

火星雅丹地貌研究进展

王江^{1,2)}, 肖龙¹⁾, 黄俊¹⁾, 赵健楠^{1,3)}

1) 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 行星科学研究所, 湖北武汉, 430074;

2) 中国地质大学(武汉)流域关键带演化湖北省重点实验室, 湖北武汉, 430074;

3) 中国地质大学(武汉)地质探测与评估教育部重点实验室, 湖北武汉, 430074

内容提要:雅丹地貌是一种典型的风蚀地貌。多源遥感探测和就位探测均表明火星表面分布着大量的雅丹地貌,其形态特征和物质组成记录了火星气候环境变化的信息,是当前火星探测和研究的热点之一。本文对火星雅丹地貌的探测历史、分布、类型、几何特征、物质组成、年代学、发育过程及对古气候指示意义等方面的研究进展进行了总结,在此基础上,提出了当前火星雅丹地貌研究存在的主要问题,建议在未来研究中重点加强雅丹地貌定量化和比较行星学研究,并结合其物质组成、年代学等方面工作,探讨其发育过程与气候环境协同演化的机制,为深入认识火星雅丹地貌发育过程,了解火星古气候环境变化提供支持。

关键词:火星雅丹;古气候环境;梅杜莎沟槽组;盖尔撞击坑

火星是地球的邻星,也是太阳系内与地球最为相似的行星。当前火星气候干冷,表面拥有稀薄的大气(CO₂含量~95.3%),但气压不足地球表面的百分之一(Carr, 2007)。在火星地质演化历史中,风扮演着极其重要的角色,是刻画火星表面形态的重要外应力之一,至今仍在火星表面活跃,塑造了沙丘(海)、风成条纹、雅丹地貌、风蚀坑、风棱石等诸多地貌(Ward et al., 1985; Greeley et al., 1999)。其中,活动沙丘、风成条纹等相对短周期地貌反映了火星表面当前的风况条件,而雅丹这类侵蚀地貌,历经了更长时间的活动周期(Sefton-Nash et al., 2013),其形成过程中不断剥蚀出新鲜地层,是研究火星表面地层单元特征的天然窗口,其形貌特征和物质组成也记录了更多火星古气候环境变化的信息(Ward, 1979),为研究火星风沙活动历史和认识古气候演变提供了重要样本,是近年来火星科学研究的热点之一(Ward et al., 1985; Greeley, 1994, 2001; Bridges et al., 2004, 2007, 2010; Kerber et al., 2010, 2012; Day et al., 2016, 2019; Desai et al., 2016; Li Jiyan et al., 2016; Anglés et al.,

2017; Kerber et al., 2017; Xiao Long et al., 2017; Wang Jiang et al., 2018, 2019, 2020; Li Lulu et al., 2018; Zhao Jie et al., 2019; Zimbelman, 2019; Dong Zhibao et al., 2019, 2020; Ding Zhaojing et al., 2020; Xiao Long, 2020; Liu Jia et al., 2020, 2021)。本文将从雅丹地貌的定义、分布、类型、几何特征、年代学等八个方面总结当前火星雅丹地貌的研究进展,在此基础上探讨火星雅丹地貌研究过程中存在的问题,并提出相关建议。

1 火星雅丹地貌研究历史

火星表面的雅丹地貌研究开始较晚,其研究基础建立在地球表面雅丹地貌。地球上关于雅丹地貌的描述最早可追溯至东汉《汉书·地理志》,彼时称之为龙城、龙堆或白龙堆(Niu Qinghe et al., 2011)。19世纪末至20世纪初,雅丹地貌受到探险家和地质地理学者的关注(Stapff, 1887; Walther, 1891)，“雅丹(Yardang)”作为专业名词开始使用,该词源于维吾尔语,由瑞典探险家Hedin(1903)在塔克拉玛干沙漠地区考察时提出,用于描述发育在

注:本文为民用航天技术预先研究项目(编号 D020101)、国家自然科学基金项目(编号 41830214, 42002305)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号 CUGL200801, CUG2106122)和中国地质大学(武汉)教学研究项目(编号 2020A04)联合资助的成果。

收稿日期:2021-06-23;改回日期:2021-07-17;网络发表日期:2021-08-11;责任编辑:蔡志慧。

作者简介:王江,男,1988年生。博士,讲师,主要从事行星地质与比较行星学研究。E-mail:j. wang@cug.edu.cn。

引用本文:王江,肖龙,黄俊,赵健楠. 2021. 火星雅丹地貌研究进展. 地质学报, 95(9): 2742~2754. doi: 10. 19762/j. cnki. dizhixuebao. 2021286.

Wang Jiang, Xiao Long, Huang Jun, Zhao Jiannan. 2021. Advances in Martian yardangs. Acta Geologica Sinica, 95(9): 2742~2754.

第四纪河湖相沉积物表面的垄状地貌,该词随着其著作《Central Asia and Tibet》广泛传播,逐渐被广大地球科学工作者接受认可。

火星雅丹地貌的研究始于 20 世纪 70 年代,源于一系列火星探测任务成功的实施。McCauley (1977) 利用 Mariner 9 的低分辨率视频数据,在火星表面发现了大量流线型地貌,其形态同地球沙漠中的覆舟状地貌相似(长度从几米到几千米不等)。随后 Ward (1979) 基于 Viking 较高分辨率数据,对比地表雅丹地貌,将这些流线型地貌正式解译为雅丹地貌,并绘制了火星全球分布图(Ward et al., 1985)。20 世纪 90 年代末至今,人类掀起了新一波火星探测热潮,获得了更多高分辨率遥感和原位探测数据,促进了学者们开展了更多关于火星雅丹地貌细节的研究。

2 当前火星雅丹地貌研究进展

2.1 雅丹地貌的界定

火星上雅丹地貌的定义直接借鉴于地球表面雅丹的研究。在地球上,雅丹地貌最初指发育在第四纪河湖相沉积物表面的垄状地貌(Hedin, 1903),随着多种类型雅丹地貌的发现和研究的深入,诸多学者对其进行了重新定义,主要观点总结为以下四种:

(1) 风蚀长垄和垄间沟槽的组合地貌,发育基础物质多样性。不仅发育在第四纪河湖相松软沉积物上,在古近纪到新近纪湖相沉积和一些更新世沙丘等胶结沉积物上也有发育(Blackwelder, 1934)。

(2) 不仅包括长宽比为 4 : 1 的经典流线型,也包括长宽比达 10 : 1 的长垄状。发育基础物质进一步扩展,不仅包括中等固结的第四系粉砂和黏土沉积物、白垩土、硅藻土,在坚硬的砂岩、灰岩和火成岩地区也有分布(Mainguet, 1968; McCauley et al., 1977; Cooke et al., 1993)。

(3) 分布于世界绝大多数沙漠地区,发育在软硬和时代不同岩性地层上的流线型地貌(Ward, 1979; Ward et al., 1984; Whitney, 1985; Goudie, 1989; Brookes, 2001)。

(4) 泛指任何在风力侵蚀作用下形成的脊状地貌,不论是否具有流线形态(Halimov et al., 1989; Laity, 2011; Kerber et al., 2016; Li Jiyan et al., 2016; Xiao Long et al., 2017; Wang Jiang et al., 2018, 2020; Xiao Long, 2020)。

本文主要研究对象为火星表面雅丹地貌,其发育环境与地球相似但又有其独特性,在对雅丹地貌

进行界定时,需要综合考虑其形成过程与演化阶段,这两方面与雅丹地貌定义密不可分。因而,本文对火星雅丹地貌的界定采用当前学者们的主流观点:泛指任何在风力侵蚀作用下形成的脊状地貌,通常以流线形态为主。

2.2 雅丹地貌的分布

目前,针对火星全球雅丹地貌分布特征开展的工作相对薄弱(表 1)。McCauley(1973)最早报道了火星上的流线型地貌,Ward et al. (1979, 1985) 基于此对火星全球流线型(雅丹)地貌进行识别,并绘制了分布示意图。限于数据分辨率,仅有规模较大的流线型(雅丹)地貌被识别,部分流线型地貌在随后的研究中被认为是线性构造或古河道的河心洲。Li Lulu et al. (2018)对火星中低纬度雅丹地貌进行了识别,主要集中在梅杜莎沟槽组(Medusae Fossae Formation, MFF)地质单元和水手峡谷(Valles Marineris)两块区域,并划分了区域内雅丹地貌分布范围。Liu Jia et al. (2020)对火星南北纬 30° 范围内雅丹进行了识别,结果表明雅丹主要集中在 10°S~20°N, 120°E~120°W 和 60°W~90°W 之间,这与前人研究结果较为一致,另外在泰瑞纳(Tyrrhena)高地、阿拉伯(Arabia)高地与示巴(Sabaea)高地之交的一些撞击坑中也发现了雅丹。

随着高分辨率数据覆盖率的增加,促进了局部区域雅丹地貌的研究,主要包括 MFF 地质单元(Mandt et al., 2008, 2009; Zimbelman et al., 2010)、尼尔科森(Nicholson)撞击坑(Desai et al., 2016)、杰泽罗(Jezero)撞击坑(Day et al., 2019; Williams et al., 2020)等,丰富了局部地区雅丹地貌分布特征的研究。也有学者针对局部区域范围内不同类型雅丹分布特征开展研究,如 Le Deit et al. (2011, 2013)对盖尔(Gale)撞击坑夏普山(Sharp Mons)上层单元、Wang Jiang(2018)对 MFF 西部 Aeolis-Zephyria 高地(AZP)区域雅丹的研究,进一步细化了不同类型雅丹在区域内的分布关系,为讨论雅丹地貌形成过程提供了支撑。

综合前人研究,当前火星上的雅丹地貌主要集中在低纬度区域(图 1),特别是赤道地区的梅杜莎沟槽组(Medusae Fossae Formation, MFF)地质单元中,其他重要分布区为奥林帕斯山(Olympus Mons)周边,艾奥利斯(Aeolis)区域,萨克拉(Sacra)沟槽,阿瑞斯(Ares)峡谷,雅皮吉亚(Iapygia)区域,以及在撞击坑古湖泊(如 Gale 撞击坑、Nicholson 撞击坑、Jezero 撞击坑)等地区零星分布(McCauley et

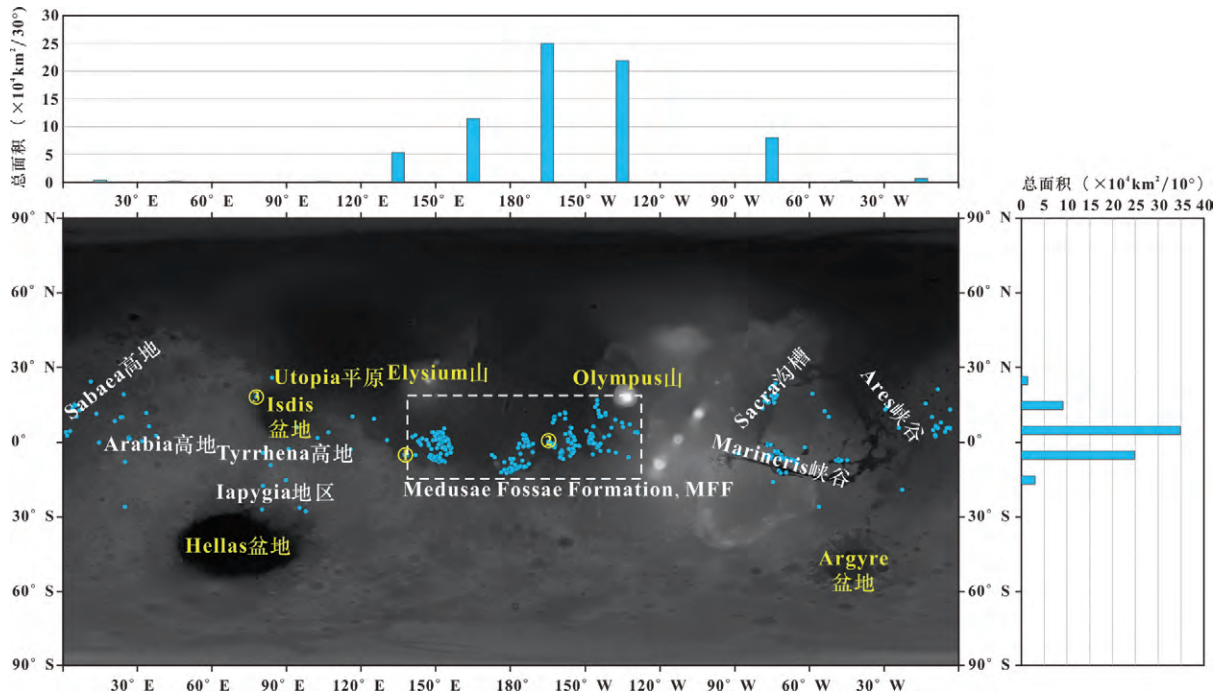


图1 火星表面低纬度雅丹地貌分布(改编自 Liu Jia et al., 2020)

Fig. 1 Distribution of Martian Yardangs in low latitude (modified from Liu Jia et al., 2020)

- ①—Gale 撞击坑; ②—Nicholson 撞击坑; ③—Jezero 撞击坑
- ①—Galecrater; ②—Nicholsoncrater; ③—Jezerocrater

al., 1977; Ward, 1979; Ward et al., 1985; Carr, 2007; Bridges et al., 2010; Le Deit et al., 2011; Kerber et al., 2012; Kite et al., 2013; Day et al., 2016; Desai et al., 2016)。

2.3 雅丹地貌的类型

雅丹地貌分类的目的是将不同形态、规模、年代、发育阶段和成因的雅丹按照一定的规则进行归类,明确各种雅丹在整个分类系统中的位置和相互间的联系(Niu Qinghe et al., 2011)。定性描述火星雅丹地貌形态描述中仍占有重要地位,前人对火星上雅丹的形态描述大多借鉴于地球,通常将其表述为覆舟状、流线型、长垄状、泪滴状、长条状、曲线状、对称状、多面状、双向型等(Ward, 1979; Bradley et al., 2002; Mandt et al., 2009, 2008; Harrison et al., 2010; Kerber et al., 2012; Sefton-Nash et al., 2013; Xiao Long et al., 2017; Xiao Long, 2020; Wang Jiang et al., 2018, 2020)。由于学者对于雅丹地貌定义的认识差异,以及雅丹地貌在野外的复杂多变,目前还没有统一的形态分类方法。表2总结了前人对于火星雅丹形态的分类研究,分类原则从单一特征到综合考虑。

在雅丹地貌分类研究中也遇到一些问题,如对

同一类型雅丹不同学者多样性的描述,或者不同类型雅丹不同学者相似性的描述。此外,雅丹地貌的形态多变,在区域上存在不同类型混杂分布现象,单纯的大小、表面特征、形态特征等指标无法照顾到多种类型分类需求,因而引入地貌的形态组合和发育阶段指标,很好地解决了这个困难,该方法是基于火星与柴达木盆地雅丹地貌的对比研究(Halimov et al., 1989; Li Jiyan et al., 2016; Wang Jiang et al., 2018)。

2.4 雅丹地貌几何特征

定性描述可以形象直观地展现雅丹地貌的形态,但也存在一定缺陷,造成其形态以外的诸多特征被忽略,引入定量描述,可以一定程度上进行弥补,为了更加明确地表达出形态特征以外的信息,需要利用几何特征参数来表征其形态。雅丹地貌的几何特征参数主要包括长度、宽度、高度、坡度、底面积、体积、长轴走向和雅丹体之间的间距等。

通过流体力学和空气动力学理论计算(Fox et al., 1973)、野外观测统计和风洞实验(Ward et al., 1984)等研究,学者们认为地球表面典型流线型雅丹的理想长宽比为4:1(宽度:长度约为0.27)(图3)。理想长宽比的雅丹在野外可能经历了更加漫长

表 1 火星雅丹地貌发现地点

Table 1 Summary of the Martian yardang locations

研究区域	分布范围及特征	主要数据	文献来源
全球	识别了规模较大的流线型(雅丹)地貌,绘制了分布点位	Mariner 9 Viking	McCauley, 1973; Ward, 1979; Ward et al., 1985
MFF 单元	识别了 4 种雅丹地貌分布点位	MOC NA CTX HiRISE	Mandt et al., 2008, 2009; Zimbelman et al., 2010; Kerber et al., 2012
Gale 撞击坑	识别了 3 种类型雅丹地貌,分布在夏普山的中上单元,划分了分布范围	CTX HiRISE	Le Deit et al., 2011, 2013
Nicholson 撞击坑	识别了 3 种类型雅丹地貌	CTX HiRISE	Desai et al., 2016
MFF 单元西部 AZP 地区	识别了 10 种类型雅丹地貌,总面积约 $\sim 3.67 \times 10^5 \text{ km}^2$, 主要分布在 Aeolis 高地、Zephyria 高地及 AZP 中央盆地内部,划分了分布范围	CTX HiRISE HRSC	Wang Jiang et al., 2018, 2020 Wang Jiang, 2018
低纬度	识别了 7 种类型雅丹地貌,主要分布在 MFF 地质单元、水手峡谷,划分了雅丹分布区	CTX HiRISE	Li lulu, 2018
Jezero 撞击坑	识别了雅丹地貌分布点位	CTX HiRISE	Day et al., 2019; Williams et al., 2020
南北纬 30°	识别了 3 种类型雅丹,绘制了 394 个雅丹分布区,分布高程为 $-29 \sim -4607 \text{ m}$, 77.97% 为长垄状雅丹。雅丹区集中分布在 $10^\circ \text{S} \sim 20^\circ \text{N}$ 之间, $120^\circ \text{E} \sim 120^\circ \text{W}$ 和 $60^\circ \text{W} \sim 90^\circ \text{W}$ 之间,总面积 734115 km^2 , 其中 86.51% 为 MFF 雅丹	CTX	Liu Jia et al., 2020

注: MOC NA(火星轨道相机窄角相机): Mars Orbiter Camera, Narrow-angle Camera (Malin et al., 2001); CTX(火星背景相机): Context Camera (Malin et al., 2007); HiRISE: High Resolution Imaging Science Experiment(火星高分辨率成像科学仪器)(McEwen et al., 2007); HRSC(高分辨率立体相机): High Resolution Stereo Camera (Gwinner et al., 2016)。

表 2 火星雅丹地貌分类方法

Table 2 Classification of the Martian yardangs

分类原则	类别	地点
大小 ^{①②③}	小雅丹(small yardang) 大雅丹(coarse yardang) 巨型雅丹(mega yardang)	Gale 撞击坑 MFF 单元
表面结构与形态特征 ^{④⑤⑥⑦⑧}	光滑线性(smooth linear yardang) 线性-曲线状(linear to curvilinear yardang) 粗糙结构型(rough textured yardang) 粗糙型(rough) 平坦型(smooth) 多面状(faceted) 双向型(bidirectional) 流线型:包括鲸背状(泪珠状)和椭圆状 穹顶状 弯曲状 V 型 长垄状 犬牙状 覆舟状	Nicholson 撞击坑 MFF 单元 低纬度地区
形态组合与发育阶段 ^{⑨⑩⑪}	方山组合(M 组合):不规则方山状(M-I)、长条状(M-R) 长垄组合(L 组合):顶面宽阔型(L-B)、顶面窄小型(L-N)、顶面粗糙型(L-R) 鲸背组合(W 组合):鲸背状(W-B)、拱背状(W-H)、低矮流线型(W-L) 锯齿组合(S 组合):锯齿状(S-T)、残丘状(S-R)、金字塔状(S-P)	MFF 单元西部 AZP 地区

注:① Le Deit et al., 2011; ② Le Deit et al., 2013; ③ Mandt et al., 2008; ④ Desai et al., 2016; ⑤ Mandt et al., 2009; ⑥ Kerber et al., 2012; ⑦ Li Lulu, 2018; ⑧ Liu Jia et al., 2020; ⑨ Wang Jiang et al., 2018; ⑩ Wang Jiang, 2018; ⑪ Wang Jiang et al., 2020。

时间的演化,而雅丹实际长宽比值变化范围比较大。Pelletier(2018)利用有界的三维瑞流射流模型将雅丹的长宽比约束在 5 : 1 至 10 : 1 之间。根据具有较大长宽比值的长垄状雅丹主要受到表面摩擦阻力侵蚀,

而长宽比值较小的雅丹主要受到压差阻力侵蚀。

诸多学者对火星表面雅丹地貌几何学特征开展了量化研究(表 3),主要集中在长度、宽度、长宽比、间距及展布方向几方面,高度和坡度仅开展了少

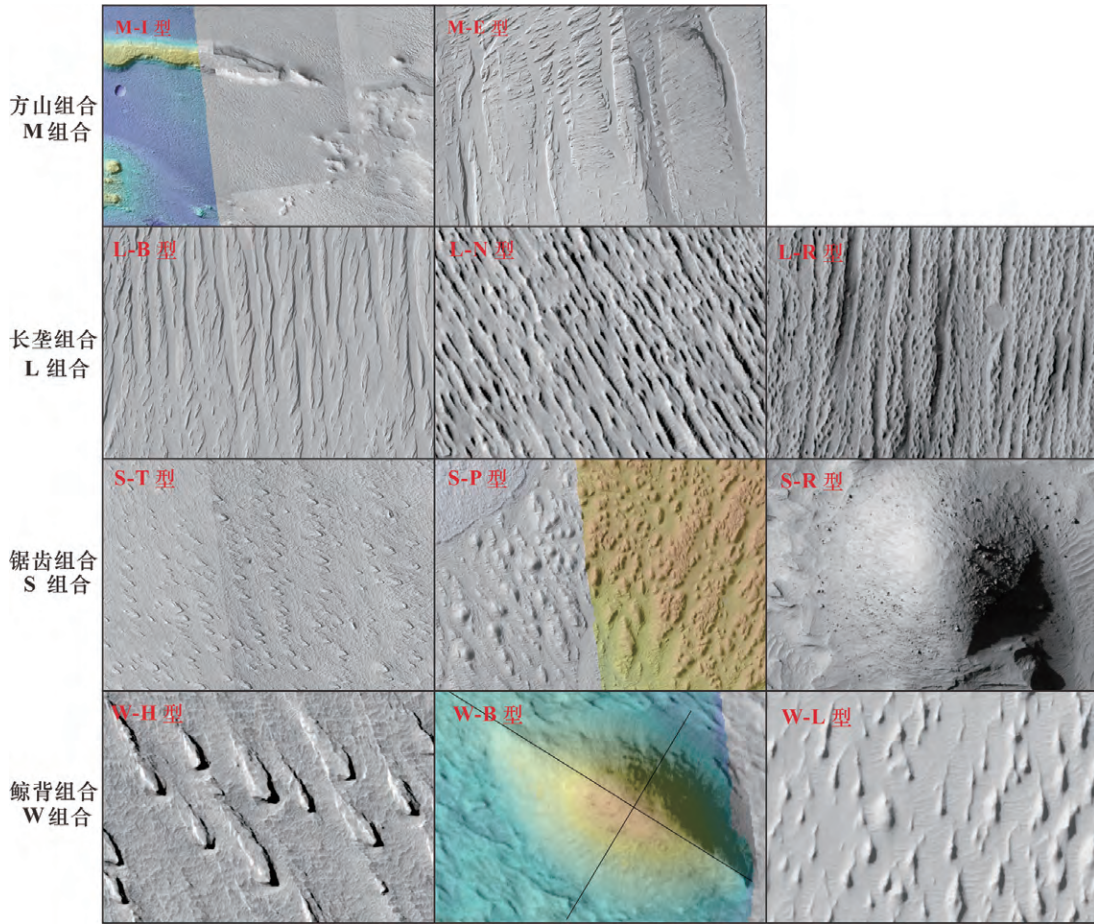


图 2 火星 MFF 地区代表性雅丹地貌类型(据 Wang Jiang, 2018)
Fig 2 Typical Yardang types in MFF region(after Wang Jiang, 2018)

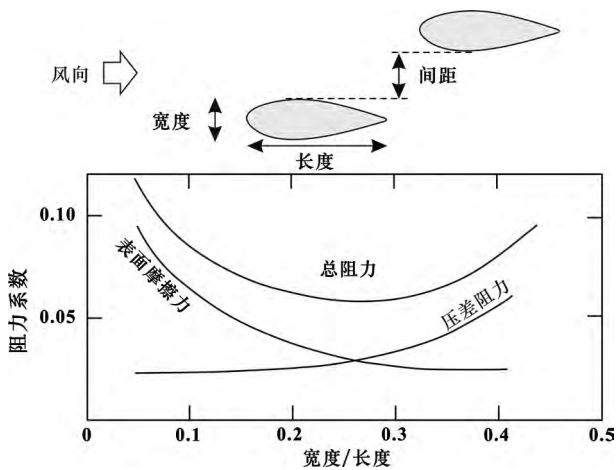


图 3 雅丹形态的阻力系数-宽度/长度函数
(改编自 Ward et al., 1984)

Fig 3 The coefficient of drag on yardang form as a function of the width/length ratio (modified from Ward et al., 1984)

量研究,这主要受限于地形数据,小规模雅丹研究明显少于较大规模雅丹,这主要受限于高分辨率数据的覆盖。其中,长宽比与雅丹的形成机制有关系,也

是衡量其发育阶段的重要参数(Niu Qinghe et al., 2011)。

火星雅丹地貌平均长度小于 5 km,最长可达 70 km 以上,这种规模极少;宽度从数米到数百米,最宽可达 5 km,平均宽度以百米级别为主。长宽比变化范围较大,最高约 70 : 1,鲸背状等流线型态较好的雅丹长宽比变化范围为 3 : 1~5 : 1(Li Lulu, 2018; Wang Jiang, 2018),接近理想状态下雅丹地貌的长宽比,长垄状雅丹的长宽比则多大于 5 : 1 (Wang Jiang et al., 2018, 2020)。雅丹之间的间距与雅丹的发育阶段也具有一定的相关性,火星雅丹间距从数十米至数百米宽,最宽约 2.6 km,大部分集中在 300 m 以下,并且鲸背组合雅丹间距变异系数高于长垄组合,代表了更晚期的演化阶段(Wang Jiang, 2018)。Mandt et al. (2008) 利用 MOLA 数据测得火星巨型雅丹的高度高达 700 m,且大多数在 100 m 以上,而 Wang Jiang(2018)利用高精度 CTX DTM 和 HiRISE DTM 数据获得 MFF 西部雅丹的高度最高可达 300 多米,大部分在 100

m 以下。相比地球而言,无论从长度、宽度还是高度上,火星雅丹整体规模也要大得多,但变化范围也相对较大,即变异系数偏高,也一定程度上说明了火星表面不同区域雅丹演化的差异性明显。火星表面雅丹的整体取向以 N-S 和 NE-SW 向为主,少量为 NW-SE 向,局部存在近 E-W 向雅丹。Wang Jiang et al. (2018)在 Zephyria 高地发现一些分布在

不同层位上的古雅丹,方向存在显著的变化,具体原因还未知。

2.5 雅丹地貌的物质组成

地表雅丹地貌发育的基础物质较为广泛,在软硬和时代不同的岩石和沉积物上均有发育,包括灰岩、大理岩、凝灰岩、砂岩、变质岩等,但以第四纪河湖相沉积物居多(Niu Qinghe et al., 2011)。火星

表 3 火星雅丹地貌几何参数汇总

Table 3 Summary of geometrical parameters of Martian yardangs

研究区域	类型	长度、宽度	长宽比	间距、高度、坡度、走向等	
全球 ^{①②}	-	长度:最长 50 km	2 : 1 ~ >10 : 1 最大 50 : 1	间距:最宽 1 km,最深 200 m; 高度:数十米	
MFF 地区 ^③	双向型	长度:30~40 m 宽度:10~15 m	-	-	
	曲线状	-	5 : 1 ~ 20 : 1	-	
	流线型	-	3 : 1 ~ 50 : 1	-	
	巨型雅丹	长度:数十千米 宽度:1~5 km	变化大 最大>50 : 1	高度:5~700 m,大部分>100 m; 坡度:75°~80°	
Gale 撞击坑 ^④	大雅丹	宽度:数百米	>2 : 1	走向:近 N-S 向	
Nicholson 撞击坑 ^⑤	光滑线性	长度:2~17 km	-	走向:SSW-NNE 和 S-N 向	
	线性-曲线状	长度:1.4~15 km	-	走向:NE-SW 向为主,局部转为 NW-SE 向	
	粗糙结构型	-	-	走向:NNW-SSE 和 N-S 向	
MFF 西部 AZP 地区 ^{⑥⑦⑧}	方山组合	长度:88~1406 m, 平均 472.2 m; 宽度:69.8~254.2 m, 平均 147.6 m	1 : 1 ~ 10.8 : 1 平均 3.0 : 1	高度:61.9~366.9 m, 平均 180.1 m	走向:Aeolis 高地和 AZP 中央盆地:NW-SE;靠近南部高地:S-N;Zephyria 高地:主要取向为近 S-N,近 W-E 向,NE-SW 向和 SE-NW 向。
	长垄组合	长度:69.9 m~73.8 km, 平均 3243.9 m; 宽度:23~1826.4 m, 平均 184.4 m	1.8 : 1 ~ 69.1 : 1 平均 14.0 : 1	间距:18 m~1.62 km, 平均 215.8 m; 高度:3.3~198.9 m, 平均 43.6 m	
	鲸背组合	长度:28.2~2547 m, 平均 299.6 m; 宽度:9.9~991.7 m, 平均 110.1 m	1.2 : 1 ~ 8.1 : 1 平均 2.9 : 1	间距:5.4~2660 m, 平均 191.4 m; 高度:9.6~293.7 m, 平均 52 m	
	锯齿组合	-	-	高度:32~167.7 m, 平均 83.3 m	
Elysium 地区 ^⑨	流线型	长度:50~230 m, 平均 69 m; 宽度:20~70 m, 平均 34 m	2.2 : 1 ~ 6.92 : 1 平均 3.79 : 1	间距:宽 90 m 走向:NW-SE	
低纬度 ^⑩	流线型	长度:47~921 m 宽度:23~385 m	1 : 1 ~ 7 : 1	走向:Aeolis-Zephyria 高地:NNW-SSE, N-S; Lucus 高地:NNE-SSW, NE-SW; Apollinaris Patera NE-SW。	
	穹顶状	长度:62~1668 m 宽度:40~1139 m	1 : 1 ~ 3 : 1	走向:Aeolis 高地:NW-SE, NNW-SEE; Lucus 高地:NNE-SSW, N-S, NE-SW。	
	长垄状	长度:78 m~44.75 km; 宽度:21~2118 m	1 : 1 ~ 61 : 1	走向:Aeolis 高地:NW-SE 向; Zephyria 高地:N-S, NNW-SSE, NNE-SSW 向; Lucus 高地:N-S, NNE-SSW 向; 水手峡谷:NW-SE, NNW-SSE; Chrysis 台地:NNE-SSW, SW-NE 向。	
南北纬 30° ^⑪	长垄状	长度:917 m~46.93 km, 平均 5626 m; 宽度:500~4874 m, 平均 993 m	1.2 : 1 ~ 46.9 : 1 1.2 : 1 ~ 10 : 1 占比最大	走向:N-S 向为主, NE-SW 向次之	

注:① Ward, 1979; ② Ward et al., 1985; ③ Mandt et al., 2008; ④ Le Deit et al., 2013; ⑤ Desai et al., 2016; ⑥ Wang Jiang, 2018; ⑦ Wang Jiang et al., 2018; ⑧ Wang Jiang et al., 2020; ⑨ Li Lulu et al., 2018; ⑩ Li Lulu, 2018; ⑪ Liu Jia et al., 2020; “-”表示作者未提供数据。

上的雅丹地貌发育基础物质相对较少,这主要与火星大气环境和岩石类型相关,主要发育在 MFF 物质(Ward et al., 1985; Pascuzzo, 2015)、湖相沉积物(Williams et al., 1994)、河流或三角洲沉积物(Wang Jiang et al., 2018; Day et al., 2019; Williams et al., 2020)以及碎屑沉积物中,这些碎屑沉积物可能来自火山作用(Ward, 1979)、崩塌(Murchie et al., 2009; Okubo et al., 2016)、空降或风成沙(Milliken et al., 2010; Le Deit et al., 2013),整体上以易碎的、易被侵蚀的物质为主,部分可能被盐类或者黏土矿物胶结,形成抗侵蚀层(Le Deit et al., 2013)。

MFF 物质是火星雅丹最重要的发育基础,它是火星赤道区域的一块年轻地体,主要由一些浅色调的、细粒的、易碎的物质组成(Tanaka, 2000; Weitz et al., 2010; Morgan et al., 2015),矿物组成和成因尚不明确。前人研究提出诸多猜想,主要观点包括:火山沉积物(如:火山碎屑流、火山灰沉降、凝灰岩)(Scott et al., 1982; Mouginis-Mark, 1993; Tanaka, 2000; Bradley et al., 2002; Hynek et al., 2003; Mandt et al., 2008)、风成沉积物(Greeley et al., 1987)、古极区沉积物(Schultz et al., 1988; Head, 2001)、湖相沉积(Malin et al., 2000)等,大部分猜想被随后的工作提出质疑。雷达数据(Watters et al., 2007; Carter et al., 2009)反演出的介电特性表明 MFF 的物质组成为干燥低密度的沉积物(例如火山灰)或者富冰的颗粒沉积物(Head, 2001; Kerber et al., 2008; Keszthelyi et al., 2008),虽然雷达数据上与富冰的颗粒沉积物特性一致,但没有直接证据表明 MFF 物质中含有冰或曾经含有冰。Mandt et al. (2009)对比研究了 MFF 区域和安第斯山中部凝灰岩中发育的雅丹,认为他们具有相似的特征。Kerber et al. (2012)数值模拟认为 MFF 的形成极有可能是火山碎屑物扩散的结果。综合前人研究结果,当前主流观点认为 MFF 物质组成为孔隙度较高的火山灰等火山碎屑沉积物。

2.6 雅丹地貌的年代学

雅丹地貌为典型的侵蚀地貌,其形成与演化过程是一个不断被侵蚀的过程,其顶部原始地层并不能代表其开始遭受侵蚀的层位,因而,利用顶部层位年龄确定其开始形成年龄并不十分准确,仅能作为年代学约束上限。火星表面常用年代学研究方法分为相对年代和绝对年代。相对年代只能通

过地层间的叠覆、切割关系和区域间地层对比来确定。而绝对年龄则通过撞击坑直径-频率分布定年方法(简称撞击坑定年法,CSFD)(Michael et al., 2010)获得,同地表雅丹研究类似,我们也无法获得其准确的开始年代,仅能对雅丹形成年代上下限进行约束。

目前,火星表面雅丹地貌年代学研究进展相对较少,前人仅对 MFF 区域雅丹形成的年代进行了约束。Scott et al. (1982)利用 CSFD 统计了每个单元上直径 $d > 1$ km 的撞击坑,估算年龄主要集中在中亚马逊世,少数在晚亚马逊世,只有一个在早亚马逊世;对直径 $d > 2$ km 撞击坑统计结果为中晚亚马逊世。随后 Werner (2006)对古瑟夫撞击坑(Gusev crater)和西南亚马逊方山(Amazonis mensae)附近 MFF 撞击坑统计获得了 1.6 Ga 的年龄(早中亚马逊世(Hartmann et al., 2001))。Kerber et al. (2010)根据熔岩流跟 MFF 地体的接触关系,认为 MFF 形成年龄应该早于前人认为的亚马逊世,在西方世就已经形成,MFF 雅丹在西方世熔岩流侵位时就已经形成,部分已经被侵蚀殆尽或者被亚马逊世熔岩流掩埋。Zimbelman et al. (2012)利用撞击坑退化保留年龄法(Werner et al., 2011)估算了 MFF 上单元(Aml2)年龄为早亚马逊世,而下单元(AHml1)年龄则于亚马逊-西方世之交,中单元(Hmm)撞击坑退化保留年龄则为西方世(3.69 Ga)(图4)。Wang Jiang (2018)通过撞击坑溅射毯与 MFF 物质的叠覆关系,利用 CSFD 约束了 MFF 西部 AZP 地区 MFF 物质最早开始于 3.48 Ga,将 MFF 雅丹活动时间上限约束在西方世,并将 AZP 中央盆地鲸背组雅丹开始形成年龄下限限定在 520 ± 50 Ma,认为在 630~490 Ma 之间 AZP 区域的风蚀速率出现明显的下降。Liu Jia et al. (2021)利用相同方法,将雅丹地貌开始形成年代下限限定在 1.5~0.5 Ga 之间。以上几种火星雅丹地貌年代学研究方法均是基于 CSFD,区别在于定年对象的差异,直接对雅丹区域进行定年,会受到侵蚀地貌的影响,部分小坑被侵蚀作用抹去,因而得到较为年轻的年龄,而利用其他单元进行约束获得的年龄相对更可靠。

2.7 雅丹地貌发育过程

雅丹的形成发育过程时间相对漫长,无法直接观测到其形成演化过程。目前,雅丹地貌的形成过程与演化规律的研究通常使用以下三种方法:①野外地质调查,室内理论综合分析推断;②实验室物

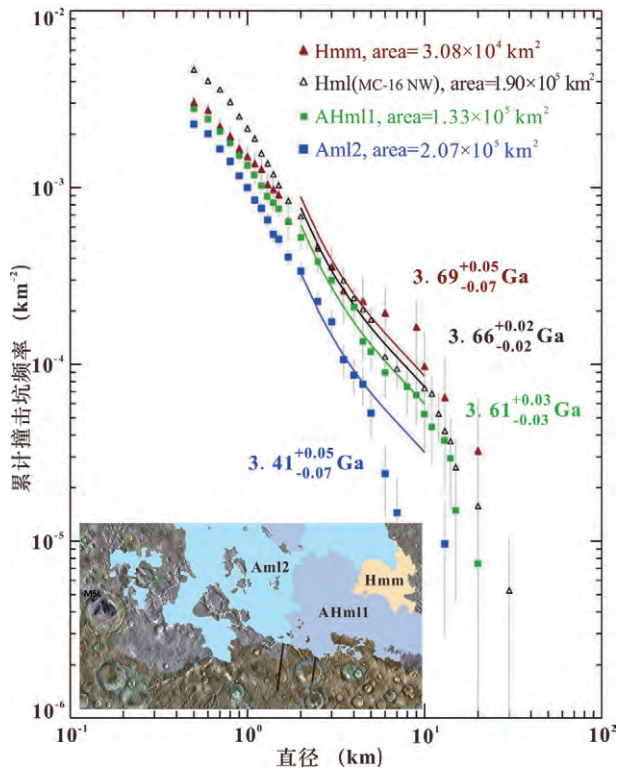


图 4 MFF 西部撞击统计坑定年结果(年龄数据来自 2~10 km 撞击坑统计结果,改编自 Zimbelman et al., 2012)

Fig 4 Cumulative crater frequency data for western MFF units (ages are derived from fitting craters in the 2 to 10 km diameter range, modified from Zimbelman et al., 2012)

理模拟试验,使用替代材料,减小雅丹规模,缩短形成与演化所需时长;③ 数值模拟,建立相关函数,计算模拟雅丹形成过程和演化规律。当前火星表面雅丹地貌的形成发育过程主要基于比较行星学方法研究,即基于地表雅丹的野外的类比研究。

Mandt et al. (2009)对 MFF 区域的雅丹地貌进行了研究,认为火星表面曲线状的雅丹是从 V 形凹陷开始的,随着侵蚀加剧,凹陷逐渐加深变长,最终形成曲线状雅丹(图 5a)。De Silva et al. (2010)对比研究了火星 MFF 区域和地表安第斯山中部的雅丹,提出的发育模式也支持了这一点。Kerber et al. (2010)认为 MFF 区域跟熔岩流交界区域的部分锯齿状雅丹是熔岩流充填了原有的 MFF 锯齿状雅丹,随后 MFF 锯齿状雅丹被侵蚀殆尽,而熔岩流充填的部分残留下来成为新的锯齿状雅丹,其所指示古风向与 MFF 锯齿状雅丹正好相反(图 5b)。Wang Jiang et al. (2018)对比了柴达木盆地和火星 AZP 地区及盖尔撞击坑的雅丹地貌,提出了 AZP 地区雅丹地貌可能经历了柴达木盆地雅丹地貌相似的四阶段演化模式,即胚胎期、青年期、成熟期和退

化期,并且该演化过程存在循环,也可能在某个阶段被打断,如遇到抗风化能力比较强的地层或者发育环境的转变,部分雅丹地貌的形成可能跟撞击作用相关。

2.8 雅丹地貌对古气候的指示意义

火星表面雅丹地貌的形成环境也是众多学者关注的问题,也是目前研究较为薄弱的方面,主要集中在 MFF 区域。自诺亚世至西方世,火星气候发生巨大变化,整体由温暖湿润向寒冷干燥转变(Clifford, 1993; Treiman et al., 1995; Brain et al., 1998; Carr, 1999; Golombek et al., 2006; Fassett et al., 2008; Ehlmann et al., 2011; Xiao Long, 2013)。前人的研究表明 MFF 区域的雅丹地貌形成至少开始于西方世(Kerber et al., 2010; Zimbelman et al., 2012),但自西方世至今,很少研究涉及 MFF 区域气候发生了哪些变化。

火星表面风沙地貌常被用作区域内风向指示(Greeley et al., 1993; Mandt et al., 2009; Cohen-Zada et al., 2016; Desai et al., 2016)。Greeley et al. (1993)将火星表面的风沙地貌指示的风向与火星大气环流模型(General Circulation Model, GCM)进行了对比研究,结果表明活动沙丘、风条纹等吻合很好,而雅丹与任何季节的模拟均不相符,他们认为自雅丹形成之后火星表面的气候发生了变化,导致当时的风向与现在不同,也可能是雅丹地貌发育的基础物质存在某些构造(如节理等)控制了雅丹的走向。Sefton-Nash et al. (2013)选取了火星赤道区域 6 个位置的层状沉积研究最近的风况,并与 GCM 模拟结果比对,结果显示大部分雅丹长轴走向跟模拟风矢量频率中方向极大值一致。这个结果与 Greeley et al. (1993)的结果并不矛盾,Greeley et al. (1993)的研究结果是全球范围内尺度相对较大,具有统计意义。而 Sefton-Nash et al. (2013)研究范围与尺度相对较小,代表了局部区域。Wang Jiang et al. (2018)对 MFF 西部 AZP 地区雅丹的研究发现一些被掩埋的雅丹的走向与现在雅丹存在显著变化,据此推断出 MFF 物质的形成过程并不是连续的,雅丹形成在 MFF 物质堆积的间断期间,区域内 MFF 物质的堆积至少经历了 4 次间断,当地盛行风环境至少也发生过 4 次显著的改变。此外,区域内还发现一些被三角洲沉积物掩埋的雅丹,以及叠加在三角洲沉积物之上的雅丹,两者形态和走向存在明显不同,表明在两次风蚀作用之间存在短暂的流水活动,可能揭示了短暂的温暖气候。

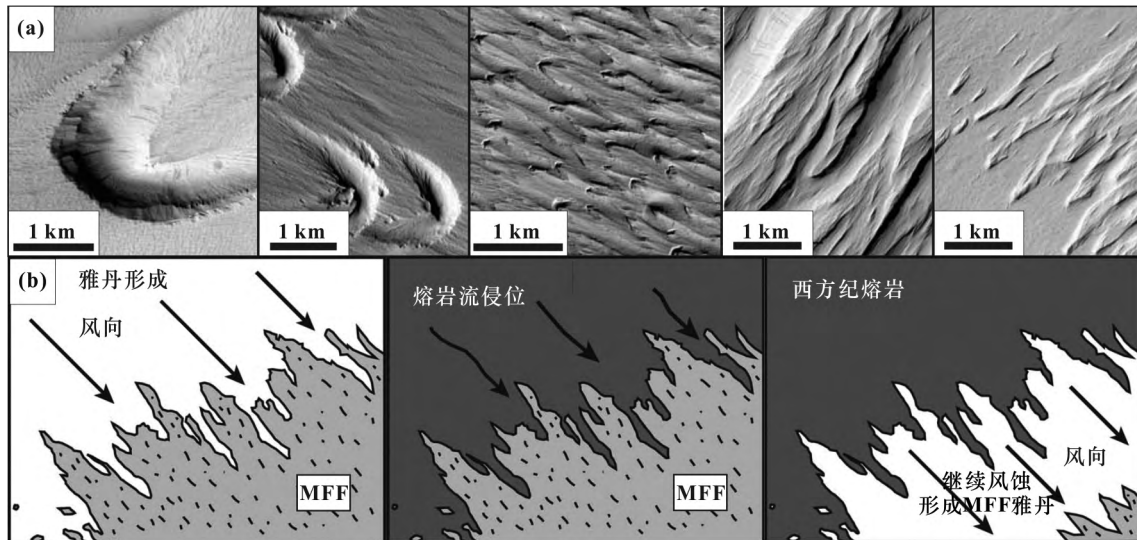


图5 火星MFF区域曲线状雅丹发育过程(a)(据Mandt et al., 2009)和MFF雅丹形成示意图(b)(据Kerber et al., 2010)

Fig. 5 The formation process of curvilinear yardangs in MFF area (a) (after Mandt et al., 2009) and the schematic of MFF yardangs (b) (after Kerber et al., 2010)

3 火星雅丹地貌研究中存在的问题与建议

虽然当前已经对火星雅丹地貌开展了一部分工作,但根据成果发表的情况,仍受制于高分辨率数据的覆盖情况,仅有小部分区域开展了详细的研究(如盖尔撞击坑、AZP地区),而雅丹地貌的定量化研究、物质组成、年代学、发育过程与气候环境的关系等仍需更深入的研究。

(1)雅丹地貌定量化研究与数值模拟:目前而言,火星雅丹地貌的定量化研究整体仍比较薄弱,开展雅丹地貌形态的定量化研究是当前也是未来雅丹研究能够有所突破重要方面。雅丹地貌的分类主要还是依靠定性的描述,需要引入量化指标,完善分类体系。量化指标需要从二维拓展到三维,高度、坡角、剖面形态等参数均与演化阶段密不可分,这些数值可以为火星雅丹地貌演化过程数值模拟提供参考,相比与地球表面,火星雅丹地貌演化过程中需要考虑的因素更少,更有利于数值模拟工作的开展。

(2)雅丹地貌的物质组成:火星雅丹地貌在形成过程中揭露出来的地层剖面是研究火星气候历史的天然窗口,这需要开展局部区域雅丹地貌物质组成精细化研究,但光谱成分数据与影像数据分辨率不匹配制约了成分的研究。此外,火星表面大部分区域被灰尘覆盖,无法获得有效成分。因此,需要开展更多局部区域工作进行筛查,寻找有数据覆盖的无尘区域。

(3)雅丹地貌年代学:当前对雅丹地貌年代学的

约束还比较宽泛,需要遴选更多可用于定年的单元,如平顶雅丹顶层、雅丹发育底层、(倒转)河道顶层、扇状沉积顶层、撞击坑连续溅射毯、熔岩流等。在CSFD定年时尽量选择面积较大的定年单元,对(倒转)河道顶层单元可以将与之关联的多条河道划为同一单元,或与河道有关联的区域划分为缓冲区,采用“缓冲区撞击坑统计法”(Fassett et al., 2008)。对于雅丹发育底层单元,则在大区域内划分单元,选用“撞击坑退化保留年龄法”(Werner et al., 2011),统计不同直径撞击坑数量,对照相关数据确定年龄。Hartmann et al. (2001)的研究表明,火星表面直径小于40 m的撞击坑已经达到饱和,因而在火星表面定年过程中,需要据此选择合适的撞击坑统计直径,此外CSFD操作过程均需要中注意二次撞击坑的识别与剔除。

(4)雅丹地貌发育过程与气候环境关系:地表雅丹研究表明,全球雅丹地貌的形成受到气候的驱动,存在“冰期雅丹发育,间冰期湖泊发育”模式(Ding Zhaojing et al., 2020),特别是高大的雅丹,大多发育在干冷多风的冰期(Niu Qinghe et al., 2011)。从西方纪开始,火星表面变得干冷多风,仅存在暂时性的流水活动(Fassett et al., 2008; Ehlmann et al., 2011; Xiao Long, 2013),但在火星地质历史时期,其自转轴倾斜角曾发生很大变化,这些轨道尺度倾角的变化对火星大气温度、湿度和大气环流以及近地风况均有影响,也是导致火星表面出现了多次冰期的主要原因(Head et al., 2003; Forget et al.,

2006; Schorghofer, 2007; Smith et al., 2016), 火星雅丹地貌的发育过程对这些气候环境变化的响应机制值得深入研究。

4 结语

雅丹地貌演化周期漫长,其形态特征和物质组成是火星气候环境变化的载体。本文回顾了火星雅丹地貌的探测历史,重点介绍了火星雅丹地貌在形态特征、类型分布、几何特征、物质组成、年代学、发育过程及对古气候指示意义等方面的研究进展,并就存在的问题进行了总结,建议在未来研究中重点加强雅丹地貌定量化研究,并结合其物质组成、年代学等方面工作,探讨其发育过程与气候环境协同演化的机制。在这过程中需要加强与地表雅丹的相似性对比研究,丰富不同天体、不同环境条件下雅丹地貌演化机制的理论。随着新一轮火星探测高潮的到来,高分辨率影像数据、地形数据、光谱数据和就位探测数据会不断丰富,对火星雅丹地貌的认识会更加深入,也将为了解火星古气候环境变化提供更大支持。

References

Anglés A, Li Yiliang. 2017. The western Qaidam Basin as a potential Martian environmental analogue; an overview. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 122(5): 856~888.

Blackwelder E. 1934. Yardangs. *Bulletin of the Geological Society of America*, 45(1): 159~166.

Bradley B A, Sakimoto S E, Frey H, Zimbleman J R. 2002. Medusae Fossae Formation; new perspectives from Mars Global Surveyor. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 107(E8): 2-1~2-17.

Brain D A, Jakosky B M. 1998. Atmospheric loss since the onset of the Martian geologic record; combined role of impact erosion and sputtering. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 103 (E10): 22689~22694.

Bridges N T, Laity J E, Greeley R, Phoreman J, Eddlemon E E. 2004. Insights on rock abrasion and ventifact formation from laboratory and field analog studies with applications to Mars. *Planetary and Space Science*, 52(1~3): 199~213.

Bridges N T, Geissler P E, McEwen A S, Thomson B J, Chuang F C, Herkenhoff K E, Keszthelyi L P, Martínez-Alonso S. 2007. Windy Mars: a dynamic planet as seen by the HiRISE camera. *Geophysical Research Letters*, 34(23): L23205.

Bridges N T, Banks M E, Beyer R A, Chuang F C, Noe Dobra E Z, Herkenhoff K E, Keszthelyi L P, Fishbaugh K E, McEwen A S, Michaels T I, Thomson B J, Wray J J. 2010. Aeolian bedforms, yardangs, and indurated surfaces in the Tharsis Montes as seen by the HiRISE Camera; evidence for dust aggregates. *Icarus*, 205(1): 165~182.

Brookes I A. 2001. Aeolian erosional lineations in the Libyan desert, Dakhla region, Egypt. *Geomorphology*, 39(3): 189~209.

Carr M H. 1999. Retention of an atmosphere on early Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 104(E9): 21897~21909.

Carr M H. 2007. *The surface of Mars*. Cambridge University Press.

Carter L M, Campbell B A, Watters T R, Phillips R J, Putzig N E,

Safaenili A, Plaut J J, Okubo C H, Egan A F, Seu R. 2009. Shallow radar (SHARAD) sounding observations of the Medusae Fossae Formation, Mars. *Icarus*, 199(2): 295~302.

Clifford S M. 1993. A model for the hydrologic and climatic behavior of water on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 98(E6): 10973~11016.

Cohen-Zada A L, Blumberg D G, Maman S. 2016. Earth and planetary aeolian streaks; a review. *Aeolian Research*, 20: 108~125.

Cooke R U, Warren A, Goudie A S. 1993. *Desert geomorphology*. CRC Press.

Day M, Anderson W, Kocurek G, Mohrig D. 2016. Carving intracrater layered deposits with wind on Mars. *Geophysical Research Letters*, 43(6): 2473~2479.

Day M, Dorn T. 2019. Wind in Jezero Crater, Mars. *Geophysical Research Letters*, 46(6): 3099~3107.

Desai A J, Murty S V S. 2016. Morphology of Yardangs Within Nicholson Crater, Mars: records of Past Fluvial and Aeolian Activities. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 44 (6): 933~948.

De Silva S L, Bailey J E, Mandt K E, Viramonte J M. 2010. Yardangs in terrestrial ignimbrites; synergistic remote and field observations on Earth with applications to Mars. *Planetary and Space Science*, 58(4): 459~471.

Ding Zhaojing, Zhao Jiannan, Wang Jiang, Lai Zhongping. 2020. Yardang on Earth and its implications to Mars; a review. *Geomorphology*, 364.

Dong Zhibao, Lü Ping. 2019. Aeolian geomorphology in the era of deep space exploration. *Advance in Earth Science*, 34(10): 1001~1014(in Chinese with English abstract).

Dong Zhibao, Lü Ping. 2020. Development of aeolian geomorphology in China in the past 70 years. *Acta Geographica Sinica*, 75(3): 509~528(in Chinese with English abstract).

Ehlmann B L, Mustard J F, Murchie S L, Bibring J P, Meunier A, Fraeman A A, Langevin Y. 2011. Subsurface water and clay mineral formation during the early history of Mars. *Nature*, 479(7371): 53~60.

Fassett C I, Head J W. 2008. Valley network-fed, open-basin lakes on Mars; Distribution and implications for Noachian surface and subsurface hydrology. *Icarus*, 198(1): 37~56.

Forget F, Haberle R M, Montmessin F, Levrard B, Head J W. 2006. Formation of glaciers on Mars by atmospheric precipitation at high obliquity. *science*, 311(5759): 368~371.

Fox R W, McDonald A T, Pritchard P J. 1973. *Introduction to fluid mechanics*. John Wiley & Sons New York.

Golombek M P, Grant J A, Crumpler L S, Greeley R, Arvidson R E, Bell J F, Weitz C M, Sullivan R, Christensen P R, Soderblom L A, Squyres S W. 2006. Erosion rates at the Mars Exploration Rover landing sites and long-term climate change on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 111 (E12): S10.

Goudie A. 1989. Wind erosion in deserts. *Proceedings of the Geologists' Association*, 100(1): 83~92.

Greeley R. 1994. Geology of terrestrial planets with dynamic atmospheres. *Earth, Moon, and Planets*, 67(1~3): 13~29.

Greeley R, Guest J. 1987. *Geologic map of the eastern equatorial region of Mars*. USGS.

Greeley R, Skyepeck A, Pollack J B. 1993. Martian aeolian features and deposits: comparisons with general circulation model results. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 98 (E2): 3183~3196.

Greeley R, Kraft M, Sullivan R, Wilson G, Bridges N, Herkenhoff K, Kuzmin R O, Malin M, Ward W. 1999. Aeolian features and processes at the Mars Pathfinder landing site. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 104(E4): 8573~8584.

Greeley R, Kuzmin R O, Haberle R M. 2001. Aeolian processes and their effects on understanding the chronology of Mars. *Chronology and Evolution of Mars*. *Space Science Review*, 96:

393~404.

- Gwinner K, Jaumann R, Hauber E, Hoffmann H, Heipke C, Oberst J, Neukum G, Ansan V, Bostelmann J, Dumke A, Elgner S, Erkeling G, Fueten F, Hiesinger H, Hoekzema N M, Kersten E, Loizeau D, Matz K D, McGuire P C, Mertens V, Michael G, Pasewaldt A, Pinet P, Preusker F, Reiss D, Roatsch T, Schmidt R, Scholten F, Spiegel M, Stesky R, Tirsch D, van Gasselt S, Walter S, Wahlisch M, Willner K. 2016. The high resolution Stereo Camera (HRSC) of Mars express and its approach to science analysis and mapping for Mars and its satellites. *Planetary and Space Science*, 126: 93~138.
- Halimov M, Fezer F. 1989. Eight yardang types in Central-Asia. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 33(2): 205~217.
- Harrison S, Balme M, Hagermann A, Murray J, Muller J P. 2010. Mapping Medusae Fossae Formation materials in the southern highlands of Mars. *Icarus*, 209(2): 405~415.
- Hartmann W K, Anguita J, Miguel A, Berman D C, Ryan E V. 2001. Martian cratering 7: the role of impact gardening. *Icarus*, 149(1): 37~53.
- Hartmann W K, Neukum G. 2001. Cratering chronology and the evolution of Mars. *Space Science Reviews*, 96(1): 165~194.
- Head J. 2001. Medusae Fossae Formation as ancient polar deposits? tests and new data on stratigraphic relationships. *Lunar and Planetary Science Conference*, 1394.
- Head J W, Mustard J F, Kreslavsky M A, Milliken R E, Marchant D R. 2003. Recent ice ages on Mars. *Nature*, 426(6968): 797~802.
- Hedin S A. 1903. Central Asia and Tibet. Hurst and Blackett, limited.
- Hynek B M, Phillips R J, Arvidson R E. 2003. Explosive volcanism in the Tharsis region: global evidence in the Martian geologic record. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 108 (E9): 5111.
- Kerber L, Head J W. 2012. A progression of induration in Medusae Fossae Formation transverse aeolian ridges: evidence for ancient aeolian bedforms and extensive reworking. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(4): 422~433.
- Kerber L. 2016. Controls on the Morphology of Yardangs on the Earth and Mars, *Lunar and Planetary Science Conference*, 2708.
- Kerber L, Head J, Madeleine J, Wilson L, Forget F. 2008. Modeling ash dispersal from Apollinaris Patera; implications for the Medusae Fossae formation, *Lunar and Planetary Science Conference*, 1881.
- Kerber L, Head J W. 2010. The age of the Medusae Fossae Formation: evidence of Hesperian emplacement from crater morphology, stratigraphy, and ancient lava contacts. *Icarus*, 206(2): 669~684.
- Kerber L, Head J W. 2012. A progression of induration in Medusae Fossae Formation transverse aeolian ridges: evidence for ancient aeolian bedforms and extensive reworking. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(4): 422~433.
- Kerber L, Radebaugh J. 2017. The role of water and wind in Yardang Formation in Iran and on Mars. *Lunar and Planetary Science Conference*, 2571.
- Keszthelyi L, Jaeger W. 2008. HiRISE observations of the Medusae Fossae formation. *Lunar and Planetary Science Conference*, 2420.
- Kite E S, Lewis K W, Lamb M P, Newman C E, Richardson M I. 2013. Growth and form of the mound in Gale Crater, Mars: slope wind enhanced erosion and transport. *Geology*, 41(5): 543~546.
- Laity J E. 2011. Wind erosion in drylands. *Arid Zone Geomorphology: Process, Form and Change in Drylands*, Third Edition: 539~568.
- Le Deit L, Hauber E, Fueten F, Pondrelli M, Rossi A, Mangold N, van Gasselet S, Massé M, Jaumann R. 2011. Geological analysis of Gale Crater on Mars. EPSC-DPS Joint Meeting 2011.
- Le Deit L, Hauber E, Fueten F, Pondrelli M, Rossi A P, Jaumann R. 2013. Sequence of infilling events in Gale Crater, Mars: results from morphology, stratigraphy, and mineralogy. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118 (12): 2439~2473.
- Li Lulu. 2018. Research progress of Yardangs on Mars. Master degree dissertation of Shaanxi Normal University (in Chinese with English abstract).
- Li Jiyan, Dong Zhibao, Qian Guangqiang, Zhang Zhencai, Luo Wanyin, Lu Junfeng, Wang Meng. 2016. Yardangs in the Qaidam Basin, northwestern China: distribution and morphology. *Aeolian Research*, 20: 89~99.
- Li Jiyan, Dong Zhibao. 2016. Research progress of Aeolian landforms on Mars. *Journal of Desert Research*, 36(4): 951~961(in Chinese with English abstract).
- Liu Jia, Di Kaichang, Gou Sheng, Yue Zongyu, Liu Bin, Xiao Jing, Liu Zhaoqin. 2020. Mapping and spatial statistical analysis of Mars Yardangs. *Planetary and Space Science*, 192: 105035.
- Liu Jia, Yue Zongyu, Di Kaichang, Gou Sheng, Niu Shengli. 2021. A Study about the temporal constraints on the Martian Yardangs' development in Medusae Fossae Formation. *Remote Sensing*, 13(7), 1316.
- Mainguet M. 1968. Le Borkou. Aspects d'un modelééolien, *Annales de Géographie. Persée-Portail des revues scientifiques SHS*, 296~322.
- Malin M C, Edgett K S. 2000. Sedimentary rocks of early Mars. *Science*, 290(5498): 1927~1937.
- Malin M C, Edgett K S. 2001. Mars global surveyor Mars orbiter camera: interplanetary cruise through primary mission. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E10): 23429~23570.
- Malin M C, Bell J F, Cantor B A, Caplinger M A, Calvin W M, Clancy R T, Edgett K S, Edwards L, Haberle R M, James P B, Lee S W, Ravine M A, Thomas P C, Wolff M J. 2007. Context camera investigation on board the Mars Reconnaissance Orbiter. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 112 (E5): S04.
- Mandt K, Silva S d, Zimbleman J, Wyrick D. 2009. Distinct erosional progressions in the Medusae Fossae Formation, Mars, indicate contrasting environmental conditions. *Icarus*, 204(2): 471~477.
- Mandt K E, de Silva S L, Zimbleman J R, Crown D A. 2008. Origin of the Medusae Fossae Formation, Mars: insights from a synoptic approach. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 113(E12).
- McCauley J F. 1973. Mariner 9 evidence for wind erosion in the equatorial and mid-latitude regions of Mars. *Journal of Geophysical Research*, 78(20): 4123~4137.
- McCauley J, Grolier M, Breed C. 1977. Yardangs. *Geomorphology in arid regions*: 233~269.
- McEwen A S, Eliason E M, Bergstrom J W, Bridges N T, Hansen C J, Delamere W A, Grant J A, Gulick V C, Herkenhoff K E, Keszthelyi L. 2007. Mars reconnaissance orbiter's high resolution imaging science experiment (HiRISE). *Journal of Geophysical Research: Planets*, 112(E5): E05S02.
- Michael G G, Neukum G. 2010. Planetary surface dating from crater size-frequency distribution measurements: partial resurfacing events and statistical age uncertainty. *Earth and Planetary Science Letters*, 294(3~4): 223~229.
- Milliken R, Grotzinger J, Thomson B. 2010. Paleoclimate of Mars as captured by the stratigraphic record in Gale Crater. *Geophysical Research Letters*, 37(4): L04201.
- Morgan G A, Campbell B A, Carter L M, Plaut J J. 2015. Evidence for the episodic erosion of the Medusae Fossae Formation preserved within the youngest volcanic province on Mars. *Geophysical Research Letters*, 42(18), 7336~7342.
- Mouginis-Mark P J, Hayashi J N. 1993. Shallow and deep fresh impact craters in Hesperia Planum, Mars. *Earth, Moon, and Planets*, 61(1): 1~20.

- Murchie S, Roach L, Seelos F, Milliken R, Mustard J, Arvidson R, Wiseman S, Lichtenberg K, Andrews-Hanna J, Bishop J, Bibring J P, Parente M, Morris R. 2009. Evidence for the origin of layered deposits in Candor Chasma, Mars, from mineral composition and hydrologic modeling. *Journal of Geophysical Research*, 114; E00D05.
- Niu Qinghe, Qu Jianju, Li Xiaoze, Dong Guangrong, Zhang Kecun, Han Qingjie. 2011. Review and prospect of Yardangs landforms research. *Advances in Earth Science*, 26(5): 516~527 (in Chinese with English abstract).
- Okubo C H. 2016. Morphologic evidence of subsurface sediment mobilization and mud volcanism in Candor and Coprates Chasmata, Valles Marineris, Mars. *Icarus*, 269: 23~37.
- Pascuzzo A C. 2015. Geologic mapping and characterization of Nicholson Crater, Mars.
- Pelletier J D, Kapp P A, Abell J, Field J P, Williams Z C, Dorsey R J. 2018. Controls on Yardang development and morphology: 1. field observations and measurements at Ocotillo Wells, California. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(4): 694~722.
- Schorghofer N. 2007. Dynamics of ice ages on Mars. *Nature*, 449(7159): 192~194.
- Schultz P H, Lutz A B. 1988. Polar wandering of Mars. *Icarus*, 73(1): 91~141.
- Scott D H, Tanaka K L. 1982. Ignimbrites of Amazonis Planitia region of Mars. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 87(B2): 1179~1190.
- Sefton-Nash E, Teanby N, Newman C, Clancy R, Richardson M. 2013. Constraints on Mars' recent equatorial wind regimes from comparison of observed with GCM-predicted aeolian feature orientations, European Planetary Science Congress 866.
- Smith I B, Putzig N E, Holt J W, Phillips R J. 2016. An ice age recorded in the polar deposits of Mars. *Science*, 352(6289): 1075~1078.
- Stapff F. 1887. Karte des unteren Khuisbets. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 33: 202~214.
- Tanaka K L. 2000. Dust and ice deposition in the Martian geologic record. *Icarus*, 144(2): 254~266.
- Treiman A H, Fuks K H, Murchie S. 1995. Diagenetic layers in the upper walls of Valles Marineris, Mars; Evidence for drastic climate change since the mid-Hesperian. *Journal of Geophysical Research: planets* 100(E12): 26339~26344.
- Walther J. 1891. Die Denudation in der Wüste. *Akademi der Wissenschaften; Mathematisch-Physicalische Klasse, Abhandlungen*, 16: 435~461.
- Wang Jiang. 2018. Geologic characteristics of yardangs on Mars and their implications for paleo-environments; constraints from analog study between the Qaidam Basin and Aeolis-Zephyria region. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiang, Xiao Long, Reiss D, Hiesinger H, Huang Jun, Xu Yi, Zhao Jiannan, Xiao Zhiyong, Komatsu G. 2018. Geological features and evolution of Yardangs in the Qaidam Basin, Tibetan Plateau (NW China): a terrestrial analogue for Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123(9): 2336~2364.
- Wang Jiang, Xiao Long, Reiss D, Hiesinger H, Huang Jun, Xu Yi, Zhao Jiannan, Xiao Zhiyong, Komatsu G. 2019. Geologic Characteristics of Yardangs on Mars and Their Implications for Paleo-Environments; Constraints from Comparison Between the Qaidam Basin/China and the Aeolis-Zephyria Region, Lunar and Planetary Science Conference, 2197.
- Wang Jiang, Huang Jun, Xiao Long. 2020. *Aeolian Landforms*. World Scientific, Singapore.
- Ward A W. 1979. Yardangs on Mars: evidence of recent wind erosion. *Journal of Geophysical Research*, 84(B14): 8147~8165.
- Ward A W, Greeley R. 1984. Evolution of the yardangs at Rogers Lake, California. *Geological Society of America Bulletin*, 95(7): 829~837.
- Ward A W, Doyle K B, Helm P J, Weisman M K, Witbeck N E. 1985. Global map of eolian features on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 90(B2): 2038~2056.
- Watters T R, Campbell B, Carter L, Leuschen C J, Plaut J J, Picardi G, Orosei R, Safaeinili A, Clifford S M, Farrell W M. 2007. Radar sounding of the Medusae Fossae Formation Mars: equatorial ice or dry, low-density deposits? *Science*, 318(5853): 1125~1128.
- Weitz C M, Milliken R E, Grant J A, McEwen A S, Williams R M E, Bishop J L, Thomson B J. 2010. Mars Reconnaissance Orbiter observations of light-toned layered deposits and associated fluvial landforms on the plateaus adjacent to Valles Marineris. *Icarus*, 205(1): 73~102.
- Werner S. 2006. Major aspects of the chronostratigraphy and geologic evolutionary history of Mars. *Fachbereich Geowissenschaften Freie Universität*.
- Werner S, Tanaka K. 2011. Redefinition of the crater-density and absolute-age boundaries for the chronostratigraphic system of Mars. *Icarus*, 215(2): 603~607.
- Whitney M I. 1985. Yardangs. *Journal of Geological Education*, 33(2): 93~96.
- Williams J, Day M, Chojnacki M, Rice M. 2020. Scarp orientation in regions of active aeolian erosion on Mars. *Icarus*, 335: 113384.
- Williams S H, Zimbelman J R. 1994. "White Rock": an eroded Martian lacustrine deposit(?). *Geology*, 22(2): 107~110.
- Xiao Long. 2013. *Planetary Geology*. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Xiao Long. 2020. *Mars On Earth: a study of the Qaidam Basin*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Xiao Long, Wang Jiang, Dang Yanan, Cheng Ziyue, Huang Ting, Zhao Jiannan, Xu Yi, Huang Jun, Xiao Zhiyong, Komatsu G. 2017. A new terrestrial analogue site for Mars research: the Qaidam Basin, Tibetan Plateau (NW China). *Earth-Science Reviews*, 164: 84~101.
- Zhao Jie, Dong Zhibao, Li Chao, Liu Zhengyao, Yang Junhui. 2019. The near-surface wind conditions of barchan dunes in Kaiser crater on Mars. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 33(9): 133~139 (in Chinese with English abstract).
- Zimbelman J R. 2019. The transition between sand ripples and megaripples on Mars. *Icarus*, 333: 127~129.
- Zimbelman J R, Griffin L J. 2010. HiRISE images of yardangs and sinuous ridges in the lower member of the Medusae Fossae Formation, Mars. *Icarus*, 205(1): 198~210.
- Zimbelman J R, Scheidt S P. 2012. Hesperian age for western medusae fossae formation, Mars. *Science*, 336(6089): 1683~1683.

参 考 文 献

- 董治宝, 吕萍. 2019. 深空探测时代的风沙地貌学. *地球科学进展*, 34(10): 1001~1014.
- 董治宝, 吕萍. 2020. 70 年来中国风沙地貌学的发展. *地理学报*, 75(3): 509~528.
- 李继彦, 董治宝. 2016. 火星风沙地貌研究进展. *中国沙漠*, 36(4): 951~961.
- 李露露. 2018. 火星雅丹地貌研究. 陕西师范大学硕士学位论文.
- 牛清河, 屈建军, 李孝泽, 董光荣, 张克存, 韩庆杰. 2011. 雅丹地貌研究评述与展望. *地球科学进展*, 26(5): 516~527.
- 王江. 2018. 火星表面雅丹地貌地质特征及古环境意义: 基于柴达木盆地与 Aeolis-Zephyria 地区的对比研究. 中国地质大学博士学位论文.
- 肖龙. 2013. *行星地质学*. 北京: 地质出版社.
- 赵杰, 董治宝, 李超, 刘铮瑶, 杨军怀. 2019. 火星 Kaiser 陨石坑新月形沙丘近表层风况特征. *干旱区资源与环境*, 33(9): 133~139.

Advances in Martian yardangs

WANG Jiang^{*1,2)}, XIAO Long¹⁾, HUANG Jun¹⁾, ZHAO Jiannan^{1,3)}

1) *Planetary Science Institute, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;*

2) *Hubei Key Laboratory of Critical Zone Evolution, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;*

3) *Key Laboratory of Geological Survey and Evaluation of Ministry of Education,*

China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

** Corresponding author: j.wang@cug.edu.cn*

Abstract

Yardangs, typical aeolian landforms, have been found to be widespread on Mars. Their morphological characteristics and compositions record information on changing paleoclimate environment, which is the focus of Martian exploration and research. This paper summarizes the research progress on their exploration history, morphological and geometric features, classification and distribution, composition, chronology, formation process, and significance to paleoclimate/environment. On this basis, we highlight major questions in the research of Martian yardangs and emphasize the importance of their quantitative and comparative planetary studies. Meanwhile, data on Martian yardang composition and chronology needs to be combined to discuss the co-evolution mechanism between their formation and climate/environmental changes.

Key words: Martian yardang; paleoclimate environment; Medusae Fossae Formation; Gale crater