



“天问一号”着陆区地貌解译与定量分析

刘佳, 刘斌, 邱凯昌, 岳宗玉, 于天一, 王稼, 盛

Martian Landing Area Morphology Interpretation and Quantitative Analysis of the Zhurong Rover

LIU Jia, LIU Bin, DI Kaichang, YUE Zongyu, YU Tianyi, WANG Jia, and GOU Sheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210123>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

“祝融号”火星车遥操作技术

Teleoperation Technology of Zhurong Mars Rover

深空探测学报(中英文). 2021, 8(6): 582-591

“天问一号”着陆缓冲机构吸能材料设计分析与试验验证

Design and Test Verification of Energy Absorption Material in the Soft Landing Gear for Tianwen-1 Mars Probe

深空探测学报(中英文). 2021, 8(5): 472-477

“祝融号”火星车图像压缩软件的设计与实现

Image Compression Software Design for Zhurong Mars Exploration Rover

深空探测学报(中英文). 2021, 8(5): 503-510

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

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

深空探测学报(中英文). 2017, 4(4): 310-324

“天问一号”降落伞材料性能分析与试验研究

Performance Analysis and Experimental Study of Tianwen-1 Parachute Material

深空探测学报(中英文). 2021, 8(5): 478-485

基于LOLA数据的冯·卡门撞击坑太阳辐射研究

Research on Solar Radiation of Von Kármán Crater Using LOLA Data

深空探测学报(中英文). 2018, 5(1): 12-19



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

“天问一号”着陆区地貌解译与定量分析

刘 佳¹, 刘 斌², 邱凯昌^{2,3}, 岳宗玉^{2,3}, 于天一⁴, 王 稼⁴, 苟 盛²

(1. 中国科学院 国家空间科学中心 天气学国家重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院 空天信息创新研究院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026; 4. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094)

摘 要: 利用火星5 m分辨率的火星背景相机数字正摄影像图 (Context Camera Digital Orthophoto Map, CTX DOM) 及“天问一号”轨道器获取的高分影像数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 产品数据, 在以着陆区点为中心的20×20 km²范围内, 对“天问一号”着陆点附近的撞击坑分布密度、撞击坑的深度、深径比等进行定量分析, 着重从火星车着陆区的撞击地貌入手, 对着陆区的地质背景进行解译分析研究, 结果表明: 着陆点周边20 km范围内, 除了包含大规模的小型撞击坑以及大量的横向风成脊外, 还存在很多凹锥、构造脊和沟槽; 火星着陆区表面的撞击坑大部分是二次坑或是已退化的撞击坑, 深径比介于0.001~0.136之间。研究对着陆区地质地貌特征的深入分析, 可为乌托邦平原 (Utopia Planitia) 的地质演化历史研究提供支撑。

关键词: “祝融号”火星车; 着陆区; 高分影像; 撞击坑

中图分类号: P237

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2022)03-0329-09

DOI:10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210123

引用格式: 刘佳, 刘斌, 邱凯昌, 等. “天问一号”着陆区地貌解译与定量分析[J]. 深空探测学报 (中英文), 2022, 9 (3): 329-337.

Reference format: LIU J, LIU B, DI K C, et al. Martian landing area morphology interpretation and quantitative analysis of the Zhurong rover[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9 (3): 329-337.

引 言

中国的“天问一号”(Tianwen-1)火星探测器于2020年7月23日在海南文昌发射场发射升空,并于2021年2月抵达火星附近,成功被火星引力所捕获,5月择机着陆在火星北半球乌托邦平原 (Utopia Planitia),其着陆地点为(25.066°N, 109.925°E)^[1-2],着陆后成功实现两器分离,与此同时“天问一号”上搭载的“祝融号”火星车随后按照路径规划开展对火星表面的巡视探测,中国首次火星探测实现一次任务成功完成“绕、落、巡”3个阶段的既定目标。2021年8月30日,“祝融号”火星车在火星表面已经累计行驶1 064 m。结合中国火星探测任务数据开展着陆区形貌研究,对深入认识火星地质历史、提升中国深空探测水平有着重要的意义。

1960年,前苏联最早拉开了火星探测的序幕;随后1965年,美国的“水手4号”(Mariner 4)拍摄的火星近距离照片,首次揭示了含有大量撞击坑的火星表面^[3-5]。火星形貌系统的研究始于对Viking遥感影像的解译,区域地形地貌的既定特征反映了火星表面的相

态变化,通常不同区域会呈现不同的形态特征。表面动力作用和内部构造作用是形成火星表面形态特征的主要因素。火星南半球地质年龄较老、平均海拔高,主要以火山和撞击地貌为主;北半球地质年龄较新,地势平缓、撞击作用少,为典型的平原地带。“天问一号”着陆区位于北半球乌托邦平原南部,邻近北部平原与南部高地的分界线。Scott等^[6]在研究火星地质演化的过程中提出乌托邦平原区域可能拥有古湖泊;Carter等^[7-8]通过高光谱数据分析出乌托邦平原存在多个含水矿物露头,对于该区域水活动历史有重要指示意义。乌托邦平原的地质演化过程较为复杂,与古海岸线的邻近以及含水矿物的出露,说明其过去极有可能存在孕育生命的环境。

本文利用火星背景相机 (Context Camera, CTX) 高分辨影像对“天问一号”着陆点周围的地貌特征进行解译,着重对着陆区典型的撞击地貌、风成地貌以及其它构造地貌类型进行定量分析,深入认识着陆区的地质形貌特征,挖掘着陆区地质演化历史,为火星车的巡视探测任务规划^[9-11]做出支撑,也可为后期的科学

研究和工程任务提供研究基础。

1 研究区与数据源

1.1 研究区概况

研究区以“天问一号”着陆点(25.066°N, 109.925°E)为中心点,选择其周围20×20 km²范围内的地质地貌进行分析研究。研究区是一处地势较为平坦的火星晚西方纪地质单元(Late Hesperian Lowland unit, LHL)^[12-15],高差变化范围约为300 m。研究区内包含撞击作用形成的撞击坑与风积作用形成的横向风成脊、沙波纹,凹锥及沟槽等地貌组合特征,如图1所示,其中,红色五角星代表“天问一号”着陆点,底图是CTX DOM影像叠加“天问一号”DEM渲染图显示。

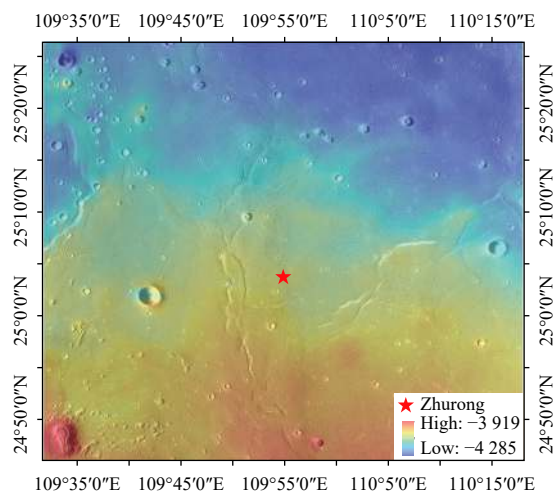


图1 “祝融号”火星车着陆点(红星处)及其周围20×20 km²研究区
Fig. 1 The Zhurong rover landing site (red star) and the study area 20×20 km²

1.2 数据与方法

火星侦察轨道器(Mars Reconnaissance Orbiter, MRO)是美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)于2005年8月12日发射的轨道器,并于2006年3月10日进入火星轨道^[16-17]。MRO上搭载的背景相机Context Camera拍摄回传的遥感数据称之为CTX影像。单张CTX影像的分辨率通常为5~7 m,结合多年重复观测,目前CTX影像已经实现了火星全球覆盖,局部区域还实现了重复观测。

本文首先根据遥感影像的分辨率、影像的入射角、光照等信息,利用多重覆盖制图定位精度的研究,选取“天问一号”着陆区附近6景单张CTX影像,然后构建遥感影像的几何模型,选取连接点,利用摄影测量平差方法消除影像间的几何不一致,获取精化的

几何模型,最后进行正射纠正重采样(5 m/pixel),并进行匀色镶嵌、裁剪,生成以着陆点为中心的20×20 km²的研究区正射影像(CTX DOM),并基于此影像对火星着陆区表面进行地貌解译、量测和分析。

以上述制作的CTX正射影像为底图,首先在选择的研究区范围内利用ArcGIS平台通过3点定圆法目视解译研究区内的所有撞击坑,对研究区附近的撞击坑的形貌大小、深径比等特征展开研究与分析,利用研究团队自行开发的ArcGIS插件精确提取撞击坑深度与直径信息^[18],进行更进一步的统计与计算。然后分析研究区内的风成地貌以及其它地貌类型。

2021年6月中国国家航天局公布了首批火星科学影像图,标志着中国首次火星探测任务的圆满成功。借助“天问一号”轨道器高分辨率遥感影像及其DEM产品可以实现火星车着陆区精细化的形貌分析。本文在对研究区撞击坑深度信息提取时,使用火星“天问一号”影像生成的DEM产品(分辨率:3.5 m),并计算了深径比,深径比的统计分析在一定程度上反映了着陆区附近撞击地貌的三维特征及其退化程度。

2 着陆区主要地貌类型解译分析

2.1 撞击地貌

撞击坑是所有固体行星表面都有的典型特征,火星上60%的撞击坑都形成于晚期大轰炸(Late Heavy Bombardment, LHB)时期^[3-4],且分布不均匀,撞击地貌在南半球多于北半球。由于重力和外力环境作用对其的改造,撞击坑在形成后都遭受了不同程度的侵蚀改造作用。着陆区主要的撞击坑类型均为简单撞击坑,其中主要由新鲜撞击坑、二次撞击坑群以及一些退化程度较高的撞击坑构成,如图2(a~c)所示。

在遥感影像的表征上,新鲜撞击坑通常具有完整的撞击坑坑沿,没有被风力或者其它外应力侵蚀的痕迹,并且撞击坑周围有明亮的辐射纹,见图2(a)。图2(b)所示二次撞击坑通常由火星上某次大型撞击事件引起的二次溅射造成的一些火星表面成簇分布,或者呈链状分布的撞击坑群,着陆区附近的二次撞击坑群主要沿NW-SE方向呈链状分布,间接说明形成二次撞击坑群的原始撞击坑的撞击方向以NW-SE方向为主。由于火星上常年存在的内外动力作用会对火星表面的撞击坑产生一定的改造,此时撞击坑表现的退化程度较高,如图2(c)所示,退化了的撞击坑没有完整的边沿,有的撞击坑内部会沉积一定的细粒沙粒或者形成沙波纹。

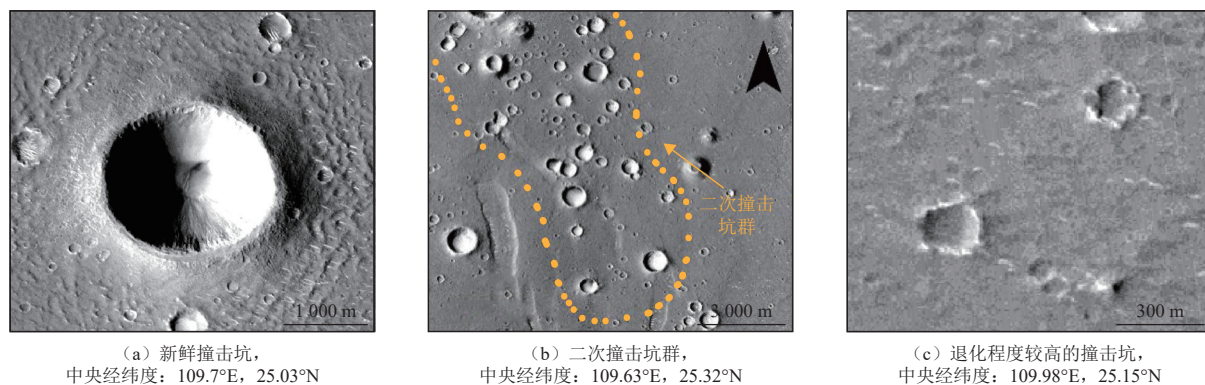


图2 研究区内主要分布的撞击坑(底图均为CTX DOM影像, 分辨率: 5 m/pixel)
Fig. 2 Impact craters in the study area, the basemap are CTX DOM images (resolution: 5 m/pixel)

本文研究区内的撞击坑, 以简单型的撞击坑为主, 见图3(a)。通过目视解译, 共识别出3 543个撞击坑, 整体而言, 研究区内撞击坑直径主要在0.034~1.99 km范围内, 研究区内较多的小撞击坑多来源于二次坑链。通过统计分析, 研究区撞击坑的完整性直径峰值为0.133 km, 见图3(b), 直径小于0.15 km的撞击坑数量占比最大, 见图3(c)。图3(b)表明, 在

整个研究区范围内, 当撞击坑直径范围大于100 m时, 撞击坑被完整解译的情况逐渐趋于最高值, 到直径为133.52 m时达到峰值, 说明研究区内直径大于100 m的撞击坑已经全部被解译提取出来。

为更清楚的对研究区撞击坑密度进行制图表达, 经试验发现当搜索半径分别为1 km和3 km时, 此时密度分布图能够较为直观的显示出撞击坑密度的整体分

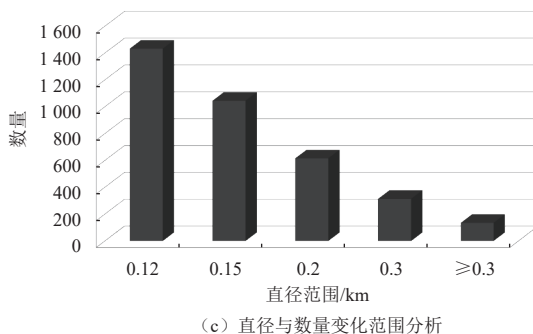
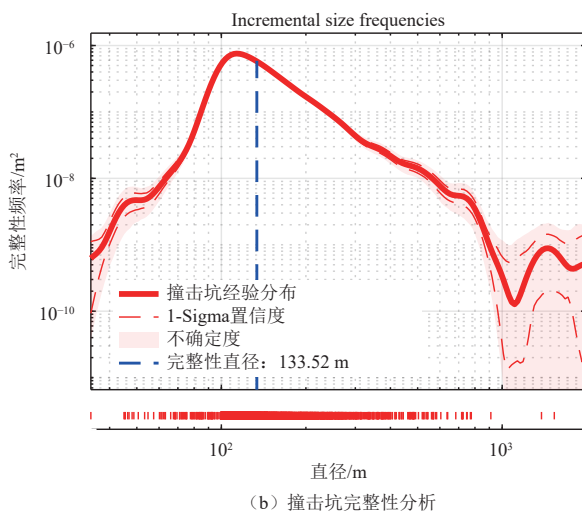
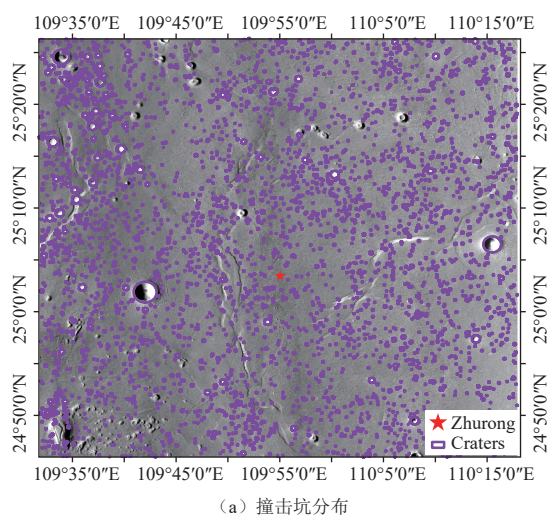


图3 研究区撞击坑分布情况、完整性分析及直径与数量变化范围(底图为5 m分辨率的CTX DOM影像)

Fig. 3 The distribution of impact craters in the study area and the completeness analysis of all impact craters (top panel), the range of crater diameter and number variation in the landing site (bottom), the basemap are CTX DOM images (5 m/pixel)

布情况。研究区撞击坑核密度分布如图4, 密度分析表明: 研究区内撞击坑在着陆点北部的密集趋势较为明显, 并且撞击坑密集区域多成簇分布的二次坑链(图2和图3), 该方向不利于火星车探测任务的开展, 正南方向撞击坑密集程度较低。乌托邦平原南部

区域是火星古海洋和古陆地的交界处, “祝融号”持续往南行驶不仅有利于火星车平稳运行, 还有利于科学探测的顺利开展。进一步的巡视探测对揭示乌托邦平原的成因、气候演化以及潜在宜居环境的分析都有重要意义。

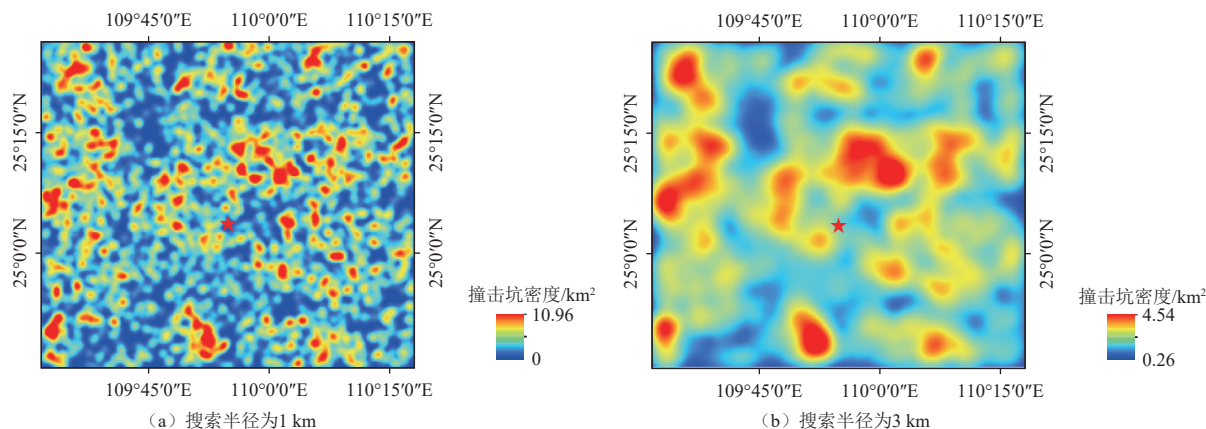


图4 研究区撞击坑核密度分布图

Fig. 4 The crater kernel density map of study area, the search radius are 1 km and 3 km

2.2 横向风成脊

火星上有稀薄的大气, 并且火星表面的风力活动十分明显^[19], 每年有一半的时间是全球性的尘暴活动, 所以风蚀作用和风积作用的产物在火星表面并不鲜见。火星沙丘以新月形沙丘、新月形沙丘链和横向沙丘等初级类型为主, 占地球沙丘约50%的线形沙丘在火星上不到10%, 并且火星上的沙丘几乎全部以简单沙丘为主^[20-21], 着陆区附近的横向风成脊(Transverse Aeolian Ridge, TAR)全部属于简单沙丘类型。长度从几米到几百米, 最宽能够在几十米的范围内变化, 且大量沉积于撞击坑和沟槽的内部, 以及部分凹锥的周围。“天问一号”着陆区附近存在的风积地貌主要是横向风成脊。其中一部分TARs沉积在撞击坑内部, 另一部分TARs沉积并依附在沟槽的周围。

本文统计了HiRISE影像(影像号: ESP_069731_2055_RED)上的4 681条TAR的形貌特征: TAR的长度范围为6~287 m, 并且平均长度是39.86 m; 宽度范围为2.5~35 m, 平均宽为8.72 m; 高度范围为1~8 m, 平均高为2.47 m。根据TARs的脊线长计算其走向, 结果表明: TAR的整体走向以NW-SE为主, 与正北方向的夹角变化范围为48°~140°。无论是在撞击坑内沉积的沙波纹还是在坑外典型的横向风成脊, 它们整体的走向趋于一致, 说明撞击坑被侵蚀严重, 以至于当风进入撞击坑内部时, 不足以因为高大或者闭合的撞击坑

壁而产生一个相当强度的局域风场来改变沙粒的堆积方向。当连续或者间歇性的净风吹蚀时, 会引起火星乌托邦平原表面沙粒不断地产生跃移、蠕移, 最后胶结堆积成以NW-SE方向为主导的沙脊。如图5所示。值得指出的是, 研究区内并未发现特别巨大或者大规模的风积沙丘和风蚀雅丹群, 没有较高的地形制约, 乌托邦平原比较适合火星车的行驶以及开展火星表面探测研究。

沙丘能够表征火星各个时期的风况类型、沉积物特征及其开始发育的古环境情况^[22]。随着越来越高精度的遥感数据实现对着陆区的覆盖, 今后可以开展对着陆区风积沙丘进行系统的量测及机理分析, 这对分析乌托邦平原的环境演化历史具有重要意义。

2.3 凹锥

在“天问一号”着陆点偏西北方向7 km左右存在典型的凹锥(Pitted Cone)。研究区附近的凹锥多数成群分布, 部分凹锥的顶部受到严重侵蚀变得破败且形状不规则。图6展示的是以5 m分辨率的CTX影像为底图解译的典型凹锥, 它的外径达1 140 m, 内径达490 m。研究区内形貌完整的26个凹锥的内径变化范围是86.8~490 m, 外径变化范围是238~1 140 m。

凹锥在火星的伊西底斯平原(Isidis Planitia)、阿西达利亚平原(Acidalia Planitia)以及克里斯平原(Chryse Planitia)等区域也有分布^[23-25]。目前凹锥的成

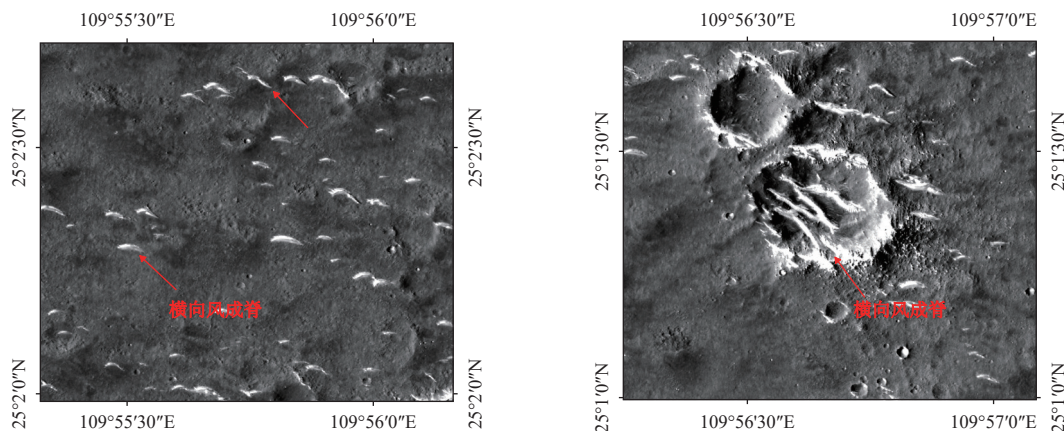


图5 着陆区附近典型的横向风成脊和撞击坑内部沙波纹沉积情况(底图为HiRISE影像,影像号:ESP_069731_2055_RED)

Fig. 5 Typical TARs and sand ripples in the impact crater around the landing area. The basemap is HiRISE image, image ID: ESP_069731_2055_RED

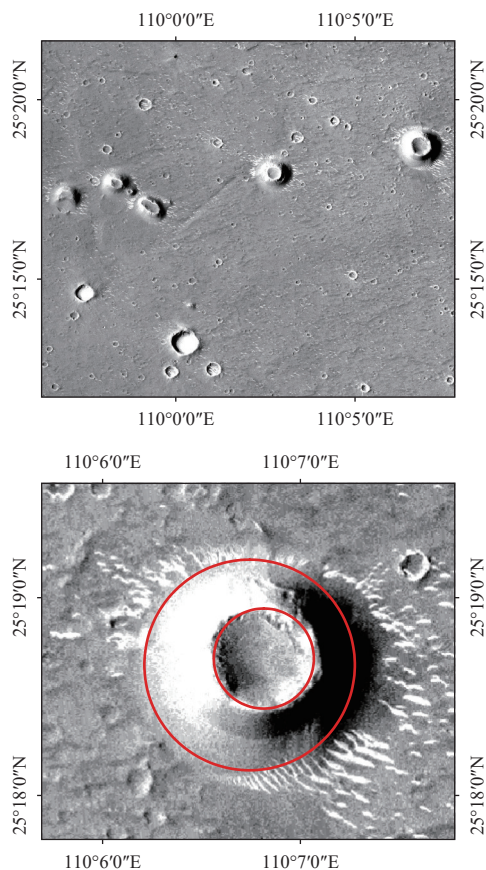


图6 研究区内典型的凹锥

Fig. 6 Typical pitted cone in the study area

因在科学界尚无明确解释, Hiesinger等^[23]认为它们可能是蕴藏火星古老生命的泥火山, 并且该假说在学界也备受关注, Oehler和Allen^[24]认为凹锥是火山渣锥, Komatsu^[25]等认为凹锥是无根锥。“祝融号”火星车的就位探测结果将为验证这些假说是否合理提供主要的资料。

2.4 构造地貌

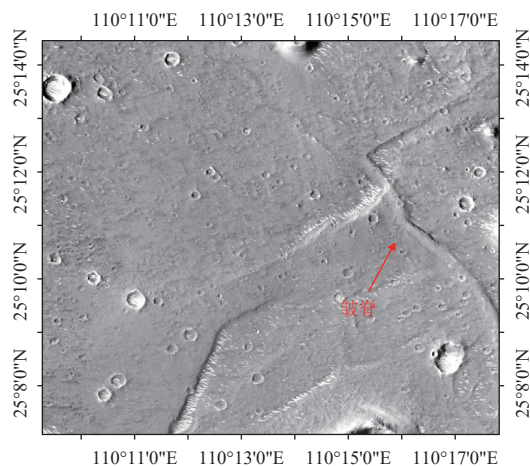
火星从诺亚纪到亚马逊纪一直都有火山活动, 火山作用不仅将地下的玄武岩带出地表, 还将火星表面的地质构造进行了一定程度的改造^[17-18]。虽然火星上厚重的岩石圈影响了火星的板块活跃度, 但是火星上依然存在着很多的表面变形, 说明火星上曾经受到过非常严重的构造作用, 例如: 火星上狭长的线性洼陷——地堑(它们是一种典型的表面伸展变形构造)、火星水手大峡谷的典型断裂构造、火星伊西底斯平原(Isidis Planitia)上的皱脊构造^[22,26-28]。

这些导致火星表面变形的构造作用将火星的表面进行了一定程度的改造, 伴随外应力的作用, 改造后的地表继续遭受长期的风力或者流水等侵蚀作用, 被改造为形态多样的地质构造特征。本文的研究区内存在很多的伸展变形构造、皱脊以及沟槽, 如图7的CTX DOM影像所示。研究区内皱脊最长的约为5.58 km, 最宽沟槽的宽度约1.6 km。

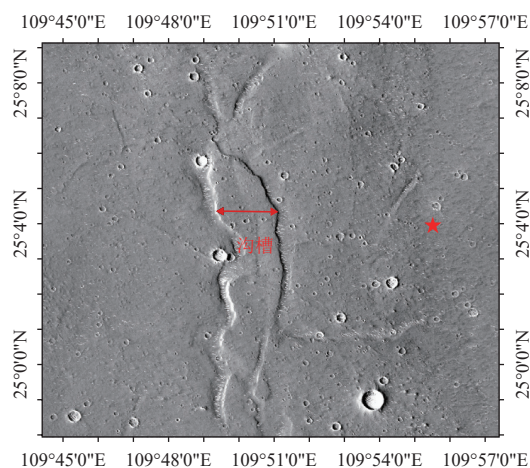
3 撞击坑深径比研究

综合前述研究与分析可知, 本文研究区内的火星表面覆盖了大量的撞击坑。在撞击坑的形貌研究中, 撞击坑的深度和直径的比值不仅是重要的形态参数, 还能了解撞击坑的退化程度^[29-33]。行星地质学界研究表明, 火星简单首次撞击坑的深径比一般为0.2^[34-35], 而早期研究使用的研究数据分辨率比较低, 所测量的撞击坑深度和直径一般是千米级以上。Daubar等^[33]基于HiRISE影像统计了火星近20年来形成的209个新鲜撞击坑, 直径为2.5~33.5 m, 计算得到的深度范围是0.2~5.2 m, 深径比范围为0.08~0.5, 均值为0.23^[36]。

本文利用自行开发的ArcGIS10.7插件^[16]对研究区的撞击坑进行深度提取, 目前“天问一号”轨道器影像



(a) 典型皱脊



(b) 典型皱脊

图7 研究区表面典型皱脊与沟槽

Fig. 7 Typical wrinkled ridges and grooves in the study area

制作的高精度DEM(分辨率: 3.5 m)底图只覆盖了本文的部分研究区, 故选择着陆区东部 $20 \times 40 \text{ km}^2$ 的“天问一号”DEM影像数据覆盖的区域作为典型区, 进行撞击坑深度提取, 典型区包含2 265个撞击坑, 提取的样本撞击坑直径变化范围从0.03~1.53 km, 计算典型区内所有撞击坑深径比情况如图8所示。

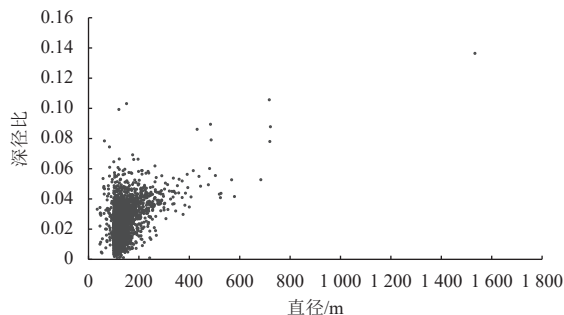


图8 典型区所有撞击坑的直径与深径比关系图

Fig. 8 The relationship between diameter and depth to diameter ratio of the impact craters in typical area

图9展示了典型区撞击坑的深径比主要集中在0.01~0.04, 深径比均值为0.024。撞击坑深度的范围是0.45~9.8 m; 直径在34~400 m之间变化, 撞击坑的深径比整体较小。

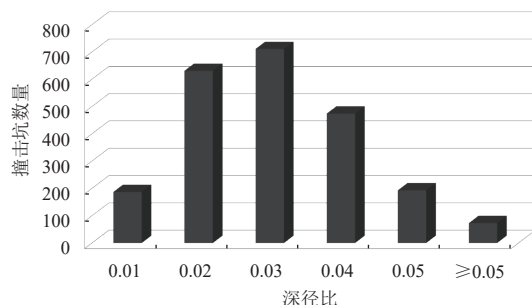


图9 撞击坑数量与深径比变化关系

Fig. 9 The relationship between the number of impact craters and the ratio of depth to diameter

前述分析表明, 火星着陆区附近的撞击坑主要由大型撞击事件的二次坑以及部分被侵蚀、填充的撞击坑构成, 二次坑在形成时撞击的能量密度远小于初始撞击坑, 体现在撞击的深径比小于简单撞击坑。乌托邦平原先后经历了沉积填充和火山熔岩流填充、流水侵蚀与填充、盆底反弹等地质构造过程^[34], 这些地表重塑事件对撞击坑存在不同程度的影响, 以致使用最新的数据提取的深度信息, 可能并非它们初始形成时的深度, 所以反映在深径比数值上会偏小。

由于DEM底图分辨率和撞击坑完整性直径结果的影响, 本文分别提取深度大于3.5 m(图10)与直径大于100 m的(图11)撞击坑深径比进行拟合分析, 发现深度大于3.5 m的撞击坑深径比主要分布在0.016~0.106之间; 直径大于100 m的撞击坑深径比主要分布在0.001~0.136之间。单一因子深径比结果均分布在相对较小的量级范围内^[18], 说明研究区撞击坑可能被沉积物填充以及风沙侵蚀等因素影响的程度较高。

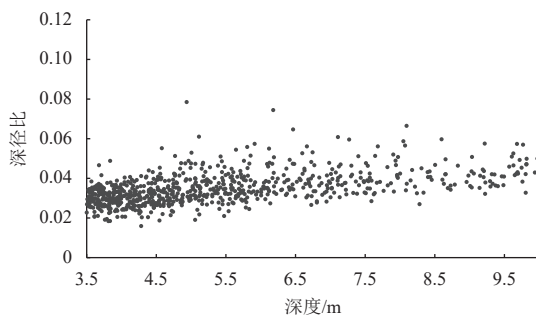


图10 深度大于3.5 m的撞击坑深径比情况

Fig. 10 Depth to diameter ratio of impact craters with a depth greater than 3.5 m

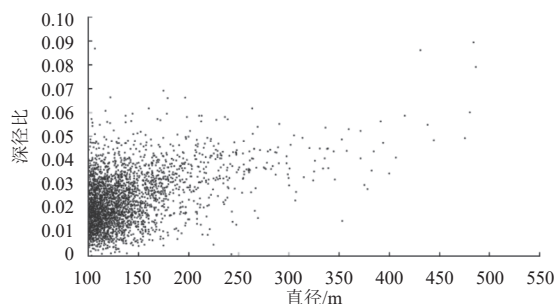


图 11 直径大于100 m的撞击坑深径比情况

Fig. 11 Depth to diameter ratio of impact craters with a diameter greater than 100 m

无论是使用何种分辨率的影像对撞击坑进行深径比提取,得到火星的简单撞击坑深径比都接近0.2。本文中研究区撞击坑深径比普遍较低,这与研究区经历的地质改造事件有直接关系,同时说明研究区内撞击坑都经历过不同程度的沉积填充或者风沙侵蚀。利用更高分辨率的HiRISE影像可以查验出,直径较大的撞击坑内部均存在不同程度的填充,并且部分撞击坑内部已经沉积了大量的线状沙波纹(见图5)。

4 结 论

本文主要利用高分辨率的火星CTX数据,对“天问一号”着陆区的地质环境以及火星车的行驶环境进行分析。着陆点周边20 km范围内的区域内,除了包含大规模的小型撞击坑以及大量的横向风成脊外,还存在很多的凹锥、构造脊和沟槽。这些复杂的地质构造类型说明火星乌托邦平原曾经经历过比较复杂的地质改造事件,是各种内外动力共同作用的结果。

利用“天问一号”轨道器影像制作的高精度DEM数据,提取了典型区内撞击坑的深度,并计算深径比。研究表明:火星着陆区表面的撞击坑大部分为二次坑或是已经退化的撞击坑,它们的深径比介于0.001~0.136之间。根据Sholes^[36]等最新的数据库显示,古海陆交界地处“祝融号”火星车的正南方向,最近距离约为180 km,并且在180~300 km之间存在过渡带。着陆区形貌分析表明,如果“祝融号”火星车能够持续平稳南向运行,则有望实现对火星凹锥、构造脊以及古海陆交界处等地貌特征进行详细探查以及就位光谱探测。

参 考 文 献

- [1] WAN W H, YU T Y, DI K C, et al. Visual localization of the Tianwen-1 lander using orbital, descent and rover images[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(17): 3439-3450.
- [2] ZOU Y, ZHU Y, BAI Y, et al. Scientific objectives and payloads of Tianwen-1, China's first Mars exploration mission[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 67(2): 812-823.
- [3] BARLOW N G. Mars: an introduction to its interior, surface and atmosphere[M]. UK: Cambridge university press, 2008.
- [4] 肖龙. 行星地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- [5] CUTTS J A, SMITH R S U. Eolian deposits and dunes on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, 78(20): 4139-4154.
- [6] SCOTT D H, RICE J W, DOHM J M. Martian paleolakes and 753 waterways: exobiological implications[J]. *Origins of 754 Life And Evolution of The Biosphere*, 1991, 21(3): 189-198.
- [7] CARTER J, POULET F, BIBRING J P, et al. Hydrous minerals on Mars as seen by the CRISM and OMEGA imaging spectrometers: updated global view[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118: 1-28.
- [8] BISHOP J L. Hydrated minerals on Mars. Water on Mars and life. [M]. Berlin: Springer, 2005.
- [9] 苟盛, 岳宗玉, 邸凯昌, 等. 火星表面含水矿物探测进展[J]. *遥感学报*, 2017, 21(4): 531-548.
- [10] GOU S, YUE Z Y, DI K C, et al. Advances in aqueous minerals detection on Martian surface[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(4): 531-548.
- [11] 邸凯昌, 刘召芹, 王文辉, 等. 月球与火星遥感制图与探测车导航定位[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [12] 邸凯昌, 刘斌, 刘召芹, 等. 火星遥感制图技术回顾与展望[J]. *航天器工程*, 2018, 27(1): 10-24.
- [13] DI K C, LIU B, LIU Z Q, et al. Review and prospect of Mars mapping technique using remote sensing data[J]. *Spacecraft Engineering*, 2018, 27(1): 10-24.
- [14] SKINNER J A, HARE T M, TANAKA K L. Digital renovation of the atlas of Mars 1: 15,000,000-scale global geologic series maps[J]. *Lunar and Planetary Science (Abstract)*, 2006, 4: 2331.
- [15] TANAKA K L, SKINNER J A, JR DOHM J M, et al. Geologic map of Mars[EB/OL]. [2021-11-02]. <http://pubs.usgs.gov/sim/3292>.
- [16] TANAKA K L. The stratigraphy of Mars[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1986, 91(B13): E139-E158.
- [17] TANAKA K L, SCOTT D H, GREELEY R. Global stratigraphy[M]. Arizona: University of Arizona Press, 1992: 345-382.
- [18] ZUREK R W, SMREKAR S E. An overview of the Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) science mission[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(E5): 1-9.
- [19] MALIN M C, BELL J F, CANTOR B A, et al. Context camera investigation on board the Mars reconnaissance orbiter[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(E5): E05S04.
- [20] LIU Z Q, YUE Z Y, MICHAEL G, et al. A global database and statistical analyses of (4) vesta craters[J]. *Icarus*, 2018, 311: 242-257.
- [21] WARD A W. Yardangs on Mars: evidence of recent wind erosion[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84: 8147-8166.
- [22] 董治宝, 吕萍. 深空探测时代的风沙地貌学[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(10): 1001-1014.
- [23] DONG Z B, LV P. Aeolian geomorphology in the era of deep space exploration[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(10): 1001-1014.
- [24] 李超, 董治宝, 吕萍, 等. 火星沙丘地貌的形态学窥见[J]. *科学通报*, 2020, 65: 80-90.
- [25] LI C, DONG Z B, LV P, et al. A morphological insight into the Martian dune geomorphology[J]. *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 80-90.
- [26] 苟盛, 岳宗玉, 邸凯昌, 等. 乌托邦平原祝融号火星车着陆区地质特

- 征遥感分析[J]. 遥感学报, 2021(预印本).
- GOU S, YUE Z Y, DI K C, et al. Geological characteristics of the landing area of the Zhurong rover at Utopia Planitia, Mars[J]. Journal of Remote Sensing, 2021(Preprint).
- [23] HIESINGER H, ROHKAMP D, STURM S, et al. Geology, ages, morphology, and morphometry of thumbprint terrain in isidis planitia, Mars[C]//Proceedings of the 40th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas, USA: Lunar and Planetary Institute, 2009.
- [24] OEHLER D Z, ALLEN C C. Evidence for pervasive mud volcanism in Acidalia Planitia, Mars[J]. Icarus, 2010, 208(2): 738636-657.
- [25] KOMATSU G, OKUBO C H, WRAY J J, et al. Small edifice features in Chryse Planitia, Mars: assessment of a mud volcano hypothesis[J]. Icarus, 2016, 268: 56-75.
- [26] NEUKUM G. Meteorite bombardment and dating of planetary surfaces: NASA-TM-77558[R]. USA: NASA, 1984.
- [27] NEUKUM G, IVANOV B A, HARTMANN W K. Crater-ring records in the inner solar system in relation to the lunnar reference system[J]. Space science review, 2001, 96(1-4): 55-86.
- [28] NEUKUM G, BASILEVSKY A T, KNEISSI T, et al. The geologic evolution of Mars: episodicity of resurfacing events and ages from cratering analysis of image data and correlation with radiometric ages of Martian meteorites[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 294: 204-222.
- [29] MICHAEL G G, NEUKUM G. Planetary surface dating from crater size-frequency distribution measurements: partial resurfacing events and statistical age uncertainty[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 294: 223-229.
- [30] MICHAEL G G, KNEISSL T, NEESEMAN A. Planetary surface dating from crater size-frequency distribution measurements: poisson timing analysis[J]. Icarus, 2016, 277: 279-285.
- [31] WERNER S C, TANAKA K L. Redefinition of the crater-density and absolute-age boundaries for the chronostratigraphic system of Mars[J]. Icarus, 2011, 215(2): 603-607.
- [32] PIKE R J. Control of crater morphology by gravity and target type-Mars, Earth, Moon[C]// Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. USA: NASA, 1980.
- [33] DAUBAR I J, ATWOOD-STONE C, BYME S, et al. The morphology of small fresh craters on Mars and the Moon[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2014, 119(12): 2620-2639.
- [34] THOMSON B J, HEAD J W. Utopia basin, Mars' characterization of topography and morphology and assessment of the origin and evolution of basin internal structure[J]. Journal of Geophysical Research, 2001: 23209-23230.
- [35] PIKE R J. Control of crater morphology by gravity and target Type-Mars, Earth, Moon[C]//Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. USA: U. S. Geological Survey, 1980.
- [36] SHOLES S F, DICKESON I J, MONTGOMERY D R, et al. Where are Mars' Hypothesized ocean shorelines? large lateral and topographic offsets between different versions of paleoshoreline Maps[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2021, 126(5): 1-8.

作者简介:

刘佳(1989-), 女, 特别研究助理, 主要研究方向: 行星地质地貌遥感解译与分析。

E-mail: liujia2021@nssc.ac.cn

刘斌(1984-), 男, 副研究员, 主要研究方向: 航空航天摄影测量、卫星遥感影像的高精度定位、行星制图与遥感。本文通讯作者。

通讯地址: 北京市朝阳区大屯路甲20号北中国科学院空天信息创新研究院(100101)

E-mail: liubin@radi.ac.cn

Martian Landing Area Morphology Interpretation and Quantitative Analysis of the Zhurong Rover

LIU Jia¹, LIU Bin², DI Kaichang^{2,3}, YUE Zongyu^{2,3}, YU Tianyi⁴, WANG Jia⁴, GOU Sheng²

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

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

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

4. Beijing Aerospace Control Center (BACC), Beijing 100094, China)

Abstract: Tianwen-1 lander and rover successfully landed in the southern Utopia Planitia of Mars on May 15, 2021. As China's first Mars exploration mission, Tianwen-1 achieved orbiting, landing and patrolling tasks in one mission. In this paper, we apply the photogrammetry methods to produce mapping products from high-resolution orbiter remote sensing images, and to analyze the landing area environment. The environment of the landing area is not only important for the path planning and safe driving of the Mars rover, but also provides fundamental information for science research. Mainly focuses on the Tianwen-1 landing area (within the surrounding 20 km of the landing point), and utilizes the 5 m/pixel CTX DOM and Tianwen-1 DEM product data to quantitatively analysis the impact crater density, impact crater depth, depth-to-diameter ratio, etc. Further interpretation and analysis of the geomorphic feature and geological background of the landing area are conducted. The results show that there are many small craters, transverse aeolian ridge, pitted cones, structural ridges and throughs in the region, most of the impact craters on the surface of the landing area are secondary craters or degraded impact craters, with an aspect ratio between 0.001 to 0.136. In addition to in-depth analysis of the geological and geomorphological features of the landing area, the crater statistics and geomorphic feature analysis are valuable for geological evolution study of the Utopia Planitia.

Keywords: Zhurong rover; landing area; high-resolution image; impact craters

Highlights:

- This paper focuses on the Zhurong rover's landing area, and utilizes the 5 m/pixel CTX DOM and HiRISE, Tianwen-1 DEM to quantitatively analysis the impact crater density, impact crater depth, and depth-to-diameter ratio.
- Interpretation and analysis of the geomorphic feature and geological background of the landing area.
- The crater statistics and geomorphic feature analysis are valuable for geological evolution study of the Utopia Planitia.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 刘勇]