



我国深空探测研究深入火星和月球内部

孙伟家, 魏勇*

中国科学院地质与地球物理研究所, 地球与行星物理重点实验室, 北京 100029

* 联系人, E-mail: weiy@mail.iggcas.ac.cn

China's deep space exploration into Martian and lunar deep interior

Weijia Sun & Yong Wei*

Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

* Corresponding author, E-mail: weiy@mail.iggcas.ac.cn

doi: [10.1360/TB-2022-1000](https://doi.org/10.1360/TB-2022-1000)

地球、火星、月球等具有显著的圈层结构, 这是其形成与演化的结果; 圈层结构因而记录了它们的形成和演化中诸多地质过程和环境变迁, 如岩浆洋冷却、壳幔分异和核幔分异, 以及气候和宜居性环境演变等. 地球的圈层结构可分为外部圈层(水圈、生物圈、大气圈)和内部圈层(地壳、地幔、地核), 地球各圈层间存在大规模的物质循环和能量交换. 地壳物质可以通过俯冲过程到达地幔甚至是核幔边界, 而核幔边界的热物质则能以地幔柱形式上涌至地表. 本文着重探讨火星与月球的浅表层和深部结构探测及其未来可能的考量.

火星是国际深空探测的重要目标之一, 在类地行星中, 火星与地球环境最为相似. 基于火星三角洲沉积和峡谷系统等研究, 火星北半球曾经存在古海洋, 火星南半球存在大规模的冰川. 地球具有活跃的多板块构造运动, 几乎难寻地球早期形成过程的痕迹; 火星则是单一板块, 不具有构造板块运动, 火星早期形成和演化过程保留至今. 研究火星圈层过程不仅可以理解火星的形成与演化, 亦有助于理解地球早期过程、生命起源以及宜居性环境形成等前沿科学问题.

火星陨石样品的镨-铪(Lu-Hf)同位素研究表明火星磁场发电机运行至41亿年^[1], 这意味着火星可能在41亿年前失去了全球磁场. 大气模拟研究表明火星在38亿年以前存在温暖湿润的环境^[2], 火星在35亿年以前存在古海洋环境^[3]. “机遇号”和“好奇号”等火星车的原位观测证实火星在37亿年前存在宜居环境^[4]. 基于这一时间轴, 火星在失去全球磁场后, 火星的大气圈主体被太阳风吹向行星际空间, 现今只残留以二氧化碳为主要成分的稀薄大气; 火星液态水或与大气一样逃逸至行星际空间或通过水合过程(或水岩反应)而被保留在火星壳内部. 上述火星的大气圈和水圈等外部圈层的演化过程

均会被记录在火星的浅表层结构(subsurface)中.

探地雷达是探测浅表层结构的有力工具, 其通过主动激发电磁波, 穿透浅表层结构并被反射回地表接收, 处理反射的电磁波信号可获得浅表层结构. 迄今为止, 人类在地外天体上共开展了4次巡视器探地雷达观测, 包括月球巡视器雷达探测两次, 即我国嫦娥三号和嫦娥四号; 火星巡视器雷达探测两次, 即美国“毅力号”和我国“祝融号”.

2021年5月15日, 执行我国首次火星探测任务的“天问一号”携带的“祝融号”火星车在乌托邦平原南部预选着陆区成功着陆, “祝融号”火星车搭载了两套不同频率的探地雷达科学仪器^[5], 其频带分别为15~95 MHz(低频)和150~1200 MHz(高频), 最大探测深度达80 m. 2021年5月25日~9月6日, “祝融号”火星车共行进了1171 m, 首次获得了火星乌托邦平原浅表层结构的探测雷达科学数据, 为理解火星乌托邦平原演化、地下水/冰分布等关键科学问题奠定了研究基础.

Li等人^[6]深入分析“祝融号”火星车低频雷达数据, 获得了0~80 m的浅表高精度分层结构图像和地层物性信息. 在厚度小于10 m的火壤层之下, 识别出两套沉积地层: 第一套层序位于地下10~20 m深度, 该层中反射能量随深度逐渐增强, 但未出现清晰连续的反射界面, 表明该层含有较多石块, 石块粒径随深度增加而逐渐增大, 其形成可能是距今大约16亿年的短时洪水、长期风化或重复陨石撞击作用的结果; 第二套层序位于地下30~80 m深度, 该层中反射能量随深度增加而逐渐增强, 但反射能量较第一套层序更强, 说明该层内石块粒径更大(可达米级)且分布更为杂乱, 可能是更古老、更大规模的火表改造作用的结果. 基于撞击坑定年法, 研究推测这次改造事件与35~32亿年前乌托邦平原南部的大型洪水活动有关. 该研究表明乌托邦平原经历了多期次的火表改造

事件(图1).

“祝融号”火星车探地雷达的目标之一是探测乌托邦平原南部现今是否存在地下水/冰. 低频雷达数据分析显示^[6], 在0~80 m深度内, 雷达反射信号振幅强度无明显衰减, 且反演的介电常数(<9)低于含水物质的介电常数范围(>15), 据此推定“祝融号”火星车巡视路径下方小于80 m深度内不存在含水层或液态水, 但可能存在硫酸盐或碳酸盐盐冰. Li等人^[6]探测了现今火星乌托邦平原南部的浅表层精细结构, 获得了详细的物性信息, 为火星可能长期存在水活动提供了观测证据, 加深了对火星地质演化与环境变迁的认识.

深度解译火星的形成与演化过程及宜居环境演变需要系统探测火星内部圈层结构. 地震学研究方法可以强有力约束行星内部圈层结构. 国际“洞察号”固定式探测器于2018年11月26日着陆火星埃律西昂平原(Elysium Planitia), 在火表部署了一台火震仪并持续记录火星震信号, 其科学目标包括: (1) 通过探测火星内部圈层结构与过程以理解火星的形成与演化; (2) 查明火星现今构造活动程度和陨石撞击频次.

火星内部存在明显的圈层结构, 揭示了火星存在壳-幔-核的分异过程. 苏黎世联邦理工学院的地球学研究团队^[7-9]获得了火星壳-幔-核的分层结构. 火星壳内部存在明显的分层结构, 综合地震学和重力学研究给出全球火星壳的平均厚度为24~72 km^[7]; 火星幔内部存在低速层, 其可能是岩石圈底部边界^[8]; 火星核的半径为1830 km, 由于火星体积小, 在火星核幔边界的压力相当于地球地幔过渡带, 因此火星不存在地球下地幔的矿物成分^[9]. 尽管火星核比预期的大, 但其归一化

半径(火星核半径/火星半径)与地球基本一致.

需要注意的是, 上述研究仅分析了若干个位于火星北半球高信噪比的火震事件, 约束了火星北半球内部圈层的一阶结构, 火星内部的精细结构与状态仍有待进一步探索与发掘^[10]. 例如, 我国科学家及其国际团队利用非常规事件检测方法^[11]探测到47个火星相似地震, 运用比较行星学方法和多学科证据, 揭示了火星幔现今仍然存在对流^[12]. 由于太阳能帆板覆满沙尘导致电力供应不足, “洞察号”火震仪于2022年12月停止工作. 火星地形、地壳结构以及剩余磁场强度的南北半球二分性是火星演化过程的前沿科学问题, 揭示火星南北半球结构差异的形成过程是解译火星形成与演化的重要环节. 进一步, 持续开展基于“洞察号”科学数据的火星内部结构研究, 将为我国未来火星地球物理探测任务的工程规划提供科学依据.

我国深空探测取得了举世瞩目的成就, 自2004~2020年我国探月工程已成功实施了三期^[13], 获得了月球的浅表层结构. 目前我国探月工程四期已获得批复, 其主要目标之一是对月球南极开展科学探测, 后续将实施嫦娥六号、嫦娥七号和嫦娥八号3次任务. 特别地, 嫦娥七号将搭载一台月震仪^[14], 主要科学目标是通过系统分析月震信号, 探测月球内部结构, 理解地-月系统的形成与演化.

阿波罗计划于1969年11月~1972年4月在月球正面布置了4台月震仪, 尽管其提供了月球正面下方结构的约束, 但仍然有诸多重大科学问题亟待回答, 如月幔下部是否存在低速熔融层? 其温度和物质成分是什么? 月球是否拥有内核? 月

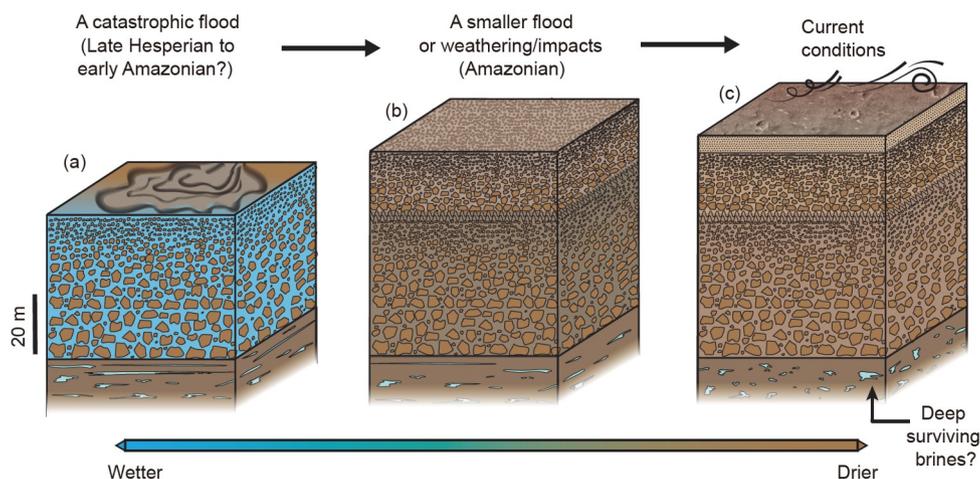


图1 火星乌托邦平原南部浅表层改造模型^[6]. (a) 晚西方纪至早亚马逊纪发生了大型洪水事件, 洪水退去后形成了石块粒径向上变细的砾岩沉积序列. (b) 亚马逊纪短时洪水、长期风化或重复撞击作用的火表改造过程, 形成了由小砾石块堆叠于老的固结沉积物之上的沉积层序. (c) 近代火星高倾角自转导致液态水转移到高纬地区, 形成现今干燥的火壤层, 火表以风成沉积和侵蚀过程为主

Figure 1 Conceptual model of the ancient resurfacing of southern Utopia Planitia of Mars^[6]. (a) During the Late Hesperian to Early Amazonian a catastrophic flood event occurred, leading to the formation of a fining-upwards sequence of conglomerate deposits as the flood discharge subsided, corresponding to the upper Vastitas Borealis Formation (VBF). (b) A resurfacing event probably associated with a transient flood, or long-term reworking by weathering or repeated impacts, occurred in the Amazonian, resulting in a fining-upwards sequence with relatively smaller boulders and cobbles atop the consolidated older sediments. (c) The subsequent loss of water to high latitudes resulting from the modern high obliquity of Mars led to the formation of the dry near-surface regolith and dominantly aeolian deposition/erosion processes at present

球发电机何时停止工作以致地球风能同时进入正面和背面月壤^[15]? 月球正面和背面地形存在显著二分性, 其内部结构与状态是否存在显著差异? 由于阿波罗计划搭载的月震仪记录的绝大多数月震位于月球正面而无法提供有力回答。我国

嫦娥七号搭载的月震仪将布设在月球背面的南极艾肯盆地内, 既可以记录发生在月球正面的月震, 也可以记录到发生在月球背面的月震, 其将强有力约束月球内部结构与演化过程, 以期深刻理解地-月系统的演化路径。

参考文献

- 1 Lapen T J, Richter M, Brandon A D, et al. A younger age for ALH84001 and its geochemical link to shergottite sources in Mars. *Science*, 2010, 328: 347–351
- 2 Ramirez R M, Kopparapu R, Zuger M E, et al. Warming early Mars with CO₂ and H₂. *Nat Geosci*, 2013, 7: 59–63
- 3 di Achille G, Hynek B M. Ancient ocean on Mars supported by global distribution of deltas and valleys. *Nat Geosci*, 2010, 3: 459–463
- 4 Grotzinger J P. Habitability, taphonomy, and the search for organic carbon on Mars. *Science*, 2014, 343: 386–387
- 5 Zhou B, Shen S, Lu W, et al. The Mars rover subsurface penetrating radar onboard China's Mars 2020 mission. *Earth Planet Phys*, 2020, 4: 345–354
- 6 Li C, Zheng Y, Wang X, et al. Layered subsurface in Utopia Basin of Mars revealed by Zhurong rover radar. *Nature*, 2022, 610: 308–312
- 7 Knapmeyer-Endrun B, Panning M P, Bissig F, et al. Thickness and structure of the Martian crust from InSight seismic data. *Science*, 2021, 373: 438–443
- 8 Khan A, Ceylan S, van Driel M, et al. Upper mantle structure of Mars from InSight seismic data. *Science*, 2021, 373: 434–438
- 9 Stähler S C, Khan A, Banerdt W B, et al. Seismic detection of the Martian core. *Science*, 2021, 373: 443–448
- 10 Sun W J, Wang Y B, Wei Y, et al. Martian seismology and review of Martian interior structure (in Chinese). *Rev Geophys Planet Phys*, 2021, 52: 437–449 [孙伟家, 王一博, 魏勇, 等. 火星地震学与内部结构研究. *地球与行星物理论评*, 2021, 52: 437–449]
- 11 Sun W, Zhao L, Wei Y, et al. Detection of seismic events on Mars: A lunar perspective. *Earth Planet Phys*, 2019, 3: 290–297
- 12 Sun W, Tkalčić H. Repetitive marsquakes in Martian upper mantle. *Nat Commun*, 2022, 13: 1695
- 13 Li C, Wang C, Wei Y, et al. China's present and future lunar exploration program. *Science*, 2019, 365: 238–239
- 14 Zhang X, Zhang J H. Research progress and prospect of moonquakes (in Chinese). *Rev Geophys Planet Phys*, 2021, 52: 391–401 [张翔, 张金海. 月震研究进展与展望. *地球与行星物理论评*, 2021, 52: 391–401]
- 15 Wei Y, Zhong J, Hui H, et al. Implantation of Earth's atmospheric ions into the nearside and farside lunar soil: Implications to geodynamo evolution. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2019GL086208