

WAN Liming, TANG Hong, LI Xiongyao, LIU Jianzhong. Analysis of the Key Elements of Martian Habitable Environment and Its Implication for Tianwen-3 Site Selection (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(5): 1285–1306. CSTR:32142.14.cjss.2024-0131. DOI:10.11728/cjss2025.05.2024-0131

火星宜居环境关键要素分析及其对 天问三号选址的启示*

万李明^{1,3} 唐红^{1,2,3} 李雄耀^{1,2,3} 刘建忠^{1,2,3}

1(中国科学院地球化学研究所 月球与行星科学研究中心 贵阳 550081)

2(中国科学院比较行星学卓越创新中心 合肥 230026)

3(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 火星宜居环境是火星探测和行星科学的重要研究内容之一。通过分析火星的探测任务及其研究成果,研究了火星宜居环境的四个关键要素,包括生命所需关键元素(碳、氮、硫和磷)、液态水、适宜的气候和能量来源。对比分析乌托邦平原以及阿拉伯高地西北部中的四个典型区域(茅尔斯峡谷、大山撞坑、麦克劳林撞坑和奥克夏高原)的地质背景和宜居环境关键要素特征,结果表明,乌托邦平原以其广泛的液态水活动痕迹和丰富的生命指示性矿物展现出重要的科学研究价值,成为天问三号任务的重点候选着陆区。本研究为天问三号任务着陆区的选择以及火星宜居环境的探索提供了重要的依据。

关键词 火星探测, 宜居环境, 着陆选址, 天问三号

中图分类号 P691

Analysis of the Key Elements of Martian Habitable Environment and Its Implication for Tianwen-3 Site Selection

WAN Liming^{1,3} TANG Hong^{1,2,3} LI Xiongyao^{1,2,3} LIU Jianzhong^{1,2,3}

1(Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081)

2(Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026)

3(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The study of Martian habitable environment is an important aspect of Mars exploration and planetary science. This paper presents a comprehensive analysis of the key factors influencing Martian habitability, by reviewing the research achievements from past Mars exploration missions. The anal-

* 国家重点研发计划青年科学家项目 (SQ2022YFF0500123) 和中国科学院青年创新促进会项目 (Y2022099) 共同资助

2024-10-20 收到原稿, 2025-03-19 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ysis focuses on four essential criteria necessary for life as we know it: the availability of key elements (carbon, nitrogen, sulfur, and phosphorus), the presence of liquid water, suitable climate conditions, and energy sources that could support life. These criteria form the foundation for understanding the potential for life on Mars, both in its past and in possible future scenarios. Based on these factors, comparing and the geological background and key elements of habitable environments of Utopia Planitia and four typical areas of northwest of Arabia Terra (Mawrth Vallis, Oyama Crater, McLaughlin Crater, Oxia Planum). These regions were selected based on their geological characteristics and the available evidence of water-related activity. The findings emphasize that Utopia Planitia, with its extensive traces of ancient liquid water activity, is a promising candidate for landing missions. The region is notable for its rich mineral composition, including the presence of minerals that strongly indicate the past or present potential for habitable conditions. These mineral traces provide invaluable clues regarding the availability of key life-supporting elements and the climatic conditions that could have prevailed in Mars' ancient past. In contrast, while Mawrth Vallis and Oxia Planum also provide compelling geological evidence of past water activity, they present certain challenges. These regions are known for their complex and highly varied geological history, which makes interpreting the evidence of habitability more difficult. Moreover, the accessibility and preservation of key habitability features in these areas may be compromised due to erosional and environmental factors. On the other hand, Oyama Crater and McLaughlin Crater, although presenting some interesting findings, are less favorable candidates due to their environmental harshness, as well as limited evidence of sustained water activity or suitable conditions for life. The paper reinforces the significance of Utopia Planitia as an important target for future Mars missions, including the Tianwen-3 mission, which aims to explore the planet's potential for past or present life. And this paper offers critical insights that could guide the selection of landing sites for future missions and advance the exploration of habitable environments on Mars.

Key words Mars exploration, Habitable environment, Landing site, Tianwen-3

0 引言

火星作为太阳系内最有可能存在生命的行星之一,自20世纪以来一直是人类探测的重要目标。1976年美国的维京1号和2号着陆器成功登陆火星,进行了详细的地质和大气分析,其中一个重要的内容是寻找未知的火星生命,但未能提供明确的火星生命存在的证据^[1,2]。随后多个轨道探测任务包括火星全球探勘者号、奥德赛号和火星快车号集中于寻找水的线索并探测到火星表面特别是高纬度地区的水冰分布,提供了火星上存在水的重要证据^[3-5]。美国2003年发射的火星车机遇号和勇气号分别着陆于子午线平原和古谢夫撞击坑,都发现了含水矿物的存在,表明火星地质历史中存在水成环境,指示其表面可能经历过温暖湿润的气候,推测具备生命存在的潜在可能性^[6]。基于早期对火星水环境的发现,2011年发射的火星车好奇号探测目标为重点探索火星是否具备宜居环境,特别是适合微生物生存的条件^[7],标志着一

个新阶段的开始,此后的探测任务都重点聚焦于分析火星是否曾经或仍然具备宜居性条件。

评估火星宜居环境涉及多个要素,主要包括生命所需关键元素、液态水、适宜的气候和能量来源^[8-10]。许多探测任务发现了支持火星具备宜居环境的证据。火星车好奇号通过分析火星的土壤和大气,发现甲烷和有机分子等,表明火星曾经存在适宜生命生存的条件^[7]。2021年美国发射的火星车毅力号成功登陆火星,重点寻找古代微生物的生命迹象,并收集岩石和土壤样本,计划带回地球进行详细分析,推动对火星生命遗迹的探索^[11]。同年,中国的天问一号任务也成功实现了对火星的环绕、着陆和巡视探测,获取大量关于火星表面形态和地质构造演化的重要数据^[12-14]。未来中国计划开展天问三号任务,实现火星样品返回,可能为火星上潜在的生命痕迹提供重要信息^[15,16]。已经开展的火星探测任务不仅为火星宜居性研究提供了新线索,也能为未来的天问三号任务的选址和采样返回计划提供重要参考。

为了评估火星的宜居环境, 探寻火星的生命迹象, 系统分析了火星宜居环境的四大关键要素, 分析了火星上生命所需关键元素、水环境、气候条件和能量来源的特征及其在火星宜居性中的作用, 并在此基础上, 针对天问三号选址, 从科学意义出发对比了五个预选着陆区, 提出乌托邦平原可作为天问三号的优选着陆区域。

1 火星宜居环境关键要素

随着对火星研究的不断深入, 在经历了寻找水源和探索宜居性阶段后, 未来的探测任务逐步进入寻找生命迹象阶段^[17]. 评估火星宜居环境的关键要素包括支持生命的基本条件 and 环境因素. 生命所需基本要素, 例如碳、氮、硫和磷, 是构成有机分子的基础, 并支撑着生物体的代谢活动. 液态水作为生命存在的必要条件成为研究的重点, 尤其是在火星现代和历史上表面和地下水的分布情况. 气候条件则是决定火星能否提供稳定居住环境的关键因素. 能源方面, 火星稀薄大气难以保留热量, 氧化还原反应提供的化学能被认为可能是火星上微生物 (例如古菌) 获取能量的重要方式之一. 火星已有的探测任务, 包括正在开展的毅力号和天问一号任务, 在气候、大气成分、土壤水冰分布及太阳辐射等方面都进行了深入研究, 获得了关于火星宜居环境关键要素的丰富研究成果, 为全面评估火星的宜居环境提供了有力支持.

1.1 与生命相关的关键元素

生命的存在与维持依赖于一系列在生物化学反应中的关键元素. 地球上所有已知的生命形式大多依赖于四种基础元素, 即碳、氮、硫和磷. 这些元素在有机分子的形成、能量的储存与传递以及生化过程的催化中起着不可或缺的作用^[18]. 因此, 在评估火星宜居性时, 探讨这四种元素的存在形式和分布至关重要.

1.1.1 含碳物质

碳是构成地球生命的基础元素之一, 能够形成独特的有机化合物, 尽管含碳物质可能通过非生物过程产生, 但其仍是评估行星是否具备生命支持能力的关键指标. 目前在火星表面已经发现了多种含碳的物质, 包括甲烷、碳酸盐、复杂有机分子以及二氧化碳和一氧化碳等无机碳物质^[19,20].

火星大气中二氧化碳 (约占大气的 95%) 是火星

碳循环的重要组成部分, 可能通过水岩相互作用形成碳酸盐矿物和甲烷^[21,22]. 火星大气中光化学反应通过分解二氧化碳生成少量一氧化碳和氧原子, 形成了大气中碳和氧的循环机制, 此过程不仅调节了火星大气的成分, 还产生了活性氧分子和自由基, 影响了表面矿物的氧化状态和火星表层的化学环境, 对火星整体化学循环至关重要^[23-25].

2004 年欧洲空间局的火星快车轨道器首次在火星大气中检测到微量的甲烷, 测得其全球平均浓度为 10 ± 5 ppbv, 之后痕量气体轨道器 (TGO) 发现低浓度的甲烷可能是由于其在大气中迅速分解或扩散造成的^[26,27]. 随后火星车好奇号和早期的地面望远镜观测显示, 甲烷浓度具有季节性变化的趋势, 表明火星上甲烷存在间歇性释放特征, 其来源可能包括生物和非生物过程 (见图 1^[28])^[22,29]. 生物来源可能是产甲烷细菌^[30]; 而非生物甲烷产生机制包括地质过程 (例如橄榄石或辉石在蛇纹石化过程中通过与水反应释放氢气, 随后氢气在镍基或铁基催化剂等特定的催化条件下, 与二氧化碳发生氧化还原反应生成甲烷^[31])、本地或陨石输送的有机物的紫外线降解^[32,33]、彗星撞击形成^[34]、地下或冰川中甲烷水合物的释放^[35]或风化层吸收的气体^[36,37]、含甲烷包裹体的玄武岩侵蚀^[38]或地热过程^[39]. 无论其来源是生物的还是非生物的, 都为理解火星的宜居性提供了重要线索并推动了对火星环境、地质过程以及潜在生命迹象的进一步探索.

火星探测任务还发现了碳酸盐的存在 (见图 2^[40]). 火星车勇气号、好奇号、凤凰号和毅力号在各自的着陆区都发现了碳酸盐, 揭示了火星上多样的水成环境^[40]. 勇气号在古谢夫撞击坑探测到的铁镁质碳酸盐与火山活动的热液系统相关, 表明这里可能曾存在中性至碱性的热液环境, 为生命潜在的化学能量来源提供了可能性^[41]; 好奇号在盖尔撞击坑沉积岩层中检测到的碳酸盐, 可能由湖泊水体中的二氧化碳 (以 HCO_3^- 形式) 与沉积物反应形成, 表明该区域曾经历稳定的中性至碱性湖泊环境, 适合古代微生物的生存^[42]; 凤凰号在北极盆地浅层土壤中检测到的碳酸盐暗示极地环境中可能存在液态水的短暂活动, 与周期性气候变化有关, 指示了局部存在宜居条件的可能性^[43]; 毅力号在杰泽罗撞击坑发现的碳酸盐集中于三角洲, 可能是自生沉积作用的产物, 为该区域的古代

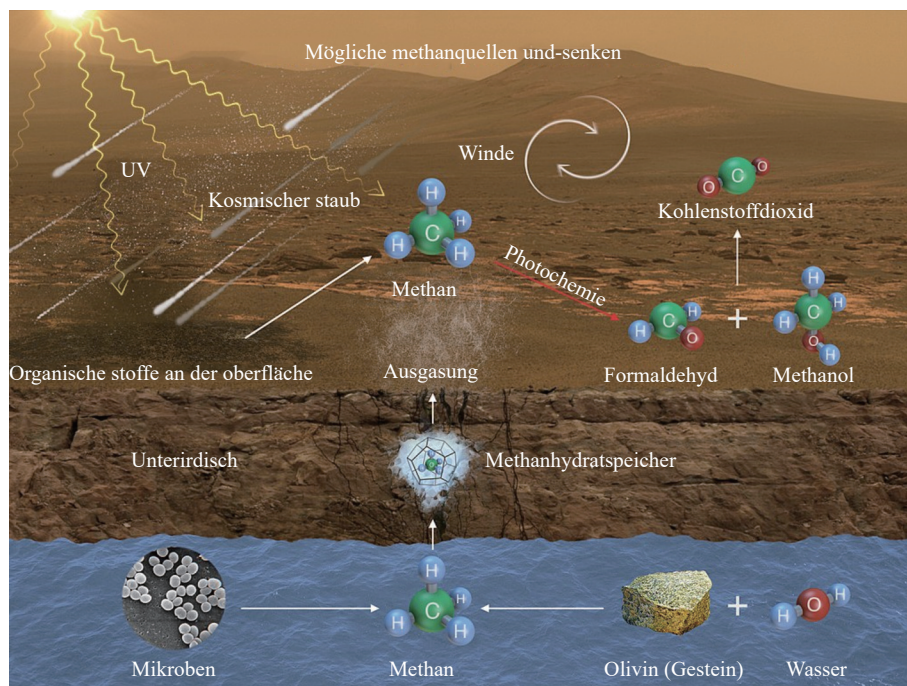


图 1 甲烷的可能来源和汇出 (修改自文献 [28])

Fig. 1 Possible methane sources and sinks (Modified from Ref. [28])

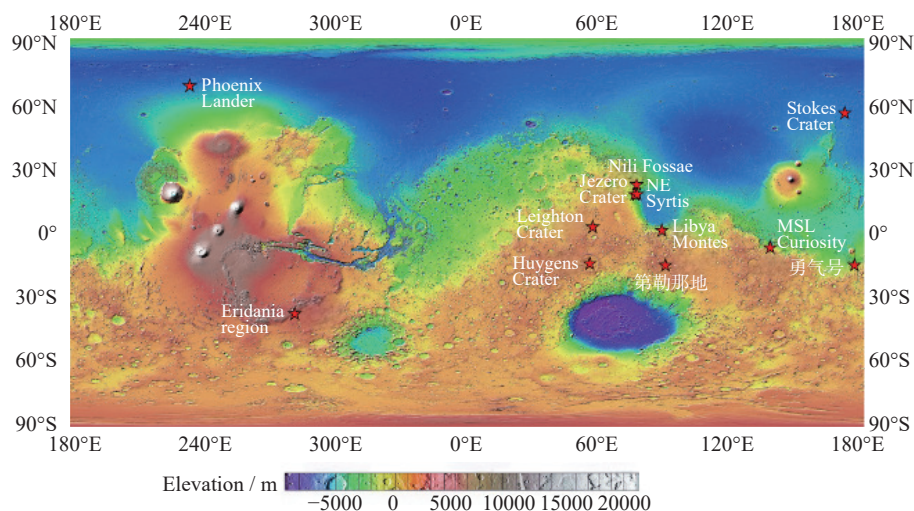


图 2 火星上已在原位 (盖尔撞击坑、古谢夫撞击坑、北极) 或通过近红外远程观测在 8 个地点 (特别是古代高地的第勒那地地区) 发现碳酸盐地点的 MOLA 火星激光高度计高程图 (红星)(修改自文献 [40])

Fig. 2 MOLA map of localities (red stars) on Mars where carbonate has been identified either *in situ* (Gale crater, Gusev, north pole) or from NIR remote observation at eight localities, particularly around the Tyrrhena Terra region in the Ancient Highlands (Modified from Ref. [40])

河流与湖泊环境提供了直接证据^[44,45]. 火星快车轨道器的光谱数据同样揭示了火星表面多个区域存在碳酸盐矿物, 特别是在火星高地的古老撞击坑中, 表明这些区域可能经历了水成作用的地质历史^[46]. 小型火

星侦测光谱仪也在尼利沟槽等地区识别出多处富含碳酸盐的地层, 这些区域通常与早期火星的稳定水环境相关, 并通过研究进一步支持这些矿物可能形成于稳定的水-岩相互作用环境^[47,48]. 火星陨石 ALH84001

和 Nakhilite 陨石群中也存在因冲击作用诱导热液作用事件形成的富铁碳酸盐, 进一步支持了火星曾经存在水的证据^[40,49]. 这些碳酸盐矿物主要形成于 35 亿~40 亿年前的温暖湿润时期, 说明当时火星表面可能存在液态水, 有利于碳酸盐的沉淀和保存^[50].

除了碳酸盐矿物, 火星探测任务和陨石中还发现了多种有机物化合物. 其中火星车好奇号、凤凰号和毅力号在各自着陆区域发现的一系列有机化合物包括氯苯、C₂-C₄ 二氯烷烃、噻吩、芳香族和脂肪族碳氢化合物以及单环和双环芳香族化合物 (例如苯、甲苯), 这些有机物可能是通过各种内源过程生成和外源性输入的, 包括较大或复杂的有机分子热分解、热液作用、大气化学反应, 陨石撞击以及彗星或行星际尘埃颗粒的输入^[51-54]. 在火星陨石 ALH84001 中发现的多环芳烃 (PAHs) 和其他复杂有机分子被认为可能通过生物过程形成, 与古代火星生命有关^[55]. 此外, 该陨石中碳酸盐球体的微观结构和磁铁矿晶体的形态也被视为潜在的生物起源证据, 然而这些结论存在争议, 这些化合物和微观结构同样可能通过非生物过程生成, 例如磁铁矿晶体可能由高温冲击事件引发的化学过程形成以及 ALH84001 中的多环芳烃分布与南极冰中类似化合物的分布相符, 其来源可能与地球污染或非生物过程有关^[55,56]. 火星陨石 Nakhla 的热解气相色谱-质谱联用分析 (GCMS) 也检测到苯、甲苯、C₂ 烷基苯和苯甲腈多种有机挥发性物质^[40,57-59]. 利用 NanoSIMS 仪器在 Tissint 火星陨石中同样检测到有机碳的存在, 主要填充在开放裂缝中, 偶尔出现在冲击熔融脉中, 碳同位素分析显示这些有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -12.8‰~-33.1‰, 明显轻于火星大气中的 CO₂ 和碳酸盐的同位素特征, 暗示有机碳可能是通过流体沉积在冲击裂缝中形成的, 或者来源于类似于碳质球粒陨石的有机物, 尽管碳同位素的轻度偏移为潜在生物过程提供了线索, 但其来源也可能是非生物过程, 例如碳质陨石的输入或流体与岩石的相互作用^[60]. 这些有机物的发现表明火星可能曾具备适合有机化合物形成和保存的环境, 对研究火星古环境和潜在的古代生物活动具有重要意义, 为生命的潜在存在提供了依据.

尽管火星上存在碳酸盐矿物、有机物和其他富碳物质, 但并不能直接证明生命的存在. 首先, 碳酸盐矿物的形成虽然可能与液态水有关, 但并不一定需要生

物过程参与^[45]. 火星大气中微量甲烷的来源尚不明确, 既可能是生物过程的产物, 也可能由非生物的地质过程产生, 如火山活动等. 同样, 火星陨石中发现的含碳化合物也可能来源于非生物过程. 因此, 碳的存在对评估火星宜居性方面具有重要意义, 但并不能作为生命存在的唯一证据, 还需要继续开展深入的探测和研究来区分和发现生物过程来源的碳.

1.1.2 含氮物质

氮是维持生命的重要元素, 参与蛋白质、核酸 (例如 DNA 和 RNA) 等生物大分子的构建, 在生命体的代谢和生长中发挥关键作用. 在火星上, 固定氮 (即 NH₃, NH₄⁺, NO_x 或 N), 以化学方式与无机或有机分子结合, 并可通过水解释放形成 (NH₃ 或 NH₄⁺) 对生物体有用^[61]. 因此, 研究火星上的氮及其存在形式对于判断火星是否具备支持生命的条件具有重要意义. 火星上含氮物质主要包括氮气、氨气、硝酸盐类和含氮有机物.

1976 年, 维京一号着陆器首次在火星大气中探测到氮气 (N₂)^[62]. 之后的轨道器火星快车和火星大气与挥发物演化任务 (MAVEN) 以及火星车好奇号进一步确认这一发现, 并测得氮气含量约占火星大气总量的 2.6%^[63-65]. 火星大气与挥发物演化任务的观测还显示氮气主要分布在火星上层大气并受季节性变化和太阳风影响^[66,67]. 火星陨石如 EETA79001, Zagami 和 SNC 陨石群 (包括 Shergottites, Nakhilites 和 Chassignites 三类陨石) 中检测到高 $\delta^{15}\text{N}$ 值的氮同位素异常, 这与火星大气的氮同位素特征一致, 暗示这些氮可能来源于火星大气演化或相关化学过程^[68-73]. 尽管氮气以相对惰性的形式存在, 但在特定的生物地球化学过程中, 氮可以转化为生物体可利用的形式, 为潜在的生命活动提供条件.

火星车好奇号通过其搭载的火星样品分析仪 (SAM) 检测到盖尔撞击坑土壤样本中硝酸盐 (NO₃⁻) 和氨 (NH₃), 推测可能是通过闪电或陨石撞击等化学反应, 将大气中的氮气转化为硝酸盐, 从而生成固定氮^[74,75]. 在火星陨石 EETA79001 和 Shergottites 的冲击玻璃以及 Nakhla 陨石的水溶提取物中也发现了硝酸盐, 这可能与火星上的氮循环过程有关^[76,77]. 化学固氮过程对评估火星的宜居性及其潜在生命活动至关重要, 能够为微生物或其他形式的生命提供必要的营养基础, 增加了火星曾存在或目前具备

生命条件的可能性.

关于含氮有机物, 火星陨石 ALH84001 中检测到的氨基酸可能形成于约 40 亿年前, 表明早期火星可能具备形成复杂有机分子的条件, 并保存了早期宜居环境的线索^[69,78]. 这些含氮有机物可能通过火星上原位生成或通过陨石输送到火星, 并且依赖非生物固氮反应 (如 N_2 或 NO 转化为 NH_3) 或潜在的生物固氮与氮储存, 在沉淀过程被捕获到碳酸盐矿物中, 之后在地下系统中长期保存 (见图 3^[69]). 然而, 由于部分陨石样本可能受到地球污染, 含氮物质是否真的来自火星仍需进一步验证.

总体来说, 火星上含氮物质的发现为理解其宜居性提供了关键线索, 不仅揭示了火星过去可能存在的氮循环, 也为评估火星表面和大气中支持生命的潜在条件提供了关键线索. 尽管一些发现仍需进一步验证以确认其来源, 但也为未来火星探索奠定了科学基础, 深入研究火星的氮循环和有机物的形成将有助于深入理解火星宜居性.

1.1.3 含硫物质

硫元素在地球的生物和地质过程中具有关键作用. 在火星探测中, 含硫物质能揭示重要的地质或化学活动, 甚至可能与潜在的生命过程相关. 因此, 研究

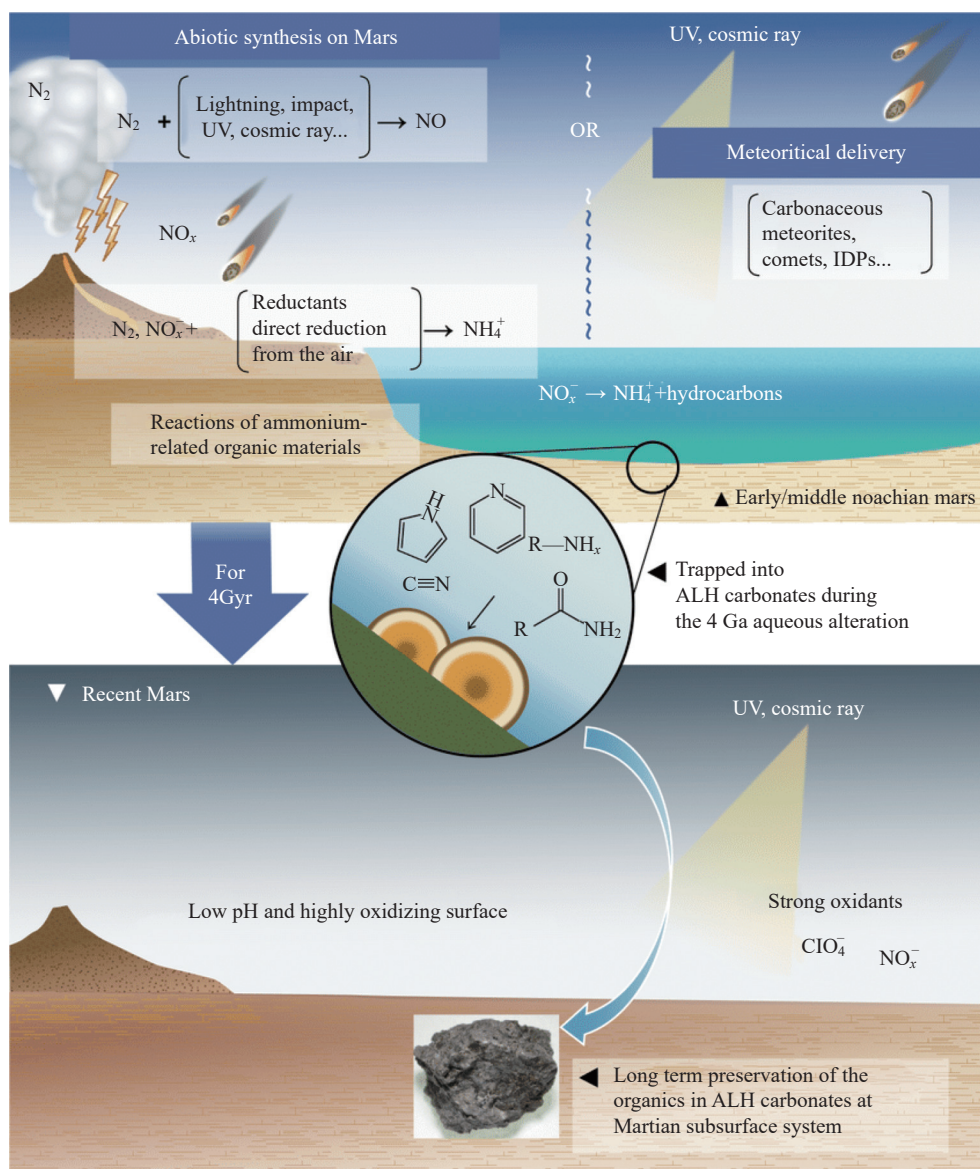


图 3 火星含氮有机物的可能历史 (修改自文献 [69])

Fig. 3 Possible history for the Martian N-bearing organics (Modified from Ref. [69])

火星上的硫元素及其化合物对于理解火星的地质历史和潜在的宜居性至关重要。火星上硫主要以硫酸盐和气态含硫物 (例如 SO_2 和 H_2S) 的形式存在。

在盖尔撞击坑沉积物中, 火星车好奇号通过样品分析仪 (SAM) 的逸出气体分析仪 (EGA) 检测到二氧化硫 (SO_2) 和硫化氢 (H_2S), 其释放被认为是硫酸盐和硫化物热分解的结果, 表明沉积物中存在氧化态和还原态的硫化物, 为研究火星早期的地球化学环境提供了线索^[79,20]。奥德赛号轨道器通过伽马射线光谱仪 (GRS) 获得近地表硫含量分布 (见图 4^[80])。后续轨道器探测任务如火星快车、火星勘测轨道器 (MRO) 和火星全球勘测者 (MGS) 揭示火星近地表广泛存在硫酸盐矿物, 包括硫酸镁、硫酸钙、硫酸铁、硫酸钠、石膏以及黄钾铁矾等, 主要分布在赤道地区的水手峡谷、子午线高原以及北部极地的沙丘矿床、珍珠湾区等区域^[81-84], 表明火星曾经有酸性、富硫的水环境。

早期着陆探测如维京 1 号、2 号和火星探路者号探测到火星土壤中存在高含量的硫, 推测其来源于硫酸盐风化层^[85-87]。火星车机遇号在子午线高原发现了硫酸盐总含量约为 20%, 主要成分包括硫酸镁、硫酸铁和硫酸钙沉积岩; 同时还检测到黄钾铁矾^[88-90], 并在奋进撞击坑边缘附近发现了近乎纯硫酸钙 (可能是石膏) 的矿脉^[91], 表明火星的早期环境可能存在水沉积作用。火星车勇气号在古谢夫撞击坑土壤和岩石中检测到可能是 Fe^{3+} 硫酸盐以及由 15%~20% 硫酸镁和硫酸钙胶结的超镁铁质砂岩^[79,81]。火星车凤凰号 (在北极地区发现土壤中含有质量分数约 3.3 wt% 的

硫酸镁和硫酸钙, 可能是由风成沉积的石膏或火山气体 (如二氧化硫和硫化氢) 与土壤反应生成的^[92]。火星车好奇号在盖尔撞击坑的沉积矿床中发现了由石膏和硬石膏组成的硫酸钙矿脉, 通常是沉积物埋藏和固结之后, 由流体穿过岩石裂缝并沉淀形成的, 属于典型的成岩作用过程, 表明沉积后盖尔撞击坑中仍存在水活动^[93,94]。

火星陨石同样证明了硫的存在。例如火星陨石 EETA79001 中存在富含硫的冲击熔融玻璃, 可能源自火星表面的次生硫酸盐^[81,94]。其他陨石如 Shergotty, Nakhla, Governador Valadares, Lafayette 中也发现了硫的存在^[95,96]; 其中对 Nakhla 陨石的硫同位素分析认为硫可能来源于水热作用^[81,96]。火星表面环境中的高浓度硫、各种 Fe^{3+} 硫酸盐相以及少量碳酸盐矿物表明硫的循环在火星大部分地质历史中起主导作用, 通过火山活动、光化学反应和水文沉积过程将硫从地壳转移到表面, 显著影响了火星的地质、气候和水文系统^[79,81,93], 这不仅为理解火星的水文地质提供了重要证据, 也为潜在的微生物生命提供了必要的化学条件。

1.1.4 含磷物质

磷是组成生命的基本元素之一, 在生命遗传物质中起着关键作用。作为遗传物质的 DNA 必须具有足够的稳定性, 以确保遗传信息能够长期保存并代代相传, 而磷在保障 DNA 的稳定性方面至关重要^[97]。磷的分布、形态以及与水活动的关系可以为理解火星的地质历史和潜在生物活动提供重要线索。火星上磷的研究集中于土壤、岩石和陨石中的磷酸盐矿物^[98]。

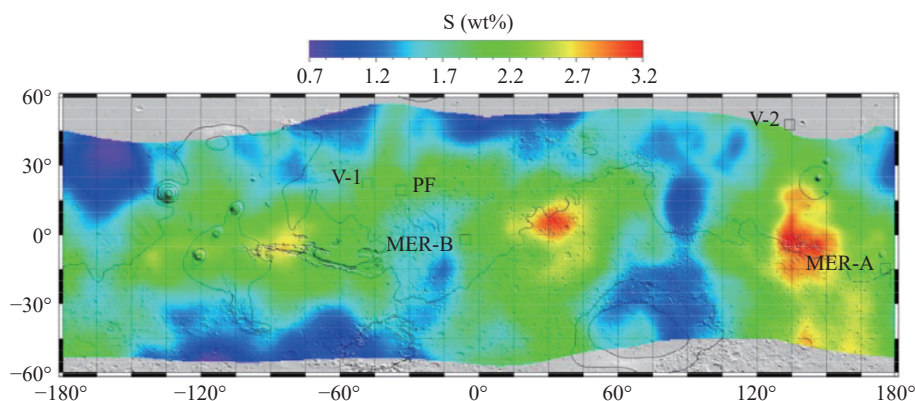


图 4 低至中纬度火星表面上部几十厘米的硫含量图叠加在 MOLA 阴影地形图上 (修改自文献 [80])

Fig. 4 Map of the sulfur content in the upper few tens of centimeters of the Martian surface at low-to mid-latitudes (H-mask) overlain onto a MOLA shaded relief topographic map (Modified from Ref. [80])

1997年火星车探路者号首次检测到火星上的磷^[85,99]。随后,火星车勇气号在古谢夫撞击坑的碎屑岩石中发现了磷元素的富集(约5 wt% P_2O_5),表明该区域曾有适合生命的近中性含磷水环境^[100,101]。火星车机遇号在奋进撞击坑发现磷的局部富集与高锰和硫含量呈正相关,表明磷可能通过富含硫酸根的流体迁移,并在适宜的化学和物理条件下沉淀下来^[102]。此外,机遇号着陆区子午线高原磷的含量和P:Ti比率与火星玄武岩相似,可能固定在次生铁和铝磷酸盐中,如铁磷酸盐^[98]。火星车好奇号在盖尔撞击坑中检测到的氟磷灰石是通过侵蚀、沉积和成岩作用保存下来的,表明该地区的水环境并非强酸性或长期处于中酸性^[98],但是氟磷灰石在酸性条件下表现为不稳定,其主要成分容易发生溶解并释放磷酸盐,尤其是在pH值较低的环境中,溶解速率显著增加^[103]。火星车毅力号在杰泽罗撞击坑中也检测到了磷酸盐矿物,通常以小而稀有的颗粒形式存在^[104]。

火星陨石中,磷灰石和磷镁石是最常见的磷酸盐矿物,主要来自火成岩,通常作为次要矿物嵌入中长石、长石或冲击产生的长石玻璃中^[98]。磷镁石在Shergottite和ALH 84001陨石中丰富存在,但Nakhlites和Chassignites陨石中只含有磷灰石^[98,105,106]。火星表土角砾岩陨石(例如NWA 7034系列陨石)中存在磷酸盐矿物,例如独居石和磷钇矿,其中磷钇矿的形成与热液蚀变有关^[107]。在与冲击产生的熔融和脉状结构相关的火星陨石(例如Zagami和Tissint)中,还发现了高压磷酸盐矿物^[108,109]。

火星上存在磷酸盐,表明具备生命所需的关键元素。火成磷酸盐矿物在液态水中迅速溶解,而次生磷酸盐矿物可以保存液态水存在的证据,并记录了对生命至关重要的成分^[102]。因此,若能在火星上或从返回的样本中识别出磷酸盐矿物,将为研究火星的过去水环境提供重要信息如温度、pH值,还能作为生物指标,有利于揭示火星潜在的生命迹象。

1.2 液态水环境

水是生命存在的基本条件,而液态水环境是火星宜居性评估的核心因素之一。虽然目前在火星表面没有发现明显的液态水活动,但大量干涸的水成地貌指示了火星表面曾广泛存在液态水。如今,火星上的水主要以冰的形式存在或被封存在含水矿物如硫酸盐和黏土矿物中^[6]。火星液态水环境的存在形式随着火

星历史时期的变化反映了火星气候和地质条件的演变过程。

1.2.1 历史水流环境

火星早期的气候条件与现今显著不同。在诺亚纪和西方纪时期(41亿~30亿年前),火星可能拥有更厚的大气层,形成了温暖的气候,使液态水能够长期稳定存在^[110]。火星的水成地貌反映了火星历史上曾存在网状河谷、外流河道、冲沟、冲积扇和三角洲、古湖泊以及与火山活动相关的热液系统,甚至很可能存在古海洋。

1971年发射的水手9号最早发现火星上的水流地貌,改变了人们对火星干燥、寒冷的传统认知^[111]。网状河谷(见图5a^[112])是火星上最古老的沟谷地貌,形成于诺亚纪和诺亚纪-西方纪过渡期^[113]。这些河谷呈现支状的线性凹陷特征,一般长约数百km,宽约数km,具有从上游V形过渡到下游U形的横截面^[112,114]。主要分布在火星南部高原,少量分布在北部平原特别是埃律西昂火山区附近,形成原因可能是降水形成的地表径流和地下水溢出侵蚀作用^[112]。倒转河道是另一种重要的地貌特征,指在水流沉积表面胶结或覆盖坚硬物质,更抗侵蚀,河岸部分被侵蚀后形成凸起的脊状地貌(见图5b)^[112,115]。

外流河道是由暴发性洪水侵蚀形成的大型槽状河道,宽度可达数百km,长度超过1000km(见图5c^[115])。大多形成于西方纪,亚马逊纪也有零星出现^[116],集中分布在克律塞平原、希腊盆地周围及萨希斯和埃律西昂火山省附近^[116,117]。其突兀的源头表明,外流河道并非由降水引发的地表径流,而是大量液态水突然释放造成的,例如构造破裂导致地下含水层内的水迅速涌出^[118],湖泊突然泄水^[119],或是岩墙侵入导致冰冻层的融化^[120]。

古湖泊是火星存在水流的另一证据。网状河谷将水汇集至低洼地区(例如撞击坑或撞击盆地),形成湖泊(见图5d^[112]),这些湖泊可能源于降水或地下水,形成于诺亚纪,并在诺亚纪和西方纪交界时停止活动^[6,112],表明火星历史中气候发生了重大变化。古湖泊主要分布在南部高原,尤其集中在南北纬30°之间的区域^[121]。冲积扇和三角洲是水流携带沉积物进入平坦开阔区域时流速骤降,形成的扇状沉积地貌(见图5e^[112]和5f^[122]),主要形成于诺亚纪^[123]。冲积扇多分布于二分性边界附近(0°N-10°S以及海拔较高的

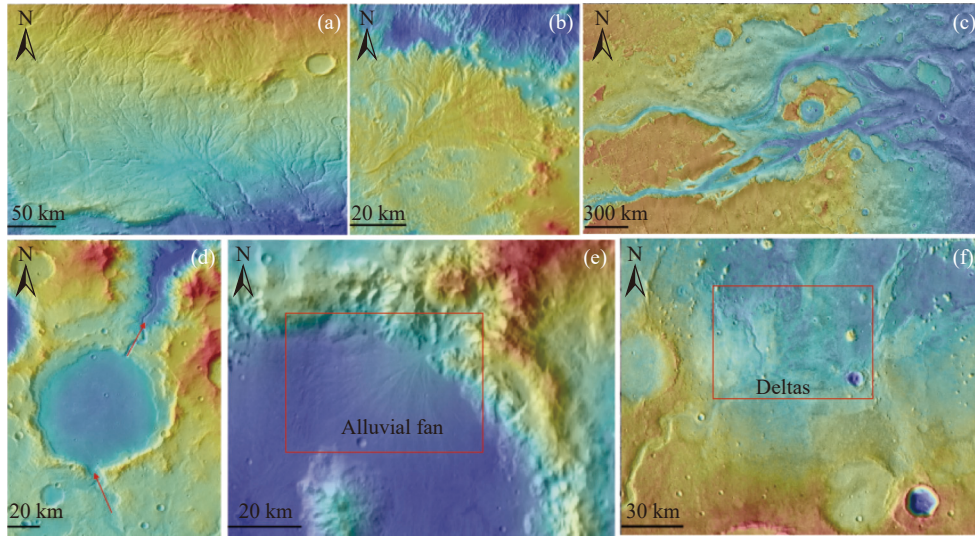


图 5 早期的水流地貌. (a) 网状河谷 (中心坐标 92.6°W , 42.5°S); (b) 发育在火星扇状沉积上的脊状倒转河道 (中心坐标 151.4°E , 6.2°S); (c) Kasei 谷 (中心坐标 301.5°E , 27.1°N); (d) 古湖泊 (中心坐标 174.8°E , 18.6°S), 红色箭头指向水流方向; (e) 冲积扇 (中心坐标 74.46°E , 22.73°S); (f) 三角洲 (中心坐标 $45^{\circ}7'28''\text{W}$, $11^{\circ}33'21''\text{N}$). 图像均为 MOLA 彩色地形图叠加在火星奥德赛热辐射成像系统 (THEMIS) 日间影像上 (a, b, d, e 修改自文献 [112]; c 修改自文献 [115]; f 修改自文献 [122])

Fig. 5 Early fluvial landform. (a) Valley networks (central coordinates 92.6°W , 42.5°S); (b) ridge-like inverted channels developed on Martian fan deposits (central coordinates 151.4°E , 6.2°S); (c) Kasei valleys (central coordinates 301.5°E ; 27.1°N); (d) Paleolakes (central coordinates 174.8°E , 18.6°S); (e) alluvial fan (central coordinates 74.46°E , 22.73°S); (f) delta (central coordinates $45^{\circ}7'28''\text{W}$, $11^{\circ}33'21''\text{N}$). The images are MOLA colorized topographic map overlaid on THEMIS mosaics (a, b, d, e are modified from Ref. [112]; c is modified from Ref. [115]; f is modified from Ref. [122])

$10^{\circ}-30^{\circ}\text{S}$), 而三角洲则主要分布于海拔较低的 $0^{\circ}-40^{\circ}\text{N}$, 并在 $0^{\circ}-30^{\circ}\text{S}$ 也有部分分布^[112,124].

冲沟是尺度较小、线性且较为年轻的侵蚀地貌, 形成时间短并受季节变化的影响^[125]. CO_2 霜升华^[126]、干燥颗粒流动^[127]、地下沉积物的不稳定性导致的崩塌或风化过程形成的颗粒流动^[125]、地面冰或雪融化都有可能形成冲沟, 北半球的冲沟集中在阿卡迪亚平原、坦佩高地、阿西达里亚平原和乌托邦平原^[128,129].

目前研究认为火星北部低地可能曾存在海洋^[122], 发现的各种证据包括沿海地貌^[130,131]、海啸^[132,133]、三角洲^[134]、外流河道和北方荒原组织 (VBF) 沉积单元^[135,136] 都支持了北方古海洋的存在. 祝融号火星车在乌托邦平原发现的沉积岩存在交错层理, 指示了与浅海环境的沉积特征, 进一步支持火星北部低地曾存在古海洋的假说^[137].

1.2.2 现代液态水环境

现今火星上的水主要以水冰形式存在, 主要分布

在极区和地表以下, 经探测发现火星目前还存在短暂或局部的液态水环境, 主要包括浅层卤水和南极地下湖泊. 火星车凤凰号在火星北极地区检测到高氯酸盐存在, 这些盐能够通过吸收大气水分在低温条件下形成液态卤水, 为火星上的短暂液态水存在提供了间接证据^[138-140]. 火星车好奇号在盖尔撞击坑也发现瞬时液态卤水的迹象, 并检测到多种盐类, 这些盐类可在火星低温环境下通过吸收水蒸气形成短暂的液态卤水^[141,142]. 虽然这些浅层卤水是瞬时的, 但在特定条件下能够暂时存在, 甚至可能在某些深度形成更长期的液态水环境. 此外, 好奇号还发现了小体积的吸附液态水, 可能以薄膜形式覆盖在火星表面的尘埃、土壤及浅层土壤中, 揭示了盖尔撞击坑内存在一个的水循环系统^[140,143]. 在火星南极还发现了可能富含高氯酸盐的地下湖泊, 尽管这样的环境可能不适合生命的存在^[114,144,145]. 并且根据温度推测, 火星低纬度地区也可能存在地下湖泊^[146].

火星的水流地貌不仅揭示了火星过去存在广泛的水环境特征,也反映现代火星气候存在湿润的情况,特别是在表面相对温暖的低纬度地区.水流地貌为理解火星气候演化和其早期宜居性提供了重要线索,其形成与持续时间有助于确定宜居环境的存在时间,能够为未来探索火星生命痕迹提供关键线索.

1.3 生命生存的能量来源

在生物系统中,能量是维持生命平衡、增殖和进化的关键要素.能量为生物化学反应提供的动力,驱动着从细胞活动到生态系统运行的各个方面.在地球上,太阳能是主要能量来源,而在某些极端环境中,化学能和地质能也能支持生命存续.探索火星宜居性时,理解潜在生命如何获取和利用能量至关重要.

由于火星大气中的氧气含量极低,深层和近表层中以氧化还原反应为动力的厌氧代谢途径成为火星过去和现在最有可能的生命能量来源,主要集中在铁、硫循环和甲烷生成方面^[152].火星地壳中富含 Fe^{2+} ,铁氧化微生物通过将二价铁(Fe^{2+})氧化为三价铁(Fe^{3+})来获取能量,或在缺氧条件下还原硝酸盐^[147,148].其他微生物如脱硫弧菌(*Desulfovibrio*)和希瓦氏菌(*Shewanella*)则可利用有机物、氢气或硫作为电子供体,将三价铁还原为二价铁^[149,150].这些铁氧化微生物还能利用火星大气中二氧化碳作为唯一的碳源,形成一种潜在的岩石自养途径,产生生命所需的能量^[151].

火星表层富含硫化物,硫可能通过与光化学产生的大气成分发生生物催化反应,形成还原和氧化状态的循环,如氢气可以还原土壤中的硫酸盐矿物,产生能量给缺氧环境的硫酸盐还原菌^[152].在火星的地下环境中,微生物还可能通过氧化从大气中扩散至土壤的氢气和一氧化碳来获取能量.地球上已知的某些微生物,如甲烷杆菌,在含有氢气的情况下可以利用一氧化碳还原生成甲烷;在缺乏氢气时,这些微生物则会将一氧化碳氧化成二氧化碳^[153],这种途径也是火星生命潜在的能量来源,能够代替光合作用^[152-154].

此外,火星的热液系统也能为潜在生命提供能源.热液活动指水体在热源(如火山活动或碰撞作用等引发的局部高温热源等)的加热作用下,产生对流并进行物质和能量传输的过程^[115].其中撞击坑中的热液系统能够持续数千年至数百万年,为微生物提供能量和适宜的环境^[155];由铀、钍和钾等放射性元素

驱动的系统可存在超过1亿年,例如火星艾利达尼亚(Eridania)地区的热液系统^[156];而火山活动驱动的热液系统主要存在于火星诺亚纪(41亿~37亿年前)^[157].早期的火山活动和地质热源可能驱动了地下热液系统,提升地壳温度,促进水循环和挥发物(例如二氧化碳)的释放,为化学合成生物提供能量,维持了长期适宜的生存环境^[115,158].例如杰泽罗撞击坑和古谢夫撞击坑的热液蚀变现象表明火星诺亚纪地下水系统可能受到岩浆残余热的驱动^[158-160].因此,早期热液系统可能为生命创造了宜居条件,是探索火星生命痕迹的重要候选区域.总之,火星的能量来源多样,从氧化还原反应驱动的微生物代谢到地质热能,都可能为火星上的生命提供生存基础.理解火星生命如何获取和利用能量,对于判断火星是否曾经或仍然适合生命存在具有重要的意义.

1.4 适宜的气候

在分析火星的宜居性时,气候的影响是一个关键因素.气候不仅决定了地表环境的稳定性和水的存在形式,还决定了生物是否能够在火星地表或地下生存.因此,理解火星气候的历史演变并评估不同阶段的环境条件对探讨火星的宜居性至关重要.

火星早期的气候一直备受争议.尽管大量地质证据表明火星表面曾存在流动的液态水,例如河谷网络、湖泊盆地,甚至可能存在海洋,但仍然难确定支持液态水存在的气候条件持续了多长时间^[161].火星早期接收到的太阳辐射亮度较低,这可能意味着火星早期大部分时间气候是寒冷的^[114].然而,诺亚纪高原上广泛分布的层状硅酸盐矿物表明,火星在当时至少经历过一段温暖湿润的气候^[115].这导致了两种主要的假说:一种认为火星早期存在温暖的气候条件,足以支持持续的液态水流动;另一种则认为火星气候主要是寒冷的,液态水可能仅在特定的时间和条件下短暂存在.

支持火星早期温暖湿润气候假说的证据包括河谷网络、湖泊等各种水流地貌、诺亚纪退化的撞击坑和温室效应^[162,163].研究表明,火山释放的氢气、蛇纹石化产生的甲烷或氢气,这些还原性气体与二氧化碳共存时,由于分子碰撞诱导的吸收,可以显著增强温室效应,从而进一步温暖气候^[164,165],目前尚缺乏足够的证据证明这些产氢过程能够大规模持续发生,并产生足够的甲烷或氢气来显著影响火星的气候.尽管火

星北部海洋可能曾经处于温暖湿润状态, 但冰的反射效应可能使气候转为寒冷潮湿^[110]. 此外, 对河谷网和古湖泊的定年结果显示, 其主要在诺亚纪和西方纪交界时期停止活动, 指示了火星气候在此期间的重大变化^[112].

第二种假说认为, 火星早期的气候主要是寒冷干燥的, 存在间断性的水文循环. 火星表面主要为冰原地貌, 冰的间歇融化可以解释大部分地质记录^[110]. 水主要以冰的形式储存在高海拔的冰川中, 火山活动或陨石撞击引发短暂的变暖, 融化冰雪形成液态水, 导致河流侵蚀和湖泊的形成^[166]. 诺亚纪时期, 封闭盆地湖泊的数量多于开放盆地, 表明水流的持续时间较短^[115]. 火星表面缺乏碳酸盐矿物, 也暗示液态水可能有限^[167]. 最新研究表明, 早期火星大气可能在还原与氧化条件之间反复转换, 在一定的条件下间歇性暖湿气候可能引发地表水循环, 导致河谷网络和氧化性矿物的形成^[115].

近年来, 也有人提出火星早期气候可能是温暖和半干旱的^[168], 夏季温度足够高以融化雪和冰, 冬季则寒冷至产生大量降雪^[169]. 虽然火星早期的气候模式仍无定论, 但可以确定的是早期火星曾经历过温暖时期, 导致冰雪融化和水文循环短暂活跃, 从而形成了河谷网络和其他地貌特征^[115,169]. 根据这些假说, 诺亚纪 (41 亿~37 亿年前) 被认为是最可能存在液态水的时期. 这一时期的温暖或间歇性暖湿气候可能提供液态水, 形成了河谷网络和湖泊等地貌, 为潜在的生命形态创造了适宜的生存环境. 尽管火星的气候模式尚未达成一致, 但诺亚纪的短暂温暖期为生命的起源和维持提供了关键条件.

2 火星天问三号候选着陆区特征分析

天问三号是中国计划中的火星探测任务, 主要目标是采集火星样本并返回地球, 该任务不仅延续了天问一号的科学目标, 还将在更深入的层面上探寻生命痕迹, 研究火星气候及其演变, 并分析火星的地质构造及内部过程^[170]. 为实现这些科学目标, 选择一个科学价值高且技术可行的着陆区至关重要. 基于上述火星宜居环境关键要素分析, 重点对乌托邦平原以及阿拉伯高地西北部中的茅尔斯峡谷、大山撞击坑、麦克

劳林撞击坑、奥克夏高原进行对比, 这些区域具有不同的地质特征和科学潜力, 是探索火星环境与生命演化的重要场所.

2.1 茅尔斯峡谷

茅尔斯峡谷中心位于 22.36°N, 343.5°E, 是一条古老的河谷, 其地质历史可追溯至诺亚纪 (41 亿~37 亿年前), 属于诺亚纪高地单元, 地貌特征表明可能是地下水释放或地表水流动侵蚀形成的^[171,172]. 区域内广泛分布着黏土矿物 (如蒙脱石和伊利石), 这些矿物主要集中于高地明亮的露头上, 水平范围可达数百 km, 并呈现出明显的垂直分布特征, 厚度超过 100 m^[173]. 此外, 茅尔斯峡谷的地层叠覆关系清晰, 保存了丰富的水文地质记录, 为研究火星早期的气候和环境演变提供了重要线索.

火星侦察轨道器搭载的小型侦察成像光谱仪光谱探测显示, 区域富含多种含水矿物如高岭石、蒙脱石族矿物, 这些矿物是早期火星水-岩相互作用的产物, 表明区域曾存在稳定的水环境^[174,175]. 矿物分布有明显的垂直分层: 下部地层含铁/镁黏土矿物 (例如绿脱石), 形成于中性至碱性条件下的水环境; 上部地层富含铝/硅黏土矿物 (例如高岭石), 形成于酸性较高的水环境, 层状结构反映了气候从温暖湿润向干燥酸性环境的转变过程^[171,176,177]. 同时, 硫酸盐矿物 (例如黄钾铁矾和石膏) 的存在进一步指示酸性水环境, 为适应极端环境的酸性嗜好微生物提供了宜居条件^[174]. 这些矿物和地质特征的综合存在表明, 茅尔斯峡谷可能是火星早期多种水文和化学环境的交会区域, 其层状矿物结构和硫酸盐暗示了多阶段的水文过程, 包括河流系统的沉积作用, 以及地下水活动的持续影响, 为生命提供了潜在的宜居条件. 此外, 火星早期的火山活动以及硫化物和铁氧化物 (例如赤铁矿) 的氧化还原反应可能为生命提供潜在的能量来源^[177].

茅尔斯峡谷记录了火星早期环境和气候变化, 同时展示了丰富的含水矿物, 不仅是研究古代水活动的可靠地区, 还具有较高的生物特征保存潜力, 使其成为研究火星古代水环境和寻找潜在生命迹象的理想区域.

2.2 大山撞击坑

大山撞击坑中心位于 24°N, 340.7°E, 直径约 101 km, 其形成可追溯至诺亚纪, 属于早诺亚纪高地单元 (eNh), 周围的地层主要属于中诺亚纪高地单元

(mNh), 包含距今 37 亿年以前的地质记录^[178]. 撞击坑的坑壁展现了显著的河流峡谷地貌和层状结构, 表明曾有水流从高原汇入坑内形成泥岩沉积, 随后河谷被黑色盖层填充并经历侵蚀, 部分区域形成倒转地形^[171,173]. 坑底和周围的地貌特征还显示出多次沉积、侵蚀及可能的火山活动痕迹, 包括多层次的沉积岩与火山岩, 这些地质证据共同指向一个早期可能存在液态水活动的环境^[171].

大山撞击坑内广泛分布含水矿物, 记录了早期湿润环境逐渐过渡到后期干燥环境. 在诺亚纪 (41 亿~37 亿年前), 高原地区沉积了富含铁/镁蒙皂石的层状黏土单元; 诺亚纪中后期 (约 38 亿年前), 大山撞击坑形成并伴随着底部含黏土层状沉积物的沉积; 之后在约 37 亿年前, 撞击坑边缘经历了流水侵蚀, 地下水循环可能在顶盖区域形成铝硅酸盐露头, 表明持续的水-岩相互作用; 随后在西方纪, 顶盖单元沉积在含黏土的侵蚀基底上, 标志着与水相关的蚀变活动逐渐结束^[177]. 火星矿物光谱分析仪 (OMEGA) 光谱显出高钙辉石 (HCP)、低钙辉石 (LCP) 以及底部存在铝页硅酸盐的光谱特征, 表明坑底的单元经历了与高原类似的后期淋滤过程^[175,179,180]. 大山撞击坑的沉积痕迹表明, 该区域可能曾是湖泊系统的一部分, 坑底沉积物的分布和地形特征支持其曾经是湖泊的假设, 这一发现为早期火星的水文活动提供了重要证据, 可能具备适合微生物等生命形式存活的条件, 为探索火星生命提供了重要线索. 此外, 火山和热液活动的迹象, 如潜在的岩浆侵入体和热液沉积矿物, 可能提供了化学热能和热液能源, 这些条件对潜在的微生物生命具有重要意义.

总体来说, 该区域地质和物质组成多样, 具备支持天问三号科学目标的条件. 其最古老的地质单元可能经历过地表水与地下热液活动, 是火星最可能孕育生命的时期, 适宜生命起源. 丰富的含水矿物广泛分布, 具有保存生命遗迹的潜力, 并可揭示火星气候和宜居性演化历史.

2.3 麦克劳林撞击坑

麦克劳林撞击坑中心位于 21.9°N, 337.63°E, 属于早诺亚纪高地单元, 形成于约 41 亿年前, 直径约 92 km (见图 6)^[181]. 撞击事件导致坑底发育断层和裂缝, 为地下水的上涌提供通道. 在约 38 亿年前, 地下水可能在撞击坑内汇集形成一个深约 500 m 的湖泊,

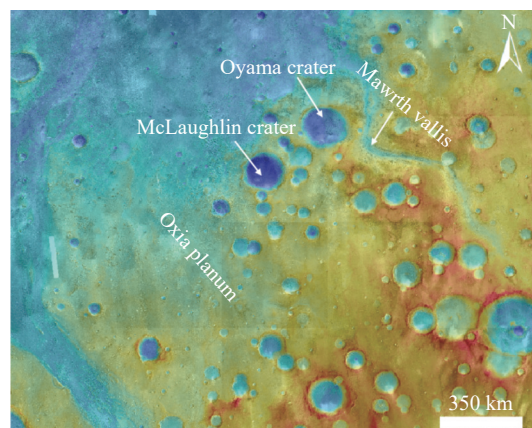


图 6 候选着陆区地点

Fig. 6 Location of the pre-selected landing areas

该湖泊可能是短暂的, 但也可能持续长达 300 万年, 并在周围形成三角洲沉积, 然而在约 37 亿年前后, 湖泊逐渐干涸消失^[182]. 并且层状沉积物在坑内广泛发育, 厚度超过 100 m, 显示出水平层理和交错层理特征, 其剖面周期性地出现深色、浅色和棕色层, 这些特征反映该地区多阶段的沉积和侵蚀过程, 是研究火星古沉积环境和气候演化的重要依据^[182].

矿物光谱分析显示坑内沉积物中含有碳酸盐和镁铁蒙脱石, 可能在地下水中的碱性湖泊中形成, 坑底还发现了辉石、橄榄石和蛇纹岩, 这些矿物反映出曾存在一个碱性、还原性的水环境, 具备生成甲烷和氢气的化学条件^[181,182]. 因此, 坑内富含的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、二氧化碳、氢气和甲烷等成分可为潜在生命提供必要的能量, 有利于微生物存在. 麦克劳林撞击坑的湖泊及其三角洲沉积表明, 该区域曾是火星古代水循环系统的重要组成部分, 湖泊的形成与地下水的持续供应密切相关. 此外, 撞击事件可能触发的热液活动也为该地区提供能量来源.

综上, 麦克劳林撞击坑具备极高的保存生命遗迹的潜力, 是研究火星早期水环境、沉积过程和生命前化学演化的理想地点, 为天问三号科学目标的实现提供了优越的着陆区选择.

2.4 奥克夏高原

奥克夏高原 (见图 6) 位于 18.275°N, 335.368°E, 茅尔斯峡谷的西南几百 km 外, 是火星南北分界线处的一个浅盆地, 其地质背景和演化历史揭示了火星早期的地质与环境变化. 该地区形成于晚诺亚纪至早西方纪过渡时期, 保存了丰富的诺亚纪沉积物, 记录了

液态水过程和区域构造演化的证据; 在晚诺亚纪和西方纪期间, 经历了显著的地貌改造包括河流活动、古湖泊沉积及可能的海岸线形成, 并受到火山活动的影响; 现今主要受到风蚀、沉积作用的持续改造^[183,184].

该区域富含铁镁黏土矿物 (例如绿脱石和蛭石), 表明存在水-岩相互作用^[185], 经历了至少两次主要水活动: 早期形成约 100 m 厚的黏土矿物层, 反映了长期的静水体环境, 如湖泊或地下水储层; 晚期水活动与河谷网络的形成密切相关, 产生三角洲沉积和水合氧化硅矿物, 之后晚期的暗色火山岩单元覆盖了部分地表^[186,187]. 通过光谱分析发现存在赤铁矿、石英及少量硫酸盐矿物, 指示可能经历蒸发作用或局部氧化条件, 说明早期火星存在稳定地表或地下水的历史环境, 支持潜在的生物活动^[187]. 地貌和矿物学证据显示其可能是浅湖泊或流动河网的一部分, 存在液态水的沉积和侵蚀作用, 并可能夹带保存有机物的沉积层, 为研究火星早期环境和潜在生命提供了线索^[188]. 后期火山活动产生的火山岩覆盖在地表, 其多孔结构与沉积岩的封闭特性结合热液活动和氧化还原反应, 有利于有机物的存在和保存^[189].

总体来说, 奥克夏高原展现了火星早期地壳中水-岩相互作用不同阶段的缩影, 为研究可能的生命起源和生命遗迹提供了重要条件. 该区域兼具岩浆活动和多期次适宜生命起源的环境, 能够反映火星早期的气候演化过程. 此外, 含水矿物广泛分布, 确保了探测器

在着陆后能够直接采集到关键的目标样品, 为火星生命和环境演化研究提供了宝贵机会.

2.5 乌托邦平原

乌托邦平原中心位于 49.7°N, 118°E, 是火星北部低地的撞击盆地之一, 其地质历史经历了多次火山活动、冲积和冰川过程. 基于祝融号探测及以往研究结果, 乌托邦平原南部地层主要由 5 层组成 (见图 7^[190]), 对寻找生命指示物、分析火星宜居性以及环境演化有重要意义. 已有研究揭示了乌托邦平原的地质演化过程. 早期诺亚纪: 乌托邦平原由巨大撞击形成并经历沉积和火山填充. 西方纪: 区域经历洪水溢流与冰川活动, 可能曾被液态水覆盖, 支持古海洋假说. 亚马逊纪: 气候冷却导致地下水冰的反复冻结和升华, 并形成多边形地形和冰川沉积, 同时可能发生泥火山活动, 进一步证明了早期冰的存在^[191-193].

轨道探测以及祝融号火星车着陆探测显示该区域沉积物中存在硫酸盐和碳酸盐, 可能还含有一定的橄榄石、高钙辉石, 这些矿物特征提供了区域水文与化学环境的重要线索: 硫酸盐的存在指示在地质演化过程中, 环境可能经历了酸性蒸发条件下的间歇性液态水活动; 碳酸盐的发现则暗示局部中性至碱性水体的存在, 橄榄石和高钙辉石的保存表明部分沉积层可能未经显著的水化作用, 反映出相对干燥且稳定的气候阶段^[46,194]. 对地貌分析发现可能的浅海沉积岩^[78] 以及广泛的北部低地北方荒原组织地层支持该

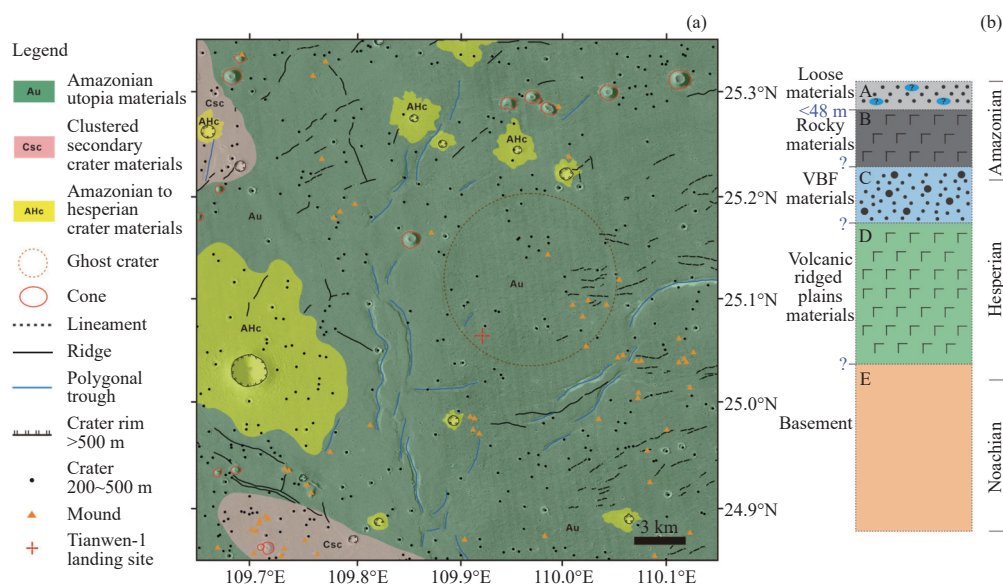


图 7 祝融登陆区地质 (a) 和拟定地层 (b) (修改自文献 [190])

Fig. 7 Geological map (a) and proposed stratigraphy (b) of the Zhurong landing region (Modified from Ref. [190])

区域可能存在古海洋,在火星气候与宜居性演化研究中的重要价值^[14,195].祝融号雷达探测的多层沉积结构和泥火山起源的凹坑锥体表明,晚西方纪后可能存在热液活动释放甲烷,具备保存有机物和生命标志物的潜力^[14,194,196].

乌托邦平原存在的生命指示性矿物、潜在的热液系统提供能量来源、可能的古海洋沉积与液态水活动以及广泛的沉积地层表明该地区具备适合生命起源的环境,能够揭示火星气候及宜居性演化历史.

2.6 候选着陆区对比评估

对候选着陆区的地质特征进行详细分析后,为进一步评估其各自优势性,基于生命关键要素、水环境等多方面因素,对上述5个候选着陆区进行综合评估(见表1),以便明确各区域的相对优势,为最终着陆区的选择提供科学依据.

基于以上分析,乌托邦平原被认为具备多种生命关键要素.首先,乌托邦平原分布有可能指示早期火星生命存在的关键矿物,包括硫酸盐和碳酸盐,其形成环境与液态水、适宜的化学条件及潜在生物活动密切相关.其次,通过河谷网络和外流河道排出的水可能通过径流或地下水形式流入北部低地,形成一个古老的北方海洋^[122].前人提出两条可能的古代海岸线:阿拉伯海岸线和亚尼罗海岸线,阿拉伯海岸线与火星地形二分边界大致一致,代表面积较大的诺亚纪海洋,其特征包括沿边界分布的沉积地貌和水流侵蚀痕

迹;而亚尼罗海岸线与北方荒原组织边缘高度吻合,表明其可能属于西方纪海洋,其特征为与地形变化一致的沉积地层分布和海岸侵蚀结构^[122,130,197].这些海岸线和相关特征为探讨早期火星的水文地貌及其潜在生命存在提供了重要依据.

天问一号任务在乌托邦平原的探测中取得了多项关键成果,为后续探测任务提供了重要支持.首先,天问一号对乌托邦平原进行了精细的地形地貌分析,识别出多种沉积和侵蚀地貌特征,为区域地质背景研究提供了关键依据.其次,揭示了该区域的多层次地质结构,表明其地质历史跨越了诺亚纪-亚马逊纪,记录了火星气候变化及其地表环境演变过程.此外,天问一号的气象探测仪器系统地记录了乌托邦平原的表面温度、气压和风速等气候数据,为未来任务着陆区环境评估提供了可靠依据^[12].并且雷达探测显示,该区域地下浅层可能存在水冰,为后续探测任务的资源利用和科学研究目标提供了宝贵线索^[14].从工程安全性角度来看,天问一号选择的着陆区域位于乌托邦平原南部.该区域地势低洼且平坦,岩石密度低至约4%,土壤具有较高的承载能力,表明着陆区域具备良好的地形条件,可为仪器长期任务提供稳定支持^[198].综合考虑乌托邦平原的科学研究价值和工程安全性,本文建议天问三号任务优先选择该区域作为着陆目标.这不仅能够进一步探索火星的地质演化历史,还能充分利用地下水冰资源,为未来的火星探索

表 1 中国天问三号候选着陆区基于宜居环境关键要素的初步评价
Table 1 Preliminary evaluation of the pre-selected landing zone of China's Tianwen-3 based on key elements of the habitable environment

地点	中心位置	含水矿物	水环境类型	能量来源	丰富性
茅尔斯峡谷	22.36°N, 343.5°E	高岭石 铁/镁蒙脱石 硫酸盐矿物(黄钾铁矾和石膏)	外流河道	热液环境 氧化还原	诺亚纪 西方纪-亚马逊纪过渡 跨地质年代 有层序信息
大山撞击坑	24°N, 340.7°E	铝页硅酸盐 铁/镁蒙皂石	河流侵蚀 的倒转地形	热液系统	诺亚纪、西方纪 跨地质年代 有层序信息
麦克劳林撞击坑	21.9°N, 337.63°E	碳酸盐 镁铁黏土 蛇纹石	古湖泊	氧化还原 热液系统	诺亚纪 跨地质年代 有层序信息
奥克夏高原	18.275°N, 335.368°E	铁、镁黏土矿物(如绿脱石 和蛭石) 水合二氧化硅	古湖泊	氧化还原 热液系统	诺亚纪 跨地质年代 有层序信息
乌托邦平原	49.7°N, 118°E	含水硫酸盐 碳酸盐 层状硅酸盐	古海洋 埋藏河道	热液系统	西方纪-亚马逊纪 跨地质年代 有层序信息

奠定坚实基础。

3 结论与展望

通过火星宜居性关键要素分析, 乌托邦平原凭借其丰富的地质多样性、假设的古海洋存在, 以及存在生命指示性矿物的证据, 被视为天问三号任务的最优着陆选择地区。该地区的研究不仅有望获得火星早期环境的更多信息, 还可能为理解火星的气候演化及其宜居性提供重要的线索。

天问一号任务中获取的数据提供了丰富的地质信息和环境演化历史, 但还有许多未知有待探索。未来需要进一步深入分析这些数据, 以确定更具体的着陆点, 从而最大限度地提高样品采集的科学价值。天问三号的样品返回任务将为研究火星宜居环境提供全新的机遇, 通过分析火星土壤和岩石样本, 能够更全面地了解火星的地质构造和演变历史。随着天问三号任务的深入推进, 期待获取更加丰富和详尽的火星数据, 揭开火星上更多的科学谜团, 特别是在致力解决火星是否曾经存在生命这一重大问题上有望获得突破。

参考文献

- [1] ARVIDSON R E, GUINNESS E A, MOORE H J, *et al.* Three Mars years: Viking Lander 1 imaging observations[J]. *Science*, 1983, **222**(4623): 463-468
- [2] ARVIDSON R E, GOODING J L, MOORE H J. The Martian surface as imaged, sampled, and analyzed by the Viking landers[J]. *Reviews of Geophysics*, 1989, **27**(1): 39-60
- [3] FOUCHET T, LELLOUCH E, IGNATIEV N I, *et al.* Martian water vapor: Mars Express PFS/LW observations[J]. *Icarus*, 2007, **190**(1): 32-49
- [4] LEVIN G V. Odyssey gives evidence for liquid water on Mars[C]//Optical Science and Technology, SPIE's 48th Annual Meeting. San Diego: SPIE, 2004: 128
- [5] ALBEE A L, ARVIDSON R E, PALLUCONI F, *et al.* Overview of the Mars Global Surveyor mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, **106**(E10): 23291-23316
- [6] NAZARI-SHARABIAN M, AGHABABAEI M, KARAKOUZIAN M, *et al.* Water on Mars—a literature review[J]. *Galaxies*, 2020, **8**(2): 40
- [7] VASAVADA A R. Mission overview and scientific contributions from the Mars Science Laboratory Curiosity rover after eight years of surface operations[J]. *Space Science Reviews*, 2022, **218**(3): 14
- [8] MELLON M T, SIZEMORE H G, HELDMANN J L, *et al.* The habitability conditions of possible Mars landing sites for life exploration[J]. *Icarus*, 2024, **408**: 115836
- [9] HOEHLER T M, WESTALL F. Mars exploration program analysis group goal one: determine if life ever arose on Mars[J]. *Astrobiology*, 2010, **10**(9): 859-867
- [10] PHILLIPS-LANDER C M, AGHA-MOHAMAMDI A, WYNNE J J, *et al.* Mars Astrobiological Cave and Internal habitability Explorer (MACIE): a new frontiers mission concept[J]. *Bulletin of the AAS*, 2021, **53**(4)
- [11] FARLEY K A, WILLIFORD K H, STACK K M, *et al.* Mars 2020 mission overview[J]. *Space Science Reviews*, 2020, **216**(8): 142
- [12] ZHAO Y Y S, YU J, WEI G F, *et al.* In situ analysis of surface composition and meteorology at the Zhurong landing site on Mars[J]. *National Science Review*, 2023, **10**(6): nwad056
- [13] LI C L, ZHANG R Q, YU D Y, *et al.* China's Mars exploration mission and science investigation[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(4): 57
- [14] LI C, ZHENG Y K, WANG X, *et al.* Layered subsurface in Utopia Basin of Mars revealed by Zhurong rover radar[J]. *Nature*, 2022, **610**(7931): 308-312
- [15] XIAO L. Evolution of the geological environment and exploration for life on Mars[J]. *Journal of Earth Science*, 2023, **34**(5): 1626-1628
- [16] XU L, LI H, PEI Z Y, *et al.* A brief introduction to the international lunar research station program and the interstellar express mission[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(4): 511-513
- [17] BEATY D W, ALLWOOD A C, VAGO J L, *et al.* Sedimentology, stratigraphy and astrobiology on Mars in 2018, potentially using two rovers[C]//The First International Conference on Mars Sedimentology and Stratigraphy. El Paso, Texas: Universities Space Research Association, 2010
- [18] SCHUUR E A G. Nitrogen from the deep[J]. *Nature*, 2011, **477**(7362): 39-40
- [19] ATREYA S K, WITASSE O, CHEVRIER V F, *et al.* Methane on Mars: current observations, interpretation, and future plans[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, **59**(2/3): 133-136
- [20] SUTTER B, MCADAM A C, MAHAFFY P R, *et al.* Evolved gas analyses of sedimentary rocks and eolian sediment in Gale Crater, Mars: results of the Curiosity rover's sample analysis at Mars instrument from Yellowknife Bay to the Namib Dune[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2017, **122**(12): 2574-2609
- [21] CHASSEFIÈRE E, LEBLANC F. Methane release and the carbon cycle on Mars[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, **59**(2/3): 207-217

- [22] 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**(5917): 1041-1045
- [23] BOXE C S, FRANCISCO J S, SHIA R L, *et al.* New insights into martian atmospheric chemistry[J]. *Icarus*, 2014, **242**: 97-104
- [24] MCELROY M B, HUNTEN D M. Photochemistry of CO₂ in the atmosphere of Mars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, **75**(7): 1188-1201
- [25] ATREYA S K, GU Z G. Photochemistry and stability of the atmosphere of Mars[J]. *Advances in Space Research*, 1995, **16**(6): 57-68
- [26] KORABLEV O, VANDAELE A C, MONTMESSIN F, *et al.* No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations[J]. *Nature*, 2019, **568**(7753): 517-520
- [27] FORMISANO V, ATREYA S, ENCRENAZ T, *et al.* Detection of methane in the atmosphere of Mars[J]. *Science*, 2004, **306**(5702): 1758-1761
- [28] NASA/JPL-Caltech. Possible Methane Sources and Sinks [OL].<https://mars.nasa.gov/resources/6891/possible-methane-sources-and-sinks/> (file), Wikipedia: Grafikwerkstatt# Methanhydrat and Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=100873248>
- [29] WEBSTER C R, MAHAFFY P R, ATREYA S K, *et al.* Background levels of methane in Mars' atmosphere show strong seasonal variations[J]. *Science*, 2018, **360**(6393): 1093-1096
- [30] 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
- [31] 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
- [32] SCHUERGER A C, MOORES J E, CLAUSEN C A, *et al.* Methane from UV-irradiated carbonaceous chondrites under simulated Martian conditions[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, **117**(E8): E08007
- [33] KEPPLER F, VIGANO I, MCLEOD A, *et al.* Ultraviolet-radiation-induced methane emissions from meteorites and the Martian atmosphere[J]. *Nature*, 2012, **486**(7401): 93-96
- [34] KRASNOPOLSKY V A. Some problems related to the origin of methane on Mars[J]. *Icarus*, 2006, **180**(2): 359-367
- [35] CHASSEFIÈRE E. Metastable methane clathrate particles as a source of methane to the Martian atmosphere[J]. *Icarus*, 2009, **204**(1): 137-144
- [36] GOUGH R V, TOLBERT M A, MCKAY C P, *et al.* Methane adsorption on a Martian soil analog: an abiogenic explanation for methane variability in the Martian atmosphere[J]. *Icarus*, 2010, **207**(1): 165-174
- [37] MESLIN P Y, GOUGH R, LEFÈVRE F, *et al.* Little variability of methane on Mars induced by adsorption in the regolith[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, **59**(2/3): 247-258
- [38] MCMAHON S, PARNELL J, BLAMEY N J F. Sampling methane in basalt on Earth and Mars[J]. *International Journal of Astrobiology*, 2013, **12**(2): 113-122
- [39] ETIOPE G, OEHLER D Z, ALLEN C C. Methane emissions from Earth's degassing: implications for Mars[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, **59**(2/3): 182-195
- [40] BRIDGES J C, HICKS L J, TREIMAN A H. Carbonates on Mars[M]//FILIBERTO J, SCHWENZER S P. Volatiles in the Martian Crust. Amsterdam: Elsevier, 2019: 89-118
- [41] HAUSRATH E M, OLSEN A A. Using the chemical composition of carbonate rocks on Mars as a record of secondary interaction with liquid water[J]. *American Mineralogist*, 2013, **98**(5/6): 897-906
- [42] SUTTER B E, HEIL E B, RAMPE R V, *et al.* Iron-rich carbonates as the potential source of evolved CO₂ detected by the Sample Analysis at Mars (SAM) instrument in Gale Crater[C]//AGU Fall Meeting. Washington D C: AGU, 2015: P31F-07
- [43] BOYNTON W V, MING D W, KOUNAVES S P, *et al.* Evidence for calcium carbonate at the Mars Phoenix landing site[J]. *Science*, 2009, **325**(5936): 61-64
- [44] HORGAN B H N, ANDERSON R B, D Geological mapping of Mawrth ROMART G, *et al.* The mineral diversity of Jezero crater: evidence for possible lacustrine carbonates on Mars[J]. *Icarus*, 2020, **339**: 113526
- [45] SCHELLER E L, SWINDLE C, GROTZINGER J, *et al.* Formation of magnesium carbonates on earth and implications for Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, **126**(7): e2021JE006828
- [46] EHLMANN B L, MUSTARD J F, MURCHIE S L, *et al.* Orbital identification of carbonate-bearing rocks on Mars[J]. *Science*, 2008, **322**(5909): 1828-1832
- [47] AMADOR E S, BANDFIELD J L, THOMAS N H. A search for minerals associated with serpentinization across Mars using CRISM spectral data[J]. *Icarus*, 2018, **311**: 113-134
- [48] JAIN N, CHAUHAN P. Study of phyllosilicates and carbonates from the Capri Chasma region of Valles Marineris on Mars based on Mars Reconnaissance Orbiter-Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (MRO-CRISM) observations[J]. *Icarus*, 2015, **250**: 7-17
- [49] BORG L E, CONNELLY J N, NYQUIST L E, *et al.* The age of the carbonates in martian meteorite ALH84001[J]. *Science*, 1999, **286**(5437): 90-94
- [50] MORRIS R V, RUFF S W, GELLERT R, *et al.* Identification of carbonate-rich outcrops on Mars by the Spirit Rover[J]. *Science*, 2010, **329**(5990): 421-424

- [51] SCHELLER E L, HOLLIS J R, CARDARELLI E L, *et al.* Aqueous alteration processes in Jezero crater, Mars—implications for organic geochemistry[J]. *Science*, 2022, **378**(6624): 1105-1110
- [52] ANSARI A H. Detection of organic matter on Mars, results from various Mars missions, challenges, and future strategy: a review[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2023, **10**: 1075052
- [53] FREISSINET C, GLAVIN D P, MAHAFFY P R, *et al.* Organic molecules in the Sheepbed Mudstone, Gale Crater, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2015, **120**(3): 495-514
- [54] KATE I L T. Organic molecules on Mars[J]. *Science*, 2018, **360**(6393): 1068-1069
- [55] MCKAY D S, GIBSON E K, THOMAS-KEPRTA K L, *et al.* Search for past life on Mars: possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001[J]. *Science*, 1996, **273**(5277): 924-930
- [56] GIBSON E K, MCKAY D S, THOMAS-KEPRTA K L, *et al.* Life on Mars: evaluation of the evidence within Martian meteorites ALH84001, Nakhla, and Shergotty[J]. *Precambrian Research*, 2001, **106**(1/2): 15-34
- [57] SEPHTON M A, WRIGHT I P, GILMOUR I, *et al.* High molecular weight organic matter in Martian meteorites[J]. *Planetary and Space Science*, 2002, **50**(7/8): 711-716
- [58] BRIDGES J C, GRADY M M. Evaporite mineral assemblages in the Nakhla (Martian) meteorites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, **176**(3/4): 267-279
- [59] CHANGELA H G, BRIDGES J C. Alteration assemblages in the Nakhla: variation with depth on Mars[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2010, **45**(12): 1847-1867
- [60] LIN Y T, EL GORESY A, HU S, *et al.* NanoSIMS analysis of organic carbon from the Tissint Martian meteorite: evidence for the past existence of subsurface organic-bearing fluids on Mars[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2014, **49**(12): 2201-2218
- [61] MANCINELLI R L, BANIN A. Where is the nitrogen on Mars?[J]. *International Journal of Astrobiology*, 2003, **2**(3): 217-225
- [62] NIER A O, MCELROY M B. Composition and structure of Mars' upper atmosphere: results from the neutral mass spectrometers on Viking 1 and 2[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, **82**(28): 4341-4349
- [63] MAHAFFY P R, WEBSTER C R, ATREYA S K, *et al.* Abundance and isotopic composition of gases in the Martian atmosphere from the curiosity rover[J]. *Science*, 2013, **341**(6143): 263-266
- [64] EVANS J S, STEVENS M H, LUMPE J D, *et al.* Retrieval of CO₂ and N₂ in the Martian thermosphere using dayglow observations by IUVS on MAVEN[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(21): 9040-9049
- [65] LEBLANC F, CHAUFRAY J Y, BERTAUX J L. On Martian nitrogen dayglow emission observed by SPICAM UV spectrograph/Mars Express[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(2): L02206
- [66] BOUGHER S W, PAWLOWSKI D, BELL J M, *et al.* Mars global ionosphere-thermosphere model: solar cycle, seasonal, and diurnal variations of the Mars upper atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2015, **120**(2): 311-342
- [67] JAKOSKY B M, GREBOWSKY J M, LUHMANN J G, *et al.* Initial results from the MAVEN mission to Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(21): 8791-8802
- [68] MARTI K, KIM J S, THAKUR A N, *et al.* Signatures of the Martian atmosphere in glass of the Zagami meteorite[J]. *Science*, 1995, **267**(5206): 1981-1984
- [69] KOIKE M, NAKADA R, KAJITANI I, *et al.* In-situ preservation of nitrogen-bearing organics in Noachian Martian carbonates[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): 1988
- [70] MATHEW K J, KIM J S, MARTI K. Martian atmospheric and indigenous components of xenon and nitrogen in the Shergotty, Nakhla, and Chassigny group meteorites[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 1998, **33**(4): 655-664
- [71] BECKER R H, PEPIN R O. The case for a Martian origin of the shergottites: nitrogen and noble gases in EETA 79001[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, **69**(2): 225-242
- [72] BECKER R H, PEPIN R O. Nitrogen and light noble gases in Shergotty[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, **50**(6): 993-1000
- [73] MIURA Y N, SUGIURA N. Martian atmosphere-like nitrogen in the orthopyroxenite ALH84001[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, **64**(3): 559-572
- [74] WRAY J, ARCHER Jr P D, BRINCKERHOFF W B, *et al.* The search for ammonia in Martian soils with curiosity's SAM instrument. James[C]/44th Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2013
- [75] STERN J C, SUTTER B, FREISSINET C, *et al.* Evidence for indigenous nitrogen in sedimentary and aeolian deposits from the Curiosity rover investigations at Gale crater, Mars[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, **112**(14): 4245-4250
- [76] MANNING C V, MCKAY C P, ZAHNLE K J. The nitrogen cycle on Mars: impact decomposition of near-surface nitrates as a source for a nitrogen steady state[J]. *Icarus*, 2008, **197**(1): 60-64
- [77] GRADY M M, WRIGHT I P, PILLINGER C T. A search for nitrates in Martian meteorites[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1995, **100**(E3): 5449-5455

- [78] BADA J L, GLAVIN D P, MCDONALD G D, *et al.* A search for endogenous amino acids in Martian meteorite ALH84001[J]. *Science*, 1998, **279**(5349): 362-365
- [79] MCADAM A C, FRANZ H B, SUTTER B, *et al.* Sulfur-bearing phases detected by evolved gas analysis of the Rocknest aeolian deposit, Gale Crater, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2014, **119**(2): 373-393
- [80] MCLENNAN S M, BOYNTON W V, KARUNATILAKE S, *et al.* Distribution of sulfur on the surface of Mars determined by the 2001 Mars Odyssey gamma ray spectrometer[C]//41st Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2010: 2174
- [81] KING P L, MCLENNAN S M. Sulfur on Mars[J]. *Elements*, 2010, **6**(2): 107-112
- [82] GENDRIN A, MANGOLD N, BIBRING J P, *et al.* Sulfates in Martian layered terrains: the OMEGA/Mars express view[J]. *Science*, 2005, **307**(5715): 1587-1591
- [83] MURCHIE S L, MUSTARD J F, EHLMANN B L, *et al.* A synthesis of Martian aqueous mineralogy after 1 Mars year of observations from the Mars Reconnaissance Orbiter[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, **114**(E2): E00D06
- [84] MCLENNAN S M, BELL III J F, CALVIN W M, *et al.* Provenance and diagenesis of the evaporite-bearing Burns formation, Meridiani Planum, Mars[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **240**(1): 95-121
- [85] RIEDER R, ECONOMOU T, WÄNKE H, *et al.* The chemical composition of Martian soil and rocks returned by the mobile alpha proton X-ray spectrometer: preliminary results from the X-ray mode[J]. *Science*, 1997, **278**(5344): 1771-1774
- [86] CLARK B C. Geochemical components in Martian soil[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, **57**(19): 4575-4581
- [87] CLARK III B C, BAIRD A K, ROSE JR H J, *et al.* The Viking X ray fluorescence experiment: analytical methods and early results[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, **82**(28): 4577-4594
- [88] CHRISTENSEN P R, WYATT M B, GLOTCH T D, *et al.* Mineralogy at Meridiani Planum from the Mini-TES experiment on the opportunity rover[J]. *Science*, 2004, **306**(5702): 1733-1739
- [89] KLINGELHÖFER G, MORRIS R V, BERNHARDT B, *et al.* Jarosite and hematite at Meridiani Planum from Opportunity's Mössbauer spectrometer[J]. *Science*, 2004, **306**(5702): 1740-1745
- [90] SQUYRES S W, KNOLL A H. Sedimentary rocks at Meridiani Planum: origin, diagenesis, and implications for life on Mars[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **240**(1): 1-10
- [91] SQUYRES S W, ARVIDSON R E, BELL J F, *et al.* Ancient impact and aqueous processes at Endeavour Crater, Mars[J]. *Science*, 2012, **336**(6081): 570-576
- [92] LANGEVIN Y, POULET F, BIBRING J P, *et al.* Sulfates in the north polar region of Mars detected by OMEGA/Mars express[J]. *Science*, 2005, **307**(5715): 1584-1586
- [93] FRANZ H B, KING P L, GAILLARD F. Sulfur on Mars from the atmosphere to the core[M]//FILIBERTO J, SCHWENZER S P. Volatiles in the Martian Crust. Amsterdam: Elsevier, 2019: 119-183
- [94] NACHON M, CLEGG S M, MANGOLD N, *et al.* Calcium sulfate veins characterized by ChemCam/Curiosity at Gale crater, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2014, **119**(9): 1991-2016
- [95] RAO M N, NYQUIST L E, WENTWORTH S J, *et al.* The nature of Martian fluids based on mobile element studies in salt-assemblages from Martian meteorites[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2008, **113**(E6): 2007JE002958
- [96] FARQUHAR J, KIM S T, MASTERSON A. Implications from sulfur isotopes of the Nakhla meteorite for the origin of sulfate on Mars[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, **264**(1/2): 1-8
- [97] ZHAO Yufen, LIU Yan, HUANG Biling, *et al.* A potential biomarker phosphate for life exploration on Mars[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(1): 129-132 (赵玉芬, 刘艳, 黄碧玲, 等. 火星生命探测中一种潜在的生物标志物磷酸盐[J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(1): 129-132)
- [98] HAUSRATH E M, ADCOCK C T, BERGER J A, *et al.* Phosphates on Mars and their importance as igneous, aqueous, and astrobiological indicators[J]. *Minerals*, 2024, **14**(6): 591
- [99] ECONOMOU T. Chemical analyses of Martian soil and rocks obtained by the Pathfinder Alpha Proton X-ray spectrometer[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2001, **61**(3/4/5/6): 191-197
- [100] USUI T, MCSWEEN Jr H Y, CLARK III B C. Petrogenesis of high-phosphorous Wishstone Class rocks in Gusev Crater, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2008, **113**(E12): E12S44
- [101] ADCOCK C T, HAUSRATH E M. Weathering profiles in phosphorus-rich rocks at Gusev Crater, Mars, suggest dissolution of phosphate minerals into potentially habitable near-neutral waters[J]. *Astrobiology*, 2015, **15**(12): 1060-1075
- [102] ARVIDSON R E, SQUYRES S W, MORRIS R V, *et al.* High concentrations of manganese and sulfur in deposits on Murray Ridge, Endeavour Crater, Mars[J]. *American Mineralogist*, 2016, **101**(6): 1389-1405
- [103] CHAÏRAT C, SCHOTT J, OELKERS E H, *et al.* Kinetics and mechanism of natural fluorapatite dissolution at 25°C and pH from 3 to 12[J]. *Geochimica et Cosmochi-*

- mica Acta*, 2007, **71**(24): 5901-5912
- [104] BEYSSAC O, FORNI O, COUSIN A, *et al.* Petrological traverse of the olivine cumulate Séítah formation at Jezero crater, Mars: a perspective from SuperCam on-board perseverance[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, **128**(7): e2022JE007638
- [105] MCCUBBIN F M, ELARDO S M, SHEARER C K, *et al.* A petrogenetic model for the comagmatic origin of chassignites and nakhlites: inferences from chlorine-rich minerals, petrology, and geochemistry[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2013, **48**(5): 819-853
- [106] SHEARER C K, BURGER P V, PAPIKE J J, *et al.* Crystal chemistry of merrillite from Martian meteorites: Mineralogical recorders of magmatic processes and planetary differentiation[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2015, **50**(4): 649-673
- [107] LIU Y, MA C, BECKETT J R, *et al.* Rare-earth-element minerals in Martian breccia meteorites NWA 7034 and 7533: implications for fluid-rock interaction in the Martian crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, **451**: 251-262
- [108] BAZIOTIS I P, LIU Y, DECARLI P S, *et al.* The Tissint Martian meteorite as evidence for the largest impact excavation[J]. *Nature Communications*, 2013, **4**(1): 1404
- [109] GU L X, HU S, ANAND M, *et al.* Occurrence of tuite and ahrensites in Zagami and their significance for shock-histories recorded in Martian meteorites[J]. *American Mineralogist*, 2022, **107**(6): 1018-1029
- [110] WORDSWORTH R D. The climate of early Mars[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2016, **44**(1): 381-408
- [111] MASURSKY H. An overview of geological results from Mariner 9[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, **78**(20): 4009-4030
- [112] ZHAO Jiannan, SHI Yutong, ZHANG Mingjie, *et al.* Advances in Martian water-related landforms[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, **95**(9): 2755-2768 (赵健楠, 史语桐, 张明杰, 等. 火星水成地貌研究进展 [J]. *地质学报*, 2021, **95**(9): 2755-2768)
- [113] HYNEK B M, BEACH M, HOKE M R T. Updated global map of Martian valley networks and implications for climate and hydrologic processes[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2010, **115**(E9): E09008
- [114] LIU Yang, LIU Zhenghao, WU Xing, *et al.* Evolution of water environment on Mars[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, **95**(9): 2725-2741 (刘洋, 刘正豪, 吴兴, 等. 火星的水环境演化 [J]. *地质学报*, 2021, **95**(9): 2725-2741)
- [115] LIU Yang, WU Xing, LIU Zhenghao, *et al.* Geological evolution and habitable environment of Mars: progress and prospects[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2021, **52**(4): 416-436 (刘洋, 吴兴, 刘正豪, 等. 火星的地质演化和宜居环境研究进展 [J]. *地球与行星物理评论*, 2021, **52**(4): 416-436)
- [116] VIJAYAN S, SINHA R K. Amazonian fluvial outflow channels in Jovis Tholus region, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2017, **122**(5): 927-949
- [117] GALLAGHER C J, BAHIA R. Outflow channels on Mars[M]//SOARE R J, CONWAY S J, WILLIAMS J P, *et al.* Mars Geological Enigmas. Amsterdam: Elsevier, 2021: 13-40
- [118] LEONE G. Mangala Valles, Mars: a reassessment of formation processes based on a new geomorphological and stratigraphic analysis of the geological units[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2017, **337**: 62-80
- [119] HARRISON K P, GRIMM R E. Multiple flooding events in Martian outflow channels[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2008, **113**(E2): E02002
- [120] HOVIUS N, LEA-COX A, TUROWSKI J M. Recent volcano-ice interaction and outburst flooding in a Mars polar cap re-entrant[J]. *Icarus*, 2008, **197**(1): 24-38
- [121] CABROL N A, GRIN E A. Distribution, classification, and ages of Martian impact crater lakes[J]. *Icarus*, 1999, **142**(1): 160-172
- [122] WANG L, HUANG J. Hypothesis of an ancient northern ocean on Mars and insights from the Zhurong rover[J]. *Nature Astronomy*, 2024, **8**(10): 1220-1229
- [123] FASSETT C I, HEAD III J W. Fluvial sedimentary deposits on Mars: ancient deltas in a crater lake in the Nili Fossae region[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(14): L14201
- [124] WILSON S A, MORGAN A M, HOWARD A D, *et al.* The global distribution of craters with alluvial fans and deltas on Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(4): e2020GL091653
- [125] PASQUON K, GARGANI J, MASSÉ M, *et al.* Present-day formation and seasonal evolution of linear dune gullies on Mars[J]. *Icarus*, 2016, **274**: 195-210
- [126] DUNDAS C M, DINIEGA S, MCEWEN A S. Long-term monitoring of Martian gully formation and evolution with MRO/HiRISE[J]. *Icarus*, 2015, **251**: 244-263
- [127] DUNDAS C M, MCEWEN A S, DINIEGA S, *et al.* New and recent gully activity on Mars as seen by HiRISE[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(7): L07202
- [128] HEAD J W, MARCHANT D R, KRESLAVSKY M A. Formation of gullies on Mars: link to recent climate history and insolation microenvironments implicate surface water flow origin[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(36): 13258-13263
- [129] HARRISON T N, OSINSKI G R, TORNABENE L L, *et al.* Global documentation of gullies with the Mars Reconnaissance Orbiter Context Camera and implications for their formation[J]. *Icarus*, 2015, **252**: 236-254
- [130] PARKER T J, SAUNDERS R S, SCHNEEBERGER D M. Transitional morphology in West Deuteronilus Mensae, Mars: implications for modification of the

- lowland/upland boundary[J]. *Icarus*, 1989, **82**(1): 111-145
- [131] PARKER T J, GORSLINE D S, SAUNDERS R S, *et al*. Coastal geomorphology of the Martian northern plains[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1993, **98**(E6): 11061-11078
- [132] RODRIGUEZ J A P, FAIRÉN A G, TANAKA K L, *et al*. Tsunami waves extensively resurfaced the shorelines of an early Martian ocean[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**(1): 25106
- [133] COSTARD F, SÉJOURNÉ A, KELFOUN K, *et al*. Modeling tsunami propagation and the emplacement of thumbprint terrain in an early Mars ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2017, **122**(3): 633-649
- [134] DI ACHILLE G, HYNÉK B M. Ancient ocean on Mars supported by global distribution of deltas and valleys[J]. *Nature Geoscience*, 2010, **3**(7): 459-463
- [135] DURAN S, COULTHARD T J, BAYNES E R C. Knick-points in Martian channels indicate past ocean levels[J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1): 15153
- [136] CARR M H, HEAD III J W. Oceans on Mars: an assessment of the observational evidence and possible fate[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2003, **108**(E5): 5042
- [137] XIAO L, HUANG J, KUSKY T, *et al*. Evidence for marine sedimentary rocks in Utopia Planitia: Zhurong rover observations[J]. *National Science Review*, 2023, **10**(9): nwad137
- [138] TUNG H H, PAUL E L, MIDLER M, *et al*. Crystallization of Organic Compounds[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009
- [139] 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: Planets*, 2009, **114**(E1): E00E03
- [140] JONES E G. Shallow transient liquid water environments on present-day Mars, and their implications for life[J]. *Acta Astronautica*, 2018, **146**: 144-150
- [141] MARTÍN-TORRES F J, ZORZANO M P, VALENTÍN-SERRANO P, *et al*. Transient liquid water and water activity at Gale crater on Mars[J]. *Nature Geoscience*, 2015, **8**(5): 357-361
- [142] GLAVIN D P, FREISSINET C, MILLER K E, *et al*. Evidence for perchlorates and the origin of chlorinated hydrocarbons detected by SAM at the Rocknest aeolian deposit in Gale Crater[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, **118**(10): 1955-1973
- [143] MARTÍNEZ G M, FISCHER E, RENNÓ N O, *et al*. Likely frost events at Gale crater: analysis from MSL/REMS measurements[J]. *Icarus*, 2016, **280**: 93-102
- [144] LAURO S E, PETTINELLI E, CAPRARELLI G, *et al*. Multiple subglacial water bodies below the south pole of Mars unveiled by new MARSIS data[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **5**(1): 63-70
- [145] OROSEI R, LAURO S E, PETTINELLI E, *et al*. Radar evidence of subglacial liquid water on Mars[J]. *Science*, 2018, **361**(6401): 490-493
- [146] SCHMIDT F, WAY M J, COSTARD F, *et al*. Circumpolar ocean stability on Mars 3 Gy ago[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, **119**(4): e2112930118
- [147] NIXON S L, COUSINS C R, COCKELL C S. Plausible microbial metabolisms on Mars[J]. *Astronomy & Geophysics*, 2013, **54**(1): 1.13-1.16
- [148] STRAUB K L, BENZ M, SCHINK B, *et al*. Anaerobic, nitrate-dependent microbial oxidation of ferrous iron[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1996, **62**(4): 1458-1460
- [149] LOVLEY D R, GIOVANNONI S J, WHITE D C, *et al*. Geobacter metallireducens gen. nov. sp. nov., a microorganism capable of coupling the complete oxidation of organic compounds to the reduction of iron and other metals[J]. *Archives of Microbiology*, 1993, **159**(4): 336-344
- [150] COLEMAN M L, HEDRICK D B, LOVLEY D R, *et al*. Reduction of Fe (III) in sediments by sulphate-reducing bacteria[J]. *Nature*, 1993, **361**(6411): 436-438
- [151] WEBER K A, ACHENBACH L A, COATES J D. Microorganisms pumping iron: anaerobic microbial iron oxidation and reduction[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2006, **4**(10): 752-764
- [152] CLARK B C. Solar-driven chemical energy source for a Martian biota[J]. *Origins of Life*, 1979, **9**(3): 241-249
- [153] INMAN R E, INGERSOLL R B, LEVY E A. Soil: a natural sink for carbon monoxide[J]. *Science*, 1971, **172**(3989): 1229-1231
- [154] DANIELS L, FUCHS G, THAUER R K, *et al*. Carbon monoxide oxidation by methanogenic bacteria[J]. *Journal of Bacteriology*, 1977, **132**(1): 118-126
- [155] RAMKISSOON N K, TURNER S M R, MACEY M C, *et al*. Exploring the environments of Martian impact-generated hydrothermal systems and their potential to support life[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2021, **56**(7): 1350-1368
- [156] OJHA L, KARUNATILLAKE S, KARIMI S, *et al*. Amagmatic hydrothermal systems on Mars from radiogenic heat[J]. *Nature Communications*, 2021, **12**(1): 1754
- [157] DUHAMEL S, HAMILTON C W, PÁLSSON S, *et al*. Microbial response to increased temperatures within a lava-induced hydrothermal system in Iceland: an analogue for the habitability of volcanic terrains on Mars[J]. *Astrobiology*, 2022, **22**(10): 1176-1198
- [158] ABRAMOV O, KRING D A. Impact-induced hydrothermal activity on early Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2005, **110**(E12): E12S09
- [159] COSTELLO L J, FILIBERTO J, CRANDALL J R, *et al*. Habitability of hydrothermal systems at Jezero and Gusev Craters as constrained by hydrothermal alteration of a

- terrestrial mafic dike[J]. *Geochemistry*, 2020, **80**(2): 125613
- [160] EHLMANN B L, MUSTARD J F, CLARK R N, *et al.* Evidence for low-grade metamorphism, hydrothermal alteration, and diagenesis on Mars from phyllosilicate mineral assemblages[J]. *Clays and Clay Minerals*, 2011, **59**(4): 359-377
- [161] RAMIREZ R M, CRADDOCK R A. The geological and climatological case for a warmer and wetter early Mars[J]. *Nature Geoscience*, 2018, **11**(4): 230-237
- [162] CHEVRIER V, POULET F, BIBRING J P. Early geochemical environment of Mars as determined from thermodynamics of phyllosilicates[J]. *Nature*, 2007, **448**(7149): 60-63
- [163] PALUMBO A M, HEAD J W, WILSON L. Rainfall on Noachian Mars: nature, timing, and influence on geologic processes and climate history[J]. *Icarus*, 2020, **347**: 113782
- [164] RAMIREZ R M, KOPPARAPU R, ZUGGER M E, *et al.* Warming early Mars with CO₂ and H₂[J]. *Nature Geoscience*, 2014, **7**(1): 59-63
- [165] CHASSEFIÈRE E, LANGLAIS B, QUESNEL Y, *et al.* The fate of early Mars' lost water: the role of serpentinization[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, **118**(5): 1123-1134
- [166] REDD N T. Early Mars may have boasted a large ocean and cool climate[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, **117**(50): 31558-31560
- [167] MALIN M C, EDGETT K S. Evidence for persistent flow and aqueous sedimentation on early Mars[J]. *Science*, 2003, **302**(5652): 1931-1934
- [168] RAMIREZ R M, CRADDOCK R A, USUI T. Climate simulations of early Mars with estimated precipitation, runoff, and erosion rates[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, **125**(3): e2019JE006160
- [169] KAMADA A, KURODA T, KASABA Y, *et al.* A coupled atmosphere-hydrosphere global climate model of early Mars: a "cool and wet" scenario for the formation of water channels[J]. *Icarus*, 2020, **338**: 113567
- [170] HOU Z Q, LIU J Z, XU Y G, *et al.* The search for life signatures on Mars by the Tianwen-3 Mars sample return mission[J]. *National Science Review*, 2024, **11**(11): nwae313
- [171] LOIZEAU D, WERNER S C, MANGOLD N, *et al.* Chronology of deposition and alteration in the Mawrth Vallis region, Mars[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, **72**(1): 31-43
- [172] WRIGHT J, BALME M, DAVIS J, *et al.* Geological mapping of Mawrth Vallis, Mars, by PLANMAP[C]//14th Europlanet Science Congress 2020. Virtual Meeting (Online): Europlanet Society, 2020
- [173] LOIZEAU D, MANGOLD N, POULET F, *et al.* Phyllosilicates in the Mawrth Vallis region of Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2007, **112**(E8): E08S08
- [174] MICHALSKI J R, BIBRING J P, POULET F, *et al.* The Mawrth Vallis region of Mars: a potential landing site for the Mars Science Laboratory (MSL) mission[J]. *Astrobiology*, 2010, **10**(7): 687-703
- [175] WRAY J J, EHLMANN B L, SQUYRES S W, *et al.* Compositional stratigraphy of clay-bearing layered deposits at Mawrth Vallis, Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**(12): L12202
- [176] FARRAND W H, GLOTCH T D, HORGAN B. Detection of copiapite in the northern Mawrth Vallis region of Mars: evidence of acid sulfate alteration[J]. *Icarus*, 2014, **241**: 346-357
- [177] BISHOP J L, GROSS C, DANIELSEN J, *et al.* Multiple mineral horizons in layered outcrops at Mawrth Vallis, Mars, signify changing geochemical environments on early Mars[J]. *Icarus*, 2020, **341**: 113634
- [178] Geologic Map of Mars . (2014-07-14)[2025-3-5]. <https://pubs.usgs.gov/sim/3292/>.
- [179] MCKEOWN N K, BISHOP J L, NOE DOBREA E Z, *et al.* Characterization of phyllosilicates observed in the central Mawrth Vallis region, Mars, their potential formation processes, and implications for past climate[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, **114**(E2): E00D10
- [180] LOIZEAU D, MANGOLD N, POULET F, *et al.* Stratigraphy in the Mawrth Vallis region through OMEGA, HRSC color imagery and DTM[J]. *Icarus*, 2010, **205**(2): 396-418
- [181] MICHALSKI J R, CUADROS J, NILES P B, *et al.* Groundwater activity on Mars and implications for a deep biosphere[J]. *Nature Geoscience*, 2013, **6**(2): 133-138
- [182] MICHALSKI J R, GLOTCH T D, ROGERS A D, *et al.* The geology and astrobiology of McLaughlin crater, Mars: an ancient lacustrine basin containing turbidites, mudstones, and serpentinites[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2019, **124**(4): 910-940
- [183] GARY-BICAS C E, ROGERS A D. Geologic and thermal characterization of Oxia Planum using Mars Odyssey THEMIS data[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, **126**(2): e2020JE006678
- [184] FAWDON P, ORGEL C, ADELI S, *et al.* The high-resolution map of Oxia Planum, Mars; the landing site of the ExoMars Rosalind Franklin rover mission[J]. *Journal of Maps*, 2024, **20**(1): 2302361
- [185] KRZESIŃSKA A M, BULTEL B, LOIZEAU D, *et al.* Mineralogical and spectral (near-infrared) characterization of Fe-rich vermiculite-bearing terrestrial deposits and constraints for mineralogy of Oxia Planum, ExoMars 2022 landing site[J]. *Astrobiology*, 2021, **21**(8): 997-1016
- [186] PAN L, CARTER J, QUANTIN-NATAF C, *et al.* Voluminous silica precipitated from Martian waters during late-stage aqueous alteration[J]. *The Planetary Science Journal*, 2021, **2**(2): 65

- [187] QUANTIN-NATAF C, CARTER J, MANDON L, *et al.* Oxia Planum: the landing site for the ExoMars “Rosalind Franklin” rover mission: geological context and prelanding interpretation[J]. *Astrobiology*, 2021, **21**(3): 345-366
- [188] MCNEIL J D, FAWDON P, BALME M R, *et al.* Mounds in Oxia Planum: the burial and exhumation of the ExoMars rover landing site[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, **127**(11): e2022JE007246
- [189] RUIZ-GALENDE P, FERNÁNDEZ G, TORRE-FDEZ I, *et al.* Characterization of sedimentary and volcanic rocks in Arminiza outcrop (Biscay, Spain) and its implication for Oxia Planum (Mars) exploration[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2021, **251**: 119443
- [190] ZHAO J N, XIAO Z J, HUANG J, *et al.* Geological characteristics and targets of high scientific interest in the Zhurong landing region on Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(20): e2021GL094903
- [191] THOMSON B J, HEAD III J W. Utopia Basin, Mars: characterization of topography and morphology and assessment of the origin and evolution of basin internal structure[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, **106**(E10): 23209-23230
- [192] MORGENSTERN A, HAUBER E, REISS D, *et al.* Deposition and degradation of a volatile-rich layer in Utopia Planitia and implications for climate history on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2007, **112**(E6): E06010
- [193] IVANOV M A, HIESINGER H, ERKELING G, *et al.* Mud volcanism and morphology of impact craters in Utopia Planitia on Mars: evidence for the ancient ocean[J]. *Icarus*, 2014, **228**: 121-140
- [194] LIU Y, WU X, ZHAO Y Y S, *et al.* Zhurong reveals recent aqueous activities in Utopia Planitia, Mars[J]. *Science Advances*, 2022, **8**(19): eabn8555
- [195] KRESLAVSKY M A, HEAD J W. Fate of outflow channel effluents in the northern lowlands of Mars: the Vastitas Borealis Formation as a sublimation residue from frozen ponded bodies of water[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2002, **107**(E12): 4
- [196] WANG L, ZHAO J N, HUANG J, *et al.* An explosive mud volcano origin for the pitted cones in southern Utopia Planitia, Mars[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, **66**(9): 2045-2056
- [197] CLIFFORD S M, PARKER T J. The evolution of the Martian hydrosphere: implications for the fate of a primordial ocean and the current state of the northern plains[J]. *Icarus*, 2001, **154**(1): 40-79
- [198] WU B, DONG J, WANG Y R, *et al.* Landing site selection and characterization of Tianwen-1 (Zhurong Rover) on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, **127**(4): e2021JE007137

作者简介



万李明 女, 2000年2月出生于河南省开封市, 现为中国科学院地球化学研究所月球与行星科学中心硕士研究生, 主要从事火星遥感地貌水环境相关的研究。

E-mail: wanliming@mail.gyig.ac.cn



唐红(通信作者) 女, 1984年8月出生于四川省内江市, 现为中国科学院地球化学研究所月球与行星科学中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为天体表面环境、天体水和有机物和地外资源利用等。

E-mail: tanghong@vip.gyig.ac.cn