

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230719004

利用微动台阵初勘目标区断裂位置及地层分布情况——以滨海区评为例*

孟科, 杨浩, 顾勤平, 王金艳, 赵启光

(江苏省地震局, 江苏南京 210014)

摘要: 在滨海某地震安全性评价项目中, 针对目标区面积大、覆盖层厚度大、地下隐伏构造复杂等问题, 采用微动勘探方法加密观测目标区, 获得了界牌-滨淮农场断裂的空间位置、目标区三维S波速度结构; 并将微动探测结果与主动源地震勘探、剪切波速测井展开对比分析。结果表明: (1) 针对界牌-滨淮农场断裂, 微动探测与主动源地震勘探两种方法所揭示的断裂特征较为一致, 作为初勘成果具有较强的应用价值; (2) 在100 m深度范围以内, 微动探测与波速测井所获得的剪切波速度值相近, 因此微动探测技术可用于场地类别的快速判定; (3) 微动探测技术相比测井和主动源地震勘探, 可更经济快速的探明深部地层的速度结构, 为目标区地层三维建模提供拓展资料及修正依据。

关键词: 微动探测; 城市区评探测; 界牌-滨淮农场断裂; 速度结构

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0969-08

Preliminary Survey of Fracture Location and Stratigraphic Distribution in Target Area using Microtremor Array: a Case Study of the Coastal Area Assessment

MENG Ke, YANG Hao, GU Qinqing, WANG Jinyan, ZHAO Qiguang

(Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China)

Abstract: In a seismic safety evaluation project in a coastal area, microtremor detection method was adopted to densely observe the target area, addressing issues such as large target area, significant thickness in overburden layers, and complex subsurface concealed structures. This approach successfully determined the spatial location of the Jiepai-Binhuai Farm Fault and the 3D S-wave velocity structure of the target area. The microtremor detection results were analyzed and compared with data from active source seismic exploration and shear wave velocity logging. The results showed that: (1) For the Jiepai-Binhuai Farm Fault, the characteristics revealed by both microtremor detection and active source seismic exploration were relatively consistent, demonstrating significant application value as preliminary exploration results; (2) Within a depth of 100 m, the shear wave velocity values obtained from microtremor detection were similar to those from wave velocity logging, indicating that

* 收稿日期: 2023-07-19; 修回日期: 2023-12-08

基金项目: 中国地震局地震星火科技计划项目(XH23018C)、中国地震局地震星火科技计划攻关项目(XH24013B)、江苏省地震局局长基金项目(202301)、江苏省333高层次人才项目及国家自然科学基金(41704052)、江苏省地震局青年基金(202305)资助

作者简介: 孟科(1984—), 男, 工程师。主要从事抗震设防与浅层地震勘探研究。E-mail: 872208271@qq.com

界牌-滨淮农场断裂是一条北东向展布、与多条北东或近北东发育不完全的次级断裂构成了一条宽度约4 km长的破碎带,主断裂为一条倾向北西,倾角 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$,归属于前第四纪断裂的正断层。本文中浅层地震和微动测线主要针对推测的主断裂通过位置进行布设,目标区范围及测线测点布设见图2。

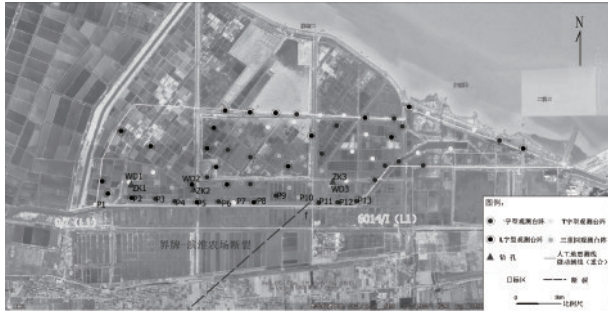


图2 目标区微动测点及实验测线布设示意

Fig.2 Microtremor survey sites and experimental survey lines in target area

2 微动探测方法

2.1 微动方法简介

微动探测是指基于从台阵观测的天然场源微动信号中采用数据处理与分析技术提取面波(瑞利波)频散信息,再通过瑞利波反演技术获得地下介质S波速度结构的地球物理勘探方法^[6-7]。近年来,我国学者主要在应用研究方面开展了大量工作,主

要涉及城市地质调查、煤矿、溶洞、地热、隐伏断裂勘察等多个领域^[8-15],但是大规模应用在地震区评的案例还较少。

2.2 仪器设备和数据采集

选用合肥国为电子有限公司GN209微动探测系统,连接主频为2 Hz的垂直分量宽频带拾震器进行数据采集,适合于工程测震及野外单点信号采集,也可垂向组合、三分量组合使用。

根据现场条件合理选择观测台阵,主要采用了一字型台阵、L型台阵、T字型台阵及三重圆台阵,一字型台阵和L型台阵站间距11.25 m,采用9个台站接收数据,T字型台阵站间距30 m,采用4个台站接收数据,三重圆台阵半径分别为22.5、45、90 m,采用10个台站接收数据。

2.3 数据处理

使用Geogiga Process软件,采取空间自相关方法(SPAC法)提取瑞雷波频散曲线。

微动剖面探测数据处理流程如图3所示,根据台阵布置方式进行微动信号采集,利用F-K法或SPAC法从各测点记录中提取瑞雷波频散曲线,绘制相速度等值线图,或者计算视S波速度,利用实际微动信号中提取的瑞雷波频散曲线反演得到视横波速度结构信息。常用的反演算法有半波法经验公式反演,半波法经验公式反演是一种采用经验公式对频散曲线进行反演计算的方法,探测目标剖面

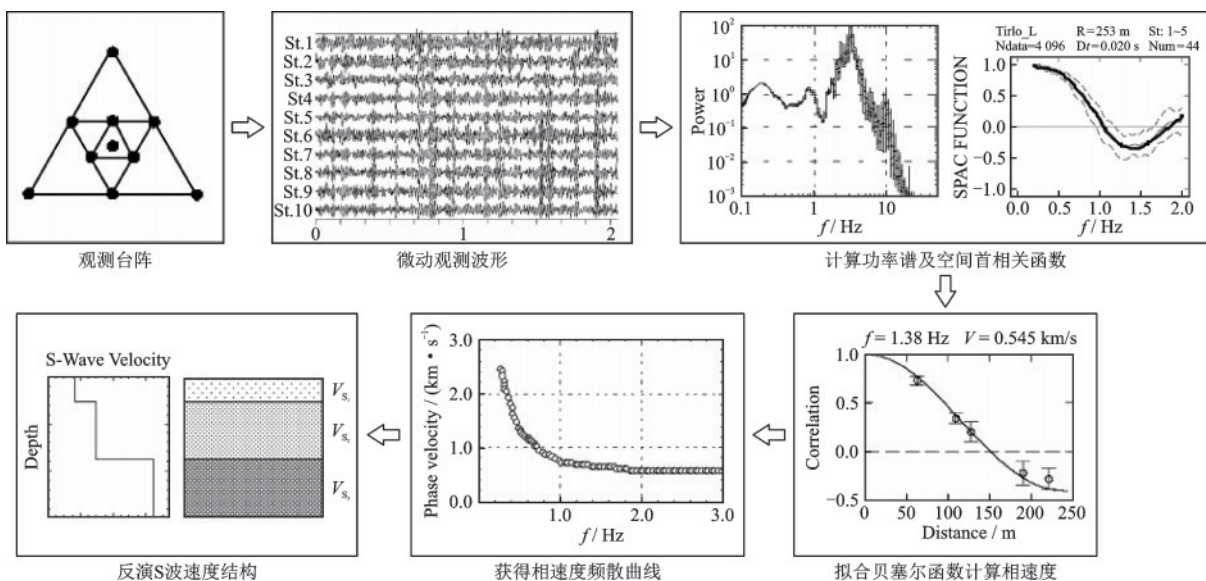


图3 数据处理流程示意

Fig.3 Data processing flowchart

上对应的视S波速度的变化情况,以获取相应的地层构造。

计算视S波速度半波法经验公式如下:

该方法用于剖面上岩性的相对变化而无需反演横波速度的绝对值。

$$v_{s,i} = \left[\frac{t_i \cdot v_{r,i}^4 - t_{i-1} \cdot v_{r,i-1}^4}{t_i - t_{i-1}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

式中, V_s 为视S波速度; V_r 为瑞雷波相速度; $t_i = 1/f_i$ 为周期, 对应的深度一般取半波长。

计算出视S波速度后, 可根据相速度频散曲线算得视S波速度随深度的变化曲线 (V_s-h 曲线), 再利用光滑插值等计算处理后, 即可得到视S波速度的剖面图。视S波速度不等于实际的S波速度值, 是拥有速度量纲的物性参数, 其变化趋势可以反映出实际的S波速度变化, 故可通过视S波速度的剖面图进行地质推断。

3 微动与浅层地震测线对比实验

3.1 浅地震勘探探测的采集情况

浅层地震探测使用的采集设备为美国SI公司生产的S-Land全数字化高密度地震勘探数据采集系统, 该系统配置28 Hz纵、横波两用检波器。震源

为保定北奥石油物探特种车辆有限公司生产的KZ03型纵、横两用可控震源车; 观测系统: 纵波反射方式激发, 偏移30 m, 道距5 m, 炮距15 m, 84道接收, 采样间隔0.5 ms; 处理软件使用Echos2011.3与Geogiga Process。

3.2 微动初勘结果

使用P1~P13微动点的视横波速度进行插值处理生成I测线视横波速度剖面图(图4(a))。速度分布总体上具有明显的非均匀性, 纵向成层、横向分块的特征清晰可见。由图可知: 在桩号666~1665段出现局部高速异常, 自浅至深速度形态具有类似背斜构造的挤压、隆起特征, 结合浅层地震勘探结果综合推断该处发育存在古潜山。在桩号3700~4800段速度出现间断, 浅部的低速体(松散层)仍向深部继续发育。根据已知界牌-滨淮农场断裂的资料, 在4800桩号处推测可能存在界牌-滨淮农场断裂通过的迹象。

3.3 主动源浅层地震结果

在初勘I测线上重合布设了浅层地震测线L1并处理生成动校正叠加时间剖面图(图4(b)), 并将剖面图进行了时深转换。由图可知: 桩号666~1665之间覆盖层波组不连续, 由深到浅影响了P2~P4三

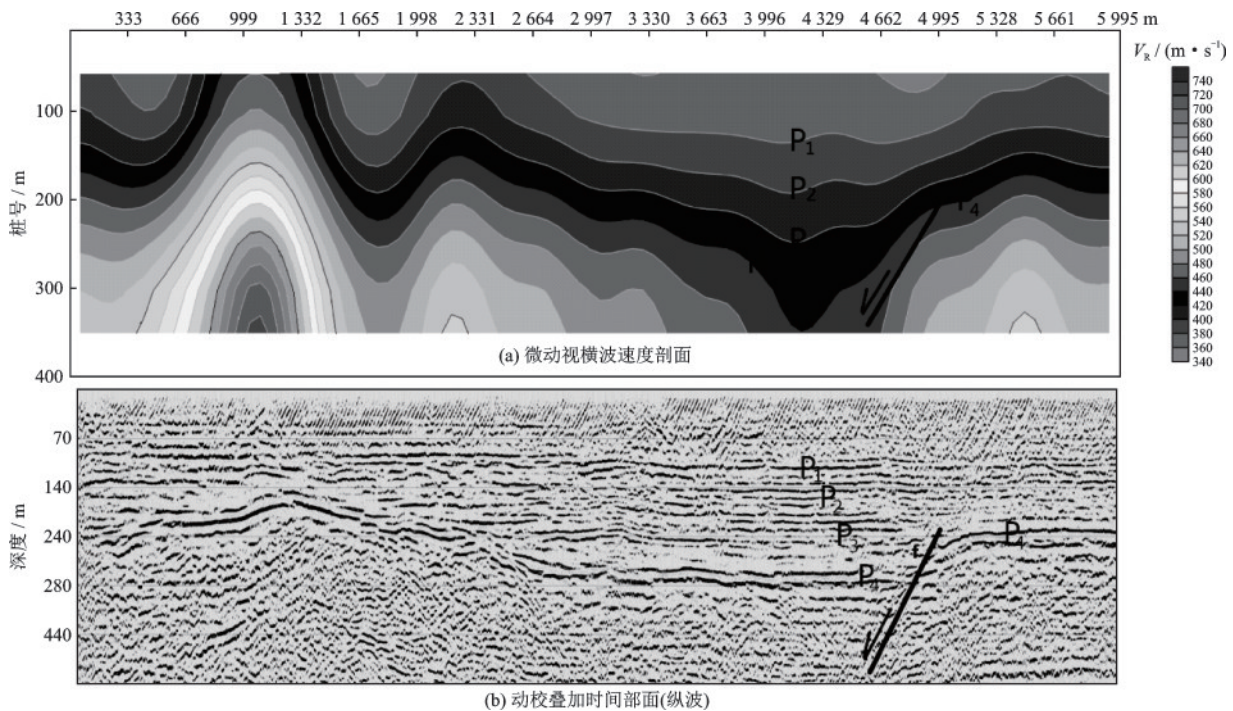


图4 微动视横波速度剖面图与动校正叠加时间剖面图对照组

Fig.4 Comparison of microtremor shear wave velocity profile and dynamic corrected stacked time profile

组覆盖层,P1波组较为平坦,推测该处有一座古潜山存在;在桩号4 800附近基岩同相轴不连续,两边出现明显时差,波组凌乱产生突变,结合附近单炮记录判断该位置可能存在断层。P1波组推测为晚更新世地层内部界面,埋深大致在100~120 m;P2波组推测为中更新世地层内部界面,埋深大致在120~140 m;P3波组推测为第四系和新近系的分界面,埋深大致在140~240 m之间;P4为基岩顶面反

射波组,埋深在140~280 m之间。

3.4 断点附近原始记录对比

为验证断点的可靠性,选择了I测线中的P8~P12微动测点频散曲线图以及L1测线的单炮记录作为比照数据组,该两组数据均跨越断层,对照组见图5。

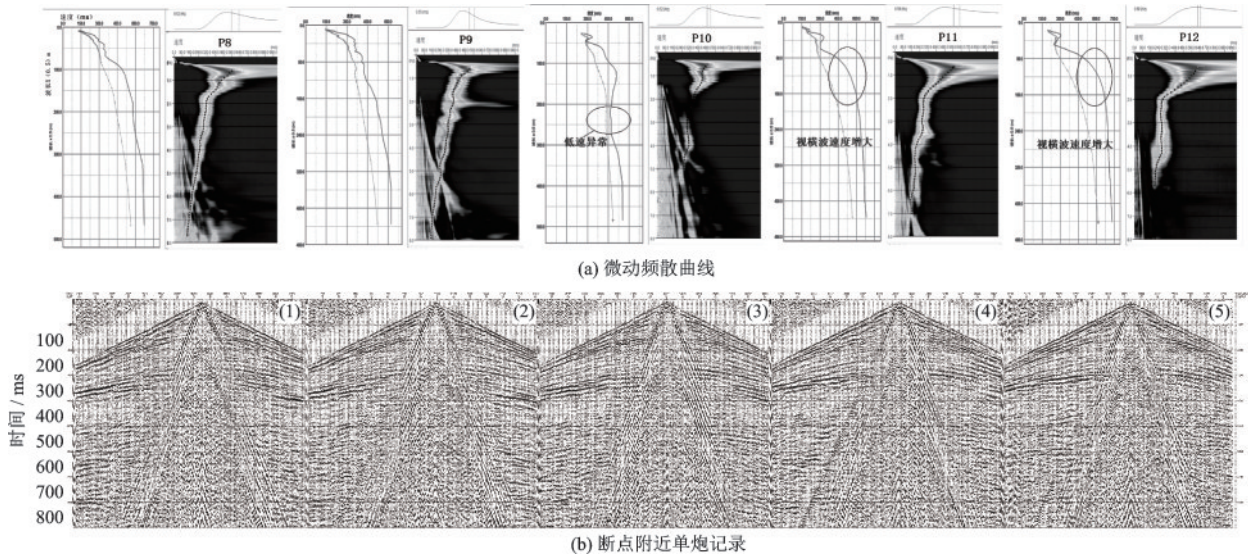


图5 单炮记录对照组

Fig.5 Single shot record comparison

由图5(a)微动频散曲线图可知:P8、P9中蓝色线为视横波速度,绿色线为相速度,随着深度的变化速度递增,说明地层比较均匀连续;P10中视横波速度出现低速异常,可能是受下方断层影响所致,因此详勘时该测点附近应为重点探测区域;P11、P12中视横波速度曲线虽然恢复了连续性,但速度值明显高于P8、P9,推测是断层两侧岩性不同使得横波速度出现差异所致;可以明确5个测点跨越了断裂上下盘不同岩性的基岩。

由图5(b)断点附近连续五炮记录可知:单炮记录的是震源位于断层上、下盘以及断层上几种形态的展示^[16],通过追踪300~380 ms的基岩反射波,当震源在测线上移动时,断层位置附近上、下盘的反射同相轴的断错位置不断变化,如从图5b(1)右侧开始的380 ms基岩反射波不断上移结束在了图5b(5)的300 ms,由此可以初步判断断裂的范围和断距,经过处理分析,浅层地震测线上控制的断裂为一条倾向北西、视倾角约40°、视断距在30 m的正断层,属前第四纪断裂,该断裂特征与界牌-滨淮农

场断裂基本一致。

3.5 对比结果

为标定钻孔深度内的浅地震解释层位,分别在测线前、中、后段临近位置选择了三个勘察钻孔,由表1可知目标区钻孔深度范围内土层自上而下分为3大层,ZK2钻孔在122 m深度未揭穿中更新统,中更新统的顶大约在90 m以深,该分界线在浅层地震动校叠加时间剖面图上对应为P1波组。目标区在ZK1-ZK3钻孔之间100 m以上的地层较为平坦,说明浅层地震测线对地层起伏解译的结果更为可靠,而微动测线剖面反映表地层起伏情况有一定的失真表现。

通过对剖面的对比分析可得出以下认识:

(1)大点距布设的微动测线在反应隐伏地下异常点及断层形态上有一定表现能力,由于数据点少,处理流程及时间也大幅减少,可以快速产出覆盖层的速度剖面图。

(2)微动视横波速度剖面图使用的是两点之间

表1 钻孔深度与厚度数据

Table 1 Borehole depth and thickness data

地层单位	ZK1孔深/m	ZK2孔深/m	ZK3孔深/m	地层岩性描述
全新统(Q ₄ ^{al})	1.68	1.40	1.80	充填土、松散、主要为粉土黏性土
全新统(Q ₄ ^{mc})	7.60	10.10	9.50	淤泥质黏土夹粉土
全新统(Q ₄ ^{mc})	27.30	27.00	28.50	粉土夹粉质粘土
上更新统(Q ₃ ^{al+1})	50.00	44.10	36.60	粉砂夹粉土
上更新统(Q ₃ ^{mc})	72.30	71.80	78.60	粉质黏土夹粉土
中更新统(Q ₂ ^{mc})	96.00	95.10	90.20	粉砂
中更新统(Q ₂ ¹)未揭穿	102.00	122.00	102.00	粉质黏土

插值计算生成,受观测点间距和数量限制,对浅覆盖层的起伏形态反映没有主动源的精确,但是该缺陷随着深度的加深逐渐减弱,从本次实验来看,200 m以下反映出的覆盖层起伏形态与主动源探测的较为一致。

(3)主动源的浅层地震勘探无论在分辨率、信噪比以及对地层的分层能力上都比被动源的微动观测要更好,但是后者的优势在于不受场地限制,可以快速大面积,适合作为主动源浅地震勘探之前的初勘手段使用。

4 微动与剪切波速测井对比实验

4.1 测井仪器

测试工作使用仪器为河北省廊坊开发区大地工程检测技术开发有限公司生产的XG—I悬挂式波速测井仪,仪器接收信号的探头采用悬挂式中检波器,水平检波器的固有频率为60 Hz,本次工作采用0.05 ms采样间隔,2 048点记录长度,测试点间

距1 m。

4.2 对比方式

本次区评项目所有钻孔与微动观测点基本遵循插空布设的原则,临近或重叠位置可提供的对照组较少,本文挑选了3对与微动测点较为接近的钻孔对照组进行对比。

微动探测深度为400 m,钻孔深度为100 m,有效对比深度为100 m。采用微动点前100 m的视横波速度与测井仪器采集的横波剪切波速进行对比,横波直方图对照组见图5。

4.3 对比结果

由图6可得到以下三点认识:

(1)微动观测点测得的视横波速度和利用钻孔测得的剪切横波速度在100 m深度内测值较为接近,误差均在不同深度土层理论横波速度值之内。该实验结果与北京市水电物探研究所在孔中波速测井曲线对比试验、及单孔法地震波测井曲线对比试验(2014年)结果一致。

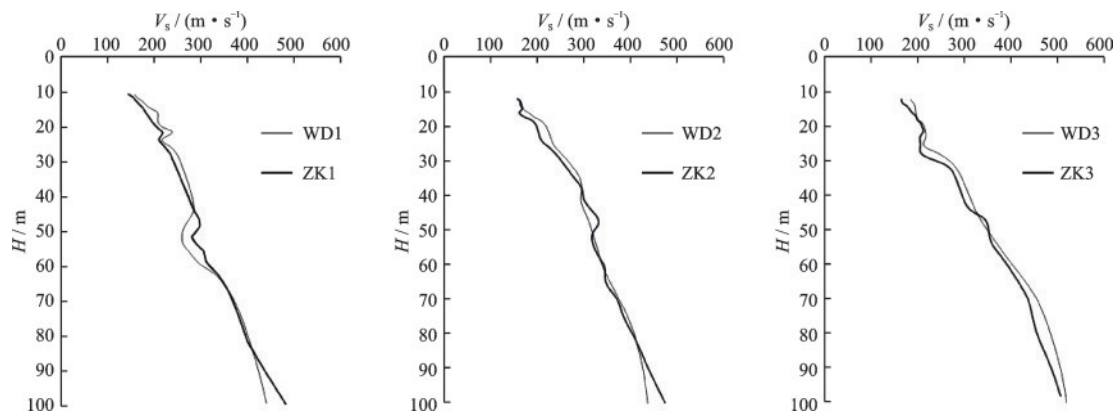


图6 微动视横波速度与钻孔剪切横波速度直方图对照组

Fig.6 Histogram comparison between microtremor shear wave velocity and borehole shear wave velocity

(2)场地类别的判定一般选用地表至地下15 m深度土层的剪切波速值进行计算,但目前主流的测井仪器基本会在井口形成几米的空测值,微动法可以利用视横波速度对剪切横波速度进行校核,或者在特殊情况直接取代进行快速的场地类别判定。

(3)微动能探测到更深层位的视横波速度,可以作为100 m剪切波速测井以下横波速度资料的补充,还可以用来参考解释浅层地震勘探覆盖层深度;在微动点布设密度高,采集数据样本足够多的情况下可以使得场地计算以及等值线图的制作能更准确地反映目标区或工程场地的实际情况。

5 探讨利用微动视横波速度剖面提高目标区三维地质模型精度

5.1 建模方法

本次三维地质模型采用“钻孔+交叉剖面”法,使用SKUA-GOCAD软件制作。以钻孔数据为主,结合区域地质调查和资料分析、物探工作结果、微动视横波速度等,确定地层等深线。对于地质情况比较复杂的构造,如夹层、尖灭、透镜体等特殊地质构造,在地质建模过程中加入交叉地质剖面,结合地质认识圈定夹层、地层尖灭线与透镜体范围,修正了以往建模中尖灭点位置在钻孔间1/2区域的不合理情况,使得地层尖灭线、透镜体等得到了更加精确的表达,提高建模的精确度。

5.2 微动等值线图与三维地质结构模型

图7为使用matlab软件制作的500 m/s的等值线图(图中Z轴为深度,XY轴为各测点对应的大地坐标值),由图可知目标区达到500 m/s速度分布在深度90~200 m范围内。200 m附近可见部分基岩起伏的形态。

图8为目标区浅部沉积层三维地质结构模型,与图7参照区域面积一致,经过对比可知,图8覆盖层内部与基岩的起伏,不仅与图7地层的波速等值线匹配度较高,也与浅层人工地震物探测线匹配度较高,是一个对地层反映准确,精度较高的优质模型。

经过比对,使用微动得到不同深度的等值线图参与构建三维地质模型可以得到更高精度更深层位的模型。

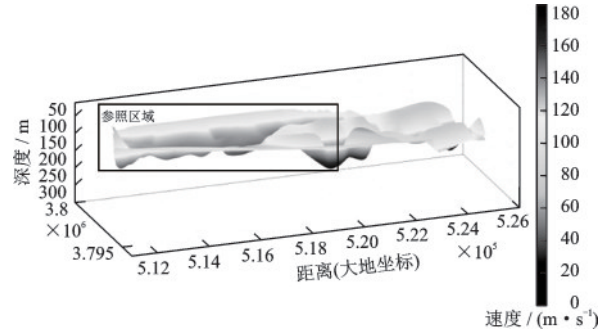


图7 视横波速度500 m/s等值线

Fig 7 500 m/s is oline of shear wave velocity

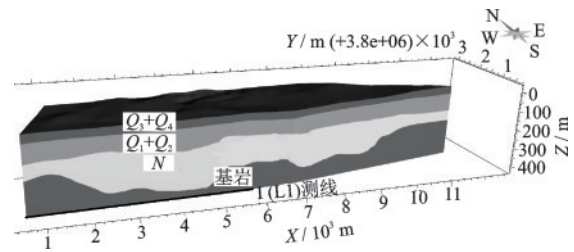


图8 目标区浅部沉积层三维地质结构模型

Fig 8 3D geological structure model of shallow sedimentary layer in target area

6 结论

本文利用盐城滨海区评项目进行了微动与浅地震测线对比实验和微动与剪切波速测井对比实验,并就如何利用微动数据构建的等值线图提升三维地质模型的精度做了探索性研究。

研究表明,微动在探查隐伏构造体及存在明显岩性差异的断层上能力上较为优秀,在对目标区大面积初勘时,微动测线以作为浅层地震测线布设的参考依据;微动观测点与钻孔从地表到地下100 m深度内对地层横波速度的反映是相近的,可以快速对场地类别进行判定;大规模布设的微动观测点可以提供更大面积、更深的地下覆盖层横波速度样本,可以显著提高场地计算以及等值线图的精准性,并作为目标区三维建模的有效补充以及拓展方式。

参考文献:

- [1] 区域性地震安全性评价技术规范: DB32/T 4050—2021[S]. 南京:江苏省市场监督管理局,2021.
- [2] 李雪燕,陈晓非,杨振涛,等. 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,2020,63(1):247-255.

- Li X Y, Chen X F, Yang Z T, et al. Application of high-order surface waves in shallow exploration: An example of the Suzhou river, Shanghai[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(1): 247-255. (in Chinese)
- [3] 李学军. 我国城市物探的应用与发展[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(6): 2221-2231.
- Li X J. Applications and development of city geophysical prospecting in China[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(6): 2221-2231. (in Chinese)
- [4] Gu Q P, Kang Q Q, Xu H G, et al. New evidence from shallow seismic surveys for Quaternary activity of the Benchahe fault[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2018(15): 1528-1541.
- [5] 顾勤平, 杨浩, 赵启光, 等. 金坛-如皋断裂北东段浅层地震勘探新证据[J]. 地震地质, 2019, 41(3): 743-758.
- Gu Q P, Yang H, Zhao Q G, et al. New evidence of NE-segment of Jintan-rugao fault discovered by shallow seismic exploration method[J]. Seismology and Geology, 2019, 41(3): 743-758. (in Chinese)
- [6] Okada H. The microtremor survey method[M]. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2004.
- [7] Okada H. Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method[J]. Exploration Geophysics, 2006, 37(1): 73-85.
- [8] 凌甦群, 三轮滋. 瞬态面波法和微动勘探法在日本新潟县中越地震灾区地质调查中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 80-85.
- Ling S Q, Miwa S. The evaluation of soil structures by surface wave prospecting method and microtremor survey method-2004 mid niigata prefecture earthquake [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 80-85. (in Chinese)
- [9] 翟法智, 徐佩芬, 潘丽娜, 等. 宁波轨道交通暗浜勘察物探方法研究[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(4): 1856-1861.
- Zhai F Z, Xu P F, Pan L N, et al. Study on geophysical methods of underground silt exploration in Ningbo rail transit[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(4): 1856-1861. (in Chinese)
- [10] 彭菲, 王伟君, 熊仁伟, 等. 江苏省泗阳浅层沉积结构的微动H/V谱比法探测[J]. 地震地质, 2022, 44(3): 561-577.
- Peng F, Wang W J, Xiong R W, et al. Detection of shallow sedimentary structure In Siyang, Jiangsu Province by microtremor H/V spectral ratio method [J]. Seismology and Geology, 2022, 44(3): 561-577. (in Chinese)
- [11] 徐佩芬, 李世豪, 杜建国, 等. 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, 2013, 29(5): 1841-1845.
- Xu P F, Li S H, Du J G, et al. Microtremor survey method: A new geophysical method for dividing strata and detecting the buried fault structures[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(5): 1841-1845. (in Chinese)
- [12] 黄光明, 徐佩芬, 李长安, 等. 覆盖区岩溶溶洞的微动探测试验研究——以福建永安大湖盆地为例[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 536-544.
- Huang G M, Xu P F, Li C A, et al. Application of 2D microtremor section survey method in covered karst area, taking Yongan Dahu Basin, Fujian Province as example[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 536-544. (in Chinese)
- [13] 王继鑫, 荣棉水, 符力耘, 等. 用微动台阵记录联合反演场地浅层速度结构——以唐山响堂台3#场地为例[J]. 地震地质, 2020, 42(6): 1335-1353.
- Wang J X, Rong M S, Fu L Y, et al. Joint inversion of site velocity structure by microtremor array record: a case study of the observation site 3# of XiangTang in Tangshan[J]. Seismology and Geology, 2020, 42(6): 1335-1353. (in Chinese)
- [14] 张宝龙, 李志伟, 包丰, 等. 基于微动方法研究五大连池火山区尾山火山锥浅层剪切波速度结构[J]. 地球物理学报, 2016, 59(10): 3662-3673.
- Zhang B L, Li Z W, Bao F, et al. Shallow shear-wave velocity structures under the Weishan volcanic cone in Wudalianchi volcano field by microtremor survey [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(10): 3662-3673. (in Chinese)
- [15] 乔高乾, 徐佩芬, 龙刚, 等. 微动剖面探测法在城市轨道交通勘察中的应用及效果: 以广州地铁十号线为例[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(20): 8582-8591.
- Qiao G Q, Xu P F, Long G, et al. Application of the microtremor profile method in urban rail transit Survey: a case study along subway line 10 in Guangzhou[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(20): 8582-8591. (in Chinese)
- [16] 孟科, 杨浩, 赵启光, 等. 幕府山—焦山断裂的空间展布和浅部构造特征研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(4): 866-873.
- Meng K, Yang H, Zhao Q G, et al. Research on the spatial distribution and shallow structural characteristics of the Mufushan-Jiaoshan fault[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(4): 866-873. (in Chinese)

(本文责编: 苏泽云)