



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



基于PyQt5的面波频散曲线成像平台的设计与实现

胡景 王帅兵 尚晨奕 萧羽 邵广周

Design and implementation of a tool for surface wave dispersion curve imaging based on PyQt5

Hu Jing, Wang Shuaibing, Shang Chenyi, Xiao Yu, Shao Guangzhou

引用本文:

胡景, 王帅兵, 尚晨奕, 萧羽, 邵广周. 2025. 基于PyQt5的面波频散曲线成像平台的设计与实现. *地震学报*[J], 47(3): 410–421. DOI: 10.11939/jass.20240100

Hu J, Wang S B, Shang C Y, Xiao Y, Shao G Z. 2025. Design and implementation of a tool for surface wave dispersion curve imaging based on PyQt5. *Acta Seismologica Sinica*[J], 47(3): 410–421. DOI: 10.11939/jass.20240100

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20240100>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

接收函数、面波与重力联合约束地壳厚度与波速比

Estimating of crustal thickness and v_p/v_s ratio using receiver function, surface wave and gravity data

地震学报. 2022, 44(6): 935–948 <https://doi.org/10.11939/jass.20210065>

浅层结构研究中高阶模式瑞雷面波对低速层的约束

Constraint on low-velocity layer using higher mode Rayleigh waves in the shallow structure research

地震学报. 2023, 45(2): 203–222 <https://doi.org/10.11939/jass.20210189>

基于程函面波成像的华北克拉通岩石圈三维高分辨率S波速度结构研究

3D High-resolution S-wave velocity structure of the lithosphere beneath North China Craton based on Eikonal surface wave tomography

地震学报. 2024, 46(4): 578–599 <https://doi.org/10.11939/jass.20230052>

基于背景噪声面波成像法研究土耳其中部岩石圈速度结构

Lithospheric velocity structure of central Turkey based on ambient noise surface tomography

地震学报. 2023, 45(4): 609–627 <https://doi.org/10.11939/jass.20220030>

倾斜边坡多道面波分析中的最小偏移距估计方法

The nearest offset distance estimation method for multi-channel analysis of surface waves in slope

地震学报. 2022, 44(2): 327–338 <https://doi.org/10.11939/jass.20210098>

基于背景噪声和地震面波联合反演华北克拉通中部岩石圈结构

Joint inversion of the lithospheric structure of the central North China Craton from ambient noise and seismic surface wave

地震学报. 2022, 44(4): 539–554 <https://doi.org/10.11939/jass.20210042>

胡景, 王帅兵, 尚晨奕, 萧羽, 邵广周. 2025. 基于 PyQt5 的面波频散曲线成像平台的设计与实现. 地震学报, 47(3): 410–421. doi: 10.11939/jass.20240100.

Hu J, Wang S B, Shang C Y, Xiao Y, Shao G Z. 2025. Design and implementation of a tool for surface wave dispersion curve imaging based on PyQt5. *Acta Seismologica Sinica*, 47(3): 410–421. doi: 10.11939/jass.20240100.

基于 PyQt5 的面波频散曲线成像 平台的设计与实现*

胡 景^{1,2)} 王帅兵¹⁾ 尚晨奕¹⁾ 萧 羽¹⁾ 邵广周^{1),*}

1) 中国西安 710054 长安大学地质工程与测绘学院

2) 中国合肥 230088 安徽至博光电科技股份有限公司

摘要 面波频散成像在研究地下介质波速结构方面起着重要作用,然而目前公开的面波频散成像工具大多在命令行环境下运行,使用不同种编程语言对数据进行前后处理,对于普通用户而言:①运行环境的配置难度系数高;②需要较强的编程能力进行数据加工以及结果展示.为解决上述问题,本文基于 PyQt5 开发了一款易于部署在 Windows 11 操作系统上的面波频散曲线成像平台(SWDIT). SWDIT 已集成多种模块,包括半波长法模块、三维面波走时反演模块、三维数据可视化模块,可对用户输入的频散曲线信息进行灵活成像,以满足用户在实际应用场景的需要.

关键词 面波频散 面波走时反演 面波频散成像工具 PyQt5 SWDIT
doi: 10.11939/jass.20240100 中图分类号: P315.63 文献标识码: A

Design and implementation of a tool for surface wave dispersion curve imaging based on PyQt5

Hu Jing^{1,2)} Wang Shuaibing¹⁾ Shang Chenyi¹⁾ Xiao Yu¹⁾ Shao Guangzhou^{1),*}

1) School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2) Anhui Zhibo Opto-Electronic Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China

Abstract: Seismic imaging with surface wave dispersion curve data plays an important role in investigating subsurface seismic velocity structures. However, most of the currently published surface wave dispersion imaging tools are operated in command-line environments and require data preprocessing and postprocessing across multiple programming languages, posing significant challenges for non-expert users. These challenges include complex runtime environment configurations and the need for advanced programming skills to process data and visualize results. To address these issues, this study introduces the Surface Wave Dispersion Imaging Tool (SWDIT), a user-friendly software developed using PyQt5, which is easily deployable on Windows 11 system.

* 基金项目 国家自然科学基金(42104051, 42174176)和中央高校基本科研业务费专项(300102262103)联合资助.

收稿日期 2024-10-08 收到初稿, 2024-11-18 决定采用修改稿.

作者简介 胡景, 博士, 讲师, 主要从事地震层析成像研究, e-mail: hujing@chd.edu.cn;

*通信作者: 邵广周, 博士, 教授, 主要从事面波勘探研究, e-mail:

shao_gz@chd.edu.cn



SWDIT integrates multiple functional modules, including the modules of half-wavelength interpretation method, three-dimensional surface wave travel-time tomography, and three-dimensional data visualization. The half-wavelength interpretation module directly converts Rayleigh wave phase velocity dispersion curves into apparent S-wave velocity profiles, avoiding the influence of hyper-parameter selection in traditional inversion methods. The three-dimensional surface wave travel-time tomography module, based on the DSurfTomo algorithm, supports direct inversion of observed surface wave travel times to obtain three-dimensional S-wave velocity structures. This module incorporates features such as ray-path density analysis, parameter configuration for inversion, real-time residual monitoring, and resolution assessment *via* checkerboard tests. Additionally, the three-dimensional data visualization module, powered by PyVista, enables interactive exploration of model data through slicing, volume rendering, and customizable display settings, eliminating the need for external visualization tools.

SWDIT is designed with a graphical user interface (GUI) to enhance accessibility, allowing users to perform complex imaging tasks without programming expertise. The software is developed in Python 3.10, leveraging libraries such as NumPy and SciPy for efficient computation, and is compiled into a standalone executable using Nuitka for easy distribution. Key advantages of SWDIT include its cross-platform compatibility and intuitive interface, which streamline the workflow from data loading to result interpretation.

In summary, SWDIT provides a comprehensive and practical solution for surface wave dispersion imaging, catering to both research and industrial applications. Future updates will expand its capabilities to include dispersion curve extraction, further broadening its applicability. The software is available at <https://gitee.com/jisa920/SWDIT>.

Key words: surface wave dispersion; surface wave travel-time tomography; surface wave dispersion imaging tool; PyQt5; SWDIT

引言

地震面波是由地球表面不同类型的地震波相互作用产生, 沿着地球表面传播, 传播速度随频率发生变化(称为面波频散). 由于不同频率的面波对地下不同深度范围内的横波速度结构具有一定的约束作用, 面波频散被广泛用于不同尺度的波速结构研究中, 如地壳-上地幔尺度(Curtis *et al.*, 1998; Shen *et al.*, 2016)、工程尺度(Xia *et al.*, 2009; 李雪燕等, 2020; 徐佩芬等, 2020; 邵广周等, 2022), 面波频散成像技术也因此成为揭示地球内部结构的重要手段, 推动了众多面波频散成像工具的开发(Herrmann, 2013; Fang *et al.*, 2015; Pan *et al.*, 2019).

软件工具的易用性主要取决于其可安装性、性能以及稳定性. 目前, 公开的面波频散成像工具大多数以源码形式发布, 并在命令行环境下运行, 如 CPS (Computer Programs in Seismology, Herrmann, 2013), DsurfTomo (Fang *et al.*, 2015), DisbaTomo (Pan *et al.*, 2019) 和 evodcinv (Luu, 2019). 这些工具比较适合重复性任务, 且方便专业用户自由修改源代码以适应不同的需求. 然而, 对于普通用户而言, 学习配置复杂的计算环境、使用命令行需要较大的时间成本.

相比之下, 基于图形用户界面(Graphical User Interface, 缩写为 GUI)的软件具有良好的交互性和直观性, 对初学者更为友好. 例如, Geopsy (Wathelet *et al.*, 2020) 和 ISP (Cabieses *et al.*,

2022)这类工具提供了易于交互的用户界面,集成了台阵分析、面波频散曲线提取等多种功能.这些工具无需用户具备编程能力或熟悉命令行操作,极大地提高了易用性.但是,部分软件如 Geopsy 缺乏模块化设计,导致其后续维护难度较大,不易扩展.

随着计算机科学的发展,Python 语言因其简单易学且具备丰富的第三方库,近年来在地球物理领域得到了广泛应用.目前,基于 Numpy, Scipy 和 Numba 等计算科学库,发展出了一系列地球物理数据处理框架,例如用于天然地震波形数据处理的 Obspy (Beyreuther *et al.*, 2010)、用于高效计算背景噪声互相关函数的 NoisePy (Jiang *et al.*, 2020)等.此外,Python 还支持多种跨平台的 GUI,如 PyQt5 和 Tkinter,其中 PyQt5 提供了丰富的组件,支持 Qt 设计师,并能将 Matplotlib (Hunter, 2007)和 PyVista (Sullivan, Kaszynski, 2019)库作为数据可视化的后端,使开发者能够快速构建功能丰富且跨平台的 GUI 应用程序.

鉴于此,本文基于 PyQt5 框架,采用 Python 语言快速实现了一个名为“斯维迪特”(Surface Wave Dispersion Imaging Tool, 缩写为 SWDIT, 网址 <https://gitee.com/jhsa920/SWDIT>)的面波频散曲线成像平台. SWDIT 集半波长法、三维面波走时成像技术以及三维模型可视化功能于一体,为用户提供友好的界面来简化面波频散成像的处理流程.此外, SWDIT 具备较强的三维可视化功能,为用户提供更加直观的三维模型展示,从而方便用户对三维模型进行解释.

1 软件总体框架

1.1 需求分析

目前面波频散曲线成像方法很多,如半波长法(徐佩芬等, 2013)、三维面波走时成像算法(Fang *et al.*, 2015; 王华明等, 2025),然而面对不同的野外观测场景需要采用不同的频散成像算法、配置不同的计算环境以及对成像结果进行可视化.尽管国内外已有面波频散成像相关算法培训,但对于不同专业背景的新用户需要花费大量的时间进行复杂计算环境的配置以及对结果再次加工方可进一步可视化.因此,为方便用户选择面波频散成像算法以及对结果进行后处理,需要一个平台集成常见的面波频散反演算法,这对于推广面波频散成像方法具有重要意义.综上所述,本文自主设计面波频散成像工具 SWDIT 的核心需求有:

- 1) 半波长法:支持瑞雷面波基阶相速度直接转换为视速度;
- 2) 三维面波走时成像:支持三维面波走时成像功能(包括分辨率分析);
- 3) 数据可视化:支持一般数据可视化和速度模型三维可视化;
- 4) 用户界面:提供易于交互的图形用户界面;
- 5) 快捷部署:支持 64 位 Windows 10 (或 11)一键部署,脱离 Python 环境独立运行.

1.2 系统结构设计

图 1 展示了 SWDIT 的主要模块以及初始化界面. SWDIT 主要模块包含初始化模块、半波长法模块、三维面波走时成像模块、数据三维可视化模块、日志模块.

初始化模块包括工区设置、软件平台各组件的参数初始化;半波长法模块包括瑞雷面波基阶相速度数据加载、频散数据的显示、横波视速度剖面的展示;三维面波走时成像模块包括基阶面波频散数据的加载、数据的筛选、射线密度的显示、初始模型的设置、反演参数的设置、迭代残差的实时可视化、反演结果的显示、分辨率的分析;数据三维可视化模块包括三维网格模型数据的加载、交互式可视化参数面板;其它模块包括软件日志模块和帮助文档

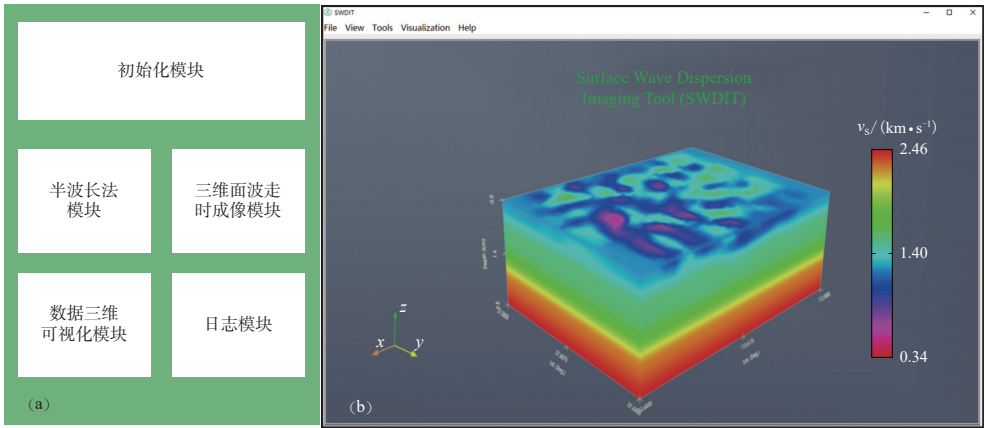


图 1 SWDIT 基本功能
(a) 主要功能模块; (b) 开始界面
Fig. 1 Basic modules of SWDIT
(a) Fundamental function modules; (b) Start interface

模块，其中日志模块主要用于显示软件运行时的重要输出内容，以便于软件的维护。

1.3 开发环境

为了方便代码调试以及实现面向对象开发，本文在 Windows 11 上使用 PyCharm (网址为 <https://www.jetbrains.com/zh-cn/pycharm/>) 搭建 Python 3.10 集成开发环境。开发环境部署了 PyQt5 (网址为 <https://www.riverbankcomputing.com>)，Matplotlib (网址为 <https://matplotlib.org>)，PyVista (网址为 <https://pyvista.org>) 和 Nuitka (网址为 <https://nuitka.net>) 等第三方库，其中：PyQt5 用于设计图形界面；Matplotlib 用于数据一般可视化；PyVista 用于三维数据可视化；Nuitka 用于 Python 项目的编译，将 Python 项目生成脱离 Python 环境的可执行文件，便于发布。

2 面波频散成像主要功能模块

2.1 半波长法模块

半波长法直接通过经验关系对获得的瑞雷面波基阶频散曲线进行转换得到视速度与深度的关系，常用于探测岩性界面。徐佩芬等(2013)提供的视速度与瑞雷面波基阶相速度和周期的关系如下：

$$v_{x,i} = \sqrt[4]{\left(\frac{T_i v_{r,i}^4 - T_{i-1} v_{r,i-1}^4}{T_i - T_{i-1}}\right)}, \tag{1}$$

式中：对于第 i 个周期， $v_{x,i}$ 为横波视速度， $v_{r,i}$ 为瑞雷波相速度， T_i 为周期。需要说明的是 v_x 是不同于相速度和 S 波速度的面波物性参数，具有速度量纲。对于每个测点，获得瑞雷面波基阶相速度频散曲线后，可利用式(1)将相速度频散曲线转换为横波视速度随深度的变化曲线，其中深度采用面波波长的一半。综合所有测点的视速度与深度的关系曲线，通过横向插值和光滑计算，最终获得横波二维视速度剖面。该算法可避免面波频散反演过程中初始模型、超参数(阻尼因子和光滑因子)等人为选取所造成的影响。图 2 展示了半波长法模块，该模块包含了瑞雷面波基阶频散曲线加载按钮、测点位置加载按钮、频散曲线转换为时速度剖面按钮以及结果保存按钮。

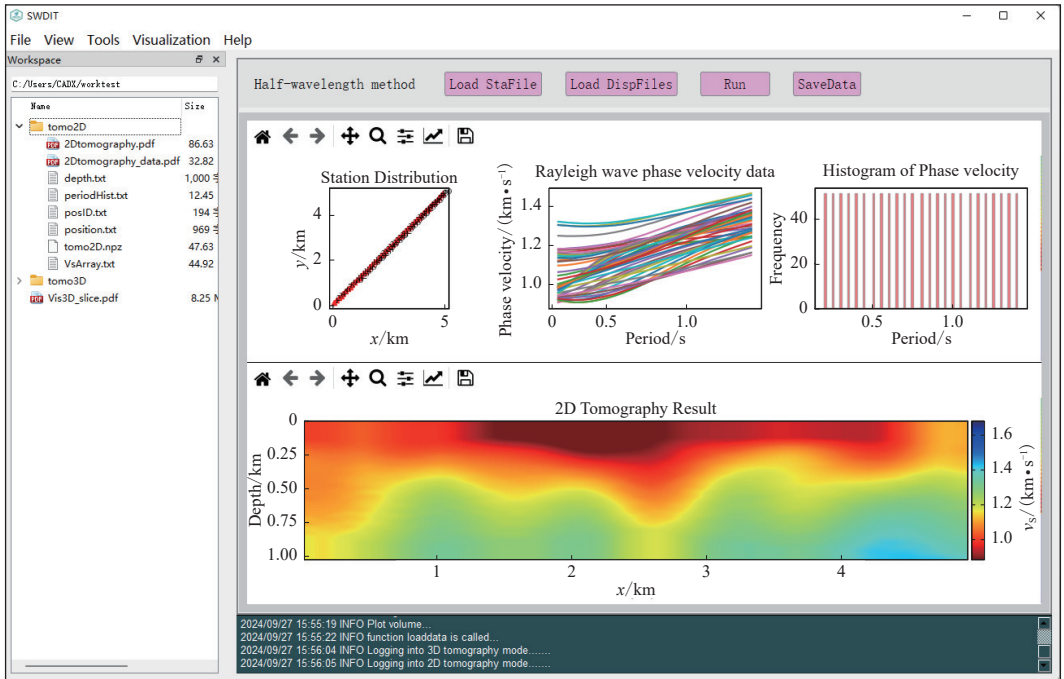


图 2 半波长法模块操作面板

Fig. 2 Operation panel of half-wavelength method module

2.2 三维面波走时成像模块

Fang 等(2015)提出了面波三维走时直接成像算法 DSurfTomo, 并将其用于确定台阵下方的三维速度结构. 相较于常规的两步法反演, DSurfTomo 直接反演不同频率下的面波观测走时从而得到三维横波速度模型. 该算法能够考虑网格点间的横向平滑约束, 并采用球坐标系下的快速行进法(Rawlinson, Sambridge, 2004)进行二维射线追踪获取理论面波走时, 从而避免了面波沿大圆路径传播的假设, 提高了面波成像的精度. 王华明等(2025)在 Fang 等(2015)的基础上提出小尺度直角坐标系台阵的面波走时三维直接成像算法, 将 DSurfTomo 推广至直角坐标系下, 以适合工程尺度的面波走时三维成像. 目前, DSurfTomo 已被应用于研究不同尺度的地质结构(Li *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2018; 黄宇奇等, 2021; 姚华建等, 2023). 基于其应用广泛性和普适性, DSurfTomo 算法被 SWDIT 选用为三维面波走时成像模块的后端.

三维面波走时成像数据加载和挑选模块如图 3 所示. 数据加载模块(图 3a)支持读入台站位置和基于双台法(姚华建等, 2004)提取的频散数据, 并且支持加载频散数据时选择合适的周期(Vantassel, Cox, 2021)参与反演以及台站分布和频散曲线分布的可视化. 数据挑选模块(图 3b)采用两种方式对观测的频散曲线进行筛选: ① 一条频散曲线至少有 N 个频散点; ② 每个周期的频散速度值在该周期对应的平均频散速度值 $\pm M$ 倍标准偏差范围内. 图 3b 展示了频散曲线的筛选过程.

图 4 分别展示了不同周期范围(0.2—0.6 s 和 0.6—1.0 s)内三维面波走时成像模块中的射线路径分布和射线密度分布可视化. 经过数据加载和筛选之后, SWDIT 将计算每一台站对连线的面波平均传播速度(相速度或群速度), 并用不同的颜色表示连线的平均速度大小, 可初步地展示面波在不同周期范围内以及不同区域位置上的传播速度特征. 从图 4 可以看出

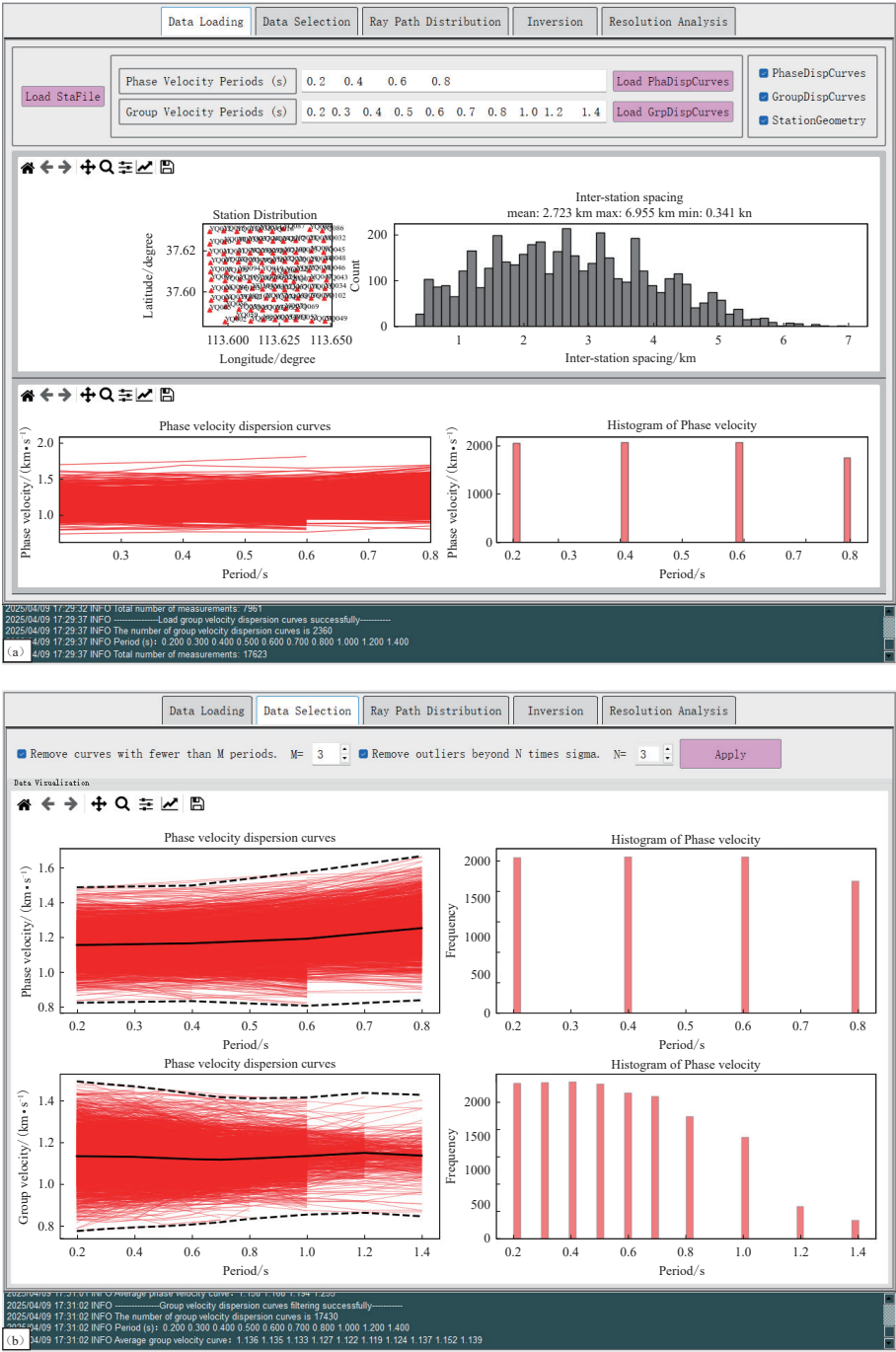


图 3 数据加载面板(a)和挑选面板(b)

黑色实线、虚线表示平均的频散曲线及其 ± 3 倍标准偏差曲线, 直方图表示每个周期下频散观测值的数量

Fig. 3 Panels for data loading (a) and selection (b)

The black and dashed lines represent the average dispersion curve and the corresponding ± 3 times standard deviation curve, respectively. The histograms represent the number of dispersion observation values at each period

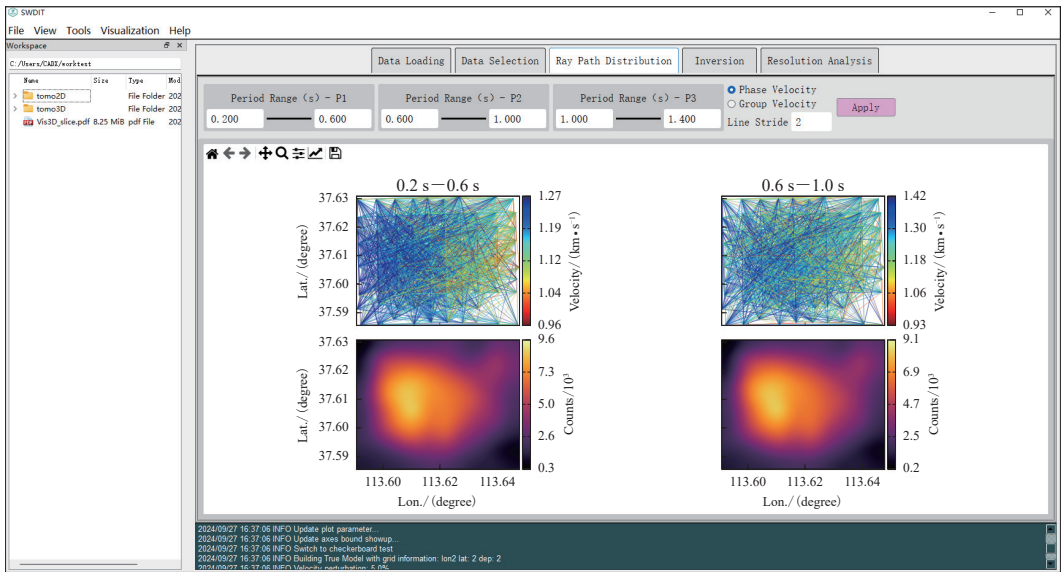


图 4 0.2—0.6 s (左)和 0.6—1.0 s (右)周期范围内的射线路径分布(上)以及
射线密度分布(下)可视化面板

Fig. 4 Visualization panel for showing ray-path distribution (upper) and its density distribution
(lower) in the period ranges of 0.2–0.6 s (left) and 0.6–1.0 s (right)

0.2—0.6 s 周期内, 113.60°E—113.61°E 范围内的连线平均速度相比 113.62°E—113.63°E 范围内的偏高, 可大致推断出横向经度范围 113.60°E—113.61°E 内的浅层横波速度偏高。频散数据在不同周期下的射线密度分布可为后续反演的结果评估起到一定的支撑作用, 简单起见, 我们将双台法的两台连线作为射线, 并采用 Numpy 库(Harris *et al.*, 2020)中的 histogram2d 函数将其进行密度化, 从射线密度图中可看出邻近边缘的射线密度较低, 由此初步判断反演结果在边缘区域较差。

三维面波走时成像模块中的反演过程面板如图 5 所示。该面板可根据台阵位置分布进行横向反演网格点剖分、对初始模型进行设置和显示、基于三维数据可视化显示反演结果、提供 DSurfTomo 反演参数设置面板、展示反演前后的残差直方统计图、实时展示残差随迭代次数的变化、提供图像显示组合。这些基本功能方便用户直接对反演结果进行查看以及调参。

分辨率分析是评价三维面波走时成像结果的基本手段。本文中三维面波走时成像模块中的分辨率分析为棋盘测试(Zhao, Hasegawa, 1993; 胡景等, 2021)。棋盘测试的具体做法: 在实际反演的初始模型下, 对相邻网格进行正负扰动生成真实的棋盘模型, 并基于真实观测系统以及棋盘模型正演理论面波走时, 加入一定水平的噪声, 形成合成数据, 之后进一步基于原始的初始模型和合成数据反演评估棋盘的恢复程度。棋盘测试可有效地帮助用户圈定一些可靠的异常范围以及估计反演分辨率。棋盘测试面板如图 6 所示, 该面板提供了棋盘测试所需的相关设置, 如棋盘大小、棋盘速度扰动、噪声等设置, 并基于三维可视化功能显示了真实棋盘模型和恢复后的模型, 便于直接对比。

2.3 三维数据可视化模块

数据可视化对于实际数据异常检测、数据挖掘起着重要作用。在 SWDIT 中, 经常需要

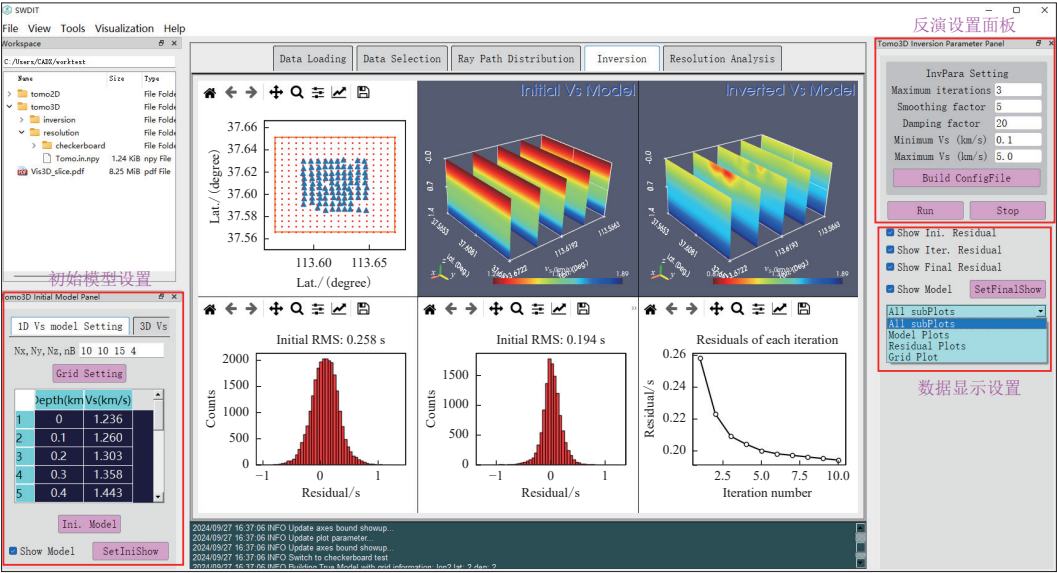


图 5 面波三维走时反演过程面板

Fig. 5 The panel of three-dimensional surface wave travel-time tomography

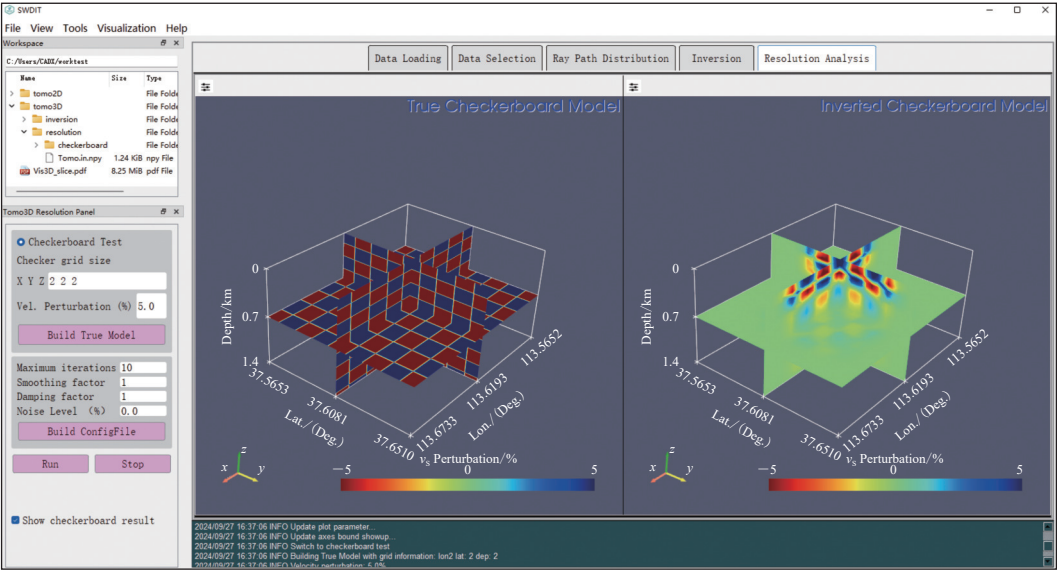


图 6 用于三维面波走时成像分辨率分析的棋盘测试面板

左右分别为真实的和恢复的三维棋盘模型图像

Fig. 6 Checkerboard test panel for resolution analysis of three-dimensional surface wave travel-time tomography

Left and right panels are true and restored three-dimensional checkerboard model images, respectively

加载和挑选频散数据、分析反演结果，因此需要使这些数据可视化，以便于质量控制。

SWDIT 数据可视化模块采用了 Matplotlib 和 PyVista 可视化库。这两种可视化库都为 PyQt5 提供了相应的接口，易于集成在 SWDIT 平台上。其中 Matplotlib 可以生成多种类型的图表，如折线图、散点图、柱状图等，提供了多种绘图样式，被广泛应用于科学计算和数据

分析. 在 SWDIT 中 Matplotlib 主要用于绘制频散曲线图、射线密度分布图、台站距离直方图等.

SWDIT 中的三维数据可视化模块主要使用 PyVista 库作为后端. PyVista 相较于 Matplotlib 更专注于三维数据的可视化处理,它是基于 VTK (Visualization Toolkit) (Schroeder *et al.*, 2000) 构建,提供了丰富的接口,用户基于 PyVista 编写少量代码即可高效地创建、交互式操作可视化三维数据. SWDIT 三维可视化模块加载的外部数据格式为四列数据,分别为经度、纬度、深度、物理属性值. 该文本数据的格式较为简单,易于使用 C/C++ 和 Fortran 等静态编程语言实现数据格式的输出.

图 7 展示了 SWDIT 集成的三维可视化模块功能图,它通过加载三维网格化模型数据,并线性插值成 PyVista 所需要的 ImageData 格式,之后通过 VTK 后端渲染成三维模型. SWDIT 另外设计了三维可视化交互参数对话框(图 8),该对话框可以方便地为用户提供不同视角的

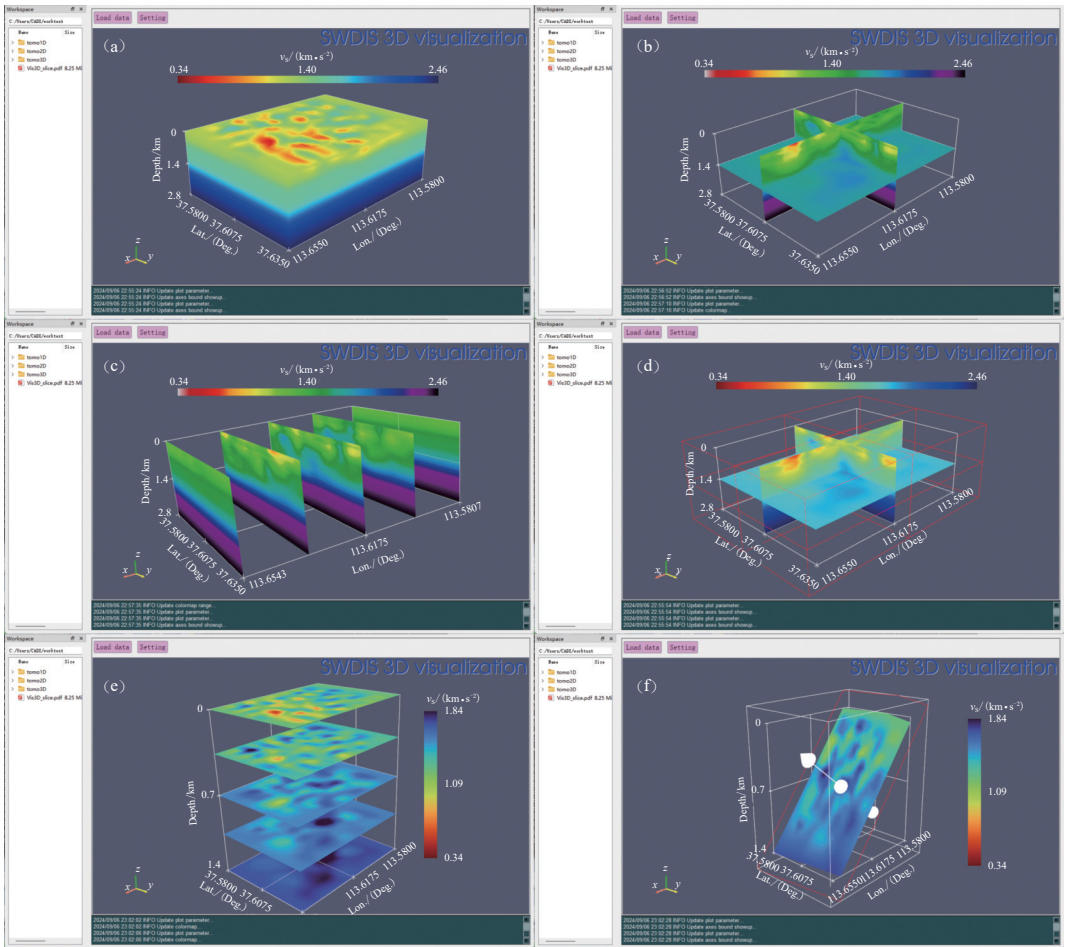


图 7 速度模型的三维可视化

- (a) 体渲染显示; (b) 正交切片组显示; (c) 横向切片显示; (d) 交互式正交切片显示;
(e) 深度切片显示; (f) 任意斜切面显示(用户自定义方向)

Fig. 7 Three-dimensional visualizations of a seismic velocity model

- (a) Volume-rendered visualization; (b) Orthogonal slice visualization; (c) Longitudinal slice visualization; (d) Interactive orthogonal slice visualization; (e) Depth slice visualization; (f) Arbitrary oblique section visualization with user-defined orientation

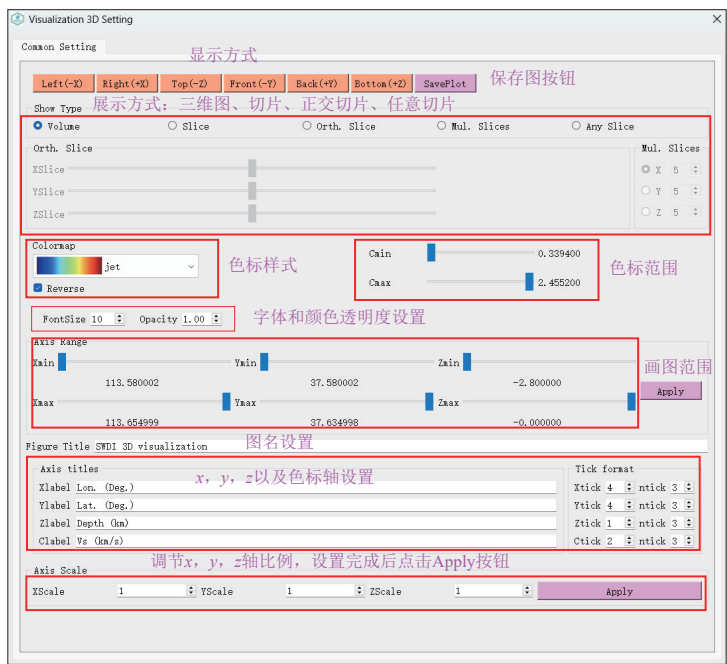


图 8 三维可视化交互对话框

Fig. 8 Dialog of three-dimensional visualization

图像显示、图像的保存、色标种类和色标范围的选择、字体大小和透明度的设置、模型显示范围的设置、坐标轴刻度和比例的设置等。三维可视化交互参数对话框提供了三维显示类型如体(volume)、切片(slice)、正交切片(orthogonal slice)、不同方向上的多个切片(multiple slices)、任意切片(any slice)。这些功能使用户能更加高效地探索三维模型数据,而无需花时间学习诸如Paraview (Ayachit, 2015)等大型三维可视化工具,此外可支持保存高分辨率图件。

3 总结

本文设计并实现了一款基于PyQt5的面波频散曲线成像工具SWDIT,详细介绍了其用户界面的设计和基本功能。SWDIT集成了半波长法、三维面波走时成像及三维模型可视化等多项功能。该软件不仅提供丰富的频散反演功能,还拥有直观友好的用户界面,简化了复杂反演资料的准备过程。此外,SWDIT支持在Windows 11系统上进行一键部署。下一步SWDIT软件计划加入面波频散曲线提取功能,以提升其广泛的适用性。

参 考 文 献

胡景, 赵韬, 白超英, 郭浩, 王莹, 李兴旺, 莘海亮. 2021. 2021年5月21日漾濞 $M_{\text{S}}6.4$ 地震震源区三维P和S波速度结构与地震重定位研究[J]. *地球物理学报*, **64**(12): 4488–4509.

Hu J, Zhao T, Bai C Y, Guo H, Wang Y, Li X W, Xin H L. 2021. Three-dimensional P and S wave velocity structure and earthquake relocation of the May 21, 2021 Yangbi $M_{\text{S}}6.4$ source region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **64**(12): 4488–4509 (in Chinese).

王华明, 胡景, 邵广周, 高级, 李兴旺, 黄宇奇, 白超英, 张海江. 2025. 小尺度直角坐标系台阵面波走时三维直接成像方法[J]. *地球物理学报*, **68**(3): 898–911.

- Wang H M, Hu J, Shao G Z, Gao J, Li X W, Huang Y Q, Bai C Y, Zhang H J. 2025. A new small-scale three-dimensional direct surface wave travel-time tomography method based on the Cartesian coordinate system[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **68**(3): 898–911 (in Chinese).
- 黄宇奇, 查华胜, 高级, 令狐建设, 宣金国, 周建斌, 董润平, 霍晶晶, 张海江. 2021. 基于密集台阵地震背景噪声成像预测煤矿瓦斯分布[J]. *地球物理学报*, **64**(11): 3997–4011.
- Huang Y Q, Zha H S, Gao J, Linghu J S, Xuan J G, Zhou J B, Dong R P, Huo J J, Zhang H J. 2021. Predicting the distribution of coalbed methane by ambient noise tomography with a dense seismic array[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **64**(11): 3997–4011 (in Chinese).
- 李雪燕, 陈晓非, 杨振涛, 王冰, 杨博. 2020. 城市微动高阶面波在浅层勘探中的应用: 以苏州河地区为例[J]. *地球物理学报*, **63**(1): 247–255.
- Li X Y, Chen X F, Yang Z T, Wang B, Yang B. 2020. Application of high-order surface waves in shallow exploration: An example of the Suzhou river, Shanghai[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **63**(1): 247–255 (in Chinese).
- 邵广周, 李远林, 岳亮. 2022. 主动源与被动源面波联合勘探在黄土覆盖区三维成像中的应用[J]. *物探与化探*, **46**(4): 897–903.
- Shao G Z, Li Y L, Yue L. 2022. Joint application of active and passive surface wave in 3D imaging of loess covered area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, **46**(4): 897–903 (in Chinese).
- 徐佩芬, 李世豪, 杜建国, 凌甦群, 郭慧丽, 田宝卿. 2013. 微动探测: 地层分层和隐伏断裂构造探测的新方法[J]. *岩石学报*, **29**(5): 1841–1845.
- Xu P F, Li S H, Du J G, Ling S Q, Guo H L, Tian B Q. 2013. Microtremor survey method: A new geophysical method for dividing strata and detecting the buried fault structures[J]. *Acta Petrologica Sinica*, **29**(5): 1841–1845 (in Chinese).
- 徐佩芬, 杜亚楠, 凌甦群, 游志伟, 姚金, 张华. 2020. 微动多阶瑞雷波 SPAC 系数反演方法及应用研究[J]. *地球物理学报*, **63**(10): 3857–3867.
- Xu P F, Du Y N, Ling S Q, You Z W, Yao J, Zhang H. 2020. Microtremor survey method based on inversion of the SPAC coefficient of multi-mode Rayleigh waves and its application[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **63**(10): 3857–3867 (in Chinese).
- 姚华建, 徐果明, 肖翔, 朱良保. 2004. 基于图像分析的双台面波相速度频散曲线快速提取方法[J]. *地震地磁观测与研究*, **25**(1): 1–8.
- Yao H J, Xu G M, Xiao X, Zhu L B. 2004. A quick tracing method based on image analysis technique for the determination of dual stations phase velocities dispersion curve of surface wave[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **25**(1): 1–8 (in Chinese).
- 姚华建, 罗松, 李成, 胡少乾, 方洪健. 2023. 基于面波走时的三维结构面波直接成像: 方法综述与应用[J]. *地球与行星物理理论评*, **54**(3): 231–251.
- Yao H J, Luo S, Li C, Hu S Q, Fang H J. 2023. Direct surface wave tomography for three dimensional structure based on surface wave traveltimes: Methodology review and applications[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, **54**(3): 231–251 (in Chinese).
- Ayachit U. 2015. *The ParaView Guide: A Parallel Visualization Application*[M]. Clifton Park, NY: Kitware Inc.: 1–276.
- Beyreuther M, Barsch R, Krischer L, Megies T, Behr Y, Wassermann J. 2010. ObsPy: A Python toolbox for seismology[J]. *Seismol Res Lett*, **81**(3): 530–533.
- Cabieces R, Olivar-Castaño A, Junqueira T C, Relinque J, Fernandez-Prieto L, Vackár J, Rösler B, Barco J, Pazos A, García-Martínez L. 2022. Integrated seismic program (ISP): A new python GUI-based software for earthquake seismology and seismic signal processing[J]. *Seismol Res Lett*, **93**(3): 1895–1908.
- Curtis A, Trampert J, Snieder R, Dost B. 1998. Eurasian fundamental mode surface wave phase velocities and their relationship with tectonic structures[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **103**(B11): 26919–26947.
- Fang H J, Yao H J, Zhang H J, Huang Y C, van der Hilst R D. 2015. Direct inversion of surface wave dispersion for three-dimensional shallow crustal structure based on ray tracing: Methodology and application[J]. *Geophys J Int*, **201**(3): 1251–1263.

- Harris C R, Millman K J, van der Walt S J, Gommers R, Virtanen P, Cournapeau D, Wieser E, Taylor J, Berg S, Smith N J, Kern R, Picus M, Hoyer S, van Kerkwijk M H, Brett M, Haldane A, Del Río J F, Wiebe M, Peterson P, Gérard-Marchant P, Sheppard K, Reddy T, Weckesser W, Abbasi H, Gohlke C, Oliphant T E. 2020. Array programming with NumPy[J]. *Nature*, **585**(7825): 357–362.
- Herrmann R B. 2013. Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research[J]. *Seismol Res Lett*, **84**(6): 1081–1088.
- Hunter J D. 2007. Matplotlib: A 2D graphics environment[J]. *Comput Sci Eng*, **9**(3): 90–95.
- Jiang C X, Denolle M A. 2020. NoisePy: A new high-performance python tool for ambient-noise seismology[J]. *Seismol Res Lett*, **91**(3): 1853–1866.
- Li C, Yao H J, Fang H J, Huang X L, Wan K S, Zhang H J, Wang K D. 2016. 3D near-surface shear-wave velocity structure from ambient-noise tomography and borehole data in the Hefei urban area, China[J]. *Seismol Res Lett*, **87**(4): 882–892.
- Liu Y, Zhang H J, Fang H J, Yao H J, Gao J. 2018. Ambient noise tomography of three-dimensional near-surface shear-wave velocity structure around the hydraulic fracturing site using surface microseismic monitoring array[J]. *J Appl Geophys*, **159**: 209–217.
- Luu K. 2019. evodcinv: Inversion of dispersion curves using evolutionary algorithms (Version 1.0.0) [CP/OL]. [2014–09–12]. <https://github.com/keurfonluu/evodcinv>.
- Pan L, Chen X F, Wang J N, Yang Z T, Zhang D Z. 2019. Sensitivity analysis of dispersion curves of Rayleigh waves with fundamental and higher modes[J]. *Geophys J Int*, **216**(2): 1276–1303.
- Rawlinson N, Sambridge M. 2004. Wave front evolution in strongly heterogeneous layered media using the fast marching method[J]. *Geophys J Int*, **156**(3): 631–647.
- Schroeder W J, Avila L S, Hoffman W. 2000. Visualizing with VTK: A tutorial[J]. *IEEE Comput Graph Appl*, **20**(5): 20–27.
- Shen W S, Ritzwoller M H, Kang D, Kim Y H, Lin F C, Ning J Y, Wang W T, Zheng Y, Zhou L Q. 2016. A seismic reference model for the crust and uppermost mantle beneath China from surface wave dispersion[J]. *Geophys J Int*, **206**(2): 954–979.
- Sullivan C B, Kaszynski A A. 2019. PyVista: 3D plotting and mesh analysis through a streamlined interface for the Visualization Toolkit (VTK) [J]. *J Open Source Softw*, **4**(37): 1450.
- Vantassel J P, Cox B R. 2021. SWinvert: A workflow for performing rigorous 1-D surface wave inversions[J]. *Geophys J Int*, **224**(2): 1141–1156.
- Wathelet M, Chatelain J L, Cornou C, Giulio G D, Guillier B, Ohrnberger M, Savvaidis A. 2020. Geopsy: A user-friendly open-source tool set for ambient vibration processing[J]. *Seismol Res Lett*, **91**(3): 1878–1889.
- Xia J H, Miller R D, Xu Y X, Luo Y H, Chen C, Liu J P, Ivanov J, Zeng C. 2009. High-frequency Rayleigh-wave method[J]. *J Earth Sci*, **20**(3): 563–579.
- Zhao D P, Hasegawa A. 1993. P wave tomographic imaging of the crust and upper mantle beneath the Japan Islands[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **98**(B3): 4333–4353.