

太阳系生命信息探测

付晓辉¹, 欧阳自远^{1,2,*}, 邹永廖¹

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100012
2. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 500022

FU Xiaohui¹, OUYANG Ziyuan^{1,2,*}, ZOU Yongliao¹

1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China
2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

FU Xiaohui, OUYANG Ziyuan, ZOU Yongliao. A review of the search for life in our Solar System. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(1): 161-176

Abstract: Searching for extraterrestrial life addresses a fundamental problem in solar system exploration. In our Solar System, the celestial bodies of interest for searching for life are Mars, Europa, Enceladus and, non-water liquid, Titan. To detect life on Mars, Viking landers carried Gas Chromatograph-Mass Spectrometer (GC/MS) and conducted three biology experiments aiming to search for metabolic activity in Martian samples. However, no organic molecules were found at the parts per billion (ppb) and the biology experiments results suggested no life present in the Martian soil. During the past decade, the systematic investigations, like high resolution camera, VIS-NIR spectrometer, thermal infrared spectrometer, APXS, GC/MS and radar, have produced a detailed knowledge of Mars' habitable environments, including river valleys and channel, lakes and deltas, aqueous minerals, polar ice caps, and water vapor in the atmosphere. Methane in the Martian atmosphere implies the existence of the mechanism(s) of production and/or release of methane on Mars. Future missions on Mars will focus on organic compound in Martian soil. Europa is a priority of exploration target for extraterrestrial life. The main reason is the presence of a water ocean beneath the icy crust and possible biosignatures in it. For Enceladus, Cassini data have revealed about a dozen or so jets of fine icy particles emerging from the south polar region. The vapor contained simple organic compounds, which may be of biological origin and also indicated potential habitable environments on Enceladus. Carbonaceous meteorites contained a wide range of soluble compounds such as amino acids, which is considered as an important source of prebiotic compounds required for the emergence of life on Earth. The results from Stardust and Deep Impact have identified a suite of primitive organic matter in comets. Some of the amino acids and amines were similar with those in carbonaceous chondrites and interplanetary dust particles (IDPs). We suggest systematically building the biomarkers to guide the search for extraterrestrial life in future, developing the technology and instruments suitable for organic detection, studying the biology of extremophiles and expanding the diversity of life. As a large nation in the world, China should carry out searching for life in future missions, which could promote our space exploration capability and exploit the new space frontier.

Key words: Solar System; extraterrestrial life; Mars; organic

摘要:寻找地外生命是人类开展太阳系探测的根本出发点。火星是太阳系中最可能存在生命的天体之一。尽管海盗号开展的生物科学实验没有获得存在生命的确凿证据,但是近二十年的探测利用高分辨成像、光谱、质谱、雷达、中子分析等多方面的探测手段,获得了河流侵蚀地貌、古湖泊河流沉积物、水成矿物、极地冰盖、大

收稿日期:2012-10-19;修回日期:2012-12-20

基金项目:国家自然科学基金项目(41303051);中国科学院空间科学战略先导科技专项空间科学预先研究项目(XDA04071900);中国科学院国家天文台青年人才基金项目

作者简介:付晓辉(1985—),男,博士,助理研究员,主要从事月球与行星科学研究。E-mail:fuxh@bao.ac.cn

* 通讯作者简介:欧阳自远(1935—),男,研究员,中国科学院院士,中国月球探测首席科学家,主要从事天体化学和比较行星学研究。E-mail:ouyangzy@bao.ac.cn

气中水蒸气组分等一系列反映火星上有水的证据。这些发现暗示了火星过去或现在存在适宜生命繁衍的环境特征。大气甲烷、火星样品中有机物是下一步火星生命探测的重点。木星和土星的天然卫星,包括木卫二、土卫二和土卫六等在地外生命的研究中引起极大关注。木卫二上的盐水海洋环境被认为可能孕育生命,海洋中可能存在类似地球上的水热地质作用。土卫二南极存在细粒冰晶的喷射,且喷射物含有对于生命非常关键的液态水、氨气和其他碳氢化合物等。碳质球粒陨石存在大量可溶性有机物,其中包括多种构成蛋白质的氨基酸。星尘号和深度撞击任务的探测结果证实彗星所代表原始物质中含有大量的有机化合物,部分类型的氨基酸在碳质陨石和星际尘埃 IDP 颗粒相同,进一步支持了彗星与地球生命的起源之间存在联系。文中分析了太阳系生命探测中亟须解决的关键问题,包括系统建立地外生物标志化合物、发展适合太阳系探测的有机物分析技术、开展地球极端生命研究。最后呼吁我国在未来火星等天体探测任务中能增加有机物探测的相关载荷,及时介入太阳系生命探测,开拓深空领域。

关键词: 太阳系; 地外生命; 火星; 有机物

中图分类号: Q693; P18 文献标志码: A 文章编号: 1005-2321(2014)01-0161-16

1 太阳系生命探测的基本科学问题

20 世纪 50 年美国和前苏联发射月球探测卫星开始,人类开始了太阳系探测的征程。尽管探测的天体目标不同、采用探测手段各异,是否存在地外生命是众多行星探测任务要回答的基本科学问题。寻找地外生命的主题贯穿了这一系列探测任务的始终,目标天体也覆盖了八大行星、矮行星、小行星和彗星等。地外生命探测的探测将为生命起源的难题打开新的突破,极大丰富对于生命的基本认识,也将帮助我们回答地球生命起源与演化、太阳系早期化学特征与演化等等重大科学问题。

在开展地外生命探测前,必须明确什么是生命或者说生命体与非生命体的本质区别。这个看似简单的问题至今没有一个普遍接受的生命定义。地球生命具有以下共同的特征:生长、繁殖和遗传、以细胞为基本结构和功能单位、新陈代谢、应激能力和进化。从生物物理的角度来讲,生命作为一个开放的系统,由物质、能量、信息 3 个基本的要素组成。地球生命是以碳化学为基础的,大部分生物分子均可看作碳氢化合物的衍生物。该类化合物具有结构稳定的共价键碳骨架,并且与氧、氮、氢等相连接形成多样的化合物。在能量和物质的交换上,绿色植物的光合作用和动物的呼吸作用,是地球生物中最为常见的两种模式。繁衍与延续是生命最基本的特性,地球生物将自身遗传信息贮存于 DNA,并通过 RNA 和蛋白质表达出来。

生命探测需要明确第二个问题是如何遴选目标天体,即判断哪些天体最可能存在生命。太阳系生命探测首要的目标是八大行星。目前已经对这些天

体开展了上百次的探测活动。距离太阳最近的水星,昼夜温差达 650°C ,长期遭受强烈的太阳风和宇宙射线辐射和陨石撞击,表面环境极为恶劣。因此,水星一般不作为地外生命研究的目标天体,尽管信使号探测结果显示北极永久阴影区次表层可能存在水冰和有机物^[1]。金星的体积、重力、组成与地球类似,被称作地球的“姐妹星”。但是金星存在的致密大气层导致表面温度高达 468°C ,且大气中含有 SO_2 、 CO 、 OCS 、 HCl 等酸性气体,这都是对生命的生存和繁衍极为不利的环境条件。类木行星由于表面温度低,主要成分为氢和氦,不太可能孕育生命。木星和土星的天然卫星,包括木卫二、土卫二和土卫六等在地外生命的研究中引起极大关注,而且认识和了解其上环境特征、可能的生命形式对于揭示早期地球生命的起源和演化具有重要意义。此外,小行星和彗星等小天体也是地外生命探测的重点,这些相对原始的天体可能保存了太阳系早期物质,特别是与生命相关的有机物。特别是,地球上的水和生命也很可能与这些小天体有密切的关联。

地外生命探测的第三个基本问题是,如何寻找生命。任何形式生命都需要必要的环境条件以支持其新陈代谢和生长繁殖。根据地球生命的认识,推测地外生命存在的必要条件包括:(1)合适的温度;(2)液态的水或其他液态介质,它既是生物体的必要组成部分,也是各种生物化学反应的必要溶剂;(3)大气层的保护,其一方面可以遮挡对有机物和生命造成伤害的辐射,另一方面生命起源的多种有机化合物,最初可能在大气中通过紫外线照射和电子辐射下合成的;(4)足够长的时间,生命形成和演化过程是非常缓慢的,地球上最早的生命是在地壳分异产生之后 10 亿年才产生的;(5)必要的有机物的

化学元素,如氢、碳、氮、氧、磷等。太阳系本身经历了长达 50 亿年的演化;而且地球作为其中一颗行星存在生命,彗星和小行星上也存在有机物。因此,太阳系生命探索中可以忽略时间和化学元素的约束,探测过程中主要以液态水、能量的供应、遗存的有机物、有机物合成过程、氧气、适宜的温度条件作为判断天体存在生命的依据。

2 火星生命的探测

自从 1887 年意大利天文学家斯基帕雷利首先观察到火星上的“运河”以来,就开始了对火星上是否存在生命的猜测。对火星的空间探测始于 20 世纪 60 年代初。从 1960 年 10 月 10 日苏联发射“火星 1960A”号火星掠飞探测器,至 2011 年 11 月 26 日美国发射“好奇”号火星巡视器,人类共开展了 41 次火星探测活动。海盗号是第一个成功着陆火星并对火星样品开展分析的探测器,其主要任务是探测火星上是否有生命或是存在过生命。近 30 年来,“找水”是美国 NASA 火星探测基本科学战略。通过火星全球勘探者、火星奥德赛,再到火星勇气号和机遇号、火星勘测轨道器和凤凰号等探测任务,确认了火星上水的存在,包括液态水。美国 2012 年 8 月 6 日成功着陆的“好奇”号搭载了专门用于火星样品中有机物分析的样品分析仪(Sample Analysis at Mars, SAM),将为火星生命问题的解答提供更多证据。

2.1 火星上生物新陈代谢过程的探测

海盗号任务包括海盗 1 号和海盗 2 号两个完全相同的探测器。海盗 1 号着陆在 Chryse 地区(22.5°N, 48°W),靠近火星一个冲击河谷。海盗 2 号降落在 Utopia 地区(48°N, 226°W),接近北极冰帽边缘。两个着陆器都搭载了用于探测和识别火星样品中有机物气相色谱-质谱仪(Gas Chromatograph Mass Spectrometer, GC/MS)。除了对土壤样品的直接分析,海盗号着陆器还设计了气体交换实验(Gas Exchange experiment, GEX)、碳-14 同位素示踪(Labeled Release experiment, LR)、碳同化实验(Carbon Assimilation 或 Pyrolytic Release experiment, PR)等三项生物实验来分析火星是否存在生命^[2]。这些生物实验都是基于对地球生命新陈代谢活动而设计的。新陈代谢是地球生命的基本特征之一。生命体作为一个开放的系统,要维持其内

部的新陈代谢就需要不断地与环境进行物质和能量的交换。海盗号生物实验的基本假设是,火星土壤中的生命体可利用实验所提供的二氧化碳或有机营养液,并在实验的时间范围内产生可探测到的新陈代谢组分^[2]。

实验一:气体交换实验。通过分析火星土壤中释放出的气体,寻找生命的信息。实验过程中火星样品密封在容器中,原有火星大气气体被抽空,容器内填充测试气体,气体组分为 91.65% He、5.51% Kr 和 2.84% CO₂,气压为 200 mbar;同时给土壤样品提供富含有机物和无机物的营养液,并对密封容器内的气体进行持续监测,来观察生物新陈代谢活动是否造成的 O₂、CO、CH₄ 等气体组分变化^[3]。同时,还开展了不同温度、湿度、培育时间条件下的对照试验,并对其中一个样品加热处理。

实验二:碳-14 同位素示踪。该实验原理是火星有机物中的碳与大气中的 CO₂ 存在类似地球上的碳循环,若土壤样品中存在生命,其新陈代谢过程会消耗有机物同时释放出 CO₂。实验中把火星土壤样品放入¹⁴C 标记的营养液中培养,通过分析是否有放射性¹⁴C 标记的 CO₂ 生成,来判断火星样品中是否存在生命。火星土壤样品密封在容器中与大气隔离,仅将水和¹⁴C 标记的营养液加入其中培养 52 个火星日。其中一个样品进行了杀菌消毒处理,2 个样品加热到 50 °C。放射性监测采用 Geiger 计数器,并同时地球土壤样品进行培养进行参照对比^[4]。

未进行杀菌处理的样品很快出现放射活度增加,但之后很快降低。地球土壤的反应与此类似。杀菌处理后的样品没有任何放射活度增加,与地球土壤样品不同。加热到 50 °C 的样品同样出现放射活度增大,但均低于未处理的火星样品和地球土壤样品。地球样品培养腔中出现 CO、CO₂ 和 CH₄。

实验三:热分解释放实验。该实验假设火星生物固碳过程可将 CO₂ 转变为有机碳化合物。实验从光照(320 nm 波长光照)、大气组分等方面模拟火星环境的基本特征,其中模拟火星大气中含碳气体(CO₂、CO)是用¹⁴C 标记的。将土壤样品放置在以上气体环境中,在光照和 8~26 °C 温度条件下培育 5 d。如果火星上存在通过光合作用(photosynthetic)或化学合成(chemosynthetic)实现固碳的生物(如地球上的植物和蓝藻),则模拟气体中¹⁴CO₂ 和¹⁴CO 会转变成有机物。培育之后的火星土壤样

品移去气体环境, 加热 120 °C 清除吸附的 CO₂ 和 CO, 之后加热到 625 °C 将有机物完全氧化。如果确实有部分放射性¹⁴C 转变成有机物, 则在加热过程中会以 CO₂ 的形式释放出来并被检测到^[5]。

以上 3 项生物实验均未获得火星中存在生命的确凿证据。高温释放实验结果证实火星土壤样品在模拟环境条件下发生固碳过程, 对比实验的结果暗示这可能是化学反应的结果而非生物成因^[6]。气体交换实验中确实检测到培养皿气体组分的变化, N₂、CO₂ 和 Ar 含量的变化与水汽加入造成火星土壤的脱吸附作用有关, 所检测到的氧气是土壤中过氧化物分解形成的^[3]。这些结果暗示火星土壤样品活跃的化学性质, 但并不是火星土壤中存在生命的证据。碳-14 示踪实验是海盗号 3 项生物实验中唯一作出火星土壤样品中存在生命的推论的实验。碳-14 标记的营养液加入火星土壤样品中之后生成¹⁴CO₂, 但加热到 160 °C 并保持 3 h 的土壤样品加入营养液后无此现象。这些暗示火星土壤中存在利用氧气分解有机物产生 CO₂ 的代谢过程, 这与地球生物呼吸作用相近^[7]。

除了以上生物实验, GC/MS 加热着陆区土壤样品到 50 °C、200 °C、350 °C、500 °C 进行直接检测。火星土壤中水和二氧化碳分别为 0.1%~1%、(50~700)×10⁻⁶, 但两个着陆点的样品中均未检测到生物成因有机物。海盗 1 号着陆器检测到土壤含量约 15×10⁻⁹ 的一氯甲烷(CH₃Cl), 海盗 2 号着陆器检测到含量为 (2~40)×10⁻⁹ 的二氯甲烷(CH₂Cl₂)。根据³⁷Cl/³⁵Cl 比值判断这些有机物来自地球物质的混染, 而非生物成因。GC/MS 此项结果颇让人意外。据估算, 每年 2×10⁸ g 的还原碳通过陨石撞击方式降落到火星, 分析精度达到 10⁻⁹ 级的 GC/MS 本应探测到这些陨石中引入有机物。学者推测火星表面长时间的太阳紫外辐射破坏了表面土壤中的有机物^[8-9] 或者火星土壤中的过氧化物快速将有机物氧化为 CO₂^[10]。另外, “凤凰”号在火星土壤中发现强氧化性的高氯酸盐, 其在加热后可与有机分子发生反应生成一氯甲烷和二氯甲烷。它是对生命存在极为不利的化学成分。因此, 海盗号分析的土壤样品中即使存在有机物, 在加热的过程中可能被分解从而无法被 GC/MS 探测到。

海盗号着陆器生物实验是人类首次也是唯一一次在地外天体上开展生命探测实验。但该实验的结果至今仍存在巨大争议。实验中检测到的固碳过

程、CO₂ 的产生等类似地球生物的新陈代谢过程, 并不能排除是化学反应的结果。另外, 墨西哥学者 Navarro-Gonzalez 等质疑火星土壤中存在微量的有机物, 但并没有被提出着陆器上的 GC/MS 检测到^[11]。

2.2 火星上液态水的证据

海盗号生物实验的结果凸显了我们对地球上的生命(还有地球之外可能的生命)的认识还不够透彻, 特别是还缺少火星环境特征的基本数据。相比直接探索生命, 研究火星的环境可能更简单可行。地球上生命存在的关键因素是液态水, 水是生命存在的先决条件。因此, 之后有关火星生命的探测开始针对火星上的液态水, 分析火星上过去和现在是否存在适宜生命繁衍的环境条件。

水星 9 号探测器返回的 7 329 张火星表面影像, 详细揭示了分析火星基本地形地貌特征, 包括冲击河床、陨石坑和火山等, 人类首次对火星及其地质特征、环境特征有了初步的认识。之后两个海盗号着陆器尽管未能发现火星存在生命的确凿证据, 但在着陆区发现水冰并探测到大气中的水。从 1996 年的火星全球勘探者号开始到 2008 年的“凤凰”号着陆器, 目前利用高分辨成像、光谱、质谱、微波雷达、中子分析等多方面的探测手段, 获得了火星上河流侵蚀地貌、古湖泊河流沉积物、水成矿物、浅表层水冰分布、极地冰盖、大气中水蒸气组分等一系列反映火星上有水的证据。这些发现暗示了火星过去或现在存在适宜生命繁衍的环境。

美国火星探路者着陆器返回的照片清楚地显示了因受强大的洪流冲击而堆积起来的鹅卵石和岩石上水作用痕迹, 这表明着陆点所在的火星 Ares 山谷几十亿年前可能发生过特大洪水, 暗示火星曾经温暖湿润且表面存在大规模的水流。火星全球勘探者在 1999 年和 2006 年分别拍摄的中纬度 Centauri Montes(38.67°S, 95.52°E) 显示, 在 7 年间山坡上形成新的碎屑沉积物, 暗示了该区域存在液态水的地质活动^[12]。2002 年 3 月“奥德赛”探测器搭载的高能中子谱仪和伽马射线谱仪的探测结果表明, 火星极区次表层可能含有丰富的冰冻水, 并绘制了火星地下水储量分布图^[13-14]。理论模型推测高纬度地区水冰分布于次表层 1~2 m 深度^[15]。2004 年 1 月, 欧洲航天局火星快车发现火星梅迪亚尼平原存在 300 m 厚的沉积物; 探测到火星南极存在冰冻水, 部分裸露在火星表面^[16]。

美国“勇气”号和“机遇”号火星车探测到火星土壤和岩石表面的赤铁矿^[17-18]、黄钾铁矾^[18-19]等水成矿物。火星快车和火星全球勘探者搭载高分辨光谱仪分别探测到火星表面分布含 H₂O 或 OH 的矿物种类, 其中诺亚纪地层主要分布的是层状硅酸盐^[20-21], 赫斯伯利亚纪地层中主要发育含水硫酸盐^[20-22]。另外, 还在火星水手峡谷周围的发现蛋白石, 其对应的地层年代为晚赫斯伯利亚世或亚马逊世, 暗示该区域曾存在大规模水地质活动^[23]。

另外, 2008 年“凤凰”号着陆器搭载的热蒸发分析仪 (TEGA) 探测到了次表层土壤中水蒸气在低温段 (295~735 °C) 和高温段 (>735 °C) 释放^[24], 这对应了火星土壤样品中不同的含水矿物相。特别是在机械臂上发现液态水滴, 这也推翻液态水不能存在于火星表面的论断^[25]。

2.3 火星上甲烷的探测

通过近二十年来火星轨道和表面巡视探测活动已经基本揭示了火星过去和现在的环境特征。其上搭载的各项科学仪器帮助我们认识四十亿年来水对火星表面形态的塑造及对表面环境形成的重要影响^[26]。然而适于生命存在和繁衍的环境不仅仅只是液态水, 还需要支持生命新陈代谢的有机碳和能量来源。2012 年发射的火星科学实验室以探测火星表面的宜居环境为主要科学目标。此次任务是美国火星探测的里程碑, 也标志着美国火星生命的探测战略主要从找水 (following the water) 到寻找生命的遗迹 (seeking signs of life) 的转变。

在 2004 年三项独立的研究相继报道火星大气中存在甲烷^[27-29]。甲烷是最简单的碳氢化合物, 由于地球上 90%~95% 甲烷都是生物成因, 火星大气中微量甲烷特别是目前仍然存在甲烷生成的过程又引起了火星生命的猜测。甲烷分子具有 4 个固有的振动, 全部位于红外波段, 4 个振动基频的波数分别为: $\nu_1 = 2\,913.0\text{ cm}^{-1}$, $\nu_2 = 1\,533.3\text{ cm}^{-1}$, $\nu_3 = 3\,018.9\text{ cm}^{-1}$, $\nu_4 = 1\,305.9\text{ cm}^{-1}$ 。每个一个固有振动对应一个光谱吸收带, 波长分别为: 3.43 μm 、6.53 μm 、3.31 μm 、7.66 μm 。利用夏威夷 CFHT 望远镜上的傅里叶变换红外光谱仪, Krasnopolsky 等^[28]观测到火星大气光谱在 3.3 μm 波长附近存在甲烷吸收特征, 估算大气中甲烷的体积分数为 $(10 \pm 3) \times 10^{-9}$ 。Formisano 等^[27]利用火星快车上搭载的行星傅里叶光谱仪同样探测到火星大气在 3 018 cm^{-1} 明显的吸收, 数据显示不同时间和区域甲烷含量不同 ($0 \sim$

$30) \times 10^{-9}$), 估算全球平均含量为 $(10 \pm 5) \times 10^{-9}$ 。同年 Mumma 等^[29-30]利用 NASA 红外望远镜 IRTF 和双子座望远镜上的高分辨率红外成像仪观测数据揭示火星局部区域大气中甲烷的含量更高 ($>250 \times 10^{-9}$)。甲烷是一种不稳定的气体, 通常仅能在大气中保存 400 a^[31]。大气中的微量甲烷暗示了火星上目前存在仍活跃的甲烷生成过程。

目前有限的探测和观测数据还不能揭示大气中的微量甲烷是生物成因还是非生物成因。为了揭示火星中甲烷来源, 可以通过研究大气中甲烷消除的过程, 估算每年火星大气的形成量来反推。火星大气中的甲烷可能通过两种过程消失, 一种是火星大气层顶部甲烷被太阳紫外线破坏, 另一种是近地表被氧化为二氧化碳。假设火星近地表大气中甲烷的光化学寿命 (photochemical lifetime) 为 $2 \times 10^{10}\text{ s}$, 若要保证大气中 10×10^{-9} 的浓度, 火星上甲烷每年产量为 126 000 kg^[27,32]。Krasnopolsky 等^[28]根据火星大气上部光化学对甲烷的破坏, 推算火星甲烷每年产量为 270 000 kg。由于火星表面过氧化物或高铝酸盐的强氧化作用的破坏, 所需的甲烷产量可能比以上估算更高。

目前推测火星大气中的甲烷可能有以下 4 种来源^[32]: (1) 火星内部地质作用形成, 如火山活动; (2) 陨石、彗星、小行星、星际介质等火星之外物质带入; (3) 火星超基性岩的水热反应形成; (4) 甲烷菌等生物成因。由于地球上火山活动所形成的甲烷数量非常少 ($<0.2\%$), 可以推测火星上火山活动形成的甲烷同样应该很有限。而且火山喷发时会释放出二氧化硫, 然而火星大气中并没有探测到该成分, 故可排除上火山作为火星上甲烷主要来源的可能性^[32]。另外, 每年约 9 000 t 的陨石和微陨石撞向火星, 其中仅 25% 能够到达表面。由于陨石本身甲烷含量很低 (碳质球粒陨石中为 0.14×10^{-6}) 且在火星大气层中经历烧蚀氧化, 其引入甲烷完全可以忽略。根据 CM2 型陨石 Murchison 进行烧蚀实验的结果, 富含有机物的碳质球粒陨石在每年甲烷引入量为 10 kg^[33]。彗星作为一种可能来源, 其甲烷的含量约为 1%, 估算每年可能带入火星的甲烷为 1 000~5 000 kg。若再将彗星撞击过程中化学反应形成的甲烷考虑在内, 彗星贡献的甲烷约为 0.8%^[32]。

另一种非生物成因的甲烷来源是超基性岩石的蛇纹石化。这种与超基性岩相关的热液系统在地球大洋中是很普遍的, 该水-岩反应过程可简单表示

为: 橄榄岩 + H₂O + C (或 CO₂) → 磁铁矿 + 蛇纹岩 + 氢氧化镁石 + H₂ + CH₄。这种变质作用通常发生 40~90 °C 温度条件下, 对应了火星表面 2 km 的深度, 而且要求在 2~20 km 存在稳定的热液供应^[34]。由于火星在 40 亿年前就存在液态水, 这种水-岩反应可能持续发生。根据此反应速率计算, 3.6 × 10¹⁷ kg 橄榄石 (对应火星全球 50 cm 厚度岩层) 发生蛇纹石化足以维持目前火星大气中甲烷的含量^[34]。因此, 目前普遍认为这可能指示了火星上的重要甲烷来源。此外, Robledo-Martinez 等根据模拟实验的结果提出了一种新的甲烷成因机制, 火星上带电的沙尘暴引起的放电效应, 将 CO₂ 气体及水分子电离, 反应的产物可能再结合生成甲烷^[35]。

除了以上非生物来源, 火星大气中的微量甲烷也可能是生物成因。甲烷碳氢同位素组成特征分析^[36]可区分两者。地球上生命在演化过程中逐渐选择碳的轻同位素¹²C。这是因为有机分子 (包括最简单的甲烷) 中,¹²C 的结合能要低于¹³C。同样, 氨基酸结合形成的蛋白质也倾向于选择¹²C。有机物中这种同位素分异特征是生命所特有的。具体的研究方法包括: 甲烷的碳和氢同位素组成 (δ¹³C 和 δ²H); 甲烷含量与乙、丙和丁烷含量和比值, 与甲烷碳同位素组成 (δ¹³C) 相关性分析; 烷烃碳和氢同位素组成 (δ¹³C 和 δ²H) 趋势分析。烷烃 δ¹³C 和 δ²H 表示为:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = \left[\frac{(\text{C}^{13}/\text{C}^{12})_{\text{sample}} - (\text{C}^{13}/\text{C}^{12})_{\text{standard}}}{(\text{C}^{13}/\text{C}^{12})_{\text{standard}}} \right] \times 1000$$

$$\delta^2\text{H}(\text{‰}) = \left[\frac{(\text{H}^2/\text{H}^1)_{\text{sample}} - (\text{H}^2/\text{H}^1)_{\text{standard}}}{(\text{H}^2/\text{H}^1)_{\text{standard}}} \right] \times 1000$$

上式中, 碳同位素标准物质拟箭石化石 Peedee Belemnite (PDB) 的¹³C/¹²C 比值为 0.011 237 2, 无机物质¹²C/¹³C 比值为 89.0。地球上生物成因甲烷的 δ¹³C 数值为 -10‰ ~ -40‰, 平均约为 -30‰, 对应的¹²C/¹³C 比值为 92, 显然高于无机标准物质拟箭石化石^[32]。

另外, 有机物手性分析也是研究火星生命一个重要的方法。自然界的氨基酸都具有手性, 但是左旋和右旋的各占一半。然而地球上生命倾向于选择左旋有机分子, 而且碳质球粒陨石中的氨基酸同样都是消旋的 (后文碳质球粒部分中有详细描述)。

“好奇号”火星科学实验室正在盖尔撞击坑开展探测活动。其上搭载的火星样品分析仪器配备了四极杆质谱仪、6 柱气相色谱仪、可调激光吸收光谱仪

等, 其科学目标是^[37]: 探测火星上的有机分子及其氧化态、分子量和化学结构; 通过溶剂萃取和化学衍化法提取氨基酸、核碱基、和羧酸; 火星大气中多种微量组分, 如 H₂O、O₂、N₂、Ar、O₃、H₃ 和 CH₄ 等在光化学作用下的日变化和大气中的季节变化; 火星大气组分和火星土壤岩石中释放气体中 C、N、O、H 及稀有气体等同位素比值。虽然初步分析结果并未检测到大气中甲烷^[38], 但之后探测过程中 SAM 将对火星大气持续开展分析。

3 木星和土星的卫星生命信息探测

3.1 木卫二

木卫二 (Europa) 是 1610 年伽利略利用望远镜发现的四颗木星卫星之一, 也是木星 63 颗卫星中体积较大的一颗。其直径为 3 138 km, 略小于月球。它距木星 67 万 km, 远大于 38 万 km 的地月距离^[39]。根据伽利略号获取的图像, 木卫二表面最突出的特征是复杂的暗色条纹和缝隙。这些条纹很可能是较温暖的下层物质暴露而引起的冰火山喷发或 3 km 处湖泊中水-冰相互作用导致抬升而形成的复杂地貌特征^[40]。木卫二赤道地区表面温度平均为 110 K (-163 °C), 两极更低, 只有 50 K (-223 °C), 所以表面的水是永久冻结的。但是潮汐力所提供的能量造成冰层仍存在地质活动, 并使得表面冰层以下的水保持液态。据估算, 冰壳厚度在 10~30 km, 冰下的海洋可能深达 100 km。伽利略号上的磁强计揭示木卫二表层下存在高电导率物质层, 推断冰层下海洋的盐度与地球海水接近, 再次印证了在木卫二表层下存在海洋的猜测。此外, 由于木星强烈的潮汐作用, 木星卫星上都出现了强烈的火山活动, 木卫二表面的冰层上也发现有火山喷发的特征^[41]。

木卫二上的盐水海洋环境被认为可能孕育生命, 但对其上生命所需能量和物质来源有不同的认识。由于木卫二表面的巨厚冰层, 可排除海洋中存在光合作用的可能性^[42]。地球深海火山口的水热地质作用也是一种可能的机制^[42], 但由于木卫二表面的冰层将下部的海洋隔离, SO₄²⁻、O₂ 和 CO₂ 等可溶性氧化物无法持续进入海洋中与还原物发生氧化还原反应, 从而无法提供这种类型生态系统所需的能量^[43]。Chyba 等^[44]提出木卫二上能量粒子、宇宙射线等太空辐射与表面冰层发生相互作用, 引发活跃的辐射分解过程, 可能为木卫二生命提供能量和

有机物。目前在木卫二上发现的辐射分解氧化物有 H_2O_2 、 O_2 、 SO_2 、 CO_2 和 SO_4^{2-} 离子^[45], 支持了辐射分解作用的发生。伽利略号探测和地基望远镜观测结果揭示, H_2O_2 相对含量(相对 H_2O 的分子数量百分比, 下同)为 0.13%, CO_2 相对含量为 0.036%; O_2 相对含量为 1.2%~4.6%, 其主要赋存于表层冰中。奇怪的是, 伽利略号仅探测到以上辐射分解反应的氧化物而没有发现还原物。模拟实验发现了同样的结果, 富 CO_2 冰样品经电子照射后 CO_2 转变成了 CO 和 H_2CO_3 , 但生成的还原性 H_2CO 、 CH_3OH 、 CH_4 量非常少^[45]。但是, 这些有限的还原物质和带电粒子辐射产生的能量可能对于木卫二上生命的形成与繁衍是非常关键的。另外, 彗星和陨石等的撞击也有可能为木卫二带入大量的外源有机物^[46]。由于木卫二同时存在液态水、能量和有机物供应等三个生命存在的基本条件, 在太阳系中最有可能存在地外生命的天体之一。

木卫三 (Ganymede) 是太阳系中最大的卫星, 直径比水星大但密度小。木卫三是伽利略卫星中唯一具有磁场的卫星, 磁场强度仅为地球的 1/10。这也说明其内部发生完整的圈层分异。木卫四 (Callisto) 体积与木卫三相近, 但其内部分异程度较低, 表面分布大量的古老撞击坑。与木卫二相同, 木卫三和木卫四表面分布着大量水冰, 冰层下可能存在盐水海洋, 但目前尚无有机物或生命存在的确凿证据。

3.2 土卫二

土卫二 (Enceladus) 是土星的第六大卫星, 平均直径为 505 km, 只有月球直径的七分之一, 质量仅为地球的 1.8×10^{-5} 。与月球相同, 土卫二的自转与公转相同步, 永远同一面朝向土星。尽管其体积很小且距离土星较远(轨道半径为土星半径的 4 倍), 其上至今依然存在活跃的地质活动。1981 年 8 月, 旅行者 2 号在人类历史上首次近距离地观测土卫二, 获取的清晰图像揭示了其表面的基本形貌特征。2004 年 7 月之后卡西尼号进入土星周围开展探测, 土卫二是该任务的优先探测目标。期间卡西尼号对其进行了多次近距离的飞掠。除了观测到表面的地质构造外, 最重要的是观测到土卫二南极存在细粒冰晶的喷射且喷射物中存在有机物^[47-48]。2005 年 1 月的飞掠中, 卡西尼号上的成像科学子系统 (ISS) 首次观测到土卫二南极地区喷发出的由细小冰晶构成的羽状物。之后 2 月 17 日的飞掠中, 磁

力计观测到土卫二附近的离子回旋波的能量有所增强, 通过测定离子回旋波的频率确定这些物质是水。在 7 月 14 日的飞掠中, 卡西尼号正好穿越了土卫二气体云, 离子和中性粒子分光计 (INMS) 和宇宙尘埃分析仪 (CDA) 从而能够直接获取喷射物的样本, 其成分包括 H_2O (91%±3%)、 CO_2 (3.2%±0.6%)、 N_2 或 CO (4%±1%) 和 CH_4 (1.6%±0.4%)。这些羽状物可能来源于南极地区的喷射口, 并据此推断该区域目前依然地质活动活跃, 源于下部的可能热源使得冰盖其下存在液态水。

除了对于生命非常关键的液态水, 喷射物中还包括氨气 (0.82%±0.02%) 和其他碳氢化合物 (C_2 — C_5), 如甲烷、乙烷、丙烷和乙炔等。这些有机物的详细种类和含量可参见文献^[49-50]。土卫二南极地区喷射物中的有机物可能有以下 6 种来源^[51]: 彗星带入; 类似土卫六的 Tholin 有机大分子形成的; Fisher-Tropsch 合成反应形成有机物; 水岩反应形成; 甲烷菌等微生物成因; 热分解成因。喷射物中水的 D/H 比值为 $2.9(+1.5/-0.7) \times 10^{-4}$, 这与彗星的 D/H 比值 (约 3×10^{-4}) 接近, 接近地球海洋水比值 (1.56×10^{-4}) 的 2 倍、原始太阳星云比值 (约 2.1×10^{-5}) 的 10 倍。另外, 喷射物中气体组成与彗星彗发部分组成非常接近^[52]。因此, 彗星可能为土卫二提供了气体和难降解有机物。外太阳系可能广泛分布的 Tholin 有机物大分子的热分解也是土卫二上简单有机物 (C_1 — C_5) 的可能来源。Fischer-Tropsch 合成 (FTT) 是行星上气体和有机物形成的重要化学反应, CO 与氢气发生反应形成碳氢化合物和水^[51]。此反应的表达为: $n\text{CO} + (n+0.5x)\text{H}_2 \rightarrow \text{C}_n\text{H}_x + n\text{H}_2\text{O}$ 。模拟实验的结果显示^[53], FTT 反应更可能是为土卫二提供多碳 C_n 有机分子 (如 C_3H_8 和 C_5H_{12}) 而没有 C_2H_2 , 喷射物中的 CH_4 和其他低碳有机物应该是通过热分解作用形成。该卫星上同样可能存在的水-岩反应生成甲烷过程, 该反应前文火星部分已详细描述。地球的地下玄武岩中存在甲烷菌消耗氢气生成甲烷的生态群落^[54-55], 土卫二上可能存在类似的生态系统^[56]。但是这种生态系统中仅能生成甲烷, 无其他有机分子, 不能解释土卫二喷射物中 C_2 — C_5 有机物的成因^[51]。前文中提及的热分解反应是行星上将难降解有机物分解为低碳有机分子 (如 C_1 — C_5) 的重要过程, 同样也是土卫二喷射物中有机物的可能成因。

卡西尼号发现的喷射物及其有机物组分暗示土

土卫二上可能存在类似地球上甲烷菌的生态群落。未来还需对 CH_4 、 CO 和 $\text{C}_2\text{—C}_5$ 等及其有机物同位素比值开展精确分析, 以确定其来源和形成机制, 从而为揭示土卫二是否存在生命提供依据。

3.3 土卫六

土卫六(Titan)是土星最大的卫星, 是仅次于木卫三的太阳系第二大卫星。它也是太阳系中唯一具有浓密大气层的卫星, 其上存在类似地球的大气循环过程, 表面分布树枝状河流系统^[57], 极区存在众多湖泊和海洋^[58-59]。土卫六被认为是太阳系中最可能存在生命的天体之一, 主要有以下原因^[59]: (1) 土卫六大气组成等特征与早期地球非常相近, 是研究地球早期地质和生命演化的重要参考; (2) 土卫六高空大气到表面甚至包括次表层都存在非常活跃的、复杂的有机化学过程, 这与早期地球非常相似; (3) 土卫六表面存在海洋, 这是生命演化重要的环境; (4) 土卫六同样也是认识地球及其生命未来演化的重要参考。也正是土卫六对于认识地球和地外生命起源的重要科学意义, 它成为也是目前研究成果最多的卫星之一。

1944 年荷兰裔美国天文学家杰拉德·柯伊伯利用望远镜上的光谱分析仪, 发现土卫六大气中的甲烷。但由于浓密大气层的存在, 无法直接观测其表面的地质特征。旅行者 1 号和 2 号在 20 世纪 80 年代初对土卫六开展飞掠探测, 发现土卫六大气的主要成分是氮气(98%)和 CH_4 (约 1.4%)、 H_2 (0.1%) 和 $\text{Ar}(3 \times 10^{-5})$ ^[60-61]。卡西尼-惠更斯号在 2004 年 7 月 1 日到达土星, 开展对土星及其卫星的探测, 同年 12 月 25 日释放出的惠更斯号成功着陆土卫六, 获取了目前认识其表面地质和环境特征最重要的数据。其搭载的气相色谱质谱仪(Gas Chromatograph Mass Spectrometer, GCMS)确认了土卫六的大气主要组分为氮气和甲烷, 而且甲烷在表层大气中浓度更高, 同时探测到极微量的 C_2H_6 、 C_2H_2 、 C_2N_2 和 HCN 等^[62]。这些有机物的发现并不意外, 甲烷和氮气的紫外光分解作用的模型已经预测到土卫六大气中的这些组分的存在^[63-65]。土卫六具有类似地球水循环一样的甲烷循环。据估算, 当土卫六大气中层的甲烷湿度超过 80% 时, 就会产生上升气流, 并形成厚厚的云层, 降落甲烷雨。

土卫六的低雷达反射特征存在暗示大面积分布的是填充液态物质的湖泊, 而不是其他天体上常见的撞击坑等等^[58]。由于其表面环境温度低(94 K),

这些液态物质不是水而是甲烷、乙烷和其他烃类混合物。与地球早期的古海洋一样, 土卫六上的“烷烃海”可能孕育了生命, 这些生命通过利用海洋中的烷烃等有机物获取能量支持生命新陈代谢^[66]。根据 Mckay 等^[62] 和 Schulze-Makuch 等^[68] 提出有机物与氢气的光化学反应模型, 土卫六表层大气中乙烷和乙炔等与氢气反应生成甲烷的反应分别释放出 57 kJ/mol 和 334 kJ/mol 的能量。这大于地球上甲烷菌生存所需的最低能量(42 kJ/mol)。该模型还预测该化学过程会造成土卫六表面上乙烷、乙炔和氢气等反应物含量相比大气层上部较低, 这也在后续的研究一一得到证实^[69-71]。尽管这不是生命的确凿证据, 这些发现大大提升了土卫六存在生命的可能性。

此外, 土卫六上地热形成的间歇性温泉和陨石彗星撞击造成冰的液化, 造成局部出现液态水或水-氨的环境。如果水能长时间内维持液态特别是含有一定数量的氨的环境^[72], 可能造成土卫六表面 Tholin 有机物的分解形成氨基酸^[73-74], 并孕育出利用化学能自供自给的生命。土卫六自转速度的变化暗示其可能同木卫二一样存在地下海洋^[75]。目前尚不清楚海洋的化学组成, 推测可能为氨-水的混合物或含硫酸铵盐^[76]。

基于以上环境特征, 土卫六被认为是目前太阳系中最可能存在生命的天体, 甚至超过火星^[77]。它将会是未来行星探测任务特别是针对地外生命探测的重要目标天体。

4 小行星和彗星上的生命信息

4.1 小行星探测

小行星是太阳系内类似行星环绕太阳运动, 但体积和质量比行星小得多的天体。目前太阳系内已知最大的小行星 1 号小行星 Ceres, 它的直径约有 1 000 km, 小的小行星则只有十几 m, 已经发现的小行星中, 直径大于 200 km 的只有 26 颗。小行星在太阳系内运动范围从地球轨道内侧一直延伸到太阳系边缘, 其中绝大多数小行星分布在火星和木星轨道之间, 称之为主带小行星。小行星可依据其可见一近红外光谱特征进行分类, 其中数量最多的是 C 型小行星(75%)和 S 型小行星(17%)。C 型小行星整体反照率低、可见一近红外光谱曲线无明显的吸收特征, 一般被认为是碳质球粒陨石的母体。含挥发

性成分的碳质球粒陨石, 如 Ivuna、Orgueil、Murchison 和 Tagish Lake 等, 含有多种有机分子, 包括氨基酸、咖啡碱、嘧啶磷等生命起源所需的重要有机分子。这类小行星将是深空探测的重要目标天体, 从 C 型小行星上采集样品返回地球, 将对生命起源的研究有极其重大的意义。

S 型小行星表面反照率较高, 光谱曲线在 $1\ \mu\text{m}$ 附近出现显著吸收, 推测由橄榄石和辉石等镁铁质硅酸盐组成。其一直被认为是普通球粒陨石的母体, 隼鸟号任务返回的 Itokawa 小行星的样品分析结果确认了两者的成因关系^[78]。隼鸟号 (Hayabusa) 是日本宇宙航空研究开发机构的小行星探测计划。这项计划的主要目的是将隼鸟号探测器送往小行星 25143 (丝川; Itokawa) 并采样返回。2003 年 5 月 9 日隼鸟号发射升空, 2005 年 9 月到达 Itokawa 小行星^[79]。在完成一系列科学探测之后^[80-81], 探测器于 2005 年 11 月尝试通过接触小行星表面以收集表面样品^[82]。尽管遭遇到了很多困难, 隼鸟号最终在 2010 年 6 月 12 日返回地球并成功回收了登陆舱。经过仔细大量的检查, 科学家们在显微镜下找到了超过 1 500 个颗粒, 被证实是地外物质, 很可能是来自 Itokawa^[78]。

隼鸟号第一次向人们提供了直接研究小行星表面有机物质的机会。Itokawa 是 S 类型小行星, 是 LL5-6 普通球粒陨石的母体^[80]。尽管由于形成温度较高, Itokawa 的有机物质含量会偏低, 但是它可能含有来自彗星或碳质球粒陨石的有机物质以及太阳风携带并注入进表面的有机物质前体 (如 CN)。利用二维高效液相色谱结合高灵敏度荧光检测以及二次飞行质谱 (TOF-SIMS) 对回收颗粒的溶液萃取物进行分析和检测。实验结果表明, 颗粒中的甘氨酸和 DL-丙氨酸与月壤氨基酸的分布一致。但是甘氨酸和 L-丙氨酸是地球环境中最普遍存在的氨基酸, 而且检测到的含量与空白相似; 即便 D-丙氨酸通常认为是来自于地外, 但含量也接近于空白水平, 说明研究样品中的 D-丙氨酸不是地外来源^[83]。因此, 实验中发现的甘氨酸和 DL-丙氨酸大多数都是地球污染物, 另外无芳香烃红外吸收特征 (aromatic infrared bands, AIB) 也同样支持这个结论。总之, 隼鸟号探测器此次返回的颗粒不含有地外有机物质。

尽管小行星自身不存在生命, 火星和木星之间小行星带的存在对于太阳系中生命的生存和繁衍具有重要意义。位于火星和木星之间小行星带存在这

数以百万计的小行星。这些小行星对于地球上的生命有双重的意义, 一方面小行星可能带来了生命早期演化所需的水^[84]和氨基酸^[85], 而小行星的撞击可能造成生物的集群灭绝。美国学者 Martin 和 Livio 提出, 巨行星与其内侧的小行星带这样的搭配对于太阳系内生命的演化是非常关键的^[86], 巨行星的存在阻止了其内侧物质聚集形成行星, 而若不存在巨行星, 则可能导致小行星带失去动力平衡, 导致强烈的撞击事件。

4.2 碳质球粒中的有机物

陨石记录了太阳系早期的化学过程, 是认识地球之外世界的重要样品。降落的碳质球粒陨石可能将有机物带入早期地球上, 这些有机物可能是目前地球上繁荣生命的“种子”^[87]。碳质球粒陨石数量较少, 仅占降落陨石的 4%, 根据化学成分和矿物组成划分为 CI、CM、CR、CV、CO、CH、CB、CK 等亚类。碳质球粒陨石发生较低程度的热变质和水变质作用, 代表了太阳系早期的物质组成。碳质球粒陨石中 C 含量为 2%~5%, 这些碳主要以有机物、碳酸盐以及少量的前太阳颗粒 (如金刚石、石墨和碳化硅) 等形式存在^[88]。在 CO、CV 和 CK 亚类, 有机物以结构复杂、不可溶的干酪根形式存在^[89]。CI、CM 和 CR 中同时还存在大量可溶性有机物 (如氨基酸), 这些可溶性有机物约占了有机物总量的 70%。组成的多样性是碳质球粒陨石中有机物的共同特征, 这不仅体现在有机物含量的差异, 表现在同类型陨石中不溶性和可溶性有机物种类的差异^[90]。

氨基酸是组成蛋白质和酶的基本单位, 在地球生物圈内广泛分布。球粒陨石中存在的氨基酸被认为与地球原始有机物和生命起源有密切的联系。在 CM 型陨石 Murchison 和 Murry 中已经发现超过 80 种氨基酸, 几乎包括所有类型 2~8 个碳原子的链状和环状的单胺^[87,91]。碳质球粒陨石中的氨基酸是非常多样的。已经在陨石样品中找到了 8 种构成蛋白质的氨基酸: 甘氨酸、丙氨酸、脯氨酸、缬氨酸、亮氨酸、异亮氨酸和谷氨酸等; 陨石还存在地球上很少或没有的氨基酸类型。Schmitt-Kopplin 等^[92]利用超高分辨率傅立叶变换离子回旋共振质谱仪 (FT-ICR MS) 分析到数千种组成、数百万种不同的结构的有机分子。由于之前的研究受到分析方法和精度的限制, Murchison 陨石中氨基酸的化学复杂性可能被严重低估^[93]。而水作用变质程度更深的 CI 型

陨石中同样发现氨基酸含量更高, 如 Orgueil 和 Ivuna。相比 Murchison 和 Murray, 这两种陨石中氨基酸的分布较为简单, 以 β -丙氨酸和甘氨酸为主。另外, 不同类型的碳质球粒陨石中氨基酸的含量也有明显差异。南极发现的 CR2 型陨石 Elephant Moraine (EET) 92042 和 Graves Nunatak (GRA) 95229 是目前发现氨基酸含量最高的陨石, 含量分别为 180×10^{-6} 和 249×10^{-6} [93]。

氨基酸分子为手性分子, 有左旋和右旋两种光学异构体, 被称为 *L* 型(左)和 *D* 型(右)两种。这两者之间呈相互镜像关系。地球上组成生命体的氨基酸都是为左旋, 非生物成因氨基酸表现为消旋特征(存在等量左旋和右旋对映异构体, $D/L=1$)。因此, 分子结构是区分陨石中氨基酸为生物还是非生物成因的重要手段。Murchison 陨石在降落之后内部取样的分析结果显示其所含氨基酸是消旋的 ($D/L=1$), 说明这些是陨石自身包含的氨基酸, 并非地球上有机物的混染。但是, Cronin 和 Pizzarello [94] 分析 Murchison 陨石中非消旋 α -二烷基氨基酸出现微弱对映体过量 (enantiomeric excess)。其中 CM 型 Murchison 中 *L* 型异缬氨酸对映体过量为 $L_{ee} = 18.5 \pm 0.6$, CI 型陨石 Orgueil 过量为 $L_{ee} = 15.2 \pm 0.4$ 。这种左旋异常的特点与地球上的有机物相似, 可能暗示地球前生物有机物是由陨石带入的。Bonner 和 Rubenstein [95]、Bailey 等 [96] 及 Lucas 等 [97] 提出在氨基酸合成过程中, 前太阳系星云中紫外偏振光 (UV circularly polarized light, UV-CPL) 的照射造成星际介质中有机物发生不对称的光解造成对映体过剩。然而模拟实验的结果显示照射后对应体过量很低, 仅为 $L_{ee} = 2\% \sim 3\%$ [98]; 而且这种辐射作用深度前, 不太可能影响形成于陨石和小行星体内部的异缬氨酸 [99]。有学者对不同类型的碳质球粒陨石中氨基酸的分析, 推测该现象与陨石母体小行星之上发生的水蚀变有关 [93, 99]。

4.3 彗星上的有机物

彗星是太阳系形成早期原始吸积盘外缘物质凝聚形成的。由于其没有经历行星的热变质和分异过程, 彗星仍然保存这太阳系形成早期的原始物质, 而且可能存在与星际介质、原始太阳星云中类似的有机物。特别是, 彗星的撞击为太阳系的行星带入的水和复杂有机分子。因此, 彗星可能在地球及其生命演化中扮演了重要角色。彗星由彗星核和彗尾两部分组成。在实现彗星近距离和原位的探测之前,

彗星的研究主要是通过地基和天文望远镜观测。彗星一般认为有等量的冰和尘埃组成; 其中冰包含了 H_2O 、 CO 、 HCN 、 CO_2 等易挥发区分。通过紫外、可见光、红外和毫米波的天文观测, 已经发现了彗星上存在多种复杂有机物。由于彗尾的气体环绕遮蔽彗星核部, 我们对于核部形貌、组成和结构等了解甚少, 只能根据彗尾的组成进行推断。星尘号 (Stardust) 和深度撞击 (Deep Impact) 是 NASA 专门针对彗星的探测任务, 特别是星尘号成功采集彗星样品返回 [100]。这些近距离探测数据和实验室分析结果将揭示彗星所代表原始物质组成和太阳系早期演化历史。

星尘号 (Stardust) 于 1999 年 2 月 7 日发射, 主要目的是探测彗星 81P/Wild 2 及其彗发成分组成。它于 2004 年 1 月飞越 81P/Wild 2, 飞越彗星时从彗星彗发收集到尘埃样品, 并拍摄了详细的冰质彗核图片。2006 年 1 月星尘号返回舱成功地在地球着陆。研究结果表明彗星 81P/Wild 2 的粒子含有大量的有机化合物, 部分类型的氨基酸在碳质陨石和星际尘埃 IDP 颗粒中已经发现。总体来说, 包括含量较低的芳香碳和烯碳, 以及丰度较高的脂肪族和含有杂原子官能团的化合物, 例如酰胺、羧酸和乙醇或乙醚 [101]。N/C 和 O/C 的原子比值 (XANES 数据) 说明杂原子含量变化较大; 这些元素比值都高于原始陨石中的有机化合物。Cody 等认为在星尘号样品中至少存在三种类型的有机物 [101]: (1) 密度相对较大、中等富 O 和 N 的粒子, 功能团与原始碳质球粒陨石中的有机物相似; (2) 高度富 N、中等富 O 的粒子; (3) 高度富 O 中等富 N 的粒子。化学性质方面, 包括元素丰度和官能团类型, 其变化范围如此之大, 说明彗星 81P/Wild 2 中的有机物具有多种来源。De Gregorio 等对星尘号收集的纳米级球粒 (nanoglobule) 进行研究并报道了其中两个具有同位素异常球粒的实验结果 [102]。其中一个来自 Track 80 的纳米球粒含有大量的芳香化合物, 并具有显著的 ^{15}N 异常 ($\delta^{15}N = 1.120\%$), 但在同一个 track 中的非球粒有机物则含有芳香化合物与 CO 的混合物, 并且 ^{15}N 的异常较小, 混合物非常类似于原始陨石中的不溶性有机物。另一个纳米级球粒来自 Track 2, 含有具有大量腈基和羧基官能团的非芳香族化合物。这些有机物非常富 D ($\delta D = 1.000\%$), 但 $^{15}N/^{14}N$ 比值落在地球范围内。De Gregorio 等 [102] 认为纳米级球粒具有的同位素异常, 极有可能是保存了

星际介质或者太阳星云外部区域的低温 ($<10\text{ K}$) 化学特征。

深度撞击任务 (Deep Impact) 是 NASA 的一个彗星探测计划。其科学目标是探测彗星周围气体和内部组成的差异, 研究彗星的结构特征和表面层的强度。深度撞击任务获取高清晰图像 ($<10\text{ m/pixel}$) 首次揭示了彗星核上的撞击坑, 并发现了彗星核向外上物质的喷射。另外, 探测器上发射出的 370 kg 重的撞击体将以 10.3 kg/s 的速度撞击彗星 Tempel 1, 造成彗星核部达 10^6 kg 物质被挖掘, 并瞬间喷发形成大量的冰粒和尘埃^[103]。红外光谱仪分析了撞击前后彗星表面挥发性物质的组成和含量, 发现撞击后最大的不同是有机物含量的显著增加。撞击瞬间 C_2H_6 含量高达 1.82 ± 0.4 , 远高于撞击前后 (0.194 ± 0.041 和 0.353 ± 0.027); 而 HCN 和 CO_2 含量增加并不明显^[104]。表 1 中比较了 Tempel 1 和其他源自奥尔特星云彗星的成分, 发现撞击溅射物的组成与这些彗星整体相近。这暗示短周期彗星 Tempel 1 与源自奥尔特星云长周期彗星来自原始行星盘同一区域。

之前对彗星的大量研究已经确认了冰的存在, 但不知其具体成分。Deep Impact 任务的成功实施使得科学家证明了彗星中水冰的存在。关于水的形成, Drobyshevski 等人认为, 是氢气、氧气以及有机物质发生反应生成了水和其他产物 ($\text{O}_2 + \text{H}_2 + \text{有机物} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO} + \text{HCN} + \text{其他产物}$)^[105]。彗星中液态水的存在以及广泛存在有机物, 是原始细菌能够形成和演化的理想条件, 这可能进一步支持了彗星与地球生命的起源之间存在联系。

5 太阳系生命探测亟须解决的关键问题

5.1 系统建立地外生物标志化合物

前文中已经详细探讨了太阳系天体中生命存在的基本条件, 分析太阳系中可能存在生命的天体及其上存在支持生命的物质和环境条件。然而, 目前这些太阳行星、小行星和彗星上生命的可能证据都是零碎的, 而且都是通过分析天体上生命宜居环境来判断。以火星为例, 由于海盗号的原位分析未能检测到土壤样品中的有机物, 之后长达几十年的火星探测任务着重于表面的生命宜居环境分析, 特别是现在和过去水的证据。在未来的太阳系探测中应该建立系统的生物标志化合物作为分析判断地外生命的依据。

在地球科学中, 生物标志化合物定义为具有特殊生物来源、保存在沉积物和沉积岩石中的有机化合物 (主要是脂类)。生物死后, 其遗体中的大多数蛋白质、核酸和糖类被生物分解成二氧化碳和水; 被埋藏进入还原环境后, 被厌氧生物进一步降解。之后只有很少部分抗降解有机分子保存下来。而且在沉积物深埋和成岩过程中, 其结构会发生变化, 最终形成稳定的地质构型。标志化合物的重要特点是化合物骨架的继承性, 裂解、重排、异构化和芳构化等反应都不会改变。由于不同生物标志化合物的生物前驱物赋存于不同环境之中, 并与环境协同演化, 分析地层中生物标志化合物组合不仅可得到其前驱物组成信息, 还是判断古环境氧含量、水体盐度、氧化还原条件的重要指示剂。

表 1 Tempel 1 和其他彗星有机组分含量比较^[104]

Table 1 The organic volatile composition of Tempel 1 and other comets^[104]

项目	C_2H_6	HCN	CH_3OH	CO	CH_4	C_2H_2
彗星 9P/Tempel 1						
A. 撞击前	0.194 ± 0.041	0.18 ± 0.06	1.32 ± 0.20			
B. 撞击后	0.353 ± 0.027	0.21 ± 0.032	0.99 ± 0.17	4.3 ± 1.2	0.54 ± 0.30	0.13 ± 0.04
C. 溅射物	0.59 ± 0.18					
奥尔特星云彗星						
153P/Ikeya-Zhang	0.62 ± 0.13	0.18 ± 0.05	2.5 ± 0.5	4.7 ± 0.8	0.51 ± 0.06	0.18 ± 0.05
Lee	0.67 ± 0.07	0.29 ± 0.02	2.1 ± 0.5	1.8 ± 0.2	1.45 ± 0.18	0.27 ± 0.03
Hale-Bopp	0.56 ± 0.04	0.27 ± 0.04	2.1	12.4 ± 0.4	1.45 ± 0.16	0.31 ± 0.1
Hyakutake	0.62 ± 0.07	0.18 ± 0.04	1.7-2	14.9 ± 1.9	0.79 ± 0.08	0.16 ± 0.08
1P/Halley	约 0.4	约 0.2	1.7 ± 0.4	约 3.5	<1	约 0.3
C/1999S4	0.11 ± 0.02	0.10 ± 0.03	<0.15	0.9 ± 0.3	0.18 ± 0.06	<0.12

注: 表中数据显示的是有机组分相对水(假设含量为 100)的相对含量。

要建立起地外生命的标志化合物, 必须首先明确该天体上的生物标志化合物是如何保存、不同地质历史时期标志化合物结构的差异。地外生物标志化合物的建立是以我们对地球生物的认识为基础, 需要综合利用环绕和原位探测数据、采集的样品和源自该天体陨石的的分析结果等等。欧空局上世纪九十年代提出判断火星上目前和现在存在生命的 6 项标准是: 存在水、晶格无 C—H 键的矿物、碳质碎屑、复杂结构有机大分子、有机物的手性、不同源区有机物的同位素分异等。所对应的生物标志化合物包括: 生物活动相关矿物、独特的化石、微化石和生物膜沉积、手性有机物分子、碳同位素分异、类似地球生命的有机物分子。为了给欧空局 ExoMars 任务的生命探测提供输入, Parnell 等^[106]系统分析火星上有机物的可能来源, 研究火星环境条件下有机物的降解过程(特别是紫外线对有机物的分解), 提出了 46 种可能的有机分子作为生物标志化合物, 这将为 ExoMars 开展火星生命探测提供可参考的判断依据。

随着探测任务的增加和研究程度的深度, 逐步建立起用于目标天体的生命标志化合物, 配合目标天体的生命探测是地外生命研究中的一个重要部分。同时, 生命标志化合物的建立, 与生命探测任务的实施同时发展的互为促进的。相比火星, 其他天体如木卫二、土卫二和土卫六等由于目前获得数据对其表面的形貌和组成、表面环境、地质演化等信息有限, 尚未建立生命标志化合物。如何系统建立目标天体的生命标志化合物, 如何将这些标志化合物的分析加入到探测任务制定和载荷设计中, 将是未来太阳系生命信息探测中重要的研究课题。

5.2 发展适合太阳系探测的有机物分析技术

在太阳系探测的历程中, 专门用于地外生命或有机物探测的仪器非常少。以火星探测为例, 海盗号着陆器首次搭载的用于火星样品中有机物探测和同位素分析气相色谱-质谱仪(GC/MS), 其同时配合开展了火星生物实验。美国凤凰号着陆器的气体分析仪(TEGA)与英国猎兔犬着陆器的气体分析载荷包(GAP)设计类似, 采用高温 1 000 °C 释放出火星样品中的气体, 并将可能的有机物中的碳氧化为 CO₂, 质谱仪可分析样品中气体种类和含量、C 等元素的同位素比值。最新发射的火星科学实验室搭载的用于火星样品中与生命信息相关的分子、元素及同位素的化学分析的载荷包 SAM, 其携带了第二台用于有机物分析的气相色谱仪。然而, 这些仪器测

量结果均不令人满意。海盗号着陆器生物实验的结果至今仍存在巨大争议。有学者质疑着陆器上的 GC/MS 的测试灵敏度低, 没有检测到火星土壤中存在有机物的降解物。凤凰号的 TEGA 仅检测到富钙碳酸盐分解产生的 CO₂, 没有发现火星土壤中的有机物。火星科学实验室 SAM 尚未检测到火星样品中存在有机物。欧空局计划 2016 年发射的火星探测任务 ExoMars 上搭载的火星有机分子分析仪(MOMA), 其科学目标包括检测火星样品中微量有机物分子, 通过碳同位素和分子手性分析判断有机物的来源, 其对有机物的探测灵敏度和精度尚未知。

火星等地外天体中有机物的含量极低, 且容易受到航天器和仪器本身携带的地球有机物的污染。此外, McSween 等^[107]总结了近年来搭载在环绕探测器上的化学分析仪器。用于主量元素和稳定同位素分析的粒子激发 X 射线谱仪(APXS)、伽马射线谱仪(GRS)技术成熟, 广泛应用于月球、火星等天体的原位和环绕探测活动中。相比于以上仪器, 有机物特别是复杂分子的分析技术应用较少。实验室中有机分子的定性和定量分析方法, 还不能适应太阳系探测任务中轻小型、低能耗、耐低温和辐射等要求。搭载在探测器上的有机分子分析仪器是当前地外生命探测的瓶颈。

5.3 开展地球极端生命研究

区域一般生物的环境条件, 地球上有些微生物生存在极端环境中。微生物学家和地质学家先后在各种极端环境中发现了各种微生物, 例如: 嗜盐菌(halophiles)可在 15% 甚至饱和的氯化钠水溶液中生长; 嗜酸菌(acidophiles)可在 pH 值为 3 甚至 0.8 的酸性环境中生存, 嗜碱菌(alkalophiles)可在 pH ≥ 10 的环境中生长; 嗜热菌(thermophiles)可在 85~100 °C 的陆地温泉甚至在 130 °C 的海底热泉中生长; 嗜冷菌(psychrophiles)可以在 -17 °C 以下生长; 嗜压菌(barophiles)可在 4 × 10⁴ kPa 甚至更高压力环境下生长。

这些极端微生物的发现生命说明在没有太阳光照射或有机物输入的环境中同样可以生存, 扩大了生物圈的范围, 丰富了自然界的生物多样性, 也暗示生物在经历灾难性撞击事件仍可以幸存。更重要的是, 这些极端环境中的微生物对生命起源的研究、地外生命探索具有重要启示意义, 为认识地外生命可能的生存状态和生存方式提供重要参考, 对于太阳系行星及其卫星、小行星和彗星上可能生命的探测大有裨益^[108-109]。以海底黑烟囱中发现的大量化学

无机自养细菌为例, 它们利用不同的无机化合物如 H_2 、 S 、 NH_4^+ 和 Fe^{2+} 等作为能量来源来固定 CO_2 。这种生命形式可能同样存在于木星和土星卫星上盐水海洋中。地球南极沃斯托克湖中极端环境微生物群落的发现, 暗示了同样为温度极低、贫有机质环境的木卫二也可能存在类似的微生物。而火山作用形成的热泉中的嗜高温微生物为研究火星上部分类似区域的生命提供参考。此外, 非“宜居”环境中生存的极端生物也说明仅通过研究环境物理条件来推断地外生命存在与否的方法可能是不可靠的。

为了研究这些微生物对极端环境的适应性, 已经对嗜高温、嗜盐、嗜酸和耐强辐射的微生物进行了基因测序。通过基因测序工作可以为认识地球生命的演化提供重要信息, 而且也能为揭示火星等天体上可能存在简单生命的形式提供可靠参考。

6 结语

美国和前苏联等航天大国开展了长达 60 多年的太阳系探测活动, 但截至目前尚未发现地球之外的天体存在生命的确凿证据。美国在《行星探测 2013—2022 十年规划》中提出的三项关键科学方向之一即探测行星宜居环境, 一方面通过卫星、彗星、小行星等天体上有机物的探测揭示其来源和形成机制, 另一方面对研究火星、木卫二、土卫二和土卫六现在的环境特征是否支持生命的存在^[110]。未来美国计划开展火星样品返回, Mars Astrobiology Explorer-Cacher (MAX-C) 将是样品返回三阶段任务的第一个探测器, 也是 NASA《行星探测 2013—2022 十年规划》中最重要的大型探测任务。欧空局计划在 2016 年发射的 ExoMars 也将火星过去和现在的生命遗迹作科学目标之一。我国月球与深空探测开始于 2007 年发射的嫦娥一号绕月卫星, 起步较晚, 与美国 NASA、欧洲 ESA 等有明显差距。根据 2011 年《中国的航天》白皮书^①, 我国将选择有限目标, 分步开展深空探测活动, 其中包括推进开展对太阳系行星、小行星和太阳的探测活动。作为最可能存在生命的太阳系行星的火星, 目前已经确定有液态水和地下水冰, 曾经有在适合生命生存和繁衍的环境, 但还没有发现能证实生命的确凿证据。未来我国将火星探测活动中, 除了火星表面形貌、大气的探测, 非常有必要增加有机物探测的相

关载荷。针对地外生命的开展探测, 瞄准太阳系探测中最基本、最具吸引力的科学问题, 这将是我国在太阳系探测中迎头赶上的最好机会。目前, 地球之外是否存在生命的难题尚未解答, 及时介入火星等天体的生命探测将使我国在国际空间探测活动中占有有利地位, 抓住航天机遇, 开拓外太空新领域。

参考文献

- [1] Neumann G A, Cavanaugh J F, Sun X, et al. Bright and dark polar deposits on Mercury: Evidence for surface volatiles [J]. *Science*, 2013, 339: 296-300.
- [2] Soffen G A. Scientific results of the Viking missions [J]. *Science*, 1976, 194: 1274-1276.
- [3] Oyama V I, Berdahl B J. The Viking gas exchange experiment results from Chryse and Utopia surface samples [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(28): 4669-4676.
- [4] Levin G V, Straat P A. Viking labeled release biology experiment: Interim results [J]. *Science*, 1976, 194: 1322-1329.
- [5] Klein H. Automated life-detection experiments for the Viking mission to Mars [J]. *Origins of Life*, 1974, 5(3/4): 431-441.
- [6] Horowitz N H, Hobby G L, Hubbard J S. Viking on Mars: The carbon assimilation experiments [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(28): 4659-4662.
- [7] Levin G V, Straat P A. Life on Mars? The Viking labeled release experiment [J]. *Biosystems*, 1977, 9(2/3): 165-174.
- [8] Biemann K. The implications and limitations of the findings of the Viking organic analysis experiment [J]. *Journal of Molecular Evolution*, 1979, 14(1/2/3): 65-70.
- [9] Biemann K, Oro J, Toulmin P, et al. The search for organic substances and inorganic volatile compounds in the surface of Mars [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(28): 4641-4658.
- [10] Benner S A, Devine K G, Matveeva L N, et al. The missing organic molecules on Mars [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, 97(6): 2425-2430.
- [11] Navarro-González R, Navarro K F, Rosa J D L, et al. The limitations on organic detection in Mars-like soils by thermal volatilization-gas chromatography-MS and their implications for the Viking results [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(44): 16089-16094.
- [12] Malin M C, Edgett K S, Posiolova L V, et al. Present-day impact cratering rate and contemporary gully activity on Mars [J]. *Science*, 2006, 314: 1573-1577.
- [13] Boynton W V, Feldman W C, Squyres S W, et al. Distribution of hydrogen in the near surface of Mars: Evidence for subsurface ice deposits [J]. *Science*, 2002, 297: 81-85.

① 中华人民共和国国务院办公厅. 2011 年中国的航天. 2011 年 12 月.

- [14] Mitrofanov I, Anfimov D, Kozyrev A, et al. Maps of sub-surface hydrogen from the high energy neutron detector, Mars Odyssey[J]. Science, 2002, 297: 78-81.
- [15] Bandfield J L. High-resolution subsurface water-ice distributions on Mars[J]. Nature, 2007, 447: 64-67.
- [16] Bibring J P, Langevin Y, Poulet F, et al. Perennial water ice identified in the south polar cap of Mars[J]. Nature, 2004, 428: 627-630.
- [17] Arvidson R E, Poulet F, Morris R V, et al. Nature and origin of the hematite-bearing plains of Terra Meridiani based on analyses of orbital and Mars exploration rover data sets[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(E12): E12S08.
- [18] Klingelhöfer G, Morris R V, Bernhardt B, et al. Jarosite and hematite at Meridiani planum from Opportunity's Mössbauer Spectrometer[J]. Science, 2004, 306: 1740-1745.
- [19] Elwood Madden M E, Bodnar R J, Rimstidt J D. Jarosite as an indicator of water-limited chemical weathering on Mars [J]. Nature, 2004, 431: 821-823.
- [20] Bibring J-P, Langevin Y, Gendrin A, et al. Mars surface diversity as revealed by the OMEGA/Mars Express observations[J]. Science, 2005, 307: 1576-1581.
- [21] Poulet F, Bibring J P, Mustard J F, et al. Phyllosilicates on Mars and implications for early martian climate[J]. Nature, 2005, 438: 623-627.
- [22] Gendrin A, Mangold N, Bibring J P, et al. Sulfates in martian layered terrains: The OMEGA/Mars Express view [J]. Science, 2005, 307: 1587-1591.
- [23] Milliken R E, Swayze G A, Arvidson R E, et al. Opaline silica in young deposits on Mars[J]. Geology, 2008, 36(11): 847-850.
- [24] Smith P H, Tamppari L K, Arvidson R E, et al. H₂O at the Phoenix landing site[J]. Science, 2009, 325: 58-61.
- [25] Rennó N O, Bos B J, Catling D, et al. Possible physical and thermodynamical evidence for liquid water at the Phoenix landing site[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114 (E1): E00E03.
- [26] Grotzinger J. Beyond water on Mars[J]. Nature Geoscience, 2009, 2(4): 231-233.
- [27] Formisano V, Atreya S, Encrenaz T, et al. Detection of methane in the atmosphere of Mars[J]. Science, 2004, 306: 1758-1761.
- [28] 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.
- [29] Mumma M J, Novak R E, DiSanti M A, et al. Detection and mapping of methane and water on Mars[J]. Bulletin of the American Astronomical Society, 2004: 1127.
- [30] Mumma M J, Villanueva G L, Novak R E, et al. Strong release of methane on Mars in northern summer 2003[J]. Science, 2009, 323: 1041-1045.
- [31] Nair H, Summers M E, Miller C E, et al. Isotopic fractionation of methane in the martian atmosphere[J]. Icarus, 2005, 175(1): 32-35.
- [32] Atreya S K, Mahaffy P R, Wong A S. Methane and related trace species on Mars: Origin, loss, implications for life, and habitability[J]. Planetary and Space Science, 2007, 55(3): 358-369.
- [33] Court R W, Sephton M A. Investigating the contribution of methane produced by ablating micrometeorites to the atmosphere of Mars [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 288(3/4): 382-385.
- [34] Oze C, Sharma M. Have olivine, will gas: Serpentinization and the abiogenic production of methane on Mars[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(10): L10203.
- [35] Robledo-Martinez A, Sobral H, Ruiz-Meza A. Electrical discharges as a possible source of methane on Mars: Lab simulation [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39 (17): L17202.
- [36] Allen M, Sherwood Lollar B, Runnegar B, et al. Is Mars alive[J]? EOS, Transactions, American Geophysical Union, 2006, 87(41): 433-439.
- [37] Webster C R, Mahaffy P R. Determining the local abundance of martian methane and its ¹³C/¹²C and D/H isotopic ratios for comparison with related gas and soil analysis on the 2011 Mars Science Laboratory (MSL) mission[J]. Planetary and Space Science, 2011, 59(2/3): 271-283.
- [38] Leshin L, Mahaffy P, Webster C, et al. Volatile, isotope, and organic analysis of Martian fines with the Mars Curiosity rover[J]. Science, 2013, 341: 1238937.
- [39] Chela-Flores J. On the possibility of biological evolution on the moons of Jupiter[M] // Chela-Flores J. The Science of Astrobiology. New York: Springer, 2011: 151-170.
- [40] Schmidt B E, Blankenship D D, Patterson G W, et al. Active formation of chaos terrain over shallow subsurface water on Europa[J]. Nature, 2011, 479: 502-505.
- [41] Chyba C F, Phillips C B. Possible ecosystems and the search for life on Europa[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2001, 98(3): 801-804.
- [42] Reynolds R T, Squyres S W, Colburn D S, et al. On the habitability of Europa[J]. Icarus, 1983, 56(2): 246-254.
- [43] Gaidos E J, Nealon K H, Kirschvink J L. Life in ice-covered oceans[J]. Science, 1999, 284: 1631-1633.
- [44] Chyba C F. Energy for microbial life on Europa[J]. Nature, 2000, 403: 381-382.
- [45] Hand K P, Carlson R W, Chyba C F. Energy, chemical disequilibrium, and geological constraints on Europa[J]. Astrobiology, 2007, 7(6): 1006-1022.
- [46] Pierazzo E, Chyba C F. Cometary delivery of biogenic elements to Europa[J]. Icarus, 2002, 157(1): 120-127.
- [47] Porco C C, Helfenstein P, Thomas P C, et al. Cassini observes the active south pole of Enceladus[J]. Science, 2006, 311: 1393-1401.

- [48] 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: 1419-1422.
- [49] Waite J H, Magee B, Brockwell T, et al. Enceladus plume composition[C]//Proceedings of European Planetary Science Congress, 2010: 61-63.
- [50] Waite 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: 487-490.
- [51] McKay C P, Khare B N, Amin R, et al. Possible sources for methane and $\text{C}_2\text{-C}_5$ organics in the plume of Enceladus[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 71(1): 73-79.
- [52] Mumma M J, Charnley S B. The chemical composition of comets-emerging taxonomies and natal heritage[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2011, 49(1): 471-524.
- [53] Hill H G, Nuth J A. The catalytic potential of cosmic dust: Implications for prebiotic chemistry in the solar nebula and other protoplanetary systems[J]. *Astrobiology*, 2003, 3(2): 291-304.
- [54] Chappelle F H, O'Neill K, Bradley P M, et al. A hydrogen-based subsurface microbial community dominated by methanogens[J]. *Nature*, 2002, 415: 312-315.
- [55] Stevens T O, McKinley J P. Lithoautotrophic microbial ecosystems in deep basalt aquifers[J]. *Science*, 1995, 270: 450-455.
- [56] McKay C P, Porco C C, Altheide T, et al. The possible origin and persistence of life on Enceladus and detection of biomarkers in the plume[J]. *Astrobiology*, 2008, 8(5): 909-919.
- [57] Elachi C, Wall S, Allison M, et al. Cassini radar views the surface of Titan[J]. *Science*, 2005, 308: 970-974.
- [58] Stofan E, Elachi C, Lunine J, et al. The lakes of Titan[J]. *Nature*, 2007, 445: 61-64.
- [59] Raulin F, McKay C, Lunine J, et al. Titan's astrobiology [M]//Brown R, Lebreton J P, Waite J. Titan from Cassini-Huygens. New York: Springer, 2010: 215-233.
- [60] Lindal G F, Wood G E, Hotz H B, et al. The atmosphere of Titan: An analysis of the Voyager 1 radio occultation measurements[J]. *Icarus*, 1983, 53(2): 348-363.
- [61] Coustenis A, Bezaud B, Gautier D. Titan's atmosphere from Voyager infrared observations: I. The gas composition of Titan's equatorial region[J]. *Icarus*, 1989, 80(1): 54-76.
- [62] Niemann H, Atreya S, Bauer S, et al. The abundances of constituents of Titan's atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe[J]. *Nature*, 2005, 438: 779-784.
- [63] Yung Y L, Allen M, Pinto J P. Photochemistry of the atmosphere of Titan: Comparison between model and observations[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 1984, 55: 465-506.
- [64] Lunine J I, Yung Y L, Lorenz R D. On the volatile inventory of Titan from isotopic abundances in nitrogen and methane [J]. *Planetary and Space Science*, 1999, 47(10): 1291-1303.
- [65] Vuitton V, Yelle R, Cui J. Formation and distribution of benzene on Titan [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(E5): 1-18.
- [66] Benner S A, Ricardo A, Carrigan M A. Is there a common chemical model for life in the universe[J]? *Current Opinion in Chemical Biology*, 2004, 8(6): 672-689.
- [67] McKay C P, Smith H D. Possibilities for methanogenic life in liquid methane on the surface of Titan[J]. *Icarus*, 2005, 178(1): 274-276.
- [68] Schulze-Makuch D, Grinspoon D H. Biologically enhanced energy and carbon cycling on Titan[J]. *Astrobiology*, 2005, 5(4): 560-567.
- [69] Lorenz R D, Mitchell K L, Kirk R L, et al. Titan's inventory of organic surface materials[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2): 1-6.
- [70] Clark R N, Curchin J M, Barnes J W, et al. Detection and mapping of hydrocarbon deposits on Titan[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(E10): 1-28.
- [71] Strobel D F. Molecular hydrogen in Titan's atmosphere: Implications of the measured tropospheric and thermospheric mole fractions[J]. *Icarus*, 2010, 208(2): 878-886.
- [72] Sarker N, Somogyi A, Lunine J I, et al. Titan aerosol analogues: Analysis of the nonvolatile tholins[J]. *Astrobiology*, 2003, 3(4): 719-726.
- [73] Neish C, Lorenz R, O'Brien D. The potential for prebiotic chemistry in the possible cryovolcanic dome ganesa macula on Titan[J]. *International Journal of Astrobiology*, 2006, 5(1): 57-65.
- [74] Neish C D, Somogyi Á, Lunine J I, et al. Low temperature hydrolysis of laboratory tholins in ammonia-water solutions: Implications for prebiotic chemistry on Titan [J]. *Icarus*, 2009, 201(1): 412-421.
- [75] Lorenz R D, Stiles B W, Kirk R L, et al. Titan's rotation reveals an internal ocean and changing zonal winds[J]. *Science*, 2008, 319: 1649-1651.
- [76] Grindrod P, Fortes A, Nimmo F, et al. The long-term stability of a possible aqueous ammonium sulfate ocean inside Titan[J]. *Icarus*, 2008, 197(1): 137-151.
- [77] Shapiro R, Schulze-Makuch D. The search for alien life in our solar system: Strategies and priorities[J]. *Astrobiology*, 2009, 9(4): 335-343.
- [78] Nakamura T, Noguchi T, Tanaka M, et al. Itokawa dust particles: A direct link between S-type asteroids and ordinary chondrites[J]. *Science*, 2011, 333: 1113-1116.
- [79] Fujiwara A, Kawaguchi J, Yeomans D, et al. The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa[J]. *Science*, 2006, 312: 1330-1334.
- [80] Abe M, Takagi Y, Kitazato K, et al. Near-infrared spectral results of asteroid Itokawa from the Hayabusa spacecraft[J]. *Science*, 2006, 312: 1334-1338.

- [81] Okada T, Shirai K, Yamamoto Y, et al. X-ray fluorescence spectrometry of asteroid Itokawa by Hayabusa[J]. *Science*, 2006, 312: 1338-1341.
- [82] Yano H, Kubota T, Miyamoto H, et al. Touchdown of the Hayabusa spacecraft at the Muses sea on Itokawa[J]. *Science*, 2006, 312: 1350-1353.
- [83] Naraoka H, Mita H, Hamase K, et al. Preliminary organic compound analysis of microparticles returned from asteroid 25143 Itokawa by the Hayabusa mission[J]. *Geochemical Journal*, 2012, 46(1): 61-72.
- [84] Alexander C O D, Bowden R, Fogel M, et al. The provenances of asteroids, and their contributions to the volatile inventories of the terrestrial planets[J]. *Science*, 2012, 337: 721-723.
- [85] Ehrenfreund P, Glavin D P, Botta O, et al. Extraterrestrial amino acids in Orgueil and Ivuna: Tracing the parent body of CI type carbonaceous chondrites[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2001, 98(5): 2138-2141.
- [86] Martin R G, Livio M. On the formation and evolution of asteroid belts and their potential significance for life [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, 428(1): L11-L15.
- [87] Chyba C, Sagan C. Endogenous production, exogenous delivery and impact-shock synthesis of organic molecules: An inventory for the origins of life[J]. *Nature*, 1992, 355: 125-132.
- [88] Sephton M A. Organic compounds in carbonaceous meteorites[J]. *Natural Product Reports*, 2002, 19(3): 292-311.
- [89] Cody G D, Alexander C O D. NMR studies of chemical structural variation of insoluble organic matter from different carbonaceous chondrite groups[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(4): 1085-1097.
- [90] Pizzarello S, Cooper G, Flynn G. The nature and distribution of the organic material in carbonaceous chondrites and interplanetary dust particles[M]// Laurretta D S, McSween H Y. *Meteorites and the Early Solar System II*. Tucson, Arizona: The University of Arizona Press, 2006: 625-651.
- [91] Martins Z. Organic chemistry of carbonaceous meteorites[J]. *Elements*, 2011, 7(1): 35-40.
- [92] Schmitt-Kopplin P, Gabelica Z, Gougeon R D, et al. High molecular diversity of extraterrestrial organic matter in Murchison meteorite revealed 40 years after its fall[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(7): 2763-2768.
- [93] Glavin D P, Callahan M P, Dworkin J P, et al. The effects of parent body processes on amino acids in carbonaceous chondrites[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2010, 45(12): 1948-1972.
- [94] Cronin J R, Pizzarello S. Enantiomeric excesses in meteoritic amino acids[J]. *Science*, 1997, 275: 951-955.
- [95] Bailey J, Chrysostomou A, Hough J H, et al. Circular polarization in star-formation regions: Implications for biomolecular homochirality[J]. *Science*, 1998, 281: 672-674.
- [96] Bonner W A, Rubenstein E. Supernovae, neutron stars and biomolecular chirality[J]. *Biosystems*, 1987, 20(1): 99-111.
- [97] Lucas P W, Hough J, Bailey J, et al. UV circular polarisation in star formation regions: The origin of homochirality[J]. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 2005, 35(1): 29-60.
- [98] Flores J J, Bonner W A, Massey G A. Asymmetric photolysis of (RS)-leucine with circularly polarized ultraviolet light [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1977, 99(11): 3622-3625.
- [99] 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: 5487-5492.
- [100] 欧阳自远. 太阳系探测的进展与比较行星学的主要科学问题[J]. *地学前缘*, 2006, 13(3): 8-18.
- [101] Cody G D, Ade H, Alexander C O D, et al. Quantitative organic and light-element analysis of comet 81P/Wild 2 particles using C-, N-, and O- μ -xanes[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2008, 43(1/2): 353-365.
- [102] De Gregorio B T, Stroud R M, Nittler L R, et al. Isotopic anomalies in organic nanoglobules from comet 81P/Wild 2: Comparison to Murchison nanoglobules and isotopic anomalies induced in terrestrial organics by electron irradiation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(15): 4454-4470.
- [103] Hörz F, Bastien R, Borg J, et al. Impact features on Stardust: Implications for comet 81P/Wild 2 dust[J]. *Science*, 2006, 314: 1716-1719.
- [104] Mumma M J, DiSanti M A, Magee-Sauer K, et al. Parent volatiles in comet 9P/Tempel 1: Before and after impact[J]. *Science*, 2005, 310: 270-274.
- [105] Drobyshevski E M, Kumzerova E A, Schmidt A A. Deep impact mission to Tempel 1 favours new explosive cosmogony of comets[J]. *Astronomical and Astrophysical Transactions*, 2007, 26: 251-266.
- [106] Parnell J, Cullen D, Sims M R, et al. Searching for life on mars: Selection of molecular targets for ESA's Aurora ExoMars mission[J]. *Astrobiology*, 2007, 7(4): 578-604.
- [107] McSween H Y, McNutt R L, Prettyman T H. Spacecraft instrument technology and cosmochemistry[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(48): 19177-19182.
- [108] Cavicchioli R. Extremophiles and the search for extraterrestrial life[J]. *Astrobiology*, 2002, 2(3): 281-292.
- [109] 陈骏, 连宾, 连斌, 等. 极端环境下的微生物及其生物地球化学作用[J]. *地学前缘*, 2006, 13(6): 199-207.
- [110] National Research Council. *Vision and Voyages for Planetary Science in the Decade 2013-2022*[M]. Washington: National Academies Press, 2011.