

董治宝, 吕萍, 李超, 等. 火星大沙波纹特征及其形成机制[J]. 地球科学进展, 2020, 35(10): 1006-1015. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2020.080.
[Dong Zhibao, Lü Ping, Li Chao, et al. Characteristics and formation mechanism of large ripples on Mars[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(10): 1006-1015. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2020.080.]

火星大沙波纹特征及其形成机制*

董治宝, 吕萍, 李超, 胡光印

(陕西师范大学行星风沙科学研究所, 陕西 西安 710119)

摘要:随着高分率影像数据的获取, 火星大沙波纹进入研究视野。火星大沙波纹是一类间距为米级的风成床面形态, 其特殊性反映在形态、格局、流动性及其形成过程等几个方面, 然而, 受限于探测资料特别是缺乏高分辨率影像资料, 对其研究的范围和深度都极其有限, 导致这些特殊性被长期忽视, 研究者们简单地认为其与地球上常见的沙波纹相类似。遵循地貌学思路, 基于已有的有限研究介绍了大沙波纹的形态、组成物质及其形成机制, 讨论了其潜在的研究意义。与普通沙波纹相比, 火星大沙波纹尺度较大, 脊线蜿蜒、尖锐, 横截面不对称, 背风坡坡度明显大于迎风坡, 且背风坡具有明显的滑落或滑塌面; 具有较强的移动性, 以脊线的纵向延伸为主, 侧向移动微弱; 大沙波纹脊线具有不同走向, 构成网格状格局, 能够用来反演较长时段的复杂风况; 具有沙波纹、大沙波纹和沙丘3级尺度风成床面形态并存的独特现象; 初步探测发现, 大沙波纹沉积物组成为分选良好的中细沙。目前关于火星大沙波纹的形成机制有3种假说: 沙丘假说、冲击假说和流体拖拽假说, 其中流体拖拽假说具有较强的说服力。火星大沙波纹不同于常态沙波纹, 其独特性对总体上认识火星风沙地貌、火星环境特征及其演化历史具有重要意义, 值得深入研究。

关键词:火星风沙地貌; 大沙波纹; 形态学特征; 形成假说

中图分类号: P185.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8166(2020)10-1006-10

1 引言

影像资料包括轨道器遥感影像和地面拍摄影像, 这些都是进行火星风沙地貌研究的主要信息资料, 所以火星风沙地貌研究的突破性进展通常伴随影像质量的提高。20世纪70年代之前的天文望远镜提供的影像表明火星风沙活动的存在, 70年代的“水手号”(Mariner)和“海盗号”(Viking)轨道器遥感影像进一步证明了火星风沙地貌的存在, 90年代以来的轨道器遥感影像分辨出了大尺度风沙地貌类型, 2006年以来, 火星勘测轨道飞行器(Mars Reconnaissance Orbiter, MRO)上的高分辨率

成像科学实验(High Resolution Imaging Science Experiment, HiRISE)相机更使火星表面的风沙地貌丝毫不现, 火星沙波纹进入了人们的研究视野(图1)。火星车的表面巡视, 如“好奇号”(Curiosity)火星车探测的影像使沙波纹研究成为可能。近年来, 研究者们不断深入的研究揭示了火星与地球风沙地貌的差异性, 展示了若干火星特有的风沙地貌类型, 如横向沙脊^[2], 以及沙波纹这种在地球上最普遍的风成床面形态在火星上也显示出令人困惑的特征(图2)。地球上的沙波纹波长为厘米级, 而火星上除了厘米级的沙波纹之外, 还有波长为米级的沙波纹, 暂且被称作大沙波

收稿日期: 2020-05-25; 修回日期: 2020-09-07.

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“塔里木盆地周围干燥剥蚀山地风化速率研究”(编号: 41930641)和“沙丘动力学数值模型时间与空间尺度的确定”(编号: 41871011)资助.

作者简介: 董治宝(1966-), 男, 陕西横山人, 教授, 主要从事风沙物理研究. E-mail: zbdong@snnu.edu.cn

纹 (Large Ripples, LRs), 其形态和形成机制均与常见的厘米级沙波纹不同, 可能蕴含着火星环境特征的重要信息。虽然被称作大沙波纹, 但其空间尺度仍然很小, 对其进行深入研究高度依赖于高分辨率遥感影像资料的获取, 所以, 目前仅有个别的研究报道, 如关于盖尔陨击坑 (Gale Crater) 大沙波纹的报道。事实上, 遥感影像显示大沙波纹在火星上普遍分布。本文遵循地貌学思路, 基于现有的有限研究介绍了大沙波纹的形态及其组成物质特征, 进一步推测其形成机制, 最后讨论其潜在的研究意义。

2 形态和组成物质

对大沙波纹的认识仍然需要从形态和组成物质入手。“好奇号”(Curiosity)火星车获取的盖尔陨击坑 (Gale Crater) 中拜格诺沙地 (Bagnold Dunefield) 桅杆相机 (Mastcam) 的照片表明, 火星大沙波纹与地球厘米级沙波纹的区别并非简单的空间尺度差异, 其还具有以下突出的形态学特征: ①火星高分辨率成像科学实验 (HiRISE) 相机的高分辨率 (分辨率达 0.25 m) 影像显示了火星大沙波纹的存在^[4], 其走向用以反演奥林匹亚沙地 (Olympia Undae)、阿拉伯高地 (Arabia Terra)、子午线高原 (Meridiani Planum) 和火星科学实验室盖尔着陆点的沙丘表面流场特征。沙波纹脊线的移动速度被用以估算尼利环形山 (Nili Patera) 沙丘区的输沙风强度和沙通量。显然, 大沙波纹的空间尺度较地球上常见的沙波纹尺度大, 以至于能够在 HiRISE 高分辨率影像上显示, 研究发现其波长为 1~5 m, 平均为 1.9~2.7 m, 即在米级尺度 (图 3)^[1,5]。然而, 大沙波纹较大的尺度特征并未引起人们的注意, 因为理论上火星风沙地貌的空间尺度应比地球上的大^[6], 直至分辨率更高的影像显示出更小尺度的沙波纹形态^[3], 大沙波纹的尺度特征才引起人们的关注。②

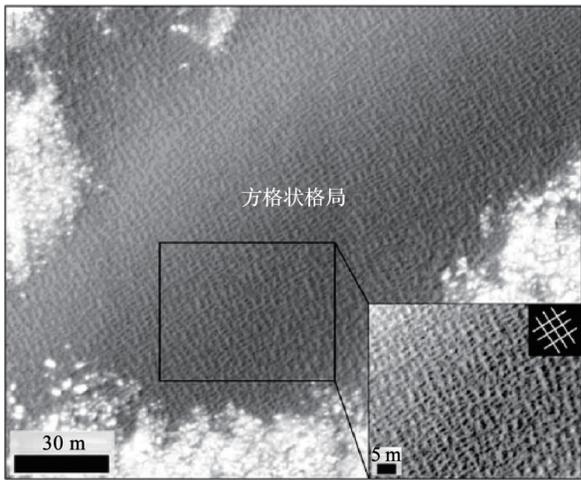


图 1 HiRISE 高分辨率影像显示的火星大沙波纹 (据参考文献[1]修改)

Fig.1 Typical large ripples and mixed square patterns in Bagnold dunes of Gale Crater (HiRISE image) (modified after reference [1])

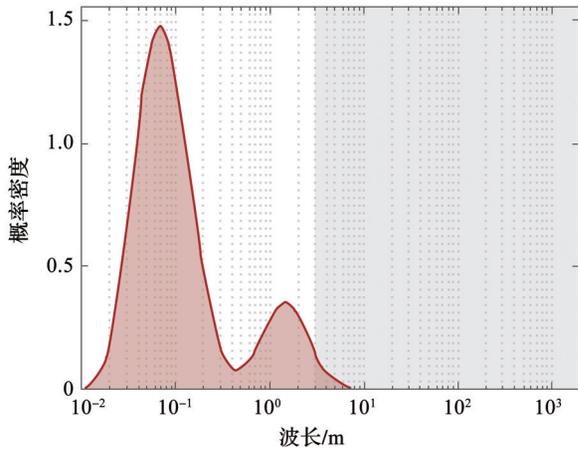


图 2 “好奇号”火星车显示的火星另一个床面形态概率分布峰值—大沙波纹 (据参考文献[3]修改)

Fig.2 Distinct modes of Martian aeolian ripples revealed by Curiosity Rover (modified after reference [3])

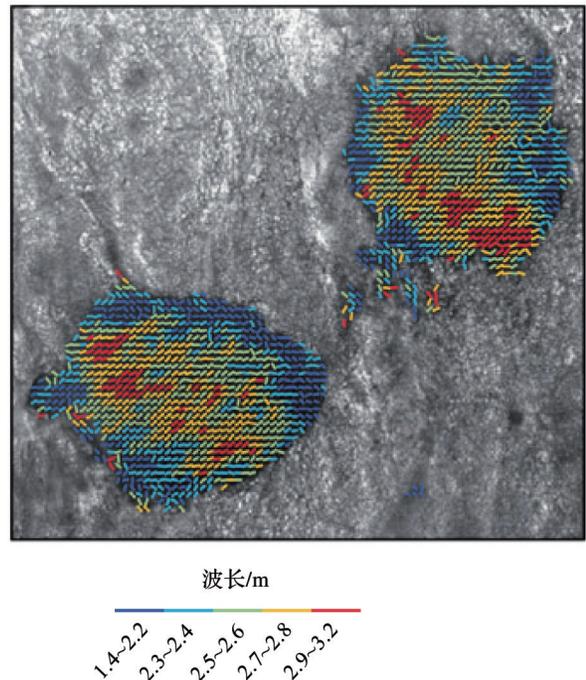


图 3 拜格诺沙地山丘上大沙波纹的波长变化 (据参考文献[5]修改)

Fig.3 Variation of wavelength of large ripples over a dune in the Bagnold Dunefield (modified after reference [5])

大沙波纹与常见的沙波纹一样,通常叠置在沙丘上,但特别之处在于其上又叠置厘米级的沙波纹(图4),厘米级沙波纹发育在大沙波纹的迎风坡,波长为5~12 cm^[3],类似地球上的冲击沙波纹,呈现目前尚未发现的沙波纹、大沙波纹和沙丘3级尺度风沙地貌类型并存现象,而地球沙波纹只有1种厘米级的沙波纹叠置在沙丘之上,此并存现象使研究者意识到大沙波纹可能是火星独特的风成床面形态类型。③火星大沙波纹的脊线比较蜿蜒、尖锐,横截面不对称,迎风坡与背风坡坡度差异比较大,背风坡坡度接近休止角,产生滑落甚至滑塌,火星机械臂透镜成像仪(Mars Hand Lens Imager, MAHLI)照片显示大沙波纹的背风坡具有新鲜的滑落或滑塌面(图5),表明大沙波纹不同于普通沙波纹的形成机制。而地球沙波纹一般脊线较直,截面较和缓。④大沙波纹具有沙丘的空间格局特征,其脊线具有不同走向,从而构成网格状格局(图6),是火星

大沙波纹最普遍的空间格局,如拜格诺沙地的大沙波纹具有41°和322°两个走向,在不同地段会呈现不同的主导走向。⑤大沙波纹移动明显,而且部分显示线形沙丘的运动特征(图7)。拜格诺沙地沙丘上的大沙波纹每个地球年的移动量达1.7 m,且呈现为沙脊的延伸,并非常见的沙波纹的侧向移动。⑥大沙波纹与风况的关系类似于沙丘,即它们的排列方向趋向于与最大输沙势方向垂直^[7]。与普通沙波纹不同的是,普通沙波纹反映短时间尺度或瞬时风向,而大沙波纹的走向能够反映更长时段的复杂风况。如拜格诺沙地的大沙波纹显示单一风向风况和双向风风况(图8),表明大沙波纹的形成机制不同于普通沙波纹。已经发现的埋藏或古大沙波纹(图9)被认为是历史时期风况特征的记录者^[3],在火星北极的黑暗色基底地层中甚至包含米级尺度的交错层理^[8],显示出大沙波纹研究在揭示火星环境及其演化历史中的潜在价值。

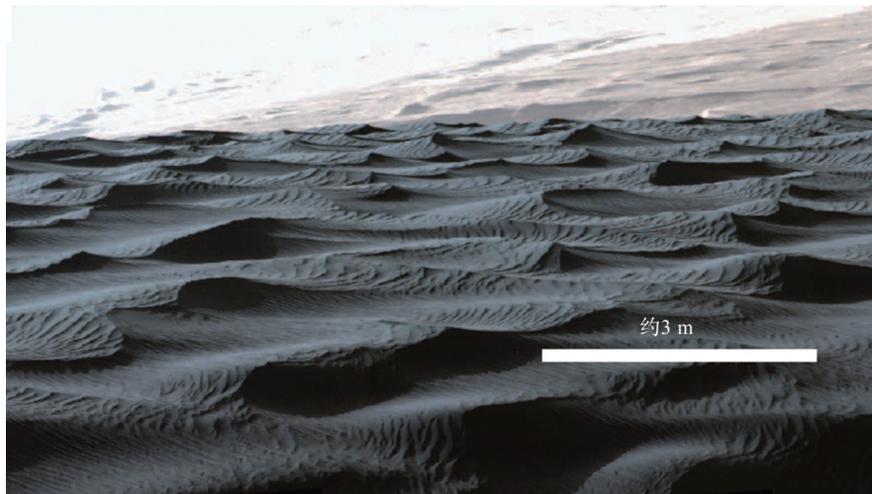


图4 栏杆相机照片显示的大沙波纹及其上叠置的沙波纹(据参考文献[3]修改)

Fig.4 Large ripples and their superimposed ripples revealed by Mastcam camera (modified after reference [3])

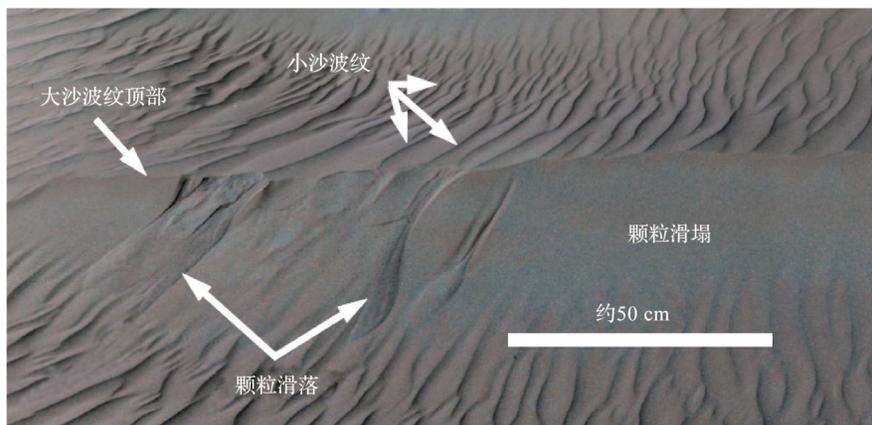


图5 火星机械臂透镜成像仪照片显示的大沙波纹坡面上的颗粒滑落与滑塌现象(据参考文献[3]修改)

Fig.5 Grainflow and grainfall on a large ripple slope revealed by MAHLI camera (modified after reference [3])

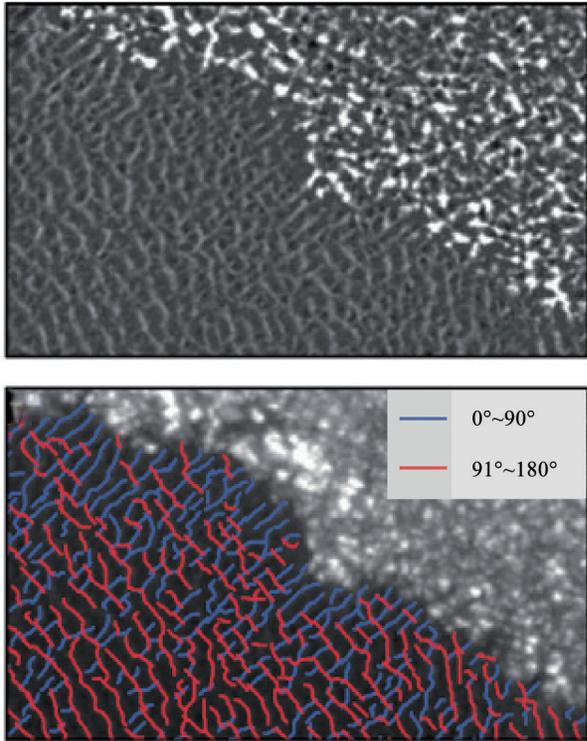


图 6 火星拜格诺沙地沙丘上大沙波纹的网格状格局
(据参考文献[5]修改)

Fig.6 Network patterns of large ripples on a dune of the Bagnold Dunefield (modified after reference [5])

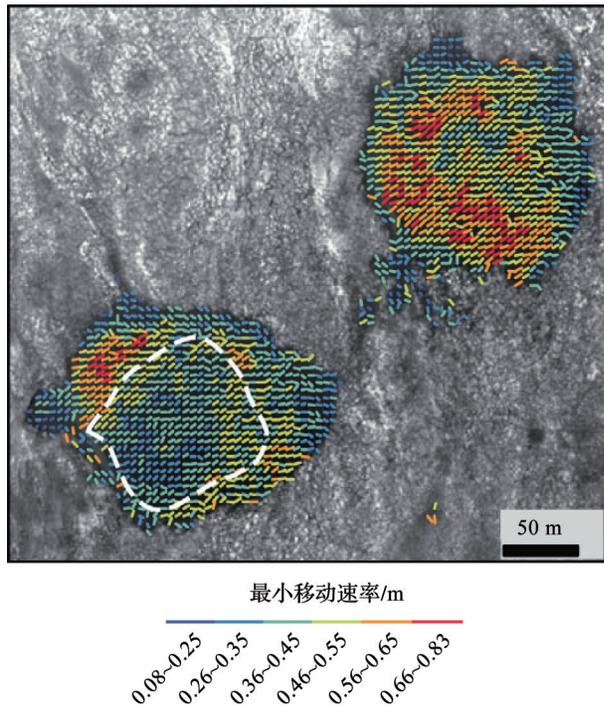


图 7 火星拜格诺沙地沙丘上大沙波纹的两期照片对比显示的大沙波纹移动量(据参考文献[5]修改)

Fig.7 Minimum migration axial field computed for the interval between two images (modified after reference [5])

火星大沙波纹的独特性引发了研究者们关于其沉积物组成的推测,因为沉积物组成在很大程度上蕴含了形成机制的信息,如有研究者们猜测组成大沙波纹的沉积物颗粒较粗^[9]。但是,火星机械臂透镜成像仪(Mars Hand Lens Imager, MAHLI)照片显示,发育于沙丘迎风坡的大沙波纹沉积物组成为分选良好的中细沙,与叠置其上的小沙波纹的沉积物颗粒组成相同^[3]。这是仅有的关于大沙波纹沉积物组成特征报道,显然是很片面的,全面的认识依赖于未来更广泛的探测和更深入的研究。

3 形成机制假说

尽管近几年已有关于火星大沙波纹的研究报道,但对其研究范围极其有限,目前粗浅的认识尚不足以支持关于大沙波纹形成机制的研究,但形成机制是一个最能引起人们研究兴趣的科学问题。形态学特征、沉积学特征及发育环境是其形成机制研究的3个重要方面,关于火星大沙波纹形成机制目前仅能根据有限的形态学认识进行猜测,遇到的问题与横向沙脊有些类似,其形成假说主要参考横向沙脊、复合沙丘、粗沙波纹、冲击沙波纹甚至水下沙波纹。因为火星大沙波纹尺度较常见的沙波纹大,最初关于其形成机制的理解是将其与沙丘联系起来。但形态学特征表明,大沙波纹并非简单的小沙丘,其在特定区域内能够保持稳定不变的空间尺度,虽然由于颗粒粒径和风速的变化,大沙波纹的波长在沿迎风坡方向上会发生微小的变化,具有与常见沙波纹相类似的性质。而地球上间距米级尺度的小沙丘虽然比较少见,但其空间尺度沿下风向逐渐增大^[10],从而基本上排除了以沙丘形成机制的理论解释大沙波纹形成机制的可能性。但是, Silvestro 等^[1]在盖尔陨击坑(Gale Crater)发现了所谓的纵向大沙波纹,并指出其形成机制类似于纵向沙丘。另一个方面的探索是根据普通沙波纹的形成理论来理解火星大沙波纹的形成机制。当上述两方面的探索均不能给出令人满意的解释时,研究者们试图寻求其他途径。目前,关于火星大沙波纹的形成机制可归纳为3个方面的猜测,姑且称之为假说。

(1) 沙丘假说。Silvestro 等^[1]基于对盖尔陨击坑火星科学实验室着陆点的拜格诺沙地沙丘上大沙波纹的研究结果提出了沙丘假说。他们应用遥感影像监测了大沙波纹的演化过程,结果表明火星大沙波纹在动力学方面不同于地球上的沙波纹,其

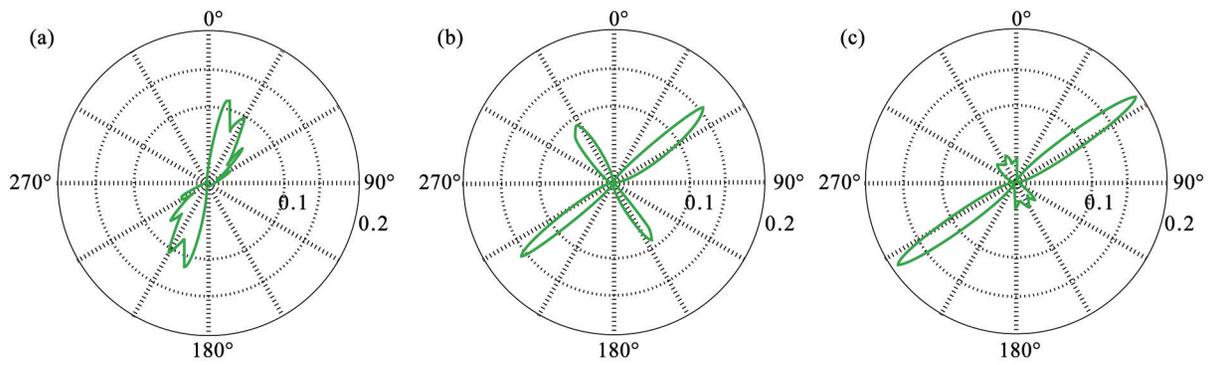


图 8 火星拜格诺沙地沙丘上大沙波纹显示的几种不同风况(据参考文献[5]修改)

Fig.8 Length-weighted circular distributions of trends of large ripples (modified after reference [5])

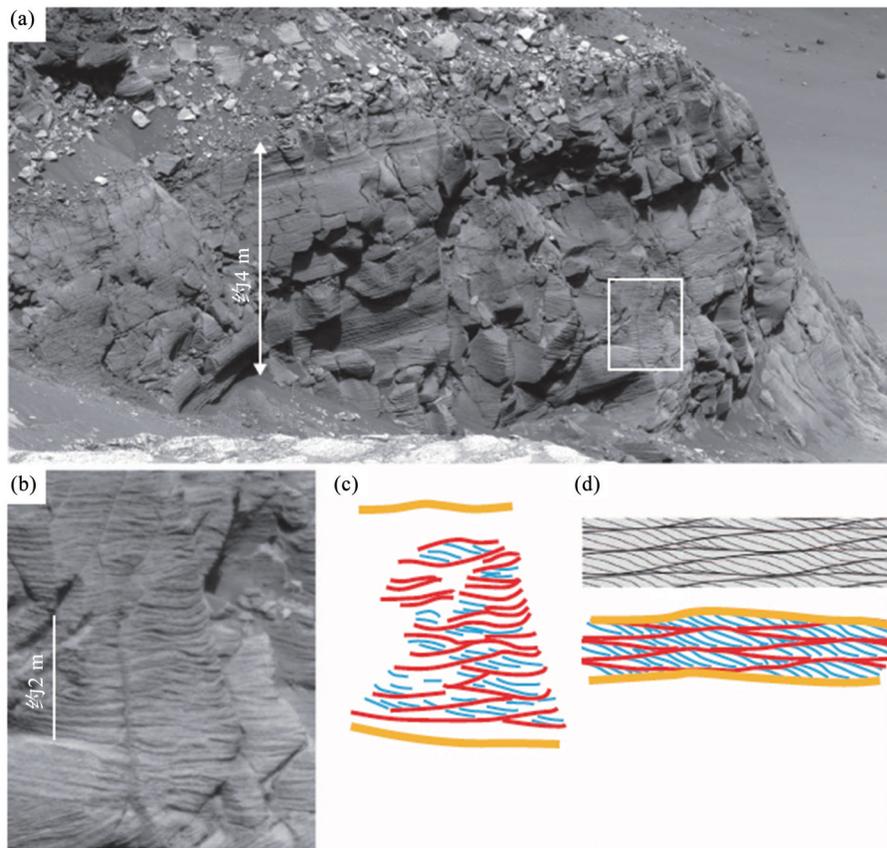


图 9 火星维多利亚陨击坑开铺圣玛丽露头显示的埋藏大沙波纹(据参考文献[3]修改)

Fig.9 Candidate wind-drag ripple stratification on Mars: Mars Exploration Rover Panoramic Camera image (P2441, sol 1212) of Cape St. Mary outcrop, Victoria crater, Mars (modified after reference [3])

(a)火星探测漫游者全景相机在维多利亚陨击坑开铺圣玛丽露头拍摄的照片;(b)图(a)中白色方框区域的分米级交错层理;(c)对图(b)交错层理的深入解析;(d)通过复合床面动力学模型模拟的不能被解释(上)和能被解释(下)的层理结构;黄色和红色线条分别代表沙丘和大沙波纹移动产生的侵蚀面;蓝色线条代表大沙波纹的交错层理;黑色表示不能被解释的层理

(a) Mars Exploration Rover Panoramic Camera image of Cape St. Mary outcrop, Victoria crater, Mars; (b) Decimeter-scale cross-strata of the white box shows the location of (a); (c) An interpretation of stratal features from (b); (d) Uninterpreted (top) and interpreted (bottom) stratification produced by kinematic modeling of compound bedforms. Yellow and red lines represent erosional surfaces produced by migration of dunes and wind-drag ripples separately; Blue lines indicate wind-drag ripple cross-stratification; Black lines represent uninterpreted stratification

演化表现为纵向延伸,在 6 个地球年内几乎未发生侧向移动,类似纵向沙丘。图 10 为基于 52 个不同

时期(T1、T2 和 T3)大沙波纹的 Y-结点的监测统计结果,图中清晰地显示了大沙波纹向西南方向的纵

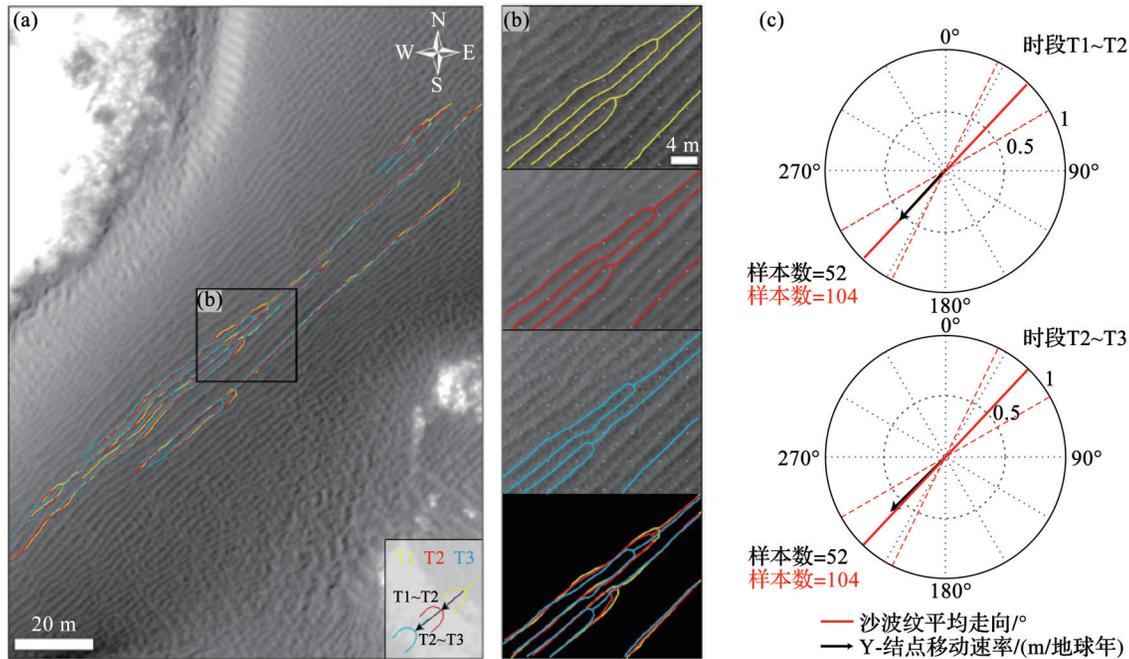


图 10 火星大沙波纹的纵向延伸(据参考文献[3]修改)

Fig.10 Longitudinal migration of LRs (modified after reference [3])

- (a) 火星盖尔陨击坑拜格诺沙地大沙波纹的纵向移动(T1~T3时间段);(b)不同时期Y-结点的位置;(c)移动方向与大沙波纹走向对比;
- (a)和(b)中黄色、红色和蓝色线条分别代表大沙波纹在T1、T2和T3时间段的纵向移动
- (a) Longitudinal migration of LRs in the Bagnold dunefield, Gale crater, Mars (at T1~T3); (b)The location of Y junction with time;
- (c) Comparison of longitudinal direction of Y junction and crest orientation of LRs; Yellow, red, and blue lines in figure (a) and (b) represent longitudinal migration of LRs during the period of T1, T2, and T3

向延伸,与基于102个大沙波纹的平均走向的统计结果一致。若干实验证明,当每个风向的变化周期小于沙波纹形态调整的时间时,在双向风作用下能够形成纵向沙波纹^[11]。火星纵向大沙波纹的存在反映了火星的双向风况,而且每个风向的作用周期小于大沙波纹形态调整的时间,可能是火星起沙风出现的频率较少所致。也可能出现某一方向风的作用周期较沙波纹形态调整时间长的情况,以至出现更复杂的斜向大沙波纹,更接近沙丘形成机制。该研究的重要启示是:火星大沙波纹能够记录较长时期的多风向风况,而普通沙波纹仅记录最近时期的风向。在根据大沙波纹反演近地层风场时,必须谨慎分析,因为不同于常见沙波纹,大沙波纹的走向有时不具有与风向垂直的性质。

(2)冲击假说。研究者们最早在遥感影像上发现大沙波纹的时候,其特殊性被忽视,认为其与地球上常见的沙波纹相类似,所以,关于其形成过程首先用最经典的沙波纹形成理论来解释,即与跃移颗粒的冲击作用有关。运动速度较大的“高能”跃移颗粒冲击地表,溅射起地表的“低能”颗粒,使其产生蠕移运动,因迎风坡受到的冲击作用较背

风坡多,所以沿迎风坡向上的沙通量大于沿背风坡向下的通量,地表起伏因此而逐渐增大。基于这一理论的沙波纹形成机制研究已有长足的发展,特别是在数值模拟研究领域,研究者们已提出许多数学模型来解释沙波纹的形成与演化,完美地再现了沙波纹的形态,也有部分野外观测和控制实验研究^[12]。跃移颗粒的冲击作用在火星风沙运动中的作用更加重要,因为火星上很少出现大于颗粒流体起动风速的风,维持风沙运动的风速主要介于颗粒的冲击起动和流体起动风速之间。偶尔被起动的颗粒在风力作用下发展为具有更强溅射作用的运动颗粒,其进一步催生更多的跃移运动,形成向下风向运动的跃移颗粒群,最终发展为低通量风沙流,使表面形态发生缓慢变化,这一理论得到了火星小沙波纹的验证^[13]。用该理论解释火星大沙波纹时,其空间尺度较大的特征被归因于火星环境下的跃移运动特征,火星重力和大气环境特征的不同,致使跃移颗粒的运动轨迹被拉长,形成较大的沙波纹。这种火星特殊环境下产生的跃移运动的尺度效应甚至被用以解释横向沙脊的形成^[2]。

事实上,大沙波纹并不是因跃移轨迹被拉长而增大的沙波纹,其与常见的沙波纹并非简单的尺度差别^[14],因为火星大沙波纹上叠置小沙波纹,两种尺度的沙波纹在相同的跃移颗粒冲击机制下共生和演化是难以理解的。此外,用地球上的粗沙波纹理论也不能解释火星大沙波纹的形成,因为已有详细探测资料表明火星大沙波纹沉积物由中细沙组成。地球上粒径 1 mm 至几厘米的粗颗粒能够形成波长为米级的粗沙波纹或砾石波纹,虽然“勇气号”(Spirit)火星车在古谢夫陨击坑(Gusev Crater)的埃尔多拉多(El Dorado)观察到粗沙波纹,“好奇号”(Curiosity)火星车在盖尔陨击坑(Gale Crater)高大沙丘的迎风坡脚也观察到类似的粗沙波纹,但火星大沙波纹明显不同于这些粗沙波纹,因其表层并未显示粗沙覆盖的特征。

(3)流体拖拽假说。该假说认为大沙波纹是由颗粒的悬移运动形成,即分选良好的中细沙在足以使其悬移的高风速条件下,形成由悬移细沙和长轨迹跃移中沙组成的风沙流,此时在颗粒湍流作用下形成波长较长和高度较低的沙波纹^[15],或称之为空气动力学沙波纹^[16]。在空气动力学沙波纹形成过程中,组成沙波纹的细颗粒的沉降速度通常为垂直湍流波动速度的 1/2,颗粒运动轨迹受湍流的强烈影响,所以此类沙波纹的形态几何特征取决于表面剪切力的局地变化,不同于常态沙波纹的形态几何特征取决于颗粒跃移轨迹。在更大尺度上,沙丘的形态特征也被认为是取决于表面剪切力的局地变化,所以某些大沙波纹具有与沙丘相类似的空间格局(图 2)。

火星大沙波纹较长的波长、不对称的截面以及蜿蜒弯曲的脊线(图 11)类似某些水下沙波纹—水流波或流体拖拽波纹,所以,流体拖拽假说试图将水流波理论作为解释火星大沙波纹的理论基础^[3],其核心是根据水槽实验得出的水流波尺度关系^[17]来估算火星大沙波纹的波长。根据实验数据,流体拖拽波的波长公式为(图 12):

$$\lambda = \frac{\nu}{u_*} \lambda^*, \lambda^* = 2.453(Re_p \sqrt{\tau_*})^{1/3}, \quad (1)$$

式中: λ 为沙波纹波长, λ^* 为无量纲沙波纹波长, ν 为流体的运动黏滞系数, u_* 为床面剪切速度, τ_* 为希尔兹剪切力(Shields stress), Re_p 为颗粒雷诺数, ν/u_* 与黏性流体底层厚度成正比,是 $Re_p \sqrt{\tau_*}$ 的函数。

公式(1)提供了不同流体及颗粒特征和重力加速度条件下沙波纹波长的计算公式,以此公式估算

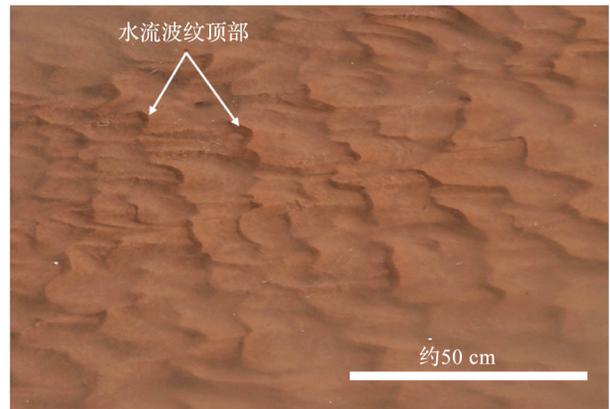


图 11 美国亚利桑州那切里大峡谷现代河流中的中细沙水下沙波纹(据参考文献[3]修改)

Fig.11 Subaqueous ripples in fine-to-medium sand, in a modern river near the Canyon de Chelly, Arizona, United States (modified after reference [3])

的火星风力拖拽沙波纹的波长远大于厘米级尺度的冲击沙波纹,因为火星大气的运动黏滞系数高而密度小。火星不同海拔高度大气密度条件下大沙波纹波长的估算结果(图 13)与流体拖拽理论结果(图 12)相吻合。

4 讨论和结语

根据已发表的相关研究论文,火星大沙波纹的确是一种需要深入研究的风成床面形态,其独特性表现在空间尺度、形态、格局以及沉积物组成等多个方面,最独特的是其上叠置更小尺度的常态沙波纹,出现 2 种级别的沙波纹共同存在和共同演化的现象,这也是将其称作大沙波纹的主要考虑。目前关于大沙波纹的理解显然是很肤浅的,因为人们对其研究的范围和深度都极其有限。关于大沙波纹的形成机制,目前有几个方面的考虑,虽然称之为假说,但仅是一些很不成熟的初步想法,且主要针对单个沙波纹的形态特征,而对其最突出的网格状格局和与小沙波纹和沙丘一起构成的三级叠置格局暂时并没有顾及。地球上的沙山、沙丘和沙波纹三级叠置格局是最普遍的沙丘地貌特征,此特征与火星沙丘地貌的三级叠置格局是否对应,理论上的推理是否定的。基于已有的大量假说、理论推导和事实,关于在平坦沙质床面上形成的沙丘,一个广为接受的理论是其波长或间距受控于含沙流的饱和长度,被称为流体床面的比例法则。基于水下沙波纹、金星风洞的微型沙丘、新鲜雪丘以及地球和火星环境风成沙丘的间距测量结果表明,含沙流的饱和长度,亦即床面形态的平均间距与颗粒粒径和

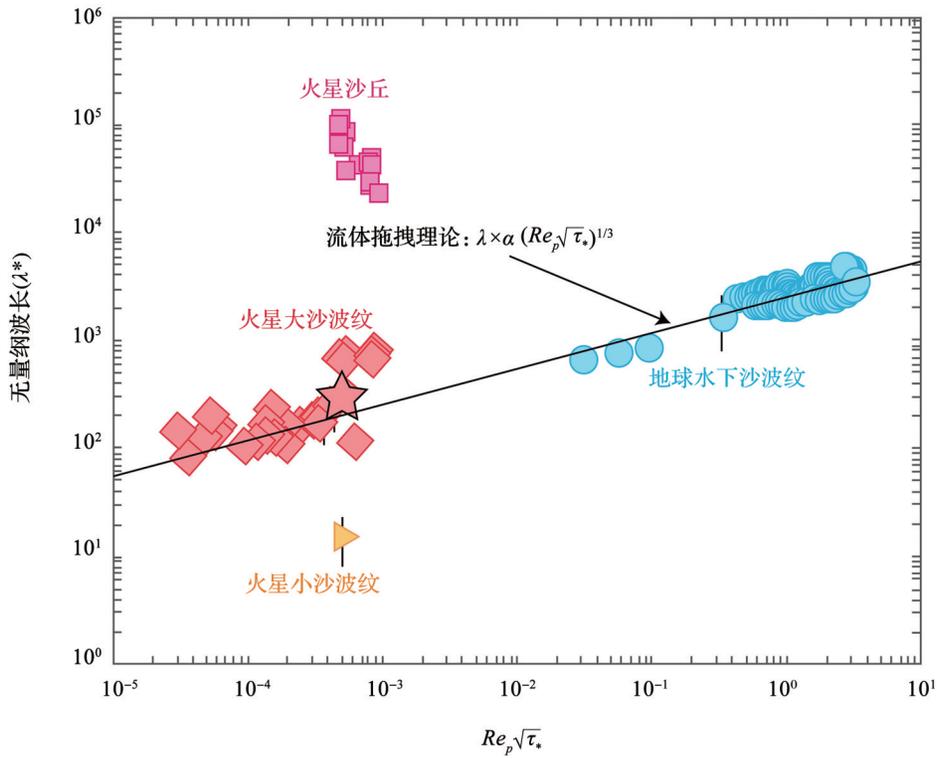


图 12 流体拖拽沙波纹的尺度比例关系(据参考文献[3]修改)

Fig.12 Scaling of fluid-drag ripples (modified after reference [3])

火星大沙波纹的波长与流体拖拽沙波纹理论吻合,而火星沙丘与小沙波纹则与之不吻合
Large Martian ripples match fluid-drag ripple theory, in contrast to Martian dunes and small Martian ripples

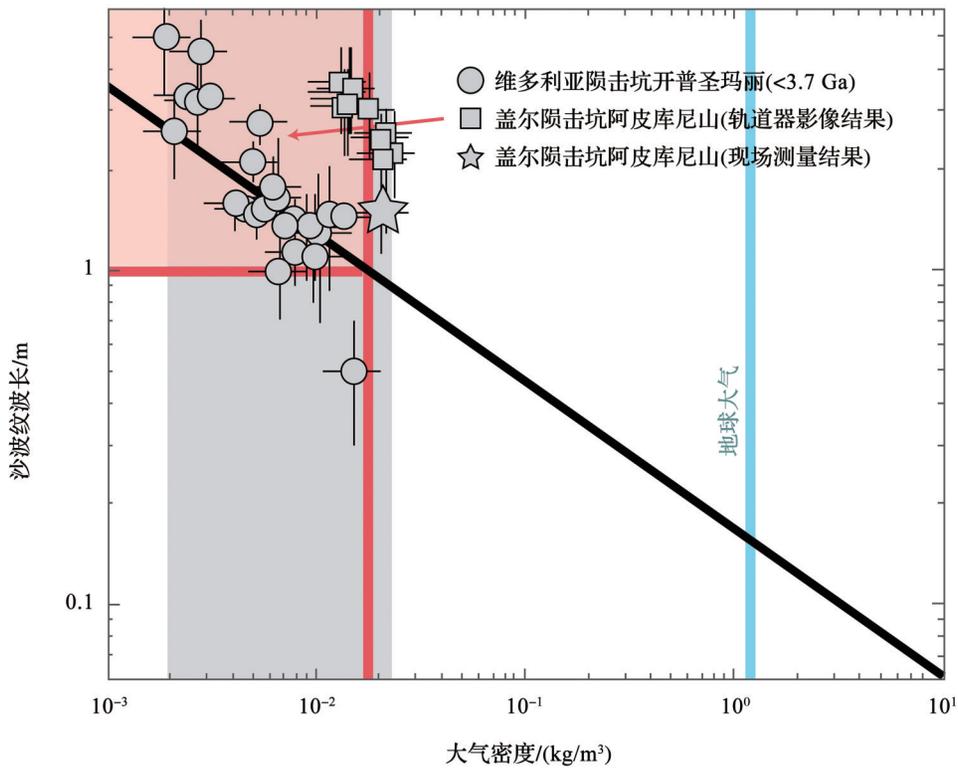


图 13 火星风力拖拽沙波纹波长随大气密度的变化(据参考文献[3]修改)

Fig.13 Wavelength of wind-drag ripples on Mars as a function of atmospheric density (modified after reference [3])

颗粒/流体密度比的乘积成正比,即颗粒粒径相同时,平均间距与颗粒/流体密度比值成正比。尽管火星沙丘沉积物的粒度组成尚没有直接的实验分析结果,但大多数的探测结果显示其与地球沙丘颗粒粒径相似,在这里我们至少可以保证,火星沙丘的间距主要取决于颗粒/流体密度值。火星大气条件下大的颗粒/流体密度值远高于地球,所以火星风成床面形态的空间尺度应当明显大于地球。

事实上,火星沙丘的空间尺度总体上是小于地球沙丘的,此现象甚至是火星沙丘地貌的一个重要特征。应用流体床面的比例法则推算床面形态波长的重要条件是需要明确含沙流饱和和长度的影响因素,这是目前理论研究的争论所在,因为决定含沙流饱和和长度的因素是复杂多样的,如除了颗粒粒径和颗粒/流体密度值之外,还有希尔兹数、颗粒和流体雷诺数及伽利略数等,甚至可能更多。我们知道,对床面形态起作用的大气流场主要是近地表大气,火星上近地表大气特征是最不清楚的,即便在地球上,决定沙丘地貌发育的贴地层气流特征也是无法准确测量的,以至于成为沙丘地貌研究的瓶颈。对火星风沙地貌研究而言,以火星大气的总体特征来探讨风沙地貌的形成机制,特别是沙波纹尺度的小尺度风成床面形态显然是很有局限性的。尤其是火星表面升华和凝结过程的存在,使火星总体大气特征对近地层气流特征的代表性更差,近地层或贴地层气流特征事实上是火星沙丘地貌研究的关键信息,可惜是最缺乏的信息。

火星大沙波纹的特殊性最近几年才被确认,在此之前人们将其视为与地球上常见沙波纹相似的大风成床面形态,以至于被用于反演火星表面风场,乃至根据埋藏沙波纹推断火星历史时期的大气特征。Lapotre 等^[3]基于火星大沙波纹的流体拖拽假说,指出火星大沙波纹代表稀薄大气,所以“机遇号”(Opportunity)火星车在维多利亚陨击坑开普圣玛丽(Cape St. Mary, Victoria crater)观察到的埋藏大沙波纹表明,在晚诺亚纪和早西方纪(Late Noachian-Early Hesperian)的布恩斯建造(Burns formation)的沉积时期,火星大气已很稀薄。在反演火星表面风况时,必须对大沙波纹形态主要是其走向以及火星大沙波纹的网格状格局进行谨慎分析,特别是所谓的纵向大沙波纹的发现表明,在有些情况下,大沙波纹对应复杂的多风况环境。

火星大沙波纹与地表风况对应关系涉及到的另外一个重要问题是沙波纹形成与演化的时间

尺度问题。基于稳定性分析,火星风沙地貌的演化速度较地球慢得多,如沙丘在千年乃至万年时间尺度上才会发生明显的变化^[6],重要原因是火星起沙风出现的频率少以及许多地区的表面被经常冻结,大沙波纹的形成与演化时间尺度比常见的小沙波纹长,所以,大沙波纹对风况的敏感性以及对风向的指示作用是需要谨慎考虑的问题。火星大沙波纹是值得特别研究的,对总体上认识火星风沙地貌、火星环境特征及其演化历史具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] Silvestro S, Vaz D A, Yizhaq H, *et al.* Dune-like dynamic of Martian Aeolian large ripples [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(16): 8 384-8 389.
- [2] Dong Zhibao, Lü Ping, Li Chao, *et al.* Unique aeolian bedforms of Mars: Transverse aeolian ridges [J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(7): 661-677. [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.]
- [3] Lapotre M G, Ewing R C, Lamb M P, *et al.* Large wind ripples on Mars: A record of atmospheric evolution [J]. *Science*, 2016, 353(6 294): 55-58.
- [4] Bridges N T, Geissler P E, Mcewen A S, *et al.* Windy Mars: A dynamic planet as seen by the HiRISE camera [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(23): L23205. DOI: 10.1029/2007GL031445.
- [5] Vaz D A, Silvestro S. Mapping and characterization of small-scale aeolian structures on Mars: An example from the MSL landing site in Gale Crater [J]. *Icarus*, 2014, 230: 151-161.
- [6] Claudin P, Andreotti B. A scaling law for aeolian dunes on Mars, Venus, Earth, and for subaqueous ripples [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 252(1/2): 30-44.
- [7] Kocurek G, Ewing R C, Mohrig D. How do bedform patterns arise? New views on the role of bedform interactions within a set of boundary conditions [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(1): 51-63.
- [8] Herkenhoff K E, Byrne S, Russell P S, *et al.* Meter-scale morphology of the north polar region of Mars [J]. *Science*, 2007, 317(5 845): 1 711-1 715.
- [9] De Silva S L, Spagnuolo M G, Bridges N T, *et al.* Gravel-mantled megaripples of the Argentinean Puna: A model for their origin and growth with implications for Mars [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2013, 125(11/12): 1 912-1 929.
- [10] Kok J, Parteli E, Michaels T, *et al.* The physics of wind-blown sand and dust [J]. *Reports on Progress in Physics Physical Society*, 2012, 75(10): 106 901.
- [11] Rubin D, Hunter R. Bedform alignment in directionally varying flows [J]. *Science*, 1987, 237(4 812): 276-278.
- [12] Andreotti B, Claudin P, Pouliquen O. Aeolian sand ripples: Experimental study of fully developed states [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(2): 028001. DOI: 10.1103/PhysRev-

- Lett.96.028001.
- [13] Sullivan R, Kok J F. Aeolian saltation on Mars at low wind speeds [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2017, 122(10): 2 111-2 143.
- [14] Yizhaq H, Kok J F, Katra I. Basaltic sand ripples at Eagle Crater as indirect evidence for the hysteresis effect in martian saltation [J]. *Icarus*, 2014, 230: 143-150.
- [15] Bagnold R A. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes* [M]. New York: Springer, 1941.
- [16] Wilson I G. Aeolian bedforms Their development and origins [J]. *Sedimentology*, 1972, 19(3/4): 173-210.
- [17] Yalin Mehmet S. On the determination of ripple geometry [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1985, 111 (8) : 1 148-1 155.

Characteristics and Formation Mechanism of Large Ripples on Mars*

Dong Zhibao, Lü Ping, Li Chao, Hu Guangyin

(Planetary Aeolian Research Institute, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Large Ripples (LRs) on Mars come into the subject of researchers with the acquisition of high resolution image data. LR s are a kind of aeolian bedforms with meter-scale wavelength, and outstanding features of their morphology, bedform patterns, mobility and formation processes. However, due to the limited exploration data, especially the lack of high resolution image data, the research scope and depth are extremely limited, which leads to the long-term neglect of their uniqueness, therefore, researches simply consider them as common sand ripples on Earth. Following the geomorphology law and based on the existing limited research, this paper introduces the morphology, sedimentology and formation mechanism of LR s, and discusses their potential research significance. Compared with ordinary sand ripples, LR s are larger with sinuous and sharp crest lines, asymmetric topographic profiles, the downwind slope angle is much bigger than that of upwind, and slip faces are marked by the presence of grainflows and grainfalls. LR s have strong mobility with obvious longitudinal extension of ridges, and the lateral migration is very small. They have various orientations and network patterns which can be used to inverse the complex wind regimes over a long period of time. Three hierarchical order aeolian bedforms of sand ripples, large ripples, and sand dunes can co-exist. Preliminary explorations show that the sedimentology of LR s is the well sorted fine-to-medium sand. Three formation hypotheses were proposed for LR s: dune hypothesis, impacting hypothesis and fluid-drag hypothesis, with more evidences supporting the fluid-drag hypothesis. LR s are different from normal sand ripples, and their uniqueness is of great significance to comprehend Martian aeolian geomorphology, environmental characteristics, and revolution history, and therefore, they are worth making an intensive study of.

Key words: Martian aeolian geomorphology; Large ripples; Morphological characteristics; Formation hypothesis.

* **Foundation item:** Project supported by the National Natural Science Foundation of China "Weathering rate of the dry denudated mountains surrounding the Tarim Basin" (Grant No. 41930641) and "Determination of time and length scales of dune dynamical model" (Grant No. 41871011).

First author: Dong Zhibao (1966-), male, Hengshan County, Shaanxi Province, Professor. Research areas include aeolian geomorphology and physics of blown sand. **E-mail:** zbdong@snnu.edu.cn