

HUANG Wenbo, CAO Haijun, XIN Yanqing, ZENG Xiaojia, CHEN Jian, LIU Ping, SU Mingyu, ZHANG Ruize, QU Hongkun, SHI Erbin, LIU Changqing, XU Xuesen, LING Zongcheng, WU Xing. Progress in Mineral Exploration and Sample Collection by Perseverance Rover on Mars (2021–2024) (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(2): 288–309. CSTR:32142.14.cjss.2024-0119. DOI:10.11728/cjss2025.02.2024-0119

毅力号火星车矿物探测与样品采集进展 (2021—2024 年)*

黄文博¹ 曹海军² 辛艳青^{1,2}
曾小家² 陈 剑² 刘 平² 苏鸣宇²
张睿泽² 曲洪坤² 石二彬² 刘长卿²
许学森³ 凌宗成² 吴 兴⁴

1(山东大学澳国立联合理学院 威海 264209)

2(山东大学空间科学与技术学院/空间科学研究院 威海 264209)

3(国科大杭州高等研究院物理与光电工程学院 杭州 310024)

4(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气重点实验室 北京 100190)

摘 要 美国 NASA 毅力号 (Perseverance) 火星车于 2021 年 2 月 18 日在杰泽罗 (Jezero) 撞击坑 (18.4°N, 77.7°E) 成功着陆, 目前已运行近 4 年, 取得了丰富的科学发现和研究成果. 毅力号搭载的四台光谱载荷 (Super-Cam, Mastcam-Z, SHERLOC, PIXL) 为探测杰泽罗撞击坑表面物质成分和潜在的生命遗迹提供了丰富的数据, 有助于深入认识火星的物质成分、岩石成因及区域地质演化历史等. 本文系统综述了毅力号的科学探测进展, 重点介绍了其搭载的光谱载荷及在杰泽罗撞击坑内四个科学探索阶段 (包括撞击坑坑底、沉积扇边缘、沉积扇上部和撞击坑边缘) 的矿物探测进展, 并分析了毅力号火星车采集的不同类型样品组成特征及其潜在的科学价值. 研究结果可为中国天问三号火星探测和采样返回任务提供重要的科学参考.

关键词 火星, 毅力号, 杰泽罗撞击坑, 矿物, 火星样品

中图分类号 P185.3

Progress in Mineral Exploration and Sample Collection by Perseverance Rover on Mars (2021–2024)

HUANG Wenbo¹ CAO Haijun² XIN Yanqing^{1,2}

* 国家资助博士后研究人员计划项目 (GZC20231431), 国家重点研发计划项目 (2022YFF0711400), 中国科学院战略性先导科技专项 (XDB 41000000), 国家自然科学基金项目 (42430204, 42372277, 42404186) 和山东省自然科学基金项目 (ZR2021QD044) 共同资助

2024-09-20 收到原稿, 2024-11-07 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ZENG Xiaojia² CHEN Jian² LIU Ping² SU Mingyu²
 ZHANG Ruize² QU Hongkun² SHI Erbin² LIU Changqing²
 XU Xuesen³ LING Zongcheng² WU Xing⁴

1(*SDU-ANU Joint Science College, Shandong University, Weihai 264209*)

2(*School of Space Science and Technology and Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209*)

3(*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Hangzhou Institute for Advanced Study,
 University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024*)

4(*State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center,
 Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*)

Abstract NASA's Perseverance Mars rover successfully landed in Jezero crater (18.4°N, 77.7°E) on 18 February 2021, and has been operating for nearly four years (2021—2024). To achieve these goals, Perseverance is equipped with four spectrometric payloads: SuperCam, Mastcam-Z, Scanning Habitable Environments with Raman and Luminescence for Organics and Chemicals (SHERLOC) and Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry (PIXL), allowing for detailed elemental and mineral analyses of surface materials. Comprehensive analyses have been conducted across several key geological units within Jezero crater, including the crater floor, delta front, upper fan, and margin unit. Each area's unique mineral compositions have been documented, revealing important information on Mars' geological and environmental evolution. The results indicate that Jezero crater region has undergone multiple aqueous alteration processes, leaving mineral evidence of historical water activity. These findings suggest that the region, especially the west delta, was once exposed to prolonged aqueous environments, potentially providing insights into Mars' paleoclimate, water salinity and possible habitability. Using its Sampling and Caching Subsystem (SCS), Perseverance has collected 21 rock core samples from various geological units, including igneous rocks from the crater floor and sedimentary rocks from the delta. These samples will undergo detailed analyses on Earth, expected to yield valuable insights into Mars' magmatic evolution, sedimentary history, water-rock interactions, geological development, and potential biosignatures. In summary, the comprehensive data collected by Perseverance has expanded our understanding of Mars, particularly Jezero crater, and provides a foundational reference for future Mars exploration and sample return missions, including China's Tianwen-3 mission.

Key words Mars, Perseverance rover, Jezero crater, Mineral, Martian sample

0 引言

火星作为太阳系中的类地行星之一, 与地球具有高度相似的地质特征与宜居环境 (例如可能曾经拥有海洋、浓密大气、水循环过程等^[1]), 因此成为深空探测的主要目标之一. 火星探测的方式主要有环绕器、着陆器和巡视器 (火星车), 其中巡视器可搭载多种原位探测载荷, 能对火星表面的物质成分、表面环境、次表层结构等进行就位探测, 有助于深入理解火星的地质演化历史、环境演变、宜居性等重要科学问题, 并为地球科学研究提供重要的类比和参考.

火星探测任务的科学目标之一是揭示火星表面的物质成分分布特征, 其中矿物组成反映了火星表面的地质演化过程. 火星表面矿物探测主要包含轨道遥感和就位探测两种手段, 前者借助轨道器光谱载荷, 如热辐射光谱仪 (Thermal Emission Spectrometer, TES)、热辐射成像系统 (Thermal Emission Imaging System, THEMIS)、紧凑型侦察成像光谱仪 (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars, CRISM) 等, 通过光谱特征对矿物进行大范围探测和识别. 轨道遥感已探测到火星表面分布着层状硅酸盐、硫酸盐、氯盐、碳酸盐、水合二氧化硅等

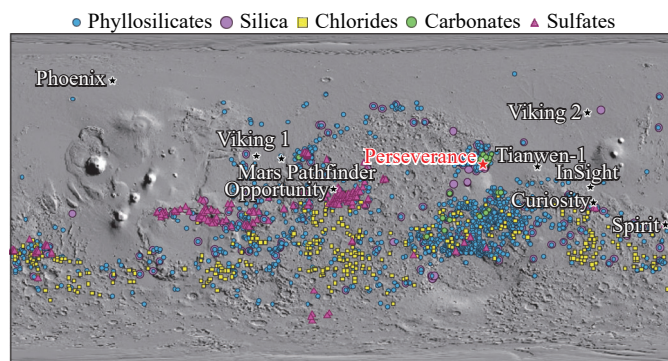


图1 火星表面含水矿物的全球分布. 五角星为已有火星着陆点位置

Fig. 1 Global distribution of the aqueous minerals on Mars with existing landing sites marked by pentagons

含水矿物, 主要分布在火星南部高地的撞击坑中央峰或溅射毯中 (见图1)^[2], 揭示了大规模的撞击作用挖掘出掩埋在浅表层的含水矿物. 就位探测方面, 火星车对巡视路线上不同地质单元中的岩石进行探测, 例如火星探路者号 (Mars Pathfinder) 分析了着陆点周围的圆形鹅卵石, 揭示古火星时期存在稳定的液态水^[3]; 勇气号 (Spirit) 和机遇号 (Opportunity) 火星车发现了多种火成岩和水流作用形成的层状沉积岩; 好奇号 (Curiosity) 火星车利用化学相机 (Chem-Cam) 和化学与矿物分析仪 (CheMin) 获得了盖尔撞击坑的沉积岩成分, 表明该区域曾是浅湖环境^[4,5]. 总体而言, 各类光谱和能谱分析手段在火星表面物质成分探测中尤为重要, 特别是在早期湖泊、河道、冲积洲等水相地貌和后期风化地貌中蚀变矿物的研究方面.

2020年7月中国成功发射天问一号火星探测器, 成功实现火星轨道飞行、着陆和巡视探测三大目标. 天问一号包括一个轨道器和一个着陆巡视器 (祝融号火星车). 其中祝融号在乌托邦平原行驶约1921 m, 获得了关于火星北部古海洋浅滩、近现代沙丘、水岩相互作用等重大科学问题的新认识^[6-13]. 同期, 美国发射了毅力号 (Perseverance), 包括一个火星车和小型直升飞机机智号 (Ingenuity). 毅力号的科学目标包括^[14,15]: 寻找古火星生命痕迹, 表征火星气候演化历史, 了解火星作为类地行星的起源和演化, 为未来的火星样品返回任务收集和储存样品, 为人类登陆火星进行技术验证. 本文系统介绍毅力号的着陆点——杰泽罗 (Jezero) 撞击坑及其搭载的光谱载荷, 概述毅力号在矿物学探测方面取得的主要成果, 并详细讨论火星样品采集的最新进展及其科学价值, 进而阐

述对中国火星探测任务的启示.

1 杰泽罗撞击坑

1.1 地质背景

毅力号火星车着陆在杰泽罗撞击坑, 该撞击坑直径约45 km, 位于火星赤道以北的Nili高原, 毗邻约39亿年前形成的Isidis盆地^[16]西部 (见图2a). 撞击坑直径-频率统计定年法揭示杰泽罗撞击坑的模式年龄为38.2~39.6亿年. 该撞击坑包含一系列火成岩、沉积岩和变质岩, 被认为是保存最完好的诺亚纪地质单元之一^[17,18]. 杰泽罗撞击坑有两个河道入口 (Neretva峡谷和Sava峡谷)、一个河道出口 (Pliava峡谷) 以及两个沉积扇 (西部和北部). 这些特征表明杰泽罗撞击坑曾是一个开放的古湖泊系统^[19-22].

毅力号着陆区地质单元可划分为撞击坑底部、沉积扇边缘、沉积扇、撞击坑边缘、Neretva峡谷和Nili高原 (见图2b)^[22]. 杰泽罗撞击坑坑底主要由一个富含辉石的暗色单元 (Cf-fr) 和一个富含橄榄石的浅色单元 (Cf-f-1) 构成^[23]; 撞击坑西部保存了一个完好的沉积扇, 从Neretva峡谷延伸而出 (见图2a), 可能形成于晚诺亚纪至早西方纪的湖泊系统^[19,21,24,25]; 西部沉积扇上部保存了完整且具有分支结构的曲线层状地貌, 这些特征很可能是古河流的遗迹. 此外, 沉积扇侵蚀陡坡内出露的分层沉积体进一步表明杰泽罗撞击坑曾发育了河流-三角洲系统^[21,24]; 杰泽罗撞击坑边缘主要由单一的边缘断裂单元构成, 其表面遍布粗糙的块状碎石, 以及出露、分层和断裂的角砾岩^[22]. 这些地质特征揭示了该地区与沉积扇截然不同的侵蚀历史.

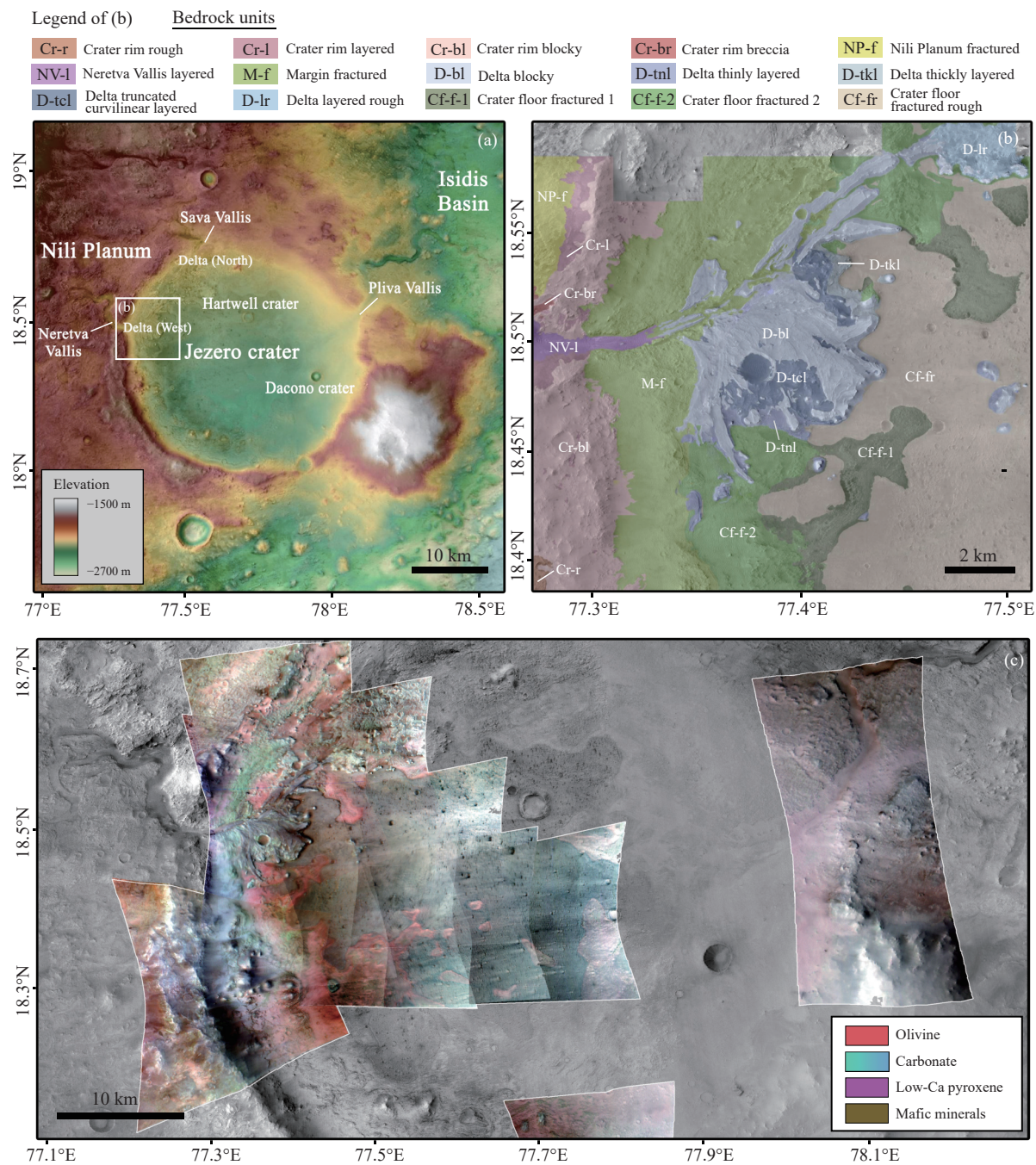


图 2 杰泽罗撞击坑的形貌与单元分类. (a) 高程图, 典型地质单元被标记, 白框代表 (b) 中的沉积扇单元; (b) 西部沉积扇单元的地质状况; (c) CRISM 绘制的矿物分布

Fig. 2 Topography and unit classification of Jezero crater. (a) Elevation map with typical geological units marked, the white box represents the delta shown in (b); (b) geological map of the delta (west); (c) mineral distribution map derived from CRISM

1.2 矿物分布

杰泽罗撞击坑的矿物组成复杂, 主要包含广泛分布于 Nili 高原及其邻近区域的 Fe/Mg/Al-粘土、碳酸盐、水合二氧化硅和蛇纹石等矿物, 这些矿物的存

在证实了该地区历史上曾有长期的液态水活动^[26-28]. 从宏观尺度看, 杰泽罗撞击坑所处区域的地表 (Nili 高原东北部) 包含三个主要的地质单元: 底层单元是火星表面最大的层状硅酸盐分布区之一^[29], 发育

了覆盖十万平方公里的富含 Fe/Mg 块状和层状硅酸盐的巨砾岩^[30,31]; 中间单元广泛分布着富含橄榄石和碳酸盐的蚀变玄武岩^[32,33], 在杰泽罗撞击坑边缘尤为显著 (见图 2c)^[23]; 高层单元则分布着富含镁铁质硅酸盐的盖岩^[22,34], 尤其集中在杰泽罗撞击坑底部、西部沉积扇和 Nili 高原的最上层, 这些盖岩将成为认识杰泽罗撞击坑地质形成和演化历史的新证据。

2 毅力号的任务与光谱载荷

毅力号火星车规划了为期三年 (约 1.5 个火星年) 的初步科学探索任务, 计划在杰泽罗撞击坑进行探测和采样活动, 活动区域包括撞击坑底部、西部三角洲边缘及其上部^[14]。截至 2023 年 9 月, 毅力号已经完成初步科学探索任务, 目前正穿越杰泽罗撞击坑, 探索撞击坑边缘及坑外的 Nili 高原, 拓展任务如图 2(a) 所示。

毅力号火星车搭载了 7 台科学载荷, 包含从远程成像到微米尺度的矿物识别, 能够对行驶路径上的岩石进行多尺度探测。远程探测光谱仪包括超级相机 (SuperCam) 和桅杆变焦相机 (Mastcam-Z), 近程探测光谱仪包括扫描适居环境的拉曼和荧光有机物与化学物质仪 (Scanning Habitable Environments with Raman and Luminescence for Organics and Chemicals, SHERLOC) 和 X 射线行星岩石化学分析仪 (Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry, PIXL)。这四台光谱载荷能够对火星岩石和土壤进行高精度的元素成分和矿物成分分析 (见图 3 和表 1)。此外, 毅力号还搭载了一套样品采集和储存系统 (Sampling and Caching Subsystem, SCS), 兼顾样品的原位探测和收集需求, 为未来火星样品返回任务提供支撑。在毅力号火星车开展科学任务期间, 其搭载的火星地下探索雷达成像仪 (Radar Imager for Mars's Subsurface Experiment, RIMFAX)、火星环境动力学分析仪 (Mars Environmental Dynamics Analyzer, MEDA)、火星制氧实验仪 (Mars Oxygen ISRU Experiment, MOXIE)、导航和避障相机也开展了科学分析和相关技术验证。而地外首架受控无人机——机智号 (见图 3), 在前三年已完成 72 次飞行任务, 为毅力号的任务开展提供协助^[35]。

2.1 远程探测光谱仪

SuperCam 由桅杆单元、主控单元和定标组件构

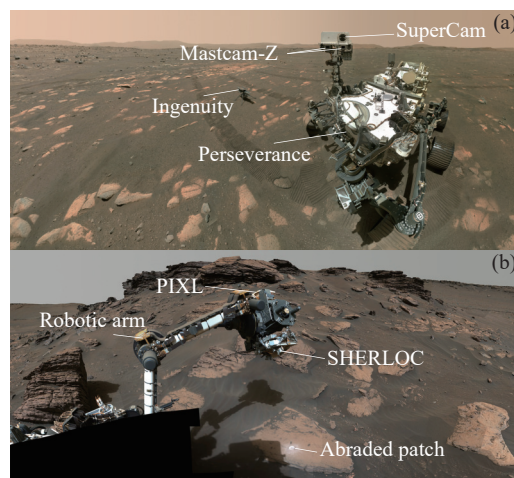


图 3 毅力号火星车及相关科学载荷. (a) 毅力号主体和机智号, (b) 毅力号机械臂和钻磨坑

Fig. 3 Perseverance rover and associated scientific payloads. (a) Perseverance rover and Ingenuity helicopter, (b) Perseverance's robotic arm and abraded patch

成, 为毅力号火星车提供多种远程探测技术: LIBS 数据的定量反演利用 23 个定标样品^[43,44] 获得了岩石和矿物的主量元素^[45] 和微量元素^[36]; 时间分辨拉曼和时间分辨荧光系统在激光脉冲激发样品后, 通过主控单元的光谱仪收集散射光谱, 同时其时间延迟门控技术能够较好地地区分拉曼散射信号和荧光信号^[46]; 可见-近红外光谱和高分辨率彩色成像是一种被动光谱技术^[37,47], 其中高分辨率彩色成像为研究毅力号行进路线上的岩石提供地质背景。在分析地质样品时, 毅力号通常先采用 LIBS 技术对探测目标进行分析, 去除表面尘土后再结合拉曼和可见-近红外光谱进行物质成分分析^[36]。LIBS 光斑直径为 0.2~0.45 mm, 其靶体的烧蚀面积远小于拉曼和可见-近红外光谱仪的探测范围, 对后续的矿物分析无影响^[48]。SuperCam 具备远程探测能力, 可以快速分析火星车周围的岩石成分, 评估是否需要后续进行 SHERLOC 和 PIXL 近程分析, 同时还能获得样品初步的矿物学信息。

Mastcam-Z 是一套多光谱、立体双成像系统, 包含火星车遥感桅杆上的两个变焦相机, 可获取宽带 (红/绿/蓝) 和窄带 (可见-近红外) 图像^[38]。Mastcam-Z 的观测值经过严格校准^[49,50]。登陆火星后的前 380 个火星日 (sol) 内, Mastcam-Z 收集的数据被总结为一个具有代表性的光谱数据库, 用于探测后续橄榄石、辉石和氧化矿物的分布区域^[51]。Mastcam-Z 是

表 1 毅力号火星车的光谱载荷与样品收集载荷
Table 1 Spectrometric and sample collection payloads of Perseverance rover

载荷类型	载荷名称	主要技术应用	主要技术指标	光谱/图像分辨率
远程探测光谱仪	超级相机 (SuperCam) ^[36,37]	激光诱导击穿光谱 (LIBS)	激发源: Nd-YAG 激光波长: 1064 nm 激光能量: >24 mJ 光斑直径: 250~450 μm 光谱范围: 244~853 nm 探测距离: 2~7 m	0.12 nm@244~342 0.12 nm@382~468 0.35 nm/11 cm ⁻¹ @535~620 <0.65 nm@620~712 <0.75 nm@712~853
		时间分辨拉曼和时间分辨荧光光谱 (TRR, TRL)	激发源: Nd-YAG 激光波长: 532 nm 激光能量: >9 mJ 光谱范围: 150~4400 cm ⁻¹ 探测距离: 2~7 m	<12 cm ⁻¹
		可见近红外反射光谱仪 (VISIR)	可见光: 透射和蓝紫色光谱仪 光谱范围: 0.39~0.85 μm 探测距离: 2 m~∞ 近红外: 声光可调滤光光谱仪 光谱范围: 1.3~2.6 μm 探测距离: 2 m~∞	0.15~0.65 nm <32 cm ⁻¹
		远程显微成像仪 (RMI)	红/绿/蓝图像 探测距离: 2 m~∞	<80 μrad
		桅杆变焦相机 (Mastcam-Z) ^[38]	多光谱立体成像 宽带红/绿/蓝图像 窄带可见-近红外图像 光谱范围: 400~1000 nm 探测距离: 0.5 m~∞	宽带: 283 μrad 窄带: 67.4 μrad
近程探测光谱仪	扫描适居环境的拉曼和荧光有机物与化学物质仪 (SHERLOC) ^[39,40]	拉曼光谱仪和荧光光谱仪 (Raman, Fluorescence)	激发源: 深紫外氦-铜激光 激光波长: 248.6 nm 激光能量: >14 μJ 光斑直径: 110 μm 拉曼光谱范围: 800~4000 cm ⁻¹ 荧光光谱范围: 275~354 nm 探测距离: 48 mm	<0.269 nm
		自动对焦环境成像仪 (ACI)	探测距离: 48 mm	10.1 μm·pixel ⁻¹
		用于操作和工程的广角地形传感器 (WATSON)	探测距离: 17.8 mm~∞	13.1 μm·pixel ⁻¹
		X射线行星岩石分析仪 (PIXL) ^[41]	激发源: 铯阳极X射线 激发能量: 28 keV X射线束斑直径: 120 μm 探测距离: 30 mm	160 eV FWHM@5.9 keV
		微观环境相机 (MCC)	探测距离: 25.5 mm	70 μm·pixel ⁻¹
样品收集载荷	样品采集与储存系统 (SCS) ^[42]	机械臂	长度: 2.2 m	
		转台	质量: 40.1 kg 直径: 75 cm	
		钻头	直径: 13 mm 长度: 70 mm 冲击频率: 23~40 Hz	
		自适应储存组件 (ACA)	容纳样本管数: 43	

一台远程成像光谱仪, 其立体全景成像功能为工作区提供了详细的地质背景, 有助于后续钻磨坑和采样位置的择定。

2.2 近程探测光谱仪

SHERLOC 是一台深紫外 (DUV) 拉曼和荧光光

谱仪, 安装在毅力号火星车的机械臂末端^[39]。在 DUV 激发下, 拉曼和荧光分别占据不同的光谱范围, 因此载荷能够同时获取拉曼光谱和荧光光谱^[52-54]。SHERLOC 主要使用两条瞄准线^[40,54]。第一条是光谱测量瞄准线, 利用自动对焦环境成像仪 (Autofocus

Context Imager, ACI) 获取目标焦点, 并与光谱仪精确对准 (偏移量约为 $150\text{ }\mu\text{m}$), 从而获得显微黑白影像和扫描数据. 第二条瞄准线是用于操作和工程的广角地形传感器 (Wide Angle Topographic Sensor for Operations and eNginneering, WATSON), 该载荷能获得从微观到无限远、带有纹理结构和颗粒特征的彩色背景影像.

PIXL 是一台微聚焦 X 射线荧光 (XRF) 光谱仪, 也安装在机械臂末端^[41]. 该载荷能够探测岩石的主量和微量元素含量, 并获得元素含量面分布. 分析地质样品时, 综合 SHERLOC 和 PIXL 数据能够获得更可靠的分析结果^[55]. PIXL 和 SHERLOC 的显微影像数据均可通过 Python 脚本处理, 利用 SHERLOC 的 WATSON 彩色图像进行影像配准和上色^[56].

2.3 钻磨和取样系统

毅力号火星车使用岩石钻磨工具 (Rock Abrasion Tool, RAT) 对工作区的岩石进行钻磨, 钻磨坑直径为 45 mm , 深度为 $8\sim 10\text{ mm}$. 钻磨工具去除上层风化层后, 通过压缩氮气脉冲^[42,57]清除钻磨坑中的灰尘和岩屑, 对新鲜暴露面进行分析.

SCS 由机械臂、转台、钻头以及自适应储存组件构成, 能够实现将岩石或风化层样品收集到单个超净无菌管中, 同时对每个样品进行拍照记录、评估和密封的功能^[42]. 毅力号共携带了 43 根样品管, 大部分用

于收集岩芯或风化层样品, 其中 5 根用于收集火星车产生的或从地球带来的颗粒污染物, 以检测火星样品的污染状态^[14], 还有一根用于收集火星大气. Beaty 等^[58]详细描述了毅力号任务中的样品采集与存储要求.

2.4 工作流程

为了协同上述科学载荷并合理有效地执行科学探索任务, 毅力号的标准工作方案 (Standardized Observation Protocol, STOP) 分为三步: 工作区记录、钻磨坑表征和样品分析. 取样和钻磨路径 (Sampling Sol Path, SSP) 按照每个火星日的顺序排列 STOP 和工程任务 (见图 4^[59]). 为了减少毅力号的科学探索和采样时间, 标准的 SSP 工作流程如下: 毅力号行驶到预定工作区, 对钻磨或取样目标进行成像, 钻磨后对钻磨坑进行近程光谱观测 (SHERLOC 和 PIXL), 然后钻取和处理岩芯 (或风化层) 样品, 对地质样品进行远程光谱观测 (SuperCam 和 Mastcam-Z), 最后驶离采样点. 在科学探索活动中, SSP 会根据任务进展、载荷性能、数据质量及工作区环境进行动态调整^[59].

3 毅力号矿物探测进展

2021 年 2 月 18 日, 毅力号从杰泽罗撞击坑底部

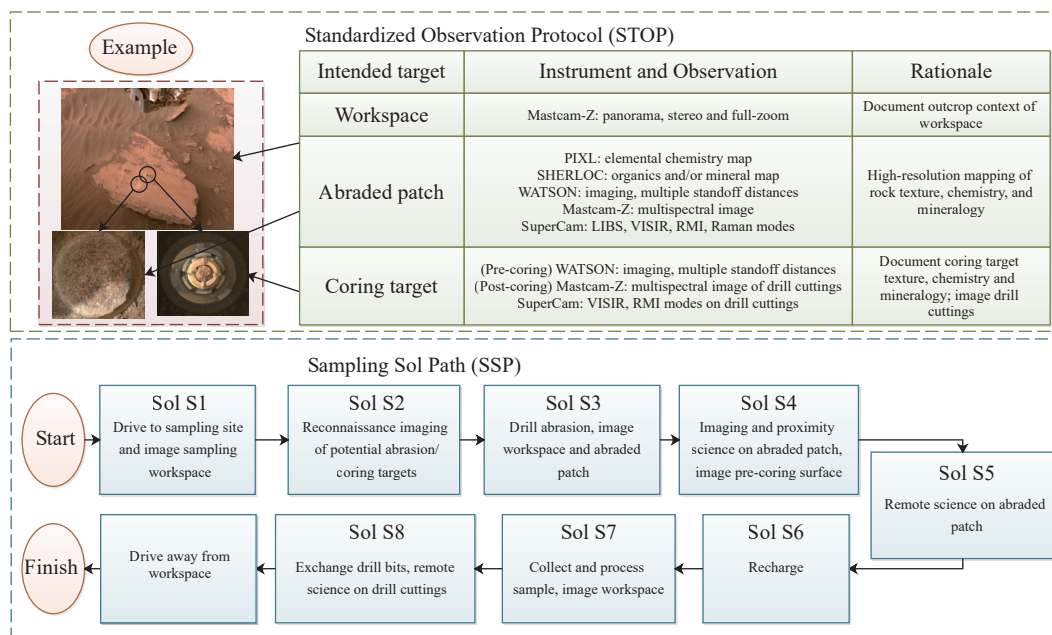


图 4 毅力号火星车的标准研究方案及取样和钻磨路径

Fig. 4 Standardized observation protocol and sampling sol path of Perseverance rover

(称为 Octavia E. Butler, OEB) 开始 (见图 5), 先后探索了撞击坑坑底 (sol 83~sol 370)^[60]、沉积扇边缘 (sol 415~sol 663)^[61]、沉积扇上部 (sol 708~sol 910)^[62] 和撞击坑边缘 (开始于 sol 910)^[63] 等四个地质



图 5 毅力号行驶路线. 橙色、绿色、蓝色、紫色点代表不同探索阶段毅力号的工作区位置

Fig. 5 Perseverance rover's traverse path, with orange, green, blue, and purple dots representing the workspaces during different scientific campaigns

单元. 截至 2024 年 6 月 29 日, 毅力号共收集了 21 个岩芯样品、2 个岩石表面风化碎屑样品和 1 个大气样品, 并对 24 块岩石进行钻磨分析, 这些钻磨坑或采集的样品均来自具有不同特征的块状或层状岩石表层.

3.1 撞击坑坑底

OEB 位于杰泽罗撞击坑底部两类火成岩单元的交界处 (见图 6^[60,66]), 其中一类火成岩单元富含橄榄石, 由侵入体、厚熔岩流或撞击熔体的分异作用形成, 称为 Séítah; 另一类火成岩单元由玄武岩、安山岩和火山碎屑组成, 富含辉石和斜长石, 称为 Máaz^[64-66]. 毅力号在该区域行驶了超过 5 km, 分析了 9 个地质样品和 7 个钻磨坑^[67,68].

在撞击坑坑底科学探索期间, 毅力号在地质样品和钻磨坑中识别出许多次生矿物, 包括碳酸盐、Fe/Mg-层状硅酸盐、无定形硅酸盐、Fe-硅酸盐、硫酸盐和高氯酸盐, 显示出多期次、复杂的水成蚀变过程^[55,56,69-73]. 虽然不同地质单元的侵蚀历史略有差异,

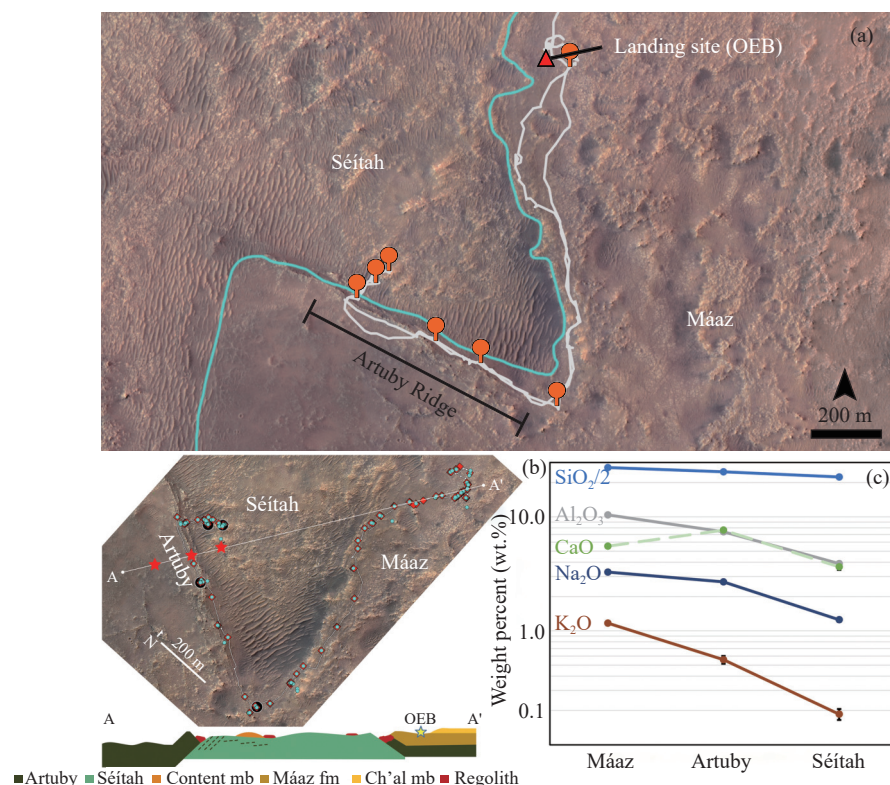


图 6 撞击坑坑底探索阶段. (a) 毅力号在撞击坑坑底的行进路线, 橙色点代表工作区位置; (b) Máaz, Séítah 和 Artuby Ridge 的地层截面; (c) SuperCam 探测结果绘制的元素组成变化趋势

Fig. 6 Crater floor campaign. (a) Perseverance rover's traverse path on the crater floor, with orange dots representing workspace locations; (b) stratigraphic cross-section of Máaz, Séítah, and Artuby Ridge; (c) elemental composition trends from SuperCam detection results

但总体上水蚀变过程可以分为三个阶段。

第一阶段主要是橄榄石的碳酸盐化。毅力号在 Séítah 单元中观测到橄榄石和碳酸盐的 Fe/Mg 比具有相似性^[71,73], 发现碳酸盐包裹了橄榄石颗粒及无定形硅酸盐广泛分布在橄榄石裂隙中, 表明碳酸盐和橄榄石的共生可能与富含 CO₂ 的流体有关 (见图 7^[73])。SuperCam 对 Séítah 单元的岩石分析表明, 部分橄榄石颗粒发生溶解, 并识别出了低钙或高钙辉石以及其他火成矿物 (例如斜长石、Cr/Fe/Ti-氧化物、磷酸盐), 证实 Séítah 单元的岩石经历了多期次的水岩相互作用^[74]。Máaz 单元的岩石富含 Fe/Mg-层状硅酸盐, 少量出露的碳酸盐富含铁, 这与 Séítah 单元中岩石发育的大量富镁碳酸盐不同, 表明两个单元的岩石经历了不同的流体蚀变过程^[69]。第二阶段是硫酸盐的形成。硫酸盐作为碳酸盐或层状硅酸盐形成后的蚀变矿物, 主要分布在 Séítah 和 Máaz 单元的岩石孔隙和裂缝中, 其成分表现出不同的 S/Cl 和 Ca/Mg/Fe 比例^[71,73]。硫酸盐中的铁离子主要来源于蚀变的原生硅酸盐, 而外来水体携带了 Mg, Ca, S, Cl 等可溶性元素, 因此蚀变产物中不同的元素比例表明两个单元的蚀变时间、流体成分和来源等均存在差异。第三阶段

是高氯酸盐的形成 (见图 8^[66])。高氯酸盐具有较高的溶解度和特殊的形成和保存机制, 因此其通常是最后形成的^[56,71]。Farley 等^[71] 认为杰泽罗撞击坑底部的高氯酸盐可能形成于亚马逊纪的短暂湿润期, 因为该时期流体的渗透和蒸发作用促使了高氯酸盐的快速结晶。此外, Tice 等^[73] 在 Séítah 单元的橄榄石中观测到较高的 Fe/Mg 比, 表明该区域的蚀变过程伴随有轻微的铁氧化。

综上所述, Máaz 和 Séítah 单元的岩石经历了多期次的蚀变, 出露的碳酸盐、Fe/Mg-层状硅酸盐、无定形硅酸盐和其他盐类 (包括硫酸盐和高氯酸盐) 表明杰泽罗撞击坑底部曾经发生了广泛的蚀变, 这些蚀变产物可能通常形成于低温和低水岩比的环境^[71]。毅力号重点探测了两单元的钻磨坑中的层状硅酸盐, 未发现高含量的铝^[71]。这可能是由于水成蚀变发生在封闭环境, 矿物中的易溶性元素 (例如 Ca, Na, K) 未迁移, 使得岩石成分不会过于单一。然而目前探测到的碳酸盐和 Fe/Mg-层状硅酸盐的含量较低 (几个 wt%^[72]), 大部分为无定形相^[56,69,73], 因此撞击坑坑底的主要岩石类型仍为火成玄武岩。

Máaz 和 Séítah 单元部分岩石表面分布着一种紫

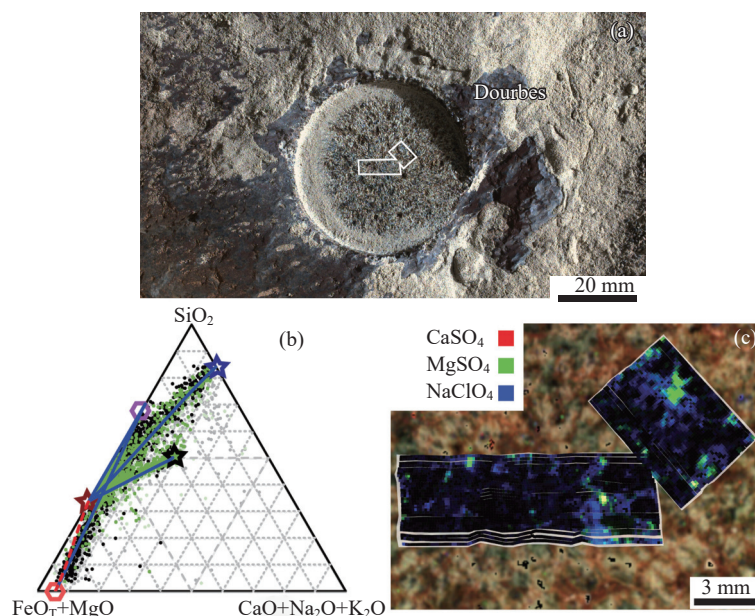


图 7 Séítah 单元的钻磨坑的 PIXL 探测结果. (a) Dourbes 钻磨坑及 PIXL 扫描区域; (b) 矿物分类三元图, 标注了主要 (星形) 和次要 (六边形) 矿物端元. 其中绿色为衍射点, 黑色为非衍射点; (c) 矿物分布

Fig. 7 PIXL detection results of abraded patch in Séítah. (a) Dourbes and PIXL scan area; (b) ternary diagram of mineral classification, with primary (star) and secondary (hexagon) mineral end-members marked, and green and black points indicate diffraction and non-diffraction, respectively; (c) mineral distribution

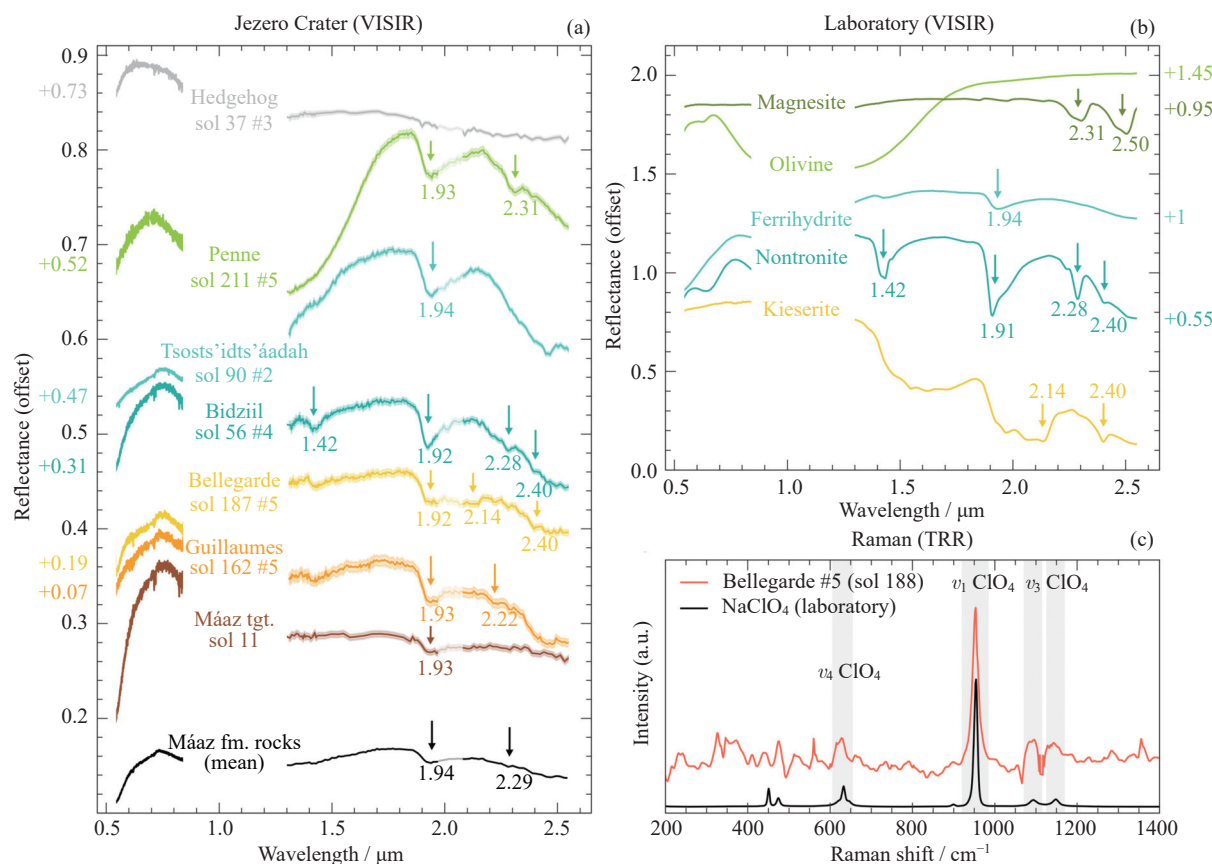


图 8 Mááz 或 Séítah 单元的钻磨坑和岩石表面的可见近红外和拉曼光谱. (a) 钻磨坑的可见近红外光谱, (b) 标准矿物的可见近红外光谱, (c) Bellegarde 钻磨坑中识别到的高氯酸钠拉曼光谱

Fig. 8 Visible-near infrared and Raman spectra of abraded patches and rock surfaces in Mááz or Séítah.

(a) Visible-near infrared spectrum of abraded patches, (b) visible-near infrared spectrum of standard minerals, (c) Raman spectrum of Na-perchlorate identified in Bellegarde

色漆层 (见图 7), Mastcam-Z 和 SuperCam 的多光谱成像也识别出该漆层^[51,75,76], 其成分与火星土壤相似且含水. Garczynski 等^[76]推测该漆层是粉尘颗粒在流体中胶结硬化形成的. 此外, SHERLOC 的荧光探测数据显示出强烈的芳香烃化合物信号^[77], 这些有机物信号暗示杰泽罗撞击坑可能存在生物标志物.

3.2 沉积扇边缘

完成撞击坑坑底的探索任务后, 毅力号绕过 Séítah 单元北部 (sol 379~414), 抵达西部沉积扇三角洲前缘的 Three Forks 区域 (见图 9^[61]), 开启了第二阶段的科学任务——探测沉积扇边缘. 沉积扇东南部陡坡下约 25 m 的沉积岩出露地层被称为 Shenandoah 组 (见图 5), 其沉积模式从砂岩为主的沉积扇环境过渡到广泛稳定的盐湖环境^[78]. 毅力号重点探索了沉积扇地层中海拔最低的两个出露区域, 分别为

Hawksbill Gap 和 Cape Nukshak. 截至 2023 年 1 月 1 日, 毅力号在沉积扇边缘地区共收集了 7 个岩芯样品和 2 个风化层样品 (见表 2), 获得了 6 个钻磨坑 (见图 10^[61]).

原位分析表明, 在 Hawksbill Gap 和 Cape Nukshak 观测到的碎屑岩通常由层状硅酸盐、赤铁矿、Ca-硫酸盐、Fe/Mg-硫酸盐以及可能的氯盐组成的细砂岩构成^[79-84]. 这些岩石中分布着含水矿物和不同成分的黏土矿物^[85]. 与粗粒度的砾岩不同, 粒径更小的黏土矿物和硫酸盐不仅能吸附有机物, 还可捕获有机物包裹体, 使其成为搜寻火星生命遗迹的理想探测目标.

在 Hawksbill Gap 单元, SuperCam 和 Mastcam-Z 数据揭示了大量 Fe/Mg-层状硅酸盐的出露^[80], 毅力号还探测到了结晶良好的赤铁矿信号^[83]. 该单元

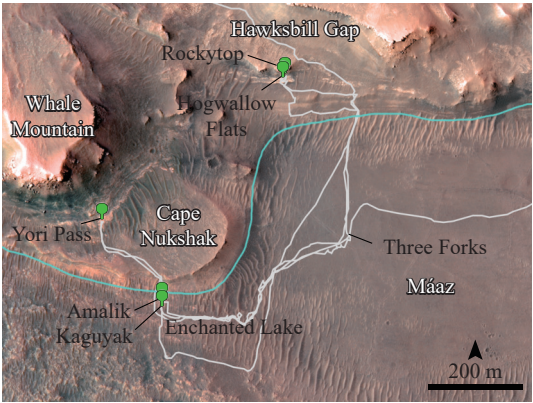


图 9 毅力号在沉积扇边缘的行进路线. 绿色点代表工作区位置

Fig. 9 Perseverance rover's traverse path on the delta front. Green dots represent the workspace locations

低洼处出露的岩石富含 SiO_2 和 Al_2O_3 , 亏损 FeO 和 MgO , 可能代表了蛭石或层状蛭石-蒙脱石混合物^[80]. Hogwallow Flats 和 Rockytop 单元的层状硅酸盐丰度远低于周边区域, 但也探测到了含水硫酸盐^[80]. 总体而言, Hawksbill Gap 单元出露了大量蚀变矿物, 例如蒙脱石、蛇纹石、Al-层状硅酸盐和 Fe/Mg-碳酸盐^[80,81,84]. 部分岩石表面的灰色漆层表明存在其他氧化物, 例如 MnO ^[86]. Cape Nukshak 单元的岩石 FeO 和 MgO 含量较高, 并探测到大量的原生矿物 (例如橄榄石、辉石)^[87]. Cape Nukshak 单元底部区域被称为 Enchanted Lake (见图 9^[61]), 可划分为富镁蛇纹石的 Amalik 区域^[87] 和富结晶赤铁矿的 Kaguyak 区域^[83]. 海拔高于这两个区域的是 Yori Pass 区域

表 2 毅力号采集的样品总览

Table 2 Overview of samples collected by Perseverance rover

序号	日期	火星日	样品名称	采集位置	当前位置	样品类型	样品长度/cm	岩石类型
1	2021-08-06	164	Roubion	Séítah北部	Three Forks	大气	—	—
2	2021-09-06	194	Montdenier	Artuby Ridge	Three Forks	岩芯	3.63	火成岩
3	2021-09-08	196	Montagnac	Artuby Ridge	毅力号	岩芯	3.72	火成岩
4	2021-11-15	262	Salette	Séítah南部	毅力号	岩芯	3.81	火成岩
5	2021-11-24	271	Coulettes	Séítah南部	Three Forks	岩芯	2.00	火成岩
6	2021-12-22	298	Robine	Séítah南部	毅力号	岩芯	3.69	火成岩
7	2022-01-31	337	Malay	Séítah南部	Three Forks	岩芯	1.86	火成岩
8	2022-03-07	371	Ha'ahóni	Octavia E. Butler	毅力号	岩芯	3.94	火成岩
9	2022-03-13	377	Atsá	Octavia E. Butler	Three Forks	岩芯	3.64	火成岩
10	2022-07-07	490	Swift Run	沉积扇边缘	毅力号	岩芯	4.06	沉积岩
11	2022-07-12	495	Skyland	沉积扇边缘	Three Forks	岩芯	3.55	沉积岩
12	2022-07-27	509	Hazeltop	沉积扇边缘	毅力号	岩芯	3.62	沉积岩
13	2022-08-03	516	Bearwallow	沉积扇边缘	Three Forks	岩芯	3.78	沉积岩
14	2022-10-02	575	Shuyak	沉积扇边缘	毅力号	岩芯	3.36	沉积岩
15	2022-11-16	619	Mageik	沉积扇边缘	Three Forks	岩芯	4.46	沉积岩
16	2022-11-29	631	Kukaklek	沉积扇边缘	毅力号	岩芯	3.01	沉积岩
17	2022-12-02	634	Atmo Mountain	沉积扇边缘	毅力号	风化层	3.21	沉积岩和火成岩
18	2022-12-07	639	Crosswind Lake	沉积扇边缘	Three Forks	风化层	3.21	沉积岩和火成岩
19	2023-03-30	749	Melyn	沉积扇上部	毅力号	岩芯	3.66	沉积岩
20	2023-06-23	832	Otis Peak	沉积扇上部	毅力号	岩芯	3.50	沉积岩
21	2023-09-15	913	Pilot Mountain	沉积扇上部	毅力号	岩芯	3.64	沉积岩
22	2023-09-25	923	Pelican Point	撞击坑边缘	毅力号	岩芯	3.70	沉积岩
23	2023-10-21	949	Lefroy Bay	撞击坑边缘	毅力号	岩芯	2.85	沉积岩
24	2024-03-12	1088	Comet Geyser	撞击坑边缘	毅力号	岩芯	3.50	二氧化硅胶结碳酸盐

注 第一个样品库位于Three Forks (沉积扇边缘, 见图9). 毅力号共携带43个样品管, 其中38个用来收集样品 (岩芯、风化层、大气), 5个用来监测样品的污染状态.

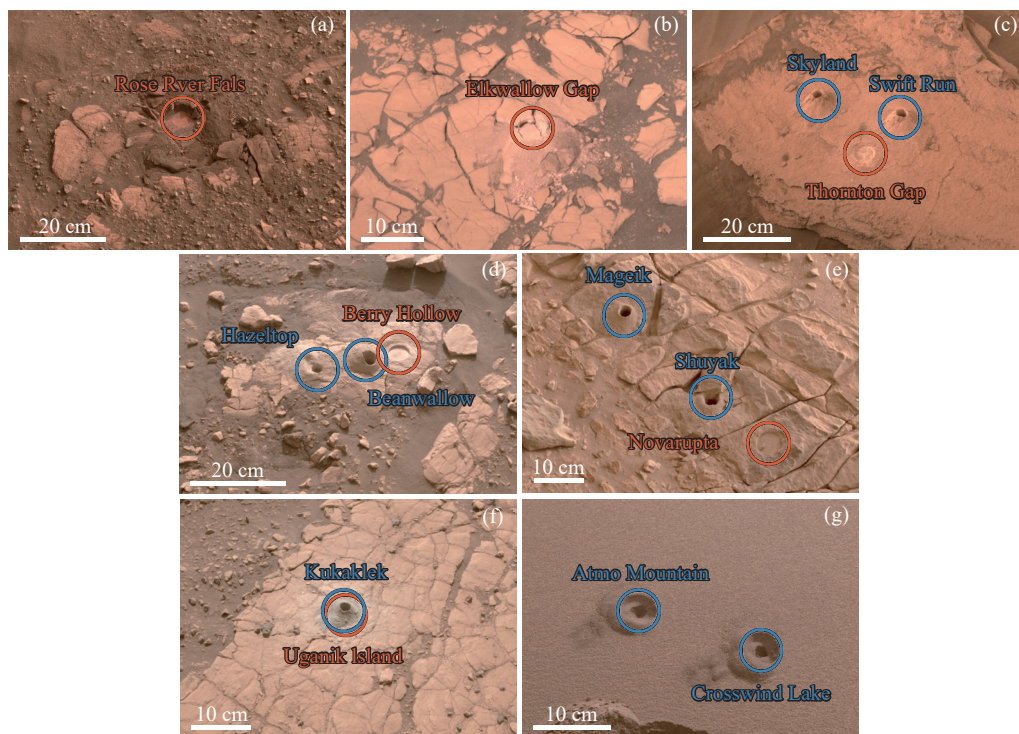


图 10 沉积扇边缘的钻磨坑 (红色) 和采样位置 (蓝色)

Fig. 10 Abraded patches (red) and sampling locations (blue) on the delta front

(见图 9), 其矿物成分与同一海拔的 Hogwallow Flats 区域相似^[80,83], 表明这两个单元可能来源于同一沉积体. 综上所述, Hawksbill Gap 和 Cape Nukshak 单元的主要矿物大致相同 (尤其是 Yori Pass 和 Hogwallow Flats), 表明两者可能形成于同一沉积时代, 但 Hawksbill Gap 单元中并未形成与 Enchanted Lake 单元海拔一致的区域 (见图 9), 这表明 Hawksbill Gap 单元的风化程度可能强于 Cape Nukshak 单元.

综上所述, 由于较大的高程落差, 两个区域均表现出水成蚀变和成岩作用的特征. 然而, 不同于杰泽罗撞击坑坑底, 毅力号在沉积扇的钻磨坑和样品中还观察到大量的浅色矿脉, 其主要分布于 Hogwallow Flats 和 Yori Pass 单元的岩石中^[82,88] (见图 11^[88]). 这些浅色矿脉可能由硫酸钙和 Fe/Mg-硫酸盐的混合胶结物组成^[82,88,89]. SuperCam 的探测结果显示, 部分硫酸钙可能是 II 型多晶硬石膏^[90]. 这些硫酸盐矿脉的成因涉及多种因素, 包括地表径流的蒸发作用和地下水体的淋滤、蚀变作用^[88]. 此外, 毅力号在沉积扇边缘的一些富铝岩石中还发现了大量 Ni 和 Cr^[91], 这表明火星表层下部可能存在镍铜富集.

3.3 沉积扇上部

2023 年 2 月 15 日 (sol 708), 毅力号开始探索沉积扇上部. 到 2023 年 9 月 11 日 (sol 910), 毅力号已穿越沉积扇, 抵达杰泽罗撞击坑边缘 (见图 12^[62]). 沉积扇地层表面主要由粗粒的河流三角洲沉积物组成, 地面构造特征显示出古河流的痕迹, 表明该区域曾经存在一个持续的地表径流水体环境^[24,62,92,93]. 在约 8 个月的科学探索中, 毅力号共计采集 3 个砂岩或砾岩样品, 分析了 7 个钻磨坑 (见图 13^[62]).

从沉积扇边缘到上部, 砂岩或砾岩中的橄榄石、碳酸盐矿物和二氧化硅含量逐渐升高, 而 Mg/Fe-硫酸盐和蛇纹石类矿物的含量略微减少^[94], 这种趋势反映出沉积扇的演化程度逐渐降低. 橄榄石贡献了大量的镁离子, 这些矿物与水体相互作用形成了大量的可溶性富镁碳酸盐和硫酸盐^[94], 这揭示了沉积扇区域可能曾经经历一个湿润的间歇期, 致使水体反复填充杰泽罗湖泊系统.

在沉积扇上部, 毅力号首先抵达 Tenby 区域, 该区域位于曲线层状单元 (见图 2b), 抗侵蚀的浅色砂岩和隐性的深色粗粒层交替分布^[22]. Tenby 区域的样品和钻磨坑普遍富含蚀变的硅酸盐 (可能是橄榄石、

长石) 和富 Mg, Fe, Ca 的碳酸盐颗粒^[62,95]. Belva 撞击坑西侧 (Powell Peak 和 Echo Creek; 见图 12) 的矿物组成与 Tenby 区域相近, 但包含更多的辉石颗粒和富铝、硅的碎屑^[83,94] (见图 14^[83]). 相比沉积扇边缘, Tenby 区域和 Belva 撞击坑西侧的岩石发育的铁氧化物较少 (见图 14), 表明后者的氧化程度更低^[83]. 总体而言, 不同区域岩石的矿物组成差异可能源于不同时期径流的反复填充沉积, 同时也可能跟河流干涸后的氧化还原环境的变化有关.

随后, 毅力号途经 Boulder Field 区域 (见图 12),

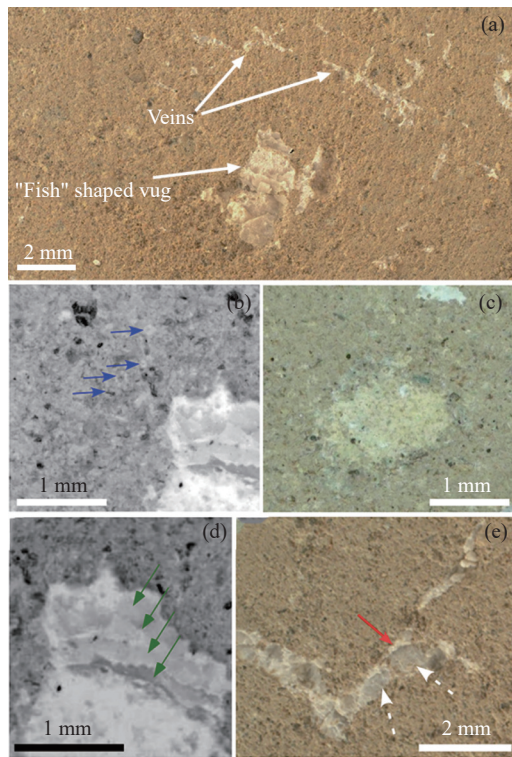


图 11 Yori Pass 的钻磨坑 (Uganik Island). (a) 浅色矿脉, 白色箭头标注; (b) 等粒胶结物, 蓝色箭头标注; (c) 内碎屑; (d) 鱼形的层状斑块, 绿色箭头标注; (e) 两个硫酸钙脉, 红色箭头指向第一代矿脉, 虚线白色箭头指向二期改造矿脉

Fig. 11 Abraded patch at Yori Pass (Uganik Island).

(a) Light-colored vein, marked by a white arrow;
(b) equigranular cement, marked by a blue arrow;
(c) intraclasts identified; (d) fish-shaped laminated patch, marked by a green arrow; (e) two Ca-sulfate veins, with the red arrow pointing to the first-generation of cement and the dashed white arrow pointing to the second generation of vein-filling cement

大量厘米至米级的岩石随处可见, 如图 13 所示. SuperCam 的 LIBS 和可见近红外光谱将这些岩石分为两类, 一类富含橄榄石^[96], 另一类富含辉石^[97]. 前者保留了火成矿物特征, 而次生矿物较少, 主要由富铁、镁的粘土和碳酸盐组成, 可能是从 Neretva 峡谷河流区域的富橄榄石-碳酸盐岩 (见图 2) 迁移至此^[17,23]. 富橄榄石的岩石地势远高于撞击坑坑底 Séítah 单元的橄榄石堆积物, 证实了两者的沉积次序^[96]. 至于富辉石的岩石, 与撞击坑底部 Máaz 和 Séítah 单元中富含矿物的火成岩相比, 这些岩石的矿物组成更单一^[66,69,72], 因此这些富辉石的巨石可能是毅力号遇到的最原始岩石之一, 对理解杰泽罗撞击坑的演化历史具有重要意义. 毅力号向西行驶至 Dream Lake 和 Willow Park 区域 (见图 12), 这些区域多含分选性较差的颗粒状砂岩、碳酸盐和硅酸盐岩 (橄榄石、辉石和长石)^[62], 还存在少量硫酸盐、二氧化硅、Fe/Ti/Cr-尖晶石碎屑^[95]. 此外, 在沉积扇上部富含碳酸盐的岩石中还发现了磷酸盐, Kizovski 等^[98] 将其识别为品质磷酸铁, 可能代表从高度演化的岩浆-热液系统 (例如花岗岩) 中结晶出的原始火成岩相, 或形成于富钙磷酸盐的超镁铁岩风化过程.

3.4 撞击坑边缘

2023 年 9 月 11 日 (sol 910), 毅力号进入撞击坑边缘单元 (见图 15^[63]). 该单元呈现出较强的碳酸盐信号, 其可能是一个富含自生湖相碳酸盐沉积单元^[23]. 截至 2024 年 6 月 29 日 (sol 1195), 毅力号已从撞击坑边缘单元收集了 3 个样品^[99], 分析了 5 个钻

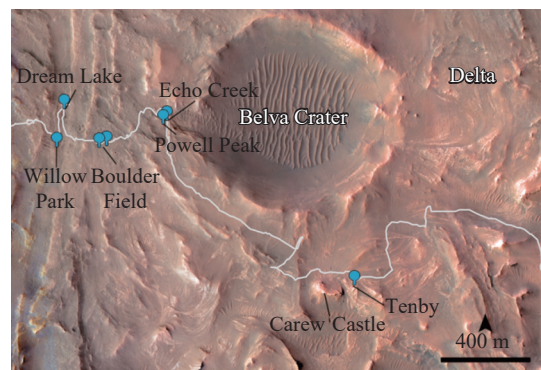


图 12 毅力号在沉积扇上部的行进路线. 蓝色点代表工作区位置

Fig. 12 Perseverance rover's traverse path in the upper fan, with blue dots representing the workspace locations

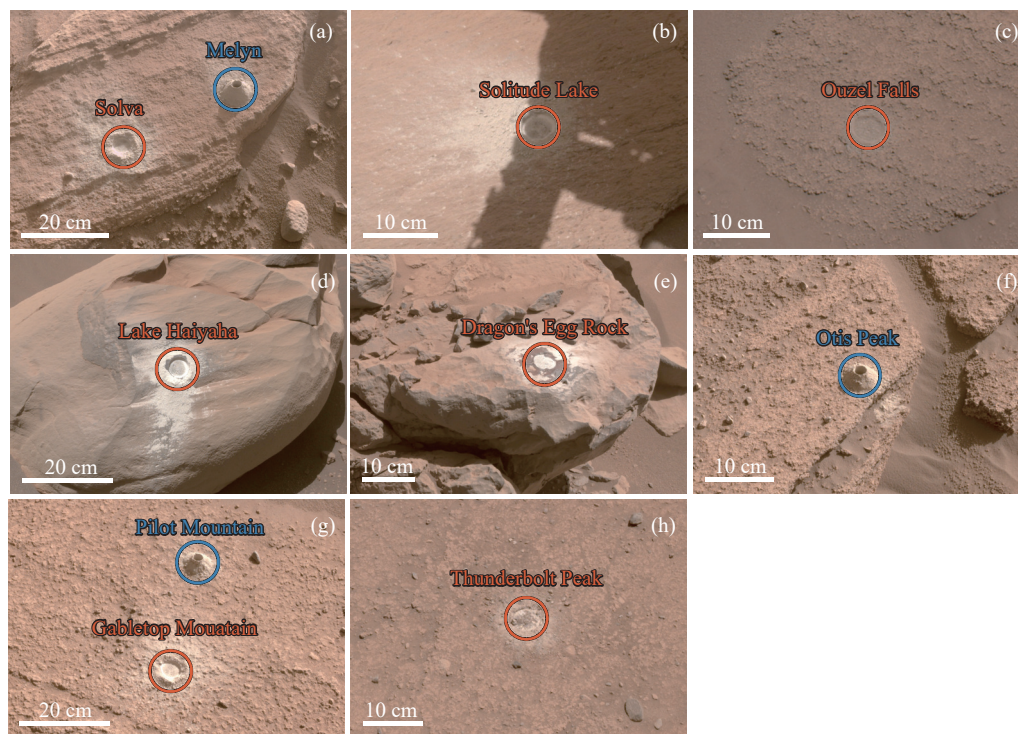


图 13 沉积扇上部的钻磨坑 (红色) 和采样位置 (蓝色)

Fig. 13 Abraded patches (red) and sampling locations (blue) on the upper fan

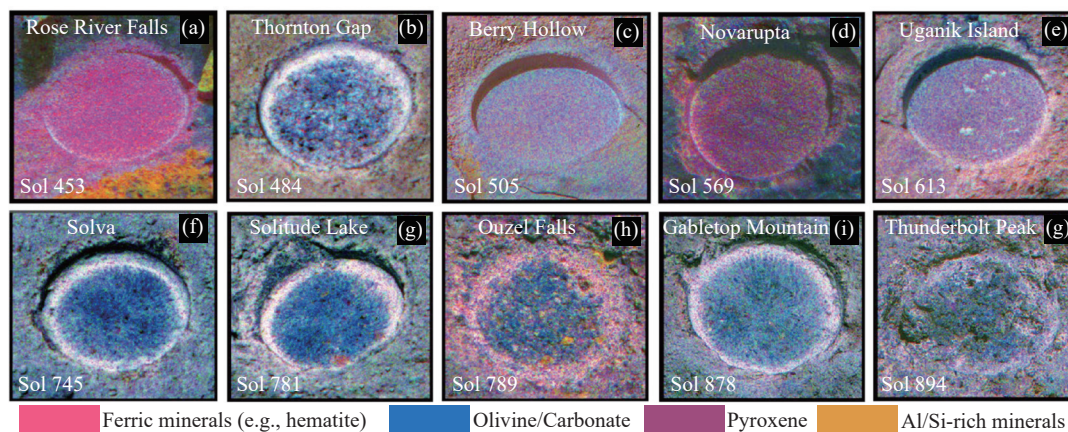


图 14 沉积扇边缘 (第一行) 和沉积扇上部 (第二行) 钻磨坑的多光谱图. (a)~(c) 在 Hawksbill Gap; (d)~(e) 在 Cape Nukshak; (f)~(j) 分别在 Tenby, Echo Creek, Powell Peak, Dream Lake 和 Willow Park

Fig. 14 Multispectral images of abraded patches at the delta front (first row) and the upper fan (second row).

(a)~(c) at Hawksbill Gap; (d)~(e) at Cape Nukshak; (f)~(j) at Tenby, Echo Creek,

Powell Peak, Dream Lake, and Willow Park, respectively

磨坑.

毅力号从沉积扇“扇柄”处的 Mandu Wall 区域进入撞击坑边缘单元 (见图 15). 火星轨道遥感数据显示, 边缘单元东部具有较强的橄榄石信号^[23], 而且分布有大量分层和碎屑结构, 表明东部更可能形成于

沉积过程^[100]. 毅力号在 Mandu Wall 和 Turquoise Bay 区域先后采样和钻磨. Mastcam-Z 和 Super-Cam 获得的这两个区域的岩石光谱, 显示其主要蚀变矿物是橄榄石、Fe/Mg-碳酸盐岩和水合二氧化硅^[101,102]. 此外, 一些砂质风化带也显示出强烈的碳酸



图 15 毅力号在撞击坑边缘的行进路线。
紫色点代表工作区位置

Fig. 15 Perseverance rover's traverse path on the margin unit. Purple dots represent the workspace locations

盐特征^[102], 可能与杰泽罗撞击坑水位最高时期的沉积作用有关. 总体而言, 边缘单元的层状硅酸盐信号较弱, 而碳酸盐与水合二氧化硅的特征明显且同时出现^[63,102]. 圆形颗粒和胶结物中的碳酸盐和二氧化硅特征与地球的三角洲环境非常相似, 具有保存生命遗迹的可能. 此外, 除了零散分布的橄榄石和碳酸盐颗粒, PIXL 和 SHERLOC 还识别出少量的辉石、长石、Fe/Ti-氧化物, 以及类似于在前三个探索时期识别到的水合硫酸盐和氯盐^[99]. 其矿物组成与蚀变玄武岩一致^[99], 可能与河流上游的 Nili 高原带来的熔岩碎屑或者杰泽罗坑底的火成岩单元相关联.

3.5 矿物探测成果

近 4 年来, 美国毅力号火星车协同运用四台光谱载荷和样品采集与储存系统, 系统分析了杰泽罗撞击坑坑底、沉积扇和坑边缘的矿物, 进一步加深了人类对火星杰泽罗撞击坑从源到汇的沉积及侵蚀历史的认识. 研究成果如下.

(1) 撞击坑坑底. 橄榄石堆积的 Séítah 单元位于独立的熔岩流沉积的 Máaz 单元之下, 两者的岩石露头显示出多期的水成蚀变过程. 次生矿物包括碳酸盐、富铁镁的层状硅酸盐、无定形硅酸盐、富铁硅酸盐、硫酸盐、高氯酸盐和磷酸盐. 碳酸盐可能由原位橄榄石碳酸化形成, Séítah 和 Máaz 区域的碳酸盐具有不同类型的阳离子, 表明其经历了不同的蚀变历史. 填充在岩石孔隙和裂缝中的硫酸盐和高氯酸盐可能形成于亚马逊纪. 此外, 部分岩石表面可能分布着由粉尘胶结硬化形成的紫色漆层和有机物 (芳香烃化合物信号).

(2) 沉积扇边缘. 沉积扇东南部边缘的沉积岩地层包括 Hawksbill Gap 单元和 Cape Nukshak 单元, 分布着大量沉积碎屑岩, 光谱特征以层状硅酸盐、赤铁矿、硫酸钙、硫酸铁/镁以及可能的氯盐为主. 然而, Hawksbill Gap 单元岩石中的次生矿物更多, Cape Nukshak 单元岩石中的原生矿物更多. 两个单元存在同时期形成的沉积体区域, 都含有大量浅色矿脉, 可能是地下水主导产生的硫酸钙或硫酸铁/镁.

(3) 沉积扇上部. 沉积扇地层表面主要由粗粒度的砂岩和砾岩组成, 蜿蜒起伏的地表沉积体表面曾经存在过错综复杂的地表径流. 从“扇缘”到“扇柄”, 橄榄石、碳酸盐、二氧化硅、Mg/Fe-硫酸盐和蛇纹石类矿物的含量呈上升趋势, 反映了沉积扇单元演化程度逐渐降低. “扇柄”的 Boulder Field 地区以富含橄榄石和辉石的巨石为主, 可能与 Neretva 峡谷源头和 Séítah 的富橄榄石岩石有关.

(4) 撞击坑边缘. 湖相碳酸盐边缘沉积单元与地球上的三角洲环境非常相似. 现有研究表明, 该区域的岩石光谱特征以橄榄石、Fe/Mg-碳酸盐岩和水合二氧化硅为主, 而辉石、长石、Fe/Ti-氧化物、水合硫酸盐和氯化物为次. 总体特征与蚀变玄武岩一致, 其成因仍需进一步研究.

撞击坑坑底的岩石主要为火成岩, 伴随多期水成蚀变特征. 沉积扇边缘、沉积扇上部及撞击坑边缘的岩石则以沉积岩为主. 这四者在空间上共同构成了古火星撞击坑湖盆的完整沉积系统. 此外, 在穿越整个沉积扇到达杰泽罗撞击坑边缘的过程中, 毅力号还取得了许多重要发现, 包括从大量岩芯样品中发现的钛磁铁矿或 Fe/Ti/Cr-尖晶石^[103] 和从沉积扇上发现的富铝浅色浮岩 (含尖晶石, 可能是蚀变最严重的岩石)^[104]. 截至目前, 毅力号仍在继续探测, 于 2024 年 6 月 29 日抵达 Bright Angel 区域 (见图 15). 未来, 其将沿 Neretva 峡谷持续向西攀登至 Nili 高原, 继续评估和收集更多具有科学价值的样品.

4 采集样品的科学价值

火星返回样品不仅是揭示火星地质与环境演变的关键, 还为探索火星生命遗迹提供了重要的科学数据, 其科学目标主要包括^[58]: 理解火星表面的地质过程, 重建火星内部的结构和演化过程, 定量约束火星

的演化时间,评估火星潜在的生命遗迹等。截至2024年6月29日(sol 1195),毅力号已收集21个原位岩石露头样品、2个岩石表面风化碎屑样品和1个大气样品(见表2),并将其中9个样品存储在首个火星返回样品库,放置于Three Forks地区(见图9)。尽管毅力号搭载的光谱载荷能够揭示火星样品的部分矿物成分信息,但将这些样品带回地面实验室进行更为详尽的分析将解锁目前尚无法获取的深层信息,包括精确的化学成分、同位素比例、矿物微观形态等,从而极大增进人们对火星水资源、碳循环、氧化还原状态及气候演变过程的理解。针对毅力号火星车采集的不同类型样品,其潜在科学价值如下。

(1) 揭示杰泽罗撞击坑区域岩浆演化过程。8个火成岩样品均来自撞击坑底部(见表2)。毅力号发现大量潜在的蚀变火成岩^[64-66],通过分析其结晶年龄,可以约束西部沉积扇甚至整个杰泽罗湖盆系统的形成时间^[105],揭示杰泽罗坑底的样品类型(例如火星地幔岩石)和撞击程度。此外,通过对比火星返回样品与火星陨石,也可以获得更多关于杰泽罗撞击坑的地质信息。

(2) 认识杰泽罗撞击坑沉积历史。12个沉积岩样品来自沉积扇区域(见表2)。对沉积扇样品的实验室研究将有助于揭示火星表面从源到汇的沉积系统和沉积扇区域的水文历史。具体来说,通过分析蚀变矿物的结构和矿物组成,例如确定Otis Peak样品(见表2)中的富铁磷酸盐类型,判断其是碎屑成因还是原位形成^[98];通过研究Pelican Point和Lefroy Bay样品(见表2)中的二氧化硅和碳酸盐胶结物,分析流体的化学特征(pH、Eh、盐度等)及其来源^[99];综合火星返回样品的实验室分析将揭示早期火星的温度变化趋势及层状硅酸盐的成因(近地表风化与撞击作用的热液活动)。

(3) 揭示杰泽罗撞击坑水岩相互作用。目前,杰泽罗撞击坑具备形成硫酸盐、高氯酸盐和氯化物的环境条件,当夜间温度降至190 K以下时,地表水活度迅速降低,近地表水分子凝结成霜^[106]。因此,蚀变矿物中的含水量至关重要。硫酸盐是重要的水载体,已被证实的包括撞击坑坑底的水合硫酸镁中含有3~5个结晶水^[107]、沉积扇边缘的水合硫酸镁以及沉积扇上部的水合硫酸钙中含有1~2个结晶水^[108],这有助于理解火星表面水的分布和循环。此外,样品中共生的

碳酸盐岩和橄榄石也指示了水岩相互作用,为深入认识早期火星地表水与地壳相互作用提供更多信息^[109]。

(4) 提示杰泽罗撞击坑地质年代演化历史。通过精确测定火星返回样品的年龄,结合采样点的地层分布特征,进一步理解杰泽罗撞击坑的地质年龄。杰泽罗撞击坑底部经历了复杂的地质过程,Quantin-Nataf等^[110]通过遥感数据建立了初步的撞击模型,再结合撞击坑底部样品的研究,可以准确约束撞击坑的形成年龄。此外,Neretva峡谷河流区域(见图2c)的富橄榄石和碳酸盐的岩石^[17,23]、沉积扇上部(见图12)的富橄榄石和碳酸盐的巨石^[96]以及撞击坑底部(见图6)的富橄榄石Séítah单元^[65,66]的地质年龄相关性,也需要返回样品的分析进一步佐证。

(5) 评估杰泽罗撞击坑生命遗迹潜力:地球上的沉积三角洲适宜生命生存,在其岩石和矿物中发现了大量潜在的生命标志物,进一步凸显杰泽罗撞击坑采集样品的重要性。在毅力号的原位分析中,沉积扇边缘Hawksbill Gap地区(见图9)的样品(Swift Run, Skyland, Hazeltop, Bearwallow)颗粒尺寸较小,富含黏土矿物和硫酸盐,能够捕获并保存流体和有机包裹体^[88],有很大概率发现有机质^[85]。此外,沉积扇上部和撞击坑边缘也可能发现潜在的生物遗迹,岩石中的大量沉积胶结物和各种蚀变的岩屑也能保存潜在有机质等生命必需物质^[95,99]。

5 对中国火星探测的启示

5.1 优势与经验

着陆区与行驶路线选择。毅力号的核心科学目标是探索火星生命遗迹和宜居环境,因此着陆区需具备以下条件:曾经有过水活动、现今赋存大量碳酸盐、地势相对平坦的沉积地貌^[14],杰泽罗撞击坑的开放性古湖泊环境和西部扇状三角洲是最佳的火星探测目标,这为中国天问三号火星采样返回任务的着陆区域遴选提供指示,即应根据科学目标来择定。毅力号的探测路线涵盖了撞击地貌(撞击坑坑底)、水流地貌(西部沉积扇)和峡谷地貌(Neretva峡谷),未来还可能攀登至Nili高原(火山地貌),着陆区地质单元的多样性和潜在高价值的地质样品为毅力号科学目标的实现提供了重要支撑。因此,天问三号的探测路线应尽可能覆盖更多类型的地质单元,有助于全面深入地

理解火星表面的物质组成、地质演化、潜在的生命遗迹和宜居环境。

载荷选择与配置. 载荷方面, 部分毅力号载荷基于前期火星探测任务的经验积累, 例如 SuperCam 和 Mastcam-Z 继承了好奇号的载荷 (ChemCam 和 Mastcam), 实现硬件更新和功能扩展; 探测方面, 毅力号成功验证多种光谱载荷协同探测能力, 结合多种光谱技术 (高光谱、LIBS、拉曼、可见-近红外、XRF、荧光) 对同一目标进行综合探测, 实现了目标元素、矿物相及有机物含量的准确探测; 成像方面, SuperCam 和 Mastcam-Z 联用可提供远程立体全景超高分辨率火星表面地质影像, 而 ACI 和 WATSON 两台相机协同拍摄又可捕获岩石矿物的微米级彩色影像, 从宏观的地质背景和微观的岩石矿物学特征认识探测目标. 以上载荷与 SCS 系统结合, 确保了准确且全面的科学探测, 为天问三号提供了一个有效的综合性探测示例。

探测策略与经验. STOP 和 SSP 作为平衡与协作控制载荷探测的理想方案, 确保了探测任务的高效性和灵活性, 即能够在获得最大化科学成果的同时减少决策过程和所用时间. 例如, 在冬季采集地质样品时需在 SSP 中预留额外充电时间, 以支持钻磨和采样工作, 而在温暖季节则无需这些步骤^[59]. 这种火星就位探测和样品采集策略为未来天问三号采样返回任务提供了探测策略的参考。

样品择选与存储. 毅力号收集的地质样品种类丰富, 包括来自不同地质单元的岩芯样品、风化层碎屑样品、大气样品. 同样, 天问三号应采集更多样化的样品, 尤其是地质单元来源、岩石岩性、物态的多样化, 以便更全面地理解火星环境和物质组成. 同时, SCS 系统在样品采集、密封、存储、运输等方面的机制, 也为天问三号火星采样任务提供了参考。

尝试性突破. 机智号作为首架地外受控无人机, 虽然目前仅用于成像, 但为未来利用地外飞行器开展大尺度就位探测、技术验证甚至采样工作提供了全新思路; MOXIE 于 2021 年 4 月 20 日首次成功实现地外制氧, 为未来地外天体的探测任务和原位资源利用提供了新的方向, 这也为天问三号采样工作以及未来的火星基地建设提供了参考。

5.2 局限与技术难点

(1) 矿物探测. 当前, 毅力号的钻磨坑 ($<10\text{ mm}$)

和样品 ($<4.5\text{ cm}$) 的探测深度较浅, 容易受到火星尘土和表面环境影响, 依靠现有就位探测手段难以理解厘米甚至米级尺度的矿物形成机制. 此外, 部分载荷仍处于试验阶段, 除灵敏度、空间分辨率、探测预处理等方面的局限外还存在其他问题, 例如通过 SHERLOC-拉曼无法直接识别低波数 ($<800\text{ cm}^{-1}$) 的矿物类型, 通过 PIXL-XRF 不能直接探测轻元素 ($Z<10$) 及大部分微量元素. 因此, 如果天问三号将搭载矿物探测载荷, 需要对这些关键技术进行攻关, 以减小环境因素和探测条件的影响。

(2) 水冰探测. 由于光谱载荷的局限性, 毅力号尚未直接探测到地表水冰, RIMFAX 有限的探测深度 ($<15\text{ m}$) 也未能发现地下水冰, 目前仅在岩石或土壤中发现了含水矿物 (如水合硫酸盐、水合二氧化硅、黏土矿物). 水冰资源是未来建立火星基地的重要保障, 对于认识火星地质演化和宜居性环境等关键科学问题有重要作用. 因此, 未来中国的火星探测任务需加强对水冰资源的勘探, 特别是其存在形式、分布及含量。

(3) 样品取回. 毅力号的样品采集与返回任务分为两期. 第一个样品库位于沉积扇边缘的 Three Forks, 第二个样品库计划放置于 Nili 高原. 然而, Nili 高原与 Three Forks 之间约 10 km 远和 500 m 落差, 极大提升了一次性取回所有地质样品的难度. 而且火星样品返回任务时间尚未确定, 在采集封装后的长时间储存可能会影响样品质量. 因此, 这将是毅力号团队面临的重大困难之一。

6 结语

基于毅力号探测任务, 人类对火星杰泽罗撞击坑西部沉积扇区域的矿物组成和分布及区域地质演化历史有了更深入的理解. 杰泽罗撞击坑是一个开放性湖泊系统, 包含大量的原生火成矿物和蚀变矿物, 可能与撞击作用、火山热液过程、构造活动、水流成因和风成作用等有关. 西部沉积扇作为毅力号探索的重点区域, 富含多种次生矿物, 如层状硅酸盐、无定形硅酸盐及其他的盐类, 表明该区域曾经存在长期稳定的水体. 此外, 初步的矿物探测揭示了有机物的存在, 但杰泽罗撞击坑是否能够支持一个孤立的生态生存系统尚需更多验证. 毅力号已经初步封存 24 个火星

样品, 为后续样品返回和揭示火星生命痕迹之谜奠定基础。其矿物探测和样品采集任务的顺利开展将为中国天问三号火星探测和采样返回科学任务提供重要参考。火星探测之旅任重而道远, 但随着技术的进步和研究的深入, 人类将进一步了解火星的历史和资源, 逐步揭开这颗红色星球的神秘面纱。

致谢 空间科学研究院 (ISSI) 对本工作给予了重要支持。本文所涉及地图底图均来自美国 PDS 地质科学节点 (<https://pds-geosciences.wustl.edu>) 与美国地质调查局天体地质科学 (<https://www.usgs.gov/centers/astrogeology-science-center>)。

参考文献

- [1] LIU Yang, WU Xing, LIU Zhenghao, *et al.* Geological evolution and habitable environment of Mars: Progress and prospects[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2021, **52**(4): 416-436 (刘洋, 吴兴, 刘正豪, 等. 火星的地质演化和宜居环境研究进展 [J]. 地球与行星物理评论, 2021, **52**(4): 416-436)
- [2] EHLMANN B L, EDWARDS C S. Mineralogy of the Martian surface[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2014, **42**(1): 291-315
- [3] ROVER TEAM. Characterization of the Martian surface deposits by the Mars Pathfinder rover, Sojourner[J]. *Science*, 1997, **278**(5344): 1765-1768
- [4] BLAKE D, TU V, BRISTOW T, *et al.* The Chemistry and Mineralogy (CheMin) X-ray diffractometer on the MSL Curiosity rover: A decade of mineralogy from Gale crater, Mars[J]. *Minerals*, 2024, **14**(6): 568
- [5] RAMPE E B, BLAKE D F, BRISTOW T F, *et al.* Mineralogy and geochemistry of sedimentary rocks and eolian sediments in Gale crater, Mars: A review after six Earth years of exploration with Curiosity[J]. *Geochemistry*, 2020, **80**(2): 125605
- [6] LI Chunlai, LIU Jianjun, GENG Yan, *et al.* Scientific objectives and payload configuration of China's first Mars exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, **5**(5): 406-413 (李春来, 刘建军, 耿言, 等. 中国首次火星探测任务科学目标与有效载荷配置 [J]. 深空探测学报, 2018, **5**(5): 406-413)
- [7] LIN Honglei, LIN Yangting, WEI Yong, *et al.* Mineralogical evidence of water activity in the northern lowlands of Mars based on inflight-calibrated spectra from the Zhurong rover[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, **66**(11): 2463-2472 (林红磊, 林杨挺, 魏勇, 等. “祝融号”在轨道标光谱揭示火星北部低地卤水活动的矿物学证据 [J]. 中国科学: 地球科学, 2023, **53**(11): 2506-2515)
- [8] XIE Juan, YAN Kai, KANG Zhizhong, *et al.* Verification study for the mineral and rock identification using multispectral camera of the “Zhurong” Mars Rover on the earth[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, **25**(7): 1385-1399 (谢涓, 闫凯, 康志忠, 等. “祝融号”火星车多光谱相机岩矿类型识别的地面验证研究 [J]. 遥感学报, 2021, **25**(7): 1385-1399)
- [9] WAN W X, WANG C, LI C L, *et al.* The payloads of planetary physics research onboard China's First Mars Mission (Tianwen-1)[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2020, **4**(4): 331-332
- [10] WU B, DONG J, WANG Y R, *et al.* Characterization of the candidate landing region for Tianwen-1-China's first mission to Mars[J]. *Earth and Space Science*, 2021, **8**(6): e2021EA001670
- [11] LIU C Q, LING Z C, WU Z C, *et al.* Aqueous alteration of the Vastitas Borealis Formation at the Tianwen-1 landing site[J]. *Communications Earth & Environment*, 2022, **3**(1): 280
- [12] LIU J J, LI C L, ZHANG R Q, *et al.* Geomorphic contexts and science focus of the Zhurong landing site on Mars[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **6**(1): 65-71
- [13] LI C, ZHENG Y K, WANG X, *et al.* Layered subsurface in Utopia Basin of Mars revealed by Zhurong rover radar[J]. *Nature*, 2022, **610**(7931): 308-312
- [14] FARLEY K A, WILLIFORD K H, STACK K M, *et al.* Mars 2020 mission overview[J]. *Space Science Reviews*, 2020, **216**(8): 142
- [15] WILLIFORD K H, FARLEY K A, STACK K M, *et al.* The NASA Mars 2020 Rover Mission and the Search for Extraterrestrial Life[M]//CABROL N A, GRIN E A. From Habitability to Life on Mars. Amsterdam: Elsevier, 2018: 275-308
- [16] WERNER S C, IVANOV B A, NEUKUM G. Theoretical analysis of secondary cratering on Mars and an image-based study on the Cerberus Plains[J]. *Icarus*, 2009, **200**(2): 406-417
- [17] MANDON L, QUANTIN-NATAF C, THOLLOT P, *et al.* Refining the age, emplacement and alteration scenarios of the olivine-rich unit in the Nili Fossae region, Mars[J]. *Icarus*, 2020, **336**: 113436
- [18] FASSETT C I, HEAD J W. Sequence and timing of conditions on early Mars[J]. *Icarus*, 2011, **211**(2): 1204-1214
- [19] 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): 2005GL023456
- [20] MANGOLD N, DROMART G, ANSAN V, *et al.* Fluvial regimes, morphometry, and age of Jezero crater paleolake inlet valleys and their exobiological significance for the 2020 rover mission landing site[J]. *Astrobiology*, 2020, **20**(8): 994-1013
- [21] 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]. *Planet-*

- ary and Space Science, 2012, **67**(1): 28-45
- [22] STACK K M, WILLIAMS N R, CALEF III F, *et al.* Photogeologic map of the Perseverance rover field site in Jezero crater constructed by the Mars 2020 science team[J]. *Space Science Reviews*, 2020, **216**(8): 127
- [23] HORGAN B H N, ANDERSON R B, DROMART G, *et al.* The mineral diversity of Jezero crater: Evidence for possible lacustrine carbonates on Mars[J]. *Icarus*, 2020, **339**: 113526
- [24] GOUDGE T A, MOHRIG D, CARDENAS B T, *et al.* Stratigraphy and paleohydrology of delta channel deposits, Jezero crater, Mars[J]. *Icarus*, 2018, **301**: 58-75
- [25] MANGOLD N, GUPTA S, GASNAULT O, *et al.* Perseverance rover reveals an ancient delta-lake system and flood deposits at Jezero crater, Mars[J]. *Science*, 2021, **374**(6568): 711-717
- [26] BRAMBLE M S, MUSTARD J F, SALVATORE M R. The geological history of Northeast Syrtis Major, Mars[J]. *Icarus*, 2017, **293**: 66-93
- [27] 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): 2012GL051594
- [28] 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
- [29] POULET F, BIBRING J P, MUSTARD J F, *et al.* Phyllosilicates on Mars and implications for early martian climate[J]. *Nature*, 2005, **438**(7068): 623-627
- [30] 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): E00D12
- [31] 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): E00D08
- [32] HOEFEN T M, CLARK R N, BANDFIELD J L, *et al.* Discovery of olivine in the Nili Fossae region of Mars[J]. *Science*, 2003, **302**(5645): 627-630
- [33] EHLMANN B L, MUSTARD J F, FASSETT C I, *et al.* Clay minerals in delta deposits and organic preservation potential on Mars[J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1**(6): 355-358
- [34] AMADOR E S, BANDFIELD J L. Elevated bulk-silica exposures and evidence for multiple aqueous alteration episodes in Nili Fossae, Mars[J]. *Icarus*, 2016, **276**: 39-51
- [35] BALARAM J, AUNG M, GOLOMBEK M P. The Ingenuity helicopter on the Perseverance rover[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(4): 56
- [36] MAURICE S, WIENS R C, BERNARDI P, *et al.* The SuperCam instrument suite on the Mars 2020 rover: Science objectives and mast-unit description[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(3): 47
- [37] WIENS R C, MAURICE S, ROBINSON S H, *et al.* The SuperCam instrument suite on the NASA Mars 2020 rover: Body unit and combined system tests[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(1): 4
- [38] BELL J F, MAKI J N, MEHALL G L, *et al.* The Mars 2020 Perseverance rover Mast Camera Zoom (Mastcam-Z) multispectral, stereoscopic imaging investigation[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(1): 24
- [39] BHARTIA R, BEEGLE L W, DEFLORES L, *et al.* Perseverance's Scanning Habitable Environments with Raman and Luminescence for Organics and Chemicals (SHERLOC) investigation[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(4): 58
- [40] WOGSLAND B V, MINITTI M E, KAH L C, *et al.* Science and science-enabling activities of the SHERLOC and WATSON imaging systems in Jezero crater, Mars[J]. *Earth and Space Science*, 2023, **10**(11): e2022EA002544
- [41] ALLWOOD A C, WADE L A, FOOTE M C, *et al.* PIXL: Planetary instrument for X-ray lithochemistry[J]. *Space Science Reviews*, 2020, **216**(8): 134
- [42] MOELLER R C, JANDURA L, ROSETTE K, *et al.* The Sampling and Caching Subsystem (SCS) for the scientific exploration of Jezero crater by the Mars 2020 Perseverance rover[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(1): 5
- [43] COUSIN A, SAUTTER V, FABRE C, *et al.* SuperCam calibration targets on board the Perseverance rover: Fabrication and quantitative characterization[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2022, **188**: 106341
- [44] MADARIAGA J M, ARAMENDIA J, ARANA G, *et al.* Homogeneity assessment of the SuperCam calibration targets onboard rover Perseverance[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2022, **1209**: 339837
- [45] ANDERSON R B, FORNI O, COUSIN A, *et al.* Post-landing major element quantification using SuperCam laser induced breakdown spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2022, **188**: 106347
- [46] BEYSSAC O. New trends in Raman spectroscopy: From high-resolution geochemistry to planetary exploration[J]. *Elements*, 2020, **16**(2): 117-122
- [47] FOUCHET T, REESS J M, MONTMESSIN F, *et al.* The SuperCam infrared spectrometer for the Perseverance rover of the Mars2020 mission[J]. *Icarus*, 2022, **373**: 114773
- [48] FAU A, BEYSSAC O, GAUTHIER M, *et al.* Pulsed laser-induced heating of mineral phases: Implications for laser-induced breakdown spectroscopy combined with Raman spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2019, **160**: 105687
- [49] HAYES A G, CORLIES P, TATE C, *et al.* Pre-flight cal-

- ibration of the Mars 2020 rover Mastcam Zoom (Mastcam-Z) multispectral, stereoscopic imager[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(2): 29
- [50] KINCH K M, MADSEN M B, BELL J F, *et al.* Radiometric calibration targets for the Mastcam-Z camera on the Mars 2020 rover mission[J]. *Space Science Reviews*, 2020, **216**(8): 141
- [51] RICE M S, JOHNSON J R, MILLION C C, *et al.* Spectral variability of rocks and soils on the Jezero crater floor: A summary of multispectral observations from *Perseverance's* Mastcam-Z instrument[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, **128**(10): e2022JE007548
- [52] BHARTIA R, HUG W F, REID R D. Improved sensing using simultaneous deep UV Raman and fluorescence detection[C]//Proceedings Volume 8358, Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XIII. Baltimore: SPIE, 2012
- [53] FRIES M D, LEE C, BHARTIA R, *et al.* The SHERLOC calibration target on the Mars 2020 Perseverance rover: Design, operations, outreach, and future human exploration functions[J]. *Space Science Reviews*, 2022, **218**(6): 46
- [54] UCKERT K, BHARTIA R, BEEGLE L W, *et al.* Calibration of the SHERLOC deep ultraviolet fluorescence-Raman spectrometer on the *Perseverance* rover[J]. *Applied Spectroscopy*, 2021, **75**(7): 763-773
- [55] RAZZELL HOLLIS J, MOORE K R, SHARMA S, *et al.* The power of paired proximity science observations: Co-located data from SHERLOC and PIXL on Mars[J]. *Icarus*, 2022, **387**: 115179
- [56] SCHELLER E L, RAZZELL HOLLIS J, CARDARELLI E L, *et al.* Aqueous alteration processes in Jezero crater, Mars-implications for organic geochemistry[J]. *Science*, 2022, **378**(6624): 1105-1110
- [57] JENS E, TARANTINO P, PREUDHOMME M, *et al.* Precision cleaning samples for science analysis using a gas-based dust removal tool[C]//Proceedings of 2017 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2017
- [58] International MSR Objectives and Samples Team (IMOST), BEATY D W, GRADY M M, *et al.* The potential science and engineering value of samples delivered to Earth by Mars sample return[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2019, **54**(3): 667-671
- [59] KRONYAK R E, KRUGER A W, SUN V Z, *et al.* Development and execution of the Mars 2020 Perseverance rover's sampling strategy[C]//Proceedings of 2024 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2024
- [60] SUN V Z, HAND K P, STACK K M, *et al.* Exploring the Jezero crater floor: Overview of results from the Mars 2020 Perseverance rover's first science campaign[C]//Proceedings of the 53rd Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2022
- [61] WILLIAMS A J, RUSSELL P S, SUN V Z, *et al.* Exploring the Jezero delta front: Overview of results from the Mars 2020 Perseverance rover's second science campaign[C]//Proceedings of the 54th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Universities Space Research Association, Lunar and Planetary Institute, 2023
- [62] NACHON M, SIEBACH K L, SHOLES S F, *et al.* Overview of the Mars 2020 mission Perseverance rover third science campaign: Exploring Jezero crater's upper fan[C]//Proceedings of the 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2024
- [63] HORGAN B, GARCZYNSKI B, GUPTA S, *et al.* Campaign overview and initial results from exploration of the margin unit in Jezero crater by the Perseverance rover[C]//Proceedings of the 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2024
- [64] SCHMIDT M E, ALLWOOD A, CHRISTIAN J, *et al.* Highly differentiated basaltic lavas examined by PIXL in Jezero crater[C]//Proceedings of the 53rd Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2022
- [65] UDRY A, OSTWALD A, SAUTTER V, *et al.* A Mars 2020 *Perseverance* SuperCam perspective on the igneous nature of the Máaz formation at Jezero crater and link with Séítah, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, **128**(7): e2022JE007440
- [66] WIENS R C, UDRY A, BEYSSAC O, *et al.* Compositionally and density stratified igneous terrain in Jezero crater, Mars[J]. *Science Advances*, 2022, **8**(34): eabo3399
- [67] SIMON J I, HICKMAN-LEWIS K, COHEN B A, *et al.* Samples collected from the floor of Jezero crater with the Mars 2020 Perseverance rover[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, **128**(6): e2022JE007474
- [68] SUN V Z, HAND K P, STACK K M, *et al.* Overview and results from the Mars 2020 Perseverance rover's first science campaign on the Jezero crater floor[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, **128**(6): e2022JE-007613
- [69] CLAVÉ E, BENZERARA K, MESLIN P Y, *et al.* Carbonate detection with SuperCam in igneous rocks on the floor of Jezero crater, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, **128**(6): e2022JE007463
- [70] CORPOLONGO A, JAKUBEK R S, BURTON A S, *et al.* SHERLOC Raman mineral class detections of the Mars 2020 crater floor campaign[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, **128**(3): e2022JE007455
- [71] FARLEY K A, STACK K M, SHUSTER D L, *et al.* Aqueously altered igneous rocks sampled on the floor of Jezero crater, Mars[J]. *Science*, 2022, **377**(6614): eabo2196
- [72] MANDON L, QUANTIN-NATAF C, ROYER C, *et al.* Reflectance of Jezero crater floor: 2. Mineralogical interpretation[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*,

- 2023, **128**(7): e2022JE007450
- [73] TICE M M, HUROWITZ J A, ALLWOOD A C, *et al.* Alteration history of Séftah formation rocks inferred by PIXL X-ray fluorescence, X-ray diffraction, and multispectral imaging on Mars[J]. *Science Advances*, 2022, **8**(47): eabp9084
- [74] BEYSSAC O, FORNI O, COUSIN A, *et al.* Petrological traverse of the olivine cumulate Séftah formation at Jezero crater, Mars: A perspective from SuperCam on-board Perseverance[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, **128**(7): e2022JE007638
- [75] BELL J F, MAKI J N, ALWMARK S, *et al.* Geological, multispectral, and meteorological imaging results from the Mars 2020 Perseverance rover in Jezero crater[J]. *Science Advances*, 2022, **8**(47): eabo4856
- [76] GARCZYNSKI B J, BELL III J F, HORGAN B H N, *et al.* Perseverance and the purple coating: A Mastcam-Z multispectral story[C]//Proceedings of the 53rd Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2022
- [77] SHARMA S, ROPPEL R D, MURPHY A E, *et al.* Diverse organic-mineral associations in Jezero crater, Mars[J]. *Nature*, 2023, **619**(7971): 724-732
- [78] STACK K M, IVES L R W, GUPTA S, *et al.* Sedimentology and stratigraphy of the Shenandoah formation, western Fan, Jezero crater, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2024, **129**(2): e2023JE008187
- [79] BROZ A P, HORGAN B H, KALUCHA H, *et al.* Biosignature preservation potential of sulfate-rich rocks from Hogwallow Flats, Jezero crater, Mars[C]//Proceedings of the 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2024
- [80] DEHOUC E, FORNI O, QUANTIN-NATAF C, *et al.* Overview of the bedrock geochemistry and mineralogy observed by SuperCam during Perseverance's delta front campaign[C]//Proceedings of the 54th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2023
- [81] HUROWITZ J A, CATLING D C, FISCHER W W. High carbonate alkalinity lakes on Mars and their potential role in an origin of life beyond earth[J]. *Elements*, 2023, **19**(1): 37-44
- [82] NACHON M, LÓPEZ-REYES G, MESLIN P Y, *et al.* Light-toned veins and material in Jezero crater, Mars, as seen in-situ via NASA's Perseverance rover (Mars 2020 mission): stratigraphic distribution and compositional results[C]//Proceedings of the 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2024
- [83] NÚÑEZ J I, JOHNSON J R, RICE M S, *et al.* Spectral diversity in fluvio-deltaic deposits in the western delta fan in Jezero crater, Mars as seen with Mastcam-Z on the Mars 2020 Perseverance rover[C]//Proceedings of the 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2024
- [84] ROYER C, POULET F, WIENS R C, *et al.* Jezero delta mineralogical diversity revealed by SuperCam infrared spectral modeling[C]//Proceedings of the 54th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2023
- [85] BOSAK T, SHUSTER D L, WEISS B, *et al.* Astrobiological potential of rocks acquired by the Perseverance rover at the front of the western sediment fan in Jezero crater, Mars[C]//Proceedings of the 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2024
- [86] GARCZYNSKI B J, HORGAN B H N, JOHNSON J R, *et al.* Rock coatings as evidence for late surface alteration on the floor of Jezero crater, Mars[EB/OL]. *ESS Open Archive*, (2023-07-08)[2024-07-16]. <https://doi.org/10.22541/essoar.168882010.05601670/v1>
- [87] BEYSSAC O, CLAVÉ E, DEHOUC E, *et al.* A journey across the transition between the igneous Séftah floor unit and the delta with the Mars2020 SuperCam instrument at Jezero crater, Mars[C]//Proceedings of the 54th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2023
- [88] BENISON K C, GILL K K, SHARMA S, *et al.* Depositional and diagenetic sulfates of Hogwallow Flats and Yori Pass, Jezero crater: Evaluating preservation potential of environmental indicators and possible biosignatures from past Martian surface waters and groundwaters[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2024, **129**(2): e2023JE008155
- [89] PHUA Y Y, EHLMANN B L, SILJESTRÖM S, *et al.* Sulfates as hydration carrier phases in altered rocks of Jezero crater fan and floor geologic units from SHERLOC on Mars 2020[C]//Proceedings of AGU Fall Meeting. San Francisco: AGU, 2023
- [90] LOPEZ-REYES G, NACHON M, VENERANDA M, *et al.* Anhydrite detections by Raman spectroscopy with SuperCam at the Jezero delta, Mars[C]//Proceedings of the 54th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2023
- [91] FORNI O, BEDFORD C C, ROYER C, *et al.* Nickel-copper deposits on Mars? Discovery of ore-grade abundances, and implications on formation and alteration[C]//Proceedings of the 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2024
- [92] CARAVACA G, DROMART G, MANGOLD N, *et al.* Depositional facies and sequence stratigraphy of Kodiak Butte, western Delta of Jezero crater, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2024, **129**(4): e2023JE008205
- [93] GUPTA S, STACK MORGAN K, MANGOLD N, *et al.* Going with the flow: Sedimentary evolution of the Jezero

- western fan, Mars[C]//Proceedings of the 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2024
- [94] TICE M M, HUROWITZ J A, SIEBACH K L, *et al.* Regional paleoenvironments recorded in sedimentary rocks of the western Fan-Delta, Jezero crater, Mars[C]//Proceedings of the 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2024
- [95] WEISS B P, NACHON M, SIEBACH K, *et al.* Perseverance samples from the Jezero upper Fan[C]//Proceedings of the 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2024
- [96] BEYSSAC O, CLAVÉ E, UDRY A, *et al.* What are the olivine-rich boulders in the Upper Fan and Margin Unit at Jezero crater, Mars? [C]//Proceedings of the 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2024
- [97] DEHOUC E, CLAVÉ E, BEYSSAC O, *et al.* Pristine pyroxene-bearing boulders analyzed by SuperCam in the Jezero western Fan, Mars[C]//Proceedings of the 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2024
- [98] KIZOVSKI T V, SCHMIDT M E, O'NEIL L, *et al.* Fe-phosphates in the Jezero crater fan: Implications for habitability and sample return[C]//Proceedings of the 54th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2024
- [99] SILJESTRÖM S, FARLEY K A, BOSAK T, *et al.* Sampling the margin unit of Jezero crater, Mars for future Mars sample return[C]//Proceedings of the 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2024
- [100] CLAVÉ E, BECK P, BEYSSAC O, *et al.* New constraints on the “Marginal Carbonates” from in situ observations with SuperCam, Mars2020[C]//Proceedings of Europlanet Science Congress. Berlin: Freie Universität, 2024
- [101] GARCZYNSKI B J, JOHNSON J R, HORGAN B, *et al.* Initial Mastcam-Z multispectral results from the Perseverance rover's exploration of the Margin Unit in Jezero crater, Mars[C]//Proceedings of the 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2024
- [102] WIENS R C, CLAVÉ E, BECK P, *et al.* Chemistry and mineralogy of the margin unit, Jezero crater, Mars, observed by M2020 / SuperCam[C]//Proceedings of the 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2024
- [103] MANSBACH E N, MANSBACH E N, KIZOVSKI T V, *et al.* Likely ferromagnetic minerals identified by the Perseverance rover and implications for future paleomagnetic analyses of returned martian samples[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2024, **129**(9): e2024JE008505
- [104] ROYER C, BEDFORD R C, WIENS R C, *et al.* Mineral composition of Al-rich float rocks in Jezero crater as seen by SuperCam[C]//Proceedings of the 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2024
- [105] WEISS B P, MANSBACH E N, CARSTEN J L, *et al.* Oriented bedrock samples drilled by the Perseverance rover on Mars[J]. *Earth and Space Science*, 2024, **11**(3): e2023EA003322
- [106] ZORZANO M P, MARTÍNEZ G, POLKKO J, *et al.* Present-day thermal and water activity environment of the Mars Sample Return collection[J]. *Scientific Reports*, 2024, **14**(1): 7175
- [107] SILJESTRÖM S, CZAJA A D, CORPOLONGO A, *et al.* Evidence of sulfate-rich fluid alteration in Jezero crater floor, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2024, **129**(1): e2023JE007989
- [108] PHUA Y Y, EHLMANN B L, SILJESTRÖM S, *et al.* Characterizing hydrated sulfates and altered phases in Jezero crater Fan and floor geologic units with SHERLOC on Mars 2020[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2024, **129**(7): e2023JE008251
- [109] MAYHEW L E, QUANTIN-NATAF C, SCHELLER E L, *et al.* The scientific value of collecting samples from the Jezero crater rim[C]//Proceedings of the 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2024
- [110] QUANTIN-NATAF C, ALWMARK S, CALEF F J, *et al.* The complex exhumation history of Jezero crater floor unit and its implication for mars sample return[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, **128**(6): e2022JE007628

作者简介



黄文博 男, 2004 年 2 月出生于山东省青岛市, 现为山东大学澳国立联合理学院本科生, 主要研究方向为行星光谱学, 研究领域包括火星表面物质成分反演研究, 火星次生矿物及蚀变过程研究。

E-mail: 2080466358@qq.com



辛艳青 (通信作者) 男, 1984 年 2 月出生于山东省潍坊市, 现为山东大学空间科学与技术学院实验师, 硕士生导师, 研究方向为行星光谱学, 研究领域为行星表面物质及演化, 物质分析方法研究。

E-mail: yqxin@sdu.edu.cn