

# 瑞雷面波勘探技术研究现状及发展

杨莎莎, 李瑜\*, 李刚, 刘聪, 胡雪婷, 高帅锋

西京学院, 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2022年12月13日; 录用日期: 2023年1月3日; 发布日期: 2023年1月17日

## 摘要

作为一门新型的岩土工程地球物理探测技术, 瑞雷面波探测有着其它技术无可比拟的优势, 国内外关于瑞雷面波勘探方面的实践和理论研究目前日益增多。本文对国内外瑞雷面波勘探方法研究进行了调研, 从数据采集、曲线提取、曲线反演三个方面对瑞雷面波勘探的研究现状进行了详细总结, 并探讨了当前瑞雷面波勘探中存在的实践和理论问题。

## 关键词

瑞雷面波勘探, 现状, 展望

# Research Status and Development of Rayleigh Surface Wave Exploration Technology

Shasha Yang, Yu Li\*, Gang Li, Cong Liu, Xueting Hu, Shuaifeng Gao

Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Dec. 13<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jan. 3<sup>rd</sup>, 2023; published: Jan. 17<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

As a new geophysical exploration technology of geotechnical engineering, Rayleigh surface wave exploration has incomparable advantages over other technologies. At present, the practice and theoretical research on Rayleigh surface wave exploration at home and abroad are increasing. This paper investigates the research of Rayleigh surface wave exploration methods at home and abroad, summarizes the current research status of Rayleigh surface wave exploration from three

\*通讯作者。

aspects of data acquisition, curve extraction and curve inversion, and discusses the practical and theoretical problems in current Rayleigh surface wave exploration.

## Keywords

Rayleigh Surface Wave Exploration, Present Situation, Expectation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## 1. 研究背景

在地震中，瑞雷波是一种危害性最大的地震波。所以，人们早期主要重点研究瑞雷波自身特性，通过各种方式来减少其危害[1]。后来当 Thomson、Haskell 等人提出了瑞雷波在非平衡介质上传播的频散特征后，就将它视为有效信号并利用其频散特征来测量与分析地下介质特性，进行浅层地表勘探研究[2]，进而形成了瑞雷面波勘探技术。列出了常见的瑞雷面波勘探方法以及各自的特点见表 1。

Table 1. Classification of Rayleigh wave method

表 1. 瑞雷波法的分类

分类	激发源	面波频带宽	面波能量	探测深度	层厚度分辨率
地球构造探测	天然地震	0.01~数 Hz	大	$N \times 10$ km	$\geq 1000$ m
石油地震勘探	人工震源	1~30 Hz	中等	10~300 m	$\geq 5$ m
瞬态面波技术	人工震源	1~200 Hz	中等	0.1~50 m	$\geq 0.1$ m
稳态面波技术	人工震源	2~50 Hz	中等	1~50 m	
长微动波法	天然震动	<1 Hz	弱~中等	$\sim n \times 10^3$ m	
短微动波法	天然常时微动	$\geq 1$ Hz	弱		

根据质点震动的方式可将面波分为瑞雷波和勒夫波，目前在面波勘探中主要运用的是瑞雷波，主要是因为数据采集中受到的水平方向干扰较为明显，很难获得高质量的勒夫波，而瑞雷波质点位移的垂直分量约为水平分量的 1.5 倍，数据采集的信噪比高，有利于数据分析和地质解释[3]。并且在近表层的地球物理过程中，瑞雷波探测方法具有快速无损、适用性广泛、抗干扰性能强、信噪比高、易识别、浅层分辨率高等特点。因此可以看出，瑞雷波勘探技术将会是未来近地表地球物理勘察与工程无损检测领域中最具发展前景的地动勘察技术之一[4]。

但是，目前国内外针对瑞雷波探测最新研究进展的全面总结还较为不足，针对于此，本文在大量检索国内外文献的基础上，对瑞雷波勘探的基本流程、发展历程和研究现状以及当前瑞雷面波勘探中存在的问题进行系统的梳理、总结和分析。

## 2. 瑞雷面波勘探技术国内外发展与现状

### 2.1. 国外发展与现状

1887 年，英国物理学家 Rayleigh 发现了瑞雷波的存在，其本质是由自由表面边界处的 P 波和 SV 波

相长干涉叠加而形成[5]。20世纪50年代初期,研究人员为了揭示瑞雷波在地球层状介质中传播的频散特征[6][7][8][9],于是开展了通过从天然或地动记录中的瑞雷波探索地球结构的工作探索[10]。1983年,Stoke II and Nazarian 等人首先以采用重锤作为震源,进行频谱快速分析建立和快速测量土层波速剖面而获取了试验初步成功,并提出了一种面波频率分析方法的新技术方案(SASW)[11],利用分析面波的频散曲线确定近土壤的S波速度断面。1999年, Park 和夏江海(Xia J)教授等人建立了多道面波分析法(即MASW法)。因为是建立在多通道接收信号的基础上来反演土壤的地层特征和剪切波速,从而能够比较方便的将基阶面波与非基阶面波、体波和其他噪声等区别出来,这也避免了在SASW法上发生的空间假频现象,也因此大大提高了土地测量的准确度和安全性[12][13][14]。2009年,张大洲等人研究出截断更高模式瑞雷波的近似表示技术。上述研究加深了人们对多模瑞雷波以及不同技术中瑞雷波传输特征的了解[18]。2016年Lu等提出了热浴模拟退火法,该方法更适用于反演频散曲线[15]。2017年, Sylvain Pasquet 和 Ludovic Bodet 基于邻域搜索算法建立了一套从面波信号采集-频散曲线提取-频散曲线反演-插值形成二维剖面的流程(SWIP),成功反演了面波四参数即横波速度、层厚、纵波速度和密度[16]。2018年, Yamanaka 等利用马尔可夫链蒙特卡罗法对频散曲线反演进行了研究[17]。

## 2.2. 国内发展与现状

在1987年,我国在铁路建设里首先引入的GR 810式面波勘察装置,仅用来解决轨道与路面工程的勘探问题[18]。1988年,吴世明等人在地层处理与路面测量等方面,开展了较大规模的测试研究工作[19][20]。1989年,杨成林等人构建了稳态瑞雷波法勘探体系,并在对瑞雷波方法的地基处理效果评估等领域展开了探索[21]。1993年,刘云帧等人通过自行制作的多道大规模地震数值采集与处理系统,将瞬态面波的深度从10米上升到了30米,在状况较好的情况下能够做到50米以上,基本可以适应于岩土施工勘察的要求[22]。1996年,吴世明发表了专著《土介质中的波》,书中对瑞雷波勘查中的若干问题作出了系统论述[23]。2010年,夏江海等出勒夫波多道分析法(MALW),自此面波勘探基于多道分析的方法奠定了基础,此后诸多的面波反演算法都基于多道分析方法[24][25]。2018年,曹丹萍等在基于深度学习的EI弹性参数反演中,构造了深度神经网络模型[26]。该方法在现场数据预测中取得了理想的结果,预测的纵横波速度具有很高的精确度,预测的密度比传统的反演方法更准确,更稳定,说明了其可行性和实用性。同年,袁三一首次采用卷积神经网络对地震波形分类和首次破碎(FB)采集,使用合成和实际数据证明了基于卷积神经网络的波形分类的有效性,结果表明卷积神经网络是一种高效的自动数据驱动分类器和选择器[27]。

下面将从数据采集、曲线提取、曲线反演等三方面具体探讨国外对瑞雷波工程勘探的研究与发展。

## 3. 瑞雷面波勘探发展进程

### 3.1. 瑞雷波野外数据采集技术研究

瑞雷波后期处理成熟与否关键在于采集到最大的信噪比、以及根据瑞雷波的特点而收集到最高信噪比的原始地震数据,所以,针对瑞雷波后期处理来说,对野外数据参数的合理设置才是最优解。在野外实践资料采集时,还必须通过现场反复测试的方式来最终确认其采集参数。

1993年,李庆忠利用“相连信号功率谱”方法,求取了信号和随机噪声之间的差值,并取得了较好的效果成效[28]。刘洋、牛聪、张军华、王红玲等人分别对比研究了各种方法信噪比及计算公式的特点,找出了适用性更广、效果更好的假设条件,并发现时域法、统计平均法等在一定水平层位下的适用性比较好;相互相关法的倾斜度和双曲共同相轴法计算峰值信噪比的优势主要体现在以下几点:叠加法偏差很小,精度最高,局限性比较高[29][30][31][32][33]。频率域估计法方法简单、精确,但徐辉群等人经

过优化方法与步骤, 得出了频率域估计方法, 其估算结果更适合于条目的层的裂隙区变化, 从而提高了估计准确度[34]。莫延刚等用 SVD 奇异值分析法估计的信噪比, 计算量一般很大, 通过修正就能够降低估计量, 比较有利于去除错误信息的产生相关性[35]。经过研究, Zhao Y 和 Lin H 等人认为在信噪比算法中, 时间窗口选择和资料频带对信噪比计算的影响并不明显[36] [37]。虽然以上学者在数据参数上不断改善优化, 但通过这些方法在噪声、道数、频带等数据上进行对比, 存在着各自的局限性, 无法满足瑞雷面波勘探技术的快速发展。由于瑞雷波是一种由横波和纵波通过交错叠加产生的次声波, 于是将横波勘探与纵波勘探的各项成果进行联合研究, 有效提升了瑞雷波地震资料的精度, 进而更容易获得高信噪比的原始地震记录。李怀良等在多波采集技术中加入有限差分算法, 消除起伏地表的边界影响, 有效压制干扰波[38]。邱新明等将三分量震源和三分量检波器相结合进行瑞雷面波数据采集工作, 获得更为精细和准确的浅地表横波速度结构[39]。

随着瑞雷波勘探技术的不断发展, 传统数据采集技术很难获得重大突破, 已无法满足瑞雷波勘探技术的研究步伐, 而通过多波探测技术可以获取更高分辨率的地震资料, 也可以确定小构造、小断裂、等细微的地貌现象。因此本文认为采用多波联合勘探技术进行数据采集, 是今后瑞雷波勘探工作野外数据采集的重要发展方向。

### 3.2. 瑞雷面波频散曲线提取研究

对于在高信噪比的野外实测瑞雷波等地震数据中提取高精度频散波形的后续反演, 国内外许多研究者给出了不同方法。

2010 年, 邵广周等[40]基于倾斜-叠加( $\tau$ - $p$ )转换探索了瑞雷波频散曲线获取的可能性; 2015 年, 张大洲等[41]和 Shao 等[42]探讨了基于广义 S 变换算法(简称 GST)开展瑞雷波频散曲线获取的可能性; 2018 年, 陈杰等[43]采用多重滤波法(简称 MFA)获取了相速度频散曲线; 2019 年, Lu 等[44]、Dai 等[45]和 Li 等[46]基于频率-波数( $f$ - $k$ )变换算法进行了瑞雷波频散曲线提取及应用研究; 2020 年, Li 等[47]利用支持向量机(简称 SVM)的方法进行了多模式表面波分离和滤波。这些研究成果提高了主动源法瑞雷波频散曲线提取的精度和分辨率, 为后续瑞雷波频散曲线反演奠定了基础。结果表明, 通过主动源方法所获得的瑞雷波频散曲线, 一般表现为低频段的清晰度小、准确性较低, 而通过微动面波记录则能够提升瑞雷波低频频散曲线的准确性[48]。2019 年, 为继续推广微动面波频散曲线获取方法的开发, Wang 等[49]、吴华礼等[50]和李雪燕等[51]采用频率-贝塞尔变换算法(简称 F-B 法)显著提升了微动面波频散曲线的准确性和清晰度; 2020 年, Liu 等[52]基于波束聚焦形成算法, 得到了拟线性的微动面波频分布曲线。上述成果, 有效克服了主动源低频频散曲线的准确度偏低问题, 并大大提高了瑞雷波测量深度。

通过以上学者的研究发现, 在瑞雷波频散曲线提取技术中, 虽然主动源法与被动源法都有各自的优缺点, 但可以采用两种方式的联合反演, 通过被动源法提升瑞雷波低频段频散数据准确度, 主动源法提升瑞雷波高频段频散数据准确度, 利用主动源法和被动源法的结合, 可以提升瑞雷波频散曲线的获取准确度、分辨率, 还可以增加瑞雷波监测深度, 为后续瑞雷波频散曲线反演的研究道路奠定基础。

### 3.3. 瑞雷面波频散曲线反演研究

瑞雷波频散曲线的反演是一种典型的高度非线性、多参数、多极值的地球物理反演问题和优化计算问题。对此问题, 地球物理学家多年来提出了各种算法, 并取得了较好的应用效果。而现有的瑞雷波反演方法可以大致划分为线性局部优化算法和非线性全局优化算法两大类。

目前应用瑞雷波频散曲线反演的局部线性化分析方法一般有: 最小二乘法和奇异值分解算法[53] [54] [55]、Occam 算法[56]、基于最速下降法的波动方程频散曲线反演算法[57]等。不过这些算法普遍存在局



限性,如最小二乘法能够反演横波速度和地层厚度;奇异值分解算法和 Occam 算法稳定性好、精度高,而且能自动分层和反演地层参数,但严重依赖初始模型、人为误差较大、容易陷入局部极小值、计算时需要求解偏导数获得梯度方向等问题,极大地限制了其应用效果与应用领域。随后地球物理学家发现非线性全局优化算法对初始模型的依赖性不强,具有较强的全局寻优和非线性反演映射能力,因此在面波频散曲线反演研究的应用中十分广泛。如遗传算法[58]、模拟退火算法[59]、人工神经网络[60]、自然邻域算法[61]、广义模式识别算法[62]、混合演化算法[63]、粒子群优化算法[64]、差分演化算法[65]、种群迁徙智能优化算法[66]、反向追踪算法[67]、人工蜂群算法[68]、灰狼优化算法[69]、自适应混沌遗传粒子群算法[70]等。

以上学者将各种算法引入到瑞雷波频散曲线反演中,取得了良好的效果,这极大促进了瑞雷波反演领域的进步。非线性全局优化算法的开发,极大地促进了在水平层状介质中面波频散曲线反演技术的发展进步,扩展了其应用的领域。然而,任何一种方法都不是绝对完美的,非线性全局优化算法由于对初始模型选取的要求下降,并且在运算中无需计算偏导数等优势,在频散曲线反演中发展十分迅速,但往往面临着诸如运算时长增大、编程困难、容易出现“早熟”收敛等缺陷,使得其发展收到了阻碍,这也是未来需要重点研究的部分。

#### 4. 存在问题及展望

国内外众多学者和科研人员的不懈努力,极大地推动了瑞雷波勘探技术的发展。但是,应当意识到基于瑞雷波研究工作的复杂性,目前瑞雷波探测技术基础还不够完善,其应用领域也受到了一定限制,仍有诸多重点和难点问题亟待解决,它们可能将是瑞雷波勘探今后重要的发展方向。作者认为主要体现在如下几方面:

1) 在瑞雷波野外数据采集技术中,利用纵波进行野外数据采集的方法存在诸多局限性,而多波联合勘探技术可获得分辨率更高的地震资料。因此,本文认为多波联合勘探技术是浅地表瑞雷波野外数据采集的重要发展方向。

2) 由于传统主动源法与被动源法的频散曲线获取方式,均存在着精确度不够、可靠性不足等问题,本文认为在今后的研究中可采取瑞雷波频散曲线联合反演,以进一步提升瑞雷波频散曲线获取的准确度和分辨率及其检测深度,为后续瑞雷波频散曲线反演的研究道路奠定基础。

3) 瑞雷波频散曲线反演中,由于运算时长增大、容易出现“早熟”收敛等缺陷,不适合大量数据处理,可通过深度神经网络模型处理非线性问题且预测速度较快,因此本文认为深度学习是今后频散曲线反演问题的重要发展方向。

4) 不管是线性化局部优化算法,还是非线性全局优化算法,都是基于介质模型的水平层状介质假设,因此仅能反演水平层状介质模型,对横向非均匀模型或存在局部不均匀体时并不适用。为了克服面波频散曲线反演的局限性,本文认为可直接从地震波场正演模拟出发,将全波形反演方法作为瑞雷波今后重要的研究课题。

#### 基金项目

西安市科技局高校院所科技人员服务企业项目(22GXFW0148);陕西省教育厅 2022 年度一般专项科研计划项目(22JK0597)。

#### 参考文献

- [1] 宋先海. 瑞雷波勘探理论及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

- [2] Anderson, D.L., Ben-Menahem, A. and Archambeau, C.B. (1965) Attenuation of Seismic Energy in the Upper Mantle. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **70**, 1441-1448. <https://doi.org/10.1029/JZ070i006p01441>
- [3] 黄真萍, 朱鹏超, 胡艳. 主动源与被动源面波勘探方法对比分析与应用[J]. 路基工程, 2015(1): 5.
- [4] 夏江海, 高玲利, 潘雨迪, 沈超, 尹晓菲. 高频面波方法的若干新进展[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2591-2605.
- [5] Rayleigh, L. (1887) On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid. *Proceedings of the London Mathematic Society*, **17**, 4-11. <https://doi.org/10.1112/plms/s1-17.1.4>
- [6] Thomson, W.T. (1950) Transmission of Elastic Waves through a Stratified Solid Medium. *Journal of Applied Physics*, **21**, 89-93. <https://doi.org/10.1063/1.1699629>
- [7] Haskall, N.A. (1953) The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **43**, 17-34. <https://doi.org/10.1785/BSSA0430010017>
- [8] Rosebaum, J.H. (1964) A Note on the Computation of Rayleigh Wave Dispersion Curves for Layered Elastic Media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **53**, 1013-1019. <https://doi.org/10.1785/BSSA0540031013>
- [9] Thrower, E.N. (1965) The Computation of the Dispersion of Elastic Waves in Layered Media. *Journal of Sound and Vibration*, **2**, 210-226. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(65\)90109-4](https://doi.org/10.1016/0022-460X(65)90109-4)
- [10] Dorman, J. and Ewing, M. (1962) Numerical Inversion of Seismic Surface Wave Dispersion Data and Crust Mantle Structure in the New York Pennsylvania Area. *Journal of Geophysical Research*, **67**, 5227-5241. <https://doi.org/10.1029/JZ067i013p05227>
- [11] Stokoe, K.H. and Nazarian, S. (1983) Effectiveness of Ground Improvement from Spectral Analysis of Surface Waves. *Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Helsinki, 23-26 May 1983, 91-94.
- [12] Park, C.B., Miller, R.D. and Xia, J. (1998) Imaging Dispersion Curves of Surface Waves on Multi-Channel Record. Society of Exploration Geophysicists, Houston, 1377-1380. <https://doi.org/10.1190/1.1820161>
- [13] Park, C.B., Miller, R.D. and Xia, J. (1999) Multichannel Analysis of Surface Waves. *Geophysics*, **64**, 800-808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- [14] Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., et al. (2000) Comparing Shear-Wave Velocity Profiles from MASW with Borehole Measurements in Unconsolidated Sediments, Fraser River Delta, BC, Canada. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, **5**, 1-13. <https://doi.org/10.4133/JEEG5.3.1>
- [15] 张大洲, 熊章强, 顾汉明. 高精度瑞雷波有限差分数值模拟及波场分析[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(4): 1313-1319.
- [16] Lu, Y., Peng, S., Du, W., et al. (2016) Rayleigh Wave Inversion Using Heat-Bath Simulated Annealing Algorithm. *Journal of Applied Geophysics*, **134**, 267-280. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.09.008>
- [17] Pasquet, S. and Bodet, L. (2017) SWIP: An Integrated Workflow for Surface-Wave Dispersion Inversion and Profiling Surface-Wave Inversion and Profiling. *Geophysics*, **82**, WB47-WB61. <https://doi.org/10.1190/geo2016-0625.1>
- [18] Yamanaka, H. and Chimoto, K. (2018) Variability of Shallow Soil Amplification from Surface-Wave Inversion Using the Markov-Chain Monte Carlo Method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **107**, 141-151.
- [19] 夏唐代, 陈云敏, 吴世明. 利用瑞雷波速度弥散特性反演地基参数[J]. 振动工程学报, 1991, 4(4): 31-37.
- [20] 陈云敏, 吴世明, 夏唐代. 用表面波谱分析方法检测 道路结构的质量[J]. 浙江大学学报, 1993, 27(3): 309-314.
- [21] 杨学林, 吴世明. 考虑高阶模态时 SASW 法的反演[J]. 浙江大学学报, 1996, 30(2): 149-156.
- [22] 杨成林. 瑞雷波勘探原理及其应用[J]. 物探与化探, 1989, 13(6): 465-468.
- [23] 刘云楨, 王振东. 瞬态面波法的数据采集处理系统及其应用实例[J]. 物探与化探, 1996, 20(1): 28-34.
- [24] 吴世明. 土介质中的波[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [25] Xia, J., Miller, R.D. and Park, C.B. (1999) Estimation of Near-Surface Shear-Wave Velocity by Inversion of Rayleigh Waves. *Geophysics*, **64**, 691-700. <https://doi.org/10.1190/1.1444578>
- [26] Xia, J., Xu, Y., Luo, Y., et al. (2012) Advantages of Using Multichannel Analysis of Love Waves (MALW) to Estimate Near-Surface Shear-Wave Velocity. *Surveys in Geophysics*, **33**, 841-860. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9174-2>
- [27] Cao, D., An, P. and Liu, S. (2018) Elastic-Parameters Inversion from EI Based on the Deep-Learning Method. Society of Exploration Geophysicists, Houston, 640-644. <https://doi.org/10.1190/segam2018-2998479.1>
- [28] Yuan, S., Liu, J., Wang, S., et al. (2018) Seismic Waveform Classification and First-Break Picking Using Convolution Neural Networks. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **15**, 272-276. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2785834>

- [29] 李庆忠. 走向精确勘探的道路: 高分辨率地震勘探系统工程剖析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- [30] 刘洋, 李承楚. 地震资料信噪比估计的几种方法[J]. 石油地球物理勘探, 1997(2): 257-262+304.
- [31] 牛聪. 地震记录信噪比估算方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- [32] 王红玲. 地震记录信噪比估算方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- [33] 牛聪, 詹毅, 李辉峰. 对比地震记录信噪比的几种估算方法[J]. 物探化探计算技术, 2006, 28(1): 5-9+1.
- [34] 张军华, 藏胜涛, 周振晓, 王静, 单联瑜, 徐辉, 傅金荣, 于海铖, 步长城. 地震资料信噪比定量计算及方法比较[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(4): 481-486+528+384-385.
- [35] 许辉群, 桂志先. 信噪比数据体在标准层分析及断裂检测中的应用探讨(英文) [J]. 应用地球物理, 2014, 11(1): 73-79+117.
- [36] 莫延钢. 低信噪比地震资料分析监控技术[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(华东), 2014.
- [37] Zhao, Y., Liu, Y., Li, X., et al. (2014) Time-Frequency Domain SNR Estimation and Its Application in Seismic Data Processing. *Journal of Applied Geophysics*, **107**, 25-35. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.05.002>
- [38] Lin, H., Li, Y., Ma, H., et al. (2016) Simultaneous Seismic Random Noise Attenuation and Signal Preservation by Optimal Spatiotemporal TFPF. *Journal of Applied Geophysics*, **128**, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.03.013>
- [39] 李怀良, 庾先国, 蒋鑫. 一种复杂山地多波勘探的有限差分模拟方法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(23): 31-36.
- [40] 邱新明, 王赞, 韦永祥, 等. 多分量面波研究进展[J]. 石油物探, 2021, 60(1): 46-56.
- [41] 邵广周, 李庆春. 联合应用  $\tau$ - $p$  变换法和相移法提取面波频散曲线[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(6): 836-840.
- [42] 张大洲, 练小聪, 杨威, 等. 基于多模式分离的 S 变换瑞雷波频散曲线提取[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015, 46(8): 2950-2956.
- [43] Shao, G., Tsoulias, G.P. and Li, C. (2016) Detection of Near-Surface Cavities by Generalized S-Transform of Rayleigh Waves. *Journal of Applied Geophysics*, **129**, 53-65. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.03.041>
- [44] 陈杰, 熊章强, 张大洲, 等. 基于多模式的多重滤波方法提取瑞雷波频散曲线[J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(4): 411-417.
- [45] Li, X., Li, Q. and Shen, H. (2019) Rayleigh-Wave Imaging of the Loess Sediments in the Southern Margin of the Ordos Basin by Improved Frequency-Wave Number Transform. *Journal of Geophysics and Engineering*, **16**, 77-84. <https://doi.org/10.1093/jge/gxy006>
- [46] Li, X., Li, Q., Lei, Y., et al. (2020) Active and Passive Source Rayleigh Wave Joint Imaging of the Shallow Structure in the Caotan Camp Area, Southwestern Ordos Basin. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **130**, Article ID: 105986. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105986>
- [47] Li, J., Chen, Y. and Schuster, G.T. (2020) Separation of Multi-Mode Surface Waves by Supervised Machine Learning Methods. *Geophysical Prospecting*, **68**, 1270-1280. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12927>
- [48] 徐义贤, 罗银河. 噪声地震学方法及其应用[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2618-2636.
- [49] Wang, J., Wu, G. and Chen, X. (2019) Frequency-Bessel Transform Method for Effective Imaging of Higher-Mode Rayleigh Dispersion Curves from Ambient Seismic Noise Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **124**, 3708-3723. <https://doi.org/10.1029/2018JB016595>
- [50] 吴华礼, 陈晓非, 潘磊. 基于频率-贝塞尔变换法的关东盆地 S 波速度成像[J]. 地球物理学报, 2019, 62(9): 3400-3407.
- [51] 李雪燕. 城市微动高阶面波在浅层成像中的应用[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [52] Liu, Y., Xia, J., Cheng, F., et al. (2020) Pseudo-Linear-Array Analysis of Passive Surface Waves Based on Beamforming. *Geophysical Journal International*, **221**, 640-650. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa024>
- [53] Xia, J., Miller, R.D. and Park, C.B. (1999) Estimation of Near-Surface Shear-Wave Velocity by Inversion of Rayleigh Waves. *Geophysics*, **64**, 691-700. <https://doi.org/10.1190/1.1444578>
- [54] Li, X. and Li, Q. (2016) Near-Surface Ambient Noise Tomography in the Baogutu Copper Deposit Area. *Journal of Geophysics and Engineering*, **13**, 868-874. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/13/6/868>
- [55] Wu, D., Wang, X., Su, Q., et al. (2019) A MATLAB Package for Calculating Partial Derivatives of Surface-Wave Dispersion Curves by a Reduced Delta Matrix Method. *Applied Sciences*, **9**, 5214. <https://doi.org/10.3390/app9235214>
- [56] Zhang, S.X., Chan, L.S., Chen, C.Y., et al. (2003) Apparent Phase Velocities and Fundamental-Mode Phase Velocities of Rayleigh Waves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **23**, 563-569. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(03\)00069-1](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(03)00069-1)

- [57] Li, J., Lin, F.C., Allam, A., *et al.* (2019) Wave Equation Dispersion Inversion of Surface Waves Recorded on Irregular topography. *Geophysical Journal International*, **217**, 346-360. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz005>
- [58] Lei, Y., Shen, H., Li, X., *et al.* (2019) Inversion of Rayleigh Wave Dispersion Curves via Adaptive GA and Nested DLS. *Geophysical Journal International*, **218**, 547-559. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz171>
- [59] Beaty, K.S., Schmitt, D.R. and Sacchi, M. (2002) Simulated Annealing Inversion of Multimode Rayleigh Wave Dispersion Curves for Geological Structure. *Geophysical Journal International*, **151**, 622-631. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01809.x>
- [60] 周晓华, 林君, 陈祖斌, 等. 改进的神经网络反演微动面波频散曲线[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(3): 900-906.
- [61] Sambridge, M. (1999) Geophysical Inversion with a Neighbourhood Algorithm—I. Searching a Parameter Space. *Geophysical Journal International*, **138**, 479-494. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1999.00876.x>
- [62] (2012) Rayleigh-Wave Theory and Application: Proceedings of an International Symposium Organised by the Rank Prize Funds at The Royal Institution, London, 15-17 July, 1985. Springer Science & Business Media, Berlin.
- [63] Song, X., Tang, L., Lv, X., *et al.* (2012) Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Surface Wave Analysis. *Computers & Geosciences*, **42**, 7-17. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.02.015>
- [64] Song, X., Tang, L., Lv, X., *et al.* (2012) Application of Particle Swarm Optimization to Interpret Rayleigh Wave Dispersion Curves. *Journal of Applied Geophysics*, **84**, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.05.011>
- [65] Song, X., Li, L., Zhang, X., *et al.* (2014) Differential Evolution Algorithm for Nonlinear Inversion of High-Frequency Rayleigh Wave Dispersion Curves. *Journal of Applied Geophysics*, **109**, 47-61. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.07.014>
- [66] Song, X., Li, L., Zhang, X., *et al.* (2014) An Implementation of Differential Search Algorithm (DSA) for Inversion of Surface Wave Data. *Journal of Applied Geophysics*, **111**, 334-345. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.10.017>
- [67] Song, X., Zhang, X., Zhao, S., *et al.* (2015) Backtracking Search Algorithm for Effective and Efficient Surface Wave Analysis. *Journal of Applied Geophysics*, **114**, 19-31. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.01.002>
- [68] Song, X., Gu, H., Tang, L., *et al.* (2015) Application of Artificial Bee Colony Algorithm on Surface Wave Data. *Computers & Geosciences*, **83**, 219-230. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.07.010>
- [69] Song, X., Tang, L., Zhao, S., *et al.* (2015) Grey Wolf Optimizer for Parameter Estimation in Surface Waves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **75**, 147-157. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.04.004>
- [70] 杨博, 熊章强, 张大洲, 等. 利用自适应混沌遗传粒子群算法反演瑞雷面波频散曲线[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(6): 1217-1227.