

# 综合物探在陕西韩城地表基质调查中的应用

高 奇, 李新斌, 刘瀚元

中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安

收稿日期: 2024年2月26日; 录用日期: 2024年4月19日; 发布日期: 2024年4月29日

## 摘 要

韩城市位于祁吕贺山字形构造的前弧东翼与新华夏构造体系第三沉降带的复合部位。以东北-西南向的山前大断裂(即韩城大断层)为界, 东南面属渭汾地堑, 西北面属鄂尔多斯台向斜的陕北盆缘褶皱区, 开展地表基质层研究具有重要意义。综合地球物理探测是开展近地表无损探测的重要途径。利用天然源面波法和高密度电法综合物探方法, 对陕西韩城地区地表基质层进行垂向分层, 取得了较好的效果。

## 关键词

高密度电法, 天然源面波勘探, 地表基质层, 陕西韩城

# Application of Comprehensive Geophysical Method to Ground Substrate Survey in the Area of Shaanxi Hancheng

Qi Gao, Xinbin Li, Hanyuan Liu

Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an Shaanxi

Received: Feb. 26<sup>th</sup>, 2024; accepted: Apr. 19<sup>th</sup>, 2024; published: Apr. 29<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Hancheng City is located in the composite area of the eastern wing of the front arc of the Qiluhe Mountain shaped structure and the third subsidence zone of the New Huaxia tectonic system. It is of great significance to conduct research on the ground substrate layer, with the northeast south-west direction of the Shanqian Fault (*i.e.* the Hancheng Fault) as the boundary. The southeast belongs to the Weifen Graben, and the northwest belongs to the folded area of the northern Shaanxi Basin in the Ordos Platform Syncline. Comprehensive geophysical method is an important way to carry out non-destructive detection near the surface. The vertical stratification of the surface ma-

trix layer in the Hancheng area of Shaanxi Province was achieved using a combination of natural source surface wave and high density resistivity method, and good results were achieved.

## Keywords

High Density Resistivity Method, Natural Source Surface Wave Exploration, Ground Substrate Layer, Shaanxi Hancheng

Copyright © 2024 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/>



Open Access

## 1. 引言

2020年1月18日,自然资源部发布《自然资源调查监测体系构建的总体方案》首次提出“地表基质层”概念,并明确要开展地表基质调查工作。2020年12月22日,自然资源部办公厅发布了《地表基质分类方案(试行)》,将地表基质概念定义为“当前出露于地球陆域地表浅部或水域水体底部,主要由天然物质经自然作用形成,正在或可以孕育和支撑森林、草原、水等各类自然资源的基础物质”,由4类3级分级体系构成,4类即岩石、砾石、土质、泥质。殷志强等(2020)根据第四纪地质学特征,将地表基质一级分类划分为基岩和第四纪松散堆积物,二、三级分类按成因类型和地貌形态进一步详细划分。在自然资源部印发的分类命名方案基础上,侯红星等(2020)、鲁敏等(2020)提出自然资源地表基质“五类三级”分类建议方案,五类即“岩石、砂砾、土质、泥质、特殊基质”。

地表基质层主要由岩石和第四纪沉积物构成,岩石包括沉积岩、火成岩、变质岩,第四纪沉积物则包括风成的沙漠和黄土、水成的河湖海洋沉积、山区的坡积物、冰碛物和基岩表面风化残积物构成的风化壳[1]。将地表或水底向下50m(特殊情况下可以更浅或更深)的空间作为地表基质层调查的基本范围[2]。

2020年殷志强发表的《地表基质分类及调查初步研究》初步探讨了地表基质的科学内涵、三级分类、支撑服务目标、调查与编图应关注的重点问题等。2021年以来,殷志强在承德生态文明示范区地表基质调查和编图的基础上,结合东北黑土地、北京、河北、江苏等不同地区地表基质调查试点工作,进一步厘清了地表基质的科学内涵和支撑服务目标,完善了地表基质统一分类方案和调查深度分层等内容,以期为全国范围内的地表基质调查与编图提供参考[3]。

2022年为查明陕西韩城地区不同地貌类型黄土地表基质层的垂向空间结构,采用高密度电法和天然源面波勘探对地表基质层进行分层。

## 2. 工区地质及地球物理特征

### 2.1. 工区地质特征

区内地层自老至新如下:

奥陶系:上部以深灰色厚层状石灰岩为主,下部为泥质灰岩、泥质白云岩互层。赋存有岩溶裂隙水,岩溶裂隙发育程度与富水性不均一,且受岩性及构造条件的控制。

石炭系:是区内主要含煤地层,主要岩性为粉砂岩、泥岩、铝土质泥岩等,系海陆交互相沉积。区内埋藏深度大,未发现断裂构造,因而裂隙不发育,富水性极弱。

二叠系:为研究区主要含煤岩系,岩性主要为砂岩及石英砂岩,其次为灰、灰绿色中、细粒砂岩、

粉砂岩、砂质泥岩或泥岩，下统山西组夹 2、3 号煤层，其中 3 号为主要可采煤层。上统上石盒子组、孙家沟组是主要含水层组。

三叠系：刘家沟组岩性以淡红色中厚层细一中粒砂岩为主，夹泥岩及粉砂岩薄层，裂隙发育，赋水条件良好。和尚沟组岩性主要为朱红色具团块状构造之砂质泥岩，裂隙较发育，富水性弱。纸坊组出露于研究区的西南边界部位，厚度 0~170.50 m，岩性以灰黄绿色厚层 - 块状中粗粒砂岩、细粒砂岩为主，含水微弱。

第三系：为棕红色含粉砂粘土，夹层状钙质结核。

第四系：与下伏不整合接触，岩性主要为砂土、亚砂土、亚粘土组成。

区内褶皱发育较弱，构造相对简单，局部断裂较为发育。其展布方向以北东、北东东向为主，且以张性、张扭性居多，由北向南可大致分为四个构造挤压带。其断裂构造在平面上具有规律的等距分带现象，其它方向的构造形迹，由东向西可分为四个构造密集带。在各带之间，构造形迹相对稀疏，造成上述现象的原因，可能与基底性质、古构造控制及不同体系构造形迹的复合、改造有关[4]。

## 2.2. 地球物理特征

本物性差异是一切地球物理方法调查与研究的前提和基础。韩城工作区地表基质主要有黄土、粘砂土、砂粘土、卵石夹粘砂土，不同基质层，面波波速不同，电阻率也有差异，这就形成了天然源面波勘探、高密度电法工作开展的前提。

根据前人研究成果[5]，整理统计获得工作区不同地层介质的地球物理参数表 1。

**Table 1.** Geophysical parameters of different strata in the work area

**表 1.** 工作区内不同地层地球物理参数

地层	岩性	电阻率( $\Omega \cdot m$ )	横波速度(m/s)
第三系	黄土	>65	<400
第四系	黏土		600~700
二叠系	泥岩、砂岩、粉砂岩	38~42	700~1000

## 3. 工作方法

### 3.1. 天然源面波

地球表面时刻都存在一种微弱震动，这种天然产生的震动以前被认为是背景白噪音，其来源主要有两个方面：一是人类的日常活动；二是自然现象，包括海浪对海岸的撞击、气压的变化等。这类震动从波的角度可以分解为体波(纵波和横波)与面波(瑞利波和勒夫波)，在实际观测中发现面波能量一般可以占整个震动能量的 70%。1957 年 Aki [6]提出利用这种天然震动所引起的面波反演地层横波速度结构的初始理论；经过多年发展，广田刚在 80 年代初提出了“微动勘探法”，相关概念由王振东于 1986 年引入国内介绍和推广[7]；北京水电物探研究所刘云帧在此理论上做了大量的实际工作[8]。

利用采集的面波信息反演地层横波速度的理论基础是频散现象[9] [10]，其表现为面波速度(群速度)会随着传播距离的增大而逐渐减小，实质上是由于不同频率波的相速度随着传播距离的增加衰减程度不同，面波能量分布一般仅限于垂向两倍波长范围之内，因此利用这点建立了速度与深度之间的对应关系，也就间接反演出不同深度地层横波速度。

天然源面波数据采集一般使用 10 个拾震器，按照多重嵌套三角形台阵形态布设，如图 1 所示，其设

计是综合考虑了反演算法、信号传播特征和采集效率。在反演算法上李娜[11]对比了圆形台阵与其他形状提取的频散曲线,证明了相同覆盖面积时圆形台阵对多向信号接收的有效性;沈雨忆[12]通过正演方法证明了在同一半径圆周设置3个拾震器效率是最高的。因此以不同边长的三角形形成多重嵌套结构优点有以下几点:①获得宽频数据;②适应震源传播方向的不确定性;③采集不同波长信号;④提高生产效率。本次天然源面波数据采集及处理相关软硬件设备使用了橘灯勘探 NODE X 面波采集系统。本次数据采集采用嵌套三角形台阵布设两条物探测线,测点间距(圆心间距)50 m,最小半径12米,最大半径50米(图1)。

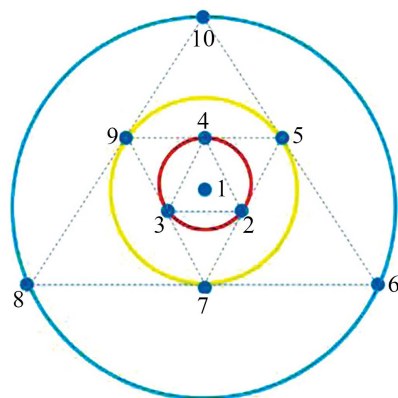


Figure 1. Layout method of natural source surface wave method  
图1. 天然源面波法测站布设方法

### 3.2. 高密度电法

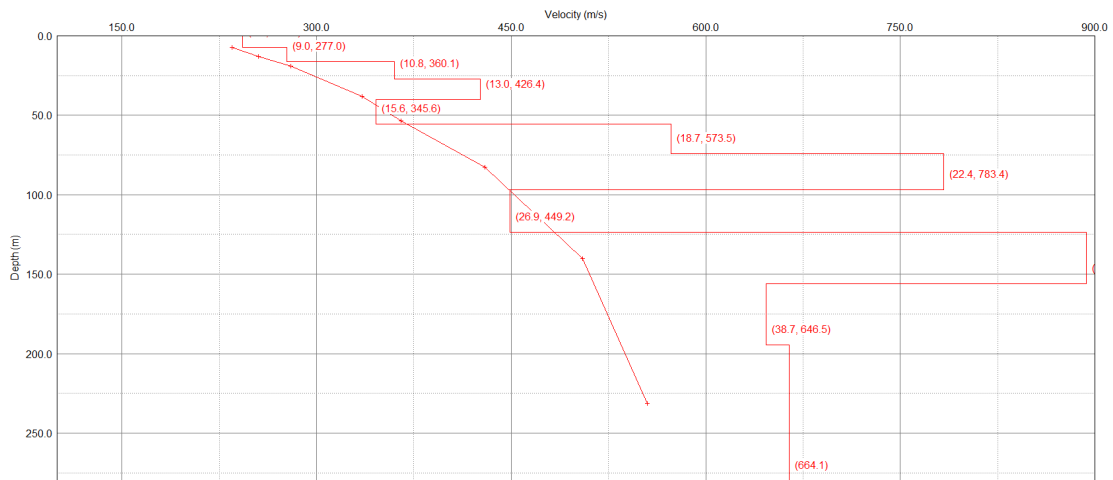
高密度电阻率法勘探与传统的直流电法勘探的原理是大体相同的,都是利用地下岩石及地质构造的电性差异,把不同的岩石构造区分开来的一种地球物理勘探方法[13],不同的是高密度电阻率法采用了阵列式布极方式,实现了剖面 and 测深同步测量,具有直观、高效、高分辨率、高精度等特点。目前高密度电法有多达十几种不同的装置类型,它们都有其各自的特点,其中比较常用的是温纳( $\alpha$ )装置、偶级( $\beta$ )装置、微分( $\gamma$ )装置和联剖( $\delta$ )装置。高密度电法的具体工作流程为:首先根据工区地质地貌情况和探测任务,确定适宜的布线方式和采集参数,然后在地表依次布设一系列电极,通过多路电极转换器不断改变供电电极和测量电极的地面位置,测量相应位置的电位值和电流值;将测量数据传入计算机,采用专业处理软件进行数据预处理和反演计算工作,绘制电阻率等值线图,最后通过物探工作者的解释可得到地质断面图[14]。

高密度电法采用重庆地质仪器厂 DUK-4 系列高密度电法测量系统。本次勘探主要采用温纳装置,最大电极距5米,电极数120根,采用滚动测量最大剖面长度895米。

## 4. 资料分析解释

### 4.1. 天然源面波技术单测点成果

对于天然源面波测点资料的解释,要以不同地层之间的波速差异为划分地层的物性基础。由图2可以看出,WD001点频散曲线拐点清晰,各段频点分布均匀,结合钻孔及地质资料对反演后的曲线进行分层解译。在反演结果中,100 m以浅深度可分为3个主要层位,浅地表0~16.3 m范围为黄土,深度16.3~74.4 m为黄土夹古土壤,深度74.4 m~123 m为砂粘土夹黄土状砂粘土。



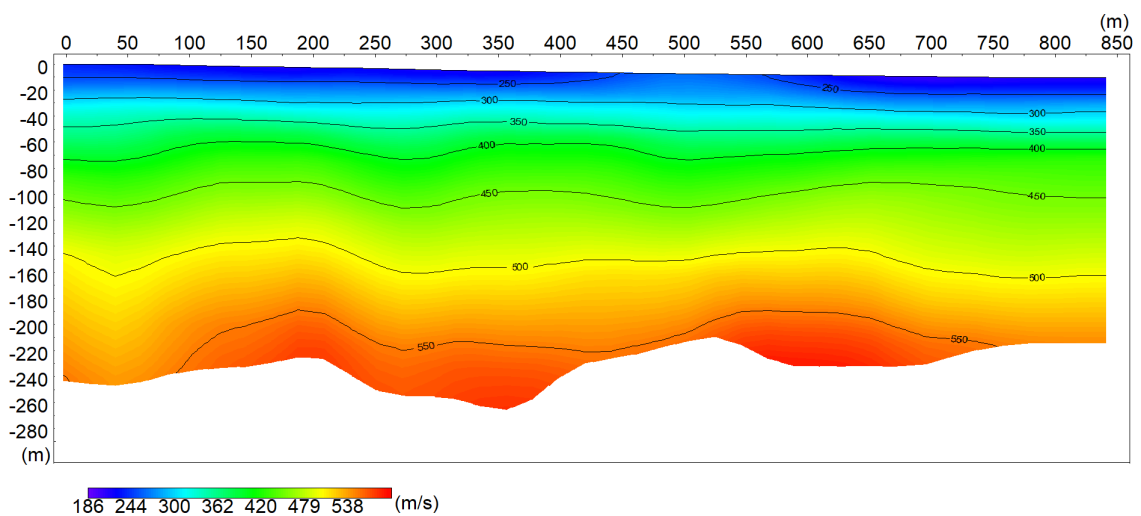
**Figure 2.** The point WD001 of inversion result model depth-velocity curve  
**图 2.** WD001 点反演结果模型深度 - 速度曲线

#### 4.1.1. 线物探成果

1 线位于一级黄土台塬，1 线方位角 95°，布设微动勘探点 18 个，点距 50 米；布设高密度电法测量点 180 个，点距 5 米。

由面波波速剖面图如图 3 可见，地下层位成层性较好，各层位相对分布较全。由收集的地质资料和钻孔资料可推断第一层为黄土，其视横波速度为 250~300 m/s，深度范围大致在 20 米以浅，第二层为黄土夹古土壤，其视横波速度为 350~500 m/s，深度范围 60~70 米，第三层为砂粘土夹黄土状砂粘土，其视横波速度为 500~600 m/s，深度范围 120~130 米，第四层为粘砂土，其视横波速度大于 600 m/s，深度为 130 米以下。

从电阻率反演剖面图如图 4 可见，在纵向上可分为两层，第一层大约 0~20 米，电阻率值为 60~90 Ω·m，为黄土；第二层 20~70 米，电阻率值 10~40 Ω·m，推断为含水层。岩性为黄土夹古土壤。



**Figure 3.** Velocity profile of nature source-surface waves on line 1  
**图 3.** 1 线天然源面波速度剖面图

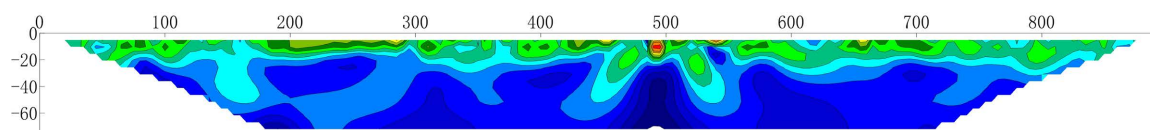


Figure 4. Apparent resistivity inversion profile of high-density electrical method line 1

图 4. 高密度电法 1 线视电阻率反演剖面图

#### 4.1.2. 线物探成果

2 线位于濂水河一级阶地, 距离濂水河约 200 米。2 线方位角  $102^\circ$ , 布设微动勘探点 13 个, 点距 50 米; 布设高密度电法测量点 170 个, 点距 4 米。

根据频散曲线拐点, 由面波波速剖面图如图 5 可知, 地下层位成层性较好。由收集的地质资料和钻孔资料可推断 0~50 米可分三层。第一层为粘砂土卵石层, 层厚度为 20 m, 面波波速为 190 m/s, 第二层为卵石夹砂粘土、粘砂土, 厚度为 10 m, 面波波速为 260 m/s; 第三层为砂粘土夹卵石, 厚度为 20 m, 面波波速为 510 m/s。

从电阻率反演剖面图如图 6 可见, 可知电阻率参数能很好地反映勘察区的地层分布特征, 电阻率地层分层明显。在纵向上可分为两层, 第一层 0~20 米, 电阻率值为  $80\sim 300 \Omega\cdot\text{m}$ , 推断为粘砂土卵石层, 第二层 20~61 米, 电阻率值小于  $50 \Omega\cdot\text{m}$ , 含水率较高, 结合钻孔资料推断为含水层, 岩性为卵石夹砂粘土、粘砂土。

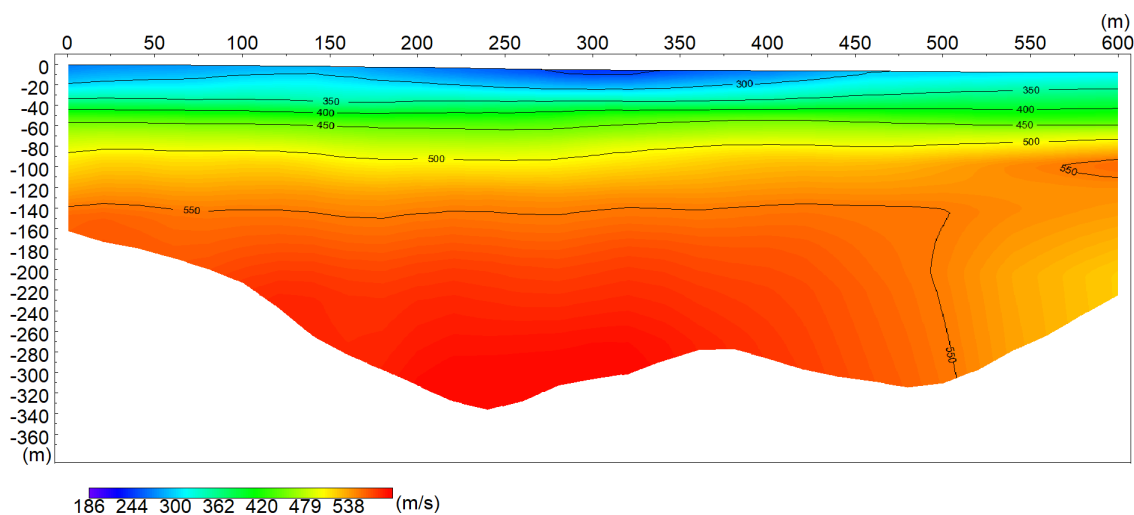


Figure 5. Velocity profile of natural source-surface waves on line 2

图 5. 2 线天然源面波速度剖面图

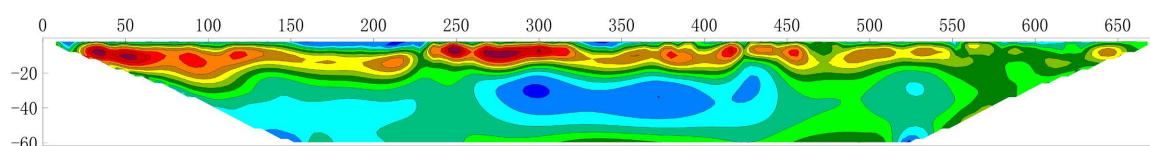


Figure 6. Apparent resistivity inversion profile of high-density electrical method line 2

图 6. 高密度电法 2 线视电阻率反演剖面图

#### 4.2. 综合物探成果分析

天然源面波技术反映的是地下介质的横波速度特征, 而高密度电法反映的是地下介质的电性变化特

征, 对比研究两种物探技术的探测结果, 天然源面波技术和高密度电法在测线上都能够准确探测地层垂向结构特征。

通过地面地质调查并结合天然源面波技术和高密度电法勘探获取了韩城市不同地貌类型黄土地表基质层的垂向空间结构, 其中, 冲积平原区地表基质总体可分为两层, 第一层 0~20 m, 电阻率值为 80~300  $\Omega\cdot\text{m}$ , 面波波速为 270 m/s, 判释为粘砂土、卵石层; 第二层 20~50 m, 电阻率值小于 50  $\Omega\cdot\text{m}$ , 面波波速为 440 m/s, 判释为卵石夹砂粘土、粘砂土。黄土台塬区地表基质总体可分为两层, 第一层 0~20 m, 电阻率值为 60~90  $\Omega\cdot\text{m}$ , 面波波速为 290 m/s, 判释为黄土; 第二层 20~70 m, 电阻率值 10~40  $\Omega\cdot\text{m}$ , 面波波速为 440 m/s, 判释为黄土夹古土壤。总体来看, 韩城市地表基质垂向结构单一。

## 5. 结论

1) 本次工作通过应用天然源面波技术和高密度电法的综合物探技术, 查明了工作区地表基质层的垂向结构, 达到了预期综合探测目的。从探测效果来看, 两种方法对 50 m 深度范围内地表基质层划分、查明第四系覆盖厚度均有效果。

2) 根据本次天然源面波技术的探测结果, 推断解译了工作区地表基质层垂向特征, 取得了良好的探测结果。与主动源地震法及其他电磁类方法相比, 天然源面波技术具有勘探深度大, 野外施工简捷, 无需人工震源, 受震动干扰影响较小及场地要求条件低等优点, 适用于城区范围内活动断裂勘查、地层划分及不良地质体圈定等工作, 在城市基础地质调查中具有广阔的应用前景。

3) 高密度电法选用温纳装置进行测量, 垂直方向分辨力较高。其具有效率高, 成本低, 信息丰富, 探测准确等优点, 但是高密度电法无法在有限测线长度的情况下得到测线两端深部的地电信息。

## 参考文献

- [1] 殷志强, 秦小光, 张蜀冀, 卫晓锋, 侯红星, 何泽新, 等. 地表基质分类及调查初步研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 8-14.
- [2] 葛良胜, 杨贵才. 自然资源调查监测工作新领域: 地表基质调查[J]. 中国国土资源经济, 2020, 33(9): 4-11, 67.
- [3] 殷志强, 陈自然, 李霞, 等. 地表基质综合调查: 内涵、分层、填图与支撑目标[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 144-151.
- [4] 张晓璐. 渭北区块韩城煤层气三维地震资料解释及评价[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012.
- [5] 强洋洋, 王鑫鑫, 段瑞锋, 李博克, 刘磊. 瞬变电磁法在韩城矿区探测中的应用[J]. 陕西地质, 2021, 39(2): 89-94.
- [6] Aki, K. (1957) Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35, 415-456.
- [7] 王振东. 微动的空间自相关法及其实用技术[J]. 物探与化探, 1986, 10(2): 123-133.
- [8] 刘云帆, 梅汝吾, 叶佩, 等. WD 智能天然源面波数据采集处理系统及其应用试验[J]. 物探与化探, 2016, 40(5): 1007-1015.
- [9] 罗银河, 夏江海, 刘江平, 等. 基阶与高阶瑞利波联合反演研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(1): 242-249.
- [10] 梁志强. 层状介质中多模式面波频散曲线研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2006.
- [11] 李娜, 何正勤, 叶太兰, 等. 天然源面波勘探台阵对比试验[J]. 地震学报, 2015, 37(2): 323-334.
- [12] 沈雨忆. 基于微动探测的江汉盆地浅部土层结构特征研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地震局地震研究所, 2018.
- [13] 吕惠进, 刘少华, 刘伯根. 高密度电阻率法在地面塌陷调查中的应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 381-386.
- [14] 董浩斌, 王传雷. 高密度电法的发展与应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 171-176.