火星沙丘地貌的形态学窥究

李超, 董治宝*, 吕萍, 赵杰, 符淑宜, 冯淼彦, 朱春鸣

陕西师范大学行星风沙科学研究院, 西安 710119

* 联系人, E-mail: zbdong@snnu.edu.cn

2019-06-11 收稿, 2019-09-16 修回, 2019-09-17 接受, 2019-11-26 网络版发表

国家自然科学基金(41871008)资助

摘要 风沙地貌过程是最活跃最普遍的现代火星地貌过程, 蕴含火星地表过程、环境和演化历史的丰富信息. 本研究利用覆盖火星全球高分辨率的遥感影像, 在地理信息系统软件的支持下, 在全球尺度上分析火星沙丘地貌的形态学特征, 挖掘所蕴含的风沙地貌学意义. 结果表明, 火星沙丘地貌类型与地球沙丘地貌相似, 但仅以简单沙丘为主, 罕见复合和复杂沙丘, 沙丘形态参数累计概率曲线表现为简单一段式. 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, 而占地球沙丘约50%的线形沙丘在火星上占不到10%. 火星沙丘规模较地球沙丘小, 与理论上应具有更大规模的沙丘相悖. 火星沙丘地貌形态参数间与地球沙丘呈现相似的良好相关性, 但相关关系不同, 意味着具有相似的形成机理, 但不同的形成条件. 得到的另一重要启示是, 在地球上研究类火星风沙地貌, 如青藏高原的类火星风沙地貌, 是认识火星风沙地貌及其发育环境的有效途径.

关键词 火星地貌, 风沙地貌, 沙丘形态学, 沙丘形态参数

火星是当前深空探测的主要目标之一, 20世纪60年代以来, 火星探测围绕生命迹象和形成演化两大核心任务, 在大气、磁场、岩石、地貌、土壤和水等方面获得了广泛的认识^[1]. 作为火星环境、地表过程及其演化历史直接的信息载体, 火星地貌得到了系统的研究. 已经探明, 火星主要地貌类型包括陨击坑、火山地貌、流水地貌、风沙地貌以及冰川地貌等^[2]. 与地球地貌差异大, 且现代地貌过程不活跃, 是一个沉寂的星球, 陨石撞击作用、流水作用、冰川作用沉寂的时间至少在亿年时间尺度上. 然而, 风沙地貌过程是公认的火星最普遍、最活跃的现代地貌过程, 虽然火山地貌过程可能仍在活跃, 但极其有限. 所以, 风沙地貌是理解火星现代地表过程可靠的地貌类型, 至少蕴含有关大气运动(风速、风向和地面风场等)、地表沉积物及其相互作用方面的信息. 特别是在目前尚没有关于火星表面气象观测的情况下, 风沙地貌为了解火星表面

风况提供了重要参考. 例如, 沙丘地貌的形态特征成为推断火星北极表面风场及其季节变化的依据^[3,4]. 在尚不能进行地表观测的情况下, 基于遥感数据认识火星沙丘地貌的宏观特征与规律, 尝试形成过程机理的数值模拟是目前的主要研究方法, 取得了令人鼓舞的成果^[5-8]. 然而, 由于资料和研究工作零散, 对火星风沙地貌的总体情况尚没有全面系统的总结.

覆盖火星全球的高分辨率遥感影像和部分地面照片为全面认识火星沙丘形态学特征提供了重要信息. 本研究试图基于这些信息分析火星全球沙丘地貌的类型、形态参数, 通过与地球沙丘地貌的形态学对比, 认识火星沙丘地貌形态学的突出特征及其所蕴含的火星风沙地貌过程与环境信息.

1 研究方法

火星沙丘地貌的形态学特征研究包括沙丘类型识

引用格式: 李超, 董治宝, 吕萍, 等. 火星沙丘地貌的形态学窥究. 科学通报, 2020, 65: 80–90

Li C, Dong Z B, Lü P, et al. A morphological insight into the Martian dune geomorphology (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 80–90, doi: [10.1360/TB-2019-0168](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0168)

别、形态参数获取、形态参数概率分布、参数间关系及其蕴含的地貌学意义。本研究关于火星沙丘地貌的形态学研究基于火星沙丘遥感影像的分析,该方法已被广泛应用于地貌形态学研究,且是目前火星地貌研究的主要资料来源。火星沙丘地貌形态的目视解译和形态参数分析主要使用了火星勘测轨道飞行器(Mars reconnaissance orbiter, MRO)获取的CTX RDR卫星影像(分辨率6 m/pixel)^[9];小尺度沙丘形态参数分析使用了火星勘测轨道飞行器获取的HiRISE RDR高分辨率卫星影像(分辨率0.3 m/pixel)^[10]。

沙丘形态参数的测量借鉴了Ewing等人^[11]的方法。利用地理信息系统软件ArcGIS 10.2的空间矢量化、空间分析和统计分析工具,通过目视解译的方法,测量了卫星影像中沙丘地貌的主要形态学参数,包括沙丘脊线长度、高度、间距和缺损密度等(图1)。其中,脊线长度和间距直接量测获取,高度是由落沙坡长度((1)式)换算而来:

$$h = l \times \tan\theta, \quad (1)$$

式中, h 为沙丘高度, l 为落沙坡长度, θ 为落沙坡坡角,即风沙颗粒的休止角,在 $28^{\circ}\sim 33^{\circ}$ 之间,取 30° 值。根据落沙坡长度估算沙丘高度在沙丘地貌研究中被广泛应用^[12]。沙丘缺损密度为单位沙丘脊线长度上的缺损对

个数($\rho=N/L$, L 为沙丘脊线长度, N 为缺损对个数),这里的“缺损”系指沙丘脊线的断点或端点^[13]。

2 火星沙丘地貌类型

根据已有的风沙地貌学知识,沙丘地貌类型与其发育环境有良好的对应关系,所以辨识火星沙丘地貌类型是深入研究沙丘形态学特征及其地貌学意义首先需要解决的问题。地球风沙地貌类型复杂多样,以至于不同学者基于不同的考虑重点,提出了10多个沙丘分类系统。全面分析火星沙丘地貌的宏观特征表明,火星沙丘地貌与地球上的沙丘地貌具有极大的相似性,但也有其特殊性。所以借鉴关于地球沙丘地貌分类,兼顾火星沙丘地貌的特征,在遥感影像上全面考察火星沙丘地貌类型的基础上,尝试性地提出火星沙丘地貌的分类系统(表1)。各沙丘地貌类型所对应的代表性形态特征见图2。该沙丘地貌分类系统遵循传统沙丘地貌分类的动力-形态原则,包括两级:第一级着眼于动力学因素,即形成沙丘地貌的风况特征。以落沙坡指示风向,分为无落沙坡、单落沙坡、双落沙坡与多落沙坡四类。大致对应于无主导输沙风向、单一输沙风向、双向输沙风和多向复杂输沙风,沙丘类型包括沙片、穹状沙丘、横向沙丘、线形沙丘、钉状沙丘、格状沙丘、星状沙丘和障碍物沙丘。第二级类型主要关注形

图1 沙丘形态参数的定义与测量

Figure 1 A diagram defining the morphological parameters of sand dunes

表 1 火星沙丘地貌分类系统

Table 1 A tentative geomorphological classification system of Martian dunes

风沙动力类型	落沙坡数量	一级形态类型	二级形态类型	形态描述	图编号
无主导输沙风向	0	沙片		起伏和缓的片状、条带状和盾状风沙堆积体	图2(a)
		穹状沙丘		呈圆形或椭圆形, 无明显落沙坡	图2(b)
单一输沙风向	1	横向沙丘	新月形沙丘	呈新月形, 有一个明显的落沙坡, 两翼角指向下风向	图2(c)
			新月形沙丘链	由一系列新月形沙丘翼角相连构成的脊线蜿蜒的垄状沙丘	图2(d)
			横向沙垄	脊线较直、与输沙风向垂直的垄状沙丘	图2(e)
			直线形沙垄	脊线较直延伸较长的线形沙丘	图2(f)
双向输沙风	2	线形沙丘	塞夫沙丘	脊线蜿蜒的线形沙丘	图2(g)
			耙状线形沙丘	由相邻新月形沙丘联结形成的脊线蜿蜒、起伏较大的线形沙丘	图2(h)
			钉状沙丘	呈钉状, 上风向两落沙坡斜交, 向下风向延伸出主脊	图2(i)
			方格状沙丘	主脊与次脊高度和间距相近、近乎正交, 形成方格	图2(j)
多向复杂输沙风	≥ 3	格状沙丘	梯形格状沙丘	主脊明显较次脊突出, 近乎正交, 形成梯状网格	图2(k)
			鱼鳞状沙丘	沙丘脊不连续, 主脊和次脊区别不明显, 构成像鱼鳞一样的网格	图2(l)
			蜂窝状沙丘	主脊和次脊走向复杂、形成不规则的格网	图2(m)
	≥ 3	星状沙丘		有多个落沙坡, 多个沙丘脊放射状自丘顶歧出	图2(n)
		障碍物沙丘		障碍物附近形成的沙丘	图2(o)

态特征. 进一步将横向沙丘分为新月形沙丘、新月形沙丘链和横向沙垄; 线形沙丘分为直线形沙垄、塞夫沙丘和耙状线形沙丘; 格状沙丘分为方格状沙丘、梯形格状沙丘、鱼鳞状沙丘和蜂窝状沙丘. 依此分类系统, 对火星所有沙丘分布区进行目视解译, 制作火星风沙地貌图, 进行沙丘地貌类型和形态参数的统计分析. 图3为火星主要沙丘地貌类型的概率分布图. 与地球相比, 火星沙丘地貌形态具有以下突出特征.

(1) 类型简单. 简单性表现在3个方面. 首先, 火星沙丘几乎全部为简单沙丘, 未见复合沙丘或复杂沙丘. 而在地球上的主要沙漠则均有相当面积的复合和复杂沙丘. 如塔克拉玛干沙漠的复杂线形沙垄、巴丹吉林沙漠的复合横向沙山、鲁卜哈利沙漠的复合新月形沙山和纳米布沙漠的复合横向沙山等. 其次, 在地球上, 由于植物的存在, 很多沙漠或沙地发育固定沙丘和半固定沙丘. 如毛乌素沙地、浑善达克沙地和澳大利亚的多个沙漠. 所以, 在地球上广泛发育的灌丛沙丘和抛物线沙丘等沙丘地貌类型在火星上是没的. 再次, 火星风沙地貌类型显示以简单风况环境为主, 单一风向形成的新月形沙丘和新月形沙丘链占51%、格状沙丘占23%、钉状沙丘占9%, 这三类最基本的简单沙丘合

占83%. 在地球上, 线形沙丘是主要沙丘类型, 约占50%^[14], 而在火星上仅占8.8%. 地球上不重要的格状沙丘在火星上占23%, 特别是还有9%的钉状沙丘在地球上极为罕见. 火星沙丘地貌类型的简单性可能与其发育环境、影响因素和演化历史有关, 所以蕴含着重要的信息, 尽管目前的理解相当有限.

(2) 规模小. 首先, 火星风沙地貌分布区的面积小, 接近 $100 \times 10^4 (98 \times 10^4) \text{ km}^2$, 远小于地球上的2000多万 km^2 . 考虑到火星全球为极端干旱气候, 且干旱的历史相当久远, 其风沙地貌分布区的面积则更是太小了. 这是一个值得思考的问题, 可能与火星演化历史和现代地表过程有关. 其次, 火星风沙地貌分布零散, 各分布区的面积小, 未形成像地球上的若干大沙漠, 如鲁卜哈利沙漠($65 \times 10^4 \text{ km}^2$)和塔克拉玛干沙漠($33.7 \times 10^4 \text{ km}^2$). 火星有沙丘地貌分布区面积大于 1 km^2 者1800多块. 位于北极地区所谓的最大沙漠面积约 $69 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占火星沙丘地貌分布区总面积的70%, 但并不是真正意义上的连续沙漠. 其余大于 1000 km^2 的数量占不到2%, 大于 100 km^2 的数量占不到20%, 约45%面积在 $10 \sim 100 \text{ km}^2$ 间. 再次, 与地球相比, 火星沙丘以高度小于30 m的小沙丘为主, 几乎没有高度超过百米的所谓

图 2 火星主要沙丘类型的形态特征: 代表性火星沙丘卫星影像和可能的风向(红色箭头指代). (a) 沙片, ESP_050182_1165_RED; (b) 穹状沙丘, ESP_046504_1385_RED; (c) 新月形沙丘, ESP_036571_2575_RED; (d) 新月形沙丘链, ESP_027248_2550_RED; (e) 横向沙垄, P16_007373_1377_XN_42S322W; (f) 直线形沙垄, ESP_046168_2645_RED; (g) 塞夫沙丘, B11_013768_1339_XI_46S323W; (h) 耙状线形沙丘, p22_009631_2594_xn_79n084w; (i) 钉状沙丘, ESP_017838_2860_RED; (j) 方格状沙丘, ESP_044851_2580_RED; (k) 梯形格状沙丘, ESP_019035_2605_RED; (l) 鱼鳞状沙丘, ESP_019023_2620_RED; (m) 蜂窝状沙丘, ESP_046085_2585_RED; (n) 星状沙丘, PSP_007650_1300_RED; (o) 障碍物沙丘, ESP_038413_1380_RED. 数据来源: 华盛顿大学PDS地学数据节点

Figure 2 Martian dune types and their typical morphology displayed on satellite image. (a) Sand sheet, ESP_050182_1165_RED. (b) Dome dune, ESP_046504_1385_RED. (c) Barchan, ESP_036571_2575_RED. (d) Barchanoid ridge, ESP_027248_2550_RED. (e) Transverse ridge, P16_007373_1377_XN_42S322W. (f) Linear ridge, ESP_046168_2645_RED. (g) Seif dune, B11_013768_1339_XI_46S323W. (h) Raked linear dune, p22_009631_2594_xn_79n084w. (i) Nail dune, ESP_017838_2860_RED. (j) Square dune network, ESP_044851_2580_RED. (k) Ladder-like dune network, ESP_019035_2605_RED. (l) Scaled dune network, ESP_019023_2620_RED. (m) Honeycomb dune network, ESP_046085_2585_RED. (n) Star dune, PSP_007650_1300_RED. (o) Obstacle dune, ESP_038413_1380_RED. The red arrow represented the possible wind direction. Data sources: Washington University PDS Geosciences Node

图3 火星各沙丘地貌类型概率分布图
Figure 3 A histogram of the probability of different types of the Martian dunes

沙山。火星为何没有形成类似地球上高大沙丘起伏的茫茫沙海？而在理论上，火星沙丘应该更高大，因为火星大气密度与颗粒密度的比值比地球小得多^[15]。

火星沙丘地貌类型的两个突出特征，简单性和规模小可能是一个问题的两个方面，指向沙丘地貌发育的不充分，而到底是什么因素导致火星沙丘地貌发育不充分？发育历史短或其他条件不具备？青藏高原的沙丘地貌类型呈现类似火星沙丘地貌的特征，初步归因于沙源供给不充分和发育时间短^[16]。而这两个方面又是具有关联性，即在沙源供给不充分时，沙丘必然不会经历长的发育时间。青藏高原的现有沙丘大都是近3 ka以来形成的，且由于高原总体上长期处于沉积物输出区，未形成沙丘地貌发育所需要的充分的第四纪松散沉积物堆积。再者，接受第四纪沉积物的干旱盆地，如柴达木盆地，沉积物被盐胶结，不能在风力

作用下形成风沙沉积。实际上，世界干旱区的干盐湖，如中国罗布泊、伊朗的卡维尔盐漠均罕见沙丘地貌发育。火星表面广布的盐壳是否造成沙源供应不足？青藏高原的沙丘地貌研究可能为理解火星沙丘地貌提供重要线索，这绝非偶然，因为青藏高原荒漠的低温和低气压是地球上与火星相似性最高的地区，尽管差异仍然巨大。

3 火星沙丘形态参数

地貌形态的发育具有自组织行为，而沙丘地貌的自组织行为更为典型^[17,18]，表现在沙丘规则的形态及其空间组合特征等方面，即形态参数之间的良好相关性。下文将分析火星沙丘的主要沙丘形态参数及参数间的关系，并与地球进行对比。

3.1 形态学参数的概率分布

为了获取具有代表性和统计意义的沙丘地貌形态参数，选择火星不同区域不同类型的代表性沙丘，测量主要沙丘形态参数如高度、脊线长度、缺损密度和间距(表2, 3)。主要类型沙丘形态参数的概率分布图(图4, 5)表明，各火星沙丘形态参数累计概率图均为简单的一段式，有别于多数地球沙漠的三段式^[11]。Ewing等人^[11]的研究表明，三段式沙丘形态参数累计概率曲线的各段代表3种不同尺度的沙丘，即沙波纹、沙丘和沙山。沙波纹的高度数厘米，波长数厘米至数十厘米，取决于风沙颗粒的运动特征；沙丘高数米至数十米，间距数十米至数百米，是沙丘形态与近地层气流互馈的结果；沙山高数十米至数百米，间距数百米至数千米，受控于大气边界层的厚度^[19,20]。复合沙丘和复杂沙丘由不同尺

表2 火星沙丘形态学参数测量统计表
Table 2 Statistics of morphological parameters of the Martian dunes

统计参数	沙丘脊线长度(m)	间距(m)	高度(m)	缺损密度(个/km)
样本数n	9823	5802	6434	212
平均值	2211	451	33	0.0005
标准差	2542	422	31	0.0003
中位数	1403	376	24	0.0005
最小值	17	4	1	0.00007
最大值	28700	3179	483	0.002
变异系数	1.15	0.93	0.94	0.60
偏度	3.60	1.43	3.36	1.30
峰度	19.44	2.78	26.03	2.18

表 3 火星沙丘分类形态学参数统计表

Table 3 Summary of statistics of the Martian dunes with respect to different dune types

形态学参数	新月形沙丘链	横向沙垄	直线形沙垄	塞夫沙丘	耙状线形沙丘	钉状沙丘	方格状沙丘	梯状沙丘	鱼鳞状沙丘
脊线长度									
样本数 n	5602	89	1587	251	227	2498	42	1637	674
平均值(m)	2186	4211	1023	1818	1158	122	5236	3367	4509
标准差	2332	4864	743	1849	737	1042	5358	3495	4336
中位数(m)	1458	2089	804	1194	916	862	2454	2235	3167
变异系数	1.07	1.16	0.73	1.02	0.64	0.86	1.02	1.04	0.96
间距									
样本数 n	2342	51	1490	95	441		28	959	460
平均值(m)	498	732	240	1069	237		441	481	580
标准差	385	355	132	542	54		82	142	137
中位数(m)	363	628	203	1039	231		446	475	578
变异系数	0.77	0.48	0.55	0.51	0.23		0.19	0.29	0.24
高度									
样本数 n	2509	62	183	79	219	131	132	747	778
平均值(m)	48	36	12	14	28	20	17	4	40
标准差	36	8	4	5	7	3	5	1	31
中位数(m)	40	39	11	13	28	20	16	3	45
变异系数	0.74	0.23	0.36	0.34	0.23	0.15	0.27	0.35	0.78
缺损密度(个/km)	0.0007	0.0003	0.001	0.007	0.0005		0.00019	0.00035	0.00025

度的沙丘叠置而成，其形态参数的累计概率曲线呈现三段式^[21]。火星沙丘形态参数的简单一段式特征与沙丘类型的简单性是一个问题的两个方面，由于火星沙丘地貌类型为简单沙丘，无更大尺度的复合沙丘和复杂沙丘发育，所以形态参数累计概率曲线仅呈现简单沙丘段。

火星沙丘的高度整体上较地球小，平均33 m，最高者483 m，与地球上最高的沙丘，巴丹吉林沙漠的高大沙山高度相当^[21]。但仍以简单沙丘出现，而地球上百米高度以上的沙丘均为复合沙丘或复杂沙丘，如巴丹吉林的复合高大沙山^[21]、纳米布沙漠的复合高大沙山^[22]和塔克拉玛干沙漠的复杂线形沙垄^[23]等。火星上高度超过百米的沙丘仅有几个，其出现是否具有偶然性？对地球上高大沙山形成的传统解释是诉诸下伏地形，而巴丹吉林沙漠的世界最高大沙山被证明不受下伏地形的控制，发育为复合沙山。火星上的个别巨型沙丘受下伏地形控制，不至于发育复合或复杂沙丘，仍呈现为简单沙丘？所以，火星个别巨型沙丘的高度需要进一步

论证，排除伪高度的可能性，其形成的原因需要研究。

沙丘脊线长度的分析仅针对具有明显延伸方向的新月形沙丘链、横向沙垄、线形沙丘、格状沙丘和钉状沙丘。火星沙丘脊线的平均长度约2200 m，最长达29 km，不同类型的沙丘，脊线长度差别大。虽然没有关于整个地球沙丘脊线长度的报道，但可以肯定的是，地球上脊线最长的沙丘是线形沙丘，绵延数千米的简单线形沙丘很常见，如中国柴达木盆地和库姆塔格沙漠的线形沙丘。复杂线形沙丘的脊线长度则更大，如塔克拉玛干沙漠的复杂线形沙丘延伸数十千米。而火星的情况几乎相反，除了钉状沙丘外，线形沙丘的脊线长度是最小的，直线型沙丘、赛夫沙丘和耙状线形沙丘的平均脊线长度分别为1023, 1818和1158 m；而新月形沙丘链的平均脊线长度为2186 m；横向沙垄的平均脊线长度为4211 m。格状沙丘的脊线长度是最长的，方格状沙丘、梯状沙丘和鱼鳞状沙丘的平均脊线长度分别为5236, 3367和4509 m。火星线形沙丘所占比例和长度小又可能是一个问题的两个方面，共同指向火星的

图 4 火星沙丘形态参数平均值累计概率图. (a) 高度; (b) 脊线长度; (c) 间距; (d) 缺损密度

Figure 4 Cumulative probability mean values of morphological parameters of the Martian dunes. (a) Height; (b) ridge length; (c) spacing; (d) defect density

图 5 火星主要沙丘地貌类型的高度(a)、脊线长度(b)和间距(c)的累计概率曲线

Figure 5 Cumulative probability plots of height (a), ridge length (b) and spacing (c) of different types of Martian dunes

环境条件不利于线形沙丘的发育，或大多数火星沙丘形成时间短，其发育过程尚未经历线形沙丘阶段。虽然关于线形沙丘的形成有若干假说，但至少有一部分线

形沙丘由新月形沙丘演变而来^[24,25]，即线形沙丘的形成需要更长的时间。这是否意味着火星沙丘地貌总体上发育时间较短是值得深入思考的问题。

沙丘间距平均约450 m, 最大者3179 m, 比地球上的沙丘间距大, 即比地球上沙漠中的沙丘更稀疏。但地球上复合沙山和复杂沙山的间距亦可达数千米, 如巴丹吉林沙漠高大沙山间距超过4 km。不同类型沙丘的间距有所不同, 赛夫沙丘平均间距最大, 超过1 km, 直线形沙垄和耙状线形沙丘最小, 间距平均约240 m。沙丘缺损密度平均约0.6个/km, 除直线形沙垄和赛夫沙丘缺损密度较高, 平均值分别为1和7外, 其他类型沙丘的缺损密度平均值在同一个数量级, 在0.2~0.7之间。略大于已报道的关于地球沙丘的缺损密度^[18,26], 如库姆塔格沙漠北部线形沙丘的缺损密度平均值为0.14。两个方面的因素可以导致火星沙丘地貌的高缺损密度: 即

发育历史短或发育过程缓慢。沙丘地貌的发育过程是小沙丘联结合并为大沙丘的过程, 其结果是沙丘的高度、脊线长度、间距增大, 缺损密度减小的过程^[27]。以此推论, 火星沙丘地貌不如库姆塔格沙漠的沙丘地貌发育充分。但必须强调的是, 沙丘发育时间与这些形态参数的关系尚不清楚, 而且其对应关系应具有区域差异, 特别在地球和火星之间的差异更大。所以, 缺损密度所蕴含的沙丘地貌学信息需要深入挖掘。

3.2 形态学参数之间的关系

自组织理论认为, 沙丘地貌的各形态参数是协同发展的, 表现为他们之间良好相关性, 这一点已被地

图6 火星沙丘形态学参数之间的关系。(a) 间距与高度; (b) 间距与脊线长度; (c) 间距与缺损密度

Figure 6 Relationship between morphological parameters of the Martian dunes. (a) Spacing and height; (b) spacing and ridge length; (c) spacing and defect density

图7 火星与其他星球沙丘形态参数间关系的对比。(a) 间距与高度; (b) 间距与脊线长度; (c) 间距与缺损密度。地球、土卫六和金星数据引自Lancaster^[29]和Ewing等人^[11,30]

Figure 7 A comparison of the relationship between morphological parameters of dunes on the Mars and other planets. (a) Spacing and height; (b) spacing and ridge length; (c) spacing and defect density. Data of the Earth, Titan and Venus refers to Lancaster^[29] and Ewing et al.^[11,30]

球上的沙丘地貌证实^[28]。火星沙丘的间距(S_p)与高度(H)、脊线长度(L)和缺损密度(D_f)之间的相关关系均可表达为幂函数:

$$y = ax^b, \quad (2)$$

式中 x 为沙丘间距, y 为其他沙丘形态参数, 高度、脊线长度和缺损密度, a 和 b 为回归常数。间距与脊线长度和高度为正相关, 与缺损密度为负相关(图6), 与地球沙丘形态参数之间的关系具有良好的一致性(图7)。由火星沙丘形态参数间的相关性可以获得两方面的启示: 尽管不同星球沙丘地貌的发育条件差异很大, 但沙丘的形成机理是一致的, 所以我们应该获得的有关地球沙丘地貌的理论和研究技术可用于其他星球; 沙丘发育条件的差异导致沙丘形态的差异, 不仅反映在不同星球之间, 而且反映在地球的不同沙漠, 甚至同一沙漠的不同区域, 探索火星沙丘形态与地球沙丘形态的差异

将提供认识火星环境的重要线索。

4 结语

本研究基于高分辨率遥感影像, 在全球尺度上全面分析了火星沙丘形态学特征, 获得两个方面的重要认识: 火星沙丘类型与形态参数均比地球沙丘简单, 沙丘形态参数间的相关关系与地球和其他星球的沙丘具有良好的一致性。沙丘地貌的简单性与青藏高原沙丘地貌具有某种程度的相似性, 而青藏高原沙丘地貌的简单性与沙源供应不充分和形成时间短有关, 这一推论是否适用于火星? 不同星球沙丘地貌的形成机理具有相似性, 但是发育条件具有很大的差异性, 研究火星沙丘地貌形态的特殊性, 进而认识形成过程与条件是火星沙丘地貌研究的重要任务, 只有这样, 火星沙丘地貌学研究方可发挥其在认识火星环境及其形成与演化的重要作用。

参考文献

- Ouyang Z Y, Zou Y L. Introduction to Mars Science (in Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2015 [欧阳自远, 邹永廖. 火星科学概论. 上海: 上海科技出版社, 2015]
- Han T L, Meng X G, Shao Z G, et al. Geology and Geomorphology of Mars (in Chinese). Beijing: Geology Press, 2007. 31–52 [韩同林, 孟宪刚, 邵兆刚, 等. 火星地质与地貌. 北京: 地质出版社, 2007. 31–52]
- Fernandez-Cascales L, Lucas A, Rodriguez S, et al. First quantification of relationship between dune orientation and sediment availability, Olympia Undae, Mars. *Earth Planet Sci Lett*, 2018, 489: 241–250
- Smith I B, Spiga A. Seasonal variability in winds in the north polar region of Mars. *Icarus*, 2018, 308: 188–196
- Hayward R K, Fenton L K, Titus T N. Mars global digital dune database (MGD3): Global dune distribution and wind pattern observations. *Icarus*, 2014, 230: 38–46
- Cardinale M, Silvestro S, Vaz D A, et al. Present-day aeolian activity in Herschel Crater, Mars. *Icarus*, 2016, 265: 139–148
- Geissler P E, Wilgus J T. The morphology of transverse aeolian ridges on Mars. *Aeolian Res*, 2016, 26: 63–71
- 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. *Icarus*, 2014, 230: 151–161
- McEwen A S, Eliason E M, Bergstrom J W, et al. Mars reconnaissance orbiter's high resolution imaging science experiment (HiRISE). *J Geophys Res-Planets*, 2007, 112: E05S02
- Malin M C, Bell J F, Cantor B A, et al. Context camera investigation on board the Mars Reconnaissance Orbiter. *J Geophys Res-Planets*, 2007, 112: E05S04
- Ewing R C, Kocurek G, Lake L W. Pattern analysis of dune-field parameters. *Earth Surf Process Landf*, 2006, 31: 1176–1191
- Bourke M C, Balme M, Beyer R A, et al. A comparison of methods used to estimate the height of sand dunes on Mars. *Geomorphology*, 2006, 81: 440–452
- Werner B T, Kocurek G. Bedform spacing from defect dynamics. *Geology*, 1999, 27: 727–730
- Lancaster N. Linear dunes. *Prog Phys Geogr*, 1982, 6: 476–504
- Claudin P, Andreotti B. A scaling law for aeolian dunes on Mars, Venus, Earth, and for subaqueous ripples. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 252: 30–44
- Dong Z, Hu G, Qian G, et al. High-altitude aeolian research on the Tibetan Plateau. *Rev Geophys*, 2017, 55: 864–901
- Hallet B. Spatial self-organization in geomorphology: From periodic bedforms and patterned ground to scale-invariant topography. *Earth-Sci Rev*, 1990, 29: 57–75
- Anderson R S. Eolian ripples as examples of self-organization in geomorphological systems. *Earth-Sci Rev*, 1990, 29: 77–96
- Wilson I G. Universal discontinuities in bedforms produced by the wind. *J Sediment Res*, 1972, 42: 667–669
- Andreotti B, Fourrière A, Ould-Kaddour F, et al. Giant aeolian dune size determined by the average depth of the atmospheric boundary layer.

- [Nature](#), 2009, 457: 1120–1123
- 21 Dong Z, Qian G, Luo W, et al. Geomorphological hierarchies for complex mega-dunes and their implications for mega-dune evolution in the Badain Jaran Desert. [Geomorphology](#), 2009, 106: 180–185
- 22 Lancaster N. The Namib Sand Sea: Dune Forms, Processes, and Sediments. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1989
- 23 Zhu Z D, Chen Z P, Wu Z, et al. Study on Aeolian Geomorphology in Taklimakan Desert (in Chinese). Beijing: Science Press, 1981. 27–55 [朱震达, 陈治平, 吴正, 等. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究. 北京: 科学出版社, 1981. 27–55]
- 24 Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. New York: Springer Netherlands, 1941. 222–225
- 25 Tsoar H. Linear dunes-forms and formation. [Prog Phys Geogr](#), 1989, 13: 507–528
- 26 Dong Z B, Su Z Z, Qian G Q, et al. Study on Aeolian Geomorphology in Kumtag Desert (in Chinese). Beijing: Science Press, 2011. 339–369 [董治宝, 苏志珠, 钱广强, 等. 库姆塔格沙漠风沙地貌. 北京: 科学出版社, 2011. 339–369]
- 27 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. [Earth Surf Process Landf](#), 2010, 35: 51–63
- 28 Lancaster N. Sand seas and dune fields. In: Shroder J F, ed. Treatise on Geomorphology. San Diego: Academic Press, 2013. 219–245
- 29 Lancaster N. Linear dunes on Titan. [Science](#), 2006, 312: 702–703
- 30 Ewing R C, Hayes A G, Lucas A. Sand dune patterns on Titan controlled by long-term climate cycles. [Nat Geosci](#), 2014, 8: 15–19

Summary for “火星沙丘地貌的形态学窥究”

A morphological insight into the Martian dune geomorphology

Chao Li, Zhibao Dong^{*}, Ping Lü, Jie Zhao, Shuyi Fu, Miaoyan Feng & Chunming Zhu

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

^{*} Corresponding author, E-mail: zbdong@snnu.edu.cn

Aeolian process is the most active and extensive contemporary geomorphological process on the Mars, bearing rich information on surface processes, environment and evolution history. High-resolution remote sensing images covering the whole planet are interpreted and processed by GIS software to analyze the morphological characteristics of the Martian dunes on global basis, and discuss their aeolian geomorphological implications. A tentative dune classification scheme is proposed for the Mars. Dunes types on the Mars mainly include sand sheet, dome dune, barchan, barchanoid ridge, transverse ridge, linear ridges, seif dune, raked linear dune, nail dune, square dune network, ladder-like dune network, scaled dune network, honeycomb dune network, star dune, and obstacle dune. It is suggested that the Mars shares similar dune types with the Earth to a large extent, but is dominated by simple dune types. Complex and compound dunes are rarely seen on the Mars so that the cumulative probability curves of dune morphological parameters are characterized by a single section. Barchans, barchanoid ridges and transverse ridges are the most popular, but linear dunes that account for about 50% on the Earth only have 10% on the Mars. The simplicity of dune geomorphology on the Mars is also manifested by the small patches of the dune fields the Martian dune-fields. The Martian dunes are generally smaller on the Mars, in contradiction with theoretical inferences that the scale of dunes increases the ratio of particle/air density. The morphological parameters of the Martian dunes are well correlated, similar to the Earth dunes, but the relationship is different, implying the similar formation mechanism but different development conditions. It is also suggested that the Martian analogues of terrestrial aeolian landforms, such as those found on the Tibetan Plateau, are good examples to study the Martian aeolian geomorphology. The simplicity of dune geomorphology on the Mars probably suggests that dunes on the Mars are developed with insufficient sediment availability and short development history. Inactive recent exogenic processes are probably responsible for insufficient sediment availability on the Mars. Insufficient sediment availability would be an interesting topic for future research, which may have extensive earth science significances.

Martian landform, aeolian geomorphology, dune morphology, dune morphological parameter

doi: [10.1360/TB-2019-0168](https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2019-0168)