

谢楚雯, 刘志坤. 2025. 火星地震学与火星介质时变研究进展[J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 56(3): 327-337. doi: [10.19975/j.dqyxx.2024-023](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2024-023).

Xie C W, Liu Z K. 2025. Progress in Martian seismology and temporal changes of Martian subsurface structure[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 56(3): 327-337 (in Chinese). doi:[10.19975/j.dqyxx.2024-023](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2024-023).

## 火星地震学与火星介质时变研究进展

谢楚雯<sup>1,2</sup>, 刘志坤<sup>1,2\*</sup>

1 陆内火山与地震教育部重点实验室 (中国地质大学 (北京)), 北京 100083

2 中国地质大学 (北京) 地球物理与信息技术学院, 北京 100083

**摘要:** 深地、深海和深空探测是国家重大科技战略, 也是世界前沿研究领域. 火星探测是深空探测的重要组成部分, 而对行星内部结构的探测又类似于地球上的深部探测, 因此, 火星内部探测可认为是深空与深地探测的结合, 总结和梳理目前火星深部研究进展, 发现新的研究增长点有着重要的意义. 本文综述了主要基于“洞察”号观测数据的火星地震学研究进展, 包括火星震特性和火星内部结构探测的新认识, 重点介绍利用“洞察”号搭载的单一地震台站研究火星介质波速度随时间变化的原理及目前观测到的波速日变和季节性变化等方面进展, 并类比地球和月球上相关研究分析了火星波速变化的影响因素, 最后总结了目前火星地震学及介质时变的研究进展, 并展望了利用单一地震台站监测火星介质时变的发展趋势和研究机遇.

**关键词:** 火星地震学; “洞察”号任务; 背景噪声; 波速随时间变化

doi: [10.19975/j.dqyxx.2024-023](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2024-023)

中图分类号: P315

文献标识码: A

## Progress in Martian seismology and temporal changes of Martian subsurface structure

Xie Chuwen<sup>1,2</sup>, Liu Zhikun<sup>1,2\*</sup>

1 Key Laboratory of Intraplate Volcanoes and Earthquakes (China University of Geosciences, Beijing),  
Ministry of Education, Beijing 100083, China

2 School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

**Abstract:** The exploration of the deep earth, deep sea, and deep space represents a major national science and technology strategy, and is also a cutting-edge research field in the world. Mars exploration falls within the realm of space exploration, whereas probing the interior of an exoplanet resembles the deep earth exploration. Consequently, exploring the subsurface structure of Mars can be considered a combination of deep space and deep earth exploration. It is of great significance to summarize and sort out the current research progress of Mars and find new research content. This article reviews the research progress of Mars seismology based on InSight data, including the new understanding of marsquakes properties and the investigation of Mars internal structure. The focus is on the background, principle and new progress of the studying on temporal velocity changes in Martian subsurface structure using the single seismic station onboard InSight and the observed diurnal and seasonal variation of seismic velocity are introduced. The influencing factors of Mars seismic velocity change are analyzed through relevant studies on the Earth and Moon. Problems and opportunities in the study of temporal changes in Martian media are also summarized. Finally, we prospect the research direction and development trend of time-varying monitoring of Mar-

收稿日期: 2024-06-23; 录用日期: 2024-08-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42274071)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42274071)

第一作者: 谢楚雯 (1999-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事火星地震学的研究. E-mail: [Cotteria@126.com](mailto:Cotteria@126.com)

\*通信作者: 刘志坤 (1983-), 男, 副教授, 主要从事地下介质四维变化监测的研究. E-mail: [zkliu@cugb.edu.cn](mailto:zkliu@cugb.edu.cn)



tian media by using single-station method.

**Keywords:** Martian seismology; InSight project; seismic ambient noise; temporal velocity changes

## 0 引言

火星是与地球相邻的行星,人类探测器可以安全地在火星上着陆.1964年“水手”4号火星探测器发射并成功传回了第一张火星表面的照片,拉开了人类探测火星的序幕.截至2023年12月,火星上共有苏联/俄罗斯、美国、中国的11个火星表面探测器成功着陆,但是苏联的“火星”三号(Mars-3)在着陆20 s后就和地球失去了联系,因此,从严格意义上说,真正长期运行火星表面探测器的只有美国和中国.火星是人类当前最可能寻找到地外生命的星体,探测火星对人类认识宇宙具有重要意义.从比较行星学的研究角度看,太阳系各个行星的演化过程既存在共同之处,也存在一定的差异,探测并研究火星能够更好地了解地球的演化.

以往火星探测器大部分都是探测火星表层信息的,如火星的土壤成分和水、风速、温度等气候条件以及可能的生物生存环境等(Jakosky et al., 2015; Orosei et al., 2018; Renno et al., 2009; Saunders et al., 2004; Smith et al., 1997).2018年美国国家航空航天局发射的“洞察”号(InSight)探测器

(Interior Exploration Using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport,即“利用地震、大地测量和热传导开展的内部探测”)是首个聚焦火星内部信息的探测器(肖万博和王彦宾, 2021).

“洞察”号任务所搭载的仪器包括:地震仪,用于检测火星的地震活动;热流钻,用于测量火星内部的温度和热传输;旋转仪,用于测量火星的自转轴方向和速度.“洞察”号任务中的地震仪(Seismic Experiment for Internal Structure, SEIS,即探测内部结构的地震实验)是第一套直接布设在火星表面上并成功记录有效数据的地震仪.本文首先综述“洞察”号任务在火星震方面的相关研究成果,包括火星震的特征与时间分布规律等;之后介绍基于“洞察”号和“祝融”号观测数据对火星内部结构研究的最新进展;然后重点介绍利用单台数据研究火星介质波速时变的进展,包括火星背景噪声研究现状、噪声自相关监测波速变化的方法原理、火星上地震波速日变化和季节性变化的初步研究进展,并结合地球上相关研究分析波速变化的物理机制;最后进

行总结与展望.

## 1 火星地震学研究进展

### 1.1 火星震研究进展

火星地震学研究始于1976年底的“维京”号着陆器,“维京”1号地震仪未能解锁,而“维京”2号地震仪连续19个月的观测主要记录了风产生的噪声(Anderson et al., 1977).“维京”2号地震仪未记录到可靠的火星震事件,主要原因可能是地震仪布置于着陆器甲板,而非火星表面上,因此记录的主要是风噪声而非地震背景噪声.鉴于此,“洞察”号任务中的地震仪SEIS直接布设到火星表面,而且还配备了隔热和防风功能(Lognonné et al., 2019),事实证明该地震仪传回的数据是有效的,基于SEIS数据,火星地震学目前已取得了诸多研究成果(Lognonné et al., 2023及其中的参考文献).SEIS数据是理解火星内部结构、火星的分异和火星潜在演化的关键(Banerdt et al., 2020),也为更广泛地理解类地行星(如地球)提供了关键的背景(Van der Lee, 2023).

SEIS包括三个甚宽频(VBB)和三个短周期(SP)传感器,覆盖了从0.01~50 Hz的大范围带宽,甚至可能扩展到更长的周期(Lognonné et al., 2023),使SEIS能够记录到火星上微弱的地震信号.火星震的震级通常较小,同时,由于火星表面严重的风干扰,火星上的地震数据信噪比相对较低,图1显示了“洞察”号甚宽频地震仪记录的背景噪声与火星震随时间的变化,由图可以看出,背景噪声存在明显的季节变化,噪声水平较低的季节火星震的识别相对较容易,噪声水平较高的季节火星震的识别变得困难.由于低信噪比和单台站的限制,基于信号处理算法的自动检测在火星上并不适用,故火星震事件检测主要采用人工识别的办法,特别是利用时频分析甄别火星震事件和背景噪声的频谱差异,进而对疑似火星震的事件进行确认(孙伟家等, 2021),事件检测由Marsquake Service (MQS)(Clinton et al., 2018, 2021)负责实施.火星震事件分为宽频(broad band)、低频(low frequency)、甚宽频(very broad band)、高频(high frequency)、

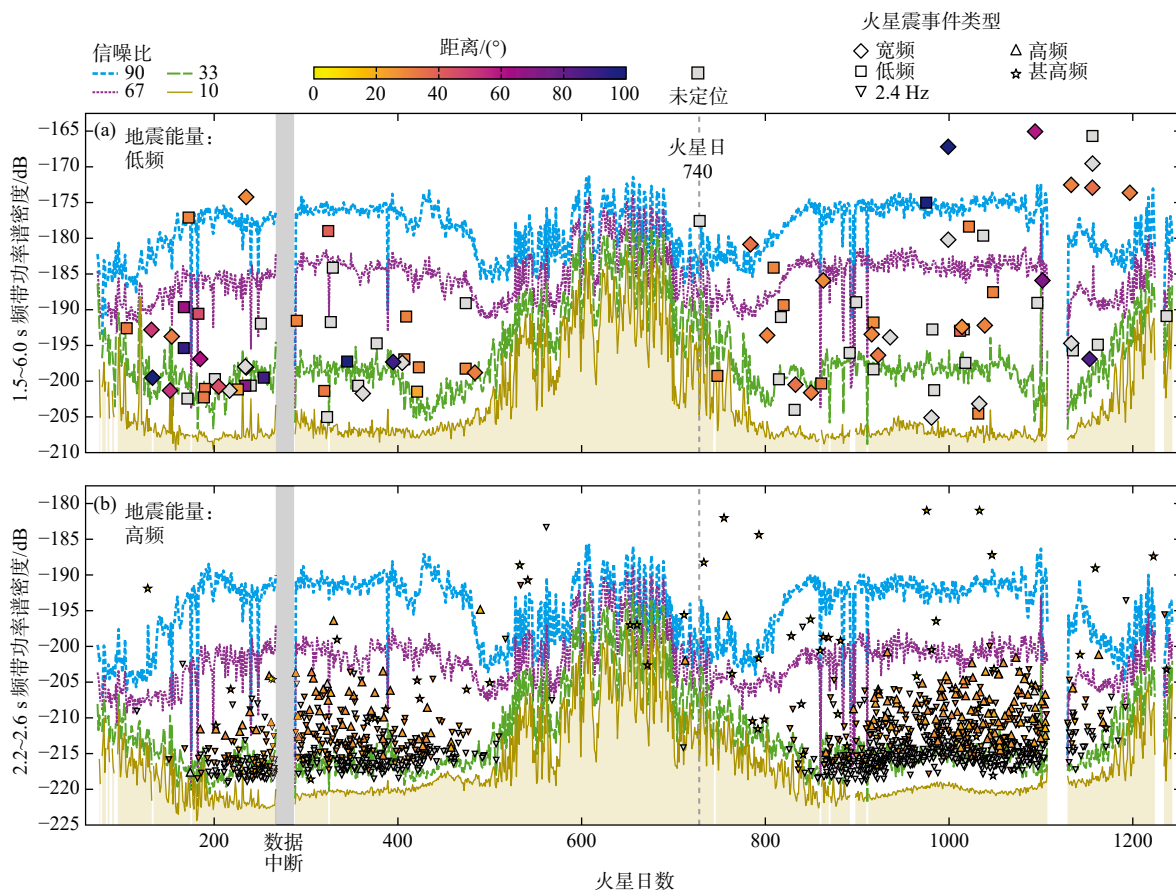


图 1 “洞察”号甚宽频 (VBB) 地震仪垂直分量记录的火星背景噪声的时间演化以及低频 (a) 和高频 (b) 火星震分布 (引自 Lognonné et al., 2023)

Fig. 1 Image showing the evolving Martian ambient noise as recorded by the VBB vertical component as well as the occurrence, amplitude, and distances of low frequency family (a) and high frequency family (b) marsquakes (from Lognonné et al., 2023)

甚高频 (very high frequency)、超高频 (super high frequency)。火星震的“低频”事件和“宽频”事件与地球略有不同, 在地球上, 低频地震通常指发生在俯冲带或板块边界处、伴随慢滑移过程产生的地震, 其主频约为 1~5 Hz (Shelly et al., 2007); 而对于火星震, 仅当能量低于 2.4 Hz 时, 才被称为低频事件, 而当能量包括或超过该频率时, 被称为宽频事件。超高频火星震持续时间非常短, 约为 10 s, 主要出现在水平分量记录上, 且频率高于 5 Hz (Lognonné et al., 2023)。

参考 MQS 目录版本 14 (InSight Marsquake Service, 2023), 截至 2022 年 12 月 31 日 (火星日第 1456 天), SEIS 共检测到了 1323 个火星震事件, 其中低频事件 59 个, 宽频事件 39 个, 高频事件 162 个, 2.4 Hz 事件 989 个, 甚高频事件 74 个; 另有 1392 个超高频事件。每个事件都基于相位拾取和反方位角误差标定了质量, 范围从质量 A (最好质量: 可定位) 到质量 D (最糟的质量: 大概是推测的) (Lognonné et al., 2023)。多数火星震震

级都很小, 但有近 50 次火星震的震级在 2~4 级之间, 能够提供火星内部的关键信息 (Witze, 2021)。

截至目前, 火星上有记录以来的最大地震事件是 S1222a, 矩震级为  $4.7 \pm 0.2$ 。由于大部分高频事件信噪比较低, 所以 S1222a 等高信噪比事件成为大多数学者的重点研究对象。MQS 将该事件归为质量 A (InSight Marsquake Service, 2020), 经纬度为  $7.63^\circ\text{S}$ 、 $170.67^\circ\text{E}$ , 位于南北半球分界线附近, “洞察”号着陆点的东侧 (Kawamura et al., 2023)。S1222a 事件非常大, 可以清楚地观察到以前检测到的事件中没有看到的特征。该事件频率成分非常丰富, 从低于  $1/30$  Hz 到 35 Hz, 被归类为宽频类型事件; 还观察到类似于高频事件的尾波衰减和极化现象 (Kawamura et al., 2023); 是第一个同时产生勒夫波和瑞利波的事件, 还看到沿火星表层传播几周之后的面波; 从长周期波形看, 其尾波持续时间超过 10 小时。因此, S1222a 提供了丰富的火星内部结构信息 (具体见 1.2 节)。

另一类重要事件是陨石撞击事件, 火星壳

(Garcia et al., 2022; Kim et al., 2022) 和火星深部 (Posiolova et al., 2022) 的速度模型都可以用陨石撞击事件约束. 火星的大气层过于稀薄, 无法给地表提供保护, 其表面频繁受到陨石的撞击. “洞察”号着陆点埃律西昂平原就是一个退化的撞击坑, 撞击坑表面光滑, 富含颗粒和卵石, 几乎没有岩石 (Hobiger et al., 2021). SEIS 工作期间, 当新的撞击事件发生时, 可以通过分析事件的到达时间、地震波和声波的极化来估计撞击位置 (Daubar et al., 2020; Garcia et al., 2020), 随后通过火星勘测轨道飞行器 (Mars Reconnaissance Orbiter) 上搭载的相机来证实陨石撞击的位置. 轨道成像数据与 SEIS 数据的配合为精确检测火星震事件提供了重要帮助 (Daubar et al., 2024; Zenhäusern et al., 2024).

针对空间分布高度离散的火星震, Durán 等 (2022) 提出了四种补充方法识别记录中的体波到时: 时域包络、极化波形及其时域包络、极化分析、波形匹配. 火星震的识别除了人工检测方法外, 还有神经网络方法 (Dahmen et al., 2022) 和模板匹配法 (Sun and Tkalić, 2022) 等. Dahmen 等 (2022) 提出了一种深度卷积神经网络方法, 名为 Mars-QuakeNet (MQNet), 用于检测火星震并去除噪声污染. 基于三分量观测数据, MQNet 预测可以在时频域中识别和分离火星震事件与噪声的能量. 该算法重现了所有人工精细筛查的 MQS 目录中的高质量事件, 以及大多数低质量的事件, 并检测到大约 60% 的额外事件, 这些事件后经人工审查得到验证. Sun 和 Tkalić (2022) 利用模板匹配方法检测到若干微小的火星震, 并研究了其成因机制, 揭示出火星内部仍然存在对流.

## 1.2 火星内部结构研究进展

根据宇宙化学元素、状态方程和行星内部及其热演化的理论模型, 可以确定火星内部结构的初步模型. 然而这些模型不是唯一的, 需要实际的地震数据进行约束 (Anderson et al., 1977).

探地雷达数据可以约束火星浅层的地质信息. 我国的“祝融”号火星车搭载的探地雷达仪器首次获得了乌托邦平原的观测数据, 深入分析“祝融”号低频雷达数据, Li C 等 (2022) 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, 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 (孙伟家和魏勇, 2023).

但是约束火星内部结构主要还是依赖于地震数

据. 目前, “洞察”号任务观测的 SEIS 数据已用来约束浅层风化层的热弹性特征 (Stähler et al., 2020) 以及反演火星的地下刚度 (Banerdt et al., 2020; Zhang et al., 2023). 结合“洞察”号的热流与物理特性数据和来自大气涡流的信号来测量火星壳本质衰减, 结果显示火星的地震衰减率大约是月球的 3 倍, 表明火星壳可能含有少量的挥发物 (Lognonné et al., 2020).

Carrasco 等 (2023) 使用 0.4~10 Hz 之间的频率的 139 个事件的尾波计算水平/垂直谱比, 反演了“洞察”号着陆点下方 100 m 深度的一维剪切波速度结构. 结果显示, 与早期亚马逊玄武岩熔岩流有关的块状喷出物下方有一较薄的高速层 (shallow high-velocity layer, SHVL), 在熔岩流之间存在一个极弱的低速层 (buried low velocity layer, bLVL), 即低速地层上存在薄高速层, 正是由于 bLVL 和 SHVL 之间介质的急剧变化, 产生了 2.4 Hz 的混响. 该结构合理解释了 SEIS 数据在低背景噪声期间存在 2.4 Hz 的特殊频谱峰.

火星的浅部地壳可能存在多个间断面. 计算 S1222a 的高频 P 波接收函数并在直达 P 波后约 1 s 处观察到转换 S 波, 表明 2 km 深度处可能是一层高度破碎地壳物质的底部 (Shi et al., 2023). 火星壳中还存在约 8 km 的界面, 利用 S1222a 事件探测到的 SH 波反射证实了此界面的存在, 此界面之上的火星壳内存在地震各向异性, 且垂直极化波速度大于水平极化波速度 (Li J Q et al., 2022). 而在 10~25 km, 对 S1222a 事件的瑞利波和勒夫波反演的速度模型显示, 水平极化剪切波的传播速度快于垂直极化剪切波 (Beghein et al., 2022). 上述两个不同深度层各向异性差异的原因可能包括剪切变形导致的各向异性晶体的优势取向、裂缝的排列、撞击导致的分层侵入、火星壳顶部大规模沉积层导致的水平分层以及大型火山喷发导致的沉积物和玄武岩沉积层的交替分布 (Li et al., 2023). 除深度差异外, 火星壳还存在南北半球差异, 火星表面的地质特征被简单分为两个部分: 北半球低地和南半球高原, 利用 S1222a 事件的瑞利波进行反演, 发现界面 21~29 km 以上的南部高原剪切波速度高于北部低地, 表明北半球有沉积岩巨厚堆积且孔隙度相对较高 (Li et al., 2023).

火星壳厚度的测量方式包括: (a) 用火星震数据结合轨道全球重力和地形图进行分析 (Hoolst and Rivoldini, 2014); (b) 对 S1222a 火星震后绕

火星传播三圈的多重瑞利波观测结果进行平均 (Kim et al., 2023); (c) 通过分析在地下界面处反射和转换的地震相 (Knapmeyer-Endrun et al., 2021). 这些方法均发现火星壳的平均厚度为 42~56 km.

为了解火星更深层的结构, Durán 等 (2022) 对部分低频火星震事件进行了完整分析, 这些低频事件对深层较为敏感, 结果表明上火星幔约为 2.4~2.9 K/km 范围的地热梯度一直延伸至 450 km 深度. 在“洞察”号任务观测前期的几次较大的火星震事件 S0235b、S0173a 等可以清晰地识别 S 波和 P 波相位, 能对地幔结构进行约束 (Giardini et al., 2020). Durán 等 (2022)、Giardini 等 (2020) 的研究都揭示了上层火星幔存在低速带. 火星幔可能经历了早期的全球岩浆海阶段, 岩浆海的结晶、分馏和翻转很可能导致火星幔底部形成了一层稳定的熔体, 富含铁和产热元素 (Khan et al., 2021; Samuel et al., 2023). 过去, 由于这一层熔体低黏度和地震速度的特点, 被错误地解释为火星核物质, 但目前已有很多证据表明, 这层熔体是熔融的液态硅酸盐层, 存在于火星核与火星幔之间 (Khan et al., 2023; Samuel et al., 2021). 将熔融层纳入火星幔模型中, 很好地解释了观测到的地震波的路径、传播时间和振幅, 也使火星核的大小和组成与类地行星的预测结果更一致 (Khan et al., 2023). Khan 等 (2023) 与 Samuel 等 (2023) 都得出结论, 熔融层包裹了整个火星核.

火星幔的热结构表明, 火星幔的潜在温度和核幔边界温度分别在 1650~1750 K 和 1900~2100 K 之间, 所以目前的火星核是完全液态的 (Durán et al., 2022). 计算火星核半径的方法包括: (a) 分析 ScS 波相位 (Durán et al., 2022); (b) 联合反演 SEIS 数据中的火星核幔边界反射波与大地测量数据 (Stähler et al., 2021); (c) 精确测量行星的自转 (Le Maistre et al., 2023); (d) 对火星地震背景噪声自相关波形进行滤波并叠加到不同的频带中确定核幔边界的深度 (Deng and Levander, 2020). 基于这些方法得到液体火星核的半径为  $1835 \pm 55$  km, 液体核平均密度为  $5700 \sim 6300$  kg/m<sup>3</sup> (Durán et al., 2022; Le Maistre et al., 2023; Stähler et al., 2021). 在引入熔融的液态硅酸盐层模型之后, Khan 等 (2023) 与 Samuel 等 (2023) 对火星核的半径和密度进行了修正, 半径相比之前的模型减小了约 10%, 密度相较之前的推测增加了 5%~8%.

铁元素和硫元素是构成火星核的主要组分 (Huang et al., 2023), 由于液体核的半径巨大, 根据对火星核半径与核密度的分析, 火星核必然还包含较轻的元素, 如氧 (Stähler et al., 2021).

## 2 火星介质时变研究进展

### 2.1 “洞察”号地震数据的时频特性

“洞察”号任务中的地震仪 SEIS 配备了 VBB 和 SP 传感器, 但 SP 记录的自身噪声比较大, 使其无法在火星日最安静的时候记录背景噪声, 所以大多数分析都是用 VBB 分量进行的 (Lognonné et al., 2023). 传输到 MQS 的连续观测数据为每秒 2 个采样点 (sps) 的 VBB 分量数据和每秒 20 个采样点的 VBB/SP 垂向分量混合数据, 如发现疑似火星震事件的信号, 传输将采样率从 20 增加到 100 sps. 相比于“维京”号, SEIS 的火星震检测能力在 1 Hz 时提高约 2500 倍, 在 0.1 Hz 时提高约 200000 倍 (Lognonné et al., 2019).

SEIS 周围布设了一个防护罩将其与外部环境进行风和温度屏蔽, 但防护罩的存在并不能完全隔绝风的干扰, SEIS 传感器仍然记录着由大气压力波和沙尘暴等天气变化引起的扰动 (Lognonné et al., 2019; Murdoch et al., 2018). 同时, 着陆器受风力作用而发生自震, 特别是着陆器上两块直径高达 1.6 m 的太阳能电池板是受到风力作用的主要部件 (Zhang et al., 2023). 因此, 大多数记录数据会受到地面风和着陆器自身震动的干扰 (Charalambous et al., 2021; Panning et al., 2020). 受风的影响, 火星上的地震噪声记录存在非常显著的昼夜变化 (Chatain et al., 2021): 在夜间, 火星非常安静, SEIS 的地震噪声记录在 4~30 s 期间比地球的微震噪声低约 500 倍; 而在白天, 因为大气运动剧烈 (Banfield et al., 2020), 对流大气涡流导致的地面变形以及着陆器振动引起的地震噪声大幅增长, 所以 SEIS 的白天记录中存在大量的风噪声 (Hobiger et al., 2021).

在低背景噪声的情况下, 背景噪声在 1.5~8 Hz 之间相对平坦, 但在垂直分量数据中存在一个可以被明显观察到的 2.4 Hz 频谱峰 (Giardini et al., 2020). 这个 2.4 Hz 的频谱峰与着陆器相关的特征模态明显不同, 表现在其形状更宽, 主要是垂直极化的, 而着陆器相关的特征模态主要是水平极化.

并且与着陆器相关的模式相比, 此频率不受温度调制. 此外, 2.4 Hz 处的数据记录在发生火星震时会产生强共振 (Dahmen et al., 2022). 2.4 Hz 峰值信号的另一特别之处在于不受短阵风和强风的影响, 对风的敏感性较弱, 其振幅与 4~6 m/s 范围内的实测风速呈弱比例关系. 有学者认为, 在大约 30~75 m 的深度有一个地震低速带, 是位于赫斯佩利亚和亚马逊河古老玄武岩层中的沉积层, 2.4 Hz 处的显著振幅峰值是该局部低速带中捕获的与表面波能量有关的 Airy 相 (Hobiger et al., 2021). 另一项研究认为, 该峰值可以通过地震仪下方层状地质结构的急剧变化来解释 (Carrasco et al., 2023).

此外, 次声波也会对 SEIS 的地震记录产生一定的干扰, 行星大气中的声波耦合到固体表面, 产生地面位移, 可以被 SEIS 观测到. 数值模拟证明了 SEIS 记录到的两个低频谐振事件 (S0133a 和 S0189a) 实际上是“围限”在夜间面波波导中的次声 (Martire et al., 2020).

## 2.2 单台背景噪声自相关分析

目前, 火星上的地震台站有且仅有一个, 而火星震的震级较小且数量相对较少, 因此基于单台背景噪声的火星介质结构及其时间变化研究尤为重要. 根据地震背景噪声可以估计地下介质的经验格林函数 (Shapiro and Campillo, 2004), 已经成为地震学研究的一个新的重要的研究领域. 在地球上, 背景噪声自/互相关方法被广泛应用于地下结构的成像研究 (Romero and Schimmel, 2018; Shapiro et al., 2005; Xi et al., 2020), 并在监测地下介质波速变化方面有重要应用 (De Plaen et al., 2016; Liu et al., 2018; Sens-Schönfelder and Wegler, 2006).

在单站背景噪声自相关研究中, 一般定义自相关函数, 即:

$$C(t) = \int_0^{t_c} v(\tau)v(t+\tau)d\tau \quad (1)$$

其中,  $v(\tau)$  表示单台站连续的波形记录,  $t_c$  为互相关时间.

火星数据的背景噪声自相关可以恢复“洞察”号下方断面段的反射响应, 约束火星莫霍面 (Deng and Levander, 2020; Schimmel et al., 2021)、地幔转换带及核幔边界等的深度 (Deng and Levander, 2020), 也可以获取上火星幔速度结构 (Deng and Levander, 2022). 尽管有分析认为 SEIS 仪器的

异常噪声可能影响噪声自相关计算结果, 但 Deng 和 Levander (2023) 去除了原始记录中振幅较大的毛刺信号, 在 0.05~0.1 Hz 下进行垂直分量自相关获得可靠的地幔转换带和核幔边界深度信息.

由于前述背景噪声自相关的数据处理是可重复进行的, 且不同时间计算得到的波形高度相似, 其中不仅包含深部断面段的反射信号, 还可能包括台站附近介质的散射响应, 基于这些高度相似波形的微弱变化可以计算地下介质波速随时间的变化, 这一研究方法被称为无源成像干涉法 (passive image interferometry, Sens-Schönfelder and Wegler, 2006). 具体研究中, 测量不同时间的噪声互/自相关波形的走时偏移 ( $dt$ ), 若假定地下介质波速是均匀变化的, 则可以通过测量相对走时偏移 ( $dt/t$ ) 来得到平均地震速度变化 ( $dv/v$ ) (Hobiger et al., 2014; 齐娟娟, 2020; Sens-Schönfelder and Wegler, 2006), 即:

$$dt/t = -dv/v \quad (2)$$

目前, 这一研究方法已在火星上有初步应用, 下一节具体介绍火星介质日周期和季节性时变监测的研究进展.

## 2.3 火星介质波速的周期性变化

Compaire 等 (2022) 使用尾波干涉技术测量了 8 组超高频重复火星震的相对走时变化, 这些重复火星震群出现在火星年的不同时期, 表现出复杂但重复的波形, 其尾波可能主要由散射波组成. 对于一些火星震群, 可以清楚地观察到尾波的拉伸; 而有些火星震群中, 尾波波形则表现为明显收缩. 根据多组重复火星震的尾波干涉测量, Compaire 等 (2022) 构建了一个火星年的波速相对变化 (图 2), 结果显示, 火星介质波速变化趋势与“洞察”号任务所处地区的表面温度均存在明显的季节性变化特征, 两者呈明显的正相关, 波速变化的延迟时间为 60~100 个火星日. 速度扰动的大小随信号中心频率的增加而增加.

Compaire 等 (2022) 也利用基于背景噪声的无源成像干涉法得到两个频段整个火星年的速度变化, 其结果与重复火星震测得的结果较为一致, 具有明显的季节变化特征 (图 2). 该研究认为, 观测到的季节性速度变化可以用风化层入射太阳通量在随时间变化的热弹性响应来进行模拟. 特别地, 地表温度变化与地下速度变化之间有时间延迟.

SEIS 记录的高频地震数据主要是由风力驱动

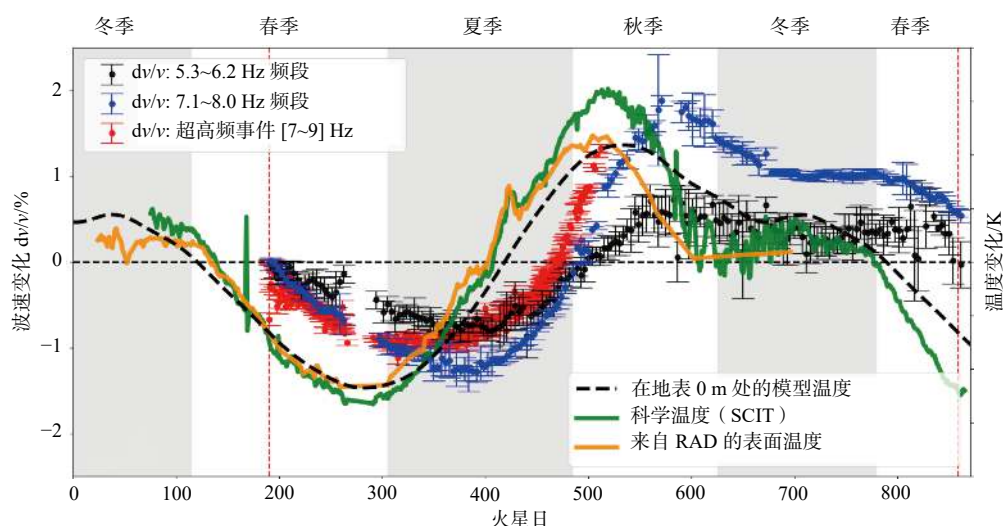


图 2 利用两个频带火星背景噪声和超高频重复火星震事件计算得到的火星介质波速的季节性变化. 两条垂直的红色虚线间隔为一个火星年 (668.6 个火星日) (引自 Compaire et al., 2022)

Fig. 2 Seismic velocity changes derived from two frequency bands in ambient noise and the super high frequency events analysis. The two vertical red dashed lines are spaced of one Martian year (668.6 Sols)(from Compaire et al., 2022)

着陆器振动而产生的, 存在明显的昼夜变化, 这也会对背景噪声自相关函数有很大影响. Qin L 等 (2023) 从 1~5 Hz 滤波的火星噪声自相关函数 (ACFs) 中提取出清晰的相位, 分别在约 1.3 s、2.6 s、3.9 s 流逝时间处. 这些相位走时的日变化 ( $dt/t$ ) 幅度约为 5%, 与地温日变化密切相关 (图 3), 且  $dt/t$  相对地表温度变化存在约为 50 分钟的时间延迟 (Qin L et al., 2023). 该研究对走时变化物理机制给出的解释是: 近地表层的热弹性应变影响着陆器-地面耦合和地下结构. 这种热弹性应变是由太阳辐射的日变化引起的.

## 2.4 波速时变的影响因素

太阳光照导致行星表面温度发生变化, 地表温度的变化引起了介质热弹性应力变化, 从而改变了

局部地震波的速度 (Cutts, 2021). 火星风化层的热弹性扰动是 SEIS 观测到的速度变化最合理的驱动因素. 此外, 火星大气压力的变化通过弹性变形也会引起地面位移 (Garcia et al., 2017), 地面的弹性形变也可能导致波速随时间变化.

由温度导致速度变化的典型星体还有月球. 通过背景噪声的互相关来重建月震仪之间的脉冲响应, 其尾波可用来监测月球土壤的周期性速度变化. 结果显示, 太阳周期性地对月球表面加热而引起的温度变化导致了速度变化, 速度与月球表面温度之间呈现清晰的负相关性, 并存在一个约 14 天的滞后时间 (Sens-Schönfelder and Larose, 2008).

地球上也观测到了由热弹性应变引起的地震波速度的季节变化现象 (Tsai, 2011), 而且地球时变研究的案例众多, 对火星介质的波速时变研究有

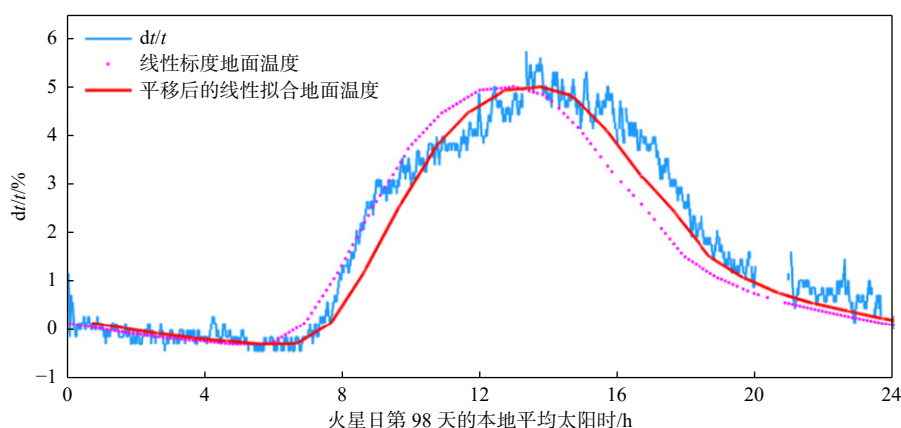


图 3 火星介质波速的日变化 ( $dt/t$ ) 与地表温度的对比. 火星夜间的波速结果的空缺是由低质量的 ACFs 造成的 (引自 Qin L et al., 2023)

Fig. 3 Temporal patterns of travel time ( $dt/t$ ). Gaps during the Martian night result from low-quality ACFs (from Qin L et al., 2023)

重要的借鉴意义. 在地球上, 地震波速度随时间变化的成因可以分为两大类, 分别是火山喷发和地震等构造过程因素 (Brenguier et al., 2014; De Plaen et al., 2016; Donaldson et al., 2019; Hobiger et al., 2014, 2016; Liu et al., 2018; Sleeman and de Zeeuw-Van Dalfsen, 2020), 以及例如降雨、温度、地下水、压强、风速、潮汐等非构造过程因素 (Andajani et al., 2020; Feng et al., 2021; Lecocq et al., 2017; Meier et al., 2010; Pham and Tkalčić, 2018; Poli et al., 2020; Takano et al., 2014).

地球构造过程中的火山喷发、断层破裂及断层愈合、强地面震动引起的地表结构破坏等都可能引起波速变化. 火山喷发是引起波速变化的常见构造性因素, 但在火星上, “洞察”号运行工作期间, 暂未监测到活跃的火山运动 (Lognonné et al., 2023). 然而, 由于有陨石撞击事件发生, 撞击事件可能会导致局部范围内火星壳地震波速的改变, 这可能会对波速造成一定影响 (Daubar et al., 2020).

过去对火星的研究 (Orosei et al., 2018; Qin X G et al., 2023; Sarah, 2018) 已经在火星上确认了多种水资源, 包括水冰、永久冻土和深藏在矿物质中的水, 但目前暂未发现水文环境对波速变化的影响. 火星上水的存在形式复杂多样: “凤凰”号探测器曾经在自己的机械臂上观察到了液滴 (Sarah, 2018), 说明火星存在局部保存液态水的可能; 也有一些研究 (Orosei et al., 2018) 认为火星甚至存在由地热驱动的地下湖泊; “祝融”号探测器降落的乌托邦平原有很多沙丘, 沙丘上的结壳、龟裂等“水痕”可能来自于降雪或者是霜降 (Qin X G et al., 2023); “毅力”号发现的沙粒胶结物最有可能的是含水的硫酸盐、蛋白质和含水氧化物 (Witze, 2022). 火星上以各种形式存在的水以及其相互之间的转化可能对波速变化具有一定影响, 是未来可进行的研究方向之一.

### 3 结论与展望

本文概述了到目前为止基于“洞察”号任务的最新火星地震学研究成果. 根据对 1300 余个火星震的检测、分类与定级, 对火星上的地震活动性有了全新的认识, 不过用于火星内部结构探测的火星震数量仅 1% 左右. 基于几次较大震级的火星震, 通过体波震相走时、接收函数和面波频散等对火星的

浅表结构、火星壳分层、火星幔转换带和火星核等均有了较好的约束. 基于相似的高频火星震和单台背景噪声获得了火星介质波速的日变和季节性等周期性变化. 通过对“洞察”号数据的深入挖掘, 我们确信未来可以获得关于火星震和火星内部结构更精细、更深入的研究成果.

对地球和其它行星物理学的理解依赖于人们测量和分析可观测到的时间尺度变化的能力. 关于未来的火星介质时变监测研究, 我们认为在数据选取、物性参数和研究方法等方面均存在继续深入研究的机遇. 如: 目前研究介质时变, 主要应用了 SEIS 记录的水平分量波形, 未来可以尝试使用多分量波形, 获得更可靠的介质时变结果, 而多分量结果也有益于介质时变物理机制的分析; 目前介质时变研究主要聚焦于浅层介质波速变化, 未来还可以参考地球上的研究, 监测地震波衰减 (Keisuke, 2020) 和各向异性 (Usher et al., 2017) 等物理参数的变化; 目前时变研究主要利用尾波干涉法研究火星介质时变, 未来可以考虑通过水平/垂直谱比或接收函数时变测量来约束火星内部特定界面或结构处的时变特性. 监测火星介质时变, 可以加深对火星结构演化的认识, 特别是探测如地球上的与液体 (Keisuke, 2020) 和气体 (Wcislo et al., 2018) 相关介质时变, 将有助于理解火星上可能存在的水/二氧化碳的赋存状态和演化规律.

### 致谢

感谢编辑老师的高效工作和三位审稿专家富有建设性的修改意见.

### References

- Andajani R D, Tsuji T, Snieder R, et al. 2020. Spatial and temporal influence of rainfall on crustal pore pressure based on seismic velocity monitoring[J]. *Earth, Planets and Space*, 72: 177. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01311-1>.
- Anderson D L, Miller W F, Latham G V, et al. 1977. Seismology on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 82(8): 4524-4546.
- Banerdt W B, Smrekar S E, Banfield D, et al. 2020. Initial results from the InSight mission on Mars[J]. *Nature Geoscience*, 13(3): 183-189.
- Banfield D, Spiga A, Newman C, et al. 2020. The atmosphere of Mars as observed by InSight[J]. *Nature*, 13: 190-198.
- Beghein C, Li J, Weidner E, et al. 2022. Crustal anisotropy in the Martian lowlands from surface waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 49(24): e2022GL101508.
- Brenguier F, Campillo M, Takeda T, et al. 2014. Earthquake dynamics.

- mapping pressurized volcanic fluids from induced crustal seismic velocity drops[J]. *Science*, 345(6192): 80-82.
- Carrasco S, Knapmeyer-Endrun B, Margerin L, et al. 2023. Empirical  $H/V$  spectral ratios at the InSight landing site and implications for the Martian subsurface structure[J]. *Geophysical Journal International*, 232(2): 1293-1310.
- Charalambous C, Stott A E, Pike W T, et al. 2021. A comodulation analysis of atmospheric energy injection into the ground motion at InSight, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126(4): e2020JE006538.
- Chatain A, Spiga A, Banfield D, et al. 2021. Seasonal variability of the daytime and nighttime atmospheric turbulence experienced by InSight on Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 48(22): e2021GL095453.
- Clinton J, Giardini D, Böse M, et al. 2018. The marsquake service: Securing daily analysis of SEIS data and building the Martian seismicity catalogue for InSight[J]. *Space Science Reviews*, 214: 133.
- Clinton J F, Ceylan S, van Driel M, et al. 2021. The marsquake catalogue from InSight, sols 0–478[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 310: 106595.
- Compaire N, Margerin L, Monnereau M, et al. 2022. Seasonal variations of subsurface seismic velocities monitored by the SEIS-InSight seismometer on Mars[J]. *Geophysical Journal International*, 229(2): 776-799.
- Cutts E. 2021. Summer could be earthquake season on Mars[J]. *Eos*, 102. <https://doi.org/10.1029/2021EO210578>.
- Dahmen N L, Clinton J F, Meier M A, et al. 2022. MarsQuakeNet: A more complete marsquake catalog obtained by deep learning techniques[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127(11): e2022JE007503.
- Daubar I J, Lognonné P, Teanby N A, et al. 2020. A new crater near InSight: Implications for seismic impact detectability on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(8): e2020JE006382.
- Daubar I J, Garcia R F, Stott A E, et al. 2024. Seismically detected cratering on Mars: Enhanced recent impact flux?[J]. *Science Advances*, 10(26): eadk7615.
- De Laen R S M, Lecocq T, Caudron C, et al. 2016. Single-station monitoring of volcanoes using seismic ambient noise[J]. *Geophysical Research Letters*, 43(16): 8511-8518.
- Deng S Z, Levander A. 2020. Autocorrelation reflectivity of Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 47(16): e2020GL089630.
- Deng S Z, Levander A. 2022. Autocorrelation R2 on Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 49(17): e2022GL099580.
- Deng S Z, Levander A. 2023. Seismic autocorrelation analysis of deep Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 50(24): e2023GL105046.
- Donaldson C, Winder T, Caudron C, et al. 2019. Crustal seismic velocity responds to a magmatic intrusion and seasonal loading in Iceland's northern volcanic zone[J]. *Science Advances*, 5: eaax6642.
- Durán C, Khan A, Ceylan S, et al. 2022. An analysis of direct, reflected, and converted seismic body waves with implications for interior structure[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 325: 106851.
- Feng K F, Huang H H, Hsu Y J, et al. 2021. Controls on seasonal variations of crustal seismic velocity in Taiwan using single-station cross-component analysis of ambient noise interferometry[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(11): e2021JB022650.
- Garcia R F, Brissaud Q, Rolland L, et al. 2017. Finite-difference modeling of acoustic and gravity wave propagation in Mars atmosphere: Application to infrasounds emitted by meteor impacts[J]. *Space Science Reviews*, 211: 547-570.
- Garcia R F, Kenda B, Kawamura T, et al. 2020. Pressure effects on the SEIS-InSight instrument, improvement of seismic records, and characterization of long period atmospheric waves from ground displacements[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(7): e2019JE006278.
- Garcia R F, Daubar I J, Beucler É, et al. 2022. Newly formed craters on Mars located using seismic and acoustic wave data from InSight[J]. *Nature Geoscience*, 19(15): 774-780.
- Giardini D, Lognonné P, Banerdt W B, et al. 2020. The seismicity of Mars[J]. *Nature Geoscience*, 13: 205-212.
- Hobiger M, Wegler U, Shiomi K, et al. 2014. Single-station cross-correlation analysis of ambient seismic noise: Application to stations in the surroundings of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake[J]. *Geophysical Journal International*, 198(1): 90-109.
- Hobiger M, Wegler U, Shiomi K, et al. 2016. Coseismic and post-seismic velocity changes detected by passive image interferometry: Comparison of one great and five strong earthquakes in Japan[J]. *Geophysical Journal International*, 205(2): 1053-1073.
- Hobiger M, Hallo M, Schmelzbach C, et al. 2021. The shallow structure of Mars at the InSight landing site from inversion of ambient vibrations[J]. *Nature Communications*, 12(12): 6756.
- Hoolst T V, Rivoldini A. 2014. Interior Structure and Evolution of Mars[M]. *Encyclopedia of the Solar System*, Elsevier, 379-396.
- Huang D, Li Y, Khan A, et al. 2023. Thermoelastic properties of liquid Fe-rich alloys under Martian core conditions[J]. *Geophysical Research Letters*, 50(6): e2022GL102271.
- InSight Marsquake Service. 2020. Mars seismic catalogue, InSight mission; V1 2/1/2020[DB]. ETHZ, IGP, JPL, ICL, Univ. Bristol. doi: 10.12686/a6.
- InSight Marsquake Service. 2023. Mars seismic catalogue, InSight mission; V14 2023-04-01[DB]. ETHZ, IGP, JPL, ICL, Univ. Bristol. <https://doi.org/10.12686/a21>.
- Jakosky B M, Lin R P, Grebowsky J M, et al. 2015. The Mars atmosphere and volatile evolution (MAVEN) mission[J]. *Space Science Reviews*, 195: 3-48.
- Kawamura T, Clinton J F, Zenhäusern G, et al. 2023. S1222a—The largest marsquake detected by InSight[J]. *Geophysical Research Letters*, 50(5): e2022GL101543.
- Keisuke Y. 2020. Detection of temporal change in near-source attenuation during intense fluid-driven seismicity following the 2011 Tohoku-Oki earthquake[J]. *Geophysical Journal International*, 224(1): 138-150.
- Khan A, Ceylan S, van Driel M, et al. 2021. Upper mantle structure of Mars from InSight seismic data[J]. *Science*, 373(6553): 434-438.
- Khan A, Huang D, Durán C, et al. 2023. Evidence for a liquid silicate layer atop the Martian core[J]. *Nature*, 622(7984): 718-723.
- Kim D, Banerdt W B, Ceylan S, et al. 2022. Surface waves and crustal

- structure on Mars[J]. *Science*, 378(6618): 417-421.
- Kim D, Durán C, Giardini D, et al. 2023. Global crustal thickness revealed by surface waves orbiting Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 50(12): e2023GL103482.
- Knapmeyer-Endrun B, Panning M P, Bissig F, et al. 2021. Thickness and structure of the Martian crust from InSight seismic data[J]. *Science*, 373(6553): 438-443.
- Le Maistre S, Rivoldini A, Caldiero A, et al. 2023. Spin state and deep interior structure of Mars from InSight radio tracking[J]. *Nature*, 619(7971): 733-737.
- Lecocq T, Longuevergne L, Pedersen H A, et al. 2017. Monitoring ground water storage at mesoscale using seismic noise: 30 years of continuous observation and thermo-elastic and hydrological modeling[J]. *Scientific Reports*, 7(1): 14241.
- Li C, Zheng Y K, Wang X, et al. 2022. Layered subsurface in Utopia basin of Mars revealed by Zhurong rover radar[J]. *Nature*, 610(7931): 308-312.
- Li J Q, Beghein C, Wookey J, et al. 2022. Evidence for crustal seismic anisotropy at the InSight lander site[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 593(593): 117654.
- Li J Q, Beghein C, Lognonné P, et al. 2023. Different Martian crustal seismic velocities across the dichotomy boundary from multi-orbiting surface waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 50(1): e2022GL101243.
- Liu Z K, Huang J L, He P, et al. 2018. Ambient noise monitoring of seismic velocity around the Longmenshan fault zone from 10 years of continuous observation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(10): 8979-8994.
- Lognonné P, Banerdt W B, Giardini D, et al. 2019. SEIS InSight's seismic experiment for internal[J]. *Space Science Reviews*, 215: 12.
- Lognonné P, Banerdt W B, Giardini D, et al. 2020. Constraints on the shallow elastic and anelastic structure of Mars from InSight seismic data[J]. *Nature Geoscience*, 13(3): 213-220.
- Lognonné P, Banerdt W B, Clinton J, et al. 2023. Mars seismology[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 24(51): 643-670.
- Martire L, Garcia R F, Rolland L, et al. 2020. Martian infrasound numerical modeling and analysis of InSight's data[J]. *Journey Geophys Research Planets*, 125: e2020JE006376.
- Meier U, Shapiro N M, Brenguier F. 2010. Detecting seasonal variations in seismic velocities within Los Angeles basin from correlations of ambient seismic noise[J]. *Geophysical Journal International*, 181: 985-996.
- Murdoch N, Alazard D, Knapmeyer-Endrun B, et al. 2018. Flexible mode modelling of the InSight lander and consequences for the SEIS instrument[J]. *Space Science Reviews*, 214(8): 1-24.
- Orosei, Lauro S E, Pettinelli E, et al. 2018. Radar evidence of subglacial liquid water on Mars[J]. *Science*, 640(361): 490-493.
- Panning M P, Pike W T, Lognonné P, et al. 2020. On-deck seismology: Lessons from InSight for future planetary seismology[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(4): e2019JE006353.
- Pham T, Tkalčić H. 2018. Antarctic ice properties revealed from teleseismic P wave coda autocorrelation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(9): 7896-7912.
- Poli P, Marguin V, Wang Q, et al. 2020. Seasonal and coseismic velocity variation in the region of L'Aquila from single station measurements and implications for crustal rheology[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(7): e2019JB019316.
- Posiolova L V, Lognonné P, Banerdt W B, et al. 2022. Largest recent impact craters on Mars: orbital imaging and surface seismic co-investigation[J]. *Science*, 378(6618): 412-417.
- Qi J J. 2020. Temporal variations of seismic velocity related to earthquakes and environmental factors from single-station ambient noise[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).
- Qin L, Qiu H R, Nakata N, et al. 2023. Variable daily autocorrelation functions of high-frequency seismic data on Mars[J]. *Seismological Research Letters*, 94(2A): 746-758.
- Qin X G, Ren X, Wang X, et al. 2023. Modern water at low latitudes on Mars: Potential evidence from dune surfaces[J]. *Science Advances*, 9(17): eadd8868.
- Renno N O, Bos B J, Catling D C, et al. 2009. Possible physical and thermodynamical evidence for liquid water at the phoenix landing site[J]. *Journal of Geophysical Research*, 114: E00E03.
- Romero P, Schimmel M. 2018. Mapping the basement of the Ebro basin in Spain with seismic ambient noise autocorrelations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(6): 5052-5067.
- Samuel H, Ballmer M D, Padovan S, et al. 2021. The thermo-chemical evolution of Mars with a strongly stratified mantle[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126(4): e2020JE006613.
- Samuel H, Drilleau M, Rivoldini A, et al. 2023. Geophysical evidence for an enriched molten silicate layer above Mars's core[J]. *Nature*, 622(7984): 712-717.
- Sarah. 2018. First discovery of water on Mars[EB/OL]. <https://www.kennedyspacecenter.com/blog/31/first-discovery-of-water-on-mars#:~:text=NASA%20has%20made%20strides%20exploring%20Mars%20in%20the,Earth%2C%20and%20is%20not%20another%20form%20of%20ice> [2018-7-31/2024-2-28].
- Saunders R S, Arvidson R E, Badhwar G D, et al. 2004. 2001 Mars odyssey mission summary[J]. *Space Science Reviews*, 110: 1-36.
- Schimmel M, Stutzmann E, Lognonné P, et al. 2021. Seismic noise autocorrelations on Mars[J]. *Earth and Space Science*, 8(6): e2021EA001755.
- Sens-Schönfelder C, Wegler U. 2006. Passive image interferometry and seasonal variations of seismic velocities at Merapi volcano, Indonesia[J]. *Geophysical Research Letters*, 33(21): L21302.
- Sens-Schönfelder C, Larose E. 2008. Temporal changes in the Lunar soil from correlation of diffuse vibrations[J]. *Physical Review E*, 78(4): 45601.
- Shapiro N M, Campillo M. 2004. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise[J]. *Geophysical Research Letters*, 31(7): L07614.
- Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, et al. 2005. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise[J]. *Science*, 307(5715): 1615-1618.
- Shelly D R, Beroza G C, Ide S. 2007. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms[J]. *Nature*, 446: 305-307.
- Shi J, Plasman M, Knapmeyer Endrun B, et al. 2023. High-frequency receiver functions with event S1222a reveal a discontinuity in the

- Martian shallow crust[J]. *Geophysical Research Letters*, 50(5): e2022GL101627.
- Sleeman R, de Zeeuw-Van Dalfsen E. 2020. Cross-correlation analysis of long-term ambient seismic-noise recordings in the caribbean netherlands to monitor the volcanoes on Saba and St. Eustatius[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(5): 2541-2558.
- Smith P H, Bell J F, Bridge N T, et al. 1997. Results from the Mars pathfinder camera[J]. *Science*, 278: 1758-1765.
- Stähler S C, Widmer-Schmidrig R, Scholz J R, et al. 2020. Geophysical observations of phobos transits by InSight[J]. *Geophysical Research Letters*, 47(19): e2020GL089099.
- Stähler S C, Khan A, Banerdt W B, et al. 2021. Seismic detection of the Martian core[J]. *Science*, 6553(373): 443-448.
- Sun W J, Wang Y B, Wei Y, et al. 2021. Martian seismology and internal structure studies[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(4): 437-449 (in Chinese).
- Sun W J, Tkalčić H. 2022. Repetitive marsquakes in Martian upper mantle[J]. *Nature Communications*, 13(1): 1695.
- Sun W J, Wei Y. 2023. China's deep space exploration into Martian and Lunar deep interior[J]. *Chinese Science Bulletin*, 68(6): 573-575 (in Chinese).
- Takano T, Nishimura T, Nakahara H, et al. 2014. Seismic velocity changes caused by the Earth tide: Ambient noise correlation analyses of small-array data[J]. *Geophysical Research Letters*, 41(17): 6131-6136.
- Tsai V C. 2011. A model for seasonal changes in GPS positions and seismic wave speeds due to thermoelastic and hydrologic variations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 116(B4): B04404.
- Usher P, Kendall J, Rietbrock A, et al. 2017. Measuring changes in fracture properties from temporal variations in anisotropic attenuation of microseismic waveforms[J]. *Geophysical Prospecting*, 65(S1): 347-362.
- Van der Lee S. 2023. Deep Mars is surprisingly soft[J]. *Nature*, 622(7984): 700-702.
- Wcislo M, Eisner L, Málek J, et al. 2018. Attenuation in west bohemia: Evidence of high attenuation in the Nový Kostel focal zone and temporal change consistent with CO<sub>2</sub> degassing[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(1): 450-458.
- Witze A. 2021. Mars's core has been measured-and it's surprisingly large[J]. *Nature*, 591: 514.
- Witze A. 2022. A year on Mars: How NASA's perseverance hit a geological jackpot[J]. *Nature*, 603(7899): 19-20.
- Xi C Q, Mi B B, Dai T Y, et al. 2020. Spurious signals attenuation using SVD-based wiener filter for near-surface ambient noise surface wave imaging[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 183: 104220.
- Xiao W B, Wang Y B. 2021. Discoveries of the InSight seismic investigation on Mars' surface[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(2): 211-226 (in Chinese).
- Zenhäusern G, Wójcicka N, Stähler S C, et al. 2024. An estimate of the impact rate on Mars from statistics of very-high-frequency marsquakes[J]. *Nature Astronomy* (in press).
- Zhang L, Gao F, Liu Z, et al. 2023. Temperature-dependent modal analysis of the InSight lander on Mars[J]. *Geophysics*, 88(2): A1-A5.

## 附中文参考文献

- 齐娟娟. 2020. 利用单台地震背景噪声研究与强震和环境因素相关的波速时间变化[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 孙伟家, 王一博, 魏勇, 等. 2021. 火星地震学与内部结构研究[J]. *地球与行星物理论评*, 52(4): 437-449.
- 孙伟家, 魏勇. 2023. 我国深空探测研究深入火星和月球内部[J]. *科学通报*, 68(6): 573-575.
- 肖万博, 王彦宾. 2021. “洞察”号火星表面地震探测中的发现[J]. *地球与行星物理论评*, 52(2): 211-226.