Journal of Deep Space Exploration

# 火星探测任务着陆区选址和地质分析

王 越<sup>1,2</sup>,王 彪<sup>1,2</sup>,王 汛<sup>1,2</sup>,潘辰安<sup>1,2</sup>,姚佩雯<sup>1,2</sup>,李晨帆<sup>1,2</sup>,李 勃<sup>1,2</sup>

(1. 山东大学 空间科学研究院,威海 264209; 2. 山东省光学天文与日地空间环境重点实验室,威海 264209)

摘 要: 以火星地形、影像数据和火星地质单元图为基础,综合工程条件约束和科学意义,选择我国火星探测任务的 优先着陆区并进行地质背景研究。基于火星表面地形数据提取预选着陆区的地形因子(包括坡度和粗糙度),并结合着陆 区的地面承重能力和高程纬度条件选出符合工程约束条件的区域;基于生命和地质两个研究重点,选取具有相应科学意义 的地区作为优先着陆区,共选出了8个优先着陆区,其中a、b优先着陆区位于克里斯平原,c~g优先着陆区位于伊希地平 原,h优先着陆区位于尼本席斯平原;对选出的区域进行地质背景研究,评定各个区域作为最终着陆区的优先程度,其中 e~g3个着陆区地形平坦、位于地质单元交界处且探测到含水矿物分布,因此被作为优先度最高的火星预选着陆区。

关键词:火星探测任务;着陆区选址;工程约束;地质背景;含水矿物

中图分类号: V11 文献标识码: A 文章编号: 2095-7777(2020)04-0371-13 **DOI:**10.15982/i.issn.2095-7777.2020.20190708001

引用格式: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.

**Reference format:** 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.

# 引 言

早在17世纪,人类就已经开始用天文望远镜观察 火星,并对火星的外观有了初步的认识。1960年以 来,人类陆续对火星进行了飞越、轨道环绕、着陆和 巡视等探测活动<sup>[1]</sup>。这些探测活动获得了大量的探测数 据,大大加深了对火星的认识。

进入21世纪后,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)相继成功发射了"勇气号"(Spirit)、"机遇号"(Opportunity)、 "凤凰号"(Phoenix)和"好奇号"(Curiosity)火星探测器,以及"火星全球勘测者"(Mars Global Surveyor, MGS)和"火星侦察轨道器"(Mars Reconnaissance Orbiter, MRO)等轨道探测器。2003年6月,欧洲航天局(European Space Agency, ESA)成功发射了火星快车(Mars EXpress, MEX)空间探测器。中、俄、日、印等国也相继公布了各自的火星探测计划<sup>[2]</sup>。

火星探测计划的主要内容就是对火星地貌、地 质、大气、环境等条件进行研究,在火星表面着陆并 进行巡视探测是火星探测计划必不可少的一环。为保 证计划的顺利进行,需要进行火星着陆区形貌分析和 选择。着陆区的表面特征会影响进入、下降与着陆 (Entry, Descent, and Landing, EDL)技术过程的安 全性和巡视器移动性能<sup>(3)</sup>。满足条件的着陆区域既要有 研究的科学意义,还应当符合火星探测器工程设计约 束的要求,只有综合考虑这两个条件,才能选出最合 适的着陆区域。

本文使用从行星数据系统(Planetary Data System, PDS)中获取的火星地形、影像数据,结合火星地质单 元图,综合考虑工程约束和科学意义来选择我国火星 探测任务的优先着陆区,并对其进行地质背景分析。

# 1 研究区域和火星数据处理方法

### 1.1 研究区域

中国于2016年1月11日正式批复首次火星探测任务,中国火星探测任务正式立项,于2020年7月23日发射"天问1号"火星探测器。火星探测任务将采取轨道器加火星车的联合探测方式,在2021年实现首次着陆巡视。图1中黑框区域是我国火星探测任务的两个预选着陆区<sup>14</sup>,本文以其为基础,将区域适当扩大作为本文的研究区域,在图1中以红框表示。

研究区域1的范围如图2(a)所示,经度范围为 20°~50°W,纬度范围为20°~30°N,投影方式为兰伯

收稿日期: 2019-09-08 修回日期: 2020-01-15

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项项目(XDB41000000);山东省自然科学基金(ZR2019MD015);山东省重点研发计划(2018GGX101028)

特投影,主要位于克里斯平原(Chryse Planitia)。研 究区域2的范围如图2(b)所示,经度范围为 75°~140°E,纬度范围为0°~30°N,投影方式为简单 圆柱投影。在研究区域2中,西部为伊希地平原 (Isidis Planitia),北部为乌托邦平原(Utopia Planitia), 南部是利比亚蒙特斯高原(Libya Montes Highlands) 和尼本席斯桌山群(Nepenthes Mensae),中部是尼本 席斯平原(Nepenthes Planum)。

由于两个研究区域范围广大,区域内形貌复杂, 其成分和地质单元各不相同,为了保证我国2020火星 探测任务的成功着陆和巡视,需要对两个研究区域进 一步进行形貌、成分和年代分析,进而确定安全且具 有科学意义的优先着陆区域。



#### 注:火星探测任务预选着陆区用黑框表示,本文研究区域用红框表示。 图 1 全火星数字高程模型彩色渲染图

Fig. 1 The color rendering map of the digital elevation model of the whole Mars



图 2 火星探测任务研究区域1和2 Fig. 2 Study areas 1 and 2 of the Mars mission

#### 1.2 研究数据

本研究的数据从地球科学节点中的MGS获得,是目前可公开获取的分辨率最高的数据,具体包括以下几种。 1.2.1 火星地形数据

火星数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM) 数据分辨率为128像元/(°),地图分辨率为463 m/像 元,使用简单圆柱投影,是火星轨道激光高度计 (Mars Orbiter Laser Altimeter, MOLA)在探测任务 过程中获取的描述火星表面地形起伏的数据。

1.2.2 火星影像数据

1) 全火星影像数据

全火星影像数据分辨率为256像元/(°),由火星 轨道相机(Mars Orbiter Camera, MOC)拍摄的红波 段广角图像(主要于1999年5—6月拍摄)拼接而成。 该数据使用IAU2000参考系统,数据分辨率为232 m/像 元,在研究中主要作为底图使用。

2) 火星表面热惯量和反照率数据

"热辐射光谱仪"(Thermal Emission Spectrometer, TES)是MGS上的一种仪器。在整个任务阶段, TES仪器测量和监测了火星的表面和大气。

本研究使用的火星表面日间热惯量数据为全火星 日间MGS-TES热惯量图<sup>[5]</sup>。使用的数据来自TES温度观 测,计算出的热惯量阈值为5~5 000 tiu (tiu = Jm<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>·s<sup>-\*</sup>),分辨率为20像元/(°),地图分辨率为 3 km/像元。该数据包括从1999年2月(任务开始) —2004年4月的数据,仅使用表面温度在160~400 K之 间的日间数据。图3是全球日间MGS-TES热惯量图, 火星探测任务的预选着陆区和本文研究区域已在图3上 标出。

本文使用的火星表面反照率数据为全火星TES热 反照率图(TES Bolometric Albedo Global Map)<sup>[6]</sup>。该 图使用简单圆柱投影,分辨率为8像元/度,地图分辨 率为7.41 km/像元,反照率值域范围为0.08~0.32。该 数据包括从1999年2月(任务开始)—2004年4月的数 据。图4是TES热反照率全球图,我国2020年火星探测 任务的预选着陆区和本文研究区域已在图4上标出。 1.2.3 火星地质单元图

本文使用的地质单元图为美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)科学调查地图系列(U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map,

SIM 3292)。如图5所示,火星探测任务的初步预选着 陆区和本文研究区域已在图上标出,底图为火星影像 数据。



图 3 全火星日间MGS-TES热惯量图 Fig. 3 Martian global dayside MGS-TES map



图 4 全火星TES热反照率图 Fig. 4 Martian global TES bolometric albedo map



图 5 火星地质单元图(编号3292) Fig. 5 Geological unit map of Mars (SIM 3292)

这张全火星地质图主要数据来自于"海盗号"(Viking) 火星探测器,记录了火星表面地质单元的分布和火星 表面形貌随时间的变化。地图比例为1:20 000 000, 采用火星2000地理坐标系。

# 1.3 研究方法

# 1.3.1 地形因子提取

本文使用全火星数字高程模型数据来提取预选着 陆区的地形因子(坡度和粗糙度),计算方法如下。 1) 坡度

坡度定义为地面单元与水平面之间的夹角,或地 面单元的法线矢量与铅垂线之间的夹角;有时也用夹 角的正切(即斜率)来表示。

在高程矩阵中,利用活动窗口计算坡度<sup>17</sup>。通过与 周围像元高程值比较计算,使用简单差分方法,快速 地求得地面单元的坡度。

2) 粗糙度

粗糙度是反映地表形态的一个宏观指标<sup>18</sup>,传统的 粗糙度是指在一个较小的区域范围内,地表单元的表 面积与其在水平面上投影面积的比值。为了定量化描 述粗糙度,本研究使用均方根偏差(Root Mean Square Deviation, RMSD)<sup>19</sup>作为火星表面粗糙度的参数。

均方根偏差v能够表示出高程在水平方向上的变 化,与所选择的水平方向上的步长(Δx)密切相关, 其表达式如下

$$v(\Delta x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} [h_i - h_{(i+\Delta x)}]^2}$$
(1)

其中: $h_i$ 为第i个点的高程值; $h_{(i+\Delta x)}$ 为与第i个点相距  $\Delta x$ 步长的点的高程值。

1.3.2 着陆区地面承重

着陆区域的表面必须能够负载探测器的着陆和巡视器的通行,这就要求火星探测器的着陆区域拥有较高的表面承重能力。根据研究可知,火星表面的承重能力与其热物理性质(包括反照率和热惯量)的大小有关。

热惯量反映了物体在白天传导和存储热能以及在 夜间释放热能的能力。一般情况下,松散细粒材料的 表面热惯量值较低,胶结面和砂粒组成的表面热惯量 值中等,岩石表面的热惯量值较高<sup>[5]</sup>。

反照率是指火星表面在太阳辐射的影响下,反射 辐射通量与入射辐射通量的比值,暗黑物体比白色物 体反照率低。反照率可以用来推断火星表面的含尘 量,因为灰尘很大的区域反照率很高<sup>[10]</sup>。

1977年, Kieffer等利用IRTM数据首次绘制了火星 表面热惯量分布图,发现热惯量与反照率有较强的负 相关关系<sup>[11]</sup>,热惯量低且反照率高的火星表面覆盖着 较厚的松散灰尘,这些区域的承重能力低,不利于探 测器的着陆和巡视器的巡视。

# 2 火星预选着陆区多因子综合安全性评价

下文所有分析与评价均基于研究区域1和2进行, 分别从工程约束和科学意义两个方面进行参数提取、 分析和评价,选择形貌安全、具有研究的科学意义的 区域作为优先着陆区。

#### 2.1 工程约束下的火星着陆区选择

#### 2.1.1 高程

对火星大气研究得知,火星大气比地球大气稀薄 很多,火星表面的大气压为560 Pa,与地球表面37 km 高度处的大气压力相同<sup>[12]</sup>。如果着陆区高程较高,着 陆器下降过程中会因为开伞高度过低而没有足够的减 速时间,导致下降速率过高而坠毁。在考虑下降过程 中相关条件的影响后,着陆器开伞时的高度相对较 低,因此选择的着陆区地形高程应处于-2 km以下<sup>[3]</sup>。

1号研究区域内高程均小于-2km,2号研究区域内 高程小于-2km的区域为图6中的蓝色区域,图6中绿色 线条为间距500m的等高线。可以看出,区域的西部、 南部和东部小部分区域高程较高,北部和中部高程 较低。



图 6 研究区域2的高程重分类图 Fig. 6 Elevation reclassification map of research area 2

## 2.1.2 纬度

纬度主要影响当地的环境条件,火星表面的热环 境规律呈现出赤道向两极整体温度逐渐降低的趋势。 大气密度、光照等环境条件都与着陆区纬度相关,其 影响随着纬度增加而增大,较为有利的纬度范围在火 星地理南北纬30°以内<sup>(3)</sup>。研究区域1和2所处纬度均满 足要求。

## 2.1.3 坡度

为了保证火星着陆器降落过程中相关仪器的正常运行和动力下降阶段燃料充足,在分辨率为0.01~1 km的地图数据中,地形起伏应当小于120 m<sup>[13]</sup>。坡度是通过计算以当前像元为中心的3 × 3高程格网得到,本研究使用的MOLA高程数据在赤道地区的分辨率为463 m/像元,所以坡度的基线长度为926 m。经计算可知,地形起伏与926 m基线长度的坡度的关系为: < 40 m (< 2.47°~4.94°),  $40 \sim 100 m (4.94° \sim 6.16°)$ ,  $100 \sim 120 m (6.16° \sim 7.38°)$ , > 120 m (> 7.38°)。

着陆区的坡度也影响火星巡视器的行动能力,在 选择合适着陆区时,应避开巡视器可能安全着陆但无 法巡视的地点。最常见的例子是巡视器安全着陆于相 对平坦的撞击坑底,但无法爬上撞击坑陡峭的坑壁而 巡视撞击坑周围的区域。由火星探测漫游者的经验和 火星科学实验室测试的结果可知<sup>[13]</sup>,坡度小于15°的区 域是可穿越的。

本文综合考虑地形起伏和可穿越区域的坡度限制,根据国外成功的火星着陆探测任务经验,排除研究区域中坡度大于7.38°的区域。图7(a)和(b)是两块研究区域的坡度重分类图,从图中可以看出,坡度大的区域多位于撞击坑的边缘和高原与平原的交界处,坡度较小的区域多位于平原内部。



注: 底图为火星数字高程模型彩色渲染图。

图 7 坡度重分类图 Fig. 7 Slope reclassification map

#### 2.1.4 地形粗糙度

地形粗糙度是反映地表形态的一个量化指标。粗 糙度越大,说明该区域地形起伏越剧烈,或者具有更 复杂的地貌,会影响探测器着陆的安全性和巡视器的 巡视能力,具有较大粗糙度的区域不适合选做火星探 测任务的着陆区。

本文分别计算了美国成功着陆的火星探测器"火星 2号"(Mars 2)、"火星6号"(Mars 6)、"海盗1号" (Viking 1)、"海盗2号"(Viking 2)、"火星探路者 号"(Mars Pathfinder, MPF)、"火星探测漫游者" (Mars Exploration Rover, MER) 计划"勇气号"(Spirit)、MER"机遇号"(Opportunity)、"凤凰号"(Phoenix)、"火星科学实验室"(Mars Science)

Laboratory, MSL)"好奇号"(Curiosity)着陆点周围 1、5、10 km范围内地形的均方根偏差作为量化火星表 面粗糙度的参数,如表1所示。

火星探测器	范围/km	均方根偏差/10-3	火星探测器	范围/km	均方根偏差/10-3
Mars 2	1	1.26~7.28	MER Spirit	1	1.26~2.54
	5	0.82~13.74		5	0.31~11.65
	10	0.82~144.92		10	0~37.40
Mars 6	1	4.65~9.60	MER Opportunity	1	0.31~0.83
	5	4.65~15.47		5	0~2.73
	10	1.56~23.06		10	0~9.15
Viking 1	1	3.48~5.19	Phoenix	1	2.02~3.77
	5	0.42~9.00		5	1.87~6.47
	10	0.42~19.72		10	0.96~7.17
	1				
Viking 2	1	1.31~1.94	MSL Curiosity	1	2.23~4.64
	5	0.47~7.04		5	1.15~60.29
	10	0.31~8.48		10	0.94~122.71
	1				
	1	2.87~3.09			
Mars Pathfinder	5	1.20~4.97			
	10	0.31~22.26			

表1 成功着陆任务不同范围区域的均方根偏差

Table 1 Root mean square deviations in different areas of the successful landing mission

为保证我国2020火星探测任务顺利着陆,应选择 粗糙度较小的地区作为优先着陆区。考虑探测器在下 降过程中的移动能力和范围,本文选择1 km范围的最 大均方根偏差0.009 6作为阈值。图8(a)和(b)是两 块研究区域的均方根偏差重分类图,用以量化研究区





注: 底图为全火星数字高程模型彩色渲染图。

图 8 均方根偏差重分类图

Fig. 8 Root mean square deviation reclassification map

#### 2.1.5 地面承重

根据研究可知,火星表面大范围的区域热惯量非 常低且反照率高,这些区域的表面主要是几米厚的松

# 散灰尘[14-15]。

从以往成功火星任务着陆区域的表面物理性质可 知,松散且厚的灰尘堆积区域没有足够的承重能力负 载探测器着陆和巡视器巡视。热惯量小于100 tiu且反 照率大于0.25的区域对应于多灰尘覆盖的区域<sup>[14,16]</sup>,这 些灰尘可能有几米厚<sup>[15]</sup>。低热惯量和高反照率区域存 在的大温差也会使部分功率用于温控,降低了着陆器 在火星表面的操作能力。具有这种特性的火星表面不 适合作为火星探测任务的着陆区。

因此,本文在进行地面承重能力分析时,将研究 区域的热惯量和反照率分别以100 tiu和0.25为阈值进行 重分类,得到研究区域的热惯量重分类图和反照率重 分类图。然后依据表2的地面承重能力判定公式<sup>[13]</sup>计算 研究区域的地面承重能力,得到研究区域地面承重能 力重分类图(图9)。由图9可以看出,研究区域1东部 大部分区域承重能力中,西北部区域承重能力高;研 究区域2东部小部分区域承重能力低,西北部和南部小 部分区域承重能力中,其余区域承重能力高。

表 2 地面承重能力判定公式 Table 2 Ground bearing capacity determination formula

公式	栅格单元值	地面承重能力
热惯量 > 100 tiu 且 反照率 < 0.25	0	高
热惯量 < 100 tiu 或 反照率 > 0.25	1	中
热惯量 < 100 tiu 且 反照率 > 0.25	2	低



注: 按高、中、低3个等级对研究区域内火星表面承重能力进行划分,底图是火星DEM数据。 图 9 研究区域的地面承重能力重分类图

Fig. 9 Ground bearing capacity reclassification map of the research area

#### 2.2 科学意义下的火星着陆区选择

2.2.1 生命

本研究所使用的工程限制条件如表3所示,在对火 星的探索任务中,最主要的目标就是寻找火星上生命 存在的痕迹。

火星上含水矿物的形成与水溶液的活动有关,寻 找并研究含有这些矿物的地质单元可以很好地了解火 星表面曾经的环境条件。含水矿物的富集区是搜寻火 星古老生命迹象、开展火星表面古气候古环境研究等 工作的良好候选地区<sup>[17]</sup>。

识别火星表面不同种类的含水矿物,确定它们的 空间分布并对富集区域进行地质环境研究,有助于选 择火星表面可能存在生命的区域并进一步探索可能存 在的火星生命形式。

本文使用火星表面主要含水矿物全球分布图<sup>[17]</sup>、 全火星含水矿物探测地图<sup>[18]</sup>和火星上黏土矿物的分布 图<sup>[19]</sup>来确定火星表面含水矿物的分布,如图10(a)、

# (b) 和 (c) 所示。

通过含水矿物分布图,可以确定研究区域内的含 水矿物种类及分布。图11(a)和(b)分别为研究区 域1和2内的含水矿物种类及分布,从图像中可以看 出,含水矿物主要分布在高原与平原的交界处和部分 撞击坑的内部和边缘位置。高原到平原地势逐渐降 低,来自高原的侵蚀物质沿着高原与平原的边界沉 积,因此在边界处探测到了大量的含水矿物。部分撞 击坑所处区域可能曾经遭受洪水侵蚀或位于河道区 域,因此在其内部和边缘曾探测到含水矿物。

# 2.2.2 地质

火星地壳的平均年龄比地球老,其形成经历了复杂的地质过程,并受到后期地质作用的不断改造<sup>[20]</sup>。因为火星地壳的板块活动不存在或早已停止,所以其表面的不同地质单元间具有较为明确的分界线。位于地质单元分界线处的区域具有复杂的地质背景,保存有火星形成及演化过程中产生的各种地质记录。选择

	表 3	我国火星探测任务着陆区工程约束条件及阈值
Table 2	Engineering	constraints and thresholds for the landing areas of Mars Mission

Table 5 Engineering constraints and thresholds for the fanding areas of Mars Mission				
参数	限制条件	说明		
高程/km	<-2	有足够的大气在降落时减速		
纬度	(0~30) °N	降落时的通讯,迎检工作温度		
地形起伏/m	<120	降落过程中相关仪器的正常运行和动力下降阶段燃料充足		
坡度/ (°)	<7.38	由地形起伏限制的坡度,应避开火星车可能安全着陆但无法穿越的区域		
地形粗糙度(均方根偏差)	<0.009 6	反映地表形态的量化指标,粗糙度越大,表明表面越粗糙,越不适合火星车着陆		
地面承重	热惯量 > 100 tiu,反照率 < 0.25	火星车着陆不会陷在松软的物质里		

90°N





(a) 火星表面主要含水矿物全球分布图











○ 层状硅盐酸(Phyllosilicates)
 ● 碳酸盐(Carbonates) ▲ 硫酸盐(Sulfates)

 (a)研究区域1



 ● 层状硅盐酸(Phyllosilicates)
 ● 碳酸盐(Carbonates)▲ 硫酸盐(Sulfates)
 ■ 氯盐(Chlorides)● 水合二氧化硅(Silica) (b)研究区域2



Fig. 11 Types and distribution of hydrated minerals in the research areas

此类区域作为优先着陆区,可以对多种地质单元进行 研究,使我们了解类地行星形成早期的状态以及演化 过程。同时,对于研究火星的生命也有非常重要的意义。 火星表面上存在着流水地貌,前人在这些地貌上 发现了液态水的痕迹,包括古河流、古湖泊、三角洲 和厚层状沉积岩等<sup>[21-22]</sup>,同时也探测到了含水矿物的分 布。流水地貌可能记录着火星表面水文系统和气候的相 关信息,选择存在流水地貌的区域作为优先着陆区,有 助于研究火星气候变化和寻找火星上生命存在的痕迹。

此外,火星上大多数新鲜撞击坑周围常被一层、 两层,甚至多层溅射物覆盖<sup>[23]</sup>。研究发现,这种火星 撞击坑溅射物与干燥月球表面撞击坑溅射物辐射纹有 明显区别。有两种模型可以解释火星撞击坑层状溅射 物的成因:撞击过程中,火星表层下的挥发份物质蒸 发<sup>[24-25]</sup>;溅射物与火星大气的相互作用<sup>[26-28]</sup>。选择存在 层状溅射物的区域作为优先着陆区,可以对其成因进 行进一步的研究,具有一定的科学意义。

# 3 火星优先着陆区选择与分析

## 3.1 优先着陆区选择

研究具体流程如图12所示,为确定着陆器着陆时 的危险程度,依据上述工程约束条件分别对研究区域 进行重分类。令满足条件的栅格单元值为0,不满足条 件的栅格单元值为1,得到各工程约束条件的二值栅格 数据。将这些栅格数据进行综合分析和叠加,可以将 研究区域的栅格单元值分为0~5,用以代表危险程 度。栅格单元值为0的区域为满足所有工程约束条件的 安全区域,可以选为优先着陆区。研究区域的危险程 度分级图如图13(a)和(b)所示,点标注为含水矿 物的分布,底图为火星影像数据。







注:黑色实线为地质单元的分界线,黑色虚线为地质单元可能的分 界线。黑色带菱形线为皱脊(Wrinkle ridge),黑色带三角线为悬崖 (Scarp),蓝色线为河道(Channel),黄色线为火山口边缘(Crater rim),红色带点线为溪谷(Rille),红色箭头线为叶状流(Lobate flow)。

#### 图 13 优先着陆区的位置分布

Fig. 13 Distribution of priority landing areas

由美国2020火星探测任务最终着陆点的工程限制 条件可知,着陆椭圆应当为近东西向,这与探测器的 轨道状态和下降过程中航空机动的精确程度有关<sup>[13]</sup>。因此本文在选择尽可能大的优先着陆区域的前提下, 尽量保证着陆椭圆为近东西向。

在危险程度为0的研究区域内,结合含水矿物的分 布情况,共选出了8个能够安全着陆且有科学意义的优 先着陆区,以a~h依次编号(如图13所示)。可以看 出,优先着陆区主要位于危险程度最低、曾探测到含 水矿物分布且具有地质方面研究意义的区域。各优先 着陆区的详细说明如表4所示。

表 4 优先着陆区的位置分布和形状 Table 4 The location and shape of the priority landing area

优先着陆区编号	中心坐标	范围/km	形状
а	26.80°N, 39.51°W	50.8×25.4	东西向椭圆
b	22.32°N, 33.35°W	60.3×21.2	东西向椭圆
с	20.16°N, 79.56°E	直径34.5	员
d	18.85°N, 77.52°E	直径23.4	员
e	6.86°N, 81.79°E	75.8×29.5	近东西向椭圆
f	4.25°N, 84.90°E	70×30	近东西向椭圆
g	11.26°N, 94.42°E	68.6×35.3	近东西向椭圆
h	121.75°E, 10.19°N	66.5×29.3	南北向矩形

# 3.2 优先着陆区地质背景分析

研究区域内的地貌和地质单元如图14(a)和 (b)所示。区域内不同的地貌和地质单元形成于不同 的年代,经受了不同的地质作用,因此可能具有不同 的矿物分布。含水矿物的分布及其变化与火星表面古 气候尤其是富水环境有紧密的联系。本研究综合分析



● 层状硅盐酸(Phyllosilicates)
 ● 碳酸盐(Carbonates) ▲ 硫酸盐(Sulfates)
 (a)研究区域1



 ○ 层状硅盐酸(Phyllosilicates)
 ○ 碳酸盐(Carbonates) ▲ 硫酸盐(Sulfates)
 □ 氯盐(Chlorides) ● 水合二氧化硅(Silica) (b)研究区域2

图 14 研究区域内地貌和地质单元图

Fig. 14 Geomorphic and geological unit maps of the research areas

优先着陆区域的地质背景和含水矿物的分布情况,分 别对各个优先着陆区内的形貌、地质单元和构造对象 进行介绍,并评定选择各着陆区的优先程度。 3.2.1 克里斯平原区域(a和b优先着陆区)

a和b优先着陆区均位于火星北半球西部的克里斯 平原,该平原处于塔尔西斯高原(Tharsis Bulge)西部 靠近赤道的位置。塔尔西斯高原在上升过程中所产生 的压力导致了克里斯平原内皱脊的形成,皱脊内形成 了高渗透性的区域。因此,地下水可能沿着这些构造 流动和聚集,形成高渗透带<sup>[29]</sup>。a和b区域内形貌特征 如图15(a)和(b)所示。

图15(a)中的Calahorra撞击坑和图15(b)中的 Yuty撞击坑都具有多层溅射物结构。优先着陆区a和 b刚好位于其多层溅射物之上,对于研究火星撞击坑多 层溅射物的成因具有一定的科学意义。

a优先着陆区西部是西方纪过渡期外流河道单元 (Hesperian transition outflow unit),东部是亚马逊纪 -西方纪撞击单元(Amazonian and Hesperian impact unit)。西方纪过渡期外流河道单元内部整体地形起伏 较小,反照率低,地面承重能力强。亚马逊纪-西方纪 撞击单元较为复杂,内部地质对象较多,包括:弯曲 山脊、流线型丘陵和退化的撞击坑边缘<sup>[30]</sup>。此外,在 Calahorra撞击坑边缘探测到了层状硅酸盐的存在,表 明该区域可能形成了相对较厚的湖相沉积。

b优先着陆区主要位于晚西方世过渡期单元(Late Hesperian transition unit),东部小部分区域位于西方 纪过渡期外流河道单元。晚西方世过渡期单元可能曾 经是较高的河床,局部有不规则的凸起。该区域可能 曾经遭受特大洪水侵蚀,在Yuty撞击坑的西方(距b着 陆区32.7 km),探测到了层状硅酸盐的存在。着陆区 东部的西方纪过渡期外流河道单元曾经可能是较低的 河床,该区域平滑且宽阔。



(a) a 优先着陆区



(b) b 优先着陆区

注:黑线为地质单元分界线,黄线为皱脊,蓝线为外流河道,红色 椭圆为优先着陆区范围,蓝色圆点为层状硅酸盐分布,底图是MOLA数 据叠加在THEMIS昼间热红外图像上。

图 15 a和b优先着陆区内的地形地貌 Fig. 15 Topography within the priority landing area a and b

#### 3.2.2 伊希地平原区域(c~g优先着陆区)

c~g优先着陆区位于火星北半球东部的伊希地平 原,该平原位于南部高地和北部低地的边界附近,几 乎成圆形。前人通过撞击坑尺度-频率分布分析得到, 伊希地平原表面上的地质单元的形成年代位于晚西方 世(Late Hesperian)到早亚马逊世(Early Amazonian) 之间<sup>[31]</sup>。c~g区域内形貌特征如图16(a)~(d) 所示。

c和d优先着陆区均位于伊希地平原的西北部边缘,其地质单元是西方纪-诺亚纪过渡单元(Hesperian and Noachian transition unit)。该单元内部没有大型撞



(a) c 优先着陆区



(c) e 和 f 优先着陆区

(d) g优先着陆区

注:黑色实线为地质单元分界线,黑色虚线为地质单元可能的分界线,黄色带菱形线为皱脊,蓝线为河道轴线,红色(椭)圆为优先着陆区范围,蓝色圆点为层状硅酸盐分布,绿色圆点为碳酸盐分布,底图是MOLA数据叠加在THEMIS昼间热红外图像上。

图 16 优先着陆区c~g内的地形地貌 Fig. 16 Topography in the priority landing areas c~g

击坑,地形坡度比较平缓。d优先着陆区位于Jezero撞击 坑内部。撞击坑内曾探测到黏土矿物和碳酸盐等含水矿 物,表明了该撞击坑很可能曾经是一个湖泊<sup>[32]</sup>。周围大 面积区域内的河流携带不同地区的沉积物流入其中,在 撞击坑内堆积形成了两个三角洲<sup>[1]</sup>。黏土矿物有利于有机 物的保存,碳酸盐能够帮助研究早期火星的碳循环。

e和f优先着陆区均位于伊希地平原的南部边缘, 接近利比亚蒙特斯高原。利比亚蒙特斯高原经历了多 期次的河流活动,形成了一系列河流和湖泊地貌,包 括树枝状山谷(dendritic valleys)、开阔盆地古湖泊 (open-basin paleolakes) 、冲积扇 (alluvialfans) 、三 角洲(deltas)、候选滨线(candidate shorelines)和水 化沉积(hydrated deposits)<sup>[33]</sup>。由于从南部的利比亚 蒙特斯高原到北部的伊希地平原地势逐渐降低,来自 高原的侵蚀物质沿着利比亚蒙特斯和伊希地的边界沉 积,因此在该边界处探测到了大量的含水矿物。其 中,e优先着陆区西北部是晚西方世低地单元(Late Hesperian lowland unit),东南部是亚马逊纪-西方纪 撞击单元。f优先着陆区主要位于晚西方世低地单元, 东部小部分位于中诺亚世高地地块单元(Middle Noachian highland massif unit)。晚西方世低地单元地形平缓, 没有较大的撞击坑,平原物质可能由沉积岩和冲击角 砾岩上的薄风化层和风成地幔组成。中诺亚世高地地 块单元部分区域有孤立的丘陵,在靠近晚西方世低地 单元的边缘可能埋藏有邻近单元的侵蚀残余物。

g优先着陆区主要位于亚马逊纪-西方纪撞击单 元,年龄大约为3.8~3.9 Ga;西北部小部分位于晚西 方世低地单元,年龄大约为3.6~3.8 Ga。区域内分布 着可能发育于伊希地平原的皱脊,一条东西向的大型 皱脊横穿整个着陆区。g优先着陆区西北部的晚西方世 低地单元地形平坦,撞击坑密度低。东南部位于着陆 区南方撞击坑的溅射物上,埋藏有较少的老旧撞击 坑,曾探测到层状硅酸盐的存在。

3.2.3 尼本席斯平原区域(h优先着陆区)

h优先着陆区位于火星北半球东部的尼本席斯平 原,该平原是一个平坦的区域,海拔约为-1500m, 平原内分布着一些粗糙、斑驳的纹理对象和一些光滑 的洼地<sup>[34]</sup>(图17)。h优先着陆区位于早西方世过渡期 单元(Early Hesperian transition unit),年龄大约为 3.65~3.81 Ga。该区域位于尼本席斯桌山群和尼本席 斯平原的交界处,在地质演化过程中可能遭受了陡 坡、河流和火山过程的侵蚀和沉积作用<sup>[35]</sup>,并且在该 区域曾探测到层状硅酸盐存在。该区域内部地貌平 坦,撞击坑少,几乎没有古老的撞击坑。



注:黑色虚线为地质单元可能的分界线,红色矩形为优先着陆区范围,蓝色圆点为层状硅酸盐分布,底图是MOLA数据叠加在THEMIS昼间热红外图像上。

图 17 优先着陆区h内的地形地貌 Fig. 17 Topography within the priority landing area h

### 3.3 优先着陆区优先程度评定

在最终选出的8个优先着陆区中, e、f、g3个着陆 区优先度最高。它们均位于地质单元的交界处,具有 复杂的地质背景;地形平坦,适合探测器着陆;区域 内曾经探测到含水矿物的存在,许多迹象表明这些区 域曾经存在液态水,对这些区域进行探索,可能能够 发现火星上曾经存在的生命物质。

a、b、h3个着陆区优先度次之。a和b着陆区内没 有探测到含水矿物分布,但处于地质单元的交界处且 位于撞击坑多层溅射物上,具有相对复杂的地质背 景。在a和b着陆区不远处曾探测到了含水矿物的存 在,平坦的地形使得巡视器能够前去探测。h着陆区虽 然不处于地质单元交界处,但区域位于尼本席斯桌山 群和尼本席斯平原的交界处。区域内存在流水地貌, 分布有层状硅酸盐,很可能曾经有生命存在。

c和d两个着陆区优先度较低。虽然这两个着陆区 内存在流水地貌且分布有含水矿物,但其位于撞击坑 内部,且被高危险程度的区域包围,这既增加了着陆 难度,又限制了探测器的探测范围,不利于规划探测 器的巡视探测计划。

# 4 结束语

中国火星探测任务已经实施,选择既有科学意义 又符合工程限制条件的着陆区域十分关键。本文通过 评定研究区域的危险程度,选出了符合工程限制条件 的区域,结合火星表面含水矿物的分布情况,共选出 了8个优先着陆区,并对其进行地质背景研究,评定各 着陆区作为最终着陆区的优先程度。

未来还需要对火星着陆区的选择开展进一步的工 作,具体包括:考虑火星沙尘暴的分布和频率对火星 着陆安全性的影响;使用高分辨率的影像数据或遥感 数据对着陆区内的岩石尺寸和分布频率进行分析;考 虑更多的科学意义,对符合工程限制条件的区域进行 进一步筛选,选取具有更多研究对象和科学意义的着 陆点。

### 参考文献

 [1] 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,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.

[2] 徐青, 耿迅, 蓝朝桢, 等. 火星地形测绘研究综述[J]. 深空探测学报, 2014, 1(1): 28-35.

XU Q, GENG X, LAN C Z, et al. Review of Mars topographic mapping[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(1): 28-35.

- [3] 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,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.
- [4] YE P J, SUN Z Z, RAO W, et al. Mission overview and key technologies of the first Mars probe of China[J]. Science China(Technological Sciences), 2017(5): 5-13.
- [5] PUTZIG N E, MELLON M T. Apparent thermal inertia and the surface heterogeneity of Mars[J]. Icarus, 2007, 191(1): 68-94.
- [6] 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.
- [7] 刘学军,龚健雅,周启鸣,等. 基于DEM坡度坡向算法精度的分析研究[J]. 测绘学报,2004,33(3):258-263.
   LIU X J,GONG J Y,ZHOU Q M, et al. A study of accuracy and algorithms for calculating slope and aspect based on grid Digital Elevation Model(DEM)[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004,33(3):258-263.
- [8] 江冲亚,方红亮,魏珊珊. 地表粗糙度参数化研究综述[J]. 地球科学 进展,2012,27(3):292-303.
   JIANG C Y, FANG H L, WEI S S. Review of land surface roughness parameterizations study[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(3): 292-303.
- [9] SHEPARD M K, CAMPBELL B A, BULMER M H, et al. The roughness of natural terrain: a planetary and remote sensing perspective[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(E12): 32777-32795.
- [10] 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, 2002, 107(E12):5127.
- [11] KIEFFER H H, MARTIN T Z, PETERFREUND A R, et al. Thermal and albedo mapping of Mars during the Viking primary mission[J]. Journal of Geophysical Research, 1977, 82(28):4249-4291.
- [12] 史建魁,刘振兴,程征伟. 火星探测研究结果分析[J]. 科技导报, 2011,29(10):64-70.
  SHI J K,LIU Z X,CHENG Z W. An analysis of results of the Mars exploration[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(10):64-70.
- [13] GOLOMBEK M, GRANT J, KIPP D, et al. Selection of the Mars Science Laboratory landing site[J]. Space Science Reviews, 2012, 170(1-4):641-737.
- [14] MELLON M T, FERGASON R L, PUTZIG N E. The martian surface: the thermal inertia of the surface of Mars[J]. The Martian Surface -Composition, Mineralogy, and Physical Properties, 2008(1): 399-427.
- [15] CHRISTENSEN P R, MOORE H J. The martian surface layer[J]. Mars, 1992, 44: 686-729.
- [16] PUTZIG N E, MELLON M T, KRETKE K A, et al. Global thermal inertia and surface properties of Mars from the MGS mapping mission[J]. Icarus, 2005, 173(2): 325-341.

- [17] 芶盛,岳宗玉,邸凯昌,等. 火星表面含水矿物探测进展[J]. 遥感学报,2017,21(4):531-548.
  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.
- [18] CARTER J, POULET F, BIBRING J P, et al. Hydrous minerals on Mars as seen by the CRISM and OMEGA imaging spectrometers: updated global view[J]. Journal of Geophysical Research Planets, 2013, 118(4): 831-858.
- [19] 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.
- [20] BIBRING J P, LANGEVIN Y, MUSTARD J F, et al. Global mineralogical and aqueous mars history derived from OMEGA/Mars express data[J]. Science, 2006, 312(5772): 400-404.
- [21] CARR M H. The surface of Mars[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [22] JAKOSKY B M, PHILLIPS R J. Mars' volatile and climate history[J]. nature, 2001, 412(6843): 237-244.
- [23] BARLOW N G, BOYCE J M, COSTARD F M, et al. Standardizing the nomenclature of martian impact crater ejecta morphologies[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105 (E11): 26733.
- [24] CARR M H, CRUMPLER L S, CUTTS J A, et al. Martian impact craters and emplacement of ejecta by surface flow[J]. Journal of Geophysical Research, 1977, 82(28):4055-4065.
- [25] STEWART S T, O'KEEFE J D, AHRENS T J. The relationship between rampart crater morphologies and the amount of subsurface ice[C]// Lunar & Planetary Science Conference. [S. 1.]: Lunar and Planetary Science Conference, 2001.
- [26] SCHULTZ P H. Atmospheric effects on ejecta emplacement[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(E7): 11623.
- [27] BARNOUIN-JHA O S, SCHULTZ P H, LEVER J H. Investigating the interactions between an atmosphere and an ejecta curtain: 1. wind

tunnel tests[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(E11): 27105.

- [28] BARNOUIN-JHA O S, SCHULTZ P H, LEVER J H. Investigating the interactions between an atmosphere and an ejecta curtain: 2. numerical experiments[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(E11): 27117.
- [29] RODRÍGUEZ J A P, TANAKA K L, KARGEL J S, et al. Formation and disruption of aquifers in southwestern Chryse Planitia, Mars[J]. Icarus, 2007, 191(2): 545-567.
- [30] KOMATSU G, OKUBO C H, WRAY J J, et al. Small edifice features in Chryse Planitia, Mars: assessment of a mud volcano hypothesis[J]. Icarus, 2016, 268: 56-75.
- [31] GHENT R R, ANDERSON S W, PITHAWALA T M. The formation of small cones in Isidis Planitia, Mars through mobilization of pyroclastic surge deposits[J]. Icarus, 2012, 217(1): 169-183.
- [32] EHLMANN B L, MUSTARD J F, FASSETT C I, et al. Clay minerals in delta deposits and organic preserva-tion potential on Mars[J]. Nature Geoscience, 2008, 1 (6): 355-358.
- [33] ERKELING G, REISS D, HIESINGER H, et al. Landscape formation at the Deuteronilus contact in southern Isidis Planitia, Mars: implications for an Isidis Sea?[J]. Icarus, 2014, 242: 329-351.
- [34] DE PABLO M Á, PACIFICI A. Geomorphological evidence of water level changes in Nepenthes Mensae, Mars[J]. Icarus, 2008, 196(2): 667-671.
- [35] WERNER S C, TANAKA K L, SKINNER J A. Mars: the evolutionary history of the northern lowlands based on crater counting and geologic mapping[J]. Planetary & Space Science, 2011, 59(11-12): 1143-1165.

作者简介:

**王越**(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:行星地质学。 通讯地址:湖北省武汉市洪山区珞南街道珞喻路129号武汉大学信息 学部(430079) 电话:15172696499 E-mail:1021657970@qq.com

# Analysis and Selection of Landing Areas for Mars Mission

WANG Yue<sup>1,2</sup>, WANG Biao<sup>1,2</sup>, WANG Xun<sup>1,2</sup>, PAN Chenan<sup>1,2</sup>, YAO Peiwen<sup>1,2</sup>, LI Chenfan<sup>1,2</sup>, LI Bo<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-Terrestrial Environment, Weihai 264209, China)

**Abstract:** In this paper, based on the (Digital Elevation Model) data, remote sensing imagery and geological units, the priority landing areas were selected by combining the engineering constraints (terrain factors, ground bearing capacity, elevation and latitude) and scientific significance, and geological background of these priority landing areas was studied. Firstly, terrain factors (including slope and roughness) of the tentative sub-area were extracted derived from DEM data. And the areas meeting engineering constraints, which have lower slope (<7.38°), roughness value (<0.0096), stronger ground bearing capacity, elevation (<-2 km) and latitude ( $0\sim30^\circ$ N), were selected. Then, based on the two research focuses of life and geology, the areas containing the scientific significance were chosen as the priority landing areas ( $a\sim$ h). Among them, a and b priority landing areas are located in the Chryse Planitia,  $c\sim g$  priority landing areas are located in the Isidis Planitia and h priority landing areas ( $e\sim g$ ) were considered as the highest priority landing areas because of their flat terrain, location at the boundary of two geological units and detection of the distribution of hydrous minerals.

Keywords: Mars exploration mission; landing areas selection; engineering constraints; geological background; hydrous mineral

#### Highlights:

• The priority landing area of Mars Mission was selected by combining the engineering constraints and the scientific significance of the research. A total of 8 priority landing areas were selected.

• The geological background of priority landing area was studied and their priority degree as the final landing area was evaluated.

• The three landing areas of e-g are considered as the highest priority landing areas because of their flat terrain, location at the junction of geological units and detection of the distribution of hydrous minerals.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 朱恬]