

上海城市水网地区电火花震源地震探测隐伏断裂的应用探索

宋春华¹, 施 刚¹, 巫 虹¹, 张 浩^{1,2}, 郁 飞¹
SONG Chunhua¹, SHI Gang¹, WU Hong¹, ZHANG Hao^{1,2}, YU Fei¹

1. 上海市地矿工程勘察院, 上海 200072;
2. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092
1. *Shanghai Institute of Geological Engineering Exploration, Shanghai 200072, China;*
2. *State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China*

SONG C H, SHI G, WU H, et al. , 2021. Application of seismic detection by spark source for concealed faults in Shanghai urban water network area [J]. Journal of Geomechanics, 27 (6): 938-948. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.06.076

Abstract: Nowadays artificial seismic exploration is recognized as one of the most effective means to detect hidden faults in urban areas. However, good seismic exploration data in highly urbanized areas is often unavailable limited by the excitation source and strong interference. In this paper, a seismic detection of excitation mode of high-power spark source was carried out in the Dazhi River area, in view of the developed urban water network in Shanghai. We did comparison tests on elements such as energy excitation of spark source, water depth of discharge and seismic imaging effects of different sources, and obtained the best excitation parameters for seismic exploration in inland river areas (east section of Dazhi River) in Shanghai. The validity of seismic exploration by spark source in urban water network is confirmed. Compared with other conventional excitation methods, EDM seismic exploration data has higher signal-to-noise ratio and can reach a deeper exploration depth, which helps to get good results from the detection of hidden faults in urban areas.

Key words: urban water network; high-power spark source; seismic exploration; concealed fault; comparison of different sources; energy excitation; profile of seismic time

摘 要: 人工地震勘探是目前公认最为有效的城市地区隐伏断裂探测手段之一, 但其受限于激发震源和城市高干扰环境背景, 在高度城市化区域往往难以获取良好的地震勘探资料。文章通过利用上海市城市水网发育的优势, 在大治河水域开展大功率电火花震源激发方式的地震探测, 对电火花震源激发能量、放电水深、不同震源的地震成像效果等对比试验, 获得了上海地区内河水域 (大治河东段) 最佳地震勘探激发参数, 确认了在城市水网开展电火花震源激发地震勘探方式的有效性。与其他常规激发方式相比, 电火花激发地震勘探资料具有较高的信噪比, 并且可以达到较深的勘探深度, 对城市地区隐伏断裂探测具有良好效果。

关键词: 城市水网; 大功率电火花震源; 地震勘探; 隐伏断裂; 不同震源对比; 激发能量; 地震时间剖面

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A

基金项目: 上海市财政重点项目—上海市区域地壳稳定性调查与研究 (20-45064)
This research is financially supported by the Key Financial Project of Shanghai (Grant No. 20-45064)

第一作者简介: 宋春华 (1985—), 男, 高级工程师, 从事城市地质调查、地球物理勘探研究。E-mail: 271797119@ qq. com

通讯作者: 施刚 (1964—), 男, 高级工程师, 从事城市地质调查、水文地质与工程地质学研究。E-mail: 454229705@ qq. com

收稿日期: 2020-07-01; 修回日期: 2020-12-23; 责任编辑: 吴芳

引用格式: 宋春华, 施刚, 巫虹, 等, 2021. 上海城市水网地区电火花震源地震探测隐伏断裂的应用探索 [J]. 地质力学学报, 27 (6): 938-948. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.06.076

0 引言

上海市地势平坦,第四系松散层覆盖厚,隐伏活动断裂等构造较为发育(火恩杰等,2004)。上海市虽不属于中强地震频发地区,但却存在着发生中强地震的地质构造条件。历史记载表明,上海市长江口以东海域和以北南黄海海域也是地震多发区之一,近500年来上海市共发生了150多次地震,其中上海市区发生地震89次,外地地震波及上海市有61次,其中影响比较大并造成损坏的有4次(刘昌森等,1980)。地震活动的空间分布与断裂带分布相对一致(王浩南等,2016),上海市高楼林立、人口稠密、经济发达,若发生一定规模的地震,其危害程度要比其他地区大很多,因此对上海市断裂的活动性探测研究至关重要。活动断裂是地球表面最新构造运动过程的一种重要表现形式,查明活动构造的基本特征,不仅对研究区域动力学有重要意义,同时也可当下社会经济发展和城市战略规划提供科学依据和指导(郑文俊等,2019),有助于指导区域地壳稳定性评价和城市规划工程建设等(王浩南等,2016;周春景等,2016)。目前,第四系厚覆盖地区城市隐伏活动断裂的调查方法比较有限,人工地震勘探是目前公认最为有效的精确探测隐伏活动断裂的地球物理手段之一(邓起东等,2003;顾勤平等,2015)。

上海市高度城市化,地上、地下建(构)筑物密集,道路交通繁忙,地下管线纵横交错(杨主恩,2008),城市区域隐伏断裂地震探测面临强烈的电磁、噪声、振动等环境因素的干扰,限制了常规激发震源地震勘探的应用,给开展城市隐伏活动断裂地震勘探带来了诸多限制(聂碧波等,2015)。其中,可控震源激发方式对城市道路及城市地下管线有一定的破坏作用(邓起东等,2007),且在高干扰条件的城市道路区域采集的地震数据的有效性、可靠性误差较大;气枪震源激发方式对水深要求较高(一般大于4 m),上海市能保证其激发水深要求的内河数量有限(仅黄浦江、大治河、金汇港等),气枪震源船改装投入成本巨大且工艺繁琐,并需携带各种装有气体的专门容器,在一定程度上具有危险性(董明荣等,2018)。近些年,随着大功率电火花震源研制日趋

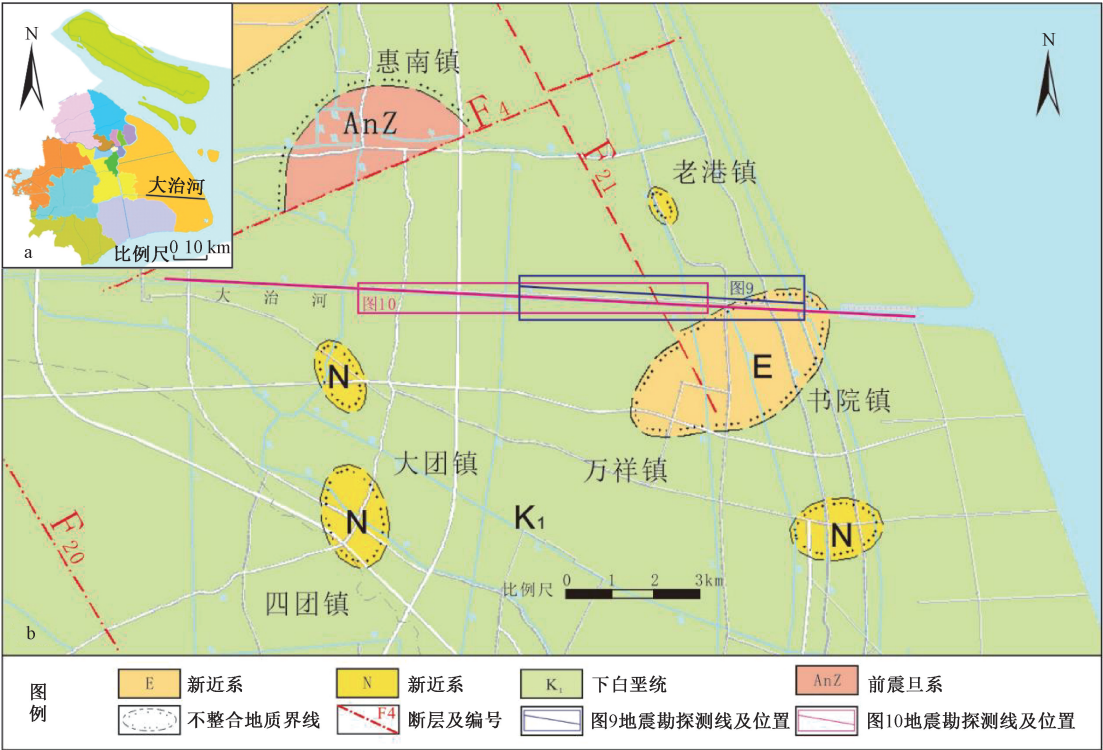
成熟,相较于其他地震激发震源,其操作安全、无污染、成本较低、对城市环境危害小,采集的数据具有重复性好、时间一致性高、频带宽、分辨率高的优势。上海市地处长江流域和太湖流域下游河口平原三角洲河网地区,水系发达,水网纵横密布。综合考虑上海市城市高干扰环境和水网发育的特点,为验证水网发育地区采用大功率电火花震源地震勘探方法对克服城市高干扰环境、获取高品质地震勘探资料的效果,通过在上海市首次开展大功率电火花震源地震勘探试验,对激发能量、激发水深、不同震源激发方式(电火花震源、可控震源与气枪震源)的单炮记录和叠加地震时间剖面等进行对比,分析此种激发方式在城市隐伏断裂探测中的效果,并为具有相似地质条件及水网优势的城市区域开展隐伏活动断裂地震勘探工作提供借鉴。

1 试验区概况

1.1 地质背景

试验区位于上海市南部大治河东段(图1a),该区域内基岩埋藏较深,基岩地层自下而上为前震旦系惠南板岩、下白垩统火山岩、零星分布的中新统白龙港玄武岩和上新统砂泥岩,缺失上古生界至三叠系地层(顾澎涛和王尧舜,1988;上海地质矿产局,1988;张宏良,1999;图1b);第四系厚度超过300 m,为粘性土与砂性土交互堆积的松散沉积物,自下而上包括下更新统安亭组、中更新统嘉定组、上更新统南汇组和全新统如东组、上海组、娄塘组等(邱金波和李晓,2007)。基岩与上覆新近系或第四系地层的密度、速度、波阻抗等物性差异明显,新近系与第四系覆盖层之间也存在着一定的波阻抗差异,具备开展地震勘探的地质条件。

试验区内断裂发育(图1),其中灯塔-赵家宅断裂(F_{21})为北西向活动断裂,白龙港玄武岩体发育与其晚期活动有关;张堰-南汇断裂(F_4)为北东向区域性活动断裂,与浙江省内的萧山-球川断裂相接(张鹏等,2018),是多条断层共同组合的宽度不定的构造断裂带,在上海张堰地区,燕山期侵入岩沿该断裂与金山群岩体接触,形成了张堰中型铜矿,直至今日,其东段仍有地震活动(顾澎涛,1987)。已有研究表明,北东向断裂是



a—大治河位置示意图；b—试验区基岩地质及测线布置图

图 1 试验区位置、基岩地质及测线布置示意图

Fig. 1 Map showing the location of the test area, bedrock geology and layout of the surveylines

(a) Location map of the test area; (b) Bedrock geology and layout of surveylines in the test area

主要控震构造，北西向断裂是重要发震构造（谢建磊，2018）。且北西向断裂形成时期晚，切割了其他北东方向的断裂，具有较强新生的特点，其活动性要强于其他方向的断裂（章振铨等，2004；火恩杰等，2004）。

1.2 测线布置

大治河是上海市有史以来规模最大的人工运河（图 1a），宽约 100~120 m，水流平缓，水深约在 3~6 m，满足大功率电火花震源的激发条件。大治河河道交通繁忙，是全市垃圾转运主要航道；沿河两岸分布有村镇、沙场、厂房等；测线布置（图 1b）河段内有数条高速公路和轨道交通干线穿越河道，振动、噪音等干扰强烈，具有典型的都市高干扰复杂环境特征。在图 1b 中可见出地震勘探测线近东西走向，长度约 18 km。

2 电火花震源激发试验

近些年，国内电火花震源研制日趋成熟，硬件方面已处于国际领先水平，成功研制出大功率电火花震源，打破了国际上对此项技术的垄断

（戚宾等，2020）。电火花震源工作原理是通过电容组高压脉冲放电，在极短的瞬间（微秒级）释放高压电（即放电），形成上万摄氏度的电弧，将水汽化，产生冲击压力脉冲波，能量绝大部分以弹性波的形式释放，对周围环境破坏小，具有较高的地震波转换率（付东等，2014；蒋辉等，2018；于富文等，2018），且频率特性与爆炸震源相似。同时，它能够控制电容器的电压实现对震源输出能量的调控（任立刚和杨德宽，2018）。

为了实现城市环境下大功率电火花地震勘探激发的有效性，在大治河水域采用船载电火花电机与电容组，沿岸布设 Sercel 428XL 地震勘探采集系统，进行电火花震源激发与接收作业试验，并依此对大功率的电火花震源的激发效果、不同激发能量、不同电极沉入深度、不同激发震源等条件下的地震响应等进行分析与研究。

2.1 模型建立

试验勘探目的层段埋深 0~1500 m，用相邻区域的测线地震深度剖面进行建模（图 2），合理设计观测系统，模型长 3000 m。进行分辨率、炮检距以及模拟剖面分析。

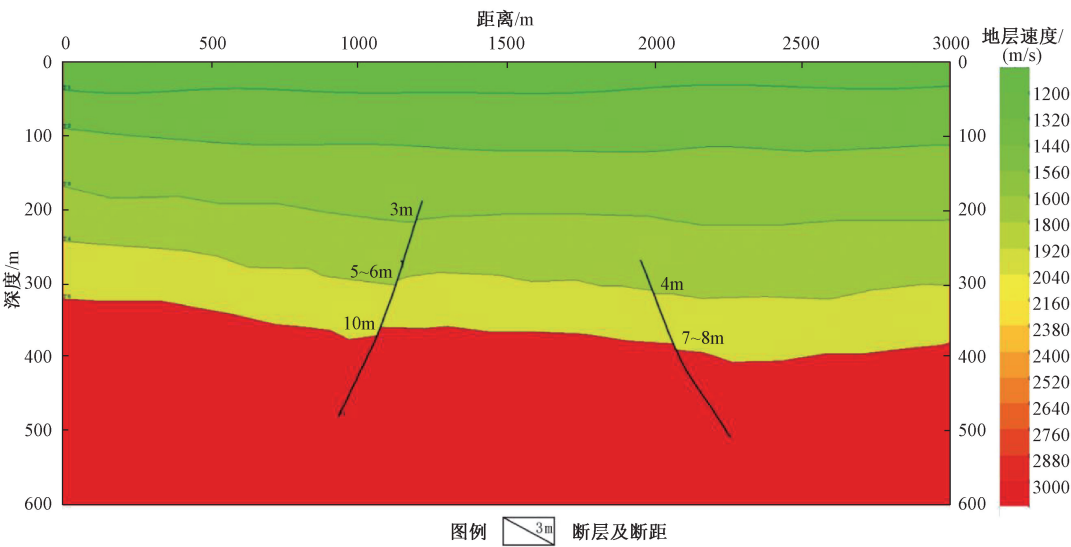


图 2 地质-物理剖面速度模型图

Fig. 2 Model of geological-physical profile velocity

(1) 纵向分辨率是指地震勘探中能分辨的最小地层厚度, 它决定了地震勘探野外采集中应保护的最高信号频率或最短的信号波长。纵向分辨率应满足公式:

$$d = V/4f_{\max} \tag{1}$$

式中: d 为纵向能分辨的最小地层厚度即垂直分辨率, m; V 为层速度, m/s; $f_{\max}$ 为应保护的最高频率, Hz。

要达到纵向分辨率, 最高频率应达到 75 Hz。

(2) 横向分辨率即水平分辨率, 表示区分地质体横向细节的能力。偏移之前它等于第一菲涅尔带的宽度, 横向分辨率与地层速度、深度及反射频率有关, 两个绕射点的距离若小于最高频率的一个空间波长, 它们就不能分开, 横向分辨率应满足公式:

$$h_r = V_{\text{int}}/f_{\max} \tag{2}$$

式中: h_r 为横向分辨率, m; V_{int} 为目的层的层速度, m/s; $f_{\max}$ 为目的层的最高频率, Hz。

考虑干扰波的存在、反射的吸收及衰减等因素, 采集时应保护 75 Hz 以内的信息。

(3) 最大炮检距的选择主要包括这样一些因素: 入射角和反射系数的关系 (AVO)、随入射角的变化引起波场特征的变化情况、动校拉伸对信号频率的影响、速度分析精度要求等。试验主要目的层 0~1500 m。

最大炮检距接近目标层深度偏移效果较好, 可以使各反射点上纵波反射系数变化小, 振幅比

较均匀。对于反射波而言, 目的层埋藏深度要求为: 一般排列长度要大于最深目的层深度以及大于两倍最浅目的层深度, 考虑其它一些因素, 排列长度可以适当大些。

各层动校拉伸系数和排列长度的关系为: 当主要目的层动校拉伸率小于 12.5% 时, 兼顾各勘探目的层动校拉伸畸变的最大偏移距范围为 1650 m。

为了保证速度分析精度的要求, 要求最大炮检距有足够的长度, 这样可以减小分析误差, 当最大炮检距为 1600 m 左右时, 可以满足主要目的层动校拉伸和速度分析精度的要求。考虑试验区构造相对平稳, 无较大构造倾角, 因此排列长度保持在 1600 m 左右即可。

通过优选, 最终大治河水域激发地震试验采用 1597.5~2.5~5~2.5~1597.5m 的观测系统。

2.2 激发能量对比试验

2.2.1 点试验分析

试验进行了 100 kJ、200 kJ、400 kJ、600 kJ 和 800 kJ 的电火花激发能量单炮对比, 其中 600 kJ 和 800 kJ 采用双枪头组合激发。从 8~60 Hz 分频扫描记录对比显示来看 (图 3), 记录面貌总体差异不大。其中 200 kJ 和 400 kJ 激发单炮信噪比较高, 能获取 1.0~1.7 s、2.2~2.5 s 范围内多组地震反射波; 100 kJ 激发显示振幅能量不够、单炮信噪比低; 600~800 kJ 由于采用双枪头组合激发, 因此能量散失较快, 信噪比略低。

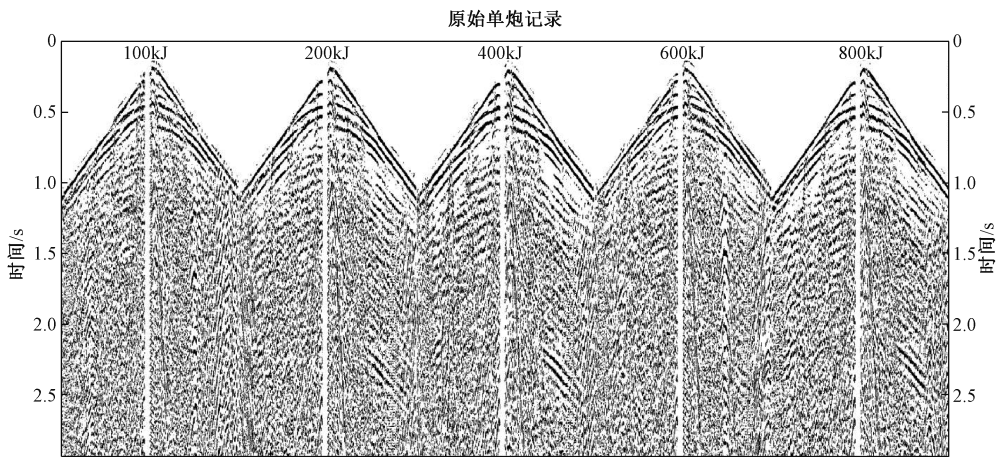


图 3 能量试验 8~60 Hz 单炮分频对比图

Fig. 3 Comparison diagram showing the frequency division of 8~60 Hz single gun in energy tests

能量试验频谱分析对比显示（图 4），在 5~15 Hz 低频段，功率谱绝对振幅能量强。

不同激发能量单炮试验子波分析显示（图 5），

随着功率的增加，由于气泡震荡，造成子波旁瓣的交混回响不利效应增强，其中 800 kJ 子波的交混回响不利效应最为明显（图 5 红色箭头所示）。

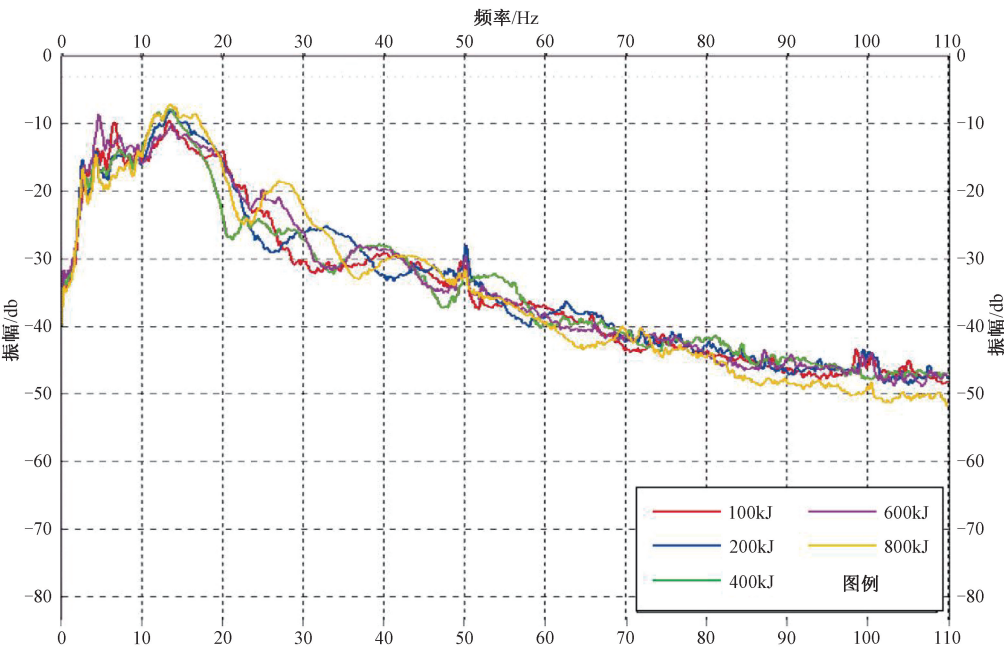


图 4 不同能量试验频谱分析对比图

Fig. 4 Comparison diagram showing the spectrum in different energy tests

2.2.2 能量段试验分析

为进一步验证电火花震源 200 kJ（图 6a）、400 kJ（图 6b）激发能量优劣性，进行电火花震源能量段对比试验，对比图（图 6）显示 400 kJ 激发能量的地震叠加时间剖面在 1 s 以上反射波组振幅能量强、同相轴连续、信噪比更高（图 7），层间信息更加丰富，整体上要优于 200 kJ 激发能量的地震叠加时间剖面。

2.3 激发水深对比试验

根据现场声呐调查结果显示，大冶河测线段水深基本在 3~5.5 m。试验布设检波器 320 道，对比分析在 2 m、3 m、4 m 三种水深下 400 kJ 能量激发效果。分频扫描记录对比显示（图 8），采用相同激发能量的条件下，大冶河地震测线接收检波器道数为 320 道采用水下 3 m 的激发方式效果最好，水下 4 m 次之，水下 2 m 最差，但均能获取

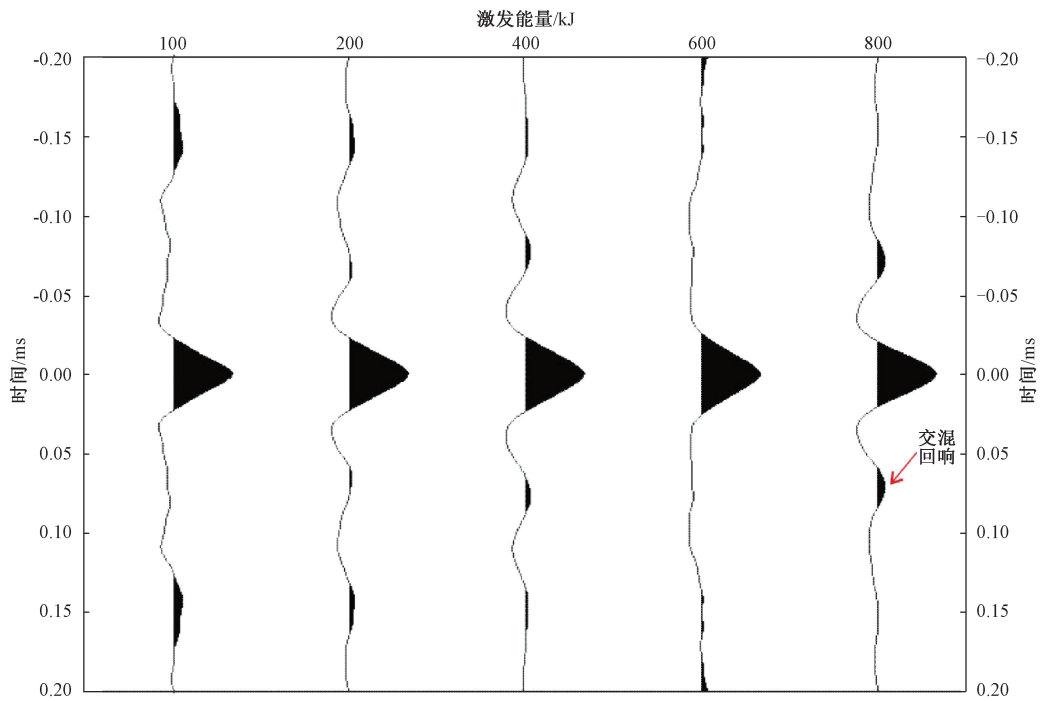
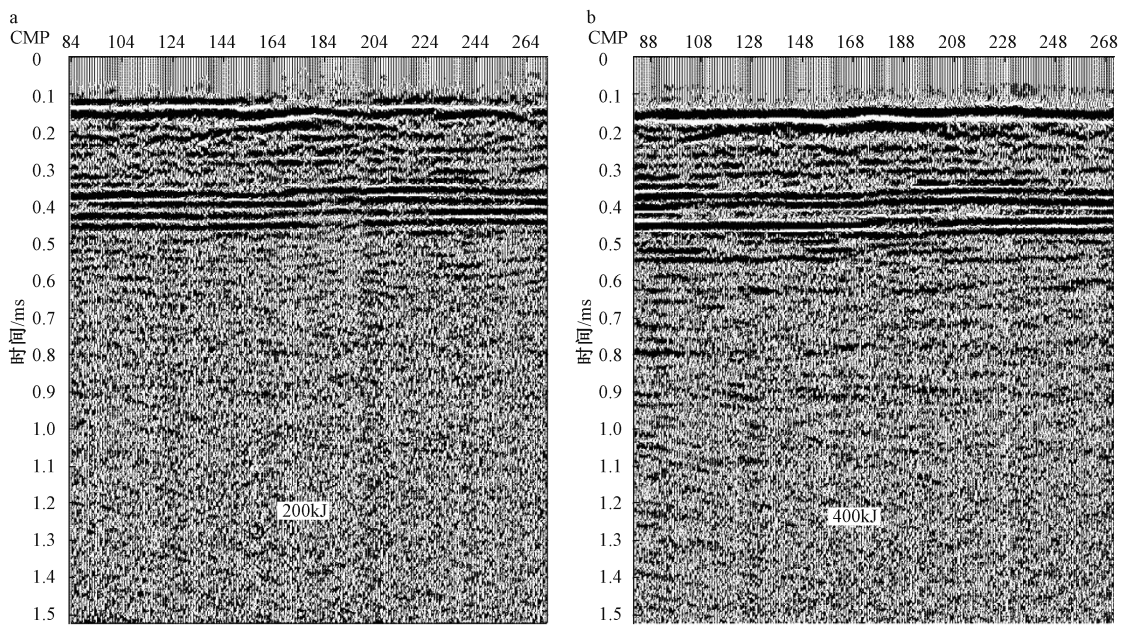


图 5 不同能量试验子波对比图

Fig. 5 Comparison diagram of the wavelet in different energy tests



a—200 kJ 激发能量地震时间剖面对比图；b—400 kJ 激发能量地震时间剖面对比图；

图 6 不同激发能量地震时间剖面对比图

Fig. 6 Comparison of the seismic time profile with different excitation energies

(a) Comparison of seismic time profile with 200 kJ excitation energy; (b) Comparison of seismic time profile with 400 kJ excitation energy

1.4 s、2.3 s 左右多套反射波组。

3 不同震源激发对比分析

电火花震源、可控震源与气枪震源激发的三

条地震勘探测线位置详见图 1 中蓝色标记测线位置，三种震源激发的地震时间剖面对比见图 9，基岩面反射波同相轴（双程走时近 400 ms）均清晰连续，能较好地识别基岩地层在测段区域内的延续情况。

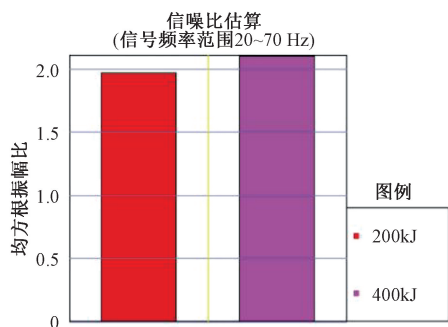


图7 200 kJ、400 kJ 激发信噪比估算对比图

Fig. 7 Comparison of the estimated SNR by 200 kJ and 400 kJ excitation

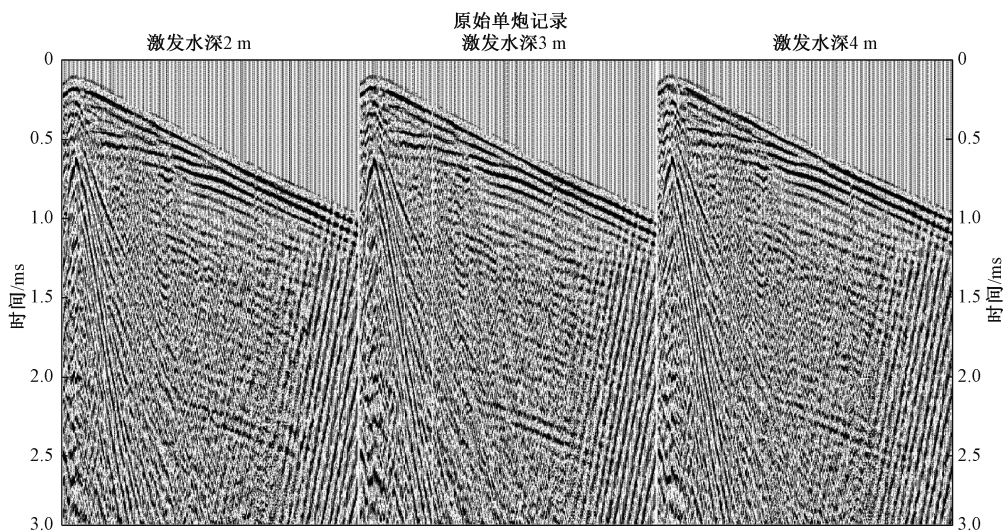


图8 水深试验单炮扫描记录对比图

Fig. 8 Comparison of the scanning record of single gun in water depth tests

并且电火花震源激发对断层上断点的刻画更为清楚；双程走时 400 ms 以深，振幅能量强，剖面信噪比较高，根据反射波组发生错断、同相轴数目突然增加或消失、波组间隔发生突变、同相轴形状和产状发生突变等特征划分断层，两种激发方法获得的地震剖面都能很好地刻画断裂分布，揭示断层切割形成的地堑形态，且地层产状和主要构造形态基本一致，主要断裂构造的位置等信息也能良好对应，同时证实了大功率电火花震源激发的地震勘探方法有效性。

(3) 通过与可控震源和气枪震源的激发效果对比，电火花震源激发地震时间剖面能更好地反映出断层两侧地层错动、局部破碎及上断点定位等地质特征。

由此可见，大功率电火花震源激发方式的地震勘探适用于上海市城市水网地区隐伏断层等构造探测，对于刻画隐伏断裂具有良好的探测效果。

(1) 气枪震源由于受河道激发水深限制和浅层气发育等因素限制，致使时间剖面显示 40 ~ 120 ms 间的第四系地层内部基本无反射波，第四系地层内界面的识别困难；由于内河水深的限制，气枪震源激发能量明显不足，仅采集到 500 ms 有效地震波反射信息（图 9c）。

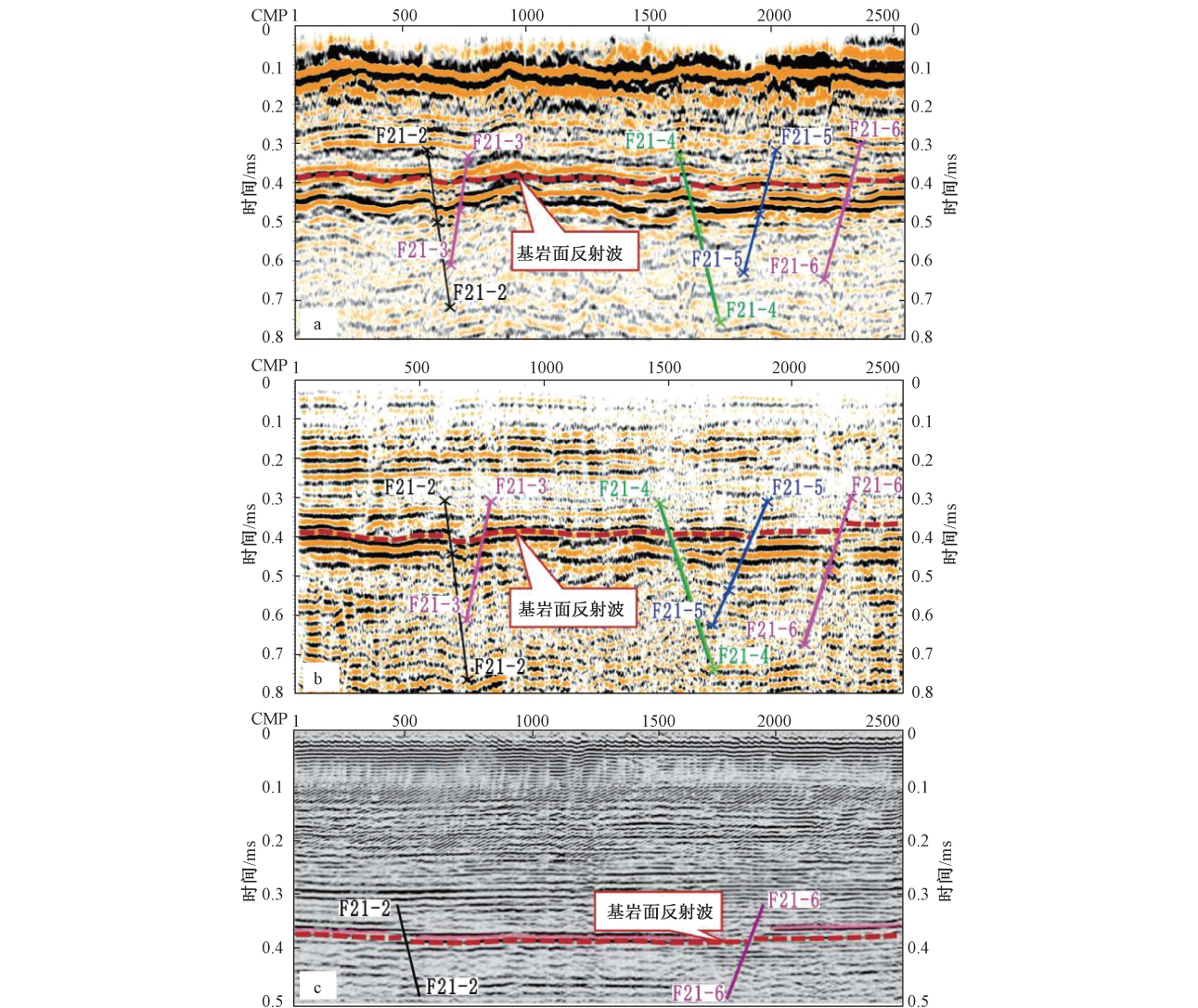
(2) 电火花和可控震源激发地震测段位置基本重合（图 1），电火花和可控震源激发方式的时间剖面显示（图 9a、9b），在中浅层（双程走时 0~400 ms）信噪比较高，多次波压制效果较好，成像清晰连续，第四系内呈现多套地震反射波组，

4 探测效果分析

依据兼顾浅—中—深层地震勘探的思路，针对上海市以往地震反射资料信号能量弱、信噪比低等特点，通过保护宽、高频反射信息提高浅部断层的分辨率，同时兼顾获取深层地震地质信息，采用水域电火花震源激发的地震勘探方式来了解断裂等构造的深部发育情况。

4.1 数据处理

数据处理时，首先采用叠前随机噪声衰减、区域异常振幅压制及去线性干扰等方法（苏贵仕和丁成震，2014），分频去噪压制该区资料中含有的噪声干扰；其次采用时间函数增益、地表一致性振幅补偿和地表一致性反褶积的方法使得时间和空间上振幅以及频率都得到补偿（蒋立等，2015），消除地表条件的变化对地震波的振幅特性



a—大功率电火花震源激发地震时间剖面；b—可控震源激发地震时间剖面；c—气枪震源激发地震时间剖面

图 9 不同震源激发地震时间剖面对比图

Fig. 9 Comparison of the seismic time profile excited by different sources

(a) Seismic time profile excited by high-power spark source; (b) Seismic time profile excited by vibroseis; (c) Seismic time profile excited by air gun source

和相位特性的影响，其中反褶积和宽频技术是电火花震源采集数据处理的关键技术（公亭等，2016）；然后采用速度分析与动校切除及地表一致性剩余静校正处理技术，建立较为准确的速度模型；最后偏移处理采用有 STOLT 有限差分方法，以达到时间剖面上断点显示清晰、层位明确。

4.2 数据解译

大治河水域电火花震源激发的地震勘探线位置详见图 1 中洋红标记测线位置，图 10 为大治河水域电火花震源地震时间剖面。利用反射波的连续性、频率和波形相位特征以及各地层反射波在纵横向上的展布形态，对剖面上一些强能量的

反射波组进行了对比追踪，共识别出八组地层界面波阻抗特征，同相轴追踪显示地层沉积平稳、产状近乎水平。通过叠加速度谱求取层速度进行时深转换，并结合区域地层和邻近基岩钻孔 ZK1 资料解释，钻孔新近系上新统底界面埋深在 320.9 m，通过速度谱拟合时深关系曲线，对应的双程时间值是大约在 390 ms，从剖面中也可以看出（图 10）390 ms 处有一明显的强反射同相轴，对比验证确定该反射层位 T_g 是新近系上新统底界与基岩面间的反射，表现为中频强振幅连续反射的同相轴，反射波特征清楚，推测为基岩顶界面的反射，其上覆的砂质黏土在密度和反射波速度上存

在很大差异，形成一个强波阻抗界面，在测线的叠加时间剖面上振幅强、波形稳定且有较好的横向连续性，在剖面上能被连续可靠追踪，作为时间剖面的标准反射层，为测线的最大不整合界面。T1—T5 为来自第四系地层内部的界面反射，T5 为下更新统底界反射；Tg-1 反射波对应的深度约为 850 m 左右，时间剖面上双程走时 0.7 s 左右的波组对应该反射波，推测其为中生界底界；Tg-2 反射波组对应的深度为 1.6 km 左右，时间

剖面上双程走时 1.4 s 左右的弱波组对应该反射波，推测其为下古生界底界。测线邻近钻孔仅钻至基岩附近，由于测线缺乏深钻资料，基岩面反射波以下波组 Tg-1 和 Tg-2 对应的地层界面和 Pz 地层信息依据区域地质资料推断解释。地震勘探揭示的活动断层构造变形，归因于中生代时期中国东部大规模的岩浆活动和新生代时期太平洋板块与菲律宾海板块的向西运动等（李锦轶等，2019）。

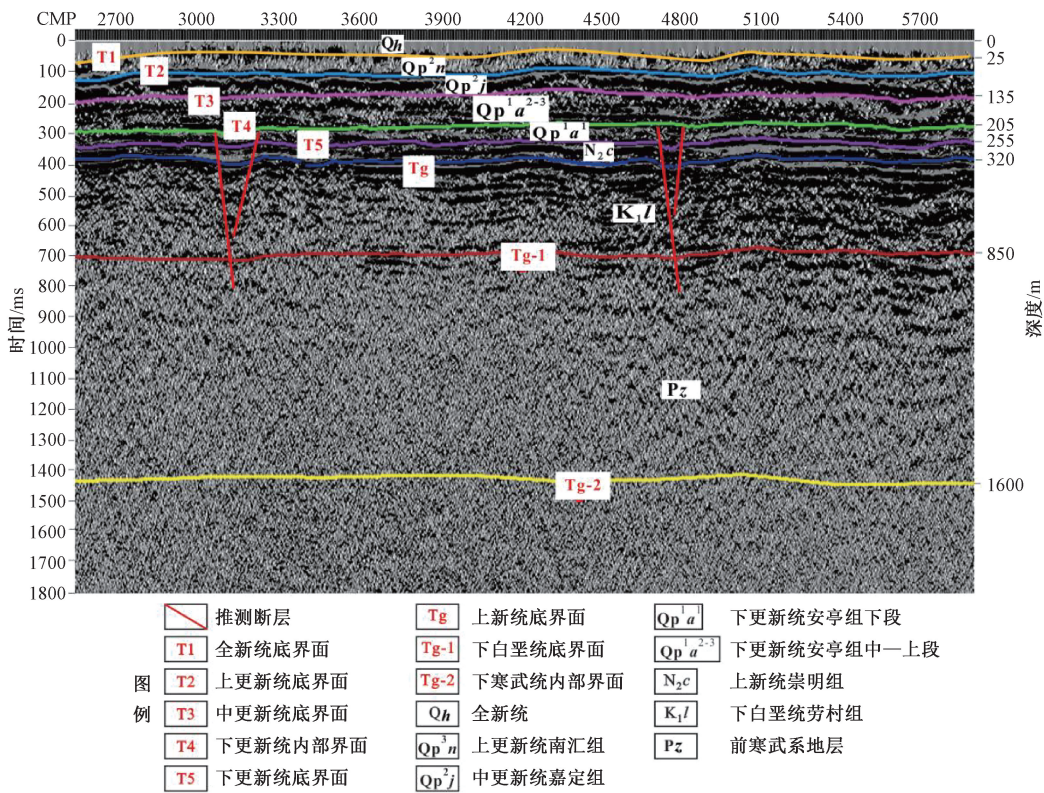


图 10 电火花震源激发地震时间剖面反射波层位解释图

Fig. 10 Horizon interpretation of the reflected wave in seismic time profile excited by spark source

电火花激发试验地震时间剖面显示（图 10），基岩面反射波（Tg）近 400 ms 以浅，能较为准确地刻画第四系内地层的赋存和产状特征，同时对断层上断点特征刻画清晰，上断点延伸至下更新统（Qp¹a）安亭组中段，推测断层在早更新世中期有明显活动迹象；地震时间剖面双程走时 400~800 ms 区间（对应深度为 320~1000 m）呈现多层低频、中—强振幅、连续性相对较差的反射波组，说明存在多组物性界面；深部双程走时大于 800 ms 的区间，地震时间剖面上亦能解释出一套弱反射波组（双程走时 1400 ms，对应深度约 1.6 km），表明激发能量（400 kJ）能够满足追踪深部地层特征的需求。

5 结论

通过大治河水域大功率电火花震源地震勘探激发试验，以及不同震源激发方式下获取的地震时间剖面对比分析，可以获得如下结论：

（1）大功率电火花震源激发的地震勘探方式适用于城市水网地区隐伏断裂探测，能较有效压制城市高频振动和强噪音等干扰，激发能量强，地震时间剖面在 1.6 s 以浅可见多组振幅较强的地震反射波，深部地球物理信息丰富，能获取第四系内部断层上断点定位和深达数千米的有效地震波反射信息，为城市隐伏断层探测提供了新的地

震震源激发思路。

(2) 不同区域、不同地质条件下需要采用不同的电火花激发参数。大治河水域测段，最佳激发参数组合为放电水深 3 m、能量 400 kJ，能够满足浅—中—深层追踪断裂展布特征的需求。采用大功率电火花震源地震勘探时，率先进行激发参数试验，对获取高品质地震勘探成果十分关键。

(3) 电火花震源相较于其他的传统震源激发方式，具有操作安全便捷，对城市水网及周边环境危害小，激发能量强、频带宽、重复性好、时间一致性高的特点，能有效地克服城市环境对传统激发震源的限制。适合应用于具有密布水网的城市区域，对城市范围开展隐伏活动断层、第四系地质、河湖隧道等探测工作具有十分重要的意义。

References

DENG Q D, LU Z X, YANG Z. 2007. Remarks on urban active faults exploration and assoicated activity assessment [J]. Seismology and Geology, 29 (2): 189-200. (in Chinese with English abstract)

DENG Q D, XU X W, ZHANG X K, et al., 2003. Methods and techniques for surverying and prospecting active faults in urban areas [J]. Earth Science Frontiers, 10 (1): 93-104. (in Chinese with English abstract)

DONG M R, FU L Y, XING C, et al., 2018. Research on the Underwater Energy radiation Characteristics of the Airgun Seismic Source [J]. Earthquake Research In China, 34 (1): 25-34. (in Chinese with English abstract)

FU D, LI W T, WANG C, et al., 2014. Application of TD sparker series high power electric spark source in seismic exploration [C] // Proceedings of symposium on engineering geophysical exploration and testing and urban engineering and environmental geophysical exploration technology. Qingdao: Special Committee of Engineering Geophysics of China Geophysical Society. (in Chinese)

GONG T, WANG Z L, GU X D, et al., 2016. Broadband seismic data matching processing [J]. Oil Geophysical Prospecting, 51 (3): 457-466. (in Chinese with English abstract)

GU P T, 1987. A Summary Account of the Regional Geology of Shanghai Municipality [J]. Regional Geology of China, (4): 309-321. (in Chinese with English abstract)

GU P T, WANG Y S, 1988. The characteristic of geologic structure in Shanghai [J]. Shanghai Geology (2): 1-14. (in Chinese with English abstract)

GU Q P, XU H G, ZHAO Q G, 2015. The seismic exploration method for buried active faults in thick sediment area: A case study of Qiaobei-Suqian fault [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 39 (2): 408-415. (in Chinese with English abstract)

HUO E J, LIU C S, ZHANG Z Q, et al., 2004. Study on the hidden

faults and their activity in Shanghai [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)

JIANG H, LI H J, GAO B, et al., 2018. The application of sparker source forseismic exploration [J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 28 (1): 42-44, 56. (in Chinese with English abstract)

JIANG L, LUO Y, CHENG Z G, et al., 2015. Research and application of surface-consistent relative Q calculation and compensation [C]. Xinjiang Geology, (3): 415-420. (in Chinese with English abstract)

LI J Y, ZHANG J, LIU J F, et al., 2019. Crustal Tectinic Framework Of CHINA And Its Formation Processes: Constraints From Stuctural Deformation [J]. Journal of Geomechanics, 25 (5): 678-698. (in Chinese with English abstract)

LIU C S, JIANG D Q, WANG X Z., 1980. An overview of historical earthquakes in Shanghai [J]. Shanghai Geology, (1): 83-85. (in Chinese)

NIE B B, ZHAO J M, LI Y G, et al., 2015. The Comprehensive Application of Shallow Seismic Prospecting Method to Urban Active Fault Detection [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 12 (1): 15-21. (in Chinese with English abstract)

QI B, WANG X C, ZHAO Q X., 2020. Research on the progress of marine sparker seismic exploration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 44 (1): 107-111. (in Chinese with English abstract)

QIU J B, LI X, 2007. Quaternary strata and sedimentary environment in Shanghai [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers. (in Chinese)

REN L G, YANG D K, 2018. Application and effect analysis of sparker in seismic acquisition in plain water area [J]. Progress in Geophysics, 33 (6): 2581-2587. (in Chinese with English abstract)

Shanghai Bureau of Geology and mineral resources. Regional Geology of Shanghai [M], Beijing: Geological Publishing House, 1988. (in Chinese)

SU G S, DING C Z, 2014. Random noise attenuation on prestack seismic data and its application skills [J]. Oil Geophysical Prospecting, 49 (S1): 87-92. (in Chinese with English abstract)

WANG H N, WU Z H, LI H M, 2016 Basic Characteristics of The Main Active Faults and Seismic Activites in Pan Yangtze River Delta Region [J]. Journal of Geomechanics, 22 (3): 500-516. (in Chinese with English abstract)

XIE J L, 2018. Seismic activity characteristics and seismotectonic province division of Shanghai and nearby regions [J]. Shanghai Land & Resources, 39 (4): 1-6. (in Chinese with English abstract)

YANG Z, 2008. Application of exploring methods on urban active faults and some common key technical problems [J]. Resources Survey & Environment, 29 (3): 157-161. (in Chinese with English abstract)

YU F W, JIANG H, YANG D K, 2018. Study on application effect of electric spark source in GH reservoir in HK area [C] //Proceedings of. CPS/SEG Beijing 2018 International Geophysical conference and

Exhibition. Beijing: China Academic Journal (CD Version) Electronic Magazine. (in Chinese)

ZHANG H L, 1999. Geological and mineral records of Shanghai [M]. Shanghai: Shanghai Academy of Social Sciences Press. (in Chinese)

ZHANG P, ZHANG Y Y, MA Z J, et al., 2018. Characteristic of Quaternary Activities of Fuyang-Jiande Segment of Xiaoshan-Qiuchuan Fault [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 13 (4): 959-967. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Z Q, LIU C S, WANG F, 2004. Preliminary Study on Relation of Fault Activity and Seismicity in the Shanghai Region [J]. EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA, 20 (2): 143-151. (in Chinese with English abstract)

ZHENG W J, ZHANG P Z, YUAN D Y, et al., 2019 Basic Characteristics Of Active Tectonics And Associated Geodynamic Processes In Continental CHINA [J]. Journal of Geomechanics, 25 (5): 699-721. (in Chinese with English abstract)

ZHOU C J, WU Z H, MA X X, et al., 2016. The Major Active Faults And Regional Crustal Stability Assessment In The Area of City Group In Central Yunnan [J]. Journal of Geomechanics, 22 (3): 454-477. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

邓起东, 徐锡伟, 张先康, 等, 2003. 城市活动断裂探测的方法和技术 [J]. 地学前缘, 10 (1): 93-104.

邓起东, 卢造勋, 杨主恩, 2007. 城市活动断层探测和断层活动性评价问题 [J]. 地震地质, 29 (2): 189-200.

董明荣, 符力耘, 邢超, 等, 2018. 气枪震源水中能量辐射特性研究 [J]. 中国地震, 34 (1): 25-34.

付东, 李闻天, 王成, 等, 2014. TD-Sparker 系列大功率电火花震源在地震勘探中的应用 [C] //第七届工程物探与检测疑难问题暨城市工程与环境物探技术研讨会论文集. 青岛: 中国地球物理学会工程地球物理专委会.

公亨, 王兆磊, 顾小弟, 等, 2016. 宽频地震资料处理配套技术 [J]. 石油地球物理勘探, 51 (3): 457-466.

顾澎涛, 1987. 上海市区域地质概要 [J]. 中国区域地质 (4): 309-321.

顾澎涛, 王尧舜, 1988. 上海地区地质构造特征 [J]. 上海地质 (2): 1-14.

顾勤平, 许汉刚, 赵启光, 2015. 厚覆盖层地区隐伏活断层探测的地震方法技术: 以桥北镇-宿迁断层为例 [J]. 物探与化探, 39 (2): 408-415.

火恩杰, 刘昌森, 章振铨, 等, 2004. 上海市隐伏断裂及其活动性研

究 [M]. 北京: 地震出版社.

蒋辉, 李海军, 高斌, 等, 2018. 电火花震源在石油地震勘探中的应用 [J]. 物探装备, 28 (1): 42-44, 56.

蒋立, 罗勇, 程志国, 等, 2015. 地表一致性表层相对 Q 计算及补偿方法研究与应用 [J]. 新疆地质, 33 (3): 415-420.

李锦铁, 张进, 刘建峰, 等, 2019. 中国地壳结构构造与形成过程: 来自构造变形的约束 [J]. 地质力学学报, 25 (5): 678-698.

刘昌森, 蒋德乾, 王先铸, 1980. 上海地区历史地震概述 [J]. 上海地质 (1): 83-85.

聂碧波, 赵建明, 郇逸根, 等, 2015. 浅层地震勘探在城市活断层探测中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 12 (1): 15-21.

戚宾, 王祥春, 赵庆献, 2020. 海洋电火花震源地震勘探研究进展 [J]. 物探与化探, 44 (1): 107-111.

邱金波, 李晓, 2007. 上海市第四纪地层与沉积环境 [M]. 上海: 上海科学技术出版社.

任立刚, 杨德宽, 2018. 电火花震源在平原水城区地震采集中的应用及效果分析 [J]. 地球物理学进展, 33 (6): 2581-2587.

上海地质矿产局, 1988. 上海市区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社.

苏贵仕, 丁成震, 2014. 叠前随机噪声衰减及其应用技巧 [J]. 石油地球物理勘探, 49 (S1): 87-92.

王浩男, 吴中海, 李浩民, 2016. 泛长三角地区主要活动断裂及地震活动基本特征 [J]. 地质力学学报, 22 (3): 500-516.

谢建磊, 2018. 上海及邻区地震活动特征及地震构造区划 [J]. 上海国土资源, 39 (4): 1-6.

杨主恩, 2008. 城市活动断层探测的实施和常见技术问题 [J]. 资源调查与环境, 29 (3): 157-161.

于富文, 蒋辉, 杨德宽, 2018. HK 地区 GH 水库电火花震源应用效果研究 [C] //CPS/SEG 北京 2018 国际地球物理会议暨展览电子论文集. 北京: 《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社.

张宏良, 1999. 上海地质矿产志 [M]. 上海: 上海社会科学院出版社.

张鹏, 张媛媛, 马志江, 等, 2018. 萧山-球川断裂富阳-建德段第四纪活动性研究 [J]. 震灾防御技术, 13 (4): 959-967.

章振铨, 刘昌森, 王锋, 2004. 上海地区断裂活动性与地震关系初析 [J]. 中国地震, 20 (2): 143-151.

郑文俊, 张培震, 袁道阳, 等, 2019. 中国大陆活动构造基本特征及其对区域动力过程的控制 [J]. 地质力学学报, 25 (5): 699-721.

周春景, 吴中海, 马晓雪, 等, 2016. 滇中城市群重要活动断裂与区域地壳稳定性评价 [J]. 地质力学学报, 22 (3): 454-477.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 能听到作者关于文章情况的语音介绍及更多文章相关资讯

