

天问一号——奔火逐梦

□ 包刚, 钟珊珊, 赵宇鹄

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

“天问一号”任务

2020年7月23日,中国首次火星探测任务(天问一号)在文昌航天发射中心成功发射,标志着我国行星探测(“天问”系列任务)的大幕正式拉开。“九天之际,安放安属?隅隈多有,谁知其数?天何所沓?十二焉分?日月安属?列星安陈……”,“天问”二字源于屈原长诗《天问》,这首长诗一共提出了170多个问题,其间许多追问关乎宇宙星河。以“天问”命名行星探测系列任务,表达了中华民族对真理追求的坚韧与执着,体现了对自然和宇宙空间探索的文化遗产。“揽星九天”是更遥远的征途和更灿烂的星辰大海。“天问”也将继“嫦娥”之后,被永远铭刻在中国航天史册上。

天问系列的首个任务是“天问一号”中国首次火星探测任务。该任务于2016年1月立项,其目标是:在国际上首次通过一次发射,实现火星环绕、着陆、巡视探测,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”探测器总重约5t,由环绕器和着陆巡视器组成,着陆巡视器主要包括进入舱和火星车(图1)。“天问一号”的三大科学问题是:(1)探测火星生命活动信息;(2)火星的演化以及与类地行星的比较研究;(3)探讨火星的长期改造与今后大量移民建立

人类第二个栖息地的前景。五大科学目标是:(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。英国《自然》杂志评价称,如果中国“天问一号”能一次性完成“绕、落、巡”三大任务,将创造新的历史纪录。

“天问一号”环绕器

环绕探测是目前火星探测的主要方式之一,也是行星探测开始阶段的首选方式。2月5日,“天问一号”探测器完成了第四次轨道中途修正,并发布了首幅火星图像(图2);2月10日19点左右,“天问一号”探测器“刹车”成功开始了环火飞行。环绕器要完成的主要科学探测任务包括五大方面:火星大气电离层分析及行星际环境探测;火星表面和地下水冰的探测;火星土壤类型分布和结构探测;火星地形地貌特征及其变化探测;火星表面物质成分的调查和分析。

“天问一号”环绕器搭载了7台有效载荷,包括:(1)中分辨率相机,绘制火星全球遥感影像图,进行火星地形地貌及其变化探测,如火星表面成像、火星地质构造和地形地貌研究;(2)高分辨率相机,获取火星表面重点区域精细观测图像,开展地形地貌和地质构造研

究;(3)环绕器次表层探测雷达,利用高频电磁波的穿透特性对行星表面和内部结构的岩性、电磁参数及主要组成成分进行探测研究;利用探测器星下点高度,开展火星表面地形研究;开展行星际甚低频射频频谱研究;(4)火星矿物光谱分析仪,分析火星矿物组成与分布;研究火星整体化学成分与化学演化历史;分析火星资源及其分布;(5)火星磁强计,探测火星空间磁场环境,研究火星电离层及磁鞘与太阳风磁场相互作用机制;(6)火星离子与中性粒子分析仪,对火星等离子体中的粒子特性进行研究,了解火星大气的逃逸;研究太阳风和火星大气相互作用、火星激波附近中性粒子加速机制;(7)火星能量粒子分析仪,研究近火星空间环境和地火



图2 “天问一号”在距离火星约220万公里处获取的首幅火星图像着色效果图(图片来源于网络)

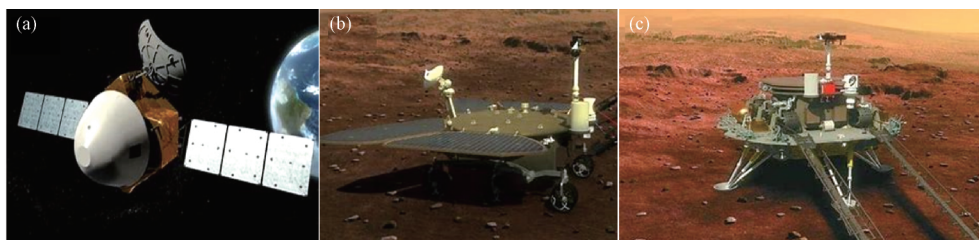


图1 “天问一号”环绕器(a);“天问一号”火星车(b);“天问一号”着陆器和着陆器上的火星车(c)(图片来源于网络)

转移轨道能量粒子的能谱、元素成分和通量的特征及其变化规律;绘制火星全球和地火转移轨道不同种类能量粒子辐射的空间分布图;与磁强计、离子和中性粒子分析仪等联合研究近火星空间能量粒子辐射与大气的关系、太阳风暴能量粒子事件对火星大气逃逸的影响与相互作用的规律以及火星粒子加速与输运过程。

“天问一号”着陆器/火星车

“天问一号”环绕器进入环火轨道后,先开展约三个月的对地观测,特别是对预选着陆区进行详细勘测。之后携带火星车的着陆器将与环绕器分离,利用降落伞和反推火箭在火星表面着陆。“天问一号”着陆器/火星车预计于2021年5月降落在火星表面,并开展为期90个火星日(一个火星日约24 h 39 min 35.2 s)的巡视探测任务。火星车要完成的科学探测任务有:火星巡视区形貌和地质构造探测,火星巡视区土壤结构(剖面)探测和水冰探查,火星巡视区表面元素、矿物和岩石类型探查,以及火星巡视区大气物理特征与表面环境探测。

火星车搭载了6台科学载荷,包括:(1)火星表面成分探测仪,火星表面成分探测仪包括激光诱导击穿光谱仪(LIBS),短波红外光谱显微成像仪(SWIR)和微成像相机。LIBS(240~850 nm)用于元素组成分析;SWIR(850~2 400 nm)用于矿物和岩石的分析和识别;微成像相机(900~

1 000 nm)可以获得探测目标的高空间分辨率图像。(2)多光谱相机,获取着陆点周围的地形、地貌和地质背景信息,进行空间分析,获得岩石、土壤等可见近红外光谱数据;采集各种白天和黑夜的天空图像,以进行特定的大气、气象和天文研究。(3)导航地形相机,拍摄广角图片,指导火星车的移动并寻找感兴趣的目标(岩石/土壤等);结合环绕器上搭载的高分辨率相机,将它们拍摄到的地面图像进行比对,可以校准火星表面的真实情况;为其他科学载荷寻找感兴趣的探测目标或区域。(4)火星车次表层探测雷达,次表层探测雷达可以探测火星土壤的地下分层和厚度。包含两个通道,低频通道(15~95 MHz)可以穿透10~100 m的深度(空间分辨率为几米);高频通道(0.45~2.15 GHz)可以穿透3~10 m的深度(空间分辨率为几厘米)。次表层探测雷达可以随火星车移动,持续收集地下雷达信号,探测地下物质的大小和分布特征,并在垂直和水平方向上约束地下分层结构,制约地下水冰和挥发物(如水合矿物质等)的分布。(5)火星表面磁场探测仪,检测火星表面磁场,火星磁场指数以及火星电离层中的电流。其主要优点是随火星车移动;与环绕器上搭载的磁强计协同观测,将对理解火星内部的演变具有极其重要的意义。(6)火星气象测量仪,用于监测火星表面温度,压力,风场和声音等的时间和空间变化。在着陆之前,还可以在环火轨道上收

集温度和声音数据。

“天问一号”火星车相较于国外的火星车其移动能力更强大,设计也更复杂。它采用主动悬架,6个车轮均可独立驱动,独立转向。除前进、后退、四轮转向行驶等功能外,还具备蟹行运动能力,用于灵活避障以及大角度爬坡。更强大的功能还包括车体升降(在火星极端环境表面可以利用车体升降摆脱沉陷)、尺蠖运动(配合车体升降,在松软地形上前进或后退)和抬轮排故(遇到车轮故障的情况,通过质心位置调整及夹角与离合的配合,将故障车轮抬离地面,继续行驶)。

“天问一号”预选着陆区地质背景

出于工程安全的需要,着陆区的选择需要这样几个条件,一是在低纬度区域(通常是南北纬30°以内),以保证火星车的太阳能板能获得足够的太阳光照;二是地势要较低,以保证着陆器在降落时有足够的时间减速;三是地表要平坦和少大块岩石,以保障火星车的安全移动。“天问一号”公布的两大备选着陆区域(图3)都位于火星的北部平原,靠近火星南北二分线。

伴随“天问一号”的成功发射,备选着陆区范围进一步缩小为区域2中的乌托邦平原,但具体着陆点还有待环绕器探测后进一步确定。美国华盛顿大学行星地质学家阿维森表示,中国“天问一号”的预选着陆区域此前从未有火星车“踏足”,它获得的数据将使全球行星科学家受益。

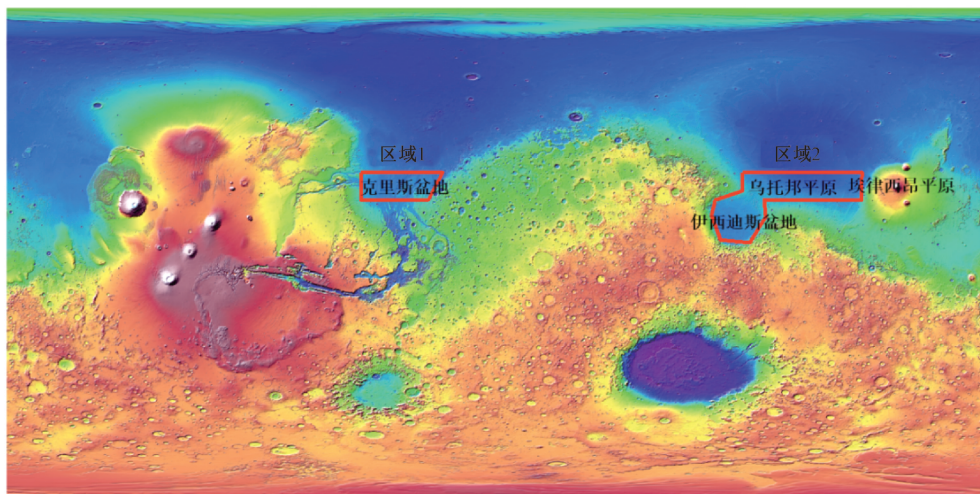


图3 “天问一号”公布的两个预选着陆区

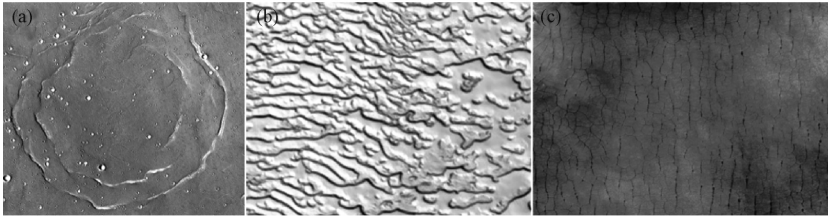


图4 被掩埋的撞击坑(a);指纹地貌(b);多边形地貌(c)

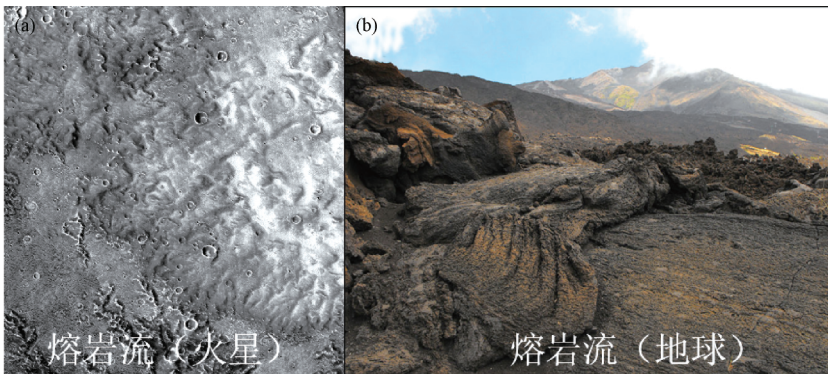


图5 火星上的熔岩流(a);地球上的熔岩流(b)(图片来源于网络)

区域1($20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $50^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{W}$)位于克里斯(Chryse)盆地内,这是一个古老的撞击盆地。欧空局-俄罗斯2022年“ExoMars”火星探测器的着陆点奥西亚平原(Oxia Planum)位于其东部。早年美国的火星探测器“探路者号”(Pathfinder)也在这个区域附近着陆。

区域2($9^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\sim 134^{\circ}\text{E}$ 和 $4^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\sim 98^{\circ}\text{E}$)主要由三部分组

成:伊西迪斯盆地(Isidis Basin)、乌托邦平原(Utopia Planitia)和埃律西昂平原(Elysium plain)。伊西迪斯盆地形成于40亿前的一次撞击事件,是火星上形成的最后一个大型盆地,盆地周围环绕着许多同心裂缝环。这些裂缝暴露出地表内部的深层物质,盆地边缘存在大量含水矿物,如层状硅酸盐等。美国宇航局2020火星探测任务

“毅力号”火星车(Perseverance)的着陆点杰泽罗撞击坑(Jezero Crater)就位于伊西迪斯盆地西北部的高地边缘。乌托邦平原是太阳系中最大的撞击盆地,直径约3300 km,其中广泛存在着与水有关的地貌特征,如严重退化/掩埋的撞击坑(图4a),可能是由于沉积物被压实导致;分布于中纬度地区的指纹地貌(图4b),可能是冰川或火山作用形成;巨型多边形(图4c)可能是由于热收缩作用导致永久冻土开裂形成,等等。区域2还包括了一部分埃律西昂火山平原单元,表面存在大量的熔岩流和熔岩物质(图5),地形复杂。

“天问一号”火星车,不仅可以开展基于火星车载荷的各项探测,更重要的是可以与轨道器的同类载荷开展地面-在轨的协同观测。轨道器携带了与火星车类似的光谱仪、磁强计和次表层雷达,协同观测和交互验证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。

回到地球,“天问一号”的探测数据,还将与火星陨石分析、模拟实验和模拟样品研究、数值模拟等研究相结合,深化对火星表面和内部物质组成以及火星各类地质过程的认识,约束关键事件发生和持续时间。“天问一号”任务将为理解火星宜居性的形成和演化作出新的中国贡献。

◆ 延伸阅读

火星探测历史

1960~2019年间,国际上一共进行了44次火星探测任务,其中成功和部分成功的有22次,是风险最高的航天任务之一。火星探测始于20世纪60年代,美国和苏联为了争夺世界领导权而展开了军事和科技竞赛。在1960年10月10日,苏联向火星发射了第一枚火星探测器,紧接着在四天之后,第二枚火星探测器也发射升空,但都以失败告终。1964年,美国也先后向火星发射了两枚探测器“水手3号”(Mariner 3)和“水手4号”(Mariner 4),其中“水手3号”失败,而水手4号于1965年7月14日从火星上空9800

km掠过,成为首次成功飞掠火星的任务,并向地球发回了21张火星图像。“水手9号”(Mariner 9)是首个进入环火轨道的探测器,传回了7000多张火星影像,取得了空前成功。20世纪70年代,美国“海盗1号”(Viking 1)和“2号”(Viking 2)着陆器首次在火星表面着陆,但未能在火星发现生命。之后的十几年,国际火星探测进入了暂停期,一直未有新的探测任务。20世纪90年代,美国重启火星探测任务,以“follow water”(跟随水)作为新时期的探测策略。随着探测技术的日趋成熟,1996年后,几乎每个发射周期(每26个月)都有新的火星探测任务发射。不论是轨道器、着陆器、巡视器,实际

工作寿命均远超过设计寿命。欧盟也于2005年发射了“火星快车”(Mars Express)环绕器,至今仍在开展探测。对比上世纪六七十年代的火星探测器,新一代探测器所携带的高性能科学载荷,极大地提高了数据的分辨率和精度,并在最近20年积累了大量高质量探测数据。国际火星探测因此迎来了高速发展期。

2020年是火星探测的窗口期和高峰年。除中国的“天问一号”探测器外,美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration; NASA)和阿联酋穆罕默德·本·拉希德太空中心(Mohammed Bin Rashid Space Centre; MBRSC)也分别发射了火星探测器

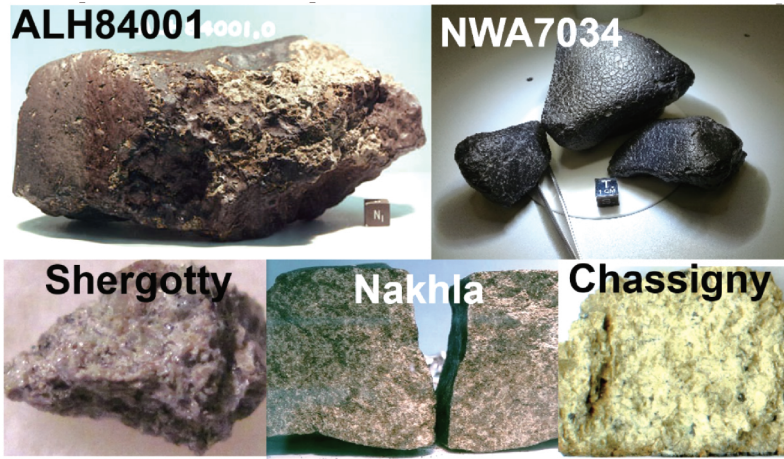


图6 目前已知的五类火星陨石,其中 SNC 三类陨石数量最多 (图片来源于网络)

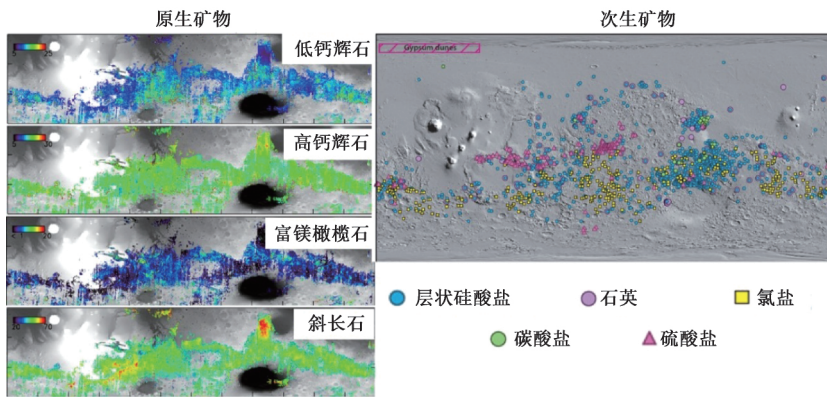


图7 火星轨道遥感探测到部分原生矿物和次生矿物的分布(图片来源于文献)

“毅力号”(Perseverance)火星车和“希望号”(Hope)环绕器,开展对火星古代沉积环境和火星大气、气候探测。美国的“毅力号”作为火星样品返回的先头兵,还将开展火星样品采集和封装,为后续的样品返回做准备。

火星岩石矿物元素组成

火星矿物和化学元素组成的数据主要源于火星环绕器携带的光谱仪和伽马射线谱仪,以及着陆器或火星车携带光谱和成分仪器,以及对火星陨石(图6)的研究。火星全球丰度模型中丰度最高的主量元素是 Si、O、Fe、Mg、Al、Ca,而 Cr、Mn、Na、P、Ti、K 等含量相对较少。火星壳为玄武质,原生矿物主要有橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、斜长石、碱性长石、硫化物(磁黄铁矿、黄铁矿)和氧化物(磁铁矿、钛铁矿)。火星表面还广布着大量次生矿物,指示火星早期曾经存在的水-岩-大气相互作用,这些次生矿物有层状硅酸盐(铁镁蒙脱石、铝蒙脱石、高岭石族、绿泥石、蛇纹石等),含水硅酸盐(葡萄石、方沸石、蛋白石等),硫酸盐(镁/铁/钙/硫酸盐、黄钾铁矾、明矾石等),氯盐和高氯酸盐,碳酸盐(镁/铁/

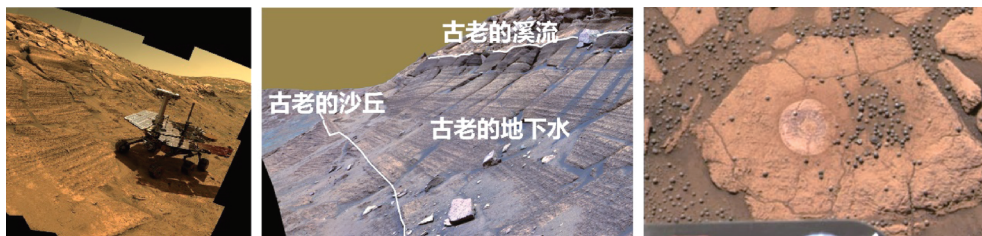


图8 “机遇号”火星车在子午线平原伯恩斯组沉积岩上行驶(左);伯恩斯组是火星着陆点第一个沉积岩记录(中);遍布着陆点的球状赤铁矿颗粒(右)

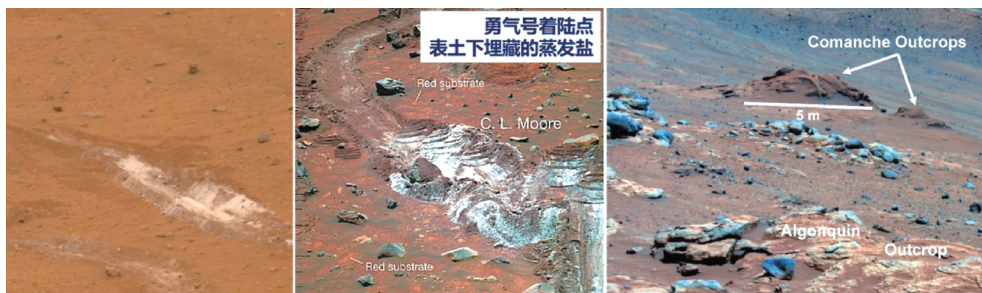


图9 “勇气号”火星车在古谢夫撞击坑中发现的热泉环境;被表土埋藏的白色富硅土壤(左);被表土埋藏的硫酸盐(中);在着陆点探测到的首个碳酸盐露头(Comanche 岩石)(右)(图片来源于网络)

钙碳酸盐)和氧化物(赤铁矿、针铁矿、四方纤铁矿等)(图7)。以CO₂为主导的火星大气和火星表面零星分布的碳酸盐,是火星地质记录与火星气候模型中存在的未解之谜。

多个火星着陆器/巡视器(海盗号、探路者号、机遇号、勇气号、好奇号)发现,火星土壤中大部分的主量元素存在全球均一化,但某些元素含量会受到岩石组成的影响。受火星区域或全球性尘暴的影响,火星土壤的细粒组分较粗粒组分更为均一。广泛存在的火星尘埃富含硫和氯。在不同的着陆点,火星车观测到不同的局部环境,指示火星表面的地质多样性。“机遇号”火星车在火星子午线平原(Meridiani Planum)的沉积记录中发现球状赤铁矿颗粒(图8),可能由硫酸铁氧化转变而成。“勇气号”火星车在古谢夫撞击坑(Gusev Crater)发现了热泉环境(图9)。“凤凰号”在火星北极着陆点的土壤中发现了水冰(图10)、碳酸盐、高氯酸盐等。“好奇号”在盖尔撞击坑(Gale Crater)发现了流水活动的证据以及湖相沉积物(图11)。

未来国际火星探测计划

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、为开展火星和火卫样品返回及载人探火做准备。

欧盟-俄罗斯“ExoMars”火星车任务由2020年推迟至2022年。该任务的科学目标为:(1)寻找火星过去和现在的生命痕迹;(2)研究水和地球化学环境如何变化;(3)研究火星大气中的痕量气体及其来源。

美国-欧盟联合火星样品返回任务,也随着毅力号的发射拉开序幕。

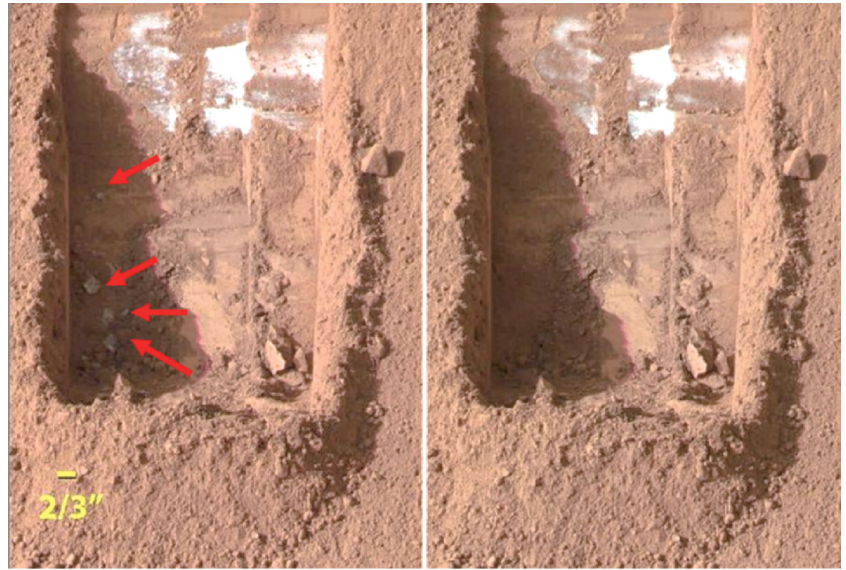


图10 “凤凰号”在火星北极着陆点的土壤中发现了水冰(红色箭头)(图片来源于网络)

根据2019年7月美国和欧盟公布的信息,整个计划跨度12年,先后包含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和一辆样品收集的火星车,并于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。搭载样品罐的上升火箭于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。中国也计划于2028年左右开展火星样品返回任务。

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”,从火卫一(Phobos)带回首批样品(大于10g),并进行火卫二(Deimos)飞越观测以及监测火星的气候。

载人探火一直是国际太空计划的目标。自1950年以来,涉及载人探火任务的概念性工作一直在进行。ESA制订的“曙光计划”中就包括了2033年载人探火的旗舰任务。美国、欧盟等都在为载人探火做准备,如2009年俄罗斯、欧空局和中国合作的Mars-500项目,旨在解决长时间太空飞行时的心理、生理和技术问题。NASA的阿尔忒弥斯计划(Artemis Program)是由美国政府资助的载人航天项目,其目标是在2024年前将宇航员平安送往月球并返回,建立常态化驻留机制,为未来的火星载人登陆任务铺就道路。

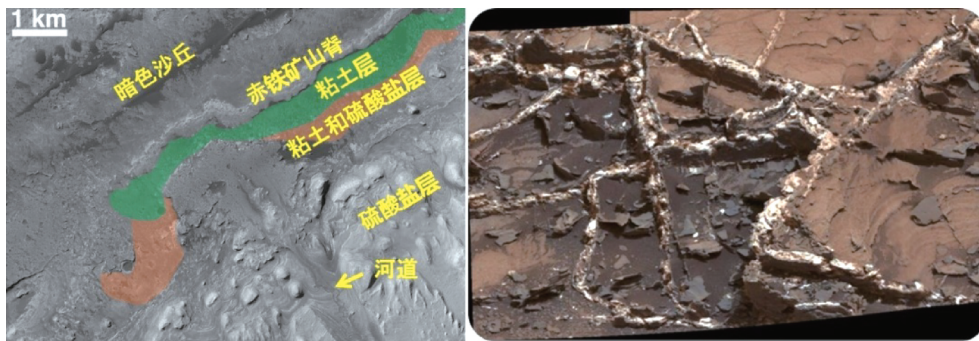


图11 盖尔撞击坑中部的夏普山底部存在的次生矿物分层(左);“好奇号”火星车在夏普山发现的泥岩和次生硫酸钙填充脉(右)(图片来源于网络)