

# 火星地质环境演变与生命宜居性探索

史语桐<sup>1</sup>, 赵健楠<sup>1</sup>, 张明杰<sup>2</sup>, 黄婷<sup>3</sup>, 孙炎润<sup>1</sup>, 肖龙<sup>1</sup>

(1. 行星地质与深空探测湖北省重点实验室, 中国地质大学(武汉)地球科学学院行星科学研究所, 武汉 430074;  
2. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 3. 澳门科技大学月球与行星科学国家重点实验室, 澳门 999078)

**摘要:** 开展火星生命探索需要了解火星地质环境演化及其对生命形成与保存的影响。总结了火星地质环境演变的最新研究成果, 回顾了人类开展火星生命探测的历史及进展, 分析了火星的环境宜居性潜能, 并归纳了火星潜在的宜居环境种类。在此基础上, 提出对火星生命痕迹的探索应当重点关注曾存在长期水活动的区域的结论, 如古海洋、古湖泊、三角洲、地下水与热泉活动区等; 考虑到当前火星表面环境对生命的形成和保存十分严苛, 未来的探测也应关注目前研究较为缺乏的地下环境, 如较浅部的熔岩管洞穴或深部地下环境; 此外, 火星样品中的微生物量可能极为稀少, 通过采样返回任务, 利用地球完备的实验条件开展研究也是未来火星生命信号探测的重要途径。

**关键词:** 火星; 宜居环境; 生命; 采样返回

**中图分类号:** P691

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2025)01-0086-11

**DOI:** 10.15982/j.issn.2096-9287.2025.20230022

**引用格式:** 史语桐, 赵健楠, 张明杰, 等. 火星地质环境演变与生命宜居性探索[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(1): 86-96.

**Reference format:** SHI Y T, ZHAO J N, ZHANG M J, et al. Evolution of the martian geological environment and exploration of habitability of Mars[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(1): 86-96.

## 引言

火星位于太阳系宜居带中, 在演化早期经历了大量与地球相似的地质过程<sup>[1-2]</sup>, 也是太阳系内最有可能存在生命的地外天体。依据数10次火星环绕和着陆探测任务获得的数据, 目前对火星所经历的主要地质事件、形成的地形地貌和气候环境演变等已经有较好的认知, 但也存在许多未解之谜, 针对火星生命探索展开的探测任务至今尚未发现其存在生命的直接证据。为了回答火星上是否存在或存在过生命这一问题, 从火星上采样返回已被认为是最直接有效的方法<sup>[3-5]</sup>。美国的“毅力号(Perseverance)”火星车正在对耶泽罗(Jezero)盆地进行地质探测和生命痕迹的搜寻, 完成了数次土壤与岩石样品的采样与抛掷, 并计划于2033年前后通过另外一次任务收集预放置的样品并带回地球<sup>[4-6]</sup>。中国的“天问三号”火星采样返回任务将火星生命痕迹的探索作为首要科学目标, 希望通过对返回样品的研究, 解开火星是否存在生命的谜团。

火星曾经历多样的地质作用, 形成了宜居性千差万别的地质环境, 并非所有区域都具有形成或保存生命的可能。那么, 在火星过去40多亿年的地质演化历史中, 哪一阶段、哪些区域最有可能形成生命? 又有哪些区域最有可能维持生命或保存生命标志物? 这些是火星生命探索中需要首先回答的问题。本文将梳理火星地质地貌所揭示的气候环境历史, 回顾火星潜在生命的探测历程, 分析火星生命宜居条件和可能的生命标志物, 探讨火星上最有可能保存生命的区域和地球与火星类比研究在火星生命探寻方面的意义。

## 1 火星地貌和矿物记录的气候环境特征

火星具有复杂和长期的地质活动历史, 造就了丰富的地貌类型, 形成了复杂的沉积环境和矿物记录, 其中火星表面多种水成地貌的存在为认识火星不同地质历史时期的气候环境提供了重要窗口<sup>[7]</sup>。广泛分布于诺亚纪(约37亿年之前)地层上的峡谷网<sup>[8-9]</sup>、冲积扇<sup>[10]</sup>、三角洲<sup>[11-12]</sup>和古湖泊<sup>[13-14]</sup>等地貌记录了火星已知最古老的流水活动。这些地貌与地球流水地貌的形貌相似性或许指示了类似的暖湿气候下相似的成因过程<sup>[15]</sup>。诺亚纪地层上的撞击坑大多具有高度退化的形态, 同样指示了具有高侵蚀速率的早期环境<sup>[16]</sup>。然而, 许多气候模拟研究<sup>[17-18]</sup>认为早期火星整体处于以融雪和冰川活动为特征的干冷气候<sup>[17-19]</sup>。也有学者认为火星诺亚纪

具有以季节性降水为特征的干旱-半干旱气候<sup>[20-22]</sup>, 以大量降雪和季节性融雪/融冰为特征的冷湿气候<sup>[23]</sup>, 或以偶发性温暖和潮湿期为特征的整体寒冷气候<sup>[24-25]</sup>。西方纪(距今约37~30亿年)时期的流水活动以大规模地下水溢出并快速冲刷形成的外流渠道为主, 而峡谷网的形成趋于停滞, 侵蚀速率相较诺亚纪显著下降。外流渠道的形成大多被认为与撞击作用、火山活动或区域构造活动引起的短时间洪水事件有关<sup>[26]</sup>。结合对于外流渠道相关洪水事件的推测, 关于西方纪火星古海洋存在的假说也被提出<sup>[27-29]</sup>。随着气候逐渐趋于干冷, 亚马逊纪(约30亿年以来)的风化和侵蚀速率非常低, 风力作用和冰川作用在地表过程中占据主导, 可能与液态水活动有关的地貌以小规模的冲沟和季节性斜坡纹为主<sup>[2]</sup>。

在地貌证据之外, 火星表面的矿物也能为气候环境演变提供信息。目前火星表面已识别出包括碳酸盐<sup>[30]</sup>、含水硫酸盐<sup>[31]</sup>和氯盐<sup>[32]</sup>在内的多种蒸发盐矿物, 以及包括蒙脱石、云母、高岭土、绿泥石、蛇纹石等在内的层状硅酸盐矿物<sup>[33-35]</sup>。其中, 层状硅酸盐矿物在诺亚纪地层上广泛存在, 指示了火星在诺亚纪时期曾存在长期的水岩作用, 它们的形成被认为与地下热液系统有关<sup>[36]</sup>。氯盐主要分布在诺亚纪和西方纪低反照率的低洼地区, 或许形成于含水洼地的溢流或地下水涌及随后的蒸发过程, 而这一过程的持续时间可达10亿年<sup>[32,37]</sup>。富含硫酸盐的沉积物在火星表面不同区域也有发现, 被认为是蒸发过程产生的化学沉淀<sup>[38]</sup>。诺亚纪以层状硅酸盐为代表的碱性水蚀变时期向西方纪以硫酸盐为代表的酸性水蚀变时期的转换代表了相对湿润的碱性环境向干旱酸性环境的过渡<sup>[39]</sup>。上述蒸发岩的存在表明液态水在火星早期曾长期存在, 为生命的出现提供了可能<sup>[40-41]</sup>。

综上所述, 流水地貌和含水矿物在火星表面的广泛分布证明了火星地质历史时期曾存在丰富的液态水活动。液态水是生命产生与发展的必要条件, 结合火星早期潜在的宜居气候, 火星是否存在生命的问题成为了长期以来的研究热点, 由此引发了持续半个多世纪的火星生命探测。

## 2 火星生命探索进展

探索火星生命有多种途径, 包括环绕探测、就位探测、陨石研究、实验室模拟、地球类比研究等。其中, 对火星的环绕探测、就位探测和火星陨石的研究是寻找火星潜在生命痕迹、了解火星不同地质历史时期环境宜居性的直接方法, 下文将对基于上述3种途径的火星生命探测历史进行总结。

### 2.1 环绕探测

为判断火星地质历史时期及现在的宜居性, 环绕探测任务的工作主要围绕寻找火星上水的迹象展开。1971年发射的“水手9号”(Mariner 9)是第一个成功环绕火星的探测器, 其最重要的发现之一即为拍摄到了火星表面类似地球峡谷和河网地貌<sup>[29]</sup>。1975年发射的“海盗1号”(Viking 1)和“海盗2号”(Viking 2)获得了更高分辨率(约200 m/像素)的火星全球影像, 发现上述地貌在火星表面广泛分布, 进而推测火星地质历史早期可能存在温暖湿润的气候, 由此引发了关于火星早期宜居环境的讨论<sup>[42-47]</sup>。20世纪以来, 随着遥感成像技术的发展和光谱分析在火星探测中的应用, 人们对火星宜居性的认识和评估取得了新进展。美国“火星奥德赛”(Mars Odyssey)、欧洲“火星快车号”(Mars Express)和美国“火星勘测轨道飞行器”(Mars Reconnaissance Orbiter)在火星全球范围内获得了大量高分辨率影像和地形数据, 由此支持了一系列关于火星早期水成地貌的识别和研究, 为火星早期丰富的水活动提供了进一步的证据。表面成分方面, “火星快车号”和“火星勘测轨道飞行器”在火星表面观测到许多含有层状硅酸盐矿物的精细沉积物, 这些沉积物只有在液态水的存在下才能形成, 进一步支持了早期火星比今天更潮湿的假设<sup>[39,48]</sup>, 为火星早期宜居环境的存在提供了证据。空间环境方面, 致力于探测火星大气与挥发分演化的MAVEN探测器自2014年以来开始观测火星大气逃逸情况, 为探明火星宜居环境的变化机制、推测火星早期宜居环境的持续时间提供了信息。当前中国“天问一号”也正获取火星全球水冰和成分数据, 为火星宜居条件研究提供新资料<sup>[49-50]</sup>。

### 2.2 就位探测

20世纪70年代以来, 为了进一步寻找火星生命痕迹, 以美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)为首的空间机构开展了多次火星就位探测, 揭示了火星生命形成和保存的可能。20世纪70年代发射的“海盗号”系列飞船将寻找火星生命作为探测目标之一, 使用气相色谱-质谱仪(GC-MS)检测到了有机碳和高氯酸盐相互作用产生的氯甲烷和氯苯<sup>[51]</sup>。1996年发射的“探路者号”(Pathfinder)着陆在阿瑞斯谷(Ares Vallis), 并在着陆区的岩石中探测到纳米氧化铁与其它含铁矿物, 但后期地质过程的改造掩盖了区域化学蚀变的证据<sup>[52]</sup>。2004年发射的“勇气号”(Spirit)和“机遇号”(Opportunity)在着陆区内检测到硫酸盐出露<sup>[53-54]</sup>。“机遇号”在子午线高原发现与赤铁矿共生的黄钾铁矾, 指示了该区域沉

积岩具有酸性水成环境成因<sup>[55]</sup>。酸性的水成环境不仅能形成硫酸盐,还常会有赤铁矿共生。这种现象不仅出现在“机遇号”着陆区,在火星表面其它硫酸盐露头也均有发现,说明酸性水成环境在火星表面普遍存在。由于地球酸性水环境中的硫酸盐保存了古代生命痕迹,即生物标志化合物(REF),因此火星类似环境中如果存在过生命,则同样可能以有机化合物的形式被保存下来<sup>[56]</sup>。“凤凰号”(Phoenix)检测到着陆区土壤样品中高氯酸盐( $\text{ClO}_4^-$ ),并直接检测到了液态水的存在,可能是高氯酸盐饱和的盐水<sup>[57-58]</sup>。“好奇号”(Curiosity)火星车的着陆点盖尔(Gale)撞击坑在40亿年前曾是中性、低盐度、持续了几百年到数万年的湖泊。“好奇号”在35亿年前的古老泥岩中检测到了热解产生的噻吩类、芳香族和脂肪族化合物<sup>[59-60]</sup>,进一步证实了“海盜号”的发现,为了解火星有机碳的保存以及碳循环提供了证据。此外,火星大气中也探测到甲烷存在<sup>[61-63]</sup>。最近“毅力号”火星车对耶泽罗古湖泊盆地进行了探测,发现着陆区耶泽罗盆地底部的玄武岩经历了广泛且多样的流水蚀变,并发现了有机物<sup>[64]</sup>。“祝融号”火星车的着陆点乌托邦平原东南部也已发现了水活动的多种证据<sup>[65-66]</sup>,该着陆点毗邻许多研究中提出的西方纪古海洋海岸线<sup>[29,67]</sup>,为就位探测潜在的早期海洋环境提供了可能。

### 2.3 陨石研究

直接对火星样品进行分析是最可靠的,但是目前还未有火星样品返回,使得火星陨石成为研究火星生命的重要样品来源。目前已经在多块火星陨石中发现有机物的存在,这些有机物指示了火星生命存在的可能性。其中最早的发现来自于火星陨石ALH84001,这是一块形成于火星诺亚纪(约40.9亿年)的岩石<sup>[68]</sup>,其中发现了少量碳酸盐(约5%),有机碳和含氮的有机化合物<sup>[69]</sup>。另外,在Dar al Gani 476陨石中发现了多环芳烃;在EETA79001陨石和Nakhla陨石中发现了多种有机化合物,包括芳烃、烷基取代芳烃以及含氧(苯酚)和含氮(苯腈)芳烃;在Tissint陨石中的有机物以芳香烃为主,包括含氧和含氮的芳香烃,含硫有机化合物<sup>[70]</sup>,以及与有机碳类似的同位素组成<sup>[71]</sup>。然而,陨石研究也存在诸多局限性,如陨石的源区难以确定、陨石的有机物是否为生物起源难以证实,陨石样品是否受到地球有机质的污染也难以评估等。

上述环绕探测、就位探测和对现有火星陨石的研究都显示火星上存在多种有机物,但无法确定其是否与生命直接相关。因此,需要重新考虑火星生命的宜居条件,准确识别火星生命标志物或生命信号,并通

过地球类比研究明确其探测方法。

## 3 火星生命宜居条件与潜在生命标志物

### 3.1 火星生命宜居条件

宜居性(habitability)被定义为一颗行星承载任何生命的潜力<sup>[72]</sup>。如果行星的环境能够支持至少一种已知生物的活动,则可认为该环境是宜居的。长期宜居环境的维持需要同时满足以下5种条件:液态水、适宜的温度和其它理化条件(例如水活度)、可用的能量、已知生命所需的主要元素(CHNOPS)、特定生物所需的其它元素<sup>[72]</sup>。恒星周围的宜居带通常指岩石行星表面能维持液态水稳定存在的区域<sup>[58]</sup>。早期火星位于太阳系宜居带中<sup>[73]</sup>,而现代火星大气稀薄,表面很难存留液态水,仅位于太阳系宜居带边缘。同时,现代火星表面经受着强烈的太阳辐射,对于生命的生存是巨大的挑战。然而,早期火星表面曾有大量的水,甚至现代火星也可能有暂时性地表水源<sup>[57]</sup>和赋存在地下的大量水冰<sup>[74]</sup>,提供了宜居环境存在的可能性。此外,火星表面环境具有多种极端环境因子,如干旱、高辐射、高盐、强氧化等,这些环境因子在不同地质背景下的组合对生命存活和生命信号的保存具有不同程度的影响,需结合地质环境、生物种类与有机物类别进行具体判断。

### 3.2 生物标志物

常见生物信号可分为以下3类<sup>[75]</sup>:

- 1) 细胞化石:保存了微生物有机残留物及其细胞外基质<sup>[76]</sup>;
- 2) 生物作用的地质结构<sup>[76]</sup>:提供了微生物生物膜存在的宏观印记,可以更容易地识别,如叠层石;
- 3) 化学信号:地质记录保存的有机化学化石<sup>[77]</sup>,可以是原生生物分子,也可以是成岩蚀变化合物,即生物标志物。

在地球海洋和其他潮湿环境中,底栖微生物形成的高度组织的微生物群落“生物膜”能够影响碎屑沉积物的积累,形成宏观的沉积结构。这些结构统称为微生物诱导沉积结构(MISS)<sup>[78]</sup>,是重要的形态生物学信号。早期火星上可能存在的原始微生物类型很小,尺度很可能在一微米到几微米之间,但它们的矿化或聚集形成的微生物菌落和生物膜会大得多。这些生物成因结构可作为矿物替代结构或被矿物胶结物包裹在沉积物中的碳质残留物保存在火星岩石上,形成凝块岩、叠层石、层状生物膜以及有机颗粒和微生物岩<sup>[79]</sup>。然而,在20多年的火星表面探测中,尚没有发现火星微生物诱导沉积结构的明确证据。

化学生物信号是另一种重要的生命信号形式。地球上的大多数生物物质都以碳质大分子的形式存在于层状沉积岩中, 其数量级比生物本身的数量级丰富得多<sup>[66]</sup>。如果古代火星上存在生命, 它的残骸也可能堆积在大量富含有机物的沉积物中, 形成诸如氨基酸、蛋白质、脂质、核酸、碳水化合物、色素和中间代谢产物等化学生物信号。其中, 脂质及脂质衍生物由于其具有稳定的碳氢化合物主链而具有极高的保存潜力, 可稳定埋藏数10亿年<sup>[80]</sup>, 是火星化学生物信号的重要探测对象。

## 4 火星生命可能的保存区域

早期火星被认为处在太阳系的宜居带中, 而其宜居环境最可能出现在湖泊、热液系统等水活动区域。现代火星的宜居环境则可能在地下或浅表暂时性卤水出现区。同时, 火星的古热液系统也有生命存在的可能(类似地球热液环境中的嗜热嗜酸微生物), 热液活动停止后, 温度降低, 为保存生物标志化合物提供了条件<sup>[81]</sup>。

火星历史时期存在多种与生命生存和保存相关的地貌和地质过程: 海洋、湖泊、峡谷网、泥火山、热泉等水活动地貌为生命生存提供了水源、热源、能量源等必要条件; 冰川有利于生命信号的长期保存; 火山作用形成的熔岩管有利于遮蔽紫外辐射。其中, 海洋、湖泊、三角洲和地下热泉区是最有可能保存生命的区域。

### 4.1 古海洋

海洋是地球生命的诞生地和重要的栖居场所, 拥有包括热液系统、深海冷泉、海洋沉积物和洋壳等多种生态环境, 其中深海热液环境是目前较为公认的早期地球生命的可能起源环境之一。深海沉积物承载了地球生物总量的5%~15%<sup>[82]</sup>。海洋所蕴含的大量水体及水下沉积环境能够提供生命代谢所需的营养物质, 海洋-硅酸盐界面处的水岩反应能够为化能生命形式提供能量来源, 低能稳定的深海沉积环境也能够为生命痕迹的保存提供良好的条件。

诸多地貌证据、化学证据和数值建模结果表明, 火星北部低地曾在诺亚纪至西方纪时期存在海洋环境<sup>[27-28, 83]</sup>。尽管关于古海洋的水源机制、覆盖范围和持续时间等仍有较大争议<sup>[27]</sup>, 古海洋假说的提出丰富了火星潜在宜居环境的类型, 为火星生命探索提供了新的可能。

类似的海洋环境在火星南部也有发现。位于火星南部高原的艾利达尼亚(Eridania)盆地曾是火星最大

的内陆海, 盆地内部富含蒸发盐、蛇纹石及含水矿物的巨厚沉积指示了深海热液环境。这一距今约38亿年的海底热液系统与可能诞生于相似环境下的地球最早生命存在于同一时期, 为了解早期地球的环境条件提供了宝贵的窗口<sup>[84]</sup>。

火星北半球地形图及现有部分研究提出的古海洋海岸线位置如图1所示, 背景为MOLA高程图, 由红色至蓝色代表高程降低。海岸线数据来自<sup>[85-87]</sup>。

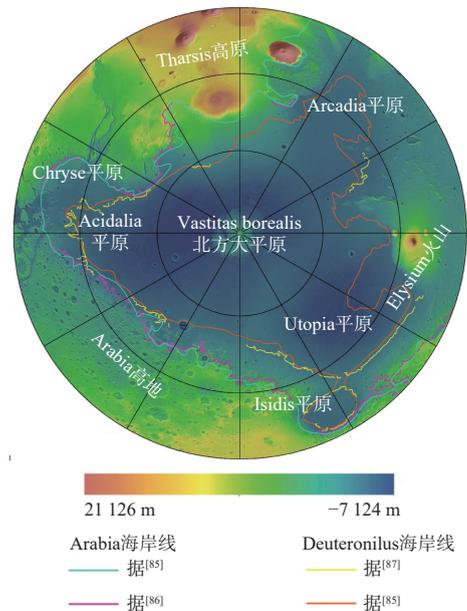


图1 火星北半球地形图及现有部分研究提出的古海洋海岸线位置  
Fig. 1 Topographic map of the northern hemisphere of Mars and ancient shorelines proposed in some current studies.

### 4.2 古湖泊

古湖泊盆地因其曾经贮存有大量液态水, 是最可能存在或曾经存在宜居环境的区域, 因而一直是火星探测和科学研究的重要对象。前人在火星表面已识别出400多个古湖泊, 它们主要分布在南部高地, 年龄多为诺亚纪至早期西方纪<sup>[88-89]</sup>。其中, 古湖泊的地貌特征能够揭示湖泊存在时地表水的活动情况; 古湖泊沉积物的矿物组成能够反映古气候环境特点; 古湖泊的年龄与分布指示了火星地表水的存在时间与分布范围<sup>[90]</sup>。因此, 古湖泊可为研究火星宜居性、寻找火星生命提供重要线索。火星古湖泊主要分类及全球分布见图2, 底图代表火星的地质年代。

古湖泊所可能代表的早期热液环境、深水水积环境和高盐环境等均能够为潜在有机物质的产生与保存提供条件。地球上, 盐湖多边形地貌是地表水或地下水或两者的共同供给下, 湖水干涸蒸发和矿物沉积的产物, 多边形地貌包含一套蒸发盐沉积, 自下而上为

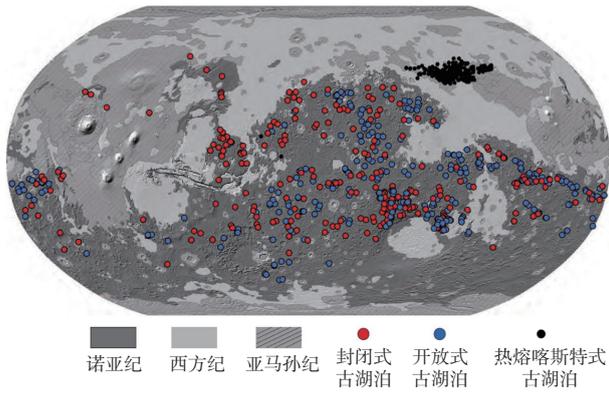


图2 火星古湖泊主要分类及全球分布<sup>[83]</sup>  
Fig. 2 Distribution of Martian paleolakes<sup>[83]</sup>

碳酸盐、硫酸盐和氯化物，它们在沉积过程中可能捕获了极嗜盐的微生物<sup>[91]</sup>。火星盐湖多边形主要集中在含氯地区。截至目前，已在火星南部高地发现600多个含氯沉积物<sup>[32,37]</sup>，约120个含氯位置发现多边形，它们中的大多数位于火星南部高地的0~30°S之间，可作为未来搜寻火星生命痕迹的重要目标。

近年来，随着一系列火星原位探测任务的实施，着陆和巡视器获取的探测数据为研究古湖泊内的环境条件和宜居性提供了重要参考。“勇气号”火星车着陆于古瑟夫(Gusev)古湖泊内，并在坑内探测到水合二氧化硅沉积<sup>[92]</sup>。Ruff等<sup>[93]</sup>的研究结果表明，这些水合二氧化硅可能是古湖泊中的热泉活动形成的泉华沉积物。由于在地球表面，泉华沉积有利于微生物的保存，因而古瑟夫盆地可能是寻找火星生命的重要区域。美国“好奇号”火星车对盖尔古湖泊盆地开展了持续探测，发现了多种类型的沉积岩和含水矿物，证实了其中曾经存在中性pH、低盐度的湖泊环境<sup>[94-95]</sup>。更为重要的是，“好奇号”探测到C、H、O、S、N、P等与生命相关的重要化学元素以及噻吩、芳香族、脂肪族化合物等有机物<sup>[95]</sup>，说明古湖泊或许能够为火星生命的孕育和保存提供环境支持。

### 4.3 三角洲

三角洲是水携带沉积物从流域到稳定水体(海洋/湖泊)中沉积下来的扇状沉积地貌，包括海岸三角洲，如克律塞(Chryse)区域的海帕尼斯(Hypanis)三角洲<sup>[96]</sup>，以及湖泊三角洲，如耶泽罗三角洲<sup>[12]</sup>。火星三角洲地貌见图3，背景图为THEMIS日间热红外影像。类似地球，作为沉积物很好的围陷体，且位于光照充足、水体稳定的浅水区，三角洲是生命形成、聚集和保存的理想区域，被认为是火星生命探测的重要目标<sup>[97]</sup>。多个火星三角洲曾被探测任务选为着陆区或备选着陆区，如耶泽罗三角洲<sup>[98]</sup>，盖尔撞击坑内的

三角洲/冲积扇<sup>[95]</sup>，埃伯斯瓦尔德(Eberswalde)三角洲<sup>[99-100]</sup>，和海帕尼斯三角洲<sup>[96]</sup>等。

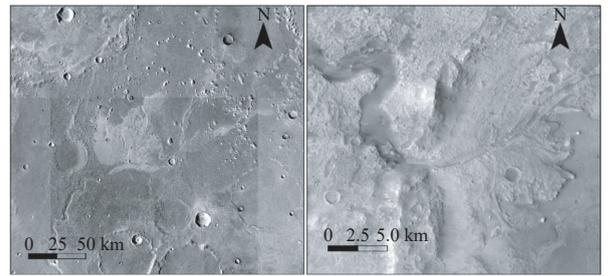


图3 典型的火星三角洲地貌  
Fig. 3 Typical delta landforms on Mars

目前火星已发现的典型三角洲共174处，主要形成年代为西方纪和亚马逊纪<sup>[101]</sup>，也有一些形成于诺亚纪<sup>[96]</sup>。火星三角洲呈全球性分布，并在南北地形二分性边界处聚集<sup>[101]</sup>，为火星北部海洋的存在提供了证据<sup>[96,102]</sup>。近期，“毅力号”火星车对耶泽罗撞击坑远端科迪亚克(Kodiak)露头地层的分析证明了耶泽罗扇状沉积的三角洲成因<sup>[103]</sup>，目前“毅力号”火星车正向耶泽罗湖泊三角洲内部不断深入和取样，继续寻找生命信号的踪迹。

### 4.4 地下水和热泉

地下水和热泉环境为生命提供重要的水、热和必要元素，因而是生命在地下更可能赋存的位置。同时，火星表面由于撞击作用和强烈的辐射，生命较难生存和保存，这使得地下成为火星生命重要的避难所。在火星诺亚纪较为温暖、湿润的环境下，地表水会自然渗透到地下，形成地下水。火星表面的一些地貌特征也证明了火星地下水的存在和上涌，比如形成位于环克律塞区域及海拉斯(Hellas)盆地北东向的大型溢流渠道、具有圆弧状河谷源头的三角洲、壁垒撞击坑(地下水/冰)和盐湖多边形地貌等(见图4)。

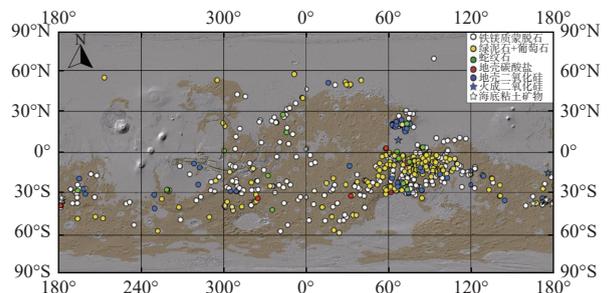


图4 火星热液系统和地下环境的沉积矿物分布<sup>[81]</sup>  
Fig. 4 Distribution of mineral deposits formed in deep crustal or surface hydrothermal environments detected by infrared remote sensing<sup>[81]</sup>

地下热泉是地下水受地下热源(火山作用、撞击作用)的加热，溢出地表或在地壳浅部的液态水活动

现象<sup>[104]</sup>。在地球上, 热泉富含多种化学物质, 加之不同的地热梯度, 使得其拥有丰富多样的微生物群落, 被认为是微生物世界的“热带雨林”<sup>[105]</sup>。“勇气号”在古瑟夫湖泊中发现的蛋白石及附近的含硫土壤, 被解释为火山地下热泉和火山作用共同作用的产物<sup>[93]</sup>。另外, 在大瑟提斯(Syrtis Major)、艾利达尼亚、诺克提斯沟网(Noctis Labyrinthus)等处均被认为是火星上可能存在热泉的位置<sup>[84]</sup>。这些热泉位置既是火星生命形成的有利区域, 也是免遭表面环境剧变影响的区域, 也是火星生命探寻应该关注的重点。

此外, 晚诺亚纪后, 火星表面环境的持续变冷, 这些地下水 and 热泉可能在地下形成一个全球冰冻圈。“凤凰号”在火星高纬近地表就位观测到的水冰<sup>[106]</sup>, 雷达探测发现的现代火星中高纬地下广泛存在的冰层<sup>[107]</sup>, 极区冰盖下可能存在的地下湖泊<sup>[108]</sup>, 以及在断崖露头上暴露出来的水冰<sup>[74]</sup>都说明当前火星或许仍存在活跃的冰冻圈。类似于地球, 这些水冰之中可能保存了远古的火星生命<sup>[109]</sup>。

#### 4.5 熔岩管洞穴

面对火星早期的强辐射环境和频繁的陨石撞击, 洞穴能够为潜在的微生物提供避难场所。洞穴内部有相对恒定的温度与湿度, 能有效避免地表环境的极端气候与太阳辐射, 为微生物的生存提供有利条件。洞穴深部环境中通过辐射分解、蛇纹石化、费托反应等各种地球化学反应产生的还原性与氧化性物质均能为地下微生物提供能量来源。

熔岩管是火星洞穴的主要形成机制之一, 在火星具有广泛的分布<sup>[110]</sup>。熔岩管是在熔岩流内部自然形成的管道, 当液态的熔岩流流动时, 由于表面冷却较快, 形成固体硬壳, 在表层硬壳的保温作用下, 其内部温度高、流速快, 从而在地下形成管状空间。当前研究普遍认为, 熔岩管所提供的地下环境具有维持宜居环境的潜能<sup>[110-111]</sup>, 并有利于潜在生命痕迹的保存, 使其免受地表改造过程的破坏。火星熔岩管集中产生于晚诺亚纪至西方纪(约37亿年前)的火山活动活跃期, 此时火星仍具有浓密的大气和足够高的表面温度, 甚至存在海洋<sup>[112-113]</sup>, 而广泛分布的熔岩管洞穴或许能够为此时诞生的潜在微生物提供栖居空间和能量供给<sup>[113]</sup>。

#### 4.6 深部地下

地球微生物在地下数千米的深度范围内都有存在, 目前探测到的大陆深部地下微生物大多为化能无机自养生物, 主要分布在地下玄武岩和花岗岩中的含水层内<sup>[114]</sup>, 通过各种的氧化还原反应来驱动代谢<sup>[115]</sup>。

类似的地下宜居环境在早期火星<sup>[115-116]</sup>, 乃至现代火星均有可能存在<sup>[117]</sup>。

火星的重力相较地球更低, 更有利于地下大型孔隙和裂缝空间的出现, 这些地下空间延伸到地壳深处<sup>[118]</sup>, 如果有足够的液态水和能量供给, 便足以支持一定生物量的存在。许多热力学证据和水文模型表明, 火星地下数千米深处能够允许液态水的长期稳定存在, 尽管目前的探测手段尚无法确定其赋存深度与范围。岩层裂隙间歇性释放的氢气、非生物合成的有机物或还原的含硫化合物均能成为火星深部地下潜在的能量来源<sup>[119]</sup>。综上所述, 尚有待探测的火星深部地下同样具有环境宜居性潜力, 是未来火星生命信号探测的重要目标。

## 5 地球类比研究的意义

半个多世纪以来, 地球类比研究一直是比较行星科学、空间探索 and 天体生物学的重要组成部分<sup>[120]</sup>。当前对地外生命形式的认知或推测都是基于地球上的碳基生命, 这些已知生命形式的产生都需要有液态水。地球生命的生存依赖于水, 在火星上寻找潜在生命的痕迹, 首先要寻找液态水活动的证据。早期火星可能能够长时间维持地表液态水活动<sup>[121-122]</sup>, 当前火星或许也能支持液态水在地下的存在<sup>[108, 123]</sup>。水是生命形成和生存的最重要的媒介, 它的存在已经成为评估火星上的可居住性和寻找生命的关键线索。因此, 认识火星水环境演化对了解潜在火星生命的形成条件与保存环境有着重要意义。在40多亿年的演化历史中, 火星的水环境经历了由早期相对暖湿到如今寒冷干旱的演变, 期间的多种水环境均能在地球上找到类比。同时, 地球的不同极端环境也拥有多种与现代火星或早期火星类似的环境条件, 包括永久冻土<sup>[124]</sup>、沙漠<sup>[125]</sup>、高盐盐湖<sup>[126]</sup>、热液系统<sup>[127]</sup>和酸性湿润条件<sup>[128-129]</sup>等。其中, 极端寒冷和干燥是类比现代火星的典型环境条件, 阿塔卡马沙漠<sup>[130, 131]</sup>、柴达木盆地<sup>[126]</sup>、力拓河盆地<sup>[128]</sup>和地球两极地区<sup>[132]</sup>等都是与现代火星类似的典型极端环境。这些环境所发育的盐湖、盐滩、冲沟、干谷、冻土、高山沙漠等地质特征为认识当前火星环境的宜居性潜能提供了依据, 也为了解相应条件下生命可能的赋存状态和保存形式提供了参考。

综上所述, 地球类比研究与火星探测任务相辅相成, 有利于: ①更好地理解火星任务返回的数据, 为评估研究区的宜居性潜力提供信息; ②识别火星过去潜在宜居环境的可能地点; ③了解在火星特定环境下可能存在的生物标志物类别, 为日后开展原位探测指明方向。

## 6 结束语

作为地球邻星,火星的许多地质和物理环境特征与地球类似。对火星宜居环境的研究是火星科学的热门课题<sup>[133-136]</sup>。早期火星被认为处在太阳系的宜居带中,已有诸多地质记录表明火星表面曾存在长期的液态水活动<sup>[7,40,137]</sup>,甚至可能存在海洋、湖泊、热泉等宜居环境<sup>[81]</sup>,具备了形成生命所必须的元素。然而,半个多世纪的探测并未发现任何生命的直接证据,原因可能为:①火星从来就没有形成过类地生命,这种假设下,则需要回答为何火星具备形成生命的条件却没有形成生命,而地球的生命又从何而来;②现有火星探测并未发现生命信号存在的区域,当前对火星潜在生命的直接认识主要依靠着陆器的就位探测,然而,现有的原位探测区域有限,探测深度也很小,对潜在宜居期存续时间最长的火星地下环境认识尤为不足;③现有探测技术不能有效识别火星原位样品中微量的生物信号,火星样品中可能有极其稀少的微生物或生物标志物,需要采样返回利用地球完备的设备条件才有可能检测到<sup>[130]</sup>。

针对上述问题,通过分析论证,本文得出火星宜居环境的准确判别和火星样品返回分析是推动火星潜在生命信号探测的两条必经之路的结论:在宜居环境的判别中,应加强对火星地下环境的研究,通过钻探、电磁、地震波和重力感应等不同手段对火星的浅部至深部地下展开全面探测,探明其宜居性潜力;在火星样品返回分析中,应当在利用地球设备开展测试的同时考虑到潜在的火星生命极强的环境耐受性问题,需对样品进行有效的隔离与保护。

目前,“毅力号”火星车在耶泽罗盆地采集并放置的样品将随未来的火星样品返回计划取回地球,中国计划开展的“天问三号”任务也有望实现火星表层和浅部物质的采样返回,相信上述探测任务的实施和火星样品的获得将会为更深入地认识火星气候环境演变提供支持,为探明火星环境宜居性潜能、发现火星潜在的生命信号提供线索。

## 参 考 文 献

- CARR M H. The fluvial history of Mars[J]. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 2012, 370(1966): 2193-215.
- CARR M H, HEAD J W. Geologic history of Mars[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 294(3-4): 185-203.
- CARRIER B L, BEATY D W, MEYER M A, et al. Mars extant life: what's next?[J]. *Astrobiology*, 2020, 20(6): 785-814.
- FARLEY K A, WILLIFORD K H, STACK K M, et al. Mars 2020 mission overview[J]. *Space Science Reviews*, 2020, 216: 1-41.
- BELL J F, MAKI J N, MEHALL G L, et al. The Mars 2020 perseverance rover Mast camera zoom (Mastcam-Z) multispectral, stereoscopic imaging investigation[J]. *Space Science Reviews*, 2021, 217(1): 24-30.
- XU L, LI H, PEI Z, 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.
- 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.
- ZHAO J N, SHI Y T, ZHANG M J, et al. Advances in Martian water-related landforms[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(9): 2755-2768.
- ALEMANN G, OROFINO V, MANCARELLA F. Global map of martian fluvial systems: age and total eroded volume estimations[J]. *Earth and Space Science*, 2018, 5(10): 560-577.
- 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*, 2010, 115(E9): 11-19.
- MOORE J M, HOWARD A D. Large alluvial fans on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets* (1991-2012), 2005, 110(E4): 225-243.
- PONDRELLI M, ROSSI A P, MARINANGELI L, et al. Evolution and depositional environments of the eberswalde fan delta, Mars[J]. *Icarus*, 2008, 197(2): 429-451.
- GOUDGE T A, MILLIKEN R E, HEAD J W, et al. Sedimentological evidence for a deltaic origin of the western fan deposit in Jezero crater, Mars and implications for future exploration[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 458: 357-365.
- GOUDGE T A, FASSETT C I, HEAD J W, et al. Insights into surface runoff on early Mars from paleolake basin morphology and stratigraphy[J]. *Geology*, 2016, 44(6): 419-422.
- ZHAO J, XIAO L, GLOTCH T D. Paleolakes in the northwest Hellas region, Mars: implications for the regional geologic history and paleoclimate[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, 125(3): e2019JE006196.
- BARNHART C J, HOWARD A D, MOORE J M. Long-term precipitation and late-stage valley network formation: landform simulations of Parana Basin, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(E01003): 21-28.
- IRWIN R P, MAXWELL T A, HOWARD A D, et al. A large paleolake basin at the head of Ma'adim Vallis, Mars[J]. *Science*, 2002, 296(5576): 2209-2212.
- WORDSWORTH R, FORGET F, MILLOUR E, et al. Global modelling of the early martian climate under a denser CO<sub>2</sub> atmosphere: Water cycle and ice evolution[J]. *Icarus*, 2013, 222(2013): 1-19.
- PALUMBO A M, HEAD J W. Early Mars climate history: characterizing a “warm and wet” martian climate with a 3 - D global climate model and testing geological predictions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(19): 10, 249-10, 58.
- PALUMBO A, HEAD J. Characterizing a warm and wet early martian climate with a 3d global climate model[C]//Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference. [S. l.]: Lunar and Planetary Science Conference, 2018.
- 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.
- 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): 22-29.
- [22] SEYBOLD H J, KITE E, KIRCHNER J W. Branching geometry of valley networks on Mars and Earth and its implications for early Martian climate[J]. *Science Advances*, 2018, 4(6): 6692-6698.
- [23] 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: 1-19.
- [24] HALEVY I, HEAD III J W. Episodic warming of early Mars by punctuated volcanism[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(12): 865-868.
- [25] CANG X, LUO W. Noachian climatic conditions on Mars inferred from valley network junction angles[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 526: 115768.
- [26] RODRIGUEZ J A, KARGEL J S, BAKER V R, et al. Martian outflow channels: how did their source aquifers form, and why did they drain so rapidly?[J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 13404.
- [27] CARR M, HEAD J. Mars: Formation and fate of a frozen Hesperian ocean[J]. *Icarus*, 2019, 319: 433-443.
- [28] HEAD III J W. Possible ancient oceans on Mars: evidence from mars orbiter laser altimeter data[J]. *Science*, 1999, 286(5447): 2134-2137.
- [29] CITRON R I, MANGA M, HEMINGWAY D J. Timing of oceans on Mars from shoreline deformation[J]. *Nature*, 2018, 555(7698): 643-646.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] OSTERLOO M, HAMILTON V, BANDFIELD J, et al. Chloride-bearing materials in the southern highlands of Mars[J]. *Science*, 2008, 319(5870): 1651-1654.
- [33] POULET F, BIBRING J P, MUSTARD J F, et al. Phyllosilicates on Mars and implications for early martian climate[J]. *Nature*, 2005, 438(7068): 623-627.
- [34] 林红磊. 火星含水矿物精细类别的高光谱遥感探测方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2018.
- LIN H L. Research on the method of martian finely hydrous minerals detection with hyperspectral remote sensing data[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [35] 苟盛, 岳宗玉, 邸凯昌, 等. 火星表面含水矿物探测进展[J]. *遥感学报*, 2017, 21(4): 531-548.
- GOU S, YUE Z Y, DI K C, et al. Advances in aqueous minerals detection on Martian surface[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2017, 21(4): 531-548.
- [36] 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.
- [37] OSTERLOO M M, ANDERSON F S, HAMILTON V E, et al. Geologic context of proposed chloride-bearing materials on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(E10): E10012.
- [38] GROTZINGER J P, SUMNER D Y, KAH L C, et al. A habitable fluvio-lacustrine environment at Yellowknife Bay, Gale crater, Mars[J]. *Science*, 2014, 343(6169): 1242777.
- [39] BIBRING J P, LANGEVIN Y, MUSTARD J F, et al. Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data[J]. *Science*, 2006, 312(5772): 400-404.
- [40] 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.
- LIU Y, LIU Z H, W X, et al. Evolution of water environment on Mars[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(9): 2725-2741.
- [41] 郑绵平, 孔维刚, 陈文西, 等. 地球同火星蒸发岩沉积的对比[J]. *高校地质学报*, 2014, 20(2): 169-176.
- ZHEGN M P, KONG W G, CHEN W X, et al. A comparative analysis of evaporite deposition on Earth and Mars[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2014, 20(2): 169-176.
- [42] SAGAN C, TOON O, GIERASCH P. Climatic change on Mars[J]. *Science*, 1973, 181(4104): 1045-1049.
- [43] TOON O B, POLLACK J B, WARD W, et al. The astronomical theory of climatic change on Mars[J]. *Icarus*, 1980, 44(3): 552-607.
- [44] BAKER V, STROM R, GULICK V, et al. Ancient oceans, ice sheets and the hydrological cycle on Mars[J]. *Nature*, 1991, 352: 589-594.
- [45] CLIFFORD S M. A model for the hydrologic and climatic behavior of water on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1993, 98(E6): 10973-11016.
- [46] CARR M H. The Martian drainage system and the origin of valley networks and fretted channels[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets (1991-2012)*, 1995, 100(E4): 7479-7507.
- [47] KASTING J F. Warming early Earth and Mars[J]. *Science*, 1997, 276(5316): 1213-1221.
- [48] EHLMANN B L, MUSTARD J F, MURCHIE S L, et al. Subsurface water and clay mineral formation during the early history of Mars[J]. *Nature*, 2011, 479(7371): 53-60.
- [49] ZOU Y, ZHU Y, BAI Y, et al. Scientific objectives and payloads of Tianwen-1, China's first Mars exploration mission[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 67(2): 812-823.
- [50] 李春来, 刘建军, 耿言, 等. 中国首次火星探测任务科学目标与有效载荷配置[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2018, 5(5): 406-413.
- LI C Y, LIU J J, GENG Y, et al. Scientific objectives and payload configuration of China's first Mars exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(5): 406-413.
- [51] NAVARRO-GONZ LEZ R, VARGAS E, DE LA ROSA J, et al. Reanalysis of the Viking results suggests perchlorate and organics at midlatitudes on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(E12): 112-117.
- [52] MORRIS R V, GOLDEN D, BELL III J F, et al. Mineralogy, composition, and alteration of Mars Pathfinder rocks and soils: Evidence from multispectral, elemental, and magnetic data on terrestrial analogue, SNC meteorite, and Pathfinder samples[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, 105(E1): 1757-1817.
- [53] HAMILTON V E, MORRIS R V, GRUENER J E, et al. Visible, near-infrared, and middle infrared spectroscopy of altered basaltic tephra: Spectral signatures of phyllosilicates, sulfates, and other aqueous alteration products with application to the mineralogy of the Columbia Hills of Gusev Crater, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(E12): 11-19.
- [54] WISEMAN S M, ARVIDSON R E, MORRIS R V, et al. Spectral and stratigraphic mapping of hydrated sulfate and phyllosilicate-bearing deposits in northern Sinus Meridiani, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: 10-20.
- [55] MARION G, CROWLEY J, THOMSON B, et al. Modeling aluminum-silicon chemistries and application to Australian acidic

- playa lakes as analogues for Mars[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(11): 3493-1511.
- [56] FERNANDEZ-REMOLAR D C, GOMEZ-ORTIZ D, HUANG T, et al. The Molecular record of metabolic activity in the subsurface of the rio tinto Mars analog[J]. *Astrobiology*, 2021, 21(11): 1387-1405.
- [57] FISCHER E, MARTNEZ G M, ELLIOTT H M, et al. Experimental evidence for the formation of liquid saline water on Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(13): 4456-4462.
- [58] SMITH P H, TAMPPARI L K, ARVIDSON R E, et al. H<sub>2</sub>O at the Phoenix landing site[J]. *Science*, 2009, 325(5936): 58-61.
- [59] MING D W, ARCHER P D, J R, GLAVIN D P, et al. Volatile and organic compositions of sedimentary rocks in Yellowknife Bay, Gale crater, Mars[J]. *Science*, 2014, 343(6169): 1245267.
- [60] EIGENBRODE J L, SUMMONS R E, STEELE A, et al. Organic matter preserved in 3-billion-year-old mudstones at Gale crater, Mars[J]. *Science*, 2018, 360(6393): 1096-1101.
- [61] 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.
- [62] HURTLEY S, GROCHOLSKI B, SMITH K T. Measuring martian organics and methane[J]. *Science*, 2018, 360(6393): 1082-1086.
- [63] 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.
- [64] SCHELLER E, HOLLIS J R, CARDARELLI E, et al. First-results from the perseverance SHERLOC investigation: aqueous alteration processes and implications for organic geochemistry in Jezero Crater, Mars[C]//Proceedings of the LPSC 2022. [S. l.]: LPSC, 2022.
- [65] LIU Y, WU X, ZHAO Y S, et al. Zhurong reveals recent aqueous activities in Utopia Planitia, Mars[J]. *Science Advances*, 2022, 8(19): eabn8555.
- [66] LU Y, EDGETT K S, WU B, et al. Aeolian disruption and reworking of TARs at the Zhurong rover field site, southern Utopia Planitia, Mars[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 595: 117785.
- [67] PERRON J T, MITROVICA J X, MANGA M, et al. Evidence for an ancient martian ocean in the topography of deformed shorelines[J]. *Nature*, 2007, 447(7146): 840-843.
- [68] LAPEN T J, RIGHTER M, BRANDON A D, et al. A younger age for ALH84001 and its geochemical link to shergottite sources in Mars[J]. *Science*, 2010, 328(5976): 347-351.
- [69] KOIKE M, NAKADA R, KAJITANI I, et al. In-situ preservation of nitrogen-bearing organics in Noachian Martian carbonates[J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 1988.
- [70] JARAMILLO E A, ROYLE S H, CLAIRE M W, et al. Indigenous organic - oxidized fluid interactions in the Tissint Mars meteorite[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(6): 3090-3098.
- [71] LIN Y, 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.
- [72] COCKELL C S, BUSH T, BRYCE C, et al. Habitability: a review[J]. *Astrobiology*, 2016, 16(1): 89-117.
- [73] KASTING J F, KOPPARAPU R, RAMIREZ R M, et al. Remote life-detection criteria, habitable zone boundaries, and the frequency of Earth-like planets around M and late K stars[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(35): 12641-12646.
- [74] DUNDAS C M, BRAMSON A M, OJHA L, et al. Exposed subsurface ice sheets in the Martian mid-latitudes[J]. *Science*, 2018(359): 12-19.
- [75] CATLING D C, KRISANSSEN-TOTTON J, KIANG N Y, et al. Exoplanet Biosignatures: a Framework for their assessment[J]. *Astrobiology*, 2018, 18(6): 709-738.
- [76] WESTALL F. Morphological biosignatures in early terrestrial and extraterrestrial materials[J]. *Space Science Reviews*, 2008, 135: 95-114.
- [77] PARNELL J, LEE P, COCKELL C S, et al. Microbial colonization in impact-generated hydrothermal sulphate deposits, Haughton impact structure, and implications for sulphates on Mars[J]. *International Journal of Astrobiology*, 2004, 3(3): 247-256.
- [78] NOFFKE N, CHRISTIAN D, WACEY D, et al. Microbially induced sedimentary structures recording an ancient ecosystem in the ca. 3.48 billion-year-old Dresser Formation, Pilbara, Western Australia[J]. *Astrobiology*, 2013, 13(12): 1103-1124.
- [79] RUFF S W, FARMER J D. Silica deposits on Mars with features resembling hot spring biosignatures at El Tatio in Chile[J]. *Nat Commun*, 2016, 7: 13554.
- [80] GEORGIU C D, DEAMER D W. Lipids as universal biomarkers of extraterrestrial life[J]. *Astrobiology*, 2014, 14(6): 541-549.
- [81] MICHALSKI J R, ONSTOTT T C, MOJZSIS S J, et al. The Martian subsurface as a potential window into the origin of life[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(1): 21-26.
- [82] D'HONDT S, SPIVACK A J, POCKALNY R, et al. Subseafloor sedimentary life in the South Pacific Gyre[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(28): 11651-11656.
- [83] GREENWOOD J P, BLAKE R E. Evidence for an acidic ocean on Mars from phosphorus geochemistry of Martian soils and rocks[J]. *Geology*, 2006, 34(11): 953.
- [84] MICHALSKI J R, DOBREA E Z N, NILES P B, et al. Ancient hydrothermal seafloor deposits in Eridania basin on Mars[J]. *Nat Commun*, 2017, 8: 15978.
- [85] PARKER T J, GORSLINE D S, SAUNDERS R S, et al. Coastal geomorphology of the Martian northern plains[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(E6): 20-29.
- [86] CLIFFORD S, 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.
- [87] IVANOV M A, ERKELING G, HIESINGER H, et al. Topography of the deuterionilus contact on Mars: evidence for an ancient water/mud ocean and long-wavelength topographic readjustments[J]. *Planetary and Space Science*, 2017, 144: 49-70.
- [88] GOUDGE T A, MUSTARD J F, HEAD J W, et al. Constraints on the history of open - basin lakes on Mars from the composition and timing of volcanic resurfacing[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, 117(E12): 34-39.
- [89] GOUDGE T A, AURELI K L, HEAD J W, et al. Classification and analysis of candidate impact crater-hosted closed-basin lakes on Mars[J]. *Icarus*, 2015, 260: 346-367.
- [90] ZHAO J, XIAO L, GLOTCH T D. Paleolakes in the northwest hellas region, Mars: implications for the regional geologic history and paleoclimate[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, 125(3): 10-17.
- [91] HUANG T, WANG R, XIAO L, et al. Dalangtan Playa (Qaidam Basin, NW China): its microbial life and physicochemical characteristics and their astrobiological implications[J]. *PLoS One*, 2018, 13(8): e0200949.
- [92] RICE M, BELL III J C, CLOUTIS E, et al. Silica-rich deposits and

- hydrated minerals at Gusev Crater, Mars: vis-NIR spectral characterization and regional mapping[J]. *Icarus*, 2010, 205(2): 375-395.
- [93] RUFF S W, CAMPBELL K A, VAN KRANENDONK M J, et al. The case for ancient hot springs in gusev crater, Mars[J]. *Astrobiology*, 2019, 19(12): 1-25.
- [94] VANIMAN D, BISH D, MING D, et al. Mineralogy of a mudstone at yellowknife bay, gale crater, Mars[J]. *Science*, 2014, 343(6169): 1243480.
- [95] GROTZINGER J P, GUPTA S, MALIN M C, et al. Deposition, exhumation, and paleoclimate of an ancient lake deposit, gale crater, Mars[J]. *Science*, 2015, 350(6257): aac7575.
- [96] FAWDON P, GUPTA S, DAVIS J M, et al. The Hypanis Valles delta: the last highstand of a sea on early Mars?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 500: 225-241.
- [97] GRANT J A, GOLOMBEK M P, WILSON S A, et al. The science process for selecting the landing site for the 2020 Mars rover[J]. *Planetary and Space Science*, 2018, 164: 106-126.
- [98] MELLON M T, SIZEMORE H G. The history of ground ice at Jezero Crater Mars and other past, present, and future landing sites[J]. *Icarus*, 2021, 19: 220-229.
- [99] IRWIN R P, LEWIS K W, HOWARD A D, et al. Paleohydrology of Eberswalde crater, Mars[J]. *Geomorphology*, 2015, 240: 83-101.
- [100] MANGOLD N, KITE E S, KLEINHANS M G, et al. The origin and timing of fluvial activity at Eberswalde crater, Mars[J]. *Icarus*, 2012, 220(2): 530-551.
- [101] MORGAN A, WILSON S, HOWARD A, et al. Global distribution of alluvial fans and deltas on Mars[C]//Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference. [S. l.]: Lunar and Planetary Science Conference, 2018.
- [102] DI ACHILLE G, HYNEK B M. Ancient ocean on Mars supported by global distribution of deltas and valleys[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(7): 459-63.
- [103] MANGOLD N, GUPTA S, GASNAULT O, et al. Perseverance rover reveals an ancient delta-lake system and flood deposits at Jezero crater, Mars[J]. *Science*, 2021: eabl4051.
- [104] TEECE B L, GEORGE S C, DJOKIC T, et al. Biomolecules from Fossilized Hot Spring Sinters: implications for the search for Life on Mars[J]. *Astrobiology*, 2020, 20(4): 537-551.
- [105] DES MARAIS D J, WALTER M R. Terrestrial hot spring systems: introduction[J]. *Astrobiology*, 2019, 19(12): 1419-1432.
- [106] MELLON M T, ARVIDSON R E, SIZEMORE H G, et al. Ground ice at the Phoenix landing site: stability state and origin[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, 114(E1): 12-19.
- [107] MORGAN G A, PUTZIG N E, PERRY M R, et al. Availability of subsurface water-ice resources in the northern mid-latitudes of Mars[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5(3): 230-236.
- [108] OROSEI R, LAURO S E, PETTINELLI E, et al. Radar evidence of subglacial liquid water on Mars[J]. *Science*, 2018, 361(6401): 490-493.
- [109] FOX M, GOREN L, MAY D A, et al. Inversion of fluvial channels for paleorock uplift rates in Taiwan[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2014, 119(9): 1853-1875.
- [110] L VELL R J, DATTA S. Lava tubes and basaltic caves as astrobiological targets on Earth and Mars: a review[J]. *Planetary and Space Science*, 2010, 58(4): 592-598.
- [111] CUSHING G E, TITUS T N, WYNNE J J, et al. THEMIS observes possible cave skylights on Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(17): 20-26.
- [112] CARTER J, LOIZEAU D, MANGOLD N, et al. Widespread surface weathering on early Mars: a case for a warmer and wetter climate[J]. *Icarus*, 2015, 248: 373-382.
- [113] WESTALL F, BRACK A. The Importance of water for life[J]. *Space Science Reviews*, 2018, 214(2): 29-38.
- [114] AMEND J P, TESKE A. Expanding frontiers in deep subsurface microbiology[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 219(1-2): 131-155.
- [115] ONSTOTT T C, EHLMANN B L, SAPERS H, et al. Paleo-Rock-Hosted life on Earth and the search on Mars: a review and strategy for exploration[J]. *Astrobiology*, 2019, 12: 39-46.
- [116] TARNAS J D, MUSTARD J F, SHERWOOD LOLLAR B, et al. Radiolytic H<sub>2</sub> production on Noachian Mars: implications for habitability and atmospheric warming[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 502: 133-145.
- [117] 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.
- [118] LEWIS K W, PETERS S, GONTER K, et al. A surface gravity traverse on Mars indicates low bedrock density at Gale crater[J]. *Science*, 2019, 363(6426): 535-537.
- [119] SHERWOOD LOLLAR B, VOGLESONGER K, LIN L H, et al. Hydrogeologic controls on episodic H<sub>2</sub> release from precambrian fractured rocks--energy for deep subsurface life on earth and Mars[J]. *Astrobiology*, 2007, 7(6): 971-986.
- [120] L VELL R. A half-century of terrestrial analog studies: from craters on the Moon to searching for life on Mars[J]. *Planetary and Space Science*, 2010, 58(4): 631-638.
- [121] CABROL N A, GRIN E A. Distribution, classification, and ages of Martian impact crater lakes[J]. *Icarus*, 1999, 142(1): 160-172.
- [122] FASSETT C I, HEAD J W. The timing of martian valley network activity: constraints from buffered crater counting[J]. *Icarus*, 2008, 195(1): 61-89.
- [123] MART N-TORRES F J, ZORZANO M-P, VALENT N-SERRANO P, et al. Transient liquid water and water activity at Gale crater on Mars[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8: 357-361.
- [124] DICKINSON W W, ROSEN M R. Antarctic permafrost: an analogue for water and diagenetic minerals on Mars[J]. *Geology*, 2003, 31(3): 199-202.
- [125] NAVARRO-GONZ LEZ R, RAINEY F A, MOLINA P, et al. Mars-like soils in the Atacama Desert, Chile, and the dry limit of microbial life[J]. *Science*, 2003, 302(5647): 1018-1021.
- [126] XIAO L, WANG J, DANG Y, et al. A new terrestrial analogue site for Mars research: the qaidam basin, tibetan plateau (NW China)[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 164: 84-101.
- [127] BROWN A J, HOOK S J, BALDRIDGE A M, et al. Hydrothermal formation of Clay-Carbonate alteration assemblages in the Nili Fossae region of Mars[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 297(1-2): 174-182.
- [128] AMILS R, FERN NDEZ - REMOLAR D. Rio tinto: an extreme acidic environmental model of astrobiological interest[J]. *Extremophiles as Astrobiological Models*, 2020: 21-44.
- [129] FERN NDEZ-REMOLAR D C, PRIETO-BALLESTEROS O, G MEZ-ORT Z D, et al. Río Tinto sedimentary mineral assemblages: a terrestrial perspective that suggests some formation pathways of phyllosilicates on Mars[J]. *Icarus*, 2011, 211(1): 114-138.

- [130] AZUA-BUSTOS A, FAIR N A G, GONZ LEZ-SILVA C, et al. Dark microbiome and extremely low organics in Atacama fossil delta unveil Mars life detection limits[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 808.
- [131] CHENG Z, FERN NDEZ-REMOLAR D, GARC A-VILLADANGOS M, et al. The salar grande hyperarid salts of the atacama desert (Chile), an analog of the Mars chloride-bearing deposits in terra sirenium[C]//Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference. [S. l.]: Lunar and Planetary Science Conference, 2015.
- [132] WENTWORTH S J, GIBSON E K, VELBEL M A, et al. Antarctic Dry Valleys and indigenous weathering in Mars meteorites: implications for water and life on Mars[J]. *Icarus*, 2005, 174(2): 383-395.
- [133] 刘洋, 吴兴, 刘正豪, 等. 火星的地质演化 and 宜居环境研究进展[J]. *地球与行星物理理论评*, 2021, 52(4): 416-436.  
LIU Y, WU X, LIU Z H, et al. Geological evolution and habitable environment of Mars: Progress and prospects[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2021, 52(4): 416-436.
- [134] 林杨挺. 探索火星环境和生命[J]. *自然杂志*, 2016, 38(1): 1-7.  
LIN Y T. Exploration of paleoclimate and possible life on Mars[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2016, 38(1): 1-7.
- [135] 赵宇娟, 周迪圣, 李雄耀, 等. 国际火星探测科学目标演变与未来展望[J]. *科学通报*, 2020, 65(23): 2439-2453.  
ZHAO Y Y, ZHOU D S, LI X Y, et al. The evolution of scientific goals for Mars exploration and future prospects[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(23): 2439-2453.
- [136] 欧阳自远, 肖福根. 火星探测的主要科学问题[J]. *航天器环境工程*, 2011, 28(3): 205-217.  
OUYANG Z Y, XIAO F G. Major scientific issues involved in Mars exploration[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2011, 28(3): 205-217.
- [137] BAKER V R. Geomorphological evidence for water on Mars[J]. *Elements*, 2006, 2(3): 139-143.

作者简介:

史语桐(1997-), 博士研究生, 主要研究方向: 行星地质学研究。

通信地址: 武汉市洪山区鲁磨路 388 号, 中国地质大学(武汉)地球科学学院(430074)

Email: ytshi@cug.edu.cn

肖龙(1963-), 男, 教授, 主要研究方向: 行星地质学与比较行星学。

本文通信作者。

通信地址: 武汉市洪山区鲁磨路 388 号, 中国地质大学(武汉)地球科学学院(430074)

E-mail: longxiao@cug.edu.cn

## Evolution of the Martian Geological Environment and Exploration of Habitability of Mars

SHI Yutong<sup>1</sup>, ZHAO Jiannan<sup>1</sup>, ZHANG Mingjie<sup>2</sup>, HUANG Ting<sup>3</sup>, SUN Yanrun<sup>1</sup>, XIAO Long<sup>1</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Planetary Geology and Deep-Space Exploration, Planetary Science Institute, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China)

**Abstract:** Search for life on Mars requires an understanding of the evolution history of Mars geological environment and its impact on the formation and preservation of life. In this paper, the latest research achievements in the history of Mars geological evolution were summarized, the history and progress of life exploration on Mars were reviewed, and shows that there was once a large amount of liquid water activity on the surface of Mars, groundwater and hot spring activities are also present. There are a variety of hydro-genic landforms and minerals, with the necessary elements to form life. The search for traces of life on Mars should focus on areas of long-term water activity, including ancient oceans, lakes, deltas, groundwater and hydrothermal activity regions, as well as cave interiors that could provide habitable environments. The present Martian environment is very harsh for the formation and preservation of life. The surface of Mars is subjected to intense radiation and the future exploration of life on Mars should pay attention to the deep sedimentary strata and caves. The microbial population on Mars may be scarce; collecting samples from right sites and bringing them to Earth and using the state-of-art technology on Earth to search for possible traces of life on Mars is the best option.

**Keywords:** Mars; habitable environments; life signal; sample return

**Highlights:**

- This paper summarized the latest research results on the geological evolution of Mars and their astrobiological significance, and reviewed the history of life exploration on Mars.
- This paper considers the accurate identification of Martian habitable environments and the analysis of Mars-returned samples as the key directions to promote the detection of potential life traces on Mars.
- In the identification of habitable environments, we proposed that studies of the subsurface of Mars should be strengthened, especially where liquid water activity used to be.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]