科学通报 2020 年 第 65 卷 第 23 期: 2439 ~ 2453
评 述
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

国际火星探测科学目标演变与未来展望

赵宇鹏[1,2*], 周迪圣[1,3], 李雄耀[1,2], 刘建忠[1,2], 王世杰[1], 欧阳自远[1]

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

* 联系人, E-mail: zhaoyuyan@mail.gyig.ac.cn

2019-10-16 收稿, 2020-03-23 修回, 2020-03-24 接受, 2020-03-24 网络版发表
国家自然科学基金(41673072, 41931077)、中国科学院战略性先导科技专项(XDB41000000, XDA15011800)、青海省科技计划创新平台建设专项(2018-ZJ-T10)、中国科学院"西部青年学者"项目和中国科学院青年创新促进会优秀会员项目资助

摘要 火星探测是当前太阳系探测和行星科学的焦点. 经过近60年的发展, 火星成为除地球外, 探测和研究程度最高的太阳系行星体, 派生出火星空间环境、火星大气、火星表层/次表层物质组成、形貌构造、撞击历史、冰川和冰冻层、气候变化、火星内部结构等多个研究领域. 火星陨石研究和实验室模拟研究(实验模拟、数值模拟等)也得以快速发展. 火星的重大科学发现包含早期和现代的水活动证据、地质环境多样性、现代地质过程监测、甲烷和有机物的发现、大气组成和演化、当前和近期气候变化、重力场和表面辐射环境等. 重大科学成果的取得得益于科学目标规划的指引, 也影响着未来科学目标的制订. 通过梳理美国火星探测项目分析组(Mars Exploration Program Analysis Group, MEPAG)近20年火星探测科学目标(生命、气候、地质、载人)的演变, 展现出国际火星探测思路及未来探测重点. 未来10年的火星探测将进一步认知火星内部结构、开启火星生命探测的新阶段和开展火星和火星卫星样品返回. 中国开展的火星探测任务也将为国际火星科学发展做出贡献. 当前火星仍有诸多重大科学问题未有解答, 这些问题与太阳系的重大科学问题紧密融合, 突显出火星探测在太阳系形成演化以及太阳系行星宜居性的形成演化研究中不可替代的重要地位.

关键词 火星, 火星探测进展, 关键科学问题, 采样返回

火星探测是当前太阳系探测和行星科学的焦点. 国际火星探测已有近60年的发展历史, 探测方式从飞越到环绕遥感探测, 再到无人着陆器/火星车就位探测, 积累了大量科学数据. 目前, 火星已成为除地球外, 探测和研究程度最高的太阳系行星体, 派生出火星空间环境、火星大气、火星表层/次表层物质组成、形貌构造、撞击历史、冰川和冰冻层、气候变化、火星内部结构等诸多研究领域. 火星陨石研究和实验室模拟研究(实验模拟、数值模拟等)也得以快速发展. 2020年, 中国、美国、阿联酋都计划发射火星探测器. 火星/火卫采样返回和火星载人探测也计划在未来10~20年内实现.

国际火星探测以美国、欧盟为代表, 经历了发展初期(二十世纪六七十年代)、停滞期(20世纪70年代后期~90年代初)和高速发展期(1996年至今). 迄今为止, 世界各国的火星探测任务总计45项(数据来源: https://Mars.nasa.gov/Mars-exploration/missions/historical-log), 其中1996年之前共26项, 成功任务(含部分成功)仅占35%; 1996年至今共19项任务, 成功任务(含部分成功)占比68%, 成功率极大提升. 在探测技术方面, 20世纪

引用格式: 赵宇鹏, 周迪圣, 李雄耀, 等. 国际火星探测科学目标演变与未来展望. 科学通报, 2020, 65: 2439–2453
Zhao Y Y S, Zhou D S, Li X Y, et al. The evolution of scientific goals for Mars exploration and future prospects (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 2439–2453, doi: 10.1360/TB-2019-0638

© 2020《中国科学》杂志社

60~70年代以飞越和拍摄影像为主; 20世纪70~80年代实现了火星着陆但探测数据误差较大; 20世纪90年代, 性能更好、造价更低、寿命更长的探测器陆续抵达火星; 21世纪以来, 大量火星车和轨道器携带多种性能卓越的科学载荷, 全方位开展火星表面探测, 火星科学的深度和广度得到空前发展.

美国于2001年成立了火星探测项目分析组MEPAG. MEPAG附属美国宇航局(NASA), 职责是为未来的火星探测任务确定优先科学目标, 阶段性更新和发布《火星探测科学目标报告》(*Mars Science Goals*, *Objectives*, *Investigations*, *Priorities*, 报告发布http://mepag.jpl.nasa.gov/reports.cfm). 该系列报告是美国乃至国际火星探测科学目标的缩影, 其最大特点是由科学家自下而上提供建议, 形成代表整个学界对火星科学目标优先级的共识, 为火星探测任务遴选、设计和实施提供了重要指导, 也保障了探测任务的延续性和科学产出的最大化. 探测任务所取得的新认识、新成果反过来指导科学目标的更迭, 形成良性循环.

中国计划在2020~2030年间开展首次火星探测和火星采样返回. 在此背景下, 本文梳理了近20年火星探测取得的重大成果、火星探测科学目标的演变、未解决的重大科学问题, 探讨了未来火星探测的突破点和火星采样返回需求, 供对火星探测、采样返回、火星和太阳系行星研究感兴趣的科学家和工程技术人员参考.

1 火星重大科学成果

火星探测的重大科学成果得益于科学目标的指引, 也影响着未来科学目标的制订. 近20年火星科学所获得的重大科学成果可归纳如下.

1.1 火星早期存在液态水

一系列证据表明, 火星表面早期曾存在大量液态水, 极大地提高了生命出现的可能性. 形貌上, 存在大量网状河道(valley networks)[1]和外流河道(outflow channels)[2], 干涸的三角洲(delta)和冲积扇(alluvial fans)地貌[3], 局部山脊顶部还发育有树枝状浅沟谷[4]及撞击坑壁上的小型沟渠[5]等. 火星表面广泛分布多种次生矿物, 包括硫酸盐、层状硅酸盐、含水二氧化硅、碳酸盐、氯盐、氯氧化物、氧化物等[6]. 这些矿物大部分源于水岩反应, 有些则与溶液活动密切相关(如蒸发岩). 总体而言, 层状硅酸盐更多分布在古老的诺亚纪地层, 而较年轻的西方纪和亚马逊纪更多分布硫酸盐和氧化物. 次生矿物的组合和相对含量可能指示着地质时期的气候变化[7]. 在火星车着陆点, 子午线高原(Meridiani Planum)和盖尔撞击坑(Gale Crater)存在水成沉积岩[8,9] . 然而, 火星水的来源和存在时间, 沟谷形成的机理和指示意义目前仍是争论焦点.

1.2 现代水活动

现代火星依然存在水活动, 包括两极冰盖、赤道地区的水(氢)信号和广泛分布的次表层冰. 当前水循环主要以雪和霜为主. 极地冰层是火星表面水的主要储库之一[10]. 在南极冰层下方1.5 km处, 欧洲航天局(简称欧空局)火星快车的星载浅层雷达观测到具有较高相对介电常数(>15)的明亮特征, 解释为冰下湖[11]. 该结论仍需进一步验证. 凤凰号在北极表土中探测到水冰和“下雪(冰晶)”现象[12,13], 指示着扩散作用是控制火星水在土壤盖层、固态冰和大气水之间循环的重要机制. 火星大气垂向上频繁出现水蒸气过饱和证据[14], 有待进一步证实. 中低纬度次表层中检测到水(氢)信号, 可能源于冰或有冰混合的土壤[15]. 在盖尔撞击坑地表的温压条件和相对湿度下, 表层5 cm土壤会在夜间出现短暂的液体水(盐水), 日出后蒸发[16]. 远离极地, 冰仍然可以在土壤颗粒间隙稳定存在, 或以纯冰形式保存在地下[17]. 即使气温在273 K以下, 土壤和冰颗粒表面仍会存在薄层水膜(约几十纳米厚)[18].

1.3 生命探测、甲烷和有机物的发现

火星生命探测经历了“直接探测生命活动证据→火星陨石对生物标志物的研究→跟随水探测生命→探测宜居环境→在宜居环境中探测有机物的种类、分布、成因→寻找生命”的过程. 以火星为代表的类地行星宜居性的形成和演化是当前火星探测研究的前沿[19].

火星直接生命探测始于海盗号(Viking)任务. 海盗号两个着陆器在火星北半球, 利用就位采集的土壤开展了有机物含量的直接测量和3个生物实验, 结果均为阴性[20]. 在对火星表面条件逐渐了解和对实验设计不断反思的基础上, 学界提出了新的生命探测策略[21]. 另一方面, 火星陨石作为目前唯一的火星样品, 在探索火星有机物和生物标志物方面也起着重要作用. 最古老的ALH84001陨石中碳酸盐球粒和磁铁矿颗粒的形态被认为可能源于生物活动[22,23], 这激起火星是否存在生命的激烈争论, 然而仅以矿物形态特征指示生命活

动存在多解性. 坠落陨石Tissint中有机物的碳同位素明显轻于火星大气CO_2和碳酸盐, 可能指示着生物活动[24], 但仍需进一步证实. 火星陨石在快速破碎中释放甲烷, 被认为是支持火星次地表存在宜居环境的重要证明[25]. 目前, 各类火星陨石中是否存在生物标志物是火星陨石研究的重要内容之一.

甲烷的生成机制和对生命及早期气候的指示是当前研究热点[26]. 最早提出火星表面可能存在生物成因的甲烷气体始于2000年[27]. 2003年, 火星大气中的甲烷信号(ppbv量级)被地基望远镜和欧空局的火星快车发现[28]. 2012年美国好奇号火星车(火星科学实验室)抵达盖尔撞击坑后, 开始大气甲烷探测, 但最初并未成功(检测限1.3 ppbv). 之后长达20个月的观测, 好奇号在局部区域检测到甲烷, 且呈现月度波动(平均背景值0.69 ± 0.25 ppbv; 峰值达7.2±2.1 ppbv). 该检测值低于紫外线降解星际尘埃颗粒和碳质球粒陨石组分能生成甲烷的模式含量. 在持续5年的观测之后, 好奇号报道甲烷背景值为0.41±0.16 ppbv且呈现重复性的季节波动(0.24~0.65 ppbv)[29]. 欧空局金星快车探测器检测到大气甲烷含量增高并识别出盖尔撞击坑甲烷的可能来源区域[30]. 欧空局-俄罗斯联合发射的痕量气体轨道器(ExoMars TGO)携带更高灵敏度载荷(检测限0.05 ppbv), 在2018年4~8月, 对南北半球的多个高度进行探测, 均未发现甲烷信号[31]. 综合这一系列的观测数据, 说明火星大气的甲烷来自火星本身, 火星表层或次表层局部区域存在甲烷产生或释放的源头, 低空大气中可能存在未知的甲烷消除机制, 使甲烷无法实现全球均一化. 学界近期组织了多学科研讨会, 梳理火星甲烷的关键问题, 研讨所需开展的测量和技术、理论和方法上的创新[32].

好奇号火星车在盖尔撞击坑的湖相沉积物中通过高温灼烧法检测到有机物的高温(500~820°C)分解产物, 包括噻吩类(C_4H_4S)、芳香族和脂肪族的化合物释放; 噻吩类同时被气相色谱质谱仪检测到[33]. 大约5%的碳以含有机硫的大分子存在, 硫化作用有助于火星有机物的保存. 由于火星表面物质中普遍存在过氧化物、高氯酸盐等物质, 在高温灼烧时会破坏或改变有机物[34], 这也是海盗号生物实验失败的可能原因之一[35]. 因此, 火星有机质探测需要非破坏性的探测方式. 美国2020“毅力号”火星车(Perseverance)搭载SHERLOC载荷, 包含紫外拉曼和紫外激光, 用于扫描微观尺度的矿物和有机物. 欧空局-俄罗斯ExoMars火星车(Rosalind Franklin)将携带“巴斯德套件”, 包含火星有机分子分析仪、红外高光谱显微镜和拉曼激光光谱仪. 这些新载荷将能够开展非破坏性的有机物和宜居环境就位探测.

1.4 地质环境多样性

火星地质环境的多样性逐渐为人所知. 火星表面以玄武岩为主, 但岩石成分组成呈现极大的变化, 硅(SiO_2)从不饱和至饱和, 全碱(Na_2O+K_2O)含量从低到高[36~38]. 火星约三分之二的表面地质年龄为诺亚纪, 该时期存在更多的水, 形成了各种复杂的沉积岩记录[39].

已有的火星着陆点代表着不同环境. 子午线高原(Meridiani Planum)为上百千米尺度的大规模硫酸盐沉积[8]; 古谢夫撞击坑(Gusev Crater)展现了受火山作用影响的水热环境[40]. 盖尔撞击坑的耶洛奈夫湾(Yellowknife Bay)和穆雷沉积建造(Murray Formation)分别代表了河流沉积[41]和湖相沉积[9]. 好奇号火星车通过攀爬夏普山时测量的重力场强度变化, 推算出沉积岩密度为1680±180 kg/m^3, 低于预期, 表明盖尔沉积岩具有高孔隙度, 并以此约束这些沉积岩的最大埋藏深度不超过2600 m[42]. 盖尔撞击坑的沉积岩中发现占某个样品14wt%的鳞石英(一种低压高温矿物)[37], 沿途的岩浆岩样品中发现了富硅和富长石的物质[38], 指示着火星可能存在富硅的火山作用. 凤凰号在火星北极地区检测到中碱性土壤环境, 约3wt%~5wt%的碳酸钙和占总氯含量90%以上的高氯酸盐(0.4wt%~0.6wt%)[43,44], 不同于其他着陆点.

1.5 现代地质过程

轨道器通过对地面目标长期重复成像, 记录了火星正在发生的现代地质过程和与极地季节性相关的过程, 如极地冰盖的盈亏, 冰盖陡坡上的雪崩, 冰盖季节性升华形成的特殊地貌[45]. 陨石撞击仍在继续, 2001~2006年间在21.5×10^6 km^{2}的区域内观察到20次撞击, 形成直径为2~150 m的新撞击坑, 观测速率与理论模拟的预期接近[46]. 撞击坑边壁上新形成或扩展的沟渠, 成因机制尚无定论, 引起激烈争论[47]. 反复出现的斜坡条纹(recurring slope lineae, RSL)是比周围环境更暗的季节性流动条纹, 通常出现在火星赤道地区最温暖的斜坡上. 成因假说包括融雪、潮解盐水、浅层地下水、深层地下水、二氧化碳霜冻、干颗粒崩塌等[48], 但RSL是否代表火星现代液态水活动或出露点,

仍存在较大争议.

火星表面存在大范围风沙活动. 火星沙粒的跳跃迁移其高度和远度是地球沙粒的100倍, 速度是地球沙粒的5~10倍[49]. 火星还存在春季干冰冰盖升华对极地沙丘地貌的改造作用[50]. 除分米级波长的波痕和百米至千米级波长的沙丘形貌外, 火星还存在米级波长的稳定风力驱动地形, 类似地球上水作用形成的流体拖曳波纹[51]. 这类地形只形成于稀薄的大气环境, 有助于制约早期火星的环境演化.

1.6 重力场/内部结构

火星地形具有独特的南北二分性. 南半球大部分地区是密布撞击坑的高地, 壳层厚度约80 km, 存在较强剩磁记录. 北半球大部分地区是低地, 壳层较薄约40 km, 剩磁很少或缺失, 撞击坑掩埋在较年轻的物质下. 南北二分性的成因假说主要包括北部受巨型陨石撞击和核对流等, 但均未能解释所有观测现象[52].

现代火星缺乏全球磁场, 但残留的磁化火星壳年龄集中在诺亚纪, 说明火星核通过发电机效应产生的磁场曾在火星早期出现过[53]. 有研究认为内核发电机由活动到停止的转变仅用了约2000万年[54]; 有假说提出火星内核发电机为单半球发电机[55]. 目前均无定论, 针对火星壳磁场的研究还有待深入.

当前火星并未发现板块运动的证据. 对萨希斯(Tharsis)火山省隆起的研究也支持火星壳为一个单一的构造板块[56]. 将多个轨道器的重力场和地形数据结合, 可提供有关火星形状及地壳厚度的信息, 并推测火星内部结构. 2016年, 美国发布了十几年持续遥感探测数据综合制成的火星重力场地图[57]. 有关火星核的组成、分层、固液态及演化, 已有的认识主要基于实验岩石学和遥感观测, 缺乏直接测量, 存在诸多争议[58].

首个火星地球物理探测器(美国洞察号InSight)已成功开展探测[59], 并发布了首年探测的系列成果. 截至2019年9月, 洞察号已识别出174次火震, 其中150次小震和24次3~4级火震, 说明火星具有地震活跃性[60]. 通过地震仪记录的地震噪声和波散射分析, 洞察号着陆点下方的火星壳最表面的8~11 km已被改造或发生破裂; 地震衰减约为月球的3倍, 表明地壳中应含有少量挥发份[61]. 着陆点表面的磁场呈现每日变化, 指示着120~180 km高度电离层对地面磁场测量的影响; 实测到的地表剩磁比预期的值强10倍, 主要或全部来源于古老的基岩层(约39亿年), 磁化地层上覆约200 m~10 km厚的熔岩流和被改造的古老地形[62]. 洞察号还观测到气辉、暴涨潮(bores)、次声波和类似地球的湍流, 这些新数据扩展了对火星大气的认识[63].

1.7 大气组成和演化

当前火星大气不足地球的1%, 以二氧化碳为主. 二氧化碳在大气和极地冰盖间循环, 致使大气压在正常年份每年有近30%的波动[64]. 好奇号火星车反复测量了火星大气组分和同位素比值. 新获得的大气组成为二氧化碳0.960(±0.007)、氩气0.0193(±0.0001)、氮气0.0189(±0.0003)、氧气1.45(±0.09)×10^{-3}、一氧化碳<1.0×10^{-3}, 修正了自1976年海盗号以来对火星大气组分的认识. $^{40}Ar/^{36}Ar$比值为1.9(±0.3)×10^{3}, 与火星陨石中一致, 为火星陨石源自火星提供了额外支撑. 火星大气富集重的氢、氩和氮同位素支持了火星大气大量损失的假说[65,66], 而大气碳同位素则会受到大气逃逸和碳酸盐沉淀等的影响[67]. 好奇号还测量了盖尔沉积岩中湖相沉积物(35亿年前)中蒙脱石中的D/H比, 结果(较标准平均海水)为3.0(±0.2), 仅为目前火星大气的一半, 但远高于对早期火星的预期[68].

缺失的火星磁场使得太阳风得以直接作用火星大气, 造成大气剥蚀和组分变化, 对火星气候演变有着重要影响. 火星大气层和挥发份演化探测器(MAVEN)观察到行星际日冕物质喷射期间, 大气离子逃逸至太空的速率增加; 火星在早期太阳活动期间的离子损失可能是火星大气长期演变的主要原因之一, 太阳风侵蚀可能是造成火星大气层稀薄的原因[69]. MAVEN观察到跨越北半球大部分地区的低空漫射极光, 向下延伸至60 km高度(1 mbar大气压, 1 mbar=100 Pa), 比迄今确认的任何行星都低, 且与太阳高能粒子爆发吻合[70]. MAVEN还得到$^{38}Ar/^{36}Ar$在均质层顶到逸散层底之间的结构. 目前的探测结果意味着66%的氩气逃逸至太空. 火星大气流失, 可能是促使火星气候急剧转变的原因[71].

除了近地表的尘埃, MAVEN对150~1000 km高空的尘埃进行了观测. 这些尘埃源自星际空间, 而非火星表面. 与实验室结果对比, 尘埃颗粒的尺寸推测为1~12 μm. 这些观测有助于理解内太阳系星际尘埃的来源、汇和运输及其对火星大气层的影响[72].

1.8 现代气候和天气

基于遥感探测所建立的初步火星大气环流模型中,

火星的高扁率环绕轨道(9%)是控制火星气候的一个重要驱动因素[73]. 热红外光谱仪(TES)对3个火星年的大气尘埃、水冰(云)、水汽和温度进行红外测绘, 发现大气的尘埃水平在近日点阶段达到峰值(Ls 180°~360°), 在较冷的远日点阶段下降. 水冰(云)在低纬地区也能观测到. 南半球在近日点期间面向太阳, 在远日点期间背向太阳, 季节变化比北半球强烈得多.

火星尘埃是火星天气的关键影响因素. 火星尘埃对光的散射和吸收是控制天空颜色的主导因素, 因此火星天空往往偏红色, 而夕阳则偏蓝色, 与地球相反. 由于缺乏液态水和岩石循环机制, 被侵蚀的岩石颗粒变得细小且积聚. 从尘卷风到地区性或全球性尘暴, 扬尘风在各种尺度都很常见. 一旦扬起, 尘可在大气中停留数月[74]. 痕量气体轨道器(ExoMars TGO)发现在全球尘暴前大气中重水分子(HDO)在40 km高度低于检测线, 而在尘暴发生几天后, 在40~80 km高度H_2O和HDO分子升高. 这指示着尘暴或许对火星气候存在快速影响, 尘暴加热形成更强烈的大气环流, 促使水蒸气局限在低海拔高度[75].

1.9 近期气候变化

火星的公转轨道、自转轴岁差及自转轴倾角的振荡, 都比地球更大, 是影响火星气候变化的主要因素. 火星自转轴倾角可在15°~35°之间, 甚至0°~60°变化. 在低倾角时, 火星极地寒冷积雪; 在高倾角时, 极地所受太阳辐射高于赤道地区, 积雪会向赤道地区迁移. 火星当前自转轴倾角约为25°. 自转轴倾角变化可回溯到几个百万年前, 更长时间范围则误差加大[76], 目前暂无突破性进展.

美国星载雷达SHARAD发现火星北极冰盖和北半球贝可勒尔撞击坑(Becquerel Crater)中沉积物呈现出明显的气候周期性变化, 指示着沉积环境的变化. 这两种截然不同的沉积物类型说明火星存在短期和长期的气候周期性变化, 时间尺度为0.01~10 Ma[77]. 遥感观测到残存的冰川和广泛分布的近地面冰层和撞击坑边壁上的沟谷(推测为冰雪消融形成)[47], 可能指示着火星目前正处于从一个冰期变暖的情况.

火星极地的层状沉积记录了气候有关的积累和侵蚀过程, 提供了冰进与冰退的气候变化证据. 星载雷达(SHARAD)观测了火星极地约87000 cm^3的冰沉积, 估计大约自37万年前末次冰期结束时开始累积, 总体积相当于全球平均60 cm厚的冰层[78]. 在南极层状沉积物中发现了埋藏的干冰, 体积为9500~12500 m^3, 是之前估算的南极残留冰盖体积的30倍. 这些储存的干冰如果在高自转轴倾角时向大气释放, 大气中二氧化碳将增加80%, 造成更频繁、更强烈的沙尘暴, 使火星表面更多区域的水保持液态[79].

1.10 火星辐射环境

火星表面受到两种主要的辐射轰击——太阳耀斑和银河系宇宙射线. 太阳耀斑是来自太阳的低能量质子, 间歇性爆发, 相对容易屏蔽. 银河系宇宙射线是来自外太阳系的高能原子核, 持续作用且难屏蔽, 会破坏DNA. 火星辐射环境实验(MARIE)发现火星表面的辐射暴露量约为国际空间站的2.5倍, 与计算值一致[80]. 地火间往返旅行将受到的辐射为0.66 ± 0.12 Sv[81]. 好奇号火星车对火星表面的宇宙射线和能量粒子辐射进行了为期300 d的观测, 观测数据有助于评估火星表面是否无菌、幸存生命所需的埋藏深度、对载人登陆可能的潜在危害等[82].

1.11 火星陨石

随着火星就位探测的进展, 所识别出火星陨石数量不断增加. 截至2019年1月, 已确定的火星陨石约有224块, 其中包含一些成对陨石(数据来源Meteoritical Bulletin Database; https://www.lpi.usra.edu/meteor/). 火星陨石现有五类, 其中辉玻无球粒陨石、透辉橄无球粒陨石和纯橄无球粒陨石(合称SNC)占绝大多数, 但都代表着年轻的火山作用(<14亿年)[83]. 虽然对于年轻的SNC陨石能否代表火星整体组成一直存在争论, 但基于SNC陨石建立的火星初始组成模型仍是目前的最佳模型[84]. 另外两类陨石较为特殊且稀少. 一类是斜方辉石岩, 仅1块(ALH84001), 结晶年龄40.9亿年, 相关研究已在前文生命探测部分讨论. 另一类是表土角砾岩(NWA7034及成对陨石; 约10块), 该陨石富含水(约为6000 ppm, 1 ppm=1 mg/kg), 包含不同年龄和不同类型的岩屑, 最早可追溯至44.4亿年[85].

除对火星生命和有机物的研究外, 火星陨石还从多方面制约火星的物质组成和演化, 这包括火星挥发份的来源和演化、关键元素(例如H、S、N、O)在不同储库间的迁移、吸积分异过程、火星表面水活动的证据、火星幔中的水含量和氧逸度、古老火星壳的形成、大气和古气候演化和撞击历史等[86~92].

2 火星科学目标规划及目标演变

2.1 MEPAG目标报告的组织形式

MEPAG《火星探测科学目标报告》自2001年起发布, 并随着探测任务的进展不断更新. 2020年1月最新2020版征求意见稿发布. 因该版本尚未最终定稿, 本文仅在相应目标中简要提及新版征求意见稿与2018正式版的主要区别. 各版报告中的探测目标演化见表S1. 生命、气候和地质3个战略目标及其目标、子目标和调查内容完整表格见表S2.

目标报告的组织形式为: 战略目标→探测目标/子目标→调查内容→测量. “战略目标”不分优先级, 包括生命、气候、地质、载人四大主题. “探测目标”指明了实现战略目标所需的知识和里程碑, 按优先性排列. 2015版开始引入“子目标”, 对“探测目标”的不同方面进行细化说明. “调查内容”是达成“探测目标”所需开展的具体探测内容, 在每个“探测目标”中独立进行优先排序, 即一个探测目标和另一个探测目标中的调查内容优先级不具可比性. “测量”是完成“调查内容”所需的测量手段和方式, 自2008版起从报告中取消, 交由探测任务团队自行决定.

探测目标排序的原则为: (1) 与太阳系探索路线图、美国宇航局、空间科学局及美国国家研究委员会《行星科学十年调查》的高级目标一致; (2) 完成后获取的科学价值; (3) 认知的逻辑顺序; (4) 测量技术的费用/风险/实施可行性. 其中, 优先性并不等同于重要性. 一些非常重要的科学问题, 可能因其他原因具有较低的优先性. 此外, 不需要火星探测器的各类研究, 例如火星陨石、地基望远镜观测、实验或数值模拟等, 不在目标文件的考量范围.

目标报告撰写和修订的最大特点是面向整个火星学界, 由科学家自下而上提供建议. 整个报告的编写和修订包括初稿、讨论、修改、同行评议、最终版. 不同领域的科学家对探测目标和调查内容有不同的优先排序, 报告撰写组需投入大量精力综合意见. 此外, MEPAG还通过邮件、在线会议等方式实时交流信息和机会, 并定期举办会议开展探测目标方面的交流. 这一组织方式的优点在于: 建立起对某一天体研究感兴趣的科学家社群; 使科学家更早地参与探测任务的目标制定; 确保报告内容能最大程度代表整个学界对火星探测前沿的共识, 也保障优选的探测任务和科学载荷能做出重大科学发现. 类似的科学目标规划讨论社群还有针对月球探测(LEAG)、金星探测(VEXAG)和外行星探测(OPAG)等, 这种组织形式值得学习借鉴.

2.2 科学目标的演变

2.2.1 “生命”战略目标

“生命”目标的演化有4个阶段: 探测水环境→寻找宜居环境→评估和描述环境宜居性, 寻找生命证据→筛选高宜居和对生物标志物具有高保存潜力的环境, 寻找生命证据.

2001版的两个首要探测目标是确定火星现在和过去是否存在生命, 调查内容以水的分布和水环境探测为中心.

2005版~2008版, 优先探测目标从直接寻找生命, 转变为可行性更高的“寻找生命存在的必要环境(宜居环境)和必需元素”. 调查内容依然以水为中心, 并探测有机碳及生命必需元素与碳的关联. 评估地表(近地表)环境对生物标志物的保存也作为主要调查内容被提出.

2010版~2014版, 延续并强调了对宜居环境的探测和评估. 优先探测目标为“过去/现在的宜居性和生命存在证据”. 着重筛选过去/现在具有高宜居性的环境, 作为未来就位探测和样品返回的优先着陆点. 本版报告移除了对碳的重点探测. 在这期间, 好奇号和机遇号火星车及多个轨道器都将探测重点转为针对宜居性的调查评估.

2015版~2018版, 继续细化并专注于对宜居性和生物标志物保存具有高潜力的环境探测. 对生物标志物的直接测量优先级低于对宜居环境和标志物保存条件的评估. 删除了“火星长期演化对宜居性环境的影响”这一探测目标. 对宜居性的评估集中在地质背景、水文条件、能量来源、物理化学环境、生命必需元素5个方面. 对早期生物标志物的保存评估, 集中在对复杂有机质、物理结构、环境印记保存潜力的调查; 对现代生物标志物的保存评估, 主要评价各种环境条件和过程的影响, 例如岩石、土壤的物理化学条件, 风蚀、尘暴、霜冻等过程等影响. 对生物标志物的调查内容包括探测有机物、生物成因物理结构、有机结构、矿物结构及新陈代谢证据. 随着非破坏性生命就位探测和火星采样返回任务的实施, 探测生物标志物的优先级定会有所提高.

2020版初稿中, 不再划分“过去生命”和“现有生命”. 重新加入了“评估非生命有机质化学演化”这一目标, 以帮助理解地球生命前有机质的演化和生命起源.

2.2.2 “气候”战略目标

“气候”目标的框架, 从“当前气候和古气候”两部分(2001版~2005版)演变为“当前气候、近期气候、古气候”三部分(2008版至今). 各版中探测目标、子目标、调查内容的表述略有调整, 但基本框架不变. 当前气候主要依靠探测器长期直接测量, 近期气候主要通过气候模型推演, 古气候主要是对地质和挥发份记录的探测解译和气候模型推演. 当前气候由于最易探测, 优先级也最高.

2001版确定了以目标A“当前气候状态和气候过程”和目标B“古气候调查”的基本框架. 2005版, 对目标A、B表述更加具体, 并新增了目标C“描述飞行器安全飞行重要的大气状态和过程”. 目标C实际属于应用目标而非科学目标, 在2008版被移至“载人”目标中. 2001版中目标A的6个调查内容在2005版中仅保留了3个: “控制水、二氧化碳和尘埃分布的过程”、“寻找局部微气候”和“光化学物质”, 其余归入目标B. 目标B古气候包含5个调查内容, 分别为: “当前大气组成”、“大气关键组分的逃逸速率和影响因素”、“大气组分随时间的演化”、“寻找过去气候的物理/化学记录”、“描述各种地质记录所记录的气候变化历史”. 这一调整将现代大气气候和早期大气气候的探测关联起来.

2008版~2014版引入了“轨道参数”指标, 并将“近期气候”作为探测目标, 形成了沿用至今的三元架构, 即目标A:“当前轨道参数下的现代大气、气候和气候过程”; 目标B:“不同轨道参数下的近期气候和气候过程”; 目标C:“早期气候与气候过程”. “近期气候”的提出, 为现代气候向古气候反演过程中长期存在的问题提供了一种解决方案. 目标A中新增了“挥发份和尘埃在地表-大气中的交换及其影响”, 突出了挥发份/尘埃在现代气候中的贡献. 目标C中将“大气关键组分的逃逸速率及影响因素”调至最优先.

2015版新增了子目标, 拓展了探测目标的内涵. 2018版整体沿用了前版内容, 但对目标B和C的子目标和调查内容做了调整, 在充分吸纳了火星极地研究群体的建议后, 新增了“冰川”作为研究对象, 新增了对南极干冰储库的形成过程与形成时间的调查, 强化了极地层状沉积物探测在近期气候反演中的作用和对中低纬度冰和挥发份的调查.

2020版初稿对气候各目标的表述进行了精简, 调整了子目标的优先排序, 删去了“确定关键组分的逃逸速率和制约控制逃逸速率的过程”这一子目标, 但整体内容与2018版没有实质性变化.

2.2.3 “地质”战略目标

“地质”目标的框架最初(2001版)包含“火星表面”和“火星内部”两大部分, 自2008版改为“火星表面”、“火星内部”、“火星卫星”三部分. 对火星卫星的探测从对火卫本身的观测(2008版), 转变为通过火卫研究火星系统的演化过程(2015版至今).

2001版目标A“火星表面”调查包含8项内容, 按优先级依次为: 火星水、沉积过程、撞击记录、岩浆过程、火星表面与大气相互作用、区域的垂向结构和物质组成的区域变化、构造历史、水热过程. 目标B“火星内部”的调查内容有3项: 火星内部参数、磁场演化、化学演化和热演化.

2005版探测目标不变, 但目标A新增了“火星表土层”、“火星壳磁化层”和“评估撞击对火星壳演化的影响”3项调查内容, 水的探测依然是最优先目标. 目标B前3项调查内容和优先级无变化, 新增了对火卫的调查.

2008版~2014版, 目标A“火星表面”调查内容优先级调整, “火星表面的原生和次生矿物以及形成和改造它们的过程”成为最优先目标. 对水的调查由第1降至第8位, “水热环境”由第8位升至第4位. “火卫探测”升级为独立的探测目标(目标C), 包含火卫起源、组成、内部结构3个调查内容.

2015版目标A“火星表面”调查内容去掉了“水热环境”, 新增了“对岩石和露头的描述”、“与冰相关的过程”、“综合制图和专题制图”、“古气候指示物”4项内容. 第一优先的是“确定水和其他过程在沉积循环中的角色”, 强调了对沉积环境的调查. 目标B、C较前版没有变化.

2018版目标A新增了子目标“识别和描述当前正在塑造火星表面的过程”, 反映出对火星现代地质过程的重视, 并将其作为获取近期或早期地质变化的手段. 此外, 明确提出了对火星尘埃的调查. 目标B火星内部的探测子目标分为两项: “评估壳幔相互作用的表现”和“火星吸积、分异和热演化的过程和时间”. 调查内容包括“壳幔挥发份的调查”、“寻找板块运动和变质活动证据”和“火星内部的结构、热力学、热状态、热流、磁场起源和演化”. 明确提出了对“壳幔作用”的调查. 目标C“火卫探测”着重点转变为“确定火卫所记录的火星演化过程”, 从之前只针对火卫的调查转变为对火星-火卫系统的调查. 两个子目标分别为“通过火卫的形成机理, 制约火星形成时周边星子的密度和类型”和“通过

火卫记录, 确定火星周边环境中的物质和撞击通量". 对应的调查内容包括火卫的形成历史、火卫的岩石和表土组成、火卫的内部结构和密度变化的原因、火星与火卫之间的物质交换、理解火星系统撞击体通量.

2020版初稿对目标A"描述保存在火星壳中的地质记录, 并调查其形成和被改造的过程"进行了重新组织, 围绕现有认知缺口进行了重新组织, 但保留了2018版中所有调查内容, 且新增了"硫和碳的演化历史"和"将火星陨石和火星返回样品与火星地质演化相关联"这两项调查内容. 目标B和C未作实质性的调整.

2.2.4 "载人准备"战略目标

"载人准备"属工程目标, 对该目标的表述在2001版中较为模糊, 提出获取火星环境数据、开展就位工程科学论证和为未来任务提供技术设施. 在2005版~2008版中, "可接受的成本、风险和性能"成为明确限制条件, 并提出在"地火转移"、"抵达火星"和"着陆火星"3个阶段中分别进行论证和准备. 2014版整理出了对火星系统认知和潜在载人任务之间存在的战略知识差距(SKG), 并提出填补这些差距的活动(GFA), 是该版的亮点. 2015版~2018版在2014版的基础上, 进一步划分了四阶段载人任务——环绕火星、登陆火星、登陆火卫、火星表面居留及其对应的数据和信息需求. 2020版初稿进一步扩大了关注范围, 将目标重新组织为着陆、巡视、就位资源利用、行星保护和火卫探测5个方面所需的数据和信息需求, 不设优先排序.

2.2.5 跨主题交叉的火星探测策略

火星探测作为理解太阳系形成和演化的基石, 许多科学问题都要求对上述的4个战略目标进行交叉, 形成更高一级的主题. 交叉主题也被看作不同时期火星探测的主导思想. 在2008年之前, 交叉主题为"跟随水". 2008~2014年, 交叉主题扩展为"跟随水"、"理解火星系统"、"寻找宜居环境", 关于水探测的关注度降低, 取而代之的是探索水环境与宜居性之间的关联. 2015年至今, 交叉主题更新为"理解火星系统"、"理解火星宜居性的长期演化"、"火星对比较行星学的启示"和"火星载人探测".

3 火星探测的未来展望

近60年的火星探测不断推进对火星宜居性、气候和地质演化的理解. 我们已经知道火星存在现代和早期的水活动, 火星地质环境和地质过程存在多样性, 火星的岩石和土壤中存在有机质但共存的强氧化剂会干扰有机质检测. 我们对火星大气的组成和演化, 气候和天气的变化, 重力场、磁场和内部结构, 空间辐射环境等诸多方面也有了初步认识. 但仍有诸多重大科学问题亟待深入探索.

MEPAG探测目标的演化表明, 未来火星生命探测将着重于筛选具有高宜居性和对生命/有机质有高保存潜力的环境, 开展非破坏性的生物/有机质检测; 未来的火星气候探测, 将从当前轨道、近期不同轨道和古气候三方面齐头并进; 未来的地质探测将在火星表面、内部和火卫三方面开展, 以理解火星-火卫系统的整体演化.

中国的火星探测与研究, 契机与挑战并存. 国际上已有的探测主要局限在火星表面, 对火星次表层、深部地层和内部结构的认识还相当粗浅; 火星北半球的研究程度较低, 南北二分性的成因、北部低地是否曾经存在海洋、冰川活动历史等, 一直缺乏有效验证; 在生命探测方面, 生命探测优选区的确定、探测的方法/技术/理念、行星保护策略等都亟待发展. 火星返样计划中, 采样区的选择、所需样品类型和采样策略、采样和返样过程中的行星保护等都是亟需探讨的问题.

3.1 未解决的重大科学问题

(1) 火星是否曾支持生命? 导致整个太阳系宜居环境以及生命起源和演变的途径是什么? 火星有机质的分布和来源? 火星是否存在现代栖息地和/或有机生命? 太阳系是否存在地外生命, 如果存在, 它们在哪里, 为什么? 它们的特点是什么, 我们如何发现和确认它们的存在? 如果不存在, 又是为什么? 是环境或化学演化特征限制了生物学潜力, 还是受检测方法的制约? 行星表面和行星内部的水和宜居环境如何随时间变化?

(2) 火星上的气候过程和历史是什么? 气候和大气如何随时间变化? 行星大气如何演化以及它们的构成和动力是什么? 磁场如何影响行星体表面、大气和近空间? 太阳系天体如何与其空间环境相互作用(以及后果是什么)? 地质气候变化的证据和驱动因素是什么? 行星级极端天气事件(例如火星尘暴)的大气演化原因、影响和作用是什么? 火星气候变化对地球的气候变化有何启示? 早期气候与宜居性/生命起源的关联?

(3) 火星作为地质系统如何形成和演化? 行星表面、壳层和内部如何形成和演化? 火星各种地质过程(例如沉积过程、水热过程、岩浆活动、变质过程、地表-大气物质循环)的时间尺度? 火星是否有过板块

运动? 火星的内部结构? 壳/幔/核的形成和演化过程及时间尺度? 大型撞击对火星演化的影响是什么? 早期太阳系过程的时间尺度是什么, 包括吸积和动态演化? 行星体尺寸的限制和从早期岩浆洋中形成和保存斜长岩壳所需的其他因素有哪些限制? 行星如何失去热量? 行星表面的年龄? 太阳系中的哪个地方保留了早期地质记录, 形成该记录的过程是什么?

(4) 如何为载人探火做准备? 人类在月球和火星上探索需要什么? 需要什么样的火星知识才能在可接受成本、风险和性能的前提下设计和实施载人登陆任务和载人居留任务? 大气动力学是否可预测? 人类将如何改变地外行星环境? 火星环境是否存在对地球生命和对未来载人不利的生物危害或化学危害? 如何减低火星表面对人体有害的辐射? 如何降低火星尘埃对人体安全的影响? 火星表面物质中水的赋存状态和特性, 氧的就位分离, 火星表面物质的物理和热物理特性是什么? 火星表面物质用于就位农业的潜力如何? 金属矿床是否可预测或利用?

(5) 类火星天体是否会出现在其他恒星周围的宜居带? 太阳系如何代表行星系统? 太阳系如何帮助我们了解外星系统(类木行星和冰巨星、类地行星、卫星和小型天体)? 如何在太阳系中寻找生命, 为寻找宇宙中其他地方的宜居性和生命证据提供信息?

3.2 未来展望

3.2.1 火星内部探测

美国洞察号是首个针对火星内部结构探测的着陆器. 洞察号携带3个核心实验, 分别是火星内部结构地震实验(SEIS), 用于探测火震和陨石撞击活动并探测火星内部结构; 热流和物理属性包(HP^3), 用于测量从地面至5 m深度的地面温度/梯度、热导率和物理属性; 自转和内部结构实验(RISE), 进行亚分米级精确追踪的行星自传大地测量. 两个辅助子系统"辅助有效载荷传感器套件(风和空气温度传感器、压力传感器和磁力计)"和"仪器部署系统(机器人手臂、中分辨率彩色摄像机和广角彩色相机)", 还可额外监测地面气象和着陆器周围数据和探测磁场. 目前, 除HP^3探针仍在尝试使其向地下推进外, 其他载荷运转良好并已发表了探测首年系列成果[60~63].

中国2020火星任务所携带的雷达(在轨和地面)和磁强计(在轨和地面)将深化对火星内部结构和火星圈层与演化的认识.

3.2.2 生命探测的新理念

当前, 地外生命探测思路着重于环境宜居性, 主要着眼于环境因素的时空动态演化, 但并未与生命直接关联, 对生物标志物的探索存在局限性. 天体生物学界提出了"生命与环境的耦合演化"探测新思路[93]. 这一探测框架一方面延续了环境因素对生命宜居性的影响, 另一方面则强调了生命对(宜居)环境的改造. 仅强调宜居环境, 实际是将生命作为一个被动体, 在环境提供的水、能量、营养源、碳源、各种非生物和生物过程的庇护下得以生存. 而协同演化的理念, 则更加强调了生命作为宜居环境塑造的主动力量, 将生物圈、大气圈、水圈、土壤圈作为一个不断发展的系统紧密耦合. 同时考虑生命和环境, 以及两者如何改造彼此. 这一新理念要求从协同演化的角度更新已有的研究思路、理论、假说、科学问题等; 在生物标志物的探测各个层面加入生态系统的观点, 包括时空尺度、光谱分辨率、环绕到地面的检测限、着陆点选择和探测策略; 获取与过去和现有的火星微生物栖息地相关的、不同尺度的高分辨率环境变化信息. 探索协同演化可以从3个方面操作: (1) 研究多极端环境中的循环和反馈机制; (2) 超越不确定性阈值, 即从可能的生物标志物到确定生物标志物; (3) 超越生物标志物的探索——着陆点选择和地面作业的生态系统方法[94].

此外, 新近成立的"不可知生物标志物实验室(LAB)"正在研发"不可知"生命检测方法, 即打破现有的主要依赖于识别与人类生命相关的特征和生物过程特征, 检测可能独立于地球生命以外的生命形式[95]. 正在建设中的生命测试手段包括: (1) 化学复杂性. 利用已有的火星车载荷寻找不太可能或不能自发形成的任何类型分子的化学复杂性, 建立各种非生物和生物样本的结构和复杂性之间的相关性, 构建复杂性指数数据库. (2) 化学计量学. 利用测序方法探索样品复杂性, 无论该生命是否基于核酸. (3) 不平衡氧化还原化学. 代谢活跃的生物体会保持与环境的化学不平衡, 这些不平衡可以被检测到并作为活性代谢的指示剂. (4) 化学分馏. 活细胞的元素和同位素组成普遍不同于它们的局部环境, 总体组成远离化学平衡, 因此生物的复杂性可以提炼成一种可观察的现象——在地球化学上与局部环境存在明显差异的亚稳态实体. (5) 数据分析的概率方法. 基于概率模型考虑期望和可能性并建立生命检测临界阈值的数据解释方案.

基于对地球生命的理解, 地外宜居性/宜居环境需

要满足4个必要条件, 即液态水、支持新陈代谢的能量来源、适宜生存的物理化学环境和组成生命的必需元素(C、H、O、S、N、P)和其他微量元素等. 其中, 能量源的分布和密度非常重要, 将决定生物量、空间分布和生物有机体的大小[27]. 另一方面, 用于合成有机质的还原性组分来源也十分重要, 例如水热环境下蛇纹石化释放的氢气可以与CO_2反应生成有机物[96].

火星生命探测和采样返回、载人探火所面临的一个重要挑战来自“行星保护”. 行星保护是指采用有效措施, 避免或尽可能降低地球与其他天体之间可能出现的生物和有机物交叉污染[97]. 对火星而言, 前往火星的无人探测器需要严格避免地球生物向火星的输送. 此外, 一旦实施载人探火, 人体携带的有机物和微生物是否会污染火星, 致使火星生命探测的可靠性失效? 因此, 有学者建议应该重新定义行星保护, 并在火星表面设立“天体生物学优先探测区”(APEX区域), 在载人任务之前优先解决火星是否存在生命的问题[98]. 另一方面, 火星样品返回计划中, 需要假设火星样品中存在地外生命, 返回样品的储存和处理需要执行最严格的行星保护策略, 有效保护地球的生态系统不受潜在的外来生命侵害.

3.2.3 火星-火卫系统采样返回

多年来, 火星采样返回一直是国际火星科学界的重大目标, 但碍于技术和成本原因一再推迟. 2018年4月美国和欧盟签署了联合火星采样返回的合作协议, 并于2019年7月公布了采样返回的具体计划. 整个计划跨度12年, 包含3次发射任务. 首先, 2020年7月美国毅力号火星车发射, 负责沿途采集样品, 并将封好的样品管留在地面上. 2026年7月第二次发射, 包含一个搭载上升火箭的着陆器(NASA研发)和一辆样品收集火星车(ESA研发), 2028年降落在毅力号火星车附近. 新抵达的火星车负责将采集好的样品管收集并送至上升火箭. 如果届时毅力号仍在运行, 也将帮助运送样品. 搭载返样罐的上升火箭于2029年春季从火星表面发射, 到达火星低空环绕轨道. 2026年10月第3次发射, 将样品返回轨道器(ESA研发)送抵火星轨道并于2028年7月前逐渐降低至合适高度. 一旦返回轨道器捕获火星样品罐, 将于2031年地火转移窗口把火星样品送回地球. 装载火星样品的返回模块最终于2032年春季着陆地球.

针对即将开启的火星返样任务, 美国和欧盟科学家及工程团队组成了“国际火星样品返回目标与样品定义小组”(iMOST). 目标是重新评估和更新火星采样返回活动中与样品相关的科学和工程目标, 并定义能满足目标的最佳测量和样品类型. 该小组基于MEPAG过去20年的优先科学目标, 于2018年8月发布了《火星样品返回的潜在科学和工程价值报告》(http://mepag.jpl.nasa.gov/reports.cfm), 提出了火星样品返回的7大科学目标. 这些目标包括地质环境、生命探测、地质年代学、挥发份、行星尺度地质、环境危害、就位资源利用. 所需返回的样品类型和关键测试需求见表S3. iMOST还提出确保采样量和样品质量, 构建采样点地质背景, 尽量选择具有地质多样性样品, 尽可能地减少杂散磁场对样品的影响, 采集火星大气样品等多个建议. 针对样品返回的讨论还将持续; 样品返回后火星新科学目标的讨论已提上日程. 采样返回无疑将前所未有地推进和深化火星科学研究. 中国也计划于2030年前开展火星样品返回任务.

针对火星卫星的采样返回任务也提上日程. 日本与法国、德国、美国合作, 计划于2024年开展“火星卫星探测任务”, 对火卫一和火卫二开展近距离遥感探测并从其中一个卫星(尚未确定)返回大于10 g样品. 作为火星系统的重要组成, 对火卫撞击历史的研究将有助于理解火星-火卫体系所经历的撞击通量和演化历史; 火卫样品的返回, 也使检验火卫起源成为可能. 探测器将携带中子和伽马射线光谱仪(MEGANE)、环火星尘埃检测器(CMDM)、质谱分析仪(MSA)、近红外光谱仪(MacrOmega)、激光雷达(LIDAR)、光学辐射计(OROCHI)和望远镜窄角摄像机(TENGOO)对火卫开展全面探测.

3.2.4 中国火星探测与研究

中国首次火星探测任务将携带先进载荷开展火星北半球的就位巡视探测以及在轨和地面相互验证的观测, 这些努力将极大提升对火星全球特别是北半球形成和演化历史的综合理解. 中国火星任务还可能在火星次表层结构和物理特征、火星壳剩磁的局部与全球特征、火山作用和冰川活动历史等方面取得突破. 返回的火星样品, 结合火星陨石分析、模拟实验和模拟样品分析、数值模拟等研究, 将深化对火星表面和内部物质组成和地质过程的认识, 并约束关键事件发生和持续时间.

中国的火星研究着眼于火星宜居性的形成和演化. 在太阳系各天体中, 火星是地外最可能曾经宜居的可探测天体, 为地球生命的产生和宜居环境的形成提供了重要参照. 火星宜居性的研究可以以水和挥发份为

线索. 火星水和挥发份贯穿了潜在生命形式和有机质的演化, 大气与气候演化, 影响宜居环境的全球和局部的地质过程(包括火星内部过程), 还将为未来载人探火的就位资源利用(水、氧气等)提供支持.

纵观国际火星科学的发展, 未来火星研究的突破点在于“建立关联”, 这包括但不限于: (1) 宜居环境与有机质/生物标志物/生命演化的关联; (2) 水活动与宜居性的关联; (3) 古地质记录与古大气/气候变化的关联; (4) 现代大气气候与早期大气气候的关联; (5) 局部/区域地质环境变化与全球性过程和地质演化的关联; (6) 火星返样、火星陨石、模拟样品和模拟实验、火星类比区等研究与火星实际过程的关联.

致谢 感谢两位审稿人提出的建设性意见, 帮助完善和丰富了本文的讨论. 感谢美国路易斯安那州立大学的Suniti Karunatillake教授对英文摘要润色修改提供的帮助.

参考文献

1 Morgan G A, Campbell B A, Carter L M, et al. 3D reconstruction of the source and scale of buried young flood channels on Mars. Science, 2013, 340: 607–610
2 Seybold H J, Kite E, Kirchner J W. Branching geometry of valley networks on Mars and earth and its implications for early martian climate. Sci Adv, 2018, 4: eaar6692
3 Malin M C, Edgett K S. Evidence for persistent flow and aqueous sedimentation on early Mars. Science, 2003, 302: 1931–1934
4 Mangold N, Quantin C, Ansan V, et al. Evidence for precipitation on Mars from dendritic valleys in the Valles Marineris area. Science, 2004, 305: 78–81
5 Christensen P R. Formation of recent martian gullies through melting of extensive water-rich snow deposits. Nature, 2003, 422: 45–48
6 Ehlmann B L, Edwards C S. Mineralogy of the martian surface. Annu Rev Earth Planet Sci, 2014, 42: 291–315
7 Bibring J P, Langevin Y, Mustard J F, et al. Global mineralogical and aqueous Mars history derived from Omega/Mars Express data. Science, 2006, 312: 400–404
8 Arvidson R E, Squyres S W, Bell J F, et al. Ancient aqueous environments at Endeavour Crater, Mars. Science, 2014, 343: 1248097
9 Grotzinger J P, Gupta S, Malin M C, et al. Deposition, exhumation, and paleoclimate of an ancient lake deposit, Gale Crater, Mars. Science, 2015, 350: aac7575
10 Zuber M T, Phillips R J, Andrews-Hanna J C, et al. Density of Mars' south polar layered deposits. Science, 2007, 317: 1718–1719
11 Orosei R, Lauro S E, Pettinelli E, et al. Radar evidence of subglacial liquid water on Mars. Science, 2018, 361: 490–493
12 Smith P H, Tamppari L K, Arvidson R E, et al. H_2O at the Phoenix landing site. Science, 2009, 325: 58–61
13 Whiteway J A, Komguem L, Dickinson C, et al. Mars water-ice clouds and precipitation. Science, 2009, 325: 68–70
14 Maltagliati L, Montmessin F, Fedorova A, et al. Evidence of water vapor in excess of saturation in the atmosphere of Mars. Science, 2011, 333: 1868–1871
15 Bandfield J L. High-resolution subsurface water-ice distributions on Mars. Nature, 2007, 447: 64–67
16 Martín-Torres F J, Zorzano M P, Valentín-Serrano P, et al. Transient liquid water and water activity at Gale Crater on Mars. Nat Geosci, 2015, 8: 357–361
17 Byrne S, Dundas C M, Kennedy M R, et al. Distribution of mid-latitude ground ice on Mars from new impact craters. Science, 2009, 325: 1674–1676
18 Boxe C S, Hand K P, Nealson K H, et al. Adsorbed water and thin liquid films on Mars. Int J Astrobiol, 2012, 11: 169–175
19 Ehlmann B L, Anderson F S, Andrews-Hanna J, et al. The sustainability of habitability on terrestrial planets: Insights, questions, and needed measurements from Mars for understanding the evolution of earth-like worlds. J Geophys Res Planets, 2016, 121: 1927–1961
20 Klein H P. The Viking mission and the search for life on Mars. Rev Geophys, 1979, 17: 1655–1662
21 Schulze-Makuch D, Rummel J D, Benner S A, et al. Nearly forty years after viking: Are we ready for a new life-detection mission? Astrobiology, 2015, 15: 413–419
22 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. Science, 1996, 273: 924–930
23 Thomas-Keprta K L, Clemett S J, Bazylinski D A, et al. Truncated hexa-octahedral magnetite crystals in ALH84001: Presumptive biosignatures. Proc Natl Acad Sci USA, 2001, 98: 2164–2169
24 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. Meteorit Planet Sci, 2014, 49: 2201–2218

25 Blamey N J F, Parnell J, McMahon S, et al. Evidence for methane in Martian meteorites. Nat Commun, 2015, 6: 7399
26 Kite E S, Gao P, Goldblatt C, et al. Methane bursts as a trigger for intermittent lake-forming climates on post-Noachian Mars. Nat Geosci, 2017, 10: 737–740
27 Weiss B P, Yung Y L, Nealson K H. Atmospheric energy for subsurface life on Mars? Proc Natl Acad Sci USA, 2000, 97: 1395–1399
28 Mumma M J, Villanueva G L, Novak R E, et al. Strong release of methane on Mars in northern summer 2003. Science, 2009, 323: 1041–1045
29 Webster C R, Mahaffy P R, Atreya S K, et al. Background levels of methane in Mars' atmosphere show strong seasonal variations. Science, 2018, 360: 1093–1096
30 Giuranna M, Viscardy S, Daerden F, et al. Independent confirmation of a methane spike on Mars and a source region east of Gale Crater. Nat Geosci, 2019, 12: 326–332
31 Korablev O, Vandaele A C, Montmessin F, et al. No detection of methane on Mars from early ExoMars trace gas orbiter observations. Nature, 2019, 568: 517–520
32 Yung Y L, Chen P, Nealson K, et al. Methane on Mars and habitability: Challenges and responses. Astrobiology, 2018, 18: 1221–1242
33 Eigenbrode J L, Summons R E, Steele A, et al. Organic matter preserved in 3-billion-year-old mudstones at Gale Crater, Mars. Science, 2018, 360: 1096–1101
34 Freissinet C, Glavin D P, Mahaffy P R, et al. Organic molecules in the sheepbed mudstone, Gale Crater, Mars. J Geophys Res Planets, 2015, 120: 495–514
35 ten Kate I L. Organics on Mars? Astrobiology, 2010, 10: 589–603
36 McSween H Y, Taylor G J, Wyatt M B. Elemental composition of the Martian crust. Science, 2009, 324: 736–739
37 Morris R V, Vaniman D T, Blake D F, et al. Silicic volcanism on Mars evidenced by tridymite in high-SiO_2 sedimentary rock at Gale Crater. Proc Natl Acad Sci USA, 2016, 113: 7071–7076
38 Sautter V, Toplis M J, Wiens R C, et al. *In situ* evidence for continental crust on early Mars. Nat Geosci, 2015, 8: 605–609
39 Grotzinger J P, Milliken R E. The sedimentary rock record of Mars: Distribution, origins, and global stratigraphy sedimentary geology of Mars. In: Grotzinger J P, Milliken R E, eds. Sedimentary Geology of Mars. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 2012, 102. 1–48
40 Squyres S W. The Spirit Rover's Athena science investigation at Gusev Crater, Mars. Science, 2004, 305: 794–799
41 Grotzinger J P, Sumner D Y, Kah L C, et al. A habitable fluvio-lacustrine environment at Yellowknife Bay, Gale Crater, Mars. Science, 2014, 343: 1242777
42 Lewis K W, Peters S, Gonter K, et al. A surface gravity traverse on Mars indicates low bedrock density at Gale Crater. Science, 2019, 363: 535–537
43 Boynton W V, Ming D W, Kounaves S P, et al. Evidence for calcium carbonate at the Mars Phoenix landing site. Science, 2009, 325: 61–64
44 Hecht M H, Kounaves S P, Quinn R C, et al. Detection of perchlorate and the soluble chemistry of Martian soil at the Phoenix lander site. Science, 2009, 325: 64–67
45 Kieffer H H, Christensen P R, Titus T N. CO_2 jets formed by sublimation beneath translucent slab ice in Mars' seasonal south polar ice cap. Nature, 2006, 442: 793–796
46 Malin M C, Edgett K S, Posiolova L V, et al. Present-day impact cratering rate and contemporary gully activity on Mars. Science, 2006, 314: 1573–1577
47 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. Proc Natl Acad Sci USA, 2008, 105: 13258–13263
48 Abotalib A Z, Heggy E. A deep groundwater origin for recurring slope lineae on Mars. Nat Geosci, 2019, 12: 235–241
49 Almeida M P, Parteli E J R, Andrade J S, et al. Giant saltation on Mars. Proc Natl Acad Sci USA, 2008, 105: 6222–6226
50 Hansen C J, Bourke M, Bridges N T, et al. Seasonal erosion and restoration of Mars' northern polar dunes. Science, 2011, 331: 575–578
51 Lapotre M G A, Ewing R C, Lamb M P, et al. Large wind ripples on Mars: A record of atmospheric evolution. Science, 2016, 353: 55–58
52 Andrews-Hanna J C, Zuber M T, Banerdt W B. The borealis basin and the origin of the Martian crustal dichotomy. Nature, 2008, 453: 1212–1215
53 Connerney J E P, Acuña M H, Wasilewski P J, et al. The global magnetic field of Mars and implications for crustal evolution. Geophys Res Lett, 2001, 28: 4015–4018
54 Lillis R J, Frey H V, Manga M. Rapid decrease in Martian crustal magnetization in the Noachian era: Implications for the dynamo and climate of early Mars. Geophys Res Lett, 2008, L14203
55 Stanley S, Elkins-Tanton L, Zuber M T, et al. Mars' paleomagnetic field as the result of a single-hemisphere dynamo. Science, 2008, 321: 1822–1825
56 Zhong S. Migration of Tharsis volcanism on Mars caused by differential rotation of the lithosphere. Nat Geosci, 2009, 2: 19–23
57 Genova A, Goossens S, Lemoine F G, et al. Seasonal and static gravity field of Mars from MGS, Mars Odyssey and MRO radio science. Icarus, 2016, 272: 228–245
58 Stewart A J, Schmidt M W, van Westrenen W, et al. Mars: A new core-crystallization regime. Science, 2007, 316: 1323–1325

59 Ji J H, Huang X M. Insight probe set out to explore the inner world of Mars (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 6: 2678–2685 [季江徽, 黄秀敏. “洞察号”启程探索火星内部世界. 科学通报, 2018, 63: 2678–2685]

60 Giardini D, Lognonné P, Banerdt W B, et al. The seismicity of Mars. Nat Geosci, 2020, 13: 205–212

61 Lognonné P, Banerdt W B, Pike W T, et al. Constraints on the shallow elastic and anelastic structure of Mars from InSight seismic data. Nat Geosci, 2020, 13: 213–220

62 Johnson C L, Mittelholz A, Langlais B, et al. Crustal and time-varying magnetic fields at the insight landing site on Mars. Nat Geosci, 2020, 13: 199–204

63 Banfield D, Spiga A, Newman C, et al. The atmosphere of Mars as observed by insight. Nat Geosci, 2020, 13: 190–198

64 James P B, Hansen G B, Titus T N. The carbon dioxide cycle. Adv Space Res, 2005, 35: 14–20

65 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. Science, 2013, 341: 263–266

66 McElroy M B, Yung Y L, Nier A O. Isotopic composition of nitrogen: Implications for the past history of Mars’ atmosphere. Science, 1976, 194: 70–72

67 Hu R, Kass D M, Ehlmann B L, et al. Tracing the fate of carbon and the atmospheric evolution of Mars. Nat Commun, 2015, 6: 10003

68 Mahaffy P R, Webster C R, Stern J C, et al. The imprint of atmospheric evolution in the D/H of Hesperian clay minerals on Mars. Science, 2015, 347: 412–414

69 Jakosky B M, Grebowsky J M, Luhmann J G, et al. Maven observations of the response of Mars to an interplanetary coronal mass ejection. Science, 2015, 350: aad0210

70 Schneider N M, Deighan J I, Jain S K, et al. Discovery of diffuse aurora on Mars. Science, 2015, 350: aad0313

71 Jakosky B M, Slipski M, Benna M, et al. Mars’ atmospheric history derived from upper-atmosphere measurements of $^{38}Ar/^{36}Ar$. Science, 2017, 355: 1408–1410

72 Andersson L, Weber T D, Malaspina D, et al. Dust observations at orbital altitudes surrounding Mars. Science, 2015, 350: aad0398

73 Smith M D. Spacecraft observations of the Martian atmosphere. Annu Rev Earth Planet Sci, 2008, 36: 191–219

74 Guzewich S D, Lemmon M, Smith C L, et al. Mars Science Laboratory observations of the 2018/Mars year 34 global dust storm. Geophys Res Lett, 2019, 46: 71–79

75 Vandaele A C, Korablev O, Daerden F, et al. Martian dust storm impact on atmospheric H_2O and D/H observed by ExoMars Trace Gas Orbiter. Nature, 2019, 568: 521–525

76 Laskar J, Correia A C M, Gastineau M, et al. Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars. Icarus, 2004, 170: 343–364

77 Phillips R J, Zuber M T, Smrekar S E, et al. Mars north polar deposits: Stratigraphy, age, and geodynamical response. Science, 2008, 320: 1182–1185

78 Smith I B, Putzig N E, Holt J W, et al. An ice age recorded in the polar deposits of Mars. Science, 2016, 352: 1075–1078

79 Phillips R J, Davis B J, Tanaka K L, et al. Massive CO_2 ice deposits sequestered in the south polar layered deposits of Mars. Science, 2011, 332: 838–841

80 Zeitlin C, Cleghorn T, Cucinotta F, et al. Overview of the Martian radiation environment experiment. Adv Space Res, 2004, 33: 2204–2210

81 Zeitlin C, Hassler D M, Cucinotta F A, et al. Measurements of energetic particle radiation in transit to Mars on the Mars Science Laboratory. Science, 2013, 340: 1080–1084

82 Hassler D M, Zeitlin C, Wimmer-Schweingruber R F, et al. Mars’ surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory’s Curiosity Rover. Science, 2014, 343: 1244797

83 Nyquist L E, Bogard D D, Shih C Y, et al. Ages and geologic histories of Martian meteorites. Space Sci Rev, 2001, 96: 105–164

84 Dreibus G, Wanke H. Mars, a volatile-rich planet. Meteorit, 1985, 20: 367–381

85 Agee C B, Wilson N V, McCubbin F M, et al. Unique meteorite from early Amazonian Mars: Water-rich basaltic breccia Northwest Africa 7034. Science, 2013, 339: 780–785

86 Hu S, Lin Y, Zhang J, et al. Volatiles in the martian crust and mantle: Clues from the NWA 6162 shergottite. Earth Planet Sci Lett, 2020, 530: 115902

87 Shaheen R, Abramian A, Horn J, et al. Detection of oxygen isotopic anomaly in terrestrial atmospheric carbonates and its implications to Mars. Proc Natl Acad Sci USA, 2010, 107: 20213–20218

88 Mezger K, Debaille V, Kleine T. Core formation and mantle differentiation on Mars. Space Sci Rev, 2013, 174: 27–48

89 Tuff J, Wade J, Wood B J. Volcanism on Mars controlled by early oxidation of the upper mantle. Nature, 2013, 498: 342–345

90 Humayun M, Nemchin A, Zanda B, et al. Origin and age of the earliest Martian crust from meteorite NWA 7533. Nature, 2013, 503: 513–516

91 Cassata W S. Meteorite constraints on Martian atmospheric loss and paleoclimate. Earth Planet Sci Lett, 2017, 479: 322–329

92 Moser D E, Arcuri G A, Reinhard D A, et al. Decline of giant impacts on Mars by 4.48 billion years ago and an early opportunity for habitability. Nat Geosci, 2019, 12: 522–527
93 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. An Astrobiology Strategy for the Search for Life in the Universe. Washington DC: The National Academies Press, 2019
94 Cabrol N A, Grin E A, Bishop J L, et al. Chapter 13—Concluding remarks: Bridging strategic knowledge gaps in the search for biosignatures on Mars—A blueprint. In: Cabrol N A, Grin E A, eds. From Habitability to Life on Mars. Amsterdam: Elsevier, 2018. 349–360
95 Johnson S S, Graham H, Anslyn E, et al. Future approaches to life detection on Mars. In: Ninth International Conference on Mars, 2019. Abs #6374
96 Martin W, Russell M J. On the origin of biochemistry at an alkaline hydrothermal vent. Philos Trans R Soc B, 2007, 362: 1887–1926
97 Lin W, Li Y L, Wang G H, et al. Overview and perspectives of Astrobiology (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 380–391 [林巍, 李一良, 王高鸿, 等. 天体生物学研究进展和发展趋势. 科学通报, 2020, 65: 380–391]
98 Fairén A G, Schulze-Makuch D, Whyte L, et al. Planetary protection and the astrobiological exploration of Mars: Proactive steps in moving forward. Adv Space Res, 2019, 63: 1491–1497

补充材料

表S1 MEPAG目标报告中火星科学探测目标的演变
表S2 2001版~2018版MEPAG目标报告探测目标演化对照表
表S3 国际火星样品返回论证组iMOST 2018报告建议返回的火星样品类型及对应的科学目标

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “国际火星探测科学目标演变与未来展望”

The evolution of scientific goals for Mars exploration and future prospects

Yu-Yan Sara Zhao[1,2*], Disheng Zhou[1,3], Xiongyao Li[1,2], Jianzhong Liu[1,2], Shijie Wang[1] & Ziyuan Ouyang[1]

[1] *Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;*
[2] *Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China;*
[3] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
* Corresponding author, E-mail: zhaoyuyan@mail.gyig.ac.cn

Mars is currently in the spotlight of solar system exploration and planetary science study. The scientific questions of Mars are closely integrated with big enigmas of the solar system, highlighting the centrality of Mars in understanding the formation and evolution of our solar system. After nearly six decades of exploration, Mars is easily the most studied planet in the solar system besides Earth, with a profusion of research across space environment, atmosphere, surface-subsurface compositions, topography and structure, impact history, glaciers and cryosphere, climate change, and internal structure. Martian meteorite and laboratory simulation studies (experimental and numerical) are also developing rapidly. Key discoveries in the past 20 years include evidence of past and current aqueous activity, geological environment diversity, modern geological processes, methane emissions and preserved organics, atmospheric composition and evolution, current and recent climate change, gravity fields and surface radiation environments, etc. Such scientific achievements, underpinned by peer-reviewed research goals developed by the planetary community, in turn shape future goals and targets. We review how the Mars exploration goals and targets (e.g., life, climate, geology, preparation for human exploration) have evolved in the past 20 years, and show priorities and focii for future international Mars exploration. For example, the Mars exploration strategy evolved thematically from “follow the water” to “understand Mars as a system”, “understand the long-term evolution of habitability on Mars”, and “exploration by humans on Mars”. In the next 10−20 years, Mars exploration will further characterize the internal structure of Mars, start a new era of life detection, and return samples from Mars and its satellites. China’s first Mars mission will contribute to the international Mars science community with an orbiter and a rover exploring the northern lowlands with advanced payloads. New findings such as the structure of the Martian critical zone (i.e., vertical zone of interaction between the atmosphere and crust with immediate relevance for habitability), local and global characteristics of the residual crustal magnetism, volcanic-geothermal evolution and the cyclicity of glaciations will clarify the still poorly known provenance and evolution of the topographic dichotomy. Hypotheses such as the formation of the global dichotomy by an oblique impact or an ancient ocean-sustaining climate may be tested and constrained. Internationally planned sample-return from Mars and its satellites, combined with study of Martian meteorites, experimental and numerical simulation of Martian processes, and study of terrestrial analog sites and samples will build absolute geochronology of Mars and constrain the timing and duration of critical events, such as cessation of the global magnetic field, quiescence of volcanism across the Noachian-Hesperian temporal boundary, transition to a single-plate planet, aqueous and sedimentary processes, and global climate change.

Mars, progress in Mars exploration, key scientific questions, Mars sample return

doi: 10.1360/TB-2019-0638