

面向原位资源利用的火星基地建造选址分析

程杉杉^{1,2}, 高玉月^{1,2}, 周 燕^{1,2}, 周 诚^{1,2}

(1. 华中科技大学 国家数字建造技术创新中心, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 土木与水利工程学院, 武汉 430074)

摘要: 面对火星的极端环境, 系统梳理了火星基地选址的关键考量因素, 通过对火星表面水冰、矿物、大气、能源等原位资源的分布与可利用性分析, 结合着陆缓冲技术、地形勘察技术、建造运维技术等与基地建造相关的工程要素综合评估, 详细探讨了火星撞击坑、峡谷与槽沟、平原与高地等地形类型的选址策略。依托火星探测任务积累的丰富数据, 深入总结了以往所提出的备选着陆区的环境特征, 为基地选址提供了多维度的参考。同时指出了面向原位资源利用火星基地选址面临的局限, 以期为今后火星基地的选址规划提供参考。

关键词: 火星基地; 原位资源利用; 着陆区选址

中图分类号: P185.3; V419

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)06-0538-13

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20240040

引用格式: 程杉杉, 高玉月, 周燕, 等. 面向原位资源利用的火星基地建造选址分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(6): 538-550.

Reference format: CHENG S S, GAO Y Y, ZHOU Y, et al. Analysis of the location of constructing Mars bases for in-situ resource utilization[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(6): 538-550.

引 言

随着太空探索技术的不断进步与人类对深空旅行的渴望, 火星作为太阳系内最有可能成为承载人类长期居住的天体, 科学考察与资源开发的重要性逐渐凸显。近年来, 各国航天机构纷纷提出了雄心勃勃的火星探测任务规划, 旨在实现人类首次登陆火星乃至建立永久基地的愿景^[1-2]。火星基地的建设, 不仅是对人类生存极限的挑战, 更是对地球以外生命存在可能性的探索。因此, 如何合理规划基地选址, 充分利用火星原位资源, 成为实现这一宏伟目标的关键。

火星表面的极端环境条件, 包括但不限于低温、高辐射、稀薄的大气及频繁的沙尘暴, 对建造火星基地提出了前所未有的挑战^[3]。这些特殊的环境因素, 加之对原位资源高效利用的需求, 使基地选址成为了一个复杂且关键的问题。原位资源的丰度与可利用性, 如水冰、矿物、大气资源等, 对支持人类长期居住至关重要。同时, 着陆条件、地貌特征、地质稳定性、岩石丰度等工程因素, 也是决定基地选址是否成功的重要考量^[4]。因此, 全面深入的对影响因素进行分析, 是确保火星基地能够顺利建设和长期运行的基础。

近年来国内外对火星进行多次探测, 并获得成功, 积累了大量火星表面环境的数据, 为科研人员提供了

研究火星不同区域环境条件的可能, 从而为基地选址提供了科学依据。本文系统地整理和分析了国际上提出的备选着陆区的环境特征, 从资源可利用性和工程技术可行性两个维度, 综合评估潜在的基地选址区域。通过对比展开针对火星撞击坑、峡谷与槽沟及平原与高地三类地形的具体选址分析。最后, 指出火星基地选址当前面临的局限和挑战, 以期为未来建设火星基地的选址提供决策参考。

1 火星探测任务着陆区分析

1.1 美国火星探测任务

自1976年起, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)火星探索之旅见证了从宏观环境认知向微观生物迹象探索的显著转变, 以及逐步对火星宜居性构建评价体系。“海盗”(Viking)系列任务, 分别在克里斯平原(Chryse Planitia)与乌托邦平原(Utopia Planitia)实现了火星软着陆^[5]。其着陆点的选取, 既考虑了地形平缓与沙尘暴稀少的工程安全因素, 也着眼于对火星基础环境的属性(如火壤与大气组成)进行初步的科学考察。“火星探路者”(Mars Pathfinder, MPF)任务的实施表明火星着陆区的选择日益凸显出对水文历史与地质特征

的重视^[6]。在阿瑞斯峡谷(Ares Vallis)的着陆充分反映了对光照充足与水蚀地貌的双重要求。步入21世纪,火星探索的目标逐渐细化,例如,“勇气号”(Spirit)与“机遇号”(Opportunity)的着陆点——古谢夫撞击坑(Gusev Crater)与子午线高原(Meridiani Planum),分别展示了火星地质历史的多样性,包括火山岩、沉积岩及可能的水蚀特征,后者富含赤铁矿且光照充足,确保了火星车太阳能面板高效运作,保障了能源持续的供给^[7]。2008年,“凤凰号”(Phoenix)在火星北半球的高纬度地区着陆,探究了冰冻水的状态及其对火星气候变迁的作用^[8]。随后“好奇号”(Curiosity)在盖尔撞击坑(Gale Crater)的着陆,标志着对火星古环境评估的新篇章,该区域曾经历过广泛的水体活动,包括河流与湖泊的沉积,成为研究火星古生态系统的理想场域^[9]。

近年来,伴随探测技术的创新突破,NASA的火星探索策略得以进一步扩展与深化。2018年,“洞察号”(Insight)在艾利西亚平原(Eridania Planitia)顺利着陆开启了火星内部构造的研究历程^[10]。“毅力号”(Perseverance)火星车于2021年在杰泽罗撞击坑(Jezero Crater)开展任务^[9],该区域满足了安全着陆与光照充足的工程技术需求。借助系统性地采样并分析其岩石成分,“毅力号”有望为火星是否存在生命迹象提供确凿证据,并为未来人类火星登陆规划提供坚实的科学支撑与实践指导。

1.2 欧洲火星探测任务

欧洲航天局(European Space Agency, ESA)与俄罗斯联邦航天局(Russian Federal Space Agency, RKA)合作“火星生命探测计划”任务时,对着陆区的选择进行了细致的科学考量与工程分析。2016年,作为ExoMars(Exobiology on Mars)项目组成部分的“斯基亚帕雷利”(Schiaparelli)着陆器原本计划在子午线高原软着陆。理论上该地区高程较低,拥有较浓厚的大气层,可为Schiaparelli隔热罩与降落伞提供足够的空气阻力,有效减缓下降的速度。然而,Schiaparelli并未成功实现软着陆,由于一系列的技术问题最终坠毁在预定着陆点附近。ExoMars项目的后续阶段虽遭遇延期,但最终确定阿克夏平原(Oxia Planum)作为着陆点。其为一片广袤的冲积扇地形,占地约15万km²,地貌特征非常明显,包括河道、三角洲及湖泊沉积物,与火星历史上水活动最为频繁的时期紧密相关,是研究火星水文历史与地质演变的理想区域。此外,阿克夏平原的光照条件优越,平均光照强度超过45 W/m²,为火星车的长期运行提供了充足的能源保障^[11]。

1.3 中国火星探测任务

中国火星探测任务“天问一号”的成功实施标志着中国深空探测能力的显著提升。“祝融号”着陆点选定于乌托邦平原的南部区域,作为火星最大的撞击盆地之一,其广袤的面积确保了相对平缓的地形,地形波动控制在100 m以内,地表障碍物密度保持在1%以下,为“祝融号”的安全着陆创造了理想的条件^[12]。此外,乌托邦平原南部区域稳定的光照条件,可保证“祝融号”火星车太阳能板高效地运转。该区域较低的尘暴发生率,有效减少了火星车受干扰的可能性,为顺利执行任务奠定了坚实的基础。更重要的是,鉴于乌托邦平原南部地质年代较新,推测可能保存有火星近期地质活动的记录,包括潜在的地下水冰。利用“祝融号”获得的原位成像和光谱数据以及高分辨率遥感数据,Wang等^[13]首次在火星的横风脊(Transverse Aeolian Ridges, TAR)表面发现水合矿物的多边形特征,Zhao等^[14]则重点针对着陆区的地表成分和气象特征进行分析,发现有证据表明当地存在潜在的亚马逊纪的盐水活动和如今的土壤-大气界面的水蒸气循环,Ju等^[15]通过建模计算出土壤中辉石和水铝英石的相对含量,并推测出着陆区内水铝英石的广泛分布与低温下火山物质的快速水蚀作用最为一致。此外,水合硫酸盐/二氧化硅等物质的发现表明大量液态水的形成源于地下水上升或地下冰的融化,上述证据进一步证明了火星的亚马逊纪期间的水循环活动比以往认为的更活跃^[16]。这一特点为研究火星水文历史与气候演变提供了独一无二的视角,对评估火星宜居性具有重大的科学价值。

2 面向原位资源利用的火星基地建造选址影响因素

2.1 资源因素

由于地火距离遥远,地外运输成本与风险不可估量,当前的火星基地建造方案多围绕原位资源利用展开具体设计^[17-18]。因此,基地选址时应充分考虑并比较当地的资源分布情况与可利用性,包括水冰、土壤、大气资源以及光照等。

2.1.1 水冰储量与分布

水冰资源不仅是制造建材不可或缺的原料之一,而且对执行火星表面任务及实现后续人类在火星的可持续性发展都具有重要意义。在基地选址阶段,水冰资源的储量与地理分布成为决策者首要关注的因素之一。

目前,火星上已确认的最大冰层主要聚集于两极地区的沉积物与高纬度地带的永久冻土,同时,中低纬度区域亦发现了季节性地下冰的存在^[19]。由Piqueux等^[20]

绘制的火星冰层厚度全球分布如图1所示,可知在北纬35°与南纬45°附近存在大面积连续的浅层冰体,这些区域被视为未来在火星原位利用水冰资源与基地建设的理想场所。而Mathieu等^[21]认为在中低纬度地区,大量水冰沉积物广泛分布于撞击坑边缘、山谷及高地斜坡。此外,Mathieu等^[21]还发现火星北半球的冰层分布较为均衡,局部峰值与谷值分别出现在北纬32°与北纬45°。南半球冰层分布随经度的变化更为复杂,距离赤道最近的冰层位于东经10°和南纬13°附近水手峡谷的北侧悬崖。一般而言,地表冰沉积物多集中于大火山以南与海拉斯盆地(Hellas Planitia)以西^[21]。

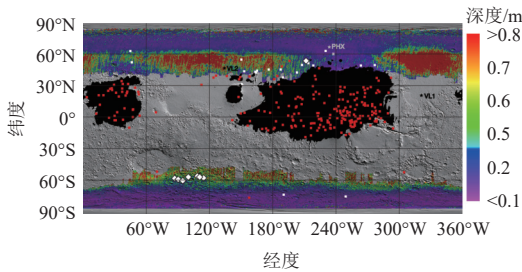


图1 根据火星气候探测器数据得出的水冰分布和深度^[20]
Fig. 1 Distribution and depth of water-ice derived from MCS^[20]

在基地选址时,应重点考虑中低纬度靠近撞击坑边缘与斜坡地带的区域,这些区域的地下冰与表层水冰含量丰富,通过高效利用火星的原位水冰资源,可大幅削减基地建设和人员生存的总体成本,为火星的长期驻留奠定坚实的物质基础。

2.1.2 火壤类型与分布

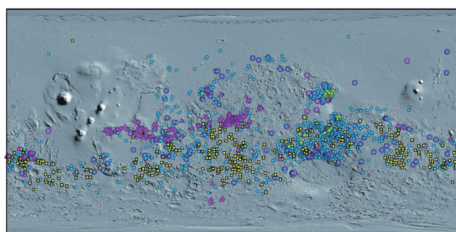
火壤作为火星上分布最广且易于获取的原位资源,在选址过程中占据着举足轻重的作用。一方面,经筛分、选矿等预处理后的火壤是基地建造的主要原材料。另一方面,利用火壤的物理特性,如其良好的防辐射能力及优异的隔热保温功效,可显著提升基地建筑生存环境的适应性^[22]。

经历一系列着陆探测器后,科学家们已经收集了大量关于火壤化学组成(以氧化物为主)的数据^[23]。如表1所示。火壤主要由二氧化硅及富含铁、镁、铝、钙等元素的硅酸盐矿物构成。鉴于含水矿物的潜在利用价值,90年代以来在火星表面陆续开展了多次针对性的探测,其全球分布情况汇总于图2(a)^[24],主要集中在火星南部高原诺亚纪古老地壳上。更具体地,碳酸盐矿物集中分布于伊西底斯平原(Isidis Planitia)以西的尼利槽沟(Nili Fossae)和海拉斯盆地(Hellas Basin)以北的第勒纳台地(Tyrrhena Terra)^[25]。而含氯盐的沉积物则遍布南部高原的诺亚纪和西方纪地质单元中,总计超过640处^[26]。水合含镁硫酸盐矿物在水手峡谷(Valles Marineris)、珍珠高原(Margaritifer Sinus)和子午线高原等地的亮色层状沉积物中被频繁检测到^[27]。此外,据统计数据(图2(b))可知,黏土矿物在全球火星地表普遍存在,其中地壳黏土的含量与分布范围最为广泛,其次为沉积黏土及其它地层单元内的黏土^[28]。

表1 火壤的平均化学成分^[23]

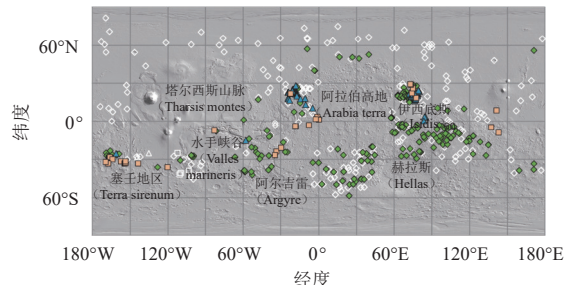
Table 1 Average chemical composition of Mars regolith^[23]

任务	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _T	Cr ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	wt%
火星探路者	42.10	0.87	9.50	21.60	0.29	0.31	7.78	6.37	2.84	0.60	0.74	6.27	0.76	
好奇号	42.88	1.19	9.43	19.19	0.49	0.41	8.69	7.28	2.72	0.49	0.94	5.45	0.69	
勇气号	46.20	0.86	10.10	16.30	0.38	0.33	8.64	6.45	2.89	0.43	0.75	5.66	0.69	
机遇号	46.40	1.02	9.46	18.30	0.40	0.37	7.29	7.07	2.22	0.49	0.83	5.45	0.63	



- 层状硅酸盐 (phyllosilicates)
- 水合硅土 (silica)
- 氯盐 (chlorides)
- 碳酸盐 (carbonates)
- 硫酸盐 (sulfates)

(a) 火星上主要含水矿物的分布



- ◆ 地壳黏土 (Crustal clays)
- 沉积黏土 (Sedimentary clays)
- ▲ 黏土地层 (Clay stratigraphies)

(b) 火星上黏土矿物的分布

图2 火星各类矿物分布情况

Fig. 2 Distribution of various types of minerals on Mars

总体而言, 在选定着陆点时, 应综合考量基地建设所需的特定土壤成分, 优先考虑那些已证实存在多类矿物(如含水矿物、黏土矿物等)的区域, 以便充分挖掘和利用当地的自然资源, 支撑火星基地的建设和长期运作。

2.1.3 大气环境

火星大气的组成及密度, 对实现原位利用以生产燃料气体、维持生命支持系统所需气体等方案的可行性有直接的关联。同时, 大气密度还密切影响着陆器在进入、下降及着陆阶段的操作控制。鉴于此, 火星的大气条件成为了面向原位资源利用的基地建造选址的关键评估因素。

依据“海盗号”任务收集的数据(表2)^[29], 火星大气的主体由二氧化碳构成(95.32%)。此后, “火星快车号”(Mars Express)探测器首度在火星大气探测到甲烷, 并于2018年由“火星科学实验室”(Mars Science Laboratory, MSL)进一步量化了其平均浓度^[30]。同时, 在火星低层大气中还检测到了少量臭氧^[31]。针对火星大气密度建立的解析模型(图3)表明, 低纬度地区火星大气密度约6~12 g/m³, 高纬度地区的大气密度均在4 g/m³以下, 且两者差异明显^[32]。然而火星独特的大气环境, 包括季节性的大气流动模式及不规律的沙

表 2 火星大气组分^[29]

Table 2 Martian atmospheric composition^[29]

气体成分	体积比	%
CO ₂	95.32	
N ₂	2.7	
Ar	1.6	
O ₂	0.13	
CO	0.07	
H ₂ O	0.03	
Kr	3×10 ⁻⁵	
Ne	2.5×10 ⁻⁴	
Xe	8×10 ⁻⁶	
O ₃	3×10 ⁻⁶	

尘暴现象, 也会对火星基地的建设造成影响。例如, Manu等^[33]研究了全球性沙尘暴期间热层大气的垂直结构变化, 发现中性(CO₂、CO、O、N₂、Ar、He)和离子(CO₂⁺、O⁺、O₂⁺、N₂⁺、CO⁺、Ar⁺)大气物质的垂直分布存在显著差异。

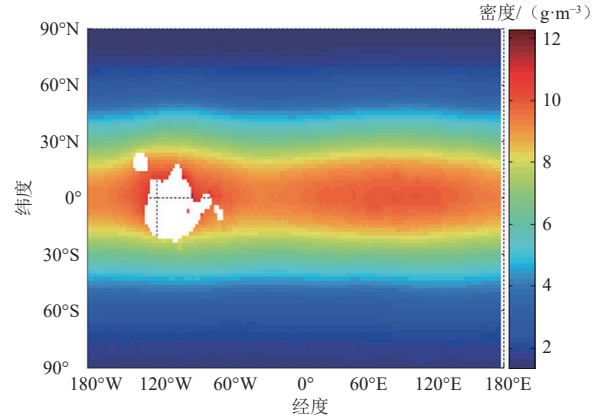


图 3 高度 30 km 处火星全球大气密度^[32]

Fig. 3 Mars global atmospheric density at an altitude of 30 km^[32]

为确保着陆程序的安全可控, 以及最大程度地利用当地丰富的气体资源, 火星基地的选址策略应侧重于那些大气密度相对较高、气候状况较为稳定、较少受到极端天气事件影响的区域。不仅有利于减少着陆风险, 还能为后续资源提取与利用提供更加有利的自然条件。

2.1.4 光照条件

在太空探索中, 能源的获取与高效利用是维持火星车、表面设施运转并延长任务周期的关键。因此, 在规划火星着陆与基地建设时, 作为一种关键的能源, 充分考量火星的光照条件至关重要。

辐射计算模型如图4所示, 呈现了火星的温度分布与太阳能转化效率^[34], 表面的最高温度集中在南纬 23°附近, 峰值接近 250 K, 而大部分区域的温度则维

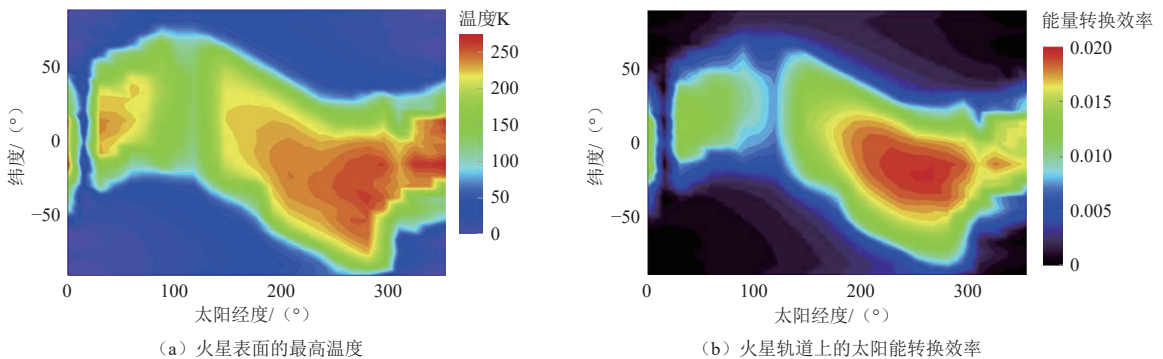


图 4 火星第24年的太阳能分布与转换效率^[34]

Fig. 4 Solar energy distribution and conversion efficiency on Mars during its 24th year^[34]

持在100 K以下。与此同时,太阳能的转换效率与温度分布类似,峰值可达约0.020。Delgado-Bonal等^[34]研究了原位利用太阳能对未来火星探测的可行性,研究指出,一块尺寸仅0.30 m的小型方形太阳能电池便足以支撑火星气象站的正常运作。

然而,迄今为止,有关火星原位可再生能源的热力学效率研究尚处于起步阶段,且鉴于高昂的运输费用与潜在的应用风险,核能目前仅被视为一种备选方案^[35]。另外,虽然风能作为一种潜在能源也曾被纳入考量范围,但火星大气稀薄(仅为地球大气的1%)与较低的风速(0.7~11.4 m/s)限制了其作为可靠动力来源的适用性^[36]。

理想的选址应具备充足的日照时长与较小的表面温度波动特点,既能保障能源供应的连续性和稳定性,又能降低因温度剧烈变化可能引发的设备故障风险,从而为火星基地长期运营提供条件。

2.2 工程因素

除考虑火星可利用的自然资源因素外,还存在多种对着陆器登陆火星阶段和基地建造过程产生限制的一系列工程因素,主要包括着陆缓冲技术、地形勘察技术及建造运维技术3类。

2.2.1 着陆缓冲技术

火星着陆的成功与否,与预设着陆区域椭圆的尺寸、高程以及岩石丰度等关键要素紧密相关,且上述因素同样对后续基地的建造过程会产生深远的影响。因此,在确定基地建设的具体位置时,必须将其纳入以进行全面的考量。

为给着陆器下降缓冲阶段预备充足的时间,着陆区域的平均高程通常需保持在-1~-2 km以下^[37-38]。火星全球地形如图5所示,火星北半球的高程普遍低于南半球,而适宜着陆的优选区域主要集中在北纬5°附近^[39]。着陆椭圆的大小则根据火星任务的研究和登陆需求进行选择,一般还会考虑高程的控制以满足下降阶段的时间需求,如MSL最终敲定的着陆区域,其高程设定在-1.4 km处,着陆椭圆尺寸19.7 km × 6.9 km^[7]。

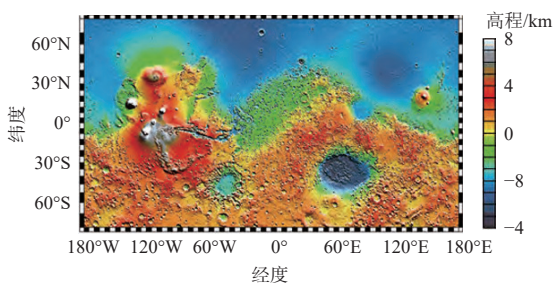


图5 火星的全球地形图^[39]

Fig. 5 Global topographic map of Mars^[39]

此外,考虑到火星表面岩石可能会对着陆器的安全降落造成威胁,进而干扰原位资源的开发利用与基地建设进程,评估岩石丰度也是选址的必要环节。迄今为止,对火星表面巨石的检测是基于其相关阴影的存在,通过分析高分辨率成像科学实验HiRISE获得的图像(其分辨率可达0.25 m/pixel),巨石的近似值是根据阴影估计的以巨石位置为中心的圆形^[40]。Pajola等^[41]评估的ExoMars 2020主要着陆椭圆扇区的平均岩石丰度如图6所示,主要识别直径≥1.75 m的岩石。结果表明,岩石分布最为密集的区域出现在西边的亚马逊火山沉积物(Av)地质单元,而在富含黏土层(Nc)的地质结构中,岩石密度峰值则集中于研究区域中心附近一个大型撞击坑的东侧。

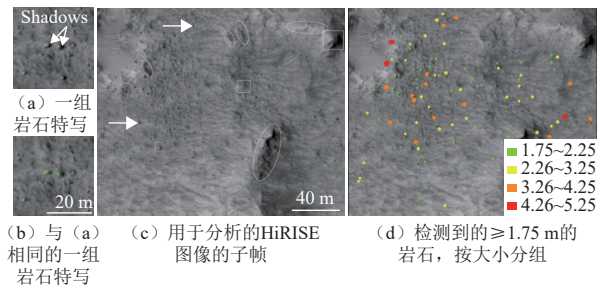


图6 用于识别位于火星表面的两个巨石的方法^[41]

Fig. 6 Methodology for identifying two boulders on the surface of Mars^[41]

在选择着陆区域时,除着重考虑着陆椭圆的尺寸与高程等首要指标外,还应当尽可能规避那些岩石丰度偏高的地带。参考过去成功实施的火星探测与着陆任务,如火星2020任务对着陆区的岩石分布率设定在7%，“祝融号”火星车主着陆区内的平均岩石丰度为8.7%^[12]。基于这些经验,选址区域的岩石分布率应控制在10%以内,以确保着陆器与火星车能够安全着陆并顺利开展后续的地形勘察与资源探索工作。

2.2.2 地形勘察技术

火星表面多样的地形地貌不仅直接影响着陆过程的安全性、火星车以及设备仪器的可移动性,更会对基地的结构设计产生限制。因此,深入分析着陆区的坡度特征及撞击坑的分布密度尤为重要。

鉴于执行地形勘察等任务的过程中,表面坡度特征深深影响着火星车的机动性能,在分辨率介于0.01~1 km的地图数据,地形的最大起伏不应超过120 m^[38]。基线为35 km的火星全球地形坡度如图7所示,在火星北部低纬度平原地区,基线在10 m以内的最大坡度不超过10°^[39]。“祝融号”着陆点的平均坡度仅为2.1°,远低于7.38°的要求^[37]。

撞击坑由于其内部存在较高坡度和凸起边缘成为

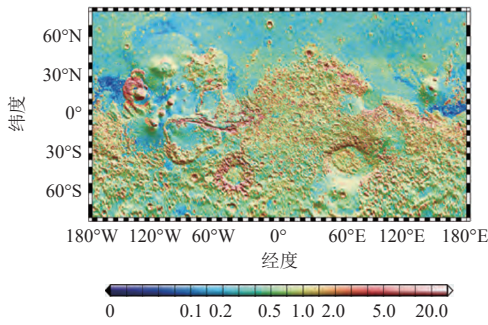


图 7 火星表面坡度 (35 km 基线)^[39]
Fig. 7 Mars surface slope (35 km baseline)^[39]

着陆点评估可能存在的危险,特别是小型和年轻的撞击坑。高密度的撞击坑分布会削弱着陆器在下降阶段的避险能力,同时限制火星车在地表进行原位资源利用和现场建设作业的灵活性。探测数据显示,“祝融号”着陆区内的撞击坑主要聚集在南部和西北部,而中北部的撞击坑密度相对较低,平均撞击坑密度约 10%,标准偏差 8.2%^[12]。

综上所述,为保障着陆器平稳着陆后的各类移动设备在火星表面顺利开展勘察任务,推荐的着陆区域应严格遵守地形坡度及撞击坑密度的限定标准,以此作为优选选址的首要依据。通过精确把控关键地形参数,可有效提升火星任务的整体安全性和执行效率,为火星探索活动的持续发展奠定坚实的基础。

2.2.3 建造运维技术

在进行火星基地建造之前,还应评估基地所在区域的地面承重能力以规划建设规模。换言之,与承重能力存在直接联系的热惯性、反照率及尘土厚度等因素也是选址时需要考虑的重点。

通过热辐射光谱仪 (Thermal Emission Spectrometer, TES) 提供的全球热惯量图 (图 8) 和反照率图 (图 9) 可知,火星大部分表面区域呈现出低热惯性和高反照率的特点,且具有相对一致性^[42-43]。这类区域的表面普遍覆盖着数米乃至更深的松散尘土层。经探测,通常热惯量低于 100 t_{iu} (100 Jm⁻²s^{-0.5}K⁻¹) 且反照率超过 0.25 的区域,其尘土覆盖厚度可达到几米到数 10 m^[44],对于承受基地结构自重及移动设备的操作非常不利。同时,鉴于雷达高度计依赖雷达反射面准确测量其下降的速度,雷达回波强度较弱的区域往往被视作低密度尘土厚覆层的标志。因而,“火星 2020”任务规定,其着陆区的雷达反射率须保持在 0.01 以上,以确保着陆器的精准定位与安全着陆^[45]。

为定性评价潜在基地候选区的地面承载能力,参考 Golombek 等^[38]提出的地面承重能力判定公式 (如表 3 所示)。基于此,对各预选基地区域的地面承载力细致分析,以确保所选地点既能够稳定支撑基地结构与设

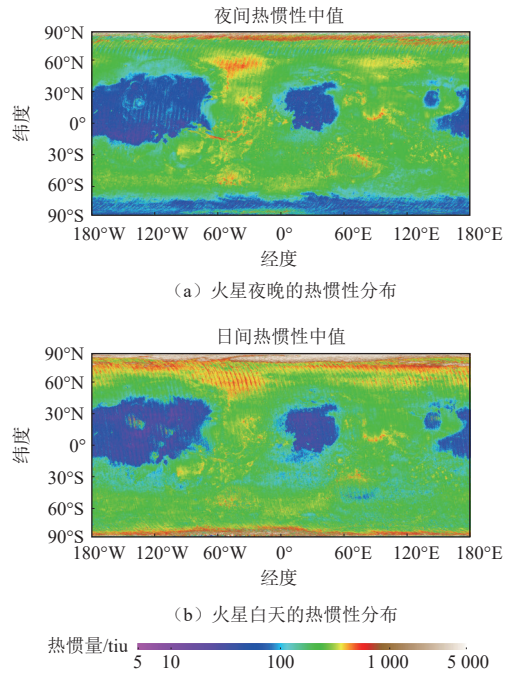


图 8 36 幅 TES 火星全球热惯性季节图的中位数^[43]
Fig. 8 Median of 36 seasonal maps of TES global thermal inertia^[43]

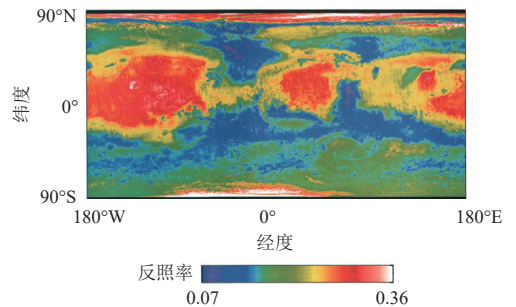


图 9 全火星 TES 热反照率图^[42]
Fig. 9 Mars TES Thermal Albedo Map^[42]

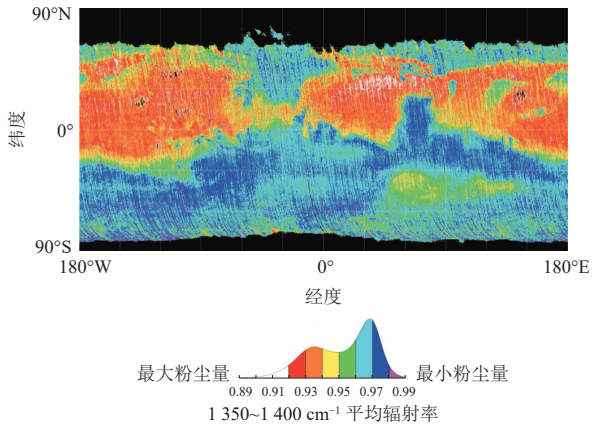
表 3 地面承重能力判定依据^[38]

Table 3 Basis for determining floor loading capacity^[38]

依据	栅格单元值	地面承重能力
热惯量 > 100 t _{iu} 且 热反照率 < 0.25	0	高
热惯量 < 100 t _{iu} 或 热反照率 > 0.25	1	中
热惯量 < 100 t _{iu} 且 热反照率 > 0.25	2	低

备重量,又便于有序开展探测活动与基地建设工作。

此外,火星环境的细颗粒物与尘埃也会限制表面设备的运行,从而影响基地后续的运维过程。例如,粉尘在太阳能电池板的累积会导致能源转化效率的下降,进而缩短设备执行任务的有效时长。Ruff 等^[46]建立的火星表面粉尘覆盖指数 (Dust Cover Index, DCI) 的全球分布如图 10 所示,该指数对硅酸盐光谱粒度效应敏感,因此可作为表面硅酸盐粉尘存在的指标。由图 10 可知,北半球的 DCI 显著高于南半球,且在北纬 30° 附近区域探测到 DCI 的极大值。

图 10 火星的全球粉尘覆盖指数图^[46]Fig. 10 Global dust coverage index map of Mars^[46]

3 面向原位资源利用的火星基地建造选址区域分析

3.1 选址准则

由于火星基地建造的主要任务包括原位资源利用,特别是针对水、矿物、大气资源的获取,以及利用火星表面能源将预处理后的材料应用于后续的建造与制造环节。上述任务的实现将为基地的长期运营提供必要的支持和保障。因而,选址时需要优先考虑那些可能存在水冰或地下水的区域,并评估区域内的矿物资源(如铁、镁、铝等)储量和分布情况,以确保基地建设和运营所需的材料供应。此外,以太阳为主的能量也在评价各备选区域的范畴内。

另一方面,在选址过程中还需综合考虑多种工程约束。选址区域应具备适合着陆的条件,包括着陆椭圆的尺寸、平均高程、地表岩石丰度等。其中,为预备充足的缓冲时间,选址区域的平均高程需保持在-2 km 以下,而岩石分布率应控制在10%以内以确保着陆器与火星车能够安全着陆并顺利开展后续的科学考察与资源探索工作。选址区域的地形地貌应适合基地建设和移动设备的操作。地形的最大起伏不应超过120 m,坡度不超过10°。选址区域内的撞击坑密度应保持较低的水平,以减少对着陆器和火星车的威胁。与承重能力相关的热惯量、反照率及表面粉尘等因素与基地的建造规模和后续的运维环节息息相关,也需进行详细的评估。选址区域应具备较低的热惯量和较高的反照率与DCI,以确保基地的稳定性和可持续性。

综上所述,各选址条件都必须与原位资源利用(In Situ Resource Utilization, ISRU)的任务场景相匹配,以确保火星基地的可持续性。所有潜在的选址区域都需满足基本的安全性和可行性要求,包括适合着陆的条件、稳定的地形地貌和足够的地面承重能力等

等。此外,选址区域应具备一定的资源储备,以支持基地的长期运营。

3.2 火星撞击坑区域基地建造选址分析

目前,已有多个火星探测任务成功在撞击坑中实现着陆,如“勇气号”于2004年着陆于古谢尔夫撞击坑(Gusev Crater),“好奇号”于2012年着陆于盖尔撞击坑以及“毅力号”于2021年着陆于杰泽罗撞击坑。

撞击坑内部的矿物资源一般较为丰富,如盖尔撞击坑中夏普山沉积岩层富含水合矿物,表明该区域曾存在液态水,为基地的水源供给提供了可能。麦克劳克林撞击坑内则存在丰富的镁铁黏土和碳酸盐,其底部还富含蒙脱石、含铁硅酸盐、蛇纹石、碳酸盐岩等^[47]。另一方面,火星撞击坑的整体形貌为基地选址提供了天然的优势。大多数撞击坑的底部较为平坦,平均坡度不超过10°,不仅可降低着陆器安全着陆的技术难度,还为后续火星车及基地建造设备的稳定运行创造了有利条件。此外,撞击坑边缘的斜坡和内部的山丘等地貌特征,为科学研究提供了丰富的样本来源,有助于科学家深入了解撞击事件的动力学过程及行星表面的演化历程。这些地形不仅暴露出不同年代的地层和岩石,揭示了行星的地质历史和物质组成,而且还可能保存着生命迹象的线索。同时也为基地建造提供了多样化的地形选择,可利用自然洞穴或构建人工掩体,以进行辐射防护和温度控制。火星撞击坑的相对封闭环境,可减少尘暴对基地的影响,为火星基地提供了天然的防护屏障,减少了辐射和微陨石的威胁。

考虑科学研究价值、着陆的安全性及未来火星基地的自给自足,除雷顿撞击坑(Leighton Crater)由于其热惯性与反照率因素导致地面承重力不足使其略占劣势外,表4所列区域均有潜力成为未来的火星任务着陆区。

3.3 火星峡谷与槽沟区域基地建造选址分析

目前虽没有火星着陆器真正踏足于峡谷与槽沟区域,但火星峡谷与槽沟的复杂地形地貌以及矿物、水冰等原位资源,对于理解火星气候变迁、潜在宜居性和建造火星基地具有重要的意义。

火星峡谷与槽沟中可能蕴藏着丰富的地下水冰、矿物质和岩石样本。南尼利槽沟中发现了丰富的镁碳酸盐和蛇纹石,并与富含橄榄石的单元伴生,还含有约10%的黄铁矿和硫酸镁^[58]。拉顿峡谷(Ladon Valle)则富含层状硅酸盐,Fe/Mg-蒙脱石黏土及水铁矿^[62]。火星峡谷与槽沟陡峭的壁面和蜿蜒的山脊网络,提供了广阔的科学探索空间,其复杂的地形还可能隐藏着火星历史的线索,如水文活动的证据^[63]。火星峡谷与

表4 火星撞击坑选址区域
Table 4 Mars impact crater siting areas

名称	经纬度/ (°N, °E)	高程/ km	其它工程因素	选址优势
霍尔顿撞击坑	-26.21, 325.18	-2.180	平均坡度: <5° DCI: 0.96~0.97	存在明显的河流三角洲沉积物, 包含大量冲积扇, 地形相对平坦; 探测到存在Fe/Mg蒙脱石黏土; 光照条件充足 ^[48-50]
埃博尔思维德撞击坑	-23.77, 326.49	-1.490	平均坡度: <9° DCI: 0.96~0.97	作为半覆盖的撞击坑, 周围的平原区域相对平坦; 富含Fe/Mg蒙脱石黏土, 具备丰富的生物保存潜力 ^[49-50]
杰泽罗撞击坑	18.44, 77.50	-2.640	平均坡度: <5° DCI: 0.96~0.97	含层状硅酸盐、含镁碳酸盐, Fe, Mg-蒙脱石黏土等资源; 某些三角平原地区地形平坦; 作为记录了数10亿年前火星环境最古老的湖泊系统, 适于探索火星早期的水文历史和潜在的生命痕迹 ^[9, 38]
古谢夫撞击坑	-14.55, 175.45	-1.950	平均坡度: 6°~7° 岩石平均丰度: 7°~8° DCI: 0.93~0.94	富含橄榄石、辉石、斜长石等矿物资源; 具有与维京着陆地点相当的热惯性和反照率; 岩石较少, 平均丰度在7°~8°; 某些区域相对平坦 ^[51-53]
麦克劳林撞击坑	21.9, 337.8	-5.030	低于-4 635 m的地区 平均坡度<5°且热惯量 约400~600 tiu	火星上最深的撞击坑之一, 底部富含蒙脱石、含铁硅酸盐、蛇纹石、碳酸盐岩。在-4635 m高程附近出现强烈的坡度断裂, 高于此水平, 坡度一般>10°, 低于此水平的坡度<5°; 低于基准高程的材料热惯量约400~600 tiu, 位于基层以上为300 tiu或更低 ^[47, 54]
小山撞击坑	23.41, 340.19	-3.877	DCI: 0.94~0.96	含铁、镁蒙脱石、云母、水合二氧化硅等, 存在富含黏土的层状矿床; 在出露的地方, 富含黏土的单元受到严重侵蚀, 只包含很少的小型撞击坑, 撞击坑密度低 ^[55-56]
卡西拉撞击坑	-27.37, 341.58	-0.375	DCI: 0.96~0.97	探测到铝黏土, 10%~30%含量的埃洛石和高岭石等矿物资源; 粉尘密度较低; 光照较为充足 ^[57-58]
菲尔索夫撞击坑	3.13, 350.68	-2.743	DCI: 0.94~0.96 热惯量>100 tiu且 反照率<0.25	存在水合硫酸盐、黏土和玻璃质物质, 并在矿物中普遍探测到存在大量的结合水(撞击坑含有约6%的水沉积物); 坑内存在圆锥形土丘, 高50~100 m, 宽数百米; 地面承重性较好 ^[59-60]
雷顿撞击坑	3.0, 57.5	0.310	DCI: 0.93~0.94 热惯量<100 tiu且反照率 >0.25, 地面承重力低	富含碳酸盐(可能是含钙或铁的碳酸盐)、黏土和页硅酸盐相(蛇纹石/蛭石/皂石) ^[9, 61]
盖尔撞击坑	-4.5, 137.4	-4.500	平均坡度: <5° DCI: 0.93~0.94	橄榄石、辉石、斜长石、磁铁矿和少量其他矿物, 并伴有铝黏土; 某些地形相对平坦, 平均坡度低于5° ^[9, 58]

槽沟复杂多样的地形地貌, 也为基地选址与后续的建设活动带来了挑战与机遇。一方面, 这些地形特征增加了着陆的难度, 要求着陆技术的高度精准和适应性; 另一方面, 峡谷的自然结构可提供天然的防护, 如辐射屏蔽和温度调节, 对于基地的长期生存和安全至关重要。

针对火星探测任务选定的备选峡谷与槽沟着陆区, 及其着陆区的具体资源与工程因素信息, 对其选址总结, 结果如表5所示。东梅拉斯峡谷(Melas Chasma)因所处位置风速较大、地形起伏导致坡度较高, 以及其具有的高灰尘密度和岩石丰度, 不适合作为着陆点。而南尼利槽沟由于多边形山脊网络密集聚集, 地表承重能力不足, 同样不是目前技术允许条件下理想的着陆区。在未来随着探测与着陆技术的发展, 除上述区域外的其余备选着陆区均有一定的潜力实现成功着陆。

3.4 火星平原与高地区域基地建造选址分析

地形相对平缓、无明显障碍物的平原与高地区域一直是备受关注的着陆与基地选址。其中, 高地又包括高原、山脉等地形。目前, 已有多次火星任务成功降落于此类型区域, 如美国“机遇号”于2004年登陆于午线高原, “祝融号”火星车在2021年成功着陆于乌托

邦平原。

火星平原与高地区域的矿物资源丰富, 如硅酸盐矿物、氧化铁等, 这些资源对于基地的建筑材料和科学研究具有重要的价值。火星平原与高地的地形特征, 如起伏的地形、陡峭的山坡, 对着陆器的着陆精度和稳定性提出了更高要求^[77]。此外, 山脉区域的风速和尘暴活动也需要纳入考量, 以避免恶劣天气对基地建设和日常运营的影响。另一方面, 平原与高地区域的自然屏障, 如山脉的背风侧, 可提供天然的风力和尘暴防护, 减少基地的外部结构负担。利用地形的高低差, 设计阶梯式或垂直式的基地布局, 既可以优化能源的使用效率, 又可减少对火星表面的干扰, 保持火星的原始生态。同时, 山脉的岩石结构为地下基地的建设提供了可能, 利用岩石的自然保温性能和辐射防护能力, 建设地下实验室或居住区, 既可保护基地免受宇宙射线的侵害, 又能降低基地的热惯性, 保持内部温度的稳定。

通过调研汇总国际上针对火星探测任务选定的备选高原与山脉着陆区, 并收集各着陆区的具体资源与工程因素信息, 总结出每个着陆区的选址优势, 如表6所示。其中, 以子午线高原、西珍珠高原为首的靠

表5 火星峡谷与槽沟选址区域
Table 5 Mars canyon and groove siting areas

名称	经纬度/ (°N, °E)	高程/ km	其它工程因素	选址优势
马沃斯峡谷	23.97, 340.94	-2.240	DCI: 平均值为0.97 热惯量约为300 tiu, 反照率约为0.13	拥有火星上最大的层状硅酸盐露头之一, 富含水性矿物, 如蒙脱石、无定形二氧化硅、高岭石、皂石、亚铁云母和硫酸盐矿物; 粉尘密度较低; 承重能力较好 ^[64-66]
南尼利槽沟	21.03, 74.35	-0.650	DCI: 0.96~0.97 山脊热惯性约为120 tiu, 主体热惯量约为138 tiu, 反照率>0.25	具有丰富的镁碳酸盐和蛇纹石, 并与富含橄榄石的单元伴生, 含有约10%的黄铁矿和硫酸镁; 多边形山脊网络密集地聚集 ^[9, 58, 67]
东梅拉斯峡谷	-12.22, 290.09 -11.47, 291.48	-4.230 -4.800	DCI: 0.96~0.97	由水蚀变形成的各种水合矿物, 包括水合硫酸盐、层状硅酸盐和黄铁矿 ^[68]
科普莱特斯峡谷	-12.6, 296.1	-5.000	DCI: 0.96~0.97	碳酸盐和层状硅酸盐, 该地区含有碳酸盐矿床, 可能富含含橄榄石的岩石; 表面非常平坦, 除此之外内部有3大层状沉积物(土丘), 土墩的顶部部分被薄台地单元覆盖 ^[69-70]
尤文达峡谷	-4.39, 298.42	-3.100	DCI: 0.94~0.96	主要由富含镁、富铁的无水或简单的水合硫酸盐矿物组成, 底部部分被水合硫酸盐覆盖; 光照较为充足 ^[71]
卡普里峡谷	-15.23, 309.5	-4.450	坡度: 约为20° DCI: 0.96~0.97	探测到页硅酸盐(伊利石、蒙脱石、碳酸盐(铁白云石和锰方解石)、含铁矿物(铁矿石))等。西部存在多个分布杂乱的土丘从而在其周围地区呈现出多个阶地 ^[72-73]
海普萨斯峡谷	11.91, 314.64	-2.630	DCI: 0.94~0.96 热惯量: 150~390 tiu 反照率: 0.18~0.21	目前火星上最大的潜在三角洲, 科考价值高; 具有玄武岩端元和广泛的蚀变矿物, 层状硅酸盐和斜长石分布在近端和中部集水区, 在水合二氧化硅和高岭石附近含有长石岩; 已在内部探测到千米大小的锥体和土丘; 尘埃覆盖低 ^[74-75]
拉顿峡谷	-20.06, 329.9	-2.069	浅色层状沉积层的 坡度约为1°~4° DCI: 0.96~0.97	富含层状硅酸盐、Fe/Mg-蒙脱石黏土以及水铁矿(地球上富含黏土的土壤的常见成分); 浅色层状沉积层较为平坦, 该沉积层几乎水平, 横向连续绵延65 km ^[76]

表6 火星平原与高地选址区域
Table 6 Mars plateau and mountain siting areas

名称	经纬度/ (°N, °E)	高程/ km	其它工程因素	选址优势
奥克夏平原	17.8, 336	-3.020	岩石丰度约为 $6.75 \times 10^4/m^2$	广泛存在与水相关的黏土矿物(Mg-蒙脱石黏土)、镁铁质材料、橄榄石、层状硅酸盐; 整体障碍物较少, 有利于安全着陆与行驶 ^[11, 41]
西子午线高原	-0.7, 351.8	-1.960	岩石丰度约为1°~7°	富含硫酸盐, 硫酸盐、氧化铁和初级矿物; 整个区域内的坡度均较低; 具有较低的风速、尘埃密度及岩石丰度 ^[9, 51]
西珍珠高原	-5.64, 353.87	-1.220	DCI值: 0.967~0.974 热惯量: 最大为 650 ± 130 tiu 反照率: 0.12~0.142	富含镁的皂石的蒙脱石占主导地位, 此外还存在斜长石、辉石、橄榄石、赤铁矿、黏土/片状硅酸盐等丰富矿物。平均温度和最高温度分别在171~204 K和184~213 K; 具有较低的反照率和较高的DCI值, 当地的尘埃覆盖并不显著 ^[77-78]
子午线高原	-2.06, 354.01	-1.300	DCI值: 0.967~0.974 热惯量: 最大为 650 ± 130 tiu 反照率: 0.12~0.142	橄榄石、辉石、斜长石等, 存在氯化物矿床, 富含赤铁矿; 地形相对平坦; 位于火星赤道附近, 该区域全年都可获得良好的光照; 热惯性较高, 极端温差影响较小 ^[53]
南利环形山 (Nili)	19.7, 73.8	-0.410	热惯量: 155~605 tiu	是火星上唯一的火山环境完整的长石岩遗址, 具有无定形二氧化硅矿床, <5%的岩石由硅酸铁组成, >95%由斜长石和其它未检测到的富含二氧化硅的相(如石英)组成 ^[79-81]
艾瑞达尼山 (Eridania)	-28.52, 178.73	0.363	岩石丰度低于20% DCI: 0.97~0.99 热惯量: 259~354 tiu 反照率: 0.13~0.16	整个边缘存在一大型含黏土单元, 底部存在无水氯化物盐、铁锂石/带有云母片的蒙脱石、水合盐或沸石、富含Al的层状硅酸盐, 并含有火星上罕见的明矾石硫酸盐; 地面承重能力较好 ^[82]

近火星赤道的高原区域, 全年可获得充足的日照条件以支持太阳能发电, 确保基地能源的稳定供应, 是较为理想的基地选址。

4 向原位资源利用的火星基地建造选址挑战与发展方向

4.1 选址技术障碍与研究挑战

虽然火星选址的相关研究正处于快速发展阶段,

当前仍存在多种技术障碍与研究挑战。

首先, 已有着陆区选址存在明显倾向, 普遍位于火星撞击坑与高原地区。当前, 火星的软着陆与探索任务多集中在低纬度高原机撞击坑区域, 如子午线高原和盖尔撞击坑, 而对高纬度及极端复杂地形区域的考察与分析相对不足, 如峡谷或槽沟, 未来需加强这些区域的勘探与评估。

其次, 火星着陆区选址影响因素与评价方法多

元, 难以统一分析对比。面向原位资源利用的火星基地选址需平衡当地资源的富足性及工程实施过程的安全性, 包括但不限于水冰资源的可用性、光照条件、地形稳定性等因素。然而, 当前具体的选址标准还缺少根据火星的环境特性定制设计。

最后, 基地选址考量与原位资源利用缺乏联系, 致使火星资源的有效开发与利用受限。为原位利用矿产、水冰等资源, 理想的基地选址应该靠近富含上述物质的地区。然而, 当前的选址考虑更多的是科学探索目标和地形平坦、易于着陆的安全性, 而非资源开采的便利性, 导致了资源利用效率的降低。

4.2 选址技术研究发展方向与策略优化

针对上述技术挑战, 在未来可围绕面向原位资源利用的火星基地选址开展进一步的研究工作并做出相应的策略优化。

深入探究火星高纬度与特殊地形中可作为备选着陆区的潜力。随着着陆与基地建造技术的进步, 未来的火星任务应更加重视对高纬度和复杂地形区域的探索, 尤其是那些可能藏匿着古老生命迹象或独特地质特征的地点, 以期发现新的科学突破。

制定兼顾工程与科研需求的火星基地选址分析与评价指标体系同样重要。火星基地的建造将更加注重结合原位资源利用, 并将工程可行性与科研目标合理地融合, 通过精细化的表面探测任务, 准确识别与比较得出火星上既满足生存条件又能促进科学研究的区域, 作为后续基地选址的优先选项。

此外, 未来还应着眼于优化火星基地选址策略以更紧密地结合当地资源分布情况。随着技术的进步和对火星环境理解的深入, 未来不仅要求在选址时进行更为细致的资源勘查和评估, 还将发展出更加高效、适应性强的资源开采和利用技术, 以实现火星基地的长期可持续运营。同时, 针对原位资源利用的火星基地选址也是未来提高基地生存能力和自给自足能力的关键。

5 结 论

本文系统性地对火星基地选址的资源与工程因素展开分析, 具体考虑了水冰、火壤、大气、光照等资源及着陆缓冲、地形勘察、建造运维等工程技术。此外, 依次比较了预选火星撞击坑、峡谷与槽沟、平原与高地三类地形区域的选址优势, 重点分析了较为理想的着陆区域。基于上述分析结果, 本文揭示了当前选址研究的主要挑战, 包括地域探索不均衡、缺乏统一的选址标准以及原位资源利用与选址决策的分离。

面对这些挑战, 未来的研究工作应致力于发掘火星高纬度和复杂地形区域的潜力, 建立综合选址评价体系, 并优化选址策略以更好地利用火星当地资源。

通过这些努力, 有望实现火星基地建设的科学性和实用性双重目标, 为人类未来的火星探索与定居奠定坚实的技术基础。

参 考 文 献

- [1] ESA. ExoMars factsheet: an overview of the ExoMars mission[EB/OL]. (2024-05-10)[2024-06-25]. https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/ExoMars/ExoMars_Factsheet.
- [2] NASA. Moon to Mars architecture definition document[EB/OL]. (2024-03-27)[2024-06-10]. <https://www.nasa.gov/moontomarsarchitecture-architecturedefinitiondocuments/>.
- [3] RODRIGUEZ-MANFREDI J A, DE LA TORRE JUÁREZ M, ALONSO A, et al. The Mars Environmental Dynamics Analyzer, MEDA, a suite of environmental sensors for the Mars 2020 mission[J]. *Space Science Reviews*, 2021, 217: 1-86.
- [4] GRANT J A, GOLOMBEK M P, WILSON S A, et al. The science process for selecting the landing site for the 2020 Mars rover[J]. *Planetary and Space Science*, 2018, 164: 106-126.
- [5] MOORE H J, JAKOSKY B M. Viking landing sites, remote-sensing observations, and physical properties of Martian surface materials[J]. *Icarus*, 1989, 81(1): 164-184.
- [6] GOLOMBEK M P, COOK R A, MOORE H J, et al. Selection of the Mars Pathfinder landing site[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1997, 102(E2): 3967-3988.
- [7] GOLOMBEK M P, GRANT J A, PARKER T G, et al. Selection of the Mars exploration rover landing sites[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2003, 108(E12): 8072.
- [8] ARVIDSON R, ADAMS D, BONFIGLIO G, et al. Mars exploration program 2007 Phoenix landing site selection and characteristics[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, 113: 104-107.
- [9] EHLMANN B L, BERGER G, MANGOLD N, et al. Geochemical consequences of widespread clay mineral formation in Mars' ancient crust[J]. *Space Science Reviews*, 2013, 174: 329-364.
- [10] GOLOMBEK M P, KIPP D, WARNER N, et al. Selection of the InSight landing site[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 211(1-4): 5-95.
- [11] GARY - BICAS C, ROGERS A. Geologic and thermal characterization of Oxia Planum using Mars Odyssey THEMIS data[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(2): e2020JE006678.
- [12] WU B, DONG J, WANG Y R, et al. Landing site selection and characterization of Tianwen - 1 (Zhurong rover) on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, 127(4): e2021JE007137.
- [13] WANG J, ZHAO J N, XIAO L, et al. Recent aqueous activity on Mars evidenced by transverse aeolian ridges in the Zhurong exploration region of Utopia Planitia[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(6): e2022GL101650.
- [14] ZHAO Y Y S, YU J, WEI G F, et al. In situ analysis of surface composition and meteorology at the Zhurong landing site on Mars[J]. *National Science Review*, 2023, 10(6): nwad056.
- [15] JU E M, LIU C Q, CHEN J, et al. Detection of allophane by the

- Zhurong rover indicates water-limited alteration at Utopia Planitia, Mars[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2024, 639: 118769.
- [16] LIU Y, WU X, ZHAO Y Y S, et al. Zhurong reveals recent aqueous activities in Utopia Planitia, Mars[J]. *Science Advances*, 2022, 8(19): eabn8555.
- [17] 赵嘉成, 罗宇轩, 张道博, 等. 基于原位资源利用的火星基地建造方案[J]. *工业建筑*, 2024, 52(8): 29-40.
- ZHAO J C, LUO Y X, ZHANG D B, et al. A novel approach for martian base construction using in-situ resources[J]. *Industrial Construction*, 2024, 52(8): 29-40.
- [18] 赵健楠, 赵源, 张诗琪, 等. 火星水资源探测、开采及原位利用研究进展[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(8): 29-40.
- ZHAO J N, ZHAO Y, ZHANG S Q, et al. Research progress on exploration, exploitation, and in-situ utilization of Martian water resources[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2024, 52(8): 29-40.
- [19] FELDMAN W C, PRETTYMAN T H, MAURICE S, et al. Global distribution of near-surface hydrogen on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2004, 109(E9): E09006.
- [20] PIQUEUX S, BUZ J, EDWARDS C S, et al. Widespread shallow water ice on Mars at high latitudes and midlatitudes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(24): 14290-14298.
- [21] VINCENDON M, FORGET F, MUSTARD J. Water ice at low to midlatitudes on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2010, 115(E10): 6306042.
- [22] MACKENZIE B, LUTZ K, PETROV G, et al. Mars manufacturing settlement[C]//Proceedings of 50th International Conference on Environmental Systems. [S. l.]: Portugal ICES Steering Committee, 2021.
- [23] 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, 2017.
- [24] GOU S, YUE Z Y, DI K C, et al. Advances in aqueous minerals detection on Martian surface[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(4): 531-548.
- [25] EHLMANN B L, MUSTARD J F, MURCHIE S L, et al. Orbital identification of carbonate-bearing rocks on Mars[J]. *Science*, 2008, 322(5909): 1828-1832.
- [26] OSTERLOO M M, HAMILTON V E, BANDFIELD J L, et al. Chloride-bearing materials in the southern highlands of Mars[J]. *Science*, 2008, 319(5870): 1651-1654.
- [27] GENDRIN A, MANGOLD N, BIBRING J P, et al. Sulfates in Martian layered terrains: the OMEGA/Mars Express view[J]. *Science*, 2005, 307(5715): 1587-1591.
- [28] EHLMANN B L, MUSTARD J F, MURCHIE S L, et al. Subsurface water and clay mineral formation during the early history of Mars[J]. *Nature*, 2011, 479(7371): 53-60.
- [29] OWEN T, BIEMANN K, RUSHNECK D R, et al. The composition of the atmosphere at the surface of Mars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(28): 4635-4639.
- [30] YUNG Y L, CHEN P, NEALSON K, et al. Methane on Mars and habitability: challenges and responses[J]. *Astrobiology*, 2018, 18(10): 1221-1242.
- [31] LEBONNOIS S, QUÉMERAIS E, MONTMESSIN F, et al. Vertical distribution of ozone on Mars as measured by SPICAM/Mars Express using stellar occultations[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2006, 111(E9): E09S05.
- [32] 秦同, 王硕, 高艾, 等. 一种火星大气密度三维解析模型[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2014, 1(2): 117-122.
- QIN T, WANG S, GAO A, et al. Three-dimensional analytical model for Mars atmospheric density[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, 1(2): 117-122.
- [33] MEHTA M, YADAV H, SINGH R P. Changes in thermospheric neutral and ionic species densities during global (2018) and regional (2016) scale martian dust storms[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2024, 52(10): 2123-2126.
- [34] DELGADO-BONAL A, MARTÍN-TORRES F J, VÁZQUEZ-MARTÍN S, et al. Solar and wind exergy potentials for Mars[J]. *Energy*, 2016, 102: 550-558.
- [35] BADESCU V. Mars: prospective energy and material resources[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2009.
- [36] CHITTENDEN J D, CHEVRIER V, ROE L A, et al. Experimental study of the effect of wind on the stability of water ice on Mars[J]. *Icarus*, 2008, 196(2): 477-487.
- [37] 王越, 王彪, 王汛, 等. 火星探测任务着陆区选址和地质分析[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(4): 371-383.
- WANG Y, WANG B, WANG X, et al. Analysis and selection of landing areas for Mars mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(4): 371-383.
- [38] GOLOMBEK M P, GRANT J G, KIPP D, et al. Selection of the Mars Science Laboratory landing site[J]. *Space Science Reviews*, 2012, 170: 641-737.
- [39] 董捷, 王闯, 赵洋. 基于工程约束的火星着陆区选择[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2016, 3(2): 134-139.
- DONG J, WANG C, ZHAO Y. Selection of the martian landing site based on the engineering constraints[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, 3(2): 134-139.
- [40] GOLOMBEK M P, HUERTAS A, MARLOW J, et al. Size-frequency distributions of rocks on the northern plains of Mars with special reference to Phoenix landing surfaces[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2008, 113(E3): E00A09.
- [41] PAJOLA M, ROSSATO S, BARATTI E, et al. Boulder abundances and size-frequency distributions on Oxia Planum-Mars: Scientific implications for the 2020 ESA ExoMars rover[J]. *Icarus*, 2017, 296: 73-90.
- [42] CHRISTENSEN P R, BANDFIELD J L, HAMILTON V E, et al. Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer experiment: investigation description and surface science results[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E10): 23823-23871.
- [43] PUTZIG N E, MELLON M T. Apparent thermal inertia and the surface heterogeneity of Mars[J]. *Icarus*, 2007, 191(1): 68-94.
- [44] CHRISTENSEN P, MOORE H J. The Martian surface layer[M]. Tucson, AZ: University of Arizona Press, 1992: 686-729.
- [45] 叶斌龙, 赵健楠, 黄俊. 美国2020火星车着陆区遴选进展及对2020中国火星任务着陆探测部分的一些思考[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2017, 4(4): 310-324.
- YE B L, ZHAO J N, HUANG J. The status of NASA Mars 2020 rover landing site selection and some thoughts on the landing part of China 2020 Mars mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(4): 310-324.
- [46] RUFF S W, CHRISTENSEN P R. Bright and dark regions on Mars:

- Particle size and mineralogical characteristics based on Thermal Emission Spectrometer data[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2002, 107(E12): 2-1-2-22.
- [47] GOU S, YUE Z Y, DI K C, et al. Hyperspectral identification of mineral diversity and formation mechanism analysis in the Mclaughlin crater on Mars[C]//Proceedings of the Remote sensing of the environment: 18th National Symposium on Remote Sensing of China.[S. l.]: SPIE, 2014.
- [48] MOORE J M, HOWARD A D. Large alluvial fans on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2005, 110(E4): E04005.
- [49] BEYER R A, KIRK R L. Meter-scale slopes of candidate MSL landing sites from point photogrammetry[J]. *Space Science Reviews*, 2012, 170: 775-791.
- [50] HUGHES C M, RICE M S, BARNHART C J, et al. Sources of clay-rich sediment in Eberswalde Crater, Mars with implications for biopreservation potential[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, 128(4): e2022JE007545.
- [51] GRANT J A, GOLOMBEK M P, PARKER T J, et al. Selecting landing sites for the 2003 Mars Exploration Rovers[J]. *Planetary and Space Science*, 2004, 52(1-3): 11-21.
- [52] GRANT J A, ARVIDSON R E, CRUMPLER L S, et al. Crater gradation in Gusev crater and Meridiani Planum, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2006, 111(E2): E02S08.
- [53] MCSWEEN JR H Y, MCGLYNN I O, ROGERS A D. Determining the modal mineralogy of Martian soils[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2010, 115(E7): E00F12.
- [54] MICHALSKI J R, GLOTCH T D, ROGERS A D, et al. The geology and astrobiology of McLaughlin Crater, Mars: an ancient lacustrine basin containing turbidites, mudstones, and serpentinites[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2019, 124(4): 910-940.
- [55] LOIZEAU D, WERNER S C, MANGOLD N, et al. Chronology of deposition and alteration in the Mawrth Vallis region, Mars[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 72(1): 31-43.
- [56] LOIZEAU D, MANGOLD N, POULET F, et al. History of the clay-rich unit at Mawrth Vallis, Mars: high-resolution mapping of a candidate landing site[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2015, 120(11): 1820-1846.
- [57] GOUDGE T A, MUSTARD J F, HEAD J W, et al. Integrating CRISM and TES hyperspectral data to characterize a halloysite-bearing deposit in Kashira crater, Mars[J]. *Icarus*, 2015, 250: 165-187.
- [58] LIN H, MUSTARD J F, ZHANG X. A methodology for quantitative analysis of hydrated minerals on Mars with large endmember library using CRISM near-infrared data[J]. *Planetary and Space Science*, 2019, 165: 124-136.
- [59] TELALOVIC B, CHAN R, JORDAN EPSTEIN L M, et al. A case for hydrothermal systems in Firsoff Crater[C]//Proceedings of the Proceedings from 12th Australian Space Science Conference. Adelaide: the Australian Space Agency, the South Australian Space Industry Centre and SmartSat CRC, 2012.
- [60] FRANCHI F, ROSSI A P, PONDRELLI M, et al. Geometry, stratigraphy and evidences for fluid expulsion within Crommelin crater deposits, Arabia Terra, Mars[J]. *Planetary and Space Science*, 2014, 92: 34-48.
- [61] AMADOR E S, BANDFIELD J L, THOMAS N H. A search for minerals associated with serpentinization across Mars using CRISM spectral data[J]. *Icarus*, 2018, 311: 113-134.
- [62] MILLIKEN R E, BISH D L. Sources and sinks of clay minerals on Mars[J]. *Philosophical Magazine*, 2010, 90(17-18): 2293-2308.
- [63] MURDIN P, MURDIN P. The rocky landscapes of Mars[EB/OL].(2015)[2024-06-25]. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-15242-4_6.
- [64] MICHALSKI J R, BIBRING J-P, POULET F, et al. The Mawrth Vallis region of Mars: a potential landing site for the Mars Science Laboratory (MSL) mission[J]. *Astrobiology*, 2010, 10(7): 687-703.
- [65] BISHOP J L, SAPER L, BEYER R A, et al. Possible sedimentary features in phyllosilicate-bearing rocks at Mawrth Vallis, Mars[C]//Proceedings of the 42nd Annual Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas: [s. n.], 2011.
- [66] BHARDWAJ A, SAM L, MARTIN-TORRES F J, et al. Discovery of recurring slope lineae candidates in Mawrth Vallis, Mars[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 2040.
- [67] KHULLER A R, KERBER L, SCHWAMB M E, et al. Irregular polygonal ridge networks in ancient Noachian terrain on Mars[J]. *Icarus*, 2022, 374: 114833.
- [68] LIU Y, GLOTCH T D, SCUDDER N A, et al. End-member identification and spectral mixture analysis of CRISM hyperspectral data: a case study on southwest Melas Chasma, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2016, 121(10): 2004-2036.
- [69] FUETEN F, RACHER H, STESKY R, et al. Structural analysis of interior layered deposits in Northern Coprates Chasma, Mars[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 294(3-4): 343-356.
- [70] MURCHIE S, ARVIDSON R, BEDINI P, et al. Compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars (CRISM) on Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2007, 112(E5): E05S03.
- [71] AL-SAMIR M, NABHAN S, FRITZ J, et al. The paleolacustrine evolution of Juventae Chasma and Maja Valles and its implications for the formation of interior layered deposits on Mars[J]. *Icarus*, 2017, 292: 125-143.
- [72] FLAHAUT J, QUANTIN C, ALLEMAND P, et al. Morphology and geology of the ILD in Capri/Eos Chasma (Mars) from visible and infrared data[J]. *Icarus*, 2010, 207(1): 175-185.
- [73] JAIN N, CHAUHAN P. Study of phyllosilicates and carbonates from the Capri Chasma region of Valles Marineris on Mars based on Mars Reconnaissance Orbiter-Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (MRO-CRISM) observations[J]. *Icarus*, 2015, 250: 7-17.
- [74] ADLER J B, BELL III J F, FAWDON P, et al. Hypotheses for the origin of the Hypanis fan-shaped deposit at the edge of the Chryse escarpment, Mars: is it a delta?[J]. *Icarus*, 2019, 319: 885-908.
- [75] ADLER J B, BELL J F, WARNER N H, et al. Regional geology of the Hypanis Valles system, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, 127(3): e2021JE006994.
- [76] WEITZ C M, BISHOP J L, GRANT J A, et al. Clay sediments derived from fluvial activity in and around Ladon basin, Mars[J]. *Icarus*, 2022, 384: 115090.
- [77] MCDOWELL M L, HAMILTON V E. Geologic characteristics of

- relatively high thermal inertia intracrater deposits in southwestern Margaritifer Terra, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2007, 112(E12): E12001.
- [78] THOMAS R J, HYNEK B M, OSTERLOO M M, et al. Widespread exposure of Noachian phyllosilicates in the Margaritifer region of Mars: implications for paleohydrology and astrobiological detection[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2017, 122(3): 483-500.
- [79] AUDOUARD J, POULET F, VINCENDON M, et al. Mars surface thermal inertia and heterogeneities from OMEGA/MEX[J]. *Icarus*, 2014, 233: 194-213.
- [80] FAWDON P, SKOK J R, BALME M R, et al. The geological history of Nili Patera, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2015, 120(5): 951-977.
- [81] EGGERS G L, WRAY J J, DUFEK J. Compositional mapping of the Nili Patera feldspathic unit: Extent and implications for formation[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(2): e2020JE006383.
- [82] PAJOLA M, ROSSATO S, CARTER J, et al. Eridania Basin: an ancient paleolake floor as the next landing site for the Mars 2020 rover[J]. *Icarus*, 2016, 275: 163-182.
- 作者简介:
程彬彬(2001-),女,硕士研究生,主要研究方向:地外建造。
通信地址:湖北省武汉市洪山区华中科技大学西六楼(430074)
电话:18871506965
E-mail: ss_cheng1005@163.com
周诚(1982-),男,博士,教授,主要研究方向:地外建造。本文通信作者。
通信地址:湖北省武汉市洪山区华中科技大学西六楼(430074)
电话:18971202049
E-mail: charleschou@163.com

Analysis of the Location of Constructing Mars Bases for In-Situ Resource Utilization

CHENG Shanshan^{1,2}, GAO Yuyue^{1,2}, ZHOU Yan^{1,2}, ZHOU Cheng^{1,2}

(1. National Center of Technology Innovation for Digital Construction, Wuhan 430074, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the face of the challenges of the extreme environment on Mars, this paper systematically combed the key considerations of Mars base siting, analyzed the distribution and availability of in-situ resources on Mars, such as water-ice, minerals, atmosphere, energy, etc., and discussed in detail the siting strategies for Mars impact craters, canyons and grooves, plains and highlands based on a comprehensive assessment of engineering elements related to base construction, such as landing buffer technology, terrain survey technology and construction, operation and maintenance technology. Drawing on the rich data accumulated by Mars exploration missions in recent years, the environmental characteristics of alternative landing zones were summarized in depth, providing multi-dimensional reference for base site selection. At the same time, the limitations and future development direction of Mars base siting for in-situ resource utilization were accordingly pointed out, in hope of providing reference for future Mars base siting planning.

Keywords: Mars bases; in-situ resource utilization; landing site selection

Highlights:

- In-situ resources and landing engineering factors affecting Mars base siting are analyzed.
- Information on alternative landing sites on Mars selected in past exploration missions is summarized.
- The potentials of suitable landing sites for Mars impact craters, canyons and troughs, plains and highlands are evaluated.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]