

火星 Cerulli 区域的地质特征及其对未来采样返回任务的启示

张诗琪¹, 赵健楠^{1,2}, 张恒¹, 史语桐², 夏淼森¹, 赵军利¹, 肖龙²

1. 中国地质大学(武汉) 地质探测与评估教育部重点实验室, 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉) 地球科学学院行星科学研究所, 武汉 430074

摘要: 采样返回是未来国内外火星探测任务的重点。为进一步了解火星宜居性、寻找火星生命迹象, 中国计划于2030年左右实施“天问三号”火星采样返回任务。选择合适的着陆点对于确保任务目标的达成具有重要意义。本文利用火星高分辨率遥感影像和地形数据, 对位于火星阿拉伯(Arabia)高地西北部的切鲁利(Cerulli)撞击坑区域的地质特征进行详细分析, 识别该区域内的撞击地貌、水成地貌和冰川地貌等地貌类型, 开展撞击坑统计定年探究, 进而编制了研究区域地质图。研究表明: Cerulli撞击坑形成于诺亚纪/西方纪之交(~3.7 Ga), 并在西方纪至亚马逊纪存在广泛的水和冰川活动; 区域内峡谷网的形成机制可能与撞击事件导致的液态水释放或火星轨道倾角变化导致的冰川活动相关, 而多期的水活动为宜居环境和生命的形成与保存提供了条件。因此, 本研究推断该区域可作为“天问三号”等未来火星采样返回任务的备选着陆点。

关键词: 遥感, 火星, Cerulli撞击坑, 地质特征, 采样返回, 着陆点选址

中图分类号: P691/P2

引用格式: 张诗琪, 赵健楠, 张恒, 史语桐, 夏淼森, 赵军利, 肖龙. 2025. 火星 Cerulli 区域的地质特征及其对未来采样返回任务的启示. 遥感学报, 29(2): 524-535

Zhang S Q, Zhao J N, Zhang H, Shi Y T, Xia M S, Zhao J L and Xiao L. 2025. Geological characteristics of the Cerulli region, Mars: Implications for future sample-return missions. National Remote Sensing Bulletin, 29(2): 524-535[DOI:10.11834/jrs.20254066]

1 引言

火星是人类深空探测的热点, 目前各国已累计实施近50次火星探测任务。中国也于2021年5月15日成功发射了首次自主火星探测任务“天问一号”, 并一次性完成了火星环绕、着陆和巡视3大目标, 获得了新的火星探测数据及科学认识(Zhao等, 2021, 2023; Liu等, 2022, 2023; Li等, 2022; Wang等, 2023; Xiao等, 2023)。为进一步了解火星宜居性、寻找火星生命迹象, 采样返回任务已成为未来各国火星探测的重点(赵宇鹄等, 2020)。中国计划于2030年前实施“天问三号”火星采样返回任务, 采集不少于500 g火星样品返回地球(Wu, 2023; Xiao, 2023)。在这一过

程中, 遴选存在或曾经存在宜居环境、甚至可能保存有生命的着陆点对于确保预期科学目标的达成至关重要。

当前已有的火星原位探测任务多以诺亚纪古湖泊作为着陆点(Grotzinger等, 2014; Farley等, 2020)。诺亚纪是距今37亿年之前的时期, 火星在该时期可能具有温暖湿润的气候, 其最直接的证据是诺亚纪形成的大量水成地貌(Baker, 2001; 赵健楠等, 2021), 包括峡谷网(Alemanno等, 2018; Shi等, 2022)、古湖泊盆地(Fassett和Head, 2008; 赵健楠和肖龙, 2016; Zhao等, 2020)、三角洲和冲积扇(Wilson等, 2021; Zhang等, 2023a)等。同时, 分布于诺亚纪地质单元内的种类多样的层状硅酸盐矿物也是该时期广泛存在地表水活动

收稿日期: 2024-02-26; 预印本: 2024-10-13

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2022YFF0504000); 国家自然科学基金(编号: 42272274, 42441839); 湖北省自然科学基金(编号: 2024AFB692)

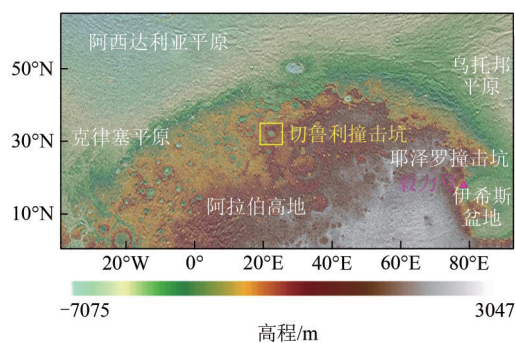
第一作者简介: 张诗琪, 研究方向为行星地质与资源。E-mail: sqzhang17@cug.edu.cn

通信作者简介: 赵健楠, 研究方向为行星地质学。E-mail: jnzhaoc@cug.edu.cn

的重要证明 (Carter 等, 2013; Ehlmann 和 Edwards, 2014; 苟盛 等, 2017)。相比而言, 西方纪 (距今 37 至 30 亿年左右) 及亚马逊纪 (30 亿年前至今) 则相对寒冷干旱, 地表水活动较少 (Carr 和 Head, 2010)。因此, 诺亚纪被认为是火星上最可能存在宜居环境甚至孕育生命的时期。但是, 诺亚纪距今较为久远, 早期的潜在宜居环境及生命信号可能已经在漫长的地质改造中被磨灭, 因而若能在西方纪、亚马逊纪地质单元内发现存在较长时间水活动的区域, 则可能更利于生命信号的探寻。

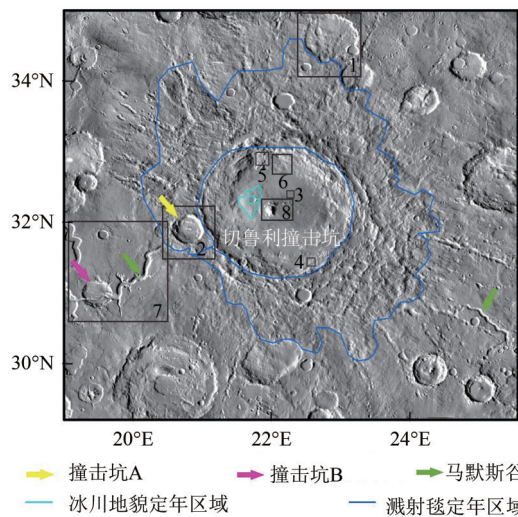
切鲁利 (Cerulli) 撞击坑 (中心坐标 32.5°N , 21.9°E), 是相对年轻且存在多种水活动地貌特征的区域 (图 1)。该撞击坑直径约 114 km, 位于火星阿拉伯 (Arabia) 高地的西北部, 距火星南北二分性边界约 830 km (图 1(a))。撞击坑的溅射毯保存较为完整、范围清晰, 溅射毯之上发育有同样保存完好的小撞击坑 (图 1(b)), 这些特征均指示 Cerulli 是在诺亚纪之后具有较低侵蚀速率时期形成的撞击坑 (Golombek 等, 2006)。同时, Tanaka 等 (2014) 的地质填图也将 Cerulli 撞击坑归为西方纪和亚马逊纪撞击坑单元 AHi (Amazonian and Hesperian impact unit), 而 Mangold (2012) 同样认为 Cerulli 撞击坑形成于西方纪。由此可见, 已有研究结果均指向 Cerulli 是西方纪形成的撞击坑, 但其坑壁和溅射毯上大量分布的峡谷网, 表明其在诺亚纪之后仍存在丰富的水活动迹象。此外, Cerulli 撞击坑本身可能为具有层状溅射毯的撞击坑 LEC (Layered Ejecta Crater), 指示地下可能存在水冰层 (Senft 和 Stewart, 2008)。因而该区域对于了解火星水活动演化、寻找火星宜居环境具有重要意义。

因此, 本文拟利用高分辨率影像和地形数据对 Cerulli 地区的地质特征开展详细研究, 识别区域内的地貌类型, 并特别关注与水 and 冰的活动相关的地貌, 同时也将开展地质单元的年代学研究, 填制该区域地质图, 以揭示其地质演化及水活动历史, 并为未来火星采样返回任务的着陆点选择提供支持。



(a) 研究区域(黄色方框)在阿拉伯(Arabia)高地的位置, 粉色三角形为美国“毅力号”着陆点耶泽罗(Jezero)撞击坑。底图为火星轨道器激光高度计与高分辨率立体相机数据联合制作的数字高程模型数据(MOLA-HRSC blended DEM)叠加在“火星奥德赛”热辐射成像系统(THEMIS)日间影像上

(a) Location of the study area (yellow box) in the Arabia Terra, with the pink triangle indicating the Jezero crater, the landing site of NASA's Perseverance rover. The base map is a digital elevation model (MOLA-HRSC blended DEM) created from data combined by the Mars Orbiter Laser Altimeter and High-Resolution Stereo Camera, overlaid on daytime imagery from the Thermal Emission Imaging System (THEMIS) onboard the Mars Odyssey orbiter



(b) Cerulli 区域 THEMIS 日间影像图, 方框 1—7 分别对应图 3(a)—(d)、图 4(a)、图 4(b) 和图 4(d) 所在区域的位置
(b) THEMIS daytime imagery of the Cerulli area, boxes 1 to 7 correspond to the locations of the areas in Fig. 3 (a)—(d), Fig. 4 (a), Fig. 4 (b), and Fig. 4 (d) respectively

图 1 Cerulli 区域的位置及 THEMIS 日间影像图

Fig. 1 Location and THEMIS daytime imagery of the Cerulli area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究所使用的大区域背景影像来自于“火星奥德赛”探测器搭载的热辐射成像系统 (THEMIS), 其分辨率为 100 m/像素, 已实现全球覆盖 (Edwards 等, 2011)。同时, 使用由 6 m/像素 (Malin 等, 2007) 的“火星勘测轨道飞行器 (MRO)”背景相机 (CTX) 影像制作的镶嵌影像产品 (Dickson 等, 2018) 开展 Cerulli 区域地貌的识别并利用 MRO 高分辨率成像科学实验设备 HiRISE (McEwen 等, 2007) 对地貌的细节特征进行研究。在地形数据方面, 本文使用了火星轨道器激光高度计 (MOLA) 数据以及由 MOLA 和“火星快车”高分辨率立体相机 HRSC (Neukum 等, 2004) 数据联合制作的分辨率为 200 m/像素的数字高程模型 MOLA-HRSC DEM (Ferguson 等, 2018) 以开展大区域地形图的绘制及撞击坑、峡谷网、扇状沉积等地貌的形态学测量。

2.2 撞击坑统计定年方法

在地貌年龄的研究方面, 将利用地层交切关系初步确定不同地质单元或地貌特征之间的相对年龄, 进而利用撞击坑直径—频率分布定年法获取地貌的绝对模式年龄。撞击坑直径—频率分布定年法又简称撞击坑统计法, 是目前国际行星科学领域广泛应用的行星表面年龄研究方法 (Michael 和 Neukum, 2010; 赵健楠 等, 2013)。在利用此方法进行定年的过程中, 将使用 ArcGIS Cratertools 插件对划定区域的撞击坑进行识别统计, 同时避开经过严重改造、地形起伏较大的地区, 以及疑似的二次撞击坑, 以获得更为可靠的结果。将撞击坑统计结果导入 Craterstats2 软件 (Michael 和 Neukum, 2010), 即可基于撞击坑产生函数和年代学曲线 (Hartmann 和 Neukum, 2001; Ivanov, 2001) 获得研究区域地质单元的绝对模式年龄。

3 Cerulli 区域的地质特征

3.1 地形

依据研究区域 MOLA-HRSC 地形图 (图 2(a))

可见该区域高程变化范围为 -4112—-500 m, 其中 Cerulli 撞击坑的平均深度约 2.5 km, 坑底存在高度约 1.2 km 的中央峰。撞击坑连续溅射毯平均宽度约 65 km, 高程的变化范围约为 -2000—-1000 m, 北部和东部的地势比南部和西部高。利用 ArcGIS Spatial Analyst 工具由 MOLA-HRSC 数字高程模型生成了研究区域的坡度图 (图 2(b)), 可见 Cerulli 撞击坑缘附近坡度较大, 最大坡度为 29.0°, 位于撞击坑西南部。Cerulli 撞击坑溅射毯平均坡度约为 3.0°, 坑底平均坡度 1.7°, 较为平坦。

3.2 地貌

研究区域内发育有撞击地貌、水成地貌、冰川地貌等多种地貌类型。本研究主要利用 CTX 和 HiRISE 等高分辨率影像数据对典型地貌特征进行了分析。

3.2.1 撞击地貌

除 Cerulli 撞击坑外, 研究区域内还密集分布有大量不同尺寸、形态多样的撞击坑 (图 3)。识别结果表明, 区域内直径 >1 km 的撞击坑共 81 个, 其中: 直径较大的撞击坑多被 Cerulli 溅射物覆盖, 坑缘退化严重, 指示其形成于 Cerulli 撞击事件之前 (图 3(a)); 叠覆于 Cerulli 连续溅射毯上的撞击坑则相对新鲜但直径较小, 其中最大的撞击坑 (图 3(b), 图 1(b) 中撞击坑 A; 中心坐标 20.8°E, 31.9°N) 的直径约 23 km, 紧邻 Cerulli 西部坑缘 (图 1(b)), 且其中心存在直径约 1.7 km 的中央凹陷, 可能指示了撞击事件发生时下部存在冰等挥发分 (Levy 等, 2017)。同时, 在撞击坑 A 坑底西侧还可见扇状沉积地貌, 为坑内曾经存在液态水活动提供了证据; 此外, 区域内还存在少量特殊的环模撞击坑 (ring-mold crater) (图 3(c)), 直径多在 300—800 m, 该类型撞击坑底部中央具有突出的台地, 指示其基底曾经富含冰等挥发分 (Kress 和 Head, 2008); 多数直径较小的撞击坑底部相对平坦但表面粗糙, 指示其经历了冰川活动的改造, 内部被富冰沉积物所充填 (图 3(d))。

3.2.2 水成地貌

研究区域内主要的水成地貌类型包括峡谷网、外流河道、古湖泊及水成扇状沉积。

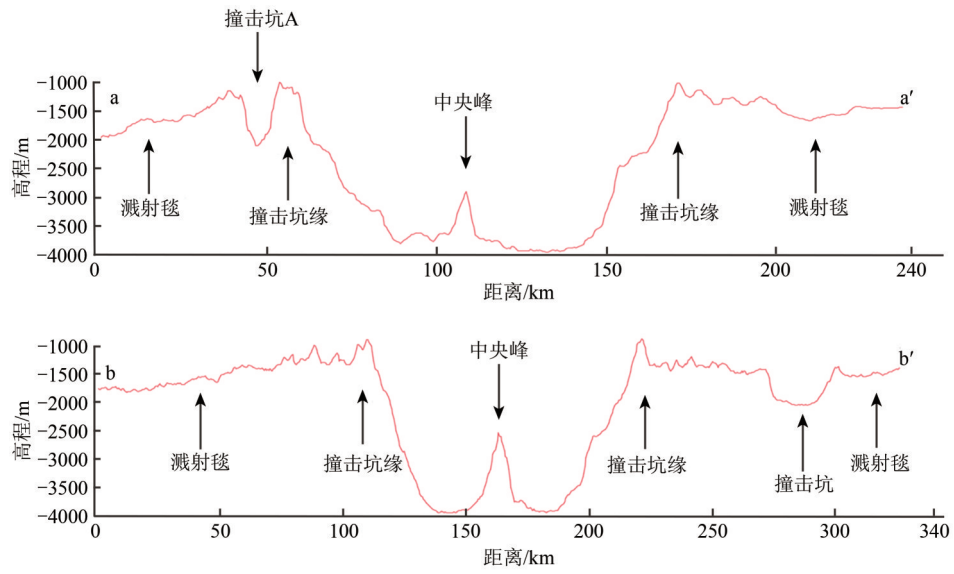
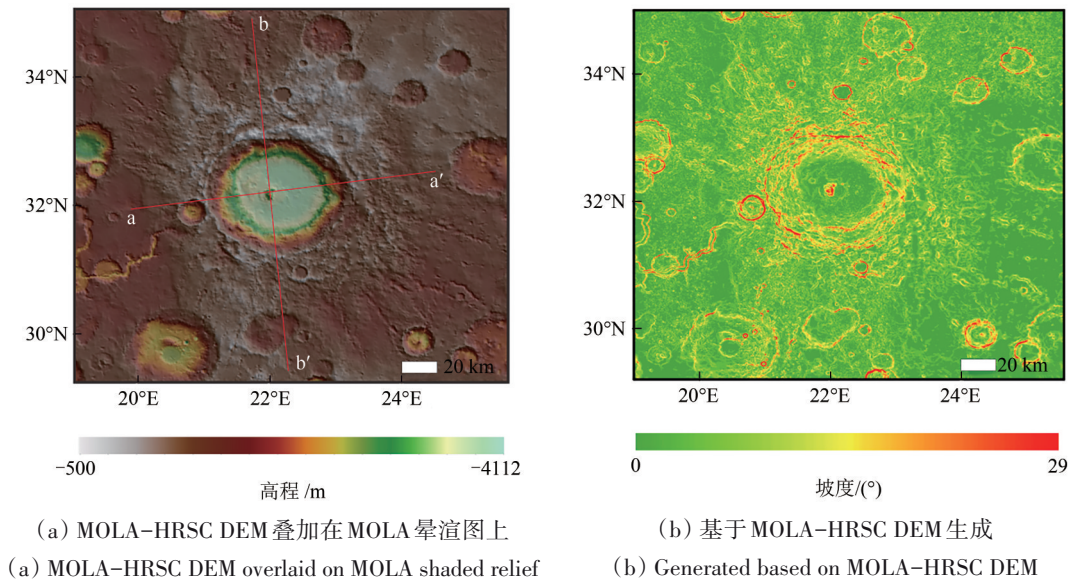
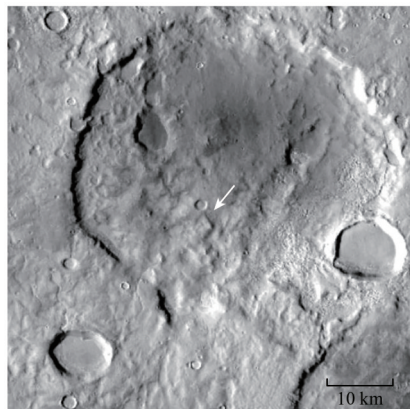
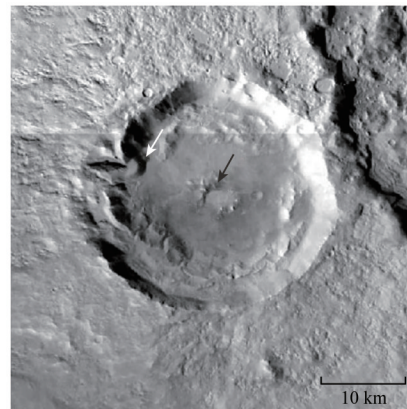


图 2 Cerulli 区域地形、坡度及高程剖面图与典型地貌

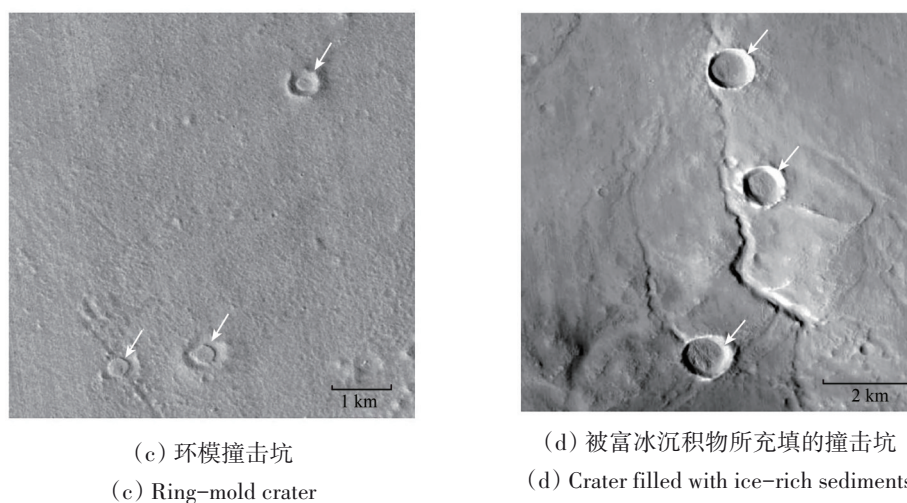
Fig. 2 Topography, slope and elevation profiles and typical landforms



(a) 早期撞击坑
(a) Relatively old crater



(b) 新鲜撞击坑
(b) Fresh crater



(c) 环模撞击坑
(c) Ring-mold crater

(d) 被富冰沉积物所充填的撞击坑
(d) Crater filled with ice-rich sediments

图3 研究区域内主要撞击坑类型 ((a) 箭头指示为 Cerulli 撞击坑的溅射毯, 中心坐标 $22.9^{\circ}\text{E}, 34.6^{\circ}\text{N}$; (b) 白色箭头为扇状沉积, 黑色箭头为中央凹陷, 中心坐标 $20.8^{\circ}\text{E}, 31.9^{\circ}\text{N}$; (c) 箭头指示为环模撞击坑, 中心坐标 $22.3^{\circ}\text{E}, 32.4^{\circ}\text{N}$; (d) 箭头指示为被富冰沉积物所充填的撞击坑, 中心坐标 $22.6^{\circ}\text{E}, 31.5^{\circ}\text{N}$ 。各图均为 CTX 镶嵌影像)

Fig. 3 Main types of craters within the study area ((a) The arrow indicating the ejecta blanket of the Cerulli crater, centered at $22.9^{\circ}\text{E}, 34.6^{\circ}\text{N}$; (b) The white arrow indicating fan-shaped deposits and the black arrow indicating the central pit, centered at $20.8^{\circ}\text{E}, 31.9^{\circ}\text{N}$; (c) The arrow indicating the ring-mold crater, centered at $22.3^{\circ}\text{E}, 32.4^{\circ}\text{N}$; (d) The arrow indicating the crater filled with ice-rich sediments, centered at $22.6^{\circ}\text{E}, 31.5^{\circ}\text{N}$. All images are CTX mosaics)

峡谷网广泛分布于 Cerulli 撞击坑的内壁及溅射毯, 其中又以 Cerulli 撞击坑北部坑壁最为集中, 依据它们的形貌特征可分为两种类型: 类型一细长蜿蜒, 宽度较窄 (通常在 300 m 内) 且保持相对恒定, 深度一般 $<20\text{ m}$, 弯曲度较大且分支较少或无分支 (图 4(a))。这些峡谷网分布广泛, 边缘清晰, 指示其退化程度较小, 受后期地质活动的改造较少; 类型二宽度较大 (图 4(b)), 可达 1500 m, 宽度和深度之比显著大于类型一, 常发育于类型一峡谷网的末端, 其底部可见线性裂隙, 裂隙宽度一般 $<50\text{ m}$ (图 4(c)), 它们可能指示了冰川对峡谷的改造。

区域内存在外流河道马默斯峡谷 (Mamers Vallis) (图 1(b))。Mamers Vallis 起源于 Cerulli 区域东南, 被 Cerulli 撞击坑及其溅射毯部分掩埋, 西段起于 Cerulli 溅射毯西南部并向西北部延伸, 最终汇入伊斯墨纽斯洼地 (Ismenus Cavus)。其总长约为 320 km, 支流较少, 总体较宽, 宽度在 1.6—11.0 km 内变化。在研究区域西部河道切穿了直径约 22 km 的撞击坑 B (图 1(b) 方框 7), 指示该撞击坑内可能曾经贮存有大量的水并形成古湖泊。

研究区域内共识别出 4 处扇状沉积。其中, 发育于 Cerulli 撞击坑内的 3 个扇状沉积位于撞击坑底

部的东北侧和北侧, 平面形态均呈扇状, 面积在 2—16 km^2 (图 4(b))。撞击坑 A 底部的扇状沉积边缘清晰, 前缘较陡, 面积为 1.43 km^2 (图 3(b))。

3.2.3 冰川地貌

Cerulli 区域存在多种与冰川活动相关的地貌, 除前文提到的环模撞击坑 (图 3(c))、峡谷网底部的冰川地貌 (图 4(c)) 之外, 还存在火星表面与冰川作用相关的具有粘性流动特征 VFF (viscous flow features) 的地貌, 一般表现为由冰与碎屑物构成的叶状、同心状、线状特征 (Milliken 等, 2003; Souness 等, 2012)。它们主要形成于火星南北纬 30° — 60° , 根据形貌可分为类冰川地貌 (glacier-like forms)、同心状撞击坑充填地貌 (concentric crater fill)、沟谷线状充填地貌 (lineated valley fill)、舌状碎屑堆积 (lobate debris apron) 等几种类型 (Milliken 等, 2003; Brough 等, 2016, 2019)。在 Cerulli 撞击坑底部的中央峰周边即存在粘性流动地貌, 以舌状碎屑堆积为主, 其中在中央峰东部存在面积约 11.7 km^2 的冰川成因堆积体, 堆积体与中央峰之间发育有多条舌状脊 (图 5)。

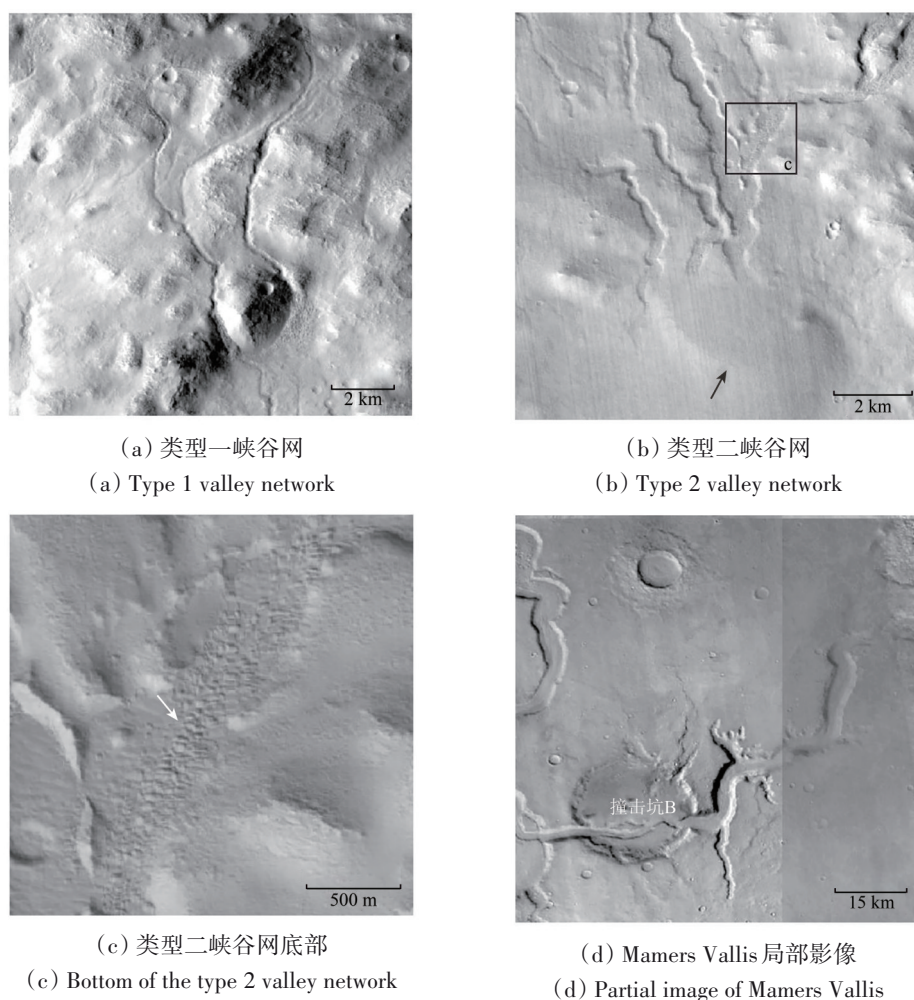


图4 研究区域内的水成地貌 ((a) CTX 镶嵌影像, 中心坐标 $21.9^{\circ}\text{E}, 32.9^{\circ}\text{N}$; (b) CTX 镶嵌影像, 黑色箭头指示末端发育的扇状沉积, 中心坐标 $22.1^{\circ}\text{E}, 32.8^{\circ}\text{N}$; (c) 为(b)中C区, HiRISE 影像: ESP_013188_2130_RED, 白色箭头指示峡谷网底部的线性裂隙, 中心坐标 $22.1^{\circ}\text{E}, 32.8^{\circ}\text{N}$; (d) CTX 镶嵌影像, Mamers Vallis 切穿了撞击坑B, 中心坐标 $19.8^{\circ}\text{E}, 31.3^{\circ}\text{N}$)

Fig. 4 Water-related landforms within the study area ((a) CTX mosaic, centered at $21.9^{\circ}\text{E}, 32.9^{\circ}\text{N}$; (b) CTX mosaic, the black arrow indicating fan-shaped deposits at the termini, centered at $22.1^{\circ}\text{E}, 32.8^{\circ}\text{N}$; (c) is the area C of (b), HiRISE image: ESP_013188_2130_RED, the white arrow indicating linear fissures at the bottom of the valley network, centered at $22.1^{\circ}\text{E}, 32.8^{\circ}\text{N}$; (d) CTX mosaic, Mamers Vallis cut through crater B, centered at $19.8^{\circ}\text{E}, 31.3^{\circ}\text{N}$)

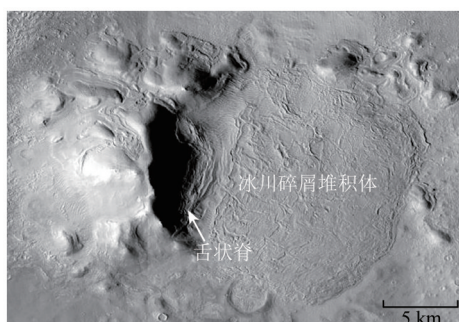


图5 Cerulli 撞击坑底部冰川地貌的 CTX 镶嵌影像

Fig. 5 CTX mosaics image of the glacial landforms at the Cerulli crater floor

3.3 Cerulli 撞击坑的地质年代

确定 Cerulli 撞击坑的形成年龄是了解研究区

地质演化的关键。虽然前人通过地层交切关系及大区域地质填图, 认为 Cerulli 撞击坑形成于西方纪 (Mangold, 2012; Tanaka 等, 2014), 但并未确定其精确的形成时代。本研究采用撞击坑统计定年法, 对 Cerulli 撞击坑的连续溅射毯进行定年以获得撞击坑的形成年龄。在定年过程中, 排除了簇状和串状排列的撞击坑以减少二次撞击坑的影响, 同时也将退化严重并被覆盖有 Cerulli 溅射物的撞击坑排除以避免将形成于 Cerulli 撞击事件之前的早期撞击坑统计在内导致定年结果偏大 (图 1(b))。定年结果表明, Cerulli 撞击坑形成于 $3.7 (+0.05/-0.07)$ Ga (图 6(a)), 位于诺亚纪/西方纪交界时期 (~ 3.7 Ga; Hartmann 和 Neukum,

2001)。此外, Cerulli 撞击坑底经历了大范围的冰川作用改造, 本研究也对其中存在明显冰川作用改造的区域进行了撞击坑定年, 结果显示为 787 (+250/-250) Ma (图 6(b)), 虽然冰川作用

改造区的年龄可能受冰川活动“擦除”撞击坑的影响而导致定年结果偏小、误差偏大 (Hepburn 等, 2020), 但该定年结果仍能够反映 Cerulli 撞击坑在亚马逊纪时期发生的冰川改造事件。

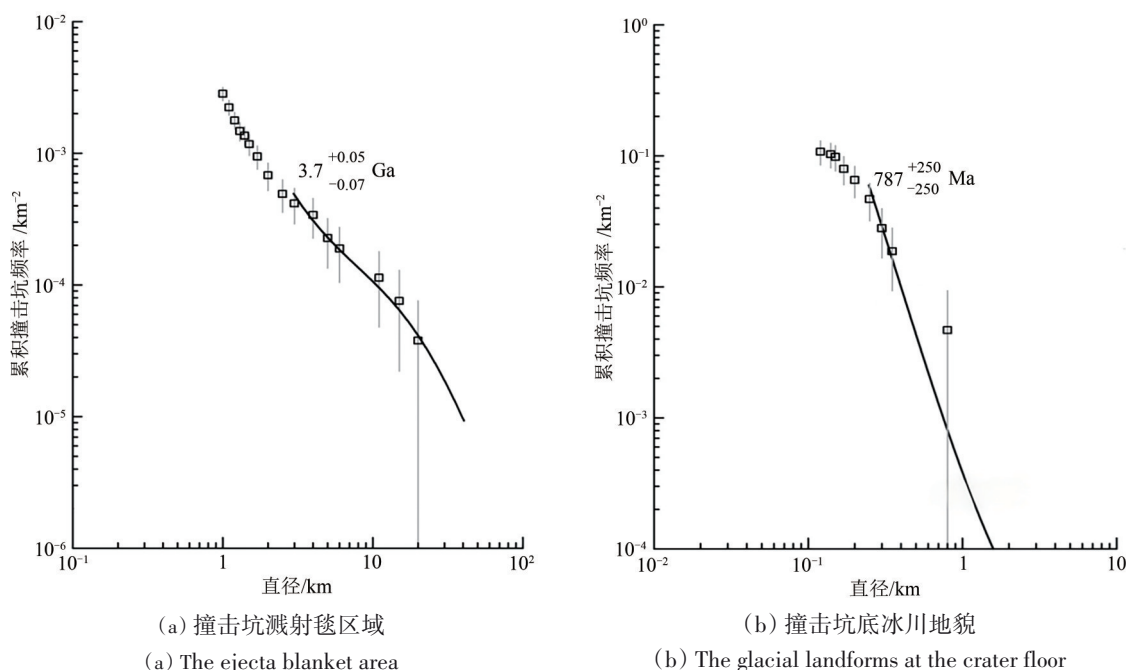


图6 Cerulli 研究区域撞击坑溅射毯区域和撞击坑底冰川地貌定年结果

Fig. 6 Age determination results of the ejecta blanket area and glacial landforms at the crater floor in the Cerulli study area

4 讨论

4.1 Cerulli 区域的水活动特点及成因机制

本研究结果揭示了 Cerulli 地区存在多种类型、多期的水活动特征。区域内的外流河道 Mamers Vallis 被 Cerulli 溅射毯覆盖, 指示其形成于 Cerulli 撞击事件之前。同时, 外流河道切穿了撞击坑, 并可能形成了古湖泊, 表明其活动时间相对较长。区域内的峡谷网和扇状沉积主要发育于 Cerulli 撞击坑内壁和溅射毯上, 由于 Cerulli 撞击坑形成于诺亚纪/西方纪之交, 因而这些水活动应发生于西方纪至亚马逊纪。早期的研究普遍认为诺亚纪之后火星的地表水活动减弱直至消失 (Carr 和 Head, 2010), 但本研究表明, 在诺亚纪之后, 火星依然可能在局部区域存在多期的地表水活动并形成峡谷网、扇状沉积等地貌。不同于诺亚纪规模较大、水系复杂、退化较为严重的峡谷网, 以 Cerulli 为代表的西方纪峡谷网规模相对较小, 连通性较差, 分支较少或无分支, 但保存程度较好。同时,

这些地貌特征也表明其发育相对不成熟, 可能形成于较为短暂的液态水活动中, 不需要稳定的液态水供给 (Hecht, 2002; Hobley 等, 2014)。

火星西方纪峡谷网可能具有多种形成机制。首先, 峡谷网的形成可能与撞击事件密切相关。当撞击靶体富含水冰时, 撞击作用产生的热量可导致冰层融化, 在溅射毯和撞击坑内部形成峡谷网, 且撞击体直径越大, 产热事件持续的时间则可能越长, 甚至导致局部区域气温的短暂上升 (Newsom, 1980; Abramov 和 Kring, 2005)。同时, 当地下含水层离地表较近时, 撞击事件也可能导致地下水的释放 (Harrison 等, 2010)。其次, 峡谷网也可能形成于冰雪的间歇性融化。火星的自转轴倾角会发生周期性变化, 火星在 5 G·a 期间的倾角平均值为 37.62°, 最大值为 82.035°。在过去的 1 G·a 中, 火星的倾角超过 60° 的概率为 63.0%, 在 3 G·a 中为 89.3% (Laskar 等, 2004)。当倾角较高时, 火星极区暴露在更高水平的太阳辐射下, 导致常年存在的极地冰盖的消融, 大气湿度上升, 大气中的水向中纬度地区移动, 凝结到中纬度地

区引起地表变化，形成冰川和冰缘地貌，其中的水冰融化可形成峡谷网（Howard 和 Moore, 2011; Souness 和 Hubbard, 2012; Wilson 等, 2016; Grau Galofre 等, 2020）。

研究区域内的峡谷网即可能由以上两种机制形成。一方面，在 Cerulli 撞击坑溅射毯及内壁上均有峡谷网分布，且这些峡谷网规模较小、连通性较差、发育不成熟，表明了它们可能形成于和撞击事件相关的地下水或地下冰层融水的突然释放。同时，研究区域在 Cerulli 撞击发生前存在 Mamers Vallis 外流河道，可能意味着该区域地下水位相对较高，也为地下水的释放提供了条件。另一方面，区域内冰川地貌广泛发育，其中类型二的峡谷网经历了明显的冰川改造作用，因此冰雪融水可能为部分峡谷网的形成提供了水源。

4.2 Cerulli 区域的地质演化及采样返回任务建议着陆点

结合 Tanaka 等（2014）开展的火星全球地质填图结果，以及研究区域撞击坑统计定年及地层叠置关系，本文编制了研究区域地质图（图 7），

并分析了区域内的地质演化过程。可见：（1）诺亚纪时期，该区域形成了广泛分布的基底物质，即中诺亚纪高地物质单元 mNh（Tanaka 等, 2014），其特征是地形起伏且多小丘。同时，由于 Cerulli 撞击坑及其溅射物覆盖在 Mamers Vallis 外流河道之上，且定年结果显示 Cerulli 撞击坑的形成年龄为 3.7 Ga，因此 Mamers Vallis 形成于 3.7 Ga 之前的诺亚纪。在这一时期，Mamers 峡谷存在较长的水活动，其切穿撞击坑形成古湖泊，并最终与阿拉伯高地北部的 Ismenus 洼地相连。（2）诺亚纪西方纪交界时期，Cerulli 撞击坑形成，该撞击坑及其溅射毯覆盖了 Mamers Vallis 的部分河道以及早期形成的撞击坑。同时撞击事件引发的水活动在溅射毯及撞击坑内形成了峡谷网、扇状沉积等丰富的水成地貌。（3）西方纪至亚马逊纪时期，在 Cerulli 撞击坑形成之后，仍有新的撞击坑形成，改造了 Cerulli 撞击坑的坑底和溅射毯，同时该区域可能经历了多次冰川活动，最近的一次可能发生于 787 Ma 左右，形成了区域内的粘性流动地貌、环模撞击坑等多种与冰川活动相关的地貌，并可能由冰川融水形成新的峡谷网。

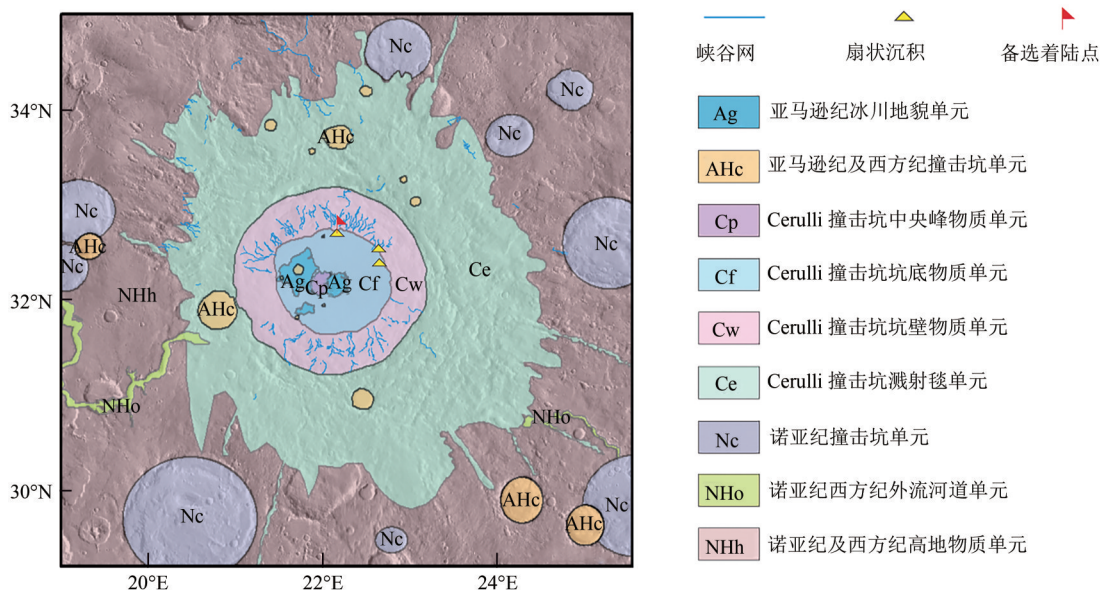


图 7 Cerulli 区域地质 THEMIS 影像图

Fig. 7 THEMIS mosaics image of the geological map of the Cerulli area

本研究结果可为包括中国“天问三号”在内的未来火星采样返回任务中着陆点的选择提供了依据。“天问三号”任务将研究火星生命与宜居性作为首要科学目标（Wu, 2023; Xiao, 2023），而 Cerulli 撞击坑形成时代较晚，且具有多期的水活动历史，

可能为宜居环境甚至生命的产生、维持和保存提供了条件。因此，该区域可作为具有较高科学价值的预选着陆区，特别是 Cerulli 撞击坑底部、峡谷网末端的扇状沉积可作为备选着陆点（图 4(b)，图 7）。扇状地貌表面相对平坦，坡度 $< 2^\circ$ ，有利于探测器

的安全着陆。同时, 扇状地貌主要由沉积岩构成, 相对于火星表面常见的火山岩更为松散 (Zhang 等, 2023b), 易于钻取和表取, 在该点位采集样品, 对于了解火星水活动持续时间、沉积物成分、气候环境特征及寻找生命信号都具有突出优势。

5 结 论

本文利用火星高分辨率遥感影像和地形数据, 对火星阿拉伯高地西北部的 Cerulli 撞击坑区域开展了详细的地质特征研究并编制了地质图。主要结论如下: 该区域存在多种类型的撞击坑, 以及峡谷网、外流河道、古湖泊、扇状沉积等多种水成地貌和粘性流动地貌、环模撞击坑等冰川相关地貌; Cerulli 撞击坑形成于诺亚纪/西方纪交界时期 (~3.7 Ga), 随后发生了多期次的液态水和水冰活动, 并在 787 Ma 左右经历了最后一次冰川活动改造; 该区域峡谷网的形成可能与撞击事件导致的液态水释放或火星轨道倾角变化导致的冰雪融化相关。

综上, 该区域复杂的水活动特征为深入了解火星的气候及水活动历史提供了线索, 同时也为宜居环境甚至生命的产生和保存提供了条件, 因此可作为未来火星采样返回任务的备选着陆点。

参考文献 (References)

- Abramov O and Kring D A. 2005. Impact-induced hydrothermal activity on early Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 110 (E12): E12S09 [DOI: 10.1029/2005JE002453]
- Alemanno G, Orofino V and Mancarella F. 2018. Global map of Martian fluvial systems: age and total eroded volume estimations. *Earth and Space Science*, 5(10): 560-577 [DOI: 10.1029/2018ea000362]
- Baker V R. 2001. Water and the Martian landscape. *Nature*, 412 (6843): 228-236 [DOI: 10.1038/35084172]
- Brough S, Hubbard B and Hubbard A. 2016. Former extent of glacier-like forms on Mars. *Icarus*, 274: 37-49 [DOI: 10.1016/j.icarus.2016.03.006]
- Brough S, Hubbard B and Hubbard A. 2019. Area and volume of mid-latitude glacier-like forms on Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 507: 10-20 [DOI: 10.1016/j.epsl.2018.11.031]
- Carr M H and Head J W. 2010. Geologic history of Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 294(3/4): 185-203 [DOI: 10.1016/j.epsl.2009.06.042]
- Carter J, Poulet F, Bibring J P, Mangold N and Murchie S. 2013. Hydrated minerals on Mars as seen by the CRISM and OMEGA imaging spectrometers: Updated global view. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(4): 831-858. [DOI:10.1029/2012JE004145]
- Dickson J L, Kerber L A, Fassett C I and Ehlmann B L. 2018. A global, blended CTX mosaic of Mars with vectorized seam mapping: a new mosaicking pipeline using principles of non-destructive image editing//49th Lunar and Planetary Science Conference 2018. The Woodlands: [s.n.]: 2480
- Edwards C S, Nowicki K J, Christensen P R, Hill J, Gorelick N and Murray K. 2011. Mosaicking of global planetary image datasets: 1. Techniques and data processing for Thermal Emission Imaging System (THEMIS) multi-spectral data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 116(E10): E10008 [DOI: 10.1029/2010JE003755]
- Ehlmann B L and Edwards C S. 2014. Mineralogy of the Martian surface. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42: 291-315 [DOI: 10.1146/annurev-earth-060313-055024]
- Farley K A, Williford K H, Stack K M, Bhartia R, Chen A, De La Torre M, Hand K, Goreva Y, Herd C D K, Hueso R, Liu Y, Maki J N, Martinez G, Moeller R C, Nelesse A, Newman C E, Nunes D, Ponce A, Spanovich N, Willis P A, Beegle L W, Bell J F III, Brown A J, Hamran S E, Hurowitz J A, Maurice S, Paige D A, Rodriguez-Manfredi J A, Schulte M and Wiens R C. 2020. Mars 2020 mission overview. *Space Science Reviews*, 216(8): 142 [DOI: 10.1007/s11214-020-00762-y]
- Fassett C I and Head J W. 2008. The timing of Martian valley network activity: constraints from buffered crater counting. *Icarus*, 195(1): 61-89 [DOI: 10.1016/j.icarus.2007.12.009]
- Ferguson R L, Hare T M and Laura J. 2018. HRSC and MOLA blended digital elevation model at 200m v2. Astrogeology PDS Annex. U.S. Geological Survey
- Golombek M P, Grant J A, Crumpler L S, Greeley R, Arvidson R E, Bell J F, Weitz C M, Sullivan R, Christensen P R, Soderblom L A and Squyres S W. 2006. Erosion rates at the Mars Exploration Rover landing sites and long-term climate change on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 111(E12): E12S10 [DOI: 10.1029/2006je002754]
- Gou S, Yue Z Y, Di K C and Zhang X. 2017. Advances in aqueous minerals detection on Martian surface. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 21(4): 531-548 (苟盛, 岳宗玉, 邸凯昌, 张霞. 2017. 火星表面含水矿物探测进展. 遥感学报, 21(4): 531-548) [DOI: 10.11834/jrs.20176335]
- Grau Galofre A, Jellinek A M and Osinski G R. 2020. Valley formation on early Mars by subglacial and fluvial erosion. *Nature Geoscience*, 13(10): 663-668 [DOI: 10.1038/s41561-020-0618-x]
- Grotzinger J P, Sumner D Y, Kah L C, Stack K, Gupta S, Edgar L, Rubin D, Lewis K, Schieber J, Mangold N, Milliken R, Conrad P G, Desmarais D, Farmer J, Siebach K, Calef F III, Hurowitz J, McLennan S M, Ming D, Vaniman D, Crisp J, Vasavada A, Edgett K S, Malin M, Blake D, Gellert R, Mahaffy P, Wiens R C, Maurice S, Grant J A, Wilson S, Anderson R C, Beegle L, Arvidson R, Hallet B, Sletten R S, Rice M, Bell J III, Griffes J, Ehlmann B, Anderson R B, Bristow T F, Dietrich W E, Dromart G, Eigenbrode J, Fraeman A, Hardgrove C, Herkenhoff K, Jandura L, Kocurek G, Lee S, Leshin L A, Leveille R, Limonadi D, Maki J, McCloskey S, Meyer M, Miniti M, Newsom H, Oehler D, Okon A, Palucis M, Parker T, Rowland S, Schmidt M, Squyres S, Steele A,

- Stolper E, Summons R, Treiman A, Williams R, Yingst A and MSL Science Team. 2014. A habitable fluvio-lacustrine environment at Yellowknife Bay, Gale crater, Mars. *Science*, 343(6169): 1242777 [DOI: 10.1126/science.1242777]
- Harrison T N, Malin M C, Edgett K S, Shean D E, Kennedy M R, Lipkaman L J, Cantor B A and Posiolova L V. 2010. Impact-induced overland fluid flow and channelized erosion at Lyot Crater, Mars. *Geophysical Research Letters*, 37(21): L21201 [DOI: 10.1029/2010gl045074]
- Hartmann W K and Neukum G. 2001. Cratering chronology and the evolution of Mars. *Space Science Reviews*, 96(1/4): 165-194 [DOI: 10.1023/A:1011945222010]
- Hecht M H. 2002. Metastability of liquid water on Mars. *Icarus*, 156(2): 373-386 [DOI: 10.1006/icar.2001.6794]
- Hepburn A J, Ng F S L, Livingstone S J, Holt T and Hubbard B. 2020. Polyphase mid-latitude glaciation on Mars: chronology of the formation of superposed glacier-like forms from crater-count dating. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(2): e2019JE006102 [DOI: 10.1029/2019JE006102]
- Hobley D E J, Howard A D and Moore J M. 2014. Fresh shallow valleys in the Martian midlatitudes as features formed by meltwater flow beneath ice. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 119(1): 128-153 [DOI: 10.1002/2013je004396]
- Howard A D and Moore J M. 2011. Late Hesperian to early Amazonian midlatitude Martian valleys: evidence from Newton and Gorgonum basins. *Journal of Geophysical Research*, 116(E5): E05003 [DOI: 10.1029/2010je003782]
- Ivanov B A. 2001. Mars/Moon cratering rate ratio estimates. *Space Science Reviews*, 96(1/4): 87-104 [DOI: 10.1023/A:1011941121102]
- Kress A M and Head J W. 2008. Ring-mold craters in lineated valley fill and lobate debris aprons on Mars: evidence for subsurface glacial ice. *Geophysical Research Letters*, 35(23): L23206 [DOI: 10.1029/2008GL035501]
- Laskar J, Correia A C M, Gastineau M, Joutel F, Levrard B and Robutel P. 2004. Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars. *Icarus*, 170(2): 343-364 [DOI: 10.1016/j.icarus.2004.04.005]
- Levy J S, Goudge T A, Head J W and Fassett C I. 2017. Candidate volcanic and impact-induced ice depressions on Mars. *Icarus*, 285: 185-194 [DOI: 10.1016/j.icarus.2016.10.021]
- Li C, Zheng Y K, Wang X, Zhang J H, Wang Y B, Chen L, Zhang L, Zhao P, Liu Y K, Lv W M, Liu Y, Zhao X, Hao J L, Sun W J, Liu X F, Jia B J, Li J, Lan H Q, Fa W Z, Pan Y X and Wu F Y. 2022. Layered subsurface in Utopia Basin of Mars revealed by Zhurong rover radar. *Nature*, 610(7931): 308-312 [DOI: 10.1038/s41586-022-05147-5]
- Liu J J, Qin X G, Ren X, Wang X, Sun Y, Zeng X G, Wu H B, Chen Z P, Chen W L, Chen Y, Wang C, Sun Z Z, Zhang R Q, Ouyang Z Y, Guo Z T, Head J W and Li C L. 2023. Martian dunes indicative of wind regime shift in line with end of ice age. *Nature*, 620(7973): 303-309 [DOI: 10.1038/s41586-023-06206-1]
- Liu Y, Wu X, Zhao Y Y S, Pan L, Wang C, Liu J, Zhao Z X, Zhou X, Zhang C L, Wu Y C, Wan W H and Zou Y L. 2022. Zhurong reveals recent aqueous activities in Utopia Planitia, Mars. *Science Advances*, 8(19): eabn8555 [DOI: 10.1126/sciadv.abn8555]
- Malin M C, Bell J F, Cantor B A, Caplinger M A, Calvin W M, Clancy R T, Edgett K S, Edwards L, Haberle R M, James P B, Lee S W, Ravine M A, Thomas P C and Wolff M J. 2007. Context camera investigation on board the Mars Reconnaissance Orbiter. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 112(E5): E05S04 [DOI: 10.1029/2006JE002808]
- Mangold N. 2012. Fluvial landforms on fresh impact ejecta on Mars. *Planetary and Space Science*, 62(1): 69-85 [DOI: 10.1016/j.pss.2011.12.009]
- McEwen A S, Eliason E M, Bergstrom J W, Bridges N T, Hansen C J, Delamere W A, Grant J A, Gulick V C, Herkenhoff K E, Keszthelyi L, Kirk R L, Mellon M T, Squyres S W, Thomas N and Weitz C M. 2007. Mars reconnaissance orbiter's high resolution imaging science experiment (HiRISE). *Journal of Geophysical Research: Planets*, 112(E5): E05S02 [DOI: 10.1029/2005je002605]
- Michael G G and Neukum G. 2010. Planetary surface dating from crater size-frequency distribution measurements: partial resurfacing events and statistical age uncertainty. *Earth and Planetary Science Letters*, 294(3/4): 223-229 [DOI: 10.1016/j.epsl.2009.12.041]
- Milliken R E, Mustard J F and Goldsby D L. 2003. Viscous flow features on the surface of Mars: observations from high-resolution Mars Orbiter Camera (MOC) images. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 108(E6): 5057 [DOI: 10.1029/2002je002005]
- Neukum G, Jaumann R, Hoffmann H, Hauber E, Head J W, Basilevsky A T, Ivanov B A, Werner S C, Van Gasselt S, Murray J B, McCord T and The HRSC Co-Investigator Team. 2004. Recent and episodic volcanic and glacial activity on Mars revealed by the High Resolution Stereo Camera. *Nature*, 432(7020): 971-979 [DOI: 10.1038/nature03231]
- Newsom H E. 1980. Hydrothermal alteration of impact melt sheets with implications for Mars. *Icarus*, 44(1): 207-216 [DOI: 10.1016/0019-1035(80)90066-4]
- Senft L E and Stewart S T. 2008. Impact crater formation in icy layered terrains on Mars. *Meteoritics and Planetary Science*, 43(12): 1993-2013 [DOI: 10.1111/j.1945-5100.2008.tb00657.x]
- Shi Y T, Zhao J N, Xiao L, Yang Y and Wang J. 2022. An arid-semiarid climate during the Noachian-Hesperian transition in the Huygens region, Mars: evidence from morphological studies of valley networks. *Icarus*, 373: 114789 [DOI: 10.1016/j.icarus.2021.114789]
- Souness C and Hubbard B. 2012. Mid-latitude glaciation on Mars. *Progress in Physical Geography*, 36(2): 238-261 [DOI: 10.1177/0309133312436570]
- Souness C, Hubbard B, Milliken R E and Quincey D. 2012. An inventory and population-scale analysis of Martian glacier-like forms. *Icarus*, 217(1): 243-255 [DOI: 10.1016/j.icarus.2011.10.020]
- Tanaka K L, Robbins S J, Fortezzo C M, Skinner J A and Hare T M. 2014. The digital global geologic map of Mars: chronostratigraphic ages, topographic and crater morphologic characteristics, and updated resurfacing history. *Planetary and Space Science*, 95: 11-

- 24 [DOI: 10.1016/j.pss.2013.03.006]
- Wang J, Zhao J N, Xiao L, Peng S, Zhang L, Zhang Z X, Gao A T, Qiao H, Wang L, Zhang S Q, Xiao X, Shi Y T, Zhao S Y, Zhao J W, Qian Y Q, Zhang J, Zhang X B and Huang J. 2023. Recent aqueous activity on Mars evidenced by transverse aeolian ridges in the Zhurong exploration region of Utopia Planitia. *Geophysical Research Letters*, 50(6): e2022GL101650 [DOI: 10.1029/2022GL101650]
- Wilson S A, Howard A D, Moore J M and Grant J A. 2016. A cold-wet middle-latitude environment on Mars during the Hesperian-Amazonian transition: evidence from northern Arabia valleys and paleolakes. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 121(9): 1667-1694 [DOI: 10.1002/2016je005052]
- Wilson S A, Morgan A M, Howard A D and Grant J A. 2021. The global distribution of craters with alluvial fans and deltas on Mars. *Geophysical Research Letters*, 48(4): e2020GL091653 [DOI: 10.1029/2020gl091653]
- Wu Y H. 2023. China's deep space exploration. *Aerospace China*, 24(1): 3-9 [DOI: 10.3969/j.issn.1671-0940.2023.01.001]
- Xiao L. 2023. Evolution of the geological environment and exploration for life on Mars. *Journal of Earth Science*, 34(5): 1626-1628 [DOI: 10.1007/s12583-023-1929-7]
- Xiao L, Huang J, Kusky T, Head J W, Zhao J N, Wang J, Wang L, Yu W C, Shi Y T, Wu B, Qian Y Q, Huang Q and Xiao X. 2023. Evidence for marine sedimentary rocks in Utopia Planitia: Zhurong rover observations. *National Science Review*, 10(9): nwad137 [DOI: 10.1093/nsr/nwad137]
- Zhang M J, Yan Q, Xu Y, Xiao L, Zhao J N, Song D B, Wang J, Yu S R, He Z K, Liu H S, Cui D S and Zhang X P. 2023b. Self-weight consolidation process of water-saturated deltas on Mars and Earth. *Icarus*, 390: 115304 [DOI: 10.1016/j.icarus.2022.115304]
- Zhang M J, Zhao J N, Xiao L, Xu Y, Bugiolacchi R and Wang J. 2023a. Fan-shaped deposits in the northern Hellas region, Mars: implications for the evolution of water reservoir and climate. *Icarus*, 395: 115470 [DOI: 10.1016/j.icarus.2023.115470]
- Zhao J N, Huang J, Xiao L, Qiao L, Wang J and Hu S Y. 2013. Crater size-frequency distribution measurements and age determination of sinus Iridum. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 38(2): 351-361 (赵健楠, 黄俊, 肖龙, 乔乐, 王江, 胡斯宇. 2013. 撞击坑统计定年法及对月球虹湾地区的定年结果. *地球科学(中国地质大学学报)*, 38(2): 351-361) [DOI: 10.3799/dqkx.2013.034]
- Zhao J N, Shi Y T, Zhang M J, Yang Y, Huang T, Wang J, Huang J and Xiao L. 2021. Advances in Martian water-related landforms. *Acta Geologica Sinica*, 95(9): 2755-2768 (赵健楠, 史语桐, 张明杰, 杨勇, 黄婷, 王江, 黄俊, 肖龙. 2021. 火星水成地貌研究进展. *地质学报*, 95(9): 2755-2768) [DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021267]
- Zhao J N and Xiao L. 2016. Achievements, issues and prospects in study of Martian paleolakes. *Earth Science*, 41(9): 1572-1582 (赵健楠, 肖龙. 2016. 火星古湖泊研究的现状、问题与展望. *地球科学*, 41(9): 1572-1582) [DOI: 10.3799/dqkx.2016.505]
- Zhao J N, Xiao L and Glotch T D. 2020. Paleolakes in the Northwest Hellas Region, Mars: implications for the regional geologic history and paleoclimate. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(3): e2019JE006196 [DOI: 10.1029/2019je006196]
- Zhao J N, Xiao Z J, Huang J, Head J W, Wang J, Shi Y T, Wu B and Wang L. 2021. Geological characteristics and targets of high scientific interest in the Zhurong landing region on Mars. *Geophysical Research Letters*, 48(20): e2021GL094903 [DOI: 10.1029/2021GL094903]
- Zhao Y Y S, Yu J, Wei G F, Pan L, Liu X F, Lin Y T, Liu Y, Sun C, Wang X Y, Wang J T, Xu W J, Rao Y F, Xu W M, Sun T Y, Chen F Y, Zhang B Y, Lin H L, Zhang Z Q, Hu S, Li X Y, Yu X W, Qu S Y, Zhou D S, Wu X, Zeng X J, Li X Y, Tang H and Liu J Z. 2023. *In situ* analysis of surface composition and meteorology at the Zhurong landing site on Mars. *National Science Review*, 10(6): nwad056 [DOI: 10.1093/nsr/nwad056]
- Zhao Y Y S, Zhou D S, Li X Y, Liu J Z, Wang S J and Ouyang Z Y. 2020. The evolution of scientific goals for Mars exploration and future prospects. *Chinese Science Bulletin*, 65(23): 2439-2453 (赵宇鹤, 周迪圣, 李雄耀, 刘建忠, 王世杰, 欧阳自远. 2020. 国际火星探测科学目标演变与未来展望. *科学通报*, 65(23): 2439-2453) [DOI: 10.1360/TB-2019-0638]

Geological characteristics of the Cerulli region, Mars: Implications for future sample-return missions

ZHANG Shiqi¹, ZHAO Jiannan^{1,2}, ZHANG Heng¹, SHI Yutong², XIA Miaosen¹,
ZHAO Junli¹, XIAO Long²

1. Key Laboratory of Geological Survey and Evaluation of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Planetary Science Institute, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: China plans to conduct the “Tianwen-3” Mars sample-return mission around 2030 to understand the habitability of Mars further and search for the potential signs of Martian life. Selecting a suitable landing site is crucial to ensure the successful achievement of mission objectives. In this paper, the geological characteristics of the Cerulli crater area in the northwestern Arabia Terra of Mars are studied in detail

utilizing high-resolution remote sensing images and topographic data. Multiple landform types are identified within the study area, including impact craters, water-related landforms, and glacial landforms. The primary types of impact craters observed within the study area include ancient craters covered by ejecta blankets, fresh craters with central pits, typical ring-mold craters, and craters filled with ice-rich deposits. The main water-related landforms are Type-1 valley networks, which are elongated and sinuous, with narrow widths and well-defined edges. Additionally, Type-2 valley networks, which are wider and often develop at the termini of Type-1 valley networks with linear fissures visible at their floor, are observed. The Mamers Vallis, an outflow channel partially buried by the Cerulli crater and its ejecta blanket, is also identified. In addition to ring-mold craters and glacial landforms at the floor of valley networks, the glacial landforms in the study area include viscous flow features, which are concentrated around the central peaks of the craters. Furthermore, this paper conducted crater counting and compiled a geological map of the study area. The research findings indicate that the Cerulli crater formed at the Noachian/Hesperian boundary (around 3.7 Ga) and suggest that Mamers Vallis was formed during the Noachian period, prior to 3.7 Ga. At the Noachian/Hesperian transition, the Cerulli crater formed and covered parts of the Mamers Vallis outflow channel and earlier craters with its ejecta blanket. Simultaneously, water activity triggered by the impact event formed various water-related landforms within the ejecta blanket and crater. From the Hesperian to the Amazonian period, after the formation of the Cerulli crater, new craters emerged and modified the crater floor and ejecta blanket of the Cerulli crater. The region may have undergone multiple glacial activities and formed various glacial landforms such as viscous flow features and ring-mold craters within the region, and potentially new valley networks carved by glacial meltwater. The formation mechanism of the valley network in the region may be related to the release of liquid water triggered by impact events or glacial activity resulting from changes in the Martian obliquity. The complex water activity characteristics in this region provide clues for a deeper understanding of Mars' climate and water activity history while offering conditions conducive to the formation and preservation of habitable environments and even life. Therefore, this study suggests that this region could serve as a potential landing site for future Mars sample-return missions, especially the fan-shaped deposits at the floor of the Cerulli crater and the termini of valley networks. Sampling at these locations offers remarkable advantages for understanding the duration of Martian water activity, sediment composition, climatic characteristics, and searching for signs of life.

Key words: remote sensing, Mars, Cerulli crater, geological characteristics, sample-return mission, landing site selection

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFF0504000); National Natural Science Foundation of China (No. 42272274, 42241839); Natural Science Foundation of Hubei Province (No.2024AFB692)