引文格式:才谨豪,徐箫剑,康志忠,等.科学价值定量化的天问三号着陆区多参数智能选址方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(11):2436-2455.DOI:10.13203/j.whugis20260343

Citation: CAI Jinhao, XU Xiaojian, KANG Zhizhong, et al. A Multi-parameter Intelligent Landing-Site Selection Method for Tianwen-3 with Quantitative Scientific-Value Assessment[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(11):2436-2455.DOI:10.13203/j.whugis20260343

科学价值定量化的天问三号着陆区多参数智能选址方法

才谨豪[1,2,3] 徐箫剑[1,2,3] 康志忠[1,2,3] 左秉正[1,2,3] 胡昊翔[1,2,3]
叶晨鸣[1,2,3] 吴雨航[1,2,3] 曹 震[4]

1 中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京,100083
2 中国地质大学(北京)河北省空天信息与智能化测绘重点实验室,北京,100083
3 教育部深空探测联合研究中心,月球与行星探测国际合作研究分中心,北京,100083
4 桂林理工大学测绘地理信息学院,广西 桂林,541006

摘 要:火星是探寻地外天体潜在生命痕迹的重要窗口,天问三号火星采样返回任务将探寻潜在生命痕迹、认识火星宜居环境演化作为主要科学任务。着陆区选址不仅关系工程安全性,还直接决定能否获取保存潜在生命痕迹的高科学价值样品。然而,火星宜居环境受多种地质条件控制,部分地貌成因存在多解性,仅靠单一遥感观测难以准确表征科学价值。针对上述问题,提出一种科学价值定量化的天问三号着陆区多参数智能选址方法。研究综合多源遥感数据,对撞击坑、沙丘、凹锥、方山等地貌类型进行系统编目,并采用"工程约束—科学评价"双阶段流程:依据任务需求配置地形条件、表面障碍物、热物理条件等工程约束识别可行区域并构建候选椭圆,利用地貌、地层和矿物进行地质背景与演化历史、物质组成多样性、液态水活动证据、宜居环境与生命标志保存潜力以及后期改造与地质记录保存状态5个科学维度进行可追溯的评价筛选。最终在伊希斯平原尼罗堑沟群、芬尔斯峡谷出口及祝融号着陆区周边3个研究区的工程可行域内绘制54个候选着陆椭圆,分别筛选出1个优选椭圆,并设计多层级敏感性实验评价方法的可靠性。优选椭圆在多维科学价值上表现出较高优先级,可为天问三号任务着陆区优选及后续高分辨率复核提供可追溯、可定量的空间决策依据,也可为后续火星探测任务选址智能化提供方法参考。

关键词:天问三号;火星采样返回;着陆区选址;多参数

中图分类号:P691 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-09-14

DOI:10.13203/j.whugis20260343 **文章编号**:1671-8860(2026)11-2436-20

A Multi-parameter Intelligent Landing-Site Selection Method for Tianwen-3 with Quantitative Scientific-Value Assessment

CAI Jinhao[1,2,3] *XU Xiaojian*[1,2,3] *KANG Zhizhong*[1,2,3] *ZUO Bingzheng*[1,2,3] *HU Haoxiang*[1,2,3]
YE Chenming[1,2,3] *WU Yuhang*[1,2,3] *CAO Zhen*[4]

1 School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China
2 Hebei Key Laboratory of Aerospace Information and Intelligentized Surveying and Mapping, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China
3 Subcenter of International Cooperation and Research on Lunar and Planetary Exploration, Center of Space Exploration, Ministry of Education of the People's Republic of China, Beijing 100083, China
4 College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China

Abstract: **Objectives**: Mars is a key target in the search for potential extraterrestrial life and preserves abundant geological records of past aqueous activity and environmental evolution. The Tianwen-3 Mars sample-return mission aims to search for potential biosignatures and investigate the habitability of Mars and

基金项目:天问三号任务关键技术攻关项目(TW3004)。

第一作者:才谨豪,博士生,主要研究方向为行星遥感,行星形貌与定年。jinhaocai_cugb@email.cugb.edu.cn

通信作者:康志忠,博士,教授。zzkang@cugb.edu.cn

its evolutionary history. Landing-site selection is therefore required to satisfy engineering safety constraints while maximizing the scientific value of the returned samples. In particular, candidate sites should contain geological materials capable of recording ancient aqueous environments and preserving potential biosignatures. However, Martian habitability is controlled by multiple geological factors, including geological age, aqueous activity, material composition, depositional setting, and post-formation modification. In addition, some geomorphological features may have multiple possible origins, making it difficult to assess scientific value from a single remote-sensing observation. To address these issues, a multi-parameter intelligent landing-site selection method with quantitative scientific-value evaluation is developed for the Tianwen-3 mission. **Methods:** Multi-source orbital remote-sensing and thematic datasets are integrated to characterize terrain, surface hazards, geological context, mineralogy, and surface physical properties. Representative landforms, including impact craters, dunes, pitted cones, mesas, channels, scarps, lobate features, and buried craters, are systematically inventoried. A two-stage workflow consisting of engineering-constraint screening and scientific-value evaluation is then implemented. In the engineering stage, constraints related to topography, surface obstacles, impact-related hazards, and thermophysical properties are parameterized, configured according to mission requirements, and applied to identify feasible regions. Mission-scale landing ellipses are subsequently generated within the engineering-feasible domain. In the scientific stage, geomorphological, stratigraphic, and mineralogical evidence within each candidate ellipse is quantitatively and traceably evaluated in five dimensions: geological context and evolutionary history, diversity of material composition, evidence for liquid-water activity, habitability and biosignature-preservation potential, and post-formation modification and preservation of geological records. The resulting multidimensional scores are integrated to rank candidate ellipses within each study region. **Results:** The method is applied to three candidate regions with contrasting geological settings: Isidis Planitia-Nili Fossae, the outlet region of Mawrth Vallis, and the surrounding area of the Zhurong landing site. A total of 54 engineering-feasible candidate landing ellipses are generated, including 12 in Isidis Planitia-Nili Fossae, 12 in Mawrth Vallis, and 30 in the Zhurong landing-site region. One preferred ellipse is identified in each region. The preferred candidates show high priorities in the multidimensional scientific-value assessment, although the dominant geological evidence differs among the three regions. The stability of the evaluation results is further examined through sensitivity analysis of engineering parameters, adjustment of scientific-objective priorities, and perturbation of geomorphological inventory uncertainty. **Conclusions:** The proposed method converts engineering requirements, geological evidence, and mission-oriented scientific preferences into an explicit and quantitative landing-site selection workflow. It is configurable and can incorporate mission requirements and expert knowledge. Engineering feasibility is treated as a prerequisite rather than as a factor that can be compensated for by high scientific value, while scientific ranking is performed only among engineering-feasible candidates. The integration of multiple geological evidence types reduces dependence on any single remote-sensing interpretation and enables the scientific ranking to be traced back to observable geomorphological, stratigraphic, and mineralogical features. The method therefore provides a quantitative and traceable spatial-decision framework for Tianwen-3 landing-site selection, supports subsequent high-resolution verification, and offers a transferable methodological reference for intelligent landing-site selection in future Mars sample-return and life-detection missions.

Key words: Tianwen-3; Mars sample return; landing-site selection; multi-parameter

火星是太阳系中与地球环境演化问题联系最为紧密的类地行星之一,也是公认地球以外有可能孕育过生命的天体[1]。火星早期曾存在广泛的液态水活动[2],部分时期可能具备潜在宜居条件[3],其表面保存了与古环境演化、水-岩作用及潜在宜居性相关的地质记录[4-6]。目前全球已实施47次火星探测任务,但尚未实现火星的地质样品采样返回,得到火星生命存在与否的实验证据。天问三号以探寻潜在生命痕迹和认识火星宜居环境演化为重要科学目标,有望成为人类历

史上首次成功实施的火星取样返回任务[7]。对天问三号任务,着陆区选址决定探测器能否安全到达,还决定可获取样品的形成环境、地层背景和科学代表性。因此,理想着陆区既需要满足着陆过程的工程安全要求,又应尽可能包含能够记录古代水活动、物质组成、潜在宜居环境及良好保存状态的地质证据。

美国火星探测任务已经形成较为成熟的任务级着陆区遴选流程[8-10]。在美国火星科学实验室(Mars Science Laboratory,MSL)任务中,依据纬度、高程、坡度、岩石丰度及热物理条件等工程限制缩小候选范围,再结合高分辨率遥感数据对候选着陆椭圆开展地形安全和地质背景分析,并通过多轮开放式着陆区研讨会综合比较候选区域的科学价值,最终形成任务决策[11]。在美国"洞察号"(InSight)火星探测任务选址中,由于任务科学目标和着陆平台特点不同,进一步突出高程、坡度、岩石丰度和表面物理性质等工程条件,对多个候选区进行工程安全性比较,形成由区域筛选到候选区确定的选址过程[10]。"火星2020"任务则在工程安全评价基础上进一步综合古环境、湖泊—三角洲沉积体系、矿物组成、生物标志保存潜力以及巡视器任务需求[12],通过多轮候选区比较确定最终着陆区域[13-15]。因此,成熟火星任务选址并非由单一算法独立完成,而是由任务工程团队和科学共同体综合判断共同构成。

这些任务已经形成较成熟的工程约束和着陆安全评价体系,但科学价值涉及地质演化、水活动方式、物质组成、沉积环境及生命信息保存条件等多层次地质解释,其评价通常仍需要专家综合多种遥感证据开展候选方案比较。在自动化方面,已有研究利用坡度、粗糙度和沃罗诺伊图开展地形危险识别与安全区域提取[16],通过多源遥感影像与深度学习实现天问一号着陆区高分辨率地形建模和地貌自动分类[17],提出多智能体协同决策模型和考虑空间异质性的TOPSIS方法[18-19]。计算机辅助行星地质分析和GIS多准则决策也为多源空间证据组织与候选方案比较提供了方法基础[20]。但对于需要在大范围候选区域内同时比较大量着陆椭圆的任务而言,如何将上述科学判断进一步表达为统一、可复核且可追溯的计算过程,仍是区域尺度候选区定量筛选需要解决的问题。

基于上述认识,本文面向天问三号候选着陆椭圆的区域尺度选址需求,构建一种自动化、可追溯、可配置的科学价值定量评价流程。首先,融合火星光学影像、数字高程模型(digital elevation model,DEM),火星轨道水成蚀变特征目录(Mars orbital catalog of aqueous alteration signatures,MOCAAS),以及火星全球地质图、撞击坑目录、热惯量和沙尘指数等多源数据,统一组织工程参数与地貌、地层和矿物科学证据;其次,利用公开任务约束和既有遥感数据体系,建立工程—科学双阶段自动选址流程,工程阶段采用任务尺度椭圆移动窗口和连通域分析自动识别可行空间并生成候选着陆椭圆,保证科学评价只在满足工程安全条件的候选集合内开展;最后,将单一证据具有多解性的地貌、地层和矿物信息组织为多证据组合,从5个科学维度开展多目标比较,根据任务科学目标给定优先级和权重,对候选方案进行自动排序,实现可解释、可追溯的候选椭圆优选。

1 研究区与多源数据

1.1 候选着陆研究区及地质背景

依据天问三号任务已发表的潜在着陆区域研究[1]及现有遥感资料[11,21-22],本文选取茅尔斯峡谷出口(337°E~348°E,20°N~30°N)、伊希斯平原尼罗堑沟群(72°E~84°E,15°N~24°N)和祝融号着陆区周边(106°E~114°E、21°N~29°N)作为候选着陆区(图1)。3个区域在地形条件、地貌组合、地质演化背景及水活动相关证据等方面具有明显差异,分别代表了古老高地-低地过渡区、大型撞击盆地边缘复杂构造区以及北部低地平原区。

茅尔斯峡谷(图1(b))位于阿拉伯高地西缘,主要发育于诺亚纪古老高地,并跨越南北二分性边界[23]。该区冲沟、水流侵蚀地貌及富含水蚀变信息的地层较为发育,适合开展古代液态水活动、蚀变矿物及地层保存关系研究[11]。

伊希斯平原尼罗堑沟群(图1(c))位于伊希斯大型撞击盆地西北缘,是南部古老高地、盆地低地与尼罗堑沟环状构造带的过渡区域[22]。该区具有复杂的地质单元、撞击构造和矿物异常,可用于分析水活动、物质组成多样性及区域地质演化[24-25]。

祝融号着陆区(图1(d))位于乌托邦平原南部,处于北方荒原组范围内[26]。该区具有天问一号火星车原位探测资料,可为遥感判读、地貌识别及多源地质证据解释提供原位参照[27-28]。

1.2 多源遥感与专题数据

本文综合采用光学遥感影像、DEM及专题数据产品等多源火星轨道遥感数据,以满足研究区地形特征、地貌形态、矿物组成、地质背景及表面

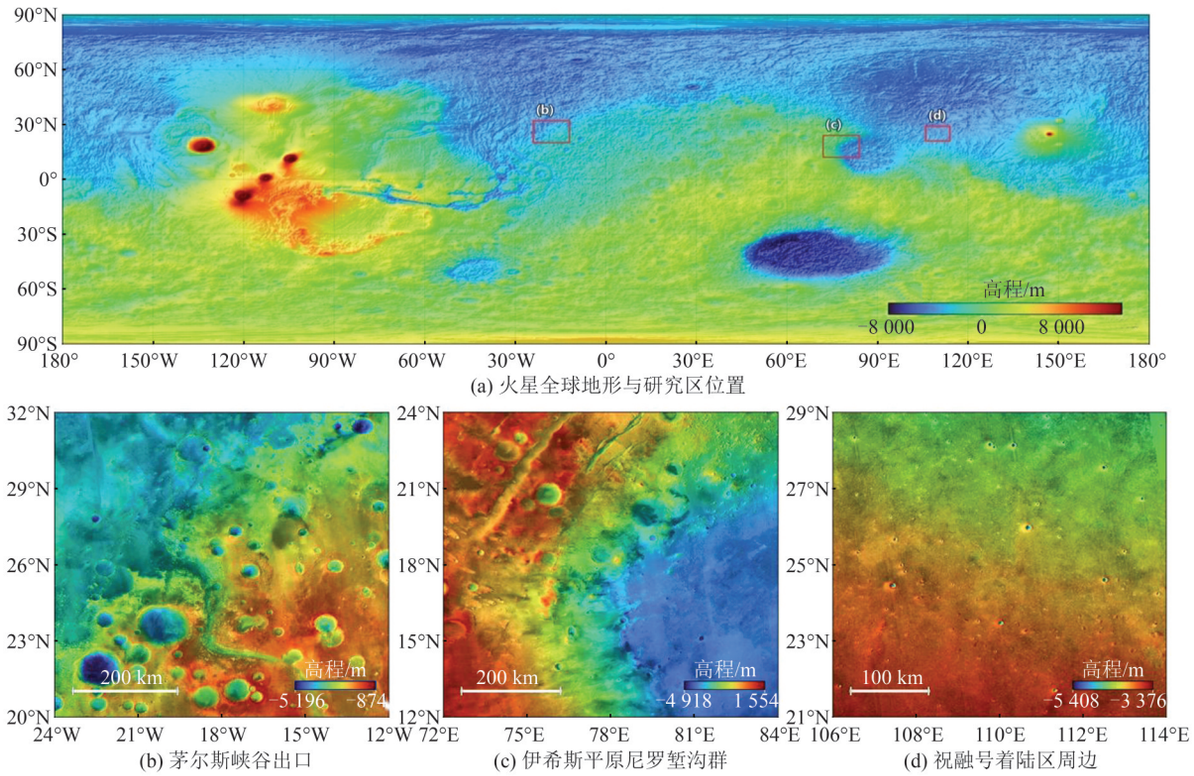


图 1　火星候选着陆研究区位置及地形背景

Fig. 1　Locations and Topographic Contexts of the Candidate Landing Regions on Mars

物理性质等不同尺度信息的综合分析需求。不同数据源在空间分辨率、覆盖范围及观测内容方面具有明显差异,因此,本文根据各类数据的空间尺度和信息特征进行协同使用,并在统一的火星等距圆柱投影坐标框架下完成空间配准和综合分析。本文使用的主要数据及其用途见表 1、图 2。

表 1　本文采用的多源火星遥感与专题数据及主要用途

Table 1　Multi-source Martian Remote Sensing and Thematic Data Used in This Study and Their Main Applications

数据类别	主要数据源	本文主要用途
光学影像	MRO/CTX[29]	连续地表纹理背景、区域地貌识别与编目
地形数据	HRSC/MOLA 融合 DEM[30]	高程、坡度、地形起伏及地貌识别
矿物专题数据	MOCAAS[31]	已报道水成蚀变特征辅助约束
地质年代专题数据	火星全球地质图[32]	地质单元、区域地层及年代背景
撞击专题数据	Robbins-Hynek 撞击坑数据库[33]	撞击坑分布、形态及撞击背景
热物理数据	THEMIS/TES 及相关产品[34-35]	热惯量、反照率及表层物理性质
沙尘覆盖数据	沙尘覆盖指数产品[36]	表面沙尘存在的指标

注:MRO(Mars reconnaissance orbiter)表示火星勘测轨道器;CTX(context camera)表示背景相机;HRSC(high-resolution stereo camera)表示高分辨率立体相机;MOLA(Mars orbiter laser altimeter)表示火星轨道激光高度计;THEMIS(thermal emission imaging system)表示热辐射成像系统;TES(thermal emission spectrometer)表示热辐射光谱仪。

光学影像主要使用 MRO 搭载的 CTX[29]。CTX 影像具有约 5~6 m/pixel 的空间分辨率,能够兼顾较大的空间覆盖范围与较高的地表形态识别能力。本文主要采用全球 CTX 镶嵌产品作为研究区连续影像底图[37],该产品在 5 m/pixel 尺度上提供了大范围连续且空间一致性较高的火星表面纹理信息,可表征火星地表形态。

地形数据主要使用火星快车号 HRSC 立体测图结果与火星全球探勘者号(Mars global surveyor,MGS)MOLA 高程数据融合形成的 DEM 产品[30, 38]。HRSC 能够通过多角度立体成像恢复火星表面地形,MOLA 提供了具有较高垂直精度和全球一致性的高程基准,二者融合能够兼顾区域地形细节与全球高程控制,为高程、坡度、局部地形起伏及粗糙程度等工程安全约束分析提供基础数据[39]。

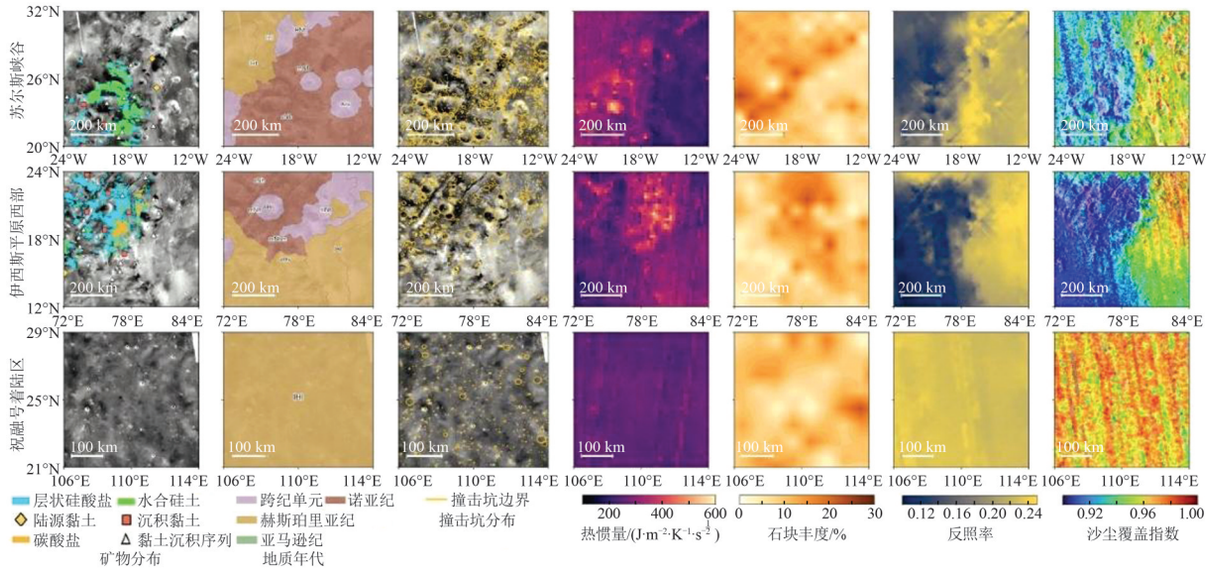


图2 研究区多源遥感与专题数据空间分布

Fig. 2 Spatial Distribution of Multi-source Remote Sensing and Thematic Data in the Study Regions

为获取仅依靠光学形态和地形数据难以确定的地表矿物组成及水成蚀变信息,本文参考MOCAAS等已有矿物专题成果[31,40],对研究区内已报道的水成蚀变矿物及其空间分布进行辅助约束。

本文还引入了包括火星全球地质图[32]、全球撞击坑数据库[33]以及热惯量[34]、反照率[35]和沙尘覆盖指数[36]等相关产品。这些数据仅用于补充研究区地质年代、撞击历史及表面物理性质等背景信息。本文采用的数据在空间尺度和信息类型上具有明显互补性。通过不同尺度、不同观测维度数据之间的协同使用,构建涵盖形态-地形-矿物-地质背景-表面物理性质的多源遥感数据体系,为后续地貌编目、工程约束分析和科学价值评价提供统一的数据基础。

2 基于多要素的工程—科学双阶段自动选址方法

本文采用工程约束筛选与科学价值评价相串联的双阶段选址方法。工程阶段将任务约束的进入、下降和着陆过程所涉及的地形及表面环境要求作为任务参数输入[9],通过多源栅格图层的滑动窗口统计识别满足工程要求的连续可行区域,并在此基础上自动化构建候选着陆椭圆;科学阶段则以工程筛选后得到的候选着陆椭圆作为统一评价单元,统计椭圆内部的地质单元、地貌、矿物异常及其空间组合关系,将可观测地质证据转换为任务需求的科学评价指标,依据任务科学目标进行自动加权综合评价。两个阶段依次回答“是否能够安全着陆”和“在满足工程约束的区域中何处具有更高科学价值”两个问题,工程与科学指标不在同一评分体系中相互补偿,从而避免具有较高科学价值但不满足基本着陆安全要求的区域进入最终优选结果,技术流程参见图3。

从工作流程看,工程—科学双阶段均可划分为任务参数输入、自动化评价、候选结果输出3个层次。输入层包括工程约束阈值、着陆椭圆尺寸与方位、科学评价维度、科学目标优先级和权重等任务相关参数;在任务参数确定后的候选生成与评价过程自动执行计算层,依次执行工程栅格判定、任务尺度椭圆窗口搜索、连通域分析、候选椭圆生成、椭圆内部地质证据统计、科学指标标准化以及综合得分计算;输出层则给出可追溯的工程可行候选椭圆、各维科学得分、综合科学优先级及其对应证据来源。除输入参数和预先定义的评价规则外,计算过程中不针对特定候选椭圆引入额外人工增减分或排序修正。此外,本文方法可以根据不同任务能力和科学目标对参数进行调整和配置,而无需改变整体计算流程。

2.1 多工程要素约束下的候选着陆椭圆自动生成

2.1.1 工程约束栅格构建

工程初筛以统一空间参考和栅格尺度下的连续空间数据为基础。根据DEM[30]、表面障碍物[41]、撞击坑[33]及热物理专题数据[34-35],分别构建高程、坡度、局部起伏度、地表粗糙度、岩石丰度、撞击坑危险区覆盖率、热惯量、反照率及沙尘覆盖等工程参数栅格,并将不同来源数据统一投影、空间配准和重采样至相同分析网格。

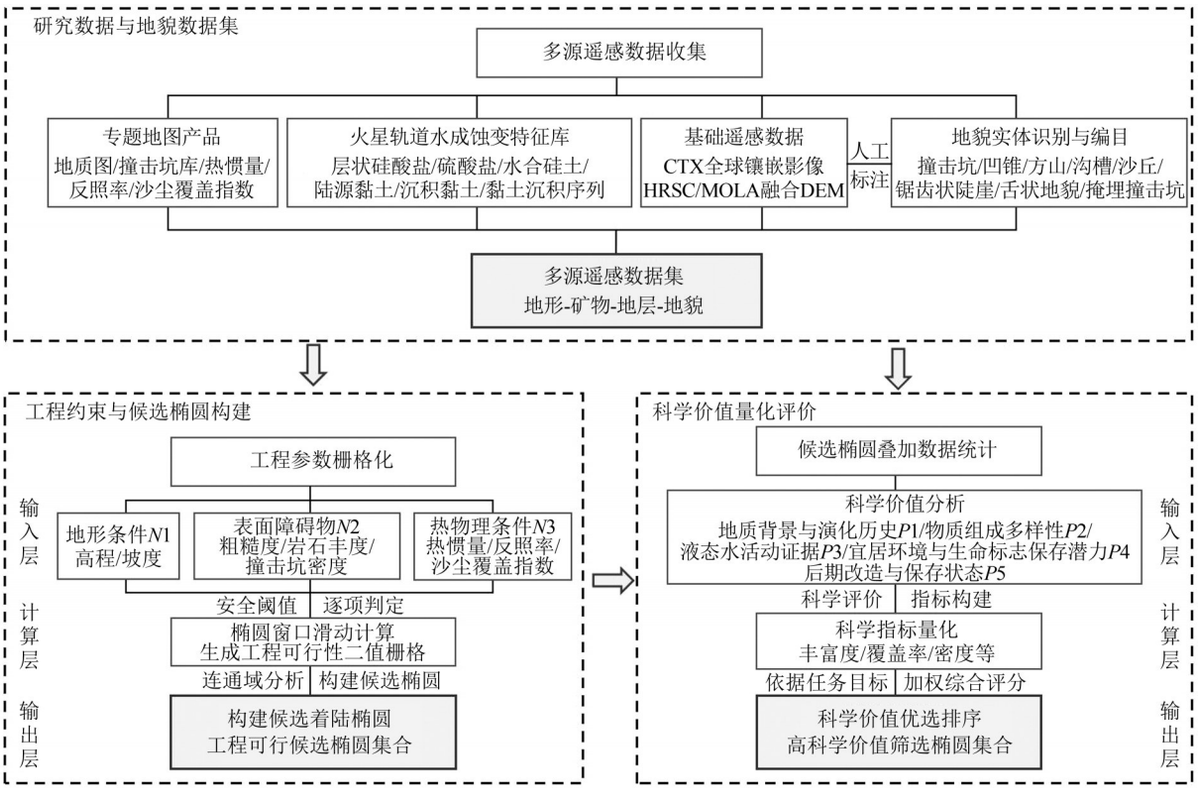


图 3　工程约束筛选与科学价值评价双阶段选址技术路线图

Fig. 3　Workflow of the Two-Stage Landing-Site Selection Method Integrating Engineering-Constraint Screening and Scientific-Value Assessment

设研究区域为Ω,位置p处第k项工程参数记为$X_k(p),p\in\Omega$。各工程参数依据任务设计要求设置相应安全阈值或允许范围[34]。对于可直接进行像元判定的参数,首先获得相应安全性栅格;对于需要考虑任务尺度空间统计特征的参数,则在后续椭圆窗口中计算其面积比例、均值、极值或局部变化程度。地形数据用于反映绝对高程、坡度及局部地形起伏;表面障碍物条件反映岩块及粗糙地表对触地稳定性的影响;热物理条件用于表征表层物质粒径、固结程度和沙尘覆盖等表面环境特征。各工程约束指标、判定阈值及数据基础见表2。

2.1.2　基于任务尺度椭圆窗口的工程可行性判定

为保持工程可行性判定与最终候选着陆椭圆在空间尺度和形状上的一致性,本文采用与任务设计着陆椭圆具有相同长短轴尺度和方位角的椭圆移动窗口开展工程约束计算。已有火星任务着陆区评价同样强调着陆椭圆尺度上的地形和安全条件分析[8,34]。根据任务设计给定着陆椭圆长半轴、短半轴和长轴方位角分别为a、b和θ。对于任一潜在中心位置$c=(x_0,y_0)$,其对应移动窗口记为:

$$W_c=W(c;a,b,\theta) \tag{1}$$

在以窗口中心为原点的平面坐标系中,椭圆内部满足:

$$\frac{x'^2}{a^2}+\frac{y'^2}{b^2}\leqslant 1 \tag{2}$$

其中局部坐标变换为:

$$\begin{cases} x'=(x-x_0)\cos\theta+(y-y_0)\sin\theta \\ y'=-(x-x_0)\sin\theta+(y-y_0)\cos\theta \end{cases} \tag{3}$$

由此,每一个移动窗口均对应一个具有实际任务尺度和方向的潜在着陆椭圆,使工程可行性判定单元与后续科学评价单元保持一致。

对于任一窗口W_c,分别从工程参数栅格中统计各类工程指标。设第k类工程约束的统计函数为$g_k(W_c)$,相应任务允许范围为Γ_k,则该约束的判定结果定义为:

$$N_k(c)=\begin{cases} 1, g_k(W_c)\in\Gamma_k \\ 0, g_k(W_c)\notin\Gamma_k \end{cases} \tag{4}$$

根据不同工程参数的物理意义,g_k分别采用极值、均值、分位数或不安全区域面积比例等统计量。坡度约束采用椭圆内部超过任务允许坡度区域的统计结果,岩石丰度采用窗口内部对应

表2 候选着陆椭圆工程约束指标、判定阈值、数据基础及工程意义

Table 2 Engineering-Constraint Indicators, Thresholds, Data Sources, and Engineering Implications for Candidate Landing Ellipses

工程约束	主要统计参数	参数来源	数据基础	工程意义
地形条件N_1	高程≤−3 000 m	天问三号任务公开约束	HRSC/MOLA DEM	约束着陆区绝对高程,保证进入、下降与着陆阶段具有足够的大气减速距离和着陆高度裕度。
	坡度≤8°	天问三号任务公开约束	HRSC/MOLA DEM	排除陡坡及局部倾斜区域,降低着陆器触地时发生姿态失稳、侧翻或支撑机构受力异常的风险。
表面障碍物N_2	局部起伏≤7 m	本文保守优选参数	HRSC/MOLA DEM	表征着陆尺度内局部地形起伏和表面不平整程度,排除高起伏或高粗糙区域,降低触地稳定性风险。
	石块丰度≤10%	天问三号任务公开约束	岩石丰度产品	限制着陆椭圆内部大型岩块和高岩块丰度区域,降低着陆器触地过程中与岩块碰撞、支撑机构落于障碍物及底部结构受损的风险。
	撞击坑覆盖率≤10%	本文保守优选参数	撞击坑目录及人工识别结果	排除撞击坑坑壁、坑缘及高密度撞击地貌区域,降低局部陡坡、坑缘障碍和复杂微地形对着陆安全的影响。
热物理条件N_3	热惯量>100 tiu	MSL任务公开约束	THEMIS、TES及相关专题产品	排除低热惯量、可能对应厚层细颗粒沉积或高尘覆盖的区域,辅助约束表层物质粒径、固结程度及着陆表面稳定性。
	热反照率<0.25	MSL任务公开约束	THEMIS、TES及相关专题产品	辅助识别高反照率、高尘埃覆盖区域,与热惯量联合约束松散细颗粒物质和表层覆盖特征。
	沙尘覆盖指数>0.96	本文保守优选参数	THEMIS、TES及相关专题产品	表征表面尘埃覆盖程度,辅助控制松散表层物质对着陆稳定性及后续地表作业的影响。

统计值,撞击坑约束采用坑体及其影响区域的覆盖比例,热惯量和反照率则依据其任务允许范围进行判定。

全部工程条件的联合判定表示为:

$$F(c)=\prod_{k=1}^{K}N_k(c) \tag{5}$$

式中,K表示工程约束总数。当全部工程条件同时满足时,$F(c)=1$,表明以位置c为中心的完整任务尺度着陆椭圆满足工程约束;任一工程条件不满足时,则$F(c)=0$。对研究区进行连续遍历后,可得到以潜在椭圆中心位置为对象的二值工程可行性栅格:$F(c)\in\{0,1\}$。因此,工程筛选结果表示能够放置完整任务尺度着陆椭圆的中心位置集合,并作为后续连通域分析和候选椭圆提取的基础。

2.1.3 连通域分析与候选着陆椭圆自动提取

工程可行中心在空间上可能形成连续分布或多个相互分离的区域。本文对$F(c)=1$的中心像元开展空间连通性分析,并采用8邻域连接规则,将水平、垂直及对角方向相邻的工程可行中心像元视为同一连通结构。对于中心像元c_{ij},其8邻域可表示为:

$$N_{ij}=\left\{c_{i+\alpha,j+\beta}\middle|\,\alpha,\beta\in\{-1,0,1\},(\alpha,\beta)\neq(0,0)\right\} \tag{6}$$

式中,α和β分别代表相对于中心像元、在x和y方向上的位置偏移量。

由此将全部工程可行中心位置聚合为若干空间连续的连通域:$C_1,C_2,\cdots,C_M$(M表示连通域总数)。连通域表示候选着陆椭圆中心能够连续布设的空间范围。连通域尺度反映满足工程约束的中心位置空间余量,规模较小或空间孤立的连通域对应较低的中心布设自由度。

为减少同一连续可行区域内候选椭圆的高度重叠,本文利用中心位置到连通域边界的距离确定代表性候选中心。对于第m个连通域C_m内任一位置c,定义:

$$D(c)=d(c,\partial C_m) \tag{7}$$

式中,∂C_m为该连通域边界。候选中心优先选取:

$$c_m^{*}=\underset{c\in C_m}{\operatorname{argmax}}\,D(c) \tag{8}$$

该位置对应连通域内部距离工程不可行边界较远的区域。对于面积较大的连通域,在提取局部极大值的基础上设置最小中心间距,以控制候选椭圆之间的空间重叠程度。最终,以筛选得到的代表性中心c_i和任务给定的a、b、θ构建候选着陆椭圆:

$$E_i=E(c_i;a,b,\theta),i=1,2,\cdots,n \tag{9}$$

由于工程可行性判定采用与最终着陆椭圆一致的窗口尺度和形状,进入科学评价阶段的候选着陆椭圆均已满足本文设定的工程约束。由此完成由工程参数栅格、任务尺度椭圆窗口、工程可行中心、连通域到候选着陆椭圆的空间转换。

2.2　基于多源地质证据的候选着陆椭圆科学价值评价

2.2.1　多源地质证据组织与科学指标构建

根据天问三号任务科学目标及3个研究区现有遥感证据[1,7],本文从地质背景与演化历史、物质组成多样性、液态水活动证据、宜居环境与生命标志保存潜力以及后期改造与地质记录保存状态5个方面进行评价,分别记为P_1～P_5。其中,P_1主要表征候选椭圆所处地质单元、地层年代、撞击改造及多阶段演化背景[33,42];P_2主要依据矿物异常、露头和地质单元信息表征候选区域的物质组成差异[31,40];P_3主要依据候选椭圆内液态水活动的形态与地质记录,主要采用沟槽/河道以及与沉积-侵蚀过程具有较明确空间关系的地貌证据[2,3];P_4重点评价潜在宜居环境及生命标志保存条件,主要采用黏土、层状硅酸盐、水合硅土、碳酸盐、层状沉积序列及反应水热环境等矿物地貌证据[5-6];P_5则反映风成覆盖、撞击改造及地层暴露等后期过程对早期地质记录保存状态的影响[26,43]。对于同一观测对象可能同时具有水活动和保存环境意义的情况,如凹锥、舌状/叶状地貌和部分陡崖等地貌仅凭轨道影像形态通常不能唯一限定其形成机制,按照其区域背景和与其他独立证据的空间关系以及主要科学含义进行归属,避免同一物理信息在$P3$和$P4$中以相同意义重复完整计分。各维度所采用的定量指标和数据基础见表3。

表3　候选着陆椭圆科学评价维度、定量指标及数据基础

Table 3　Scientific-Assessment Dimensions, Quantitative Indicators, and Data Sources for Candidate Landing Ellipses

科学维度	本文采用的定量指标	主要数据
地质背景与演化历史P_1	地质单元类型数N_g、各单元面积比例、地质单元面积多样性H_g、主要地层/构造边界长度密度、撞击坑数量密度、掩埋撞击坑数量密度	全球地质图、CTX、DEM及地貌编目
物质组成多样性P_2	矿物/露头类别数N_m;矿物异常总覆盖率;矿物类别面积多样性H_m	MOCAAS矿物专题产品
液态水活动证据P_3	沟槽/河道长度密度D_L、水活动相关地貌面积比例、水成地貌类型数、与沟槽/河道分布相关的舌状地貌密度作为间接证据	CTX、DEM及地貌编目
宜居环境与保存潜力P_4	黏土沉积序列覆盖率、不同水成矿物类型丰富度、沟槽/河道、层状地层等沉积地貌密度、潜在流体/挥发分活动相关凹锥数量密度	CTX、DEM及地貌编目
后期改造与保存状态P_5	风成地貌覆盖率、撞击改造强度、锯齿状陡崖及方山所反映的地层暴露的地貌密度	CTX、THEMIS/TES及地貌编目

设候选椭圆E_i的面积为A_i,各科学维度可采用以下定量指标进行表征。对于撞击坑、方山等面状地貌G,其在候选椭圆内的覆盖率计算为:

$$R_G(E_i)=\frac{A(G\cap E_i)}{A_i} \tag{10}$$

对于河谷、冲沟、皱脊等线状地貌,可使用单位面积长度(L)密度表示:

$$D_L(E_i)=\frac{\sum L(G\cap E_i)}{A_i} \tag{11}$$

对于撞击坑等点状或离散对象,可采用单位面积数量(N)密度:

$$D_N(E_i)=\frac{N(G\cap E_i)}{A_i} \tag{12}$$

不同地质或矿物类型的丰富程度除采用类型数外,还可进一步通过面积比例计算Shannon多样性指数[44]:

$$H_i=-\sum_{r=1}^{m}q_{ir}\ln q_{ir} \tag{13}$$

式中,q_{ir}为第r类地貌在候选椭圆内所占面积比例。该指标同时反映类型丰富度及不同类型之间的面积分配特征。

为降低同一证据在不同科学维度之间的重复计分,指标按照其主要科学含义进行归类。液态水活动相关形态证据主要用于表征P_3,水成蚀变矿物及沉积保存条件主要用于表征P_4,从而区分液态水活动过程证据和宜居环境及保存条件证据。

2.2.2　科学指标标准化与维度得分计算

不同科学指标分别采用数量、长度、密度及面积比例等不同量纲,因此在综合计算前进行无量纲化处理。对于数值增大对应科学价值提高的正向指标,表示为:

$$z_{ir}^{+}=\frac{x_{ir}-x_r^{\min}}{x_r^{\max}-x_r^{\min}} \tag{14}$$

对于风成覆盖、后期扰动等数值越大表示保存条件越差的负向指标,表示为:

$$z_{ir}^{-}=\frac{x_r^{\max}-x_{ir}}{x_r^{\max}-x_r^{\min}} \tag{15}$$

式中,x_{ir}为第i个候选椭圆第r项原始指标值;$x_r^{\min}$和$x_r^{\max}$分别为相应指标在参与比较的全部候选椭圆中的最小值和最大值。

第j个科学维度若由m_j个子指标构成,则维度得分表示为:

$$P_{ij}=\sum_{r=1}^{m_j}\beta_{jr}z_{ijr} \tag{16}$$

式中,$\sum_{r=1}^{m_j}\beta_{jr}=1$,$\beta_{jr}$为同一科学维度内部各子指标的权重。本文分别在各研究区内部对候选着陆椭圆进行标准化和排序。标准化后的综合科学得分主要用于同一研究区内部候选方案的相对比较,不用于3个研究区之间绝对科学价值的直接比较。

2.2.3 任务目标权重与综合科学排序

依据天问三号任务对液态水活动、宜居环境与生命标志保存潜力以及物质组成等科学问题的关注程度,本文将5个科学维度的优先级设置为:$P_3>P_4>P_2>P_5>P_1$。

为将上述序位偏好转换为数值权重,采用基于排序的rank-sum方法计算各科学维度权重。设指标总数为$m=5$,第j个指标的优先等级为r_j,则:

$$w_j=\frac{m-r_j+1}{\sum_{k=1}^{m}(m-r_k+1)} \tag{17}$$

由此将任务科学目标对应的序位偏好转换为统一的权重体系。候选着陆椭圆的综合科学价值评分计算为:

$$S_i=\sum_{j=1}^{5}w_jP_{ij} \tag{18}$$

综合得分S_i越高,表示该候选椭圆在当前任务科学目标及权重体系下具有越高的区内科学优先级。最终依据综合得分对各研究区内部候选着陆椭圆进行排序,并结合各维度得分及其对应的地貌、地层和矿物证据解释排序结果。

2.2.4 历史任务回溯性落点验证方法

为检验本文方法在已有火星着陆任务场景中的空间一致性,进一步选取Mars 2020任务的杰泽罗撞击坑[13,45]和MSL任务的盖尔撞击坑[8,15]开展回溯性验证。验证过程中沿用前述"工程约束筛选—候选着陆椭圆生成—科学价值评价"的计算流程,对两个历史任务区域独立生成候选着陆椭圆并进行科学优先级排序。实际火星车着陆点坐标不参与工程筛选和科学评分,仅在完成候选椭圆排序后作为独立空间参考,用于判断高排名候选椭圆是否覆盖实际落点。

2.3 稳健性与不确定性评价

为评价模型输出对工程参数、任务科学偏好以及地貌观测不确定性的依赖程度,本文在主体评价结果基础上进一步开展工程约束阈值敏感性、科学目标优先序敏感性以及地貌目录不确定性扰动实验。

1)工程约束阈值敏感性

以主体实验工程参数为基准,每次仅将高程、坡度、岩石丰度或承重能力中的一项调整至较宽松的次优选条件,其余工程参数保持不变。对每种情景重新计算工程可行区域,并统计工程可行面积比例、连通域数量、满足相应条件的候选数量。候选着陆椭圆工程约束敏感性次优选指标见表4。

表4 候选着陆椭圆工程约束敏感性次优选指标

Table 4 Suboptimal Selection Indicators of Candidate Landing Ellipses Under Engineering-Constraint Sensitivity

工程约束	次优选指标参数	参数依据
地形条件N_1	高程≤−2.5 km 坡度<15°	InSight着陆安全约束
表面障碍物N_2	石块丰度≤15%	本文保守优选参数
热物理条件N_3	热惯量>100 tiu或 热反照率<0.25	MSL着陆安全约束

2)科学目标优先序敏感性

以主体评价采用的$P1\sim P5$优先关系为基准,通过交换相邻科学维度的优先等级构建若干任务偏好情景。基准科学优先关系权重比例为$P1:P2:P3:P4:P5=1:3:5:4:2$,以此为基准,设置3种优先级调整情景:$S1=1:3:4:5:2$,即提高$P4$相对于$P3$的优先级;$S2=1:4:5:3:2$,即提高$P2$并降低$P4$的相对优先级;$S3=1:5:4:3:2$,即进一步将$P2$调整为最高优先维度。每种情景重新采用rank-sum方法计算科学权重,并重新计算候选着陆椭圆综合得分。采用区域Top-1保持情况、Top-5集合重合率以及Spearman秩相关系数评价不同科学偏好条件下排序结果的稳定程度。

3)地貌目录不确定性扰动

为评价人工地貌编目可能存在的漏检和误检对最终科学评分的影响,分别设置5%、10%和20%的低、中、高地貌目录扰动情景,对参与科学计算的地貌统计量进行随机漏检和误检模拟。每个不确定性等级进行多次蒙特卡洛模拟,并统计候选椭圆保持Top-1和进入Top-5的概率,以评价观测误差由地貌实体层向最终科学排序的传播程度。

3　自动选址结果与分析

3.1　地貌编目与区域地质证据特征

3.1.1　典型地貌类型及遥感识别特征

着陆区科学价值并不能由单一遥感参数直接表征,需要通过具有明确地质意义的地貌、地层和矿物结果,推断区域经历的主要地质过程及其与任务科学目标之间的关系。因此,本文识别的地貌优先选取能够反映地质演化、水活动、沉积与侵蚀过程以及后期表面改造状态,并能够利用现有轨道遥感影像进行稳定识别和空间统计的地貌类型。

结合3个候选着陆区的实际地貌组成以及后续科学价值评价需求,本文重点提取撞击坑、沙丘、凹锥、方山、沟槽/河道、锯齿状陡崖、舌状地貌和掩埋撞击坑等地貌类型。上述地貌分别从不同角度为5项科学评价维度提供观测证据:撞击坑、掩埋撞击坑主要记录地表形成、侵蚀、覆盖及多阶段演化过程,可用于约束地质背景与演化历史;凹锥和舌状地貌存在成因多解性,其数量本身不再作为确定液态水活动或生命标志保存环境的直接证据,而仅作为区域地质背景和空间组合的辅助信息;沙丘等风成地貌反映后期表面改造和覆盖作用;陡崖、方山及残余台地则有助于判断地层暴露以及早期地质记录的保存状态。对于具有多种可能成因的地貌,如凹锥、舌状地貌和锯齿状陡崖,本文将遥感影像中的形态信息转化为可定位、可统计的证据对象,不单独以形态确定其具体成因,只在科学评价时结合其空间位置、邻接关系进行分析[26, 46-48]。

地貌识别主要基于CTX连续影像与DEM的地形表达,为保证结果可靠,采用分组交叉核查提高地貌编目的一致性。不同地貌依据其平面几何形态、地形起伏、阴影特征、边界形态和与周围地貌之间的空间关系进行判读。图4给出了本文主要地貌类型的典型遥感实例及其基本识别特征。

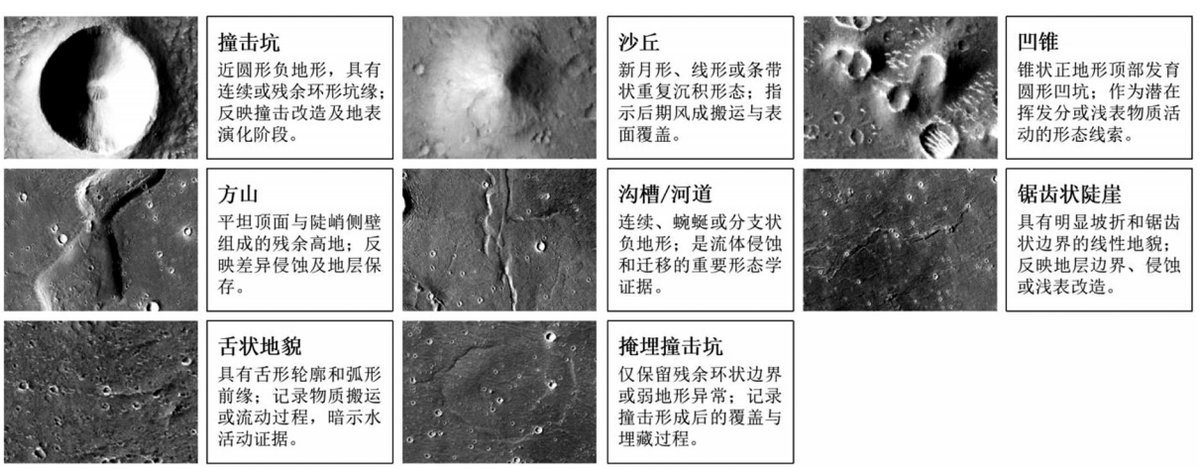


图4　火星候选着陆区典型地貌及遥感识别特征

Fig. 4　Typical Landforms and Their Remote Sensing Identification Characteristics in the Candidate Landing Regions on Mars

总体上,上述地貌是构成候选着陆椭圆内部的地貌证据组合。后续科学价值评价以这些可定位、可计数和可进行空间统计的地貌为基础,通过其数量、密度、面积、长度及空间组合关系,将遥感观测信息进一步映射至地质背景与演化、水活动、宜居环境及后期改造等科学维度。

3.1.2　研究区地貌实体编目与组合特征

基于统一的地貌分类与遥感判读规则,对茅尔斯峡谷、伊希斯平原尼罗堑沟群和祝融号着陆区进行了区域尺度地貌编目。统计结果表明,3个研究区均受到撞击改造,但在风成地貌、凹锥、流水相关地貌以及后期覆盖和侵蚀地貌方面表现出明显差异(表5、图5),体现出不同的区域地貌组合特征。

撞击坑作为地外天体分布最广泛的地貌,在3个研究区均有广泛分布。撞击坑累积频率也通常作为判断区域相对年龄的最直观的手段之一[42]。撞击坑累积特征反映研究区经历了长期撞击改造,并可为区域相对地质时代判断提供辅助依据[33]。除撞击坑外,3个研究区的地貌组合具有较强的区域性。茅尔斯峡谷大规模河道、残余台地共同分布,其早期可能存在大规模的液态水活动。伊希斯平原尼罗堑沟群地貌类型更加多样,存在凹锥、方山、沟槽、陡崖等多类型特殊地貌共同出现的复杂组合,反映较复杂的表面演化和地质过程组合,具体成因需结合地层与矿物证据进一步约束。祝融号着陆

表5 候选着陆区地貌实体编目统计结果

Table 5 Inventory Statistics of Geomorphic Features in the Candidate Landing Regions

研究区	撞击坑	沙丘	凹锥	方山	河道	沟槽	冲沟	舌状地貌	锯齿状陡崖	陡崖	掩埋撞击坑
茅尔斯峡谷	35 514	674 501	8	245	66	56	0	0	0	0	0
伊希斯平原尼罗堑沟群	73 744	1 367 056	5 563	225	0	25	0	1	0	17	0
祝融号着陆区	58 032	528 366	2 582	148	0	0	156	1 741	383	0	151

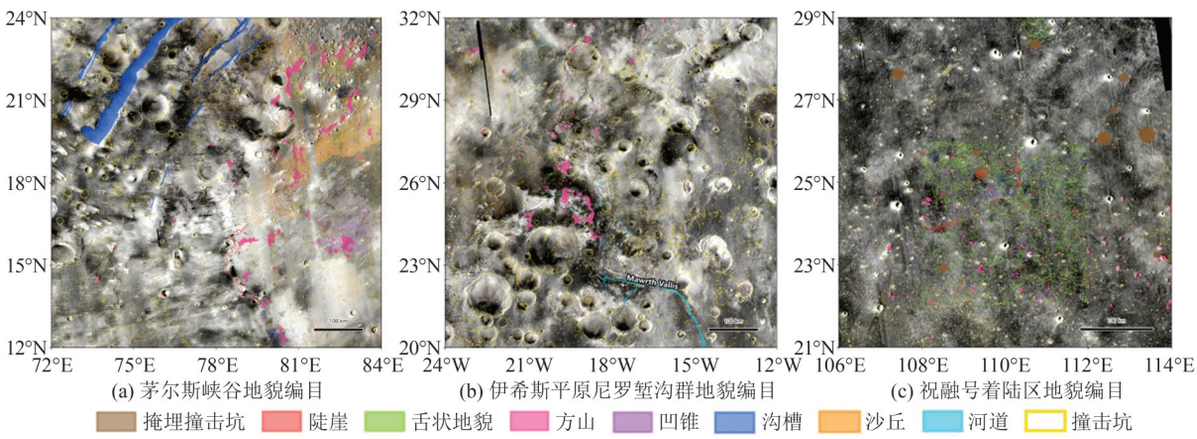


图5 候选着陆区地貌实体编目及空间分布

Fig. 5 Inventory and Spatial Distribution of Geomorphic Features in the Candidate Landing Regions

区则表现出不同于前两个区域的地貌组成,舌状地貌、锯齿状陡崖和掩埋撞击坑在该区具有较为突出的数量特征,反映其地表保存了较丰富的浅表改造、侵蚀和覆盖相关形态记录。

此外,不同类型地貌在单位面积尺度上的差异进一步体现了区域地貌组合的非均一性。例如,凹锥在茅尔斯峡谷极少出现,在伊希斯平原尼罗堑沟群和祝融号着陆区分布广泛;方山在3个区域数量相近,但考虑面积差异后,祝融号着陆区的单位面积丰度相对较高。这表明仅使用地貌绝对数量不足以完成跨区域比较,地貌密度以及面状、线状地貌的面积和长度信息能够更有效地反映不同区域的地貌组成差异。

3个候选着陆区表现出3类不同的地貌组合:茅尔斯峡谷以局部河道、残余地形为主要特征;伊希斯平原尼罗堑沟群具有更丰富的凹锥以及多类型地貌共同分布特征;祝融号着陆区则以舌状地貌、沟槽、锯齿状陡崖和掩埋撞击坑等浅表改造地貌较为突出。上述区域差异为后续候选着陆椭圆内部地貌统计和P_1~P_5科学评价提供了具有明显空间异质性的基础数据。

3.2 工程可行域与候选着陆椭圆生成结果

3.2.1 工程可行域空间分布与连通特征

基于高程、坡度、地形起伏、表面障碍物、撞击坑影响范围及热物理性质等工程约束,对3个候选着陆区开展栅格化工程可行性判定,工程约束结果参见图6。工程约束叠加后,3个研究区的工程可行面积及其空间连续性表现出明显差异(表6)。

茅尔斯峡谷研究区约65.17%的区域受到工程条件限制被排除,工程可行像元在空间上呈明显的离散和破碎分布。可行区域主要集中在研究区西北部地形相对平缓的位置,少量候选椭圆位于Oyama撞击坑内部,峡谷主体及局部地形起伏较大的区域工程可行性明显较低。伊希斯平原尼罗堑沟群研究区约69.04%的研究区被工程约束排除。伊西斯平原的工程可行区域具有较强的集中性,主要分布于大型撞击坑内部相对平坦区域。

祝融号着陆区表现出与前两个区域明显不同的工程条件,仅有少数区域被排除。由于区域整体地形平缓且工程可行空间连续性较高,可供任务尺度着陆椭圆布设的范围明显大于茅尔斯峡谷和伊希斯平原尼罗堑沟群。

3.2.2 候选着陆椭圆生成与空间分布

在工程可行性判定基础上,进一步结合任务着陆椭圆的长短轴尺度、方位角、候选中心之间的空间距离以及可行区域完整性生成备选着陆椭圆。图7展示了3个研究区获得的54个工程可行候选着陆椭圆,其中茅尔斯峡谷12个、伊希斯平原尼罗堑沟群12个、祝融号着陆区30个。不同研究区候选数量并不与初始研究区面积呈简

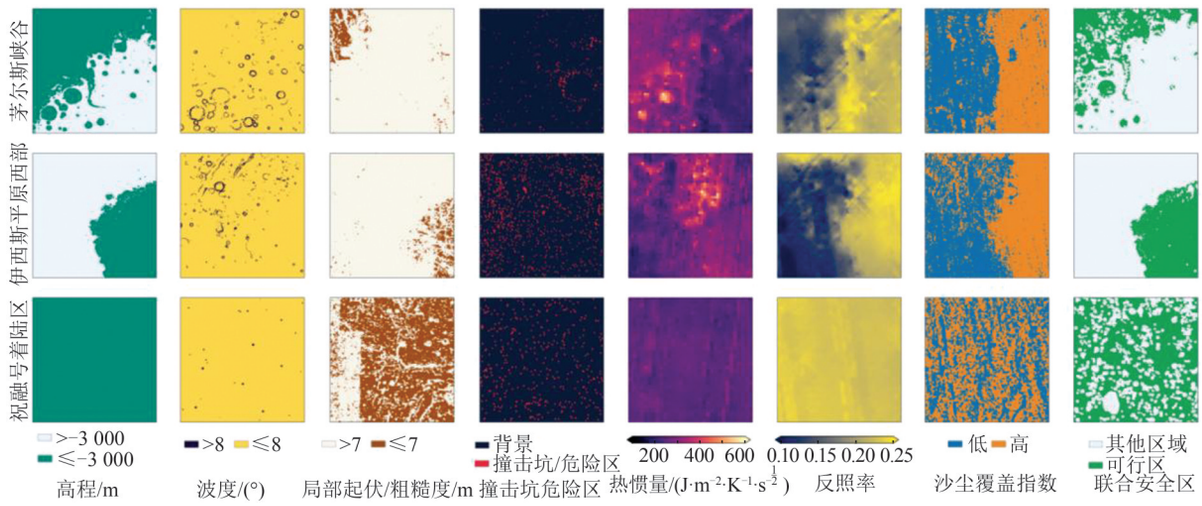


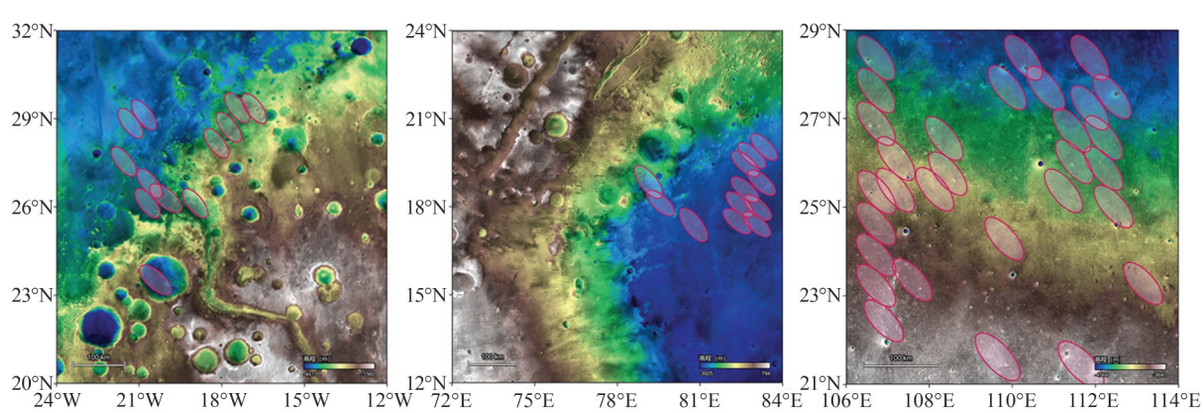
图 6　候选着陆区工程约束要素及工程可行域分布

Fig. 6　Engineering-Constraint Factors and Spatial Distribution of Engineering-Feasible Areas in the Candidate Landing Regions

表 6　候选着陆区工程可行域及连通域统计结果

Table 6　Statistics of Engineering-Feasible Areas and Connected Components in the Candidate Landing Regions

研究区	原始面积/km²	工程可行域面积/km²	可行面积比例/%	连通域数量	保留连通域数量
茅尔斯峡谷	452 137.57	157 499.77	34.83	282	188
伊希斯平原尼罗堑沟群	480 300.96	148 720.48	30.96	21	1
祝融号着陆区	203 797.78	202 259.63	99.25	8	6



(a) 茅尔斯峡谷候选椭圆　(b) 伊希斯平原尼罗堑沟群候选椭圆　(c) 祝融号着陆区候选椭圆

图 7　候选着陆区工程可行候选着陆椭圆空间分布

Fig. 7　Spatial Distribution of Engineering-Feasible Candidate Landing Ellipses in the Candidate Landing Regions

单正相关,主要受工程可行面积比例、可行区域连续程度以及单个连通域能否容纳完整任务尺度着陆椭圆等因素共同控制。

从空间分布来看,茅尔斯峡谷候选椭圆主要集中于研究区西北部平缓区域;伊希斯平原尼罗堑沟群的候选方案集中于研究区东南部大型撞击坑内部及其邻近连续平缓区域;祝融号着陆区由于整体地势平坦,候选椭圆在研究区内部的分布范围更广。上述空间差异与各研究区的区域地形和工程可行域结构具有较好的一致性。

因此,工程筛选由像元级约束、连通域判定和任务尺度椭圆布设3个空间层级依次完成。最终得到的54个候选着陆椭圆均满足本文设定的工程约束,并作为下一阶段科学价值评价的统一空间单元。

3.3　候选着陆椭圆科学价值评价与优选结果

3.3.1　科学指标总体特征

在工程约束筛选结果的基础上,分别以候选着陆椭圆为统一空间统计单元,对其内部地貌、地层和矿物证据进行统计,并从科学维度:地质背景与演化历史 P_1、物质组成多样性 P_2、液态水活动证据 P_3、宜居环境与生命标志保存潜力 P_4、后期改造与

地质记录保存状态P_5 5个维度开展科学价值评价(图8)。

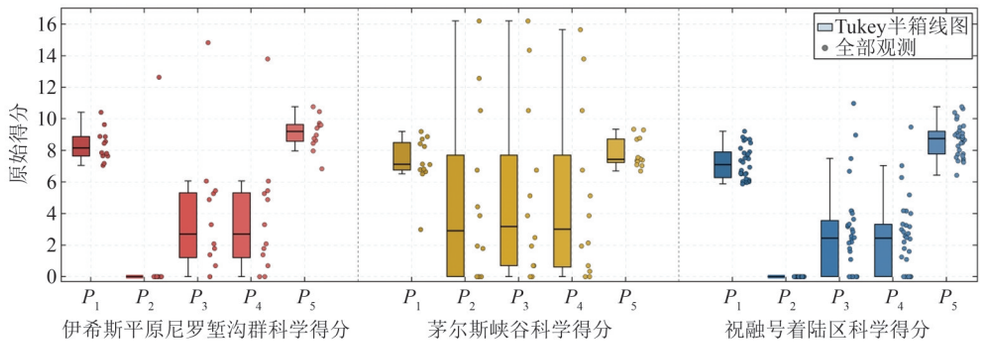


图8 研究区候选着陆椭圆P_1～P_5科学价值分布

Fig. 8 Distributions of P_1-P_5 Scientific-Value Scores for Candidate Landing Ellipses in the Study Regions

从图8可以看出,3个研究区内的地质背景与演化历史均表现出较大的候选间差异,说明不同工程可行椭圆所覆盖的撞击密度、地层背景并不均一。部分候选椭圆虽然具有较高的地质背景与演化历史得分,但在液态水活动证据和物质组成多样性相关指标上相对较弱,因此并未获得最高综合优先级,表明古老地质背景并不必然对应更高的综合科学优先级。

物质组成多样性表现出明显的区域间差异。伊希斯平原尼罗堑沟群和茅尔斯峡谷的部分椭圆赋存丰富的层状硅酸盐、水合硅土、硫酸盐等含水矿物,因此该指标能够形成较明显的候选区分。相比之下,祝融号着陆区当前矿物数据未在候选椭圆之间形成有效区分。因此,在祝融号着陆区内部,物质组成多样性维度实际上不改变候选椭圆之间的相对排序。

液态水活动证据和宜居环境与生命标志保存潜力总体表现出较一致的空间变化趋势,具有较丰富沟槽/河道、凹锥及其他与流体活动有关的形态证据,或同时具有水成蚀变矿物异常的候选椭圆,通常在液态水活动证据和宜居环境与生命标志相关维度上表现出较高得分。由于这两个维度分别对应是否保存液态水活动证据和是否具有较好的宜居环境与生命标志保存潜力,它们在评价逻辑上具有联系,但侧重点不同。

后期改造与地质记录保存状态与前述科学证据呈现不同的变化特征。部分候选椭圆虽然具有较丰富的水活动或地质演化信息,但其沙丘覆盖及后期扰动降低古老地质记录的暴露和保存评价,使得分相对较低;另一些候选椭圆虽然后期改造较弱,却缺少与核心科学目标直接相关的水活动和宜居环境证据。因此,后期改造与地质记录保存状态主要起到区分作用,不能单独决定最终科学优先级。科学指标揭示了不同候选着陆椭圆之间明显的多维权衡关系。由此,最终的综合评分反映出不同类型地质证据对着陆椭圆的组合影响。

3.3.2 研究区代表性候选着陆椭圆科学证据与优选结果

科学评价结果表明,3个研究区内部均形成了较为明显的候选着陆椭圆科学价值梯度,但不同候选之间的优势来源并不一致。为进一步展示不同评价等级及不同地质证据组合在遥感影像中的实际表现,本文分别从3个研究区均选取4个具有代表性的候选着陆椭圆进行对比(表7)。

伊希斯平原尼罗堑沟群的代表性候选椭圆(图9)总体表现出较强的撞击改造背景,并发育数量不等的沙丘、凹锥和方山,反映了撞击、风成作用及局部地表改造共同塑造的复杂地貌环境。4个代表候选椭圆的综合得分分别为74.54、23.26、14.88和8.41,IB-01得分最高,为优选椭圆,较IB-02高51.28分,表现出较明显的区内排序优势。优选椭圆内部集中识别出的凹锥群和方山反映较复杂的地貌与地层背景。此外,相比其他候选椭圆,优选椭圆内方山数最多,共计20余处。方山可以提供该区域暴露的不同地层,降低采样难度,对获取高价值样品、理解火星古环境演化有重要意义,且撞击坑、沙丘等后期改造相关的地貌数量也明显少于其他椭圆。因此,对于重建古环境水活动和环境演化具有较高的科学潜力。

茅尔斯峡谷代表性候选椭圆(图10)总体体现出古老地层、撞击改造、风成覆盖以及水成矿物共同作用的地质特征,其中不同候选椭圆之间的主要差异表现为水成矿物异常的丰富程度及其与地貌背景的组合关系。4个代表候选椭圆的

表 7　研究区代表性候选着陆椭圆科学评价结果

Table 7　Scientific-Assessment Results for Representative Candidate Landing Ellipses in the Study Regions

研究区	编号	中心经度/(°E)	中心纬度/(°N)	综合得分	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
伊希斯平原尼罗堑沟群	IB-01	83.07	17.39	74.54	64.81	0.00	75.52	68.19	71.45
	IB-02	80.77	17.37	23.26	100.00	0.00	14.02	15.08	59.21
	IB-03	82.66	19.45	14.88	76.80	0.00	9.35	10.05	29.72
	IB-04	79.57	18.12	8.41	23.73	0.00	0.00	0.00	51.21
茅尔斯峡谷	MV-01	−18.96	26.12	94.25	66.30	100.00	100.00	100.00	73.74
	MV-02	−20.02	26.29	84.21	84.91	77.54	88.60	88.20	74.90
	MV-03	−20.61	26.79	41.45	94.80	27.36	31.64	32.75	77.85
	MV-04	−20.82	29.12	6.99	61.73	0.00	0.00	0.00	21.57
祝融号着陆区	Zr-01	109.80	24.28	82.94	67.70	50.00	100.00	100.00	63.17
	Zr-02	109.65	21.62	34.86	89.16	50.00	25.79	29.87	17.67
	Zr-03	111.50	26.02	34.20	22.08	50.00	33.12	28.91	29.82
	Zr-04	109.88	27.69	16.33	2.57	50.00	0.00	0.00	46.18

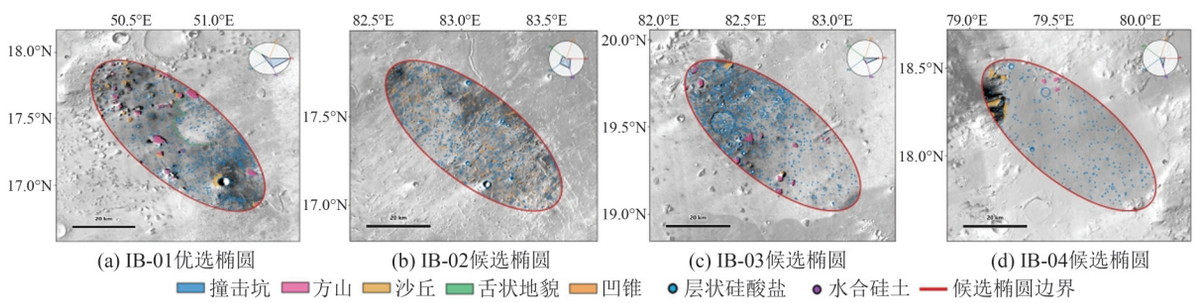


图 9　伊希斯平原尼罗堑沟群代表性候选着陆椭圆及地貌-矿物证据分布

Fig. 9　Representative Candidate Landing Ellipses and Associated Geomorphic-Mineralogical Evidence in Isidis Planitia-Nili Fossae

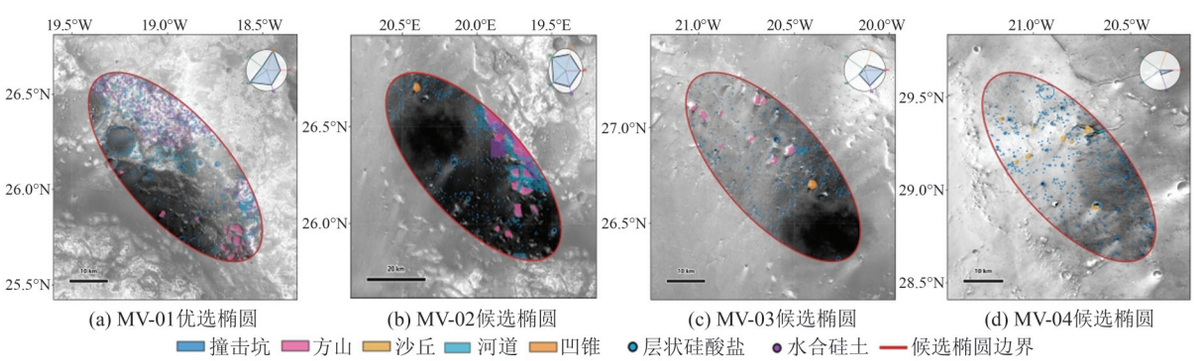


图 10　茅尔斯峡谷代表性候选着陆椭圆及地貌-矿物证据分布

Fig. 10　Representative Candidate Landing Ellipses and Associated Geomorphic-Mineralogical Evidence in Mawrth Vallis

综合得分分别为 94.25、84.21、41.45 和 6.99,其中 MV-01 为优选椭圆,其内部层状硅酸盐和水合硅土富集,远超其他候选椭圆,并伴有少量硫酸盐,同时保留方山、沟槽等地貌证据,对液态水活动、古环境变化以及潜在宜居环境的科学目标具有更直接的指向性。

由于祝融号着陆区矿物专题数据未形成明显的空间区分,该区域的科学评价主要依靠地貌实体组合来反映地质演化、水活动和后期保存状态。4 个代表候选椭圆的得分依次为 82.94、34.86、34.20 和 16.33,其中 Zr-01 得分最高,较 Zr-02 高 48.08 分,区分度较为明显。由图 11 可以看出,候选范围内普遍保存撞击坑和风成改造记录,局部区域发育凹锥、沟槽/河道、锯齿状陡崖、舌状地貌及掩埋撞击坑等多种特殊形态,不同候选之间的得分差异主要表现为这些过程性地貌的分布情况。优选椭圆的科学价值主要来自多类型地貌证据在同一任务尺度椭圆内共同出现。椭圆内存在 10 处沟槽/河道、139 个凹锥以及 45 处舌状地貌等形态证据,沟槽/河道为流体侵蚀或

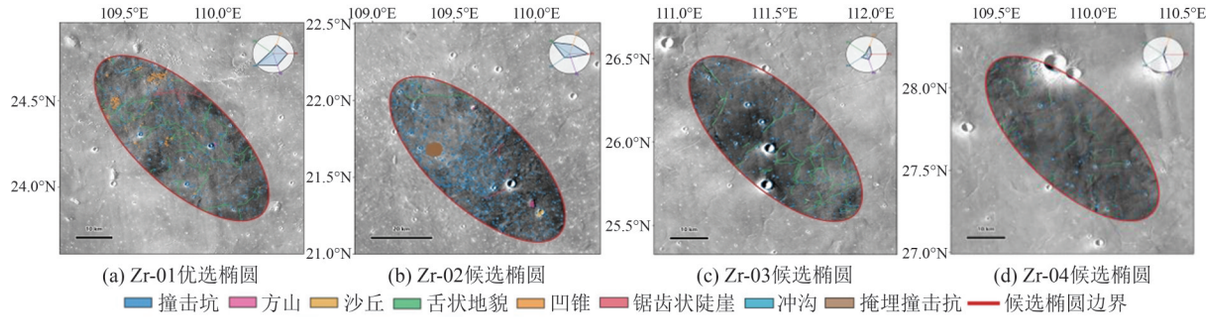


图11 祝融号着陆区代表性候选着陆椭圆及地貌科学证据分布

Fig. 11 Representative Candidate Landing Ellipses and Geomorphic Evidence in Zhurong Landing Region

迁移过程提供相对直接的形态学约束;同时,掩埋撞击坑和陡崖等地貌又为判断后期覆盖、侵蚀及地质记录保存状态提供了附加信息。因此,在缺少明显矿物差异的情况下,优选椭圆依靠丰富且具有互补意义的地貌组合形成较高的综合科学优先级。

从研究区的区内排序结果看,优选、候选与次优代表性候选之间的综合得分差至少超过10分,说明该评价体系能够在不同地质背景下形成一定的候选区分度。此外,3个研究区代表性候选椭圆的结果还表现出明显的区域差异性,说明高科学价值并不对应固定的地貌或矿物组合。伊希斯平原尼罗堑沟群区域的候选差异主要体现为地质演化背景与水活动、保存条件之间的组合差异;茅尔斯峡谷的高优先级候选突出表现为水成矿物与多阶段地质记录的共同保存;祝融号着陆区则更多依赖多类型地貌对水活动和地表演化过程的综合指示。尽管高分候选的具体证据来源不同,但优选椭圆普遍具有一个共同特征,即与任务核心科学目标相关的多类地质证据能够在任务尺度着陆椭圆内部形成较好的空间组合,仅在单一评价维度表现突出通常不足以形成稳定的综合科学优势。

3.3.3 历史任务回溯性落点验证结果

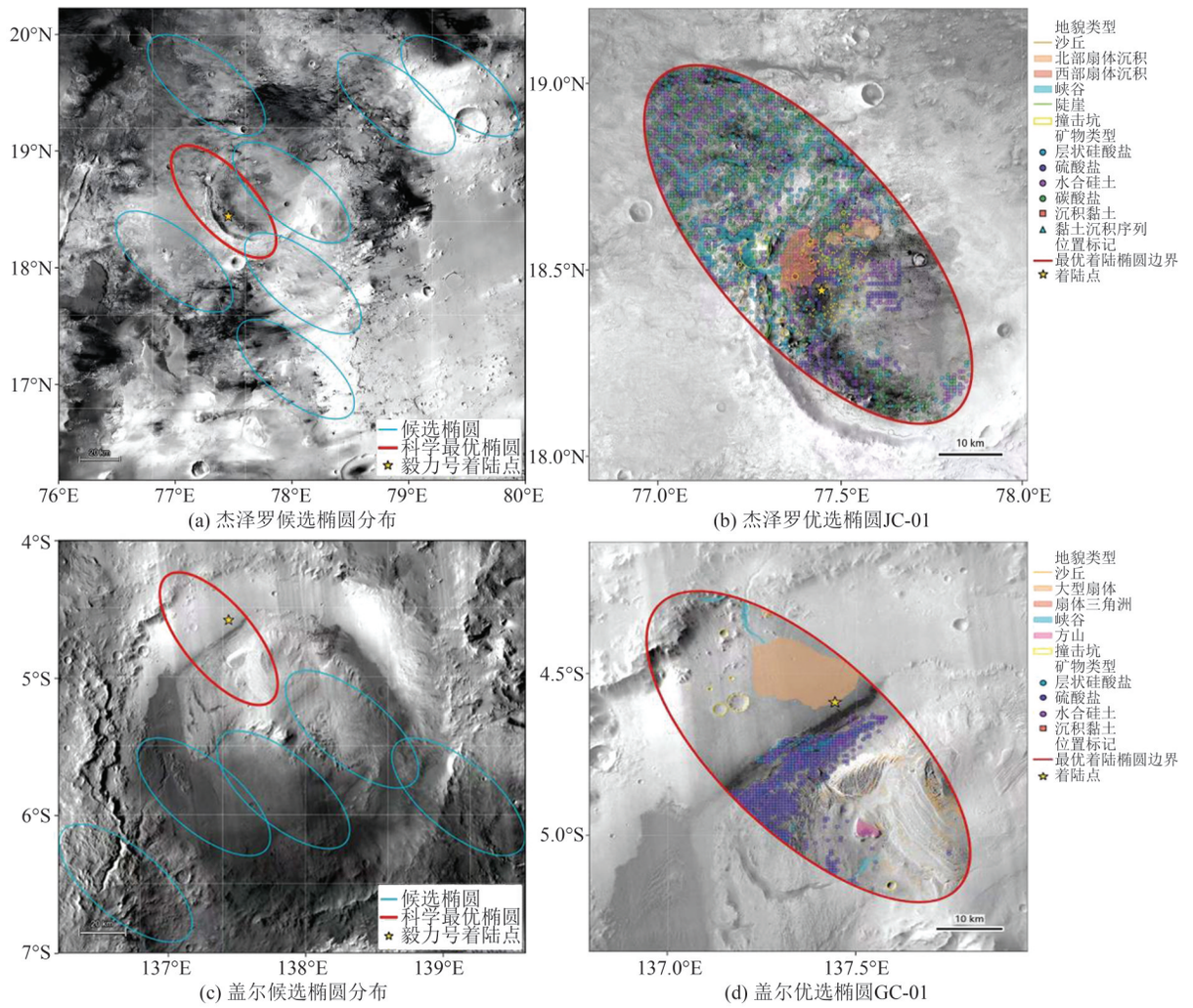
为进一步检验评价结果与真实火星着陆任务选址位置之间的空间一致性,选取具有相似科学目标的任务着陆区域开展回溯性验证。将与前述研究区一致的工程筛选和科学评价流程分别应用于杰泽罗撞击坑和盖尔撞击坑区域,完成候选方案排序(表8、图12),然后以毅力号和好奇号任务的实际着陆点作为独立空间参考进行回溯性检验。

表8 历史任务优选椭圆与次选椭圆科学评价结果

Table 8 Scientific-Assessment Results for Preferred and Second-Ranked Landing Ellipses in Historical Mission Regions

研究区	编号	中心经度/(°E)	中心纬度/(°N)	综合得分	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
杰泽罗撞击坑	JC-01	77.414	18.568	87.53	100.00	100.00	100.00	100.00	6.45
	JC-02	76.991	18.055	71.22	0.000	94.499	84.920	87.049	6.005
盖尔撞击坑	GC-01	137.372	−4.726	85.90	100.00	99.87	96.54	100.00	3.11
	GC-02	138.340	−5.382	83.51	39.934	100.000	100.000	99.417	7.558

经工程条件及椭圆边界完整性筛选后,最终分别在杰泽罗撞击坑区域获得13个满足工程条件的候选着陆椭圆,盖尔撞击坑区域共获得10个候选着陆椭圆。杰泽罗撞击坑区域候选椭圆总体具有较丰富的水成矿物和流水相关地貌,但不同候选椭圆的矿物组合、水活动形态及后期改造程度差异明显。优选椭圆JC-01综合得分为87.53分,次选椭圆JC-02与其相差16.31分,水活动相关的沟槽/河道证据尤其突出,明显高于次选椭圆。矿物方面,4类含水/蚀变矿物累计达到13 116个统计单元,为候选椭圆中最多,为古代液态水活动、水-岩作用以及潜在宜居环境提供较为丰富的观测证据。盖尔撞击坑区域候选椭圆科学价值梯度相差较小,优选椭圆GC-01综合科学得分为85.90分,与次选椭圆GC-02相差仅2.39分。优选椭圆中具有方山所反映的地层暴露条件、沟槽/河道所记录的流体活动形态,同时也富集层状硅酸盐、硫酸盐和水合硅土等矿物。虽然次选椭圆存在更丰富的矿物证据,但地貌分布略低于优选椭圆。排序完成后的空间检验表明,最高排名候选椭圆包含毅力号与好奇号的实际着陆点,与历史任务的实际着陆位置一致。



(a) 杰泽罗候选椭圆分布　(b) 杰泽罗优选椭圆JC-01

(c) 盖尔候选椭圆分布　(d) 盖尔优选椭圆GC-01

图 12　杰泽罗撞击坑和盖尔撞击坑区域候选椭圆与优选椭圆结果

Fig. 12　Candidate and Preferred Landing-Ellipse Selection Results in Jezero and Gale Craters

由于其他历史任务科学目标设计与天问三号存在差异,难以在同一科学评价基准下进行严格比较,需要重新设计评价维度和权重。因此,本文选择与生命探测、古环境研究和样品科学价值关系较为密切的杰泽罗撞击坑和盖尔撞击坑作为典型火星探测区域。结果表明,本文提出的多参数评价方法能够将历史任务中具有较高科学意义的地质环境识别为高优先级候选区域,为方法的科学合理性提供了初步的外部空间支持。

3.4　参数敏感性与科学评价稳健性

3.4.1　工程约束阈值敏感性

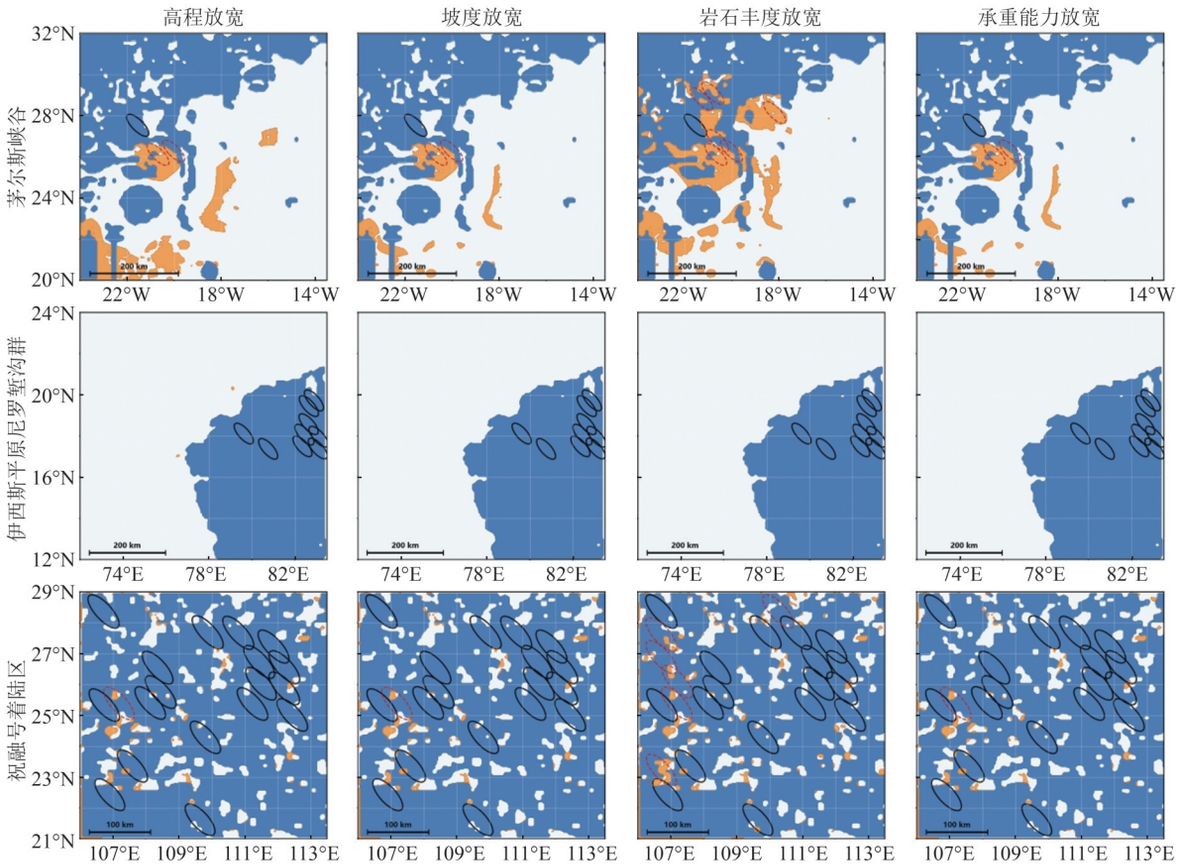
单因素敏感性实验表明,不同研究区对工程阈值变化具有明显不同的响应(图 13)。茅尔斯峡谷对工程参数调整最为敏感,其中岩石丰度条件放宽引起的工程可行面积增量最大,可行面积比例增加 11.05%,新增可行面积约 4.19×10^4 km^2;高程条件放宽后可行面积增加 7.73%,表明这两项参数对茅尔斯区域工程可行空间具有较强控制作用。坡度和承重能力调整产生的影响相对较小。

伊希斯平原尼罗堑沟群对单项工程阈值调整总体不敏感。除高程条件放宽产生少量新增区域外,其余参数变化未明显改变主要工程可行空间。祝融号着陆区表现出中等程度响应,其中岩石丰度放宽增加 3.08% 可行面积,高程、坡度和承重能力变化产生的面积增量相对较小。

上述结果说明,工程阈值变化对候选区域的影响并非在不同地质背景下均匀发生。本文工程参数可根据任务能力进行配置,但在应用于新区域时仍需重新评价控制该区域工程可行空间的关键因素。

3.4.2　科学目标优先序敏感性

科学目标优先序敏感性结果如表 9 所示。在方案 1(仅交换 $P3$ 与 $P4$)或方案 2(仅交换 $P2$ 与 $P4$)对优先级进行较小调整时,3 个研究区基准最高候选均保持不变,各情景与基准排序的 Spearman 相关系数



注:黄色表示新增可行区域,红色虚线表示新增椭圆。

图13 研究区工程阈值敏感性结果

Fig. 13 Sensitivity Analysis of Engineering Thresholds in the Study Areas

表9 科学目标优先序敏感性结果

Table 9 Sensitivity Analysis Results for Scientific Objective Prioritization

研究区	科学目标优先方案	Top-1变化	Top-5重合率/%	最大绝对名次变化	Spearman相关系数
茅尔斯峡谷	方案1($S1$):$P4>P3>P2>P5>P1$	否	80.00	1	0.993
伊西斯平原尼罗堑沟群		否	100.00	3	0.944
祝融号着陆区		否	80.00	3	0.994
茅尔斯峡谷	方案2($S2$):$P3>P2>P4>P5>P1$	否	80.00	2	0.979
伊西斯平原尼罗堑沟群		否	100.00	1	0.993
祝融号着陆区		否	100.00	4	0.993
茅尔斯峡谷	方案3($S3$):$P2>P3>P4>P5>P1$	是	80.00	2	0.944
伊西斯平原尼罗堑沟群		否	100.00	3	0.937
祝融号着陆区		否	80.00	6	0.967

总体较高,说明主体排序对任务科学偏好的小幅变化具有较好的稳定性,也说明液态水活动证据$P3$与宜居环境及生命标志保存潜力$P4$目标具有一致性,小幅改变科学目标顺序对选址结果影响较小。

当进一步提高物质组成多样性$P2$的相对优先级,使其成为最高优先科学维度时,部分研究区的最高候选发生改变,表明本文评价结果不是脱离任务目标的绝对科学价值,而是当前科学目标及其优先关系下的任务化科学优先级。该结果也说明本文方法具有可配置性:当未来任务科学关注点发生调整时,可在保持评价流程不变的情况下重新配置权重并获得新的候选排序。

3.4.3 地貌目录不确定性

人工遥感地貌编目可能受到影像分辨率、地貌尺度、边界模糊程度以及解译经验等因素影响,由于当前火星高分辨率影像分布不连续,因此无法开展大范围漏检筛查,仅设计地貌目录模拟扰动实验。在相同数据尺度下,分别模拟5%、

10%和20%的漏检/误检情况。茅尔斯峡谷和祝融号着陆区的优选椭圆没有发生变化;伊希斯尼罗堑沟群区域最高候选的保持概率则分别为93.5%、87.8%和79.3%。即使在20%的高扰动情景下,3个区域的Top-5候选集合总体仍保持较高稳定性。上述结果表明,地貌编目误差对高科学价值候选集合总体识别影响有限,其具体漏检结果仍应结合后续高分辨率遥感数据进行复核。

总体上,补充实验显示本文评价结果具有一定稳健性,同时也明确揭示了工程参数、任务科学偏好和地貌解释不确定性能够影响候选排序的条件范围。因此,本文所输出的优选椭圆应理解为给定工程参数、科学目标和现有遥感证据条件下的高优先级候选,而不是脱离任务条件的绝对最优位置。

4　结　语

针对天问三号火星采样返回任务候选区域尺度大、地质证据类型复杂以及科学价值难以由单一遥感观测直接表征的问题,本文面向工程可行候选着陆椭圆,构建了一种自动化、可追溯、可配置的科学价值定量评价流程。该方法综合地形、表面障碍物、撞击地貌、热物理性质等工程要素,以及地貌、地层和矿物等科学要素,将任务工程条件与科学价值评价分两阶段处理。工程阶段首先保证候选区域满足任务实施所需的基本安全条件,科学阶段则在工程可行候选集合内进一步评价不同位置对任务科学目标的支持程度,实现从“可安全着陆”到“科学上更优”的顺序评价。研究得到以下主要结论:

1)任务尺度椭圆移动窗口能够将高程、坡度、岩石丰度及表面物理条件等像元级工程信息转换为完整任务落区尺度的空间约束。3个研究区的工程筛选结果表明,工程可行面积及其空间连续性共同控制候选着陆椭圆的生成,因此像元局部满足安全阈值并不等同于完整任务尺度落区满足工程要求。

2)以候选着陆椭圆为统一评价单元,可以将地貌、地层和矿物等多源观测信息组织为可统计的科学证据,并进一步映射至地质背景与演化历史、物质组成多样性、液态水活动证据、宜居环境与生命标志保存潜力以及后期改造与地质记录保存状态5个维度。该评价过程使候选椭圆综合得分能够逐级追溯至科学维度、定量指标及原始遥感观测对象,从而提高科学价值比较的可解释性和可复核性。

3)3个研究区共获得54个工程可行候选着陆椭圆,并形成具有不同证据组合的高科学优先级候选。不同区域的高分来源并不相同,说明高科学价值并不对应唯一固定的地貌或矿物组合,而取决于任务核心科学目标相关证据在着陆椭圆尺度上的共同出现及其组合关系。

4)工程参数、科学目标优先序及地貌目录扰动实验表明,候选集合总体具有一定稳定性,但部分研究区最高候选的精细排序会随任务偏好或地貌解释假设发生变化。这说明本文输出的是给定任务参数和现有观测证据条件下的相对科学优先级,而非与任务条件无关的绝对最优解。敏感性分析同时提供了识别排序不稳定候选的手段,可为后续高分辨率数据复核和任务级安全分析确定重点区域。

本文方法的主要作用是将工程与科学相关的多类选址要素转化为明确的数据输入、空间约束、评价维度和计算规则,使着陆区选择过程具有更好的自动化、可追溯性和可重复性。该框架中的工程阈值、地质证据映射关系及科学权重均可根据具体任务能力和科学目标进行调整,因此该方法可为天问三号候选着陆椭圆的大范围自动初筛与科学价值定量比较提供参考。后续可进一步开展多尺度地貌智能识别、地质证据不确定性表征及知识图谱辅助的自动化选址决策。

参　考　文　献

[1] HOU Z Q, LIU J Z, PANG F C, et al. In Search of Signs of Life on Mars with China's Sample Return Mission Tianwen-3[J]. *Nature Astronomy*, 2025, 9(6): 783-792.

[2] VAGO J L, WESTALL F, PASTEUR INSTRUMENT TEAMS LANDING S, et al. Habitability on Early Mars and the Search for Biosignatures with the ExoMars Rover[J]. *Astrobiology*, 2017, 17(6/7): 471-510.

[3] HEAD J W, WORDSWORTH R D, FASTOOK J L. The Search for Life and Biosignatures on Mars: A Mars System Science Approach (Atmosphere, Hydrosphere, Cryosphere, Lithosphere, Geologic History)[J]. *Astrobiology*, 2026, 26(10): 868-915.

[4] BOSAK T, MOORE K R, GONG J, et al. Searching for Biosignatures in Sedimentary Rocks from Early Earth and Mars[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(7): 490-506.

[5] MCMAHON S, BOSAK T, GROTZINGER J P, et al. A Field Guide to Finding Fossils on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2018, 123(5): 1012-1040.

[6] HAYS L E, GRAHAM H V, DES MARAIS D J, et al. Biosignature Preservation and Detection in Mars Analog Environments [J]. *Astrobiology*, 2017, 17(4): 363-400.

[7] HOU Z Q, LIU J Z, XU Y G, et al. The Search for Life Signatures on Mars by the Tianwen-3 Mars Sample Return Mission[J]. *National Science Review*, 2024, 11(11): nwae313.

[8] GOLOMBEK M, GRANT J, KIPP D, et al. Selection of the Mars Science Laboratory Landing Site [J]. *Space Science Reviews*, 2012, 170(1): 641-737.

[9] 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(2): 134-139.
DONG Jie, WANG Chuang, ZHAO Yang. Selection of the Martian Landing Site Based on the Engineering Constraints[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016(2): 134-139.

[10] GOLOMBEK M, KIPP D, WARNER N, et al. Selection of the InSight Landing Site[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 211(1): 5-95.

[11] MICHALSKI J R, INSTITUTE P S, BIBRING J P, 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.

[12] HUROWITZ J A, TICE M M, ALLWOOD A C, et al. Redox-Driven Mineral and Organic Associations in Jezero Crater, Mars[J]. *Nature*, 2025, 645 (8080): 332-340.

[13] FARLEY K A, WILLIFORD K H, STACK K M, et al. Mars 2020 Mission Overview[J]. *Space Science Reviews*, 2020, 216(8): 142.

[14] 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.

[15] GRANT J A, GOLOMBEK M P, GROTZINGER J P, et al. The Science Process for Selecting the Landing Site for the 2011 Mars Science Laboratory[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, 59(11/12): 1114-1127.

[16] ZHAO W, TONG X, XIE H, et al. Simulation Experiment on Landing Site Selectionusing a Simple Geometric Approach[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, XLII-3/W1: 213-218.

[17] 柳思聪, 童小华, 刘世杰, 等. "天问一号"着陆区遥感形貌建模与制图分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(3): 338-347.
LIU Sicong, TONG Xiaohua, LIU Shijie, et al. Topography Modeling, Mapping and Analysis of China's First Mars Mission Tianwen-1 Landing Area from Remote Sensing Images[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(3): 338-347.

[18] WAN R, FENG Y J, TANG P L, et al. A Multiagent Decision-Making Model for Martian Landing Site Selection[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2025, 18: 18743-18761.

[19] WANG R, FENG Y J, WANG Y H, et al. An Improved Method of Mars Landing Site Evaluation Using Spatial Heterogeneity-Based TOPSIS [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2026, 19: 19929-19945.

[20] RONGIER G, PANKRATIUS V. Computer-Aided Exploration of the Martian Geology[J]. *Earth and Space Science*, 2018, 5(8): 393-407.

[21] LIU Y, WU X, ZHAO Y S, et al. Zhurong Reveals Recent Aqueous Activities in Utopia Planitia, Mars [J]. *Science Advances*, 2022, 8(19): eabn8555.

[22] IVANOV M A, HIESINGER H, ERKELING G, et al. Major Episodes of Geologic History of Isidis Planitia on Mars[J]. *Icarus*, 2012, 218(1): 24-46.

[23] 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.

[24] MUSTARD J F, EHLMANN B L, MURCHIE S L, et al. Composition, Morphology, and Stratigraphy of Noachian Crust Around the Isidis Basin[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, 114(E2): 2009JE003349.

[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] HUANG H, WANG X, et al. Observations and Interpretations of Geomorphologic Features in the Tianwen-1 Landing Area on Mars by Using Orbital Imagery Data [J]. *Earth and Planetary Physics*, 2023, 7(3): 331-346.

[27] 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.

[28] LI C, ZHENG Y K, WANG X, et al. Layered

Subsurface in Utopia Basin of Mars Revealed by Zhurong Rover Radar[J]. *Nature*, 2022, 610(7931): 308-312.

[29] MALIN M C, BELL III J F, CANTOR B A, et al. Context Camera Investigation on Board the Mars Reconnaissance Orbiter[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2007, 112(E5): 2006JE002808.

[30] SMITH D E, ZUBER M T, FREY H V, et al. Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment Summary After the First Year of Global Mapping of Mars [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E10): 23689-23722.

[31] CARTER J, RIU L, POULET F, et al. A Mars Orbital Catalog of Aqueous Alteration Signatures (MOCAAS)[J]. *Icarus*, 2023, 389: 115164.

[32] TANAKA K L, SKINNER J A, DOHM J M, et al. Geologic Map of Mars [M]. Reston, VA : U. S. Geological Survey, 2014.

[33] ROBBINS S J, HYNEK B M. A New Global Database of Mars Impact Craters ≥1 km: 1. Database Creation, Properties, and Parameters [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, 117(E5): 2011JE003966.

[34] FERGASON R L, CHRISTENSEN P R, KIEFFER H H. High-Resolution Thermal Inertia Derived from the Thermal Emission Imaging System (THEMIS): Thermal Model and Applications[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2006, 111(E12): 2006JE002735.

[35] 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.

[36] 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.

[37] DICKSON J L, EHLMANN B L, KERBER L, et al. The Global Context Camera (CTX) Mosaic of Mars: A Product of Information-Preserving Image Data Processing [J]. *Earth and Space Science*, 2024, 11(7): e2024EA003555.

[38] NEUKUM G, JAUMANN R. HRSC: The High Resolution Stereo Camera of Mars Express [C]// Wilson A, ed. Mars Express: The Scientific Payload. Scientific Coordination: Agustin Chicarro ESA SP-1240. Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, 2004:17-35.

[39] 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): 28-35.
XU Qing, GENG Xun, LAN Chaozhen, et al. Review of Mars Topographic Mapping[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014(1): 28-35.

[40] 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.

[41] KRESLAVSKY M A, HEAD III J W. Kilometer-Scale Roughness of Mars: Results from MOLA Data Analysis [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, 105(E11): 26695-26711.

[42] HARTMANN W K, NEUKUM G. Cratering Chronology and the Evolution of Mars [C]//Chronology and Evolution of Mars. Dordrecht: Springer, 2001: 165-194.

[43] GUIDAT T, POCHAT S, BOURGEOIS O, et al. Landform Assemblage in Isidis Planitia, Mars: Evidence for a 3 Ga Old Polythermal Ice Sheet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 411: 253-267.

[44] SHANNON C E. A Mathematical Theory of Communication [J]. *Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379-423.

[45] STACK K M, WILLIAMS N R, CALEF F, et al. Photogeologic Map of the Perseverance Rover Field Site in Jezero Crater Constructed by the Mars 2020 Science Team [J]. *Space Science Reviews*, 2020, 216(8): 127.

[46] BROŽ P, OEHLER D, MAZZINI A, et al. An Overview of Sedimentary Volcanism on Mars [J]. *Earth Surface Dynamics*, 2023, 11(4): 633-661.

[47] CAO Z, KANG Z, HU T, et al. Cross-Attention Induced Multilayer Domain Adaptation Network for Extraction of Sub-kilometer Craters from HiRIC Images [J]. *Icarus*, 2024, 407: 115776.

[48] CAO Z, KANG Z, HU T, et al. AiTARs-Net: A Novel Network for Detecting Arbitrary-Oriented Transverse Aeolian Ridges from Tianwen-1 HiRIC Images[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2024, 211: 135-155.