

代宪鹏,孙君嵩,吴晓峰,等.控制点对区域流动重力测网平差精度的影响[J].地震工程学报,2022,44(3):626-630.DOI:10.20000/j.1000-0844.20201104001

DAI Xianpeng, SUN Junsong, WU Xiaofeng, et al. Impact of control points on the adjustment accuracy of mobile gravity network[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(3): 626-630. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20201104001

控制点对区域流动重力测网平差精度的影响

代宪鹏, 孙君嵩, 吴晓峰, 范文华, 王大伟

(江苏省地震局, 江苏 南京 210014)

摘要: 为分析控制点对区域流动重力测网平差精度的影响,利用江苏测区的流动重力观测数据,从参与平差计算的控制点数量以及空间分布两个角度,分析控制点对平差后的重力测网精度的影响规律,并进一步分析了本区域测网的监测能力。结果显示:采用单个基准点进行平差计算,基准点应当选择尽量靠近测网几何中心或多个闭合环节点的位置;当采用在空间分布上较为均匀控制点平差计算时,控制点周边测点与测网中部测点的点值精度并没有明显的差别。结合江苏区域重力测网的空间分辨率和观测数据平差处理精度,认为江苏重力测网对5级以上地震具有较好的监测效果,同时对4~5级地震也具有一定的监测能力。结果可为重力数据处理中合理的采用基准点进行平差、提升资料处理精度提供参考依据。

关键词: 控制点; 区域网; 流动重力; 测网精度; 监测能力

中图分类号: P315.72⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2022)03-0626-06

DOI:10.20000/j.1000-0844.20201104001

Impact of control points on the adjustment accuracy of mobile gravity network

DAI Xianpeng, SUN Junsong, WU Xiaofeng, FAN Wenhua, WANG Dawei

(Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, Jiangsu, China)

Abstract: To analyze the influence of control points on the adjustment accuracy of regional mobile gravity network, based on the mobile gravity observation data of Jiangsu area, the influence of control points on the adjustment accuracy of gravity network was analyzed from the perspectives of the number and spatial distribution of control points used in the adjustment calculation, and the monitoring ability of Jiangsu gravity network was further analyzed. The results show that when using a single datum point for adjustment calculation, the datum point should be as close as possible to the geometric center of the network or multiple closed loop nodes. When the control points with uniform spatial distribution are adopted, there is no obvious difference in the point value accuracy between the measuring points around the control point and the measuring points in the middle network. Combined with the spatial resolution of Jiangsu regional gravity network and

收稿日期:2020-11-04

基金项目:江苏省地震局青年金项目(202003)

第一作者简介:代宪鹏,工程师,从事流动重力与跨断层水准外业测量与内业数据处理与分析工作。E-mail:706342589@qq.com。

通信作者:吴晓峰,高级工程师,从事流动重力与跨断层水准外业测量与内业数据处理与分析工作。E-mail:39519969@qq.com。

the adjustment accuracy of observation data, it is considered that Jiangsu gravity network has a good monitoring effect on $M \geq 5$ earthquakes. The results of this paper can provide a reference basis for reasonably using datum points for adjustment and improving the accuracy of gravity data processing.

Keywords: control points; regional network; mobile gravity; network accuracy; monitoring capability

0 引言

地震孕育的发生必然伴随地球内部物质的运移,从而引起重力场的变化。通过定期流动重力复测来监测这种重力场的非潮汐变化,可用于研究地震的孕育、发生和调整过程^[1-3]。近年来,我国地震监测预报人员利用流动重力观测资料,对我国多次 6 级以上地震进行了较为准确的预测,尤其是在强震发生地点的判定方面成效尤为显著^[4-7],因此流动重力观测已成为地震监测预报的重要技术方法之一。

重力观测资料的质量对于地震监测预报十分关键,而重力观测资料的精度既依赖于监测成果质量,也依赖于资料处理方法^[8-9]。在实际的平差过程中控制点的选择和使用是首先需要考虑的问题,它直

接决定了数据所使用的平差方法并影响重力观测资料的精度。本文以江苏区域流动重力网 2020 年第一期观测数据为例,通过采用不同控制点下的数据平差处理,分析不同控制点选取的平差点值精度水平与分布特征,为江苏地区重力观测资料的数据处理分析与应用提供参考依据。

1 流动重力测量与平差模型

1.1 江苏流动重力测网概况

我国流动重力测量起步于邢台地震后的 20 世纪 60 年代,在 80、90 年代得到长足的发展^[10]。至 2015 年,江苏区域重力网全网约 135 个测点,形成 14 个完整闭环,平均测点间距约 30 km,能够覆盖江苏省 80% 以上的地区^[11][图 1(a)]。

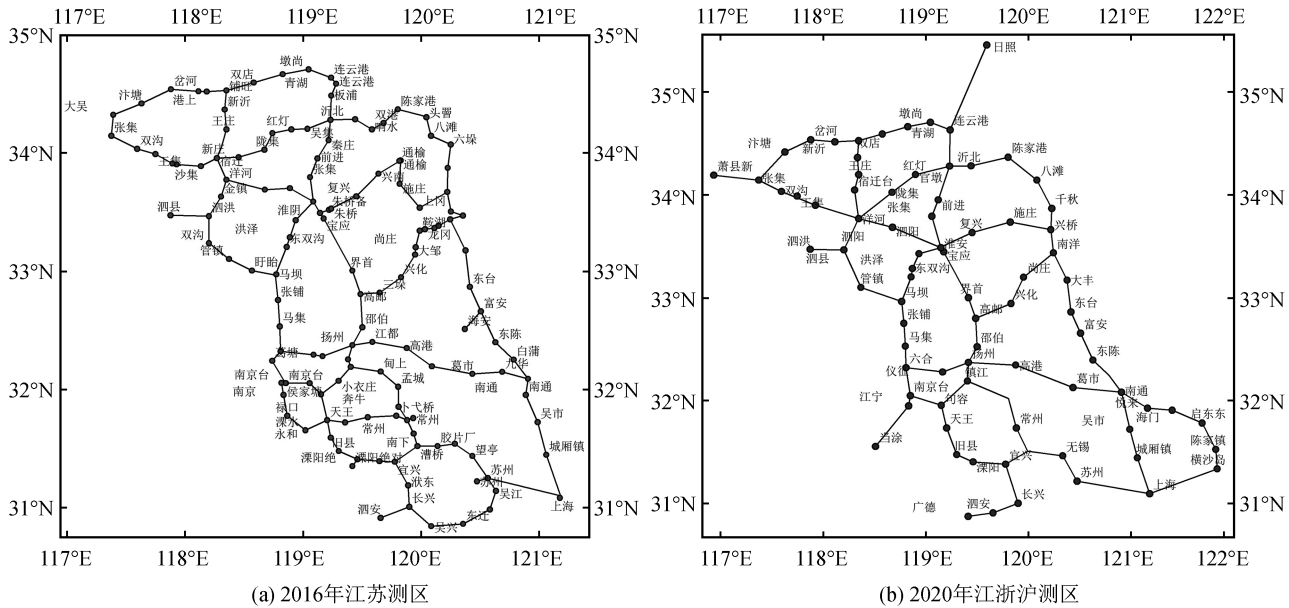


图 1 江浙沪地区流动重力测网
Fig.1 Mobile gravity network in Jiangsu—Zhejiang—Shanghai area

2016 年之后,为让现有的监测网在地震预报中发挥更大作用,中国地震局在现有测网基础上对各重力区域网进行了适当调整、优化和改造^[12-14]。经过一系列的优化调整措施,至 2020 年重力网测点减至 85 个、形成闭合环 12 个,平均测点间距 45 km,可以覆盖江苏百分之 90% 以上的地区,增加与山东

测区公共测点 2 个(日照、黄口),增加与安徽测区公共测点 1 个(当涂),复测周期为 6 个月,周边地区有溧阳、日照 2 个可用重力控制点,优化后的测网如图 1(b)所示。

1.2 流动重力外业测量方法

狭义上的流动重力测量是指相对重力测量,是

一种利用相对重力仪按照一定的复测周期测量固定测点间的重力值之差的测量方法^[15]。江苏地区2016年开始使用CG-5型相对重力仪代替之前的LCR-G型重力仪,所有测段均采用两台仪器同时观测并保证测线当日往返,当单台仪器自差超过25 μGal或者两台仪器互差超过30 μGal时及时进行重测,最终形成完整的闭合环(图2)。

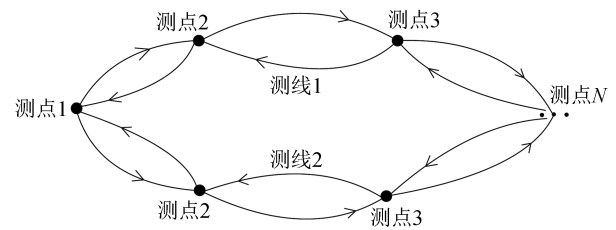


图2 流动重力测量联测示意图

Fig.2 Joint measurement of mobile gravity

1.3 平差模型

相对重力观测误差方程为：
$$v_{ij} = (\bar{g}_j - \bar{g}_i) - (g_j - g_i) - D(t_j - t_i) = (\bar{g}_j - \bar{g}_i) - D \cdot \Delta t_{ij} - l_{ij} \tag{1}$$

式中： g_i 、 g_j 为任意*i*、*j*两点读数的预处理重力值； t_i 、 t_j 为*i*、*j*两点的观测时间； Δt_{ij} 为两点的观测时间差； D 为相对重力仪零漂率； $\bar{g}_i$ 、 $\bar{g}_j$ 为*i*、*j*点待求重力值。

当测网与绝对重力点联测时将测网内的绝对重力点值作为起算基准进行平差,此时的误差方程为：

$$v_h = \tilde{G}_h - G_h = \tilde{G}_h - l_h \tag{2}$$

式中： $\tilde{G}_h$ 为重力点*h*平差后重力值,在此作为未知数求解； G_h 为已知重力值； v_h 为平差后改正数。

当测网位未与绝对重力点联测,此时测网中无起算基准,需增加如下伪观测方程：

$$v_h = \tilde{G}_{h1} + \tilde{G}_{h2} + \cdots + \tilde{G}_{hn} - l \tag{3}$$

不采用控制点平差时,上式中 $\tilde{G}_{hn}$ 表示为全部测点的重力值未知数,采用任一点为起算基准平差时上式中 $\tilde{G}_{hn}$ 表示为选取点的重力值未知数。

2 数据处理与分析

2020年江苏地区重力网有效测点85个,有效测段93段,可使用的重力控制点2个,分别是溧阳、日照。为削弱CG-5型石英弹簧重力仪的一次项系数变化对精度的影响^[16],每期正式测量之前均利用绝对点进行实测标定。为控制其他因素对数据精度的影响,仪器线性漂移等其他相关参数设置均保持一致,仅改变参与平差的控制点数量和空间位置。

2.1 采用单个基准点平差

在实际的野外重力测量中由于受到客观因素的制约,经常会出现未能与绝对重力点联测或者仅与1个绝对重力点相联测的情况,此时采用的平差方法需要根据联测情况做出相应的改变。溧阳绝对点是江苏测区内业平差时常用的起算基准。以该点为起算基准平差后的点值精度均值为 $20.1 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,最大为 $25.5 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,最小为 $5.0 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。从空间分布上看[图3(a)],在基准点附近的一些测点

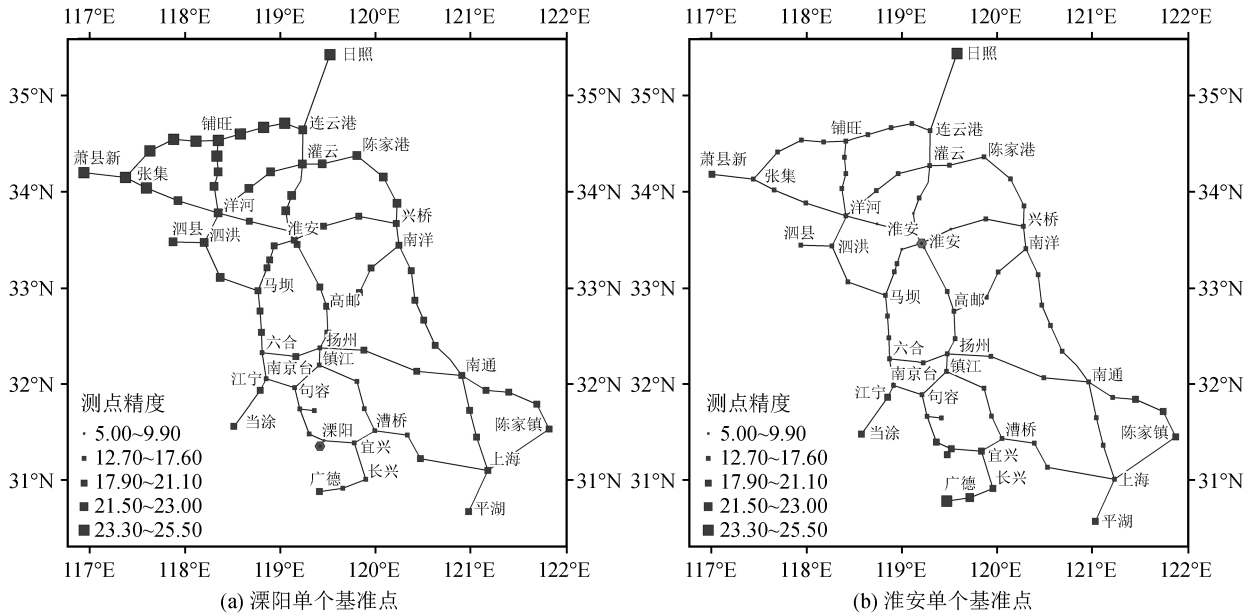


图3 单个基准点时江苏测网平差精度分布

Fig.3 The adjustment accuracy distribution of Jiangsu survey network with one control point

的点值精度较高,但随着与基准点距离的增加,测点
点值精度逐步降低。江苏东南部地区的测点精度普
遍在 $20\times10^{-8}\text{ms}^{-2}$ 左右,江苏北部的测点距离控制
点最远,测点精度也下降到 $25\times10^{-8}\text{ms}^{-2}$ 左右。这
表明,在单独采用溧阳基准点进行平差计算的情况
下,测点重力值精度在空间分布上呈现明显的非均
匀性,在远离基准点的地区测点重力值的精度较低。

为进一步分析单个基准点情况下重力网的平差
精度,本文另选取靠近测网中部、且是 5 个闭合环线
的公共测点的淮安测点作为基准点进行了测试。结
果表明,以淮安点为基准点进行平差后的点值精度
均值为 $14.9\times10^{-8}\text{ms}^{-2}$,相比采用溧阳基准点的计
算结果,其精度明显提高。在测点精度的空间分布
上,除测网边缘地区若干支线测点外,基本呈均匀分
布态势[图 3(b)]。这表明,在采用单个基准点进行
平差计算时,基准点位于测网中心、且位于闭合观测
环线时,有利于提高测网数据的平差处理精度。而
溧阳绝对点由于位于测网边缘,且与最近的闭环线
通过支线的方式联测,因此仅采用该测点作为基准
点进行平差计算,会导致计算结果的精度存在不足,
尤其是距离控制点较远的测点以及支线末端测点的
精度通常较低。

2.2 两个基准点平差

多个控制点参与平差的方法是日常内业处理中
采用较多的平差方式,此时测网在空间中稳定,空间
自由度低。这种平差处理方式能够将相对重力观测
资料与控制点联测构成高精度的控制网,形成具有绝
对重力基准的区域动态监测网,可以有效的保持区域
测网起算基准的统一,可靠地解算出测区的重力变
化^[14]。当周边其他测区共用这些控制点时,则测区
之间具有了相同的起算基准,很容易将这些测区进行拼
接形成大范围的具有统一起算基础的重力场监测网。

江苏重力测网网内溧阳和日照两个绝对点分别
位于测网的南北两端,这种空间分布方式有助于控
制点的控制范围最大化。采用溧阳和日照两个绝对
点作为基准的平差计算结果表明,测网平均精度为
 $14.8\times10^{-8}\text{ms}^{-2}$,最大为 $19.1\times10^{-8}\text{ms}^{-2}$,明显优
于采用溧阳单个基准点时的计算精度。在空间分布
上,整个测网在两个基准点的控制作用下精度较为
均匀,仅有测网边缘或者支线测点的点值精度稍微
偏大(图 4)。从局部上看,测点精度与控制点的距
离关系并不敏感,控制点周边测点与测网中部测点
的点值精度并没有明显的差别。

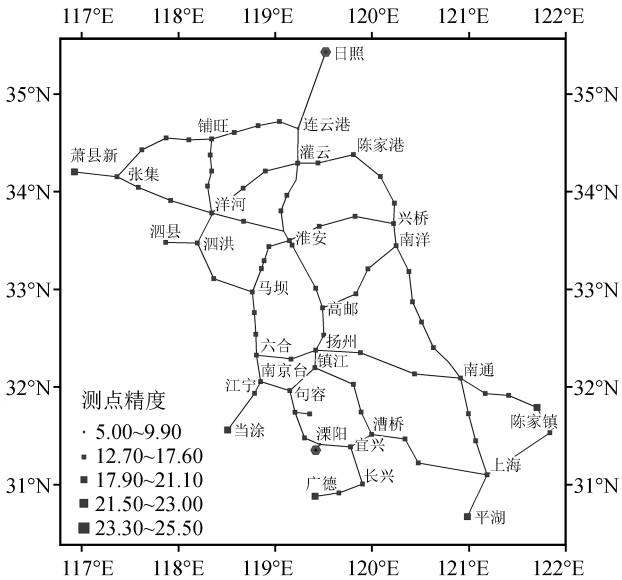


图 4 溧阳、日照 2 个控制点测网平差精度分布
Fig.4 The adjustment accuracy distribution of Jiangsu
survey network with two control points of
Liyang and Rizhao

表 1 采用不同控制点平差精度状况对比
Table 1 Comparison between adjustment accuracy with
different control points

序号	控制 点数	控制点名	测点值精度/ μgal		测网平均 精度/ μgal
			最小值	最大值	
1	1	溧阳	5.0	25.5	20.3
2	1	淮安	5.0	23.6	14.9
3	2	溧阳、日照	4.9	19.1	14.8

2.3 江苏重力网监测能力分析

获取地震孕育过程中引起的重力异常信息是地
震重力监测的重要目标。一些学者已通过大量震例
研究总结了可用于地震分析预报的重力变化异常的
空间范围和变化量级指标^[17]。从空间分辨率来看,
江苏重力测网的平均点距约为 45 km,介于 $M_s4.0$
~5.0 地震诱发的重力场变化区域的半径范围
内^[17-18],能够满足 5 级以上地震的监测需求。从重
力变化量级看,4 级地震引起的重力异常变化量级
约为 $30\mu\text{gal}$,5 级地震则约为 $50\mu\text{gal}$ ^[18]。本文采
用溧阳和日照两个绝对点作为基准计算的测网平均
精度为 $14.8\times10^{-8}\text{ms}^{-2}$,最大为 $19.1\times10^{-8}\text{ms}^{-2}$ 。
以 2 倍中误差计(95%置信度),重力网可以检测到
 $30\sim40\mu\text{gal}$ 上的重力变化,满足 5 级以上地震的监
测需求,对于 4~5 级地震也应具有一定的监测能
力。从实际震例来看,2016 年 10 月 20 日江苏射阳
4.4 级地震前重力场变化结果中表现出较为明显的
重力“异常”特征,具体表现为“震前 1 年尺度”图像

中,震中以西出现量级约 $30 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 的正重力场变化,正重力变化中心与震中距离约 40 km,地震发生在重力场变化的“零值线”附近^[19]。因此,从空间分辨率以及现有观测精度两个方面来看,江苏重力测网对 5 级以上地震具有较好的监测效果,同时对 4~5 级地震也具有一定的监测能力。

3 结论

本文通过对江苏测网重力数据处理分析,研究了基准点设置对数据平差处理精度的影响,同时对江苏测网的监测能力进行了探讨,结果显示:

(1) 当使用溧阳单个绝对点作为基准进行平差计算时,由于该点位于测网边缘,会导致计算的测点重力值精度在空间分布上呈现明显的非均匀性,在远离基准点的苏北和测网东南地区精度较低。这也表明,采用单个基准点进行平差计算,基准点应当选择尽量靠近测网几何中心、多个闭合环节点的位置。

(2) 采用溧阳和日照两个绝对点作为基准进行平差计算,测网平均精度约为 $15 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,在空间分布上也较为均匀,控制点周边测点与测网中部测点的点值精度并没有明显的差别。

(3) 结合江苏重力测网的空间分辨率和观测数据平差处理精度以及实际震例,认为江苏重力测网对 5 级以上地震具有较好的监测效果,同时对 4~5 级地震也具有一定的监测能力。

(4) 本文结果可为重力数据处理中合理的采用基准点进行平差、提升资料处理精度提供参考依据。

参考文献(References)

- [1] 王青华,郝洪涛,汪健,等.云南地震流动重力监测网建设与映震能力分析[J].大地测量与地球动力学,2019,39(3):317-324. WANG Qinghua,HAO Hongtao,WANG Jian,et al.Construction and analysis of seismic response capability of gravimetric network in Yunnan[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2019,39(3):317-324.
- [2] 隗寿春,祝意青,梁伟峰,等.网形结构对重力数据分析结果的影响[J].大地测量与地球动力学,2018,38(10):77-81. WEI Shouchun,ZHU Yiqing,LIANG Weifeng,et al.Impact on gravity data analysis of network structure[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2018,38(10):77-81.
- [3] 王青华,冯建林,檀玉娟,等.2018 年兴文 5.7 级地震和 2019 年珙县 5.3 级地震前重力场变化[J].地震研究,2019(3):393-397. WANG Qinghua,FENG Jianlin,TAN Yujuan,et al.Change of gravity field before Sichuan Xingwen $M_s 5.7$ and Gongxian $M_s 5.3$ earthquakes in 2018[J].Journal of Seismological Research,2019(3):393-397.

- [4] 胡敏章,郝洪涛,李辉,等.地震分析预报的重力变化异常指标分析[J].中国地震,2019,35(3):417-430. HU Minzhang,HAO Hongtao,LI Hui,et al.Quantitative analysis of gravity changes for earthquake prediction[J].Earthquake Research in China,2019,35(3):417-430.
- [5] 祝意青,闻学泽,孙和平,等.2013 年四川芦山 $M_s 7.0$ 地震前的重力变化[J].地球物理学报,2013,56(6):1887-1894. ZHU Yiqing,WEN Xueze,SUN Heping,et al.Gravity changes before the Lushan,Sichuan, $M_s 7.0$ earthquake of 2013[J].Chinese J Geophys,2013,56(6):1887-1894.
- [6] 申重阳,李辉,孙少安,等.重力场动态变化与汶川 $M_s 8.0$ 地震孕育过程[J].地球物理学报,2009,52(10):2547-2557. SHEN Chongyang,LI Hui,SUN Shaoan,et al.Dynamic variations of gravity and the preparation process of the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake[J].Chinese Journal of Geophysics,2009,52(10):2547-2557.
- [7] 祝意青,赵云峰,李铁明,等.2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级地震前后重力场动态变化[J].地震地质,2014,36(3):667-676. ZHU Yiqing,ZHAO Yunfeng,LI Tieming,et al.Dynamic variations of gravity field before and after the Minxian—Zhangxian $M_s 6.6$ earthquake on July 22,2013,Gansu,China[J].Seismology and Geology,2014,36(3):667-676.
- [8] 祝意青,申重阳,张国庆,等.我国流动重力监测预报发展之再思考[J].大地测量与地球动力学,2018,38(5):441-446. ZHU Yiqing,SHEN Chongyang,ZHANG Guoqing,et al.Re-thinking of the development of mobile gravity monitoring and prediction in China[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2018,38,(5):441-446.
- [9] 祝意青,付广裕,梁伟峰.鲁甸 $M_s 6.5$,芦山 $M_s 7.0$,汶川 $M_s 8.0$ 地震前区域重力场时变[J].地震地质,2015,37(1):319-330. ZHU Yiqing,FU Guangyu,LIANG Weifeng,et al.Earthquake predictions:spatial-temporal gravity changes before the Ludian $M_s 6.5$,Lushan $M_s 7.0$ and Wenchuan $M_s 8.0$ earthquakes[J]. Seismology and Geology,2015,37(1):319-330.
- [10] 祝意青,王庆良,徐云马.我国流动重力监测预报发展的思考[J].国际地震动态,2008(9):125-125. ZHU Yiqing,WANG Qingliang,XU Yunma.Thoughts on the development of earthquake monitoring and prediction in mobile gravity[J].Recent Developments in World Seismology,2008(9):125-125.
- [11] 吴晓峰,宋浩,代宪鹏,等.2016 年射阳 $M_s 4.4$ 地震前后重力场变化[J].地震地磁观测与研究,2019,40(1):101-106. WU Xiaofeng,SONG Hao,DAI Xianpeng,et al.Variations of gravity field before and after the Sheyang $M_s 4.4$ earthquake [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2019,40(1):101-106.
- [12] 李辉,徐如刚,申重阳,等.大华北地震动态重力监测网分形特征研究[J].大地测量与地球动力学,2010,30(5):15-18. LI Hui,XU Rugang,SHEN Chongyang,et al.Fractal characteristics of seismological dynamic gravity network in northern China[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2010,30(5):15-18.

地震研究,2008,31(4):406-412.

MAO Xianjin, QIAN Jiadong, YANG Lingying. Progress of multi-separation array observation and research for earth resistivity[J].Journal of Seismological Research,2008,31(4):406-412.

[4] 石富强,邵志刚,占伟,等.青藏高原东北缘活动断裂剪切模量及应力状态数值模拟[J].地球物理学报,2018,61(9):3651-3663.

SHI Fuqiang, SHAO Zhigang, ZHAN Wei, et al. Numerical modeling of the shear modulus and stress state of active faults in the northeastern margin of the Tibetan Plateau[J].Chinese Journal of Geophysics,2018,61(9):3651-3663.

[5] 佟鑫,郭建芳,周剑青,等.昌黎地电台多极距观测系统的设计[J].华北地震科学,2016,34(1):65-69.

TONG Xin, GUO Jianfang, ZHOU Jianqing, et al. The design of multi-separation array observation system of Changli geoelectricity station[J].North China Earthquake Sciences,2016,34(1):65-69.

[6] 徐世浙.视电阻率年变的定量计算[J].地震学报,1985,7(4):422-427.

XU Shizhe. Quantitative calculation of annual variation of apparent resistivity[J].Acta Seismologica Sinica,1985,7(4):422-427.

[7] 解滔,卢军,闫伟.地电阻率日变化成因分析[J].地震地质,2019,41(6):1464-1480.

XIE Tao, LU Jun, YAN Wei. The mechanism of diurnal variation in consecutive apparent resistivity observation[J].Seismology and Geology,2019,41(6):1464-1480.

[8] 赵和云,张文孝,杨明芝.地电阻率观测中一类反常年变化的分析讨论[J].西北地震学报,1985,6(1):4-11.

ZHAO Heyun, ZHANG Wenxiao, YANG Mingzhi. Analysis and discussion of a class of anomalous annual variation in earth resistivity observation[J].Northwestern Seismological Journal,1985,6(1):4-11.

(上接第 630 页)

[13] 刘冬至,邢乐林,徐如刚,等.FG5/232 绝对重力仪的试验观测结果[J].大地测量与地球动力学,2007,27(2):114-118.

LIU Dongzhi, XING Lelin, XU Rugang, et al. Experimental observation results with FG5/232 absolute gravimeter[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2007,27(2):114-118.

[14] 项爱民,孙少安,李辉.流动重力运行状态及质量评价[J].大地测量与地球动力学,2007,27(6):109-114.

XIANG Aiming, SUN Shaoan, LI Hui. Running state and quality evaluation of repeated gravimetry[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2007,27(6):109-114.

[15] 国家地震局制定.地震重力测量规范[M].北京:地震出版社,1983.

State Seismological Bureau. Seismological gravimetric standard [M]. Beijing: Seismological Press, 1983.

[16] 梁伟峰,刘芳,祝意青,等.重力仪一次项系数对重力场动态变化的影响研究[J].大地测量与地球动力学,2015,35(5):882-886.

LIANG Weifeng, LIU Fang, ZHU Yiqing, et al. Research on the effect of one degree term of chromatic polynomial of gravimeter on gravity dynamic change[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2015,35(5):882-886.

[17] 贾民育,詹洁晖.中国地震重力监测体系的结构与能力[J].地震学报,2000,22(4):360-367.

JIA Minyu, ZHAN Jiehui. The structure and ability of the China seismological gravity monitoring system[J].Acta Seismologica Sinica,2000,22(4):360-367.

[18] 祝意青,申重阳,刘芳,等.重力观测地震预测应用研究[J].中国地震,2020,36(4):708-717.

ZHU Yiqing, SHEN Chongyang, LIU Fang, et al. Application of earthquake prediction based on gravity observation[J].Earthquake Research in China,2020,36(4):708-717.

[19] 胡敏章,郝洪涛,宋浩,等.弱地震活动背景地区流动重力变化探析[J].大地测量与地球动力学,2019,39(4):339-343.

HU Minzhang, HAO Hongtao, SONG Hao, et al. Analysis of gravity changes in areas of weak seismic activity background [J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2019,39(4):339-343.