地外空间环境下的生命起源研究进展

丁昆[1*] 王健生[1] 应见喜[2] 吴翊乐[2] 李庆利[1] 赵玉芬[2*]

1(上海市多维度信息处理重点实验室 华东师范大学 上海 200241)

2(宁波大学新药技术研究院 浙江省宁波市 315211)

摘 要

天体生物学旨在研究宇宙中生命的起源、演化与分布，而太空环境为探讨生命起源提供了独特的实验平台。生命起源研究公认需经历三个关键阶段：(1)无机小分子到有机小分子（氨基酸、核苷酸等）的演化；(2)有机小分子聚合形成生命大分子（蛋白质、核酸等）；(3)生命大分子组装形成具有代谢和复制能力的原始细胞，其中分子手性均一性的起源是核心难题。本文系统综述了近年来在国际空间站、中国空间站及各类卫星与探测器平台上开展的生命起源与天体生物学相关实验，重点分析了前生源化学物质的形成与稳定性、生命在空间极端环境下的适应机制，以及地外样本中前生源物质的探测成果。研究表明，太空特殊环境下可合成肽链等生物大分子前体，多种微生物在空间极端环境中展现出惊人的耐受能力，小行星样本中发现了生命必需的氨基酸、核苷碱基等有机分子但呈外消旋特征。这些发现为理解生命起源的三个关键阶段、评估地外生命可能性及探索分子手性起源提供了关键证据。本文进一步讨论了空间生命起源研究的技术挑战，提出在轨实时分析、长周期暴露实验、手性放大机制及多学科交叉融合等未来发展方向。

关键词 天体生物学；生命起源；前生源化学；空间站实验；手性起源；极端环境适应性

Research Progress on the Origin of Life in Extraterrestrial Space Environments

Ding Kun[1] Wang Jiansheng[1] Ying Jianxi[2] Wu Yile[2] Li Qingli[1] Zhao Yufen[2]

1 Shanghai Key Laboratory of Multidimensional Information Processing, East China Normal University, Shanghai 200241, China

2 Institute of New Drug Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China

Abstract

最新录用

Astrobiology aims to study the origin, evolution, and distribution of life in the universe, while the space environment provides a unique experimental platform for exploring the origins of life. Research on the origin of life universally recognizes three key stages: (1) evolution from inorganic small molecules to organic small molecules (amino acids, nucleotides, etc.); (2) polymerization of organic small molecules into biological macromolecules (proteins, nucleic acids, etc.); and (3) assembly of macromolecules into protocells with metabolic and replicative capabilities, among which the origin of molecular homochirality represents a central challenge. This paper systematically reviews recent experiments related to the origin of life conducted on the International Space Station, the Chinese Space Station, and various satellite and probe platforms, with emphasis on the formation and stability of prebiotic chemical substances, adaptation mechanisms of life to extreme space environments, and detection of prebiotic materials in extraterrestrial samples. Research has demonstrated that peptide chains and other macromolecular precursors can be synthesized under the unique conditions of space, various microorganisms exhibit remarkable tolerance to extreme environments, and pristine asteroid samples contain essential organic molecules for life but with racemic characteristics. These findings provide critical evidence for understanding the three key stages of life's origin, evaluating the possibility of extraterrestrial life, and exploring the origin of molecular homochirality. Furthermore, this paper discusses technical challenges and proposes future directions including in-situ real-time analysis, long-duration exposure experiments, chirality amplification mechanisms, and interdisciplinary integration.

Keywords astrobiology; origin of life; prebiotic chemistry; space station experiments; homochirality; extreme environment adaptability

最新录用

1 引言

生命起源是人类认识自身的基本科学问题之一，也是自然科学领域最具挑战性的前沿科学问题[1]。生命如何从非生命物质演化而来，遗传信息体系的建立与演化，以及生命分子手性均一性的起源等问题至今仍是未解之谜[2-3]。当前科学界公认，生命起源无论发生在地球还是地外空间，都必须经历三个关键演化阶段：第一阶段，无机小分子在特定能量驱动下形成有机小分子，如氨基酸、核苷酸、糖类等生命基本构建单元，这一过程已被 Miller-Urey 实验等经典研究在实验室条件下成功模拟；第二阶段，有机小分子通过聚合反应形成生命大分子，包括蛋白质和核酸（DNA/RNA），其中肽键的形成和核苷酸聚合是关键步骤，也是空间实验研究的核心焦点之一；第三阶段，生命大分子进一步组装形成具有代谢活性、自我复制能力和边界分隔的原始细胞体系，其中遗传密码的建立、tRNA 氨酰化系统的分子手性选择性起源是理解生命本质的核心难题[4-8]。

随着空间技术的发展，地外空间环境为研究生命起源提供了前所未有的独特实验平台。地外空间环境具有微重力、强宇宙辐射（包括银河宇宙射线和太阳高能粒子）[9]、高真空、极端温度循环等地面难以长期稳定模拟的特殊条件，为研究前生源化学过程提供了独特的实验场。天体生物学作为一门融合宇宙学、天体物理学、化学、生物学和行星科学的交叉学科，旨在探索生命在宇宙中的起源、演化与分布[10]，其核心科

学问题包括：生命在何时、以何种方式起源于地球或地外空间？支撑生命存在的环境边界在哪里？宇宙中是否存在其他生命形式？这些问题的解答不仅关乎人类对自身在宇宙中地位的认识，也直接影响未来空间探索的方向与策略。

近年来，随着国际空间站（ISS）的持续运营、中国空间站（CSS）的全面建成以及隼鸟 2 号（Hayabusa2）、OSIRIS-REx 等深空采样返回任务的成功实施，地外空间生命起源研究取得了突破性进展[11]。在国际空间站 EXPOSE 设施上开展的长期暴露实验系统评估了有机分子在太空环境中的稳定性；中国空间站开展的氨基酸成肽反应实验直接探索了微重力对生命分子聚合的影响；小行星返回样本中检测到多种氨基酸和全部五种核苷碱基，但呈外消旋特征，为理解分子手性起源提供了关键约束条件。这些实验成果对应生命起源的三个关键阶段，从有机小分子合成、大分子聚合到手性起源，为我们认识生命起源的条件与机制提供了全新的视角。

本文旨在系统梳理当前在地外空间环境下开展的生命起源研究，重点围绕前生源化学物质的形成与演化（对应第一、二阶段）、生命分子手性起源、生命在太空极端环境下的适应机制，以及未来技术发展方向等方面进行全面综述。通过整合分析国际空间站、中国空间站及深空采样任务的科学成果，揭示这些发现对理解生命起源三个关键阶段的重要意义，并探讨该领域面临的挑战与发展机遇。

2 空间实验平台与探测任务

空间生命起源实验的开展高度依赖于空间实验平台的建设与探测任务的持续进展目前，主要的在轨实验平台包括国际空间站的 EXPOSE 系列实验设施和中国空间站生物技术科学实验系统，而深空探测任务发射的采样返回探测器则为前生源物质分析提供了珍贵的原始地外样本。表 1 对主要空间实验平台的能力、代表性实验及其在生命起源研究三个关键阶段中的科学贡献进行了系统比较。

实验平台	主要实验设施	暴露周期	实验能力	代表性实验	关键成果与生命起源阶段对应
国际空间站	EXPOSE-R2/R3 设施；JEM 曝露设施（希望号）	1-3 年	长期太空暴露；UV/辐射/真空/温度循环综合作用；有机稳定性分析	Tanpopo 任务；BIOMEX 实验；BOSS 实验	氨基酸暴露稳定性数据（第一阶段）；有机分子耐受性排序；生物膜极端环境存活评估（第三阶段）
中国空间站	生物技术实验柜；生命生态实验柜；舱外暴露装置	约 6 个月/批次	微重力下分子聚合反应；模式生物培养；舱外长期暴露	氨基酸成肽实验（神舟 16/18）；厌氧古菌适应性研究；斑马鱼水生生态系统（44	微重力对肽键形成的影响（第二阶段）；产甲烷古菌空间适应性（第三阶段）；脊椎动物空间生态系统

最新录用

实验平台	主要实验设施	暴露周期	实验能力	代表性实验	关键成果与生命起源阶段对应
				天）	稳定性
隼鸟 2 号	样本采集返回装置；撞击坑形成装置	2014-2020（任务期）	小行星原位采样；未受地球污染的原始样本分析	龙宫（Ryugu）小行星采样返回（5.4g）	20+种氨基酸检出；全部 5 种核苷碱基；外消旋特征（D/L≈1）—手性起源关键约束（第一、二阶段）
OSIRIS-REx	TAGSAM 采样臂；样本返回舱	2016-2023（任务期）	大面积表面采样；样本量返回分析	大 Bennu 小行星采样返回（122g）	33 种氨基酸（14 种蛋白质氨基酸）；~10,000 种含氮化合物；富挥发性有机物—外太阳系来源线索
LEOrigin 实验	低地球轨道暴露数月至 1 年舱；矿物催化反应单元		微重力+辐射条件下矿物催化有机合成	甲酰胺与矿物（橄榄石/蒙脱石/TiO_2）催化反应	矿物表面催化前生源合成的可行性数据（第二阶段）；火星土壤类似物反应验证

表 1 主要空间实验平台实验能力、周期与关键成果对比

2.1 中国空间站生命科学实验设施

中国空间站作为国家太空实验室，配备了多种先进实验设施，支持开展多种类、成体系的空间科学实验。在空间生命科学领域，问天实验舱和梦天实验舱提供了强大的实验能力，特别是生物技术实验柜、科学手套箱与生命生态实验柜等设施，能够支持从分子层面到细胞、组织层面，再到小型模式生物层面的多层次实验需求。

在生命起源研究方面，中国空间站开展了具有开创性的氨基酸成肽实验。厦门大学赵玉芬院士团队进行的蛋白与核酸共起源及密码子起源项目[11]，旨在探索生命的“种子”——氨基酸与核苷在微重力环境下的相互作用与聚合行为。该实验聚焦生命起源第二阶段的核心问题——有机小分子如何聚合形成生物大分子。实验设计将多种氨基酸（包括甘氨酸、丙氨酸等）在模拟原始地球和太空环境条件下进行聚合反应，通过对比地面与空间微重力环境下的反应差异，探索重力因素在肽键形成和蛋白质前体合成中的作用。该实验已随神舟十六号（两批样品）和神舟十八号（一批样品）发射任务上行，飞船返回时带回了三批实验样品。初步分析表明，微重力环境可能影响氨基酸的聚合路径和产物分布，这对理解生命大分子在无重力天体环境中的形成机制具有重要意义。

此外，中国空间站还开展了厌氧古菌辐射损伤与适应性研究，以探索早期生命形式对空间极端环境的耐受能力，间接为理解第三阶段原始细胞的环境适应性提供线索。

最新录用

清华大学刘竹教授团队的实验验证了三株产甲烷古菌在空间微重力环境和宇宙辐射条件下的适应性[12]。这些实验直接关联到“好奇号”火星车在火星上探测到的甲烷信号，通过在地球轨道上模拟火星环境条件，检验甲烷是否有可能来源于古菌的生命活动，为探索地外生命可能性提供了实验依据。

2.2 国际空间站生命科学实验设施

国际空间站自 1998 年开始建设以来，已逐步建立了一套完善的空间科学实验系统[13]。其中最具代表性的是 EXPOSE 系列实验设施（包括 EXPOSE-E、EXPOSE-R 和 EXPOSE-R2），这些设施安装在空间站外部平台，能够将样品长期暴露于太空环境中，包括高真空、极端温度循环（-20°C 至+60°C）、宇宙辐射和太阳紫外线（UV）等多种因素的综合作用[14-15]。EXPOSE 设施支持了多项开创性的天体生物学研究，如 BIOMEX（Biofilm Organisms Exposure to Mars Conditions）项目研究了生物膜在模拟火星条件下的生存极限[16]，BOSS（Bioorganic Experiment on the ISS）项目专注于有机分子在太空环境下的化学稳定性[17]。

日本负责的“希望号”（Kibo）实验模块暴露设施（JEM Exposed Facility）上的 Tanpopo（日语意为“蒲公英”）任务是生命起源研究的重要实验之一[18]。该任务设定了两个明确科学目标：(1)检验泛生假说——评估微生物及有机分子在行星际空间中的存活和传输可能性；(2)检验有机化合物在太空暴露过程中的化学演化行为。Tanpopo 任务通过捕获太空中的高速微粒子和暴露各类有机化合物（包括氨基酸及其前体物质），系统研究了甘氨酸（Gly）、乙内酰脲（Hyd）、异缬氨酸（Ival）以及由 CO、NH_3 和 H_2O 经辐照形成的复杂有机物（CAW）等在空间环境下的稳定性。研究结果显示，经过 1 至 3 年的空间暴露，甘氨酸和 CAW 的回收率显著高于 Hyd、Ival 等物质，表明在有机分子从空间向原始地球传输的过程中，结构较为复杂的有机物或氨基酸可能比简单前体更加稳定，为评估生命起源第一阶段有机分子的地外来源提供了关键数据[18]。

2.3 卫星与探测器平台的任务贡献

除空间站外，各类深空探测器和返回式卫星在天体生物学研究中同样发挥着不可替代的作用。这些平台通过直接采集地外样本或在地球轨道上进行短期暴露实验，为生命起源三个关键阶段的研究提供了独特的实证数据。

在样本采集返回方面，日本的隼鸟 2 号（Hayabusa2）和美国的 OSIRIS-REx 任务取得了里程碑式成果。隼鸟 2 号于 2019 年从小行星“龙宫”（Ryugu）采集了约 5.4 克样本并于 2020 年返回地球[19]。对样本的分析发现了 20 余种氨基酸和全部 5 种核苷碱基

最新录用

（腺嘌呤、鸟嘌呤、胞嘧啶、胸腺嘧啶和尿嘧啶），包括蛋白质氨基酸和非蛋白质氨基酸。特别重要的是，所有手性氨基酸均以近似等量的 D 型和 L 型存在（外消旋混合物），表明小行星并未携带预设的手性偏向。这一发现对理解生命手性起源具有深远意义——地球上生命对 L-氨基酸的专一性选择可能发生在有机分子被输送到地球之后的某个阶段，而非源于地外物质的手性偏向。

NASA 的 OSIRIS-REx 任务从小行星 Bennu 采集了约 122 克样本，是迄今为止从月球以外天体获取并带回地球的最大样本。分析结果检测到 33 种氨基酸（其中 14 种为地球生物使用的标准蛋白质氨基酸），以及约 10,000 种含氮化合物[20]。与 Ryugu 样本类似，Bennu 中的手性氨基酸也呈外消旋状态，进一步支持了小行星作为前生源物质载体但不携带手性偏向的观点。Bennu 样本还发现了甲醛、胺类、多环芳烃和含氮杂环化合物，其挥发性物质含量（碳 4.54%、氮 0.23～0.25%）高于 Ryugu 样本和大多数碳质陨石，表明 Bennu 母体可能在外太阳系富氨冰环境中形成或吸积了含冰物质。

欧洲空间局的 LEOrigin 实验则聚焦于太空环境中矿物催化前生源反应的研究。该实验利用低地球轨道平台研究了甲酰胺与橄榄石、蒙脱石、火星土壤模拟物（SOPHIA）和 TiO_2 等在微重力、宇宙辐射和真空条件下的相互作用，探索无机材料催化有机化合物合成的路径，为理解生命大分子形成的可能催化机制提供了实验数据[21]。

3 前生源化学物质的空间实验研究

前生源化学（Prebiotic Chemistry）研究生命起源前的化学演化过程[22]，即无机物如何转化为构成生命的有机分子（第一阶段），并进一步聚合组装成为具有生命特征的生物大分子和原始细胞体系（第二、三阶段）。太空环境为研究前生源化学提供了独特的天然实验室。本节从地外样本分析、太空暴露实验和理论模拟三个层面，系统论述空间实验对生命起源三个关键阶段研究的贡献，特别关注氨基酸成肽和手性起源等核心问题。

3.1 地外样本中的前生源物质分析——第一阶段的实证

对地外样本的直接分析为生命起源第一阶段——无机小分子到有机小分子的演化——提供了最直接的证据[23-24]。近年来，从小行星返回的样本分析结果不断带来突破性发现，支持了生命的基本化学构建单元可以在地外空间形成并被输送到地球的观点。

隼鸟 2 号从小行星 Ryugu 返回的样本分析揭示了超过 20,000 种不同的有机分子，其中包括约 20 种氨基酸和全部 5 种主要核苷碱基[25-26]。这一发现确认了蛋白质氨基酸和

最新录用

非蛋白质氨基酸均可在小行星环境中通过非生物过程合成。蛋白质氨基酸如甘氨酸、丙氨酸、缬氨酸等的存在表明，构成地球生命的基本化学单元在太阳系早期就已经在碳质小行星上形成。从生命起源三阶段框架来看，这直接证实了第一阶段——有机小分子的非生物合成——可以在地外环境中自然发生。

特别值得关注的是，Ryugu 和 Bennu 样本中手性氨基酸的分布特征。地球上的生命几乎专一性地使用 L-型氨基酸，而这两个小行星样本中的手性氨基酸均呈外消旋状态（D 型和 L 型含量基本相等）[20,27]。这一发现排除了小行星作为地球生命手性偏向来源的可能性，对理解分子手性起源提出了新的约束条件：如果生命的手性均一性不是由地外物质输送时携带的，那么这一关键转变必然发生在有机分子被输送到地球之后的某个阶段——可能通过 Soai 自催化反应放大、圆偏振光不对称光解或矿物表面选择性吸附等机制实现。这为第三阶段原始细胞体系建立时的分子手性选择机制研究指明了方向。

OSIRIS-REx 从 Bennu 返回的样本进一步丰富了我们对小行星有机化学多样性的认识[28]。样本中检测到 33 种氨基酸、胺类、甲醛、羧酸、多环芳烃和含氮杂环化合物，以及约 10,000 种含氮化合物。氮-15 同位素富集特征表明氨和其他含氮可溶性分子形成于冷的分子云或原行星盘外层。Bennu 样本比 Ryugu 更富集挥发性物质（碳含量 4.54%，氮含量 0.25%），这可能反映了其母体小行星在外太阳系富氨冰环境中的形成历史。这些发现表明，小行星等天体不仅是有机分子的载体，更可能是生命起源第一阶段有机合成的天然反应器。

3.2 太空中前生源物质的化学演化——从第一阶段到第二阶段

在太空暴露条件下研究有机分子的形成、聚合和稳定性，是连接生命起源第一、二阶段研究的重要桥梁。地面模拟实验和空间暴露实验表明，许多生命必需的有机分子及其聚合物可以在太空极端条件下形成并保持稳定[29-30]。

2026 年丹麦奥胡斯大学 Ioppolo 和 Hopkinson 团队的突破性实验为太空中的肽键形成提供了直接证据[31]。该团队在实验室中模拟星际空间条件（温度-260°C、超高真空），将甘氨酸置于模拟宇宙尘埃冰粒表面，用高能质子（模拟宇宙射线）辐照。质谱分析检测到甘氨酰甘氨酸（glycylglycine）的形成——这是最简单的二肽。这一发现在 Nature Astronomy 发表后引起广泛关注，因为它表明肽键可以在不依赖液态水的极寒真空环境中形成，颠覆了传统上认为肽键只能在温暖水溶液中合成的观念。从生命起源框架来看，这意味着第二阶段——有机小分子向生物大分子的聚合——可能在星际尘埃颗粒上就已经启动，远早于这些物质被输送到行星表面。

最新录用

国际空间站 Tanpopo 任务对多种有机物进行了 1 至 3 年的太空暴露实验，获得了有机分子在太空环境中稳定性的系统数据[18]。实验结果显示，甘氨酸和 CAW（CO、NH_3 和 H_2O 辐照形成的复杂有机物）的回收率高于乙内酰脲、异缬氨酸等物质。这一发现具有重要的演化意义：在有机分子通过星际尘埃或微陨石从空间环境向原始地球传输的过程中，结构较为复杂的有机物（如 CAW）可能比简单前体分子更加稳定，暗示早期地球接收的可能已经是经过太空环境“筛选”的有机化合物混合物，而非单一简单分子。

欧洲空间局的 LEOrigin 实验则聚焦于矿物催化的前生源合成。该实验在低地球轨道上研究了甲酰胺与橄榄石、蒙脱石、火星 Oxia Planum 粘土类似物（SOPHIA）和 TiO_2 等在微重力、宇宙辐射和真空条件下的相互作用。甲酰胺被认为是前生源化学中的重要前体分子，可以生成氨基酸、核苷碱基等多种生命相关化合物。实验结果表明，在微重力和辐射的共同作用下，矿物表面能够有效催化甲酰胺向更复杂有机分子的转化[32-33]，且紫外线辐射对反应路径有显著影响。这些发现为理解早期地球或火星表面的矿物催化前生源合成提供了空间实验证据。

3.3 前生源化学的理论模拟与手性起源问题

前生源化学的太空实验不仅提供了实证数据，也对生命起源理论产生了深远影响这些实验通过模拟早期地球或地外环境条件，帮助人们理解生命如何从非生命物质演化而来。

在理论模拟方面，美国能源部劳伦斯伯克利国家实验室的研究团队使用热喷嘴装置模拟富碳恒星附近的环境，将含氮单环碳分子和乙炔在 700 开尔文条件下反应，成功合成了喹啉和异喹啉——DNA 和 RNA 碱基的前体分子[34]。这表明恒星附近的高温环境可能是生命分子形成的天然反应场所，为评估星际空间中生命起源第一阶段化学路径的多样性提供了新线索。

分子手性均一性起源是生命起源研究中最核心的难题之一，直接关联到第三阶段——原始细胞体系建立——的关键问题。从 Ryugu 和 Bennu 样本中获得的外消旋证据出发，科学家们提出了几种可能的地球手性放大机制。圆偏振光（CPL）不对称光解假说认为，星际空间中的圆偏振紫外光可以优先破坏某一手性的氨基酸，从而产生微小的对映体过量。实验表明，圆偏振光确实可以诱导约 1.3%的对映体过量，与小行星陨石中检测到的值相当。然而，仅靠这一机制产生的过量远不足以解释地球生命对 L-氨基酸的绝对专一性。

Soai 自催化反应提供了另一种可能的放大机制[35]。在这一反应中，一个手性的醇分子可以催化自身对映选择性合成，产生正反馈循环。如果初始存在微小的手性偏向，

最新录用

自催化反应可能将其放大到接近完全的手性均一性。然而，这一机制是否在前生源条件下可行仍是未解之谜。Tamura-Schimmel 模型则从 tRNA-氨基酸连接系统的分子结构出发，提出 RNA 分子可能通过手性选择性氨基酸酰化导致了蛋白质手性均一性的建立。最近对隼鸟 2 号和 OSIRIS-REx 样本中外消旋现象的分析支持了这一观点——即手性选择可能是在遗传系统建立过程中通过生物分子相互作用实现的，而非预先由地外物质决定。事实上，围绕生物分子手性同一性的起源，科学界已提出从基本物理相互作用到生物大分子选择的多种理论与假说——微小的对映体过量从何而来、又如何放大为生命所必需的单一手性，正是第 4 章将要系统讨论的内容。

对土卫二（Enceladus）有机分子起源的研究提供了另一种视角。罗马国家天体物理和行星研究所的研究团队发现，土卫二表面裂缝喷涌的水柱中检测到的有机分子，可能并非源自地下海洋深处，而是由土星的强大辐射作用于卫星表面冰层所形成[36]。辐射与冰的相互作用产生了一氧化碳、氰酸盐和氨，以及氨基酸的前体分子甲酰胺等。这一发现揭示了一个重要悖论：在寻找生命迹象时，环境本身的化学活性也可能“伪造”出生命的化学信号。这提醒我们在分析有机分子来源时必须严格区分生物来源和非生物来源的信号。

最新录用

4 生物分子手性同一性起源的主要理论与假说

地球上已知的生命形式呈现出高度的手性同一性——蛋白质几乎专一由 L-型氨基酸构成，核酸的糖骨架则清一色为 D-型核糖与 D-脱氧核糖。这种单一手性并非生命演化的偶然副产品，而很可能是生命得以出现的前提：Joyce 等[37]早在 1984 年即证明，当模板复制体系中混入“错误”构型的核苷酸单体时，链延伸会被迅速阻断，即所谓交叉手性抑制——外消旋的前生源原料无法支撑有效的分子复制。围绕手性同一性如何起源，已提出的假说大体可归为两类：其一是随机/机遇型机制，认为手性对称性经自发破缺与非线性放大而丧失，最终符号由统计涨落决定；其二是决定论型机制，认为存在某种物理手性偏置预先规定了对映体过量的符号。无论哪条路径，完整的假说都必须回答两个环环相扣的问题——初始对映体过量（ee）从何而来，以及微小的 ee 如何被放大至接近 100%。何裕建[38]曾从《科学》杂志遴选的科学前沿问题出发，对该领域的代表性假说作过系统梳理[39-40]；本章则沿上述框架加以归纳，并结合地外样本证据检验其解释力。

4.1 物理手性偏置机制

决定论型假说首先求助于基本物理相互作用。弱相互作用的宇称不守恒意味着自然界在镜面对称变换下并非严格不变，Vester 与 Ulbricht[41]于 1959 年据此提出，β 衰变

产生的自旋极化电子可选择性辐解 D-氨基酸；其后的研究进一步指出，弱中性流相互作用使一对对映体的基态能量不再简并，产生宇称破缺能量差（PVED）。Quack[42]的高精度量子化学计算给出 L-丙氨酸的 PVED 约为 3.3×10^{-18} eV/分子，仅相当于 10^{-17} kT 量级，且从未被直接测到；不过 Dreiling 与 Gay[43]于 2014 年首次用自旋极化电子束观测到手性分子的不对称解离。值得注意的是，宇称不守恒假说近年获得了鲜明的地外形式：Famiano 等[44]提出的 SNAAP 模型认为，超新星爆发的反中微子流与磁场定向的 ^{14}N 核相互作用，可选择性破坏星尘有机物中一种构型的氨基酸，将核物理尺度的对称性破缺传递到分子尺度。

圆偏振光（CPL）是影响最广的地外偏置机制。Bailey 等[45]于 1998 年在猎户座 OMC-1 恒星形成区测得高达 17%的红外圆偏振，表明恒星形成区存在宏观尺度的手性辐射场。实验方面，CPL 不对称光解外消旋亮氨酸可获得约 2%的 ee；de Marcellus 等[46]利用同步辐射真空紫外 CPL 在模拟星际冰上从非手性原料合成出 ee 约 1.34%的丙氨酸，该 ee 最高可经光子能量调控至 4.2%。这一链条一度被视为默奇森（Murchison）陨石氨基酸 L-过量的最佳解释，其局限同样明显：天文观测到的是红外圆偏振，而手性光化学的作用窗口在紫外；所得 ee 普遍低于 2%，必须依赖后续放大机制；Ryugu 与 Bennu 返回样本的近外消旋结果更对其构成直接挑战（详见 4.4 节）。

第三类偏置机制与电子自旋相关。Globus 与 Blandford[47]指出，宇称不守恒使宇宙线次级 μ 子天然自旋极化，其衰变电子继承极化，并可在全宇宙范围给出同一符号的手性选择。在凝聚态层面，手性诱导的自旋选择性（CISS）效应——电子穿过手性分子层的透射率强烈依赖其自旋取向与分子手性的匹配——为自旋-手性耦合提供了新的物理通道，磁性基底上的自旋极化电子可产生约 10% ee 的手性选择化学。Ozturk 与 Sasselov[48]据此提出地球本地情景：早期地球浅湖中的磁铁矿在太阳紫外辐照下发射水合自旋极化电子，通过 CISS 驱动对映选择性化学；其后他们又证明 RNA 前体可在磁化矿物表面结晶实现手性拆分。

矿物表面的手性识别是另一类广为讨论的机制。Hazen 团队[49]发现方解石的镜面对称晶面可分别选择性吸附 D-与 L-天冬氨酸，局域 ee 可达约 10%，并系统论证了手性晶面在常见矿物中的普遍性。然而，左右旋晶面在自然界等量出现，宏观净效应为零——此类机制解释的是手性的“分离”与“富集”而非 ee 的净“产生”，宜视为放大链条中的一环而非独立的起源答案。

4.2 手性对称性自发破缺与放大机制

随机型机制的理论源头是 Frank[50]于 1953 年提出的动力学模型：在开放的、远离平衡态的体系中，若两种对映体各自自催化复制且彼此抑制，微小的随机涨落将被非

最新录用

线性动力学放大，体系以分岔方式演化为单一手性——但左右符号各有 50%概率。Kondepudi 与 Nelson[51]随后的定量分析表明，极小的确定性手性偏置只要越过临界阈值，便能压倒统计涨落而锁定分岔方向，从而在两类假说之间架起桥梁；其实验对应物是搅拌下的 $NaClO_3$ 结晶——从近外消旋溶液中可获得 ee 超过 99%的单一手性晶体群。在聚合层面，引入对映体交叉抑制与手性反馈的聚合物模型，进一步将对称性破缺推广为聚合反应网络的内禀性质。这类模型的共同局限在于：纯随机破缺无法解释为何地球生命恰好选择了 L-氨基酸与 D-糖。

对称性破缺的实验实现在 Soai 反应中达到极致。Soai 等[35]于 1995 年报道的不对称自催化体系可从约 2% ee 的种子出发实现放大，后续研究更将触发阈值降至 0.00005% ee 并放大到 99.5%以上，实现了无外加手性源的自发绝对不对称合成；圆偏振光、手性石英、$NaClO_3$ 晶体乃至 ^{13}C 同位素手性均可触发。尽管有机锌试剂缺乏直接的前生源合理性，该反应被普遍视为 Frank 模型的概念验证，确立了“微小 ee 可被化学反应网络自发放大”这一关键命题。

固态物理化学过程提供了更具前生源合理性的放大途径。Viedma[52]于 2005 年发现对外消旋聚集晶体悬浮液持续研磨，固相可自发演化为单一手性，其后该去外消旋化策略被推广至蛋白质氨基酸天冬氨酸；Noorduin 等[53]则证明圆偏振光可定向驱动氨基酸衍生物的完全手性对称性破缺——CPL 假说由此与固态放大机制直接耦合。基于溶解度性质的共晶点操纵同样高效：丝氨酸在水中的共晶 ee 可高于 99%，1% ee 的苯丙氨酸经两次蒸发沉淀可放大至 90% ee；Hein 等[54]进一步从近外消旋原料出发，经结晶放大与脯氨酸催化串联得到对映纯的 RNA 前体，打通了“物理放大→前生源合成”的完整链条。

4.3 生物大分子层面的手性选择

即使化学层面只积累了部分手性富集，生命体系自身的复制与翻译机器仍可能完成最终的手性锁定。交叉手性抑制意味着，在 RNA 世界框架下，谁先达到足够高的同手性纯度，谁就获得复制优势。Tamura 与 Schimmel[55]的氨酰化模型提供了具体机制：在 RNA 迷你螺旋氨酰化中，D-核糖构成的 RNA 对 L-氨基酸呈现约 4:1 的选择性，提示“D-糖的手性决定 L-氨基酸的手性”这一跨分子类别的手性传递通道；Tamura[56]更借此回应近年地外样本的外消旋结果，主张同手性应是在 RNA 氨酰化与翻译起源阶段于地球本地产生的。

中国学者在这一方向作出了系统而独特的贡献。赵玉芬院士团队于 1990 年第 11 届国际生命起源大会上提出“磷酰化氨基酸是核酸与蛋白质的共同起源”，并与曹培生创立“核酸与蛋白质共同起源”学说。在此框架下，韩大雄等[57]以核苷-5′-磷酰化氨

最新录用

基酸为模型提出氨基酸手性同一起源的新理论模型——手性同一伴随遗传密码子的起源而协同形成：古老氨基酸的 L-型优先被选择遵从“立体与物理化学决定论”，后出现的氨基酸则是“手性继承”的结果。2025 年，赵玉芬、高祥团队[58]报道 N-磷酰化修饰可在水相中活化外消旋氨基酸并实现同手性连接成肽，非对映异构体过量（de）高达 97.5%，证实五配位磷中间体的关键作用；D-核苷对 L-氨基酸呈现 1.2 至 7.3 倍的偏好，密度泛函计算显示 L-型五配位磷中间体的过渡态能垒低约 1.9 kcal/mol。这一系列工作将磷化学、肽键形成与手性选择统一于同一前生源反应网络，为该学说的手性偶联预言提供了直接实验证据[59]。

4.4 地外样本证据对假说的检验

地外样本的氨基酸手性分析是检验上述假说的天然实验场。Cronin 与 Pizzarello[60]于 1997 年报道 Murchison 陨石中异缬氨酸存在约 8%～9%的 L-型过量，后续分析最高达 15%～18.5%；异缬氨酸在地球生物圈极为罕见，碳氮同位素证据亦确认其地外来源，一度被视为地外手性偏置存在的最有力证据。然而 Glavin 与 Dworkin[61]于 2009 年发现，L-异缬氨酸过量程度与陨石母体水蚀变程度正相关——这提示观测到的 ee 可能并非原初偏置的直接遗存，而是母体液态水环境中放大过程的产物，“偏置+放大”的组合解释由此成为主流。

小行星返回样本带来了新的转折。隼鸟 2 号 Ryugu 样本中的非蛋白质氨基酸接近外消旋[27]；OSIRIS-REx 的 Bennu 样本中所有可测的手性非蛋白质氨基酸均为外消旋或近外消旋[20]。这些未受地球污染的样品对“地外 CPL 偏置—陨石播种”叙事构成重大挑战：若太阳系星尘中普遍存在可观的手性偏置，为何在保存最完好的小行星物质中不见踪迹？合理的推论是，手性对称性破缺与放大更可能发生在行星尺度的液态水环境中——地球本地机制与生物层面的手性锁定由此获得更强的指向性。

综观全章，各类假说并非彼此排斥，而更像同一条因果链上的不同环节：物理偏置机制给出微小但定向的初始 ee，自催化与固态放大机制将其推向单一手性，生物大分子的复制与翻译选择则完成最终锁定。地外样本证据的天平正从“地外播种”移向“本地破缺+放大”的组合框架，但这一判断仍需直接实验检验——空间环境恰恰提供了地面难以复制的验证平台：微重力与强辐射条件下的结晶与去外消旋化、在轨圆偏振光暴露与星际冰模拟等，都可能为上述机制链条补上关键的实证环节。这正是第 5 章将要展开的空间实验研究图景。

最新录用

5 生命在空间极端环境下的适应性研究

地外空间环境对地球生命而言是一种极端环境，包括微重力、宇宙辐射、高真空极端温度变化等多种应激因素。研究生命在太空环境下的适应与演化机制，虽然与生命起源没有直接关系（已起源生命的适应性而非起源过程本身），但有助于界定生命存在的环境边界，为理解生命起源第三阶段——原始细胞在极端环境中的存活与演化——提供重要参考，同时也为评估泛生假说和星际生命传播的可能性提供实验依据。

5.1 微生物在太空的生存极限与适应策略

微生物是地球上最古老、分布最广的生命形式，它们对极端环境的适应能力为研究生命在太空中的生存极限提供了理想模型。在国际空间站进行的 Tanpopo 任务中，奇球菌（Deinococcus aetherius）在太空暴露实验中显示出惊人的生存能力[62]。该菌株在强辐射、高真空和极端温度循环的综合作用下，通过进入休眠状态、高效的 DNA 修复机制（如 RecA 介导的重组修复）[63-64]以及产生保护性色素（如类胡萝卜素）等多种策略维持存活。这些研究结果侧面检验了泛生假说的可能性——即微生物可能在行星际传播中存活，并为理解早期生命在高辐射环境下的生存策略提供了线索。

中国空间站上开展的极端环境微生物研究中，从地球极端环境（如热泉、盐湖、深海热液口等）分离的微生物经过筛选后，进行了空间暴露实验[12]。这些极端环境微生物展现出向外太空拓展的潜力，为评估地球生命发生星际传播的可能性、验证岩石有生源假说提供了实验数据。同时，对极端环境微生物多层次抗逆机制的研究也挖掘了具有潜在应用价值的生物资源。

5.2 模式生物与植物的太空响应研究

利用模式生物和植物研究空间环境对复杂生命体的影响，有助于揭示生命在太空环境下的基本适应机制。中国空间站开展的斑马鱼和金鱼藻水生生态系统实验是中国在空间脊椎动物研究方面的重要突破。科研人员构建了由斑马鱼和金鱼藻组成的小型水生生态系统，于 2024 年搭载神舟十八号进入中国空间站，在问天舱生命生态柜中成功实现了 44 天的稳定运行（超过计划的 30 天）[65]。

该实验发现空间环境对斑马鱼的运动行为产生了明显影响，包括运动轨迹、集群行为和应激反应等方面的改变。金鱼藻作为初级生产者，在空间环境下的光合效率和生长速率也表现出与地面不同的特征。这些研究为未来建立长期太空生命保障系统、理解复杂生态系统在空间环境下的运行规律提供了重要参考，也为探索生命在不同重力环境下的适应性演化潜力提供了数据支持。

最终录用

6 技术挑战与未来方向

空间生命起源研究作为一个快速发展的交叉学科领域，面临着多方面的科学挑战同时也蕴含着巨大的发展潜力。基于当前研究进展和技术瓶颈，本节提出以下具有前瞻性和可操作性的未来研究方向。

6.1 空间实验的技术挑战与创新需求

空间生命起源研究在技术方法学上面临的主要挑战包括：(1)样品稳定性与活性保持——空间环境下的温度波动、辐射损伤和微重力效应可能影响实验样品的稳定性，特别是对有机分子和生物大分子的长期保存构成挑战；(2)在轨实时分析能力不足——传统的“上行-在轨实验-返回-分析”模式无法获取实验过程的动态数据，制约了对反应机理的深入理解；(3)长期自动化实验的可靠性——当前大多数空间暴露实验持续时间有限（数月至3年），而模拟真实的星际物质传输可能需要更长时间尺度的暴露。

针对上述挑战，技术创新应聚焦于以下方向：微流控芯片技术与空间实验的集成可实现微量样品的精确操控和反应监测；在轨质谱（MS）和拉曼光谱联用技术的发展，能够实现对有机分子演变的原位实时检测[66-68]；人工智能辅助实验设计，可优化暴露条件和样品组合以提高信息获取效率。中国空间站上材料舱外暴露实验装置配备的在轨实时观测相机已展示了在轨显微成像的可行性，为未来更大规模的在轨分析提供了技术基础。

6.2 长周期暴露与手性放大机制的空间验证

从生命起源三阶段研究的需求出发，未来的空间暴露实验应着重关注以下可操作的研究方向：(1)长周期暴露实验（5～10年）——模拟真实的星际物质传输时间尺度，评估有机分子在长期空间环境下的演化轨迹；(2)手性放大机制的空间验证——在轨开展Soai自催化反应、圆偏振光不对称光解等实验，直接测试前生源条件下手性放大的可行性；(3)聚合反应动力学研究——系统对比微重力与地面条件下氨基酸成肽、核苷酸聚合等关键反应的速率和路径差异，明确重力因素在生命大分子形成中的作用。

NASA计划实施的“蜻蜓”（Dragonfly）任务将对土卫六（Titan）表面的前生源化学过程进行原位探测。土卫六表面丰富的液态甲烷和碳氢化合物构成的独特化学环境，可能模拟了早期地球或外太阳系天体上的前生源化学条件。该任务携带的质谱仪（DraMS）将用于分析土卫六表面物质的分子组成，评估其孕育生命的可能性[69]。ESA的“2050航程”计划则聚焦于太阳系巨行星的冰卫星、温和系外行星和早期宇宙新物理探测，将为生命起源研究开辟新的前沿领域[70]。

最新录用

6.3 多学科交叉融合的研究范式

太空生命起源研究本质上是一个多学科深度交叉的领域。未来的突破将依赖于以下交叉方向的协同发展：(1)天体化学与合成生物学的结合——利用合成生物学工具重构前生源条件下的分子网络，与天体化学观测数据相互验证；(2)空间实验技术与行星科学的协同——将空间站实验结果与小行星/彗星样本分析、行星探测数据进行系统整合，构建从分子到行星尺度的生命起源全景图；(3)分子手性研究的跨学科攻关——整合量子化学计算、不对称合成化学和天文观测，破解生物分子手性均一性起源之谜。

此外，地球化学与天体生物学的深度结合将为了解生命起源的环境背景提供关键信息。通过研究地球早期环境条件以及陨石和彗星中的有机分子[71]，可以构建更真实的生命起源环境模型，并在空间实验中进行针对性的模拟验证。中国空间站未来计划的分子-细胞-组织-模式生物多层次实验平台，有望为这种多学科交叉研究提供独特的实验条件。

7 结论与展望

空间科学实验为解答生命起源这一重大科学问题提供了新的研究范式。本文以生命起源的三个关键演化阶段——无机小分子到有机小分子、有机小分子到生物大分子、生物大分子到原始细胞——为分析框架，系统综述了国内外在空间生命起源实验研究方面的进展。

在第一阶段（有机小分子形成）的研究方面，小行星样本分析取得了突破性成果隼鸟 2 号从 Ryugu、OSIRIS-REx 从 Bennu 采集返回的样本中均检测到多种氨基酸和全部 5 种核苷碱基[20,25-26]，证实了地外环境中可以非生物合成生命的化学构建单元。两个小行星样本中的手性氨基酸均呈外消旋状态，排除了地外物质携带预设手性偏向的可能性，将分子手性起源问题的答案指向了地球本身。

在第二阶段（生物大分子聚合）的研究方面，2026 年的突破性实验证实了肽键可以在星际尘埃冰粒的极寒真空表面上形成[30]，颠覆了传统观念。中国空间站的氨基酸成肽实验则直接探索了微重力对聚合反应的影响。Tanpopo 任务的暴露实验表明，复杂有机物在空间环境中可能比简单前体更加稳定，暗示了有机分子从太空向行星传输过程中的“自然筛选”效应。

在第三阶段（原始细胞与手性起源）的研究方面，虽然空间实验无法直接模拟原始细胞的形成过程，但对极端环境微生物适应性的研究为界定生命存在的环境边界提供了数据，对手性放大机制的理论探索也为解决手性均一性之谜指明了方向。基于小行星样本的外消旋证据，tRNA 手性选择性氨酰化等后输送放大机制获得了更多支持。第 4 章系统梳理的“物理偏置—手性放大—生物锁定”机制链条表明，手性同一性的

最新录用

形成很可能是多种机制接力完成的，而空间实验平台有望为这一链条的各环节提供地面难以复制的实证检验。

展望未来，空间生命起源研究将在以下方向继续深化。第一，长周期（5～10年）空间暴露实验将模拟真实的星际传输时间尺度，获取有机分子长期演化的动态数据。第二，在轨实时分析技术（质谱、拉曼光谱）的发展将使科学家能够捕获反应过程的瞬态信息。第三，针对手性起源的空间实验——如 Soai 自催化反应和圆偏振光不对称合成——有望为这一核心难题提供决定性证据。第四，随着詹姆斯·韦伯空间望远镜（JWST）对系外行星大气有机分子成分的远程探测能力不断提升，空间实验与天文观测的协同将构建从实验室到宇宙尺度的生命起源研究新范式。

空间生命起源研究不仅有助于揭示生命起源这一重大科学问题，也为人类未来的太空探索和地外居住提供重要参考。通过研究生命在空间环境下的适应机制，可以为长期太空任务中的生命保障和健康维护提供指导；通过探索地外生命存在的可能性，可以更深刻地理解地球生命在宇宙中的地位。随着更多国家加入太空探索的行列，特别是中国空间站的持续运行和未来深空探测计划的推进，人类对生命起源的认识必将不断深化，开启天体生物学的新篇章。

最新录用

参考文献

[1] So much more to know[J]. Science, 2005, 309(5731): 78-102

[2] DARWIN F. The life and letters of Charles Darwin: including an autobiographical chapter[M]. London: John Murray, 1887

[3] BERNAL J D. The physical basis of life[J]. Proceedings of the Physical Society, Section B, 1949, 62(10): 597-618London: John Murray

[4] 史晓颖, 李一良, 曹长群, 等. 生命起源、早期演化阶段与海洋环境演变[J]. 地学前缘, 2016, 23(6): 128-139

SHI Xiaoying, LI Yiliang, CAO Changqun, et al. Life origin, early evolution stages, and ocean environment changes[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(6): 128-139

[5] ORGEL L E. Prebiotic chemistry and the origin of the RNA world[J]. Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology, 2004, 39(2): 99-123

[6] TAMURA K, ALEXANDER R W. Peptide synthesis through evolution[J]. Cellular and Molecular Life Sciences, 2004, 61(11): 1317-1330Chapter 2: the origin of biomoleculesM//ZAIKOWSKI L, FRIEDRICH J M, SEIDEL S R. Washington:

[7] BOSE T, FRIDKIN G, DAVIDOVICH C, et al. Origin of life: protoribosome forms peptide bonds and links RNA and protein dominated worlds[J]. Nucleic Acids Research, 2022, 50(4): 1815-1828 地外有机化合物(YANG Jing, LIN Yangting, OUYANG Ziyuan. Extraterrestrial organic compounds[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, **21**(6): 165-187)

[8] HUBER C, KRAUS F, HANZLIK M, et al. Elements of metabolic evolution[J]. Chemistry-A European Journal, 2012, 18(7): 2063-2080(SHI Xiaoying, LI Yiliang, CAO Changqun, *et al*. Life origin, early evolution stages, and ocean environment changes[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, **23**(6): 128-139)

[9] MEYER-VERNET N. Basics of the solar wind[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007Cambridge:

[10] CHYBA C F, HAND K P. Astrobiology: the study of the living universe[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2005, 43: 31-74Self-repair of thymine dimer in duplex DNA

[11] LIU Y, YING J X, DING K, et al. Origin of life experiments onboard Tiangong[J]. Nature Astronomy, 2024, 8: 1343Sulfate minerals and organic compounds on Mars5

[12] CUI D, LI L Y, YANG S Y, et al. In pursuit of life beyond Earth[J]. Nature Astronomy, 2023, 7: 1004-1005The Sun, geomagnetic polarity transitions, and possible biospheric effects: review and illustrating model

[13] HORNECK G, REITZ G, RETTBERG P, et al. A ground-based program for exobiological experiments on the International Space Station[J]. Planetary and Space Science, 2000, 48(5): 507-513Search for evidence of life in space: analysis of enantiomeric organic molecules by N, N-dimethylformamide dimethylacetal derivative dependant Gas Chromatography–mass spectrometry

[14] RABBOW E, RETTBERG P, BARCZYK S, et al. EXPOSE-E: an ESA astrobiology mission 1.5 years in space[J]. Astrobiology, 2012, 12(5): 374-386

[15] RABBOW E, RETTBERG P, BARCZYK S, et al. The astrobiological mission EXPOSE-R on board of the International Space Station[J]. International Journal of Astrobiology, 2015, 14(1): 3-16bonds

[16] DE VERA J P, ALAWI M, BACKHAUS T, et al. Limits of life and the habitability of Mars: the ESA space experiment BIOMEX on the ISS[J]. Astrobiology, 2019, 19(2): 145-157Peptide synthesis through evolution

[17] BRYSON K L, SALAMA F, ELSAESSER A, et al. First results of the ORGANIC experiment on EXPOSE-R on the ISS[J]. International Journal of Astrobiology, 2015, 14(1): 55-66

[18] YAMAGISHI A, HASHIMOTO H, YANO H, et al. Four-year operation of Tanpopo: astrobiology exposure and micrometeoroid capture experiments on the JEM Exposed Facility of the International Space Station[J]. Astrobiology, 2021, 21(12): 1461-1472

[19] YADA T, ABE M, OKADA T, et al. Preliminary analysis of the Hayabusa2 samples returned from C-type asteroid Ryugu[J]. Nature Astronomy, 2022, 6(2): 214-220

[20] GLAVIN D P, DWORKIN J P, ALEXANDER C M O'D, et al. Abundant ammonia and nitrogen-rich soluble organic matter in samples from asteroid (101955) Bennu[J]. Nature Astronomy, 2025, 9(2): 199-210

[21] WILSON R, TORRES I, BESSETTE E, et al. LEOrigin space mission: illuminating life's origins[C]//EPSC-DPS Joint Meeting 2025. Helsinki: Copernicus Meetings, 2025: EPSC-DPS2025-2100

[22] CLEAVES H J, LAZCANO A. The origin of biomolecules[M]//ZAIKOWSKI L, FRIEDRICH J M, SEIDEL S R. Chemical Evolution II: From the Origins of Life to Modern Society. Washington DC: American Chemical Society, 2009: 17-43 矿物光电子与地球早期生命起源及演化初探(LU Anhuang, WANG Xin, LI Yan, *et al*. Mineral photoelectrons and their implications for the origin and early evolution of life on Earth[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, **44**(6): 1117-1123)

[23] 杨晶, 林杨挺, 欧阳自远. 地外有机化合物[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 165-187 甘氨酸在锐钛矿上的吸附及热缩合反应 3(ZHONG Xiaomei, LIU Xueming, LIU Yuqi, *et al*. Adsorption and thermal polymerization of glycine on surface of anatase[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2018, **37**(3): 505-511)

YANG Jing, LIN Yangting, OUYANG Ziyuan. Extraterrestrial organic compounds[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(6): 165-187

[24] ELSILA J E, CALLAHAN M P, DWORKIN J P, et al. The origin of amino acids in lunar regolith samples[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2016, 172: 357-369(LIN Honglei, ZHANG Xia,

YANG Yazhou, *et al*. Retrieval of the mineral abundance and particle size distribution at the landing site of Yutu rover with hyperspectral remote sensing data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, **23**(5): 831-840)

[25] NARAOKA H, TAKANO Y, DWORKIN J P, et al. Soluble organic molecules in samples of the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu[J]. Science, 2023, 379(6634): eabn9033Young Sun, galactic processes, and origin of life

[26] KOGA T, OBA Y, TAKANO Y, et al. A complete set of canonical nucleobases in the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu[J]. Nature Astronomy, 2026. DOI: 10.1038/s41550-026-02791-zYoung Sun, galactic processes, and origin of life

[27] FURUSHO A, ISHII C, AKITA T, et al. Enantioselective three-dimensional high-performance liquid chromatographic determination of amino acids in the Hayabusa2 returned samples from the asteroid Ryugu[J]. Journal of Chromatography Open, 2024, 5: 100134 从“初光”开始:FAST 早期科学及前景展望 1(LI Di, WANG Pei, ZHANG Yongkun. Shining on from the first light: the early sciences of FAST[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, **66**(11): 1272-1280)

[28] FURUKAWA Y, SUNAMI S, TAKANO Y, et al. Bio-essential sugars in samples from asteroid Bennu[J]. Nature Geoscience, 2026, 19(1): 19-24 介绍[C]//中国天文学会 2021 年学术年会摘要集. 南充: : 7

[29] MEINERT C, MYRGORODSKA I, DE MARCELLUS P, et al. Ribose and related sugars from ultraviolet irradiation of interstellar ice analogs[J]. Science, 2016, 352(6282): 208-212 XOrigin of life experiments onboard Tiangong(10)

[30] VLADILO G, HASSANALI A. Hydrogen bonds and life in the universe[J]. Life, 2018, 8(1): 1 Y YIn pursuit of life beyond Earth(8)

[31] HOPKINSON A T, WILSON A M, PITFIELD J, et al. An interstellar energetic and non-aqueous pathway to peptide formation[J]. Nature Astronomy, 2026. DOI: 10.1038/s41550-025-02765-7EXPOSE-R

[32] 鲁安怀, 王鑫, 李艳, 等. 矿物光电子与地球早期生命起源及演化初探[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(6): 1117-1123EXPOSE-E: an ESA astrobiology mission 1.5 years in space LU Anhuai, WANG Xin, LI Yan, et al. Mineral photoelectrons and their implications for the origin and early evolution of life on Earth[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(5): 897-902

[33] 钟小梅, 刘明学, 刘宇琪, 等. 甘氨酸在锐钛矿上的吸附及热缩合反应[J]. 岩石矿物学杂志, 2018, 37(3): 505-511: the ESA space experiment BIOMEX on the ISS ZHONG Xiaomei, LIU Mingxue, LIU Yuqi, et al. Adsorption and thermal polymerization of glycine on surface of anatase[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2018, 37(3): 505-511

[34] PARKER D S N, KAISER R I, KOSTKO O, et al. Gas phase synthesis of (iso)quinoline and its role in the formation of nucleobases in the interstellar medium[J]. The Astrophysical Journal, 2015, 803(2): 53First results of the ORGANIC experiment on EXPOSE-R on the ISS

[35] SOAI K, SHIBATA T, MORIOKA H, et al. Asymmetric autocatalysis and amplification of enantiomeric excess of a chiral molecule[J]. Nature, 1995, 378(6559): 767-768

[36] RICHARDS G, RÁCZ R, KOVÁCS S T S, et al. Water-group ion irradiation studies of Enceladus ice analogues: can radiolysis account for material in and around the south polar plume?[J]. Planetary and Space Science, 2025, 266: 106179Four-year operation of Tanpopo: astrobiology exposure and micrometeoroid capture experiments on the JEM exposed facility of the international space station

[37] JOYCE G F, VISSER G M, VAN BOECKEL C A A, et al. Chiral selection in poly(C)-directed synthesis of oligo(G)[J]. Nature, 1984, 310(5978): 602-604returned C-type (2)

最新录用

[38] 何裕建. 自然界中同型手性起源的难题[J]. 科学通报, 2017, 62(22): 2465-2472 HE Yujian. The problem on the origin of homochirality in nature[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(22): 2465-2472

[39] COMPTON R N, PAGNI R M. The chirality of biomolecules[J]. Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics, 2002, 48: 219-261ÁÁWater-group ion irradiation studies of Enceladus ice analogues: can radiolysis account for material in and around the south polar plume? 266:

[40] KESZTHELYI L. Origin of the homochirality of biomolecules[J]. Quarterly Reviews of Biophysics, 1995, 28(4): 473-507HASHIMOTOHEnvironmental data and survival data of deinococcus aetherius from the exposure facility of the Japan experimental module of the international space station obtained by the Tanpopo mission

[41] VESTER F, ULBRICHT T L V, KRAUCH H. Optische Aktivität und die Paritätsverletzung im β-Zerfall[J]. Naturwissenschaften, 1959, 46(2): 68C//EPSC Abstracts, Vol. 18. EPSC-DPS Joint Meeting 2025. Gottingen:

[42] QUACK M. How important is parity violation for molecular and biomolecular chirality?[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2002, 41(24): 4618-46302

[43] DREILING J M, GAY T J. Chirally sensitive electron-induced molecular breakup and the Vester-Ulbricht hypothesis[J]. Physical Review Letters, 2014, 113(11): 118103 X Y Y selection strategy for the first zebrafish cultivationexperiment on the

[44] FAMIANO M A, BOYD R N, KAJINO T, et al. Selection of amino acid chirality via neutrino interactions with 14N in crossed electric and magnetic fields[J]. Astrobiology, 2018, 18(2): 190-206A ground-based program for exobiological experiments on the International Space Station

[45] BAILEY J, CHRYSOSTOMOU A, HOUGH J H, et al. Circular polarization in star-formation regions: implications for biomolecular homochirality[J]. Science, 1998, 281(5377): 672-674

[46] DE MARCELLUS P, MEINERT C, NUEVO M, et al. Non-racemic amino acid production by ultraviolet irradiation of achiral interstellar ice analogs with circularly polarized light[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2011, 727(2): L27Introducing the *Voyage 2050* White Papers, contributions from the science community to ESA's long-term plan for the Scientific Programme(3)

[47] GLOBUS N, BLANDFORD R D. The chiral puzzle of life[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2020, 895(1): L11

[48] OZTURK S F, SASSELOV D D. On the origins of life's homochirality: inducing enantiomeric excess with spin-polarized electrons[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2022, 119(28): e22047651195(1)13

[49] HAZEN R M, FILLEY T R, GOODFRIEND G A. Selective adsorption of L- and D-amino acids on calcite: implications for biochemical homochirality[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2001, 98(10): 5487-5490

[50] FRANK F C. On spontaneous asymmetric synthesis[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 1953, 11(4): 459-463related sugars82

[51] KONDEPUDI D K, NELSON G W. Weak neutral currents and the origin of biomolecular chirality[J]. Nature, 1985, 314: 438-441

[52] VIEDMA C. Chiral symmetry breaking during crystallization: complete chiral purity induced by nonlinear autocatalysis and recycling[J]. Physical Review Letters, 2005, 94(6): 065504

[53] NOORDUIN W L, BODE A A C, VAN DER MEIJDEN M, et al. Complete chiral symmetry breaking of an amino acid derivative directed by circularly polarized light[J]. Nature Chemistry, 2009, 1(9): 729-732(6010)

[54] HEIN J E, TSE E, BLACKMOND D G. A route to enantiopure RNA precursors from nearly racemic starting materials[J]. Nature Chemistry, 2011, 3(9): 704-706(2)

最新试用

[55] TAMURA K, SCHIMMEL P. Chiral-selective aminoacylation of an RNA minihelix: mechanistic features and chiral suppression[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006, 103: 13750-13752(24)

[56] TAMURA K. Origin of homochirality in terrestrial biology[J]. Journal of Biosciences, 2025, 50: 13(11)

[57] 韩大雄, 陈伟珠, 韩波, 等. 氨基酸手性同一起源的新理论模型[J]. 中国科学 C 辑: 生命科学, 2007, 37(4): 382-38814 (2)HAN Daxiong, CHEN Weizhu, HAN Bo, et al. A new theoretical model for the origin of amino acid homochirality[J]. Science in China Series C: Life Sciences, 2007, 50(5): 580-586

[58] ZHANG Y, ZHOU L, CHEN C, et al. Homochiral ligations of amino acids by N-phosphorylation in water[J]. Cell Reports Physical Science, 2025, 6(3): 102495(5377)

[59] KAMERLIN S C L, SHARMA P K, PRASAD R B, et al. Why nature really chose phosphate[J]. Quarterly Reviews of Biophysics, 2013, 46(1): 1-132(2)

[60] CRONIN J R, PIZZARELLO S. Enantiomeric excesses in meteoritic amino acids[J]. Science, 1997, 275(5302): 951-955(1)

[61] GLAVIN D P, DWORKIN J P. Enrichment of the amino acid L-isovaline by aqueous alteration on CI and CM meteorite parent bodies[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106(14): 5487-5492 *of the United States of America*(28)

[62] YAMAGISHI A, KAWAGUCHI Y, HASHIMOTO H, et al. Environmental data and survival data of Deinococcus aetherius from the Exposure Facility of the Japan Experimental Module of the International Space Station obtained by the Tanpopo mission[J]. Astrobiology, 2018, 18(11): 1369-1374 *of the United States of America*(10)

[63] RASTOGI R P, RICHA, KUMAR A, et al. Molecular mechanisms of ultraviolet radiation-induced DNA damage and repair[J]. Journal of Nucleic Acids, 2010, 2010: 592980(6559)

[64] HOLMAN M R, ITO T, ROKITA S E. Self-repair of thymine dimer in duplex DNA[J]. Journal of the American Chemical Society, 2007, 129(1): 6-7(6)

[65] JIA C, ZHANG X, SUN H, et al. Zebrafish selection strategy for the first zebrafish cultivation experiment on the Chinese space station[J]. Life Sciences in Space Research, 2025, 46: 43-52(9)

[66] FREISSINET C, BUCH A, STERNBERG R, et al. Search for evidence of life in space: analysis of enantiomeric organic molecules by N,N-dimethylformamide dimethylacetal derivative dependant gas chromatography-mass spectrometry[J]. Journal of Chromatography A, 2010, 1217(5): 731-740(9)

[67] AUBREY A, CLEAVES H J, CHALMERS J H, et al. Sulfate minerals and organic compounds on Mars[J]. Geology, 2006, 34(5): 357-360 (5978)

[68] KOTLER J M, HINMAN N W, RICHARDSON C D, et al. Laboratory simulations of prebiotic molecule stability in the jarosite mineral group; end member evaluation of detection and decomposition behavior related to Mars sample return[J]. Planetary and Space Science, 2009, 57(12): 1381-1388 R *of the United States of America*(37)

[69] LORENZ R D, TURTLE E P, BARNES J W, et al. Dragonfly: a rotorcraft lander concept for scientific exploration at Titan[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2018, 34(3): 374-387(5302)

[70] FAVATA F, HASINGER G, TACCONI L J, et al. Introducing the Voyage 2050 white papers: contributions from the science community to ESA's long-term plan for the Scientific Programme[J]. Experimental Astronomy, 2021, 51(3): 551-558 *of the United States of America*(14)

[71] OBRIDKO V N, RAGULSKAYA M V, KHRAMOVA E G. Young Sun, galactic processes, and origin of life[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2020, 208: 105395

基金项目：中国科学院空间利用技术工程中心（No.KJZ-YY-NSM0406）—空间环境下遗传密码起源与手性的关系研究

最新录用

收稿日期：2025-12-31

通讯作者：丁昆（dingkun@ecnu.edu.cn）；赵玉芬（zhaoyufen@nbu.edu.cn）

最新录用

作者简介

丁昆 男 ，1990 年 12 月 出生于河南省汝南县，博士，现为华东师范大学信息与电子工程学院研究，博士生导师，主要研究方向为空间光电科学载荷、空间生命科学实验载荷技术及超低轨电离层探测技术等。



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



最新录用