

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231122001

# 利用主-被动源法联合探测昆山—嘉定断裂上断点位置\*

张颐彪<sup>1,2</sup>, 范小平<sup>1</sup>, 符伟<sup>1</sup>, 郑拓<sup>1</sup>, 张鹏<sup>1</sup>, 徐焯<sup>3</sup>, 丁页岭<sup>3</sup>

(1. 南京工业大学交通运输工程学院, 江苏南京 211800; 2. 中国能源建设集团山西省电力勘测设计院有限公司, 山西太原 030001; 3. 江苏省地震局, 江苏南京 210000)

**摘要:** 为探索深厚覆盖层区城市隐伏断裂探测及其活动性评价, 利用主-被动源联合方法对昆山—嘉定断裂进行探测研究。首先采用浅层地震勘探法对昆山—嘉定断裂进行了定位, 在断点发育处采用台阵微振动观测技术对覆盖层精细结构探测。验证并更新了昆山—嘉定断裂的断层特征和断裂活动性认识: 昆山—嘉定断裂为正断层, 倾向为南, 倾角约 $60^\circ$ , 该断裂错断了新近系, 上断点终止于下更新统顶部, 上断点埋深约在220~240 m, 投影在地表的坐标为(31.38°N, 121.06°E), 据此推断昆山—嘉定断裂最新活动时代为第四纪早更新世。主-被动源联合探测法避免了单一勘探方法对隐伏断裂勘探的局限性, 可利用主动源法对目标断裂进行初步定位, 再利用被动源法确定上断裂位置。主-被动源联合探测法对解决深厚覆盖区隐伏断裂上断点位置具有参考意义。

**关键词:** 主-被动源法; 昆山—嘉定断裂; 上断点; 浅层地震勘探; 台阵微振动

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-1301-10

## Joint Detection of Upper Breakpoint Location of Kunshan—Jiading Fault Using Active-passive Source Method

ZHANG Yibiao<sup>1,2</sup>, FAN Xiaoping<sup>1</sup>, FU Wei<sup>1</sup>, ZHENG Tuo<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>,  
XU Ye<sup>3</sup>, DING Yeling<sup>3</sup>

(1. College of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China;  
2. China Energy Construction Group Shanxi Electric Power Survey and Design Institute Co., Ltd., Taiyuan 030001, China;  
3. Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** To explore the detection of urban concealed faults and the evaluation of their activity in deep overburden areas, the Kunshan—Jiading fault was investigated using the joint active-passive source detection method. Firstly, the shallow seismic exploration method was used to locate the Kunshan—Jiading fault, and the fine structure of the overburden layers was detected using array microtremor exploration technology at the breakpoint development zone. The fault characteristics and activity of the Kunshan—Jiading fault were verified and updated: the Kunshan—Jiading fault was a normal fault with a southern inclination and an inclination angle of about  $60^\circ$ . The fault displaced the Neogene strata, with

\* 收稿日期:2023-11-22;修回日期:2024-07-23

基金项目:国家自然科学基金项目(41874051,42104099)资助

作者简介:张颐彪(1999—),男,硕士研究生。主要从事地球物理勘探方面的研究。E-mail:709551157@qq.com

通信作者:范小平(1974—),男,教授,硕士。主要从事地震波理论与应用、介质非均匀性成像等方面的教学和研究。

E-mail:nj\_fxp@163.com

the upper breakpoint terminating at the top of the Lower Pleistocene and buried at a depth of about 220~240 meters. Its projection on the surface was located at coordinates (31.38°N, 121.06°E). Based on this, the latest activity of the Kunshan—Jiading fault was inferred to have occurred during the Early Pleistocene of the Quaternary period. The joint active-passive source detection method overcomes the limitations of a single exploration method for concealed faults. The active source method can be used for preliminary positioning of target faults, followed by the passive source method to determine the location of the upper breakpoint. The joint active-passive source detection method provides a valuable reference for determining the location of the upper breakpoint of concealed faults in deep overburden areas.

**Keywords:** active-passive source method; Kunshan—Jiading fault; upper breakpoint; shallow seismic exploration; array microtremor

## 0 引言

隐伏断层探测及其活动性鉴定工作是活动断层探测和地震危险性评价工作中的重要内容之一。隐伏断层空间位置的精确定位及其活动性的鉴定对城市发展规划、防灾减灾等工作有着重要的意义。主动源因其具有较高的探测精度仍是城市隐伏断层探测工作中主要的断层定位方法之一<sup>[1-3]</sup>。被动源勘探是指利用地球表面产生的天然微弱振动作为信号源,通过对观测到的微振动信号进行处理与分析,获取地下介质结构信息的地球物理勘探方法<sup>[4-6]</sup>。该方法广泛应用于工程地质勘探、场地安全性评价、地下空间勘察等多个领域<sup>[7-9]</sup>。

昆山—嘉定断裂是一条隐伏的南倾正断层,总长约 78 km。该断裂对甬直凹陷有控制作用,历史上在甬直凹陷内发生过 2 次破坏性地震,最大震级达 5 级,是苏州地区一条与破坏性地震关系密切的重要断裂构造。前人针对昆山—嘉定断裂开展了一系列的探测与研究,对昆山—嘉定断裂的空间展布位置已较为明确,但对其活动性探测与研究仍有许多工作要做。由于该区第四系发育,埋深较厚,传统的排钻方法因成本昂贵、城市内不便施工等因素而受限制<sup>[10-11]</sup>。

基于上述分析,本文尝试采用主-被动源联合探测方法实现对昆山—嘉定断裂上断点位置进行定位并对断裂活动性进行研究。本文研究成果为深厚覆盖层环境下,城市隐伏断层探测及其活动性评价提供新的思路。

## 1 探测方法与原理

### 1.1 反射波勘探方法

反射波法是利用震源激发产生横向或纵向的地震波,通过各岩层产生反射,地震仪器记录下反射波的传播途径、震动强度、速度、振幅、频率等参数,这些参数会因为反射介质的不同而发生变化,因此通过对这些参数的分析,可以推断出地下岩石或者地层的所属类型以及分布特征,从而达到工程地质勘查的目的<sup>[12-14]</sup>。反射波的到达时间与反射面的深度有关,据此可查明反射界面埋深、倾角等参数<sup>[15]</sup>。该方法已广泛应用于城市隐伏断层探测工作中,成为地质学家们在研究地质结构方面的主要手段之一<sup>[16-17]</sup>。

### 1.2 台阵微振动探测方法

观测表明,微振动信号包含体波和面波信号等成分,其中面波的能量占微振动信号总能量的 70% 以上<sup>[18]</sup>。微振动台阵观测系统有圆形(嵌套三角形、“九宫格”形)台阵、“十”字形台阵、“T”形台阵、“L”形台阵等<sup>[19]</sup>。常用的微振动信号提取方法有两种,一种空间自相关法(Spatial Autocorrelation Method,简称 SPAC 法)<sup>[20]</sup>;另一种是频率-波数法(Frequency-Wavenumber Spectral Method,简称 F-K 法)<sup>[21]</sup>。

空间自相关法基本原理是,给定一组被动源面波接收点,其中一个点位于中心,其余点等角度分布在圆周上,假设中心点  $C(0, 0)$  与圆周上任一点  $X(\gamma, \theta)$  接收的角频率为  $\omega$  的面波信号分别为  $u(0, 0, \omega, t)$  和  $u(\gamma, \theta, \omega, t)$ , 则其空间自相关函数为:

$$\phi(\gamma, \theta, \omega) = u(0, 0, \omega, t)u(\gamma, \theta, \omega, t) \quad (1)$$

空间自相关系数则定义为空间自相关函数在

所有方向上的平均,即:

$$\rho(\gamma, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \phi(\gamma, \theta, \omega) d\theta \quad (2)$$

式(2)的积分结果可表示为:

$$\rho(\gamma, \omega) = J_0\left(\frac{\omega_r}{v(\omega)}\right) \quad (3)$$

式中,  $J_0(X)$  为第一类零阶贝塞尔函数;  $v(\omega)$  为面波相速度<sup>[22-23]</sup>。

## 2 数据采集与处理

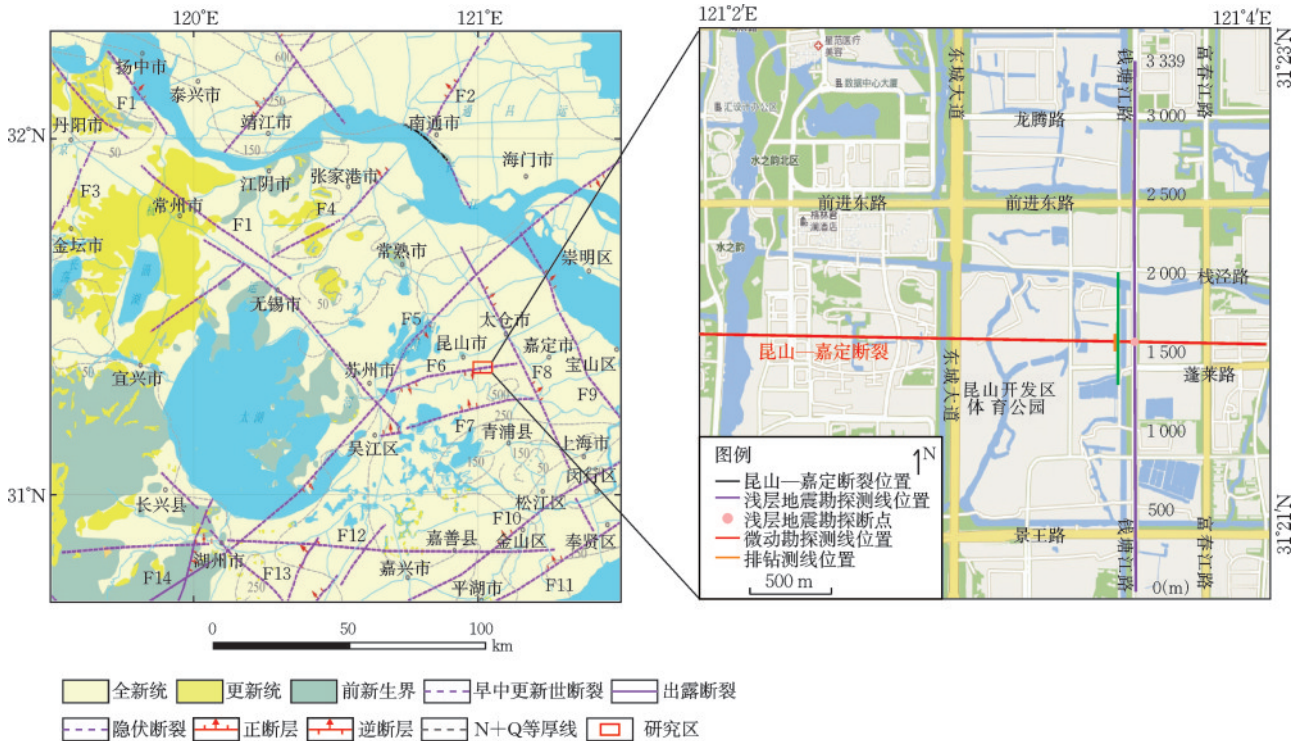
### 2.1 浅层地震反射波勘探

图1为本次勘探范围区域地震构造图及目标断

裂勘探位置示意图。本次沿钱塘江路由南向北布设了一条跨昆山—嘉定断裂的浅层地震反射勘探测线(图1紫线位置),测线标注为L1,测线总长度为3 339 m。观测系统、震源及检波器参数如表1所示。

图2为典型原始单炮记录。由图2可以看出反射波组初至较为清晰,在110、200、270、460、810、900 ms处均有较强的反射波组发育。说明本次单炮数据信噪比较高,为后续的剖面叠加奠定了基础。

图3为L1测线动校叠加时间剖面图。由图3可以看出,叠加剖面波组发育丰富,可识别出8组反射波,标记为P<sub>1</sub>~P<sub>8</sub>,其中:



主要断裂名称及其编号:

F1: 无锡—宿迁断裂; F2: 苏北滨海断裂; F3: 金云—南渡断裂; F4: 和桥—阳山断裂; F5: 湖州—苏州断裂;  
F6: 昆山—嘉定断裂; F7: 吴江—千灯断裂; F8: 太仓—奉贤断裂; F9: 浏河—新场断裂; F10: 松江—嘉善断裂;  
F11: 南汇—平湖断裂; F12: 湖州—嘉善断裂; F13: 长兴—奉化断裂; F14: 孝丰—三门湾断裂

图1 研究区区域地震构造及勘探位置

Fig.1 Regional seismic tectonic map and exploration locations of the study area

表1 浅层地震勘探测线参数一览表

Table 1 Parameters of shallow seismic exploration lines

测线 编号	观测系统参数				震源类型及参数			检波器 频率/ Hz	地震仪接收参数		测线		
	道距/ m	最小偏 移距/m	接收 道数	覆盖 次数	激发波 类型	可控源参数	扫描长度/s		扫描频带/Hz	激发方式	采样 间隔/Hz	记录 长度/ms	炮数
L1	3	36	90	12	P波	6	10~70	单边激发	28	0.5	2 000	265	3 339

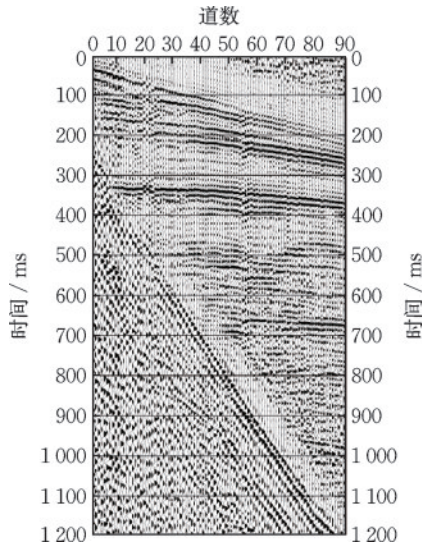


图2 L1测线典型反射原始单炮记录

Fig.2 Typical original single-shot record of reflection on line L1

P<sub>1</sub>波组:为中更新统(Qp<sub>2</sub>)顶面反射,反射波组同相轴连续、能量较强且稳定,强相位双程时为110~125 ms,界面埋深为85~95 m。

P<sub>2</sub>波组:为下更新统(Qp<sub>1</sub>)顶面反射,反射波组相

轴连续、能量较强且稳定,震相特征明显且连续,强相位双程时为190~210 ms,对应埋深为180~195 m。

P<sub>3</sub>波组:为新近系(N)顶面反射,反射波组能量较强且稳定,震相特征明显且连续,强相位双程时为310~330 ms,对应埋深为280~295 m。同相轴在1550~1600桩号附近疑似发生错动、扭曲,自南向北有10 ms左右的抬升,推断此处可能为断层的反映,断距5 m左右。

P<sub>4</sub>波组:推测为古近系(E)顶面反射波,反射波组能量较强且稳定,震相特征明显且连续,仅存在于0~1550桩号间,强相位双程时为450~470 ms,对应埋深为390~410 m。同相轴在1550桩号附近发生明显错动、扭曲,自南向北有20 ms左右的抬升,推断此处为断层的反映,断距10 m左右。

P<sub>5</sub>波组:推测为古近系(E)内部层位反射波,反射波组存在三组波峰,波组能量较强且稳定,震相特征明显且连续,仅存在于0~1400桩号间,强相位双程时为600~620 ms,对应埋深为610~630 m,同相轴在1400桩号附近自南向北有40 ms左右的抬升,推测为断裂通过导致,断距20 m左右。

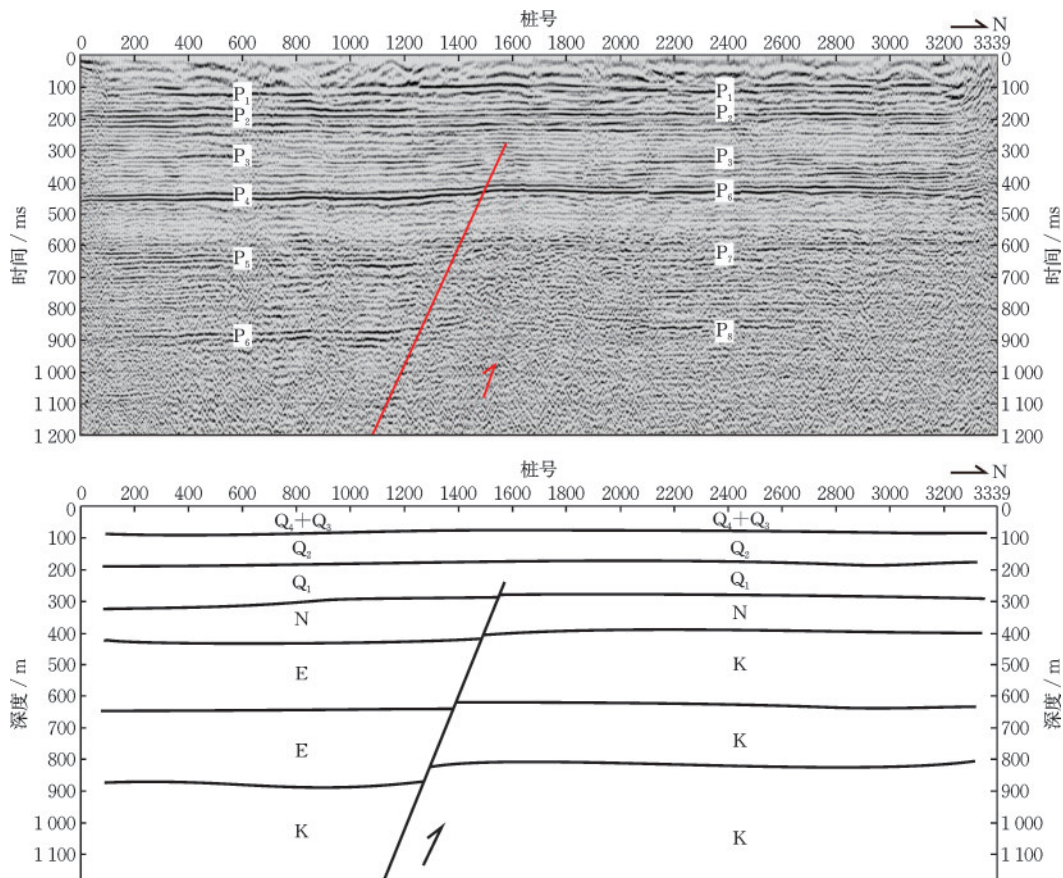


图3 L1测线动校叠加时间剖面图及地质解释

Fig.3 Normal moveout stacked time profile and geological interpretation of line L1

$P_6$ 波组:推测为白垩系(K)顶面反射波,反射波组能量较强且稳定,震相特征明显且连续,0~1270桩号间,强相位双程时为850~900 ms,对应埋深为840~870 m,同相轴在1270桩号附近自南向北有50 ms的抬升,推测为断裂通过导致,断距25 m左右。1550~3339桩号强相位双程时为440~460 ms,对应埋深为380~400 m。

$P_7$ 波组:推测为白垩系(K)内部层位顶面反射波,反射波组能量较强且稳定,震相特征明显且连续,仅存在于1400~3339桩号间,强相位双程时为630~680 ms,对应埋深为550~570 m。

$P_8$ 波组:推测为白垩系(K)内部层位反射波,反射波组能量较强且稳定,震相特征明显且连续,仅存在于1270~3339桩号间,强相位双程时为850~900 ms,对应埋深为790~870 m。

综上所述,在1550桩号处, $P_4$ 波组约有20 ms时差,地层落差可达10 m左右,可能为昆山—嘉定断裂发育所致。第四系地层埋深分别为95、195、295 m。断裂南侧新近系地层埋深约410 m,古近系地层自北向南下倾,埋深分别约为630、870 m。断裂北侧新近系埋深400 m,白垩系地层埋深610 m和800 m。断裂北侧古近系地层缺失,断裂两侧白垩系地层落差达470 m,反映了昆山—嘉定断裂对地层有控制作用。由此可见昆山—嘉定断裂是一条南倾的正断层,视倾角约 $60^\circ$ ,第四系底部被断裂错断,断距约10 m左右。

由浅层地震勘探可以看出断裂下盘出现了地层缺失的现象。造成该现象的原因可能是在古近纪时期发生了正断层活动,导致白垩系地层错断,下盘相对上升;在新近纪时期断裂活动减弱,使得新近系地层发生沉积;断裂活动直至第四纪早更新世结束,因此在该断裂下盘出现了古近系地层缺失的现象。此外,反射波组 $P_4$ 波组同相轴存在明显的时差,但 $P_3$ 、 $P_2$ 波组同相轴是否存在时差并不容易判定,为了进一步探测昆山—嘉定断裂是否对 $P_3$ 波组( $Qp_1$ 地层底)、 $P_2$ 波组( $Qp_2$ 地层底)产生扰动,考虑到横波对较为松散的介质比较敏感,因此采用台阵微振动勘探方法对昆山—嘉定断裂在第四系内部发育做进一步探测研究。

## 2.2 台阵微振动勘探

本次台阵微振动勘探采用九宫格形观测系统,设定主观测线一条(图1绿线位置),编号自南向北

依次为KS01—KS15,辅线布设主线两侧,各台站间距均为50 m(图4)。观测时以主测线的1个台站及其四周8个台站组成1个九宫格形数据体,观测时间2小时。随后对主测线每一个点分别重复上述操作,最终形成15个九宫格数据体。微振动仪频带宽度为0.2~200 Hz,主频为2 Hz,灵敏度为60 V/m/s,采样间隔为1 ms。

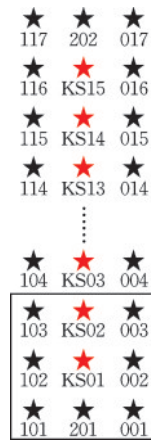


图4 台阵排列示意

Fig.4 Schematic diagram of array arrangement

对观测数据进行原始数据分段、集束、滤波等预处理<sup>[24-25]</sup>,使用SPAC法获取了15组频散曲线,图5为频散曲线集合,可以看出各观测点频散曲线形态具有一致性,仅在小于1 Hz范围内略有差异。随后利用遗传算法对频散曲线反演<sup>[26-28]</sup>,获取了深度为400 m的二维横波速度剖面(图6)。可以看出在台阵微振动勘探400 m的反演深度范围内,横波速度结构呈现纵向分层的结构特征;在200 m以内,

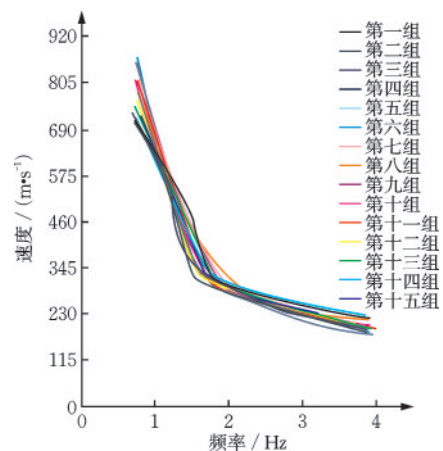


图5 台阵微振动勘探频散曲线集合

Fig.5 Collection of dispersion curves of array microtremor exploration

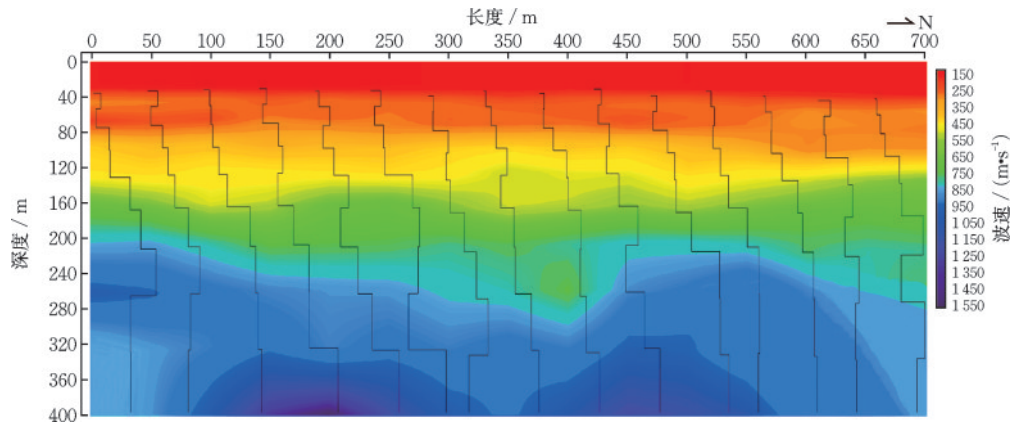


图6 微动勘探反演结果及结合模型曲线

Fig.6 Microtremor exploration inversion results and combined model curves

横波速度成像差异性较小,表明沉积层较为稳定;在200 m以外,随着深度的增加横波速度横向差异性逐渐增大,可能反映了地层某种形变或断裂活动。值得注意的是,在400~450测线范围,220~240 m深度范围内,存在明显的横波速度低速异常区,推测可能与断裂的发育相关。

### 3 讨论

图7为反演深度400 m的台阵微振动勘探成果与浅层地震勘探成果的综合解释图,横坐标为浅层地震勘探测线桩号,纵坐标为反演深度。在台阵微振动勘探400 m的反演深度范围内,大致存在5个层位:30 m深度处为全新统底界、60 m处为上更新统内部层位、110 m深度处上更新统底界、190 m处为中更新统底界、310 m处为下更新统底界,该成果与排钻勘探及浅层地震勘探成果相吻合。在深度

100~190 m内,启东组内部出现了较为明显的分层现象。结合附近地区的地质资料,初步推断是由于该地区启东组覆盖层内部是由上部粉质黏土和下部中粗砂组成,因此在反演成果中呈现出明显的差异性。在深度220~240 m、1600桩号附近地层出现低速异常现象,其界面的明显错动迹象与断层相吻合,推测为昆山—嘉定断裂导致,上断点投影在地表的坐标为(31.38°N, 121.06°E),断裂错断了下更新统底界,断距10 m左右。

为了对研究区第四系地层进行标定,同时为了进一步验证昆山—嘉定断裂是否对第四系上部地层产生扰动及评价其第四纪活动性,本文在微振动勘探发现的疑似断点处布设一组排钻。测线位于蓬莱路北侧,与钱塘江路平行(图1橙线),孔间距为QS1孔←25 m→QS4孔←50 m→QS5孔←12.5 m→QS3孔←12.5 m→QS2孔,总长度100 m,总进尺为529.5 m。

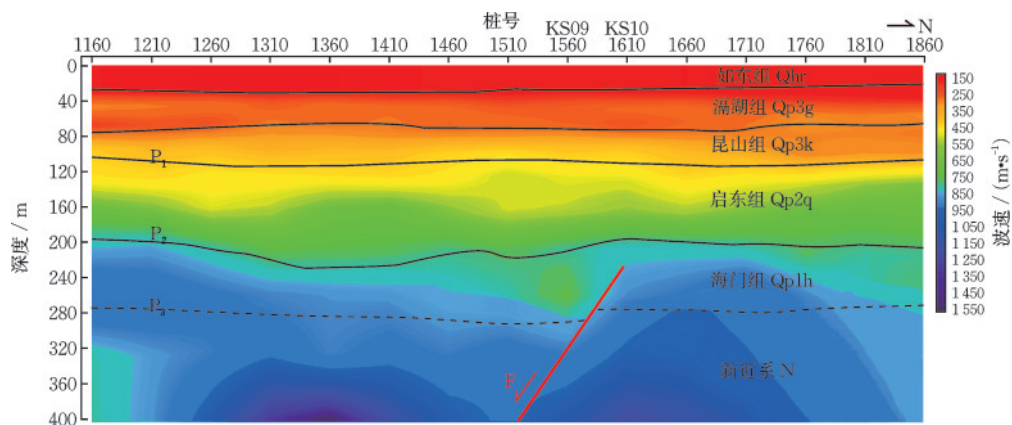


图7 微振动勘探400 m深度反演成果结合浅层地震勘探测线成果

Fig.7 Microtremor exploration inversion results at 400 m depth combined with shallow seismic exploration line results

图8为构造综合解释图,探测范围内第四系划分为:全新统如东组(Qhr),上更新统涪湖组(Qp<sub>3</sub>g),上更新统昆山组(Qp<sub>3</sub>k),中更新统启东组(Qp<sub>2</sub>q)。

本次勘探认为昆山组(Qp<sub>3</sub>k)底界连续、稳定,未被断层错断,同时也为主-被动源法联合勘探对浅部地层的分析解释奠定了基础。

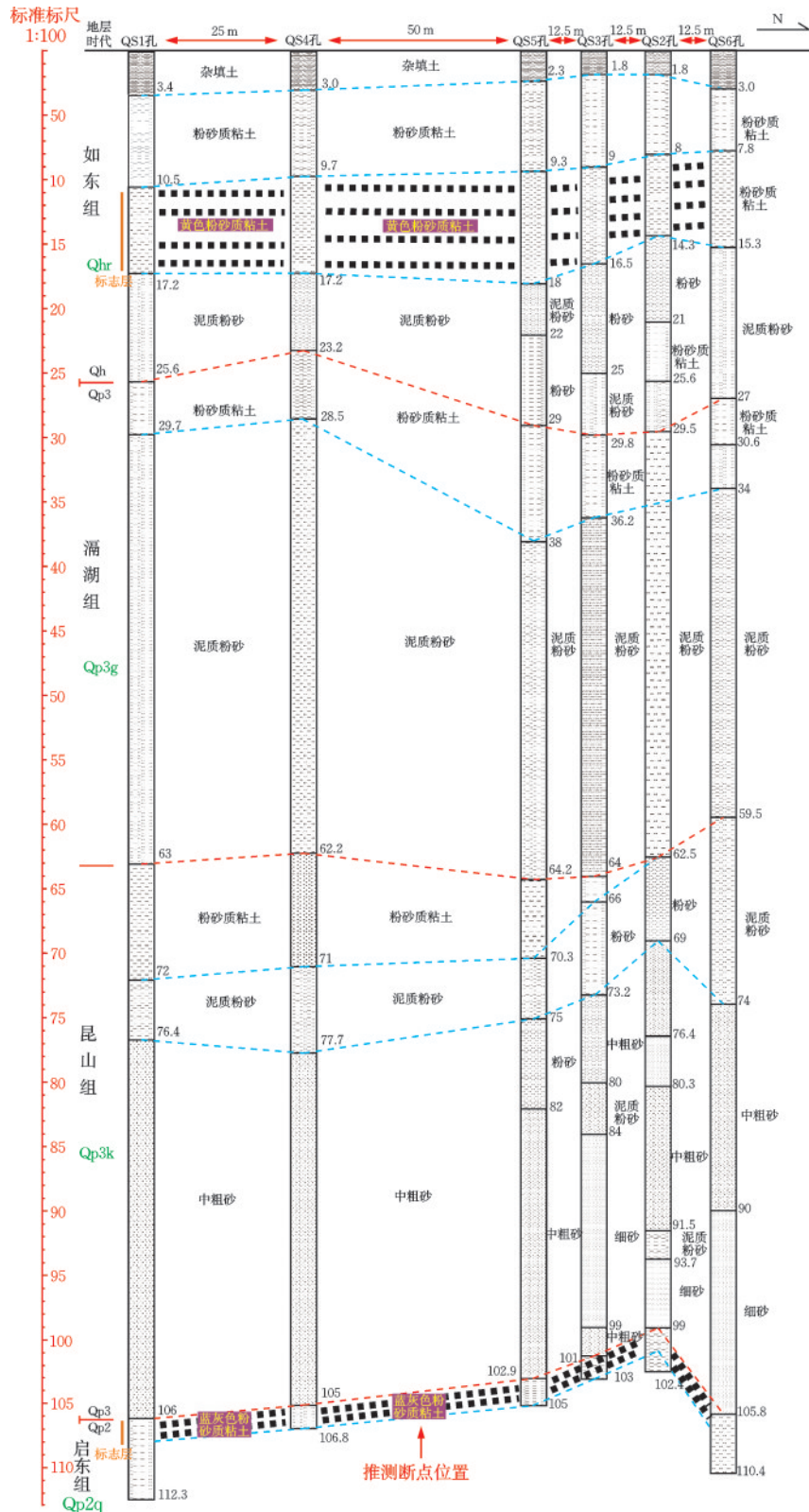


图8 排钻构造解释

Fig.8 Structural interpretation of borehole profile

为了判断本次微振动勘探数据反演的可靠性, 本文将微振动勘探台阵KS07的频散曲线反演得到的100 m深度模型曲线与钻孔QS1测得的横波速度相结合(图9), 结果表明台阵微振动反演模型与钻孔实测成果基本一致, 证明本次台阵微振动勘探数据质量较好。

为了验证微振动勘探在排钻勘测深度范围以外有良好的外推性, 本文反演了140 m深度范围内的研究区纵向剖面图, 结合排钻成果验证数据的真实性。如图10所示, 反演所得的地层划分以及起伏趋势基本与排钻所获得的数据一致: 深度30 m左右, 处于全新统如东组和上更新统漏湖组的分界线; 深度60 m左右, 处于上更新统漏湖组和上更新统昆山组的分界线; 深度100 m左右, 处于上更新统昆山组和中更新统启东组的分界线; 在深度100 m左右, 地层在台站KS07~KS09区域内, 自南向北逐渐提升, 有着向上轻微拱起的趋势。这些都与钻孔

资料达成一致。对比可以发现, 利用面波反演所获得的速度结构模型与实际地质资料、钻探资料吻合的较好, 据此可推断本文采集的数据是真实可靠的, 在钻孔深度范围之下具有合理的外推性。

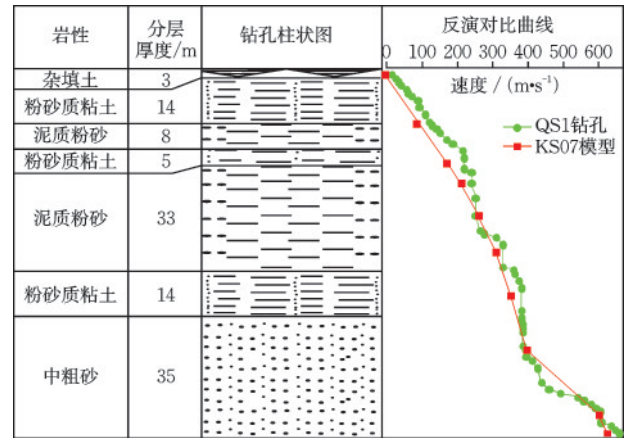


图9 钻孔柱状图与反演模型对比

Fig.9 Comparison between borehole stratigraphic column and inversion model

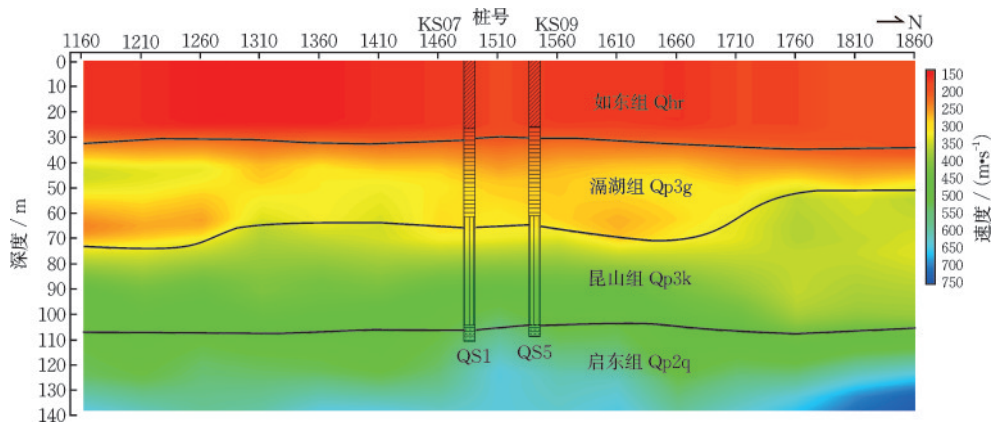


图10 微振动勘探140 m深度反演成果结合排钻成果

Fig.10 Microtremor exploration inversion results at 140 m depth combined with borehole profile results

## 4 结论

采用主-被动源联合探测方法对昆山—嘉定断裂上断点位置进行了精确定位并对其最新活动时代进行了研究, 可得出以下结论:

(1) 昆山—嘉定断裂为正断层, 倾向为南, 倾角约60°, 断裂连续错断了白垩系、古近系及新近系地层, 止于第四系下更新统底部, 上断点埋深在220~240 m, 投影在地表的断点坐标为(31.38°N, 121.06°E)。上断点并未切穿中更新统地层, 推测该断裂最新活动时代是第四纪早更新世。

(2) 主-被动源法联合探测是解决深厚覆盖区隐伏断层探测及活动性评价的有效方法之一。本文首先采用主动源法确定目标断裂位置及基本地层信息, 接着采用被动源法对目标断裂上断点位置进行精确定位并探明其活动性, 二者相辅相成, 联合使用可有效获取深覆盖层区隐伏断层的精细结构。

## 参考文献:

- [1] 何正勤, 陈宇坤, 叶太兰, 等. 浅层地震勘探在沿海地区隐伏断层探测中的应用[J]. 地震地质, 2007, 29(2): 363-372.

- He Z Q, Chen Y K, Ye T L, et al. Application of shallow seismic exploration in detection of buried fault in coastal areas[J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(2): 363-372. (in Chinese)
- [2] 潘纪顺,张先康,刘保金,等.城市活断层的抗干扰高分辨率浅层地震勘探研究[J]. *中国地震*, 2003, 19(2): 148-157.
- Pan J S, Zhang X K, Liu B J, et al. Research on detecting urban active faults by shallow seismic exploration method with anti-disturbance high resolution[J]. *Earthquake Research in China*, 2003, 19(2): 148-157. (in Chinese)
- [3] 许汉刚,范小平,冉勇康,等.郟庐断裂带宿迁段F<sub>5</sub>断裂浅层地震勘探新证据[J]. *地震地质*, 2016, 38(1): 31-43.
- Xu H G, Fan X P, Ran Y K, et al. New evidences of the Holocene fault in Suqian segment of the tanlu fault zone discovered by shallow seismic exploration method[J]. *Seismology and Geology*, 2016, 38(1): 31-43. (in Chinese)
- [4] 杜亚楠,龚雪,徐佩芬,等.微动勘探中噪声场分布的不均匀性对圆形和直线形台阵的影响研究[J]. *地球物理学进展*, 2022, 37(3): 1007-1012.
- Du Y N, Gong X, Xu P F, et al. Study on the influence of the inhomogeneity of noise field distribution on circular and linear array in microtremor exploration[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(3): 1007-1012. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 马国松.基于水含量的富水采空区微动勘探方法可行性研究[J]. *地球物理学进展*, 2022, 37(3): 1292-1300.
- Ma G S. Mapping water-rich goaf utilizing microtremor survey methods[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(3): 1292-1300. (in Chinese)
- [7] 潘佳铁,吴庆举,李永华,等.中国东北地区噪声层析成像[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(3): 812-821.
- Pan J T, Wu Q J, Li Y H, et al. Ambient noise tomography in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(3): 812-821. (in Chinese)
- [8] 唐有彩,陈永顺,杨英杰,等.华北克拉通中部地区背景噪声成像[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(8): 2011-2022.
- Tang Y C, Chen Y S, Yang Y J, et al. Ambient noise tomography in North China Craton[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(8): 2011-2022. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 曹江涛,翟伟强,方勇.浅层地震反射波法在山区工程勘察中的应用[J]. *工程勘察*, 2014, 42(8): 84-88.
- Cao J T, Zhai W Q, Fang Y. Application of shallow seismic reflection wave method in engineering investigation of mountain area[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2014, 42(8): 84-88. (in Chinese)
- [11] 刘保金,张先康,方盛明,等.城市活断层探测的高分辨率浅层地震数据采集技术[J]. *地震地质*, 2002, 24(4): 524-532.
- Liu B J, Zhang X K, Fang S M, et al. Acquisition technique of high-resolution shallow seismic data for surveying of urban active faults[J]. *Seismology and Geology*, 2002, 24(4): 524-532. (in Chinese)
- [12] 张合,扈本娜,吕国军,等.浅层地震反射波法在场地震安全性评价中的应用[J]. *勘察科学技术*, 2012(6): 61-64.
- Zhang H, Hu B N, Lyu G J, et al. Application of shallow seismic reflection wave method in seismic safety evaluation of site[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2012(6): 61-64. (in Chinese)
- [13] 何诚,薛霆斌,王亮.喜马拉雅背景噪声横波速度层析成像[J]. *工程地球物理学报*, 2018, 15(4): 425-431.
- He C, Xue T X, Wang L. Tomography of noise S-wave velocity in the back ground of Himalayan[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2018, 15(4): 425-431. (in Chinese)
- [14] 董明华,穆鹏宇.地质雷达及超声横波技术在密集型钢筋混凝土结构检测中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2019, 16(5): 686-693.
- Dong M H, Mu P Y. Application of ground penetrating radar and transverse wave reflection imaging technology to detection of dense reinforced concrete structures[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2019, 16(5): 686-693. (in Chinese)
- [15] 林承灏,潘浩波,方良好,等.浅层地震反射波法在某大型工程场址工程地质勘察中的应用[J]. *工程地球物*

- 理学报, 2016, 13(5): 652-658.
- Lin C H, Pan H B, Fang L H, et al. The application of shallow seismic reflection wave method to engineering geological investigation in one large engineering site[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2016, 13(5): 652-658. (in Chinese)
- [16] 晏红艳, 丘斌煌, 刘伟祖, 等. 小尺度铜矿脉反射地震勘探成像的数字模拟试验[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(2): 144-150.
- Yan H Y, Qiu B H, Liu W Z, et al. Digital simulation test of reflection seismic exploration imaging of small-scale copper veins[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16(2): 144-150. (in Chinese)
- [17] 陈爽爽, 李鹏, 张智, 等. 线性台阵被动源面波法在地下空间探测中的应用[J]. 人民长江, 2022, 53(2): 77-81.
- Chen S S, Li P, Zhang Z, et al. Application of linear-array passive source surface wave method in underground space exploration[J]. Yangtze River, 2022, 53(2): 77-81. (in Chinese)
- [18] 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, 880.
- 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, 880. (in Chinese)
- [19] 赵东. 被动源面波勘探方法与应用[J]. 物探与化探, 2010, 34(6): 759-764.
- Zhao D. Passive surface waves: Methods and applications[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(6): 759-764. (in Chinese)
- [20] Aki K. Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors[J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute Tokyo University, 1957, 35: 415-456.
- [21] Ohori M. A comparison of ESAC and FK methods of estimating phase velocity using arbitrarily shaped microtremor arrays[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2002, 92(6): 2323-2332.
- [22] Okada H, Suto K, Asten M W. The microtremor survey method[M]. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2004.
- [23] Okada H. Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method[J]. Exploration Geophysics, 2006, 37(1): 73-85.
- [24] 王振东. 面波勘探技术要点与最新进展[J]. 物探与化探, 2006, 30(1): 1-6, 12.
- Wang Z D. Essentials and recent advances of the surface wave exploration technique[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 30(1): 1-6, 12. (in Chinese)
- [25] Chouet B, De Luca G, Milana G, et al. Shallow velocity structure of Stromboli volcano, Italy, derived from small-aperture array measurements of Strombolian tremor[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1998, 88(3): 653-666.
- [26] Horike M. Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized areas[J]. Journal of Physics of the Earth, 1985, 33(2): 59-96.
- [27] Matsushima T, Okada H. Determination of deep geological structures under urban areas using long-period microtremors[J]. Butsuri-Tansa, 1990, 43: 21-33.
- [28] Wu C F, Huang H C. Near-surface shear-wave velocity structure of the Chiayi area, Taiwan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(2A): 1154-1164.

(本文编辑:池营营)