

# 21世纪火星探测科学发现 与未来展望

王 琴 时 蓬 范全林

(中国科学院国家空间科学中心空间科学与深空探测规划论证中心 100190)

## 1. 引言

火星,居于太阳系宜居带的三大行星之一,因在晴朗夜空中呈红色而被我国古人称之为荧惑,罗马神话称为战神Mars。从1960年10月10日苏联发射火星1号A卫星开启火星探测(任务失败),整整60年过去了,火星成为人类深空探测折戟次数最多的目标天体——最早期的探测器几乎都失败了,1996年前的26项火星任务中成功(含部分成功)的仅占35%!但是火星探测事业在一次又一次的失败中不断前行。

不同于早期的火星探测器飞掠和拍摄影像,进入21世纪,美国、欧洲发射的多个先进、长寿命的轨道器、着陆器乃至火星车相继成功抵达火星,它们携带的多台套新型有效载荷,获取了关于火星的大量科学数据,使得人们对于曾倍感神秘和挑战的火星有了巨大的认知飞越,也让人们坚信它将是继月球后最有希望载人登陆的地外天体。

实际上,人类开展火星探测的最核心驱动来自内心的“茫茫宇宙中我们是否孤独”这一命题,所以寻找火星生命或生命迹象,或退而求其次找寻生命宜居性条件,关于它们的任何进展都是新世纪火星探测的重大消息。与此同时,人们关于火星大气、火星表层/次表层物质组成、形貌构造、火星空间环

境等的探测与研究也开辟了行星科学的诸多子领域,不断构建了火星迷之拼图的一块又一块新拼板。

2021年2月,当中国、美国和阿联酋的火星探测器先后抵达火星之际,让我们回望新世纪以来人类火星探测的主要重大科学发现,也更有理由期待当下和未来的火星探测的新突破和新认知。

## 2. 火星生命探测

迄今,人类探测器尚未发现火星生命。1976年,美国海盗号(Viking 1/2,两者均由轨道器+着陆器组成)成为第一个成功登陆火星并对火星样品开展生命检测的探测任务,它基于对地球生命新陈代谢活动的认识,设计了气体交换实验、碳-14同位素示踪和碳同化试验等3项生物实验,检测火星是否存在生命。海盗号着陆器生物实验是人类首次也是唯一一次在地外天体上开展的生命探测试验,但三项实验均未获得火星存在生命的确凿证据。海盗号任务的两个轨道器累计拍摄了5万多幅火星照片,覆盖率达火星表面积97%,也没有发现任何高级生命痕迹<sup>①②</sup>。

另一方面,基于火星陨石的生物标志物研究也在开展。1996年8月时任美国总统克林顿曾就ALH84001陨石可能含有疑似火星微生物的遗迹召

基金项目:中国科学院空间科学(二期)先导专项综合论证课题项目(Y7291A1AGS);先导专项预研项目(XDA15010000);中国科学院重点部署项目(ZDRW-KT-2019-1)

开新闻发布会,轰动世界。尽管相关研究成果在 Science 上发表,但随后就有科学家指出不能排除 ALH84001 受到地球环境的污染可能。有意思的是,正是通过对比 ALH84001 中极微小的气泡与海盗号探测的火星大气成份数据,确定了它是来自火星的陨石,重约 1.9 kg,大约 45 亿岁,因为火星遭遇小行星撞击被抛向太空,因缘际会 1.3 万年前被地球俘获,最终坠落在南极艾伦山(Allan Hills),1984 年 12 月 27 日由美国南极陨石搜寻计划(ANSMET)团队成员罗伯特·斯科尔(Roberta Score)捡到,科学家 1996 年在 ALH84001 陨石中发现了疑似蠕虫化石的微结构(图 1)<sup>③④</sup>。

不过,我国科学家对提森特(Tissint)火星陨石的研究更审慎。该陨石 2011 年 7 月降落在摩洛哥



图1 ALH84001 陨石中发现了疑似蠕虫化石的结构

沙漠,是第5块降落型火星陨石,更是迄今最新鲜的火星陨石样品,受到地球污染的机会很小。科学家利用激光拉曼谱仪和纳米离子探针,对 Tissint 陨石开展了系统的精细测试,发现了陨石中数微米大小的碳颗粒(图 2)。碳的同位素组成是指示含碳物质是否生物成因的关键证据:生物作用一方面会产生明显的同位素分馏,另一方面这种变化会朝向富集轻的碳同位素方向。相对于火星大气的 CO<sub>2</sub> 和火星上的碳酸盐而言, Tissint 陨石中碳颗粒更富集轻的碳同位素,与地球沉积岩中的有机质、煤和石油的碳同位素组成情形非常类似。这也是迄今为止所有报导的火星上可能曾有过生命活动的最有利证据<sup>⑤</sup>。

### 3. 火星生命宜居环境探测

火星现在没有发现任何生命活动的迹象,那过去有吗? 没有火星叔叔马丁,有原始生命吗? 相比直接探测生命活动迹象,研究火星的生命宜居环境可能更简单可行。从最小的细菌到最大的树木,水是生命之源。地球生命最初就是在海洋中形成的,地球生命存在的关键因素是液态水。因此搜寻火星上现存或者过去的液态水,分析火星上过去和现在是否存在适宜生命繁衍的环境条件,成为新世纪以来寻找火星探测与研究的新焦点。

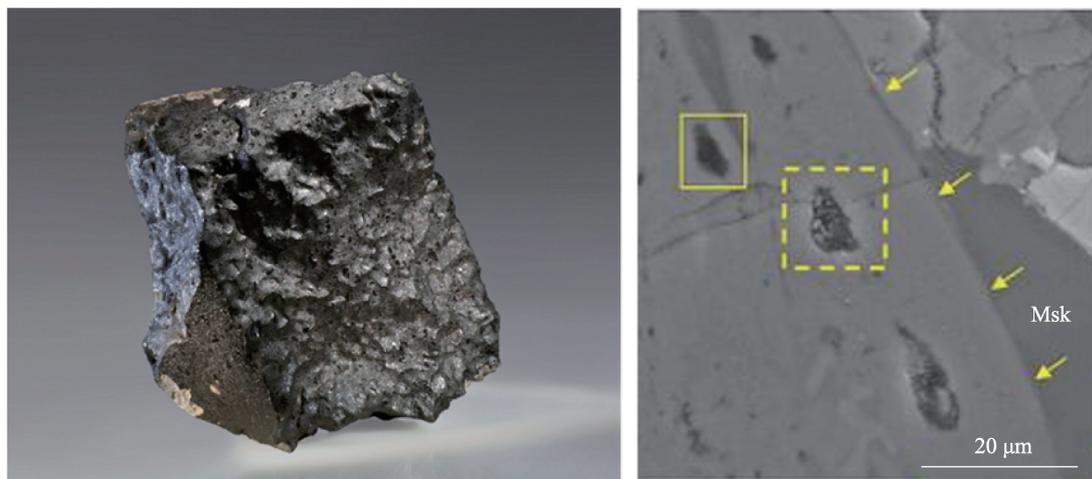


图2 Tissint 火星陨石及有机碳颗粒的电子显微镜照片(右图虚线框所围)

对火星地貌特征的精细观测让人们相信火星表面过去曾存在大量液态水。美国的多个火星轨道器首先发现了火星地表存在大量网状河道和外流河道,干涸的三角洲和冲积扇地貌<sup>⑥</sup>(图3),局部山脊顶部发现了树枝状浅沟及撞击坑壁上的小型沟渠等,表明火星表面早期曾存在大量液态水。

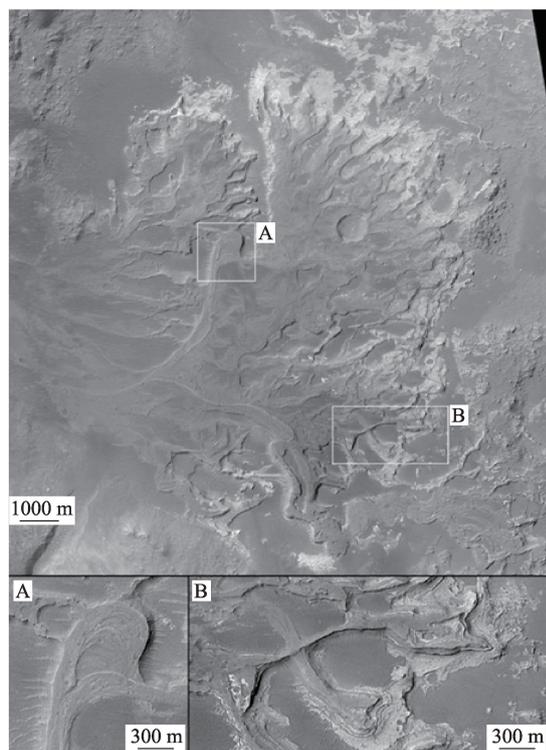


图3 火星全球勘测者号(MGS)的火星轨道相机(MOC)拍摄的霍顿撞击坑东北部的冲积扇地貌

火星表面广泛分布着水成矿物。利用火星车原位勘探和轨道器的红外光谱仪等,人们对火星矿物成分有了新的认识。2004年美国机遇号火星车(Opportunity)在鹰撞击坑(Eagle Crater)发现富含赤铁矿的小球状颗粒,被称为“蓝莓”(图4)<sup>⑦</sup>。欧空局(ESA)火星快车(Mars Express)和美国火星勘测轨道器(MRO)都绘制了全球水成矿物分布图。水成矿物大多发现于南半球,在北半球,熔岩或其他物质已清除了较古老的地质历史(图5)<sup>⑧</sup>。

而随着火星探测的深入,美国科学家断言,数十亿年以前火星盖尔撞击坑(Gale Crater)中的湖泊包含了所有生命所需的要素,其中包括化学要素与能量来源。好奇号火星车在盖尔坑的黄刀湾(Yel-



图4 机遇号发现了富含赤铁矿的蓝莓小颗粒

low knife Bay)发现了壮观的沉积岩(图6)<sup>⑨</sup>,大部分是岩石颗粒细小的泥岩,鹅卵石和细沙遍布,还需要水才能形成的砾岩。钻探发现这里曾经存在一个非常适宜火星微生物生存繁衍的淡水湖,具有多个适合生命存活的特点,如其水体平静,水质pH值呈中性。钻探的岩石样品包含黏土和硫酸盐矿物,说明黄刀湾的静水存在时间很长。湖底沉积物中还发现了碳、氢、氧、硫、氮和磷等丰富的、维持生物生存所需的关键生命元素,理论上可以支持一些简单微生物的生存,但科学家依然没有掌握火星存在远古生命的直接证据。

前述多个间接的火星早期存在水的证据很令人振奋,但真正发现水更是人们梦寐以求的。轨道器率先发现火星两极可能存在水冰。2002年,美国2001火星奥德赛轨道器(2001 Mars Odyssey)利用伽马射线能谱仪器包(GRS)发现极区次表层水冰信号,北极的水冰被冬季的二氧化碳霜层所掩盖(图7)<sup>⑩</sup>,火星上可能广泛存在水的轨道器,后续的轨道器任务都丰富了这一结论。

随后,2008年5月美国凤凰号(Phoenix)着陆器降落在火星的北部高纬度地区。它的机械臂先后挖到了土壤下方的高纯度水冰以及掺杂在土壤中的水冰,并且拍摄了着陆器下方的冰层,还拍摄到

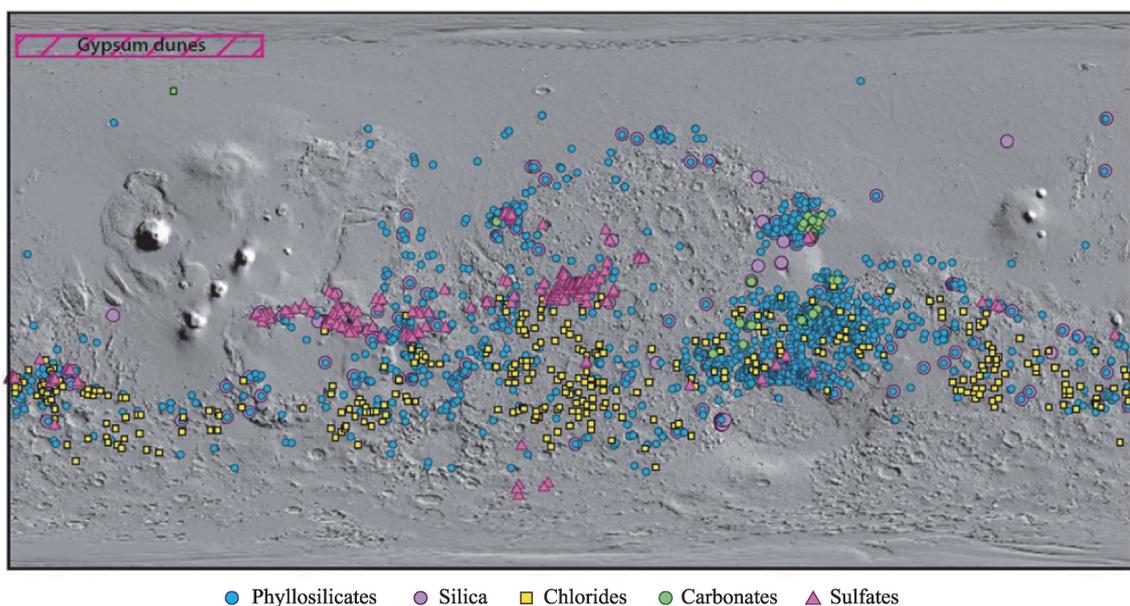


图5 MRO的紧凑型勘测成像光谱仪(CRISM)绘制的火星全球水成矿物分布图。  
蓝色代表黏土,绿色代表碳酸盐,红色为硫酸盐,黄色是氯化物

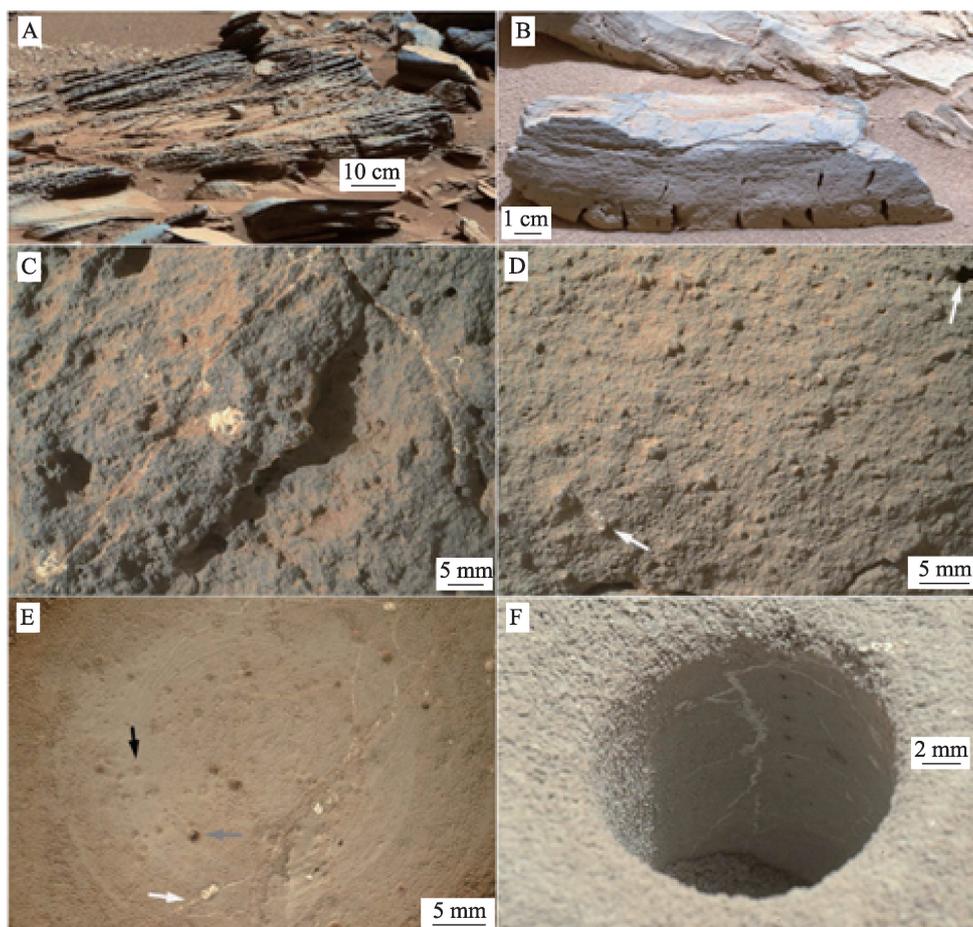


图6 黄刀湾的沉积岩

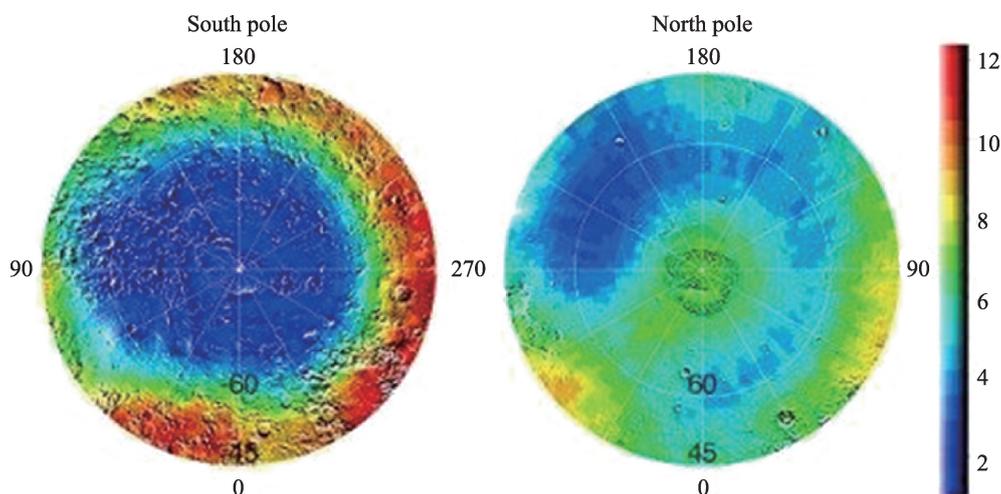


图7 奥德赛在火星高纬度地区发现了富含氢的土壤(深蓝色表示)

了阳光下水冰的升华。直接挖掘到水被认为是凤凰号任务最大的科学成果之一。图8给出了它在第20个与第24个火星日(2008年6月15/19日)分别拍摄的火星第一个人造沟槽“渡渡鸟-金凤花”(Dodo-Goldilocks)中水冰及其升华后的影像<sup>①</sup>,证实了6年前Odyssey伽马射线光谱仪的关于火表水冰冻层的探测结果。当年9月29日凤凰号还探测到来自着陆点上空4000 m的火星云层的降雪,不过降雪在到

达火星表面前已经气化。

长期以来,人们一直怀疑火星极冠下存在液态水但没有观察到。利用欧空局(ESA)火星快车(Mars Express)2012年5月至2015年12月的测地雷达数据,人们发现南极乌尔蒂马断崖群(Ultimi Scopuli)层状沉积物处冰盖下1.5 km处,可能存在一个直径约20 km的冰下湖。湖水寒冷且充满了盐,不太可能成为生命的栖息地。但这无疑增加了科学家对火星发现生命的期许,促使科学家继续探索其他可能更宜居的埋藏水层<sup>②</sup>。

尽管如此,人们尚未确切发现火星表面大规模的液态水流动。虽然2015年从MRO高分辨率照片中发现了火星表面存在一些神秘的“手指状”条痕——“季节性斜坡条纹”(RSL)(图9),它们在温暖的季节出现并得以延伸,在寒冷的季节则会消退。有科学家认为是含盐的液态水参与了这些神秘条痕的

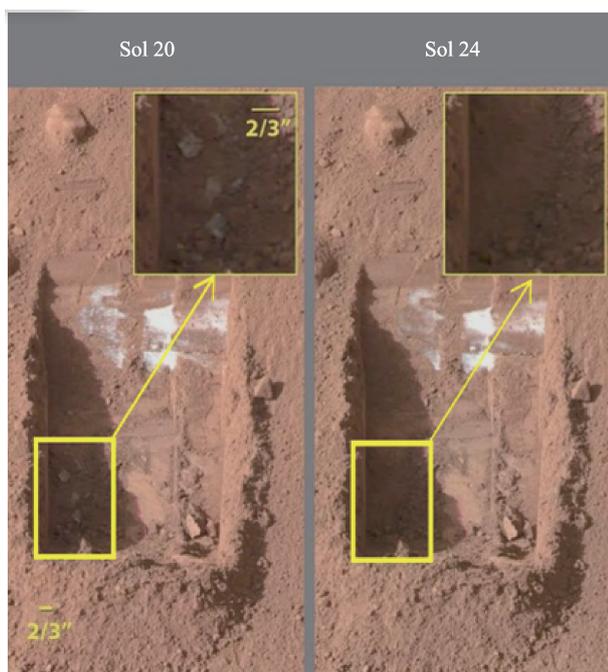


图8 凤凰号在机械臂挖的沟槽中发现骰子般大小的白色水冰块

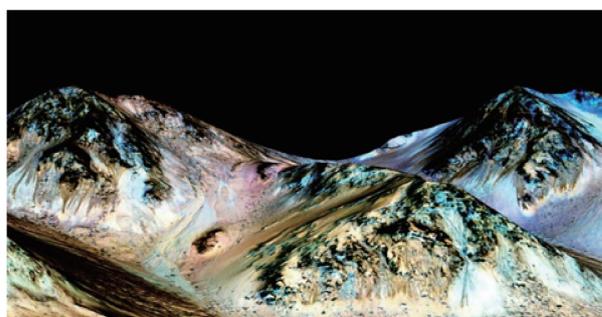


图9 火星表面发现的季节性斜坡条纹

形成<sup>③</sup>。不过也有科学家后来指出,条纹仅仅是重力作用下滑动的沙子或灰尘留下的痕迹,可能根本不是液态水引起的<sup>④</sup>。

## 4. 火星气候探测

探测火星气候及大气没有寻找水与生命迹象那么引人注目,但天气因素却是开展火星演化科学研究,以及着陆、巡视空间探测的不可或缺因素。人们已利用飞越、环绕、着陆及巡视等多种方式,对火星气候开展了全球和局部的观测,获得古代气候、当前气候和气候演化的一定认识。但与空间环境相互作用、关键组分逃逸等诸多科学问题有待继续深化。

### 4.1 当前火星气象观测

火星大气干燥稀薄,组成成分主要为CO<sub>2</sub>(占95%),微量的氮气和氩气等。表面温度较地球低得多,火表引力常数是地球的10.7%,气压约为地球的0.7%,太阳辐射强度约为地球的42%,一个火星年中太阳辐射强度的变化约为19%,反照率随纬度增加而增大。火星大气中含有悬浮尘埃,与太阳辐射、热辐射的相互作用,关系到大气中相关的凝结和蒸发过程,是环境变化的重要因素之一。

轨道器开展全球性天气和大气结构观测,了解不同季节和年份的天气与气候变化机制。MRO任务携带的火星气候探测仪(MCS),持续对压温湿风等气象要素和尘埃开展了连续测量,研究大气层与火表在不同空间和时间尺度的相互作用<sup>⑤</sup>,还将为2030火星采样返回任务(MSR)提供天气服务。

在火星大气层探测到绿色气辉。欧空局2016火星生命探测计划(ExoMars-2016)的天底和掩星探测包(NOMAD),通过掩星/临边侧向(edge-on)探测首次在地球之外的行星周围观测到太阳光辐射带来的气辉(图11)<sup>⑥⑦</sup>。气辉在海拔约80 km高度最强,且随着火星和太阳之间距离的变化而变化,主要是由二氧化碳分解成一氧化碳和氧气驱动的。研究行星气辉有助于了解大气成分和动力学,揭示日光和太阳风的能量沉积过程。

多个着陆器、火星车携带的气象观测站,开展了火表和低层大气动力学、尘暴等的探测。好奇号火星车环境监测站(REMS)获取了小尺度和地表大气界面关键区域数据,扩展了已有的多尺度火星大气数值模型,包括低分辨率(约300 km)全球大气环流模型(GCM),高分辨率有限区域中尺度(约10~100 km)和微观尺度或大涡模拟(LES)模型<sup>⑧</sup>。美国洞察号(InSight)着陆器的辅助有效载荷传感器系统

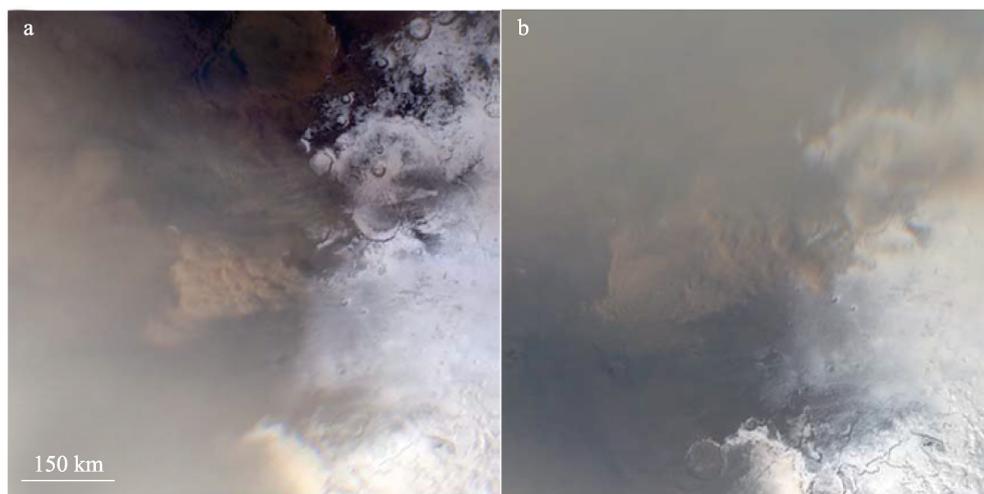


图10 MRO观测到的以64.4°S,62.1°W为中心的局部火星沙尘暴

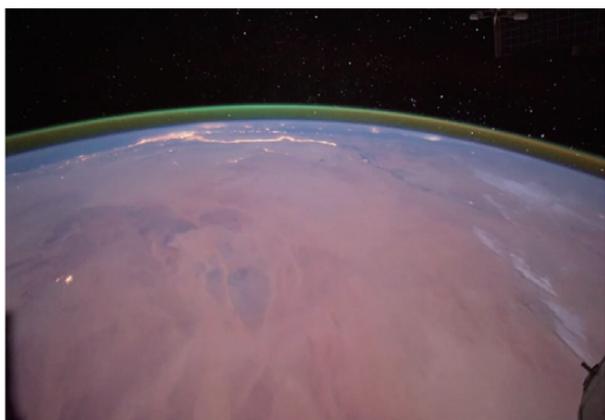


图11 ExoMars-2016首次探测到火星大气中的绿色气辉

(APSS)是第一个能有效连续监测火星压温风参数的气象站<sup>⑩</sup>,已在美国国家航空航天局(NASA)网站发布火星天气预报(图12)。

火星大气的甲烷之谜仍待破解。以甲烷为代表的有机物通常被认为是行星的生命指征,2004年3月火星快车在大气层中发现了含量极低的甲烷,只有大约十亿分之一(ppbv)。好奇号曾经在2013年12月到2014年1月之间测到了大气中甲烷水平的一个峰值,是火星快车报告的10倍,甲烷浓度每天都在变化,盖尔撞击坑甲烷渗漏率约为平均每火星日2.8千克<sup>⑪</sup>。欧空局火星痕量气体轨道器(TGO)绘制了迄今最为详细的火星痕量气体全球分布图,大气中甲烷的浓度不会超过0.05 ppbv,比此前所有

相关探测结果低10~100倍(图13),可以认为甲烷浓度极低<sup>⑫</sup>,尚待进一步探测。

## 4.2 40亿年来火星气候演化

大气逃逸是造成火星气候变化的主要原因。美国火星大气与挥发物演化探测器(MAVEN)发现太阳风暴可能是导致火星大气随时间流失的主因<sup>⑬</sup>;证实火星上的大部分CO<sub>2</sub>已经逃逸到行星际空间,剩余的CO<sub>2</sub>不足以令火星升温使之“地球化”<sup>⑭</sup>(图14)。

沙尘暴引起的升温可能造成了水的逃逸。TGO的天底和掩星光谱仪(NOMAD)和大气化学组件(ACS),首次开展了火星大气的高分辨率太阳掩星测量,持续的沙尘暴引起的升温可能是火星大气中水蒸气急剧增加的原因<sup>⑮</sup>,将有助于理解控制逸散到外太空的氢和氦原子数量的过程,以及火星水存储的演变。TGO的超热中子探测器(FREND)还绘制了首张火星地下水分布图。沙尘暴发生期间水蒸气的迅速增加,符合GCM模型。

流水侵蚀、河流冲击扇和三角洲等地貌特征,水成矿物和盐湖沉积、沉积岩石地层,以及极地冰盖、水蒸气等系列证据,证明火星表面曾经有过大规模的水体活动。但是大气逃逸及气候演化可能带来了水的逃逸,使得火星由40亿年前的蓝色,逐渐变成现在的红色(图15)<sup>⑯</sup>。

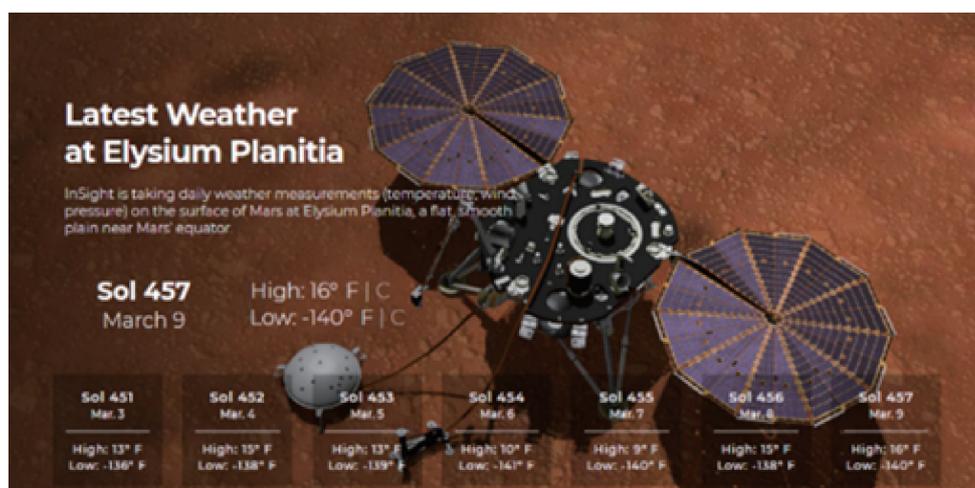


图12 洞察号发布的某段时间火星天气情况

TGO detection attempts, combined with the MSL enriched mode dataset

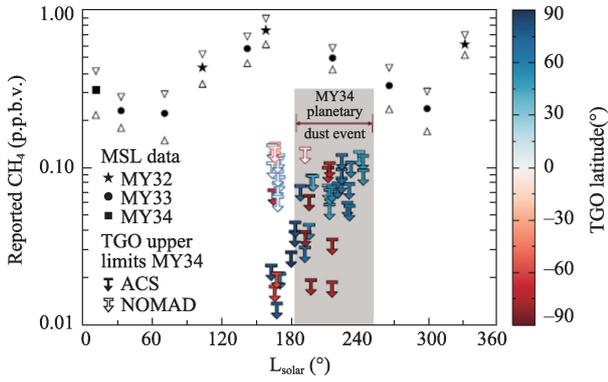


图 13 TGO 与好奇号对甲烷含量的探测对比

## 5. 火星地质环境多样性与演化

科学家已完成火星全球及局部区域的重力场测量、火星空间环境观测,对火表地貌特征与火星内部结构有了一定认识,如地质环境多样,存在小且频繁的火星震。

### 5.1 火表地质环境多样

火星表面以玄武岩为主,约三分之二的表面地质年龄为诺亚纪,形成了多种复杂的沉积岩记录。2014年美国地质调查局(USGS)利用 MGS、Odys-



图 14 MAVEN 揭示火星大气逃逸

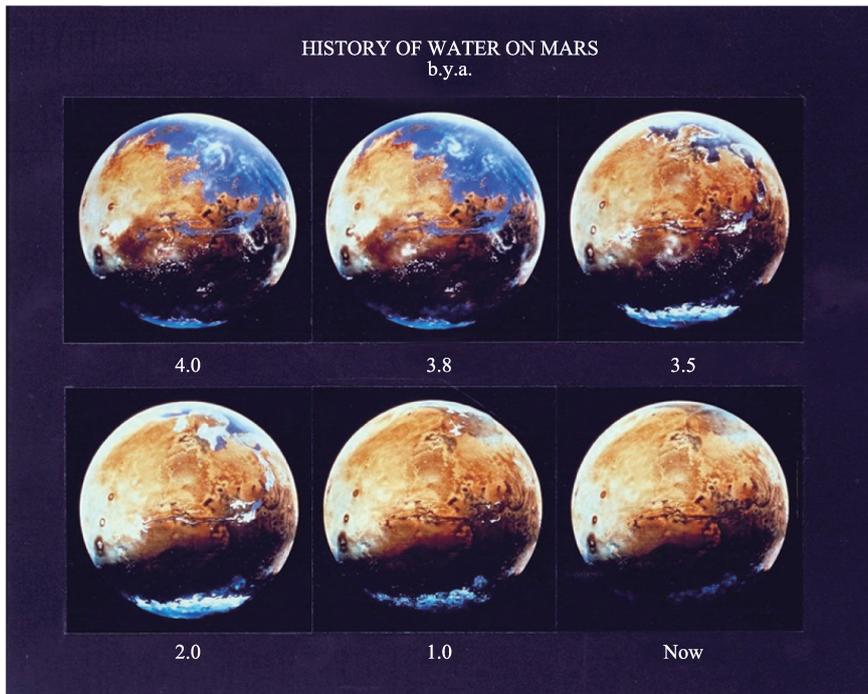


图 15 40 亿年以来火星水演化的想象图

sey、Mars Express 和 MRO 等 4 个火星轨道器长达 16 年的观测数据,绘制了火星地图(图 16),揭示了火星的地质细节<sup>⑳</sup>,岩石成分组成呈现极大的变化。

火星地质环境的探测也为着陆点的优选提供了指导(图 17)。子午线平原(Meridiani Planum)为上百千米尺度的大规模硫酸盐沉积,古谢夫撞击坑(Gusev Crater)展现了受火山作用影响的水热环境,盖尔撞击坑的黄刀湾和默里岩层(Murray Formation)分别代表了河流沉积和湖相沉积。

已测量全球及局域重力场。2016 年,NASA 利用 MGS、Odyssey 和 MRO 等轨道器重力场和地形探测数据,绘制了火星重力场图<sup>㉑</sup>(图 18)。好奇号开展了夏普山区域重力场强度变化的测量,发现盖尔沉积岩具有高孔隙度。

火表主要受到太阳耀斑和银河宇宙射线两种辐射,前者具有间歇性、相对容易屏蔽;而后者持续

且难屏蔽,会破坏生命 DNA 结构等。Odyssey 的火星辐射环境实验(MARIE)载荷,在 400km 环火轨道对太阳耀斑和银河系宇宙射线辐射进行了长期测量<sup>㉒</sup>。好奇号的辐射评估探测器(RAD)也进行了自发射至火表漫游期间的持续观测,发现结果并未超出预期,但需严肃对待。载人登火往返一趟,航天员接受的辐射相当于 20~30 次全身 CT 扫描。这些监测数据有助于评估火表宜居性、载人登火的潜在辐射伤害等<sup>㉓</sup>。

## 5.2 火星震小且频繁

首个火星地球物理探测器揭示火震此起彼伏<sup>㉔</sup>。InSight 是人类首个火星内部结构探测任务,已工作 2 年,内部结构地震实验(SEIS)装置已发现超过 450 个火震信号,最大烈度约为 4.0 级,尚不足以揭示火星内部结构特点(图 19)。

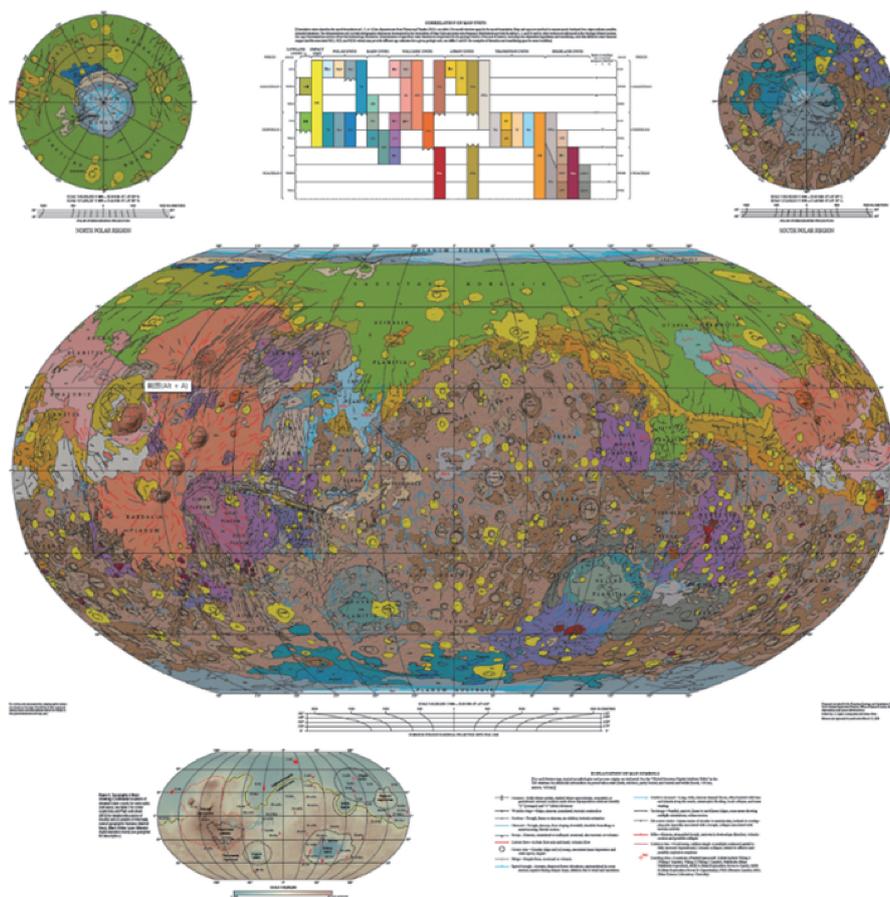


图 16 火星全球地质图

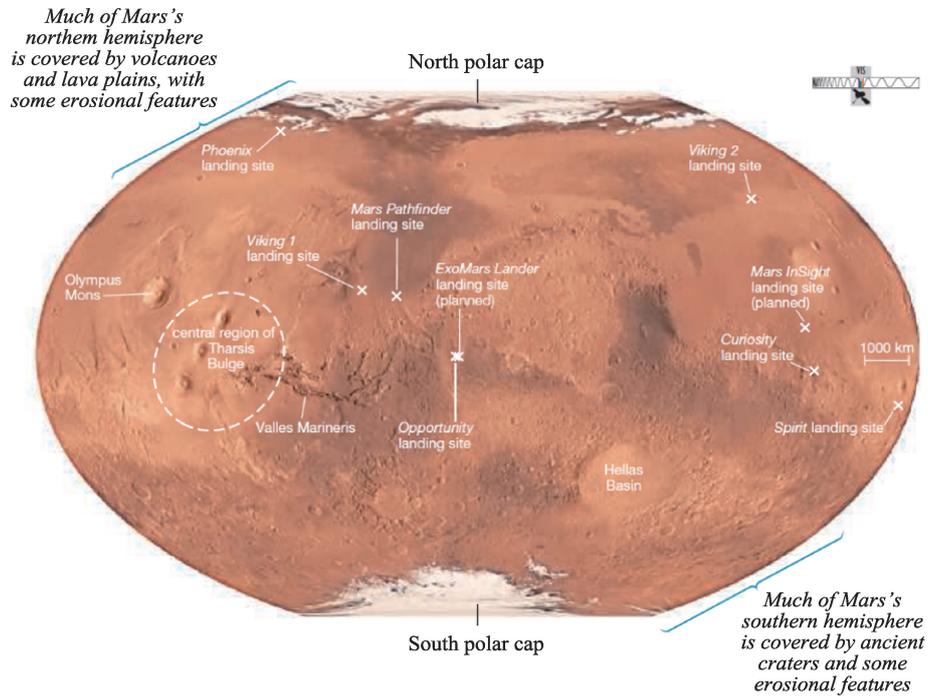


图17 着陆点位置示意图,底图是MGS绘制的地形图

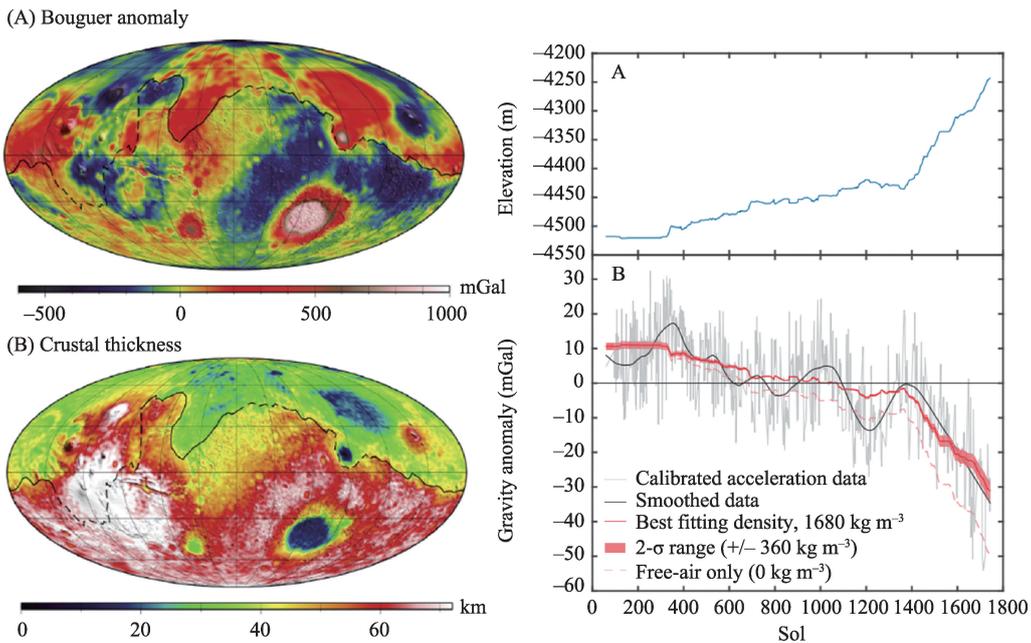


图18 火星全球重力场及局域重力场细微变化

火星早期曾经出现磁场和目前仍有奇特磁场脉动。根据 MAVEN 探测结果,科学家们在 42 亿至 43 亿年前的火星岩石中发现了古老的磁场特征<sup>⑧</sup>。In-Sight 的磁强计记录到了着陆区较强磁场,发现

Homestead hollow 浅环形山的磁场信号比 MAVEN 卫星的反演值高 10 倍<sup>⑨</sup>,推测是火星局部地壳下至数千米的深度有强磁化的古老岩石,磁场大小随昼夜时间变化波动的原因则可能与太阳风、行星际磁

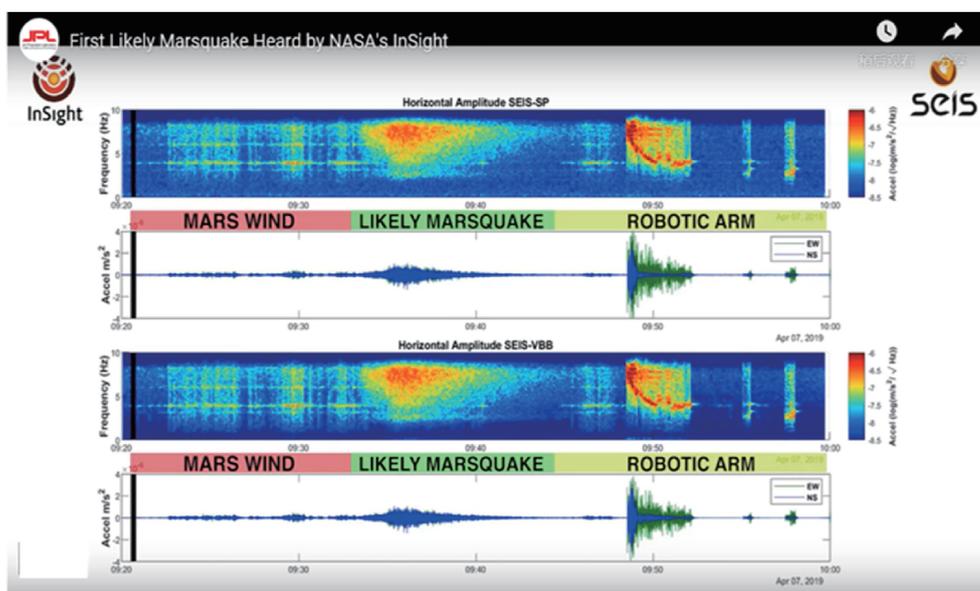


图19 InSight首次探测到火星地震信号

场和火星大气的相互作用有关,而时变场对研究火星的深电导率结构非常有用,因为它与火星内部温度有关(图20)。

## 6. 诸多火星未解之谜期冀当下及未来任务破解

当前有8个在役任务正对火星开展探测,其中

环火轨道器6个,分别是美国的Odyssey、MRO、MAVEN,ESA的Mars Express、TGO,以及印度的曼加里安火星轨道器(MOM),以及火星着陆器1个InSight,火星车1辆Curiosity。

新一波探测浪潮已拉开帷幕。2021年中国牛年春节过后,天问一号(火星车+着陆器+轨道器)、美国的火星2020任务(毅力号火星车),以及阿联酋的希望号轨道器(Hope Mars)也将加入火星探测全家

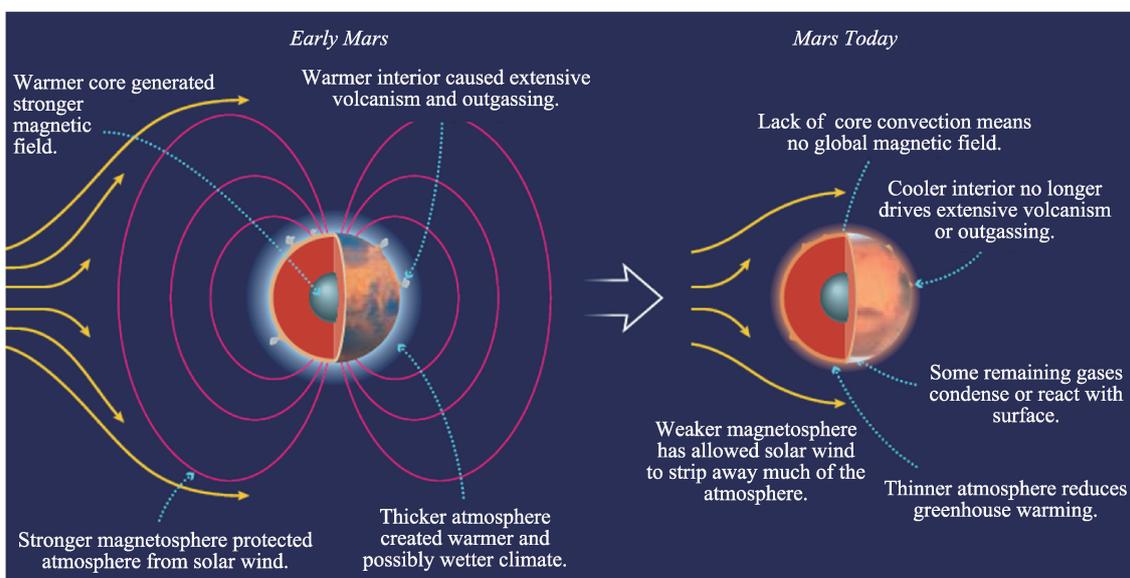


图20 火星早期及现在的磁场示意图

福中。欧俄联合的探索火星生命 2020 任务(ExoMars 2020 火星车+着陆器),因为技术和庚子新冠疫情双重影响推迟至 2022 年。

天问一号迈出了我国行星探测的第一步,在国际上首次通过一次发射任务,实现火星环绕、着陆、巡视探测(图 21)<sup>①</sup>,将成为世界上第二个独立掌握火星着陆巡视探测技术的国家。天问一号肩负五大科学使命,通过环火探测和火表巡视,揭示:①火星形貌与地质构造特征;②火星表面土壤特征与水冰分布;③火星表面物质组成;④火星大气电离层及表面气候与环境特征;⑤火星物理场与内部结构<sup>②</sup>。

天问一号共搭载 13 台科学载荷:7 台配置在轨道器上,分别是中分辨率相机、高分辨率相机、次表层探测雷达、火星矿物光谱探测仪、火星磁强计、火星离子与中性粒子分析仪、火星能量粒子分析仪;6 台配置在火星车上,分别是地形相机、多光谱相机、次表层探测雷达、火星表面成分探测仪、火星表面磁场探测仪、火星气象测量仪<sup>③</sup>。它们将回答地外生命起源、类地行星气候演化和地质环境与过程等重大科学前沿问题(详见表 1 天问一号栏)。

ExoMars 2022 任务包括“罗莎琳德·富兰克林”号火星车及“哥萨克”号着陆器,其中 ESA 负责火星

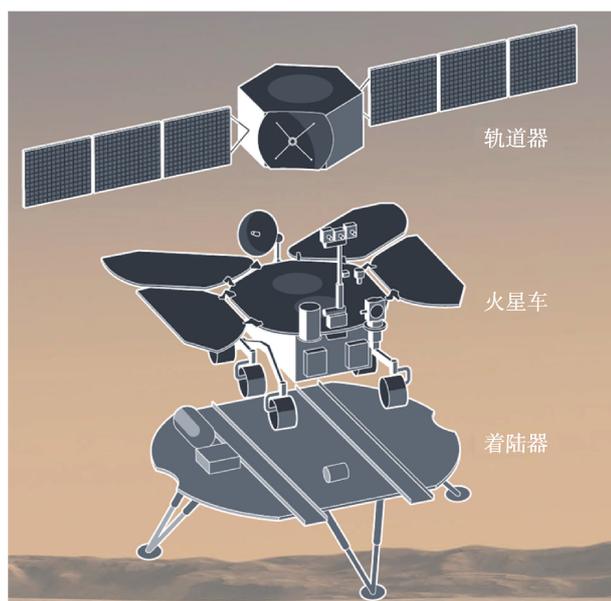


图 21 天问一号由轨道器、火星车和着陆器组成

车研制和着陆器 GNC 部分设备,俄罗斯联邦航天局(Roscosmos)提供着陆器大部分的硬件设备。罗莎琳德·富兰克林(R.E.Franklin)是 1950 年发现 DNA 分子结构的英国女科学家。ExoMars 2022 的核心科学目标是研究火星气候、大气和辐射,钻取火星表面 2 m 以下原始土壤的样本寻找生命迹象。

未来十年的重点是火星采样返回,它对于认知类地行星起源和生命宜居性、奠定未来载人登火基础,具有重大意义<sup>④</sup>。NASA 的 2030 火星采样返回(MSR)任务将历时十年分步实施;JAXA 的火星卫星探测任务(MMX)计划于 2024 年发射,2029 年实现火卫一样品返回地球。

MSR 任务在美国科学院发布的《2013—2022 年行星科学十年规划与展望》报告中被列为最优先的旗舰任务。2020 年已升空的毅力号是该任务的首场,此外 2026 年还将实施 2 次地球发射,2028 年实施 1 次火星发射,2031 年将约 600 g 火星样品返回地球。任务包括“采集样品、收集样管、火轨交接、返回地球”等 4 个关键步骤(图 22),MSR 任务由美国主导,ESA 参加。

MMX 任务基于 JAXA“隼鸟号”和“隼鸟二号”小行星探测和采样返回任务,将对火卫一(Phobos)和火卫二(Deimos)开展近距离遥感和就位探测,并从火卫一采样返回,提供火星起源与演化新视角。上述各任务关注的主要科学前沿对比详见表 1<sup>⑤</sup>。

人类火星探测事业 60 年弹指一挥间。遥远而陌生的火星,突然开始变得熟悉而可知,但了解越多,人们对火星生命及宜居性的的好奇心越强烈<sup>⑥</sup>。像懂得地球一样认知火星,我们对太阳系和生命起源与演化的看法都有可能发生重大改观(图 23)。除了火星表面的一道道车辙,人们更渴望能看到第一个地球人的脚印。21 世纪还有 4/5 的光景,随着一代又一代航天人乘风破浪,这些空间科学和探索的梦想终将成真。

#### 参考文献

- ① Levin G V, Straat P A. Viking labeled release biology experiment: interim results[J]. Science, 1976, 194: 1322-1329.

表1 在途及规划火星探测任务关注的主要科学前沿

科学问题演化	未来主要前沿	毅力号	天问一号	希望号	ExoMars 2022	MSR	MMX
生命—— 直接探测生命迹象 →寻找生命宜居环境的 核心要素水 →筛选高宜居环境	A1 古宜居环境 A2 寻找生物标志物 A3 当前宜居环境 A4 火星的水和宜居 环境的演化	1.1 检测岩石和风化层是否 存在有机物-超级相机 1.2 探测火星环境中的碳元 素, 识别有机物-拉曼和荧 光光谱仪 1.3 精细测量元素- X射线光谱仪	1.1 研究火星冰分 布-矿物光谱探测仪	/	1.1 确定矿物成分, 识别 有机物-拉曼光谱仪 1.2 测量元素-X射 线衍射仪 1.3 确定有机分子等生物 标志物-火星有机分子 分析仪 1.4 寻找地下水和含水矿 物质-探地雷达	1.1 原始有机 物的形成及当 前状态 1.2 古水环境 1.3 早期生命 证据	/
气候—— 当前气候和古气候 →当前气候、近期 气候、古气候 →气候演化	B1 气候/天气过程和 历史演变 B2 与空间环境相互 作用 B3 地质气候变化 证据 B4 火星大气关键组 分逃逸	A1/A2/A3/A4 2.1 观测火星天气现象-桅杆 相机-Z 2.2 测量火星大气风、温、压 以及沙尘、紫外线、可见光和 红外辐射等-火星环境动力 学分析仪/火星气象站	A3 2.1 研究火星环境特 征-磁强计、离子与 中性粒子分析仪、能 量粒子分析仪 2.2 研究火星电离层 及气候-火星气象测 量仪	2.1 研究大气温 度模式, 冰, 水蒸 气和灰尘-红外 光谱仪 2.2 高层大气及 太空逃逸的氢和 氧的痕迹-紫外 线光谱仪	A1/A2/A3/A4 /	2.1 大气演化 2.2 大气动态 模型 2.3 火星大气与 地球气候变化	/
地质—— 火星表面和火星 内部 →火星地貌特征与 火星内部结构、火 卫系统 →火星地质演化	C1 过去和现在的地 质环境与过程 C2 地质特征分布和 属性 C3 内部结构与动 力学 C4 火卫及火星周边 环境	B1/B2/B3/B4 3.1 火星地貌、岩石和土壤- 桅杆相机-Z 3.2 岩石化学组成和矿物学 分析-超级相机 3.3 岩石土壤高分辨率成像、 精细测量元素-X 射线光谱仪 4 探测岩石和矿物组成-拉 曼和荧光光谱仪 5 火星浅层地质结构-次表 层雷达成像仪	B1/B2 3.1 研究火星环境特 征-表面磁场探测仪 3.2 研究火星形貌与 地质构造特征-中分 辨率相机、高分辨率 相机、地形相机 3 研究火星土壤特 征-物质组成-矿物 光谱探测仪 4 研究火星物理场与 内部结构-次表层探 测雷达	3.1 拍摄高分辨 率图像-高分辨 相机	B1/B2/B3/B4 3.1 数字地形测绘, 遴选 采样样品-全景相机 3.2 分析表面矿物组成, 遴选合适采样-红外摄 谱仪 3.3 确定矿物成分-拉曼 光谱仪 4 矿物和岩层成分分析- 火星次表层多光谱摄 像仪 5 寻找地下水和含水矿 物质, 研究适合在地下钻 探的样品-探地雷达	3.1 地质环境、 化学组成 3.2 地质年代学 3.3 行星尺度 地质演化过程	1 火卫一的地 形和化学组 成、太阳系行 星的演化 2 火卫二飞掠 探测
载人—— 获取环境数据 →开展任务设计 →载人环火及登陆 火星	D1 着陆、巡视、资源 就位利用 D2 行星保护和火卫 探测	C1/C2/C3 1 利用火星CO <sub>2</sub> 制取O <sub>2</sub> -火星 就地资源利用实验室	C1/C2/C3 /	C1 /	C1/C2/C3 /	C1/C2/C3 1 资源就位利用 D1/D2	C4 1 火卫一采样 D2

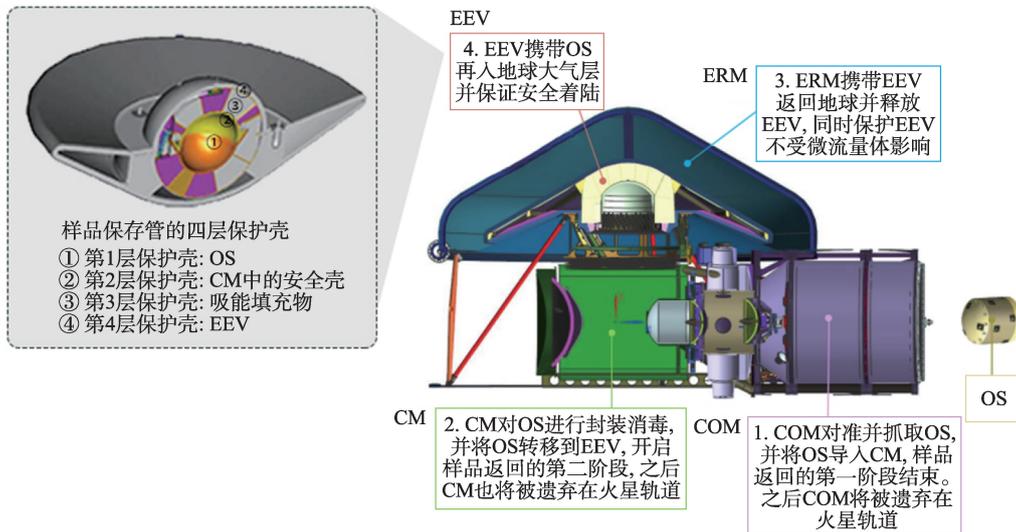


图22 MSR任务返回地球轨道器结构组成及样品保存管4层保护壳示意图

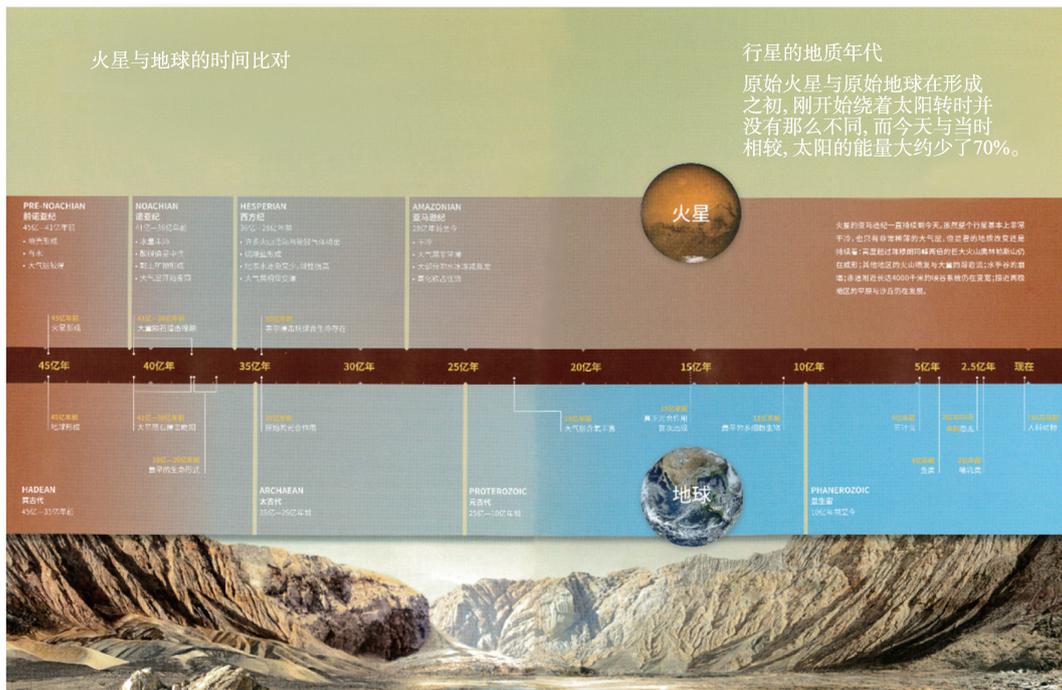


图23 火星与地球的演化对比<sup>②</sup>

② Horowitz N H, Hobby G L, Hubbard J S. Viking on Mars: the carbon assimilation experiments[J]. Journal of Geophysical Research, 1977 82(28): 4659-4662.

③ Kerr, R. A. et al, Ancient life on Mars?[J]. Science 1996, 273: 864- 866.

④ Mckay, D. S. , Gibson, Jr. E. K. , ThomasKeprta, K. L. , Vali, H. , Romanek, C. S. , Cletmet t, S. J. , Chili er, X. D.F. , Maechling, C. R. & Zare, R. N. , Search for past life on Mars Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001[J]. Science, 1996,

273: 924-929.

⑤ Yangting LIN, Ahmed EL GORESY, 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

⑥ Malin M C, Edgett K S. Evidence for persistent flow and aqueous sedimentation on early Mars. Science, 2003, 302(5652): 1931-1934

⑦ A Bowl Full of Blueberries. [https://www.nasa.gov/mars\\_art/blueber-](https://www.nasa.gov/mars_art/blueber-)

- ries/#.YApk0aEw86g
- ⑧ Ehlmann B L, Edwards C S. Mineralogy of the martian surface. Annual Review of Earth and Planetary[J] Sciences, 2014, 42: 291-315
- ⑨ 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): 1-15.
- ⑩ Found it! Ice on Mars. [https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/28may\\_marsice/](https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/28may_marsice/)
- ⑪ NASA Phoenix Mars Lander Confirms Frozen Water. <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasa-phoenix-mars-lander-confirms-frozen-water/>
- ⑫ Orosei R, Lauro S, EPettinelli.E, et al., Radar evidence of subglacial liquid water on Mars[J]. Science, 2018, 361(6401):490-493.
- ⑬ NASA confirms evidence that liquid water flows on today's Mars (Update) <https://phys.org/news/2015-09-evidence-brine-mars.html>
- ⑭ Recurring Martian Streaks: Flowing Sand, Not Water? <https://www.nasa.gov/feature/jpl/recurring-martian-streaks-flowing-sand-not-water>
- ⑮ Malin M. C, Bell III J. F, Calvin W, et al. Mars Color Imager (MARCI) on the Mars Climate Orbiter. Journal of Geophysical Research. 2001, 1106(8):17651-17672, August 2001.
- ⑯ [http://www.esa.int/Science\\_Exploration/Human\\_and\\_Robotic\\_Exploration/Exploration/ExoMars/ExoMars\\_spots\\_unique\\_green\\_glow\\_at\\_the\\_Red\\_Planet](http://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/ExoMars/ExoMars_spots_unique_green_glow_at_the_Red_Planet)
- ⑰ J.-C. Gérard, S. Aoki, Y. Willame, et al. Detection of green line emission in the dayside atmosphere of Mars from NOMAD-TGO observations. Nature Astronomy. 2020, 4:1049-1052
- ⑱ Gómez-Elvira, J., Armiens, C., Castañer, et al. REMS: The Environmental Sensor Suite for the Mars Science Laboratory Rover. Space Science Reviews, 2012, 170(1-4), 583-640.
- ⑲ Banfield, D., Spiga, A., Newman, C. et al. The atmosphere of Mars as observed by InSight. Nature Geoscience. 13: 190-198 (2020).
- ⑳ John E. Moores, Raina V. Gough, German M. Martinez, et al. Methane seasonal cycle at Gale Crater on Mars consistent with regolith adsorption and diffusion. Nature Geoscience. 12: 321-325. (2019)
- ㉑ Oleg Korablev, Ann Carine Vandaele, Franck Montmessin, et al. No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations. Nature 568: 517-520 (2019).
- ㉒ NASA's MAVEN Selfie Marks Four Years in Orbit at Mars. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2018/maven-selfie-marks-four-years-in-orbit-at-mars>
- ㉓ NASA's MAVEN Reveals Most of Mars' Atmosphere Was Lost to Space. <https://www.nasa.gov/press-release/nasas-maven-reveals-most-of-mars-atmosphere-was-lost-to-space>.
- ㉔ Thomas, N., Cremonese, G., Ziethe, R. et al. The Colour and Stereo Surface Imaging System (CaSSIS) for the ExoMars Trace Gas Orbiter. Space Science Review. 212, 1897-1944 (2017).
- ㉕ Life on other planets. <http://www.starsatnight.org/blog/educational-blog/life-on-other-planets/>.
- ㉖ Geologic Map of Mars. [https://pubs.usgs.gov/sim/3292/pdf/sim3292\\_map.pdf](https://pubs.usgs.gov/sim/3292/pdf/sim3292_map.pdf)
- ㉗ Global Geologic Map of Mars. <https://mars.nasa.gov/resources/6435/global-geologic-map-of-mars/>.
- ㉘ 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
- ㉙ Zeitlin C, Cleghorn T, Cucinotta F, et al. Overview of the Martian radiation environment experiment. Adv Space Res, 2004, 33: 2204-2210
- ㉚ 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
- ㉛ 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
- ㉜ Casey L. F, Marissa F. Paul W, et al. MAVEN Observations of the Effects of Crustal Magnetic Fields on Electron Density and Temperature in the Martian Dayside Ionosphere. Volume44, Issue21, 16 November 2017. Pages 10812-10821
- ㉝ 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
- ㉞ Alexandra W, Smriti M, Elizabeth G. Countdown to Mars: three daring missions take aim at the red planet[J]. Nature, 2020(58): 184-188.
- ㉟ 赵聪. 红色的星球, 炽热的梦想——天问一号探测器火星探测前瞻[J]. 太空探索, 2020(08): 18-23.
- ㊱ 时蓬, 范全林, 汤惟玮. 关于2030年前火星采样返回科学任务的展望. 空间科学学报. 2020, 40(3): 301-304.
- ㊲ 时蓬, 王琴, 白青江, 范全林. 2020年深空探测热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 39(01)
- ㊳ 赵宇娟, 周迪圣, 李雄耀, 刘建忠, 王世杰, 欧阳自远. 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.
- ㊴ 马克·考夫曼, 国家地理火星零距离[M]. 2017. 北京: 北京联合出版公司