0254-6124/2026/46(6)-0001-10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

MA Hong, KONG Shuo, WANG Zhimin, LÜ Xuefei, ZHANG Ying, GUO Pei, ZHANG Ruoyao, LI Zhao, QI Xiaoyue, ZHANG Yongqian, DENG Yulin. Research Progress of Space Environmental Microorganisms: Review of China's Achievements during the 14 th Five-Year Plan Period (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(6): 1–10. CSTR:32142.14.cjss.2026–0035. DOI:10.11728/cjss2026.06.2026–0035

“十四五”期间中国空间环境微生物研究进展*

马 宏[1] 孔 硕[1] 王志敏[2] 吕雪飞[1]
张 莹[3] 郭 佩[4] 张若瑶[1] 黎 朝[1]
祁晓月[1] 张永谦[1] 邓玉林[1]

1(北京理工大学医学科学与工程学院 北京 100081)

2(北京理工大学前沿交叉科学研究院 北京 100081)

3(北京理工大学生命学院 北京 100081)

4(中国航天科技集团中国空间技术研究院 北京 100086)

摘 要 随着中国航天事业的高速发展, 载人航天任务执行频率不断增加, 航天员在轨驻留时长显著延长, 微生物对航天员健康、空间站环境及设施的影响日益突出, 空间环境中的微生物活动已成为影响航天任务成功实施的关键因素之一. 空间特殊环境会致使人体菌群平衡失调, 与多系统功能损伤直接相关, 而空间环境微生物的变异与污染同样是航天员身体健康的潜在威胁. 此外, 部分微生物还会对航天器材料和设施造成严重腐蚀. 因此, 深入探究微生物在空间环境中的响应规律及其影响机制、开发新型高效的检测平台、研制航天器微生物防控技术以及加速空间微生物资源的开发利用, 对于保障未来深空探测任务的顺利开展具有重要意义. 本文对中国“十四五”期间在空间微生物研究领域取得的重要进展进行系统梳理, 涵盖微生物检测、航天器微生物防治、微生物资源利用等方面内容, 旨在为未来空间微生物的防控与利用提供参考.

关键词 “十四五”, 空间环境, 微生物检测, 微生物防治, 微生物资源利用

中图分类号 V524.1

Research Progress of Space Environmental Microorganisms: Review of China's Achievements during the 14 th Five-Year Plan Period

MA Hong[1] KONG Shuo[1] WANG Zhimin[2] LÜ Xuefei[1]
ZHANG Ying[3] GUO Pei[4] ZHANG Ruoyao[1] LI Zhao[1]
QI Xiaoyue[1] ZHANG Yongqian[1] DENG Yulin[1]

1(*School of Medical Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081)

* 载人航天工程航天医学实验领域项目资助 (HYZHXM02003)

2026-02-11 收到原稿, 2026-07-01 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

2(*Advanced Research Institute of Multidisciplinary Sciences, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081)

3(*School of Life Science, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081)

4(*China Academy of Space Technology, China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing* 100086)

Abstract With the rapid development of China's space industry, the frequency of manned space missions has increased significantly, accompanied by substantially extended in-orbit residence durations for astronauts. Consequently, the impact of microorganisms on crew health, space station environments, and facility integrity has become increasingly prominent, rendering microbial activities in space a critical factor influencing mission success. The unique space environment disrupts human microbiome homeostasis, directly correlating with multi-system functional impairments, while microbial mutation and contamination in space pose additional threats to astronaut health. Furthermore, certain microorganisms can induce severe corrosion of spacecraft materials and equipment. Therefore, investigating microbial response patterns and underlying mechanisms in space, developing novel and efficient detection platforms, establishing microbial prevention and control technologies for spacecraft, and accelerating the exploitation of space microbial resources are of paramount importance for ensuring the success of future deep-space exploration missions. This review systematically summarizes significant advances in space microbiology research achieved by China during the 14th Five-Year Plan period, encompassing microbial detection, spacecraft microbial prevention and control, and microbial resource utilization, aiming to provide references for future microbial prevention, control, and utilization in space.

Key words The 14 th Five-Year Plan, Space environment, Microbial testing, Microbial control, Microbial application

0 引言

伴随中国航天活动从近地轨道向深空探测领域拓展, 在空间站、月球乃至火星等复杂地外环境实现长期驻留已成为必然走向. 航天活动所面临的空间环境, 是由封闭空间、宇宙辐射以及微重力等多种复杂因素相互作用而形成的极端系统, 目前针对该环境对生命机体影响的研究仍处于起步阶段[1,2]. 但已形成共识的是, 微生物作为地球上适应能力最强、分布范围最广的生命形态, 其在空间环境中呈现出的独特生物学行为与变化, 既构成了潜在的生物安全隐患, 也是具备开发利用价值的珍贵生物资源[3–6].

此前, 基于国际空间站 (International Space Station, ISS) 的研究已在空间微生物的适应性、腐蚀机理及对宿主健康影响等方面取得了系列认识[7–9]. 研究证实, 微重力与辐射环境能够改变微生物的生物被膜形成能力以及基因表达, 进而对航天器材料造成腐蚀威胁. 同时, 空间环境还会影响航天员体内的菌群平衡, 进而诱发一系列疾病. 因此, 深入探究微生物的空间响应机制, 并发展高效的监测与调控技术, 是保障长期载人深空探测任务顺利实施必须解决的重大科学问题.

“十四五”时期是中国迈向航天强国的关键阶段. 随着中国空间站的全面建成, 依托这一国家级空间实验平台, 中国的空间微生物学研究迎来了前所未有的发展契机. 在这一阶段, 空间微生物学研究不仅聚焦于探索微生物在极端空间环境下的生存机制与适应性变化, 更致力于揭示这些变化对中国航天器材料安全以及生态系统稳定性的潜在影响. 通过系统性的实验设计与数据分析, 空间微生物研究不断深入推进, 为未来的深空探测任务提供坚实的科学与技术支撑. 本文对“十四五”期间中国在空间微生物领域取得的一系列重要进展进行系统性回顾, 着重梳理空间环境微生物发现与监测、航天器微生物防治和空间微生物资源利用等方面的内容, 以期为中国未来载人航天任务中的微生物资源化利用和风险管理提供参考.

1 空间环境微生物的发现

截至目前, 载人航天飞行器内部已检测出超过两

百种微生物. 这些微生物以航天员代谢产物及飞行器材料作为营养来源, 在空间环境中繁殖并形成生物膜. 生物膜可对电气设备产生腐蚀作用, 导致水循环管道堵塞, 直接威胁航天任务安全及航天设备使用寿命. 此外, 部分条件致病菌可能损害航天员身体健康, 引发呼吸道、皮肤等疾病, 增加在轨医学事件发生概率[10–15]. 因此, 综合运用先进检测技术手段, 精准确定中国空间站环境微生物的种属范围, 对于保障航天员执行任务的安全性以及延长航天器使用寿命具有重要的现实意义.

1.1　综合微生物培养鉴定策略的实施

微生物培养检测法作为检测微生物的权威标准方法, 通过营造适宜条件促使样本中的微生物形成可见菌落, 进而实现计数与鉴定的目标. 2022 年, Lu 等[16] 针对中国某航天器组装、集成和测试厂房的表面环境及内部空气, 采用平板培养法并结合 16 S rRNA 基因序列分析, 共计鉴定出 13 株细菌. 这些细菌涵盖了多个属种的常见环境微生物, 其中 9 株属于芽孢杆菌属 *Bacillus*. 研究团队进一步对这些细菌的生长特性、代谢途径等进行了深入分析, 经极端环境耐受力、成膜能力以及抗生素耐药性测试, 发现这些细菌均为耐盐、耐酸、耐碱的微生物, 具备抵抗热激和紫外光的能力, 多数具有较强的成膜能力, 且均对红霉素和四环类抗生素表现出较强的耐药性. 此外, 该研究还优化了平板培养法的操作流程, 提高了微生物鉴定的准确性和效率. 研究结果显示, 这些细菌可能最终附着于航天器内部, 造成潜在污染. 可见, 综合运用培养法和生信分析手段, 再对比已知的航天器不同区域的微生物分布情况, 在明确航天器组装过程中各环节的微生物污染风险点方面取得重要进步, 可为后续制定针对性的防控措施提供科学依据.

1.2　新型微生物培养发现策略的实施

微生物的不可培养性一直是微生物研究领域面临的重大挑战之一, 传统培养方法往往只能捕获到环境中极小一部分微生物种类. 针对这一问题, 中国研究人员采用了模拟空间环境参数的培养策略, 通过精确调控温度、压力、氧气浓度等关键因素, 成功激活了多种在常规条件下难以培养的微生物的生长潜能. 这一策略不仅显著提高了微生物的检出率和多样性, 还为深入探索空间环境中微生物的生态功能与代谢机制提供了宝贵的研究材料. 2023 年, 北京理工大学与中国空间技术研究院科研团队联合设计出一种新型微生物培养芯片 (cChip), 并结合流式细胞分选技术对空间站冷凝水样本进行筛选培养 (图 1), 成功分离出 9 株真菌 (4 属) 和 30 株细菌 (6 属), 其中包含传统方法未检测出的镰刀菌属 *Fusarium*、大洋芽孢杆菌属 *Oceanobacillus* 及窄食单胞菌属 *Stenotrophomonas*. 宏基因组分析和高通量测序证实了 cChip 在微生物多样性分析方面的补充作用, 揭示了该芯片在高风险菌株监测中的应用潜力. 此研究为

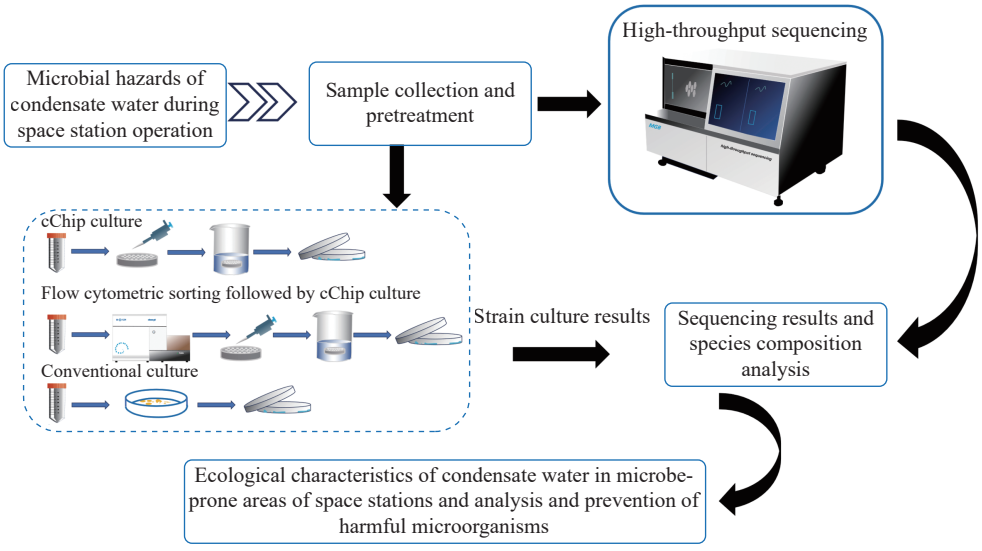


图 1　空间站微生物易滋生区完整生态研究实验流程

Fig. 1　Complete ecological research experiment process for the areas prone to microbial growth in the space station

航天器微生物防治和极端环境微生物生态分析提供了创新性的技术支持[17,18]. 可见, 极端环境微生物发现新策略的实施, 在模拟空间效应下的功能变化和组成挖掘方面实现了突破, 对于中国长期空间科学任务中的微生物防治与行星保护具有重要的科学价值.

1.3 空间微生物检测能力的提升

在空间微生物检测能力的提升方面, 中国科研团队取得了显著进展. 一方面, 通过优化现有的微生物检测技术, 提高了检测的灵敏度和特异性, 能够更准确地识别和定量空间环境中的微生物种类和数量. 在此基础上, 配套研发了新型的快速检测设备, 这些设备具有便携、高效、自动化等特点, 大大缩短了检测时间, 为空间微生物的实时监测提供了有力支持. 另一方面, 结合最新的人工智能技术, 丰富了空间微生物检测方法体系, 为空间微生物研究提供了规范化的操作指南.

核酸分子检测技术借助对特定核酸序列的检测, 并对其开展定性与定量分析, 以达成检测目标, 在疾病诊断、食品安全以及传染病防控等领域得以广泛应用. 国际空间站曾运用一种水质监测系统, 该系统基于核酸扩增代表性技术 PCR, 实现了对特征微生物的半定量检测, 整个过程仅需 1 h[19]. 环介导等温扩增 (LAMP) 作为一种高效的核酸等温扩增技术, 相较于需变温过程的 PCR 技术, LAMP 能够在恒定温度 (通常为 60～65 ℃) 条件下进行, 操作简便, 无需复杂的热循环, 适用于资源受限、设备简易的空间站及偏远地区, 可实现核酸的快速检测. 2023 年, 中国科学院空间应用工程与技术中心与北京理工大学联合研发出一种用于微生物核酸鉴别的侧向流层析试纸条, 该试纸条基于 LAMP 耦合荧光进行检测. 研究人员制备并表征了 FMs-SA 偶联物, 设计了可与试纸配套的小型化光学检测模块, 能够对金黄色葡萄球菌 *Staphylococcus aureus* 和大肠杆菌 *Escherichia coli* 等空间站常见致病菌进行快速、特异性检测, 整个检测过程在 1 h 内完成, 灵敏度达到 100 copy·μL^{-1}[20]. 2024 年, 中国科学院上海技术物理研究所开发了中国空间站配备的一种微生物在线监测模块 (MOMM). 该模块同样采用基于 LAMP 的等温核酸扩增技术, 在真实空间失重环境下开展了试剂灵敏度和硬件功能验证测试, 同时进行了多项微生物全过程检测实验, 成功验证了对大肠杆菌的有效检测, 确保了 MOMM 的可行性[21].

基于机器学习与深度学习的人工智能图像处理技术在地面微生物检测领域已获得诸多应用, 在需对微生物实施有效监测的空间站同样具备重要应用价值. 机器学习与深度学习算法能够对空间站微生物图像进行精准识别与分类. 通过大量标注的微生物图像数据训练模型, 使其能够快速准确地判断出微生物的种类, 甚至能识别出一些罕见或新出现的微生物物种, 大大提高检测的准确性和全面性. 2021 年, 北京航空航天大学科研团队针对中国空间站密闭舱室的微生物监测问题, 运用特征筛选、图像增强等方法对空间舱铝合金材料的真菌滋生图像进行预处理, 进而得到数据集. 同时, 对随机森林和支持向量机两种模型的识别效果进行了比较, 研究显示支持向量机模型在真菌种类识别方面效果更佳, 准确率达 97% 以上[22]. 不难预测, 借助图像处理技术还能对微生物的生长状态、数量变化等进行实时监测和分析, 获取微生物在不同时间段的图像信息, 利用算法分析其生长趋势、数量波动等情况, 为空间站微生物的动态监测提供有力支持, 有助于及时发现潜在的微生物风险并采取相应措施.

2 航天器微生物防治

微生物广泛存在于地球的各类环境中, 涵盖热泉、深海, 甚至远至外层空间的空间站. 载人航天器作为人类开展空间探索的关键载体, 其内部封闭环境下的微生物污染问题愈发受到关注. 在长期在轨飞行或深空探测任务期间, 空间站等航天器内部适宜的温度、湿度以及营养条件, 为微生物的繁殖与生长营造了有利环境[23]. 因此, 开展航天器内微生物分布规律、腐蚀机制以及防控技术的研究, 对于保障航天员安全、延长航天器在轨寿命具有重要意义.

2.1 微生物分布规律研究

在轨航天器内部滋生的微生物主要源自航天员自身携带、航天器组装过程携带以及物资运输过程携带三个方面. 对航天器相关场所内的微生物实施有效分离与精准鉴定, 是实施针对性防控措施的首要步骤, 具有重要的工程实践意义. 2023 年, 北京航空航天大学与中国医学科学院联合开展研究, 探究模拟微重力和低剂量电离辐射条件下航天器内多细菌种群

的演变及耐药性变化情况, 发现不同群落间的竞争程度降低, 仅在辐射环境下耐药性增强[24]. Liu 等[25] 运用自然沉降法, 对文昌发射场 AIT 厂房等 6 个区域的空气微生物样本展开研究, 通过与空间站微生物分布情况进行对比, 建议将青霉属 *Penicillium*、芽孢杆菌属和曲霉属 *Aspergillus* 作为微生物防治的重点目标. 2025 年, Zhang 等[26] 借助与航天器相同材料制备的膜, 对天和核心舱及问天、梦天实验舱的内部表面 (工作区、睡眠区和卫生区) 的 50 个样品进行检测鉴定, 这些样品涵盖神舟十二号至神舟十四号航天机组于 2021 年至 2022 年的三次飞行, 动态分析了携带微生物的几乎全部来源. 结果表明, 早期仅神舟十二号参与飞行时, 舱内微生物种类均匀度相对较高; 随着神舟十三号机组加入, 假单胞菌属 *Pseudomonas* 开始成为优势微生物. 中国空间站中的多数微生物来源于人体, 且每次乘组轮换后微生物多样性发生显著变化. 由此可见, 针对航天器内部微生物的分布规律, 中国科研人员借助多种采样方法, 全方位采集不同部位、不同运行阶段的微生物样本, 并运用先进的分子生物学技术, 精确剖析微生物的种类、数量以及分布特征, 绘制详尽的航天器微生物分布图谱指日可待.

2.2　微生物腐蚀机制研究

航天器在轨运行阶段, 微生物可通过附着于航天器表面形成生物膜, 进而引发堵塞问题, 或者分泌有机酸对材料造成腐蚀. 通过地面模拟空间环境或在轨进行微生物腐蚀研究, 揭示相关机制, 对长期在轨航天器的微生物腐蚀防控具有重要指导意义. “十四五”期间, 中国科研机构开展了多项关于微生物与航天器材料相互作用的研究, 研究对象主要聚焦于真菌 (表 1).

铜由于具备优异的导电性能, 被广泛应用于电路板制造领域. 北京科技大学联合航天神舟生物等机构, 针对空间环境中巴西曲霉 *Aspergillus brasiliensis* 与铜电路之间的相互作用展开了研究. 为期 90 天的腐蚀测试结果表明, 测试菌株的超微结构、菌丝形态以及有机酸积累量均呈现出显著变化. 在空间环境下, 巴西曲霉分泌的草酸量有所增加. 酸腐蚀和含氧电化学腐蚀可能是导致铜发生腐蚀的主要机制[27].

铝合金凭借其高强度与良好的耐腐蚀性, 在航空航天领域被广泛用作结构材料. 北京科技大学科研团队[28] 针对低剪切模拟微重力环境下蜡状芽孢杆菌 *Bacillus cereus* 对铝合金的腐蚀机理展开研究. 研究结果显示, 蜡状芽孢杆菌代谢产生的有机酸对铝合金的钝化膜造成了明显的化学溶解, 进而加速了局部腐蚀进程. 此外, 该团队还对巴西曲霉在空间环境中对 PCB 聚氨酯涂层的生物降解效应进行了研究[29]. 在中国空间站开展的为期 90 天的测试表明, 空间环境中的真菌在长期低养分环境下呈现出更高的活性, 微重力可能诱导菌株依赖性生长, 促使生物膜增厚, 并产生大量胞外聚合物.

如表 1 所示, 在腐蚀机制研究方面, 中国科研人员已开展了系统性的工作. 深入探究了微生物代谢产物与航天器材料的相互作用, 明确了微生物 (特别是真菌) 通过分泌有机酸等代谢产物引发腐蚀的化学与物理过程. 这些研究涵盖了从巴西曲霉、炭黑曲霉到蜡样芽孢杆菌等多种微生物, 针对铜、铝合金、聚合物等多种航天器材料, 在空间站、模拟微重力及地面辐射等多种环境下的作用, 系统性地揭示了不同微生物对不同航天材料的腐蚀特性与规律.

2.3　微生物防控技术研究

在防控技术研究上, 中国科研人员致力于新型抗菌材料的研发, 这些材料不仅能有效抑制微生物的附着与生长, 还具备良好的物理化学性能, 满足航天器的使用要求; 同时, 开发高效的微生物清除技术, 在航天器在轨运行期间, 快速、彻底地清除微生物污染, 保障航天器的正常运行. 例如, 研发了基于先进氧化技术的微生物清除装置, 该装置利用强氧化性物质破坏微生物的细胞结构, 从而达到快速杀灭微生物的目的, 且不会对航天器材料造成损害. 此外, 还探索了利用特定波长的紫外线照射技术, 通过破坏微生物的 DNA 结构, 有效抑制微生物的繁殖和生长, 为航天器的微生物防控提供了新的手段. “十四五”期间, 随着中国空间站建设的逐步完善, 飞行任务时长不断增加, 微生物精确控制的特点更加凸显.

2022 年, 科研人员针对中国空间站在神舟十二号发射前使用的 5 种消毒纸巾, 开展了对两种不同种群水平微生物的消毒与清除效率的调查研究[36]. 具体而言, 采用实时荧光定量聚合酶链式反应 (qPCR) 技术检测 5 种纸巾擦拭受污染表面后的微生物残留情况, 研究发现, 使用湿巾擦拭高微生物负荷表面时, 可去除的微生物数量多于低微生物负荷表面. 为确保清洁后在轨表面的微生物浓度处于规定范围之内, 每

表 1 近五年 (模拟) 空间环境微生物对工程材料腐蚀行为研究汇总

Table 1 A five-year summary of research on microbial corrosion of engineering materials, encompassing both real and simulated space environments

物种	作用材料	作用环境	主要发现	文献
巴西曲霉 *Aspergillus brasiliensis*	PCB-裸露铜电路	中国空间站 地面同步实验	受高水平铜离子毒性影响, 测试菌的形态发生变化. 地面测试菌通过形成新的细胞壁来降低铜离子毒性的影响; 空间环境下测试菌分泌更多草酸, 与铜离子反应形成草酸盐解毒. 结果表明铜在空间环境下经历更严重的局部腐蚀. 氧浓度差电池和酸腐蚀可能是铜腐蚀的主要腐蚀机制.	[27]
巴西曲霉 *Aspergillus brasiliensis*	PCB-PU涂层	中国空间站 地面同步实验	测试菌的形态、低分子量有机酸分泌量和细胞超微结构等特征在空间中相比地面表现出显著变化. 涂层的劣化与有机酸引起的化学降解和生物膜引起的生物降解有关. 空间环境中测试菌形成更成熟生物膜, 有助于捕获营养及抗逆. 但菌丝大多中空, 细胞器减少, 可能发生了自噬. 地面样品内部出现多空腐蚀, 而太空样本局部腐蚀, 这表明微重力改变了涂层劣化的机制.	[29]
巴西曲霉 *Aspergillus brasiliensis*	镁合金 铝合金 无涂层保护PCB 聚酰亚胺 聚乙烯 硫化橡胶	中国空间站 地面同步实验	验证了微生物–材料相互作用科学实验装置的可行性. 巴西曲霉在空间环境下各种材料中出现了形态变化, 且随着时间延长变化愈发明显. 空间环境下, 微生物对材料的腐蚀趋势加剧.	[30]
耐受酸和铝的微生物: 芽孢杆菌属 *Bacillus*、 青霉属 *Penicillium*、 曲霉属 *Aspergillus*	改良的酸性含铝LB液体培养基	地面实验室	从中国天宫空间站组装洁净室分离出9个细菌菌株与10个真菌菌株. 主要为芽孢杆菌属、青霉属和曲霉属. 表明其具备在极端环境下存活并可能参与金属腐蚀的潜力.	[31]
蜡样芽孢杆菌 *Bacillus cereus*	5 A06铝合金	模拟微重力	模拟微重力环境通过营养限制, 导致蜡样芽孢杆菌分泌胞外聚合物的增加和细胞聚集, 继而导致生物膜形成, 这些变化加速了铝合金钝化膜的降解, 表明微重力会增加航天器水回收系统管道金属的腐蚀风险.	[28]
纤维素降解微生物: 芽孢杆菌属 *Bacillus*、 镰刀菌属 *Fusarium*、 木霉属 *Trichoderma*	滤纸培养基	中国空间站 地面同步实验	空间样本中β-内切葡聚糖酶和胞外总蛋白含量显著增加, 微生物群落结构发生变化, 导致纤维素降解能力增强, 纤维素酶基因上调证实了这一点. 研究为宇航服等航天物品的设计提供了理论依据.	[32]
巴西曲霉 *Aspergillus brasiliensis*	交联聚乙烯	中国空间站 地面同步实验	空间环境中巴西曲霉成膜能力提升, 有机酸分泌显著增加, 较地面高出一个数量级. 交联聚乙烯材料出现裂纹和剥落, 短期内对绝缘性能影响较小. 提示长期任务需关注聚合物材料的微生物腐蚀风险.	[33]
草酸青霉 *Penicillium oxalicum*	5 A06铝合金	地面低剂量质子辐射	在低辐射下, 测试菌的存活率仅24.8%, 但生长速度得到提高, 同时真菌代谢产生的有机酸分泌增加. 相比对照组, 腐蚀更严重. 电化学试验表明, 铝合金腐蚀速率与有机酸含量有关.	[23]
巴西曲霉 *Aspergillus brasiliensis*	铍青铜	中国空间站 地面同步实验	微重力环境使液膜的动力学和腐蚀产物的沉积特性发生改变, 腐蚀层的致密度和厚度显著增强. 空间环境中的腐蚀中二价铜离子富集, 形成致密的复合层, 使腐蚀介质均匀扩散, 将腐蚀模式由地面的垂直渗透变为横向膨胀.	[34]
炭黑曲霉 *Aspergillus carbonarius*、 巴西曲霉 *Aspergillus brasiliensis*	钛合金、铝合金、铁以及铝和铜板	模拟微重力	模拟微重力显著促进测试菌的生长和有机酸的分泌, 其中主要是柠檬酸和草酸大幅增加.	[35]

注 菌株ATCC 16404在历史上及本表部分引用的文献中被称为“黑曲霉*Aspergillus niger*”. 然而, 基于分子鉴定, 美国模式培养物集存库已将其分类更新为“巴西曲霉*Aspergillus brasiliensis*”. 本表采用其当前确认的名称.

100 cm^2 使用 2 张纸巾即可.

2021 年, Yang 等[37] 研发出一种菌斑清除装置. 地面验证的初步结果显示, 该装置在优化后的工艺参数条件下, 杀菌率和菌斑收集率分别达到 99.5% 和 91%, 能够满足载人航天器的使用要求. 经过快速染菌测试, 该装置对易腐蚀菌株金灰青霉 *Penicillium aurantiogriseum* 等的杀菌率和菌斑清除率均在 90% 以上. 在实际应用过程中, 对舱室灯板部位的菌斑清除率达到 99%. 该装置的实际应用有望提升我国在轨防控微生物污染的能力. 针对腐蚀材料, Yang 等[38] 还设计了一种表面原位维护装置. 研究结果表明, 该维护装置对聚氨酯、橡胶和硅胶三种高分子材料表现出良好的耐腐蚀性能和维护效果. 该装置操作简便且安全, 能够实现对菌斑材料的快速修复, 整个过程无臭氧污染和紫外光泄漏现象, 总挥发性有机化合物 (Total Volatile Organic Compounds, TVOC) 未超过封闭舱最大允许浓度.

因此, 为保障中国空间站的长期稳定运行, 应制定并实施更多高效、合理的航天器微生物防治措施. 整合多部门资源, 联合优势研究成果并进行在轨验证, 持续提升中国载人航天器在轨微生物防控能力.

3　空间微生物资源利用

空间环境微生物资源利用的研究, 涉及空间环境微生物基础研究与应用研究两个层次. 在基础研究层面, 中国科研人员深入剖析空间环境微生物的特殊生理特征、遗传变异规律以及与极端空间环境的交互作用机制. 运用一系列先进的实验技术与分析手段, 揭示了空间环境微生物在微重力、高辐射等特殊条件下的生存策略与适应机制, 为进一步开发利用此类微生物资源奠定了坚实的理论根基. 在应用研究领域, 积极探寻空间环境微生物在生物制药、材料合成、环境修复等方面的潜在应用价值. 例如, 利用空间环境微生物的特殊代谢途径, 研发新型药物与生物材料; 凭借其独特的降解能力, 处理空间站内的废弃物与污染物, 实现空间站内环境的自我净化与资源的循环利用. “十四五”期间, 该研究方向的工作主要呈现为天地协同、稳中求进的态势.

3.1　基础研究

诸多研究显示, 微生物可通过改变表型与基因型特征, 以适应空间环境, 这些特征涵盖毒力、代谢、氧化应激以及基因表达等方面. 2024 年, 华东理工大学科研团队将野生型枯草芽孢杆菌株 *Bacillus subtilis* 送往外层空间, 旨在探究空间环境对该菌株的潜在影响[39]. 研究发现, 菌株出现细胞密度增加、生物膜形成能力减弱以及次级代谢能力下降等表型改变. 此外, 研究还揭示了菌株在空间环境中通过增强脂肪酸降解、减少氨基酸合成来改变脂蛋白代谢的机制. 2021 年, 中国人民解放军总医院科研人员开展了模拟微重力对嗜麦芽窄食单胞菌 *Stenotrophomonas maltophilia* 影响的研究[40]. 结果表明, 在模拟微重力条件下, 该菌生长速度加快, 成膜能力增强. 同源基因簇注释分析显示, 生长速度的加快可能与参与能量代谢、细胞内运输和囊泡运输的差异表达基因上调相关. 2024 年, 北京理工大学科研团队研究了模拟微重力对电化学活性细菌的影响[41]. 结果显示, 模拟微重力增强了电化学活性细菌的发电能力, 促进了细胞壁合成和核黄素生成基因的富集. 最大功率提升了 71%, 电荷传递阻抗降低了 39%. 由此可见, 研究微生物在特殊空间环境下的各类适应性变化, 对于获取生命科学领域的新知识至关重要, 研究结果有望为微生物资源的利用开拓新的途径.

3.2　应用研究

微生物具备适应多样化恶劣环境的能力, 在空间环境中可凭借其独特优势开展各类有益应用.

中国地质大学与中国科学院微生物研究所联合开展了关于链霉菌 *Streptomyces* 在模拟微重力条件下对矿物元素浸出影响的研究[42], 该研究借助回转器模拟微重力环境. 研究结果表明, 模拟微重力显著增强了链霉菌的代谢及发育分化能力, 具体体现为菌丝和孢子提前进入发育分化阶段, 有机酸产量有所提升. 当链霉菌与矿物进行共培养时, 在正常重力条件下元素浸出率仅为 0.33‰, 而在模拟微重力条件下元素浸出率达到 3‰. 经分析可知, 链霉菌在微重力环境下分泌更多有机酸是促进各类矿物元素浸出的关键因素.

北京理工大学研究团队[43] 构建了一种基于合成生物学的新型辐射生物剂量传感器, 用于评估辐射和化学试剂对 DNA 造成的损伤. 该工程菌对 Co-60 辐射呈现出显著的剂量效应关系, 能够有效监测 Co-60 辐射剂量, 检测限可达 0.64 Gy. 科研人员还对工

程细菌保护剂进行了优化, 并探究了冻干细菌的保存时长, 最终研制出辐射损伤生物剂量仪. 针对空间环境的特殊需求, 重点设计了具有空间适用性的多腔室微流控灌流培养芯片及其一体化多功能卡盒, 卡盒内集成了电磁阀、注射器、培养基袋及废液袋, 通过与平台适配的供电及通信接口, 成功实现了基因工程菌粉的复苏、灌流培养、光学检测和实验数据的下行传输等功能, 降低了航天员操作的复杂性, 保障了空间生物安全性. 2022 年 11 月和 2023 年 5 月, 作为国际首个基于微生物传感器的主动式辐射生物剂量载荷, 先后两次随货运飞船上行, 完成了三个批次天基实验的在轨实施, 获取了空间站内微生物辐射损伤累积情况的重要检测数据. 可见, 针对空间特殊环境适应性需求开发基于微生物的新型生物载荷, 不仅可为空间环境中工程菌的回收、培养与分析提供保障, 此项航天医学技术也具有成为高效筛查各类放射性物质工具的巨大潜力.

微生物作为地球上最早出现的生命形式, 具备独特优势, 在地面已广泛应用于生物制药等领域. 随着深空探索的推进, 星球可持续原位资源利用已成为学界共识, 微生物冶金与合成生物学亦将为外空基地建设提供助力.

4 结论与展望

“十四五”时期, 中国在空间微生物相关研究领域取得了一系列具有重要意义的进展. 相关基础研究不仅对微生物群落的变化进行了细致描述, 还进一步深入剖析了微重力、辐射等空间环境因素对微生物环境适应性的作用机制, 并与包括国际空间站在内的空间微生物研究形成了交叉验证与补充. 此外, 在监测防控层面, 科研人员研发了基于等温扩增的快速在轨检测、有害菌分离鉴定、航天器微生物污染机理解析、中国空间站冷凝水等特殊样本的微生物分离培养以及高效防控装备等一系列关键技术, 取得了一系列特色鲜明的在轨实验数据与技术成果, 为保障航天员在轨安全提供了有力支撑. 可以看到, 该领域的研究不再局限于现象层面的观察, 而是深入到分子机制、多组学关联以及天地协同验证等维度, 旨在系统地揭示空间环境微生物适应性变化规律, 进而制定新的精准的防控应对策略. 这些成果填补了以中国航天器为特定环境模型的数据空白, 形成了具有中国特色的技术体系和研究思路, 为全球长期载人深空探测的生物安全与资源利用贡献了重要的“中国案例”和“中国方案”.

为助力未来长期深空探测任务的有序推进, 仍需在以下几个方面持续深入研究. 其一, 需进一步强化对空间环境微生物基础特性的探究, 全面剖析其于极端空间环境下的生存、繁衍及代谢机理, 为后续的防控与利用奠定坚实的理论根基. 其二, 应加强航天器微生物防控技术的研发力度, 持续优化现有的防控设备, 提高其智能化与自动化程度, 以应对未来深空探测中更为复杂且严峻的微生物污染难题. 其三, 要积极探寻空间微生物资源利用的新路径与新方法, 尤其是在微生物冶金、合成生物学等领域, 挖掘其在外空基地建设中的潜在应用价值, 为人类在太空的长期驻留和资源开发提供有力支撑. 本文结合该领域未来发展趋向, 提出三方面的展望与思考.

(1) 研发轻量化、集成化在轨闭环调控系统. 未来载人航天任务的需求, 不应局限于微生物的发现, 而应朝着“预警–决策–干预”一体化方向发展. 例如, 将检测技术、人工智能与合成生物学相结合, 开发出能够实时监测评估微生物风险并自动释放特定抗菌肽的智能防控系统; 或者借助微流控芯片技术提升检测效率与自动化水平, 实现空间载荷仪器的小型化.

(2) 强化航天数据整合与模型预测. 整合历次航天任务中获取的微生物组数据以及环境参数等, 构建空间微生物组学大型数据库, 并通过人工智能分析, 预测长期在轨微生物生态的演变趋势及航材腐蚀和人体健康风险, 从而实现从被动应对到主动预测的转变.

(3) 拓展微生物的地外生存支持作用. 充分挖掘微生物的原位资源利用潜力, 如利用微生物制药满足航天员常见疾病的治疗需求、利用微生物生产特种食品、利用微生物分解废弃物等. 从防控微生物到将微生物作为资源加以利用, 可能是实现太空基地可持续运行的关键所在.

医学伦理 研究不涉及人体或动物实验.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] PRABODHA T, DANNER L, ILES G N, *et al.* Initiating

sensory science research in space conditions—current practices and future perspectives[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2025, **24**(5): e70241

[2] WUYTS F L, DEBLIECK C, VANDEVOORDE C, *et al*. Brains in space: impact of microgravity and cosmic radiation on the CNS during space exploration[J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2025, **26**(6): 354-371

[3] LI G, LIU R Q, CHEN Y Y, *et al*. Evolutionary dynamics and codon bias analysis of canine circovirus: insights into global spread and host adaptability[J]. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2025, **209**: 108369

[4] JOHNSON M D, SHEPHERD D C, SAKAI H D, *et al*. Cell-to-cell interactions revealed by cryo-tomography of a DPANN co-culture system[J]. *Nature Communications*, 2024, **15**(1): 7066

[5] SZYDLOWSKI L M, BULBUL A A, SIMPSON A C, *et al*. Adaptation to space conditions of novel bacterial species isolated from the International Space Station revealed by functional gene annotations and comparative genome analysis[J]. *Microbiome*, 2024, **12**(1): 190

[6] GREENBLUM S. Microbial adaptability in changing environments[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2024, **22**(6): 327

[7] BIJLANI S, STEPHENS E, SINGH N K, *et al*. Advances in space microbiology[J]. *iScience*, 2021, **24**(5): 102395

[8] ETLIN S, ROSE J, BIELSKI L, *et al*. The human microbiome in space: parallels between Earth-based dysbiosis, implications for long-duration spaceflight, and possible mitigation strategies[J]. *Clinical Microbiology Reviews*, 2024, **37**(3): e00163-22

[9] ZEA L, MCLEAN R J C, ROOK T A, *et al*. Potential biofilm control strategies for extended spaceflight missions[J]. *Biofilm*, 2020, **2**: 100026

[10] TIERNEY B T, KIM J, OVERBEY E G, *et al*. Longitudinal multi-omics analysis of host microbiome architecture and immune responses during short-term spaceflight[J]. *Nature Microbiology*, 2024, **9**(7): 1661-1675

[11] SALIDO R A, ZHAO H N, MCDONALD D, *et al*. The International Space Station has a unique and extreme microbial and chemical environment driven by use patterns[J]. *Cell*, 2025, **188**(7): 2022-2041. e23. DOI: 10.1016/j.cell.2025.01.039

[12] ALON D M, MITTELMAN K, STIBBE E, *et al*. CRISPR-based genetic diagnostics in microgravity[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2023, **237**: 115479

[13] FLORES P, MCBRIDE S A, GALAZKA J M, *et al*. Biofilm formation of *Pseudomonas aeruginosa* in spaceflight is minimized on lubricant impregnated surfaces[J]. *npj Microgravity*, 2023, **9**(1): 66

[14] KIM H W, RHEE M S. Space food and bacterial infections: realities of the risk and role of science[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, **106**: 275-287

[15] MCDONAGH F, CORMICAN M, MORRIS D, *et al*. Medical astro-microbiology: current role and future challenges[J]. *Journal of the Indian Institute of Science*, 2023, **103**(3): 771-796

[16] LU Yueying, YANG Jianlou, FU Yuming, *et al*. Screening and characterization of extremophiles in spacecraft assembly environment[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, **28**(6): 1400-1407 (陆月盈, 杨建楼, 付玉明, 等. 航天器组装环境中极端微生物的筛选与特性[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28**(6): 1400-1407)

[17] ZHAO J T, SHAKIR Y, DENG Y L, *et al*. Use of modified ichip for the cultivation of thermo-tolerant microorganisms from the hot spring[J]. *BMC Microbiology*, 2023, **23**(1): 56

[18] LODHI A F, ZHANG Y, ADIL M, *et al*. Design and application of a novel culturing chip (cChip) for culturing the uncultured aquatic microorganisms[J]. *Archives of Microbiology*, 2023, **205**(8): 285

[19] KAROUIA F, PEYVAN K, POHORILLE A. Toward biotechnology in space: high-throughput instruments for *in situ* biological research beyond Earth[J]. *Biotechnology Advances*, 2017, **35**(7): 905-932

[20] HAN Pei, HOU Hongqu, FAN Yunlong, *et al*. Space microbial detection method based on fluorescent LAMP[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(2): 302-309 (韩培, 侯红渠, 樊云龙, 等. LAMP 耦合荧光侧向流层析试纸条的空间微生物快速检测技术 [J]. 空间科学学报, 2023, **43**(2): 302-309)

[21] XU Z H, LIU F W, ZHANG X L, *et al*. Development of the Microbial Online Monitoring Module (MOMM) for the Chinese space station[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2024, **36**(4): 39

[22] LU Yueying, FU Yuming, LIU Hong. Monitoring of fungal growth on surface of space station cabin materials based on image processing methods[J]. *Manned Spaceflight*, 2021, **27**(2): 190-197 (陆月盈, 付玉明, 刘红. 基于图像处理方法的空间站舱室材料表面真菌滋生监测 [J]. 载人航天, 2021, **27**(2): 190-197)

[23] CHEN N N, LIU Q Q, FENG Y L, *et al*. Microbial corrosion behavior and mechanism of 5A06 aluminum alloy under low dose proton radiation[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, **27**: 4533-4540

[24] LU Y Y, FU Y F, CHEN L T, *et al*. Combined effect of simulated microgravity and low-dose ionizing radiation on structure and antibiotic resistance of a synthetic community model of bacteria isolated from spacecraft assembly room[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2023, **38**: 29-38

[25] LIU Qianqian, YAO Qiong, WANG Ning, *et al*. Isolation and identification of indoor and outdoor culturable microorganisms in Wenchang Spacecraft Launch Site[J]. *Science & Technology Review*, 2023, **41**(7): 114-126 (刘倩倩, 姚琼, 王宁, 等. 文昌航天发射场室内外可培养微生物的分离与鉴定 [J]. 科技导报, 2023, **41**(7): 114-126)

[26] ZHANG Y, PENG Y, QU X, *et al*. On-orbit microbial suc-

cession patterns of the China Space Station during the construction period[J]. *Microbiome*, 2025, **13**(1): 73

[27] LIU Q Q, ZHANG Q, DANG L, *et al*. The interaction between *Aspergillus brasiliensis* and exposed copper circuits in the space microgravity environment[J]. *Corrosion Science*, 2024, **234**: 112132

[28] FENG Y L, CHEN J H, LIU Q Q, *et al*. Low-shear modeled microgravity accelerated the degradation of passive films of aluminium alloy by *Bacillus cereus* through increased extracellular polymeric substances[J]. *Applied Surface Science*, 2024, **655**: 159618

[29] LIU Q Q, ZHANG W D, YUAN J X, *et al*. Study on biodegradation of polyurethane coating on PCB by *Aspergillus brasiliensis* in space[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, **490**: 151514

[30] ZHANG W D, CHEN N N, YUAN J X, *et al*. Initial attempt: design and application of microorganism-material interaction test on on-orbit space microgravity conditions[J]. *Acta Astronautica*, 2025, **228**: 384-395

[31] RCHEULISHVILI N, PAPUKASHVILI D, SHAKIR Y, *et al*. Acid and aluminium-tolerant microbes isolated from China space station assembly cleanroom surfaces and identified by 16S rRNA/ITS sequencing and MALDI-TOF MS[J]. *International Journal of Astrobiology*, 2021, **20**(2): 133-141

[32] SHAKIR Y, RCHEULISHVILI N, ZHANG Y, *et al*. Effects of short-term space conditions on cellulose degradation ability and biodiversity of microorganisms[J]. *Cellulose*, 2022, **29**(9): 5061-5077

[33] ZHANG S Y, DANG L, LI W L, *et al*. Differential microbial degradation of cross-linked polythene by *Aspergillus niger* in space and on the ground[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, **509**: 161394

[34] SONG X W, HE Z W, CHEN N N, *et al*. Corrosion behavior and mechanism of beryllium bronze induced by *Aspergillus brasiliensis* in space[J]. *Corrosion Science*, 2026, **258**: 113421

[35] JIANG C M, YANG S X, GUO D, *et al*. Simulated microgravity accelerates alloy corrosion by *Aspergillus* sp. via the enhanced production of organic acids[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2022, **88**(19): e00912-22

[36] QU X, WANG H, LODHI A F, *et al*. Evaluation of decontamination potential of wet wipes against microbial contamination of Chinese spacecraft materials[J]. *Astrobiology*, 2023, **23**(7): 746-755

[37] YANG Jianlou, SUN Ruxin, ZHANG Lantao, *et al*. Design of plaque removal device used in manned spacecraft with preliminary application verification[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2021, **38**(6): 699-706 (杨建楼, 孙儒馨, 张兰涛, 等. 载人航天器内菌斑清除装置设计及初步应用验证[J]. 航天器环境工程, 2021, **38**(6): 699-706)

[38] YANG Jianlou, FU Yuming, LIU Hong. Design of *in situ* repair device for the microbial corrosion surface material used in manned spacecraft[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2022, **39**(3): 255-261 (杨建楼, 付玉明, 刘红. 载人航天器内腐蚀材料表面原位修护装置设计 [J]. 航天器环境工程, 2022, **39**(3): 255-261)

[39] QIN W Q, LIU Y F, LIU J F, *et al*. The metabolic and physiological responses to spaceflight of a lipopeptide-producing *Bacillus subtilis*[J]. *Microbial Biotechnology*, 2025, **18**(3): e70111

[40] SU X L, GUO Y H, FANG T Z, *et al*. Effects of simulated microgravity on the physiology of *Stenotrophomonas maltophilia* and multiomic analysis[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, **12**: 701265

[41] YI Y, ZHAO Z Y, CAO B, *et al*. Effects of simulated microgravity on current generation of electrochemically active bacteria: insights from case-control study using random positioning machine[J]. *Bioresource Technology*, 2024, **399**: 130618

[42] WANG Wei, ZHANG Limin, XIA Qingyin, *et al*. Leaching of elements from minerals by streptomyces under simulated microgravity effects[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2025, **44**(3): 370-378 (王维, 张利敏, 夏庆银, 等. 链霉菌在模拟微重力效应下浸出矿物中元素试验研究 [J]. 湿法冶金, 2025, **44**(3): 370-378)

[43] WANG W J, YU Y, LI X Q, *et al*. Microfluidic chip-based long-term preservation and culture of engineering bacteria for DNA damage evaluation[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2022, **106**(4): 1663-1676

作者简介



马 宏 女, 现为北京理工大学医学技术学院教授、博士生导师, 主要研究方向为航天医学工程、神经生物学与分子肿瘤学.

E-mail: 04656@bit.edu.cn



邓玉林 (通信作者) 男, 现为国际宇航科学院院士、北京理工大学讲席教授, 主要研究方向为 xxx.

E-mail: deng@bit.edu.cn