

# 火星“祝融号”着陆区横向风成脊的分布及形态研究

任晓兰<sup>1,2,3</sup>, 曹震<sup>1,2,3</sup>, 康志忠<sup>1,2,3</sup>, 胡腾<sup>1,2,3</sup>, 徐箫剑<sup>1,2,3</sup>, 付世洋<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国地质大学(北京) 土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京) 月球与行星遥感探测研究中心, 北京 100083;  
3. 教育部深空探测联合研究中心 月球与行星探测国际合作研究分中心, 北京 100083)

**摘要:** 针对火星“祝融号”着陆区横向风成脊的研究主要集中于平坦区域, 而忽视了复杂地貌类型对其空间分布和几何形态影响的问题, 利用“天问一号”轨道器获取的高分辨率数据, 在“祝融号”着陆区周围的层状溅射物撞击坑(Crater Ejecta)、二次撞击坑(Secondary Craters)、沟槽(Trough)、叶状边缘(Lobate Margin)、凹锥(Pitted Cone)、平地(Plain)和方山(Mesa)地貌处展开横向风成脊测绘调查, 分析了横向风成脊的分布和形态与地貌之间的关系, 研究了高度和坡度两种地形因素对横向风成脊分布和形态的影响。研究表明: 不同类型的地貌对横向风成脊的空间分布和形态尺寸有显著的影响, 在复杂的地貌下, 横向风成脊的分布和形态呈现多样性, 尺寸相差较大但在长宽比方面却无显著差异; 在-4 300~-3 900 m高程范围内, 横向风成脊的数量整体情况来看呈上升的趋势, 其平均长度和平均宽度与高程呈极强的负相关性。研究区以极缓坡和缓坡为主, 横向风成脊平均长度和平均宽度与坡度呈中等负相关性。本研究为横向风成脊的形成和发育提供了数据支撑, 也可为后期研究火星表面古风场及其开始发育的古环境提供研究基础。

**关键词:** 横向风成脊; 地貌单元; 分布与形态; 高度; 坡度

**中图分类号:** P237

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2024)06-0594-11

**DOI:** 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20240010

**引用格式:** 任晓兰, 曹震, 康志忠, 等. 火星“祝融号”着陆区横向风成脊的分布及形态研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(6): 594-604.

**Reference format:** REN X L, CAO Z, KANG Z Z, et al. Study on distribution and morphology of transverse aeolian ridges in the landing area of Zhurong rover[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(6): 594-604.

## 引言

风沙运动是当前火星表面改造地貌的主要外营力之一。与外来天体物质的撞击、流水、冰川作用等不同, 风沙运动在火星一直很活跃, 并通过地表侵蚀、搬运和沉积形成一系列独特的风成地貌。因此, 风成地貌为了解火星古环境和古风场提供了重要的线索<sup>[1]</sup>。

横向风成脊(Transverse Aeolian Ridges, TARs)是火星风引起的广泛分布的沉积地貌, 呈现线性到略微弯曲的波纹状, 具有剖面对称的特征<sup>[2-3]</sup>, 形态与巨型沙波纹(Megaripple)类似。有研究认为巨型沙波纹是横向风成脊的类似物<sup>[4]</sup>, 但横向风成脊的尺寸和平均间距远大于巨型沙波纹。也有观点认为反向沙丘(Reversing Dune)是横向风成脊的类似物<sup>[5]</sup>。反向沙丘是由于与主风向相反的风导致脊线发生偏移而形成的沙丘形态<sup>[6]</sup>。但横向风成脊的反射率与周围地貌有明显的差异, 该属性与反向沙丘明显不同。为此, Bourke等<sup>[7]</sup>在遥感研究中将这种地貌类型统称为“横向风成脊”来

模糊其归属。

横向风成脊最早发现于“海盗号”(Viking)探测器传回的影像。但直到火星轨道相机窄角影像的出现, 人们才开始对这种火星特有的风成地貌展开研究<sup>[8]</sup>。Zimelman<sup>[2]</sup>利用“海盗号”传回的图像评估火星地表地貌的形成和演化过程, 并发现了类似沙丘的风成床面。Berman等<sup>[9]</sup>基于火星轨道摄影机(Mars Orbiter Camera, MOC)分辨率1.5~12 m/pixel的影像对火星南纬90°~北纬90°, 东经0°~45°范围的横向风成脊进行统计分析, 发现横向风成脊集中分布在中低纬度地区。同样基于MOC影像, Wilson等<sup>[10]</sup>对火星南纬90°~北纬90°, 东经180°~240°范围的横向风成脊进行测绘调查, 结果表明横向风成脊的纬度分布趋势与火星表面粗糙度有关, 同时横向风成脊分布的区域, 其地形坡度显著大于无横向风成脊的区域。Geissler等<sup>[11]</sup>基于HiRISE(High Resolution Imaging Science Experiment) 0.25~0.5 m/pixel相机获取的高分辨率影像数据生成数

收稿日期: 2024-02-26 修回日期: 2024-05-18

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFE0123300); 火星磁场特性与内部构造研究项目(D020103)

字地形模型 (Digital Terrain Model, DTM), 详细测量横向风成脊, 研究发现横向风成脊的波长与纬度、高程之间无相关性, 因此推测横向风成脊是由火星风驱动而非重力驱动的尘埃流形成。Berman等<sup>[9]</sup>通过测量撞击坑的累计大小-频率分布 (Crater Size-Frequency Distribution, CSFD), 评估了横向风成脊的年龄, 发现火星表面北部的横向风成脊要比南部更古老, 并且已经停止活动, 认为横向风成脊可表征古风场的形态。然而, Silvestro等<sup>[12]</sup>提出横向风成脊迁移学说, 认为火星上并非所有明亮色调的横向风成脊都是过去气候的遗迹, 部分仍有可能处于活跃状态。Day<sup>[13]</sup>基于HiRISE影像研究火星海拉斯盆地 (Hellas Basin) 北部一个直径约50 km未命名撞击坑内横向风成脊的表面形态, 发现其具有分层结构, 认为其已经发生了迁移而非静止。由于原位探测数据较少, 横向风成脊的形成机制和演化过程仍存在争议。

随着深空探测技术的发展, 各航天大国展开了新一轮的火星探测。中国于2020年7月23日成功发射了“天问一号” (Tianwen-1) 火星探测器, 首次实现了火星“绕”“落”“回”三个阶段的目标。2021年5月“祝融号”火星车成功着陆在火星北半球的乌托邦平原 (Utopia Planitia), 着陆点109.925°E, 25.066°N。“天问一号”环绕器搭载载荷高分辨率相机, 用于获取火星表面重要区域的精细观测图像。这些图像提供了大量的火星地表数据, 为火星地形、地貌和地质构造等科学研究提供了丰富的信息。

Gou等<sup>[14]</sup>利用HiRISE影像结合缓冲撞击坑计数 (Buffered Crater Counting, BCC) 得出“祝融号”着陆区横向风成脊的形成年代或最后的活跃期在亚马逊时代的晚期。Liu等<sup>[15-16]</sup>利用“天问一号”轨道器数据及火星背景相机 (Context Camera, CTX) 高分辨率影像对“祝融号”着陆区附近的横向风成脊形态参数 (长度、宽度、密度、走向) 统计, 经分析认为横向风成脊是在古老的风况下形成, 以东西走向为主, 长期未发生移动。Wang等<sup>[17]</sup>利用高分辨率遥感数据, 对“祝融号”着陆区2 km × 2 km范围内识别出的354个横向风成脊进行形态特征分析, 提出横向风成脊演化模型并首次发现了表面水合矿物的多边形特征。

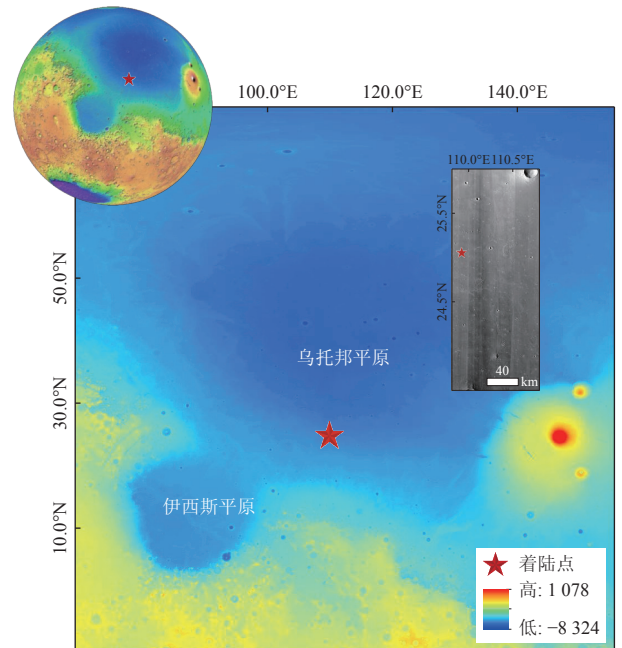
尽管目前已有诸多对“祝融号”着陆区横向风成脊的相关科学研究, 然而关于横向风成脊的分布及形态研究多限于局部区域的平坦地形。例如Gou<sup>[14]</sup>和Wang等<sup>[17]</sup>选择的研究区地势平坦, 并且除撞击坑和横向风成脊之外, 无其它地貌。从高分辨率影像可观察到, 着陆区表面存在二次撞击坑 (Secondary Craters)、层状溅

射物撞击坑 (Crater Ejecta)、凹锥 (Pitted Cone) 等多种地貌类型, 并且横向风成脊的分布和形态与这些地貌之间存在非常紧密的关系。然而, Liu等<sup>[16]</sup>仅对着陆区内沟槽 (Trough)、撞击坑 (Crater) 和平坦地形处的横向风成脊进行了测量, 样本数量有限, 难以全面理解横向风成脊分布和形态与着陆区地貌之间的关系。因此, 目前关于横向风成脊的分布和形态与这些地貌之间的关系仍有待研究。为弥补这一缺陷, 本文利用“天问一号”高分辨率相机影像对“祝融号”着陆区的横向风成脊进行测绘调查, 统计了其在不同地貌单元的空间分布及形态特征, 并研究分析了高度和坡度与横向风成脊的相关性。

## 1 研究区域和数据源

### 1.1 研究区介绍

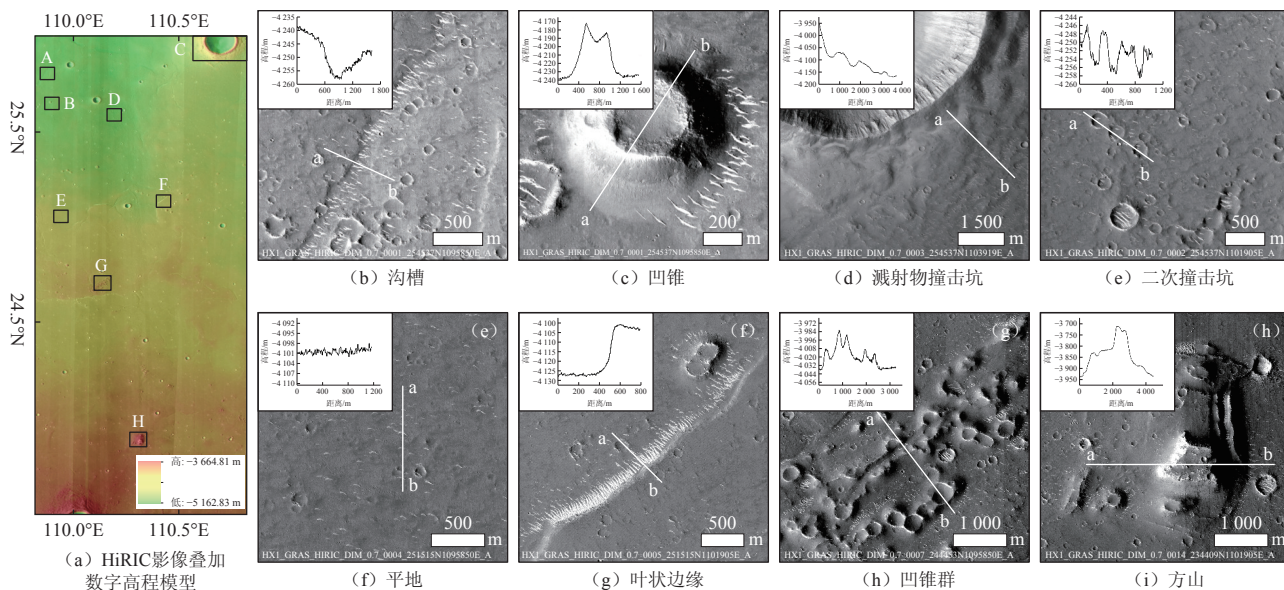
本文研究区域位于“祝融号”火星车着陆区 (109.8°E ~ 110.8°E, 23.5°N ~ 26.0°N), 该区域位于火星北部乌托邦平原南部, 地势平坦, 如图1所示。其高程由-5 162.83 m向南逐渐升高至-3 664.81 m, 影像高程如图2 (a) 所示, 大约90%以上的区域地形坡度小于5°。“祝融号”火星车着陆前, “天问一号”轨道器利用其搭载的0.7 m/pixel高分辨率相机 (High Resolution Imaging Camera, HiRIC) 在预选着陆区展开了详细的测绘调查, 获取了丰富的高分辨率影像数据, 为研究横向风成脊提供了丰裕的数据源。



注: 灰色部分为“天问一号”分辨率为0.7 m/pixel的轨道器影像。

图1 “祝融号”火星车着陆区

Fig. 1 “Zhurong” Mars rover landing area



注：左上角为各地貌的剖面图。

图2 不同地貌单元的HiRIC影像

Fig. 2 HiRIC images of different geomorphological units

## 1.2 研究数据

本文数据由“天问一号”搭载的HiRIC相机采集，HiRIC采用离轴三镜像散光学系统，焦距4 640 mm、光圈12、视场 $2^{\circ} \times 0.693^{\circ}$ ，HiRIC可在265 km的高度实现0.5 m的高分辨率，幅宽可达9 km<sup>[18-19]</sup>。“天问一号”轨道器对主要候选区(109.925°E, 25.066°N)进行了21次成像(其中11张前视图像和10张后视图像以构建立体图像)，每幅图像宽度约11 km，南北方向长度约170 km。HiRIC相关参数如表1所示。

表1 HiRIC相关参数<sup>[20]</sup>

Table 1 HiRIC related parameters<sup>[20]</sup>

参数	HiRIC
地面采样距离/(cm·pixel <sup>-1</sup> )	50 (265 km高度处)
光谱范围/μm	蓝: 0.45~0.52、绿: 0.52~0.60、红: 0.63~0.69、近红: 0.76~0.9、全色: 0.6~0.9
视场角/(°)	$2 \times 0.693$
焦距/mm	4 640
像素间距/μm	8.75 (全色)、35 (多光谱)

## 2 研究方法

### 2.1 横向风成脊的位置提取

本文利用“天问一号”轨道器获取的HiRIC影像数据，对“祝融号”着陆区不同地貌区域内的横向风成脊进行测绘调查。涉及的地貌主要包括：沟槽(Trough)、凹锥(Pitted Cone)、层状溅射物撞击坑(Crater Ejecta)、二次撞击坑(Secondary craters)、平地(Plain)、叶状边缘(Lobate Margin)、方山(Mesa)。受地形和局地风况的影响，横向风成脊的空间分布和

形态特征存在着很大的差异(见图2)。

1) 沟槽区域位于109.868°E, 25.805°N, Hiesinger等<sup>[21]</sup>认为由于地壳隆升和扩张形成，长期受到风力或者流水等侵蚀作用，其呈现线性地质构造特征<sup>[22]</sup>。沟槽长约3 800 m，宽约250 m，槽深约10 m，两侧高，中间低，沿特定方向延伸，见图2(b)所示。

2) 凹锥区域分别位于109.892°E, 25.652°N和110.133°E, 24.695°N，如图2(c)和图2(h)所示。图2(c)为独立存在的凹锥，保存完好，外直径约800 m，内直径约350 m，高约60 m，顶部的东南侧受到侵蚀，横向风成脊主要在其两侧呈放射状排列。图2(h)为成群且呈簇状分布的凹锥，占地面积约15.9 km<sup>2</sup>，部分凹锥顶部受到严重侵蚀变得破败且形状不规则<sup>[23]</sup>。

3) 层状溅射物撞击坑区域位于110.789°E, 25.927°N，撞击坑周围由一层或多层流态化溅射物形成的溅射毯<sup>[22]</sup>，地形崎岖，起伏较大。溅射毯直径约16 km，撞击坑直径约0.9 km，坑深约1.3 km，如图2(d)所示。

4) 二次撞击坑位置位于110.193°E, 25.595°N，该区域主要由撞击溅射形成的小型撞击坑组成，通常是呈现簇或链状的分布<sup>[15]</sup>，其直径范围在50~350 m，如图2(e)所示。

5) 平地区域位于109.925°E, 25.066°N，地势平坦，地表障碍物较少，平均坡度为1.15°(基线: 50 m)，为极缓坡或平坦地形<sup>[24]</sup>，如图2(f)所示。

6) 叶状边缘区域位于110.42°E, 25.138°N，是弯曲的凸起斜坡，边缘类似陡崖，全长约3 746 m，高度约20 m，向西南方向延伸，可能是早期熔岩或泥浆流

动边界的证据<sup>[25]</sup>, 如图2(g)所示。

7) 方山区域位于110.317°E, 23.878°N, 地形复杂, 具有平坦的山顶和陡峭的斜坡<sup>[22]</sup>, 地形较高, 山体四周多沟壑区域, 高约250 m, 占地面积约11.5 km<sup>2</sup>, 如图2(i)所示。

本文数据可在月球与行星数据发布系统获取, 以分辨率0.7 m/pixel的高分遥感正射影像(Digital Orthophoto Map, DOM)和3.5 m/pixel数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)作为基础, 基于ArcGIS平台开展数字化工作。为准确提取横向风成脊的形态参数, 使用ArcGIS 10.2提供的创建面要素矢量工具, 以最小包围矩形对横向风成脊的位置和空间范围进行标注。

## 2.2 横向风成脊形态参数标注

本文统计横向风成脊的几何参数包括长度( $L$ )、宽度( $W$ )、间距( $\lambda$ )及辅助参数密度( $s = \lambda/W$ )和长宽比( $a = L/W$ )。采用Wang等对横向风成脊的长度( $L$ )和宽度( $W$ )的几何定义, 即宽度是垂直穿过山脊顶部的最长距离, 长度是垂直于宽度的山脊顶部端到端测量的线性距离<sup>[17]</sup>, 见图3(a)~(c)。横

向风成脊在形成时垂直于当地盛行风向<sup>[26]</sup>, 定义 $\theta$ 为风向的方位角其垂直于横向风成脊的脊线方向, 如图3(f)所示。叶状边缘处部分横向风成脊出现相互连接、顶部分叉的现象, 可能会影响参数测量时的准确性, 如图3(d)所示。为减小测量误差, 本文确定了统一的测量标准, 对于相互连接较严重的横向风成脊, 以主脊线作为分离依据, 当主脊线出现断裂或者错位的情况时, 可将其视为不同的横向风成脊。测量其尺寸时将两端的最长直线距离作为其长度, 垂直于长度的最宽距离作为宽度。同时, 对于此类横向风成脊的形态参数采用3人测量取平均的方法, 并以计算标准差的方式评估测量的准确性。此外, 本文使用密度( $s = \lambda/W$ )表征横向风成脊的空间分布, 其中 $\lambda$ 为横向风成脊的平均波长, 即相邻脊的平均间距,  $\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n)/n$ , 如图3(e)所示。依循Balme等<sup>[26]</sup>将横向风成脊的密度分为3种类型: 当 $s=1$ 时, 横向风成脊空间分布为“饱和”;  $s < 2$ 时, 横向风成脊空间分布为“紧密分布”;  $s \geq 2$ 时, 横向风成脊的空间分布为“广泛分布”或“不连续分布”。根据此标准, 本文对“祝融号”着陆区不同地貌单元处横向风成脊的密度进行分类。

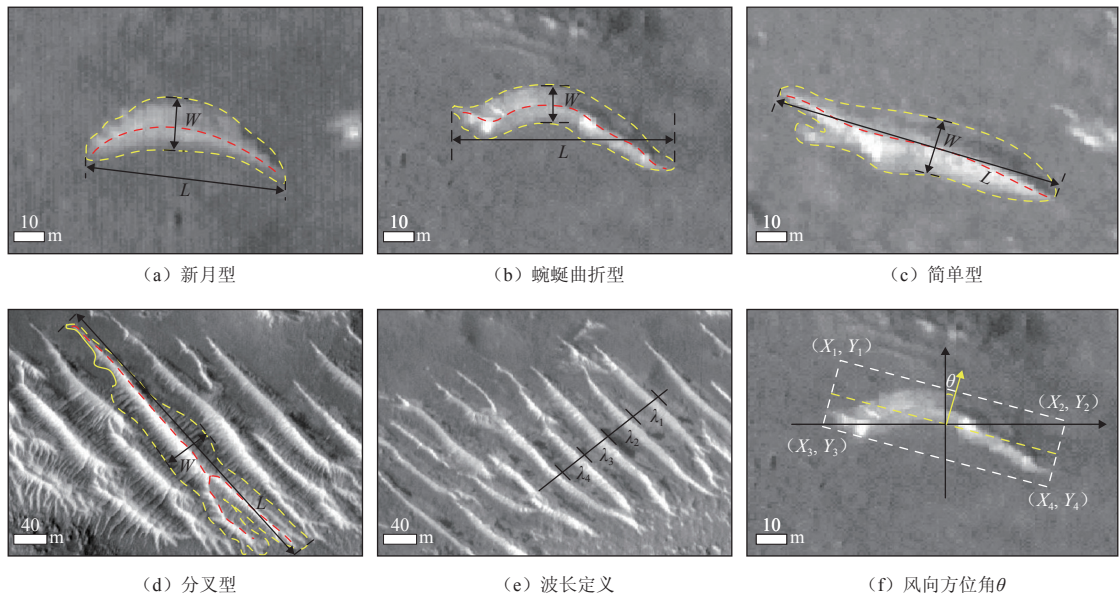


图3 横向风成脊定义方法

Fig. 3 Definition method of transverse aeolian ridges

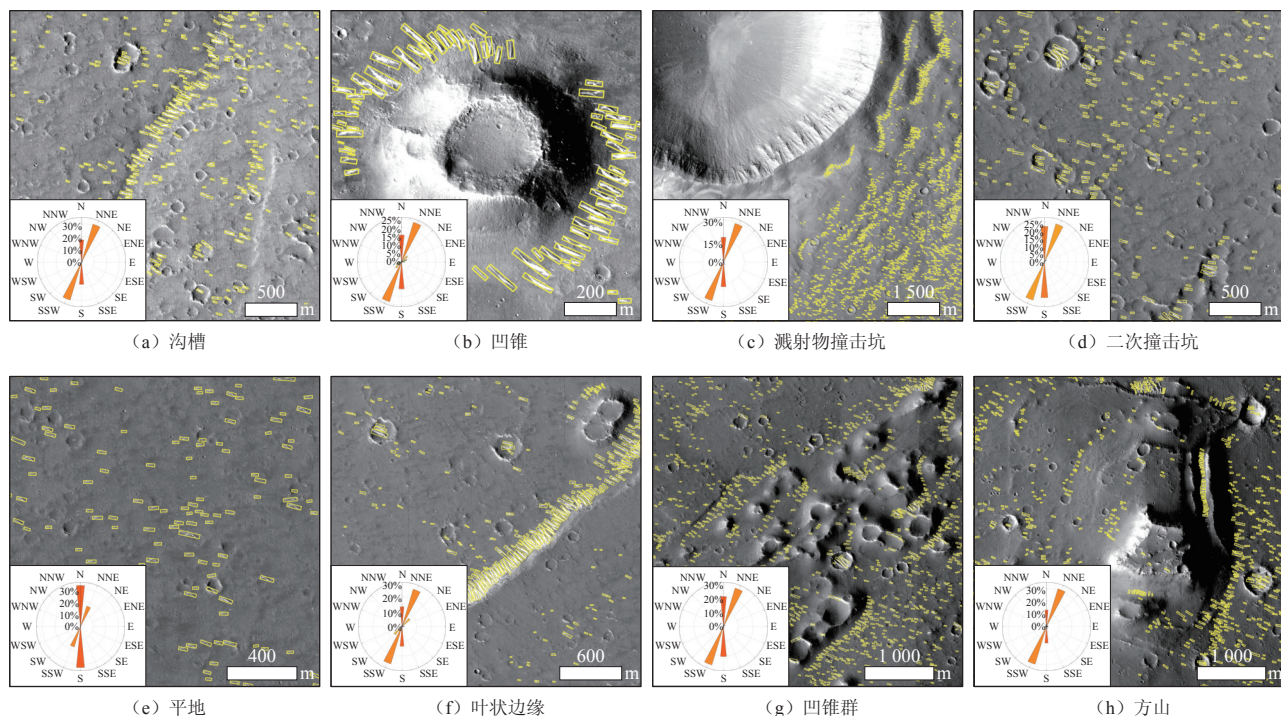
## 3 结果与分析

### 3.1 地貌单元处横向风成脊的空间分布

基于HiRIC影像共识别出8 588个横向风成脊, 各地貌类型处均有分布, 但空间分布差异明显。不同地貌处横向风成脊的分布情况如图4所示, 表2统计了不同地貌处横向风成脊的空间密度“ $s$ ”。

1) 沟槽底部的横向风成脊整齐排列, 走向垂直于两侧斜坡, 分布与沟槽延伸方向一致如图4(a)所示, 平均间距 $\lambda = 42.59$  m, 空间密度 $s = 2.11$ , 呈“不连续分布”。

2) 凹锥处的横向风成脊主要分布在东西两侧, 呈放射状如图4(b)所示, 平均间距 $\lambda = 39.23$  m, 空间密度 $s = 1.3$ , 呈“紧密分布”。簇状凹锥群中的横向风



注：左下角图片为该区域横向风成脊特征的古风向玫瑰图。

图4 地貌单元处横向风成脊的分布及局部古风向

Fig. 4 Distribution of transverse aeolian ridges and local paleowind directions in geomorphic units

成脊分布在相邻凹锥之间，如图4(g)所示，平均间距 $\lambda = 41.46$  m，空间密度 $s = 2.53$ ，呈“不连续分布”。

3) 层状溅射物撞击坑周围溅射毯的平缓区域存在大量的横向风成脊，坑内几乎没有，如图4(c)所示，平均间距 $\lambda = 54.89$  m，空间密度 $s = 2.9$ ，呈“不连续分布”。

4) 二次撞击坑内外均有横向风成脊分布如图4(d)所示，坑内平均间距 $\lambda = 39.71$  m，空间密度 $s = 1.65$ ，呈“紧密分布”，长度受控于二次撞击坑的直径；坑外平均间距 $\lambda = 104.18$  m，空间密度 $s = 5.92$ ，分布间隔宽，呈“不连续分布”。研究表明二次撞击坑底部分区域为弱大气流区，有利于横向风成脊的稳定<sup>[27]</sup>。

5) 平地处横向风成脊均匀分布、形态简单，如图4(e)所示，平均间距 $\lambda = 93.88$  m，空间密度 $s = 5.61$ ，呈“不连续分布”。

6) 叶状边缘处横向风成脊均匀分布于坡底，走向垂直于陡坡，延伸方向与叶状边缘一致，如图4(f)。平均间距 $\lambda = 34.44$  m，空间密度 $s = 1.52$ ，呈“紧密分布”。

7) 方山处横向风成脊主要分布于山底沟壑地区，山顶几乎没有分布，脊线走向垂直于沟壑壁如图4(h)所示。平均间距 $\lambda = 51.85$  m，空间密度 $s = 2.79$ ，呈“不连续分布”。

方山、凹锥、叶状边缘、层状溅射物撞击坑、二次撞击坑及沟槽处的横向风成脊分布与走向受地貌边界的影响，而平地处横向风成脊的走向在大范围内保

持不变，且均匀分布。本文采用Balme等<sup>[26]</sup>的方法，对“祝融号”着陆区不同地貌处横向风成脊的分布进行分类：二次撞击坑内部的横向风成脊的长度和脊线形状受控于坑的边界，属于围限型；凹锥和方山周围的个别横向风成脊走向出现小尺度变化，属于影响型；层状溅射物撞击坑、叶状边缘、沟槽、凹锥群处横向风成脊的走向和间距受地貌边界影响，属于控制型；平地 and 二次撞击坑坑外的横向风成脊走向在大范围内保持不变，地形对其影响微弱，属于独立型。不同地貌处横向风成脊呈现不同的分布类型，支持了风成过程受区域地形环境影响的结论<sup>[28]</sup>。

### 3.2 地貌单元处横向风成脊的形态特点

地貌单元处横向风成脊的总体长度24.8~187.4 m，宽度9.6~36.3 m，长宽比介于2:1~6:1，其中2.5:1~5:1最为常见，如图5所示。本文采用Balme等<sup>[26]</sup>的分类方法，根据每个横向风成脊脊线的平面形状，将其分为5种类型：简单型、蜿蜒曲折型、分叉型、网格型和新月型。

1) 沟槽处横向风成脊的平均长度90.19 m，平均宽度20.13 m，多为新月型，部分为简单型。

2) 独立存在的凹锥处横向风成脊的平均长度88.35 m，平均宽度20.77 m，多为新月型，少数出现分叉型；簇状分布的凹锥群处横向风成脊的平均长度48.46 m，平均宽度16.71 m，多为新月型和简单型。

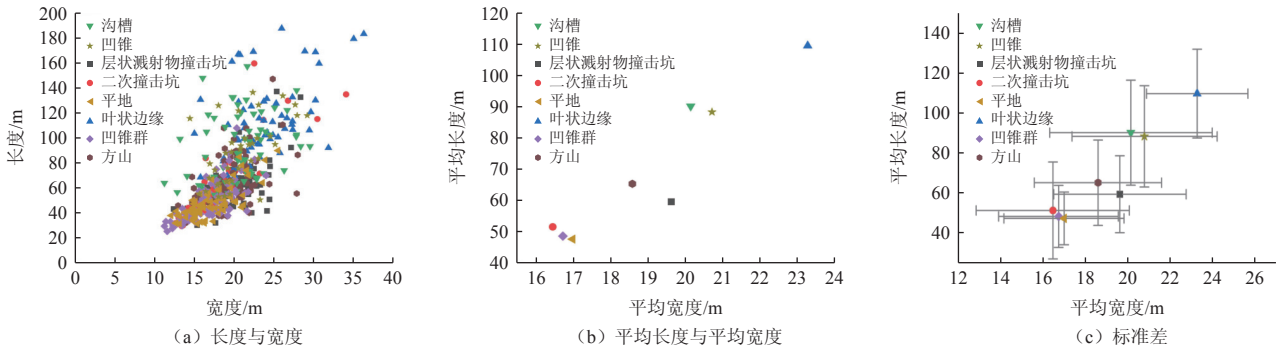


图 5 地貌单元处横向风成脊形态分布统计

Fig. 5 Distribution statistics of transverse aeolian ridges in geomorphic units

3) 层状溅射物撞击坑处横向风成脊的平均长度 59.53 m, 平均宽度 19.61 m, 多为简单型。

4) 二次撞击坑处横向风成脊的平均长度 51.43 m, 平均宽度 16.44 m, 形态简单, 多为新月型。

5) 平地处横向风成脊的平均长度 47.49 m, 平均宽度 16.97 m, 以新月型为主。

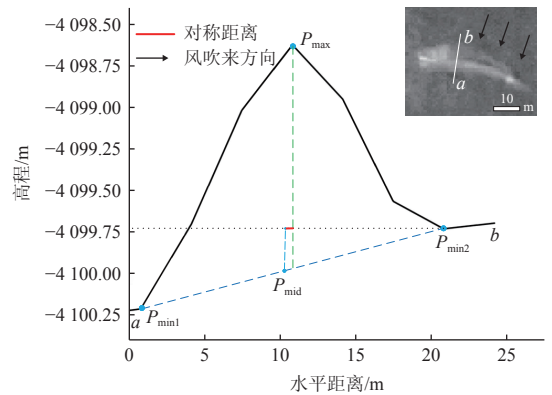
6) 叶状边缘处横向风成脊的平均长度 109.65 m, 平均宽度 23.26 m, 形态复杂, 为分叉型, 且垂直主脊线有次生脊形成。

7) 方山处横向风成脊的平均长度 65.26 m, 平均宽度 18.57 m, 多为简单型, 少数出现分叉型。

本文统计了“祝融号”着陆区轨道影像不同地貌处横向风成脊的脊线方向, 统计结果如表 3 所示。横向风成脊的脊线方向以 W-E、NW-SE 为主, 少部分为 NE-SW。横向风成脊呈高度对称的形态中部通常比两端宽, 两端呈尖形或细长的角翼。研究区以新月型横向风成脊为主, 两个角翼偏向西或东南方向, 表明过去形成横向风成脊区域的输沙风主要是从北或东北方向吹来, 如图 6 所示。

图 4 显示的地貌单元处局部古风向以 NNE-SSW、N-S 为主。Bourke 等认为风势和地形之间的相互作用会产生复杂的风成地貌, 沟槽底部风力较其它区域大

30%, 易达携沙阈值, 叶状边缘也有类似的情况<sup>[29]</sup>。叶状边缘处横向风成脊的形态复杂, 相互连接, 除主脊线之外, 发育出次生脊, 表明此处风蚀能力较强, 近期风场可能发生变化, 但对于次生脊是由局部气流涡旋形成还是在较大区域风型转变 90° 未有准确定论<sup>[30]</sup>。平地处横向风成脊零散分布、尺寸较小, 多为新月型, 可能这是受平坦地形和均匀风力的影响。地形越复杂, 横向风成脊的分布和形态越多样, 而不同地貌之间横向风成脊的长宽比没有明显差异。



注: 灰色部分为“天问一号”分辨率为 0.7 m/pixel 的轨道器影像。

图 6 横向风成脊剖面图<sup>[14]</sup>

Fig. 6 Transverse aeolian ridge profile<sup>[14]</sup>

表 2 地貌单元处横向风成脊的形态参数统计

Table 2 Statistics of morphological parameters of transverse aeolian ridges in geomorphic units

地貌类型	长度 L/m	宽度 W/m	间距 λ/m	间距/宽度 (s = λ/W)	长度/宽度 (a = L/W)
沟槽	90.19 ± 26.17	20.13 ± 3.84	42.59 ± 23.97	2.11 ± 1.45	4.46 ± 1.35
凹锥	88.35 ± 25.23	20.77 ± 3.43	39.23 ± 10.79	1.30 ± 1.13	4.27 ± 1.13
层状溅射物撞击坑	59.53 ± 19.17	19.61 ± 3.13	54.89 ± 15.54	2.90 ± 1.31	3.02 ± 0.70
二次撞击坑	51.43 ± 24.12	16.44 ± 3.62	坑内: 39.71 ± 16.68 坑外: 104.18 ± 71.72	坑内: 1.65 ± 0.56 坑外: 5.92 ± 3.46	坑内: 3.96 ± 0.74 坑外: 4.30 ± 0.69
平地	47.49 ± 13.13	16.97 ± 2.84	93.88 ± 44.65	5.61 ± 3.94	2.78 ± 0.46
叶状边缘	109.65 ± 22.13	23.26 ± 2.39	34.44 ± 12.71	1.52 ± 0.45	4.86 ± 1.27
簇状分布的凹锥群	48.46 ± 15.47	16.71 ± 2.84	41.46 ± 27.68	2.53 ± 1.36	2.87 ± 0.63
方山	65.26 ± 21.26	18.57 ± 3.01	51.85 ± 24.63	2.79 ± 0.54	3.35 ± 0.89
平均值	73.11 ± 21.18	18.86 ± 3.31	57.69 ± 29.30	3.08 ± 1.70	3.69 ± 0.85

### 3.3 高程和坡度对横向风成脊的分布及形态的影响

本文采用皮尔逊相关系数<sup>[31]</sup> (Pearson correlation coefficient) 法分析横向风成脊形态参数与高度、坡度的相关性, 皮尔逊相关系数 $r$ 取值范围在 $-1\sim 1$ , 若 $r > 0$ 表明两个变量是正相关; 若 $r < 0$ 表明两个变量是负相关;  $r = 0$ 表明两者不存在线性相关关系。一般认为, 相关系数 $|r|$ 在 $0\sim 0.2$ 为极弱相关或者不相关,  $0.2\sim 0.4$

为弱相关,  $0.4\sim 0.6$ 为中等相关,  $0.6\sim 0.8$ 之间为强相关,  $0.8\sim 1$ 为极强相关。

#### 3.3.1 高程对横向风成脊的分布及形态的影响

本文选择高程范围为 $-4\ 300\sim -3\ 900\text{ m}$ , 整体高差约 $400\text{ m}$ , 将其划分为8个等级, 每个等级间隔 $50\text{ m}$ , 每个高度范围内随机裁剪两张 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$ 的影像块, 用于统计横向风成脊的数量和形态参数。

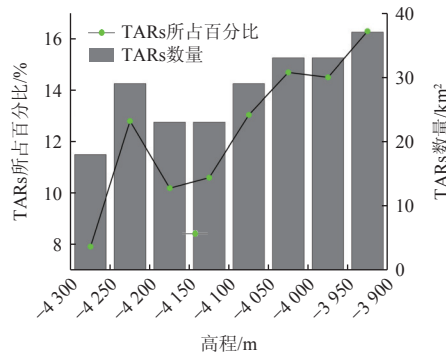
表3 地貌单元处横向风成脊形态及分布特征统计

Table 3 Statistics of morphology and distribution characteristics of transverse aeolian ridges in geomorphic units

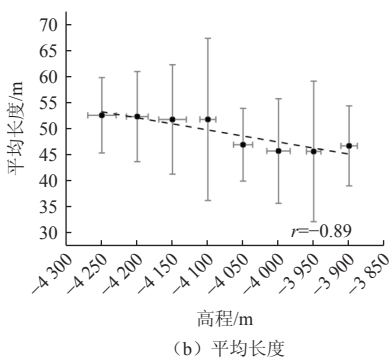
地貌类型	中心位置/(°E, °N)	横向风成脊的脊线方向 (以N为0°, 顺时针为正方向)				形态特征	空间分布特征
		最大值/(°)	最小值/(°)	平均值/(°)	标准差/(°)		
沟槽	109.869, 25.814	143.8	89.3	115.0	11.3	新月型、简单型	不连续分布
凹锥	109.892, 25.652	167.1	13.5	111.9	21.2	新月型、分叉型	紧密分布
层状溅射物撞击坑	110.697, 25.971	134.4	77.5	110.3	8.4	简单型	不连续分布
二次撞击坑	110.188, 25.587	140.3	76.3	105.8	9.9	新月型	坑内: 紧密分布 坑外: 不连续分布
平地	109.958, 25.095	124.9	71.8	99.9	9.3	新月型	不连续分布
叶状边缘	110.417, 25.137	157.2	81.5	124.5	12.6	分叉型	紧密分布
簇状分布的凹锥群	110.131, 24.700	145.9	65.2	110.7	11.1	新月型、简单型	不连续分布
方山	110.306, 23.890	152.6	5.5	103.7	25.8	简单型、分叉型	不连续分布

研究结果显示, 在 $-4\ 300\sim -3\ 900\text{ m}$ 高程范围内, 横向风成脊的平均宽度 $8.17\pm 3.32\sim 13.18\pm 3.04\text{ m}$ , 平均长度 $46.65\pm 7.69\sim 52.53\pm 7.25\text{ m}$ 。图7中(b)和(c)表明, 横向风成脊的平均长度和宽度与高程均呈极强的负相关性( $r = -0.89$ ,  $r = -0.82$ )。图7(d)显

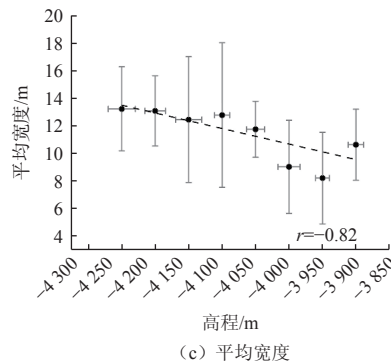
示, 横向风成脊的空间密度与高程同样呈极强的负相关性( $r = -0.89$ ), 说明随着高程的增加, 横向风成脊的间隔在减小, 但仍呈“不连续分布”。通过统计不同高度范围内横向风成脊的数量可知(图7(a)), 横向风成脊在各个高程处均有分布, 约超过16%分布于



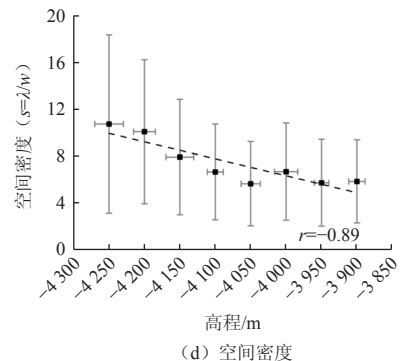
(a) TARs单位面积数量及所占百分比



(b) 平均长度



(c) 平均宽度



(d) 空间密度

图7 横向风成脊与高程之间相关性统计图

Fig. 7 Statistical diagram of correlation between transverse aeolian ridges and elevation

-3 950~-3 900 m, 约15%分布于-4 050~-4 000 m, 而高程范围在-4 300~-4 250 m仅有不到8%的横向风成脊分布。在所研究的400 m高差范围之内, 随着高度的增加, 横向风成脊的数量整体呈现上升趋势, 与Wilson等<sup>[10]</sup>的研究结果相近。

火星的稀薄大气理论上应使物质在较低海拔和较高的大气压力下更容易被风吹动<sup>[32]</sup>, 但实验结果表明, 400 m高差内横向风成脊广泛存在, 说明高度并非横向风成脊分布和发育的限制因素, 风成过程可以形成于高海拔、低气压的地区<sup>[33]</sup>。由于本文研究区范围较小, 依此判断横向风成脊与高度的相关性可靠性较低, 后续应扩大研究区, 选择更大范围的高差和更多的影像, 进一步探索高度对横向风成脊的分布及形态影响, 避免潜在的采样效应<sup>[10]</sup>。

### 3.3.2 坡度对横向风成脊的分布及形态的影响

本文参考Wei等<sup>[24]</sup>对坡度的划分, 划分地面坡度0°~2°为极缓坡, 2°~5°为缓坡, 5°~15°为斜坡, 15°~25°为陡坡, 大于25°为极陡坡。

坡度的计算方法<sup>[34]</sup>: 坡度计算窗口也被称为坡度计算的基线 (Baseline或者Scale), 计算窗口共包含9个格网点的高程值, 分别用 $I_1, \dots, I_9$ 表示, 在计算火星地表坡度从 $X, Y$ 两个方向分别进行坡度计算, 如图8所示。

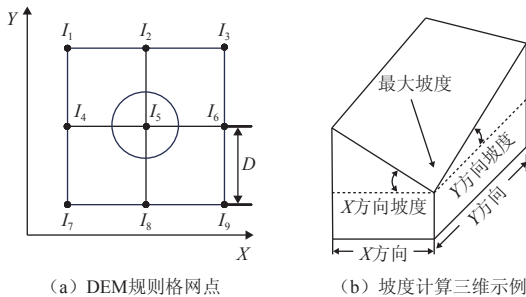


图 8 基于DEM的坡度分析示例<sup>[35]</sup>

Fig. 8 Example of slope analysis based on DEM<sup>[35]</sup>

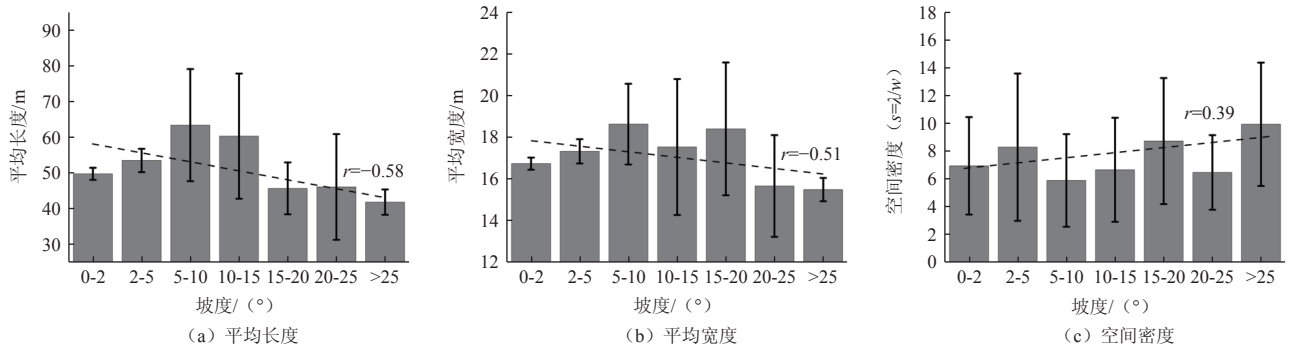


图 9 横向风成脊与坡度之间相关性统计图

Fig. 9 Statistical diagram of correlation between transverse aeolian ridges and slope

$$X = \frac{I_3 + 2I_6 + I_9 - I_1 - 2I_4 - I_7}{8D} \quad (1)$$

$$Y = \frac{I_1 + 2I_2 + I_3 - I_7 - 2I_8 - I_9}{8D} \quad (2)$$

其中:  $D$ 为DEM的分辨率, 值为3.5 m/pixel。

利用 $X, Y$ 方向的坡度值, 计算得到该坡度计算窗口内最大的坡度值 $S$ 。

$$S = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (3)$$

对DEM的每个格网点都进行计算, 可得到以每一个格网点为中心, 坡度计算窗口范围内的最大坡度, 并以此坡度值取代DEM中各格网点处的高程值<sup>[35]</sup>。为更好地拟合研究区地形, 同时反映横向风成脊发育的背景地貌, 本文将坡度计算基线设置为50 m, 研究区坡度统计以及横向风成脊的分布情况如表4所示。

表 4 研究区坡度及横向风成脊统计表  
Table 4 Statistical table of slope and transverse aeolian ridges in the study area

坡度范围	所占面积百分比/%	横向风成脊所占百分比/%
0°~2° (极缓坡)	77.476	70.701
2°~5° (缓坡)	21.179	28.045
5°~15° (斜坡)	1.320	1.175
15°~25° (陡坡)	0.020	0.067
>25° (极陡坡)	0.005	0.013

根据分辨率为3.5 m/pixel的DEM产品数据, 统计研究区内坡度分布: 坡度主要集中在5°以内, 占整个研究区的98.66%, 表明研究区域整体趋势平坦。坡度较大的地区主要集中在撞击坑、沟槽、叶状边缘、凹锥等地貌处。

为更好地分析横向风成脊形态参数与坡度之间的关系, 本文将斜坡5°~15°细分为5°~10°、10°~15°, 陡坡15°~25°细分为15°~20°、20°~25°。结果表明, 研究区的坡度与横向风成脊的平均长度和宽度均呈中等负相关性 ( $r = -0.58, r = -0.51$ ) (图9 (a) 和

(b) ) )。结果验证了当坡度较大时,风携沙能力减弱,沉积物难以继续被带到坡面,且受到重力的影响,沉积物更易滑落,不利于沉积停留在坡面上<sup>[36]</sup>。横向风成脊的空间密度与坡度呈弱正相关性( $r = 0.39$ )如图9(c)所示,即随着坡度增大,横向风成脊的间隔有增大的趋势,呈“不连续分布”类型。由于陡坡和极陡坡处样本数量较少,实验结果存在较大的误差。此外,坡度计算结果很大程度上受到DEM分辨率和计算基线的影响<sup>[15]</sup>。因此,本文统计的横向风成脊的分布与坡度之间的关系具有参考意义。

## 4 结 论

本文利用“天问一号”火星探测任务获取的HiRIC影像和DEM产品数据,统计分析了“祝融号”着陆区横向风成脊在不同地貌单元的分布和形态特征,并研究了高度和坡度对其影响。研究表明:不同地貌单元处横向风成脊的空间分布类型和形态尺寸各异。在-4 300~-3 900 m高程范围内,随着高度升高,横向风成脊数量呈现上升趋势,平均长度和宽度与高程呈极强的负相关性。研究区以极缓坡和缓坡为主,横向风成脊的平均长度和宽度均与坡度呈中等的负相关性。表明横向风成脊的空间分布和形态特征受多种因素共同作用,具有非随机性,与地貌单元的构造特点及周围环境因素有着紧密的联系。

由于本文研究区范围小、样本数量少,影像分辨率较低等问题,对于高程和坡度的统计结果存在不确定性。在未来研究中,可进一步扩大研究区,结合更高分辨率遥感数据,针对性开展对横向风成脊形成过程的研究,从而更全面地了解其在火星不同地形条件下的形成和演化规律,对未来火星风成地貌科学探索具有重要意义。

## 致 谢

本文中使用的“天问一号”轨道器分辨率相机HiRIC数据、高分遥感正射影像(DOM)和数字高程模型(DEM)产品由中国月球与深空探测工程地面应用系统处理制作,由中国国家航天局提供(<https://moon.bao.ac.cn/>)。

## 参 考 文 献

- CRADDOCK R A. Aeolian processes on the terrestrial planets: recent observations and future focus[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2012, 36(1): 110-124.
- ZIMBELMAN J R. Spatial resolution and the geologic interpretation of martian morphology: implications for subsurface volatiles[J]. *Icarus*, 1987, 71(2): 257-267.
- THOMAS P C, MALIN M C, CARR M H, et al. Bright dunes on Mars[J]. *Nature*, 1999, 397(6720): 592-594.
- FOROUTAN M, STEINMETZ G, ZIMBELMAN J R, et al. Megaripples at Wau-an-Namus, Libya: a new analog for similar features on Mars[J]. *Icarus*, 2019, 319: 840-851.
- ZIMBELMAN J R. Transverse aeolian ridges on Mars: first results from HiRISE images[J]. *Geomorphology*, 2010, 121(1-2): 22-29.
- MCKEE E D. A study of global sand seas[M]. Washington: U. S. Government Printing Office, 1979.
- BOURKE M C, WILSON S A, ZIMBELMAN J R. The variability of transverse aeolian ridges in troughs on Mars[J]. *Lunar and Planetary Science Conference*, 2003, 34: 2003-2090.
- THOMAS P. North-south asymmetry of Eolian features in martian polar regions: analysis based on crater-related wind markers[J]. *Icarus*, 1981, 48(1): 76-90.
- BERMAN D C, BALME M R, RAFKIN S C R, et al. Transverse Aeolian Ridges (TARs) on Mars II: distributions, orientations, and ages[J]. *Icarus*, 2011, 213(1): 116-130.
- WILSON S A, ZIMBELMAN J R. Latitude-dependent nature and physical characteristics of transverse aeolian ridges on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2004, 109(E10): 1-12.
- GEISSLER P E, WILGUS J T. The morphology of transverse aeolian ridges on Mars[J]. *Aeolian Research*, 2017, 26: 63-71.
- SILVESTRO S, CHOJNACKI M, VAZ D A, et al. Megaripple migration on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, 125(8): e2020J-e6446J.
- DAY M. Interaction bounding surfaces exposed in migrating transverse aeolian ridges on Mars[J]. *Geology*, 2021, 49(12): 1527-1530.
- GOU S, YUE Z Y, DI K C, et al. Transverse aeolian ridges in the landing area of the Tianwen-1 Zhurong rover on Utopia Planitia, Mars[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 595: 117764.
- 刘佳, 刘斌, 邸凯昌, 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.
- 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.
- LIU J, LIU Y, WAN W, et al. Orbital and in situ observation of transverse aeolian ridges at Zhurong landing site[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, 128(11): e2023JE007857.
- WANG J, ZHAO J N, XIAO L, et al. Recent aqueous activity on Mars evidenced by transverse aeolian ridges in the Zhurong exploration region of Utopia Planitia[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(6): e2022G-e101650G.
- YAN W, LIU J J, REN X, et al. Detection capability verification and performance test for the high resolution imaging camera of China's Tianwen-1 mission[J]. *Space Science Reviews*, 2021, 217(6): 1-21.
- ZOU Y L, ZHU Y, BAI Y F, 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.
- 柳思聪, 童小华, 刘世杰, 等. “天问一号”着陆区遥感形貌建模与制图分析[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, 9(3): 338-347.
- LIU S C, TONG X H, LIU S J, et al. Topography modeling, mapping and analysis of China's first Mars mission Tianwen-1 landing area from remote sensing images[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022,

- 9(3): 338-347.
- [21] HIESINGER H, HEAD III J W. Characteristics and origin of polygonal terrain in southern Utopia Planitia, Mars: results from Mars Orbiter Laser Altimeter and Mars Orbiter Camera data[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, 105(E5): 11999-12022.
- [22] MILLS M M, McEwen A S, OKUBO C H. A preliminary regional geomorphologic map in Utopia planitia of the Tianwen-1 Zhurong landing region[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(18): 1-10.
- [23] 王乐, 赵健楠, 黄俊, 等. 火星乌托邦平原南部凹锥的爆烈式泥火山成因[J]. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(9): 2072-2084.
- WANG L, ZHAO J N, HUANG J, et al. An explosive mud volcano origin for the pitted cones in southern Utopia Planitia, Mars[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2023, 53(9): 2072-2084.
- [24] WEI Z H, DONG Z B, HU G Y, et al. Impact factors to formation and distribution of sand dunes in Zoige basin[J]. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(6): 1035-1042.
- [25] 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[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2022, 52(3): 82-93.
- ZHANG C L, LIU Y, WU X, et al. Geological background and potential exploration targets of the Zhurong landing area[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2022, 52(3): 82-93.
- [26] BALME M, BERMAN D C, BOURKE M C, et al. Transverse Aeolian Ridges (TARs) on Mars[J]. *Geomorphology*, 2008, 101(4): 703-720.
- [27] HAYWARD R K, TITUS T N, MICHAELS T I, et al. Aeolian dunes as ground truth for atmospheric modeling on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, 114: E11012.
- [28] LIU J J, QIN X G, REN X, et al. Martian dunes indicative of wind regime shift in line with end of ice age[J]. *Nature*, 2023, 620: 303-309.
- [29] BOURKE M C, BULLARD J E, BARNOUIN-JHA O S. Aeolian sediment transport pathways and aerodynamics at troughs on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2004, 109(E7): 1-16.
- [30] NAGLE-MCNAUGHTON T, SCUDERI L. Multistage evolution in transverse aeolian ridges[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(7): 1-15.
- [31] PEARSON K. Notes on regression and inheritance in the case of two parents[J]. *Proceedings of the Royal Society of London* 1895, 58(347-352): 240-242.
- [32] 董治宝, 吕萍, 李超, 等. 火星独特风沙地貌之横向沙脊[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(7): 661-677.
- DONG Z B, LYU P, LI C, et al. Unique aeolian bedforms of Mars: Transverse Aeolian Ridges(TARs)[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(7): 661-677.
- [33] MALIN M C, EDGETT K S. Mars global surveyor Mars orbiter camera: interplanetary cruise through primary mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E10): 23429-23570.
- [34] TANG J, PILESJÖ P. Estimating slope from raster data: a test of eight different algorithms in flat, undulating and steep terrain[J]. *Geodesy and Cartography*, 2013, 39(2): 41-52.
- [35] 李飞, 吴波, 杨眉, 等. 嫦娥四号冯·卡门撞击坑着陆区地形及月面遮挡分析[J]. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49(12): 1385-1396.
- LI F, WU B, YANG M, et al. Topo-graphic and occlusion analysis of the Chang'E-4 landing site in the Von Kármán crater[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2019, 49(12): 1385-1396.
- [36] 王晓旭, 严平, 王勇, 等. 坡度和坡形对爬坡沙丘形成影响的风洞模拟实验[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(6): 118-126.
- WANG X X, YAN P, WANG Y, et al. Effects of slope gradient and shape on climbing dunes: a wind tunnel experiment[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(6): 118-126.

作者简介:

**任晓兰**(1999-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 摄影测量与遥感、月球与行星遥感。

E-mail: renxiaolan@email.cugb.edu.cn

通信地址: 北京市海淀区学院路29号中国地质大学(北京)土地科学技术学院(100083)

**康志忠**(1975-), 男, 博士生导师, 主要研究方向: 激光雷达技术、室内定位与建模、月球与行星遥感。**本文通信作者**。

通信地址: 北京市海淀区学院路29号中国地质大学(北京)土地科学技术学院(100083)

E-mail: zzkang@cugb.edu.cn

# Study on Distribution and Morphology of Transverse Aeolian Ridges in the Landing Area of Zhurong Rover

REN Xiaolan<sup>1,2,3</sup>, CAO Zhen<sup>1,2,3</sup>, KANG Zhizhong<sup>1,2,3</sup>, HU Teng<sup>1,2,3</sup>, XU Xiaojian<sup>1,2,3</sup>, FU Shiyang<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Lunar and Planetary Remote Sensing Exploration Research Center, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3. International Cooperation Research Center for Lunar and Planetary Exploration, Joint Research Center for Deep Space Exploration, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

**Abstract:** At present, the research on transverse aeolian ridges in the "Zhurong" landing area on Mars mainly focuses on flat areas, while ignoring the impact of complex landform types on their spatial distribution and geometric morphology of these ridges. To solve this problem, this paper used high-resolution data obtained by the Tianwen-1 orbiter to conduct a survey of transverse aeolian ridges in the Crater Ejecta, Secondary Craters, Trough, Lobate Margin, pitted Cone, Plain, and Mesa around the landing area of the "Zhurong", analyzed the relationship between the distribution and morphology of transverse aeolian ridges and landforms, and studied the influence of two topographic factors, elevation and slope, on the distribution and morphology of transverse aeolian ridges. The results show that different landform types have a significant impact on the spatial distribution and morphological size of transverse aeolian ridges. Under the complex topography, the distribution and morphology of transverse aeolian ridges are diverse, with large sizes and no significant differences in aspect ratios; in the range of  $-4\ 300$  m to  $-3\ 900$  m in elevation, the number of transverse aeolian ridges is on an upward trend, and their average length and average width are strongly negatively correlated with the elevation. The study area is dominated by extremely gentle slopes and gentle slopes, and the average length and average width of transverse aeolian ridges are moderately negatively correlated with the slope. This study provides data support for the formation and development of transverse aeolian ridges, and also provides a research basis for future studies on the types of wind conditions on the Martian surface and the paleo-environment in which they began to develop.

**Keywords:** transverse aeolian ridge; geomorphic unit; distribution and morphology; elevation; slope

## Highlights:

- This paper takes the transverse aeolian ridges at the geomorphic units in the "Zhurong" landing area as the research object. It uses the high-resolution data obtained by the "Tianwen-1" mission to analyze the spatial distribution density, distribution type, and morphological parameters of the transverse aeolian ridges for quantitative analysis.
- Quantitative analysis of the influence of two topographic factors, elevation and slope, on the distribution and morphology of transverse aeolian ridges is made.
- Different landform types have significant effects on the spatial distribution and morphological size of transverse aeolian ridges, and the interaction between wind and topography can produce complex transverse aeolian ridges. In complex landforms, the distribution and morphology of transverse aeolian ridges are diverse.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]