第35卷 第8期
2020年8月

地球科学进展
ADVANCES IN EARTH SCIENCE

Vol.35 No.8
Aug.，2020

董治宝,吕萍,李超.火星风沙地貌研究方法[J].地球科学进展,2020,35(8):771-788.DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2020.063.[Dong Zhibao, Lü Ping, Li Chao. Research methodology of Martian aeolian geomorphology[J]. Advances in Earth Science,2020,35(8):771-788. DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2020.063.]

火星风沙地貌研究方法*

董治宝,吕 萍,李 超
(陕西师范大学行星风沙科学研究院,陕西 西安 710119)

摘 要:火星探测是深空探测的热点和焦点。中国于2020年实施首次火星探测计划,风沙地貌过程是火星表面最广泛和最活跃的地貌过程,一直是火星研究的重要内容。持续推进火星风沙地貌过程研究需要理论体系和研究方法两个方面的支撑,在目前无法采用实地观测直接获取资料的情况下,探索和提高研究方法的水平尤为重要。从方法论、研究方式和现代技术应用3个层面剖析了火星风沙地貌研究方法。方法论注重归纳法与演绎法,还原论与整体论的辩证统一。研究方式包括探测研究和模拟研究,在地球上选择与火星类似的地方开展类火星研究,也是目前普遍采用的研究方式。充分利用各种遥感观察与探测技术,是火星风沙地貌研究赖以发展的重要基础,模拟实验也一直是风沙地貌学研究的重要手段。在人类无法实施实地调查和观测的情况下,风洞模拟和数值模拟在火星风沙地貌过程以及环境研究方面发挥着重要作用。

关 键 词:火星风沙地貌;遥感探测;数值模拟
中图分类号: P185.3;P931　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1001-8166(2020)08-0771-18

深空探测是世界各航天大国科技探索与创新的战略制高点,作为地球的近邻和太阳系内与地球最相似的姊妹行星,火星是深空探测领域中竞相角逐的热点。中国近年来在航天领域快速发展,在完美地实施了月球探测计划后开始了新的征程,于2020年实施首次火星探测。2020年迎来另一个火星冲日探测窗口,除了中国之外,美国和阿联酋也发射了火星探测器,各种火星探测器在这一年将在火星上同场竞技。火星探测在20世纪60~70年代、90年代至21世纪初的几次高潮之后,将掀起新的高潮。现代火星探测发现,与地球相似,火星表面发育着以内营力为主形成的山脉构造及火山等地貌,也有以外营力为主形成的陨击坑、古水系、风成地貌、冰川地貌和冻土地貌等。这些地貌类型是火星内部演化和表面过程的综合显现,蕴含着火星演化历史的重要信息。风沙地貌过程是火星表面最广泛和最活跃的地貌过程,一直是火星研究的重要内容。陆续发表的重要成果增进了人类对火星的认识,以火星为代表的行星风沙地貌学成为风沙地貌学研究的重要前沿领域[1]。然而,一门学科的持续发展需要理论体系和研究方法两个方面的支撑,研究方法是当前火星风沙地貌研究最为困惑的一个问题。本文根据国际研究进展,尝试阐述火星风沙地貌研究方法,以期产生投石问路的效果。

基于地球研究的风沙地貌学已建立起一套应用广泛的研究方法,包括野外调查、测量、观测与监测,实验室样品分析,物理(风洞)模拟实验,数值模拟,以及遥感和地理信息技术等,火星风沙地貌研究也力求通过上述研究方法来开展工作。但事实上,风沙地貌学的研究方法远未完善,特别是针对

收稿日期:2020-01-16;**修回日期:**2020-02-25.
* **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"巴丹吉林沙漠高大沙山系统的形成"(编号:41871008)资助.
作者简介:董治宝(1966-),男,陕西横山人,教授,主要从事风沙地貌与风沙物理研究. **E-mail:**zbdong@snnu.edu.cn

火星这样一个特殊的研究对象,可以选择的方法更为有限,例如野外工作和样品的实验室分析至少在目前是无法进行的。所以,火星风沙地貌研究方法需要解决的重要问题是在无法采用上述方法直接获取资料情况下如何开展研究。另外,火星风沙地貌研究必须基于两个事实:①它是风沙地貌学研究中的一个新领域,②风沙地貌学本身是一门理论亟待拓展和完善的科学。因此,研究方法要从方法论、研究方式和现代技术应用3个层面全面考虑。

1 方法论的思考

方法论是一个哲学概念,因为它是人们认识世界和改造世界所使用方法的理论,在地球风沙地貌研究中很少被考虑。在火星风沙地貌乃至其他地外行星的风沙地貌研究中,会不断遇到困惑不解的问题,其中最突出的是:研究者们试图根据已有的风沙地貌学知识与理论研究火星风沙地貌,因为一些火星风沙地貌呈现出某些我们已熟知的风沙地貌特征,但也有我们在形态、分布和物质组成等多个方面未曾见到、甚至想到的特征。火星与地球风沙地貌的形似性与差异性并存造成的困惑在于:如何根据已有风沙地貌知识与理论指导火星风沙地貌研究,或如何通过火星风沙地貌研究来拓展和修正原有理论,这不仅涉及风沙地貌学知识和理论产生的背景、过程及其可靠性,还涉及是否遵循正确的方法论与逻辑以及如何坚持正确的方法论。在火星风沙地貌研究中,在方法论层面上需要重新考虑3个方面的关键问题:

(1)*归纳法与演绎法的辩证统一*。像其他科学研究一样,归纳法和演绎法被应用到风沙地貌研究中。研究者们对于风成过程对地球科学的重要意义以及风沙地貌学研究必要性的认识,正是基于全球广泛分布的风成黄土和其他地层中风成沉积记录的认识和总结,而风沙地貌动力学及其实验研究,则是将现代流体力学理论应用于风沙运动和沙丘地貌过程[2]。风沙物理学先驱Bagnold R. A.试图依据其建立的风沙物理学理论解释当时观察到的个别风沙地貌现象,如沙波纹、砾浪、新月形沙丘、纵向沙丘和沙丘内部沉积构造,在经历了长期的检验工作之后,对更多风沙地貌现象的归纳与总结形成了多种猜测与假说。20世纪80年代以来,基于多种新理论和新方法的数值模拟研究产生了更多需要检验的假说,以至于风沙地貌学多种假说并存,在许多方面难以达成统一的理论。研究火星风沙地貌,首先,尽可能广泛地收集和总结火星风沙地貌资料,这是最重要的但也是难度最大的。其次,基于已有风沙地貌学知识和理论理解火星风沙地貌,并对其局限性有清醒的认识,即目前关于地球风沙地貌的认识和理论在许多方面尚处于猜测和假说阶段。所以,现有知识与理论为火星风沙地貌研究提供便捷的途径,但又必须加以拓展。火星风沙地貌现象的综合与归纳既要注重与其他星球(主要是地球)的相似规律,又要注重其差异性,特别是关于火星环境特征及其演化信息,发展、丰富和修正假说蕴含着深远的科学意义。

(2)*还原论与整体论的辩证统一*。风沙地貌学在发展中一直向微观和宏观两个方向拓展。微观研究深入至颗粒尺度,旨在释风沙地貌形成的微观机理,是还原论思维方法。例如,试图将跃移颗粒的运动特征与沙波纹联系起来,将跃移颗粒的运动参数与风沙流通量廓线联系起来,进而阐释风沙流的侵蚀规律及其对风蚀地貌的塑造作用[3~7]。宏观研究关注沙丘、沙丘群、沙海和全球风沙地貌格局特征及其形成,需要整体论的思维方法。面对复杂的风沙地貌现象,在研究方法和理论还不完善的情况下,着眼于风沙地貌某些局部认识,如风沙地貌形态参数、风沙沉积物特征、沙丘气流场特征、风况特征、风沙地貌格局等,构成了截至目前风沙地貌研究的主体,推动了风沙地貌学的发展[8]。基于还原论思维,风沙地貌学研究层层分解,并不断向相邻学科渗透,如流水地貌学、泥沙动力学、流体力学、理论物理学、生物学等。局部认识的综合集成构建了风沙地貌学的研究框架:形态学、沉积物与动力过程。

20世纪70年代以来,空间观察与探测技术以及其他相关研究技术的发展,显示了整体论方法的优势与必要性。首先,对大尺度风沙地貌特征的了解,启发风沙地貌学家用其他思想去探究沙丘地貌格局等问题,如用自组织理论研究沙丘地貌格局特征[9]。越来越多困惑研究者的复杂风沙地貌现象被发现,如与传统理论相悖的多种风沙地貌类型共生现象,暗示风沙地貌的形成与发展不遵循简单统一的规律。由于对初始条件的敏感性,会导致不断变化的难以预测的行为模式,风沙地貌学家诉诸复杂系统理论,在更高的层面上探究“混沌中的秩序”。必须认识到复杂系统理论对火星风沙地貌研究的意义,因为截至目前所能获取的微观信息极其有限,特别是风沙地貌的发育条件,不苛求细节、变通

地追求混沌系统的可预测性对目前火星风沙地貌研究具有重要启发。其次,风沙地貌系统表现出普遍的非线性行为是还原论思想的致命弱点,如颗粒起动风速与粒径大小的非线性关系给风沙蚀积特征预测带来困难,直接影响人们对风沙地貌形态变化的理解。另外一个典型的非线性行为就是不同尺度沙丘地貌形成机理的差异,沙波纹、沙丘和沙山形态特征高度相似,但形成机理截然不同。理论上讲,火星风沙地貌尺度比地球上的大,沙波纹可能相当于地球上的沙丘,实际上,火星沙丘地貌尺度普遍小于地球。与地球风沙地貌研究不同的是,火星风沙地貌研究的一个重要目标是为认识火星环境特征及其演化提供证据,而地球上的风沙地貌研究则主要是研究特定环境的风沙地貌,所以着眼于火星系统,研究火星风沙地貌尤为重要。人类对火星风沙地貌乃至整个火星的最早认识来自肉眼观察和望远镜观察,其实都是整体性的认识,随着探测技术的发展,越来越多的细节被发现,显现出基于还原论思想研究的必要性。

(3)经典地貌学概念的重新思考。当前地貌学研究越来越多地关注环境地貌、灾害地貌以及地貌与全球变化的关系等,研究方向主要集中在应用方面,但火星风沙地貌研究为纯理论研究,在理论探索方面具有重要意义,所以需要重新思考已有的经典地貌学概念(表 1)。火星地貌过程与地球有很大的不同,但正是这些不同能够激发研究者们对经典地貌学概念与理论的重新思考。通过风沙地貌研究为整体上认识火星提供证据是火星风沙地貌研究的重要目标之一,但火星风沙地貌所代表环境的时间尺度到底有多大。地球上现代沙漠都是第四纪或中更新世以来形成的,风沙地貌被作为更新世或全新世环境变化的指征。火星表面 30 多亿年以来一直处于寒冷干旱的状况,并不像地球有多种多样活跃的第四纪和现代表面过程,其地貌痕迹可以长期保存,所以经典地貌学概念,如年轻地形论、更新世遗存论和现代主义等在理解风沙地貌发育环境及其变化方面如何考虑。既然火星表面过程已长期沉寂,是否可以基于均变论和渐变论的思想理解风沙地貌的形成。火星风沙地貌的分布规律并未显示其与气候的关系,广为接受的形态气候区分异论在火星上的显示程度如何。所以,参考经典地貌学概念,但并不束缚于这些思想,通过火星地貌的特殊性,思考经典地貌学概念局限性产生的根源是火星风沙地貌理论探索的重要动力。

火星风沙地貌增强了风沙地貌学家理论探索的兴趣与信心。地貌学远离社会需求的学术化研究在一定程度上逐渐被淡化,而火星风沙地貌形态特征及空间格局与地球风沙地貌完美的相似性和不可思议的差异性以及所蕴含的重要意义,吸引了越来越多的地貌学家,为风沙地貌学纯理论研究的复兴提供了机遇。20 世纪 70 年代以来,火星风沙地貌的发现使科学界对风沙地貌的兴趣和研究价值的认识发生了重要转折,科学家们意识到风沙地貌研究对地球科学和行星科学发展均有重要意义。1978 年著名风沙地貌学家们汇聚美国加利福尼亚棕榈泉,召开了风成过程行星地质学野外大会(Planetary Geology Field Conference on Aeolian Processes),开启了以火星为标志的行星风沙地貌研究新纪元[10]。

表 1　地貌学基本概念

Table 1　Basic concepts in geomorphology

概念	含义描述	反例
均变论(Uniformitarianism)	地质历史时期的地貌过程与现代地貌过程相似	地质历史时期曾发生异常地貌过程,现代不再发生
渐变论(Gradualism)	较为频繁和中等规模的过程在景观长期渐进变化中起重要作用	灾难性过程与变化在景观演化中具有最重要的作用
有序论(Orderliness)	行星表面侵蚀营力形成规则的时间—地形序列	有些地貌景观产生于无序过程
形态气候区域分异论(Morphoclimatic Zonation)	地貌景观通过发育特色地貌及其组合反映特定的气候过程	地质构造在地形形成中的作用比气候更为重要
年轻地形论(Youthfulness of Topography)	大多数地球上的地形形成于更新世以来	在地质稳定的地区,广泛保存了第三纪,甚至中生代的地貌景观
更新世遗存论(Legacy of the Pleistocene)	更新世期间的地质和气候变化对塑造景观具有关键作用	即使在更新世的变化中,残留的景观要素仍持续作用并塑造地貌景观
现代主义(Modernism)	地貌学主要关注塑造现代景观的现代地貌过程	必须注重研究过去的条件和历史才能使地貌学得到充分发展
简单论(Simplicity)	在地貌学研究中,有必要探索地貌形态的简单性	地貌形态的复杂性比简单性更普遍

2 探测研究

2.1 火星探测计划简介

在具体研究方法方面，火星风沙地貌研究关键是要解决在无法到达火星现场的情况下，如何获取资料并对其进行分析研究，唯一的选择就是充分利用遥感观察和探测技术，目前已被证明是很有效的研究方法。人类对火星的观察与探测经历了肉眼观察、天文望远镜观测、探测器飞越火星探测、火星轨道器探测、火星着陆器就位探测和火星车巡视探测，目前正在朝建立火星观测站和返回火星样品方向努力。基于各种观察与探测结果，火星风沙地貌研究目前处于描述性研究阶段向过程研究阶段发展。人类关于火星最早的观察记录可以追溯至公元前1570年至公元前1293年的埃及[11]，回顾各种观察和观测记录发现一些火星现象与风沙活动有关。古代中国人观察到火星颜色如火，飘忽不定，将其称作"荧惑"，在一定程度上反映了火星大气的沙尘现象；18世纪随着望远镜技术的进步，人类开始观察到火星的冰盖及其他表面形貌；1877年，意大利天文学家Schiaparelli G.V.观察到火星上的水道，观测和记录了火星黄暴(yellow storm)和黄云(yellow cloud)；1907年，英国自然学家Wallace A. R.指出，火星上撞击坑是陨石坑，开始有火星黄暴和黄云的测量与摄影结果[12]；1912年瑞典化学家Arrhenius S.提出，火星极冠冰融化引起的化学反应造成火星表面的一些季节变化。

20世纪60年代以来，火星的风成作用逐渐被重视，科学家们对其认识发生了重大飞跃，并基于已有的系统观察与测量资料，推测风成作用。例如，推测1877年以来关于黄暴和黄云等望远镜观察记录和1907年以来的测量与摄影资料都与沙尘暴有关[13,14]；推测20世纪30年代和40年代以来望远镜拍摄到的火星表面暗色条带是由随风飘移的沙、尘和火山物质所致，即表面存在风成沉积物[14,15]，关于风成现象的认识从大气风尘深入到表面风成沉积。20世纪70年代以来，对火星风成过程认识出现重要突破。首先是水手6、7和9号探测器确认了火星表面风沙运移的存在[16,17]，其次水手9号照片展示了火星不同地区的风沙地貌，包括风蚀和风积地貌，从而表明风成过程在火星上具有普遍性[18,19]。进一步通过探测器发现在区域尺度上，风沙堆积对火星表面环境产生重要改造作用[20]，表明风成过程对火星的地质演化具有重要作用[18]，自此，火星风沙地貌成为火星探测研究的重要内容[21]。20世纪90年代以来，探测技术的发展使火星风沙地貌研究得以快速发展，目前探测到地外星球，如金星、土卫六、冥王星，还可能有海卫一和其他一些彗星[22]的风沙地貌，内容丰富且精度高的探测结果使火星风沙地貌研究正在引领行星风沙地貌学的发展。

所以，历次火星探测计划所获得的各种资料是火星风沙地貌研究赖以发展的重要基础，掌握各种探测资料的来源、特点有助于充分发挥其在风沙地貌研究中的价值，梳理已实施的探测计划和探测资料是很有必要的。20世纪60年代以来，世界各国已进行了45次专门针对火星的探测任务(不包括其他探测任务的"顺访")，其中20次成功，4次部分成功(表2)，表3列出了成功的探测计划及其主要探测任务与重要发现。

表2 各国实施的火星探测计划统计（1960—2019年）
Table 2 Statistics of Mars exploration programs implemented in various countries（1960-2019）

国家/机构	美国	苏联+俄罗斯	欧洲空间局	日本	印度	总计
发射次数	22	17+2	2	1	1	45
成功次数	16	4(部分成功)	2	0	1	23

2.2 探测原理

风沙地貌是大气圈和岩石圈相互作用产生的表面形貌特征，所以，对其进行研究需要表面形貌、沉积物组成和大气特征等方面的信息，几乎需要调动目前关于火星探测的全部资料。对火星的各种探测可统称为遥感，即无接触的远距离探测，包括对电磁场、力场、声波和地震波等的探测。火星风沙地貌研究应用的遥感技术主要是使用各种传感仪器，接收目标物所辐射和反射的电磁波信息，通过处理和分析，识别目标物特征及其变化。遥感的信息源是物体吸收、反射和辐射的光谱，遥感探测揭示目标物特征的基本原理是光谱特征对物质特征的敏感性，即在同一光谱区各种物体反映的情况不同，同一物体对不同光谱的反映也有明显差别，即使是同一物体，在不同的时间和地点，由于太阳光照射角度不同，它们反射和吸收的光谱也各不相同，探测的辐射源包括太阳、宇宙射线粒子和放射性元素。遥感探测是由遥感平台、传感器以及遥感信息分析与应用组成的遥感系统来完成。表4列出了各火星探测计划的遥感平台，包括飞船、轨道器(人造卫星)、着陆器和巡视器等，搭载了多种传感器，即针对电磁波谱不同波段的探测仪器。火星探测资料包括遥感影像、光谱分析数据和其他探测数据。

表 3　成功实施的火星探测计划

Table 3　Successful Mars exploration program

探测器名称	时间	国家/机构	探测类型	计划探测任务	主要工作与重要科学发现
水手4号（Mariner 4）	1964 年 11 月 28 日发射，1965 年 7 月 15 日飞越火星	美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）	飞越	对火星近距离探测并将照片传回地球，在火星附近进行星际磁场测量，提供长时间星际飞行工程方面的经验和知识	1967年12月21日结束工作。第一次成功飞越火星，传回21张照片，清晰观察到火星上大量陨击坑，记录了约70个陨击坑。证明火星地势有高差变化，否定了火星上的黑色区域代表植被，探测到火星表面大气压为400~700 Pa
水手6号（Mariner 6）	1969 年 2 月 24 日发射，1969 年 7 月 31 日飞越火星	NASA	飞越	以飞越模式共同执行探测任务。研究火星表面和大气，为未来探测提供数据，寻找有关地外生命方面的信息，探索未来探测的有关技术	水手6号传回75张照片，其中49张远距离照片，26张近距离照片，拼接起来覆盖火星表面20%面积。水手7号传回126张照片，其中93张远距离照片，33张近距离照片。分析了火星表面和大气。获得800 M数据，确定火星南极冠主要由碳氧化物组成，表面大气压估计为600~700 Pa，修正了火星质量、半径和形状数据
水手7号（Mariner 7）	1969 年 3 月 27 日发射，1969 年 8 月 5 日抵达距火星最近处	NASA	飞越		
水手9号（Mariner 9）	1971 年 5 月 30 日发射，1971 年 11 月 14 日进入火星轨道	NASA	轨道器	进入环火星轨道，返回照片和数据，研究火星气候及表面的变化，对 80% 的火星表面制图	1972年10月27日结束工作。第一个安全进入火星轨道的轨道器，传回540 T数据，包括7 329张照片，覆盖80%以上的火星表面，获得了有关火星全球性尘暴、三轴形状、不均匀的重力场和风成活动的信息
火星2号（Mars 2）	1971 年 5 月 19 日发射，1971 年 11 月 27 日进入火星轨道	苏联	轨道器+着陆器（着陆时被撞碎）	获得火星表面和云层的图像，研究表面形貌、成分和物理性质，测量火星表面温度、大气性质，监测太阳风和星际、火星磁场	传回大量数据，包括60张照片。所获数据可用于绘制火星表面形貌图，提供有关重力和磁场信息。发现火星表面高达22 km的高山，大气层有原子氢和氧，表面温度变化为–100~13 ℃，大气压500~600 Pa，大气中水蒸气浓度约为地球 1/5 000，电离层下界高度为 80~110 km，大气7 km高度处有来自尘暴的颗粒
火星3号（Mars 3）	1971 年 5 月 28 日发射，1971 年 12 月 2 日进入火星轨道	苏联	轨道器+着陆器（着陆20秒后停止工作）		
火星5号（Mars 5）	1973 年 7 月 25 日发射，1974 年 2 月 12 日进入火星轨道	苏联	轨道器	获取火星大气和表面成分、构造和性质的信息	绕火星22圈，工作9天，传回60张图片。测得火星最高表面温度–1 ℃，土壤热惯性与0.1~0.5 mm的颗粒一致，风成沉积物的粒度0.04 mm，发现与地球镁铁质岩石类似的U、Th、K成分，40 km高度臭氧层，高水汽含量等
火星6号（Mars 6）	1973 年 8 月 5 日发射，1974 年 3 月 12 日进入火星轨道	苏联	飞越+着陆器（发送了224 s数据）	着陆器进入火星大气层，现场研究火星大气和表面	着陆器发送的数据可编制大气对流层结构图。测得火星表面大气压600 Pa，气温–43 ℃，显示比之前报道更多的大气水蒸气
海盗1号（Viking 1）	1975 年 8 月 20 日发射，1976 年 6 月 19 日进入火星轨道	NASA	轨道器+着陆器	研究火星表面和大气的生物学、化学组成、天气、地震、磁性、形貌和物理性质	“海盗1号”轨道器于1980年8月17日结束工作，绕火星飞行1 485圈。着陆器于1976年7月20日着陆，1982年11月13日结束工作，传回表面照片。“海盗2号”轨道器于1978年7月25日结束工作，绕火星飞行了706圈，传回16 000张照片。着陆器于1976年9月3日着陆，1980年4月11日结束工作。“海盗计划”是一次科学与技术上的巨大成功，获得的数据，特别是轨道器获得的数据得到了深入分析与研究。着陆器传回4 500余张照片，轨道器传回51 500余张照片，对97%的表面制图，分辨率达300 m
海盗2号（Viking 2）	1975 年 9 月 9 日发射，1976 年 8 月 7 日进入火星轨道	NASA	轨道器+着陆器	主要目标是探索火星生物	

续表3

探测器名称	时间	国家/机构	探测类型	计划探测任务	主要工作与重要科学发现
火星全球勘测者（Mars Global Surveyor, MGS）	1996年11月7日发射，1997年9月12日进入火星轨道	NASA	轨道器	认识表面特征和地质过程，测定表面矿物、岩石和冰物质性质、组成和分布，测量全球地势、火星形状和磁场，监测全球天气和大气热结构，研究表面和大气的相互作用	2006年11月14日结束工作。全面研究火星表面、大气和内部。发现天气格局的周期性变化，特别是沙尘暴发生于春季至秋季、代表流水作用的冲沟和碎屑流、新巨砾轨迹和新近形成的陨石坑
火星探路者（Mars Pathfinder, MPF）	1996年12月4日发射，1997年7月4日着陆火星	NASA	火星车巡视探测	对火星表面进行长距离和近距离照相，表面岩石和土壤成分、性质测试，探测火星气象，考察火星环境，为未来探测提供参考	1997年9月27日结束工作。旅居者号（Sojourner）火星车传回2.3 G数据，16 500张着陆器拍摄的照片，550张火星车拍摄的照片，15组岩石和土壤的化学分析数据，广泛的风和天气数据。分析结果表明，火星曾经温暖湿润，有液态水和较浓密的大气，显示火星大量类似古河道的证据，频繁的尘卷风使沙尘进入大气，早晨低层大气有水冰云，上午气温波动剧烈
火星奥德赛（Mars Odyssey）	2001年4月7日发射，2001年10月24日进入火星轨道	NASA	轨道器	基于探测数据，评估火星是否适合生命存在，了解火星气候和地质概况，研究辐射对宇航员的潜在危险	目前在工作，NASA工作最长的火星探测器。发现火星地下含有丰富的氢，可能以水的形式存在
火星快车（Mars Express Orbiter）	2003年6月2日发射，2003年12月25日进入火星轨道	欧洲空间局（European Space Agency, ESA）	轨道器	获取火星高分辨率（10 m）地质图像，高分辨率（100 m）矿物学制图，研究火星浅层地下结构、大气循环、大气与表面和星际介质的相互作用	目前在工作。轨道器正常工作，Beagle 2着陆器失联，欧洲空间局第一个地外行星探测器。发现北极附近环形山底部一块水凝结成的冰，极光现象，近期冰川活动，火山爆发，以及甲烷气
火星探测漫游者—勇气号火星车（Mars Exploration Rover- Spirit, MER）	2003年6月10日发射，2004年1月4日着陆火星	NASA	火星车巡视探测	机器人地质学家。借助仪器开展地质调查工作，包括照相、岩石取样和分析。通过在岩石和土壤中寻找水存在的证据等数据，帮助确定生命存在的可能性，了解气候和地质特征，为载人火星探测提供资料	“勇气号”于2004年1月4日到达火星表面，2010年3月22日结束工作；“机遇号”于2004年1月25日着陆火星表面，2019年2月13日结束工作。最重大的科学发现是土壤中的二氧化硅，是曾经有水的有力证据，另外发现土壤中有硫酸盐存在，是咸水曾经存在的证据。在岩石中发现溴、硫和氯，可能被水深度改性
火星探测漫游者—机遇号火星车（Mars Exploration Rover-Opportunity, MER）	2003年7月7日发射，2004年1月25日着陆火星	NASA	火星车巡视探测		
火星勘测轨道器（Mars Reconnaissance Orbiter, MRO）	2005年8月12日发射，2006年3月10日进入火星轨道	NASA	轨道器	借助目前行星探测计划中最先进的相机，提供火星表面形貌最清晰的细节。增进对火星气候、塑造星球的各种过程以及水在这些过程中的作用，确认一些地方的水的存在，判读有利于生物活动甚至生命的环境，确定未来火星着陆点	目前在工作。发现大量水合二氧化硅，表明液态水在表面持续存在的时间可能要比之前认为的长10亿年，在支持生命的环境中扮起重要作用。在碎石表层下广泛埋藏着冰层
凤凰号火星着陆器（Phoenix Mars Lander）	2007年8月4日发射，2008年5月25日着陆火星	NASA	着陆器	主要任务是寻找火星北极地区的生命宜居性。寻找水存在的证据，分析土壤样品成分，确定土壤中是否存在有机化合物，判读现在和过去的环境是否适宜生命存在	“凤凰号”着陆器于2008年5月25日着陆，2008年11月2日结束工作。发现北极土壤中的盐分，被认为是过去生命的养分，碳酸钙等矿物形式表明曾有水的参与，土壤中氧化性极强的高氯酸盐表明过去严酷的环境，鉴别出土壤样品有水蒸气，确认火星有水，几百万年前气候更湿润温暖

续表3

探测器名称	时间	国家/机构	探测类型	计划探测任务	主要工作与重要科学发现
火星科学实验室—好奇号(Mars Science Laboratory-Curiosity, MSL)	2011 年 11 月 26 日发射,2012 年 8 月 6 日着陆火星	NASA	火星车巡视探测	NASA 火星实验室计划的一部分,核心任务是寻找水和生命的证据。探寻生命证据,分析气候特征,开展地质调查,为载人火星探测做准备	目前在工作。借助目前最大和功能最强的火星车,发现湖泊遗迹,探测到 7×10^{-6}甲烷,打钻发现有积碳颗粒,火星岩石中存在氮化物。提供了早期生命的证据,如液态水、组成生命的关键元素、化学能源及酸度和盐度比较适中的水
曼加里安号火星轨道器(Mangalyaan)	2013 年 11 月 5 日发射,2014 年 9 月 24 日进入火星轨道	印度空间研究组织(ISRO)	轨道器	主要科学目标是探测火星表面形貌、地质结构与物质成分、大气环境、大气成分、大气氘氢比例、甲烷、热点和冰雪	轨道器携带 5 台科学仪器:莱曼 α 光度计(LAP)、火星甲烷传感器(MSM)、火星大气层中性成分分析仪(MENCA)、火星彩色照相机和热红外成像光谱仪
梅文号(MAVEN,火星大气与挥发物演化)	2013 年 11 月 18 日发射,2014 年 9 月 22 日进入火星轨道	NASA	轨道器	研究火星大气中的气体逃逸在火星演化中的作用,探测火星大气与气候的变化历史、液态水及其宜居性	目前在工作。目前的发现揭示了火星大气的散逸速率、路径及其演化史;在形成后不久,火星上的生命已不复存在
火星生物学探测计划 2016(ExoMars 2016 Mission)	2016 年 3 月 14 日发射,2016 年 10 月 19 日进入火星轨道	ESA、俄罗斯联邦空间局(Roscosmos)	轨道器+着陆器	主要目的是探测甲烷和其他大气痕量气体,作为活跃的生物和地质过程的证据。目前在工作	包括痕量气体轨道器和着陆器。痕量气体轨道器于 2016 年 10 月 19 日进入火星轨道,Schiaparelli 着陆器于 2016 年 10 月 16 日从轨道器释放,19 日失联。科学探测于 2017 年 12 月开始
洞察号火星着陆器(InSight)	2018 年 5 月 5 日发射,2018 年 11 月 26 日着陆火星	NASA	着陆器	NASA 发现探测计划的一部分,通过研究火星内部结构与过程,理解类地行星的演化,确定当前火星的构造活跃程度以及流星的撞击率	目前在工作,计划于 2020 年 11 月结束主要工作

表 4　可用于火星风沙地貌研究的主要探测仪器与探测资料类型(近 20 年)

Table 4　The main detective instruments and data that can be used to study the Martian aeolian landforms (nearly two decades)

探测仪	搭载探测器	特点及技术参数
α 粒子激发 X-射线谱仪(Alpha Proton X-ray Spectrometer, APXS)	火星探路者(MPF, 1997)、火星探测漫游者(MER, 2004)、火星科学实验室:好奇号(MSL, 2012)	精确测定岩石和土壤的元素组成
大气结构仪器/气象包(Atmospheric Structure Instrument and Meteorology Package, ASI/MET)	火星探路者(MPF, 1997)	获取着陆器降落和着陆之后的火星大气信息,重建表面之上超过 100 km 的大气密度、温度和气压廓线
热辐射光谱仪(Thermal Emission Spectrometer, TES)	火星全球勘测者(MGS, 1997)	通过测定可见光和红外光谱,研究火星表面矿物
火星轨道激光高度计(Mars Orbiter Laser Altimeter, MOLA)	火星全球勘测者(MGS, 1997)	制作表面高程图,精度在 30 m 内
火星轨道相机(Mars Orbiter Camera, MOC)	火星全球勘测者(MGS, 1997)	广角镜头用于制作日天气卫星图,显示地表特征和云,分辨率为 7.5 km;窄角镜头分辨率为 2~3 m
磁强计电子反射计(Magnetometer/Electron Reflectometer, MER)	火星全球勘测者(MGS, 1997)	探寻磁场的存在与强度,以及古磁场的残余
热辐射成像系统(Thermal Emission Imaging System, THEMIS)	火星奥德赛 2001	通过测定可见光和红外光波,研究火星表面矿物
火星辐射环境试验仪(Martian Radiation Environment Experiment, MARIE)	火星奥德赛 2001	研究飞往火星途中和火星轨道的辐射环境
γ 射线谱仪(Gamma Ray Spectrometer, GRS)	火星奥德赛 2001	通过探测表面发射的 γ 射线和中子,测定火星表面的元素组成
高分辨率立体彩色相机(High Resolution Stereo Camera, HRSC)	火星快车(2003)	火星表面成像

续表4

探测仪	搭载探测器	特点及技术参数
红外矿物成像光谱仪(Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité(Visible and Infrared Mineralogical Mapping Spectrometer, OMEGA)	火星快车(2003)	探测火星表面组成和演化过程
行星傅立叶光谱仪(Planetary Fourier Spectrometer, PFS)	火星快车(2003)	探测火星大气组成
火星大气特征探测光谱仪(Spectroscopy for Investigation of Characteristics of the Atmosphere of Mars, SPICAM)	火星快车(2003)	研究火星大气组成与循环
火星地下电离层雷达(Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding, MARSIS)	火星快车(2003)	探测火星地下水
空间等离子体高能原子分析仪(Analyzer of Space Plasmas and Energetic Atoms, ASPERA)	火星快车(2003)	探测太阳风如何剥蚀火星大气
无线电科学实验系统(Mars Radio Science, MaRS)	火星快车(2003)	探测内部结构、大气和环境
全景相机(Panoramic Camera, PANCAM)	火星探测漫游者(MER, 2004)	全彩色成像,岩石和大气光谱分析,1 028像素×1 028像素,原点全景照片24帧×4帧
微型热辐射光谱仪(Miniature Thermal Emission Spectrometer, Mini-TES)	火星探测漫游者(MER, 2004)	通过167种颜色测量红外线辐射的亮度
穆斯堡尔谱仪[Moessbauer(MB) Spectrometer]	火星探测漫游者(MER, 2004)	精确测定含铁矿物的组成与丰度,表层物质的磁性特征
显微成像器(Microscopic Imager, MI)	火星探测漫游者(MER, 2004)	拍摄岩石和土壤的特显黑白照片,获取岩石细微特征信息
高分辨率成像科学实验(High Resolution Imaging Science Experiment, HiRISE)	火星勘测轨道器(MRO, 2006)	可见光成像,扫描带宽6 km,空间分辨率0.30 m,彩色立体相对高度分辨率为0.25 m
小型火星勘测成像光谱仪(Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars, CRISM)	火星勘测轨道器(MRO, 2006)	可见光和红外线彩色成像,探测重要矿物,分辨率可达18 m,全球成像分辨率100~200 m
背景相机(Context Camera, CTX)	火星勘测轨道器(MRO, 2006)	可见光成像,扫描带宽30 km,分辨率6 m
火星彩色成像仪(Mars Color Imager, MARCI)	火星勘测轨道器(MRO, 2006)	可见光和红外线成像,全视野覆盖,空间分辨率1~10 km可选
火星气候探测仪(Mars Climate Sounder, MCS)	火星勘测轨道器(MRO, 2006)	水平和垂直探测大气分层结构,分辨率5 km,探测高度80 km
浅层地下雷达(Shallow Subsurface Radar, SHARAD)	火星勘测轨道器(MRO, 2006)	探测深度1 km,可辨别不同组成和物理状态(如液态水)的地层,地层分辨率可达10 m
机械臂相机(Robotic Arm Camera, RAC)	凤凰号(2008)	拍摄4个方面的全彩色特显照片,即火星表面、土壤和水冰样品、采样铲中的样品、探沟侧壁底层与构造
表面立体成像仪(Surface Stereoscopic Imager, SSI)	凤凰号(2008)	拍摄火星北极的全彩色全景高分辨率立体照片
热逸出气体分析仪(Thermal and Evolved Gas Analyzer, TEGA)	凤凰号(2008)	高温炉和质谱仪的组合,分析火星冰和土壤样品
显微术电化学与传导分析仪(Microscopy, Electrochemistry, and Conductivity Analyzer, MECA)	凤凰号(2008)	测定酸度、盐度和组成等重要土壤性质
气象站(Meteorological Station, MET)	凤凰号(2008)	记录火星北部平原区日天气情况
桅杆相机(Mast Camera, Mastcam)	火星科学实验室:好奇号(MSL, 2012)	两台功能互补的高像素彩色相机,显示火星车周围的细微特征,其中Mastcam100长焦镜头分辨率为1 600像素×1 200像素,Mastcam 34镜头在2 m处的分辨率为450 μm
火星机械臂透镜成像仪(Mars Hand Lens Imager, MAHLI)	火星科学实验室:好奇号(MSL, 2012)	全彩色可调焦相机,在距目标物最近处(21 mm),拍摄的照片分辨率达14 μm,视野22 mm×17mm
火星降落成像仪(Mars Descent Imager, MARDI)	火星科学实验室:好奇号(MSL, 2012),凤凰号(2008)	拍摄火星车落地前最后几分钟表面的视频,每秒4帧,分辨率1 600像素×1 200像素
化学相机(Chemistry and Camera, ChemCam)	火星科学实验室:好奇号(MSL, 2012)	应用激光诱导击穿光谱技术,确定岩石和土壤的组成,包括水

续表4

探测仪	搭载探测器	特点及技术参数
化学与矿物实验仪(Chemistry and Mineralogy, CheMin)	火星科学实验室:好奇号(MSL, 2012)	应用X射线衍射法,分析岩石和土壤粉末样品
火星样品分析仪(Sample Analysis at Mars, SAM)	火星科学实验室:好奇号(MSL, 2012)	探测微弱的有机物痕迹,并分辨其种类,提供生命和过去环境信息
火星车环境监测站(Rover Environmental Monitoring Station, REMS)	火星科学实验室:好奇号(MSL, 2012)	记录火星天气日变化和季节变化信息,包括风速、风向、气压、相对湿度、气温、表面温度和紫外线
辐射评估探测器(Radiation Assessment Detector, RAD)	火星科学实验室:好奇号(MSL, 2012)	监测来自太阳、远超新星和其他物体的高能原子和亚原子,评估生命存在的条件。
中子反照率动态探测器(Dynamic Albedo of Neutrons, DAN)	火星科学实验室:好奇号(MSL, 2012)	探测火星车运行路径上的浅层(0.5 m)地下矿物中的水
太阳高能粒子仪(Solar Energetic Particle, SEP)	梅文号(MAVEN, 2013)	测定太阳风暴、耀斑和日冕物质喷射释放的高能氢和氦离子
太阳风粒子分析仪(Solar Wind Ion Analyzer, SWIA)	梅文号(MAVEN, 2013)	测量未受扰动的星际介质以及进入火星大气环境时太阳风离子的密度、温度和速度
超热与热离子组分探测装置(SupraThermal and Thermal Ion Composition, STATIC)	梅文号(MAVEN, 2013)	测量火星上层大气高能离子的组成和速度
郎缪尔探针与波敏感器(Langmuir Probe and Waves, LPW)	梅文号(MAVEN, 2013)	包括郎缪尔探针与波传感器和另外一个测量来自太阳的极强紫外线传感器,测量电离层电子的温度
太阳风电子分析仪(Solar Wind Electron Analyzer, SWEA)	梅文号(MAVEN, 2013)	测量具有中程能量电子的能量与角分布
磁强计(Magnetometer, MAG)	梅文号(MAVEN, 2013)	提供探测器穿行太阳风、电离层的磁环境,或磁化地壳区域的磁场环境信息
中性气体离子质谱仪(Neutral Gas and Ion Mass Spectrometer, NGIMS)	梅文号(MAVEN, 2013)	测量火星上层大气中性气体和热离子的组成,并根据电荷和同位素质量进行分选
紫外光谱成像仪(Imaging UltraViolet Spectrograph, IUVS)	梅文号(MAVEN, 2013)	应用紫外线测量火星上层大气的组成和氢原子逃逸火星的速度
天底/掩星火星探测光谱仪(Nadir and Occultation for MArs Discovery, NOMAD)	火星生物学探测计划2016(ExoMars 2016)	监测大气组成与温度的季节变化
大气化学探测包(Atmospheric Chemistry Suite, ACS)	火星生物学探测计划2016(ExoMars 2016)	探测大气痕量气体的详细清单
彩色表面立体相机(Colour and Stereo Surface Imaging System, CaSSIS)	火星生物学探测计划2016(ExoMars 2016)	与痕量气体源有关的火星表面特征成像与表征
高分辨率超热中子探测器(Fine Resolution Epithermal Neutron Detector, FREND)	火星生物学探测计划2016(ExoMars 2016)	探测深达1 m的地下氢,从而推测浅层地下伏水冰的存在
内部结构地震实验仪(Seismic Experiment for Interior Structure, SEIS)	洞察号(InSight, 2018)	测量火星内部活动引起的震动,从而认识地壳、地幔和地核的特征
热流和物理特性包(Heat Flow and Physical Properties Package, HP^3)	洞察号(InSight, 2018)	测量火星温度,从而得知有多少热量从火星深部流出
自转和内部结构实验仪(Rotation and Interior Structure Experiment, RISE)	洞察号(InSight, 2018)	测量火星北极受太阳推拉在其轨道上的晃动,从而推测火星金属核的大小和组成

2.2.1　遥感影像有关概念

电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)。影像传感器的核心器件,由美国贝尔实验室(Bell Labs)Boyle W. S.和Smith G. E. 1969年发明。它是一种特殊半导体器件,将光电效应在器件表面产生的电荷,直接将光学信号转换为模拟电流信号,组成数位影像,电流信号经过放大和模数转换,实现图像的获取、存储、传输、处理和复现。经过50多年的发展,CCD已广泛应用于数码摄影、天文学,尤其是光学遥测技术、光学与频谱望远镜和高速摄影技术。

(1)像素。Picture elements,简写为pixels,是指在由一个数字序列表示的图像中的一个最小单位,对应于CCD的一个感光元件,即芯片,一个芯片由

被一层二氧化硅绝缘层隔开的一层金属电极和一层硅晶体组成,在用作成像系统时,芯片排列成图像元素数组,依芯片排列方式分为线阵CCD和面阵CCD两类。像素数是CCD的主要性能标准,决定了显示图像的清晰程度。像素可以用一个数字表示,如30万像素;也可以用一对数字表示,如640像素×480像素表示横向640像素和纵向480像素,其总数为640×480=307 200像素。

(2)*像素比例尺与空间分辨率*。像素比例尺是指图像的每个像素对应的地面实物的大小,与成像系统的镜头投射到影像上的大小有关,取决于相机的光学性能、拍摄距离和每个像素的大小,可表示为每个像素的长度,如每像素10 m,意为地面10 m的物体被传感器注册为一个像元亮度值(Digital Number,DN)。空间分辨率比像素比例尺更复杂,是遥感图像上能够详细区分的最小单元的尺寸或大小,是用来表征影像分辨地面目标细节的指标,是评价传感器性能和遥感信息的重要指标之一,也是识别地物形状大小的重要依据。目标物与背景的对比度与形状、探测器对地表结构和组成的响应性以及目标物相对像素比例尺的大小均影响空间分辨率。因此,像素比例尺和空间分辨率是两个不同但经常被混淆的参数。

(3)*图像处理*。从遥感影像上获取尽可能多的准确信息需要借助图像处理技术。遥感图像处理技术是对遥感图像进行辐射校正和几何纠正、图像整饰、投影变换、镶嵌、特征提取、分类以及各种专题处理等一系列操作,以期达到预期目的。遥感图像处理可分为两类:一是利用光学、照相和电子学的方法对遥感模拟图像(照片、底片)进行处理,简称光学处理;二是利用计算机对遥感数字图像进行一系列操作,从而获得某种预期结果的技术,称为遥感数字图像处理。随着计算机技术的发展,计算机处理技术已经越来越多地应用于遥感图像处理中,数字处理方法操作简单,能够很容易地构建满足特定任务的遥感图像处理系统。同时随着计算机硬件和软件技术的发展,处理效率越来越高,可以准确地提取所需要的遥感信息,同时还可以和其他计算机系统(如地理信息系统和GPS系统)无缝集成,形成3S技术的综合应用。目前来说,遥感图像数字处理方法已经逐步取代光学方法,成为遥感图像处理的主流技术手段。

2.2.2 主要火星遥感影像类型

风沙地貌研究始于形态的认识,20世纪70年代以来各种探测计划获取的多种遥感影像为认识火星风沙地貌形态、类型、分布规律与发育环境提供了关键信息,也极大地助推了其他方面,如形成过程和风沙沉积学的研究。火星遥感影像已覆盖全球,部分地区甚至有分辨率在1 m以下的高分辨率影像(表5)。

2.3 地球化学与地球物理探测资料

火星探测不仅提供研究风沙地貌形态的遥感影像,而且提供了研究其形成过程、沉积学和发育环境的大气、表面和近表面物质组成甚至深部的数据,即地球化学和地球物理等探测数据。

2.3.1 光谱分析

鉴定火星大气圈及其表面化学成分最主要的方法是光谱分析,由于每种原子都有自己的特征谱线,就像人的指纹,因此可以根据光谱来鉴别物质和确定其化学组成,从而产生了光谱分析法。这种方法的优点是非常灵敏而且迅速,10^{-10} g元素含量就可以从光谱中发现其特征谱线,在科学技术中有广泛的应用。在历史上,光谱分析帮助人们发现了许多新元素,对研究天体的化学组成也很有用。19世纪初在研究太阳光谱时发现,它的连续光谱中有许多暗线,对照各种原子的特征谱线,人们得知太阳大气层中含有氢、氦、氮、碳、氧、铁、镁、硅、钙和钠等几十种元素。按波长区域不同,光谱可分为红外光谱、可见光谱和紫外光谱。目前关于火星大气、表面以及近表层元素和矿物的组成几乎都来自光谱探测,所以光谱仪是火星探测计划中必备的仪器。历次火星探测计划搭载了各种光谱分析仪(表4),探测大气、岩石和土壤的化学和岩石组成。

2.3.2 多光谱和高光谱数据

由多个数据层组成的光谱数据,每个数据层代表在某个特定波长范围获取的数据。不同地物有不同的光谱特性,其在不同波段的辐射能量有差别。矿物的晶体结构在暴露于电磁能量时呈现独特的特征,在可见光和近红外区,晶体吸收能量,形成可诊断特定矿物或矿物组的吸收带。多光谱光谱仪利用这一现象,使用响应特定吸收波段的滤波器和探测器,测量反射能量随波长的变化,将地物辐射电磁波分割成若干个较窄的光谱段,在同一时间获得同一目标不同的波段信息。分谱段的图像或数据可以通过摄影彩色合成或计算机图像处理,获得比常规方法更为丰富的图像,也为地物影像计算机识别与分类提供了可能。光谱分辨率在λ/10数量级范围的称为多光谱,这样的遥感器在可见光

表 5　火星风沙地貌研究采用的遥感影像及其特征

Table 5　The remote sensing images and characteristics in Martian aeolian geomorphology

遥感影像类型	主要特征指标
MOLA（Mars Orbiter Laser Altimeter）	一个二极管端泵浦1.06 μm Nd:YAG激光发射器和一个0.5 m直径抛物线型接收器，测距精度0.37 m，水平分辨率约300 m。最新全球地形栅格分辨率0.015625°×0.015625°
MOC（Mars Orbiter Camera）	由一个窄角相机，378 km高度的成像分辨率达1.4 m。两个推扫式广角相机，成像分辨率230 m至7.5 km
HRSC（High Resolution Stereo Camera）	一种多传感器扫描仪，由多个平行安装的CCD线传感器组成，提供全球分辨率为10 m的全彩色、3D影像，部分地区影像分辨率达2 m
HiRISE（High Resolution Imaging Science Experiment）	集成高分辨率、高信噪比和宽带幅成像，提供全色和彩色图像，彩色影像宽度达4 048像素，像素比例尺小于1 m，部分地区分辨率达1~2 m，个别地区影像和立体相对分辨率20 000 pixel × 126 000 pixel，生成的数字高程模型，高度精度0.25 m以下
CTX（Context Camera）	与HiRISE和CRISM一起组成一套功能强大的遥感探测设备，提供HiRISE和CRISM高分辨率影像和分析的周围背景黑白（灰度）影像，5 064 pixels宽×多种长度，300 km高度的成像分辨率达6 m，带幅宽30 km
MARCI（Mars Color Imager）	有2个相机，其中一个为广角相机，提供火星日全球图像，另一个为中角相机，提供个别地区每像素40 m的影像。像素分辨率为1~10 km，可在5个可见波段和2个紫外波段观查火星表面。用于调查沙尘暴、极地霜、水汽云、水冰和二氧化碳冰晶的出现和消退
CRISM（Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars）	300 km高度的成像分辨率达18 m/pixel，波谱范围0.37~3.92 μm，波段数544个。用于识别指示火星表面过去或现在存在水的矿物和化学物质

注：搭载的平台参照表2和表4

和近红外光谱区只有几个波段；而光谱分辨率在λ/100时称之为高光谱；光谱分辨率达到λ/1000时称之为超高光谱。

2.3.3　*多层数据*

包含多个被测物理量的数据。在火星光谱或成像探测中，在某个像素覆盖的区域，可能存在多个被测物理量，每个被测物理量可以生成一层包含特定信息的数据，就产生了多层数据，每个物理量是多层次数据中的一层。多层数据还可以由不同传感器获得的数据及附属数据的叠加形成。例如，在研究地貌时，为了同时表现地貌特征和起伏特征，通常会选择高空间分辨率影像数据和高程数据。

2.3.4　*热辐射数据*

物体因热或能量产生波长0.5~300 μm电磁波辐射，可以被探测器记录为数据文件或转为图像，以电磁波的方式向外传递热量受许多复杂因素的影响，包括物质的组成与结构，了解表面物质能量传输的物理机制能够帮助人们辨识岩石和粒度组成等。所以，热辐射探测仪被应用于地球和行星探测中，火星全球勘测者搭载的热辐射光谱仪使人们对火星表面的认识发生革命性的提升。

2.3.5　*雷达成像数据*

雷达探测的波长在微波范围内，对云雾、小雨、植被及干燥地物有一定的穿透性，且主动发射电磁波，具有不依赖太阳光照及气候条件的全天时、全天候对地观测能力。雷达遥感探测数据为成像数据，通过调节最佳观测视角，其成像的立体效应可以有效地探测目标地物的空间形态特征。利用岩石的表面粗糙度、风化特点和地貌形态，在雷达图像上可识别和分析岩石类型。雷达成像对大面积的地表地形变化很敏感，如断层、裂隙、沙丘、成层岩石和露头，这类地表特征常常会引起地貌、覆盖类型和粗糙度的明显变化。合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar，SAR）的侧视成像对地表几何形态的敏感，可对地质构造探测形成立体感较强的图像，从而能直观地分析地质构造，揭示构造现象。主动发射电磁波的工作方式，能使特定延伸方向的构造得到增强并得以发现。雷达还能够探测地下不同沉积单元的界线，显示岩层的沉积构造，被成功地应用于沙丘沉积构造的研究中[23]。EAS的火星快车和美国NASA的火星勘查轨道器均搭载了成像雷达。

2.3.6　*紫外线、X-射线、γ-射线数据*

波长较短的电磁波具有穿透能力强的特点，被

用于探测大气和岩石的化学组成。紫外线是电磁波谱中波长为10~400 nm 辐射的总称，不能引起人们的视觉。在该波段电磁波能量受气体的影响强烈，所以紫外线被用以研究行星大气和缺乏大气的地表，能够提供颗粒组成和冰冻等地表的物理特征的信息。梅文号火星探测器搭载的紫外光谱成像仪用以测量火星上层大气的组成和氢原子逃逸火星的速度。X-射线是一种波长0.001~10 nm的电磁波，X-射线光谱可用于诊断铝、硅和镁等元素。火星探路者、火星探测漫游者和火星科学实验室：好奇号均搭载X-射线光谱仪，精确测定岩石和土壤的元素组成。γ射线，又称γ粒子流，是波长小于0.001 nm的电磁波，是由放射性衰变和来自深空的宇宙射线轰击表面产生的，伽玛射线光谱仪测量这种能量，可以用来绘制一些元素的分布，如钛。

2.3.7 磁场探测

火星磁场分布、重力场、电导率分层、地震波速度以及内部热通量等物理特征是研究火星内部结构、物质组成和演化历史的重要手段。火星磁场是火星主要观测物理场之一，研究火星磁场的起源与变化为理解风沙地貌发育的火星环境与演化背景提供更广泛的参考资料。磁场的时空变化探测与其他表面探测相结合，可推测火星演化过程的重要事件，所以大多火星探测计划都包括磁场探测，甚至是早期探测的主要科学目标。美国NASA戈达德太空飞行中心（Goddard Space Flight Center）研究人员根据5.5个地球年的磁场探测数据，推测古代火星具有较强的磁性，证明火星最初5亿年期间的板块构造学说[24]。没有磁场保护，火星暴露于太阳风的完全灼烧下，大气层被缓慢地侵蚀，直至削弱成仅包裹着气体残留物为止，随后恶劣的气候变化很快到来，促使火星表面逐渐转变成现今的荒芜模样，因此火星磁场的消失研究可以为揭示火星地质、内部和大气演化提供重要线索。

2.3.8 重力探测

火星重力场是表面形貌、质量分布和内部物理结构的综合反映，通过重力场数据结合表面形态数据，可以反演内部结构[25]。重力探测是利用组成地壳的各种岩矿体的密度差异而引起的重力变化而进行地质勘探的一种方法，是地球物理勘探方法之一。只要勘探地质体有一定的剩余质量，埋藏深度较小，地形起伏影响较小，就可用精密重力仪器测出重力异常。结合地质资料，对重力异常进行定性或定量解释，推断覆盖层以下密度不同的地质体的组成、结构及其与地表特征的关系。但是，目前对火星重力场尚未直接探测，主要是基于地面测站轨道跟踪数据，结合轨道动力学理论，在对火星探测器进行紧密定轨的同时，解算火星重力场模型位系数，建立相应的重力场模型。火星偏离标准圆球具有各向异性，并且表面形态和物质差异使其表面拓扑结构和质量分布显示出不同的变化，导致环绕火星飞行的卫星实际轨道与预测轨道存在差异，这种差异反映了火星重力异常分布[26]。

3 模拟研究

自 Bagnold R. A. 开创了风沙动力学的风洞模拟实验以来，模拟实验一直是风沙地貌学研究的重要组成部分，在风沙颗粒运动学、风沙输移模型和床面形态—气流相互作用研究方面发挥了重要作用。20世纪80年代以来发展起来的数值模拟研究是风沙地貌研究的重要方向，在无法实施野外研究的情况下，模拟研究在火星风沙地貌研究中发挥更为重要的作用，除了模拟风沙地貌的形成过程之外，还可以模拟火星环境，具有深远的意义。

3.1 物理模拟

20 世纪 80 年代以来，美国、欧洲和日本相继建设了火星风洞，用于研究飞行器在火星大气中的表现。在探测到火星沙尘暴和其他风成过程之后，人们迫切的想知道火星上的风是如何起动风沙运动的。在大多数情况下，研究者们试图通过改变Bagnold方程，如颗粒起动方程和输沙率模型方程中的参数来估算火星风沙颗粒的起动风速，但该方法遇到的最大问题是火星与地球之间显著的气压和温度差别，导致估算结果相差甚远，于是火星风洞模拟研究应运而生。

（1）美国NASA Ames研究中心火星表面风洞

美国NASA Ames中心于1976年建造了一座火星表面风洞（Mars Surface Wind Tunnel，MARSWIT）[27]，工作原理是高压空气引射的驱动方式。该风洞为直流式边界层低密度风洞，总长14 m，由等长度2.4 m的5段组成，外加一个1 m长的锥形入口。第三段为试验段，横截面1.2 m×0.9 m。第1段前端安装有整流装置，第四段和第五段为扩散段。第四段末端安装有高压空气引射装置，其上有72个等距分布的小孔喷管，每个喷管有82°的圆锥扩散角，高压空气通过这些喷管进行引射驱动。风洞使用的气体为空气和二氧化碳，密度范围为0.01~1.24 kg/m³，范围的下限值相当于火星表

面的大气密度。在风洞工作大气压 500 Pa 时风速最高可达到 180 m/s。

MARSWIT 所需的低气压环境利用 Ames 研究中心于 20 世纪 60 年代早期建造的低压室，曾被用于低气压条件下火箭结构和声学测试试验，之后被废弃。该低压测试室为五角形的混凝土塔，位于 N-242 建筑内，体积 4 058 m^3，风洞放置于底层区域的中心。由 N-234 建筑内的五级喷射泵通过一个直径 0.60 m 的管道对测试室抽空，抽空到 300 Pa 需要约 45 min。驱动风洞的高压空气由辅助空气供应系统提供。

MARSWIT 的目的是通过地面模拟试验去解释"水手号"和"海盗号"火星探测器接收到的数据，开展的研究工作主要有：模拟"火星探路者"着陆器降落伞减速过程，模拟火星尘暴和尘卷风条件下的耐压太空服评估试验、火星表面尘暴、表面风对探测器表面沙尘的聚集和吹除作用。

（2）日本东北大学火星风洞

日本东北（Tohuko）大学于 2007 年建造了模拟火星大气环境的低密度火星风洞（Mars Wind Tunnel，MWT）[28]。该风洞为直流吸入式风洞，总长度 3.49 m，由稳定段、收缩段、试验段、第一扩散段、混合段和第二扩散段共 6 段组成。扩散段内设置 1 个蜂窝器和 5 个滤网以减小气流湍流度，收缩段采用 16∶1 的收缩比以减小气流的纵向湍流度。试验段长 0.4 m，截面积 0.1 m×0.15 m，洞壁的阻塞效应控制在 1% 以下，试验段出口处的边界层厚度 3.5 mm（大气条件：气压 1 kPa，气温 15 ℃，马赫数 0.45）。风洞底板和顶板扩散角 1.3°，以补偿试验段轴向边界层变化。风洞工作压力范围 1~20 kPa，工作气体温度−73~27 ℃，雷诺数范围 10^4~10^5，马赫数最高可达 0.71，湍流度小于 0.5%。风洞工作气体为空气和二氧化碳，通过喷射液态的二氧化碳来冷却气体以模拟火星上真实的大气温度。风洞的引射装置的原理与 MARSWIT 风洞一样，其上面有 30 个等距分布的喷管，位于第一扩散段的末端。MWT 风洞采用铝合金材料制造，被放置于一个长 5 m、内径 1.8 m 的圆柱形真空容器中，主要由真空箱、缓冲罐和连接管上的蝶形阀等组成。MWT 主要用于开展基础科研工作，建成后开展了日本宇宙航空研究开发机构（Japan Aerospace Exploration Agency，JAXA）火星探测飞船的低雷诺数翼型试验研究。

（3）丹麦 Aarthus 风洞模拟器

丹麦 Aarthus 大学火星模拟风洞是欧洲空间局和欧盟资助的用于研究火星环境的特色实验装置，能够提供关键物理参数，如温度、大气压及其组成、风、特别是尘粒的悬浮。2000 年，丹麦 Aarhus 大学火星模拟实验室建设了一个小火星风洞 AWTS（Aarhus Wind Tunnel Simulator）[29]。风洞为循环式，0.4 m 直径×1.5 m 长，最大风速可达 20 m/s，湍流度可控制在 5% 以下。风洞置于一个 0.8 m 直径×3 m 长的真空管中，抽空至 3 Pa 后，再增压至火星大气压，通过液氮冷却得到所需要的低温条件。小火星风洞可以模拟火星大气压力、温度、气体组分和可见紫外线 UV 光条件，模拟火星地表风速和尘埃环境。

2009 年，在欧盟和欧空局的资助下，Aarhus 大学建设了另外一座大火星风洞[30]——新火星模拟设施（New Mars Simulation Facility）[31]，风洞由风扇抽吸段、试验段和来流稳定段 3 个部分组成，风扇抽吸段包含 2 个直径 1.8 m 的风扇；试验段 2 m×1 m，气流经试验段后从上、下回路流回，试验风速 1~25 m/s，来流稳定段长 5 m。气流用液氮系统冷却至−150 ℃，也可以用电加热器系统加热，整个风洞壁采用真空夹层隔热，能够模拟火星表面的温度、气体组分、压力、速度和悬浮尘埃粒子等[30]。风洞置于一个真空罐中，并与真空罐热隔离，有一个服务器控制系统控制风、温度、大气压、照明和数据采集。已支持了欧洲行星（Europlanet）跨国研究项目的若干研究团队的研究，如针对火星极区 CO_2 冰光学特征的 CO_2 冰形成研究，火星悬浮尘粒的光学散射特征研究，还用于行星着陆系统和传感器的研发、试验和标定。

（4）美国 NASA Lewis 中心高空风洞

美国 NASA Lewis 中心于 20 世纪 40 年代建造了高空风洞（Altitude Wind Tunnel，AWT）[32]，是用于开展推进系统研究的低速风洞，能够模拟高空低压低密度低温环境[27]。80 年代改造后，成为一座用于全尺寸推进系统高空性能测试和不利天气条件下飞机操纵性能研究的风洞。

AWT 风洞为闭口试验段回流式风洞，长 80.2 m，宽 36.9 m。改造前试验段截面为圆形，直径 6.1 m，试验段长 12.2 m，改造后试验段截面为八边形，其平行边的间距 6.1 m，长 16.8 m，稳定段直径 15.6 m，收缩比 6.5，可以模拟高空的大气压力、密度、温度和流气场环境，风洞马赫数为 0~0.9、模拟范围从海平面到 16.8 km 高空、温度范围−40~15.6 ℃。可以进行空气动力学试验、气体热力学试验、气动

声学试验、结冰试验、降雨试验、全尺寸推进系统高空环境测试试验等。AWT风洞是一个庞大的实验室系统，附属建筑包括动力系统厂房、冷却系统厂房和真空抽气厂房等。

3.2 数值模拟

在无法实施野外研究的情况下，随着计算机技术的发展，数值模拟研究在火星风沙地貌研究中发挥着重要的作用。目前，模拟主要集中在火星大气、沙粒跃移运动、风沙流结构以及沙丘动力学特征方面。

（1）*火星大气流场模拟*。最早模拟火星大气的环流模型（General Circulation Models，GCMs）建立的基础与地球大气环流模型相似，在欧拉坐标系下，联立求解大气质量连续方程、运动方程、热力学方程和状态方程，此模型适用于大尺度环流模拟[33,34]。对于火星中、小尺度环流特征的模拟研究，研究者们近年来建立了火星区域大气环流系统的模型（Mars Regional Atmospheric Modeling System，MRAMS），此模型用平均变量来代替GCMs中的变量，同时考虑气流的扩散项、位温的透热源以及火星大气中主要成分CO_2和尘埃的源或汇等[35,36]。大气流场模拟结果可以很好地帮助我们理解火星风沙地貌形成演变的动力环境。

（2）*沙粒跃移运动与风沙流结构模拟*。Almeida等[37]利用FLUENT软件包模拟了二维条件下火星沙粒跃移运动的轨迹以及饱和输沙率与风速的关系。模型假定流体为不可压缩流体，运用二维质量守恒方程和雷诺平均后的Navier-Stokes动量方程，采用$k-\varepsilon$闭合方案和初始风速对数廓线规律，然后将此流体模型与沙粒运动方程相互耦合，同时考虑气流与沙粒之间的反馈作用。在沙粒运动方程中，规定所有沙粒起跳角度保持36°不变，起跳速度为入射速度的0.6倍，且每次从地表溅起的沙粒数目等于入射沙粒数目。沙粒起跳函数是风沙流模拟中一个关键的物理量，在以往的火星风沙流数值模拟研究中，由于缺乏实地测量而采用地球上的实验经验公式，使模拟结果缺乏可信性。针对这一问题，傅林涛[38]提出了一个不依赖于实验结果的沙粒起跳函数，改进粒—床碰撞模型，耦合沙粒运动方程和流体运动方程，模拟了火星风沙流场结构特征及其跃移沙粒运动特性。其主要改进了以下3个方面：①考虑入射沙粒对床面碰撞以后速度恢复系数的影响；②风沙运动中起跳沙粒和入射沙粒的速度与角度是相互关联的，而不是彼此独立；③地表动力粗糙度不仅取决于沙粒粒径，还受来流风速、大气密度以及黏度的影响。

（3）*沙波纹与沙丘动力学模拟*。Landry等[39]假设沙波纹是由沙粒跃移运动形成的，在此基础上利用目标跟踪算法研究了沙波纹的形成机制。在此算法中，规定床面上所有沙粒粒径一致，且保持不变。入射沙粒每次从床面上只能击溅起一颗沙粒，被击溅起的颗粒的概率及其起跳角度取决于沙粒周围床面的平均压力梯度，规定所有沙粒的休止角为30°，运算中采用周期边界条件。Pelletier[40]通过耦合沙粒传输元胞自动机模型[41]和改进的低矮沙丘边界层流场解析模型[42]模拟了沙波纹以及横向沙丘的高度和间距的控制因素。这两种模型相互之间的耦合通过床面剪切力实现，在风动力作用下，床面形态发生变化，导致床面剪切力发生相应变化，进一步改变床面的风蚀率和沉降率。Parteli等[43]利用连续模型模拟了不对称新月形沙丘形成的决定因素。此模式主要是基于连续介质理论的观点，将来流风场和近地层风沙流分别处理为稳定不可压的边界层流动和类流体，模型将地形对输沙率的影响与沙丘流场结合起来，用有限元差分法求解沉积物连续方程，沙丘的尺寸取决于风沙流发展的饱和长度，而饱和长度在一定程度上依赖于沙粒跃移运动。

4 类火星风沙地貌研究

虽然无法开展野外现场研究是火星研究的一个关键限制，但无论是火星探测技术还是科学问题的研究，野外试验都是必须的，解决的方法是在地球上选择与火星类似的地方，即类火星试验点（Terrestrial analogues to Mars或Mars analogues），开展类火星研究（analogue Mars research），这也是行星研究普遍采用的方法。所以，在过去的40多年，类火星研究是火星探测与研究的重要内容，主要包括技术研发、机组人员培训和科学试验等，其中前两项是早期试验研究的内容，因为火星探测计划的设计和准备工作必须对探测设备性能进行测试，以及极端环境对宇航员生理和心理的影响。全球许多地方都曾被纳入类火星试验研究的范围，寒冷、干旱、大气稀薄和低大气密度是火星突出的特征，所以，类火星试验点必然是地球上具有极端环境的地方，如低pH值、低温、缺水、强氧化等。智利的阿塔卡玛沙漠是最理想的类火星研究点之一，水分稀缺、紫外线强烈，西班牙力拓（Rio Tinto）具有低pH

值及其相关的地球化学和岩石特征[44]。类火星试验点的目标地区包括沙漠、极地地区和高寒地区，具体地点的选择还必须考虑试验目的及其研究内容。

4.1　生存环境试验

（1）Flashline火星北极研究站（Flashline Mars Arctic Research Station，FMARS）。FMARS是美国火星学会于2000年建立的第一个类火星试验点，位于加拿大北极地区的努勒维特德文岛（Devon Island，Nunavut），鸟瞰形成于3 900万年前的Haughton陨石坑，2007年进行火星和月球机组人员4个月耗水试验[45]。

（2）火星沙漠研究站（Mars Desert Research Station，MDRS）。美国火星学会于2001年在Utah州的沙漠中建立了火星沙漠研究站，主要提供类火星表面环境，特别是类火星地形，以及在火星上生存知识的科普教育与技能培训，培训对象包括研究人员、学生和其他普通大众。

（3）夏威夷太空探索模拟与仿真试验站（Hawaii Space Exploration Analog and Simulation，HI-SEAS）。位于夏威夷大岛鞍部地区莫纳罗亚（Mauna Loa）一侧一个孤立的类似火星的地方，海拔约2 500 m，玄武岩风化物与火星风化壳类似，能进行高保真地质野外工作，主要任务是培训机组人员。

4.2　风沙地貌研究

影响火星风沙地貌的形成因素不同于地球。地球上干旱和极地地区的地貌过程，其影响因素包括风、流水、冰缘、沉积物坡移、冰川、岩石风化、湖泊/海洋、蒸发岩、冰和冰川、火山过程、地质构造、陨击坑和辐射等，基于这些影响因素，干旱荒漠、极地荒漠和高寒荒漠是类火星风沙地貌试验优先考虑的区域。

（1）莫哈韦沙漠/死谷地区（Mojave Desert/Death Valley）。美国加州南部的荒漠是最早被关注的类火星风沙地貌研究试验点[10]，可以追溯至1978年，2001年10月召开专门研讨会，研讨该区作为研究火星高原的类火星试验点的合理性[46]。该区有较好的研究基础和方便的交通与研究条件，更重要的是有与火星类似的地貌过程与地貌类型。许多干盐湖具有古湖泊沉积物和蒸发岩，与火星湖盆类似。这里的风成过程、构造运动和火山作用也与火星高原地区类似。

（2）南极干谷。南极干谷是理想的类火星试验研究点，最大的是McMurdo干谷（78°S，163°E）。干旱和寒冷的气候使其成为研究火星地貌、土壤、水和生物的试验点，其风沙地貌对研究火星风沙地貌极具参考价值。南极大陆95%被冰雪覆盖，干谷是未被冰雪覆盖的裸露部分，沙漠和岩漠是主要景观，另有少量被冰覆盖的湖泊和1年仅流动2个月的河流。这里气候表现为寒漠，年降水量约100 mm，但很快被蒸发，没有水文意义。南极干谷对太阳辐射敏感，而且由于太阳高度角低，地形对太阳辐射的影响明显，造成很大的局地性温差，辐射与冰冻圈的相互作用为火星表面过程研究提供重要线索。栖息于河道和干谷的微生物对探索火星生命具有重要意义，微生物的分布与太阳辐射有直接的关系，也受冰川融水的间接影响，细菌不仅能抵抗严寒，而且能够经受剧烈的温、湿和光照的变化。冻土普遍分布，对干谷的地貌和水文具有重要影响作用。

冰冻圈对风沙地貌的影响是南极干谷类火星风沙地貌研究的最大意义。南极地区最早被关注的风成过程是风吹雪，虽然沙丘在20世纪70年代就被关注[47]，但近10年的研究明显增多，特别是类似火星风沙地貌特征的发现，如维多利亚谷地的风沙—风雪沉积特征对揭示火星沙丘的形成很有启发意义，最近发现火星沙丘的含水量达40%~50%[48]。南极地区气温低，空气密度较大，风沙颗粒的起动风速低，所以南极干谷的输沙率较大，该效应是否在火星上存在？是否可以解释火星沙丘主要集中在北极地区？一系列有意义的风沙地貌问题使南极干谷作为类火星风沙地貌研究区显示出重要的潜在价值。

（3）阿塔卡玛沙漠。阿塔卡玛沙漠（Atacama Desert）是南美洲西海岸中部的沙漠地区，在安第斯山脉和太平洋之间南北绵延约1 000 km，总面积约为18万km^2，主体位于智利境内，部分位于秘鲁、玻利维亚和阿根廷。该沙漠作为类火星研究试验点的突出特征在于其极端干旱的气候，在副热带高气压带下沉气流、安第斯山脉对湿润气流的阻挡作用、离岸风和秘鲁寒流的综合影响下，本区成为世界最干燥的地区之一，被称为世界的“干极”，这里每十年的降雨量，只能用毫米来度量，而在沙漠的某些部分，已经数百年没有出现过丝毫的降水迹象。由于极度缺水，阿塔卡玛是地球上最接近火星的自然环境，这里土壤荒瘠、酸性强，连细菌也不能存活。所以，阿塔卡玛沙漠曾作为美国NASA测试

太空探测车的地方。2004年以来,NASA科学家在阿塔卡玛沙漠研究稀缺的生命,以期更多地探知火星原始生命存在的原因。

阿塔卡玛沙漠的风沙地貌被以往的研究长期忽视,其重要原因是:不像其他沙漠呈现出茫茫沙海的景观,阿塔卡玛沙漠沙丘规模较小,呈现斑块状分布于山间盆地,这可能是该区海拔较高,不具备形成丰厚松散沉积物的条件,该特征与火星类似。

(4)柴达木盆地。近10余年来,中国的风沙地貌工作者在青藏高原柴达木盆地及其邻近地区的沙漠发现了多种类火星风沙地貌[49]。柴达木盆地作为类火星风沙地貌研究点的突出特征在于高海拔导致的低大气密度和低温,以及极端干旱的气候,其位于青藏高原北部,海拔约2 800 m,年降水量小于50 mm,其西北部甚至小于20 mm。风沙地貌总体上发育于类似的环境中。其寒冷干旱和高紫外线的环境是地球上与火星最相似,风沙地貌发育在湖积物和蒸发岩矿物组合上,与火星类似,还有清晰的沟壑、洪积扇和多边形土。初步研究发现,包括柴达木盆地在内的青藏高原,其风沙地貌形态、类型和分布与火星极为类似[50],原因亦指向松散沉积物不够充分的环境背景。微生物分离结果表明,嗜盐菌是高盐沉积物中最重要的组成部分,所以柴达木盆地不同发育阶段的盐湖和干盐湖是研究类火星环境适居性的潜在场所。

总之,柴达木盆地沙漠代表的高寒干旱、低气压环境与其他类火星风沙地貌试验点互补,形成完善的类火星风沙地貌研究体系。

参考文献(References):

[1] Dong Zhibao, Lü Ping. Aeolian geomorphology in the era of deep space exploration[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(10):1 001-1 014.[董治宝, 吕萍. 深空探测时代的风沙地貌学[J]. 地球科学进展, 2019, 34(10): 1 001-1 014.]

[2] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. New York: Springer Netherlands, 1941.

[3] Zheng X J, Xie L, Zhou Y H. Exploration of probability distribution of velocities of saltating sand particles based on the stochastic particle-bed collisions[J]. *Physics Letters A*, 2005, 341(1): 107-118.

[4] Jiujiang Z, Longxi Q, Zhenbang K. Velocity distribution of particle phase in saltating layer of wind-blown sand two-phase flows[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2001, 33: 37-45.

[5] Jiang H, Huang N, Zhu Y. Analysis of wind-blown sand movement over transverse dunes[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 1-11.

[6] Wang P, Zhang J, Huang N. A theoretical model for aeolian polydisperse-sand ripples[J]. *Geomorphology*, 2019, 335: 28-36.

[7] Jiang H, Dun H, Tong D, *et al*. Sand transportation and reverse patterns over leeward face of sand dune[J]. *Geomorphology*, 2017, 283: 41-47.

[8] Lancaster N. Geomorphology of Desert Dunes[M]. New York: Routledge, 1995.

[9] Ewing R C, Hayes A G, Lucas A. Sand dune patterns on Titan controlled by long-term climate cycles[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 8(1): 15-19.

[10] Zimbelman J R, Tsoar H. Learning about planets through studying wind-related processes on Earth[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Planets*, 2018, 123(5): 1 003-1 006.

[11] Ouyang Ziyuan, Zou Yongliao. Introduction to Mars Science[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Education Press, 2015.[欧阳自远, 邹永廖. 火星科学概论[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2015.]

[12] Capen C F, Martin L J. Survey of martial yellow storms[J]. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 1972, 4: 374.

[13] Mclaughlin B D. Volcanism and aeolian deposition on Mars[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1954, 65(7): 715.

[14] Ryan J A. Notes on the Martian yellow clouds[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1964, 69(18): 3 759-3 770.

[15] Sagan C, Pollack J B. Windblown dust on Mars[J]. *Nature*, 1969, 223(5 208): 791-794.

[16] Cutts J A, Soderblom L A, Sharp R P, *et al*. The surface of Mars 3. Light and dark markings[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(2): 343-356.

[17] Sagan C, Veverka J, Fox P, *et al*. Variable features on Mars: Preliminary mariner 9 television results[J]. *Icarus*, 1972, 17(2): 346-372.

[18] Cutts J A. Wind erosion in the Martian polar regions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, 78(20): 4 211-4 221.

[19] Cutts J A, Smith R S U. Eolian deposits and dunes on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, 78(20): 4 139-4 154.

[20] Soderblom L A, Kreidler T J, Masursky H. Latitudinal distribution of a debris mantle on the Martian surface[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, 78(20): 4 117-4 122.

[21] Greeley R, Iversen J D. Wind as a Geological Process: On Earth, Mars, Venus and Titan[M]. New York: Cambridge University Press, 1985.

[22] Hayes A G. Dunes across the Solar System[J]. *Science*, 2018, 360(6 392): 960-961.

[23] Bristow C S, Bailey S D, Lancaster N. The sedimentary structure of linear sand dunes[J]. *Nature*, 2000, 406(6 791): 56-59.

[24] Connerney J E P, Acuña M H, Ness N F, *et al*. Tectonic implications of Mars crustal magnetism[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(42): 14 970-14 975.

[25] Zuber M T, Solomon S C, Phillips R J, *et al*. Internal structure and early thermal evolution of Mars from Mars global surveyor topography and gravity[J]. *Science*, 2000, 287(5 459): 1 788-

1 793.

［26］ Neumann G A. Crustal structure of Mars from gravity and topography［J］. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109（E8）: 11 113.

［27］ Zhang Yongsheng, Lang Weidong. Present situation and development of subsonic low density wind tunnel［J］. *Spacecraft Environmental Engineering*, 2013, 30(6): 675-680.［张永升, 郎卫东. 亚声速低密度风洞的现状和发展［J］. 航天器环境工程, 2013, 30(6): 675-680.］

［28］ Anyoji M, Nose K, Ida S, *et al*. Development of a low-density wind tunnel for simulating martian atmospheric flight［J］. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2011, 9: 21-27.

［29］ Merrison J P, Bechtold H, Gunnlaugsson H, *et al*. An environmental simulation wind tunnel for studying Aeolian transport on mars［J］. *Planetary and Space Science*, 2008, 56（3/4）: 426-437.

［30］ Zhan Peiguo. Review of mars wind tunnel and aeolian process experiments［J］. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(120): 206-209.［战培国. 国外火星风洞及火星环境风工程研究［J］. 环境科学与技术, 2014, 37(120): 206-209.］

［31］ Merrison J, Aye K, Holstein-Rathlou C, *et al*. Advances in a European Planetary Simulation Wind Tunnel Facility［C］//European Planetary Science Congress, 2012.

［32］ Chamberlin R. The Altitude Wind Tunnel（AWT）— A Unique Facility for Propulsion System and Adverse Weather Testing［C］//23rd Aerospace Sciences Meeting, 1985: 12.

［33］ Gierasch P, Goody R. An approximate calculation of radiative heating and radiative equilibrium in the Martian atmosphere［J］. *Planetary and Space Science*, 1967, 15(10): 1 465-1 477.

［34］ Leovy C, Mintz Y. Numerical simulation of the atmospheric circulation and climate of Mars［J］. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1969, 26(6): 1 167-1 190.

［35］ Rafkin S C R, Haberle R M, Michaels T I. The Mars regional atmospheric modeling system: Model description and selected simulations［J］. *Icarus*, 2001, 151(2): 228-256.

［36］ Yang Ruiyan, Yan Feifei, Huang Dinghua, *et al*. Evolvement of Mars atmospheric circulation mode［J］. *Geological Science and Technology Information*, 27(1): 31-34.［杨瑞琰, 闫霏霏, 黄定华, 等. 火星大气环流模型研究进展［J］. 地质科技情报, 2008, 27(1): 31-34.］

［37］ Almeida M P, Parteli E J R, Andrade J S, *et al*. Giant saltation on Mars［J］. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(17): 6 222.

［38］ Fu Lintao. Numerical Studies on the Evolution of Wind-blown Sand on Mars［D］. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.［傅林涛. 火星风沙流发展演化的数值研究［D］. 兰州: 兰州大学, 2015.］

［39］ Landry W, Werner B T. Computer simulations of self-organized wind ripple patterns［J］. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1994, 77(1/3): 238-260.

［40］ Pelletier J D. Controls on the height and spacing of eolian ripples and transverse dunes: A numerical modeling investigation［J］. *Geomorphology*, 2009, 105(3): 322-333.

［41］ Werner B. Eolian dunes: Computer simulations and attractor interpretation［J］. *Geology*, 1995, 23(23): 1 107.

［42］ Jackson P S, Hunt J C R. Turbulent wind flow over a low hill［J］. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1975, 101(430): 929-955.

［43］ Parteli E J R, Durán O, Bourke M C, *et al*. Origins of barchan dune asymmetry: Insights from numerical simulations［J］. *Aeolian Research*, 2014, 12: 121-133.

［44］ Gomez F. Mars analogues［M］// Gargaud W, Irvine W M, Amils R, *et al*. Encyclopedia of Astrobiology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.

［45］ Bamsey M, Berinstain A, Auclair S, *et al*. Four-month Moon and Mars crew water utilization study conducted at the Flashline Mars Arctic Research Station, Devon Island, Nunavut［J］. *Advances in Space Research*, 2009, 43(8): 1 256-1 274.

［46］ Howard A D, Moore J, Rice J W. Field Trip and Workshop on the Martian Highlands and Mojave Desert Analogs: Las Vegas, Nevada, and Barstow, California, October 20-27, 2001［R］. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2001.

［47］ Calkin P E, Rutford R H. The sand dunes of victoria valley, Antarctica［J］. *Geographical Review*, 1974, 64(2): 189.

［48］ Bourke M C, Ewing R C, Finnegan D, *et al*. Sand dune movement in the Victoria Valley, Antarctica［J］. *Geomorphology*, 2009, 109(3): 148-160.

［49］ Xiao L, Wang J, Dang Y, *et al*. A new terrestrial analogue site for Mars research: The Qaidam Basin, Tibetan Plateau（NW China)［J］. *Earth-Science Reviews*, 2017, 164: 84-101.

［50］ Dong Zhibao. Tibetan Plateau Altas of Aeolian Geomorphology［M］. Xi'an: Xi'an Map Publishing House, 2017.［董治宝. 青藏高原风沙地貌图集［M］. 西安: 西安地图出版社, 2017.］

Research Methodology of Martian Aeolian Geomorphology*

Dong Zhibao，Lü Ping，Li Chao
（*Planetary Aeolian Research Institute*，*Shaanxi Normal University*，*Xi'an* 710119，*China*）

Abstract：Martian exploration is the focus and hot topic of deep space exploration，and China implemented the first Martian exploration Program in 2020. Aeolian process is the most extensive and active landform process on the surface of Mars，and has been an important part of Martian research. Sustainable development of Martian aeolian geomorphology research requires the support of theoretical system and research methodology，and research methodology is a key issue when field observations are impossible. We analyzed the research methods of Martian aeolian geomorphology from three aspects：methodology，approach，and application of modern technology. Methodology must focus on the dialectical unity of induction and deduction，reductionism and holism. Research approach includes exploration and numerical simulation，and Mars-like aeolian geomorphology study on Earth is also a common approach. Taking full advantage of remote sensing observations and detection technologies is an important basis for the development of Martian aeolian research. Simulation experiments have been an important part of aeolian geomorphology research. Since the 1980s，the United States，Europe，and Japan have successively built Martian wind tunnels to study various aircrafts in Martian atmosphere. In the absence of field observation，wind tunnel experiment and numerical simulation play an important role in studying the evolution and formation process of aeolian landform and the Martian environment.

Key words：Martian geomorphology；Remote sensing；Numerical simulation.

* **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 "Formation of the meagadune system in China's Badain Jaran Sand Sea" (Grant No. 41871008).

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