



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Applied Geophysics—Article

## 主动源在高频被动源面波测量中的应用

程逢<sup>a</sup>, 夏江海<sup>b,\*</sup>, 沈超<sup>c</sup>, 胡悦<sup>a</sup>, 徐宗博<sup>d</sup>, 宓彬彬<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Subsurface Imaging and Sensing Laboratory, Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

<sup>b</sup> School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

<sup>c</sup> School of Measurement and Testing Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

<sup>d</sup> Department of Geosciences, Boise State University, Boise, ID 83725, USA

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 15 October 2017

Revised 24 March 2018

Accepted 16 August 2018

Available online 23 August 2018

#### 关键词

被动源面波

主动源面波

高频

混合源面波

空间自相关

被动源面波多道分析

### 摘要

被动源面波可弥补主动源面波测量中低频信息缺失的不足, 因此引起人们的广泛研究。然而, 被动源面波法不能提供高达几十赫兹的相速度信息, 因此需要通过主动源面波法拓展频率范围。为了减少野外工作量, 本文设计了一种高频被动源面波的勘探策略, 即在连续的被动源面波测量过程中引入人工震源。我们称其为“混合源面波”(mixed-source surface-wave, MSW)测量。研究人员分别在学校内、马路边、铁路旁这三个噪声等级不同的地点记录短时长(10 min内)被动源面波和混合源面波。频谱分析表明, 在连续的被动源面波观测中加入人工震源可以改善高频段能量。在记录的时间序列中分别应用了空间自相关(spatial autocorrelation, SPAC)法与基于互相关的被动源面波多道分析方法(multichannel analysis of passive surface, MAPS), 结果表明该施工策略在高频段面波相速度分析中有很大的灵活性与适用性。笔者认为, 相较于进行单一的主动源面波测量或被动源面波测量, 在地震勘探中进行混合源面波测量具有建设性意义。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

鉴于其非破坏性、非侵入性、经济高效、可精确分辨等特点, 面波法已经被越来越多地应用在多尺度工程和地质勘查中。考虑到面波的频散特性, 为了得到客观的探测深度和特定的分辨率, 面波的频率特征对岩土工程应用至关重要。最近, 关于产生穿透力更强的低频面波的研究日益引发人们的兴趣[1]。

面波测量通常使用主动源和被动源两种震源。常见的主动源包括锤击、落重和谐波振动筛。在主动地震源分析中, 多道面波分析(multichannel analysis of surface wave, MASW)方法[2–6]能将波形数据从时间-偏移

( $t-x$ )关系转换成频率-速度( $f-v$ )关系, 从而由多道面波数据直接确定相速度。为了提高各向异性介质中面波方法的横向分辨率, Hayashi和Suzuki [7]在MASW中引入常见的共中点互相关分析。然而, 由于低频能量产生困难, 合理便携式主动源对深层土壤进行采样的能力通常会受到限制。

微震(< 0.6 Hz, 海洋引发的自然噪声)和地脉动(> 1 Hz, 车辆交通、铁路或机械等人为噪声)等被动源面波通常频率更低, 可拓宽探测深度, 因此具有很大的利用价值。事实上, 日本对利用地震台站检测到的面波地脉动勘察方法[8]等被动源面波应用已有深入的研究。利用地脉动并假设其主要由瑞利波能量贡献, 剪切

\* Corresponding author.

E-mail address: [jhxia@zju.edu.cn](mailto:jhxia@zju.edu.cn) (J. Xia).

波速度 ( $V_s$ ) 可通过反演空间自相关 (spatial autocorrelation, SPAC) 曲线得出[9–11]。Louie [12]提出折射微动方法是一种基于 $\tau$ - $p$ 变换或倾斜叠加的快速高效的被动源地震方法。Park等[13]引入一种方法, 将被动源面波的成像频散与基于相移法测量的主动方法相结合。Cheng等[14]通过基于互相关的方位改进了这种被动源面波方法, 从而得到被动源面波多道分析 (multichannel analysis of passive surface, MAPS) 法。

此外, 已有研究工作通过结合主动源面波和被动源面波的测量以拓展面波的探测深度而不用牺牲近地表分辨率[1,11,15–17]。然而, 当两种测量方式 (即频散图像或曲线) “硬” 结合时, 其结果可能不适用于进一步分析, 原因有以下两点: ①组合反演 $V_s$ 的空间分辨率会变得模糊, 因为被动源面波测量的空间采样间隔通常比主动源面波测量的间隔长几倍甚至10倍; ②主动和被动测量在频率重叠范围内可能存在较大差异, 因为主动测量在低频段的信息不准、所得相速度通常较慢[18], 而被动测量在高频段容易受到更高阶模式、假频和体波的干扰。

如果被动源面波法能够提供几十赫兹的相速度, 那么或许可以省去主动源面波测量, 而且野外工作量可以大幅减少。在本研究中, 我们提出在连续的被动源面波测量过程中引入人工震源这一施工策略来实现主、被动源面波方法的有机结合, 以达到高频被动源面波测量的目的。我们称这种包含被动源面波 (比如地脉动) 和人工震源的方法为“混合源面波” (mixed-source surface wave, MSW) 测量。本研究分别在学校内、马路边、铁路旁这三个噪声等级不同的地点进行, 并使用SPAC方法、MAPS方法和主动源面波方法进行测量。这一初步研究结果显示, 本文提出的结合的主、被动源面波法能够有效拓宽被动源面波测量的频率范围。

## 2. 被动源面波法

### 2.1. SPAC

Aki [9,19]提出一种从地震台阵记录的地脉动中确定相速度频散曲线的技术。他提出SPAC系数 $\rho(r, w)$ 作为关于给定间距 $r$ 和角频率 $w$ 的频率函数, 经过方位平均之后可写成以下形式:

$$\rho(r, w) = J_0\left(\frac{rw}{c}\right) \quad (1)$$

式中,  $J_0$ 是第一类的零级贝塞尔函数;  $c$ 是频率为 $w$ 时场地的相速度。假设波场由在所有方向上以相同功率传播

的面波组成。每种频率的相速度可由测得的SPAC系数反演后得到。获得SPAC系数的常见方法是对观察到的互功率谱进行总体平均, 并通过平均自功率谱对互功率谱进行归一化[20]。Weemstra等[21]在总体平均前归一化互功率谱, 得到以下SPAC系数:

$$\rho(r, w) = \left\langle \frac{\Re[u(x_1, w)u^*(x_2, w)]}{|u(x_1, w)||u(x_2, w)|} \right\rangle \quad (2)$$

式中,  $\langle \cdot \rangle$  表示总体平均;  $\Re[\cdot]$  是取复数的实数部分;  $u(x_k, w)$  是台站 $x_k$ 处噪声波场的功率。

根据由Aki [9]提出、Asten [22]进一步讨论的理论, 我们将用第一类的零级贝塞尔函数[式 (1)]拟合SPAC系数, 并定义拟合残差 $\varepsilon$ , 以反演得到一维 (one-dimensional, 1D) 相速度频散曲线。其中,  $\varepsilon$ 的定义如下:

$$\varepsilon(c_i, w_j) = \rho(r, w) - J_0\left(\frac{rw_j}{c_i}\right) \quad (3)$$

接着使用网格搜索寻找100~1000  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的相速度内和1~30 Hz频率内的最小L1范数残差 (步长分别为1  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和0.5 Hz)。

在各向同性的理想噪声波场中, 式 (2) 不需要方位平均。在真实应用中, 如果噪声源分布在某段时间内充分变化, 那么这一阶段内求得的时间平均值类似于在噪声源分布固定情况下的方位平均值[23,24]。这说明将这一方法扩展到具有固定主动源的线性阵列中是可行的。下文的应用将证明该假设的可行性。

### 2.2. MAPS

MASW法已应用于马路交通噪声, 从而获取低频频散信息[13]。为了降低被动源面波测量中的方位影响和空间假频, Cheng等[14]用互相关改进了该方法。本文作为初步研究工作, 在以下实测数据应用中只考虑沿线平面波传播情况 (图1)。有兴趣的读者可阅读参考文献[14]。安装在路边的检波器用于检测路面平面波的传播。检波器排列的末端施加主动源。我们期望在连续的被动源面波 (比如道路交通噪声) 测量中施加人工震源后可以检测到高频段能量, 并且有所改善。

根据Cheng等[14]的研究, 沿线平面波传播情况下的相对频散能量矩阵可计算如下:

$$E(f, v) = \left| \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N \exp\left(\frac{i2\pi f x_{jk}}{v}\right) \frac{C_{jk}^+(f) + C_{jk}^-(f)}{2} \right| \quad (4)$$

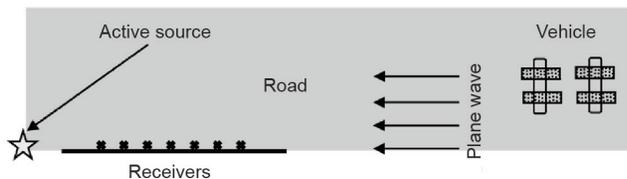


图1. 安装主动源的沿线平面波传播。

式中,  $E(f, v)$ 是关于特定频率 $f$ 和扫描相速度 $v$ 的相对频散能量矩阵;  $C_{jk}^+(f)$ 和 $C_{jk}^-(f)$ 分别是白噪化之后的第 $j$ 道和第 $k$ 道之间的互相关的因果和非因果部分的傅里叶变换;  $x_{jk}$ 对应检波器 $j$ 和 $k$ 的道间距;  $N$ 是总的检波器数。

为了改善相对频散能量矩阵的质量, 我们采用Cheng等[25]提出的地震噪声干涉处理, 其中包括单站数据预处理(分段、去均值、去趋势、带通滤波、时域归一化和频域归一化)、双站数据的互相关和信噪比(signal to noise ratio, SNR)加权叠加。

### 3. 三个测试点的 MSW 测量

如上所述, SPAC方法和MAPS方法应用于三个站点, 即在学校内、道路旁以及铁路沿线。我们粗略地将普通市区的被动源面波(如交通噪声)分为三个等级: L(轻)、M(中等)和S(强)。这三个等级数据示例可以被认为这三个噪声水平的对应表示。本节将介绍如何为MSW测量施加主动源信号源, 并检查其对高频被动源面波相速度分析的适用性。

#### 3.1. 测试点 1——L 级被动源面波

研究人员在武汉市中国地质大学地球物理与空间

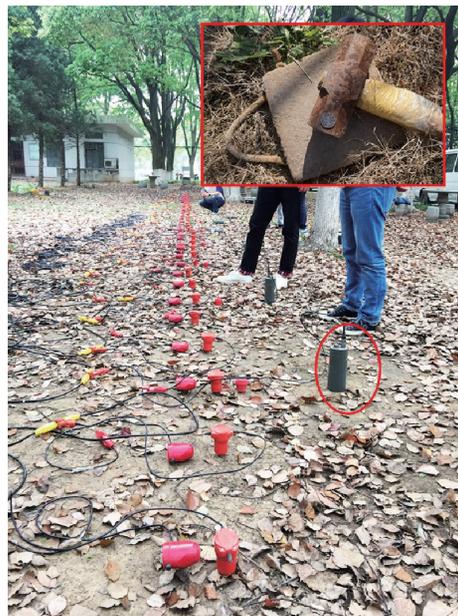


图2. 在地球物理与空间信息学院后院进行的主动源-被动源面波联合实验。

信息学院的后院进行了主动源-被动源面波联合实验(图2)。实验收集了48道主动源炮集记录。主动源是一个6.3 kg、垂直撞击6 in (1 in= 2.54 cm)的锤子板(图2中的红色矩形)。同时, 同步部署了具有15个RefTek数字转换器(图2中的红色椭圆)的对比线性阵列。实验过程中有几台数字转换器接触不良, 只剩下9台数字转换器运行良好。所有检波器都是4.5 Hz垂直分量地震检波器。主动源和被动源测量的空间采样间隔分别为0.5 m和1.5 m, 时间采样间隔分别为0.25 ms和8.0 ms。

很明显, 根据图3(a)显示, 在0.03~0.3 s之间记录到瑞利波完全分散。通过将高分辨率线性Radon变换

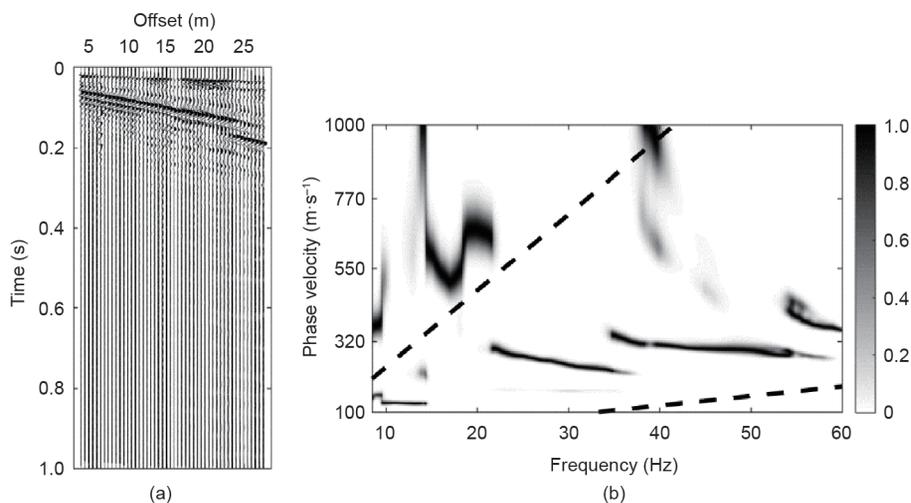


图3. (a) 48个4.5 Hz垂直分量的地震检波器, 空间采样间隔为0.5 m, 时间采样间隔为0.25 ms; (b) 归一化频散能量图像。

[26]应用于原始主动源记录来生成频散图像[图3 (b)]。频散图像表示有效波数区内的频散能量良好,其受奈奎斯特波数 $[1/(2dx)]$ 和最小波数 $[1/(ndx)]$ 之间的两条虚线限制。显然,由于缺乏低频( $< 20$  Hz)信息,主动源面波测量受限于其对深层土壤( $> 10$  m)进行采样的能力。

为了弥补主动源面波测量中低频信息的不足,该实验利用记录的被动源面波进行分析。注意,我们将连续时间序列分成两个10 min的数据集;前一个数据完全由“平静”的被动源面波组成,而后一个数据包含几个用锤子的主动源记录,即MSW数据。图4分别显示了两个数据集的典型10 s时间序列。在右侧8.5~9.0 s之间可以看到一个主动源炮集。将SPAC方法应用于预处理之后的被动源面波数据和预处理之后的MSW数据。得到的频散能量图像(图5)表明,被动源面波测量能够获得低频率段的频散信息。此外,结果还显示混合源测量[图5 (b)]将原来被动源面波测量的高频上限从30 Hz扩展到55 Hz[图5 (a)]。考虑到混合源面波测量有能力提供全频段信息,因此可以避免主动源面波方法的野外施工。

为了进一步论证MSW测量在高频被动源面波相速分析中的可行性,研究人员进行了频谱分析。结果表明,连续被动源面波观测期间施加人工震源可以明显改善该记录时间序列的较高频段能量[图6 (a)、(b)],进而说明了通过MSW测量进行高频被动源面波频散分析的可行性。与MSW频谱[图6 (b)]相比,主动源面波频谱在低频( $< 15$  Hz)段严重失真[图6 (c)]。

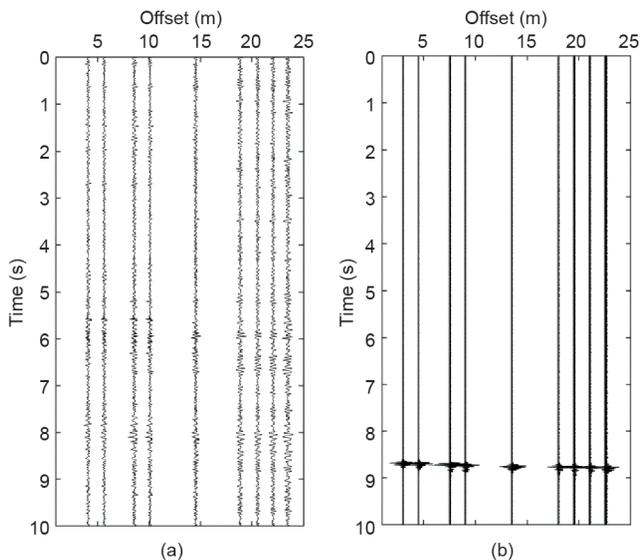


图4. (a) 在10 min内,一个10 s长的“平静”被动源面波记录;(b) 在10 min内,一个10 s长的混合源面波记录。

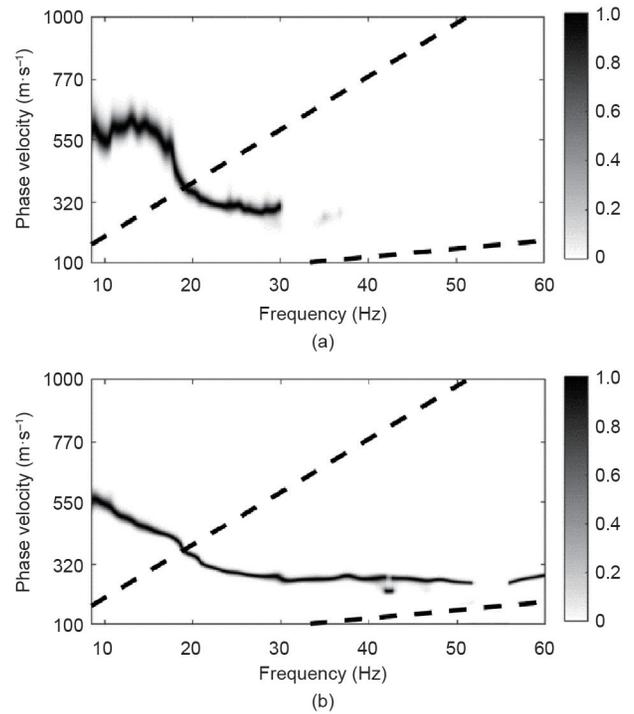


图5. 使用SPAC方法获得的频散能量图像。(a)“平静”被动源面波数据和(b)混合源面波数据。

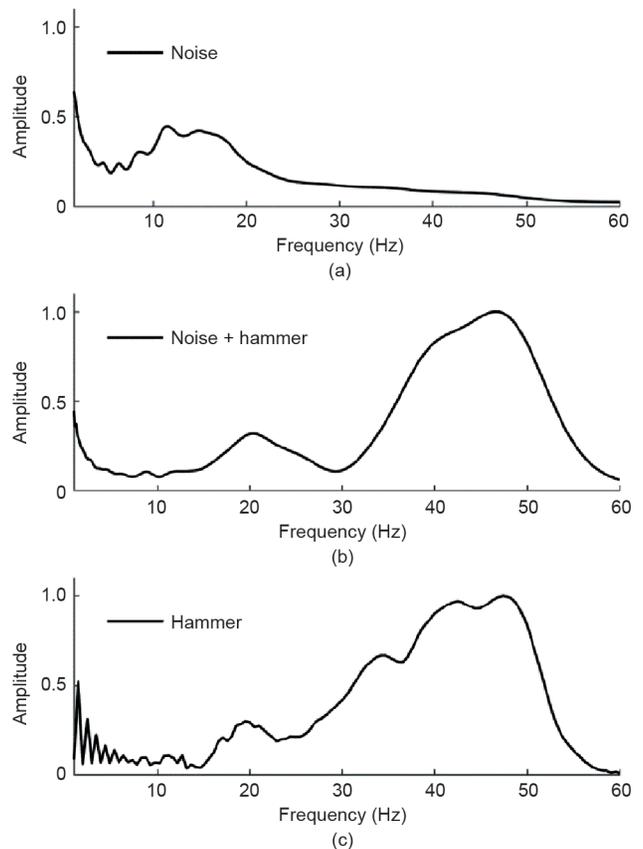


图6. (a)“平静”被动源面波的频谱分析;(b) MSW的频谱分析;(c) 主动源炮集记录的频谱分析。所有平均功率谱在1~60 Hz的频带中归一化。

我们使用主动源面波测量验证了被动源面波测量的准确性。由于主动源测量结果缺少高频段 ( $35 \text{ Hz} < f < 55 \text{ Hz}$ ) 的基阶模式, 我们将被动源测量结果与反演得到的主动源模型频散曲线[图7 (a) 中的浅灰色方块]进行了比较。反演得到的主动源模型频散曲线与MSW测量结果之间的最大误差约为7%, 这证明了所提方法的准确性。其中频散曲线[图7 (a) 中的深灰色菱形]的反演使用的是Levenberg-Marquardt方法[4,6,27,28], 以获得1D  $V_s$  曲线[图7 (b)]。

### 3.2. 测试点 2——M 级被动源面波

该测试于长沙市进行, 沿潇湘路的路边部署了12个2.5 Hz垂直分量检波器的线性阵列, 空间采样间隔固定为5 m, 时间采样间隔为2 ms。测线与河流、道路平行。为了检查施加人工震源对被动源面波测量的影响, 连续记录交通噪声10 min, 并且在记录的最后5 min期间连续施加五次人工震源。震源由一个10 kg的锤子垂直敲击6 in的板产生。

图8分别示出了这两个5 min噪声数据集中的从18 s到28 s的两个典型时间序列。如图8 (a) 所示可以区分出由车辆产生的几个线性事件。如图8 (b) 黑色箭头所示, 在26~27 s之间的人工震源记录是明显的, 但在远偏移距处衰减严重。与1号测试点的“平静”噪声环境不同, 由于交通噪声的严重干扰和强烈的土壤衰减而导致主动面波测量效果不佳。此处没有展示。实验还发现强加的人工震源并没有显著改善高频 (>20 Hz) 能量, 因为人工震源能量埋藏在强大的交通噪声中。然而, MSW的绝对振幅[图9 (b)]似乎仍然普遍高于原始被动

源面波[图9 (a)], 特别是在8~18 Hz的频率范围内。

采用SPAC方法[图10 (a)、(b)]和MAPS方法[图10 (c)、(d)]对被动源面波数据和MSW数据进行处理。由上述测量结果中拾取的可接受的频散曲线[图10 (e)]彼此可以很好地拟合, 相互佐证了这些测量结果的有效性。与被动源面波相比, MSW对高频 (>10 Hz) 段频散分析具有更好的适用性。另外, MSW的频散测量结果中14~18 Hz高频段被非相干能量污染的部分[图10 (c)]被显著削弱[图10 (d)]; 其对相干能量的影响将在后文中讨论。

### 3.3. 测试点 3——S 级被动源面波

该测试于岳阳市进行, 从北京到广州的铁路是中国最繁忙的铁路之一, 在这条铁路沿线部署了12个4.5 Hz垂向检波器, 空间采样间隔固定为10 m, 时间采样间隔为2 ms。在该测试中, 记录并分析了三种噪声数据集。第一个数据记录仅由“平静”的环境噪声组成; 在第二个数据观测期间, 一列客运列车和一列货运列车依次通过; 在第三个数据观测期间施加了四次人工震源。震源是当地发现的一个20 kg的大石块。

图11显示每个数据集的完整300 s噪声记录。两列列车的到达及其负载大小很容易区分[图11 (b)]。对每个数据集进行频谱分析 (图12), 我们发现与“平静”噪声 (深灰色线) 相比, 施加人工震源确实提高了MSW (白线) 的高频 (>5 Hz) 能量。有列车通过的噪声记录 (黑线) 在5~10 Hz的频率范围内显示出能量峰值, 但由于列车的快速驶离, 高能的高频 (10 Hz以上) 能量急剧衰减。注意, 在高频 (> 18 Hz) 处, MSW频谱能量随着各道

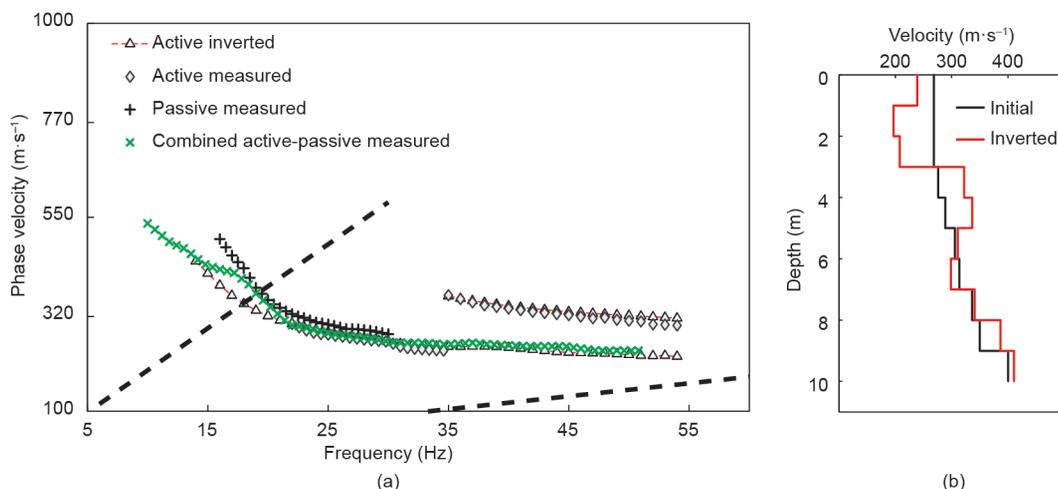


图7. (a) 主动源 (深灰色钻石)、被动源 (加符号)、混合源 (交叉符号) 和通过主动源面波测量 (浅灰色方块) 反演得到的频散测量结果的比较; (b) 采用主动面波测量方法, 反演得到的1D  $V_s$  剖面 (灰线) 及其初始模型 (暗线)。

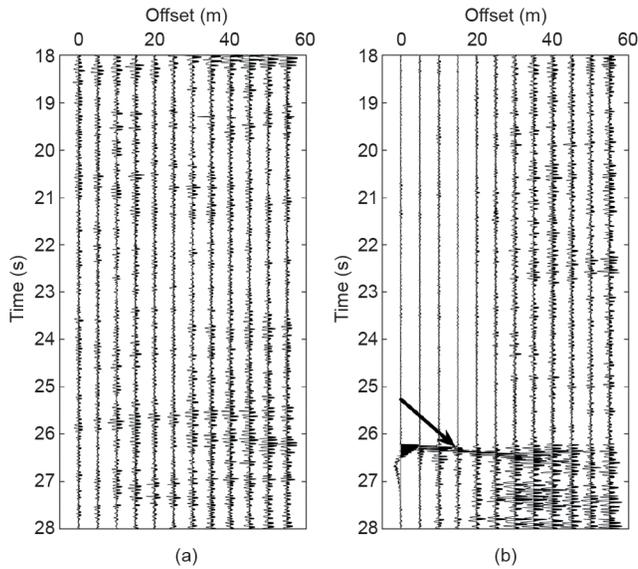


图8. (a) 5 min内一段10 s的被动源面波; (b) 5 min内一段10 s长MSW记录。黑色箭头表示人工震源锤击事件。

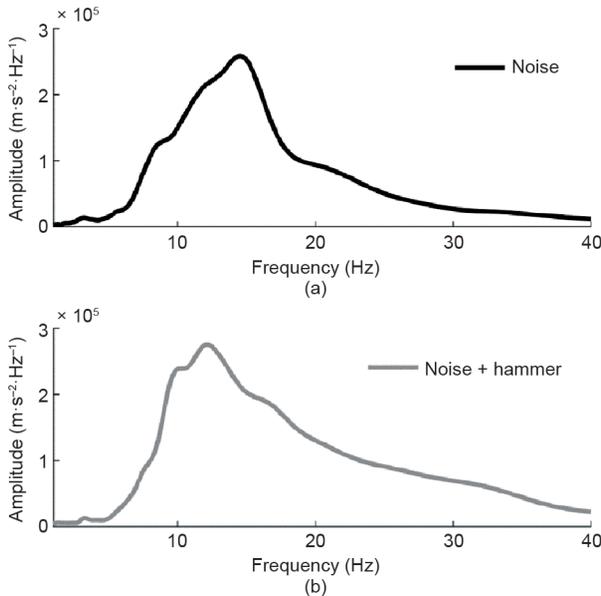


图9. (a) 被动源面波和 (b) MSW的平均功率谱。

偏移距的不同显示出较大的幅度波动，这揭示了人工震源能量随几何扩散和衰减的影响。

分别用MAPS法[图13 (a)~(c)]和SPAC法[图13 (d)~(f)]获得每个数据集的频散能量图像。在上述测量值中拾取的可接受的频散曲线[图13 (g)]彼此可以很好地拟合，相互佐证了这些测量结果的有效性。与“平静”噪声记录[图13 (a)、(d)]相比，MSW记录对于高频(> 8 Hz)频散分析具有更好的适用性[图13 (b)、(e)]。尽管列车通过的噪声记录显示有更高的频谱振幅(图12)，但高频(> 10 Hz)段相干信号的快衰减使得利用这种被动源面波进行高频频散分析变得极为困难[图13 (c)

和(f)]，后面将对此进一步讨论。

## 4. 讨论

在被动源面波测量中，空间假频的影响不容忽视。利用互相关算法，Cheng等[14]证明了MAPS在抑制空间假频方面的优势。与使用被动源面波相比，我们发现MSW测量能够进一步降低空间假频的影响。例如，MSW测量[图5 (b)]比被动源面波测量[图5 (a)]在有效波数区以外的低频处显示出更小的相速度扰动。此外，很容易发现被动源面波测试在7~20 Hz的假频趋势[图13 (a)]，而在MSW测量中假频被显著抑制[图13 (b)]。该抑制是由于主动源振动引入的相干信号的影响。值得注意的是，在预处理期间的归一化选项将只对被动源面波的振幅起作用；并不会影响相干相位[29]。

通常来说，长时间序列噪声记录能提高被动源面波测量信噪比，且拓宽频散测量的频带范围[30]。然而，试验结果表明利用超短时间记录(如几秒或几分钟)也能够进行被动源面波调查，而不是数小时或数天的长时间记录。虽然短时间记录的使用研究超出了目前的工作范围，但我们认为基于信噪比加权叠加操作短时记录将有利于放大主动源中相干信号能量对MSW测量的影响[25]。

本文的侧重点是，连续被动源面波观测中施加人工震源对获得高频段被动源面波频散信息的可行性。因此，在这种情况下，我们不考虑用被动源面波获取的低频信息。注意，在测试点3，从MSW记录和有列车通过的噪声记录[图13 (b)、(c)、(e)和(f)]获得低频(< 5 Hz)相速度是困难的，因为高能量火车震源产生了更多的近场效应和散射[31]，而超短持续时间记录(5 min)并不足以对这种非相干信号在如此低频范围内进行总体平均。但是在有效波数区域内的频散测量结果仍然表现出良好的性能。这表明为了获得足够的深度覆盖，需要更长的测线排列以降低波数区域的下限[32]。利用三个噪声环境完全不同的场地，验证了MSW测量在高频相速度分析中具有较好的灵活性和适用性。MSW测量在现场实施中也较为灵活。例如，测试点3的主动源仅仅是在场地上原有的大石块。应当指出的是，人工震源(即偏移距、震源强弱、震源主频等)对MSW测量的影响还需要进一步研究。

## 5. 结论

本文提出了一种简便的高频被动源面波施工策略：

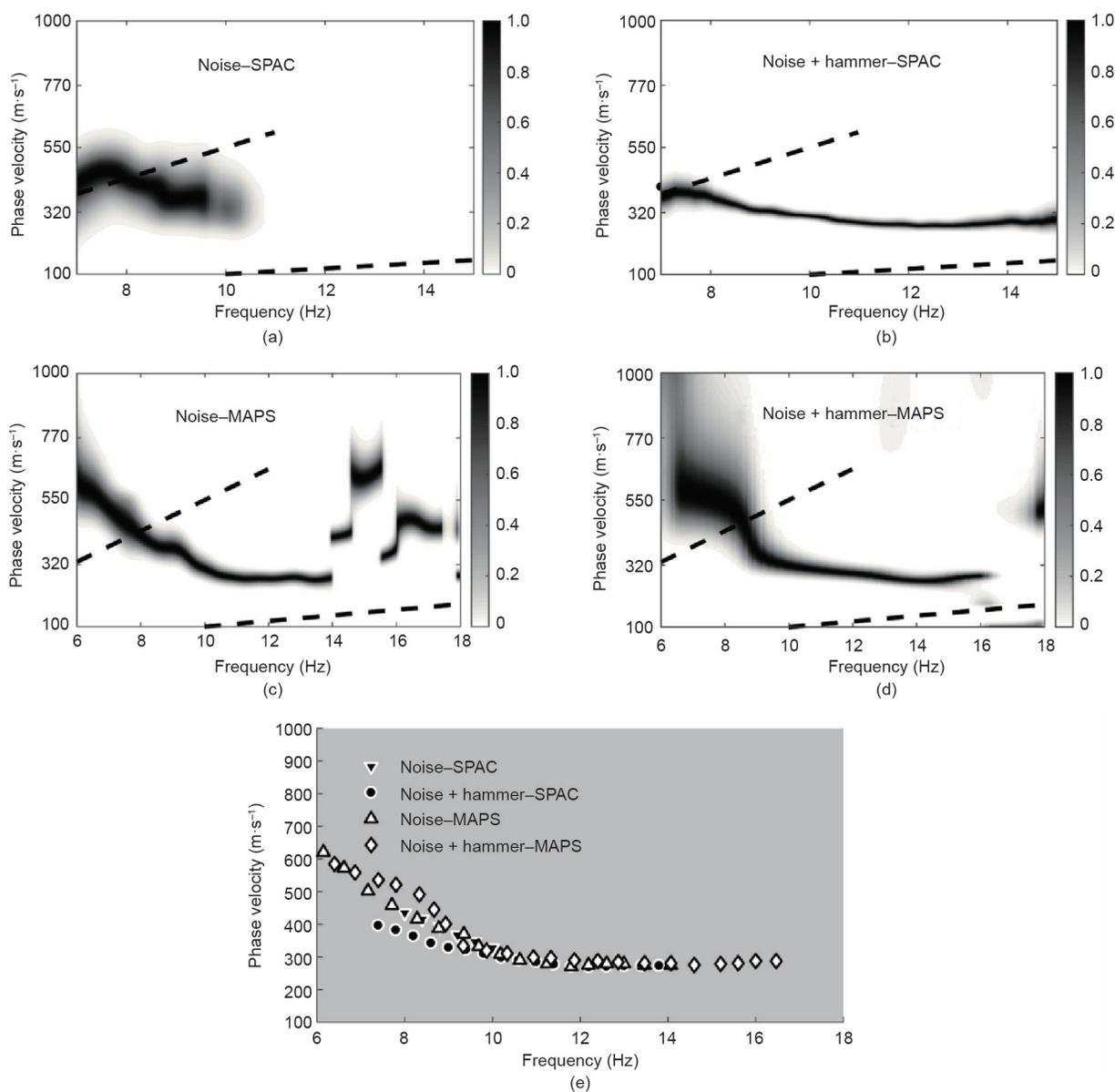


图10. (a)、(b) 使用SPAC方法获得的分散能图像;(c)、(d) 使用MAPS方法获得的分散能图像;(e) 从(a)~(d)中挑选的频散曲线。(a)和(c)显示来自被动源面波的频散测量值, 而(b)和(d)显示来自MSW的测量值。

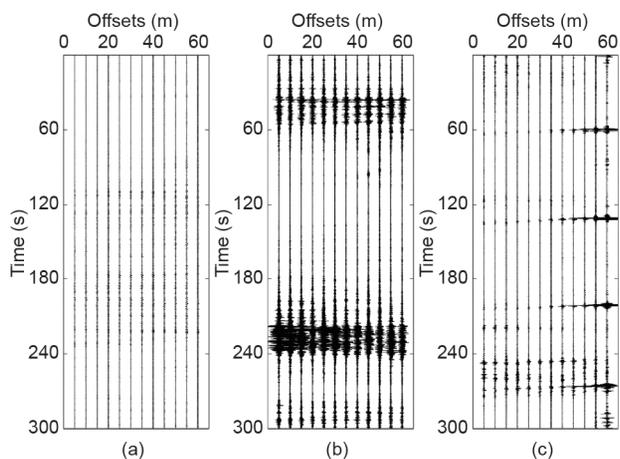


图11. (a) 5 min内“平静”的被动源面波;(b) 5 min内, 有两列火车经过时的被动源面波;(c) 5 min内, 四次岩石敲击的MSW记录。

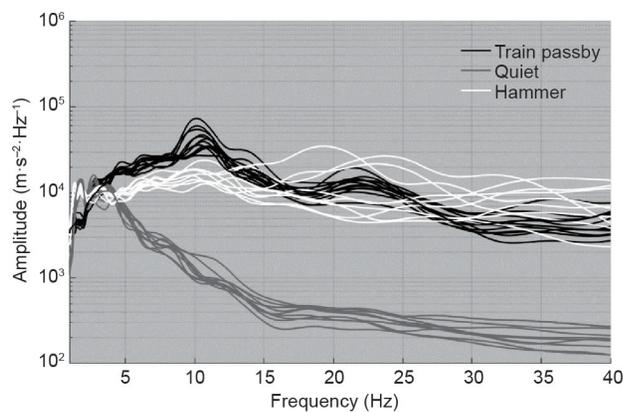


图12.“平静”被动源面波(灰线)、MSW记录(白线)和有列车经过的被动源面波(黑线)的每条轨迹的功率谱。

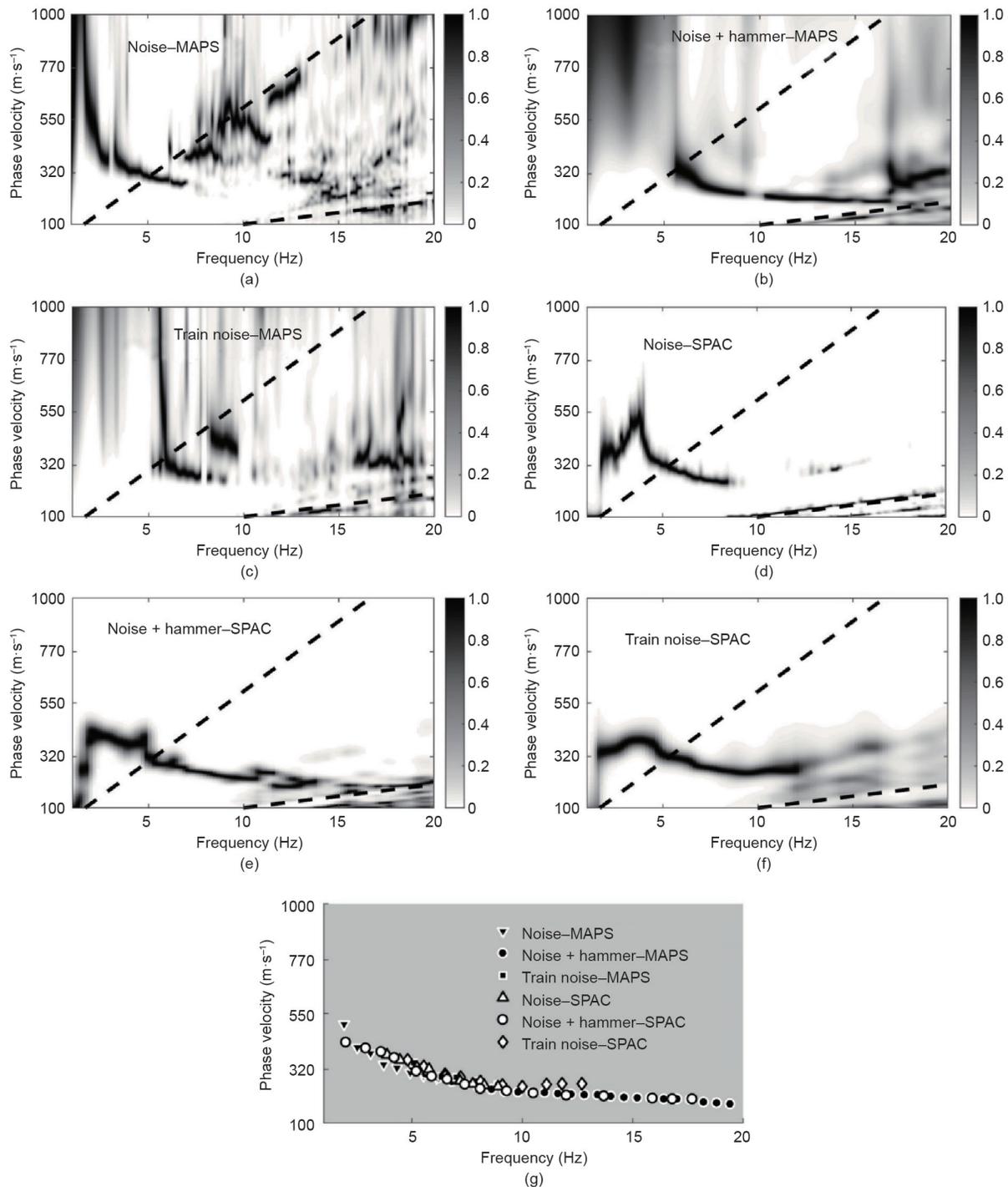


图13. (a)~(c)使用MAPS方法获得的频散能图像;(d)~(f)使用SPAC方法获得的频散能图像;(g)从(a)~(f)中拾取的频散曲线。(a)和(d)显示了“平静”被动源面波的频散测量结果;(b)和(e)显示MSW的测量结果;(c)和(f)显示了有列车经过的被动源面波的测量结果。

在观测连续的被动源面波时，可通过施加人工震源来扩展频带范围，我们称之为“MSW测量”。我们已在三个噪声程度不同的场地应用了这种方法，结果表明该方法在高频相速度分析中有很大的灵活性和适用性。虽然这项初步工作目前还没有得到理论论证的支持，但其展现出的结果显示，在地震勘探期间进行MSW测量是非常有建设性的，而不是单独进行主动源面波测量或被动源

面波测量。结果表明，我们所提出的方案在工程、环境和其他地震项目中可以作为备选方案。

## 致谢

本研究得到国家自然科学基金委员会(41774115)和国家非营利机构中国地质科学院物探与化探研究所

(WHS201306) 的资助。作者感谢奥成科技和工作人员在数据采集方面的帮助。

## Compliance with ethics guidelines

Feng Cheng, Jianghai Xia, Chao Shen, Yue Hu, Zongbo Xu, and Binbin Mi declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## Reference

- [1] Yoon S. Combined active-passive surface wave measurements at five sites in the western and southern US. *KSCE J Civ Eng* 2011;15(5):823–30.
- [2] Song YY, Castagna JP, Black RA, Knapp RW. Sensitivity of near-surface shear-wave velocity determination from Rayleigh and Love waves. *SEG Expanded Abst* 1989;8(1):1357.
- [3] Park CB, Miller RD, Xia J. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics* 1999;64(3):800–8.
- [4] Xia J, Miller RD, Park CB. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics* 1999;64(3):691–700.
- [5] Xia J, Miller RD, Park CB; Kansas Geological Survey. Advantages of calculating shear wave velocity from surface waves with higher modes. In: *SEG technical program expanded abstracts 2000*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists; 2000. p. 1295–8.
- [6] Xia J, Miller RD, Park CB, Tian G. Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes. *J Appl Geophys* 2003;52(1):45–57.
- [7] Hayashi K, Suzuki H. CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data. *Explor Geophys* 2004;35(1):7–13.
- [8] Okada H, Suto K. The microtremor survey method. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists; 2003.
- [9] Aki K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to micro-tremors. *Bull Earthquake Res Inst* 1957;35:415–56.
- [10] Asten MW. Site shear velocity profile interpretation from microtremor array data by direct fitting of SPAC curves. In: *Proceedings of the Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*; 2006 Aug 30–Sep 1; Grenoble, France; 2006.
- [11] Xu Y, Zhang B, Luo Y, Xia J. Surface-wave observations after integrating active and passive source data. *Leading Edge* 2013;32(6):634–7.
- [12] Louie JN. Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bull Seismol Soc Am* 2001;91(2):347–64.
- [13] Park C, Miller R, Laffen D, Neb C, Ivanov J, Bennett B, et al. Imaging dispersion curves of passive surface waves. *SEG Expanded Abst* 2004;1:1357–60.
- [14] Cheng F, Xia J, Luo Y, Xu Z, Wang L, Shen C, et al. Multi-channel analysis of passive surface waves based on cross-correlations. *Geophysics* 2016;81(5):EN57–66.
- [15] Yoon S, Rix GJ. Combined active-passive surface wave measurements for nearsurface site characterization. In: *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2004*; 2004 Feb 22–26; Colorado Springs, CO, USA. Denver: Environment and Engineering Geophysical Society; 2004. p. 1556–64.
- [16] Liu Y, Bay J, Luke B, Louie J, Pullammanappallil S. Combining active- and passive-source measurements to profile shear wave velocities for seismic microzonation. In: *Proceedings of the Geo-Frontiers Congress 2005*; 2005 Jan 24–26; Austin, TX, USA; 2005.
- [17] Park CB, Miller RD, Ryden N, Xia J, Ivanov J. Combined use of active and passive surface waves. *J Environ Eng Geophys* 2005;10(3):323–34.
- [18] Hayashi K, Cakir R, Walsh TJ, State W. Comparison of dispersion curves and velocity models obtained by active and passive surface wave methods. In: *Proceedings of the 2016 SEG Annual Meeting*; 2016 Oct 16–21; Dallas, TX, USA; 2016. p. 4983–8.
- [19] Aki K. A note on the use of microseisms in determining the shallow structures of the earth's crust. *Geophysics* 1965;30(4):665–6.
- [20] Ohori M, Nobata A, Wakamatsu K. A comparison of ESAC and FK methods of estimating phase velocity using arbitrarily shaped microtremor arrays. *Bull Seismol Soc Am* 2002;92(6):2323–32.
- [21] Weemstra C, Boschi L, Goertz A, Artman B. Seismic attenuation from recordings of ambient noise. *Geophysics* 2013;78(1):Q1–14.
- [22] Asten MW. On bias and noise in passive seismic data from finite circular array data processed using SPAC methods. *Geophysics* 2006;71(6):V153–62.
- [23] Chávez-García FJ, Luzón F. On the correlation of seismic microtremors. *J Geophys Res* 2005;110:1–12.
- [24] Chávez-García FJ, Rodríguez M, Stephenson WR. Subsoil structure using SPAC measurements along a line. *Bull Seismol Soc Am* 2006;96(2):729–36.
- [25] Cheng F, Xia J, Xu Y, Xu Z, Pan Y. A new passive seismic method based on seismic interferometry and multichannel analysis of surface waves. *J Appl Geophys* 2015;117:126–35.
- [26] Luo Y, Xia J, Miller RD, Xu Y, Liu J, Liu Q. Rayleigh-wave dispersive energy imaging using a high-resolution linear radon transform. *Pure Appl Geophys* 2008;165(5):903–22.
- [27] Xia J, Xu Y, Chen C, Kaufmann RD, Luo Y. Simple equations guide high-frequency surface-wave investigation techniques. *Soil Dyn Earthquake Eng* 2006;26(5):395–403.
- [28] Pan Y, Xia J, Zeng C. Verification of correctness of using real part of complex root as Rayleigh-wave phase velocity with synthetic data. *J Appl Geophys* 2013;88:94–100.
- [29] Bensen GD, Ritzwoller MH, Barmin MP, Levshin AL, Lin F, Moschetti MP, et al. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broadband surface wave dispersion measurements. *Geophys J Int* 2007;169(3):1239–60.
- [30] Chimoto K, Yamanaka H. Effects of the durations of crosscorrelated microtremor records on broadband dispersion measurements using seismic interferometry. *Geophysics* 2014;79(3):Q11–9.
- [31] Yoon S, Rix GJ. Near-field effects on array-based surface wave methods with active sources. *J Geotech Geoenviron Eng* 2009;135(3): 399–406.
- [32] Lin CP, Lin CH. Effect of lateral heterogeneity on surface wave testing: numerical simulations and a countermeasure. *Soil Dyn Earthquake Eng* 2007;27(6):541–52.