

美国2020火星车着陆区遴选进展及对2020中国火星任务着陆探测部分的一些思考

叶斌龙^{1,2}, 赵健楠^{1,2}, 黄俊^{1,2*}

(1. 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. 中国地质大学(武汉)地球科学学院 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 总结了近20年来火星探测的重要发现以及生命、气候和地质3个方面尚未解决的关键科学问题; 介绍了美国国家航空航天局(NASA)2020火星探测任务的科学目标、科学载荷和着陆区选择的工程条件限制, 并重点分析了经过3次着陆区选择研讨会, 上百位行星科学家投票选取的排名前3的预选着陆区的地质情况。在此基础上, 提出了对我国2020年火星任务的着陆探测部分的一些思考, 并根据不同的任务目标(聚焦生命、气候和地质问题; 支持载人火星探测的资源勘察; 工程技术验证)提出了3个候选着陆区。

关键词: 火星探测; 着陆区遴选; 行星地质; 天体生物学; 行星气候

中图分类号: V476.4

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2017)04-0310-15

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2017.04.002

引用格式: 叶斌龙, 赵健楠, 黄俊. 美国2020火星车着陆区遴选进展及对2020中国火星任务着陆探测部分的一些思考[J]. 深空探测学报, 2017, 4(4): 310-324.

Reference format: Ye B L, Zhao J N, Huang J. The status of NASA Mars 2020 Rover Landing Site Selection and some thoughts on the Landing Part of China 2020 Mars Mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(4): 310-324.

0 前言

人类很早就注意到夜空中红色的火星, 古罗马人称之为Mars, 意思为战神。17世纪以来, 人类开始用望远镜对火星进行观察, 发现了火星两极的白色极冠和反照率变化的表面区域。20世纪60年代以来, 人类利用飞行器对火星进行飞越、轨道环绕、着陆和巡视等探测活动。轨道环绕探测获得了大量的科学探测数据, 大大加深了我们对于这颗红色星球的认识: 全球的地形^[1]、地质构造和过程^[2]、表面矿物和元素组成^[3-6]、近地表水的分布^[7-9]、固有的剩余磁场^[10]、重力场和地壳结构^[11]、大气组成及其随时间变化的特征^[12-15]等。另一方面, 这些遥感数据为后续着陆和巡视探测提供支持: “海盗号”(Viking)和“凤凰号”(Phoenix)着陆器、“旅行者号”(Sojourner)、“勇气号”(Spirit)、“机遇号”(Opportunity)和“好奇号”(Curiosity)等巡视器成功地执行了表面探测任务, 获得了表面形貌、地层、矿物和元素成分以及大气-表面相互作用的详细信息。

在未来的20年, 人类对于火星的探测将进入一个新的高潮: 欧洲航天局(ESA)的新一代火星探测任务ExoMars 2016已经成功发射; 阿联酋的火星环绕轨道器及其科学载荷也正在研制, 计划于2020年发射; 美国国家航空航天局(NASA)的Insight飞船正在进行调试, 准备2018年发射; 样品采集巡视器及其科学载荷正在紧张研制中, 瞄准2020年的发射窗口; 为了2020火星任务的科学产出最大化, NASA已经召集上百名火星探测的科学家召开了3次着陆区遴选会议, 并确定了3个备选区。2017年5月, NASA宣布将于2033年左右实现载人登陆火星的计划。中国的火星探测任务已经开始实施, 探测器由环绕轨道飞行的卫星和着陆探测器(着陆器和巡视器)组成, 并计划于2020年发射。选择符合工程技术条件, 又具有重大科学意义的着陆区对于中国首次独立自主地开展火星探测任务并获得新的重大发现十分关键。本文将首先总结近20年来国内外火星探测的重要进展和存在的主要科学

收稿日期: 2016-12-10 修回日期: 2017-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41403052, 41773061); 博士点优先领域基金资助项目(20130145130001); 中国地质大学(武汉)中央高校基本科研业务费专项资金(CUGL160402, CUG2017G02)

问题,进而介绍美国2020火星车着陆区遴选的进展及我们对中国2020火星任务着陆探测部分的一些思考。

1 火星探测科学成果简述与尚未解决的问题

本节主要从生命、气候和地质3个方面来阐述火星探测的科学成果和存在的问题。

1.1 生命

国际上探测火星最重要的目标之一是寻找生命。由于对生命直接进行探测比较困难,NASA把确定火星上现今或曾经是否存在适合生命生存的环境作为火星探测任务的一个重要目标。对于火星生命的探测和研究,能够间接帮助我们了解地球早期生命的起源与演化,具有十分重要的天体生物学意义。

探测数据表明,现在的火星表面寒冷、干燥、氧化、辐射强,这些条件都不利于生命的生存。然而,火星的次表层可能出现间歇性的液态水,并很可能是混合着冰的卤水^[16-17],因而次表层可能比表面更适合生命的生存。在地表数千米以下,较高的温度能够让孔隙水保持液态,营养物质和水循环可以支持深部地下的生物圈^[18-19]。最近研究人员在火星南半球中纬度地区某些撞击坑的坑壁上观察到了一些随季节变化的线状构造——季节性斜坡线纹(Recurring Slope Lineae)。它们很可能是含高氯酸盐的卤水活动的痕迹^[20-22],但其成因争议很大。另一个重要的发现是火星大气中的甲烷。由于甲烷较为容易发生一系列光化学反应,很难长期存在于大气中,因此推测火星的某些区域现今仍在释放甲烷^[23]。甲烷的产生可能是生物成因或非生物成因,需要进一步的研究。

火星轨道倾角的变动,也会影响水冰的分布。现在其自转轴的倾角大约在 25° ,但是在过去的一千万年中,其最大值可达 46° ^[24]。如此高的倾角使得大气中的水含量上升,表面的冰层从两极转移到较低的纬度,从而使得赤道附近的地下冰层稳定存在^[25-26]。在次表层可能形成了宜居的环境。

与现在的环境相比,诺亚纪的火星气候更加温暖和湿润。利用遥感数据,前人通过分析火星地貌和成分信息,发现了大量液态水在表面和地下活动的痕迹^[27-28]。早期的火星火山作用与撞击作用非常活跃,可能发育热液系统,形成了能够维持生命活动的环境^[29-31]。大约在西方纪,大部分有流水特征的河道可能是由于次表层水短时间大量释放形成的^[32]。在地下的深处,仍可能存在着适宜生命居住的环境。

即使现在大量的证据表明火星曾经适合生命生

存,但一系列问题仍未解决,火星在什么时间和区域适合生命生存,持续的时间有多长?哪些物化条件影响着火星的宜居环境?是否有任何形式的生命存在过?如果有,怎样才能寻找到这些可能存在的生命痕迹,如在宜居环境中寻找有特定分子结构的有机化合物、微生物组织纤维等细胞化石、稳定同位素特征、生物建造的沉积结构和矿物证据等?

未来我们仍需重点探测火星上多样的适合生命生存的环境,如湖泊沉积环境、火山热液环境、撞击坑热液系统等,对这些潜在的宜居环境进行深入研究。其中就位探测和采样返回是最有效的研究手段。对适合生命生存的地点和保存生物标记物的地点的沉积物进行探测,重建火星的沉积历史,了解火星地质、气候和生物过程。采集样品返回地球进行更深入的矿物学和地球化学分析,研究矿物形成和保存的环境等^[27,31,33],有望解决火星是否存在地外生命的问题。同时,可以在地球上与火星相似的极端环境(如柴达木盆地)开展相关的天体生物学研究^[34],探索火星生命存在的可能性。对于次表层的宜居环境,可以通过研究火星大气的微量元素或者利用地球物理等手段进行探测。

1.2 气候

对气候的研究目前仍是火星探测的一个重要方面。气候深刻影响着可能的生命生存的环境,并与表面地貌相互作用。对火星气候的研究也能够帮助我们了解地球的气候变化。

多年的探测任务获取了大量的数据,表明现代的火星气候系统非常复杂和多样。最主要的过程是尘埃循环、二氧化碳循环、水循环和大气之间的相互作用。尘埃会影响大气的辐射特性。在火星上有多种与尘埃有关的气候现象,如尘卷风与沙尘暴等^[35],但是尚不清楚它们的成因,也不清楚沙尘暴是如何扩大到全球范围的^[36-37]。在秋冬季节,大气中的二氧化碳会在高纬度地区沉降下来形成干冰。在春夏季节,极冠中的干冰会升华。二氧化碳在大气和极区表面之间的循环导致了火星大气压力的季节性变化^[38]。水蒸气也会在表面与大气之间循环,形成云、雾和霜。近年来在南极极冠中发现了水冰^[39],推翻了前人南极极冠全部由干冰组成的认识。极区堆积物的厚度达到 $3\,000\text{ m}$ ^[40],含有层状的冰和尘埃,记录了火星过去几百万年来的二氧化碳循环、水循环和尘埃循环^[41-42],因此是相关研究重要的素材。

环绕火星的“火星侦察卫星”(Mars Reconnaissance Orbiter)探测器的“Mars Climate Sounder”载荷和“火星

快车号”(Mars Express)探测器上的SPICAM载荷通过测量不同高度的大气温度来观察大气的循环,发现火星大气非常活跃^[43-44]。2014年入轨的MAVEN(Mars Atmosphere and Volatile Evolution)探测器也为火星气候研究带来大量新的认识,如:测量了火星的热层和电离层的成分结构及其随高度的变化特征,为火星大气挥发分的逃逸过程提供了制约^[15];观察到了极光^[45]与距表面150~1 000 km的尘埃^[46];结合“好奇号”(Curiosity)火星车上搭载的采样分析仪获取的表面大气数据,发现火星在过去的40亿年中损失了大量的大气,这个结果表明火星早期的大气比现今更加浓密^[47]。虽然目前我们仍无法了解火星大气散失的全貌,但这些数据都表明火星上层大气对于火星气候的演化有着重要的影响,也间接地影响火星的水与环境宜居性^[14]。另外一个重要的发现是在火星大气中检测到甲烷^[48]。在2016年底入轨的微量气体轨道器(Trace Gas Orbiter)就是专门研究火星大气的微量气体,特别是甲烷,有望解决甲烷的成因。轨道器获得的高分辨率影像,观察到了大量的现象,如沙丘的移动^[49]和高纬度的二氧化碳升华形成不同形状的形貌^[50-51],这也表明现在火星的气候活动十分活跃。

另一方面,通过分析火星表面的地貌和成分数据,表明了火星曾经的气候系统可能与现在非常不同,古代火星的大气压力和温度可能比现在高得多,液态水能够间歇或长期地存在于表面^[5, 28, 32, 52]。由于太阳早期比现在要暗约25%,而且火星距离太阳相对于地球更远,更难以形成温暖湿润的环境,因此多种假说,如强烈的温室效应、火山喷发、云、陨石撞击等被用来解释这种现象,但各自也存在着问题^[30, 53-55]。

目前,关于火星气候的认识依然很少,一系列问题仍需要深入研究,如确定高层大气逃逸的速率、逃逸气体的种类,从而了解火星大气逃逸的机制,了解火星大气的演化;研究火星大气在垂直方向上不同气体的分布,为大气模型提供制约。同时,火星大气的光化学反应和动力过程非常复杂,这些光化学反应影响着火星的水循环、二氧化碳循环和尘埃循环,也影响着大气的动力过程。我们需要进一步研究这些光化学反应的种类、反应速率和全球的分布情况以及光化学反应对于火星大气逃逸的影响。就位探测任务可以携带相关的气象仪器,测量风向、压力、温度和湿度等物理量,监测水的蒸发、云的活动、表面霜的活动,挥发份的运输和存储等,研究特定的气候过程(如云的活动),在全火星建立一个气象网络。此外,也可以寻找相关的地质记录,如对极地的层状沉

积物进行就位探测,测量其粒度、灰尘的成分、层厚和年龄等。

1.3 地 质

在地球上,早期(早于25亿年的冥古宙和太古宙)的地质记录保存极少,大多被板块活动破坏掉。而火星地壳的平均年龄比地球老,不存在板块活动或在其早期就停止了,提供了一个窗口使我们了解类地行星形成早期的状态以及演化过程。同时,火星的地质演化历史对于研究火星的生命和气候也有非常重要的意义。

火星地壳的形成经历了复杂的地质过程,并受到后期地质作用的不断改造^[5, 56-57]。火星表面外露有大量35~37亿年的地质单元,是其早期的地质记录,主要分布在布满大量撞击坑的南部高地上。前人在这些单元上发现了表层液态水的痕迹,包括湖泊、河谷网络和厚层状沉积岩等^[58-59],但是水成矿物很少与这些峡谷网络共生。近年来随着遥感探测技术的进步,仪器空间分辨率和光谱分辨率的提高,使轨道器发现了许多新矿物,如层状硅酸盐、硫酸盐、碳酸盐和氯盐^[5, 60-63]。不同的矿物组合指示了环境的多样性,如不同的水(卤水)化学条件,pH的环境等^[64-66]。如在早期火星的地层中发现碳酸盐沉积物^[67-68],表明火星早期的环境不都是偏酸性的,更有利于生命的出现。

就位探测发现了更多的指示水活动的矿物组合,如“机遇号”(Opportunity)巡视器在子午线高原(Meridiani Planum)发现赤铁矿^[69-70]、黄钾铁矾^[71]等硫酸盐。对于地层序列的研究表明,可能是由于地下水涌形成的,类似于地球的萨布哈(Sabkha)沉积环境^[27, 72]。“勇气号”(Spirit)巡视器在古瑟夫(Gusev)撞击坑的着陆区发现了大量的岩浆岩、层状硅酸盐、碳酸盐、含铁硫酸盐、卤化物、高硅物质,据此推测该区域存在过热液系统环境^[33]。“凤凰号”着陆器发现其登陆点周围土壤的化学成分具有中性的pH值,并含有高氯酸盐^[73-74]。“好奇号”火星车相当于一台移动的实验室,对盖尔(Gale)撞击坑进行探测,认为该着陆点可能为一个古湖泊,可能适合生命的生存^[75]。

火星内部的演化也是火星地质的重要研究内容。火星陨石的放射性同位素和地磁数据显示火星分异于其形成的早期(大约在其形成后的25~100 Ma之间)。大量的盾形火山,如塔尔西斯(Tharsis)、埃律西昂(Elysium)和环海拉斯(Hellas)盆地区域的火山)释放了大量的酸性挥发物到大气中,影响着火星的气候,也在地质、构造和热演化方面发挥了显著的作用^[56, 59, 76]。同时,火星磁场的丢失也对火星大气的

逃逸过程有重要的影响^[59,77]。总之,火星内部的演化与火星表面及火星大气有非常紧密的联系。

过去20年对火星的探测任务带来了大量新的认识,但也带来了大量重要的新问题:火星早期的气候变化是什么时候发生的,为什么发生和如何发生的?不同沉积单元反映了什么环境,其形成时间是什么时候?蚀变矿物的组成是什么,是怎样形成的?检测到的甲烷的成因是什么?火星的碳循环是怎样的?火星的岩浆岩的特征怎么样,是怎么形成的,形成年代是什么时候?火星陨石与火星表面关系是怎么样的?极区层状沉积物和沉积岩是如何记录现在和过去的气候、火山作用的?火星内部的结构是怎样的?火星是怎样分异的?是否存在板块构造?火星的发电机是怎样演化的?火星现在的构造、地震和火山活动是怎样的?火星的地壳为什么会出现二分性?火星的岩石圈结构是怎样的?火星的整体、地幔和地核的成分是什么?火星的内部结构是怎样影响磁场、大气和环境宜居性的?火星磁场是怎么丢失的?

为了回答以上问题,加深我们对火星地质演化过程的了解,需要综合利用遥感数据和就位探测数据,并开展相关的实验模拟。更有效的手段是返回重要的火星样品,在地球实验室内进行深入的岩石学、矿物学、岩石地球化学的分析,从而了解火星的地质演化。目前,对火星内部的探测非常少,2018年将要发射的InSight探测器将会大大加深我们对火星内部构造的了解,包括岩石圈的结构和厚度、现在的地震与火山活动等。同时,也需要获取更多的地球物理数据,如热流值,从而更好地限定火星内部的矿物、密度、温度以及结构等,为模型提供边界条件。

2 美国2020火星探测的科学目标

NASA正在进行2020火星探测任务的仪器研制和飞船建造工作,同时在遴选具有重要科学意义的着陆区。这个任务将搜寻火星的生命痕迹,并加深对火星的地质演化和过去环境宜居性的认识。整个项目的预算为21亿美元,计划于2020年发射。飞船将利用类似“火星科学实验室”的飞行系统(如天空起重机等),对火星表面的着陆区进行大约一个火星年(约690个地球日)的巡视探测,并对具有重要科学意义的样品进行采集和封装,为将来样品返回地球做准备。同时,这个项目也能为未来载人火星任务提供技术储备。

该任务主要包括以下四大科学目标:

1) 探索与天体生物学相关的火星古环境,从而解译其地质过程与地质历史,包括评估以往的宜居性

探测火星潜在生物标记物保存的区域,了解该区域的环境状况及宏观和微观的过程。对比研究已知的有生命存在的类似环境,评价该区域的宜居性。探索相关的地质过程,重建其地质历史。这些工作需要利用巡视器对火星着陆区进行就位探测。巡视器搭载的科学载荷能够对着陆区的岩石结构、构造、矿物、化学成分和有机物进行探测。结合轨道探测的遥感数据,分析该地区的地质情况,解释包括地质过程与地质历史等在内的诸多关键的科学问题,如水的作用时间和范围,岩浆作用活动的时间,环境是否适合生命的生存。更重要的是寻找具有代表性的古环境样品,采集并保存起来,为返回地球进行更加全面和深入的研究做好准备。

2) 在选择的地质环境中评价生物标记物保存的可能性并寻找潜在的生物标记物

探索火星最主要的目的之一是确认是否存在地外生命。在太阳系中,火星与地球的气候最为相似。目前一些证据支持火星曾经有液态水的活动,曾经出现过适合生命生存的环境。评估生物标记物保存的可能性并寻找可能的生物标记物,可以帮助确认火星生命是否存在过。生物标记物是由生物作用产生的物质或痕迹,例如几乎不可能在没有生命存在的环境下形成和富集的复杂的有机分子。生物标记物不可能孤立地出现,一般会和相关的环境紧密联系在一起,因此寻找生物标记物也对评估环境有着重要的作用。

3) 为后续带回具有重要科学意义并具有详细记录的样品进行技术积累

通过轨道探测和就位探测,大大加深了我们对于火星的认识,但是一些非常重要的科学问题,如精确定年、寻找生命、重建环境演化历史(地表、水下、还原、氧化)和地质事件(火山灰的沉降、熔岩流动、断层活动、岩脉充填),都需要通过对带回的样品进行深入的研究才能解决。然而火星采样返回是一项非常具有挑战的任务,基于经费和技术的限制,2020火星探测任务只是整个采样返回任务的第一步。其将验证新的技术,并为带回样品的后续任务提供技术积累。

4) 为载人探测和操控任务指挥部或空间技术计划提供参与机会

NASA的载人探测和操控任务指挥部(Human Exploration and Operations Mission Directorate, HEOMD)计划开展地月空间、近地小行星、火星及其卫星的载人探测任务。火星2020任务主要可以从以下3个方面支持计划2035年发射的载人火星探测任务:①任务设计,如通过对火星大气密度和风的研究改进现有的火

星进入、下降和着陆技术等；②人员的生命安全，如行星间航行和火星表面的辐射、有毒物质（如尘埃）或可能的地外生命的威胁；③任务的实施，如避免污染火星的特定区域，以及避免火星尘埃导致电子设备的故障等。

3 科学载荷简介

以上述科学目标为指引，NASA向全世界公开征集火星2020任务的科学载荷，经过评审选择了下列科学仪器^①。

3.1 桅杆相机（Mastcam-Z）

桅杆相机是一个能够获得立体像对的多光谱相机，将会安装在2020火星车的桅杆上。这个设备能够拍摄极高分辨率的彩色图像和立体全景图像，也能获取每秒4帧的录像，从而记录一些动态的现象，如沙尘暴、云的活动和天文现象等。桅杆相机还配备了带通滤波器（400~1 000 nm），可获得多光谱数据，从而区分没有风化和已经风化了物质，也可区分硅酸盐、氧化物、氢氧化物以及一些与水环境相关的矿物等。

通过这个载荷，我们可以获取火星车周围的地形地貌、岩石的结构构造及矿物形态等信息。其还能约束火星岩石的类型，了解地质单元的成因，重建地质历史。同时也可以获取大气与表面相互作用的信息，从而评估现今的大气和天气状况。

3.2 火星环境动力分析仪

火星环境动力分析仪（Mars Environmental Dynamics Analyzer）是一套用于环境监测的传感器集合，能够记录尘埃的光学性质和大气参数（风速、风向、压力、相对湿度、空气温度和地面温度），也可以获取大气气溶胶的性质。该载荷能够帮助我们了解火星的以下情况：①中尺度的表面环流现象的痕迹；②小尺度的气象系统（热流，边界层湍流、漩涡和沙尘暴）；③当地的水循环（空间和时间的多样性、风化层的扩散传输）；④尘埃的光学性质、光解的速率、臭氧气柱、氧化产物等。

3.3 火星氧元素原位资源利用实验仪

火星氧元素原位资源利用实验仪（Mars Oxygen ISRU Experiment）能够消耗火星大气中的二氧化碳来生产氧气，主要由二氧化碳获取压缩系统和固体氧化物电解槽两部分组成。首先，二氧化碳获取压缩系统收集并且过滤火星大气中的二氧化碳，然后通过固体氧化物电解槽，利用电化学的方法将二氧化碳分解成氧气和一氧化碳，最后将废气排出。

这个载荷不仅能在该任务中验证原位资源利用技术，利用火星大气生产可供呼吸的和作为火箭燃料的氧气，为人类探测火星任务做准备，也能测量大气尘埃的大小和形态，了解尘埃对火星表面环境的影响。

3.4 X射线岩石化学行星载荷

X射线岩石化学行星载荷（Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry）是2020火星车的X光荧光微成像仪，对目标岩石和土壤发射X射线，然后通过分析其诱发出来的X光荧光获取亚毫米级的物质化学成分。该载荷能够探测以下元素：Na、Mg、Al、Si、P、S、Cl、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Br、Rb、Sr、Y、Ga、Ge、As、Zr，其中包含一些重要的示踪元素如Rb、Sr、Y和Zr，检出限为10 ppm。

大量地质现象，如纹层、粒度、胶结物、脉体和结核的化学成分在空间上会有变化，该仪器能够在短时间内对这些结构和构造进行扫描，获取不同部位的化学成分。其还能获取全岩的化学成分，与以往行星探测任务获得的数据进行对比。

3.5 火星次表层雷达成像实验仪

火星次表层雷达成像实验仪（Radar Imager for Mars' subsurF Ace eXperiment, RIMFAX）是一个探地雷达，能够获取高分辨率的火星次表层的结构，约束着陆区下伏物质的性质。它由安装在火星车内部的电子单元和固定在外部的天线组成，能够发射150 MHz~1.2 GHz频率的雷达脉冲信号，理论上在垂直方向上的分辨率为14.2 cm。它在火星车的行进过程中工作，并能够运行在不同模式。火星车每行驶10 cm，其会默认切换成深部穿透或浅部穿透模式。该仪器预计能获取次表层10 m内的信息。如果次表层的物质对雷达脉冲信号的衰减作用较小，其可能会获得更深的信息。利用该仪器，可以探测：①风化层的厚度和范围；②次表层的地层，并与地面的地层露头进行对比；③采集和保存样品所在地层剖面的特征。

3.6 宜居环境有机物和化学物质拉曼与冷发光扫描探测仪

宜居环境有机物和化学物质拉曼与冷发光扫描探测仪（Scanning Habitable Environments with Raman & Luminescence for Organics & Chemicals）是一种深紫外共振拉曼和荧光光谱仪，它将被固定在机械臂上，利用248.6 nm的激光获取小于100 μm束斑内物质的成分。该仪器对于芳香族有机物和碳聚合物的探测非常灵敏，也可以探测到脂肪族有机物。除了有机物，还能够检测到粒度在20 μm以下与水环境相关的矿物。

^①<https://mars.nasa.gov/mars2020/mission/instruments/>。

该载荷的目标是评估火星过去的水历史，探测生物标记物，协助挑选火星样品返回地球。其将测量矿物中的C、H、N、O、P和S等元素，测量火星表面的有机物的种类和分布，并探测具有相关纹理特征的物质。

3.7 超级相机

超级相机（SuperCam）是一个遥感载荷，包含有遥感光学测量和激光光谱仪，能够高效快捷地远距离获取样品高精度的矿物和化学信息、原子和分子的组成。该载荷包含4个光谱仪：①激光诱导剥蚀光谱仪（LIBS），使用1 064 nm的激光探测7 m以内的目标；②拉曼光谱仪，使用532 nm的激光探测12 m以内的目

标；③时间分辨荧光光谱仪；④可见光和红外反射光谱仪，波长范围400~900 nm和1.3~2.6 μm。利用这些光谱仪能够获取样品的矿物信息、分子结构，也能够直接搜索有机物。同时，SuperCam的激光能够清除样品表面的灰尘，从远距离获取灰尘下的表面物质信息。该载荷还含有彩色远程微成像仪，能够获取高分辨率的样品影像。

4 工程条件限制

NASA公布的火星2020探测任务的着陆区工程限制条件见表1，详细说明可以参考文献[78]。

表 1 2020火星车着陆区工程限制条件
Table 1 Engineering constraints of Mars 2020 landing site selection

工程参数	限制条件	说明
纬度	±30°	降落时的通讯、硬件工作温度
高程	−0.5 km	足够的大气来减速火星车
着陆椭圆	25 km × 20 km，近东西向	操控精度
1~1 000 m地形起伏	~100 m	火星车移动操控性和动力
2~5 m的坡度	<25°~30°	火星车着陆的稳定性
石块高度和丰度	随机选取的4 m ² 的区域内高于0.55 m的石块的概率小于0.5% 约为7%的石块丰度	火星车着陆的安全性
雷达反射率	Ka波段背散射波段在−20 dB和+15 dB之间	火星车下降过程中速度计和高度计的准确测量
地面承重	热容量大于100 Jm ^{−2} s ^{−0.5} K ^{−1} ，反照率 < 0.25，雷达反射率 > 0.01	火星车着陆不会陷在松软的物质里

5 美国2020火星车备选着陆区（前3名简介）

图1为本文介绍的所有备选着陆区。经过3次着陆区选择研讨会，上百位行星科学家投票选取了3个预选着陆区：Jezero撞击坑、NE Syrtis与Columbia Hills（Gusev），分别代表了可能的湖泊环境（Jezero）、地下热液环境（NE Syrtis）和地表热泉环境（Columbia Hill），都很可能孕育过生命，符合美国2020火星探测的科学目标与工程条件限制。下面将简要介绍这3个预选着陆区的地质情况。经过前两次着陆区选择研讨会排名靠前的备选着陆区（3个预选着陆区除外）仍具有重要的科学意义，可以为后续的探测任务提供参考，它们的地质特征详见第8节附录。全文制图使用了美国亚利桑那州立大学开发的JMARS软件。

5.1 Jezero撞击坑

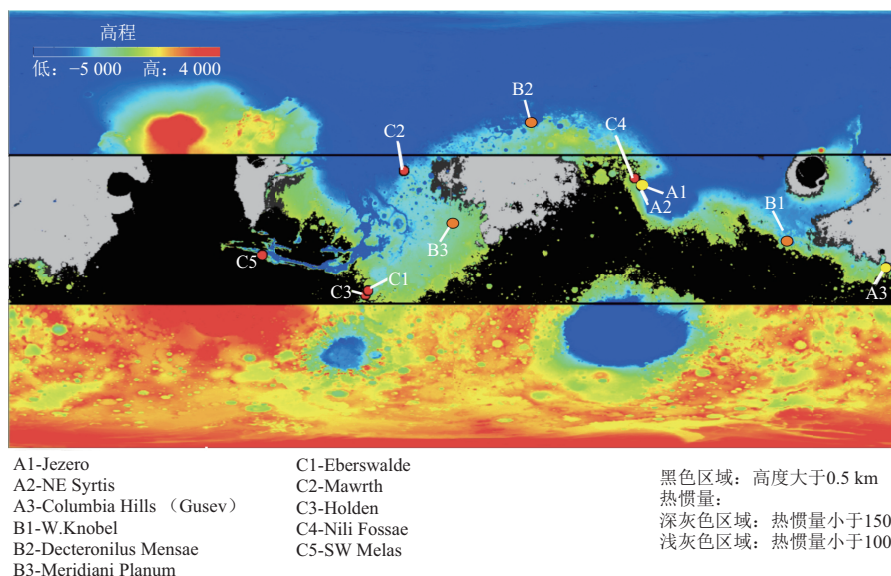
Jezero撞击坑的中心位置为18.8 °N，77.5 °E，直径约为49 km，位于大瑟提斯（Syrtis Major）火山的东部。该撞击坑很可能曾经是一个250 km³的湖泊。汇入其中的河流经过了大面积区域，携带了不同地区的沉积物，在撞击坑内堆积形成了两个三角洲，并出露了非常明显的层状沉积结构^[80-82]（图2）。前人在该地区探测到大量与水环境相关的矿物：含Fe/Mg的粘土矿

物和碳酸盐^[82]，揭示了该区域曾经存在稳定的中性水体环境。特别是碳酸盐，能够帮助我们研究早期火星的碳循环。Fe/Mg粘土有利于有机物的保存^[82]。撞击坑内有尚未蚀变的岩浆岩基底单元，可以利用其来改进撞击坑直径分布统计定年的方法，对其进行撞击坑统计定年的结果差异非常大^[83-84]。

5.2 NE Syrtis

NE Syrtis的中心位置位于17.8 °N，77.1 °E，邻近Jezero撞击坑。该区域广泛出露多个不同年龄的岩浆岩单元，从前诺亚纪的基底到早西方纪的熔岩流（图3），对返回的样品进行精确定年能极大改进现有的火星表面撞击坑统计定年的方法。同时，该区域广泛分布含Al或Fe/Mg的层状硅酸岩矿物、橄榄石、高岭土、硫酸盐和碳酸盐^[85-87]。大量的层状硅酸盐与碳酸盐的发现表明该地区曾经存在过碱性或中性水环境。因此，这样的环境很可能孕育了生命，这些地质记录保存了过去气候的信息。

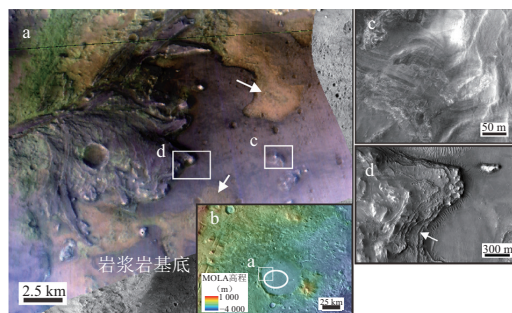
NE Syrtis分布有大量的平顶山建造（图3c）。自上而下，由盖层、浅色块状单元、橄榄石与碳酸盐混合的单元和含Fe/Mg的层状硅酸盐单元组成，其成因有很大争议。大量宽约10 m，长约几百米的脊状构造出露在这个区域（图3d），其成因非常复杂，可能为



注：图中黑线表示南北纬30°。高程数据来源于火星轨道高程数据（Mars Orbiter Laser Altimeter, MOLA），其中高程高于0.5 km的区域为黑色。热惯量数据来源于热发射成像系统（Thermal Emission Imaging System, THEMIS）。热惯量代表了表面物质对抗外界温度变化的能力，可以近似认为其代表表面物质的粒度^[9]。热惯量较高的物质昼夜温差较小，如石块（热惯量通常大于 $1\,200\text{ J m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$ ）；热惯量较小的物质昼夜温差较大，如灰尘（热惯量通常小于 $100\sim 150\text{ J m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$ ）。图中深灰色的区域表示热惯量小于 $150\text{ J m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$ ，浅灰色的区域表示热惯量小于 $100\text{ J m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$ 。修改自 <http://marsnext.jpl.nasa.gov/>。

图1 本文介绍的所有备选着陆区

Fig. 1 Locations of landing site candidates discussed in this study



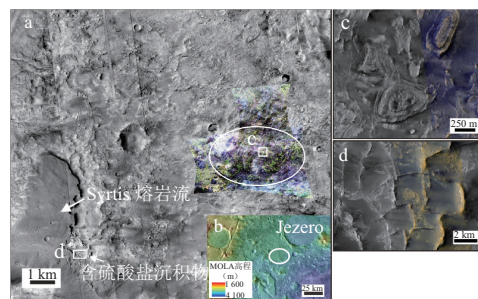
注：a为Jezero撞击坑（中心位置约 18.8°N ， 77.4°E ）的地貌，该图为火星专用小型侦查成像光谱仪（Compact Reconnaissance Imaging Spectrometers for Mars, CRISM）的假彩色图像（红： $2.38\text{ }\mu\text{m}$ ，绿： $1.80\text{ }\mu\text{m}$ ，蓝： $1.15\text{ }\mu\text{m}$ ）叠加在背景相机（Context Camera, CTX）影像上，不同的颜色代表不同的成分：绿色表示含层状硅酸盐的物质，黄色表示含橄榄石的物质，蓝色表示含低钙辉石的物质，紫色和棕色为无明显吸收特征的物质；b为Jezero撞击坑区域的地形图，该图为MOLA数字高程伪彩色图叠加在THEMIS昼间热红外图像。白色椭圆为建议的着陆椭圆，大小为 $25\text{ km} \times 20\text{ km}$ ；c为残余的三角洲，该图为高分辨率成像科学实验（High Resolution Imaging Science Experiment, HiRISE）的影像；d为箭头指示三角洲的层状沉积物，该图为HiRISE影像。

图2 Jezero撞击坑的地形地貌

Fig. 2 Landforms and topography of Jezero Crater

破裂、断层、剪切带、岩墙和差异风化的产物，也可能与Isidis撞击后的热液活动有关^[88]。

多种潜在的宜居环境、完整的诺亚纪到西方纪地层、多样的矿物和多个岩浆岩单元能够帮助我们解决火星诸多关键的天体生物学和行星演化的科学问题。该地区曾经入选为“好奇号”的预选着陆区。



注：a为NE Syrtis（中心坐标约 17.8°N ， 77.1°E ）的地貌，白箭头所指的是Syrtis熔岩流及含硫酸盐沉积物，图像为CRISM假彩色图像（红： $2.38\text{ }\mu\text{m}$ ，绿： $1.80\text{ }\mu\text{m}$ ，蓝： $1.15\text{ }\mu\text{m}$ ）叠加在CTX影像上。不同的颜色代表不同的成分：绿色表示含层状硅酸盐的物质，黄色表示含橄榄石的物质，蓝色表示含低钙辉石的物质，紫色和棕色为无明显吸收特征的物质；b为NE Syrtis的地形地貌图，是由MOLA叠加在THEMIS昼间热红外图像上。白色椭圆为建议的着陆椭圆，大小为 $25\text{ km} \times 20\text{ km}$ ；c为平顶山建造。自上而下，由盖层、浅色块状单元、橄榄石和碳酸盐混合的单元和含Fe/Mg的层状硅酸盐单元组成^[89]；d为成因复杂的脊状构造，检测到硫酸盐沉积物。c和d为HiRISE影像。

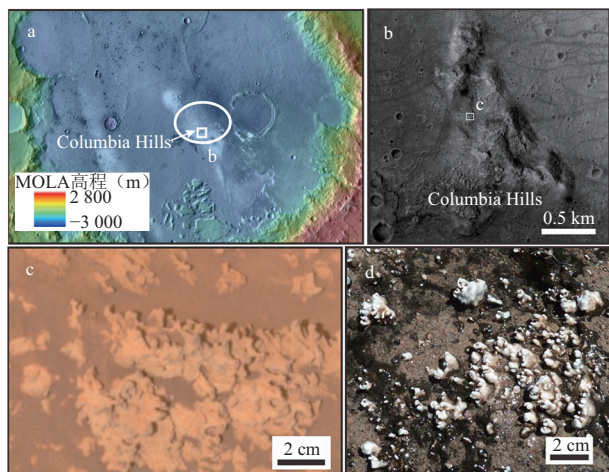
图3 NE Syrtis的地形地貌

Fig. 3 Landforms and topography of NE Syrtis

5.3 Columbia Hills (Gusev)

Gusev撞击坑的中心位置约为 14.0°S ， 175.4°E ，直径约 166 km 。Columbia Hills位于Gusev撞击坑的坑底（图4a和图4b）。着陆于此的“勇气号”火星车翻越了Columbia Hills在Home Plate单元观察到了地表出露的乳白色、微指突起状的蛋白石（图4c）。这些蛋白石的宏观形貌和中红外光谱特征非常类似在智利阿塔

卡马沙漠的热液系统中发现的生物成因的蛋白石(图4d)。据此, Ruff和Farmer^[90-91]认为Home Plate单元中发现的微指突起状蛋白石很可能是与生物相关的热液系统形成的。这一点是支持该备选着陆区排名靠前的重要原因。



注: a为Columbia Hills (Gusev) (中心坐标约14.0°S, 175.4°E)地形地貌图, 为MOLA数字高程图叠加在THEMIS昼间热红外图像。白色椭圆为建议的着陆椭圆, 大小为25 km × 20 km; b为Columbia Hills, 广泛分布c图中展示的白色微指突起状的蛋白石和混合有橄榄石的Fe/Mg层状硅酸盐物质; c为“勇气号”巡视器上的Pancam相机在Home Plate单元处拍摄到的可能具有生物成因的白色微指突起状的蛋白石^[90]; d为智利阿塔卡马沙漠的热液系统中发现的生物成因的蛋白石^[91]。

图4 Gusev撞击坑的地形地貌

Fig. 4 Landforms and topography of Gusev Crater

另外, Gusev撞击坑内还分布与橄榄石共存的Fe/Mg层状硅酸盐矿物、碳酸盐、蛇纹石、硫酸盐^[92]。该区域广泛出露多套尚未蚀变的玄武岩, 可以作为年代学研究的重要样品, 校准目前行星地质学界广泛用来确定火星表面绝对模式年龄的撞击坑直径-频率分布统计法。

该备选区目前最主要的问题是“勇气号”火星车在该区域进行了长达10年的科学探测, 公众心理上很难接受在有限的经费条件下, 两次探测同一片火星表面区域。

6 对于我国2020火星任务探测着陆部分的一些思考

我国的首次火星探测任务已经立项并开始实施。任务包括轨道器、着陆器和巡视器, 并预计在2020年发射。这将是我国首次独立自主地对火星进行科学探测, 选择具有重大科学意义同时又符合工程限制条件的着陆点, 将是获得可能的重大科学发现的重要保障。

NASA是火星探测领域获得最多重大科学成果的研究机构, 其历次火星着陆探测的经验, 特别是其2020火星车的着陆区遴选策略值得认真思考。

6.1 科学载荷的遴选和信息公开

美国科学院在广泛征集行星科学领域研究者的建议后, 组织同行公认的资深科学家对这些建议进行总结, 于2011年出版了2013—2022行星科学10年愿景^[93]。在这份报告的火星探测部分, 采样返回被一致认为是下一步火星探测最重要的任务。由于技术和资金的限制, 火星采样返回任务将分为3个阶段: ①表面探测、样品采集和封装保存, 即2020火星车任务; ②发射样品采集器到火星轨道; ③样品采集器返回地球。随后, NASA组织行星科学界的一线科学家, 对火星2020巡视器任务进行详细的科学定义。在此基础上, NASA向全世界公开征集由首席科学家负责的科学载荷, 经过行星科学领域专家数轮评审, 于2014年7月公布了入围的科学载荷, 其中包括一个美国高校提出的载荷和3个国外载荷。随后, 这些科学载荷的关键科学探测指标均向全世界公开^①。

6.2 科学家主导着陆区选择

NASA向行星科学家公布2020火星车任务的工程技术的限制(第4节), 科学家在此框架内, 提出具有重要科学意义的备选着陆区, 并在着陆区研讨会上向行星科学界报告这些备选区域预计可以探测的科学目标和获得的科学认识^②。然后行星科学领域的研究者对这些备选区域的科学意义进行综合排名, 并向全世界公布讨论会的详细信息, 鼓励更加广泛的讨论。通过大约6次讨论会, NASA会在发射前一年最终确认最具科学价值的着陆区。

6.3 适合中国2020火星探测着陆部分的潜在备选着陆区

如前所述, NASA通常需要数年的时间, 召集上百名行星科学领域一线的研究者进行多次研讨会, 才能最终确定具有重大科学意义的着陆点。由于目前我国火星2020着陆探测的科学目标和工程技术限制尚未向外公布, 因此本文根据不同的任务目标提出3个备选着陆区, 希望起到抛砖引玉的作用, 引发我国行星科研人员的广泛讨论。

6.3.1 Knobel撞击坑西部盆地——聚焦火星生命、气候和地质问题

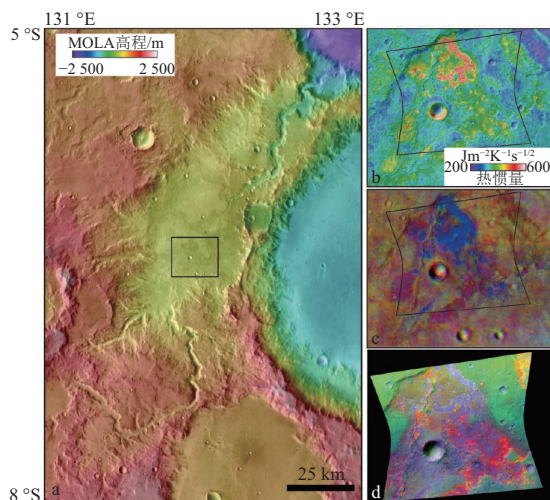
Knobel撞击坑西部盆地符合NASA2020火星车的工程限制条件, 位于火星二分性边界附近, 面积约为3 000 km²。其基底是古老的诺亚纪物质, 无数的沟渠

①<http://mars.nasa.gov/mars2020/mission/instruments/>。

②<http://marsnext.jpl.nasa.gov/>。

切割了其周围的高地，一条主要的排水渠道（深约300m）切割了盆地的北部（图5）。该盆地的底部出露了热惯量较高（图5b）的含氯盐（很可能是NaCl）的沉积物和含层状硅酸盐（Fe/Mg蒙脱石）矿物的沉积物（图5c和图5d）。这些水成矿物揭示了该区域复杂的地质历史，可能代表了不同时期的气候特征。该盆地还具有特别重要的天体生物学意义，可能在含氯盐沉积物中保存了生物标记物、化石甚至仍在休眠的微生物^[94]。

6.3.2 德特罗尼鲁斯·门萨（Deuteronilus Mensae）——为载人火星探测任务进行前期勘察



注：a为Knobel撞击坑西部盆地的区域地形地貌，MOLA数据叠加在THEMIS昼间热红外图像上；b为盆地底部的热惯量分布，含盐沉积物的热惯量较高；c为盆地底部的不同成分分布，THEMIS热红外多光谱数据去相关拉伸（波段8-7-5）图像；d为盆地底部的不同成分分布，CRISM光谱比值假彩色图像。修改自Huang等^[94]。

图5 Knobel撞击坑西部盆地的地形地貌

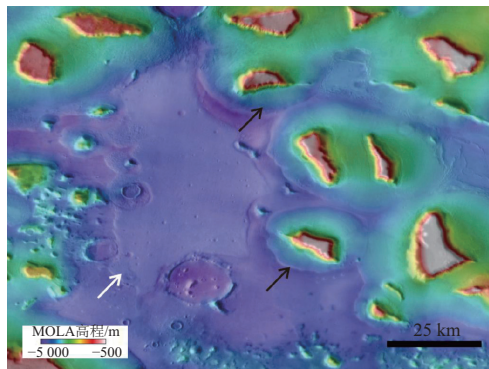
Fig. 5 Landforms and topography of the basin in the west of Knobel Crater

Deuteronilus Mensae正位于火星二分性边界上，Arabia Terra区域的北部。区域以南为年代较老、密布撞击坑的高原，北部为较年轻、撞击坑较少的平原。这个区域最显著的地质单元是平顶的山丘（图6）。对火星轨道器获得的雷达数据的分析表明，该区域的次表层分布了一定量的水冰^[95]。这些水冰对于未来载人火星探测任务具有非常重要的意义。然而这些水冰的详细分布特征、储量等信息尚不清楚，需要着陆器和巡视器的系统勘察。

6.3.3 子午线高原（Meridiani Planum）——工程技术较为容易实现的区域

Meridiani Planum是火星表面最为平坦的区域之一（图7），并且在赤道附近，着陆和通信相对较为容易控制，并且能提供充足的太阳能。“火星全球勘察者号”上的热发射光谱仪发现其为火星表面最富集赤铁矿

的区域^[96]，因此NASA发射了“机遇号”火星车前往该区域进行表面巡视探测，发现了更加丰富的矿物类型和更加复杂的地质历史^[97]。由于该区域面积较大，如果我国的火星着陆器和巡视器到达该区域，也将会有一些新的发现。



注：MOLA数据叠加在THEMIS昼间热红外图像上。黑色箭头所指的是源于平顶山的年代较新的冰川沉积物，白色箭头所指的是年代较老的，已经看不到平顶山的冰川沉积物。

图6 Deuteronilus Mensae（中心坐标约为44°N，27.75°E）的地形地貌

Fig. 6 Landforms and topography of Deuteronilus Mensae (centered at 44°N, 27.75°E)



注：远处可以看到降落伞和保护壳。可以看出该区域非常平，且没有较大的石块。

图7 “机遇号”着陆Meridiani Planum后拍摄的照片

Fig. 7 A photo taken by Opportunity rover after landing in Meridiani Planum

7 结 语

我国火星探测任务已经立项并开始实施，选择具有重大科学意义同时又符合工程限制条件的着陆点，是整个任务关键的环节。NASA作为火星探测成果最多的研究机构，其多次火星着陆探测的经验，特别是2020火星车探测任务的策略，如科学载荷的遴选和科学家主导的着陆区选择等，都很值得我们学习。本文根据不同的任务目标，聚焦火星生命、气候和地质问题，针对载人火星探测任务和工程技术验证分别提出备选着陆点，希望对我国火星探测任务的着陆点选取起到抛砖引玉的作用。同时，我国火星探测任务着陆点的选取也需要科学家与工程技术人员之间紧密合

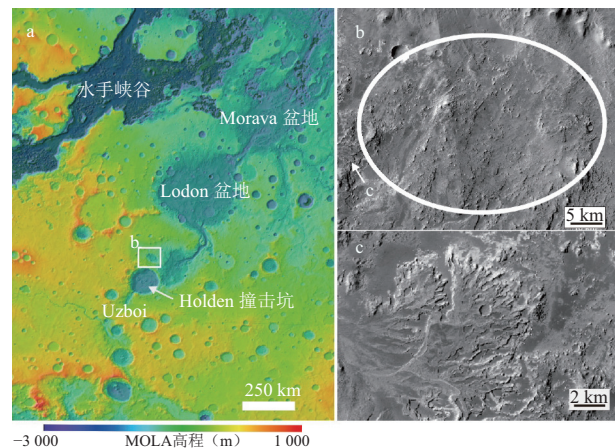
作, 才能在符合我国的工程条件限制下选取最具科学价值的着陆点, 获取最大的科学回报。

8 附录

本附录简要介绍经过两次着陆区选择研讨会选取的地点(3个预选着陆区除外)。这些区域综合考虑了工程条件限制并且符合美国火星探测的科学目标, 虽然在第三次研讨会中落选, 但仍有十分重要的意义, 能够为后续的探测任务提供参考。

8.1 Eberwalde撞击坑

Eberwalde撞击坑中心位置约为 24.0°S , 327.0°E , 直径约65.3 km, 位于火星Erythraeum区域, 是Uzboi-Ladon-Morava (ULM) 河谷盆地系统的一部分(图8a), 可观察到大量水活动的痕迹(图8c), 可能记录着火星诺亚纪到西方纪水文系统和气候的信息^[98]。该区域可观察到河流三角洲和大量弯曲的河道, 反映了长时间的水活动^[99](图8c)。并且, 三角洲处出露了大量的黏土矿物, 有利于生命痕迹的保存, 有十分重要的天体生物学意义。同时, 在着陆区内还可以探测到Holden撞击坑的撞击角砾岩与一些巨大的脉体。该地区最吸引人的地方是着陆区小范围内分布了大量值得探测的目标。



注: a为Uzboi-Ladon-Morava (ULM) 河谷盆地系统, 火星轨道高程数据叠加在热发射影像系统昼间热红外图像上; b为Eberwalde撞击坑(中心坐标约 24.0°S , 327.0°E), 白色椭圆为建议的着陆椭圆, 大小为 $25\text{ km} \times 20\text{ km}$, 白色箭头处为Eberwalde撞击坑的三角洲所在的位置。为背景相机拼接图像; c为Eberwalde撞击坑内西部的三角洲, 可能保存了古老生物痕迹。

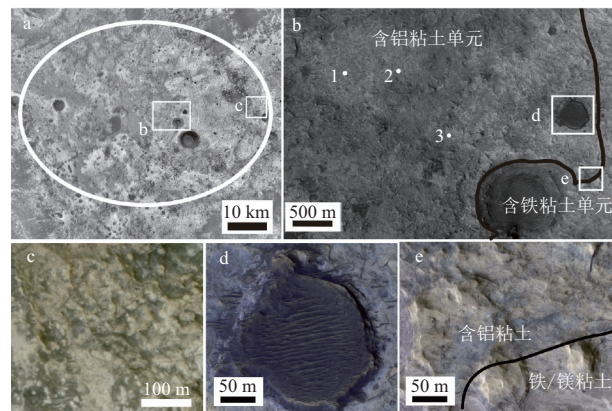
图8 Eberwalde撞击坑的地形地貌

Fig. 8 Landforms and topography of Eberwalde Crater

8.2 Mawrth Vallis

Mawrth Vallis中心位置为 22.3°N , 343.5°E , 位于火星二分性边界上的河道内(图9a)。该区域出露复

杂多样的物质, 如含Al层状铝硅酸盐和含Fe/Mg层状硅酸盐等^[100-103], 它们记录了该区域气候变化和多种地质过程。然而该区复杂多样的物质成分也是其作为备选着陆区最大的弱点, 因为地质过程过于复杂, 很难厘清地层关系。



注: a为Mawrth Vallis (中心坐标约 22.3°N , 343.5°E), CTX拼接图像。白色椭圆为建议的着陆椭圆, 大小为 $25\text{ km} \times 20\text{ km}$; b出露了大量与水环境相关的矿物。点1探测到了高岭石/明矾石。点2探测到了黄钾铁矾。点3探测到了Al蒙脱石; c为斑点状构造; d为黑色盖层残余, 覆盖在黏土矿物之上, 可能为黏土矿物的形成时间提供限制; e为Fe黏土单元和Al黏土单元, 它们有明显的边界。b、c、d、e为高分辨率影像科学仪器(High Resolution Imaging Science Experiment, HiRISE)影像。

图9 Mawrth Vallis的地形地貌

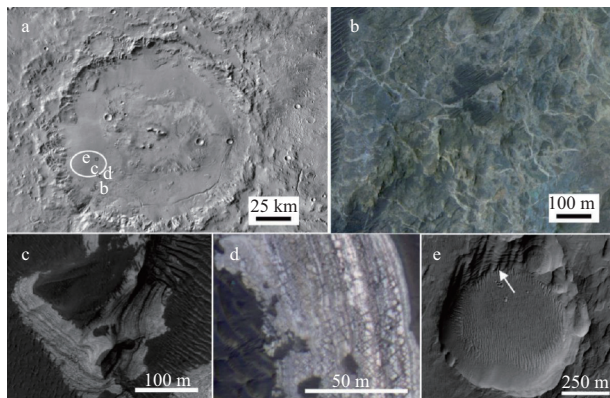
Fig. 9 Landforms and topography of Mawrth Vallis

8.3 霍顿(Holden)撞击坑

Holden撞击坑中心位置为 26.4°S , 325.1°E , 直径为155 km, 深约2 km, 也是Uzboi-Ladon-Morava (ULM) 河谷盆地系统的一部分(图10a)。Holden撞击坑出露了大量的水活动痕迹和沉积物, 可能是一个稳定的水体(图10a)^[104-106]。着陆区内出露大量的矿物, 包括低钙辉石、高钙辉石、富Mg橄榄石、富Fe橄榄石和层状铁镁硅酸盐等^[107]。该地区底部为一套撞击角砾岩(图10b), 中部色调较浅的区域可能为湖泊沉积(图10c, 10d), 含层状硅酸盐矿物, 可能保存有古老的生命痕迹, 具有重要的天体生物学意义^[104]。该区域的露头非常多, 可能记录了火星诺亚纪到西方纪的环境的变化(图10c, 10d, 10e)。

8.4 尼利槽沟(Nili Fossae)

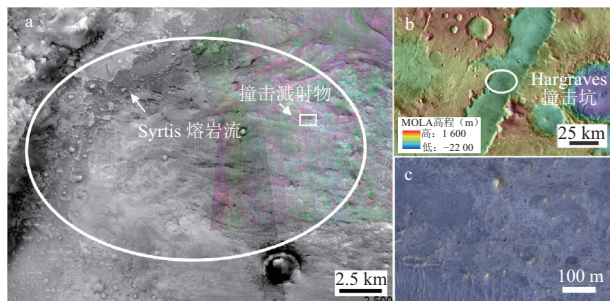
Nili Fossae地区是一个巨大的凹槽(图11a), 位于 21.0°N , 74.5°E , Syrtis火山省的东北方, Hargraves撞击坑和Isidis盆地的外缘。该区域出露清晰的诺亚纪和西方纪的地层序列, 并广泛分布层状硅酸盐、碳酸盐沉积物、橄榄石、低钙辉石和高钙辉石等(图11b, 11c, 11d, 11e)^[108-110]。同时, Nili Fossae地区有着很重要的年代学意义, Hargraves撞击事件和Isidis撞击事



注：a为Holden撞击坑（中心坐标约26.4°S，325.1°E）的CTX影像。白色椭圆为建议的着陆椭圆，大小为25 km × 20 km。b、c、d、e来自HiRISE影像。b为Holden撞击坑里的撞击角砾岩；c为着陆椭圆内的一处含粘土矿物的浅色物质的露头，是寻找古老生命痕迹的理想地点；d浅色物质上可见有些多边形裂缝；e显示撞击坑坑壁的地层（白色箭头）出露良好。

图 10 Holden撞击坑的地形地貌

Fig. 10 Landforms and topography of Holden Crater



注：a为Nili Fossae（中心位置约21.0°N，74.5°E）的地貌。底图为火星专用小型侦查成像光谱仪的影像（红：D2300，绿：LCPINDEX2，蓝：BD1900）叠加在背景相机影像上。不同的颜色表明了不同的成分：红色表示粘土矿物，绿色表示低钙辉石。白色椭圆为建议的着陆椭圆，大小为25 km × 20 km。箭头分别指示Syrtis的熔岩流与撞击溅射物；b为Nili Fossae的地形地貌图，为MOLA数字高程图叠加在THEMIS昼间热红外图像；c为Hargraves撞击溅射物，HiRISE影像。

图 11 Nili Fossae的地形地貌

Fig. 11 Landforms and topography of Nili Fossae

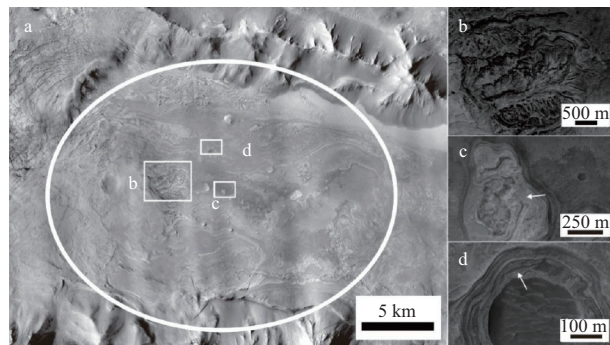
件挖掘出的火星地壳物质可能赋存于溅射物中，能够帮助我们了解火星诺亚纪地壳的组成。获取Hargraves撞击事件、Isidis撞击事件和Syrtis熔岩流未蚀变质物质的样品，将可用于优化撞击坑直径-频率分布统计法。

在着陆点半径10 km以内，如此小的范围出露了多样的物质，以及具有重要的年代学研究意义，是科学家们支持该区域成为着陆区的重要原因。

8.5 SW Melas

SW Melas中心位置为9.8°S，283.6°E，位于水手峡谷之中（图 12a），可能是最年轻的撞击坑湖泊。该地区有着复杂的地貌特征，如扇形的水下三角洲（图 12b），反映其长时间的水流活动。该区域出露了厚度约300 m的较为清晰的地层序列^[112]，可能记录了

火星地质与气候等信息。另外，该区域分布着许多零散的蛋白石土露头（图 12c），是值得探测的目标之一。



注：a为SW Melas的CTX影像（中心位置约为9.8°S，283.6°E），白色椭圆为建议的着陆椭圆，大小为25 km × 20 km；b为水下三角洲地貌；c为水合硅土；d为撞击坑坑壁出露的层状结构。b、c、d为HiRISE影像。

图 12 SW Melas的地形地貌

Fig. 12 Landforms and topography of SW Melas

参考文献

- [1] Smith D E, Zuber M T, Frey H V, et al. Mars Orbiter Laser Altimeter: experiment summary after the first year of global mapping of Mars[J]. Journal of Geophysical Research-Planets, 2001, 106(E10): 23689-23722.
- [2] Malin M C, Edgett K S. Mars Global Surveyor Mars Orbiter Camera: interplanetary cruise through primary mission[J]. Journal of Geophysical Research-Planets, 2001, 106(E10): 23429-23570.
- [3] Christensen P R, Bandfield J L, Smith M D, et al. Identification of a basaltic component on the Martian surface from Thermal Emission Spectrometer data[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(E4): 9609-9621.
- [4] Ehlmann B L, Edwards C S. Mineralogy of the Martian surface[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2014, 42: 291-315.
- [5] 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.
- [6] Boynton W V, Taylor G J, Evans L G, et al. Concentration of H, Si, Cl, K, Fe, and Th in the low- and mid-latitude regions of Mars[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2007, 112(E12): n/a-n/a.
- [7] Mitrofanov I, Anfimov D, Kozyrev A, et al. Maps of subsurface hydrogen from the high energy neutron detector, Mars Odyssey[J]. Science, 2002, 297(5578): 78-81.
- [8] Byrne S, Dundas C M, Kennedy M R, et al. Distribution of mid-latitude ground ice on Mars from new impact craters[J]. Science, 2009, 325(5948): 1674-1676.
- [9] Bandfield J L. High-resolution subsurface water-ice distributions on Mars[J]. Nature, 2007, 447(7140): 64-67.
- [10] Acuna M H, Connerney J, Wasilewski P A, et al. Magnetic field and plasma observations at Mars: Initial results of the Mars Global Surveyor mission[J]. Science, 1998, 279(5357): 1676-1680.
- [11] Zuber M T, Solomon S C, Phillips R J, et al. Internal structure and early thermal evolution of Mars from Mars Global Surveyor topography and gravity[J]. Science, 2000, 287(5459): 1788-1793.

- [12] Jakosky B M, Lin R P, Grebowsky J M, et al. The Mars atmosphere and volatile evolution(MA-VEN)mission[J]. *Space Science Reviews*, 2015, 195(1-4): 3-48.
- [13] Smith M D. Interannual variability in TES atmospheric observations of Mars during 1999-2003[J]. *Icarus*, 2004, 167(1): 148-165.
- [14] Jakosky B M, Grebowsky J M, Luhmann J G, et al. Initial results from the MAVEN mission to Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(21): 8791-8802.
- [15] Bougher S, Jakosky B, Halekas J, et al. Early MAVEN Deep Dip campaign reveals thermosphere and ionosphere variability[J]. *Science*, 2015, 350(6261): d459.
- [16] Christensen P R. Water at the poles and in permafrost regions of Mars[J]. *Elements*, 2006, 2(3): 151-155.
- [17] Martin-Torres F J, Zorzano M, Valentin-Serrano P, et al. Transient liquid water and water activity at Gale crater on Mars[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(5): 357-361.
- [18] 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.
- [19] Council N R. An Astrobiology Strategy for the Exploration of Mars[Z]. Washington, D.C.: [s. n.], 2007.
- [20] McEwen A S, Ojha L, Dundas C M, et al. Seasonal Flows on Warm Martian Slopes[J]. *Science*, 2011, 333(6043): 740.
- [21] McEwen A S, Dundas C M, Mattson S S, et al. Recurring slope lineae in equatorial regions of Mars[J]. *Nature geoscience*, 2014, 7(1): 53-58.
- [22] Ojha L, Wilhelm M B, Murchie S L, et al. Spectral evidence for hydrated salts in recurring slope lineae on Mars[J]. *Nature Geoscience*. 2015, 8(11): 829-832.
- [23] Mumma M J, Villanueva G L, Novak R E, et al. Strong Release of Methane on Mars in Northern Summer 2003[J]. *Science*, 2009, 323(5917): 1041-1045.
- [24] Laskar J, Correia A, Gastineau M, et al. Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars[J]. *Icarus*, 2004, 170(2): 343-364.
- [25] Forget F, Haberle R M, Montmessin F, et al. Formation of glaciers on Mars by atmospheric pre-cipitation at high obliquity[J]. *science*, 2006, 311(5759): 368-371.
- [26] Schorghofer N. Dynamics of ice ages on Mars[J]. *Nature*, 2007, 449(7159): 192-194.
- [27] Grotzinger J P, Arvidson R E, Bell J F, et al. Stratigraphy and sedimentology of a dry to wet eolian depositional system, Burns formation, Meridiani Planum, Mars[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 240(1): 11-72.
- [28] Andrews-Hanna J C, Zuber M T, Arvidson R E, et al. Early Mars hydrology: Meridiani playa de-positos and the sedimentary record of Arabia Terra[J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 2010, 115.
- [29] Walter M R, Desmarais D J. Preservation of Biological Information in Thermal-Spring Deposits - Developing a Strategy for the Search for Fossil Life on Mars[J]. *Icarus*, 1993, 101(1): 129-143.
- [30] Segura T L, Toon O B, Colaprete A. Modeling the environmental effects of moderate-sized im-pacts on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 2008, 113(E11).
- [31] Steele A. Astrobiology Sample Acquisition and Return. White paper submitted to the Planetary Science Decadal Survey[Z]. Washington, D.C.: [s. n.], 2009.
- [32] Carr M H, Head J W. Oceans on Mars: an assessment of the observational evidence and possible fate[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, 108(5042): 127-143.
- [33] Arvidson R E, Ruff S W, Morris R V, et al. Spirit Mars rover mission to the Columbia hills, gusev crater: mission overview and selected results from the Cumberland Ridge to Home Plate[J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 2008, 113(E12).
- [34] 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.
- [35] Cantor B A, Kanak K M, Edgett K S. Mars Orbiter Camera observations of Martian dust devils and their tracks(September 1997 to January 2006) and evaluation of theoretical vortex models[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2006, 111(E12): n/a-n/a.
- [36] Basu S, Wilson J, Richardson M, et al. Simulation of spontaneous and variable global dust storms with the GFDL Mars GCM[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2006, 111(E9): 75-83.
- [37] Newman C E, Lewis S R, Read P L, et al. Modeling the Martian dust cycle. 1. Representations of dust transport processes[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2002, 107(E12): 6-1-6-18.
- [38] Hourdin F, Le Van P, Forget F, et al. Meteorological variability and the annual surface pressure cycle on Mars[J]. *Journal of the atmospheric sciences*, 1993, 50(21): 3625-3640.
- [39] Bibring J P, Langevin Y, Poulet F, et al. Perennial water ice identified in the south polar cap of Mars[J]. *Nature*, 2004, 428(6983): 627-630.
- [40] Clifford S M, Crisp D, Fisher D A, et al. The state and future of Mars polar science and explora-tion[J]. *Icarus*, 2000, 144(2): 210-242.
- [41] Levrard B, Forget F, Montmessin F, et al. Recent formation and evolution of northern Martian polar layered deposits as inferred from a Global Climate Model[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2007, 112(E6).
- [42] Laskar J, Levrard B, Mustard J F. Orbital forcing of the Martian polar layered deposits[J]. *Nature*, 2002, 419(6905): 375.
- [43] McEeese D J, Heavens N G, Schofield J T, et al. Structure and dynamics of the Martian lower and middle atmosphere as observed by the Mars Climate Sounder: Seasonal variations in zonal mean temperature, dust, and water ice aerosols[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2010, 115(E12): n/a-n/a.
- [44] Forget F, Montmessin F, Bertaux J, et al. Density and temperatures of the upper Martian atmos-phere measured by stellar occultations with Mars Express SPICAM[J]. *Journal of Geophysical Re-search: Planets*, 2009, 114(E1).
- [45] Schneider N M, Deighan J I, Jain S K, et al. Discovery of diffuse aurora on Mars[J]. *Science*, 2015, 350(6261): d313.
- [46] Andersson L, Weber T D, Malaspina D, et al. Dust observations at orbital altitudes surrounding Mars[J]. *Science*, 2015, 350(6261): d398.
- [47] Jakosky B M, Slipski M, Benna M, et al. Mars' atmospheric history derived from up-per-atmosphere measurements of ³⁸Ar/³⁶Ar[J]. *Science*, 2017, 355(6332): 1408-1410.
- [48] Lefevre F, Forget F. Observed variations of methane on Mars unexplained by known atmospheric chemistry and physics[J]. *Nature*, 2009, 460(7256): 720-723.
- [49] Silvestro S, Fenton L K, Vaz D A, et al. Ripple migration and dune

- activity on Mars: Evidence for dynamic wind processes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(20).
- [50] Hansen C J, Diniega S, Bridges N, et al. Agents of change on Mars' northern dunes: CO₂ ice and wind[J]. *Icarus*, 2015, 251: 264-274.
- [51] Hansen C J, Byrne S, Portyankina G, et al. Observations of the northern seasonal polar cap on Mars: I. Spring sublimation activity and processes[J]. *Icarus*, 2013, 225(2): 881-897.
- [52] Malin M C, Edgett K S. Evidence for persistent flow and aqueous sedimentation on early Mars[J]. *Science*, 2003, 302(5652): 1931-1934.
- [53] Wordsworth R D. The climate of early Mars[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2016, 44: 381-408.
- [54] Johnson S S, Mischna M A, Grove T L, et al. Sulfur-induced greenhouse warming on early Mars[J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 2008, 113(E8).
- [55] Forget F, Pierrehumbert R T. Warming early Mars with carbon dioxide clouds that scatter infrared radiation[J]. *Science*, 1997, 278(5341): 1273-1276.
- [56] Solomon S C, Aharonson O, Aurnou J M, et al. New perspectives on ancient Mars[J]. *Science*, 2005, 307(5713): 1214-1220.
- [57] Mustard J F, Murchie S L, Pelkey S M, et al. Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars reconnaissance orbiter CRISM instrument[J]. *Nature*, 2008, 454(7202): 305-309.
- [58] Carr M H. *The Surface of Mars*[J]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [59] Jakosky B M, Phillips R J. Mars' volatile and climate history[J]. *nature*, 2001, 412(6843): 237-244.
- [60] Osterloo M M, Hamilton V E, Bandfield J L, et al. Chloride-bearing materials in the southern highlands of Mars[J]. *Science*, 2008, 319(5870): 1651-1654.
- [61] Murchie S L, Mustard J F, Ehlmann B L, et al. A synthesis of Martian aqueous mineralogy after 1 Mars year of observations from the Mars Reconnaissance Orbiter[J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 2009, 114(E2): 0-6.
- [62] Ehlmann B L, Edwards C S. Mineralogy of the Martian surface[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2014, 42: 291-315.
- [63] Mustard J F, Murchie S L, Pelkey S M, et al. Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars Reconnaissance Orbiter CRISM instrument[J]. *Nature*, 2008, 454(7202): 305-309.
- [64] Tosca N J, McLennan S M, Clark B C, et al. Geochemical modeling of evaporation processes on Mars: Insight from the sedimentary record at Meridiani Planum[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 240(1): 122-148.
- [65] Tosca N J, McLennan S M. Chemical divides and evaporite assemblages on Mars[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 241(1-2): 21-31.
- [66] King P L, Mesween H Y. Effects of H₂O, pH, and oxidation state on the stability of Fe minerals on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2005, 110(E12): 10.1029/2005JE002482.
- [67] 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.
- [68] Morris R V, Ruff S W, Gellert R, et al. Identification of Carbonate-Rich Outcrops on Mars by the Spirit Rover[J]. *Science*, 2010, 329(5990): 421-424.
- [69] Christensen P R, Morris R V, Lane M D, et al. Global mapping of Martian hematite mineral de-posits: Remnants of water-driven processes on early Mars[J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 2001, 106(E10): 23873-23885.
- [70] Christensen P R, Wyatt M B, Glotch T D, et al. Mineralogy at Meridiani Planum from the Mini-TES experiment on the Opportunity Rover[J]. *Science*, 2004, 306(5702): 1733-1739.
- [71] Klingelhöfer G, Morris R V, Bernhardt B, et al. Jarosite and hematite at meridiani planum from opportunity's mössbauer spectrometer [J]. *Science*, 2004, 306(5702): 1740-1745.
- [72] McLennan S M, Bell J F, Calvin W M, et al. Provenance and diagenesis of the evaporite-bearing Burns formation, Meridiani Planum, Mars[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 240(1): 95-121.
- [73] Smith P H, Tamppari L K, Arvidson R E, et al. H₂O at the Phoenix landing site[J]. *Science*, 2009, 325(5936): 58-61.
- [74] 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[J]. *Science*, 2009, 325(5936): 64-67.
- [75] 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): c7575.
- [76] Stanley S, Elkins-Tanton L, Zuber M T, et al. Mars' paleomagnetic field as the result of a sin-gle-hemisphere dynamo[J]. *Science*, 2008, 321(5897): 1822-1825.
- [77] Stanley S, Elkins-Tanton L, Zuber M T, et al. Mars' paleomagnetic field as the result of a sin-gle-hemisphere dynamo[J]. *Science*, 2008, 321(5897): 1822-1825.
- [78] Golombek M, Grant J, Kipp D, et al. Selection of the Mars Science Laboratory landing site[J]. *Space Science Reviews*, 2012, 170(1-4): 641-737.
- [79] Fergason R L, Christensen P R, Kieffer H H. High - resolution thermal inertia derived from the Thermal Emission Imaging System(THEMIS): Thermal model and applications[J]. *Journal of Geo-physical Research: Planets*, 2006, 111(E12): 107-108.
- [80] Goudge T A, Mustard J F, Head J W, et al. Assessing the mineralogy of the watershed and fan deposits of the Jezero crater paleolake system, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2015, 120(4): 775-808.
- [81] Fassett C I, Head J W. Fluvial sedimentary deposits on Mars: Ancient deltas in a crater lake in the Nili Fossae region[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(14): 190-194.
- [82] Ehlmann B L, Mustard J F, Fassett C I, et al. Clay minerals in delta deposits and organic preserva-tion potential on Mars[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(6): 355-358.
- [83] Schon S C, Head J W, Fassett C I. An overfilled lacustrine system and progradational delta in Jezero crater, Mars: Implications for Noachian climate[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 67(1): 28-45.
- [84] 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): 382-385.
- [85] 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 Miner-als*,

- 2011, 59(4): 359-377.
- [86] 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.
- [87] Mustard J F, Ehlmann B L, Murchie S L, et al. Composition, morphology, and stratigraphy of Noachian crust around the Isidis basin[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, 114(E2).
- [88] Saper L, Mustard J F. Extensive linear ridge networks in Nili Fossae and Nilosyrtris, Mars: implications for fluid flow in the ancient crust[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(2): 245-249.
- [89] Ehlmann B L, Mustard J F. An in-situ record of major environmental transitions on early Mars at Northeast Syrtis Major[J]. *Geophysical research letters*, 2012, 39(11).
- [90] Ruff S W, Farmer J D, Calvin W M, et al. Characteristics, distribution, origin, and significance of opaline silica observed by the Spirit rover in Gusev crater, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(4): 287-296.
- [91] Ruff S W, Farmer J D. Evidence for an Alkali Chloride Hydrothermal System in the Columbia Hills, Mars[C]//Lunar & Planetary Science Conference, [S.l.]: [s.n.], 2016.
- [92] Carter J, Poulet F. Orbital identification of clays and carbonates in Gusev crater[J]. *Icarus*, 2012, 219(1): 250-253.
- [93] Board S S, National R C. Vision and voyages for planetary science in the decade 2013-2022[M]. [S. l.]: National Academies Press, 2012.
- [94] Huang J, Salvatore M R, Christensen P R, et al. Chlorides Predated Clay in a Lacustrine Environment on Mars and Its Astrobiology Application[Z]. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2015.
- [95] Plaut J J, Safaenili A, Holt J W, et al. Radar evidence for ice in lobate debris aprons in the mid-northern latitudes of Mars[J]. *Geophysical research letters*, 2009, 36(2): 349-363.
- [96] Christensen P R, Ruff S W. Formation of the hematite-bearing unit in Meridiani Planum: Evidence for deposition in standing water[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2004, 109(E8): 217-228.
- [97] Rogers A D, Aharonson O. Mineralogical composition of sands in Meridiani Planum determined from Mars Exploration Rover data and comparison to orbital measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2008, 113(E6): 2556-2572.
- [98] Grant J A, Irwin R P, Wilson S A, et al. A lake in Uzboi Vallis and implications for Late Noachian-Early Hesperian climate on Mars[J]. *Icarus*. 2011, 212(1): 110-122.
- [99] 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.
- [100] Farrand W H, Glotch T D, Rice J W, et al. Discovery of jarosite within the Mawrth Vallis region of Mars: Implications for the geologic history of the region[J]. *Icarus*, 2009, 204(2): 478-488.
- [101] Loizeau D, Mangold N, Poulet F, et al. Phyllosilicates in the Mawrth Vallis region of Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2007, 112(E8): 640-641.
- [102] Bishop J L, Dobra E Z N, Mckeown N K, et al. Phyllosilicate diversity and past aqueous activity revealed at Mawrth Vallis, Mars[J]. *Science*, 2008, 321(5890): 830-833.
- [103] Mckeown N K, Bishop J L, Noe Dobra E Z, et al. Characterization of phyllosilicates observed in the central Mawrth Vallis region, Mars, their potential formational processes, and implications for past climate[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, 114(E2): 337-343.
- [104] Grant J A, Irwin R P, Grotzinger J P, et al. HiRISE imaging of impact megabreccia and sub-meter aqueous strata in Holden Crater, Mars[J]. *Geology*, 2008, 36(3): 195-198.
- [105] Grant J A, Wilson S A. Late alluvial fan formation in southern Margaritifer Terra, Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(8): L08201.
- [106] Moore J M, Howard A D, Dietrich W E, et al. Martian layered fluvial deposits: Implications for Noachian climate scenarios[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(24): PLA6-1.
- [107] Mustard J F, Murchie S L, Pelkey S M, et al. Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars reconnaissance orbiter CRISM instrument[J]. *Nature*, 2008, 454(7202): 305-309.
- [108] Ehlmann B L, Mustard J F, Murchie S L. Geologic setting of serpentine deposits on Mars[J]. *Geophysical research letters*, 2010, 37(6): 53-67.
- [109] Ehlmann B L, Mustard J F, Swayze G A, et al. Identification of hydrated silicate minerals on Mars using MRO - CRISM: Geologic context near Nili Fossae and implications for aqueous alteration[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, 114(E2): 538-549.
- [110] 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.
- [111] Quantin C, Allemand P, Mangold N, et al. Fluvial and lacustrine activity on layered deposits in Melas Chasma, Valles Marineris, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2005, 110(E12): 4919-4934.
- [112] Dromart G, Quantin C, Broucke O. Stratigraphic architectures spotted in southern Melas Chasma, Valles Marineris, Mars[J]. *Geology*, 2007, 35(4): 363-366.

作者简介:

叶斌龙(1995-), 男, 本科, 主要研究方向: 行星地质学。

通信地址: 中国湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号中国地质大学(430000)

E-mail: blye@cug.edu.cn

赵健楠(1990-), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 月球与火星地貌学、矿物岩石学、年代学。主要侧重于行星火山作用、火星古湖泊、火星含水矿物和盐类矿物研究。

通信地址: 中国湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号中国地质大学(430000)

黄俊(1995-), 男, 博士, 副教授主要研究方向: 行星地质学。本文通讯作者。

通信地址: 中国湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号中国地质大学(430000)

E-mail: junhuang@cug.edu.cn

The Status of NASA Mars 2020 Rover Landing Site Selection and Some Thoughts on the Landing Part of China 2020 Mars Mission

YE Binlong^{1,2}, ZHAO Jiannan^{1,2}, HUANG Jun^{1,2*}

(1. Planetary Science Institute, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. State Key Lab for Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The important discoveries of Mars exploration in the past 20 years and the major unsolved questions on Martian life, climate and geology were reviewed. The scientific goals, payloads information and engineering constraints of the National Aeronautics and Space Administration (NASA) 2020 Mars mission were presented. In addition, the geologic characteristics of the top 8 candidate landing sites selected by hundreds of planetary scientists in three landing site selection workshops were described. Three candidate landing zones for China's 2020 Mars mission were proposed based on the different mission goals: 1) addressing key life, climate and geology questions; 2) resource reconnaissance for future human missions; 3) engineering demonstration.

Key words: Mars exploration; landing site selection; planetary geology; astrobiology; planetary climate

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]