祝融号着陆区地质背景和潜在探测目标研究

张朝琳^{1,2}, 刘洋^{1,3*}, 吴兴¹, 刘佳¹, 赵振兴^{1,2}, 邹永廖¹

1. 中国科学院国家空间科学中心, 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

*联系人, E-mail: yangliu@nssc.ac.cn

收稿日期: 2022-01-02; 接受日期: 2022-02-11; 网络出版日期: 2022-02-17

民用航天预先研究(编号: D020102, D020101)、国家重点研发计划(编号: 2019YFE0123300)和国家自然科学基金(编号: 42072337)资助项目

摘要 在行星探测任务中, 地图可以提供全球性和区域性的基础地质地貌单元信息, 其蕴含的地质背景信息是巡视器选取科学探测目标的重要参考依据. 本文以祝融号火星车着陆点正南15 km处(109.922°E, 24.821°N)为中心, 绘制了4周约25 km范围(109.907°E–109.966°E, 24.732°N–25.241°N) 1:50000着陆区形貌分布图, 进一步划分地貌亚类并描述其特征, 分析地貌的科学价值. 通过研究获得了祝融号着陆区形貌上的三个主要认识: (1) 总体地势低平且起伏小, 出露的地层单元较为单一; (2) 较为显著的面状地貌有风成地貌、凹锥、撞击坑、台地和脊状平原, 其中风成地貌分布广泛, 凹锥分布呈现出一定的聚集特征; (3) 线状及(或)条带状单元较为丰富且为分散型分布, 如槽沟、脊、皱脊、叶状边缘等. 本研究还总结了着陆区具有较高科学价值地貌的研究进展, 可为祝融号选取探测目标和为后续的数据解译工作提供参考.

关键词 祝融号, 乌托邦平原, 地质背景, 探测目标

PACS: 96.12.-a, 96.15.-g, 96.30.Gc

1 引言

我国首次火星探测任务的着陆平台和火星车已于2021年5月15日在乌托邦平原(Utopian Planitia, UP)南部(图1)成功着陆^[1–5], 截至2022年1月31日, 祝融号火星车已在火星表面工作255个火星日, 累计行驶1524 m. 未来, 火星车还将继续向南行驶, 寻找和探测更多感兴趣的目标. 火星车上携带的火星表面成分探测仪、多光谱相机、次表层探测雷达、表面磁场探测

仪、气象测量仪和导航地形相机等6个科学载荷将继续获取行驶区域内形貌与地质构造特征、土壤特征与水冰分布、表面物质组成、表面气候与环境特征等丰富信息^[6,7]. 与轨道环绕器相比, 火星车的探测范围更小、目标更具体、结果更精细. 绘制大比例尺的精细地图, 详细研究区域内地貌的类型、分布, 有针对性地调研重要地貌的科学意义和研究进展, 可以为祝融号火星车选取有价值的科学探测对象提供重要依据.

祝融号着陆的乌托邦平原是火星最大的撞击平

引用格式: 张朝琳, 刘洋, 吴兴, 等. 祝融号着陆区地质背景和潜在探测目标研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 239508
Zhang C L, Liu Y, Wu X, et al. Geological background and potential exploration targets of the Zhurong landing area (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 239508, doi: 10.1360/SSPMA-2022-0001

图 1 研究区域地理位置、地质单元及地形特征. (a) 研究区位于乌托邦平原南部, 北部低地和南部高地边界(白色虚线)的一个过渡区域, 底图为MOLA_HRSC融合的200 m山体阴影图; (b) 位于晚西方纪低地单元上(绿色: IHL, 晚西方纪低地单元; 橙红色: AHV, 亚马逊纪和西方纪火山单元; 黄色: LHT, 晚西方纪过渡单元) [8]; (c) 研究区地势整体南高北低, 最大高差约200 m, 南部有一条东西向、长约16 km的叶状边缘将南北分隔开

Figure 1 Geographical location, geological units and topographical features of the study area. (a) The study area is located on the southern part of the Utopia Planitia, a transitional area of the boundary (the white dotted line) of the northern lowlands and southern highlands. The base map shows the MOLA_HRSC merged 200 m hillshade relief; (b) it is located on the Late Hesperian lowland unit (Green: IHL, Late Hesperian lowland unit; orange: AHV, Amazonian and Hesperian volcanic units; yellow: LHT, Late Hesperian transitional unit) [8]; (c) the topography of the study area is high in the south and low in the north, with a maximum elevation about 200 m. In the south, there is an east-west, 16 km-long lobate margin separating the north from the south.

原, 长期受到撞击、火山、河流、冰缘等多种地质作用的改造, 物质组成和地质演化过程复杂. Wu等人^[1]

将乌托邦平原的演化历史总结为以下8个阶段: 乌托邦平原的形成始于一个大型的诺亚纪撞击事件; 随后

盆地被沉积物和火山物质改造、填充; 早西方纪时期被火山平原所覆盖; 西方纪中期被褶皱山脊变形所主导; 晚西方纪时期, 北部平原外流通道形成, 外流通道产生的沉积物掩盖并改变了脊状平原; 在地质历史上很短的时间内, 外流河道的流失所残留的沉积物导致北方荒原物质(Vastitas Borealis Formation, VBF)的形成; 水或冰的升华或体积压实产生的构造回弹形成了巨大的多边形; 最后, 亚马逊纪的熔岩流和埃律西昂火山省岩浆流流入盆地的东南部. 长期的地表重塑使得乌托邦平原表面趋于平坦, 并在一定程度上限制了我们对这个区域地质演化过程的认识. 在Tanaka等人^[8]绘制的火星全球地质图中, 着陆区位于晚西方纪低地单元上(图1(b)). 一些研究认为, 乌托邦平原历史上曾存在大型水体, 但是水体的规模、范围、留存时间以及是否形成了古海洋等还存在争议^[9-11].

乌托邦平原作为一个负高程中心, 在漫长的地质演化历史中扮演着“汇”的角色, 记录了丰富的地质过程及其产物. 相较于南部表现出的丰富地貌, 乌托邦平原看上去显得比较“单调”——地表的重塑抹去了大部分演化的痕迹, 制约了对乌托邦平原乃至火星全球环境演化的认知. 目前, 这一区域还有大量尚待研究的科学问题, 如地层结构及物质成分(是否含有水冰和挥发分), 是否曾存在大型的水体, 地表物质是否经历了长期的水合作用, 诺亚纪和西方纪过渡时期气候急剧变化的原因, 是否还有潜在的热活动等.

本文绘制了着陆区1:50000形貌分布图, 全面调查了着陆区的主要地貌及其分布, 总结了部分重要地貌的研究进展, 以期对祝融号火星车选取感兴趣目标、开展有针对性的探测工作、获取具有科学价值的探测数据提供参考, 辅助后续探测数据解译工作, 进而拓展对火星古气候、古环境的认识, 以及帮助更好地理解行星地球的环境演化.

2 数据和方法

本次地图绘制工作包括背景调研、数据的选取、数据库和制图环境的搭建、信息提取和制图综合等过程. 数字地图的绘制在地理信息系统(Geographic Information System, GIS)平台中完成, 本次制图使用ArcGIS 10.6以及Adobe Illustrator 2020, 数据统计使用MatlabR2021a.

数据主要使用了火星全球勘测者(Mars Global Surveyor, MGS)搭载的火星轨道激光高度计(Mars Orbiter Laser Altimeter, MOLA)记录的区域地形数据(包括高程和生成的山体阴影数据)^[12]、火星勘测轨道飞行器(Mars Reconnaissance Orbiter, MRO)搭载的背景相机(Context Camera, CTX)提供的火星全球地表可见光遥感图像(分辨率为6 m/像素)^[13]和高分辨率成像科学仪器(High Resolution Imaging Science Experiment, HiRISE)可见光图像数据(分辨率0.25–0.5 m/像素)^[14]. 在数字制图工作中, 底图需满足两个基本条件: 范围覆盖整个制图区域和分辨率满足制图比例尺的要求. 在1:50000的地图中, 图上1 cm代表实际距离500 m. CTX的分辨率为6 m/像素, 可以满足1:25000及更小比例尺的制图要求, 同时CTX是目前覆盖度最广的火星遥感数据(几乎覆盖了火星全球), 因此选择CTX作为底图.

下载原始的CTX的数据后, 需要对数据进行一定的处理, 包括拼接、裁剪等, 以获取刚好能完全覆盖制图区域的可用底图. 在ArcGIS10.6中使用镶嵌功能将轨道器获取的CTX图像拼接成一张完整的图像, 拼接后图像外轮廓不一定与研究区域范围刚好重合, 需在底图同一坐标系下绘制研究区域矢量范围, 再用矢量边界裁剪已拼接的底图, 便可获得研究区域的底图. HiRISE图像虽然没有覆盖整个研究区域, 但其更高的分辨率可以帮助更好地分析单个地貌(如凹锥)的形态特征. 使用点、线、面三种基本要素对地貌进行矢量化, 将所有的栅格底图和矢量图层的地理坐标统一为Mars2000_Sphere坐标系, 并在统计时以区域中心点(约109.922°E, 24.821°N)为中心进行兰勃特方位等积投影. 在1:10000及更大比例尺的视图下进行制图, 保证各要素在成图中可见. 制图工作参阅美国联邦地理数据委员会(U.S. Federal Geographic Data Committee, FGDC)发布的地质图符号化的数字制图标准及已发表的相关成果, 并结合区域实际情况有所调整^[2,3,8,15,16].

3 结果

为了解区域内主要的地貌类型及其分布情况, 以109.922°E, 24.821°N为中心绘制了比例尺为1:50000的着陆区形貌分布图(图2). 依据形态和成因, 将区域内地貌划分为点状特征、线状特征和面状单元 3 大类.

图 2 祝融号着陆区形貌分布图

Figure 2 Geomorphology map of Zhurong landing area.

点状特征描绘的是直径 ≥ 50 m的小撞击坑(Small Crater, Sc), 线状特征包括撞击坑坑缘(Crater Rim, Cr)、脊(Ridge, R)、皱脊(Wrinkle Ridge, Wr)、槽沟(Trough, Tr)、叶状边缘(Lobate margin, Lm)等5类地貌; 面状单元有6类共9种, 包括平原(Plain, P)、脊状平原(Ridged Plain, Rp)、风成单元(Aeolian Bedform, Eb)、台地(Mesa, Ms)、撞击单元(溅射毯Crater Ejecta, Ce和撞击坑内部单元Crater Interior, Ci)、锥状单元(锥体Cone, Cc, 典型凹锥Pitted Cone1, Pc1, 可能的或不规则的凹锥Pitted Cone2, Pc2)。

3.1 线状特征

线状特征包括脊、皱脊、槽沟和叶状边缘, 其分

布如图3(a), (b)所示。脊是较为平直、尖锐、细窄且两侧坡向相反的线性凸起, 主要分布在着陆点的西南部, 图4(a)黄色虚线为脊线。皱脊通常比脊更宽和弯曲, 沿走向不对称, 边缘较为粗糙, 有微小褶皱(图4(b)), 主要分布在东部的脊状平原单元上。典型的皱脊有两个主要的地形特征: 一条宽达几十公里的脊和脊上或附近蜿蜒且不连续的次脊^[17]; 着陆区的这些线状特征规模虽然比典型的皱脊小, 但是形态特征与皱脊较为一致, 可能是浅层推力断层有关的形变造成的微小皱脊^[18]。槽沟是大型的长条状低地, 两侧高, 中间低, 并沿一定的方向延伸(图4(c))。着陆点以西的槽为南北走向, 绵延约20 km, 宽数百m; 着陆点以东的槽呈东北-西南走

图 3 地图要素的分布. (a) 脊和皱脊, 黑色为脊, 粉红色为皱脊; (b) 浅蓝色为槽, 深蓝色为叶状边缘; (c) 撞击坑, 黄色: 撞击坑内部, 绿色: 溅射, 黑点: 直径 ≥ 50 m且 < 500 m的撞击坑; (d) 风成地貌; (e) 锥状单元, 包括锥体、典型凹锥以及可能的凹锥; (f) 台地和脊状平原

Figure 3 Distribution of map features. (a) Ridges and wrinkle ridges, black lines represent ridges, pink lines represent wrinkle ridges; (b) troughs (light blue) and wrinkle ridges (dark blue); (c) impact craters, yellow: interior of impact craters, green: crater ejecta, black dots: impact craters ≥ 50 m and < 500 m in diameter; (d) aeolian bedforms; (e) cone-shaped units, including cones, typical pitted cones and possible pitted cones; (f) mesa and ridged plains.

向, 同样长约20 km, 宽100–500 m. 叶状边缘是弯曲的凸起斜坡, 边缘类似于陡崖(图4(d)), 可能是存在过去熔岩或者泥浆流动边界的证据, 在平原内部各处几乎均有发现, 东南的聚集情况较为明显(图3(b)); 最长也是最具有代表性的一条叶状边缘位于南部, 长约16 km, 其南北两侧高差可达60 m (图1(c)).

3.2 点状特征和撞击单元

点状特征绘制了所有直径 ≥ 50 m且 < 500 m的小撞击坑, 共12090个. 小撞击坑在着陆区内密集分布, 中南部聚集特征较为明显(图3(c)). 撞击单元(溅射毯和撞击坑内部单元)是直径 ≥ 500 m的撞击坑, 共32个, 随机分布(图3(c)). 北部有两个较大的撞击坑, 溅射毯都较为明显, 研究区域中最大的撞击坑如图5(e)所示. 地图西北角可见一个幽灵撞击坑(图5(a)), 幽灵撞击坑具有双同心环边缘, 是被后期物质充分填充、退化程度很高的一种撞击坑, 形成时间早于VBF.

3.3 面状特征

在前人的研究中, 乌托邦平原是一个单一的地质单元, 主要由晚西方纪到早亚马逊纪时期的北方荒原物质(Vastitas Borealis Formation, VBF)组成^[19]. 整体上, 研究区域地势平坦且起伏小, 偶见橘皮状纹理. 本文将该区域视为一个较为完整的基础单元: 平原单元. 当然, 在平原单元上可能覆盖了后期重塑事件的物质. 因此进一步划分地貌亚类为脊状平原、风成单元、台地、锥状单元(Cone)和撞击单元(Crater) 5类, 共8个单元, 其分布和形态特征分别如图3(c)–(f)和图5所示. 撞击单元已在3.2节介绍, 此部分不再赘述.

脊状平原是一种比平原更加粗糙、分布着纵横交错的皱脊的连续单元(图5(b)), 东部的三个小区域都发现了此特征(图3(f)). 火星高海拔平原上的皱脊平原是由岩石圈的厚表面压缩构造力导致的深层逆冲断层形成的^[20], 在北部平原, 脊状平原在许多地方被VBF所覆

图 4 (网络版彩图)主要的线状特征细节. (a) 脊, 中心为 109.593°E , 24.965°N ; (b) 皱脊, 中心为 110.265°E , 25.19°N ; (c) 槽, 中心为 109.841°E , 25.03°N ; (d) 叶状边缘, 中心为 110.058°E , 24.629°N

Figure 4 (Color online) Details of linear features. (a) Ridge, centered at 109.593°E , 24.965°N ; (b) wrinkle ridge, centered at 110.265°E , 25.19°N ; (c) trough, centered at 109.841°E , 25.03°N ; (d) lobate margin, centered at 110.058°E , 24.629°N .

盖^[21,22].

风成单元是研究区域内广泛分布的亮色调小型风成单元, 同时聚集分布在一些海拔较低和较为封闭的区域, 如撞击坑内、槽(图5(c))及部分锥状单元附近. 我们认为这些风成单元是横向风成脊(Transverse Aeolian Ridges, TAR), 因为它们都具有体积小、横向尺寸窄、形状细长且一般较为简单的特点^[23]. 由于TAR体积较小, 在CTX分辨率下无法分辨出单个TAR的轮廓, 只能使用面状要素对TAR聚集分布的区域进行绘制. 此外, 还利用覆盖着陆点的一景HiRISE图像(ID: ESP_069665_2055)绘制了TAR脊线, 在这张图像覆盖的约 86.2 km^2 范围内, 描绘出5497条脊线(图3(d)), 长度最小为4 m, 最大达364 m. TAR形状多样, 有简单型、曲折型、分叉型、网格型和新月型等, 网格型只分布在撞击坑底部; 走向为西北-东南, 反映盛行风向为东北-西南.

区域内仅有的一个台地位于着陆点西南约25 km处(中心经纬度 109.563°E , 24.806°N). 台地的识别特征是比周围地形高, 顶部平坦, 边缘陡峭, 形状可为椭

圆、多边形或不规则. 识别出的台地上叠加了数十个大小不一的撞击坑, 顶部边缘有环状槽沟, 槽沟以内有一个多边形, 多边形的外轮廓为鲸鱼状(图5(d)). 台地形态流畅, 质地较为紧实, 呈现出侵蚀残余的特征.

锥状单元包括锥体(Cone, Cc)、典型凹锥(Pitted Cone1, Pc1)、可能的或不规则的凹锥(Pitted Cone2, Pc2) 3类(图3(e)). 如图5(f)所示, Cc表面圆滑, 光照一侧很亮, 放大后显示出块状岩石的形态特征; 大小不一且都偏小, 直径20–300 m不等; 通常呈簇状集中分布在一块较小的区域, 使地面呈现瘤状. Pc1最显著的特征是顶部有一个圆形的凹坑, 表面纹理比周围更细腻、平滑, 且单独存在. 对识别出的35个典型凹锥的底部直径和中心直径进行统计, 如图6所示. 底部直径平均约为474 m, 最小为246.8 m, 最大为863.5 m. 中心直径平均约为237 m, 最小为103.9 m, 最大约为469.5 m. Pc2具有Pc1的特点, 它们都是顶部有凹坑的锥体, 都有平滑的表面纹理, 但是Pc2形状相对不规则, 彼此之间界限模糊甚至相连, 受侵蚀作用的影响更大. Pc1和Pc2周围(主要是其西北和东边)通常会有呈放射状分布的TAR,

图 5 面状单元细节. (a) 着陆区CTX底图, 一个幽灵撞击坑在西北角, 白色线条指示(b)–(h)的位置; (b) 脊状平原, 多条方向不同的脊交错分布, 中心为110.326°E, 25.006°N; (c) 风成地貌, 图中亮色调条纹状物质, 中心为110.053°E, 25.022°N (HiRISE图像ID: ESP_069111_2050); (d) 台地, 中心为109.563°E, 24.806°N; (e) 区域内最大的撞击坑及其溅射毯, 中心为109.699°E, 25.032°N; (f) 锥体, 大小不一, 中心为109.508°E, 24.935°N; (g) 典型凹锥, 中间有圆形凹坑、底部近圆形的锥体, 中心为109.972°E, 24.795°N (HiRISE图像ID: ESP_070377_2050); (h) 凹锥类似物, 顶部有凹坑, 但是明显有侵蚀痕迹, 或者彼此之间无明显边界, 中心为110.128°E, 24.672°N

Figure 5 Details of units. (a) Landing area based on CTX, with a ghost crater in the northwest corner and the white boxes marking the location of (b)–(h); (b) the ridged plain, with different ridges staggered centered at 110.326°E, 25.006°N; (c) aeolian bedforms are highlight stripe-like features centered at 110.053°E, 25.022°N (HiRISE image: ESP_069111_2050); (d) mesa centered at 109.563°E, 24.806°N; (e) the biggest impact crater and its ejecta centered at 109.699°E, 25.032°N; (f) cones with different sizes centered at 109.508°E, 24.935°N; (g) typical pitted cone has a circular pit on the top and the bottom is round centered at 109.972°E, 24.795°N (HiRISE image ID: ESP_070377_2050); (h) likely pitted cones, with a pit on the top, but it is obviously eroded, and there are no obvious boundaries between each other, centered at 110.128°E, 24.672°N.

这些TAR的走向与其他区域没有明显差异. 从分布上看, 3类锥状单元的空间分布具有一定的相关性, 集中在中西部, 并且接近叶状边缘末端.

4 讨论

整体上, 着陆区地势平坦且地貌类型丰富(图2),

图 6 凹锥的直径统计. (a) 用圆拟合凹锥形状, 橙色圆代表凹锥底部的范围, 黄色为凹锥顶部小坑的范围(HiRISE图像ID: ESP_070377_2050); 研究区内35个典型凹锥的底部直径统计(b)和中心直径统计(c)

Figure 6 Diameter statistics of pitted cones. (a) Matching the shape of the pitted cones by circles, orange: the range of the bottom, yellow: the range of the top pit (HiRISE image ID: ESP_070377_2050); basal diameter (b) and center diameter (c) statistics of 35 typical pitted cones in the study area.

这有利于火星车的行驶和寻找探测目标. 在这一部分, 选取着陆区内4类研究优先级较高的地貌进行讨论, 并提出接下来的探测建议.

4.1 凹锥

凹锥形态特殊, 是着陆区备受关注的一种地貌. 目前, 至少有8种不同的假说来解释凹锥的形成, 如撞击坑、壁垒撞击坑、火山、泥火山、凝灰岩、泉丘、无根锥和冻胀丘等^[24]. 现有研究中, 更多证据指向了冻胀丘模式和泥火山模式. Depablo和Komatsu^[24]对乌托邦平原广泛存在的穹窿、圆锥体和环状结构的形成机制进行了研究, 基于形态学和地球类似物的分析, 并结合乌托邦平原地质背景, 他们倾向于用冻胀丘模式来解释三者的存在, 认为穹窿、圆锥体和环状结构分别处于冻胀丘演化的早期、中期和晚期三个阶段.

在泥火山模式中, 乌托邦平原的凹锥虽然并不是岩浆火山, 但是其具有和火山相似的特征. 泥火山是地下气体携带水、细粒物质喷出地表所形成的地貌, 顶部凹陷的边缘是泥浆干燥、凝固所形成的, 随着不断喷发, 泥火山会不断向外围输送泥浆、发育成不同的形态. 泥火山的形成需要具备泥浆形成的条件、足够的地下压力以及透气的地层, 可能与气体、热液、火山或者生命活动有关. 在地球上, 泥火山附近都存在泥舌、喷出物堆积体和地表裂缝等结构. 我们没有在着陆区观察到这些特征, 可能的原因是, 泥火山停止喷发后, 这个区域经历了长期的或(和)强烈的后期

改造. 未来需要更多关于物源及流出物去向的证据, 才能判断这些凹锥的形成机制.

另外, 虽然3类锥状单元具有形态上的相似性, 但是我们无法确定它们是相似(或同一)地质演化过程的结果, 如果他们经历了相同的演化过程, 它们分别处在演化的什么阶段以及造成他们差异的原因是什么将会是值得深入探讨的课题. 如果它们的相似是不同作用所致, 那这一区域演化的丰富性将更值得挖掘.

火星车携带的表面成分探测仪和多光谱相机可以对不同锥体的物质成分进行探测, 还可以拍摄高清的表面图像观察它们的表面特征(致密程度、裂隙和孔洞、沉积物新鲜程度等), 穿透雷达可以获取周围浅层地下的结构特征, 综合探测的结果或许会对凹锥起源和演化的研究起到关键的推动作用.

4.2 叶状边缘

叶状边缘可能是过去的熔岩或泥石流边界的证据, 祝融号获取的数据可以帮助我们识别叶状边缘的熔岩、泥流或其他特征^[2], 进而推断区域内此类地貌的成因. 着陆区叶状边缘的走向和分布似乎表明曾有物质从西北部流向东南. 我们还观察到, 在叶状边缘的末端有很多锥状单元, 这可能是锥体阻挡了流动体的流动, 也可能是相对高温的流动体使得地下的挥发分上涌, 形成了锥体^[2]. 详细调研锥状单元和叶状边缘分布的空间分布、物质成分, 可以进一步了解这种空间相关性的真实性, 也可以帮助推测其形成的时间和原因.

4.3 横向风成脊

火星北半球的TAR分布具有纬度依赖性, 几乎只在 30°N 以南出现^[23]. TAR的移动性很弱, 有研究认为TAR的内部是细粒物质, 表层覆盖着一层更大的颗粒, 在目前的风场下可能很难移动^[23]. 横向风成脊这一术语也不涉及成因, 因为目前这种地貌的起源还不清楚, 无法判定它们是波纹还是沙丘. 对于TAR目前形态的成因, 普遍认为是风力沉积的, Geissler^[25]认为某些TAR可能是数百万年前在较高轴向倾角时期形成的坚硬尘埃沉积物, 随后硬化、被侵蚀形成现在的形貌. TAR的顶部走向垂直于当地盛行风向, 尤其是在难以受到地面风影响的地方^[26], 因此TAR也被用来模拟全球风场. 在一些低洼区域, TAR的走向更多地受到局部风场的控制. 探测TAR的形态特征以及颗粒的粒度、圆度、球度、成分等特征, 可以研究区域大气的运移、TAR的成因和演化, 进而有助于了解现代火星的环境演化.

4.4 台地

台地(又叫平顶丘、桌山)具有平坦的顶部和陡峭的斜坡, 在火星马墨耳斯峡谷群(Mamers Valles)、斯堪的亚(Scandia)、乌托邦平原等区域被发现. 台地的

形成有多种解释, 如侵蚀所形成的地形倒转撞击坑^[27]、与地下富含挥发分的沉积物质的升温有关^[28]或是较厚且连续的近极地层状沉积序列的侵蚀残余^[29]. 乌托邦平原南部靠近火星南北二分界, 区域内的台地通常被理解为更大结构的侵蚀残余^[30], 可能保存了平原底部物质成分信息和区域环境演化的地层记录^[11], 这对了解乌托邦平原的地质演化具有重要的作用.

4.5 高价值探测目标

目前祝融号已针对部分石块、风成堆积物进行了初步探测, 获取了基本的形貌、光谱、气象等数据. 4.1–4.4节中列出的地貌固然具有较高的探测价值, 但目前祝融号火星车距离以上典型目标较远. 从可行性和探测效率的角度出发, 使用覆盖了着陆点的一景HiRISE作为底图, 结合火星车巡视路径方向, 将具有代表性的部分探测目标绘于图7. 着陆点附近的小区域内, 有不少锥体和小土丘(蓝绿色三角)、粗糙区域(蓝色不规则形状), 调研这3种目标可获取重要的岩石成分信息. 在着陆点西南的一个撞击坑(图7西北方的推荐探测目标, 用橙色三角形标记)内壁观察到凹坑, 可能与潜在的挥发分有关^[3]; 同时, 这个撞击坑周围分

图 7 潜在感兴趣探测目标分布(底图为HiRISE, ID: ESP_069665_2055)

Figure 7 Distribution of potential targets of interest (Basemap is HiRISE, ID: ESP_069665_2055).

布了粗糙区域、石块、横向风成脊等特征, 也可作为探测目标. 邻近着陆点的槽(蓝绿色线条)、脊(黑色线条)、叶状边缘(深蓝色虚线)均被绘制, 亦有较高探测价值. 横向风成脊(白色短线)分布广泛, 火星车在整个行进途中均可选择合适的对象获取科学数据. 同时, 也可以在不同地点收集平原地表的物质成分等信息, 研究探测点之间的差异.

5 结论

(1) 本研究绘制了中国天问一号火星探测任务火星车祝融号着陆区1:50000形貌分布图, 全面调查了着陆区地貌类型及其分布, 阐述了该区域的地质背景和

地质演化过程, 对火星车选取科学探测目标和数据解译具有一定的参考价值.

(2) 着陆区整体地势平坦, 主要的地质单元是晚西方纪低地单元, 缺乏地层叠置关系清晰的剖面; 地貌较为丰富, 分布了至少4种线状特征和6种面状地貌单元.

(3) 地貌反映了乌托邦平原南部的地质演化特征, 如锥状单元、脊状平原分别集中分布在着陆点南部、东部, 都具有一定的聚集分布特征, 暗示区域内可能存在局部特殊的地质过程; 凹锥和风成单元的形成机制可能分别与区域的地下活动、风场有关. 祝融号火星车获取的探测数据将可能解决这些地貌的起源问题, 帮助更好地理解气候变化、环境演变甚至是生命起源等关键科学问题.

参考文献

- 1 Wu X, Liu Y, Zhang C, et al. Geological characteristics of China's Tianwen-1 landing site at Utopia Planitia, Mars. *Icarus*, 2021, 370: 114657
- 2 Mills M M, McEwen A S, Okubo C H. A preliminary regional geomorphologic map in Utopia Planitia of the Tianwen-1 Zhurong Landing Region. *Geophys Res Lett*, 2021, 48: e94629
- 3 Zhao J, Xiao Z, Huang J, et al. Geological characteristics and targets of high scientific interest in the Zhurong landing region on Mars. *Geophys Res Lett*, 2021, 48: e94903
- 4 Ye B, Qian Y, Xiao L, et al. Geomorphologic exploration targets at the Zhurong landing site in the Southern Utopia Planitia of Mars. *Earth Planet Sci Lett*, 2021, 576: 117199
- 5 Liu J, Li C, Zhang R, et al. Geomorphic contexts and science focus of the Zhurong landing site on Mars. *Nat Astron*, 2022, 6: 65–71
- 6 Li C L, Liu J J, Geng Y, et al. Scientific objectives and payload configuration of China's first Mars exploration mission (in Chinese). *J Deep Space Exp*, 2018, 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. *深空探测学报*, 2018, 5: 406–413]
- 7 Geng Y, Zhou J S, Li S, et al. Review of first Mars exploration mission in China (in Chinese). *J Deep Space Exp*, 2018, 5: 399–405 [耿言, 周继时, 李莎, 等. 我国首次火星探测任务. *深空探测学报*, 2018, 5: 399–405]
- 8 Tanaka K L, Robbins S J, Fortezzo C M, et al. The digital global geologic map of Mars: Chronostratigraphic ages, topographic and crater morphologic characteristics, and updated resurfacing history. *Planet Space Sci*, 2014, 95: 11–24
- 9 Ivanov M A, Hiesinger H, Erkeling G, et al. Mud volcanism and morphology of impact craters in Utopia Planitia on Mars: Evidence for the Ancient Ocean. *Icarus*, 2014, 228: 121–140
- 10 Sholes S F, Dickeson Z I, Montgomery D R, et al. Where are Mars' hypothesized ocean shorelines? Large lateral and topographic offsets between different versions of paleoshoreline maps. *J Geophys Res Planets*, 2021, 126: e06486
- 11 Pan L, Ehlmann B L, Carter J, et al. The stratigraphy and history of Mars' Northern Lowlands through mineralogy of impact craters: A comprehensive survey. *J Geophys Res Planets*, 2017, 122: 1824–1854
- 12 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 Geophys Res*, 2001, 106: 23689–23722
- 13 Malin M C, Bell III J F, Cantor B A, et al. Context camera investigation on board the Mars reconnaissance orbiter. *J Geophys Res*, 2007, 112: E05S04
- 14 McEwen A S, Eliason E M, Bergstrom J W, et al. Mars reconnaissance orbiter's high resolution imaging science experiment (HiRISE). *J Geophys Res*, 2007, 112: E05S02
- 15 U.S. Geological Survey, 2006, FGDC Digital Cartographic Standard for Geologic Map Symbolization (PostScript Implementation): U.S.

- Geological Survey Techniques and Methods 11-A2. <http://pubs.usgs.gov/tm/2006/11A02/>
- 16 Sun V Z, Stack K M. Geologic map of Jezero crater and the Nili Planum region, Mars: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3464, pamphlet 14 p., 1 sheet, scale 1:75000, 2020
- 17 Schultz R A. Localization of bedding plane slip and backthrust faults above blind thrust faults: Keys to wrinkle ridge structure. *J Geophys Res*, 2000, 105: 12035–12052
- 18 Plescia J B, Golombek M P. Origin of planetary wrinkle ridges based on the study of terrestrial analogs. *Geol Soc Am Bull*, 1986, 97: 1289
- 19 Ivanov M A, Hiesinger H, Erkeling G, et al. Evidence for large reservoirs of water/mud in utopia and acidalia planitiae on Mars. *Icarus*, 2015, 248: 383–391
- 20 Golombek M P, Anderson F S, Zuber M T. Martian wrinkle ridge topography: Evidence for subsurface faults from MOLA. *J Geophys Res*, 2001, 106: 23811–23821
- 21 Head J W, Kreslavsky M A, Pratt S. Northern Lowlands of Mars: Evidence for widespread volcanic flooding and tectonic deformation in the Hesperian Period. *J Geophys Res*, 2002, 107: 5003
- 22 Hughes S S. Wrinkle Ridge Plains. In: *Encyclopedia of Planetary Landforms*. New York: Springer, 2014
- 23 Balme M, Berman D C, Bourke M C, et al. Transverse aeolian ridges (TARs) on Mars. *Geomorphology*, 2008, 101: 703–720
- 24 Depablo M, Komatsu G. Possible pingo fields in the Utopia Basin, Mars: Geological and climatical implications. *Icarus*, 2009, 199: 49–74
- 25 Geissler P E. The birth and death of transverse aeolian ridges on Mars. *J Geophys Res Planets*, 2014, 119: 2583–2599
- 26 Zimbelman J R, Foroutan M. Dingo gap: Curiosity went up a small transverse aeolian ridge and came down a megaripple. *J Geophys Res Planets*, 2020, 125: e06489
- 27 Dundas C M. Investigations of the Martian Mid-Latitudes: Implications for Ground Ice. Dissertation for Doctoral Degree. Tucson: The University of Arizona, 2009
- 28 Tanaka K L, Fortezzo C M, Hayward R K, et al. History of plains resurfacing in the scandia region of Mars. *Planet Space Sci*, 2011, 59: 1128–1142
- 29 Warner N H, Farmer J D. The origin of conical mounds at the mouth of Chasma Boreale. *J Geophys Res*, 2008, 113: E11008
- 30 Hargitai H, Kereszturi A. *Encyclopedia of Planetary Landforms* 2015. New York: Springer, 2015

Geological background and potential exploration targets of the Zhurong landing area

ZHANG ChaoLin^{1,2}, LIU Yang^{1,3*}, WU Xing¹, LIU Jia¹, ZHAO ZhenXing^{1,2} & ZOU YongLiao¹

¹ State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China

Maps provide global and regional information about geological and geomorphological units in planetary exploration missions. The geological background in maps is a critical reference for the rover in selecting scientific exploration targets. In this paper, a 1:50000 geomorphologic map of the Zhurong landing area (109.907°E–109.966°E, 24.732°N–25.241°N) is developed, centered 15 km south of the landing site (109.922°E, 24.821°N). Further, characteristics and scientific values of various geomorphic subtypes are classified and described in detail. Three main understandings based on the topography of the Zhurong landing area have been obtained. First, the overall terrain is low and flat, with relatively homogeneous exposed stratigraphic units. Second, obvious landforms including aeolian bedforms, pitted cones, impact craters, mesa, and ridged plains, with aeolian bedforms are widely distributed, and the distribution of pitted cones shows cluster characteristics. Third, troughs, ridges, wrinkle ridges, and lobate margins are examples of linear and/or banded feature units that are abundant and dispersed. Furthermore, this study summarizes the scientific significance of landforms, providing an important reference for selecting exploration targets of the Zhurong rover and subsequent data interpretation in the future.

Zhurong, Utopia Planitia, geological background, targets of interests

PACS: 96.12.-a, 96.15.-g, 96.30.Gc

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0001](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0001)