



矿物学报
Acta Mineralogica Sinica
ISSN 1000-4734, CN 52-1045/P

《矿物学报》网络首发论文

题目：火星凹锥地貌研究进展及对天问三号任务的启示
作者：王乐，黄俊，肖龙
收稿日期：2025-07-28
网络首发日期：2025-10-13
引用格式：王乐，黄俊，肖龙. 火星凹锥地貌研究进展及对天问三号任务的启示[J/OL]. 矿物学报. <https://link.cnki.net/urlid/52.1045.P.20251011.1711.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.3724/j.1000-4734.2025.45.104

CSTR: 32252.14.j.1000-4734.2025.45.104

火星凹锥地貌研究进展及对天问三号任务的启示

王乐, 黄俊*, 肖龙

(中国地质大学(武汉)地球科学学院 地质过程与成矿预测全国重点实验室 行星地质与深空探测湖北省重点实验室, 湖北 武汉, 430074)

摘要: 凹锥地貌是火星表面分布广泛的百米尺度锥状地貌, 在可能有古海洋沉积物覆盖的乌托邦、克律塞和阿茜达利亚等北部平原区域分布较为集中。基于地貌学的类比研究, 火星凹锥地貌可能有多种成因, 包括无根锥、火山渣锥、火山碎屑排气锥、冰核丘和泥火山。其中, 位于潜在古海洋沉积物之上的凹锥地貌, 被认为与地球上泥火山具有相似的形貌特征, 由埋藏于地下深处的低密度含水沉积物在上覆地层压力、构造挤压等作用下喷出地表后堆积而成。本文综述了火星凹锥地貌在形貌特征、成因机制、物质组成和源区深度方面的研究进展, 阐述了其与地球相似地貌的类比研究现状, 并结合我国“天问三号”火星采样返回任务的科学目标, 探讨了凹锥地貌区域作为采样目标的科学价值。

关键词: 凹锥地貌; 成因; 天问三号; 火星

中图分类号: P691 **文献标志码:** A

第一作者: 王乐, 男, 1996年生, 博士生, 主要从事行星地貌学、行星地质与比较行星学相关研究。E-mail: lewang@cug.edu.cn。

Research progresses on the topography of martian pitted cones and their implications for the Tianwen-3 mission

WANG Le, HUANG Jun*, XIAO Long

(State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences, Hubei Key Laboratory of Planetary Geology and Deep-Space Exploration, China University of Geosciences, Wuhan Hubei, 430074, China)

Abstract: Pitted cones are hundred-meter scale conical landforms widely distributed on the Martian surface. They are relatively concentrated in the northern lowlands such as the Utopia Planitia, Chryse Planitia, and Acidalia Planitia, where may be covered by residual ancient marine sediments. Based on the analogical studies of topographies of various pitted cones, there are various originated pitted cones including the rootless cone, cinder/scoria cone, pyroclastic cone, pingo, and mud volcano. Especially, the pitted cones on the potential ancient marine sediments were believed to have similar topographical characteristics with mud volcanoes on the Earth. They are believed to have been formed by the accumulation of subsurface low-density, water-bearing sediments extruded to the Martian surface under the pressure of overburden strata and structural compression. In this paper, we have reviewed advances of researches on the topographic characteristics, formation mechanisms, material compositions, and source depths of Martian pitted cones, have elucidated the current status of analogical studies of Martian Pitted Cones with analogous terrestrial landforms on the Earth, and have discussed the scientific value of the Martian pitted cone landform area as the sampling target combined with the scientific goals of China's Tianwen-3 Mars Sample Return Mission.

Keywords: pitted cone; genesis; Tianwen-3; Mars

收稿日期: 2025-07-28。

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 42441801)。

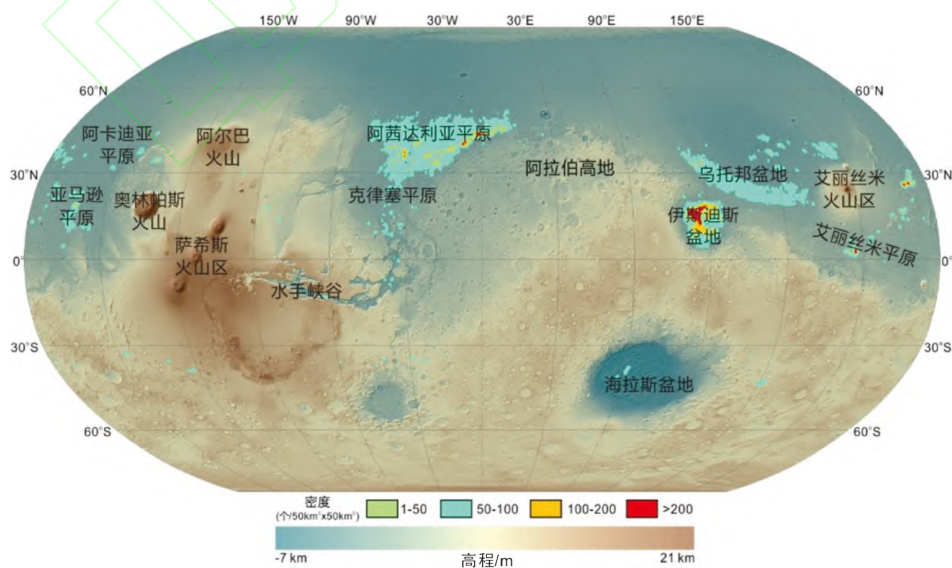
*通信作者, E-mail: junhuang@cug.edu.cn。

火星表面发育大量峡谷网络、古湖泊、外流河道、硫酸盐、黏土等与表面水活动相关的地貌和矿物^[1-7]。尽管这些流水地貌已经干涸，但指示了早期火星表面存在液态水，在一定时期内具备有利于生命生存的环境条件，因此，宜居环境和地外生命探测一直是火星探测的重点课题之一。我国“天问一号”火星探测任务的“祝融号”火星车在乌托邦盆地内成功着陆，发现了一系列支持火星北半球存在古海洋的地质证据^[8-10]。在潜在的古海洋沉积物上，分布了大量凹锥地貌，可能是埋藏于地下深部的含水沉积物喷发形成的泥火山^[11-16]。地球上的泥火山通常是大气甲烷的重要源区，与地下微生物活动紧密相关^[17,18]。因此，火星上可能为泥火山的凹锥地貌对探寻火星生命痕迹具有重要意义。

目前，深空探测已进入高速发展期，月球、小行星采样返回任务的成功实施，加深了人类对地外天体形成演化的认识。在新阶段，火星采样返回和探寻生命痕迹成为深空探测的热点。国际上，欧空局和美国宇航局已经实施了火星采样返回任务的第一阶段，“毅力号”火星车正在杰泽罗撞击坑中采集样品。我国也部署了“天问三号”火星采样返回任务，其首要科学目标是生命痕迹探寻，目前已经完成采样着陆区的初步选择，遴选出的86个潜在着陆点主要分布在乌托邦盆地和克律塞平原^[19]。“天问三号”任务计划于2028年前后实施发射，亟需对火星北部平原的地质演化历史开展深入研究，确定有利于生命痕迹形成和保存的高价值区域。本文将在总结火星凹锥地貌研究进展的基础上，探讨凹锥地貌保存生命痕迹的潜力及其对“天问三号”任务的科学价值。

1 凹锥地貌的成因和形成机制

凹锥地貌是火星表面一种底部直径 $<1\text{ km}$ ，顶部发育凹坑的锥状正地形，广泛分布在火星北半球的平原区域内^[13,20-22]（图1）。在形貌特征上，凹锥地貌与地球上多种小规模锥状地貌相似，成因多样化，包括以下主要成因：1）熔岩流-地表水/冰相互作用形成的无根锥^[23]；2）小规模岩浆喷发形成的火山渣锥^[24]；3）火山碎屑涌流沉积物的排气作用形成的火山碎屑排气锥^[25]；4）冰川冻土区域由冰川退化、冻土层冻融循环形成的核部具有残留冰的冰核丘^[26]；5）地下埋藏的低密度、富黏土矿物的细粒含水沉积物喷出地表形成的泥火山^[17,27]。位于乌托邦盆地、克律塞平原和阿茜达利



凹锥地貌矢量数据源自文献^[20]；底图是Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA^[31]) Digital Elevation Model (DEM) 覆盖在MOLA山体阴影渲染图上。

图1 火星凹锥地貌全球分布图

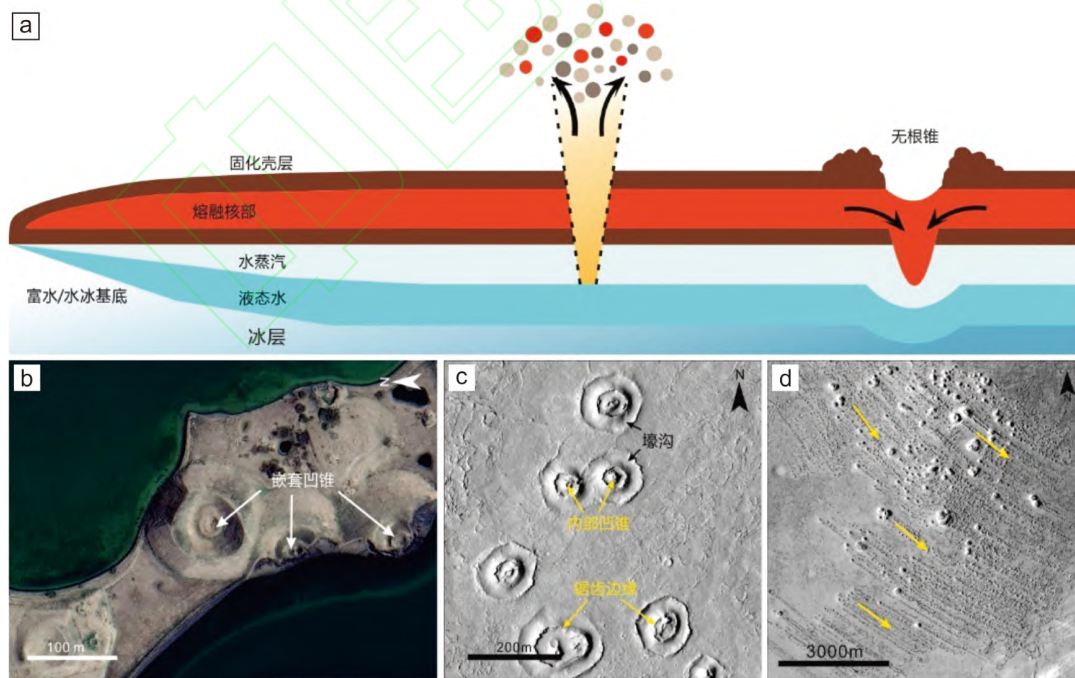
Fig. 1. Global map of pitted cones on the Mars

亚平原内的凹锥地貌, 建造于潜在的古海洋沉积物上^[12,28,29], 被认为最可能是泥火山成因^[11-16,30]。

1.1 无根锥

喷发的熔岩流流经水饱和的湿地或冻土基底时, 发生剧烈的水热相互作用, 基底孔隙内的水或水冰在熔岩流加热作用下汽化, 孔隙压力迅速增大, 超过上覆熔岩流的围限压力时会发生爆裂式喷发, 喷出的大量碎屑物质在排气口附近堆积形成无根锥^[23] (图2a)。地球上典型的无根锥位于冰岛, 主要的分布区包括: Myvatn、Landbrot、Álftaver、Raudhólar和Reykjavfk地区^[23,32]。此外, 我国东北地区黑龙江省的五大连池火山区内也发育多个与无根锥形成机制相同的锥状和碟状地貌^[33]。

Myvatn是在冰岛东北部的湖泊, 发现的无根锥大多分布在湖泊的西北缘, 与Laxárdalshraun熔岩流在2.5 ka流入湖盆后发生的水热相互作用有关^[32,34]。Myvatn地区的无根锥在规模上大小不一, 锥体的直径 (W_{co}) 范围20~200 m, 顶部凹坑 (W_{cr}) 直径范围15~200 m, W_{cr}/W_{co} 值范围0.35~0.85^[35]。在形貌特征上, Myvatn地区的无根锥发育典型的嵌套结构 (图2b), 即顶部凹坑内发育一个或多个规模更小的凹锥。Noguchi等^[36]认为无根锥嵌套结构的形成与含水基底的渗透性有关, 发育嵌套结构的无根锥仅分布在Myvatn地区, 区域内含水基底为低渗透性的湖相沉积物, 初期水饱和的基底与熔岩流接触并持续喷发形成外部锥体, 低渗透性使得后期基底中的水供给不足, 发生间歇性小规模喷发形成内部锥体。火星艾丽丝米平原的Cerberus Fossae附近和Athabasca峡谷内有显著的流水侵蚀地貌和熔岩平原特征, 目前研究认为区域内在500~10 Ma期间有多期洪水和熔岩流侵蚀沉积交替发生^[37-39], 有利于发生岩浆-水相互作用, 区域内分布的大量具有嵌套结构的凹锥地貌 (图2c) 被认为最有可能是无根锥成因^[35,40]。此外, 在位于艾丽丝米平原和阿卡迪亚平原之间的Tar-



a. 无根锥形成机制模式图 (据文献^[23]修改); b. 地球冰岛Myvatn湖内的无根锥, 中心坐标: 16°55'48"E, 65°37'12"N; c. 火星艾丽丝米平原Athabasca谷内的无根锥, 中心坐标: 156°26'40"E, 9°34'38"N, High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) ID: PSP_002226_1900; d. 火星艾丽丝米平原和阿卡迪亚平原之间的Tartarus Colles区域的无根锥链, 中心坐标: 173°31'2"E, 26°12'44"N, 黄色箭头指示熔岩流的流向, 底图是Context Camera (CTX^[42]) 全球拼接图。

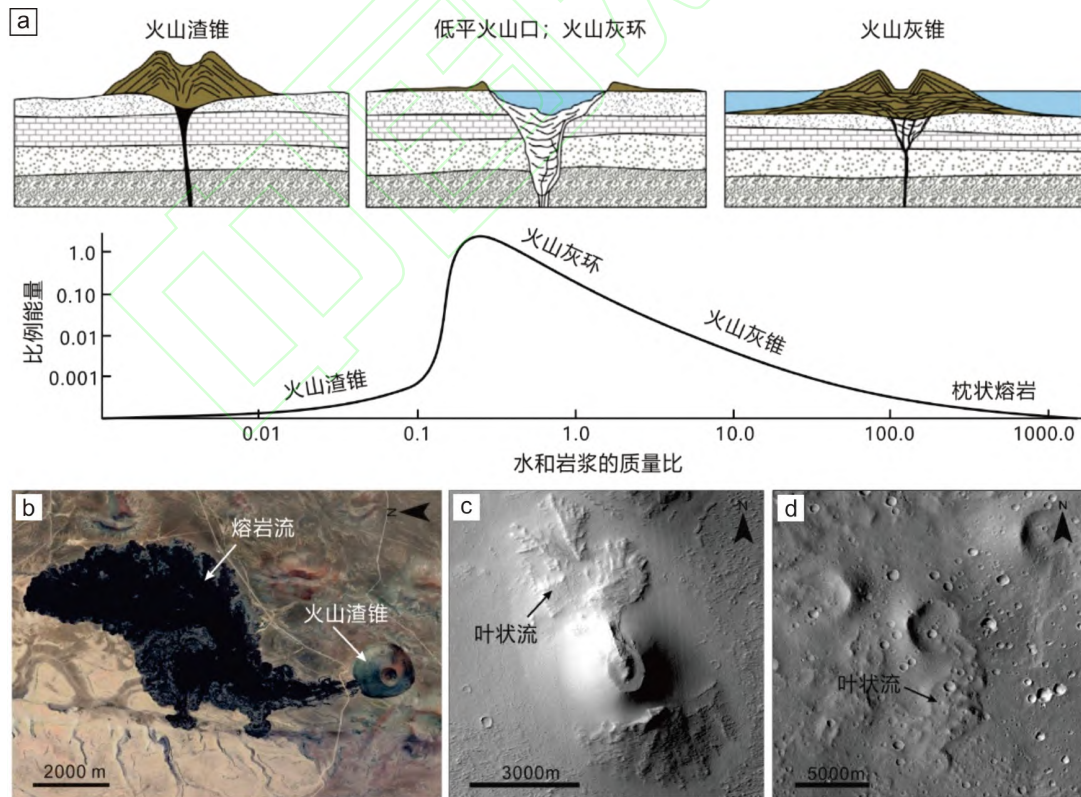
图2 无根锥的形成机制和典型形貌特征

Fig. 2. The formation mechanism and typical topographic characteristics of rootless cones

tarus Colles区域内发育大量具有“航迹”拖尾的凹锥地貌（图2d），Jaeger等^[40]和Hamilton等^[41]认为这与熔岩流的流动有关，熔岩流流经富水或水冰的基底，在形成无根锥的喷发过程中，基底的喷发口固定，随着上覆熔岩流的流动，在熔岩流表面形成一系列无根锥。

1.2 火山渣锥

岩浆沿着地下裂缝上升过程中遇到含水层，发生爆裂式喷发^[43-45]，剧烈的水热相互作用使得岩浆发生破碎形成富含挥发分的火山渣、火山灰等火山碎屑。在含水层水含量较低的情况下，地下水和岩浆的质量比较小，岩浆破碎程度低，形成粒度较大的火山渣，喷出地表后在喷发口附近堆积形成火山渣锥（图3a）。随着地下含水层水含量的增多，岩浆破碎程度升高，喷出的碎屑物质以细粒的火山灰为主，形成低平火山口或火山灰环（Maar, Tuff ring），由于喷发剧烈，火山口的底部通常低于周围地形（图3a）。当喷发口位于水下环境时，则形成火山灰锥（Tuff cone）或枕状熔岩（图3a）。火山渣锥的喷发持续时间通常 ≤ 100 yr，导致其规模较小（体积 ≤ 1 km³）^[43]。火山渣锥在地球上分布非常广泛，其中最典型的是位于美国亚利桑那州北部的SP Mountain（图3b），经常被用于和火星上的相似地貌进行类比研究。SP Mountain是玄武安山质的火山渣锥，翼部陡峭，坡度为 $27^\circ \sim 31^\circ$ ，顶部凹坑边缘相对锋锐，指示形成时代较年轻，风化侵蚀程度较低^[46]。在火山锥的东北部有一条长度约7 km的玄武安山质熔岩流（图3b），其厚度约50 m。SP Mountain的形成与圣弗朗西斯科火山原的喷发相关^[46]，其周围分布有多个早期的火山渣锥，但其他火山锥被侵蚀的程度相对较高，



a. 火山渣锥模式图，以及水和岩浆的质量比与火山喷发强度的关系图（据文献^[45]修改）；b. 亚利桑那州的SP Mountain，中心坐标：111°37'48"W，35°34'48"N；c. 萨希斯火山区内的发育基部叶状流的凹锥地貌，中心坐标：122°58'14"E，5°34'15"N，底图是CTX全球拼接图；d. 乌托邦盆地南部发育基部叶状流的凹锥地貌，中心坐标：110°3'47"E，16°17'46"N，底图是CTX全球拼接图。

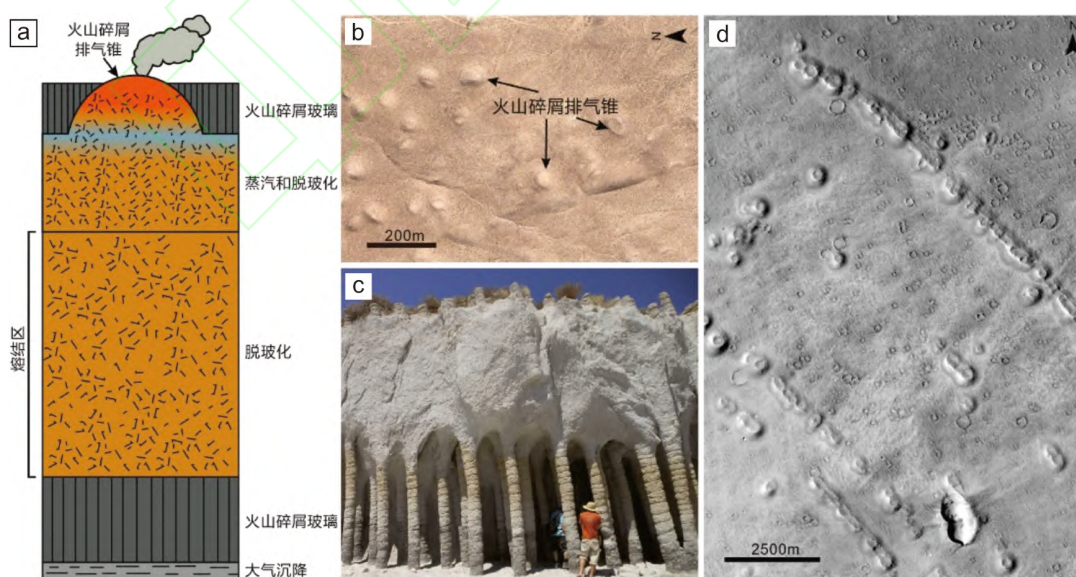
图3 火山渣锥模式图及地球和火星上典型的火山渣锥

Fig. 3. Schematic diagram of the cinder cone and typical landforms of cinder cones on the Earth and Mars

且其顶部凹坑在某一方向上存在缺口, 指示可能有岩浆从顶部凹坑流出^[46]。火星上萨希斯火山区内具有发育叶状流的凹锥地貌 (图3c), Brož和Huber^[47]认为这些凹锥地貌是局部爆裂式喷发形成的火山渣锥, 叶状流是喷发后期的熔岩流。此外, 在火星乌托邦盆地南部的Nephenthes高原附近也分布有底部发育叶状流的凹锥地貌 (图3d), 尽管Skinner和Tanaka^[27]认为这些凹锥地貌是泥火山, 但其在形貌和规模上更符合Brož 和Hauber^[48]提出的火山灰环和火山灰锥成因。

1.3 火山碎屑排气锥

大型爆裂式火山喷发会产生由大量火山渣、火山灰等组成的高温碎屑流, 在重力作用下沿着斜坡流动, 称之为火山碎屑密度流^[49]。火山碎屑密度流沉积后, 顶部和底部迅速冷却, 中部的碎屑物质冷却缓慢, 在高温作用下发生熔结, 形成相对致密的熔结凝灰岩^[50]。在碎屑物质的熔结过程中, 火山玻璃发生脱玻化成为无水矿物, 并释放出水和其他挥发分, 从而产生大量高温气体, 这些气体携带碎屑物质沿着冷却收缩形成的节理裂缝喷出地表, 形成火山碎屑排气锥^[50] (图4a)。地球上典型的火山碎屑排气锥 (图4b) 位于美国加利福尼亚州Bishop市西北部的火山高原内, 区域内被Long Valley火山口喷出的多期火山碎屑密度流覆盖^[50,51]。此外, 在沉积于Long Valley火山口南部Crowley湖岸的火山碎屑密度流中, 出露一系列与火山碎屑排气相关的十几米高、直径<1 m的沸石柱 (图4c)。Randolph-Flagg等^[52]认为这些沸石柱形成于Crowley湖水与火山碎屑密度流的相互作用, 渗入火山碎屑密度流内部的湖水在高温碎屑的加热作用下汽化, 热的蒸汽流向上运移形成多个排气通道, 排气通道间为冷的湖水渗流通道, 沸石在渗流通道中结晶析出, 形成沸石柱^[52]。Ghent等^[25]认为火星伊斯迪斯盆地内的凹锥地貌 (图4d) 是火山碎屑排气锥成因, 碎屑密度流的来源可能是盆地西南部的Syrtis Major火山。伊斯迪斯盆地内缺乏熔岩流覆盖的地质特征, 环形地堑表明盆地内的上层填充物为松散的细粒碎屑物质^[53], 可能为火山碎屑, 支持区域内凹锥地貌的火山碎屑排气锥成因, Ghent等^[25]认为伊斯迪斯盆地内的排气锥形成过程中所需的挥发分含量<0.0017% (质量分数)。



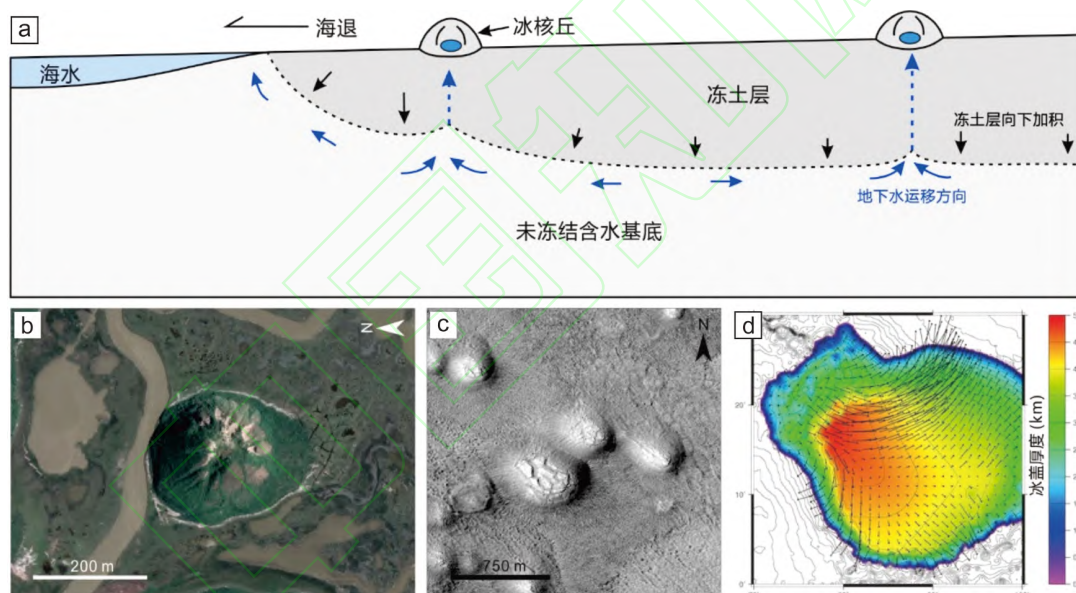
a. 火山碎屑排气锥形成机制示意图 (据文献^[49]修改); b. 加利福尼亚州Bishop市的火山碎屑排气锥, 中心坐标: 118°33'57"W, 37°27'45"N; c. 加利福尼亚州Crowley湖岸的沸石柱 (源自文献^[52])。d. 伊斯迪斯盆地内的链状凹锥地貌, 中心坐标为: 84°9'34"E, 16°8'53"N。

图4 火山碎屑排气锥的模式图和典型地貌图

Fig. 4. Schematic diagram of the fumarolic cone and typical landforms of fumarolic cones

1.4 冰核丘

在地表温度比较寒冷的环境中，冻土层的增厚或高处冰川融化导致地下含水层中的水压增大，当压力超过一定阈值时，地下水沿着裂缝通道向地表运移，并在近地表被冻结形成冰核，随着地下水不断上涌，冰核逐渐膨胀使得地表隆起形成冰核丘^[26]（图5a）。冰核丘表面通常具有裂缝（图5b, c），使得内部的冰发生融化或升华，导致顶部坍塌而形成凹锥地貌^[26]。地球上典型的冰核丘（图5b）位于加拿大东北部的图克托亚图克半岛（Tuktoyaktuk Peninsula），区域内曾经存在较大湖泊，湖泊底部是饱和的未冻结砂，周围的冻土层在湖水快速消退后向湖底扩张，使得砂层内的孔隙水排出，并在近地表冻结而形成逐渐膨胀的冰透镜体，导致地表隆起形成冰核丘^[26,54]。火星上的冰核丘主要位于南北半球中高纬度区域^[26]，此外，Guidat等^[55]认为伊斯迪斯盆地内的凹锥地貌是具有核部冰的冰碛地貌，盆地内凹锥地貌排列成等间隔的平行弧状脊，指示湿基冰川的运动方向。Souček等^[56]模拟了伊斯迪斯盆地内的冰盖在过去5 Ga时间内的演化过程，结果显示在3 Ga时冰盖覆盖整个盆地，且冰流方向与凹锥地貌排列方式指示的冰川运动方向一致（图5d），支持盆地内凹锥地貌为冰碛地貌的解释。



a. 冰核丘形成机制示意图（据文献^[57]修改）；b. 加拿大的冰核丘，中心坐标：133°4'48"W，69°28'12"N；c. 火星上的冰核丘，中心坐标：4°6'38"W，40°44'50"N，HiRISE ID: ESP_079282_2210；d. 伊斯迪斯盆地冰盖在3 Ga时的厚度和覆盖范围模拟结果（源自文献^[56]）。

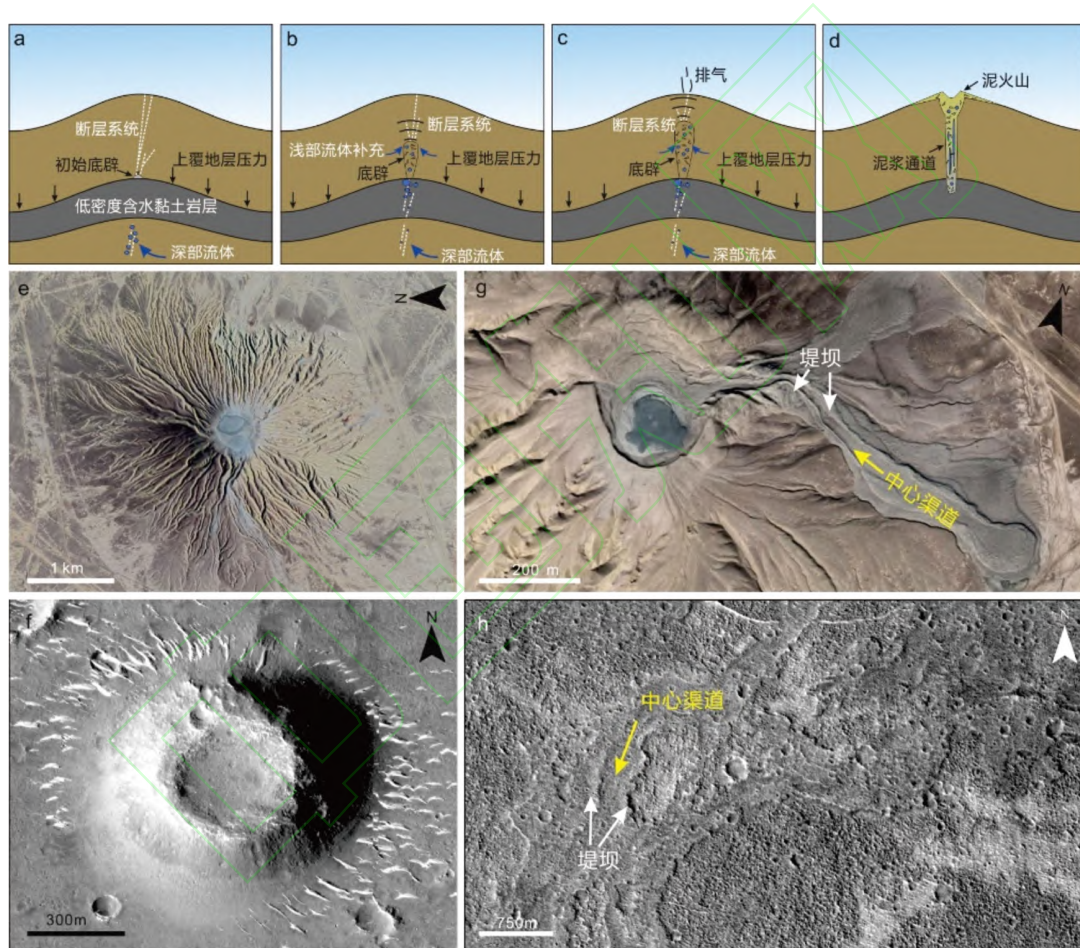
图5 冰核丘模式图和典型冰核丘地貌

Fig. 5. Schematic diagram of the pingo and typical landforms of pingos on the Earth and Mars

1.5 泥火山

在快速沉积条件下，沉积盆地内大量欠压实的含水细粒沉积物被埋藏到地下深处，形成低密度层，在上覆地层压力作用下，没有及时排出的孔隙水使得低密度层的孔隙压力超过静水压力，超压状态的含水沉积物沿着裂缝通道喷出地表，形成泥火山^[17,58]（图6a~d）。在地球上，根据泥火山的喷发强度分为三种类型：1）爆裂喷发型（Lokbatan type），喷发活动强烈，持续时间较短；2）平稳持续型（Chikishlyar type），宁静式喷发，喷发活动较弱且持续时间长；3）过渡型（Schugin type），过渡类型的泥火山，在持续的宁静式喷发过程中穿插爆裂式喷发^[18]。阿塞拜疆地处黑海和里海之间，构造上位于阿拉伯板块和欧亚板块碰撞形成的大高加索山脉东部末端，其东南沿海的巴

库区域发育大量泥火山^[17,59,60]。Toragay (图6e) 是阿塞拜疆区域最大的泥火山之一, 整体呈相对规则的锥形, 顶部具有泥浆喷口, 常作为典型的泥火山地貌与火星上的凹锥地貌进行类比研究。火星上的凹锥地貌 (图6f) 呈近圆形锥体, 顶部凹坑直径与锥体底部直径的比值相对地球上的泥火山更大。阿塞拜疆的泥火山的翼部有明显的泥流特征 (图6g), 泥流的中心为泥浆流动的渠道, 渠道两侧是泥浆脱水固结形成的堤坝。Komatsu等^[11]在克律塞平原内发现了可能的泥流地貌 (图6h), 认为区域内的凹锥地貌是泥火山成因。但是乌托邦盆地内的凹锥地貌的翼部和周围均没有类似的泥流特征 (图6f), Wang等^[13]认为乌托邦盆地内的凹锥可能是爆裂式喷发型泥火山, 锥体由喷出的泥质碎屑组成, 所以缺乏泥浆流动特征。



a~d. 泥火山形成过程模式图 (据文献[58]修改); e. 阿塞拜疆泥火山 (Toragay), 中心坐标: $40^{\circ}9'36''E$, $49^{\circ}19'12''N$; f. 乌托邦盆地“祝融号”火星车着陆区内的典型凹锥地貌, 中心坐标分别为: $109^{\circ}51'28''E$, $25^{\circ}9'35''N$, 底图是天问一号高分辨率相机(HiRIC)数据; g. 阿塞拜疆泥火山 (Bozdag-Guzdek) 翼部的泥流, 中心坐标: $40^{\circ}22'52''E$, $49^{\circ}36'37''N$; h. 阿茜达利亚平原内的泥流, 中心坐标: $37^{\circ}7'6''W$, $19^{\circ}23'38''N$, HiRISE ID: ESP_020469_1995。

图6 泥火山模式图和典型地貌图

Fig. 6. Schematic diagram of the mud volcano and typical landforms of mud volcanos

目前, 艾丽丝米平原的Athabasca峡谷内和Tartarus Colles区域内的凹锥地貌基本确定为无根锥成因^[35,40,41]。尽管诸多研究认为乌托邦盆地内的凹锥地貌是泥火山, 但缺乏泥流特征, 其在形貌上与地球上溢流式喷发形成的泥火山也存在较大差异。此外, 对乌托邦盆地内的凹锥地貌的喷发机制研究不足, Wang等^[13]认为的爆裂式喷发泥火山成因缺乏充分的地质证据。虽然Komatsu等^[11]在克律塞平原发现了与地球上泥火山翼部泥流相似的地貌特征, 但低黏度熔岩流也可以形成相似的地

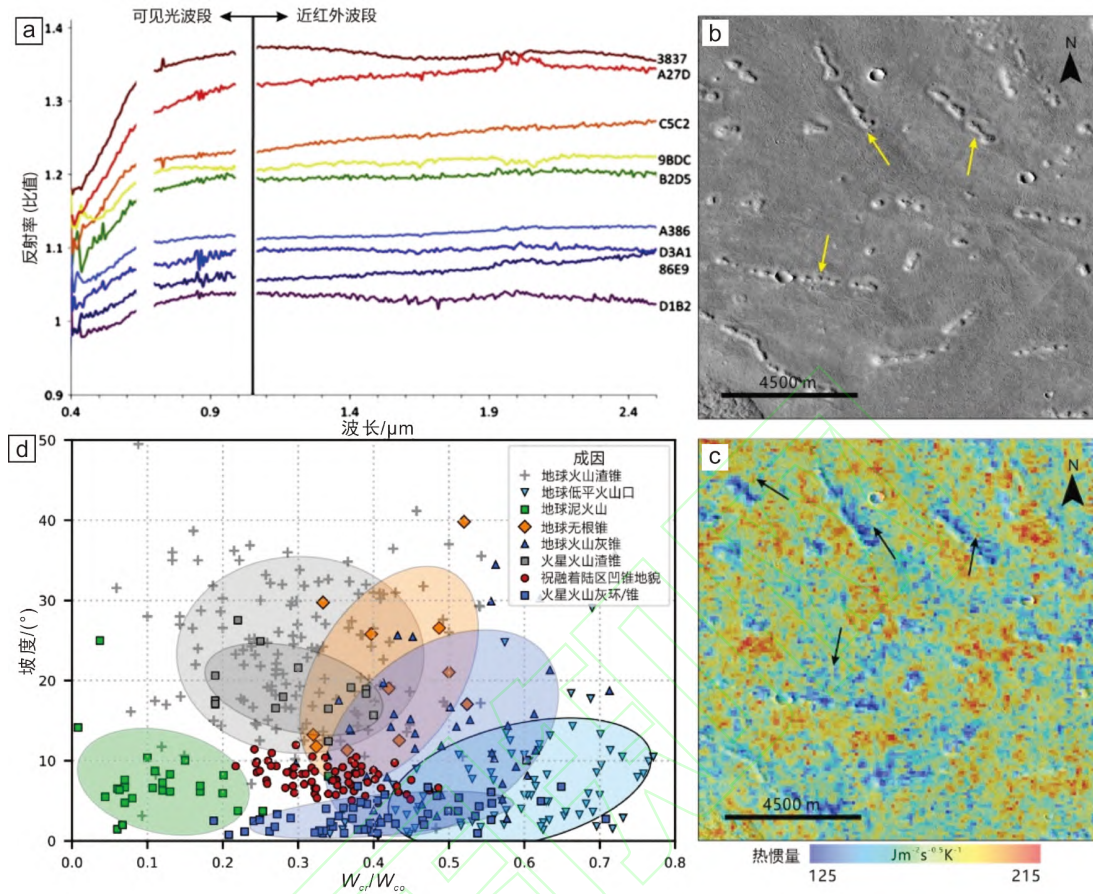
貌, 缺乏成分的约束仍然无法确定区域内凹锥地貌的成因。Brož和Huber^[47]已经对南部高原萨希斯火山区的凹锥地貌做了详细的工作, 确定其成因为火山渣锥。争议最大的是位于伊斯迪斯盆地内的凹锥地貌, 无根锥、火山碎屑排气锥、冰碛物^[23,25,55]多种成因假设缺乏可以直接排除的证据。尽管火星上的凹锥地貌具有多种潜在的成因, 但这些成因大多都和地下水或水冰具有直接联系, 表明凹锥地貌分布区内曾经存在地表或地下水/水冰。

2 凹锥地貌的物质组成和源区深度

在凹锥地貌的多种成因中, 与岩浆活动相关的无根锥、火山渣锥、火山碎屑排气锥等的物质组成主要是橄榄石、辉石等与岩浆活动相关的矿物, 而与流水沉积作用相关的泥火山的物质组成则主要是蒸发盐、蒙脱石、石膏、高岭石等与沉积活动相关的矿物, 确定凹锥地貌的物质组成将是判断其成因的有力依据。但是凹锥地貌分布密集的北部平原内灰尘覆盖严重^[61], 极大地限制了利用光谱手段分析凹锥地貌物质组成。此外, 凹锥地貌的多种成因都与地下水或水冰紧密相关, 分析凹锥地貌的源区深度, 有助于约束火星早期地下含水宜居环境的范围。

2.1 凹锥地貌的物质组成

由于凹锥地貌的规模较小, 可用于成分分析的光谱数据主要包括: Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) 高光谱数据和Thermal Infrared Imaging System (THEMIS) 热红外光谱数据。已有研究利用CRISM数据分析凹锥地貌的物质组成, 没有发现指示沉积活动的层状硅酸盐等水蚀变矿物^[11,62]。Oehler等^[62]发现在克律塞平原内, 凹锥地貌与周围地形在近红外波段都显示镁铁质矿物信号, 将二者的光谱做比值后分析二者之间的差异, 获得的比值光谱显示在 $0.4\sim 0.65\ \mu\text{m}$ 的可见光波段具有正斜率(图7a), 表明凹锥地貌的组成物质中有更多的 Fe^{3+} , 即凹锥地貌相比周围地形的氧化程度更高, 可能经历了更强的蚀变作用。Komatsu等^[11]利用CRISM数据发现凹锥地貌顶部的凹坑边缘在 $0.53\ \mu\text{m}$ 存在较强吸收特征, 指示富含纳米相氧化铁, 也表明凹锥相比于周围地形的氧化作用较强。THEMIS热红外数据可用于计算火星表面物质的热惯量, 热惯量较低的物质对应结构比较松散的碎屑颗粒。乌托邦盆地内的凹锥地貌与周围地形都具有较低的热惯量($125\sim 215\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}\cdot\text{K}^{-1}$, 图7b,c), 对应细粒到粗粒的砂($155\sim 374\ \text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}\cdot\text{K}^{-1}$)^[63]。凹锥地貌相对周围地形的热惯量更低(图7b,c), 指示其组成物质可能为细粒的黏土沉积物或火山灰。除了光谱数据, 凹锥地貌的几何特征在一定程度上也可以间接反映其喷发机制和物质组成。凹锥地貌的顶部凹坑直径与锥体底部直径的比值(W_{cr}/W_{co})能够指示喷发强度, 比值越大则喷发的越剧烈^[23,32,44], 对于岩浆成因的凹锥地貌, 喷发强度主要受外源水和岩浆的质量比的控制, 水和岩浆的质量比为1:1时喷发最剧烈, 形成低平火山口和火山灰锥, 外源水较少时则形成火山渣锥, 较多时则形成火山灰锥(图3a)。凹锥地貌的坡度也可以反映物质组成: 1) 爆裂式喷发形成的火山渣锥、无根锥, 喷出的碎屑物质发生高温熔结, 可形成更大的坡度; 2) 同样为爆裂式喷发形成的低平火山口、火山灰环、火山灰锥, 由于喷出的碎屑粒度更细, 或在地表水降温冷却作用下不发生熔结, 其坡度相比火山渣锥更小; 3) 溢流式喷发形成的泥火山, 喷出的泥流可流动较远距离, 坡度通常低于 10° (图7d)。根据 W_{cr}/W_{co} 值, 乌托邦盆地“祝融号”火星车着陆区内的凹锥地貌呈现爆裂式喷发的特征(图7d), 其在坡度上与低平火山口相近, 但低平火山口的顶部凹坑的坑底通常低于周围地形^[45,48]。因此, Wang等^[13]认为“祝融号”火星车着陆区内的凹锥地貌为爆裂式泥火山成因。



a. 阿茜达利亚平原内的凹锥地貌与周围地形的比值光谱, 右端的数字为CRISM数据ID的后四位; b. 乌托邦盆地内的凹锥地貌, 中心坐标: $86^\circ 34' 45'' \text{E}$, $33^\circ 22' 4'' \text{N}$, 底图为CTX全球拼接图, 黄色箭头指示凹锥地貌; c. 凹锥地貌的THEMIS热惯量, 黑色箭头指示凹锥地貌, 其热惯量相对周围地形较低; d. 火星和地球上凹锥地貌的底径直径比值与坡度的关系图^[13]。

图7 火星凹锥地貌光谱特征和几何参数对比图

Fig. 7. Spectral characteristics of pitted cones on the Mars and geometric parameter comparison for different types of pitted cones

2.2 凹锥地貌的源区深度

凹锥地貌是地下物质喷出地表后的表面建造, 与地下水/水冰相关的凹锥地貌的源区深度可以约束火星早期地下水/水冰的埋藏范围。在凹锥地貌的成因中, 无根锥、火山灰锥/环、泥火山与相对富集的地下水/水冰相关。其中, 无根锥的源区是熔岩流与水饱和基底的接触边界, 在熔岩流就位前区域内已存在浅层地下水/水冰, 埋藏深度 $<10\sim 20\text{ m}$ ^[32]。火山灰锥和火山灰环属于蒸汽岩浆喷发 (phreatomagmatic eruption), 指示在地表或浅次表层 ($<10\text{ m}$) 存在大量水/水冰^[43,45]。泥火山的源区埋藏相对较深, 其源区通常由深部泥浆储层和多个浅部储层组成, 地球上陆地泥火山源区的深度范围从几千米到十几千米^[60,64]。De Toffoli等^[65-67]和Zhang等^[15]利用分形几何理论和聚类分析方法, 估算了阿茜达利亚平原和乌托邦盆地内可能为泥火山成因的凹锥地貌的源区深度, 结果显示深度范围是 $0.6\sim 12\text{ km}$ 。Hemmi和Miyamoto^[68]基于地球上泥火山的简单浮力模型^[69], 计算了克律塞平原和阿茜达利亚平原内凹锥地貌的源区深度, 在泥浆密度为 $1400\sim 2100\text{ kg/m}^3$ 的条件下, 得到的源区深度为 $110\sim 860\text{ m}$, 但是没有模拟泥浆的喷发过程, 以及火星低温环境对源区深度的影响。Wang等^[70]在简单浮力模型的基础上, 利用管道流模型^[71]和重力流的轴对称扩散模型^[72]模拟泥浆的纵向运移和横向扩散过程, 计算了乌托邦盆地内的凹锥地貌在泥火山成因的假设下的源区深度。利用简单浮力模型, 可通过泥火山的高度 (H_{co}) 计算源区深度 (h_s):

$$h_s = \frac{(h_s + H_{co})\rho_m g}{\rho_s g} \quad (1)$$

其中, h_s 是上覆地层厚度, 即泥火山源区深度, ρ_s 是上覆地层密度, H_{co} 是泥火山高度, ρ_m 是泥浆密度。将计算的上覆地层厚度输入管道流模型获得泥浆喷发的流量 Q :

$$Q = \frac{\Delta P \pi R_c^4}{8l\mu} \quad (2)$$

其中, ΔP 是上覆地层与泥浆通道底部的压力差, R_c 是泥浆通道的半径, l 是泥浆通道的长度, μ 是泥浆的动力黏度。将得到的流量输入轴对称扩散模型, 即可获得泥流的扩散半径(R)和厚度(h):

$$R \approx \left(\frac{gQ^3}{v} \right)^{1/8} t^{1/2} \quad (3)$$

$$h \approx \left(\frac{vQ}{g} \right)^{1/4} \quad (4)$$

其中 v 是泥浆的运动黏度($v=\mu/\rho$), t 是时间, 通过多次迭代计算, 可以得到模拟的泥火山地形剖面, 与真实地形剖面对比分析, 约束潜在泥浆房的深度。由于火星表面环境温度较低, 浅次表层的水冰无法融化产生液态泥浆, 需要根据地热条件计算次表层温度剖面, 确定高于水冰融点对应的深度, 进一步约束潜在泥浆房的位置:

$$T = T_0 + \frac{q}{\lambda_s} h_s \quad (5)$$

其中, T_0 是表面温度, q 是地热热流, λ_s 是上覆地层的热导率。

结果显示, 乌托邦盆地内的凹锥地貌的源区深度为530~1800 m, 在这一深度范围内的温度可达20℃, 可以存在液态水, 具备支持生命生存的条件^[70]。

3 凹锥地貌对天问三号任务的启示

我国将于2028年前后实施“天问三号”火星采样返回任务的发射, 并计划于2031年将火星样品返回地球^[73]。基于科学论证和工程论证结果, “天问三号”科研团队提出任务的首要科学目标是探寻火星生命痕迹^[19]。利用遥感数据, 结合对地球早期生命的研究成果, 寻找有利于生命痕迹形成和保存的着陆点, 是当前阶段的主要任务之一。在地球生命起源的研究中, 液态水和有机聚合物(如核酸、蛋白质)是生命必需的两大基础物质^[74]。由于目前在轨探测和原位探测均没有在火星表面发现可靠的生命痕迹, 表明在火星地质历史中可能没有发生生命大繁荣, 无法通过宏观标志物表征火星早期生命痕迹, 且其存在范围具有一定的局限性。火星表面广泛分布的峡谷网络^[5,75]、古湖泊^[6,76]、外流渠道^[7]和古海洋^[2,29,77]等流水侵蚀沉积形成的地貌特征, 指示早期火星表面可能存在液态水, 液态水活动相关地貌的分布区对生命痕迹探寻具有更高的科学价值。考虑在火星大气逃逸、磁场消亡后, 表面环境受到的紫外辐射、宇宙射线作用强烈, 与生命活动相关的有机质在表面环境下的保存条件较差, 而地下环境则可以为有机质的保存提供庇护。因此, 火星次表层含水宜居环境有保存早期生命痕迹的较高潜力。

覆盖火星北部平原的北方荒原组被认为是古海洋残余沉积物^[29,78], 建立于其表面的凹锥地貌更可能是古沉积物喷发形成的泥火山^[12-16], 指示了地下深处的含水宜居环境。在地球上泥火山微生物学研究中, 甲烷在深部泥浆房内的微生物代谢过程中扮演着重要角色^[58,79,80]。甲烷的生成路径包括生物成因、热成因、非生物成因^[81], 稳定碳、氢同位素, 结合Bernard参数(C_1/C_2+C_3)可用于区分甲烷的生物和非生物成因^[81-83]。地基望远镜、轨道探测器和着陆探测器都曾在火星大气中检测到甲烷气体^[84-86], 集中分布在阿拉伯高地、萨希斯和艾丽丝米火山区^[85,87,88], 可能形成于橄榄石的蛇

纹石化蚀变过程^[85,89]。尽管没有证据表明火星大气中的甲烷与北部平原潜在的泥火山地貌之间存在关联, 但不排除在泥火山喷发时期释放甲烷气体的可能性。因此, 可能为泥火山成因的凹锥地貌仍然具有较高的探测价值, 但是凹锥地貌规模较小且坡度较陡, 难以直接着陆在其表面采样。据报道, “天问三号”任务的科学载荷中有配备了机械臂的无人机, 可执行移动采样^[73], 或许可以飞行到泥火山锥附近, 采集喷出的泥角砾岩, 其中可能保存有火星早期生命痕迹。此外, 如果无人机搭载成像设备和光谱仪, 近距离采集凹锥地貌的影像和光谱数据, 也可以为揭开火星凹锥地貌成因之谜提供重要资料。

致谢: 感谢中国科学技术协会青年人才托举工程(博士生专项计划)和中国矿物岩石地球化学学会对本研究的支持。

参考文献:

- [1] 欧阳自远, 肖福根. 火星探测的主要科学问题[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(3): 205–217.
- [2] 刘洋, 刘正豪, 吴兴, 等. 火星的水环境演化[J]. 地质学报, 2021, 95(9): 2725–2741.
- [3] 赵健楠, 史语桐, 张明杰, 等. 火星水成地貌研究进展[J]. 地质学报, 2021, 95(9): 2755–2768.
- [4] 凌宗成, 鞠恩明. 火星表面硫酸盐探测与研究进展[J]. 空间科学与试验学报, 2024, 1(1): 40–53.
- [5] Hynek B M, Beach M, Hoke M R T. Updated global map of Martian valley networks and implications for climate and hydrologic processes[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2010, 115(E9): 2009JE003548.
- [6] Fassett C I, Head J W III. Valley network-fed, open-basin lakes on Mars: Distribution and implications for Noachian surface and subsurface hydrology[J]. *Icarus*, 2008, 198(1): 37–56.
- [7] Carr M H. Formation of Martian flood features by release of water from confined aquifers[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1979, 84 (B6): 2995–3007.
- [8] 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.
- [9] Xiao L, Huang J, Kusky T, et al. Evidence for marine sedimentary rocks in Utopia Planitia: Zhurong rover observations[J]. *National Science Review*, 2023, 10(9): nwad137.
- [10] Li J H, Liu H, Meng X, et al. Ancient ocean coastal deposits imaged on Mars[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2025, 122(9): e2422213122.
- [11] Komatsu G, Okubo C H, Wray J J, et al. Small edifice features in Chryse Planitia, Mars: Assessment of a mud volcano hypothesis[J]. *Icarus*, 2016, 268: 56–75.
- [12] Ivanov M A, Hiesinger H, Erkeling G, et al. Mud volcanism and morphology of impact craters in Utopia Planitia on Mars: Evidence for the ancient ocean[J]. *Icarus*, 2014, 228: 121–140.
- [13] Wang L, Zhao J N, Huang J, et al. An explosive mud volcano origin for the pitted cones in southern Utopia Planitia, Mars[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 66(9): 2045–2056.
- [14] Ye B L, Qian Y Q, Xiao L, et al. Geomorphologic exploration targets at the Zhurong landing site in the southern Utopia Planitia of Mars[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 576: 117199.
- [15] Zhang J J, Ren X, Chen Y, et al. Potential formational scenarios of the mud volcanoes in the Zhurong landing area in Utopia Planitia, observed by Tianwen-1[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2024, 647: 119024.
- [16] Huang H, Liu J J, Wang X, et al. The analysis of cones within the Tianwen-1 landing area[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(11): 2590.
- [17] Kopf A J. Significance of mud volcanism[J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40(2): 2–1–2–52.
- [18] Dimitrov L I. Mud volcanoes—the most important pathway for degassing deeply buried sediments[J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, 59(1/2/3/4): 49–76.
- [19] 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): nwa313.
- [20] Chen Z Y, Wu B, Krasilnikov S, et al. A global database of pitted cones on Mars for research on Martian volcanism[J]. *Scientific Data*, 2024, 11: 942.
- [21] Mills M M, Bickel V T, McEwen A S, et al. A global dataset of pitted cones on Mars[J]. *Icarus*, 2024, 418: 116145.
- [22] Brož P, Oehler D, Mazzini A, et al. An overview of sedimentary volcanism on Mars[J]. *Earth Surface Dynamics*, 2023, 11(4): 633–661.
- [23] Fagents S A, Lanagan P, Greeley R. Rootless cones on Mars: A consequence of lava-ground ice interaction[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2002, 202(1): 295–317.
- [24] Brož P, Čadek O, Hauber E, et al. Shape of scoria cones on Mars: Insights from numerical modeling of ballistic pathways[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 406: 14–23.
- [25] Ghent R R, Anderson S W, Pithawala T M. The formation of small cones in Isidis Planitia, Mars through mobilization of pyroclastic surge deposits[J]. *Icarus*, 2012, 217(1): 169–183.
- [26] Burr D M, Tanaka K L, Yoshikawa K. Pingos on earth and Mars[J]. *Planetary and Space Science*, 2009, 57(5/6): 541–555.

- [27] Skinner J A Jr, Tanaka K L. Evidence for and implications of sedimentary diapirism and mud volcanism in the southern Utopia highland–lowland boundary plain, Mars[J]. *Icarus*, 2007, 186(1): 41–59.
- [28] Salvatore M R, Christensen P R. On the origin of the vastitas borealis formation in chryse and acidalia planitiae, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2014, 119(12): 2437–2456.
- [29] Wang L, Huang J. Hypothesis of an ancient northern ocean on Mars and insights from the Zhurong rover[J]. *Nature Astronomy*, 2024, 8(10): 1220–1229.
- [30] Brož P, Hauber E, Conway S J, et al. New evidence for sedimentary volcanism on Chryse Planitia, Mars[J]. *Icarus*, 2022, 382: 115038.
- [31] 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.
- [32] Greeley R, Fagents S A. Icelandic pseudocraters as analogs to some volcanic cones on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E9): 20527–20546.
- [33] Xiao L, Wang C Z. Geologic features of Wudalianchi volcanic field, northeastern China: Implications for Martian volcanology[J]. *Planetary and Space Science*, 2009, 57(5/6): 685–698.
- [34] Thorarinsson S. The crater groups in Iceland[J]. *Bulletin Volcanologique*, 1953, 14(1): 3–44.
- [35] Noguchi R, Kurita K. Unique characteristics of cones in central Elysium planitia, Mars[J]. *Planetary and Space Science*, 2015, 111: 44–54.
- [36] Noguchi R, Höskuldsson Á, Kurita K. Detailed topographical, distributional, and material analyses of rootless cones in Myvatn, Iceland[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2016, 318: 89–102.
- [37] Berman D C, Hartmann W K. Recent fluvial, volcanic, and tectonic activity on the Cerberus Plains of Mars[J]. *Icarus*, 2002, 159(1): 1–17.
- [38] Burr D M, McEwen A S, Sakimoto S E H. Recent aqueous floods from the Cerberus fossae, Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(1): 13–1–13–14.
- [39] Voigt J R C, Hamilton C W. Investigating the volcanic versus aqueous origin of the surficial deposits in Eastern Elysium Planitia, Mars[J]. *Icarus*, 2018, 309: 389–410.
- [40] Jaeger W L, Keszthelyi L P, McEwen A S, et al. Athabasca valles, Mars: A lava-draped channel system[J]. *Science*, 2007, 317(5845): 1709–1711.
- [41] Hamilton C W, Fagents S A, Thordarson T. Lava–ground ice interactions in Elysium Planitia, Mars: Geomorphological and geospatial analysis of the Tartarus Colles cone groups[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(E3): E03004.
- [42] Malin M C, Bell J F III, Cantor B A, et al. Context camera investigation on board the Mars reconnaissance orbiter[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2007, 112(E5): 2006JE002808.
- [43] Németh K, Kereszturi G. Monogenetic volcanism: Personal views and discussion[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2015, 104(8): 2131–2146.
- [44] Wood C A. Morphometric evolution of cinder cones[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1980, 7(3/4): 387–413.
- [45] De Silva S, Lindsay J M. Chapter 15 - Primary Volcanic Landforms[M/OL]//SIGURDSSON H. *The Encyclopedia of Volcanoes* (Second Edition). Amsterdam: Academic Press, 2015: 273–297[2024–12–11]. DOI:10.1016/B978–0–12–385938–9.00015–8.
- [46] Schaber G G, Elachi C, Farr T G. Remote sensing data of SP Mountain and SP Lava flow in North-Central Arizona[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1980, 9(2): 149–170.
- [47] Brož P, Hauber E. A unique volcanic field in Tharsis, Mars: Pyroclastic cones as evidence for explosive eruptions[J]. *Icarus*, 2012, 218(1): 88–99.
- [48] Brož P, Hauber E. Hydrovolcanic tuff rings and cones as indicators for phreatomagmatic explosive eruptions on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, 118(8): 1656–1675.
- [49] Giordano G, Cas R, Wright J V. Subaerial pyroclastic density currents (pyroclastic flows and surges): Origins, types, and deposit characteristics[M]// *Volcanology*. Cham: Springer International Publishing, 2024: 693–889.
- [50] Sheridan M F. Fuamolic mounds and ridges of the bishop tuff, California[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1970, 81(3): 851.
- [51] Jenkins W T, Klimczak C, Trent P M, et al. Fumarolic pathways were structurally controlled by a strike-slip fault system beneath the bishop tuff, bishop, California[J]. *Minerals*, 2021, 11(11): 1167.
- [52] Randolph-Flagg N, Breen S, Hernandez A, et al. Evenly spaced columns in the Bishop Tuff (California, USA) as relicts of hydrothermal cooling[J]. *Geology*, 2017, 45(11): 1015–1018.
- [53] Buczkowski D L, Cooke M L. Formation of double-ring circular grabens due to volumetric compaction over buried impact craters: Implications for thickness and nature of cover material in Utopia Planitia, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2004, 109(E2): 2003JE002144.
- [54] MacKay J R. Pingo Growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula Area, Western Arctic Coast, Canada: A long-term field study[J]. *Géographie Physique et Quaternaire*, 2002, 52(3): 271–323.
- [55] 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.
- [56] Souček O, Bourgeois O, Pochat S, et al. A 3 Ga old polythermal ice sheet in Isidis Planitia, Mars: Dynamics and thermal regime inferred from numerical modeling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 426: 176–190.
- [57] Hornum M T, Hodson A J, Jessen S, et al. Numerical modelling of permafrost spring discharge and open-system pingo formation induced by basal permafrost aggradation[J]. *The Cryosphere*, 2020, 14(12): 4627–4651.
- [58] Mazzini A, Etiope G. Mud volcanism: An updated review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 168: 81–112.

- [59] Komatsu G, Feyzullayev A A. Geomorphology of subaerial mud volcanoes in Azerbaijan: Issues about edifice construction and degradation[J]. *Geomorphology*, 2024, 463: 109352.
- [60] Planke S, Svensen H, Hovland M, et al. Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan[J]. *Geo-Marine Letters*, 2003, 23(3): 258–268.
- [61] 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.
- [62] Oehler D Z, Allen C C. Evidence for pervasive mud volcanism in Acidalia Planitia, Mars[J]. *Icarus*, 2010, 208(2): 636–657.
- [63] Mellon M. High-resolution thermal inertia mapping from the Mars global surveyor thermal emission spectrometer[J]. *Icarus*, 2000, 148(2): 437–455.
- [64] Collignon M, Mazzini A, Schmid D W, et al. Modelling fluid flow in active clastic piercements: Challenges and approaches[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 90: 157–172.
- [65] De Toffoli B, Pozzobon R, Mazzarini F, et al. Estimate of depths of source fluids related to mound fields on Mars[J]. *Planetary and Space Science*, 2018, 164: 164–173.
- [66] De Toffoli B, Pozzobon R, Massironi M, et al. Surface expressions of subsurface sediment mobilization rooted into a gas hydrate-rich cryosphere on Mars[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 8603.
- [67] De Toffoli B, Massironi M, Mazzarini F, et al. Rheological and mechanical layering of the crust underneath thumbprint terrains in arcadia planitia, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(11): e2021JE007007.
- [68] Hemmi R, Miyamoto H. High-resolution topographic analyses of mounds in southern acidalia planitia, Mars: Implications for possible mud volcanism in submarine and subaerial environments[J]. *Geosciences*, 2018, 8(5): 152.
- [69] Murton B J, Biggs J. Numerical modelling of mud volcanoes and their flows using constraints from the Gulf of Cadiz[J]. *Marine Geology*, 2003, 195 (1/2/3/4): 223–236.
- [70] Wang L, Huang J, Xiao X, et al. Subsurface habitable environments revealed by mud volcanoes in utopia planitia on Mars and implications for China's Tianwen-3 mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2025, 130(9): e2025JE009075.
- [71] Turcotte D L, Schubert G. *Geodynamics*[M]. Third Edition. Cambridge university press, 2014. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511843877>.
- [72] Didden N, Maxworthy T. The viscous spreading of plane and axisymmetric gravity currents[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1982, 121: 27–42.
- [73] 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.
- [74] Bada J L. How life began on Earth: A status report[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 226(1/2): 1–15.
- [75] 史语桐, 杨勇, 赵健楠, 等. 火星峡谷网研究的现状、问题与展望[J]. *地球科学*, 2024, 49(1): 359–374.
- [76] 赵健楠, 肖龙. 火星古湖泊研究的现状、问题与展望[J]. *地球科学*, 2016, 41(9): 1572–1582.
- [77] Parker T J, Gorsline D S, Saunders R S, et al. Coastal geomorphology of the Martian northern Plains[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1993, 98(E6): 11061–11078.
- [78] Salvatore M R, Christensen P R. Evidence for widespread aqueous sedimentation in the northern Plains of Mars[J]. *Geology*, 2014, 42(5): 423–426.
- [79] Alain K, Holler T, Musat F, et al. Microbiological investigation of methane- and hydrocarbon-discharging mud volcanoes in the Carpathian Mountains, Romania[J]. *Environmental Microbiology*, 2006, 8(4): 574–590.
- [80] Ijiri A, Inagaki F, Kubo Y, et al. Deep-biosphere methane production stimulated by geofluids in the Nankai accretionary complex[J]. *Science Advances*, 2018, 4(6): eaao4631.
- [81] Etiopie G. Natural emissions of methane from geological seepage in Europe[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(7): 1430–1443.
- [82] Bernard B B, Brooks J M, Sackett W M. Natural gas seepage in the gulf of Mexico[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1976, 31(1): 48–54.
- [83] Schoell M. The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(5): 649–661.
- [84] Formisano V, Atreya S, Encrenaz T, et al. Detection of methane in the atmosphere of Mars[J]. *Science*, 2004, 306(5702): 1758–1761.
- [85] Mumma M J, Villanueva G L, Novak R E, et al. Strong release of methane on Mars in northern summer 2003[J]. *Science*, 2009, 323(5917): 1041–1045.
- [86] Webster C R, Mahaffy P R, Atreya S K, et al. Background levels of methane in Mars' atmosphere show strong seasonal variations[J]. *Science*, 2018, 360(6393): 1093–1096.
- [87] Fonti S, Marzo G A. Mapping the methane on Mars[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2010, 512: A51.
- [88] Oze C, Sharma M. Have olivine, will gas: Serpentinization and the abiogenic production of methane on Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(10): 2005GL022691.
- [89] Shen J X, Liu C Z, Pan Y X, et al. Follow the serpentine as a comprehensive diagnostic for extraterrestrial habitability[J]. *Nature Astronomy*, 2024, 8 (10): 1230–1236.