孙林，于秉坤，蔡国军，等. 月球与火星环境约束下孔压静力触探机理及适用性差异研究进展与展望[J]. 水利水电技术(中英文)，2026，57(9)：1-20. DOI：10. 13928/j. cnki. wrahe. 2026. 09. 001
SUN Lin，YU Bingkun，CAI Guojun，et al. Research progress and prospects on piezocone penetration testing mechanisms and applicability under environmental constraints of Moon and Mars[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2026，57(9)：1-20. DOI：10. 13928/j. cnki. wrahe. 2026. 09. 001

月球与火星环境约束下孔压静力触探机理及适用性差异研究进展与展望

孙 林[1]，于秉坤[2]，蔡国军[1]，吴 盾[1,2]

(1. 安徽建筑大学 土木工程学院 安徽省智能地下探测重点实验室，安徽 合肥 230601；
2. 深空探测实验室深空科学研究院，安徽 合肥 230026)

摘 要：【目的】静力触探(Cone Penetration Test，CPT)及其孔压扩展形式孔压静力触探(Piezocone Penetration Test，CPTU)在地球岩土工程中已形成较成熟的观测—解释体系，其核心观测量包括锥尖阻力 q_c、侧摩阻力 f_s 和孔压 u_2。当地球 CPTU 向月球与火星浅表层探测拓展时，低重力、近真空/稀薄大气、强热循环以及含冰、含盐、胶结和不饱和风化层等因素将系统性改变贯入过程中的应力路径、边界条件、测量链稳定性及观测响应的可解释性。针对月球水资源勘探开发及火星浅表层工程探测需求，系统评述月球与火星环境约束下类 CPTU 的响应机理、适用边界及技术发展方向。【方法】以地球 CPTU 解释基线为参照，围绕“环境约束—测量链路—指标响应—解释边界”的主线，结合月球极区含冰风化层、月球非极区近地表工程场景和火星候选平原取样/钻探场景，综述低重力、真空/稀薄大气、含冰/含盐/不饱和介质及现有探测任务资料对 q_c、f_s、u_2 形成机制和解释框架的影响，并讨论系统改进、多传感联合约束、地面等效校准与小样本条件下的概率解释思路。【结果】低重力的影响并不只是降低原位应力水平，还会改变反力供给、姿态稳定性和贯入边界条件，使 q_c 和 f_s 更易呈现突变型或阈值型响应，削弱地球经验图谱及连续参数反演关系的直接迁移性。近真空或稀薄大气及热循环会显著影响孔压测量链稳定性，使 u_2 在地外场景中更适合作为经状态诊断后方可使用的条件性辅助观测量。在月球近真空条件下，当其物理归因不明确时，不宜直接用于土体力学参数反演。含冰、含盐、胶结和分层结构进一步增强了贯入响应的非唯一性，在现有证据条件下，分层识别、界面识别及事件型响应分析通常更适合作为复杂介质条件下的优先解释路径。现有任务资料可为承载水平、浅层结构和推进边界提供外部约束，但尚不能直接替代标准 CPTU 校准体系。【结论】月球与火星场景中的类 CPTU 研究，关键不在于简单复制地球三通道配置，而在于面向任务场景重构“测量链路—推进边界—多源约束—解释评估”框架。后续研究应重点推进低重力条件下的地面等效校准、真空/热循环环境中的孔压测量稳定性验证、含冰/含盐风化层贯入机理及其适用边界研究，以及地面等效数据库和不确定性分级解释体系建设，以支撑月球水资源探测和地外浅表层工程勘查中的类 CPTU 技术发展。

收稿日期：2026-03-31；**修回日期：**2026-05-30；**录用日期：**2026-06-01；**网络出版日期：**2026-08-14
基金项目：国家杰出青年科学基金项目(42225206)；国家自然科学基金面上项目(42572345)；安徽省自然科学基金面上项目(2508085MD087)；安徽省教育厅科研项目(2025AHGXZK20082、2025AHGXZK50042)
作者简介：孙 林(1995—)，男，博士研究生，主要从事工程地质与岩土工程研究。E-mail：linsun0828@126. com
通信作者：蔡国军(1977—)，男，教授，博士，主要从事工程地质与岩土工程研究。E-mail：focuscai@163. com
吴 盾(1985—)，男，教授，博士，主要从事地球化学与岩土工程研究。E-mail：wudun@ahjzu. edu. cn
©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

关键词：CPTU；月球/火星环境；贯入机理；原位测试；月球风化层；火星土壤；浅表层探测；影响因素

DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.001　　开放科学(资源服务)标志码(OSID)：

中图分类号：P184.5；P185.3　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0860(2026)09-0001-20



Research progress and prospects on piezocone penetration testing mechanisms and applicability under environmental constraints of Moon and Mars

SUN Lin[1], YU Bingkun[2], CAI Guojun[1], WU Dun[1,2]

(1. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Anhui Province Key Laboratory of Intelligent Underground Exploration, Hefei 230601, Anhui, China; 2. Deep Space Science Research Institute, Deep Space Exploration Laboratory, Hefei 230026, Anhui, China)

Abstract: [Objective] Cone penetration testing (CPT) and its pore-pressure extension, piezocone penetration testing (CPTU), have formed a relatively mature observation-interpretation framework in terrestrial geotechnical engineering, with cone tip resistance (q_c), sleeve friction (f_s), and pore pressure (u_2) as the core measured parameters. When terrestrial CPTU is extended to shallow subsurface exploration on the Moon and Mars, factors such as low gravity, near-vacuum or rarefied atmospheric conditions, intense thermal cycling, and ice-bearing, saline, cemented, and unsaturated regolith can systematically alter stress paths, boundary conditions, measurement-chain stability, and the interpretability of measurement responses during penetration. To meet the demands of lunar water resource exploration and Martian shallow subsurface engineering investigation, the response mechanisms, applicability boundaries, and technical development directions of CPTU-like techniques under lunar and Martian environmental constraints are systematically reviewed. [Methods] Taking the terrestrial CPTU interpretation framework as the reference baseline, the analysis follows the main line of "environmental constraints-measurement chain-response indicators-interpretation boundaries." It examines three representative mission scenarios: ice-bearing regolith in the lunar polar regions, near-surface engineering conditions in non-polar lunar regions, and sampling/drilling scenarios in candidate Martian plains. On this basis, the impacts of low gravity, vacuum or rarefied atmosphere, ice-/salt-bearing and unsaturated media, and existing mission observations on the formation mechanisms and interpretation framework of q_c, f_s, and u_2 are synthesized. Additionally, possible directions for system improvement, multi-sensor joint constraints, ground-equivalent calibration, and probabilistic interpretation under small-sample conditions are discussed. [Results] The impact of low gravity is not merely limited to reducing the in situ stress level. It also alters the reaction force supply, attitude stability, and penetration boundary conditions, making q_c and f_s more prone to exhibiting abrupt or threshold-type responses. This undermines the direct applicability of terrestrial empirical charts and continuous parameter inversion relationships. Near-vacuum or rarefied atmospheric conditions and thermal cycling significantly affect the stability of the pore-pressure measurement chain, making u_2 more suitable as a conditional auxiliary observation parameter in extraterrestrial scenarios that can be used only after state diagnosis. Under the near-vacuum conditions on the Moon, when its physical attribution remains unclear, u_2 should not be directly used for the inversion of soil mechanical parameters. The presence of ice, salts, cementation, and layered structures further enhances the non-uniqueness of penetration responses. Given the current evidence, layer identification, interface identification, and event-type response analysis are generally more appropriate as priority interpretation approaches under complex media conditions. Existing mission data can provide external constraints on bearing capacity, shallow structure, and penetration boundary conditions, but they cannot directly replace the standard CPTU calibration system. [Conclusion] For lunar and Martian applications, the key to CPTU-like investigation does not lie in simply replicating the terrestrial three-channel configuration, but in reconstructing a mission-oriented framework that integrates the measurement chain, penetration boundary conditions, multi-source constraints, and interpretation/evaluation. Future efforts should focus on ground-equivalent calibration under low-gravity conditions, validation of pore-pressure measurement stability under vacuum and thermal cycling, investigation of penetration mechanisms and applicability boundaries in ice-/salt-bearing regolith, and development of ground-equivalent databases and tiered uncertainty-based interpretation schemes, so as to support the advancement of CPTU-like techniques for lunar water resource exploration and extraterrestrial shallow subsurface engineering investigations.

Keywords: CPTU; lunar/Martian environment; penetration mechanism; in situ testing; lunar regolith; Martian soil; shallow subsurface exploration; influencing factors

0 引　言

静力触探(Cone Penetration Test，CPT)及其孔压扩展形式孔压静力触探(Piezocone Penetration Test，CPTU)，是岩土工程中应用最广的高分辨率原位测试方法之一[1-2]。该方法依托标准化的锥头几何尺寸、准恒速贯入模式、连续数据采集体系及成熟的电测技术，构建了涵盖土层连续划分、土类判别、强度和状态参数评估、固结与渗透特性推断等环节的可校准、可复用的解释框架。在此基础上，通过规范化操作规程的推行，逐步积累了丰富的工程经验与完善的质量控制准则[3-6]。在机理层面，锥尖阻力 q_c 与侧摩阻力 f_s 反映了贯入诱发的剪切破坏、颗粒重排及局部应力场演化，而锥肩孔压 u_2 则反映了排水条件与有效应力路径的变化，因此，三者协同构成了 CPTU 的核心观测体系[2,7]。

需要指出的是，现有 CPTU 理论框架及其参数解释体系主要是在地球岩土环境下建立和发展的，其成立通常依赖若干基本前提，即观测量能够较稳定地获取并具有相对明确的物理含义，原位应力背景可以合理定义，渗流与排水边界能够进行基本归类，经验判释图谱与反演关系具有一定适用性。这些前提在常规地基土中往往能够得到较好满足，但当测试对象由地球土体扩展到月球和火星风化层时，环境边界、介质状态及测试实施条件都会发生系统性变化，因而原有解释体系的可直接迁移性将受到明显限制[8]。

随着深空探测任务持续推进，“地外岩土工程”正由概念探索走向系统发展。着陆场安全评估与沉陷风险控制、巡视器通过性与轮陷判别、原位取样与钻取可行性分析，以及浅层资源勘查、长期驻留支撑与设施建造前期勘查等任务[8-13]，均要求对厘米至分米尺度浅表层结构及其力学性质实现可操作、可量化的定量约束[14]。遥感与表面成像技术更擅长提供面状或区域尺度信息，但对浅表层力学响应及层状结构的直接识别能力仍相对有限[15-16]。相比之下，贯入式原位测试有望在有限载荷与能耗条件下获取沿深度方向的连续响应信息，并服务于工程更关心的承载、变形、可钻性与界面识别问题[17-18]。因此，将 CPTU 的连续贯入测试思想拓展到月球和火星风化层、发展适用于地外环境的“类 CPTU”原位剖面技术，具有明确的工程价值和方法学意义。

然而，月球与火星并非“同一土体在不同地点”的简单替换。月球处于低重力、近真空环境，火星则表现为较低重力与稀薄大气共存，二者近地表环境条件及其对贯入测试的约束具有明显差异[19-21]。二者风化层均以干燥、非饱和介质为主，但火星更可能涉及含冰/冻土、盐类胶结及稀薄大气条件下的表层结构演化[22-23]，月球则更突出地受到极低压、强热循环、尘埃活跃及反力受限等因素影响[24-25]。同时，低重力环境会降低原位应力并限制平台反力，使得锚固—推进—姿态控制成为影响数据质量的关键边界条件[26-27]。由此可见，地外场景下 CPTU 方法的适用性讨论若仅停留于“月球整体—火星整体”的一般比较，其工程针对性仍然不足。相比之下，围绕未来更可能开展原位探测、取样钻进、浅层勘查、长期驻留与设施建造的典型任务场景来分析环境约束、观测响应及解释边界，更有助于建立面向工程应用的分析框架。对月球而言，极区含冰风化层探测更关注低温环境下含冰层识别、层状结构判别及可采性分析，而非极区科研站建设和资源开发则更关注地层承载、变形特征、可钻性及工程分层。对火星而言，候选平原取样与钻探任务更强调对松散层、硬壳层以及局部胶结或含冰层组合特征的识别。

此外，地外介质中的 u_2 响应也不宜被简单视为地球饱和土中孔隙水压力概念的直接外推。一方面，在强不饱和介质中，吸力与气相边界共同参与有效应力和强度控制[28-29]。另一方面，在含冰或冻融介质中，温度变化、相态转换及结构性重组会共同影响压力传递路径和贯入响应[29-32]。对于月球近真空环境，u_2 更可能同时受到局部结构扰动、热致漂移及测量链状态变化的共同影响。若无法对上述分量进行有效区分，则该通道不宜作为标准力学观测量参与解释，而仅适合作为测量链健康状态监测或辅助事件识别信息。对于火星稀薄大气与细粒多孔介质条件，孔隙气体传输在理论上可能偏离地球常压下的连续流假设[33]，并对 u_2 的物理解释边界产生影响，但其在贯入过程中的实际作用程度仍有待进一步定量研究。因此，在月球与火星场景下，u_2 更适宜被视为经状态诊断后方可使用的条件性辅助观测通道，而非默认可直接参与参数反演的核心力学指标。

基于上述认识，本文以“地球 CPTU 解释基线—月球/火星环境差异—适用性边界与可迁移路径”为主线，系统评述月球与火星环境约束下孔压静力触探机理与适用性差异的研究进展。文章在分析月球与火星关键环境参数及其对(q_c、f_s、u_2)的影响链路及工程后果的基础上，进一步讨论典型任务场景下类 CPTU 方法的适用边界及解译约束。同时，结合多传感联合约束与系统级改进思路，对地面等效校准、不

确定性评估及相关技术发展方向进行讨论，以期为月球水资源探测和地外浅表层工程勘查中的类 CPTU 技术研究提供参考。

1　地球 CPTU 机理与解释框架

CPTU 在近恒速贯入条件下同步获取锥尖阻力 q_c，侧摩阻力 f_s 与锥肩孔隙水压力 u_2，并形成以多源响应协同约束为特征的原位测试解释体系。由于贯入过程本质上属于非线性大变形问题，实际工程中通常并不追求严格解析解，而是通过孔压修正、应力归一化、土行为类型判别与参数反演等步骤，建立从原始响应到工程参数的经验-半经验解释框架[34-36]。该框架的核心目标，在于将不同深度、不同场地条件下的原始测量结果转化为具有可比性的指标，并据此实现连续分层、土类判别及参数估计[37]。

1.1　指标体系与应力归一化

CPTU 解释的基础在于对应力背景与孔压效应进行合理修正。设总上覆应力为 σ_{v0}，有效上覆应力为 σ'_{v0}，静水孔压为 u_0，则常用的孔压修正锥阻可为

$$q_t = q_c + u_2(1 - a) \tag{1}$$

式中，a 为探头净面积比。

进一步可定义净锥阻

$$q_n = q_t - \sigma_{v0} \tag{2}$$

在此基础上，通常引入规范化指标以削弱上覆有效应力差异带来的背景影响。常用形式包括[37-38]

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \tag{3}$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \times 100\% \tag{4}$$

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \tag{5}$$

式中，Q_t 主要反映锥阻相对于原位应力水平的增强程度；F_r 用于表征摩阻的相对贡献；B_q 则为排水状态、细粒效应及结构性识别提供辅助约束。

为进一步提高不同应力水平下剖面对比的稳定性，还可采用应力指数归一化形式[37]

$$Q_{tn} = \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{P_a}\right)\left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}}\right)^n \tag{6}$$

式中，P_a 为大气压；n 为应力指数。

相较于原始读数，以上规范化指标更适合用于跨深度、跨场地的统一解释，也是后续土体行为类型（Soil Behavior Type，SBT）或归一化土行为类型（Normalized Soil Behavior Type，SBTn）判别的基础。

1.2　解译流程、孔压消散与质量控制

在地球饱和土条件与标准 CPTU 测量假设下，解释流程通常可概括为“修正—规范化—判别—反演—校核”。根据 q_c、f_s 与 u_2 的同步变化特征识别层界与过渡带，通过 Q_t（或 Q_{tn}）、F_r 与 B_q 等指标进行 SBT 或 SBTn 判别。在此基础上，再针对不同土类选取相应经验关系开展参数反演[2,39-40]。对于近不排水条件下的黏性土，常将修正锥阻与承载系数联系起来估算不排水抗剪强度，即[2,7]

$$s_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \tag{7}$$

式中，N_{kt} 为与土体类型、结构性及应力历史有关的经验承载系数。

对于近排水条件下的砂性土，则通常结合规范化锥阻估计相对密度、摩擦角或状态参数，并强调经验关系的适用范围及现场标定条件。总体而言，SBT 判别并不直接等同于传统地质分类，而是服务于工程响应识别与参数选取的行为型分区。

除贯入阶段的连续响应外，孔压消散试验可为排水条件与固结特性提供独立约束。在选定深度停止贯入后，记录 u_2 随时间衰减的过程，可定义超孔压及其归一化消散程度，并据特征时间参数反演水平固结系数[41-43]。在具体表达上，时间因子与探头特征尺寸的定义可随所采用的解释模型而有所差异，但其基本思想是一致的，即利用孔压恢复速率表征土体的渗流—固结特征。因而，孔压消散不仅可补充贯入阶段无法直接分辨的信息，也可作为对排水假设和参数反演结果的校核手段。CPTU 解释结果的可靠性，在很大程度上取决于测量链路本身的稳定性。其中，孔压测量链的充分饱和尤为关键。若滤元、传压介质或孔压腔体中存在气泡，可能导致孔压响应出现迟滞或衰减，进而影响孔压修正、应力归一化及相关参数反演的可靠性。因此，地球 CPTU 框架虽然已形成较成熟的经验体系，但其有效性仍建立在“孔压可稳定测量、应力背景可合理定义、排水边界可基本归类”的前提之上[34,44]。

2　月球与火星环境对 CPTU 的影响

2.1　任务场景分层与适用边界

从 CPTU 向月球和火星风化层应用拓展的角度看，地球条件下形成的解释体系通常建立在观测量可稳定获取、边界条件可基本界定以及经验判释图谱与参数反演关系具有一定可迁移性的前提之上。然而，在低重力、近真空或稀薄大气、强不饱和以及含冰或

盐类胶结等地外环境中，上述前提都可能发生系统性改变。由此，q_c、f_s、u_2 的形成机制、观测基准和解释边界均可能不同于地球条件，现有经验关系的适用基础也随之减弱[45-46]。其中，u_2 在月球近真空场景下更易受到测量链状态和环境扰动影响，其解释前提需较 q_c 和 f_s 更为谨慎，不宜默认作为核心解释变量使用。因此，地外场景下类 CPTU 方法的适用性讨论，不能仅停留于“月球整体—火星整体”的一般比较，而需要结合具体任务场景分析其环境约束、观测响应及解释边界。

在月球水资源勘探开发与浅表层工程应用背景下，月球场景本身也不宜作为单一对象处理。对本文而言，月球至少涉及两类具有明显差异的应用场景。一类是极区永久阴影区（Permanently Shadowed Regions，PSR）及邻近低温冷阱的含冰风化层探测，其关注重点在于含冰层识别、冰含量垂向变化、可采性以及扰动敏感性（见图 1）[47-48]；另一类是非极区科研站建设与资源开发相关的近地表工程场景，其关注重点更多在于承载、分层、可钻性及平台部署条件（见图 2）[49-50]。火星方面，本文主要对应候选平原着陆区及其取样、钻探等作业环境（见图 3）[51-52]。下文关于环境因素、指标响应及解释框架的共性分析，主要围绕上述三类典型场景展开。其中，月球极区含冰风化层具有更强的特殊性，其低温、含冰及极低背景应力等条件会对类 CPTU 的贯入稳定性、测量链可靠性及结果解释边界形成更强约束，因此在工程应用中应给予特别关注。图 1—图 3 分别给出了月球极区表面水冰分布、月球着陆探测适宜性分布与科研站优势区空间位置，以及火星天问三号候选着陆区地理位置及地质单元示意图。

2.2　低重力条件下贯入特征与地面模拟局限

低重力的影响并不只是将地球场景下的原位应力按比例缩小[53-54]。对类 CPTU 而言，重力变化不仅会降低自重应力和初始围压，还会改变颗粒接触网络中重力与黏附力的相对权重，并进一步影响平台反力供给、姿态稳定性以及贯入控制边界[26,55-56]。已有测试表明，贯入阻力随重力水平增大而增大，这说明重力并非单纯的背景参数，而会直接参与贯入响应的形成[26,54]。因此，地外类 CPTU 中的“重力相似”不能仅理解为重力值或围压水平的匹配，还应同时关注颗粒接触状态、边界反力条件以及测试控制方式的一致性。

现有地面模拟方法各具适用范围，也为低重力贯入机理研究提供了重要支撑，但在不同程度上仍存在一定局限[57-59]。落塔和抛物线飞行能够提供较真实的低重力环境，适用于短时动力学响应或快速过程观测，但受持续时间和过程扰动影响，对连续稳定贯入及孔压消散测试的支撑仍相对有限[见图 4（a）（b）][60-62]；倾斜、悬挂或补偿等减载方法能够在一定程度上降低等效载荷，便于开展简化条件下的贯入

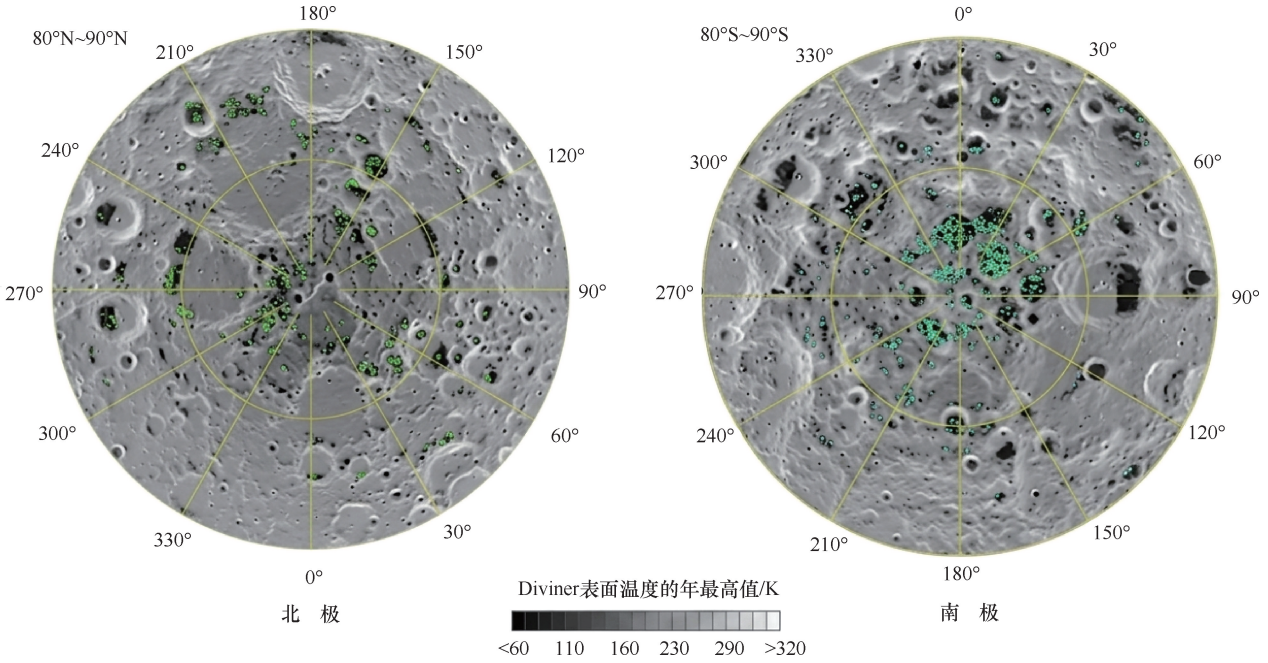
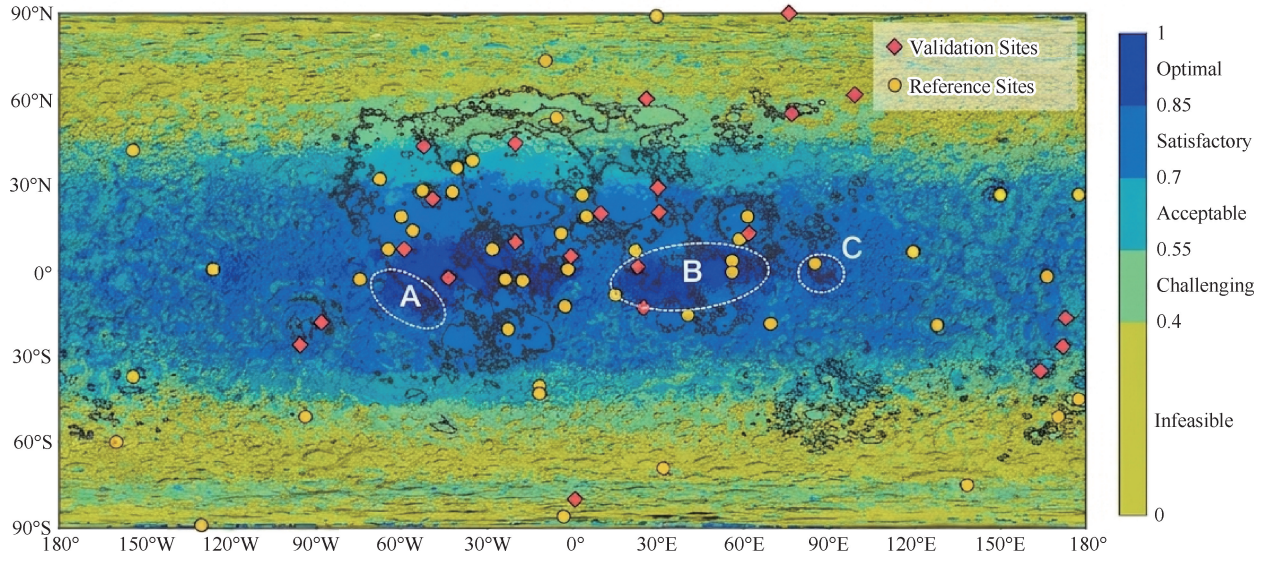


图 1　月球极区表面水冰分布[48]

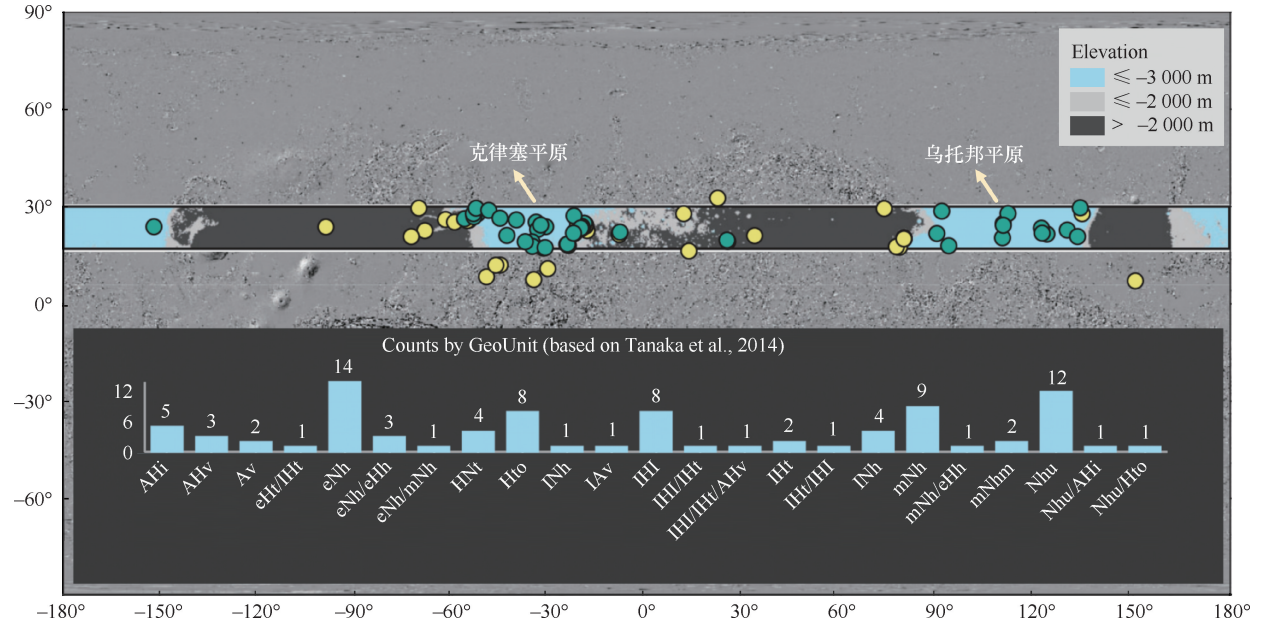
Fig. 1　Distribution of surface water ice in lunar polar regions[48]



图中给出了月球着陆探测任务适宜性分布及验证点(红色菱形标记)、参考点(黄色圆形标记)的位置。月球科研站适宜性分布集中在 A 区(风暴洋西南缘)、B 区(静海南部、丰饶海北部及两者之间的高地区域)和 C 区(史密斯海)。该图用于展示月球着陆探测与科研站建设两类任务场景的空间关系

图 2　月球着陆探测适宜性分布与科研站优势区空间位置[49]

Fig. 2　Distribution map of suitability for lunar landing exploration and spatial locations of advantageous areas for scientific research stations[49]

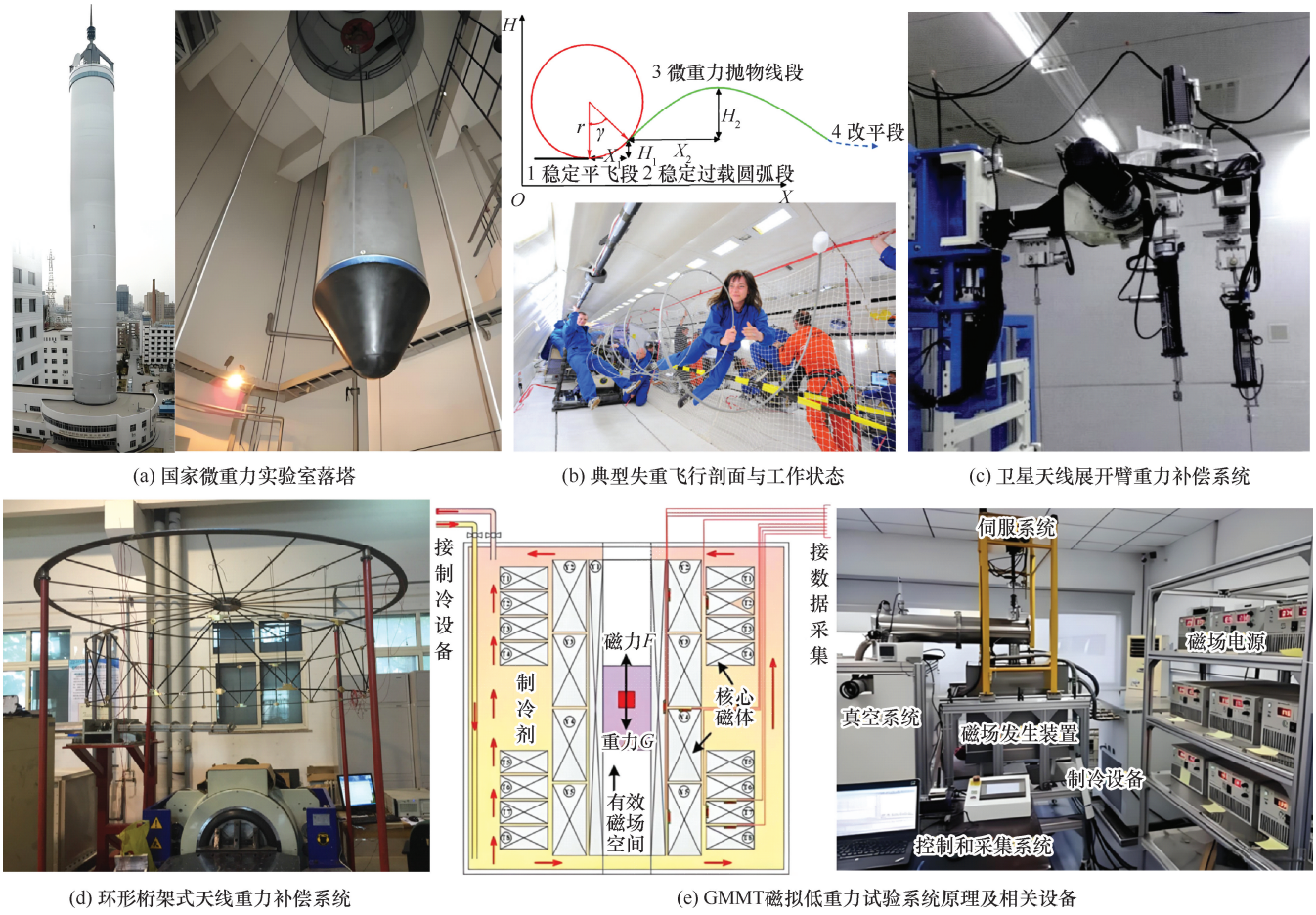


图中 51 个绿色点表示满足当前工程约束条件的潜在着陆区，其余 35 个黄色点虽不满足当前工程约束，但具有相对较高的科学价值。两条粗线之间的纬向带表示 17°N~30°N 的工程约束范围。图中各标注所对应的地质单元名称可参照文献[53]

图 3　火星天问三号候选着陆区地理位置及地质单元示意[51]

Fig. 3　Schematic diagram of geographical location and geological units of candidate landing sites for Tianwen-3 mission on Mars[51]

试验，但在真实体力场重构及颗粒接触网络保持方面仍存在偏差[见图 4(c)(d)][63-65]；磁拟重力方法在持续时间和多场耦合方面表现出更大潜力，但目前仍受磁敏相似材料、试验尺度、场梯度非均匀性以及系统能耗等因素制约，其对真实月面工况的表征能力仍有待进一步提升[见图 4(e)][26,66]。此外，离心机主要用于增强重力场和放大应力水平效应，虽不适合直接复现月球或火星低重力条件下的贯入环境，但可作



(a) 国家微重力实验室落塔　(b) 典型失重飞行剖面与工作状态　(c) 卫星天线展开臂重力补偿系统

(d) 环形桁架式天线重力补偿系统　(e) GMMT磁拟低重力试验系统原理及相关设备

图 4　部分微重力地面模拟系统示意

Fig. 4　Schematic diagram of a partial microgravity ground simulation system

为研究重力效应规律和应力水平控制机制的重要间接手段[67-68]。因此，当前低重力贯入研究的关键问题并不在于缺乏可用的模拟手段，而在于不同方法所满足的相似条件各不相同，尚需结合具体研究目标明确其适用范围与外推边界。基于此，现阶段地面试验结果更适合作为特定条件下的机理认知与参数对比依据，在用于月球或火星场景解释时，仍应结合相似条件及其失配环节，并在明确适用边界的基础上加以分析。

在表 1 所列关键环境因素中，低重力及其对应的低应力背景、近真空/稀薄大气条件以及不饱和—含冰介质状态，是影响类 CPTU 响应机理与解释边界的三类核心约束。其中，低重力首先改变贯入过程中的应力传递、结构阈值及边界条件，真空或稀薄大气进一步重塑孔压测量链的工作状态，而不饱和及冻融/含冰状态则使 q_c、f_s 与 u_2 的联合解释面临更强的非唯一性。因此，三者共同构成了地外类 CPTU 适用性分析中的关键环境约束，也决定了地球 CPTU 经验关系在月球与火星场景中的可迁移边界。

由表 1 可见，低重力对类 CPTU 的影响不仅表现为原位应力水平整体降低，还表现为剪胀效应、拱效应及局部结构因素对贯入响应控制作用的增强。在相同密度和埋深条件下，月球与火星近地表总上覆应力量级均显著低于地球，其中月球约为地球的 1/6，火星约为地球的 0.38。若仅作自重应力量级估算，可采用代表性等效密度范围进行比较。结合已有月壤与火壤资料[8,69-70]，本文分别取月壤风化层 $\rho_L \approx 1.5 \sim 1.9\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$、火星近表层风化层 $\rho_M \approx 1.2 \sim 1.6\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$。需要说明的是，上述取值仅用于说明低重力条件下极浅层应力量级的降低，并不代表月壤或火壤的统一密度。实际密度还会随着着陆区位置、颗粒级配、密实状态以及胶结或含冰条件而变化。按 $\sigma_{v0} \approx \rho g z$ 估算，月球在 0.1 m 和 1 m 埋深处的总上覆应力量级约为 0.25～0.31 kPa 和 2.5～3.1 kPa，火星对应约为 0.44～0.59 kPa 和 4.4～5.9 kPa。作为对比，在相同密度范围下，地球 0.1 m 和 1 m 埋深处约为 1.47～1.86 kPa 和 14.7～18.6 kPa。由此可见，月球和火星极浅层的应力背景均处于很低水平，其中月球降幅

表 1　面向典型任务场景的月球与火星关键环境参数差异及其对类 CPTU 观测量（q_c，f_s，u_2）的影响

Table 1　Differences in key environmental parameters between Moon and Mars in typical mission scenarios and their impacts on CPTU-like measurements（q_c，f_s，u_2）

参数项	月球特征	火星特征	对观测量的主要影响	工程后果/解释风险
重力与围压	0.17g，σ'_{v0} 显著降低	0.38g，σ'_{v0} 降低但高于月球	低重力不仅降低原位应力水平，还会影响反力供给与贯入边界条件，q_c 与 f_s 更易表现为突变型或阈值型响应	月球环境下更易受反力与姿态稳定性约束；火星虽相对更易实施，但响应机制仍可能偏离地球校准域
大气/真空	近真空，对流散热弱	稀薄大气，存在气压边界	孔压测量链更易受脱气、挥发和温度漂移影响；火星 u_2 响应可能叠加气相边界效应	u_2 不宜作为核心解释指标。对月球场景，若无法区分热漂移、链路状态扰动与局部结构响应，则仅用于通道健康状态监测；对火星场景，仅在状态可诊断条件下作为辅助观测量使用，并结合温度与通道状态进行解释
温度与热循环	强昼夜热循环，极端温差显著	昼夜温差较大，但较月球缓和	传感器零点漂移与密封状态随温度变化而变化；冻结/融化过程可能改变接触状态与传压路径	数据解释需同步记录温度与传感器状态；在强温度扰动条件下，突变响应识别通常较连续参数反演更稳健
含水/相态	极干，液态水难稳定存在	不饱和为主，局部含冰/盐水	不饱和吸力与含冰相变共同影响有效应力与阻力组成；u_2 的物理含义可能具有非唯一性	需结合电学/介电与温度信息联合约束含水和含冰状态，避免直接沿用饱和土条件下的解释框架
尘埃与颗粒形貌	棱角明显，细粉含量高，尘埃活跃	粉尘覆盖及胶结硬壳更为常见	摩阻界面易受污染和磨损影响，f_s 稳定性下降；硬壳和界面可导致 q_c 出现尖峰或阶跃式变化	需考虑抗磨损与防污染设计，并结合突变响应识别与重复贯入对照进行解释
反力与锚固条件	平台反力不足	反力条件优于月球，但仍受限	反力不足或姿态扰动会影响贯入速率、排水条件及侧阻响应，进而干扰 q_c 与 f_s 的可比性	应将反力与姿态稳定性作为数据有效性判据，否则测试结果可能首先反映系统边界效应

最为显著。对于 Q_t/Q_{tn} 这类以应力归一化为基础的指标，更关键的问题并不是公式在数学意义上的发散，而是分母项所代表的应力背景已可能接近估算误差、结构应力或界面效应的量级，从而使归一化结果对局部扰动高度敏感，物理解释力明显减弱。

当地层中存在冰胶结、盐胶结、硬壳或颗粒黏附等结构性因素，且其影响与原位应力背景处于同一量级甚至占主导时，贯入响应将更多体现结构强度控制特征，围压归一化指标的适用边界相应收缩。基于此，Q_t/Q_{tn} 更适合作为分层识别、界面识别和趋势比较的辅助指标，地球场景下 SBT/SBTn 判释图谱及连续参数反演关系在地外极浅层的直接适用性存在明显限制，其解释仍需结合局部结构特征、重复贯入结果及外部任务资料综合判断。

在这一条件下，地外极浅层贯入响应已难以按常规围压水平下以摩擦剪切为主的机制简单外推。低自重应力削弱了围压对颗粒摩擦剪切和接触网络稳定性的约束作用，使颗粒嵌锁、接触摩擦、颗粒黏附以及可能存在的静电吸附、范德华力、冰/盐胶结等局部结构效应在阻力形成中的控制权重提高。由此产生的 q_c 和 f_s 突变、尖峰或阶跃响应，往往对应局部接触网络失稳、胶结单元破坏或嵌锁结构释放等阈值型过程。该机制表明，地外极浅层中传统围压归一化指标的敏感性增高，本质上反映了低应力背景下贯入阻力主控权重的变化，其与连续密实度变化或有效围压变化之间难以建立稳定的对应关系。

2.3　真空/稀薄大气条件下 u_2 响应分量与测量链边界

与低重力主要通过改变应力路径、结构阈值及贯入边界条件影响 q_c 与 f_s 不同，近真空或稀薄大气更直接作用于锥肩压力通道及其测量链工作状态。对于月球场景，由于缺乏稳定气相边界且液态水难以长期存在，传统孔压链路所依赖的“饱和传压—连续介质响应”前提将明显削弱[71-73]。在这一条件下，u_2 不宜再被直接视为与地球饱和土孔压对应的单一力学变量，而应重新定位为经状态诊断后方可使用的条件性辅助观测通道。从组成上看，月球场景中的 u_2 观测值可概念性地拆分为四类分量：一是局部颗粒骨架扰动及结构重排经滤元和腔体传递形成的结构响应分量；二是滤元、传压介质、密封腔体及传感器封装在强热循环条件下产生的热致漂移分量；三是脱气、堵塞、密封衰减或零点偏移所对应的链路状态分量；四是随机噪声分量。只有在温度同步记录、零点稳定、自检诊断及重复贯入一致性能够证明后几类干扰处于可控范围内时，残余信号才可进一步作为界面识别、事件判读或多源联合约束的辅助依据。若链路状态信号或热漂移占主导，则该通道主要用于监测测量链健康状态，而不应直接参与土体力学参数反演。其中，

结构响应分量的物理来源主要与探头附近颗粒骨架的局部扰动有关。月球近真空且缺乏稳定液态水赋存时，探头贯入引起的颗粒接触力链重组、局部微观挤压和嵌锁释放，可通过滤元、腔体及传感器封装结构传递至 u_2 通道。该分量具有明显的固体接触应力转换特征，其响应强度及演化特征不仅受颗粒骨架扰动控制，也受滤元接触状态、腔体刚度和传感器封装条件影响。因而，在后续设备研发和数据处理中，有必要将其作为具有独立物理来源的结构型响应分量加以识别，并在去噪与参数解耦算法中与热致漂移、链路状态变化及随机噪声进行区分。

对于火星场景，稀薄大气为孔隙气相提供了边界条件。当地表细颗粒介质的孔隙尺度与气体平均自由程相当时，孔隙气体传输在理论上可能偏离连续流假设，并进入滑移流或过渡流控制范围。已有研究指出，在约 6 mbar 的低压条件下，温度梯度可在多孔介质中驱动热蠕流，并呈现出类似 Knudsen 泵的气体输运特征，进而影响近表层颗粒起动和局部压力分布[74-77]。尽管这些认识主要来自风沙与热蠕流研究，对火星近表层风化层中的气体传输行为具有启发意义，但在贯入过程中，压力扰动在滤元、孔隙与腔体之间的传递速度、幅值衰减和响应迟滞都有可能发生变化，进而削弱 u_2 与局部应力状态及排水条件之间的对应关系。基于目前公开试验与任务资料，将其理解为稀薄气体条件下可能出现的非连续流传输效应较为合适，其中 Knudsen 流可能是值得考虑的影响因素之一，但其作用程度仍有待进一步定量研究。因此，火星场景中的 u_2 更适合作为任务增强型辅助通道保留，而不宜脱离温度、电学或介电响应及通道健康状态单独解释。仅在特定介质与链路条件满足时，才谨慎讨论其有限的排水状态或有效应力路径解释价值。

2.4　水冰赋存状态差异及其对观测量的影响路径

月球与火星上水/冰的赋存状态并不相同。月球极区目前较有依据的赋存形式主要包括矿物晶格中的结构水、颗粒表面吸附水或冰膜，以及永久阴影区次表层间隙中的水冰[78-79]。火星上则已识别出水气、水冰以及含水矿物中的吸附水、结晶水、层间水、结构水和非晶质中的水，极区冰盖、中高纬次表层水冰及局部疑似卤水环境又使其相态与空间分布更加复杂[80-81]。若从类 CPTU 响应分析角度进一步概括，可将含冰介质中冰在颗粒骨架内的作用方式理解为孔隙填充、颗粒胶结、层状分布和透镜体富集等几类典型情形。

不同赋存方式对观测量的影响并不相同[33,82-84]。孔隙填充型冰主要提高骨架刚度并限制颗粒重排，通常使 q_c 增大，并可能带动 f_s 同步升高；胶结型冰更强调颗粒间黏结和低温脆性破坏，贯入曲线更易出现尖峰、突跳及局部失稳；层状冰和透镜体冰则具有更强的界面控制效应，常导致阻力突变、峰值集中和层间差异放大，此时分层识别往往比连续参数反演更可靠。相较之下，u_2 在含冰介质中的物理含义更复杂，温度、相变、吸力和有效应力的耦合作用会同时改变压力传递路径与响应时程。对月球近真空场景而言，若无法进一步区分链路扰动与结构响应，则该通道更适合作为状态监测或辅助事件识别信息，而不宜直接参与参数反演。

若聚焦月球极区永久阴影区(PSR)场景，其近表层通常具有极低温、冰含量垂向非均匀以及覆盖层—冰富集层组合等特征。已有研究表明，永久阴影区中除结构水外，还可能出现颗粒表面冰膜、冰壤混合物以及次表层冰富集层等不同状态，月壤与水冰的结合形式也可由少量冰颗粒混入逐步发展到颗粒胶结、孔隙填充和局部冰层[57]。这意味着类 CPTU 的贯入阻力不仅受密实度、颗粒形貌和级配控制，还会受到低温稳定冰胶结、盖层厚度及局部冰层分布的共同约束。相应地，u_2 通道也更容易受到温差、密封衰减和相态转化的叠加影响。

对于火星场景，水/冰赋存状态的复杂性主要体现在水冰、含水矿物以及可能的含盐液相过程并存。火星总体上已识别出极区永久冰盖、南极层状沉积中的水冰与干冰交替成层、中高纬次表层水冰，以及不同地质时期形成的层状硅酸盐、硫酸盐和水合二氧化硅等含水矿物，这表明火星上水的相态、载体和空间分布具有明显的多尺度特征[22,80-81]。但对本文所关注的候选平原着陆区取样与钻探场景而言，更需要关注的是近表层可能出现的次表层水冰、含水矿物及局部含盐过程对工程响应的影响。就类 CPTU 观测量而言，这意味着近表层介质中既可能存在以孔隙填充或胶结形式控制短尺度贯入响应的冰，也可能存在由层状沉积、局部富冰层或矿物水主导的界面型信号。因而，q_c 和 f_s 的变化不宜仅解释为密度或强度差异，还应考虑冰—盐—矿物复合结构及其形成环境差异带来的非唯一性。对于 u_2，则需进一步叠加稀薄气体条件、相变过程和含盐效应对压力传递路径的影响。

2.5　模拟土与真实风化层差异及其对测量链的影响

模拟土的意义在于围绕特定科学或工程问题，尽可能保留影响响应的主要特征，为地外原位测试提供成分、级配、颗粒形貌和边界条件可控的试验对

象[85-86]。对于月球场景，现有模拟月壤已经在矿物组成、粒径分布及部分颗粒形貌特征上较好反映真实月壤的基本特征，从而为月壤贯入响应研究和地面试验验证提供基础。对于火星场景，虽然缺乏系统室内试验所需的直接返回样本，但仍可依据遥感和就位探测结果，对玄武质基底、铁氧化物、盐类及含水矿物等因素进行面向具体问题的材料设计与参数控制。

需要指出的是，真实风化层仍包含一些难以在模拟体中完整体现的环境效应。对于月球，长期真空、辐照和撞击成熟化过程会改变颗粒表面状态、黏附特性和细观接触行为，纳米铁、玻璃质组分、尖锐棱角及静电作用的综合影响通常难以被常规模拟土完全覆盖[87-88]。对于火星，长期氧化、强干燥环境、盐类/含水矿物作用以及可能的盐水相互作用，会进一步影响颗粒表面化学、胶结结构和孔隙连通性[89-90]，因此模拟体通常只能保留其中的主要控制因素，而不以完整复现火星全部风化历史为目标。

这些差异不仅体现在材料本身，也会进一步影响类 CPTU 观测响应及其测量链工作状态[17,57,91-92]。对 q_c 而言，颗粒形貌、胶结方式和孔隙填充状态的差异会改变锥尖前方的局部破坏模式与承载机制；对 f_s 而言，真实风化层中由表面活性、静电吸附、盐类胶结或风化膜引起的界面黏附、磨损和污染行为，难以被普通模拟土完全反映；对 u_2 而言，颗粒细观结构、孔隙连通性以及冰/盐相状态的差异，又会进一步影响滤元邻域的压力传递路径和通道稳定性。因此，模拟土试验更适合用于识别响应趋势、比较参数敏感性和建立特定条件下的解释框架，在将其结果用于月球或火星风化层解释时，还需结合模拟对象所保留的关键特征，讨论其适用范围与解释边界。

3　面向月球与火星环境下类 CPTU 技术拓展

在地外环境中，类 CPTU 原位贯入测试技术关键并非简单复制地球三通道配置，而是围绕“可实施性—可测性—可解释性”耦合约束整体优化系统架构。具体需通过锚固/反力系统与推进闭环设计确保贯入边界条件可控，通过探头结构及测量链耐环境设计提升信号获取稳定性，并在严格考虑载荷重量、功耗及数据传输带宽约束的前提下配置辅助观测通道。同时，要将地外探测数据与地面模拟试验及校准数据库相互映射，形成“测试—标定—解释”的闭环框架。

3.1　推进/锚固与边界条件控制

低重力环境下平台反力受限，使推进方式成为影响 q_c 与 f_s 可比性的重要控制因素。静力恒速贯入更有利于保持与地球 CPTU 解释基线的可比性，但对反力供给和姿态控制的要求较高。冲击、间歇贯入或振动辅助方式可降低峰值反力需求并提高穿透能力，但同时会引入应变率效应和动力响应，从而使排水条件与侧阻响应更难与地球校准域直接对应。因此，更合理的技术路径是将反力、贯入速率或输入能量、倾角及侧向力等参数，与主响应通道及状态诊断通道一并纳入测试质量评价体系，作为约束跨模式数据可比性和解释可靠性的关键控制变量。其中，u_2 仅在任务中实际配置且链路状态可诊断的前提下，才参与不同推进模式之间的数据对比，并用于辅助评估结果解释的可信度。

3.2　探头与孔压测量链改进

针对月球近真空及强尘埃环境，探头设计应优先考虑密封与温控能力，以及抗磨损和抗污染性能。针对火星候选平原区可能出现的不饱和、局部含冰或盐类胶结介质，滤元堵塞及相态变化可能引起明显的迟滞与失真，因此需要通过冗余设计和可诊断的孔压测量链加以抑制[93-94]。更重要的是，孔压测量链在系统设计层面应完成功能重定位。对月球近真空场景，其优先目标不再是复现地球饱和土条件下的标准孔压判释，而是实现通道健康状态监测、热漂移识别和局部结构事件辅助观测。对火星等存在稀薄气相边界的场景，该通道可作为任务增强模块保留，但必须配套温度修正、零点自检及状态诊断功能。仅在特定介质与链路条件满足时，才讨论其有限的排水状态或有效应力路径解释价值。

3.3　多传感集成与联合约束

在推进/锚固条件控制和孔压测量链改进的基础上，引入多传感协同观测有助于降低地外复杂介质条件下响应解释的非唯一性。但多传感集成并不意味着在单次任务中同时配置全部观测模块。考虑到深空探测任务通常受到载荷重量、功耗、数据传输带宽及环境可靠性等多重约束，观测通道的配置更适合围绕任务目标与资源边界进行分级设计。

若任务目标主要是在受限资源条件下实现地层识别与贯入有效性判断，则最小完备集至少应包括三类信息：一是以 q_c 为核心的轴向贯入响应信息，用于表征沿深度方向的主响应特征；二是姿态或反力状态信息，用于区分曲线突变究竟来自真实地层变化，还是平台反力不足、探头偏转及推进失稳；三是温度信息，用于识别热漂移、相态变化影响，并辅助判断测量链工作状态。上述三类信息分别对应主响应表征、

边界条件判别和通道状态约束，构成了地外场景下实现分层识别所需的最小完备观测基础。

在此基础上，若载荷资源允许，f_s 可作为优先增强通道，用于提高土行为差异、层间界面及摩阻变化的识别能力；u_2 则在链路状态可诊断且任务目标确有需要时保留为辅助观测量。电阻率或介电通道更适用于含冰、含盐及可能的介电异常状态识别；声发射或微震信息则更适用于硬壳破裂、脆性界面穿越及局部结构突变识别[95-100]。对于月球近真空场景，此类事件信号的采集主要依赖探头—介质—结构体系中的固体接触传导，而非气体传播。

因此，地外类 CPTU 的多传感配置更适合形成“最小完备集—优先增强通道—任务定制通道”的分级结构。表 2 所列各类观测通道可视为面向不同任务目标的可选能力库，其具体组合仍需结合载荷资源、功耗预算、数据传输能力及任务风险偏好加以确定。对于地外类 CPTU 而言，以 q_c 为代表的连续贯入响应仍是解释地层结构与贯入行为的主体，辅助通道的主要作用在于约束边界条件、识别通道异常并增强关键事件判别，而不是以通道堆叠替代核心贯入指标的解释能力。

4　讨　论

4.1　现有探测任务数据对类 CPTU 解释框架的外部约束

尽管现有月球与火星任务尚未直接实施标准三通道 CPTU 测试，但若将“外部约束”理解为对近表层结构、承载—变形关系和贯入可实施性的补充依据，则已有探测数据仍具有重要价值。

对月球场景而言，嫦娥四号着陆区基于轮地作用和滑转-沉陷关系反演得到的力学参数，可为未来类 CPTU 在月球浅层介质中的应用提供承载能力和压力-沉陷响应方面的参照[101]。虽然这类结果不能直接替代 q_c 曲线，但其反映出的强度水平、表层结构和沉陷特征，可用于限定浅层强弱分区、层界识别和结构性表征的合理范围。若相关任务数据已经显示出壳层、分层或表层非均一性特征，则在构建类 CPTU 解释框架时，不宜将近表层简单视为均一松散介质。嫦娥五号任务进一步提供了风化层厚度、成熟度、着陆扰动和钻进可实施性等信息，这些资料有助于约束表层疏松结构、扰动敏感性及采样/钻探条件下的地层响应[102-103]。相较之下，f_s 在现有月球任务中缺乏直接对应观测，但轮地摩擦和采样阻力变化仍可作为界面效应的间接参照。

对火星场景而言，“洞察号”任务中 HP^3 热探针的推进受阻表明，低围压背景下的局部结构性、反力不足及边界不稳定都可能显著影响推进结果[104]。这说明在火星环境中讨论类 CPTU 技术时，推进系统能否维持稳定反力和姿态条件，本身就是解释框架中的前提约束，而不能被视为默认成立。相比之下，“祝融号”在乌托邦平原获取的通过性、轮迹和轮陷信息更接近工程约束，可为火星平原场景下近表层承载能力、壳层存在性、松散层厚度及局部结构突变等问题提供外部参照[105]。因而，在面向火星平原场景构

表 2　面向地外类 CPTU 任务的分级多传感配置建议

Table 2　Recommendations for tiered multi-sensor configurations for extraterrestrial CPTU-like missions

配置等级	观测通道/模块	主要约束对象	主要作用	推荐校准与验证方式
最小完备	轴向力—位移—速率/能量	推进边界条件与输入模式	构建跨推进模式的可比性指标，表征主贯入响应与输入效率	控速/控能试验；能量—贯入效率标定
最小完备	姿态/倾角/侧向力	反力不足、探头偏转及局部边界失稳	识别曲线突变是源于真实地层变化还是边界条件扰动	反力水平变化与倾角控制试验；姿态—力学响应同步标定
最小完备	温　度	相态变化、热漂移及局部热扰动	区分温度效应、相变响应与测量链漂移对观测量的影响	热循环条件下对照试验；温度—响应同步记录与漂移校正
优先增强	侧摩阻力 f_s	土行为差异、层间界面及摩阻变化	提高对层界变化、摩阻突变及土行为差异的识别能力	分层介质与不同密实度条件下的对照试验；锥阻—摩阻联合标定
任务可选	u_2/孔压通道及状态诊断	孔压测量链健康状态、局部压力扰动	在链路状态可诊断时提供辅助信息；在链路异常时用于状态监测而非参数反演	滤元饱和/堵塞诊断；零点自检；温度漂移校核；重复贯入对照
任务可选	电阻率/介电	含冰、含盐及介电异常状态	区分成分变化、相态变化与力学响应耦合效应	含冰/含盐分层条件下对照试验；电学响应与力学响应联合分析
任务可选	声发射/微震监测	剪切带形成、硬壳破裂、脆性界面穿越及局部结构突变	为阻力曲线中的尖峰、拐点和突变提供事件型证据，增强对脆性破坏和界面穿越的识别能力	含冰、胶结和分层条件下对照试验；月球近真空条件下重点验证固体接触传导与近场接收路径；开展事件同步采集、频带识别及时深对应关系标定

建类 CPTU 解释框架时，应尽量使其与巡视器通过性分析所揭示的浅层结构特征保持一致。若二者差异较大，则需重新审视模型适用域、边界条件和层状假设。现有任务数据对类 CPTU 的约束具有明显层次性。与 q_c 相关的解释最容易获得外部参照，f_s 只能提供有限的界面效应旁证，而 u_2 在现有任务资料中的约束主要体现为边界条件、环境状态和测量链可解释性的外部限制，而非可直接用于建立稳定参数映射的独立依据。对现阶段而言，这些任务观测更适合与地面试验相互参照，用于限定类 CPTU 解释框架中的结构假设、承载水平和推进边界。

4.2　校准对象、解释层级与适用范围

地球条件下 CPTU 经验体系的可迁移性，通常建立在观测量物理含义相对稳定、边界条件基本明确以及经验图谱与参数反演关系具有一定适用基础的前提之上(见图 5)。然而，地外环境首先改变的正是这一前提本身。低重力会改变应力传递、结构阈值及推进边界条件，近真空或稀薄大气会重塑孔压测量链的工作状态，含冰、含盐及不饱和介质则进一步增加观测响应的非唯一性。因而，地外类 CPTU 的校准不宜理解为将地球经验参数或判释图谱直接移植至月球或火星场景，而应围绕观测链路、系统边界和解释框架三个层级分别展开[8,106-107]。

第一层是仪器与通道层的校准，重点在于明确传感器及测量链在地外环境中的工作状态。对于 q_c 与 f_s，主要涉及锥头受力、侧摩阻响应及其对温度、姿态和边界扰动的敏感性。对于 u_2，基于 2.3 节所述边界，其在地外场景中的使用前提应转变为“经状态诊断后的条件性使用”。其中，对月球近真空环境，若无法实现对热漂移、链路状态扰动与局部结构响应的有效区分，则该通道不参与土体力学参数反演，而主要用于测量链健康状态监测。对火星等存在稀薄气相边界的场景，可将其作为任务增强型辅助通道保留，但应在温度、电学或介电及通道健康状态联合约束下谨慎使用。

第二层是系统与边界层的校准，重点在于明确测试结果是否首先受制于反力、姿态和推进模式，而非真实介质性质。低重力环境下，平台反力不足会使推进方式本身成为影响数据可比性的关键因素。冲击、间歇贯入或振动辅助方式虽有助于降低峰值反力需求，但也会引入速率效应和附加动力响应。因此，反力、贯入速率或输入能量、倾角及侧向力不宜仅作为附属工程参数记录，而应与主响应通道及状态诊断通道一并视作决定结果可比性和解释可信度的重要控制量。只有在系统边界条件得到识别和约束的前提下，类 CPTU 数据才具有进一步解释的基础。对于配置了 u_2 的系统，只有在系统边界条件得到识别和约束、且通道健康状态可诊断的前提下，其观测结果才具有进一步解释意义。

第三层是解释与模型层的校准，重点在于界定哪些地球经验关系仍可作为参照，哪些只能用于局部、附条件的解释。当地层响应主要受密实度变化控制时，连续参数反演仍具有一定参考价值。当含冰、含盐、壳层、界面或局部脆性破坏成为主控因素时，分层识别、界面识别及事件判别往往比连续参数反演更稳定。由此，类 CPTU 解释的适用范围应随任务场景

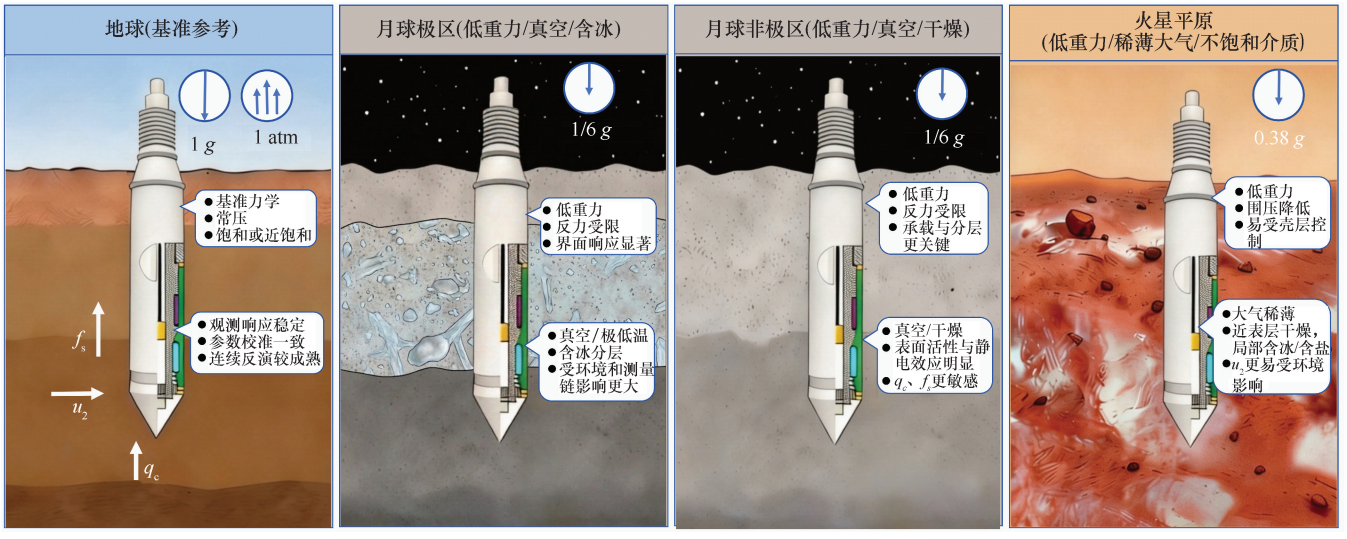


图 5　不同典型任务场景下类 CPTU 观测响应与解释边界差异示意

Fig. 5　Schematic diagram of differences in observational responses and interpretation boundaries of CPTU-like techniques under different typical task scenarios

而变化。月球极区含冰风化层中，校准重点应放在温度、相态和层状结构的约束上；月球非极区近地表工程场景中，重点应放在承载、分层及平台部署条件上；火星平原场景中，则更应关注稀薄气体边界、壳层—松散层组合以及局部富盐/富冰过程对观测响应的影响。在这一层级中，u_2 不应再被视为默认参与参数反演的核心输入，而应根据通道状态、任务场景及辅助证据条件决定其是否进入解释流程。总体而言，地外类 CPTU 的校准目标，不是恢复地球条件下三通道经验体系的形式完整性，而是在明确观测链路、系统边界和适用范围的前提下，建立面向具体任务场景的分级解释框架。

4.3　地外类 CPTU 标准化框架性建议

从工程应用和后续任务对比的角度看，若缺乏基本一致的探头几何、记录变量和结果表达方式，不同任务之间的类 CPTU 数据将难以进行横向比较。考虑到当前公开任务与地面模拟试验数据仍较有限，现阶段更适合提出面向地外场景的“标准化”框架，而非直接建立完整统一的正式标准。其目的不在于提前固化全部技术细节，而在于为不同任务、不同场景和不同推进模式下的数据可比性提供最低限度的一致性基础。因此，标准化框架应明确几类基础要素，即：(1)探头几何参数应尽量统一，包括锥头角度、横截面积、净面积比、滤元位置和侧摩阻测段长度等，以减少不同装置之间由几何差异引起的系统偏差；(2)贯入控制方式应与记录变量一体化考虑。对于静力恒速贯入、冲击/间歇贯入和振动辅助贯入，不宜简单套用同一速率标准，而应分别给出速率或能量输入的记录要求，并同步记录反力、位移、姿态、温度以及必要的辅助观测信息。结果表达方式也应从单一参数输出转向主参数与状态量组合表达，使 q_c、f_s、u_2 与边界条件和通道状态能够在同一框架下被解释。

需要强调的是建立与任务场景相适应的数据质量分级体系是必要的。对于月球极区场景，质量控制应突出温度条件、通道稳定性、含冰/分层信息及反力约束；对于月球非极区工程场景，应更重视反力供给、姿态控制、承载响应和分层识别；对于火星平原场景，则应加强对稀薄气体边界、壳层—松散层组合及局部富盐/富冰迹象的记录和描述。准标准化并不意味着不同场景采用完全相同的测试内容，而是在共同框架下保留可比的基础参数，同时允许与场景特征相关的变量被重点强调，故现阶段提出的只是“标准化”，而非正式标准，地外类 CPTU 仍处于从地面模拟走向任务应用的过渡阶段，其近期目标更适合作为任务设计、试验验证和结果解释之间的桥梁，服务于不同探头方案、不同推进模式和不同场景之间的数据对照。随着未来原位探测数据的增加，探头几何、控制方式、质量分级和结果表达方式仍可进一步修订和收敛。就目前而言，优先建立几何参数可比、记录变量完整、边界条件明确、结果表达统一的准标准化框架，更有利于推动类 CPTU 从单次试验走向跨任务、跨场景的系统应用。

4.4　面向月球与火星环境下类 CPTU 的地面等效校准数据库

面向地外任务的校准数据库，不宜停留在“单指标—单参数”对照层面，而应形成同时包含观测量、通道状态、推进条件和场景标签的地面等效数据库[108-109]。其作用不只是为某一组 q_c、f_s、u_2 数据寻找经验对应关系，更在于为地外类 CPTU 中的观测链路校准、边界条件识别和解释框架约束提供可比的试验基础。对于月球与火星场景而言，数据库的意义首先体现在降低观测响应的非唯一性，其次体现在限定不同模型和判释关系的适用范围，并为后续任务数据与地面试验之间的对照提供统一参照。

从数据库构成看，宜围绕三类信息组织。第一类是通道与环境响应数据，主要对应真空或稀薄大气、热循环、尘埃污染及温度漂移等条件下传感器和测量链的工作状态，包括 q_c、f_s、u_2 通道的基线稳定性、零点漂移、迟滞、堵塞和状态异常等。第二类是介质与结构响应数据，主要对应不同密实度、颗粒形貌、含冰率、含盐状态、壳层、界面和分层结构下的贯入响应，用于建立不同场景中“介质特征—观测响应”之间的约束关系。第三类是推进与边界响应数据，主要对应反力水平、推进方式、贯入速率或输入能量、姿态扰动及侧向力条件下的系统响应，用于识别测试结果中由边界条件引入的附加影响。只有将这三类信息放在同一数据库框架下，地外类 CPTU 中的观测响应、通道状态和系统边界才可能被同时识别和解释。此外，数据库设计宜面向任务场景构建最小完备试验矩阵。对月球极区场景，应突出低温、含冰、分层和真空条件下的通道稳定性与贯入响应；对月球非极区场景，应突出干燥风化层、平台反力和姿态控制对承载与分层识别的影响；对火星平原场景，则应加强稀薄气体边界、壳层—松散层组合以及局部富盐/富冰过程对观测量的影响描述。在试验记录层面，除 q_c、f_s、u_2 外，还应同步记录反力、位移、速率或能量、倾角、侧向力以及必要的温度、电学或介电和事件型观测信息，使数据库能够同时服务于连续参数解释和

边界条件识别。

需要说明的是，地面等效校准数据库还应具有迭代更新能力。原位任务中可能出现的异常模式，如孔压通道基线偏移、事件型尖峰或阶跃、姿态扰动耦合以及重复贯入引起的响应变化，均不宜仅作为个别异常现象处理，而应纳入数据库作为通道状态、系统边界和解释风险的标记信息。由此形成的数据库输出，也不应局限于“某指标对应某参数”的经验关系，而应包括模型适用范围、通道健康状态标签、推进模式可比性标识以及解释可信度等级。对现阶段的地外类 CPTU 研究而言，这类数据库更适合作为任务设计、试验验证和结果解释之间的中间层，使不同场景下的观测量、边界条件和解释框架能被放在统一坐标中加以比较。

进一步，数据库输出还可作为小样本条件下先验构建的中间层。其中，遥感探测、着陆区地质单元和巡视器通过性等信息更适合作为场景级先验，用于限定可能的层序组合、壳层或含冰层存在性及其大致空间分布。地面等效数据库则更适合作为条件参数先验来源，用于在给定场景模板下提供承载水平、层位厚度、界面深度或结构参数的区间分布。当地面数据库与目标场景之间的相似性存在不确定性时，先验宜采用加权混合分布或经方差扩张后的宽分布，而不是压缩为单一确定参数。

4.5　不确定性量化与小样本条件下的概率解释思路

月球与火星环境下原位测试结果的工程意义，更多体现在参数范围、适用条件和解释等级的综合表达上。与地球场景下可依托较大样本经验图谱进行直接解译不同，地外类 CPTU 所面对的观测数据更少，先验信息更有限，任务场景差异也更显著。在这种条件下，小样本条件下的概率解释更适合采用“场景模板—条件参数—有限观测”的分层更新思路[110-114]，而不是直接将外部信息映射为单一参数值。图 6 展示了小样本条件下类 CPTU“观测量—先验约束—后验区间”逻辑演化过程。其中，遥感探测、着陆区地质单元、巡视器通过性及地貌背景等信息主要用于构建场景级先验，用以限定可能的地层模板、层序组合以及壳层或含冰层存在性，并给出其大致厚度范围。地面等效数据库则在给定场景模板的条件下，为承载水平、层位深度、界面位置和局部结构参数提供条件参数先验。贯入观测、温度、姿态、反力以及测量链状态信息进一步用于对上述先验进行更新。通过这种处理，跨尺度信息进入解释过程的方式由“直接参数赋值”转为“先限定场景，再更新参数”，从而降低低分辨率外部信息被直接映射为厘米级单点参数所带来的偏差风险。

当地面数据库与目标场景之间的相似性本身存在不确定性时，先验构建更适合采用多场景模板并行保留、相似度加权分配或范围更宽的区间分布，而不是压缩为单一高置信度先验。若不同来源先验之间存在明显冲突，则应允许场景模板切换、先验弱化或解释等级下降，以降低错误先验对后续结果的牵引效应。

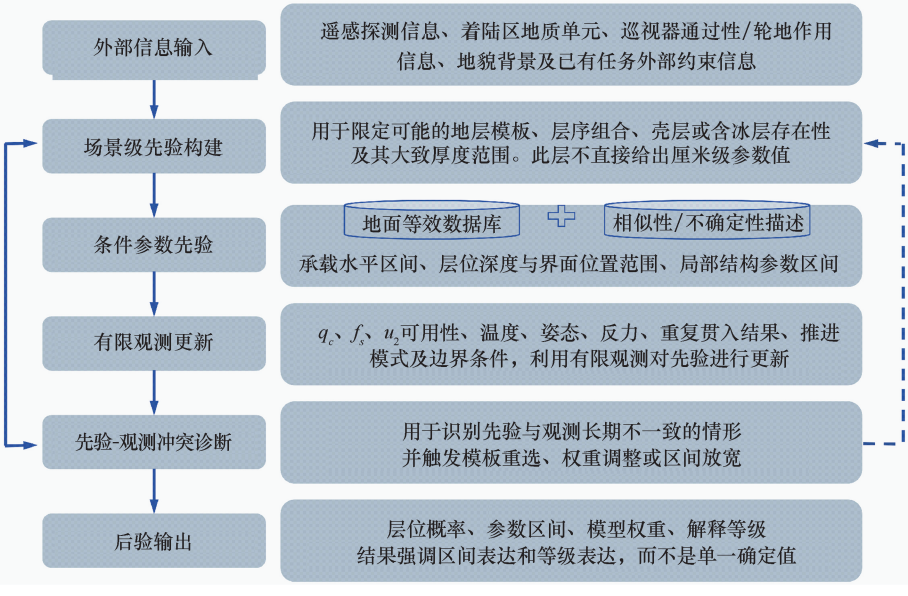


图 6　小样本条件下类 CPTU“观测量—先验约束—后验区间”逻辑演化示意

Fig. 6　Schematic diagram of logical evolution from “observed quantities-prior constraints-posterior intervals” for CPTU-like method under small-sample conditions

与此对应，后验结果更适合表达为层位概率、参数区间、模型权重和解释等级，而不是给出形式精确但条件说明不足的单值结果。

值得关注的是，为降低“小样本与低精度先验”导致局部最优陷阱的风险，解释流程中还需设置先验—观测冲突诊断。当场景模板所对应的高权重先验与贯入曲线、温度、姿态、反力或重复贯入结果持续不一致时，应触发先验弱化或场景模板重选。这样，有限观测的作用不仅是对先验进行数值修正，也包括对先验是否成立进行筛选。由此，概率解释在本文中的意义主要不在于立即形成统一的任务级算法，而在于为“场景模板—条件参数先验—有限观测—后验区间”之间的关系提供清晰的逻辑框架。这一框架符合面向月球与火星环境的类 CPTU 解释。对于数据较少的任务场景，在场景分区、外部约束和测量链状态说明的基础上给出层位概率、参数区间和解释等级，通常比给出单一参数值更具工程意义。小样本反演以及基于先验—观测联合更新的概率解释，可作为这一方向上值得持续推进的技术路径。其适用性、稳定性和任务级实现方式，仍有赖于后续地面试验和原位观测资料的进一步积累。

5　结　论

本文以地球条件下的 CPTU 解释体系为参照，围绕月球极区含冰风化层、月球非极区近地表工程场景以及火星候选平原取样/钻探场景，系统梳理了月球与火星环境约束下类 CPTU 的响应机理、适用边界及不确定性约束问题。主要结论如下。

(1)月球与火星环境对类 CPTU 的影响并不只是原位应力水平的变化，而是贯穿于贯入边界条件、测量链工作状态和结果解释过程。低重力不仅降低围压背景，还会改变反力供给、姿态稳定性和推进控制条件，使 q_c 和 f_s 更易表现为突变型或阈值型响应，从而削弱地球经验图谱、归一化指标和连续参数反演关系的直接迁移性。

(2)地外场景下 u_2 的使用前提需要重新界定。对于月球近真空环境，若无法实现对热漂移、链路状态扰动与局部结构响应的有效区分，则 u_2 不宜参与土体力学参数反演，而主要用于测量链健康状态监测。对于火星稀薄大气环境，u_2 可作为任务增强型辅助通道保留，但应在温度、电学或介电及通道健康状态联合约束下谨慎解释。

(3)含冰、含盐、胶结、壳层及分层结构会进一步增强类 CPTU 响应的非唯一性。对于此类复杂介质，在现有证据条件下，分层识别、界面识别和关键事件识别通常比脱离场景约束的连续参数反演更稳健。现有着陆压陷、轮迹/通过性等任务资料可作为外部约束，用于限定承载水平、浅层结构特征和推进边界条件。

(4)面向地外探测应用的类 CPTU 技术，其发展重点并非对地球原位三通道配置进行简单复刻，而需结合地外低重力环境、特殊作业条件与探测任务约束，对贯入方式、测量链路和解译方法等关键环节开展适应性优化，逐步构建适用于地外探测场景的技术体系。后续研究应重点聚焦低重力条件下的地面等效校准方法、孔压测量链路的环境适应性与稳定性提升、典型含冰/含盐风化层的贯入作用机理，同时推进地面等效试验数据库与不确定性分级解译体系建设，为月球水资源探测与地外浅表层工程勘查提供技术参考。

参考文献(References)：

[1] 刘松玉，蔡国军，张炜，等. 岩土工程勘察、测试与评价进展[J]. 土木工程学报，2024，57(10)：108-124.
LIU S Y，CAI G J，ZHANG W，et al. State-of-the-art developments in geotechnical testing and site investigation[J]. China Civil Engineering Journal，2024，57(10)：108-124.

[2] 汤姆·伦尼，彼得·K. 罗伯逊，约翰·J. M. 鲍威尔. 静力触探工程实践：第四版[M]. 蔡国军，刘路路，刘晓燕，等，译. 第一版. 北京：科学出版社，2025.
LUNNE T，ROBERTSON P K，POWELL J J M. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice：4th Edition[M]. Translated by CAI G J，LIU L L，LIU X Y，et al. 1st ed. Beijing：Science Press，2025.

[3] WANG L Z，ZHANG X H，HONG Y，et al. Efficient 3D geological modeling for offshore wind farm with sparse CPTU and borehole data[J]. Canadian Geotechnical Journal，2025，62：1-23.

[4] MOLAABASI H，SABERIAN M，KHAJEH A，et al. Settlement predictions of shallow foundations for non-cohesive soils based on CPT records-polynomial model[J]. Computers and Geotechnics，2020，128：103811.

[5] YANG Z N，LIU M Y，CHANG J Y，et al. Revised plastic soil classification system with soil behaviour type index based on CPTu[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2025，84(5)：226.

[6] ROBERTSON P K. Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test：An update[J]. Canadian Geotechnical Journal，2022，59(4)：620-624.

[7] 刘薛宁. 基于 CPTU 的长江三角洲古下切河谷地层层序识别与工程表征方法研究[D]. 南京：东南大学，2024.

LIU X N. Research on Identification and Characterization Method of Paleo-Incised Valley Stratigraphy in the Yangtze River Delta Based on CPTU[D]. Nanjing: School of Transportation, Southeast University, 2024.

[8] 吴盾，孙林，陆建伟，等. 火壤工程地质原位探测技术研究进展与孔压静力触探应用展望[J]. 岩土力学，2025，46(7)：2308-2324.
WU D, SUN L, LU J W, et al. Research advances in in-situ characterization techniques for Martian soil and prospects for piezocone penetration test application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(7): 2308-2324.

[9] 崔平远，葛丹桐，朱圣英，等. 行星着陆点自主评估与选取研究进展[J]. 中国科学(技术科学)，2021，51(11)：1315-1325.
CUI P Y, GE D T, ZHU S Y, et al. Research progress of autonomous planetary landing site assessment and selection[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2021, 51(11): 1315-1325.

[10] CUI P Y, GE D T, GAO A. Optimal landing site selection based on safety index during planetary descent[J]. Acta Astronautica, 2017, 132: 326-336.

[11] 李涛，杨军，费思邈. 探测器安全着陆风险评估与敏感性分析[J]. 北京航空航天大学学报，2011，37(11)：1461-1464.
LI T, YANG J, FEI S M. Risk assessment and sensitivity analysis of detector safety landing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(11): 1461-1464.

[12] 申彦，邹猛，党兆龙，等. 火星车通过性评估技术现状与展望[J]. 光学 精密工程，2023，31(5)：729-745.
SHEN Y, ZOU M, DANG Z L, et al. Trafficability analysis for Mars rover: Present and development[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(5): 729-745.

[13] ZHANG Y L, ZHANG T, WEI H Y, et al. Advances in extraterrestrial drilling technology to discover the secrets hidden inside celestial bodies[J]. Space Science Reviews, 2022, 218(6): 47.

[14] 李守定，陈薪硕，李娟，等. 行星工程地质问题与关键技术[J]. 工程地质学报，2024，32(6)：2298-2322.
LI S D, CHEN X S, LI J, et al. Key problems and technologies in planetary engineering geology[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(6): 2298-2322.

[15] 邸凯昌，叶乐佳，王润之，等. 行星遥感影像目标识别与分类进展[J]. 遥感学报，2021，25(1)：365-380.
DI K C, YE L J, WANG R Z, et al. Advances in planetary target detection and classification using remote sensing data[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 365-380.

[16] 何飞. 行星空间环境光学遥感[J]. 科学通报，2020，65(14)：1305-1319.
HE F. Remote sensing of planetary space environment[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(14): 1305-1319.

[17] 三郎斯基，王超，童小华，等. 顾及范德华力作用的月壤离散元模拟及其圆锥贯入试验[J]. 岩土工程学报，2026，48(8)：1722-1732.
SANLANG S J, WANG C, TONG X H, et al. Discrete element simulation of lunar regolith considering van der Waals forces and its application in cone penetration test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2026, 48(8): 1722-1732.

[18] 蒋明镜，吕雷，李立青，等. TJ-M1 模拟火壤承载特性的研究[J]. 岩土工程学报，2020，42(10)：1783-1789.
JIANG M J, LÜ L, LI L Q, et al. Bearing properties of TJ-M1 Mars soil simulant[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1783-1789.

[19] LOMAX B A, JUST G H, MCHUGH P J, et al. Predicting the efficiency of oxygen-evolving electrolysis on the Moon and Mars[J]. Nature Communications, 2022, 13: 583.

[20] 潘永信，林巍，秦礼萍. 我国行星科学研究新进展[J]. 中国科学：地球科学，2025，55(10)：3238-3250.
PAN Y X, LIN W, QIN L P. Recent advances in China's planetary science research[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2025, 55(10): 3238-3250.

[21] RAZETO C, VISVANATHAN R, KAMEL E. Extraterrestrial infrastructures: Review of in-situ materials, envelope solutions, and energy performance of livable Martian and lunar habitats[J]. Acta Astronautica, 2026, 238: 146-159.

[22] 刘正豪，刘洋，刘佳，等. 火星水冰分布特征和研究进展[J]. 地球科学，2024，49(6)：2253-2276.
LIU Z H, LIU Y, LIU J, et al. Distribution characteristics and research progress of water-ice on Mars[J]. Earth Science, 2024, 49(6): 2253-2276.

[23] BISHOP J L, YEŞILBAŞ M, HINMAN N W, et al. Martian subsurface cryosalt expansion and collapse as trigger for landslides[J]. Science Advances, 2021, 7(6): eabe4459.

[24] 黄帅，周健，张锐，等. 月球资源开发的关键挑战与技术路径[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2025，56(11)：4560-4582.
HUANG S, ZHOU J, ZHANG R, et al. Key challenges and technological pathways for lunar resources development[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2025, 56(11): 4560-4582.

[25] CANNON K M, DREYER C B, SOWERS G F, et al. Working with lunar surface materials: Review and analysis of dust mitigation and regolith conveyance technologies[J]. Acta Astronautica, 2022, 196: 259-274.

[26] LI R L, CHEN J, ZHANG J R, et al. Cone penetration resistance of CUMT-1 lunar regolith simulant under magnetic-similitude lunar gravity condition[J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(12): 6725-6744.

[27] LI M X, TANG D W, QUAN Q Q, et al. Investigation of the asteroid triple-drill anchoring force under complicated working conditions[J]. Powder Technology, 2023, 428: 118804.

[28] GHAREHDAGHI M, SHAHBODAGH B, KHALILI N. Pore pressure

parameters for unsaturated soils[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 172: 106441.

[29] QI J L, CUI W Y, WANG D Y. Applicability of the principle of effective stress in cold regions geotechnical engineering[J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 219: 104129.

[30] NA S H, SUN W C. Computational thermo-hydro-mechanics for multiphase freezing and thawing porous media in the finite deformation range[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 318: 667-700.

[31] LI K Q, YIN Z Y, QI J L, et al. State-of-the-Art Constitutive Modelling of Frozen Soils[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2024, 31(7): 3801-3842.

[32] LI K Q, YIN Z Y. State of the art of coupled thermo-hydro-mechanical-chemical modelling for frozen soils[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2025, 32(2): 1039-1096.

[33] KRAEMER A, TEISER J, STEINPILZ T, et al. Analog experiments on thermal creep gas flow through Martian soil[J]. Planetary and Space Science, 2019, 166: 131-134.

[34] 刘晴昊, 李玉琼, 李娜, 等. 土壤原位触探技术与贯入机理研究进展[J]. 光学精密工程, 2023, 31(5): 588-620.
LIU Q H, LI Y Q, LI N, et al. Research progress of soil in-situ penetration technology and penetration mechanism[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(5): 588-620.

[35] MONFORTE L, ARROYO M, CARBONELL J M, et al. Coupled effective stress analysis of insertion problems in geotechnics with the Particle Finite Element Method[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 101: 114-129.

[36] MONFORTE L, GENS A, ARROYO M, et al. Analysis of cone penetration in brittle liquefiable soils[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 134: 104123.

[37] ROBERTSON P K. Interpretation of cone penetration tests: A unified approach[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(11): 1337-1355.

[38] ELSWORTH D, LEE D S. Permeability determination from on-the-fly piezocone sounding[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(5): 643-653.

[39] 刘松玉, 蔡国军, 邹海峰. 基于 CPTU 的中国实用土分类方法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1765-1776.
LIU S Y, CAI G J, ZOU H F. Practical soil classification methods in China based on piezocone penetration tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1765-1776.

[40] LI H X, DUAN M L, YANG X T, et al. Modified CPTU parameters and SBTn chart for predicting shear behavior of organic soils at large strains[J]. Engineering Geology, 2025, 356: 108273.

[41] CAI G J, LIU S Y, PUPPALA A J. Consolidation parameters interpretation of CPTU dissipation data based on strain path theory for soft Jiangsu Quaternary clays[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2015, 33(4): 310-319.

[42] ZHANG Y, WANG H, LIU T, et al. Interpretation of pore pressure dissipation of CPTU in intermediate soil considering partial drainage effect[J]. Ocean Engineering, 2022, 266(Part 3): 112956.

[43] 孙淼军, 谢雅囡, 王栋. 结构性土中静力触探孔压消散的大变形模拟[J]. 岩土力学, 2024, 45(11): 3416-3422.
SUN M J, XIE Y N, WANG D. Large deformation simulation of pore pressure dissipation during penetration of piezocone in structured soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(11): 3416-3422.

[44] 赵学亮, 刘子雄, 李宇, 等. 地/月环境下静力触探试验数值仿真研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2025, 55(2): 426-434.
ZHAO X L, LIU Z X, LI Y, et al. Numerical simulation study on cone penetration test in terrestrial and lunar environments[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2025, 55(2): 426-434.

[45] 高峰, 周国庆, 莫品强, 等. 小重力环境下静力触探模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 394-401.
GAO F, ZHOU G Q, MO P Q, et al. Experimental study on static cone penetration model tests under small gravity fields[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2): 394-401.

[46] LIN C X, TU F B, LING D S, et al. FEM-DEM coupled modeling of cone penetration tests in lunar soil[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(2): 392-405.

[47] 张杰, 刘洋, 薛长斌, 等. 月球南极水冰科学问题与探测方法[J]. 空间科学与试验学报, 2025, 2(3): 1-10.
ZHANG J, LIU Y, XUE C B, et al. Scientific questions and detection methods of water ice at the lunar south pole[J]. Journal of Space Science and Experiment, 2025, 2(3): 1-10.

[48] LI S, LUCEY P G, MILLIKEN R E, et al. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(36): 8907-8912.

[49] CHEN X S, LI S D, LI J, et al. A comprehensive geological engineering site selection for lunar research station and base on a global scale[J]. Engineering Geology, 2025, 355: 108225.

[50] LIU J J, ZENG X G, LI C L, et al. Landing site selection and overview of China's lunar landing missions[J]. Space Science Reviews, 2020, 217(1): 6.

[51] 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.

[52] WEN P Z, TIAN Y, LI B, et al. Establishment of safety evaluation factors for dust storms in the landing area selection for Tianwen-3 mission[J]. Earth and Space Science, 2025, 12(3): e2024EA003994.

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

[54] CHEN J, LI R L, FU S G. Influence of low gravity on the penetration resistance of lunar regolith[J]. NPJ Microgravity, 2026, 12: 18.

[55] MO P Q, ZHOU G Q, GAO F, et al. Bearing capacity of surface circular footings on granular material under low gravity fields[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13(3): 612-625.

[56] SUN Q, WANG L, ZHANG L, et al. Lunar Highlands simulant: Geotechnical characterization, 3D discrete element modeling, and cone penetration simulations[J]. Acta Astronautica, 2024, 221: 283-295.

[57] 徐勇. 极区含水冰模拟月壤贯入阻力特性研究[D]. 徐州：中国矿业大学, 2025.
XU Y. Characterization of Penetration Resistance of Icy Lunar Regolith Simulant in Polar Regions[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2025.

[58] 陈大庆. 小重力及真空环境模拟月壤触探阻力特性试验研究[D]. 徐州：中国矿业大学, 2022.
CHEN D Q. Experimental Study on Penetration Resistance of Lunar Regolith Simulant under Low Gravity and Vacuum Environments[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.

[59] 田大可，范小东，郑夕健，等. 空间可展开天线微重力环境模拟研究现状与展望[J]. 机械工程学报, 2021, 57(3): 11-25.
TIAN D K, FAN X D, ZHENG X J, et al. Research status and prospect of micro-gravity environment simulation for space deployable antenna[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(3): 11-25.

[60] 张孝谦，袁龙根，吴文东，等. 国家微重力实验室百米落塔实验设施的几项关键技术[J]. 中国科学 E 辑, 2005, 35(5): 523-534.
ZHANG Xiaoqian, YUAN Longgen, WU Wendong, et al. Some key technics of drop tower experiment device of National Microgravity Laboratory (China) (NMLC)[J]. Science in China Series E: Engineering & Materials Science, 2005, 35(5): 523-534.

[61] 饶秋磊，杨媚，尹艳艳，等. 失重试飞方法优化设计与试验[J]. 飞行力学, 2023, 41(6): 76-81.
RAO Q L, YANG M, YIN Y Y, et al. Optimal design and test of weightless flight[J]. Flight Dynamics, 2023, 41(6): 76-81.

[62] BLOCK J, BÄGER A, BEHRENS J, et al. A self-deploying and self-stabilizing helical antenna for small satellites[J]. Acta Astronautica, 2013, 86: 88-94.

[63] SIRIGULENG B, ZHANG W, LIU T, et al. Vibration modal experiments and modal interactions of a large space deployable antenna with carbon fiber material and ring-truss structure[J]. Engineering Structures, 2020, 207: 109932.

[64] LI C, WANG H J, HU Z C, et al. Design and analysis of low-gravity simulation scheme for Mars ascent vehicle[J]. Aerospace, 2024, 11(6): 424.

[65] 贺云，张飞龙，杨明毅，等. 卫星天线展开臂的随动吊挂重力补偿系统设计[J]. 机器人, 2018, 40(3): 377-384.
HE Y, ZHANG F L, YANG M Y, et al. Design of tracking suspension gravity compensation system for satellite antenna deployable manipulator[J]. Robot, 2018, 40(3): 377-384.

[66] 陈君. 低重力环境异形颗粒模拟月壤宏细观力学特性及其机理[D]. 徐州：中国矿业大学, 2024.
CHEN J. Macro-mesoscopic Mechanical Properties and Mechanisms of Irregular Lunar Regolith Simulant Particles under Low Gravity Environment[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.

[67] LEE H R, PARK H J, KIM D S. Bearing capacity of shallow footings in simulated lunar environments using centrifuge tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(7): 04018042.

[68] MO P Q. Discussion of "bearing capacity of shallow footings in simulated lunar environments using centrifuge tests" by Hey-Rim LEE, Heon-Joon PARK, and Dong-Soo KIM[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(7): 07019010.

[69] 吴鹏，陈健，黄珏皓. 基于可解释机器学习方法的月壤力学参数预测[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2026, 54(2): 24-34.
WU P, CHEN J, HUANG J H. Prediction of lunar soil strength parameters based on interpretable machine learning method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2026, 54(2): 24-34.

[70] JAYATHILAKE B A C S, ILANKOON I M S K, DUSHYANTHA M N P. Assessment of significant geotechnical parameters for lunar regolith excavations[J]. Acta Astronautica, 2022, 196: 107-122.

[71] GO G H, LEE J, CHUNG T, et al. Controlling soil disturbance of a lunar regolith simulant bed during depressurization in a vacuum chamber[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 1878.

[72] GUO Y M, ZHANG G Z, LIU S Y. Temperature effects on the in-situ mechanical response of clayey soils around an energy pile evaluated by CPTU[J]. Engineering Geology, 2020, 276: 105712.

[73] ZHAO X L, LIU Z X, LI Y, et al. Numerical study of cone penetration tests in lunar regolith for strength index[J]. Applied Sciences, 2024, 14(22): 10645.

[74] KOESTER M, KELLING T, TEISER J, et al. Gas flow within Martian soil: Experiments on granular Knudsen compressors[J]. Astrophysics and Space Science, 2017, 362(9): 171.

[75] DE BEULE C, WURM G, KELLING T, et al. The Martian soil as a planetary gas pump[J]. Nature Physics, 2014, 10(1): 17-20.

[76] BILA T, KOLLMER J, TEISER J, et al. Thermal creep on Mars: Visualizing a soil layer under tension[J]. The Planetary Science Journal, 2023, 4(1): 16.

[77] KÜPPER M, WURM G. Thermal creep-assisted dust lifting on Mars: Wind tunnel experiments for the entrainment threshold velocity: Thermal creep-assisted dust lifting[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2015, 120(7): 1346-1356.

[78] 姜生元，刘君巍，李雄耀，等. 月壤水冰组构特征模拟及其力学特性研究展望与构想[J]. 机械工程学报，2024，60(22)：351-363.
JIANG S Y，LIU J W，LI X Y，et al. Prospects and ideas on the simulation of the fabric feature of lunar icy regolith and the test of its mechanical properties[J]. Journal of Mechanical Engineering，2024，60(22)：351-363.

[79] 张大帅，渠裴亮，宗钟凌，等. 月球南极水冰探测方法综述[J]. 水利水电技术(中英文)，2026，57(1)：13-32.
ZHANG D S，QU P L，ZONG Z L，et al. Review of detection methods for water ice at lunar south pole[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2026，57(1)：13-32.

[80] 尹浩安，唐红，李雄耀，等. 火星水的主要赋存状态及其红外光谱特征[J]. 空间科学学报，2024，44(6)：1086-1105.
YIN H A，TANG H，LI X Y，et al. Occurrence and infrared absorption spectra of Martian water[J]. Chinese Journal of Space Science，2024，44(6)：1086-1105.

[81] YU A J，WANG H B，AN D L，et al. Evolution of Mars water-ice detection research from 1990 to 2024[J]. Remote Sensing，2025，17(6)：1023.

[82] WANG T，SUN Q，JIA H L，et al. Linking the mechanical properties of frozen sandstone to phase composition of pore water measured by LF-NMR at subzero temperatures[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2021，80(6)：4501-4513.

[83] ZHENG H，SASAKI Y，KANIE S. Image processing method for observing ice lenses produced by the frost heave process[J]. Cold Regions Science and Technology，2020，171：102977.

[84] CUI J S，CHEN B X，LIU S B，et al. Thermal simulations of drilling of cryogenic lunar soils containing water ice[J]. Aerospace，2023，10(6)：510.

[85] 李云丽，吴文平，吴昊天，等. 模拟月壤的力学性能与本构模型研究进展[J]. 中国粉体技术，2025，31(4)：75-92.
LI Y L，WU W P，WU H T，et al. Research progress on mechanical properties and constitutive models of lunar soil simulants[J]. China Powder Science and Technology，2025，31(4)：75-92.

[86] 刘汉生，王江，赵健楠，等. 典型模拟火星土壤研究进展[J]. 载人航天，2020，26(3)：389-402.
LIU H S，WANG J，ZHAO J N，et al. Research progress of typical Martian soil simulants[J]. Manned Spaceflight，2020，26(3)：389-402.

[87] TAYLOR L A，PIETERS C M，BRITT D. Evaluations of lunar regolith simulants[J]. Planetary and Space Science，2016，126：1-7.

[88] ZHANG T，CHAO C Y，YAO Z X，et al. The technology of lunar regolith environment construction on Earth[J]. Acta Astronautica，2021，178：216-232.

[89] 史语桐，赵健楠，张明杰，等. 火星地质环境演变与生命宜居性探索[J]. 深空探测学报(中英文)，2025，12(1)：86-96.
SHI Y T，ZHAO J N，ZHANG M J，et al. Evolution of the Martian geological environment and exploration of habitability of Mars[J]. Journal of Deep Space Exploration，2025，12(1)：86-96.

[90] DEMIDOV N E，BAZILEVSKII A T，KUZ'MIN R O. Martian soils：Varieties，structure，composition，physical properties，drillability，and risks for landers[J]. Solar System Research，2015，49(4)：209-225.

[91] BARZEGAR Y，GHANBARI A. FDM-DEM coupled method investigation of NASA's InSight HP^3 mole：Dynamic cone penetration challenges and enhancements on Mars[J]. Advances in Space Research，2025，76(9)：5780-5793.

[92] 陈朕，李秀娟，张锐，等. 火星表面地形环境特征及火壤力学特征研究[J]. 中国空间科学技术(中英文)，2025，45(3)：19-28.
CHEN Z，LI X J，ZHANG R，et al. Review of surface environmental characteristics and terrain mechanics of Mars[J]. Chinese Space Science and Technology，2025，45(3)：19-28.

[93] WANG Y H，WANG J P，ZHANG G Q，et al. Advances in drill-based sampling technology for extraterrestrial bodies[J]. Space Science Reviews，2024，220(6)：66.

[94] ZHANG X，ZHANG G Q，XIE H P，et al. A review of sampling exploration and devices for extraterrestrial celestial bodies[J]. Space Science Reviews，2022，218(8)：59.

[95] LI X，DIAS-DA-COSTA D，SI G Y，et al. Radiation efficiency and acoustic efficiency in rock cracking：A new understanding from low and high frequency waveforms[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2025，191：106129.

[96] TORRESE P，UNNITHAN V，ROSSI A P. Planetary analogue study using microseismic analysis for near-surface lava tube detection and exploration[J]. Icarus，2022，377：114912.

[97] LOGNONNÉ P，BANERDT W B，PIKE W T，et al. Constraints on the shallow elastic and anelastic structure of Mars from InSight seismic data[J]. Nature Geoscience，2020，13(3)：213-220.

[98] NUNN C，GARCIA R F，NAKAMURA Y，et al. Lunar seismology：A data and instrumentation review[J]. Space Science Reviews，2020，216(5)：89.

[99] LOGNONNÉ P，BANERDT W B，CLINTON J，et al. Mars seismology[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences，2023，51：643-670.

[100] MAO W W，PAN L，YANG Y，et al. Particle breakage and acoustic emission characteristics of granular soils under large shear deformation[J]. Acta Geotechnica，2025，20(8)：3773-3793.

[101] TANG Z C，LIU J J，WANG X，et al. Physical and mechanical characteristics of lunar soil at the Chang'e-4 landing site[J]. Geophysical Research Letters，2020，47(22)：e2020GL089499.

[102] QIAN Y Q，XIAO L，YIN S，et al. The regolith properties of the Chang'e-5 landing region and the ground drilling experiments using lunar regolith simulants[J]. Icarus，2020，337：113508.

[103] QIAN Y Q，XIAO L，WANG Q，et al. China's Chang'e-5 landing

site：Geology，stratigraphy，and provenance of materials[J]. Earth and Planetary Science Letters，2021，561：116855.

[104] SPOHN T，HUDSON T L，MARTEAU E，et al. The InSight HP^3 Penetrator（Mole）on Mars：Soil properties derived from the penetration attempts and related activities[J]. Space Science Reviews，2022，218(8)：72.

[105] DING L，ZHOU R，YU T，et al. Surface characteristics of the Zhurong Mars rover traverse at Utopia Planitia[J]. Nature Geoscience，2022，15(3)：171-176.

[106] SMITH-MOORE A，KAUFMANN E，JIA Q，et al. Exploring planetary regolith：Deriving geotechnically meaningful properties from penetrometry[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society，2025，541(1)：251-265.

[107] XIE H P，WU Q，LIU Y F，et al. Direct measurement and theoretical prediction model of interparticle adhesion force between irregular planetary regolith particles[J]. International Journal of Mining Science and Technology，2023，33(11)：1425-1436.

[108] ZUO W，LI C L，ZHANG Z B，et al. China's lunar and planetary data system：Preserve and present reliable Chang'e Project and Tianwen-1 scientific data sets[J]. Space Science Reviews，2021，217(8)：88.

[109] JIA L C，LIU X F，XU W M，et al. Initial drift correction and spectral calibration of MarSCoDe laser-induced breakdown spectroscopy on the Zhurong rover[J]. Remote Sensing，2022，14(23)：5964.

[110] 刘国锋，李琦，冯坤，等. 小样本下岩体参数不确定性表征与围岩卸荷稳定性概率评价方法[J/OL]. 地球科学，2026. https：//link.cnki.net/urlid/42.1874.p.20260129.1427.008.
LIU G F，LI Q，FENG K，et al. Characterization of uncertainty in rock mass parameters under small samples and probabilistic evaluation method for unloading stability[J/OL]. Earth Science，2026. https：//link.cnki.net/urlid/42.1874.p.20260129.1427.008.

[111] 黄天朗，宫凤强，伍婷玉. 小样本岩土参数概率分布的正交多项式推断方法[J]. 工程力学，2017，34(8)：85-95.
HUANG T L，GONG F Q，WU T Y. Orthogonal polynomial inference method of the probability distribution function for small samples of geotechnical parameters[J]. Engineering Mechanics，2017，34(8)：85-95.

[112] AMORIM G，THAS O，VERMEULEN K，et al. Small sample inference for probabilistic index models[J]. Computational Statistics & Data Analysis，2018，121：137-148.

[113] 赵腾远，陈久明，黎伟，等. 基于物理阈值约束与多任务贝叶斯压缩感知的钻孔缺失数据估计[J]. 岩石力学与工程学报，2025，44(12)：3276-3286.
ZHAO T Y，CHEN J M，LI W，et al. Estimation of missing borehole data from physically-bounded multi-task Bayesian compressive sensing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2025，44(12)：3276-3286.

[114] MCNEISH D. On using Bayesian methods to address small sample problems[J]. Structural Equation Modeling：A Multidisciplinary Journal，2016，23(5)：750-773.

（责任编辑　王海锋）