

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

马 森, 王浩文, 许少帅, 孙鹏飞*

河北工程大学地球科学和工程学院, 河北 邯郸
Email: 806869853@qq.com, *huowang6886@163.com

收稿日期: 2021年7月7日; 录用日期: 2021年7月29日; 发布日期: 2021年8月4日

摘 要

上海是中国最大的经济中心城市, 建筑物和生命财产的安全是经济有序发展的一个重要方面, 因此查明上海市辖区基岩面以上范围内隐伏活动断裂的空间展布特征是必要的。本文以上海市张堰 - 金山卫地区为例, 利用改进后的帕克法, 增加了约束因子来减少干扰造成的突变, 使反演出的基岩面深度和走向更精准, 利用欧拉反褶积、水平和垂直导数探查基岩面以上的活动断裂位置和走向, 同时结合地质资料验证断裂位置、基岩面深度的有效性, 为以后的上海市隐伏活动断裂勘探调查使用高精度重力勘探提供支持依据。

关键词

隐伏活动断裂, 高精度重力勘探, 帕克法, 基岩面

High-Precision Gravity Is Used to Probe the Structural Characteristics of Zhangyan-Jinshanwei Floor and the Distribution of Buried Faults

Sen Ma, Haowen Wang, Shaoshuai Xu, Pengfei Sun*

School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei
Email: 806869853@qq.com, *huowang6886@163.com

Received: Jul. 7th, 2021; accepted: Jul. 29th, 2021; published: Aug. 4th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 马森, 王浩文, 许少帅, 孙鹏飞. 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, 2021, 11(8): 1024-1032. DOI: 10.12677/ag.2021.118098

Abstract

Shanghai is the largest economic center city in China, and the safety of buildings, life and property is an important aspect of orderly economic development. Therefore, it is necessary to find out the spatial distribution characteristics of buried active faults in the area above the bedrock surface of Shanghai. Zhangyan-Jinshanwei area as an example, this paper improved Parker-Oldenburg's algorithm, increasing the constraint factors to reduce the interference caused by the mutation, make the inversion of the bedrock surface's depth and toward more accurate, use Euler deconvolution, horizontal derivative and vertical derivative to explore the position and toward of active faults above the bedrock surface, combined with the geological data, the inversion results are verified to be effective. It provides a support basis for the future investigation of buried active faults in Shanghai using high-precision gravity.

Keywords

Buried Active Faults, High-Precision Gravity Survey, Parker-Oldenburg's Algorithm, Bedrock Surface

Copyright © 2021 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

活动断裂是指在最近地质时期活动过并且将来可能仍持续活动的断裂[1]。活动断裂带来破坏性地震危害及衍生地质灾害，对城市发展及基础设施建设具有难以回避的灾害危险性，是威胁城市地质安全的最大隐患[2]。

在城市的活动断裂勘探过程中，目标断裂绝大多数为隐伏断裂。同时考虑到城市复杂特征的影响，需要采用抗干扰、高信噪比、低城市环境影响的勘探技术手段。因此，地球物理勘探在活动断裂探测中发挥着重要的作用[3] [4] [5] [6] [7]。目前调查隐伏断裂的有效地球物理勘探手段包括电磁法勘探[8] [9]、浅层地震勘探[10] [11] [12]、高精度重力勘探[13] [14] [15] [16]等。

2. 区域背景

2.1. 地质特征

上海境内基岩地层划分了 22 个“组”以上的岩石地层单位。由下至上有：古元古界、中元古界；震旦系；古生界寒武系、奥陶系、志留系；中生界侏罗系、白垩系以及新生界古近系、新近系。分布面积最广当属上侏罗统火山岩系，包括劳村组、黄尖组和寿昌组，遍布于全市，出露面积约占总面积的 70% 以上[17]。

本市的断裂构造具体可划分为 NE、NNE、NW-NNW 和近 EW(NEE)四组，从断裂构造之间相互关系看，NE、近 EW 向断裂一般属于早期构造，NNE、NW-NNW 向断裂为晚期构造[18]。

2.2. 物理特征

工作区域内几类常见岩性密度参数表 1。

Table 1. Main rock density parameters in working area
表 1. 工作区主要岩层密度参数

地层及岩性	密度(g/cm ³)
第四系粘土	1.60~2.04
第四系砂层	--
第四系砂砾层	--
花岗岩	2.30~2.80
安山岩	2.30~2.70
玄武岩	2.53~3.10

根据上表,高精度重力勘探法能够在张堰-金山卫区域探测活动断裂前提——探测地质目标体与周围介质间存在密度形成差异的条件达成了。

2.3. 研究现状

前人在张堰附近至金山卫一带进行了电磁勘探和浅层人工地震勘探,发现了分布于此的张堰-金山卫断裂,走向 NW330°,倾向 SW,陡倾角,陆上部分展布约 15 公里,分成两段,呈雁行排列。北段长 5~6 km,走向北西 330~335°,倾向南西,倾角 60°,上断点埋深为 160 m 左右,为早更新世断层。往南至张堰附近,表现为由阶梯状的两条断层构成,宽 60 m,倾向北东,倾角 55~65°,基岩面落差约 30 m,上断点埋深约 90 m 左右,属中更新世断层。断层南段走向为北西 325°,倾向南西,倾角 70°,长 6 km [19]。

目前对于本条断裂的认识,是根据电磁资料及浅层人工地震探测所获取的,由于物探方法本身存在多解性,因此获得的结论与认识可能需要进一步的佐证。

3. 勘探原理和布线

3.1. 勘探原理

3.1.1. 布格异常计算

布格重力异常 Δg_B 的计算公式(单位 10^{-5} m/s^2)为:

$$\Delta g_B = \Delta g_C + \delta g_\varphi + \delta g_B + \delta g_T \quad (1)$$

其中 Δg_C 为测点相对于总基点的重力值。 δg_φ 为纬度改正, δg_B 为布格改正, δg_T 为地形改正。各测点观测值经过上述各项校正后获得布格重力异常值,布格异常反映的是地质体与围岩密度差异所引起的重力变化。

3.1.2. 基底反演

为反演底界面的起伏形态,利用了经典的 Parker-Oldenburg 界面反演算法[20]。

1973 年, Parker 提出的常密度单一界面的正演公式为:

$$F[\Delta g] = -2\pi G \Delta \rho e^{-\omega h_0} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-\omega)^{m-1}}{m!} F[\Delta h^m] \quad (2)$$

其中 G 为万有引力常数, $\Delta \rho$ 为界面上下密度差, ω 为圆频率, Δh 为界面起伏高度, Δg 则是界面起伏

所引起的重力异常, F 代表 Fourier 变换。

1974 年, Oldenburg 在 Parker 法正演基础上, 结合迭代模式给出了界面反演的迭代方法:

$$F[\Delta h] = -\frac{e^{-\omega h_0} F[\Delta g]}{2\pi G \Delta \rho} - \sum_{m=2}^{\infty} \frac{(-\omega)^{m-1}}{m!} F[\Delta h^m] \quad (3)$$

为了来减少干扰造成的突变, 现在增加了实时界面深度与平均深度比的约束因子, 约束因子由于根据每次迭代计算进行实时变化, 因此在一定程度上会减少各种误差造成的反演震荡和突变, 具体改正后的反演公式如下:

$$F[\Delta h] = -\frac{e^{\left(-\omega h_0 + \frac{\Delta h}{h_0}\right)} F[\Delta g]}{2\pi G \Delta \rho} - \sum_{m=2}^{\infty} \frac{(-\omega)^{m-1}}{m!} F[\Delta h^m] \quad (4)$$

其中 h_0 是基岩的平均深度, 利用该方法对各剖面进行反演, 表层第四系密度为 $1.5\sim 2.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 安山岩密度为 $2.5\sim 2.8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 由于没有收集到相关密度资料, 故在已知钻孔的约束下, 经过多次试验, 将密度差设为 $0.55 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

3.1.3. 断裂划分

为了研究区内断裂的分布情况, 采用水平导数、垂向导数方法处理。基于离散余弦变换的重力异常垂向和水平一阶导数公式:

$$\begin{aligned} \Delta g_z(x, 0) &= C^{-1} [2\pi u \Delta G(u, 0)], \\ \Delta g_x(x, 0) &= C^{-1} [2\pi u \Delta G_{C_{\pi/2}}(u, 0)] \end{aligned} \quad (5)$$

其中 C^{-1} 表示离散余弦反变换:

$$\Delta G_{C_{\pi/2}}(u, 0) = \sqrt{\frac{2}{N}} c(k) \times \sum_{n=0}^{N-1} \Delta g(x, 0) \cos \left[\frac{\pi}{2} - \frac{(2n+1)k\pi}{2N} \right] \quad (6)$$

根据重力异常形态、水平一阶导数极值点及垂向一阶导数零值点位置, 再结合欧拉反褶积(构造指数取零), 对研究区的断裂进行划分。

3.2. 测线布设

高精度重力测线 3 条, 主要部署于龙胜路、龙轩路、查梅路(表 2, 图 1)。

Table 2. Information of high-precision gravity line

表 2. 重力测线信息

测线编号	位置	实物工作量(点)	测线长度(m)	走向(大致)
G1	龙胜路	74	2939	自西向东
G2	龙轩路	61	2402	自西向东
G3	查梅路	36	792	自东向西
总计		171	6133	



Figure 1. Location of high-precision gravity lines
图 1. 高精度重力测线布设位置

4. 数据分析和讨论

4.1. 布格异常与基底反演

图 2~图 4 是经过数据处理获得的布格重力异常曲线和基底反演结果形成的。

图中的红色实线代表布格异常曲线，蓝色实线代表拟合曲线，黑色实线代表地面高程，黑色虚线代表基底起伏。

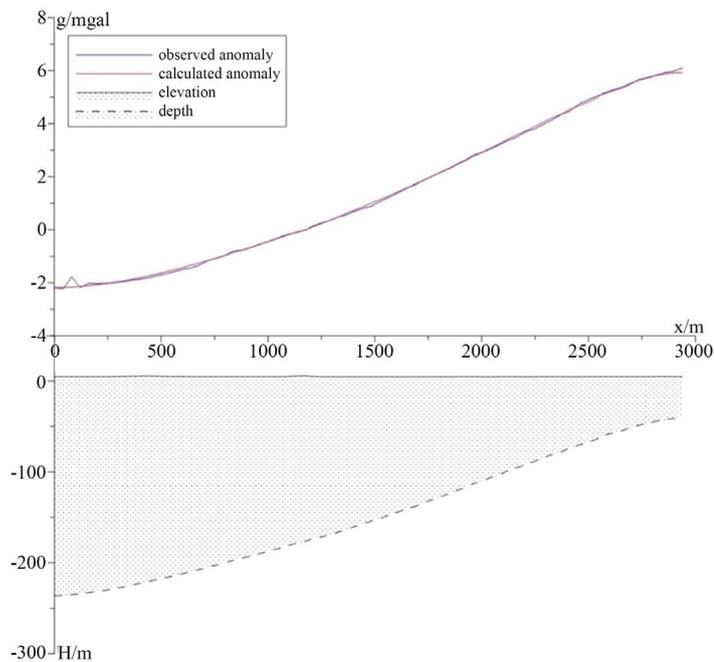


Figure 2. Bouguer anomaly curve, floor inversion and forward fitting of G1 line
图 2. G1 测线布格异常曲线、基底反演及正演拟合

从 G1 测线布格异常曲线、基底反演及正演拟合图(图 2)上可以看出 G1 线龙胜路的布格重力异常变化量为 $-2.228 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2 \sim 6.096 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，经过各项外部改正后的异常变化范围减小，异常形态变得相对简单。同时可以看出基底界面深度较浅时，其产生的重力异常值较大，各个重力值与其深度值之间的

对应关系比较好。基底埋深范围约为 45 m~240 m，自西南向东北越来越浅。

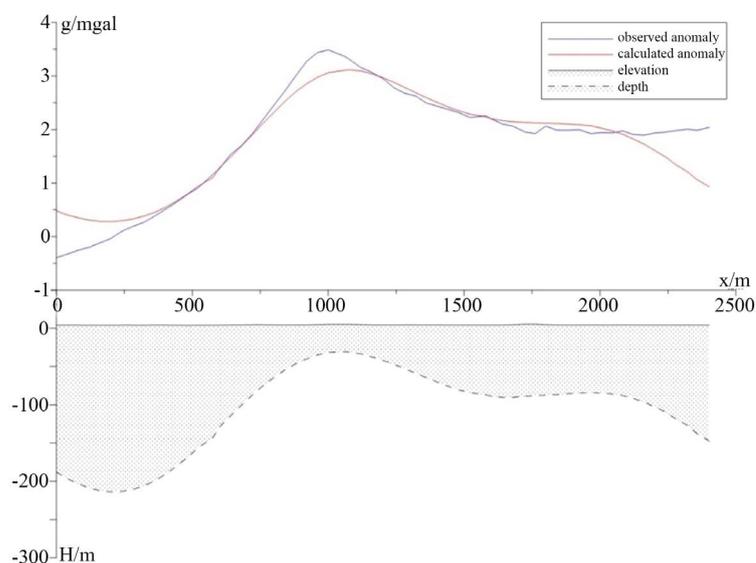


Figure 3. Bouguer anomaly curve, floor inversion and forward fitting of G2 line

图 3. G2 测线布格异常曲线、基底反演及正演拟合图

从 G2 测线布格异常曲线以及基底反演及正演拟合图(图 3)上可以看出 G2 线龙轩路的布格重力异常变化量为 $-0.395 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2 \sim 3.489 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，经过各项外部改正后的异常变化范围减小，异常形态变得相对简单。同时可以看出基底界面深度较浅时，其产生的重力异常值较大，各个重力值与其深度值之间的对应关系比较好。基底埋深范围约为 35 m~220 m，最浅处在学府路东侧约 450 m。

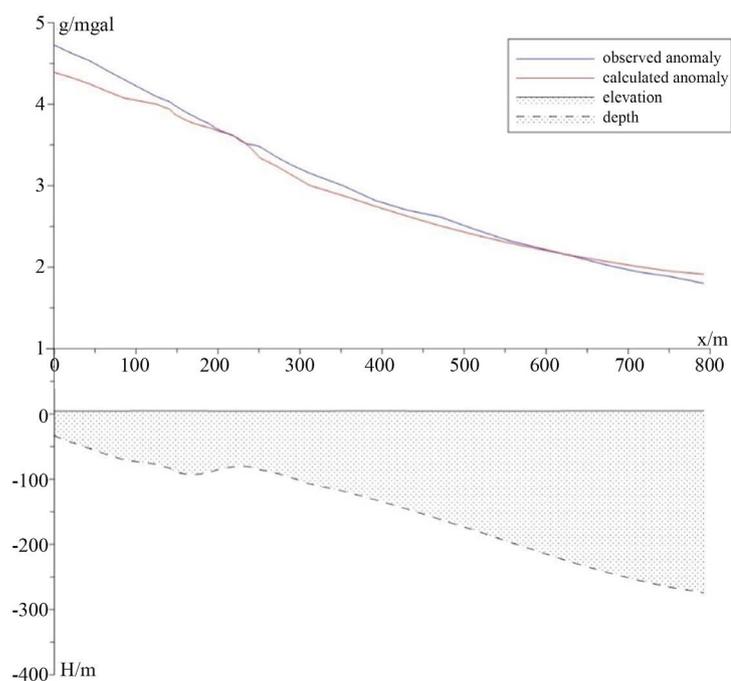


Figure 4. Bouguer anomaly curve, floor inversion and forward fitting of G3 line

图 4. G3 测线布格异常曲线、基底反演及正演拟合

从 G3 测线布格异常曲线、基底反演及正演拟合图(图 4)上可以看出 G3 线查梅路的布格重力异常变化量为 $1.802 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2 \sim 4.728 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 经过各项外部改正后的异常变化范围减小, 异常形态变得相对简单。同时可以看出基底界面深度较浅时, 其产生的重力异常值较大, 各个重力值与其深度值之间的对应关系比较好。基底埋深范围约为 37 m~280 m 之间, 自西南向东北越来越浅。根据距离起点 165 m, 180 m, 220 m 的三处钻井资料显示, 基底界面在 -100 m, -96 m, -92 m 的位置, 改进帕克法反演深度分别是 -101 m, -95 m, -91 m 两者吻合很好。

4.2. 断裂划分

根据重力异常形态、水平一阶导数极值点及垂向一阶导数零值点位置, 再结合欧拉反褶积(构造指数取零), 对研究区的断裂进行划分。各剖面结果如图 5~图 7 所示, 图中红色加粗实线为推断为欧拉反褶积结合水平和垂直导数推断出的断裂位置。

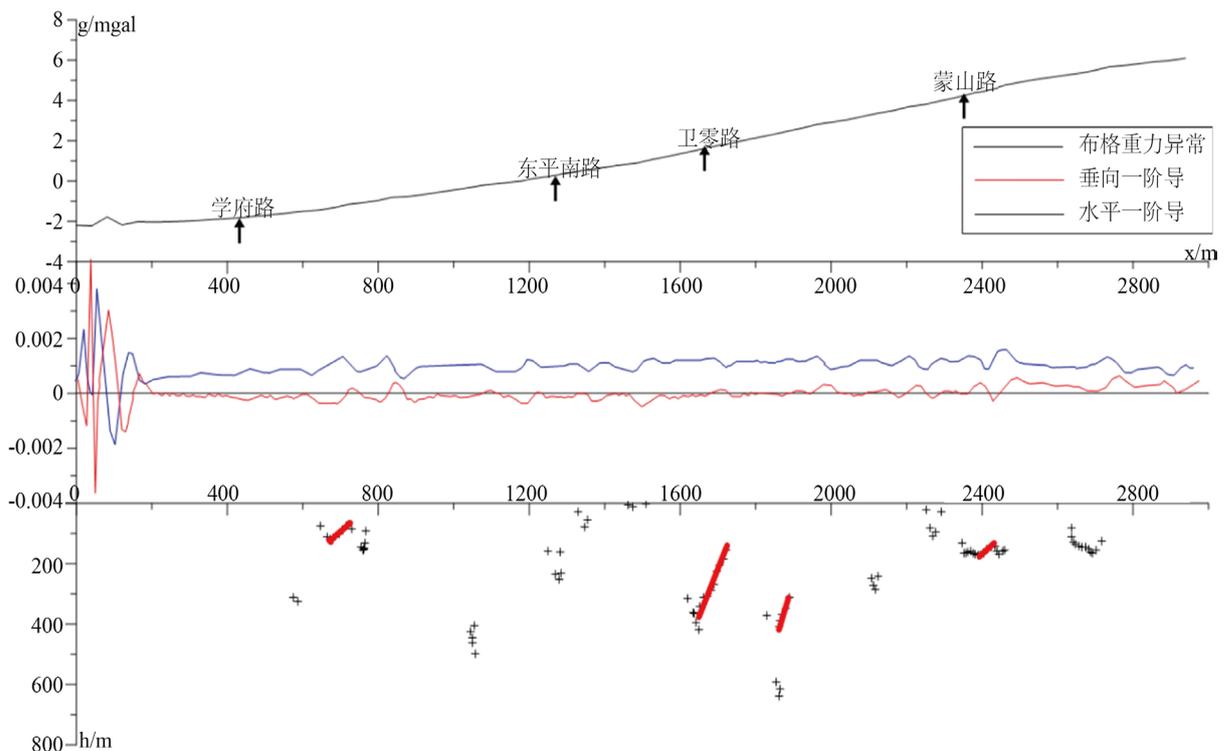


Figure 5. Fault division of G1 line
图 5. G1 测线断裂划分

从 G1 测线断裂划分图(图 5)上推断出 G1 线龙胜路断裂共推断出 4 条, 分别分布在学府路东约 250 m 处、卫零路路口附近、卫零路东约 200 m、蒙山路路口附近。

从 G2 测线断裂划分图(图 6)上推断出 G2 线龙轩路断裂共推断出 5 条, 分别分布在学府路路口附近、学府路东约 140 m 处、东平北路西约 240 m、东平北路东约 250 m、卫零路东约 200 m。东部三条断裂规模较小。

从 G3 测线断裂划分图(图 7)上推断出 G3 线查梅路断裂共推断出 3 条, 分别分布在钻孔 F32-1 附近、长春路路口附近、长春路西约 220 m 处。

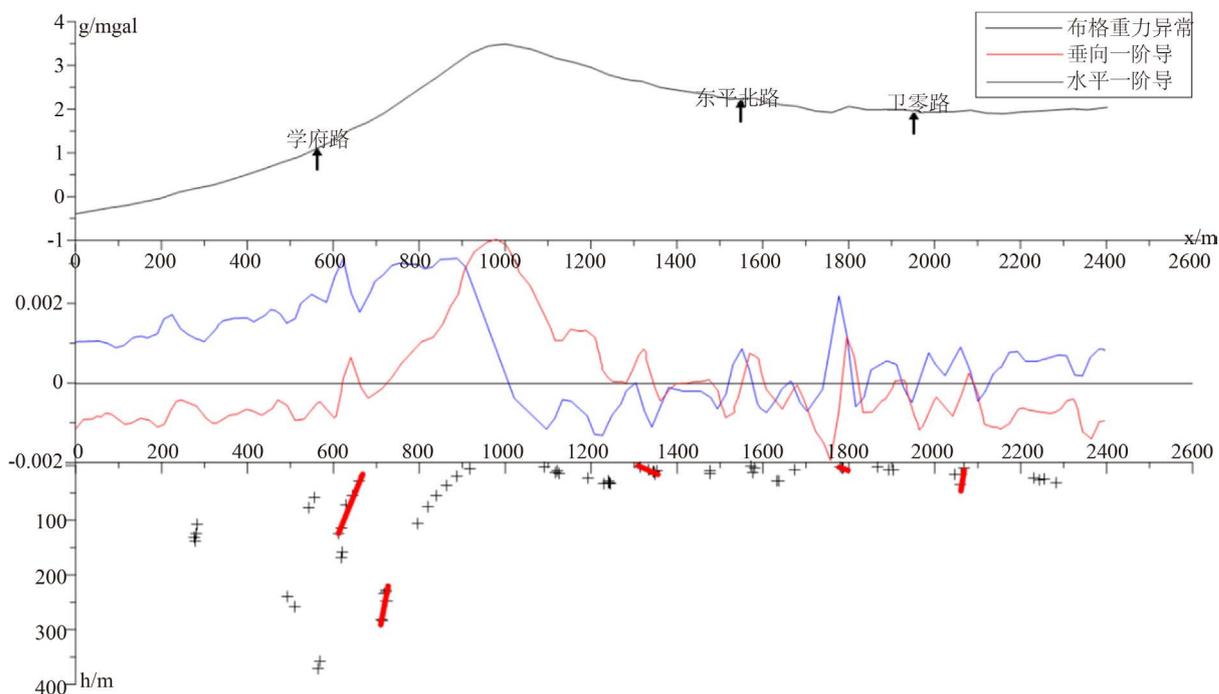


Figure 6. Fault division of G2 line

图 6. G2 测线断裂划分

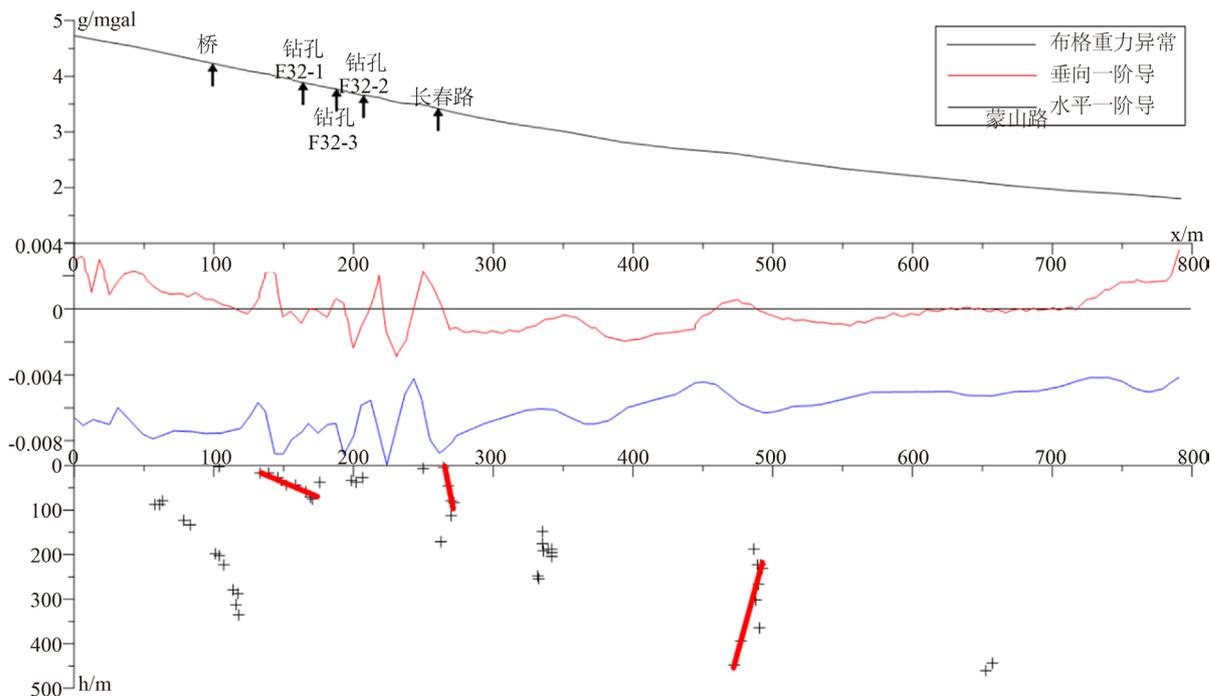


Figure 7. Fault division of G3 line

图 7. G3 测线断裂划分

5. 结果和讨论

本次高精度重力勘探中推断出，工作区域基底埋深趋势整体是自西南向东北越来越浅的，龙胜路出

现了 4 条断裂, 龙轩路出现了 5 条断裂, 查梅路出现了 3 条断裂。

通过对高精度重力数据的欧拉反褶积、水平导数、垂直导数以及改进后的帕克法基底反演, 表明高精度重力法能够实现查明该区域的基岩起伏形态, 隐伏断裂位置分布、大致走向, 及发育深度等要素。同时与以往物探和地质资料对比, 它们存在较好的一致性, 而且高精度重力探测结果反映的异常细节更为丰富和复杂。为以后上海市内隐伏活动断裂调查中提供依据, 但要想全空间探查断裂的展布和走向, 需要进行三维重力数据采集和反演, 二维反演只能部分显示断裂的展布, 这也是后期高精度重力探测的发展方向。

参考文献

- [1] 吴中海. 活断层的定义与分类——历史、现状和进展[J]. 地球学报, 2019, 40(5): 661-697.
- [2] 邓起东, 徐锡伟, 张先康, 等. 城市活动断裂探测的方法和技术[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 93-104.
- [3] 卢造勋. 城市活断层探测中的地球物理方法[J]. 东北地震研究, 2009, 25(2): 1-7.
- [4] 吴建平. 城市地震活断层探测的地球物理方法[J]. 国际地震动态, 2001(8): 2-16.
- [5] 李征西, 曾昭发, 李恩泽, 等. 地球物理方法探测活动断层效果和方法最佳组合分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005(S1): 109-114.
- [6] 潘纪顺, 刘保金, 朱金芳, 等. 城市活断层高分辨率地震勘探震源对比试验研究[J]. 地震地质, 2002, 24(4): 533-541.
- [7] 柴炽章, 孟广魁, 杜鹏, 等. 隐伏活动断层的多层次综合探测——以银川隐伏活动断层为例[J]. 地震地质, 2006, 28(4): 536-546.
- [8] 陈实, 李延清, 李同贺, 等. 高密度电法在城市基础地质调查中的应用[J]. 新疆地质, 2019, 37(1): 28-33.
- [9] 张迪, 李家存, 吴中海, 等. 地质雷达在活动断裂探测中的应用与进展[J]. 地质力学学报, 2016, 22(3): 733-746.
- [10] 郑晓雯. 浅层地震勘探在城市活断层探测中的应用[J]. 科技展望, 2016, 26(13): 178.
- [11] 吴建平. 城市地震活断层探测的地球物理方法[J]. 国际地震动态, 2001(8): 2-16.
- [12] 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.
- [13] 张毅, 徐如刚, 余勇, 等. 高精度重力测量在隐伏断层探测中的应用[J]. 国际地震动态, 2012(5): 6-7.
- [14] 李凤廷, 孟军海, 苗虎林, 等. 高精度重力测量中城市建筑物的影响及其校正[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(5): 686-691.
- [15] Abbott, R.E. and Louie, J.N. (2000) Depth to Bedrock Using Gravimetry in the Reno and Carson City, Nevada, Area Basins. *Digital Library Home*, **65**, 340. <https://doi.org/10.1190/1.1444730>
- [16] Blakely, R.J., Christiansen, R.L., Guffanti, M., et al. (1997) Gravity Anomalies, Quaternary Vents, and Quaternary Faults in the Southern Cascade Range, Oregon and California: Implications for Arc and Backarc Evolution. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **102**, 22513-22527. <https://doi.org/10.1029/97JB01516>
- [17] 张宏良. 上海地质矿产志[M]. 上海: 上海社会科学院出版社, 1999.
- [18] 章振铨, 刘昌森, 王锋. 上海地区断裂活动性与地震关系初析[J]. 中国地震, 2004(2): 25-33.
- [19] 火恩杰. 上海市隐伏断裂及其活动性研究[M]. 北京: 地震出版社, 2004.
- [20] Oldenburg, D.W. (1974) The Inversion and Interpretation of Gravity Anomalies. *Geophysics*, **39**, 526. <https://doi.org/10.1190/1.1440444>