

引用格式: 宋春华, 郁飞, 施刚, 2023. 上海张堰-金山卫隐伏活动断层活动特征及综合地球物理证据 [J]. 地质力学学报, 29 (6): 888-897. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023058](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023058)

Citation: SONG C H, YU F, SHI G, 2023. The activity characteristics and comprehensive geophysical evidence of the Zhangyan-Jinshanwei concealed active fault in Shanghai, China[J]. Journal of Geomechanics, 29 (6): 888-897. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023058](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023058)

上海张堰-金山卫隐伏活动断层活动特征及综合地球物理证据

宋春华¹, 郁 飞¹, 施 刚²
SONG Chunhua¹, YU Fei¹, SHI Gang²

1. 上海市岩土地质研究院有限公司, 上海 200072;
2. 上海市地矿工程勘察(集团)有限公司, 上海 200072
1. *Shanghai Geotechnical Engineering & Geology Institute Co., Ltd, Shanghai 200072, China;*
2. *Shanghai Geological Engineering Exploration (Group) Co., Ltd, Shanghai 200072, China*

The activity characteristics and comprehensive geophysical evidence of the Zhangyan-Jinshanwei concealed active fault in Shanghai, China

Abstract: The concealed faults in the urban area of Shanghai are well-developed, accumulating several hundred meters of loose sediment layers since the Quaternary. Hindered by the complex and highly disturbed urban environment, the detection and characterization of concealed faults face challenges, posing significant geological risks for urban safety. This study employs high-precision gravity area measurements, high-resolution shallow seismic exploration, and geophysical exploration methods. It integrates geological stratification from surrounding boreholes, stress, and chronostratigraphy analyses (C14 and optically stimulated luminescence) to investigate the Quaternary and current activity of the Zhangyan-Jinshanwei fault. Results show that the fault exhibits good spatial continuity, with evidence reflected in Bouguer gravity anomalies and seismic time profiles. The Zhangyan-Jinshanwei fault is identified as a thrust fault with inherited and newly developed activity characteristics. Its overall trend is northwestward at 315°, dipping southwest, with a fault distance of approximately 10 meters along the bedrock surface. The upper fault point has been displaced to the mid-Pleistocene in the Quaternary. The most recent active period occurred during the mid-Pleistocene, and the current northwestward stress state makes the fault susceptible to extensional and torsional activities. Continuous attention is required for the ongoing activity of this fault. This study's detection approach and findings can serve as a reference for similar urban concealed active fault detection and activity analysis.

Keywords: concealed active fault; Zhangyan-Jinshanwei fault; high precision gravity area measurement; high-resolution shallow seismic exploration; chronology; crustal stress

摘 要: 上海城市隐伏断层十分发育, 第四纪以来沉积了数百米厚的松散沉积层, 受限于其特大城市复杂高干扰环境背景, 隐伏断层的探测与活动性特征研究难以取得理想的效果, 城市地质安全面临严重风险。文章通过高精度重力面积测量、高分辨率浅层地震勘探等地球物理探测方法, 结合周边钻孔地层分层、地应力和年代学测试分析(碳十四和光释光), 对张堰-金山卫断层第四纪和现今的活动性开展了探测与研究。结果显示, 该断层空间上具有较好的延展性, 断层行迹在布格重力异常和地震时间剖面上均有较好的地球物理证据反映。研究认为张堰-金山卫断层为逆冲断层, 同时具有继承性和新生性活动特征, 总体走向为北西向 315°, 倾向南西, 基岩面断距约 10 m, 上断点已错断至第四系中更新统内, 最新

基金项目: 上海市财政资金项目 (18-29780)

This research is financially supported by the Shanghai Municipal Financial Funding Project (Grant No.18-29780).

第一作者: 宋春华 (1985—), 男, 高级工程师, 从事基础地质调查、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: 2023-04-20; 修回日期: 2023-10-30; 责任编辑: 吴芳

活动时代为中更新世,目前北西向地应力状态易于发生张扭性活动,该断层现今活动性依然需持续关注。此次研究探测思路与成果可为类似城市开展隐伏活动断层探测及活动性分析提供借鉴和参考。

关键词: 隐伏活动断层;张堰-金山卫断层;高精度重力面积测量;高分辨率浅层地震勘探;年代学;地应力

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 06-0888-10

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023058

0 引言

活动断层与地震活动有着紧密联系,是时刻威胁城市地质安全的重要新构造活动隐患(邓起东等, 2003, 2007; 徐锡伟, 2006; 吴中海, 2019; 宋春华等, 2021; 魏鹏等, 2022)。上海人口稠密、经济发达、城市化程度高,《上海市城市总体规划(2017—2035年)》明确提出了建立“卓越全球城市”的愿景,对城市地质安全的需求更是提升到新的高度。上海在20世纪90年代进行了“活动断裂探测与地震危险性评价”工作(徐锡伟等, 2015),确认了城市下众多隐伏断层的存在(顾澎涛, 2006),后续鲜有相关工作开展,目前在断层精准定位、断层最新活动特征等方面,研究投入与认知程度都较北京、深圳等一线城市存在着一定差距(张浩等, 2021; 刘先林等, 2022)。

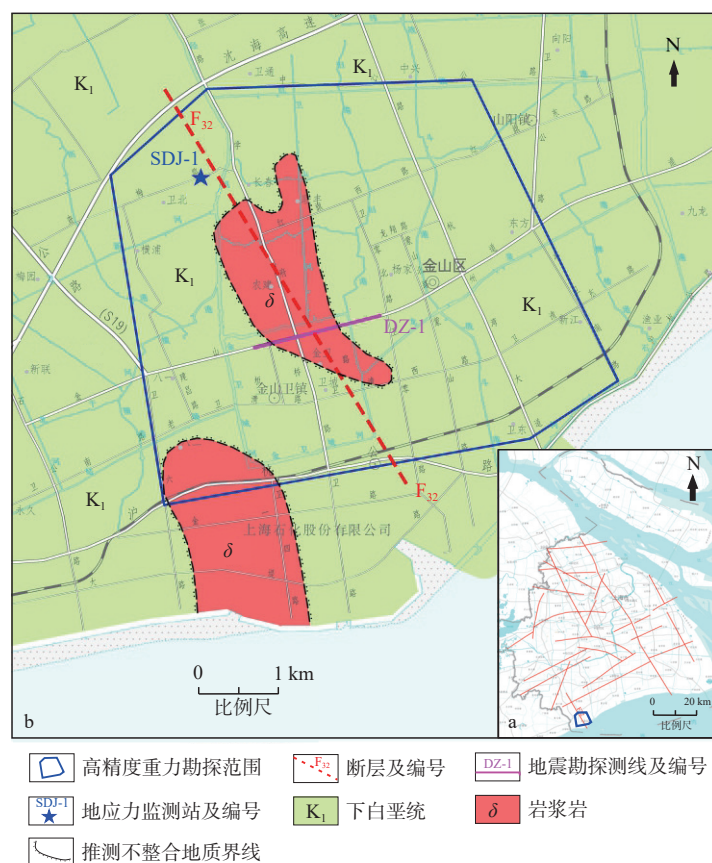
城市隐伏活动断层的空间展布、规模、产状、活动时代等特征的探测与研究对评价断层活动性至关重要(李传友等, 2007),也是保障城市安全、开展区域地壳稳定性评价工作的必要前提与基础(谭成轩等, 2009; 姚鑫, 2014; 戚帮申等, 2018; 马森等, 2021; 郭宇等, 2022)。张堰-金山卫断层是上海市西南部极其发育的隐伏断层,其基本特征是基于重力、航磁资料推断而来。断层穿越金山老城区,陆上部分展布约15 km,分为两段,呈雁行排列(火恩杰等, 2004; 章振铨等, 2004),断层倾向南西,总体走向约北西。从地形地貌特征上看,该断层是查山凸起和金山凹陷的分界(张宏良和张洁, 1996),对区域地貌及第四系沉积都有一定的控制作用。区域地震记录显示,2013年上海金山发生的1.3级地震可能与该断层活动有关,根据地震的历史重复规律,不排除未来该断层重复活动引发区域地震地质灾害的可能,因此亟待开展该断层探测与活动性研究。

上海城市环境具有建、构筑物密集、交通繁忙的特征,环境背景噪声干扰严重,针对隐伏断层探

测的常规电、磁类地球物理勘探方法很难取得理想的效果。此次研究采用区域控制性探测和精细探测逐步递进的思路,应用高精度重力面积测量、高分辨率浅地震勘探相结合的综合地球物理勘探方法,对上海市张堰-金山卫隐伏活动断层开展调查工作,确认了断层走向、上断点位置、产状与形态等特征。结合周边钻孔地应力测试和地层年代学测试结果,对断层活动性进行分析,进一步厘定了该断层最新活动时代、第四纪和现今活动性特征。探测工作与分析成果将为上海市城市地质安全保障提供基础支撑,为城市断层危险性评价、城市重大工程规划和选址提供科学的基础地质依据。

1 区域地质概况

上海地区第四纪地层发育,成因类型复杂,陆相和海相地层广泛分布,第四系底界年龄约2.60 Ma,地层自下而上包括:下更新统(安亭组)、中更新统(嘉定组)、上更新统(南汇组和川沙组)和全新统(青浦组、上海组和娄塘组)的黏性土、粉性土、砂性土等(邱金波和李晓, 2007)。前上新统基岩地层由下至上包括:古元古界、中元古界、震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、白垩系、古近系、新近系等,分布面积最广的地层为下白垩统火山岩系(上海地质矿产局, 1988; 张宏良, 1999)。区内断裂构造发育,主要分为北东向、北西向和近东西向三组断裂,其中北西向断裂多在燕山期时成型,分割北东向断裂(图1)。上海区内的大部分构造形成于喜马拉雅构造运动期之前,到喜马拉雅构造运动期时,构造运动已经相对减缓,新生成的断裂明显减少,但先期形成的断裂发生复活,成为区内新构造运动的主要因素之一。近500年来,上海地区共发生了150多次地震(图2),其中上海市发生地震89次,外围地震波及上海有61次,包括1971年上海长江口4.9级地震、1984年南黄海6.2级地震、1996年上海长江口6.1级地震、1855年上海长江口5.0级地震、1624年上海黄浦江边4.8级地震等。



a—上海市断层位置分布简图；b—金山区基岩地质及地球物理探测测线布置图

图1 上海金山区位置、基岩地质及地球物理探测测线布置图

Fig. 1 Location, bedrock geology, and geophysical survey line layout of Jinshan District, Shanghai

(a) Sketch map of fault distribution in Shanghai; (b) Geological and survey line layout of the bedrock in Jinshan District

2 地球物理探测方法

不同岩土地层介质间有着明显的物性(密度、视电阻率和速度)差异(王仁杰, 2010; 尚彦军等, 2018; 周超等, 2022), 工作区内地层物性差异是开展张堰—金山卫断层调查与研究的基础(表1)。张堰—金山卫断层调查与研究主要采用高精度重力面积测量和高分辨率浅层地震勘探等方法进行隐伏活动断层活动特征探测。金山卫分布有密集的居民区、商业区、厂房, 道路纵横交错, 存在强烈的人类活动震动、噪音等干扰, 属于典型的复杂高干扰环境。调查研究依照区域控制性探测、精细探测、综合分析解译等步骤逐步推进实施。首先采用大比例尺高精度(1:25000)重力面积测量了解金山卫地区基岩起伏形态、隐伏断层分布及划分等要素(李长波等, 2022), 指导后续物探调查工作的布置(图1); 然后应用浅层地震探测查明一定深度范围内地层结构、断层性质及倾向、错断的层位及上断

点埋深等重要信息(张慧利等, 2014; 王继等, 2020)。

重力测量是利用不同岩土体间的密度差异引起的重力变化进行地质勘探的一种方法(王谦身, 2003), 通过改正计算获得布格重力异常和自由空气重力异常, 应用位场转换、求导、反演等处理方法, 可以获取重力场线性梯级带、不同特征的重力场分界线、重力方向导数异常平面上条带状分布的极值点的连线(极值带)或零值线等特征(程家印等, 1983; 徐伟民等, 2014), 推断解释覆盖层以下不同密度岩土体的埋藏情况, 从而可以找出异常地质体构造边界(沈博, 1994)。此次调查采用加拿大生产的CG-5型高精度石英弹簧重力仪, 仪器投入使用前进行静态、动态及一致性试验。野外工作中按基点—辅助点—基点的次序进行1:25000重力面积测量观测, 采集过程中需要规避密集建筑物群和交通震动干扰, 尽量选择晚上至凌晨时间段进行野外数据采集工作。

浅层地震勘探是指利用地下介质弹性和密度

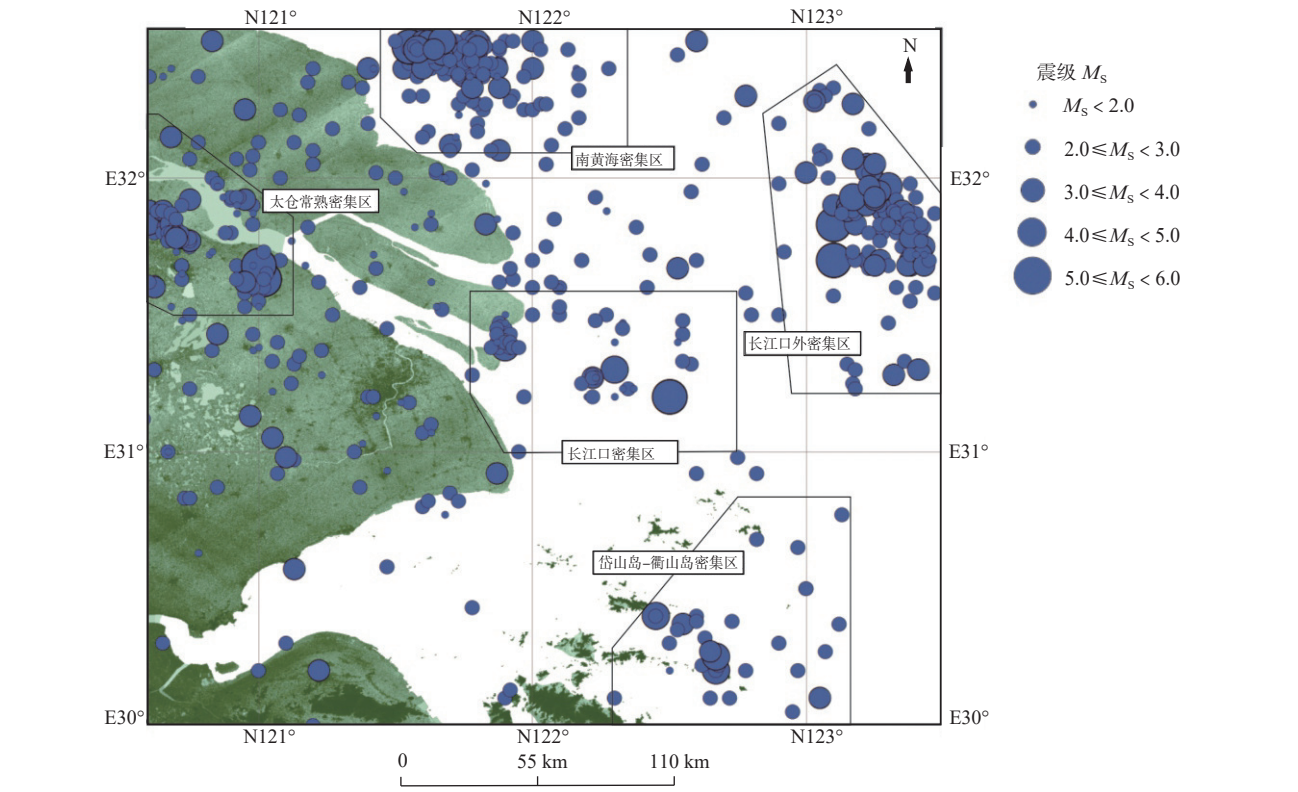


图 2 上海及邻近地区 1970—2017 年 (部分地区数据至 2019 年) 地震分布图
Fig. 2 Earthquake distribution map of Shanghai and its neighboring areas from 1970 to 2017 (Data for some regions is up to the year 2019)

表 1 工作区主要地层物性特征一览表

地层及岩性	密度/(g/cm ³)	纵波速度/(m/s)
第四纪黏土	1.64~1.98	827~884
第四纪砂层	1.78~2.03	1184~1268
第四纪砂砾层	1.87~2.16	1312~1680
中生代安山岩	2.30~2.70	1640~2260
中生代岩浆岩	2.61~2.81	1640~2260

的差异,通过观测人工地震产生的弹性波在不同岩土地层间的波阻抗差异(陆基孟和王永刚,2009;李万伦等,2018),推断和解释地下岩土地层的精细结构、断层的空间展布的方法(顾勤平等,2015)。利用地震速度分析数据对地震剖面进行时间深度转化(Cameron,2009),与钻探分层数据进行对比,在线和道方向的剖面进行精细解释,可以详细刻画断层的性质,如倾向和倾角,以及错段层位等信息。浅层地震勘探在实际应用中需要根据现场交通、环境噪声以及人文条件选择合适震源和激发偏移距,最终选择晚上至凌晨时间段进行采集,采用 120 道、间距 5 m 的 100 Hz 纵波检波器组成全排列接收,偏移距为 300 m,采样间隔 0.25 ms,记录长度 1.024 s,前置放大器采用全通方式,激发震源采用 BV300 型

出力 18 t 可控震源,扫描长度为 10 s,扫描频带 10~120 Hz,叠加次数为 1~4 次,震源出力 40%,斜坡长度 0.5 s,偏移距为 300 m。

3 地球物理探测结果分析

3.1 高精度重力测量结果分析

高精度区域控制性重力测量经处理获得 1:25000 布格重力异常图(图 3),显示工区的布格重力异常变化大致呈北西走向,西南低、东北高,其中测区中北部与东南角各存在一处正异常,工作区中部北西向重力梯度带特征明显,推断为张堰-金山卫断层构造线大致分布位置,断层总体走向为北西向 315°。

采用水平方向导数方法处理断裂或构造边界的分布情况,可以用来分析区内某一方向的构造线特征。重力异常的水平方向导数等值线圈闭的同向轴可以指示密度变化的边界,从而可利用其判断断裂的平面位置。因此,对工作区向上延拓 300 m 高度的异常,做了水平 0°、45°、90°、135°四个不同方向的导数(图 4),分别反映南北方向、北西方向、东西方向、北东方向的断裂或密度变化构造线的展

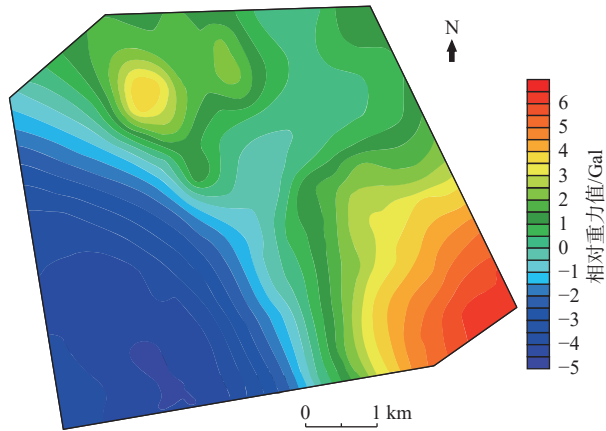


图3 布格重力异常等值线图

Fig. 3 Bouguer gravity anomaly contour map

布, 0° 、 45° 、 90° 三个不同重力水平方向导数 V_{xz} 的极大值(图 4a—4c)位置均显示断裂构造优势走向, 而 135° 水平导数(图 4d)求导方向上无原始异常, 结合布格重力异常可方便地确定台阶上沿断裂构造的地面投影位置, 显示为明显的北西向断裂构造带走向特征。

为揭示三维测区张堰—金山卫断层的深部空间伸展情况, 对布格重力异常作了 300 m、600 m、900

m、1600 m、2400 m 和 3000 m 共六个不同高度的向上延拓(图 5), 重力向上延拓后的水平梯度所突出的构造线可作为岩体边界和断层走向构造线解释的依据(张凤旭等, 2007; 孟小红等, 2009)。北西向断层构造线的行迹刻画识别均较为清晰, 推测为张堰—金山卫断层的断层走向构造线。但是重力异常的垂向分辨能力弱, 断层在第四纪内部延伸特征需结合地震勘探资料进一步分析解释(雷晓东等, 2021)。

采用 Parker-Oldenburg 界面反演方法(关小平, 1991; 郭涛等, 2019)揭示基岩埋深整体呈西南部深、东北部浅的态势(图 6), 最深处在 -190 m 左右, 最浅处在 -50 m 左右, 测区中北部、东南角基底形态有明显凸起, 南西侧基岩地层有明显断陷迹象, 断层构造线优势走向为北西方向。

3.2 浅层地震勘探成果分析

为更精细划分和识别断裂构造, 采用变速成图和建立高精度速度场的地震数据处理方法, 最终地震时间剖面显示 0.25 s 以浅出现了多个有效反射波组(图 7), 地震反射波组 T1 和 T2 同相轴局部不连续、不稳定, 能量中等到中强, 分别对应上更新统川沙组(Qp^3c)的顶界面和底界面; Tg 反射波同相轴连

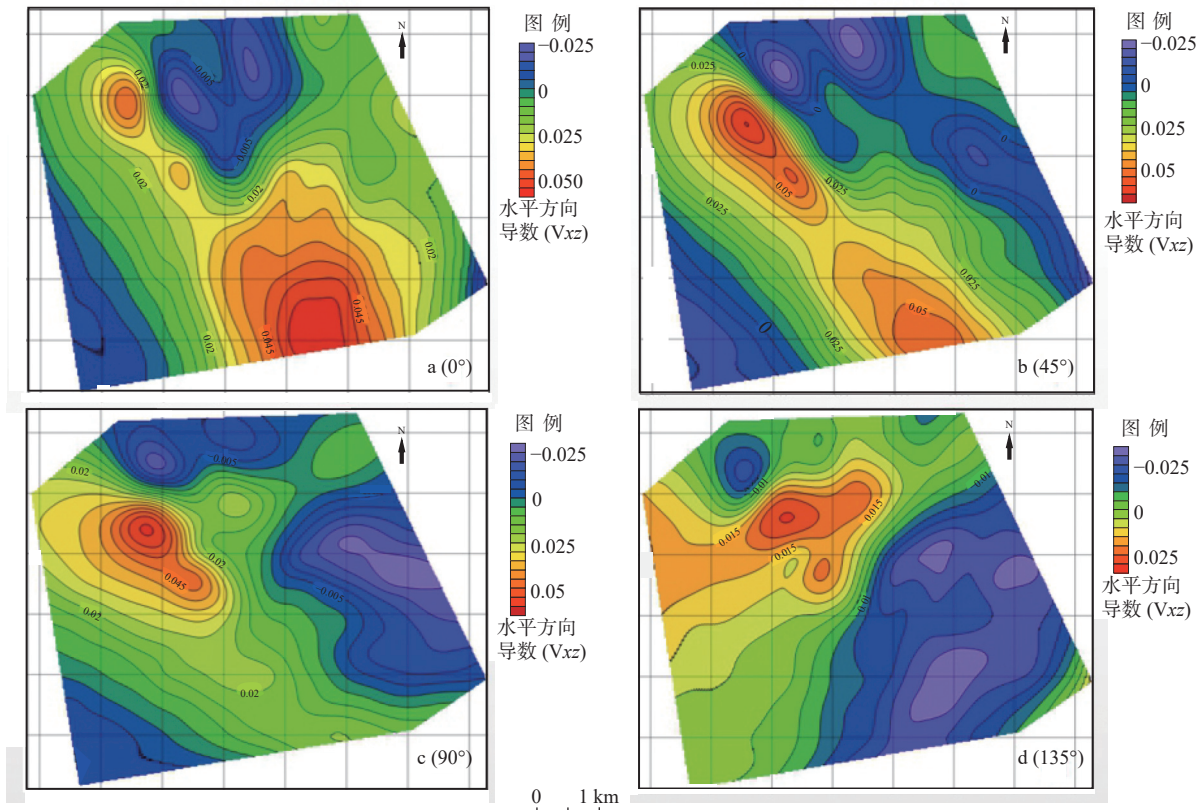


图4 布格重力异常的水平方向导数图

Fig. 4 Horizontal derivative plots of Bouguer gravity anomalies

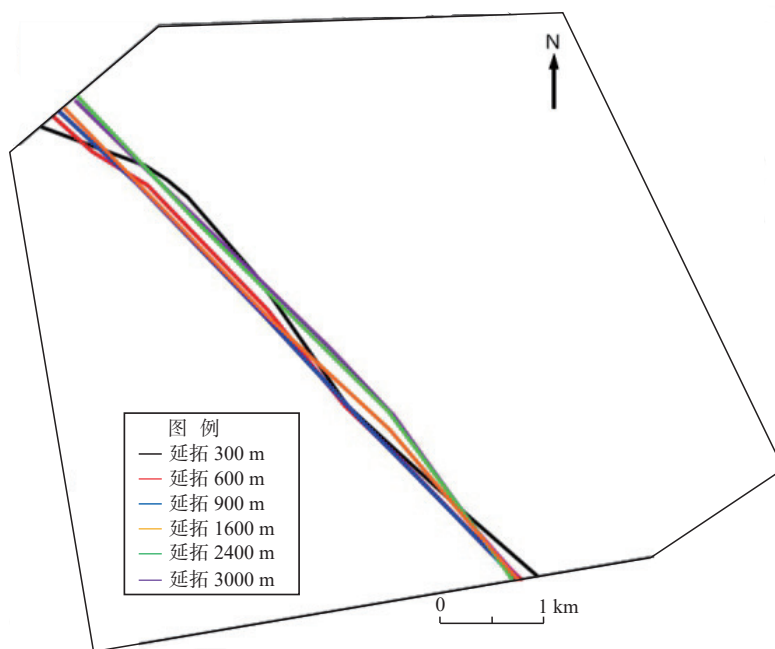


图 5 不同上延高度重力异常断层构造线识别结果图

Fig. 5 Identification results of gravity anomaly fault layer structural lines at different upward elevations

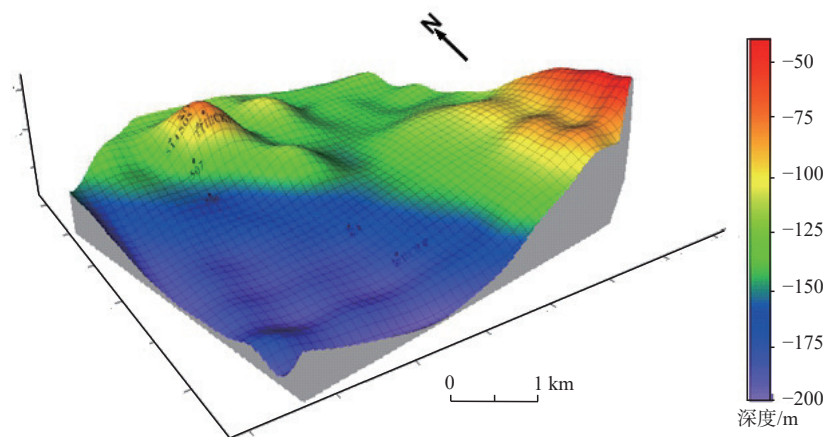


图 6 基底反演结果图

Fig. 6 Inversion results of basement

续性好、稳定, 能量强, 可连续追踪, 对应是基岩面反射波, 其双程旅行时约为 0.205~0.23 s。根据地震剖面反射波组的横向变化特征, 桩号 900 m 位置附近地震反射波组 Tg(时间约 0.22 s 区段)同相轴错断明显, 与其上部的反射波组同相轴错断特征进行断点组合, 显示为逆冲断层性质, 基岩面断距约 10 m, 倾向南西。断层在第四纪地层中也有明显的错断行迹, 上断点也可追踪至第四纪(埋深约 100 m)内。

对上海市首座地应力监测站 SDJ-1 钻孔内的(图 1)第四纪松散沉积样品进行光释光和碳十四年代学测试(测试结果见图 8), 地震时间剖面断层上

断点埋深约 100 m, 其对应年龄为 110~140 ka 之间(图 8), 可以推断上断点错断至第四系中更新统地层(Qp³), 为第四纪中更新世活动断层。

4 断层活动性特征分析

4.1 张堰-金山卫断层第四纪活动特征

根据探测资料及钻探成果, 对张堰-金山卫断层第四纪活动性特征进行综合讨论。综合物探成果显示, 张堰-金山卫断层走向与已有的根据重磁场特征推测的断层走向存在有一定平面摆动偏差

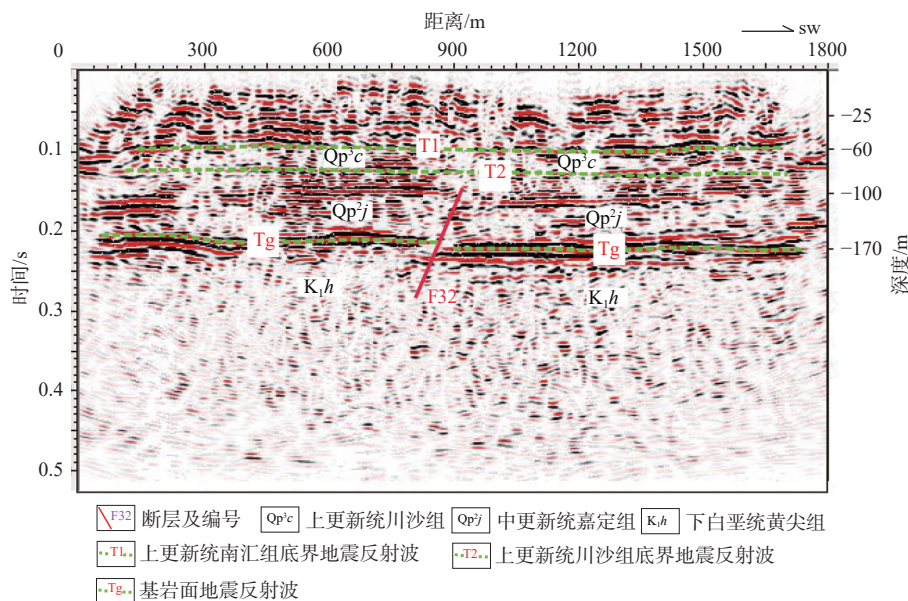


图 7 浅层地震勘探线时间剖面图

Fig. 7 Time profile of shallow seismic exploration line

(张宏良等, 1996; 张宏良, 1999), 其走向约北西 315°, 倾向南西, 上断点错断埋深位置约 100 m。地应力监测站 SDJ-1(图 1)四分量压磁地应力探头安装于完整基岩上(埋深约 168 m 处), 揭示了 180.17 m 钻探深度范围内的地层, 包括第四系全新统、上更新统、中更新统、下更新统的黏性土、粉性土、砂性土及下白垩统的安山岩。自上而下揭示的地层岩性特征为: ①全新统青浦组(Qh₃)属滨海-河口相沉积, 顶、底板埋深 1.00~42.00 m; ②上更新统南汇组(Qp³ⁿ)属滨海相沉积, 为第一承压含水层, 顶、底板埋深 42.00~60.00 m; ③上更新统川沙组(Qp^{3c})属河口相沉积, 为第二承压含水层, 顶、底板埋深 60.00~93.50 m; ④中更新统嘉定组(Qp^{2j})属河流-三角洲相、湖泊相沉积, 为第三承压含水层, 顶、底板埋深 93.50~120.60 m, 含碎块状安山岩, 土质分布不均匀; ⑤下白垩统黄尖组(K_{1h})为灰绿色安山岩。其顶部为风化层, 在深部 122.60~139.70 m 岩石破碎, 裂隙发育, 推测为张堰-金山卫断层活动形成的断层破碎带。结合高分辨率浅层地震时间剖面上断点错断位置和第四纪沉积物的年代学测试结果(图 8), 可以推断断层已错断至第四系中更新统地层, 为中更新世活动断层, 推测此北西向断层可能是在燕山期张扭结构面的基础上, 于喜山期继续活动发展和强化形成的, 具有较强的新生特点(张宏良, 1999; 包汉勇等, 2013; 李三忠, 2019)。晚近时期以来, 上海地区历史地震震中的分布都与北西向断

层有着密切联系, 这与现今中国东部地区北西向断层为最活跃的地质构造一致(章振铨等, 2004; 李三忠等, 2019)。

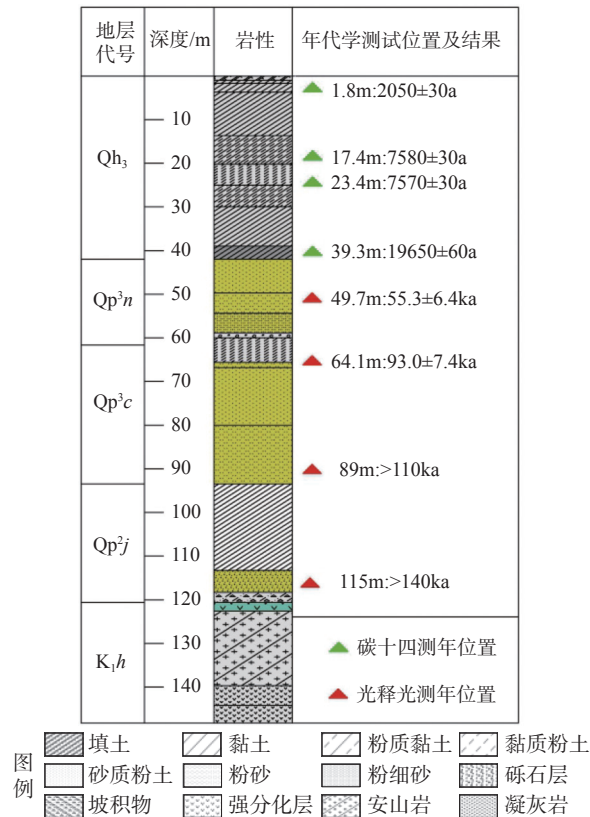


图 8 地应力监测钻孔 SDJ-1 岩性柱状图及测年结果图

Fig. 8 Lithological histogram and dating results of Borehole SDJ-1 for ground stress monitoring

4.2 张堰-金山卫断层现今活动特征

张堰-金山卫断层附近地应力监测站钻孔 SDJ-1 原位地应力实测显示现今最大水平主应力方向为北西 $42^{\circ}\sim 62^{\circ}$ (表 2), 优势方位为北西向(张浩等, 2020), 该应力状态有利于北西向张堰-金山卫断层

发生张扭活动。上海地震台网测定金山区 2013 年 1 月曾发生 1.3 级地震, 震源深度 8 km, 可能与该断层活动有一定关系, 断层现今活动性依然活跃(吴中海和张会平, 2021), 同时也说明了上海地区北西向断层现今仍具有较强活动性特征。

表 2 地应力测量取值结果表

Table 2 Results of ground stress measurement values

序号	中心深度/m	主应力值/MPa			S_H/S_h	S_H 方向/ $^{\circ}$
		S_H	S_h	S_v		
1	143.6	9.54	5.41	2.85	1.76	NW42°
2	145.5	10.77	5.88	2.90	1.83	NE80°
3	155.5	10.62	5.75	3.17	1.85	NW56°
4	157.5	10.10	5.61	3.22	1.80	NW62°
5	164.5	11.81	6.38	3.40	1.85	
6	170.0	12.91	6.96	3.55	1.85	NW46°
7	176.3	12.29	6.53	3.72	1.88	

注: S_H 为最大水平主应力, MPa; S_h 为最小水平主应力, MPa; S_v 为根据上覆岩石埋深计算的垂直主应力, MPa; $K_{th}=S_H/S_h$, 为水平主应力比值, 表征地应力状态

5 结论

此次研究利用高精度重力面积测量及高分辨率浅层地震勘探技术, 精细查明张堰-金山卫断层一定深度范围内地层结构、隐伏断层空间分布及上断点位置等要素。

(1) 地球物理探测结果刻画的断层行迹在布格重力异常和地震时间剖面上均有较好的物性异常反映, 研究显示张堰-金山卫断层横穿金山老城区, 性质为逆断层, 总体走向为北西向 315° , 倾向南西, 基岩面断距约 10 m。

(2) 张堰-金山卫断层上断点已错断至第四系中更新统内, 为第四纪中更新世活动断层, 分析认为张堰-金山卫断层是于燕山期张扭结构面基础上, 于喜山期继续活动发展和强化形成的, 同时具有继承性和新生性活动特征, 在现今中国东部地区北西向地应力状态下易于发生张扭性活动, 该断层活动性仍需持续关注。

References

BAO H Y, GUO Z F, ZHANG L L, et al., 2013. Tectonic dynamics of eastern china since the formation of the pacific plate[J]. *Advances in Earth Science*, 28(3): 337-346. (in Chinese with English abstract)

CAMERON M, 2009. Time depth conversion and seismic velocity analysis based on time offset velocity[J]. MA F Z, trans. *Petroleum Geophysics*, 7(1): 48-52. (in Chinese)

CHENG J Y, XIONG S Q, YIN C X, 2013. Geological and geophysical interpretation of the bouguer gravity map of China[J]. *Geological Review*, 29(2): 181-189. (in Chinese with English abstract)

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

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

GU P T, 2006. Thinking of getotectonic attribution on Jinshan Group in Shanghai Area[J]. *Shanghai Land & Resources*, 27(4): 10-13. (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 and Geochemical Exploration*, 39(2): 408-415. (in Chinese with English abstract)

GUAN X P, 1991. An effective and simple approach of subsurface inversion using parker's equation[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 13(3): 236-242. (in Chinese with English abstract)

GUO T, HU J S, YIN K M, et al., 2019. Gravity interface inversion method based on three-dimensional seismic peeling and its application[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(5): 1090-1096. (in Chinese with English abstract)

GUO Y, LI J S. 2022. Application of High Density Electrical Method in Rock Exploration of Badong Formation in Fengjie Area[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 48(6): 71-76. (in Chinese with English abstract)

HUO E J, LIU C S, ZHANG Z Q, et al., 2013. Study on hidden faults and their activity in Shanghai City[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)

LEI X D, QI B S, GUAN W, et al., 2021. Research on the faults identification based on gravity anomaly in Beijing plain[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(4): 1253-1265. (in Chinese with English abstract)

LI C B, JIANG R, ZENG J W, et al., 2022. Construction of bedrock geologic-

- al model in shallow overburden area: Application of a joint inversion of gravity anomaly and borehole data in the Tanlu Fault Zone, Sihong area[J]. Geological Bulletin of China, 41(2-3): 425-435. (in Chinese with English abstract)
- LI C Y, WANG Y P, WANG Z C, 2007. Some analyses on the relation between the upper offset point and the latest activity times of buried faults in cities of eastern China: taking the Xingtai and Tangshan earthquake regions as an example[J]. Seismology and Geology, 29(2): 431-445. (in Chinese with English abstract)
- LI S Z, CAO X Z, WANG G Z, et al., 2019. Meso-cenozoic tectonic evolution and plate reconstruction of the Pacific plate[J]. Journal of Geomechanics, 25(5): 642-677. (in Chinese with English abstract)
- LI W L, TIAN Q N, LIU S F, et al., 2018. Progress in the study of shallow seismic exploration technology in urban areas[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 42(4): 653-661. (in Chinese with English abstract)
- LIU X L, FAN J, ZHU J W, et al. Critical slowing-down characteristics of brittle fracture of rock bridge under uniaxial compression [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(3): 166-175. (in Chinese with English abstract)
- LU J M, WANG Y G, 2009. Principle of seismic exploration[M]. 3rd ed. Dongying: China University of Petroleum Press. (in Chinese)
- MA S, WANG H W, XU S S, et al., 2021. High-precision gravity is used to probe the structural characteristics of Zhangyan-Jinshanwei floor and the distribution of buried faults[J]. Advances in Geosciences, 11(8): 1024-1032. (in Chinese with English abstract)
- MENG X H, GUO L H, CHEN Z X, et al., 2009. A method for gravity anomaly separation based on preferential continuation and its application[J]. Applied Geophysics, 6(3): 217-225.
- QI B S, FENG C J, TANG C X, et al., 2018. Study on the regional crustal stability in Zhangjiakou and its adjacent areas[J]. Urban Geology, 13(3): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- QIU J B, LI X, 2007. Quaternary stratigraphy and sedimentary environment in Shanghai[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers. (in Chinese)
- Shanghai Bureau of Geology and Mineral Resources, 1988. Shanghai regional geology[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- SHANG Y J, JIN W J, WANG G J, et al., 2018. Comprehensive analysis of geophysical results via different exploration methods in granites of Daya Bay Neutrino tunnel[J]. Progress in Geophysics, 33(4): 1687-1699. (in Chinese with English abstract)
- SHEN B, 1994. Application of precision gravity measurement[J]. Earth Science, 1: 8-30. (in Chinese)
- 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. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, SUN Y, WU S R, et al., 2009. A consideration on regional crustal stability assessment after $M_s 8.0$ Wenchuan strong earthquake in China[J]. Journal of Geomechanics, 15(2): 142-150. (in Chinese with English abstract)
- WANG J, GAO Z W, LIU F X, et al., 2020. Study on Tangshan-Hejian-Cixian earthquake fault zone by shallow seismic exploration method[J]. Seismology and Geology, 42(4): 866-880. (in Chinese with English abstract)
- WANG Q S, 2003. Gravimetry[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- WANG R J, 2010. Application and development of geophysical exploration technology in Shanghai[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers. (in Chinese)
- WEI P, REN X H, JIAO H X, et al. Study on optimization inversion of initial in-situ stress field within slate area [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(1): 190-198. (in Chinese with English abstract)
- WU Z H, 2019. The definition and classification of active faults: history, current status and progress[J]. Acta Geoscientia Sinica, 40(5): 661-697. (in Chinese with English abstract)
- WU Z H, ZHANG H P, 2021. Chief editor's address[J]. Journal of Geomechanics, 27(2): 157-158. (in Chinese)
- XU W M, CHEN S, SHI L, 2014. Seismic activity and gravity anomaly characteristics of Yutian in Xinjiang and surrounding regions[J]. Earth Science, 39(12): 1831-1841. (in Chinese with English abstract)
- XU X W, 2006. Active faults, associated earthquake disaster distribution and policy for disaster reduction[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 1(1): 7-14. (in Chinese with English abstract)
- XU X W, YU G H, RAN Y K, et al., 2015. An introduction to active faults in China: findings of active faults in 20 cities[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- YAO X, 2014. Development and problems of regional crustal stability assessment study companying with discussion of the specification compilation[J]. Geological Review, 60(1): 22-30. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG F X, JIANG Z K, ZHANG F Q, et al., 2007. Calculating upward continuation of gravity anomalies using cosine transform[J]. Progress in Geophysics, 22(1): 57-62. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H, SHI G, WU H, et al., 2020. In-situ stress measurement in the shallow basement of the Shanghai area and its structural geological significance[J]. Journal of Geomechanics, 26(4): 583-594. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H, SHI G, WU H, et al., 2021. Quaternary activity of the Luodian-Zhoupu buried fault in the Shanghai region: integrated exploration and research[J]. Journal of Geomechanics, 27(2): 267-279. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H L, ZHANG J, 1996. On the geological characteristics of Zhangyan copper deposit in Jinshan county of Shanghai City[J]. Shanghai Geology(4): 9-15. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H L, 1999. Shanghai geological and mineral records[M]. Shanghai: Shanghai Academy of Social Sciences Press. (in Chinese)
- ZHANG H L, ZHANG L, XIA Y Y, 2014. The application of shallow seismic prospecting methods to urban active fault detection and risk assessment[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 11(1): 85-88. (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)
- ZHOU C, ZHANG S, REN J L, et al. 2022. Application of OCTEM in the Preliminary Investigation of Railway Engineering[J]. Railway Investigation and Surveying, 48(6): 65-71. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

包汉勇, 郭战峰, 张罗磊, 等, 2013. 太平洋板块形成以来的中国东部

- 构造动力学背景[J]. *地球科学进展*, 28(03): 337-346.
- CAMERON M, 2009. 基于时间偏移速度的时深转换和地震速度分析[J]. 马方正, 译. *油气地球物理*, 7(1): 48-52.
- 程家印, 熊寿庆, 尹春霞, 1983. 全国重力图的地质-地球物理解释[J]. *地质论评*, 29(2): 181-189.
- 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.
- 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.
- 顾澎涛, 2006. 关于上海地区金山群大地构造属性的思考[J]. *上海地质*, 27(4): 10-13.
- 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.
- 关小平, 1991. 利用Parker公式反演界面的一种有效方法[J]. *物探化探计算技术*, 13(3): 236-242.
- 郭涛, 胡加山, 尹克敏, 等, 2019. 基于三维地震剥层的重力界面反演方法及应用[J]. *物探与化探*, 43(5): 1090-1096.
- 郭宇, 李均山, 2022. 高密度电法在奉节地区巴东组岩层勘察中的应用[J]. *铁道勘察*, 48(6): 71-76.
- 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.
- 雷晓东, 戚帮申, 关伟, 等, 2021. 北京平原区断裂构造重力异常识别研究[J]. *地球物理学报*, 64(4): 1253-1265.
- 李长波, 蒋仁, 曾剑威, 等, 2022. 重力约束反演构建郯庐断裂带泗洪浅覆盖区隐伏基岩地质模型[J]. *地质通报*, 41(2-3): 425-435.
- 李传友, 汪一鹏, 王志才, 2007. 中国东部城市地区隐伏断裂上断点与最新活动时代关系的初步分析: 以邢台、唐山地震区为例[J]. *地震地质*, 29(2): 431-445.
- 李三忠, 曹现志, 王光增, 等, 2019. 太平洋板块中一新生代构造演化及板块重建[J]. *地质力学学报*, 25(05): 642-677.
- 李万伦, 田黔宁, 刘素芳, 等, 2018. 城市浅层地震勘探技术进展[J]. *物探与化探*, 42(04): 653-661.
- 刘先林, 范杰, 朱觉文, 等. 单轴压缩下岩桥脆性断裂的临界慢化特征[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(3): 166-175.
- 陆基孟, 王永刚, 2009. 地震勘探原理[M]. 3版. 东营: 中国石油大学出版社.
- 马森, 王浩文, 许少帅, 等, 2021. 利用高精度重力探查张堰-金山卫基底结构特征与隐伏断裂分布[J]. *地球科学前沿*, 11(8): 1024-1032.
- 孟小红, 郭良辉, 陈召曦, 等, 2009. 基于优选延拓的重力异常分离方法及其应用(英文)[J]. *应用地球物理*, 6(3): 217-225.
- 戚帮申, 丰成君, 谭成轩, 等, 2018. 张家口及邻区地壳稳定性研究[J]. *城市地质*, 13(3): 1-14.
- 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.
- 上海地质矿产局, 1988. 上海市区域地质志[R]. 北京: 地质出版社.
- 尚彦军, 金维浚, 王光杰, 等, 2018. 大亚湾中微子试验隧道工程不同物探方法探测结果综合分析[J]. *地球物理学进展*, 33(4): 1687-1699.
- 沈博, 1994. 精密重力测量的应用[J]. *地球科学*, (1): 8-30.
- 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.
- 谭成轩, 孙叶, 吴树仁, 等, 2009. “5.12”汶川 $M_s8.0$ 大地震后关于我国区域地壳稳定性评价的思考[J]. *地质力学学报*, 15(2): 142-150.
- 王继, 高战武, 刘芳晓, 等, 2020. 用浅层人工地震方法探测唐山一河间一磁县地震构造带内的活动断裂[J]. *地震地质*, 42(4): 866-880.
- 王谦身, 2003. 重力学[M]. 北京: 地震出版社.
- 王仁杰, 2010. 上海地球物理勘探技术应用与发展[M]. 上海: 上海科学技术出版社.
- 魏鹏, 任旭华, 焦红星, 等. 板岩区初始地应力场优化反演研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(1): 190-198.
- 吴中海, 2019. 活断层的定义与分类: 历史、现状和进展[J]. *地球学报*, 40(5): 661-697.
- 吴中海, 张会平, 2021. 新构造与环境[J]. *地质力学学报*, 27(2): 157-158.
- 徐伟民, 陈石, 石磊, 2014. 新疆于田及周边地区地震活动性与重力异常特征[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 39(12): 1831-1841.
- 徐锡伟, 2006. 活动断层、地震灾害与减灾对策问题[J]. *震灾防御技术*, 1(1): 7-14.
- 徐锡伟, 于贵华, 冉勇康, 等, 2015. 中国城市活动断层概论: 20个城市活动断层探测成果[M]. 北京: 地震出版社.
- 姚鑫, 2014. 区域地壳稳定性评价研究进展与问题, 兼谈规范编制[J]. *地质论评*, 60(1): 22-30.
- 张凤旭, 姜正奎, 张凤琴, 等, 2007. 利用余弦变换计算重力异常的向上延拓[J]. *地球物理学进展*, 22(1): 57-62.
- 张浩, 施刚, 巫虹, 等, 2020. 上海地区浅部地应力测量及其构造地质意义分析[J]. *地质力学学报*, 26(4): 583-594.
- 张浩, 施刚, 巫虹, 等, 2021. 上海罗店-周浦隐伏断裂第四纪活动性综合探测与研究[J]. *地质力学学报*, 27(2): 267-279.
- 张宏良, 张洁, 1996. 上海金山张堰铜矿床地质特征[J]. *上海地质*, 4: 9-15.
- 张宏良, 1999. 上海地质矿产志[M]. 上海: 上海社会科学院出版社.
- 张慧利, 张琳, 夏媛媛, 2014. 浅层地震勘探在城市活断层探测与危险性评价中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 11(1): 85-88.
- 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.
- 周超, 张硕, 任金龙, 等, 2022. OCTEM在铁路工程前期勘察中的应用[J]. *铁道勘察*, 48(6): 65-71.

开放科学(资源服务)标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的
语音介绍及更多文章相关资讯

