Institute of Drug Discovery Technology, Ningbo University, Ningbo 315211)

2(College of Life Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

3(Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077)

4(College of Environmental Sciences and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026)

5(Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, China Academy of Space Technology, Beijing 100098)

6(CAS Center for Excellence in Molecular Plant Sciences, Shanghai 200032)

7(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract Space life science is a discipline dedicated to investigating the origin, evolution, and distribution of life under space environmental conditions, along with the phenomena and principles governing life. This field delves into the mechanisms of life's origin and early evolution from both theoretical and experimental perspectives, while also exploring fundamental scientific inquiries such as the habitability and forms of extraterrestrial life. With the implementation of major scientific projects such as the Chinese space station, the Chang'E lunar exploration program, and the Tianwen series, research on space life in China has witnessed rapid development. This paper provides an overview of the domestic and international trends in space life, identifies key areas for future development of space life science in China, optimizes disciplinary layouts, and aims to promote high-quality advancement in space life research.

Key words Space life, Origin of life, Life exploration, Development trend, Strategic planning

0 引言

作为地球和行星科学的重要分支,空间生命科学是研究空间环境条件下生命起源、演化、生存、分布等生命现象及其规律的学科,涉及生命起源和早期演化,地外天体生命的宜居性、存在形式等基础前沿科学问题。此外,在行星际空间条件下研究生命的存在形式和响应机制,也可以为深刻认识生命现象本质、开展空间探索活动、开发地外资源、发展空间生物技术和未来开展人类长期空间探索活动提供关键参考信息、健康保障对策及技术基础。

空间生命科学研究对象涉及多层次生命相关物质及生命体,包括生命前体物质、原核和真核微生物、低等植物和脊椎动物等生命形式。在空间极端环境,例如微重力、空间辐照和亚磁等多因素协同效应下,探究不同层次生命物质的感知和响应等机制,可以为中国开展深空探测和发展空间技术的国家重大

战略任务提供实验基础、理论储备以及实践经验的积累。因此,推动空间生命科学研究对中国地球和行星科学学科和研究迈向高质量和自主可控纵深发展具有重大战略意义。

1 国外现状和发展态势

1.1 地外生命探寻与演化

1.1.1 火星探索

火星是太阳系中地球之外最具宜居性的行星,是长期以来地外生命探索的热点^[1]。目前研究已确定其表面早期宜居性和现在深部环境的宜居性,但原位研究尚未确证生物存在的证据。因此,从火星采样返回,利用地基实验室高、精、尖的仪器设备最终确认火星是否曾经存在过生命,将是未来的重点研究方向。中国、美国、欧洲均有计划在2030年实现该目标。目前美国和中国成功将火星车投放到火星,正在进行各种

观察和分析工作,是获得可能保存有火星生命记录样品的重要保证.迄今关于火星的科研论文发表数量已经超过7万篇,其中美国占90%以上,欧洲超过7%,中国整体占比很低,但最近随着祝融号的工作进展而呈井喷态势.

目前受到关注的火星生物标志物包括磷、甲烷、水等^[2-5].磷是所有已知生命的必需元素.基于磷对生命的重要意义,诺贝尔化学奖得主Todd教授提出了“哪里有生命,哪里就有磷”的观点,指出磷是在宇宙中寻找生命的重要线索.2013年勇气号火星车在火星表面探测到磷元素,其含量是地球上的5~10倍.现阶段研究认为远古火星曾拥有丰富的水.早期火星环境中磷酸盐释放到水中的速度是地球上的45倍,磷酸盐浓度可能是早期地球的2倍^[6].火星早期水环境中可能富含磷作为支持生物分子合成的基础,沉积在矿物中的磷可能是寻找火星生命的标志性矿物.

火星等以二氧化碳为大气主要成分的行星,大气氧化程度高,不利于产生化学成因甲烷,此种情况下甲烷可能为生物标志物.自2004年发现了火星大气中的甲烷后,引起了学界极大关注,已发表相关论文超过1200篇.然而,甲烷亦有可能来源于非生物机制,如蛇纹石化过程,或光化学分解二氧化碳等;进一步研究探索火星甲烷的来源具有重要意义.目前火星大气甲烷的观察已是美国宇航局(NASA)和欧洲太空总署(ESA)的顶级优先(Top Priority)探索目标,NASA的火星科学实验室可在火星进行原位测量;但ESA轨道卫星遥测存在技术问题,而其发射火星车的计划推迟到2026年或可能更晚.

1.1.2 矮行星和冰卫星宜居性探索

除了地球以外,部分矮行星和巨行星的冰卫星是太阳系中现存地外海洋的一类特殊星体,且其海水化学成分与生命起源时期的地球水体类似,是国际寻找地外生命及解答生命起源奥秘的热点目标.欧美等国家和地区正如火如荼地开展对于地外海洋星体的探索,产生了非常多重大前沿科研成果.例如,2007—2018年美国NASA发射的DAWN探测器,对谷神星开展了详细的遥感探测,揭示了谷神星年轻且活跃的表面冰层结构^[7],指示含有活跃的次表层液态水海洋活动.此外,DAWN通过分析谷神星表面的冰层光谱特征,发现部分区域富含粘土矿物^[8]以及碳酸钠等盐类^[9,10],甚至还有丰富的有机物存在^[11].

2006年,NASA发射的New Horizon探测器,发现冥王星具有年轻的表面形貌特征^[12,13],大气和冰面含有丰富的有机物^[14],并在冰面以下存在液态水海洋^[15],有利于生命的起源和生存.自1972年,NASA联合欧洲太空总署(ESA)相继实施Pioneer, Voyager, Galileo, Cassini-Huygens等探测计划,对木星、土星等巨行星的部分冰卫星开展了遥感探测研究,于国际上率先揭示了诸多冰卫星的宜居性特征.例如,2005—2015年NASA发射的Cassini号对土卫二开展了近轨的观察及部分采样研究,发现其南极地区存在活跃的水冰火山活动^[16],结合重力场和温度场等探测证据^[17,18],揭示土卫二冰下存在全球性的液态水海洋及潜在热液活动,并且富含还原性气体、营养元素以及有机物等^[19-22],可满足微生物生存的基本条件.同期发射的Huygens号探测器,对土卫六开展了遥感及着陆探测,发现土卫六大气及表面富含有机物^[23,24],包括部分生命分子或其前体物质^[25,26],甚至形成了有机岩和液态烃湖泊^[24].此外,对于Huygens号探测数据的解读也发现土卫六冰壳以下可能存在液态水海洋^[27],可能有利于微生物生命的起源和生存.除了上述冰卫星,木卫二、木卫三、木卫四及海卫一等冰卫星均被认为含有液态水海洋.

当前,对于部分小行星和冰卫星等冰下海洋宜居性及潜在生命信号的探测已经成为世界科技前沿.据不完全统计,近20年间,Nature和Science正刊发表了近400篇有关Ceres, Pluto, Enceladu, Europa, Ganymede, Callisto, Titan等矮行星和冰卫星研究的成果(webofscience.com, 2023年统计数据),发表在Nature和Science子刊及PNAS等权威期刊的成果更多.但是,目前小行星及冰卫星宜居性探测主要由欧美主导,几乎所有的成果都与美国NASA及欧盟ESA相关的探测计划有关,且绝大部分成果是欧美第一单位发表.

未来,ESA正在论证Calathus计划,对谷神星宜居性和生命信号开展探测.2023年4月,ESA成功发射JUICE号,计划对木卫二、三、四实施近轨遥感探测.此外,美国NASA计划分别于2024年和2027年发射Europa Clipper号及Titan Dragonfly号对木卫二及土卫六开展近轨探测,并实现部分样品采集分析.这些探测计划的首要科学目标是制约地外海洋的宜居性并寻找潜在生命信号.

1.2 空间基础生物学与医学基础

1.2.1 空间环境对航天员的影响

空间生命科学和医学研究以目前国际空间站为主要平台, 将获取新的基础科学成果和转化应用成果. 空间站的微重力、辐射、亚磁等复合环境因素能直接或通过生物间相互作用对航天员产生特殊效应, 对其研究不仅有利于保障航天员安全, 亦可促进地面相关领域研究.

美国 NASA 的空间亚健康研究包括航天员健康状况研究、动物实验、细胞实验、药物试验等工作. 为评估长期空间任务 (>300 天) 对航天员健康的影响, NASA 利用同卵双胞胎构建了航天飞行和地面对照^[28]. 通过在任务之前、期间和之后对两人的多维度组学和生理数据进行监测, 该研究纵向评估了航天期间特有的人体变化, 包括端粒伸长、基因组不稳定等. 在返回地球后的 6 个月内, 其中部分变化消失, 但观察到短端粒数量增加, 一些与免疫相关的基因组甲基化变化仍未恢复. 这些数据为未来人类空间飞行长期驻留和载人深空探测工程的实施, 进行健康风险评估和防护提供了一个有价值的参考.

空间环境还可能通过影响其他生物对航天员产生威胁. NASA 通过检测 32 位航天员的体液样品, 发现体内潜伏的人类疱疹病毒第四型 (EBV) 等病毒激活现象^[29], 并发展了潜伏病毒快速检测技术. 为了研究空间病原体变异及其潜在危害, NASA 进行了大量的空间实验工作, 2019 年发表的最新研究结果显示, 在国际空间站上残存的几个主要病原菌家族 (葡萄球菌, 芽孢杆菌, 肠球菌) 的部分菌种已变异出耐受杀菌涂层材料 AGXX 的菌株^[30], 亟需更系统全面地研究病原体在空间的变异及潜在危害.

1.2.2 空间环境对动物和细胞的影响

美国 NASA 建立了多种动物实验装置以及多种细胞实验装置. 2018 年俄罗斯利用 3D 生物打印机在国际空间站制造了世界首个活体器官组织. NASA 则在同年利用空间微重力效应在微小的芯片空间内制造了 3D 多细胞组织. 空间生物实验装置在疾病机理和测试新药方面取得了突出成果. NASA 利用空间微重力环境导致骨骼和肌肉流失效应, 推动了多种相关药物的研制, 并进入临床试验阶段. 还发现在微重力环境下, 装有化疗药物微型胶囊能够更加简单高效地直达肿瘤部位, 这两项研究入选《国际空间站 10 大技

术突破》. NASA 还充分利用空间极端环境加速亚健康现象, 进行了动物衰老、高血压和代谢疾病等多种疾病和亚健康模型的实验.

1.2.3 空间环境下的生物技术研究

大量商业航天公司 (例如 NanoRacks)、大型药企 (例如礼来) 正在大举跟进空间生物制药, 项目涉及制药菌种改良、重大疾病治疗、生物制造工程 (疫苗、蛋白质晶体生长、细胞/组织培养)、空间药物制备技术 (微流控芯片、分离提纯技术) 等. 为更高效地整合空间生物组学研究数据, 美国 NASA 还在 2018 年建立了生物信息学数据库 Genelab, 提供了专业的空间生物信息学技术支持^[31].

微生物代谢产物是药物的重要来源. 空间微重力、辐射、亚磁等独特的复合条件有利于激发产药微生物的应激反应, 打开正常环境下沉默的代谢通路, 从而提高药物产率. 美国 NASA 自 20 世纪八九十年代开始进行微生物制药项目, 并发现棕黑腐质霉菌, 褶皱链霉菌等微生物产药量显著提高. 2004—2014 年持续进行了多批次的微生物制造药物、激素、酶等众多项目, 证实了空间制药是提高微生物制药技术水平的重要途径. 然而, 空间环境中也存在微生物易老化, 产药时间变短等问题. 微生物代谢物的产生常依赖于与周边环境、其他微生物、或高等生物的相互作用, 因此未来可构建包含多种生物的系统在空间环境共同培养, 进一步提升产药能力.

空间是研究具有复杂三维结构蛋白质的绝佳环境, 因为消除了重力和对流对晶体形成的影响, 从而可以获得更大更完美的晶体和高浓度晶体悬浮液, 有利于对蛋白质结构进行解析. NASA 和日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 数十年来大力发展空间蛋白质结晶技术, 并应用于制造高纯度抗体制剂和支持新药研发项目, 目前有多个空间蛋白质结晶项目正在进行中.

2 中国现状和发展态势

2.1 空间生命探索

水是生命之源, 哪里有水, 哪里就可能有生命. 因此, 在寻找地外生命的过程中, 是否具有水或有水存在的证据是生命可能存在的最基本条件. 通过对嫦娥五号带回月壤的分析, 国内多个科研机构相继发现月

球表面有水存在的证据^[32]. 中国天问一号探测器在火星乌托邦平原南部着陆地探测到了水活动的原位证据^[33], 嫦娥五号月球原位探测及取回样品分析都发现了羟基水的存在. 这些结果为生命起源研究和进一步进行地外生命探索提供了重要的资料.

磷是地球生命的关键和必要元素之一, 比如遗传物质核酸、细胞膜磷脂和蛋白磷酸化都需要磷的参与. “哪里有磷, 哪里就有生命”也是学界的共识. 中国有研究发现在磷介导下, 氨基酸与核苷之间具有手性互选性, 即左旋氨基酸偏好右旋核苷, 这正是地球生命所使用的手性系统^[34]. 同样地, 在磷存在下, 氨基酸成肽与其遗传密码间存在着一定对应关系, 为早期遗传密码起源研究提供了化学实验模型^[35]. 由此推测, 磷在生命从混沌到有序演化过程中, 很可能发挥着关键作用. 2022年, PNAS发表的中国科学技术大学有关冰卫星研究揭示了土卫二海洋中可能含有丰富的磷元素^[36], 供给潜在生命, 填补了土卫二海洋宜居性研究的学术空白, 被新华社等国内外媒体广泛关注, 且稍后被美国NASA探测数据证实^[37]. 最近, 浙江大学的学者研究揭示了磷酸盐的聚合物—多聚磷酸盐能够和带正电荷的寡肽分子、金属离子通过液—液相分离作用组装形成凝聚态液滴类细胞结构, 并通过该原始(人工)细胞模型中存在的一种非酶类抗氧化机制, 在极端辐射环境中保护了其中生物分子^[38], 该成果在原始细胞形成和演化研究领域向前迈出了重要的一步; 此外, 该团队还在多聚磷酸盐降解酶的分子机制和结构进化上取得研究进展, 研究发现了一种基于酶分子结构域之间 α -linker的细菌多聚磷酸盐降解酶PPX结构演化规律, 即其 α -linker的长度在不同细菌间存在多样性, 且影响了酶的结构、活性和热稳定性, 揭示了PPX的分子演化与细菌的磷循环和环境适应性上的潜在关系^[39].

中国科学院地球化学研究所欧阳自远等利用火星陨石进行有机质的检测发现, 其碳同位素组成明显轻于火星大气中的二氧化碳和碳酸盐, 该成果提供了一个潜在的生物成因线索^[40]. 厌氧微生物代谢过程中可能产生甲烷, 在氧化大气条件下, 甲烷的存在也可以作为生命印记或行星宜居性标志. 中国研究确定了柴达木盆地甲烷的赋存状态、含量范围和碳同位素组成以及最终其盆地深部来源^[41]. 据此可以推测火星盆地表面大量分布的石膏脉与此类似, 应携带深部甲烷, 因此可能是火星表面最易获取的来自深部的有机

碳的信息.

2.2 空间环境对生物体的影响探究

空间环境主要包括空间辐射、微重力和磁场. 研究这些空间环境因素对生物体的影响, 对于航天员的生命健康有重要意义, 此外对其他方面例如空间育种等也有重要的帮助.

中国空间辐射相关研究已近30年, 利用水稻种子、模式动物线虫、拟南芥及其突变体开展多次空间搭载实验, 系统研究了空间辐射诱发的表型、基因组和表观遗传学的影响特征^[42], 解析了空间高能粒子引起的基因组不稳定的可能机制^[43-49]. 从“靶效应”和“非靶效应”角度, 构建了基于辐射损伤与损伤过程的多种辐射生物物理模型, 这些模型能很好地预测不同辐射品质下的生物学效应, 揭示不同辐射品质下的相对生物学效应变化规律, 能较好的应用于辐射损伤评估^[50-55]; 该成果丰富了辐射生物学理论, 为空间辐射健康风险评估提供了重要理论支撑. 此外, 针对空间辐射生物学数据的特点, 建立了基于特征选择的空间辐射敏感分子标记物筛选算法, 并用于神舟八号以及国际空间站搭载的秀丽隐杆线虫和小鼠多组学数据分析, 发现了多种可用于空间辐射计量的可能分子标志物^[56-60], 可用于空间辐射健康风险早期诊断.

中国实践十号科学实验卫星任务包括“空间微重力条件下光周期诱导高等植物开花的分子机理”. 该实验为解析微重力在开花调控中的作用提供了第一手实时数据. 所构建的热激启动系统与实时荧光图像系统, 为后续空间站植物生长关键基因的在轨实时观察提供了重要的实验系统与分子生物学工具. 2016年12月, 中国天宫二号空间实验室任务“空间微重力条件下高等植物生殖生长调控机理研究”, 首次实现了微重力条件下拟南芥从“种子到种子”, 标志中国空间长期植物培养实验开始^[61,62]. 2022年12月, 中国空间站任务“微重力条件下高等植物开花调控的分子机理”在国际首次实现了水稻“种子到种子”全生命周期及相关适应性机理的研究^[63], 可为后续载人深空探测空间生命生态支持系统中植物培养实验的设计提供参考和技术路径.

在经航天器搭载诱变微生物提高代谢物产量方面, 中国已有一定研究基础. 中国医学科学院药物研究所利用神舟三号搭载能生产新型免疫抑制剂Kanglemycin C的地中海诺卡氏菌5株, 返回地面后培养

发现其中一株产量比对照组增加了 200%。中国科学院沈阳应用生态研究所在神舟七号搭载生产维生素 C 前体 2-酮基-L-古龙酸的混合培养普通酮古龙酸菌与苏云金芽孢杆菌, 地面结果显示摇瓶发酵中最好一组菌对 L-山梨糖转化为 2-酮基-L-古龙酸的转化率由 82.7% 显著提高至 95.0%。

2.3 航天医药

围绕保障航天员安全、健康和高效工作, 中国研发了系列航天特因环境模拟装置和脑健康中药药效评价装置, 创建了功能完善、体系完整、高自动化和智能化的改善学习记忆、情绪(抑郁、焦虑等)和睡眠等航天应激所致脑功能损伤及中药防护评价技术体系, 开创了中医药和航天医学相结合的航天中医药研究领域。宁波大学建立的 SpaceLID (空间生命探索数据库), 通过挖掘公开可用的空间生命科学数据, 保存了 448 项科学研究的数据^[64-66]。这些研究代表了多种空间极端环境对生物有机体的影响, 包括重力水平(微重力、超重力)、电离辐射、昼夜节律干扰和大气压以及关于各种生物的特征和样本培养、保存、处理方法等详细的试验流程信息及重要结果、结论等信息。SpaceLID 将充分发挥空间科学数据的应用价值, 扩大数据的使用范围, 为人类空间探索提供强有力的支持。

3 空间生命未来重点发展方向和目标

3.1 总体目标

空间生命科学是空间科学领域不可或缺的一个重要方向, 也是国际航天大国竞相争夺的战略制高点之一, 其水平高低直接体现了一个国家空间科学在国际上的地位。因此, 空间生命学科的建设与发展对中国空间科学强国建设具有十分重要的意义。本学科的总体目标是, 坚持重大科学目标牵引, 重大成果产出导向, 充分发挥空间科学卫星、空间站等空间科学实验平台的作用, 紧紧围绕本学科的前沿、重大科学问题开展原始创新研究, 在“地外生命探寻与演化”、“地球生命在火星宜居性、原位资源利用和宜居化改造”以及“深空辐射风险评估和防护体系”等三个方面的研究实现重大突破, 通过若干年努力, 研究成果在总体上超越欧洲 ESA, 与美国 NASA 并驾齐驱。

3.2 前沿科学问题

空间生命科学的重要问题是地球生命从哪里来, 如何从混沌到有序, 其基本规律是否与地外生命一致, 这些问题的答案需要从微生物、动植物等单一物种到跨界物种之间相互影响等层面进行研究, 研究的成果将进一步为深空探索提供科学支撑。因此, 重大前沿科学问题包括: 地外生命起源和演化的关键机制及其普适性, 地球生物体在空间环境下的生命现象及机制是什么, 如何利用空间平台拓展特殊空间生物技术, 如何在医学角度有效支撑空间探索活动。

3.2.1 地外生命起源和演化的关键机制及其普适性

从空间站宇宙生物学研究平台到宇宙空间, 探索宇宙(包括地球)生命如何起源、演化; 地球极端环境中的生命现象与存在的形式; 地外生命及生命迹象的探索; 在特殊空间下开展生命有机分子的生成实验, 探索核酸等生物大分子的原位合成, 考察空间生命分子同手性起源和遗传密码起源等基本科学问题, 为生命物质基础的原位储备提供理论及实验基础; 寻找宜居性的星系, 为地球生命在火星原位资源利用和宜居化改造提供科学依据。

(1) 生命分子的手性与遗传密码的规律是否在太阳系里具有普适性。生命起源的最关键问题是手性起源和遗传密码起源。地球上从手性混沌和物质混沌, 经过何种机制可以演化产生生命, 即手性同一性和遗传密码规律。目前, 在不同空间环境, 已检测到氨基酸、核苷酸和糖类等生命有机分子, 但仍不能证明在这些空间环境里有生命。因此, 需要探索生命是如何从混沌到有序的关键机制, 才有助于地外生命的探索。进一步地, 将回答生命分子的手性现象和遗传密码规律在太阳系内是否具有普适性。

(2) 火星生命迹象的探测。对宇宙的创生和生命密码的理解将深刻地影响人类对宇宙和自身的认识。起源问题一直是人类科学探索的圣杯级问题。关于地球生命起源的证据最早可以追溯到 38 亿年前, 但仍然不清楚生命在地球上如何发生。火星保存了大量地表年龄比地球的年龄老得多的岩石, 由于其不存在板块构造, 很可能保留了前生命化学过程的证据及相关的生物标志物(Biosignature)。中国与美国是迄今唯二成功在火星上运行科学探索着陆器和火星车的国家, 而且都计划在 2030 年返回火星样品到地球。生命起源于宜居环境, 对火星采样返回可以了解类地行星

的地质、气候及宜居环境的演化等诸多重大科学问题。过去几十年对火星的遥感研究发现了多样的宜居环境, 包括热泉, 地下水, 湖泊, 干盐滩等。对这些宜居环境进行遥感及就位探测, 可能对火星生命的科学认识上追平美国; 在 2030 年返回最有意义的样品, 从而在寻找火星生命这一重要科学问题上首先获得重大突破。甲烷在宇宙中非常常见, 是最简单和最富集的有机物分子。甲烷在火星大气中会发生复杂的光化学反应, 其存在周期大约只有 300 年, 这也暗示有正在活动的非生物或者生物过程释放甲烷。在地球表面沉积环境和大气中的甲烷超过 71% 为生物成因; 由于其生物成因的重大科学意义, 欧空局和美国国家航空航天局均将火星大气甲烷成因的探索列为其最优先 (Top Priority) 进行的项目。其中, 以欧空局主导的 ExoMar 的轨道观测具有很大的不确定性和涉及观测灵敏度的问题。美国国家航空航天局的火星探测可以在火星表面进行实地测量和对所采集的地面样品进行质谱测量。根据现在对类火星环境和材料的研究, 可能优先发射有针对性的火星表面样品原位采样和分析探测器, 率先获得对火星深部碳循环的认识, 因为若现在有火星生命, 应存在于火星的深部环境。

(3) 矮行星 (如谷神星)、小行星和彗星上氨基酸的形成、保存和传播。这将是理解太阳系生命起源和分布的关键。地球是迄今所知太阳系唯一驻有生命的星球。但越来越多的研究发现冥古宙的地球环境并不适合氨基酸的合成, 甚至地球生命的发源地也可能不在地球。对小行星样品返回和陨石氨基酸的研究发现, 保存在小行星 (和彗星) 上的氨基酸具有高的丰度和结构多样性。在将来对小行星或彗星的飞跃观察和样品返回研究将能够解释氨基酸在太阳系演化早期过程中的形成、保存和释放到行星表面的过程。该研究将为理解整个太阳系生命密码的同源性和多地起源的可能性提供重要的基础。

(4) 太阳系中冰卫星等小天体液态水与生命起源。这是国际深空探测计划寻找地外生命及解答生命起源奥秘的热点目标。地外海洋的海水成分, 尤其是生命营养元素及有机物, 是探究生命宜居性的关键。目前, 有限的地外海洋探测数据均被欧美少数国家掌控。对地外海洋成分及宜居性的超前预研, 有助于为中国深空探测计划的顺利实施提供科学问题及工程需求层面的参考, 及早树立我国在这一领域的全球领

先地位。有关地外海洋的重大前沿科学问题为: 地外海洋星体的结构及演化特征、化学成分和演化历史, 能量和物质交换过程, 适宜存在的生命类型及生命信号的识别; 利用现有探测手段, 判别太阳系外海洋星体的宜居性; 基于对太阳系中冰卫星等地外海洋星体的理解, 论证太阳系外冰卫星等小天体的探测方案, 提出系外生命信号的辨别标准。

3.2.2 地球生命在地外天体的适应性和生存力

研究地球生物的生物大分子、细胞及组织等各层次对空间特殊环境 (微重力、辐射及亚磁) 的响应、适应、生存与变化等科学问题, 研究不同生理层次生物力学特征以及物质运输过程; 挖掘应激机制, 损伤变化和评估方法, 建立行之有效的防护体系; 以哺乳动物与细胞为对象, 研究其生理病理变化和药物调控效应; 实现哺乳动物空间受孕并认识其生殖发育规律, 提升中国空间基础生物学的理论水平, 为宇宙空间人类长期健康驻留, 提供重要的基础实验支撑。

(1) 地球生命在太阳系地外天体 (火星) 适应性和生存力。对火星人类宜居性研究的初步阶段是地面模拟地球生命在火星条件下的适应性和生存力。通过构建由地球极端抗逆微生物、低等植物和动物等“先锋生物”组成的不同进化层次和功能互补的抗逆生物微生态系统, 在地面开展火星模拟环境下地球生命的适应性和生存力研究, 研究极端环境下生态圈的微生物-植物-动物之间的物质传递和能量转化作用, 探究地外宜居环境的可行性, 并探讨地球生命利用火星原位资源 (二氧化碳、磷酸盐、高氯酸盐等) 的能力, 以及研究地外空间极端环境条件下生物体中多聚磷酸盐等聚合物的代谢调控和生理功能。

(2) 人类在地外长期适应并生存的原位资源利用。随着当代科技的快速发展, 建设月球中转站、载人火星等极具挑战性的航天任务已提上日程并具备可实施性。“拓展人类在太阳系的存在”已成为人类共同目标, “我们有可能在另一个星球上长期居住吗?” 已成为全球最前沿的 125 个科学问题之一。人类长期地外生存面临一系列前所未有的挑战, 是人类社会发展将要面对和亟需解决的重大问题。需探索在地外天体上获取原位资源并将其转化为可呼吸的空气、食物、水、燃料、建筑材料以及生产制造材料等人类生存和活动所需的基本物资和能源, 构建基于原位资源利用的开放体系地外居住系统。

3.2.3 如何利用空间平台拓展特殊空间生物技术

特殊空间生物技术及转化研究是瞄准前沿和特殊生物学问题的创新研究方法技术。一方面是利用空间微重力和辐射等复合特殊条件, 研发新型多用途的细胞与组织器官生物材料、生物制品、制剂, 实现在地面难以达到的效果; 另一方面则是为空间的前沿生命科学研究或特殊问题开发专用的实验方法技术, 旨在服务地面经济与社会发展的空间生物医药与技术研究。例如发展空间合成生物学以糖、淀粉、维生素等重要营养物质为对象的制造技术研究等。

在对生命体生命活动的研究方面, 从传统的单一微生物拓展到多个微生物的菌群协同作用研究, 进一步到微生物与低等植物的跨物种共生作用研究。在空间制药领域研究方面, 充分利用多物种的应激反应系统; 利用微生物沉默基因在空间被激活后产生的新型次生代谢产物用于药物的研发; 基于空间环境研究中医药对航天生物应激损伤的防护功能。利用便携式返回舱——“生命快船”, 实现空间样本快速返回地球进行充分分析。

3.2.4 如何在医学角度有效支撑空间探索活动

支撑航天员长期在轨的生命保障、健康维护和工作效率的基础和应用基础科学研究, 包括空间环境下人体生理、心理性改变及分子机制是什么, 空间环境下人体病理性改变及可行的对抗措施是什么, 关注空间复合环境下的心血管功能失调、骨质流失、肌肉萎缩、免疫功能减弱、神经系统功能障碍、空间运动病、时间节律改变、心理学变化等, 自主提升中国航天医学基础的同时, 有效实现空间医学地面转化应用。

3.3 重点发展方向

3.3.1 生命从混沌状态演化到有序的关键机制

不论低等生物(如细菌)还是高等生物(包括人类), 都是利用相同的遗传密码系统, 而地球生命出现之前都是手性混沌和物质混沌的, 那么是通过什么机制经漫长演化到手性单一且有序生命世界, 遗传密码系统又是通过什么机制从无到有进化而来的, 这一过程的关键机制有待阐明。

(1) 空间生命分子的合成以及生命起源关键机制研究。基于中国空间站开展生命分子的生成实验, 核酸等生命分子的合成探索; 探索空间生命的可能存在和空间生命起源关键机制等基本科学问题, 为生命从混沌状态演化到有序的关键机制研究及生命物质基

础的原位储备提供理论及实验基础; 空间生命大分子到原始细胞的自组装到空间合成生物制造技术应用, 实现二氧化碳到主要食物原料和维生素等营养因子的高效定向合成, 为空间站人员长期驻留提供持续的生存物资供给。关键的科学问题是回答生命起源与演化的关键机制是什么。

(2) 探索火星是否现在存在生命, 是否曾经存在生命。最晚在 2030 年返回最有可能保存火星生命记录的样品到地球, 率先回答火星现在是否仍存在生命, 是否曾经存在生命的重大科学问题。在火星上对石膏所含包括甲烷在内的碳氢化合物进行其组分和碳同位素分析。拟解决的关键内容包括两部分: 关于阶段加热-色谱-质谱仪器的小型化及其在火星表面进行采样和分析的相关技术, 以拉曼或红外光谱都可识别石膏和碳氢化合物, 可以在载荷同时安装其中一个作为该质谱工作的前端设备。关键的科学问题是回答火星上是否有深部幸存的产甲烷菌的存在。

(3) 探索太阳系的生命起源。在 2027 年或之前对矮行星、小行星和彗星进行着陆、原位观测和样品返回, 揭秘太阳系的生命起源问题。有机分子, 特别是氨基酸的形成、保存和传播, 对前生命过程的启示意义。地球、火星和太阳系的生命起源问题的根本在于详细地研究保存在小行星和彗星之中的原始氨基酸的结构多样性和分布。日本的隼鸟 2 号从天宫小行星上返回样品揭示了此类工程在探索太阳系生命起源领域的重要意义。在小行星或彗星上采集的含氨基酸样品不仅可以提供其碳-氢化合物前驱体的特征, 而且可以提供在不同于行星大气环境中的加氧和加氮的氨基酸合成过程。而彗星或小行星上含氨基酸样品也可能记录了这种生命的初始材料在太阳系演化历史上的变化。在该研究中除了样品采集、封存相关技术之外, 需要进行前往和返回样品相关的行星保护方面的研究工作。关键的科学问题是要回答太阳系各宜居行星环境之中的氨基酸是否同源, 进而限定太阳系各宜居环境中可能发源生命的遗传密码是否具有多样性和理解宇宙中生命的普遍性。

(4) 探索冰卫星是否存在生命及其宜居性。进行多次发射任务, 确定冰卫星的宜居性和是否存在生命。2030 年基于天问四号探测计划, 实现木卫二、三、四的遥感探测, 厘定这些冰卫星的冰下结构特征, 估算冰下海水规模及分布特征, 分析冰壳的化学成分, 结

合实验及理论模拟, 推测冰下海水的化学成分, 探测可能的有机物类型及含量. 2040年, 发射探测器, 实现土卫(土卫二、土卫四、土卫六)、海卫(海卫一)等冰卫星的遥感探测, 厘定土卫的结构及冰下海洋规模, 实现部分样品的收集分析, 研究土卫冰壳及海洋成分, 探测有机物, 尤其是生命组成分子; 同时, 利用巡天望远镜, 搜寻太阳系外冰卫星等小天体. 此外, 论证并发射天基天文望远镜, 进一步寻找太阳系外冰卫星等小天体. 关键的科学问题是要回答冰壳及冰下海洋是否具有生命必需的营养元素及有机物等生命信号分子.

3.3.2 地球生命对空间环境应激的适应及改造

与地面环境比较, 空间环境极其复杂, 无论是重力、磁场、辐射、大气、气温都发生了激变, 因此空间生物学中一个极其重要的科学问题就是地球生命是否以及如何适应空间环境应激的, 包括: 地球生物感知(微)重力信号及其信号传导机制; 空间受控环境下生态学基础; 空间辐射损伤与修复的机理; 空间环境下微生物变化规律; 变重力环境调控生命体的力学-生物学耦合规律; 跨尺度力学-生物学耦合的整合研究; 地磁场减弱或消除后的生物学效应及机制; 空间环境下哺乳类的孕育能力与机制等.

(1) 地球生命(包括人类)对空间条件的适应性研究. 基于中国空间站平台, 研究地球生物及组织、细胞、分子等各层次对空间特殊环境的响应和适应、生存与变化等科学问题, 以哺乳动物与细胞为对象, 研究其生理病理变化和药物调控效应, 为空间人体研究的基础研究提供重要支撑; 争取实现哺乳动物空间受孕并认识其生殖发育规律, 研究不同生理层次生物力学特征以及物质输运过程. 关键科学问题是要回答地球生命适应空间环境的必需条件是什么.

(2) 人类在空间长期飞行驻留的支撑和保护体系研究. 针对人类空间长期生存面临的医学和相关科学问题, 深化微重力环境对人的机体调控、组织间交互作用、机体代谢、肠道微生态、衰老调控等生理机制认识, 发展先进的重力生理学理论. 研究人脑在空间特殊环境、密闭飞行条件和工作压力下的影响、适应、调控原理, 群脑协同机制, 生物节律和睡眠觉醒转换与维持的环路机制, 发展可能的脑功能维护措施, 促进对大脑和思维奥秘; 研究人-机器人协同, 包括语音、手势、眼动、脑电等先进人机交互技术, 为航

天员作业服务. 关键的科学问题是回答人类在空间长期飞行驻留的支撑和保护体系是什么.

(3) 地球生命在太阳系地外天体(火星)生存能力研究. 在现有自主研发的火星综合环境模拟舱(原理机)的基础上进一步升级完善, 完成多种地球抗逆生命物种的筛选与测试, 构建由地球极端抗逆微生物、低等植物和动物等“先锋生物”组成的不同进化层次和功能互补的抗逆生物微生态系统; 研究极端环境(低温、低氧、亚磁场、微重力、强辐射、干燥等)下生态圈的微生物-植物-动物之间的物质传递和能量转化作用, 并探讨地球生命利用火星原位资源(磷酸盐、高氯酸盐、二氧化碳等)的能力; 研究在地外空间极端环境条件下, 多聚磷酸盐等聚合物代谢及其对极端环境微生物胞内核酸、蛋白质稳态的调控功能和作用机制. 关键的科学问题是回答地球生命在太阳系地外天体(火星)能够生存的条件是什么.

(4) 地外宜居环境构建及原位资源利用. 基于空间站开展“植物-微生物-动物”等陆生和水生空间生命生态支持组合系统研究; 通过地外星球原位资源的开发与利用实现水、氧气等基本生活物资以及热、电等基本能源的原位补给, 构建地外宜居环境, 逐步摆脱地球补给依赖; 通过微生物实现火壤改造并具备种植生产能力, 发展火星农业, 实现食物自给自足, 具备建立火星局域生态圈的物质和科学基础; 开展以火星为代表的地外人类宜居生境探索与人工生态系统创建. 关键的科学问题是回答地球生物体在火星生命活动的基础条件和规律是什么.

3.3.3 中长期航天飞行和驻留的医学基础问题

中长期空间飞行对人类健康的影响包括: 暴露于失重及生物钟变化环境产生的生理变化及其机制(心血管功能失调、废用性肌肉萎缩、失重性骨质流失、免疫功能下降、航天贫血症和空间运动病等); 宇宙辐射对健康的危害(肿瘤发生、白内障等); 长期幽闭环境对心理的影响(空间乘员心理相容性、环境心理适应性等). 利用多种模式生物研究空间环境下生命的衰老、再生与调控机制.

(1) 空间辐射及其他空间环境因素对生命的协调效应. 空间辐射与其他空间飞行的因素(微重力、昼夜节律变化等)之间是否对人体生理健康存在相互作用, 是什么相互作用, 个体辐射敏感性及与遗传背景的关联等都需要进行研究. 特别是月球和火星的重力

与近地轨道的微重力不同,需要在对应的微重力环境进行分析.关键的科学问题是回答空间辐射及其他空间环境因素对生命的协调效应.

(2) 深空辐射诱发生物体基因组不稳定与环境适应性.空间辐射诱发生物体基因组稳定性变化,是由于生物体受到胁迫后会自组织一系列修复功能,参与这一过程的分子机制仍然不清楚,该机制的研究对地球生物进化提供重要的信息.关键的科学问题是回答深空环境诱发生物体基因组不稳定的机制是什么.

(3) 面向空间生命科学的创新性 AI 方法和空间生物信息平台.使用创新方法分析和挖掘观测数据是产生新发现的突破口.目前,在空间生命探索研究产生的数据中,影像和光(波)谱类占据了很大比重.例如天问一号火星车“祝融号”搭载的地形相机、多光谱相机获得火星地表影像;激光诱导击穿光谱仪和近红外-短波红外光谱仪用于探测火星表面成分.火星轨道器上搭载了矿物光谱分析仪.对于尚无法登陆的天体,光(波)谱类数据则是最主要的信息来源,已被用于寻找系外宜居行星、分析行星大气成分等.但对远距离探测获得的弱信号、高噪音的复杂光(波)谱数据,现有分析方法还存在无法解决的问题.创新 AI 方法能够将光(波)谱数据转化为图像,故可利用图像 AI 中较为成熟的弱信号和降噪技术解决现有问题.研究将利用该方法综合分析影像与波谱数据,发挥全景学习的优势.如果能将该技术服务于中国未来的地外天体探索研究中,将有望帮助做出重要发现,并建立一套国际领先的空间探测数据分析方法.关键科学问题是回答 AI 及生物信息学如何为空间生命科学服务.

3.3.4 开展空间特殊生物技术研究

利用空间微重力和亚磁等特殊空间环境,研究干细胞的空间三维培养与组织构建及组织自组装机理;开展空间合成生物学、空间生物工程以及空间生物制造技术研究(空间制药,纳米生物材料的仿生制备)等.以中国空间站为起点及跳板,分阶段逐步推进月球、火星等地外星系发展传统医学诊疗技术航天应用,研究天地不同时间相的脏腑功能和治则治法,运用人源类器官芯片开展空间多因素影响研究,构建预测模型和评估体系,为发展航天员健康检测与维护新技术提供支撑.研发小型化、集成化、智能化、高精度天基检测设备,建设具有国际先进水平的空间人体研究

实验系统支撑实现上述研究目标.开辟基于空间环境的中药制药和健康产品研发新技术提供了不同于地球的独特全新环境.将为利用中国传统中医药形成的独特药食同源养生经验,在空间培养药食同源物质,满足航天员长期空间生活的营养和健康需求提供中国特色的解决方案.关键的科学问题是回答如何利用空间的特殊环境为生命科学服务.

4 结语

空间生命学科的发展是航天强国发展战略的支柱.习近平在“二十大”报告中指出,坚持把发展经济的着力点放在实体经济上,推进新型工业化,加快建设制造强国、质量强国、航天强国、交通强国、网络强国、数字中国.因此,空间生命科学的发展战略,符合国家发展战略规划.

空间生命学科,依托中国空间站、嫦娥工程和天问系列等平台开展相关研究,特别是对地外生命起源与演化、地球生命在火星宜居性、原位资源利用和宜居性改造以及空间基础生物学与基础医学的研究,必将具有原始创新的贡献.同时在辐射损伤的机制和防护的研究为中国深空载人航天工程中航天员筛查、在轨辐射风险评估和防护等方面提供支持.实现抗逆生物微系统载荷的发射和部署,利用月球原位资源的食药同源物质生产和利用,并以月球作为远征火星的跳板进行火星资源的利用和改造使中国处于地外探索的最前沿水平,占领国际空间生命科学领先地位,成为世界空间生命科学中心.

致谢 本文撰写过程中得到陈善广、李莹辉、邓玉林、商澎、刘新民、郭金虎、李艳梅、刘艳、张红雨等空间生命学科相关领域专家学者的指导、支持和建议.

参考文献

- [1] HYODO R, USUI T. Searching for life on Mars and its moons[J]. *Science*, 2021, **373**(6556): 742
- [2] KRASNOPOLSKY V A, MAILLARD J P, OWEN T C. Detection of methane in the martian atmosphere: evidence for life[J]. *Icarus*, 2004, **172**(2): 537-547
- [3] FORMISANO V, ATREYA S, ENCRENAZ T, *et al.* Detection of methane in the atmosphere of Mars[J]. *Science*, 2004, **306**(5702): 1758-1761
- [4] NOVAK R E, MUMMA M J, VILLANUEVA G L. Measurement of the isotopic signatures of water on Mars; Im-

- plications for studying methane[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, **59**(2/3): 163-168
- [5] ADCOCK C T, HAUSRATH E M. Weathering profiles in phosphorus-rich rocks at gusev crater, mars, suggest dissolution of phosphate minerals into potentially habitable near-neutral waters[J]. *Astrobiology*, 2015, **15**(12): 1060-1075
 - [6] ADCOCK C T, HAUSRATH E M, FORSTER P M. Readily available phosphate from minerals in early aqueous environments on Mars[J]. *Nature Geoscience*, 2013, **6**(10): 824-827
 - [7] MCCORD T B, COMBE J P, CASTILLO-ROGEZ J C, *et al.* Ceres, a wet planet: The view after Dawn[J]. *Geochemistry*, 2022, **82**(2): 125745
 - [8] AMMANNITO E, DESANCTIS M C, CIARNIELLO M, *et al.* Distribution of phyllosilicates on the surface of Ceres[J]. *Science*, 2016, **353**(6303): aaf4279
 - [9] CARROZZO F G, DE SANCTIS M C, RAPONI A, *et al.* Nature, formation, and distribution of carbonates on Ceres[J]. *Science Advances*, 2018, **4**(3): e1701645
 - [10] BRAMBLE M S, HAND K P. Spectral evidence for irradiated sodium chloride on the surface of 1 ceres[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(3): e2021GL096973
 - [11] DE SANCTIS M C, AMMANNITO E, MCSWEEN H Y, *et al.* Localized aliphatic organic material on the surface of Ceres[J]. *Science*, 2017, **355**(6326): 719-722
 - [12] MOORE J M, MCKINNON W B. Geologically diverse pluto and charon: implications for the dwarf planets of the kuiper belt[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2021, **49**: 173-200
 - [13] SINGER K N, WHITE O L, SCHMITT B, *et al.* Large-scale cryovolcanic resurfacing on Pluto[J]. *Nature Communications*, 2022, **13**(1): 1542
 - [14] GLADSTONE G R, YOUNG L A. New horizons observations of the atmosphere of pluto[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2019, **47**: 119-140
 - [15] STERN S A, GRUNDY W M, MCKINNON W B, *et al.* The pluto system after *new horizons*[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2018, **56**: 357-392
 - [16] HANSEN C J, ESPOSITO L, STEWART A I F, *et al.* Enceladus' water vapor plume[J]. *Science*, 2006, **311**(5766): 1422-1425
 - [17] NIMMO F, SPENCER J R, PAPPALARDO R T, *et al.* Shear heating as the origin of the plumes and heat flux on Enceladus[J]. *Nature*, 2007, **447**(7142): 289-291
 - [18] IEISS L, STEVENSON D J, PARISI M, *et al.* The gravity field and interior structure of enceladus[J]. *Science*, 2014, **344**(6179): 78-80
 - [19] WAITE J H, COMBI M R, IP W H, *et al.* Cassini ion and neutral mass spectrometer: enceladus plume composition and structure[J]. *Science*, 2006, **311**(5766): 1419-1422
 - [20] WAITE JR J H, LEWIS W S, MAGEE B A, *et al.* Liquid water on enceladus from observations of ammonia and ^{40}Ar in the plume[J]. *Nature*, 2009, **460**(7254): 487-490
 - [21] WAITE J H, GLEIN C R, PERRYMAN R S, *et al.* Cassini finds molecular hydrogen in the Enceladus plume: evidence for hydrothermal processes[J]. *Science*, 2017, **356**(6334): 155-159
 - [22] POSTBERG F, KHAWAJA N, ABEL B, *et al.* Macromolecular organic compounds from the depths of Enceladus[J]. *Nature*, 2018, **558**(7711): 564-568
 - [23] NIEMANN H B, ATREYA S K, BAUER S J, *et al.* The abundances of constituents of Titan's atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe[J]. *Nature*, 2005, **438**(7069): 779-784
 - [24] HÖRST S M. Titan's atmosphere and climate[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2017, **122**(3): 432-482
 - [25] VUITTON V, YELLE R V, MCEWAN M J. Ion chemistry and N-containing molecules in Titan's upper atmosphere[J]. *Icarus*, 2007, **191**(2): 722-742
 - [26] MANDT K E, GELL D A, PERRY M, *et al.* Ion densities and composition of Titan's upper atmosphere derived from the cassini ion neutral mass spectrometer: Analysis methods and comparison of measured ion densities to photochemical model simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, **117**(E10): E10006
 - [27] SOTIN C, KALOUSOVÁ K, TOBIE G. Titan's Interior structure and dynamics after the cassini-huygens mission [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2021, **49**: 579-607
 - [28] 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): eaau8650
 - [29] PIERSON D L, STOWE R P, PHILLIPS T M, *et al.* Epstein-Barr virus shedding by astronauts during space flight[J]. *Brain, Behavior, and Immunity*, 2005, **19**(3): 235-242
 - [30] VAISHAMPAYAN A, GROHMANN E. Multi-resistant biofilm-forming pathogens on the international space station[J]. *Journal of Biosciences*, 2019, **44**(5): 125
 - [31] GALAZKA J M. GeneLab: Open Science for Life in Space[R]. Washington: NASA, 2019
 - [32] HU S, HE H C, JI J L, *et al.* A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang'e-5[J]. *Nature*, 2021, **600**(7887): 49-53
 - [33] WU X, LIU Y, ZHANG C L, *et al.* Geological characteristics of China's Tianwen-1 landing site at Utopia Planitia, Mars[J]. *Icarus*, 2021, **370**: 114657
 - [34] YING J X, DING R W, ZHANG Y M, *et al.* Trimetaphosphate-induced chiral selection between amino acid and nucleoside using ^{15}N - ^{31}P coupling NMR[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2022, **33**(2): 821-824
 - [35] YING J X, FU S S, LI X, *et al.* A plausible model correlates prebiotic peptide synthesis with the primordial genetic code[J]. *Chemical Communications*, 2018, **54**(62): 8598-

- 8601
- [36] HAO J H, GLEIN C R, HUANG F, *et al.* Abundant phosphorus expected for possible life in Enceladus's ocean[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, **119**(39): e2201388119
 - [37] POSTBERG F, SEKINE Y, KLENNER F, *et al.* Detection of phosphates originating from Enceladus's ocean[J]. *Nature*, 2023, **618**(7965): 489-493
 - [38] DAI S, XIE Z M, WANG B Q, *et al.* An inorganic mineral-based protocell with prebiotic radiation fitness[J]. *Nature Communications*, 2023, **14**(1): 7699
 - [39] DAI S, WANG B Q, YE R, *et al.* Structural evolution of bacterial polyphosphate degradation enzyme for phosphorus cycling[J]. *Advanced Science*, 2024. DOI: 10.1002/advs.202309602
 - [40] LIN Y T, EL GORESY A, HU S, *et al.* NanoSIMS analysis of organic carbon from the Tissint Martian meteorite: evidence for the past existence of subsurface organic-bearing fluids on Mars[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2014, **49**(12): 2201-2218
 - [41] LI Y L, LI Z K, QIN X R, *et al.* Gypsum ridges as conduits for deep methane emission in an evaporite basin—Insights into the origin of atmospheric methane on Mars[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2024, **641**: 118834
 - [42] SUN Y Q, WANG W, ZHANG M, *et al.* Space radiation systems biology research in SJ-10 satellite[M]//DUAN E, LONG M. Life Science in Space: Experiments on Board the SJ-10 Recoverable Satellite. Singapore: Springer, 2019: 43-68
 - [43] SHI J M, LU W H, SUN Y Q. Comparison of space flight and heavy ion radiation induced genomic/epigenomic mutations in rice (*Oryza sativa*)[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2014, **1**: 74-79
 - [44] YU X, WU H, WEI L J, *et al.* Characteristics of phenotype and genetic mutations in rice after spaceflight[J]. *Advances in Space Research*, 2007, **40**(4): 528-534
 - [45] GAO Y, XU D, ZHAO L, *et al.* Effects of microgravity on DNA damage response in *Caenorhabditis elegans* during Shenzhou-8 spaceflight[J]. *International Journal of Radiation Biology*, 2015, **91**(7): 531-539
 - [46] GAO Y, XU D, ZHAO L, *et al.* The DNA damage response of *C. elegans* affected by gravity sensing and radiosensitivity during the Shenzhou-8 spaceflight[J]. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 2017, **795**: 15-26
 - [47] ZHAO L, ZHANG G, TANG A P, *et al.* Microgravity alters the expressions of DNA repair genes and their regulatory miRNAs in space-flown *Caenorhabditis elegans*[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2023, **37**: 25-38
 - [48] JIANG J H, ZHAO L, GUO L, *et al.* Integrated analysis of mRNA and miRNA expression profiles in *dys-1* mutants of *C. elegans* after spaceflight and simulated microgravity[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2023, **35**(3): 31
 - [49] GAO Y, LI S, XU D, *et al.* Changes in apoptotic micro-RNA and mRNA expression profiling in *Caenorhabditis elegans* during the Shenzhou-8 mission[J]. *Journal of Radiation Research*, 2015, **56**(6): 872-882
 - [50] ZHAO L, HE X Y, CHEN X P, *et al.* Fitting the generalized target model to cell survival data of proton radiation reveals dose-dependent rbe and inspires an alternative method to estimate RBE in high-dose regions[J]. *Radiation Research*, 2019, **192**(5): 507-516
 - [51] ZHAO L, CHEN X P, TIAN J H, *et al.* Generalized multi-hit model of radiation-induced cell survival with a closed-form solution: an alternative method for determining isoeffect doses in practical radiotherapy[J]. *Radiation Research*, 2020, **193**(4): 359-371
 - [52] ZHAO L, TANG A P, LONG F, *et al.* Modeling of ionizing radiation-induced chromosome aberration and tumor prevalence based on two classes of DNA double-strand breaks clustering in chromatin domains[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, **259**: 115038
 - [53] ZHAO L, MI D, HU B, *et al.* A generalized target theory and its applications[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 14568
 - [54] ZHAO L, MI D, SUN Y Q. A novel multitarget model of radiation-induced cell killing based on the Gaussian distribution[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2017, **420**: 135-143
 - [55] ZHAO L, TIAN J T, BORASI G, *et al.* Improved asymptotic expansions in high- and low-dose ranges for generalized multi-hit model of radiation-induced cell survival[J]. *Radiation Research*, 2021, **196**(3): 306-314
 - [56] ZHAO L, GAO Y, MI D, *et al.* Mining potential biomarkers associated with space flight in *Caenorhabditis elegans* experienced Shenzhou-8 mission with multiple feature selection techniques[J]. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 2016, **791-792**: 27-34
 - [57] ZHAO L, LI Z J, HUANG B H, *et al.* Integrating evolutionarily conserved mechanism of response to radiation for exploring novel *Caenorhabditis elegans* radiation-responsive genes for estimation of radiation dose associated with spaceflight[J]. *Chemosphere*, 2024, **351**: 141148
 - [58] ZHANG Y, DU X H, ZHAO L, *et al.* Construction of dose prediction model and identification of sensitive genes for space radiation based on single-sample networks under spaceflight conditions[J]. *International Journal of Radiation Biology*, 2024, **100**(5): 777-790
 - [59] ZHANG Y, ZHAO L, SUN Y Q. Using single-sample networks to identify the contrasting patterns of gene interactions and reveal the radiation dose-dependent effects in multiple tissues of spaceflight mice[J]. *npj Microgravity*, 2024, **10**(1): 45
 - [60] ZHAO L, HE X Y, SHANG Y X, *et al.* Identification of potential radiation-responsive biomarkers based on human orthologous genes with possible roles in DNA repair path-

- ways by comparison between *Arabidopsis thaliana* and *homo sapiens*[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **702**: 135076
- [61] XIE J Y, WANG L H, ZHENG H Q. Molecular basis to integrate microgravity signals into the photoperiodic flowering pathway in *Arabidopsis thaliana* under spaceflight condition[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, **23**(1): 63
- [62] WANG L H, XIE J Y, MOU C H, *et al.* Transcriptomic analysis of the interaction between *FLOWERING LOCUS T* induction and photoperiodic signaling in response to spaceflight[J]. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 2022, **9**: 813246
- [63] JIA C X, ZHENG W B, LIU F W, *et al.* Biological culture module for plant research from seed-to-seed on the chinese space station[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2024, **42**: 47-52
- [64] WANG S S, WANG T, ZENG X, *et al.* Exploring outer space biophysical phenomena via SpaceLID[J]. *Scientific Reports*, 2023, **13**(1): 17400
- [65] WANG S S, WANG J Y, ZENG X, *et al.* Database of space life investigations and information on spaceflight plant biology[J]. *Planta*, 2023, **258**(3): 58
- [66] WANG J Y, WANG T, ZENG X, *et al.* Database of space life investigations and bioinformatics of microbiology in extreme environments[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, **13**: 1017773

作者简介



赵玉芬 女, 1948年12月出生于湖北武汉, 1991年当选中国科学院院士. 现任天体化学与空间生命——钱学森空间科学协同研究中心主任, 宁波大学新药技术研究院院长、教授, 清华大学、厦门大学教授. 博士生导师, 主要研究方向为天体生物学、生命起源、生命有机磷化学、化学生物学等.
E-mail: zhaoyufen@nbu.edu.cn