

宋同, 李欣欣, 张伟, 等. 基于加窗互相关函数的微动面波岩溶塌陷探测[J]. 中国岩溶, 2024, 43(4): 937-947.

DOI: 10.11932/karst20240415

# 基于加窗互相关函数的微动面波岩溶塌陷探测

宋同<sup>1,2</sup>, 李欣欣<sup>1,2</sup>, 张伟<sup>3</sup>, 胡涛<sup>1</sup>, 郑晓慧<sup>1</sup>

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065; 3. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 文章利用微动面波成像方法对江西某研究区的岩溶塌陷进行探测: 先针对微动信号的互相关函数进行窗函数优化处理, 提高数据信噪比, 改善微动面波的频散能量谱分辨率; 再对研究区各组虚源面波记录进行频散曲线提取和反演处理, 获得测线上各点的横波速度结构; 最后联合各测点反演结果生成测线下方的横波速度剖面, 并结合钻孔资料进行地质解释, 成功揭示区内岩溶塌陷的分布位置及深度。结果表明: (1) 互相关函数计算时的窗函数选取将影响频散能量谱的分辨率, 在微动数据处理时应进行窗函数测试; (2) 对互相关函数进行加窗处理和优化, 可有效提高微动面波的信噪比和频散能量谱的分辨率, 拓宽频散曲线的频带范围, 提高反演的准确性; (3) 微动面波技术在岩溶塌陷探测中具有较好的应用效果, 结合加窗函数优化处理能更准确确定地下危害体的范围。

**关键词:** 微动; 面波; 互相关函数; 窗函数; 岩溶塌陷

**创新点:** 对微动互相关函数进行加窗处理和分离, 以提高面波信号的信噪比, 成功获得高分辨率的微动面波频散能量谱, 使得频散曲线提取的准确性和精度大幅度提高, 同时利用蒙特卡洛反演出高质量的地层横波速度结构, 揭示出研究区内岩溶塌陷的分布位置和深度。

中图分类号: P315.9 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)04-0937-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引言

岩溶塌陷是一种由于岩溶水气压力的突变、岩(土)体的渗透变形破坏, 在地表下方形成空洞的地质现象<sup>[1-2]</sup>。这种现象可能会导致地表坍塌, 尤其是在降雨和地下水大规模开采的影响下, 不稳定的地表还可能引发泥石流、滑坡等地质灾害, 对土地利用、地下水资源和生态环境都会造成影响, 严重危害人们生命财产安全<sup>[3-4]</sup>。因此, 查明塌陷区的地质情况不仅有助于更好地解释该地区的地质特征和地下水系统, 还可以提高人类应对地质灾害的预警和防

范能力; 同时, 也能为可持续利用土地和环境保护提供更多信息, 具有重要的实际意义。

面波具有低速、低频和频散特性, 这一特性为探测地下结构奠定了基础。微动面波成像不需要人为激发地震信号, 施工简单, 具有高效、低成本和无损等优势, 常被应用在矿产资源勘查以及工程地质领域的防灾减灾中<sup>[5]</sup>, 如煤层采空区探查<sup>[6]</sup>、深部地热资源勘查<sup>[7]</sup>、城市地面沉降检测<sup>[8]</sup>、城市居民区地下空间勘探<sup>[9]</sup>等。微动面波在天然地震学等领域也被称为背景噪声面波或被动源面波。1957年, Aki<sup>[10]</sup>首次提出可以从微动(Microtremors)信号中获取面波的

基金项目: 国家自然科学基金项目(42004110); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2021JQ-589)

第一作者简介: 宋同(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事微动面波成像方法研究。E-mail: songtong2022@163.com。

通信作者: 李欣欣(1989—), 男, 理学博士, 副教授, 主要从事地震层析成像方法研究。E-mail: xxli@xsyu.edu.cn。

收稿日期: 2024-03-03

频散信息,提出了空间自相关(Spatial Autocorrelation method, SPAC)成像的理论与方法,并利用 SPAC 方法获得了东京大学校园某场地的频散曲线。1968 年, Claerbout<sup>[11]</sup> 提出在水平层状介质中记录到的噪声的自相关结果等效于一个自激自收的地震记录道,后又提出通过将地表一定距离的两个地震台的噪声记录进行互相关运算,其结果可等效为将其中一个台站作为震源点激发一个地震信号而在另一个台站位置处接收所获得的主动源噪声记录。1970 年, Capon<sup>[12]</sup> 运用频率—波数法( $f-k$  法)从微动信号中提取出了频散曲线。2004 年, Shapiro 等<sup>[13]</sup> 成功利用背景噪声提取出了格林函数,并得到了美国加州地区的瑞利面波速度结构图像。经过半个多世纪的发展, 2007 年, Bensen 等<sup>[14]</sup> 对被动源噪声成像方法的流程进行了总结,探讨从经验格林函数中提取面波相速度频散曲线的问题。

20 世纪 80 年代中国开始微动面波成像技术的研究,主要应用在浅层地质结构的调查。2011 年,王伟涛等<sup>[15]</sup> 对噪声源性质、经验格林函数中信号到时的波速成像及监测和格林函数中信号的振幅特性进行了应用研究。为提高面波成像的水平分辨率, 2018 年,尹晓菲等<sup>[16]</sup> 提出一种基于层析成像技术的提高浅地表面波成像水平分辨率的方法,具有一定抗噪能力,并通过理论模型和实际资料证明了该方法的有效性。2019 年,邵广周等<sup>[17]</sup> 对被动源瑞利波两道法提取频散曲线的质量控制方法进行研究。针对城市环境中噪声源分布不均匀的情况, 2022 年, NING 等<sup>[18]</sup> 提出一种基于波束形成的交通噪声段选择处理方案,实际应用显示该方案可以提高面波的信噪比和频散图像的分辨率,提高横波速度的准确性。

本研究将微动面波成像方法应用于江西萍乡某研究区的岩溶塌陷调查中,并对微动互相关函数进行加窗优化处理,以提高微动虚源面波道集的信噪比<sup>[19]</sup>;进而对虚源面波进行处理以获得频散曲线并反演横波速度结构,得出二维成像剖面;最后结合钻孔资料对成像结果进行分析与地质解释,揭示研究区地下结构,以查明区内测线下方岩溶塌陷的分布位置和深度,以期为制订科学有效的地质灾害防治措施、保护居民的生命财产安全,进一步提高对该地区的地质特征和地下水系统的认识提供参考。

## 1 原理与方法

地球上存在着各种各样的振动,如工业振动、交通噪声、潮汐洋流、大气活动等,在地表观测到由上述活动所引起的持续性微弱振动信号称为微动。微动面波成像方法就是利用自然界持续存在的各类振动作作为信号源,从微动记录中提取地震面波波场信息,并利用其进行地下介质成像的一种探测方法。微动成像方法可以分为 5 个步骤:即研究区微动信号采集、数据预处理、经验格林函数计算、面波频散曲线提取和横波速度结构反演,其中,经验格林函数通过两个检波器记录的微动信号互相关运算得到,是获取面波信息的关键步骤,本研究即对互相关函数进行优化处理,以提高微动面波数据处理和成像的质量。

### 1.1 加窗互相关函数

从微动信号中提取面波信息需要经过互相关运算等处理,两个台站或检波器记录的微动信号的互相关函数与反映地下介质信息的格林函数之间存在一定联系,通过对两点记录的微动信号进行互相关计算可以提取出格林函数。如第  $i$  道和第  $j$  道检波器记录的信号的互相关函数表示为<sup>[20]</sup>:

$$C_{i,j}(k) = \frac{\sum_{n=1}^N x_i(n) x_j(n+k)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N x_i^2(n) \sum_{n=1}^N x_j^2(n)}} \quad (1)$$

式中:  $x_i(n)$  和  $x_j(n)$  分别表示第  $i$  道和第  $j$  道采集的微动数据;  $N$  为道数,即检波器个数。

利用互相关函数提取频散曲线是微动数据处理的关键步骤,提取精度直接影响着反演结果的准确性。微动数据中的面波信号由于受到自然界噪声源分布不均匀以及随机噪声的干扰,导致互相关函数的信噪比不高,直接利用互相关函数进行计算,可能会得到低分辨率的频散能量谱,不利于后续频散曲线高质量提取和准确反演。

针对利用互相关函数直接计算可能得到低分辨率的能量谱这一缺陷,本研究对互相关函数进行优化,通过加窗处理,提高信噪比,有利于提高频散能量谱的分辨率和频散曲线的提取质量。通过试验测试发现,窗口的设置并不严格且不是唯一的,只需要保证窗口大小可以包含互相关函数中全部的有效面

波信号, 就可以得到较高质量的频散曲线。

## 1.2 $f$ - $k$ 变换

$f$ - $k$  变换法是一种常用的计算频散能量谱的方法, 本研究使用该方法计算微动面波的频散能量谱。 $f$ - $k$  变换法本质上是一种二维傅里叶变换。微动信号随时间和空间变化, 在时间域上进行傅里叶变换, 可以得到不同频率所对应的振幅谱; 在空间域上进行傅里叶变换, 可以得到不同波数所对应的振幅谱<sup>[21-22]</sup>。对微动信号进行上述两种变换之后, 就可以得到微动信号在频率—波数域的能量分布情况。

对于一个关于时间  $t$  和偏移距  $x$  的二维波场函数  $y(t, x)$ , 其傅里叶变换为:

$$Y(f, k) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} y(t, x) e^{-2\pi i(f t + k x)} dt dx \quad (2)$$

对应的二维傅里叶逆变换为:

$$y(t, x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Y(f, k) e^{2\pi i(f t + k x)} df dk \quad (3)$$

二维波场函数  $y(t, x)$  的二维傅里叶变换结果  $Y(f, k)$  反映了各个频率  $f$  和波数  $k$  简谐成分的能量谱。在时间域和空间域的傅里叶变换没有先后次序, 由于傅里叶变换的对称性, 变换结果在第一和第四象限、第二和第三象限是对称的。面波只从震源方向传播而来, 只需要分析频率和波数均为正(即第一象限)的结果。

在二维傅里叶变换完成后, 根据面波相速度和频率、波数之间的关系:

$$v = f \times \lambda = f \times \frac{1}{k} = \frac{f}{k} \quad (4)$$

利用(4)式中关系, 通过计算可将面波的频谱从频率—波数域转换到频率—速度域, 波数信息映射为相速度信息。

## 1.3 蒙特卡洛反演

微动面波的频散曲线反演是一个非线性化的多参数多极值的最优化问题。在地球物理学中, 蒙特卡洛(Monte Carlo method)方法可用来反演地下介质的横波速度和地层结构。该方法是一种以概率和统计理论方法为基础的数值计算方法, 利用已知概率分布的随机变量或者随机抽样来模拟某一问题的物理过程, 并对抽样结果进行统计分析, 最后得到所研究问题中变量的期望值<sup>[23]</sup>。本研究利用蒙特卡洛方法实现对地下横波速度结构的反演。

## 2 萍乡微动面波实例

研究区位于江西省萍乡岩溶发育区, 区内山地、丘陵、盆地错综分布, 以丘陵地貌为主, 东、南、北大多为山地, 西北部地势较低, 东南部地势较高, 地貌较为复杂<sup>[24]</sup>。自加里东运动以来, 强烈的褶皱作用和重力滑脱作用使得区内断层和伸展滑覆构造较为发育, 并伴随岩浆侵入活动, 形成多期叠加复式构造<sup>[25]</sup>, 多次构造运动也导致区内产生了萍乡—广丰等区域性大断裂<sup>[26]</sup>。其构造体系大致可分为 NNE 向构造、旋卷构造和盆地构造等, 以 NNE 向构造为主, 旋卷构造常镶嵌在这些构造之间。

研究区出露晚元古代青白口系、震旦系、晚古生代、中生代以及新生代地层。其中晚元古代, 晚古生代二叠系, 中生代三叠系、白垩系地层为主要出露地层, 泥盆系、石炭系、侏罗系地层零星出露, 第四系出露联圩组, 主要沿水系和山麓分布, 水系主要为萍水, 大气降水和上游灰岩地区地下水构成区内主要水源<sup>[27]</sup>。由于降雨和地下水对土壤的长期侵蚀作用, 易形成地下空洞。

本研究即在岩溶发育区内布设一维直测线采集微动数据, 沿测线布置 42 道检波器, 道间距 5 m, 各道检波器采样间隔设为 0.002 s, 采集时长 3 600 s。对测线上 41 个检波器记录的微动数据进行处理。根据道数不同采用两种分组方式, 通过实验测试选择每组 13 道检波器和每组 26 道检波器, 对于前 21 道(即 1~21 个检波器), 按照 1~13 道、2~14 道、3~15 道……, 9~21 道分组, 分成 9 组; 对于后 32 道(即 10~41 个检波器), 按照 10~35 道、11~36 道、12~37 道……, 16~41 道分组, 分成 7 组, 两种分组方式把 41 道检波器分成了 16 组, 每组以靠近测线基点的检波器作为虚拟震源。根据数据采集参数和目标探测深度, 选择合适的数据分段长度, 分别将时间窗长度设置为 5 s、10 s 和 15 s, 分别计算互相关函数和得出频散能量图。图 1 是对 1~13 道进行不同时间窗长度处理后的面波图和频散能量图, 图中显示按照 10 s 的时间窗分段效果优于 5 s 和 15 s。因此, 通过实验测试和对比分析, 选择将数据按照 10 s 的时间窗分段, 共分成 360 段。

在处理每一分组时, 首先对原始数据进行格式

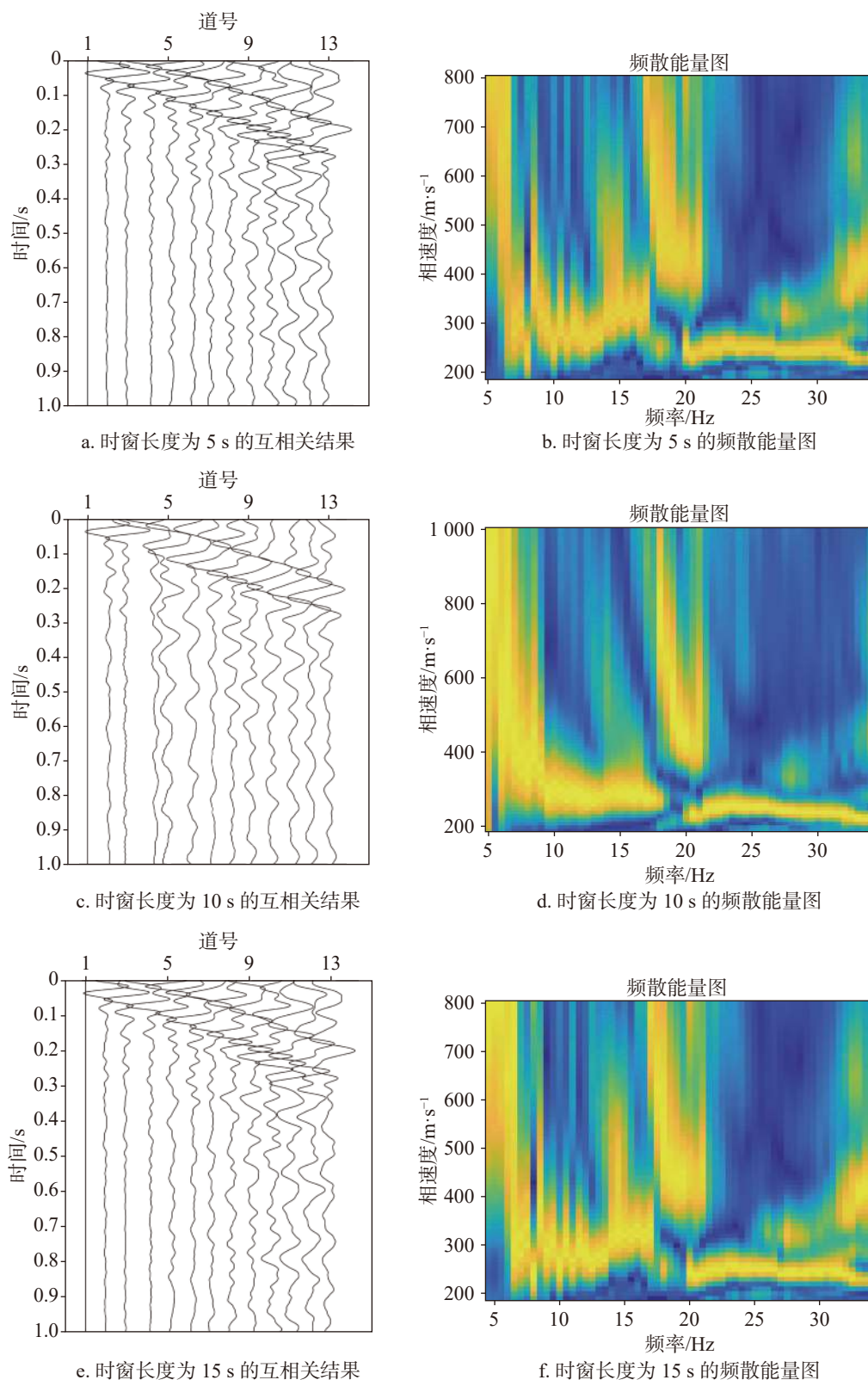


图 1 不同时间窗长度对互相关结果和频散能量谱的影响

Fig. 1 Influence of window length on cross-correlation results and dispersive energy spectrum

转换、去均值、去趋势、归一化等预处理, 去除异常值。然后按照上述的分段方式, 将虚拟震源分别与其他道相同时间段的记录做互相关运算, 然后将各

段互相关结果叠加得到包含面波的经验格林函数 (图 2a 和图 2b 分别为 7~19 道和 16~41 道提取的虚拟瑞利面波道集记录)。

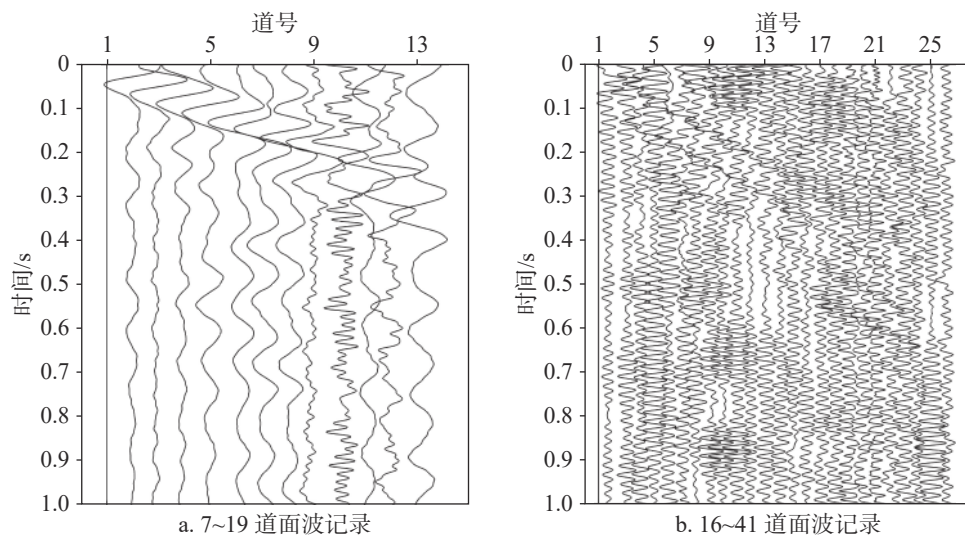


图2 原始面波道集记录

Fig. 2 Original trace record of surface waves

由于测线上部分测点临近道路,从图2a中可知,第10道记录的整体噪声水平高于其他记录,而图2b的面波记录中存在更多噪声。这些噪声的存在降低了有效信号的信噪比,不利于频散曲线高质量提取。

为提高面波的信噪比,本研究对互相关函数进行加窗优化,去除多余的噪声信号,保留面波信号。首先找到互相关函数中每道的最大振幅值 and 对应时间,然后利用该时间设置窗口范围,保留该时间前后面波信号的振幅数据,并将该范围外的噪声信号的振幅大小全部设置为零(图3为第8道数据及窗口位置,窗口位置位于红色方框处,窗外为噪声信号)。

加窗处理完成后得到新的互相关函数,对新的

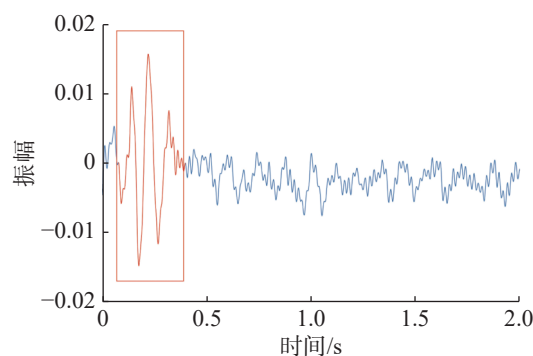


图3 第8道数据及窗口位置

Fig. 3 Data and window location in Trace 8

互相关函数提取虚源瑞利面波道集记录(图4a和图4b分别为加窗优化后原始观测系统中位于7~19道和16~41道的虚源面波道集记录)。

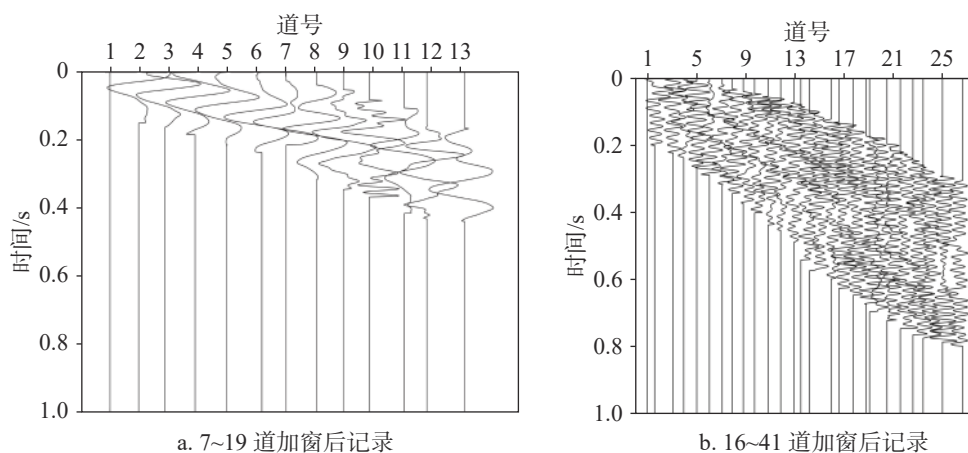


图4 互相关函数加窗后的微动面波道集记录

Fig. 4 Trace record of microtremor surface waves after the adding of a window to the cross-correlation function

从图 4 的面波记录中可知,对互相关函数加窗优化后,噪声信号被压制,面波信号占比增大。之后利用  $f-k$  变换法计算互相关函数优化前后的频散能量谱(图 5 为 7~19 道和 16~41 道互相关函数优化前后的频散能量谱)。

从图 5a 和图 5b 中可知,与优化前相比,优化后频散能量谱的分辨率有了明显提高;从图 5c 和图 5d 中可知,优化前的频散能量谱的分辨率不仅低且频散能量团较为分散,不利于频散曲线连续提取,而优化后的频散能量谱有了明显的连续性。这表明互相关函数经过加窗优化处理后,一定程度上可提高频散能量谱的质量。

利用频散能量谱的峰值点提取频散曲线并采用蒙特卡洛法对频散曲线进行反演。根据前人的研究,影响瑞雷面波频散特性的因素主要是地层的横波速度和厚度,而纵波速度和地层密度对其影响较小<sup>[28-29]</sup>。

因此,本研究根据已有的研究区地质资料和实验结果,将地下结构初始模型设置为 7 层,其中有限厚度层数为 6 层,最下层为无限空间,泊松比设置为 0.3,横波速度范围上限、下限分别设为  $800 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,在模型参数的搜索空间设置上,将横波速度的搜索步长和层厚度的搜索步长分别设置为  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和 8 m。横波速度参数根据实测频散曲线估计得到,利用介质的弹性模量和泊松比之间的关系以及经验信息估计出纵波速度和地层密度。

设置完初始地层模型后,迭代 1 000 次共得到 16 组反演结果(图 6 和图 7 分别为 7~19 道和 16~41 道的反演结果,图中棕色线条为模拟频散曲线,红色虚线为观测频散曲线,黑色部分表示拟合结果最佳)。

从图 6 和图 7 的反演结果中可知,反演得到的模拟频散曲线与观测频散曲线的拟合效果较好,地

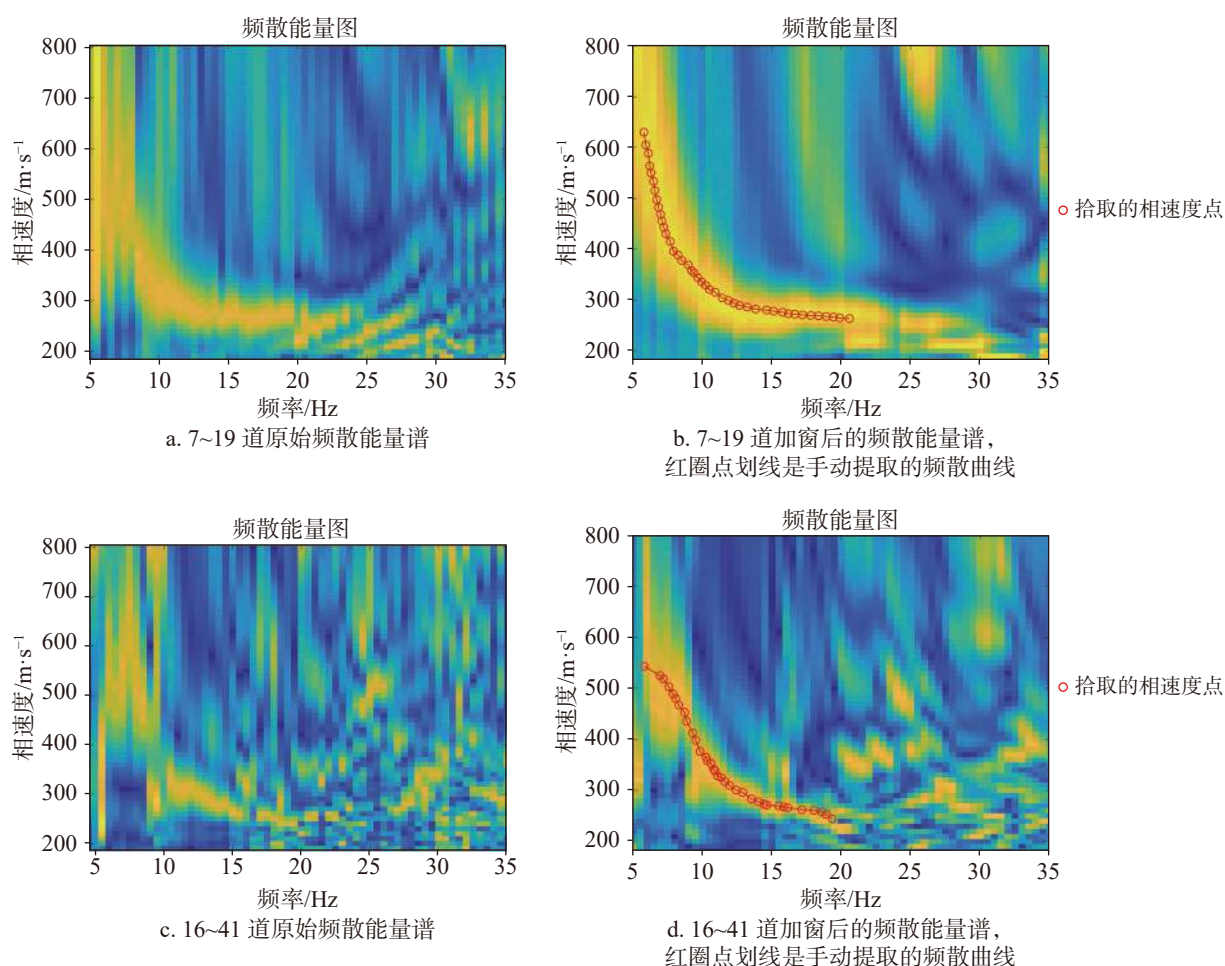


图 5 互相关函数加窗前后的微动面波频散能量谱对比

Fig. 5 Comparison of the dispersion energy spectrum of microtremor surface waves after the adding of a window to the cross-correlation function

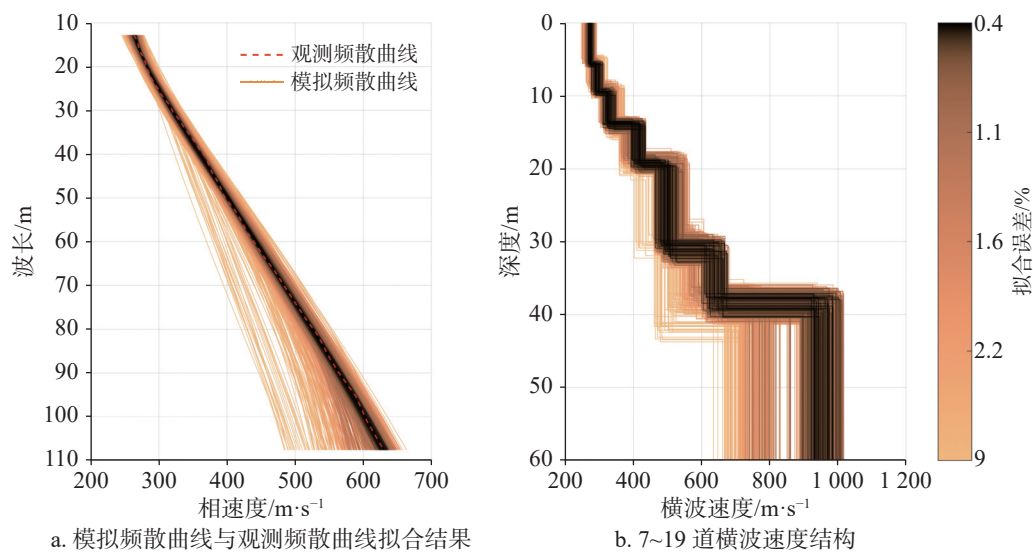


图 6 7~19 道反演结果

Fig. 6 Inversion results of Trace 7–Trace 19

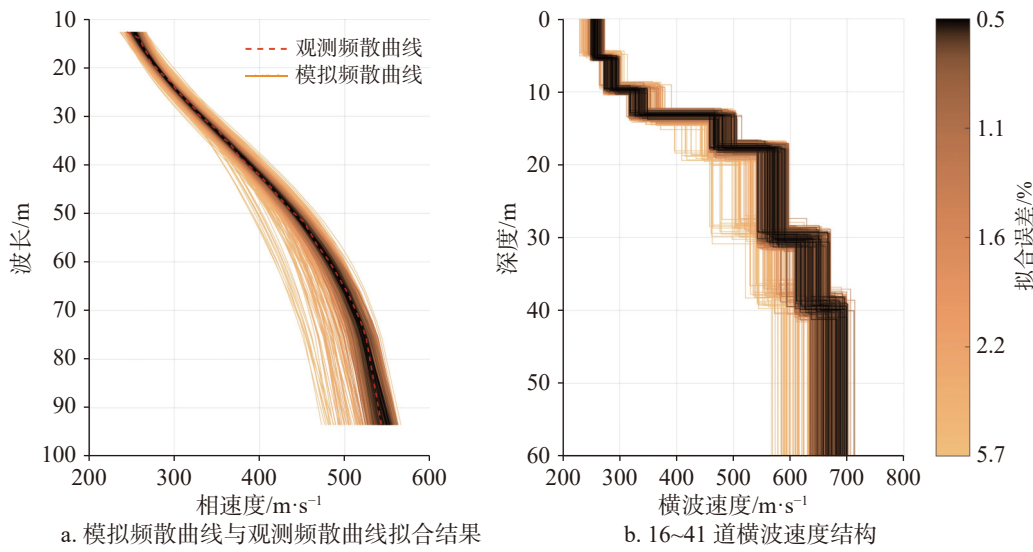


图 7 16~41 道反演结果

Fig. 7 Inversion results of Trace 16–Trace 41

表 1 每组最小反演误差

Table 1 Minimum inversion error of each group

| 组别     | 1~13道  | 2~14道  | 3~15道  | 4~16道  | 5~17道  | 6~18道  | 7~19道  | 8~20道  |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 相对误差/% | 0.6372 | 0.5738 | 0.4878 | 0.3740 | 0.7260 | 0.4879 | 0.4335 | 0.5893 |
| 组别     | 9~21道  | 10~35道 | 11~36道 | 12~37道 | 13~38道 | 14~39道 | 15~40道 | 16~41道 |
| 相对误差/% | 0.6069 | 0.3773 | 0.1811 | 0.5585 | 0.7147 | 0.4911 | 0.5007 | 0.4958 |

层结构有着清楚划分。本研究也统计了反演结果相对于初始模型之间的误差(表 1 为统计出的 16 组最小相对误差)。

对最小误差的反演结果进行地质成像,将一维横波速度结构和空间位置进行组合得到二维横波速

度结构剖面(图 8 为研究区地下二维横波速度结构剖面,a 和 b 分别为加窗处理后的探测结果和未加窗处理的探测结果),结果表明加窗处理可提高反演结果的准确性。

从图 8a 可知,测线下方的地层有明显的高低速

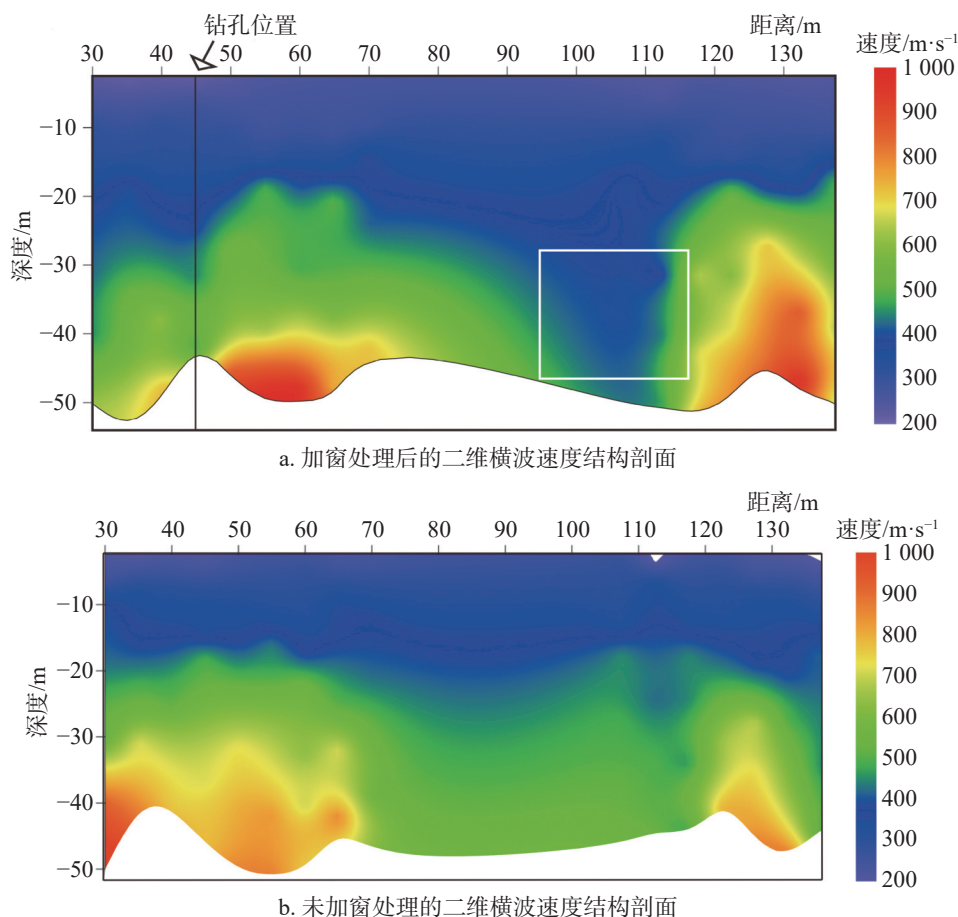


图 8 研究区二维横波速度结构剖面

Fig. 8 Structural profile of two-dimensionall transverse wave velocity in the study area

分界线, 15 m 之前为低速层, 在近地表连续分布; 在水平方向 90~115 m、地下 30~50 m 处, 速度变化显著, 中间为低速层, 两侧为高速层, 根据已有地质资料分析, 推测该位置可能为岩溶塌陷区(图 8a 中白色方框所示区域)。由于每组一维横波速度剖面反演的最终深度不同, 因此反演得到的横波速度与真实地层速度之间可能会存在一定差异, 部分深度的速度结构可能不可信(图 8a 和图 8b 中下方的白色区域)。为检验微动勘探的成像结果, 利用钻孔资料进行验证, 钻孔位置在测线上 45 m 处(图 8a 中箭头所示的黑色竖线), 钻孔岩心柱状图如图 9 所示。

根据钻孔结果, 孔深 80 m, 该孔以灰岩为主, 岩性简单, 岩心较完整, 其中 0~8 m 为素填土、耕植土、粉质黏土和碎石土, 分布较均匀, 8~16 m 为粉质黏土, 16~28 m 为充填型溶洞, 部分深度为粉质黏土、灰岩和方解石, 28 m 之后为灰岩, 在深度 33~52 m 之间的自然伽玛异常平均值大于 60 API, 井液电阻率曲线在 32 m 以上出现扩散现象, 可能有地层水进入孔内, 孔内温度变化均匀, 推断认为此井段为裂隙灰岩或

溶洞灰岩, 充填物泥质含量高。在微动面波勘探形成的剖面上也可看到在 32 m 以下的地层中存在明显的两侧高速、中间低速的地层, 表明该区域的地下地质构造可能存在异常, 与钻孔结果对应较好。

### 3 结 论

本研究利用微动面波成像技术对江西萍乡某研究区的岩溶塌陷进行探测, 通过对互相关函数进行加窗处理, 得到了高质量的二维横波速度结构剖面, 并结合钻孔资料, 成功揭示了区内岩溶塌陷的分布位置和深度。主要结论如下:

(1) 互相关函数计算时的窗函数选取将影响频散能量谱的分辨率, 在微动数据处理时应进行窗函数测试。

(2) 对互相关函数进行加窗处理和优化, 可有效提高微动面波的信噪比和虚源道集频散能量谱的分辨率, 拓宽频散曲线的频带范围, 提高反演的准确性。

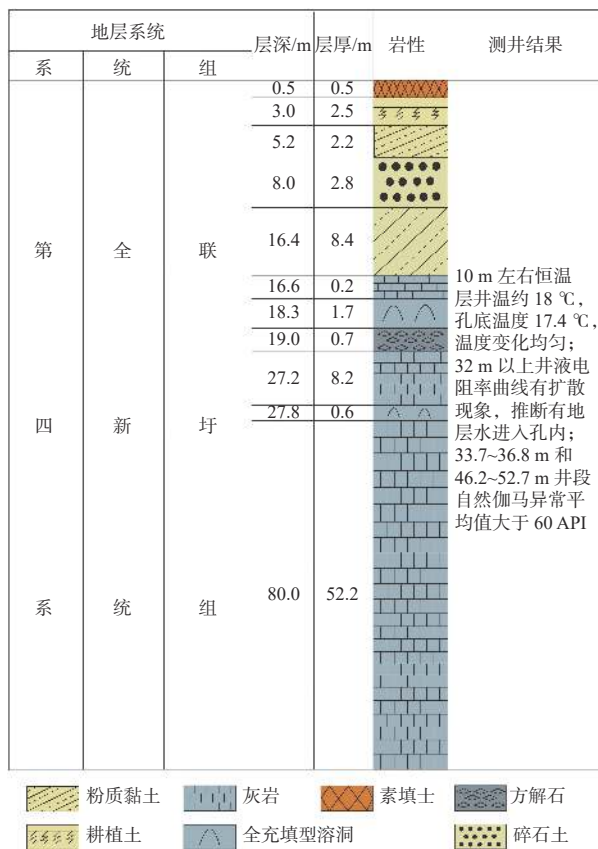


图 9 钻孔岩心柱状图

Fig. 9 Histogram of borehole core

(3)与常规处理流程相比,利用加窗互相关函数计算的微动面波进行处理和探测,所得的岩溶塌陷定位更加精准,有利于查明地下介质中的潜在危害地质体。

## 参考文献

- [1] 蒋小珍,冯涛,郑志文,雷明堂,张伟,马骁,伊小娟.岩溶塌陷机理研究进展[J].中国岩溶,2023,42(3):517-527.  
JIANG Xiaozhen, FENG Tao, ZHENG Zhiwen, LEI Mingtang, ZHANG Wei, MA Xiao, YI Xiaojuan. A review of karst collapse mechanisms[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(3): 517-527.
- [2] 田必林,姜杰,郝立彬,戴晖.综合物探方法在岩溶塌陷调查中的应用分析[J].中国煤炭地质,2023,35(7):79-83.  
TIAN Bilin, JIANG Jie, HAO Libin, DAI Hui. Application analysis of different geophysical methods in karst collapse detection[J]. Coal Geology of China, 2023, 35(7): 79-83.
- [3] 王瑞,兰恒星,刘世杰,伍宇明.森林火灾对岩土体物理力学特性的影响[J].地球科学与环境学报,2022,44(1):114-123.  
WANG Rui, LAN Hengxing, LIU Shijie, WU Yuming. Influence of forest fire on physical and mechanical properties of rock and soil[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(1): 114-123.
- [4] 魏凯,王延岭,赵志伟,吴亚楠,翟代廷,闫佰忠.泰安旧县水源地下水动态特征及可开采量研究[J].中国岩溶,2023,42(5):940-955.  
WEI Kai, WANG Yanling, ZHAO Zhiwei, WU Ya'nan, ZHAI Daiting, YAN Baizhong. Dynamic characteristics of groundwater level and exploitable amount of groundwater source in Jiuxian county, Tai'an[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(5): 940-955.
- [5] 李庆春,邵广周,刘金兰,梁志强.瑞雷面波勘探的过去、现在和未来[J].地球科学与环境学报,2006,28(3):74-77.  
LI Qingchun, SHAO Guangzhou, LIU Jinlan, LIANG Zhiqiang. Past, present and future of Rayleigh surface wave exploration[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, 28(3): 74-77.
- [6] 姚金,徐佩芬,凌甦群,张华,刘红兵,杜亚楠,游志伟,张敏.地铁线路采空区微动剖面法探测研究:以广州地铁14号线二期为例[J].地球物理学报,2023,66(10):4279-4289.  
YAO Jin, XU Peifen, LING Suqun, ZHANG Hua, LIU Hongbing, DU Ya'nan, YOU Zhiwei, ZHANG Min. Research on microtremor profile method to detection of goaf along subway line: A case study in the second phase of subway line 14[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(10): 4279-4289.
- [7] 万光南,白晨,郝立彬,王秀荣,陆金波.微动法在深部地热资源勘查中的应用[J].中国煤炭地质,2023,35(6):76-83.  
WAN Guangnan, BAI Chen, HAO Libin, WANG Xiurong, LU Jinbo. Application of microtremor survey method on deep geothermal resources exploration[J]. Coal Geology of China, 2023, 35(6): 76-83.
- [8] 徐浩,吴小平,盛勇,廖圣柱,贾慧涛,徐子桥.微动勘探技术在城市地面沉降检测中的应用研究[J].物探与化探,2021,45(6):1512-1519.  
XU Hao, WU Xiaoping, SHENG Yong, LIAO Shengzhu, JIA Huitao, XU Ziqiao. Application of microtremor survey method in detection of urban land subsidence[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(6): 1512-1519.
- [9] 郭健强,陈松,徐俊杰,郑智杰,刘永亮,王越.被动源面波法在城市居民区建筑间的应用[J].中国岩溶,2023,42(6):1322-1330.  
GUO Jianqiang, CHEN Song, XU Junjie, ZHENG Zhijie, LIU Yongliang, WANG Yue. Application of the method of passive surface wave to the exploration of urban residential area[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(6): 1322-1330.
- [10] Aki K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors[J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, 1957, 35(3): 415-456.
- [11] Claerbout J F. Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response[J]. Geophysics, 1968, 33(2): 264-269.
- [12] Capon J. Applications of detection and estimation theory to large array seismology[J]. Proceedings of the IEEE, 1970, 58(5): 760-770.
- [13] Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, Ritzwoller M H. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise[J]. Science, 2005, 307(5715): 1615-1618.

- [14] Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, Levshin A L, Lin F, Moschetti M P, Shapiro N M, Yang Y. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements[J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 169(3): 1239-1260.
- [15] 王伟涛, 倪四道, 王宝善. 地球背景噪声干涉应用研究的新进展[J]. *中国地震*, 2011, 27(1): 1-13.  
WANG Weitao, NI Sida, WANG Baoshan. New advances in application of ambient noise interferometry[J]. *Earthquake Research in China*, 2011, 27(1): 1-13.
- [16] 尹晓菲, 胥鸿睿, 夏江海, 孙石达, 王芑. 一种基于层析成像技术提高浅地表面波勘探水平分辨率的方法[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(6): 2380-2395.  
YIN Xiaofei, XU Hongrui, XIA Jianghai, SUN Shida, WANG Peng. A travel-time tomography method for improving horizontal resolution of high-frequency surface-wave exploration[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(6): 2380-2395.
- [17] 邵广周, 岳亮, 李远林, 吴华. 被动源瑞利波两道法提取频散曲线的质量控制方法[J]. *物探与化探*, 2019, 43(6): 1297-1308.  
SHAO Guangzhou, YUE Liang, LI Yuanlin, WU Hua. A study of quality control of extracting dispersion curves by two-channel method of passive Rayleigh waves[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(6): 1297-1308.
- [18] Ning Ling, Xia Jianghai, Dai Tianyu, Liu Ya, Zhang Hao, Xi Chaoqiang. High-frequency surface-wave imaging from traffic-induced noise by selecting in-line sources[J]. *Surveys in Geophysics*, 2022, 43(6): 1873-1899.
- [19] 潘登, 高级, 张海江. 基于速度窗的频散曲线提取方法[C]. 中国地球科学联合学术年会论文集——专题二十五: 浅地表地球物理进展. 2023, 25: 2079.
- [20] 张唤兰, 王保利. 基于分段波形互相关的井下随采地震数据成像[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(4): 29-33, 40.  
ZHANG Huanlan, WANG Baoli. Waveform cross correlation-based imaging of underground seismic data while mining[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(4): 29-33, 40.
- [21] 夏江海. 高频面波方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2015.
- [22] Li Xinxin, Li Qingchun, Shen Hongyan. Rayleigh-wave imaging of the loess sediments in the southern margin of the Ordos Basin by improved frequency-wavenumber transform[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2019, 16(1): 77-84.
- [23] 邵霄怡. 概率地震危险性的蒙特卡洛方法研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2018.  
SHAO Xiaoyi. Study on Monte Carlo simulation based probabilistic seismic hazard analysis[D]. Beijing: Institute of Earthquake Science China Earthquake Administration, 2018.
- [24] 侯靖钥, 夏元平. 江西萍乡时序 InSAR 形变监测[J]. *北京测绘*, 2022, 36(11): 1514-1518.  
HOU Jingyue, XIA Yuanping. Timeseries InSAR deformation monitoring in Pingxiang, Jiangxi Province[J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2022, 36(11): 1514-1518.
- [25] 姜智东, 饶玉彬, 李昌龙. 江西萍乡大江边地区煤矿地质特征与聚煤规律[J]. *山东煤炭科技*, 2020(8): 134-136.  
JIANG Zhidong, RAO Yubin, LI Changlong. Geological characteristics of coal mine and coal concentration law in Dajiangbian area of Pingxiang, Jiangxi Province[J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2020(8): 134-136.
- [26] 代俊峰, 李增华, 许德如, 邹勇军, 肖富强, 米振华, 张健. 江西萍乐坳陷带新田煤矿关键金属铯的富集特征及成因机制[J]. *地球科学与环境学报*, 2023, 45(5): 1162-1175.  
DAI Junfeng, LI Zenghua, XU Deru, ZOU Yongjun, XIAO Fuqiang, MI Zhenhua, ZHANG Jian. Enrichment characteristics and genesis mechanism of critical metal cesium in Xintian coal mine of Pingle depression, Jiangxi, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2023, 45(5): 1162-1175.
- [27] 赵毅斌, 曹员兵, 汪明有. 萍乡北部非可溶岩区地下水富集规律研究及开发利用建议[J]. *江西科学*, 2023, 41(1): 67-72.  
ZHAO Yibin, CAO Yuanbing, WANG Mingyou. Study on groundwater enrichment law in non-soluble rock area of northern Pingxiang and its application development and utilization suggestions[J]. *Jiangxi Science*, 2023, 41(1): 67-72.
- [28] 邵广周, 李庆春. 基于细化分层法探讨面波频散曲线反演参数的简化[J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(3): 317-320.  
SHAO Guangzhou, LI Qingchun. Study on parameter simplifying in dispersion curves inversion of surface wave based on subdividing layer method[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(3): 317-320.
- [29] 王一鸣, 宋先海, 张学强. 基于蚁狮优化算法的瑞雷波频散曲线反演[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(3): 331-337.  
WANG Yiming, SONG Xianhai, ZHANG Xueqiang. Inversion of Rayleigh wave dispersion curves based on antlion optimizer[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(3): 331-337.

## Detection of karst collapses through microtremor surface waves based on windowing cross-correlation function

SONG Tong<sup>1,2</sup>, LI Xinxin<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei<sup>3</sup>, HU Tao<sup>1</sup>, ZHENG Xiaohui<sup>1</sup>

( 1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 3. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China )

**Abstract** The study area is located in the karst development area of Pingxiang in the west of Jiangxi Province, China. The landform of this area is complex, low in the northwest and high in the southeast. The fold action and gravitational sliding action led to the development of faults and extensional sliding nappe structures in the area, accompanied by magmatic intrusion activities, which has formed multi-phase superimposed complex structures. Atmospheric precipitation and groundwater in the upstream limestone areas constitute the main water source in the study area. Meanwhile, karst collapses may cause the formation of holes below the surface, seriously endangering people's life and property. Therefore, finding out the geological situation of the collapse area can provide a reference for the understanding of the geological characteristics and the groundwater system in this area.

Microtremor is a kind of persistent weak vibration signal observed on the surface caused by industrial vibrations, traffic noises, tidal currents, atmospheric activities and other activities on the earth. Surface waves are formed by vertical waves and transverse waves interfering on the surface. They have the characteristics of low speed, low frequency and frequency dispersion, which lay a foundation for the detection of underground structure. The method of microtremor surface waves survey utilizes various types of vibrations that continuously exist in nature as signal sources. It extracts the information on seismic surface wave field from microtremor records and uses this type of information for imaging underground media. The steps include microtremor signal acquisition in the study area, data preprocessing, empirical Green function calculation, extraction of surface wave dispersion curves and inversion of velocity structure for transverse waves. Among these steps, the empirical Green function is obtained through the cross-correlation operation of the microtremor signals recorded by two detectors, and calculating the empirical Green function is the key to obtain the surface wave information.

This study detects the karst collapses in the study area by using microtremor surface waves. However, the surface wave signals are affected by uneven distribution of natural noise sources and random noises, which may cause the low signal-to-noise ratio of the Green function. Therefore, the direct use of the empirical Green function for subsequent data processing may get the dispersion energy spectrum with low resolution, which is not conducive to the subsequent extraction of high-quality dispersion curves and accurate inversion.

Due to the above shortcomings, this study first optimized the window function for the cross-correlation function of microtremor signals to improve the signal-to-noise rate of microtremor data, and to enhance the resolution of energy spectrum of microtremor surface wave dispersion. Then, the extraction of dispersion curves and inversion of the virtual source surface record of each group in the study area were conducted to obtain the transverse wave velocity structure of each point along the measurement line. Finally, the distribution positions and depths of karst collapses in the study area were revealed, according to the the transverse wave velocity section below the measurement line generated by inversion as well as the geological interpretation of drilling data. The results show as follows, (1) The selection of window function in the cross-correlation function calculation will affect the resolution of the dispersion energy spectrum, and the window function should be tested in processing the microtremor data. (2) The processing and optimizing of window function for the cross-correlation function can effectively improve the signal-to-noise rate of microtremor surface wave and the resolution of the dispersion energy spectrum, widen the frequency band range of dispersion curves, and improve the accuracy of the inversion. (3) The method of microtremor surface waves survey is highly applicable to karst collapse detection, and the optimization of the window function can determine the range of underground hazards in a more accurate way.

**Key words** microtremor, surface wave, cross-correlation function, window function, karst collapse

(编辑 黄晨晖)