

汪健,韩宇飞,张新林,等,2020. 庐山重力基线场稳定性分析. 中国地震,36(4):899~911.

庐山重力基线场稳定性分析

汪健^{1,2)} 韩宇飞³⁾ 张新林¹⁾ 申重阳¹⁾ 胡敏章¹⁾ 梁伟锋⁴⁾
宋浩⁵⁾ 徐如刚⁶⁾ 刘少明¹⁾ 谈洪波¹⁾

1) 中国地震局地震研究所地震大地测量重点实验室,武汉 430071

2) 中国科学院大学,地球与行星科学学院,北京 100049

3) 中国地震台网中心,北京 100045

4) 中国地震局第二监测中心,西安 710054

5) 江苏省地震局,南京 210014

6) 安徽省地震局,合肥 230000

摘要 利用2018年庐山重力短基线场绝对重力和相对重力观测资料,基于绝对重力控制下的相对重力联测方式对庐山基线场的稳定性进行了分析。结果表明:庐山基线场2015~2018年测段重力变化为 $-11.6 \sim 13.4 \mu\text{Gal}$ 、均值 $-0.962 \mu\text{Gal}$,较小的重力变化表明庐山短基线重力场较稳定;2000~2018年测段重力变化为 $-39 \sim 33.5 \mu\text{Gal}$ 、均值 $-0.275 \mu\text{Gal}$,总体以G16测点为界呈分化特征,上山侧(G16~JZ04)重力变化较平缓(约 $-3 \mu\text{Gal}$),下山侧(G03~G16)因G04、G14测点重力值变化显著(分别为 -24.95 、 $-18.5 \mu\text{Gal}$),导致相邻测段重力变化剧烈;测段重力变化与段差比值(B)为 $1.19 \times 10^{-4} \sim 3.58 \times 10^{-3}$;庐山及其周边地区由地表垂直运动引起的重力变化速率为 $0.7543 \pm 0.16 \mu\text{Gal/a}$;近期研究区地震活动性呈震级小、沿断裂带集中分布特征;重力变化对相对重力仪一次项系数标定结果影响较大(正比于 B 值),对校正精度影响小,利用以往重力观测成果进行一次项系数标定时,绝对重力测段JZ02~JZ04误差影响小于最大重力段差测段,定期维护和复测是保障高精度重力短基线场的有效途径。

关键词: 庐山基线场 重力变化 格值标定 绝对重力观测 相对重力联测

[文章编号] 1001-4683(2020)04-0899-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

庐山重力基线场是国家级高精度重力仪格值标定场(短基线)之一,是中国大陆构造环境监测网络和2000国家重力基本网的重要基础设施,可为绝对重力仪的野外观测比对、相对重力仪格值系数标定和性能测试提供重力基准。随着精密重力测量技术在中国迅速发展

[收稿日期] 2020-06-05; [修定日期] 2020-08-17

[项目类别] 国家自然科学基金(41604014)、中国地震局地震研究所和应急管理部国家自然灾害防治研究院基本科研业务费专项资助项目(IS201926298)共同资助

[作者简介] 汪健,男,1986年生,博士研究生,助理研究员,主要从事重力场变化监测研究。

E-mail: wangjian196@mails.ucas.ac.cn

韩宇飞,通讯作者,男,1981年生,博士研究生,高级工程师,主要从事重力观测数据处理与应用研究。

E-mail: yfhan@seis.ac.cn

展,庐山重力基线场在测绘、资源勘探、地震预报、空间技术和国防建设等领域中发挥了重大效能。作为高精度重力仪格值标定、性能测试检校的基线场,其稳定性分析对重力观测成果具有重要意义。本文基于 2018 年新开展的庐山基线场重力观测资料,与往期重力观测成果进行了对比分析,讨论了庐山重力基线场的稳定性。

庐山重力基线场(短基线)位于江西省九江市庐山风景区北坡,由中国地震局地震研究所于 1985 年建立,基线场总测点数 26 个,包括基点 24 个、九江地震台基准点和引点(2000 网引点,点号 3054)各 1 个。其中,24 个基点沿北山公路布设(图 1),高程分布范围为 29~1079.8m,基点间距(约 1km)和相邻点间重力差(约 10mGal)大致均匀。1985~2000 年期间进行了 5 次大规模重力联测,刘冬至等(2000)对比分析了各期重力观测成果,发现庐山重力基线建场观测值可靠,地区地质构造比较稳定,1985 年建场的初值测定与次年中德合作观测结果几乎一致,23 个测段中最大差值仅为 $7\mu\text{Gal}$,各测段差值绝对值的平均值为 $2.3\mu\text{Gal}$,2000 年与 1985 年重力测段最大差值可达 $17\mu\text{Gal}$,各测段差值绝对值的平均值为 $8.0\mu\text{Gal}$ 。伴随着庐山北山公路的改造与建设,庐山重力短基线进行了多次维修和重新测定。2011 年 5~7 月,由中国地震局地震研究所联合陕西省地质矿产勘查开发局第二综合物探大队对部分已损毁的基点进行了重新勘选和建设。2011 年 9 月,中国地质大学(武汉)利用一套野外流动式 A10 绝对重力仪(#022)和一台 LCR-D 型相对重力仪(#159)联合对改造后的 8 个测点进行了绝对重力和梯度观测,结果显示绝对重力观测的标准差均小于 $4\mu\text{Gal}$,A10 绝对重力仪观测段差结果与 2000 年相对重力仪观测结果互差均在 $10\mu\text{Gal}$ 以内(王林松等,2012)。2015 年,中国地震局地震研究所首次使用 1 套 FG5 型绝对重力仪和 7 台 CG-5 型相对重力

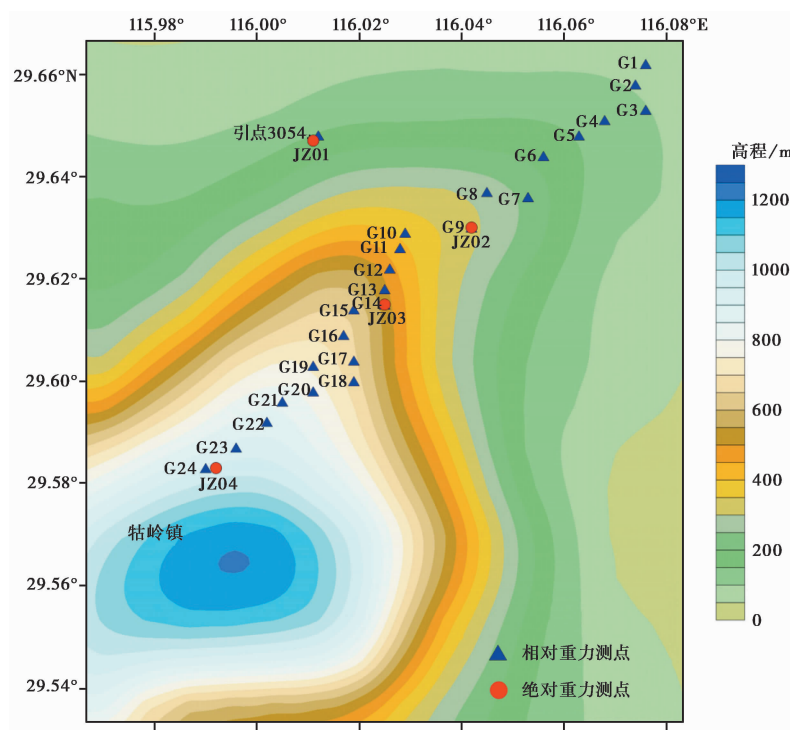


图 1 庐山重力基线场点位分布(高程据 ETOPO1 模型绘制)

仪对庐山重力基线场 24 个基点、1 个基准点测点进行野外测定,邢乐林等(2016)基于绝对重力控制解算的结果表明,基点点值精度均优于 $\pm 5\mu\text{Gal}$,相邻各段段差精度均优于 $\pm 3\mu\text{Gal}$,与 2000 年联测重合的 13 个测段中,绝对值变化均值为 $18.8\mu\text{Gal}$,最大变化为 $40\mu\text{Gal}$,最小为 $4\mu\text{Gal}$,其中 10 个测段的变化值在 $\pm 20\mu\text{Gal}$ 范围内。

2017 年,中国地震局地震研究所对庐山重力基线场进行了新一轮勘查和维护,发现受庐山道路维修影响,多达 12 个测点遭到损毁或填埋,且部分基点附近的局部环境变化较大,由此造成了基点近区的质量重新分布,对基点的重力值产生不可忽视的影响。因此,为保证庐山基线场重力观测成果的高精度,亟需对基线场进行重新测定。

1 观测与数据处理

2018 年 1 月 10~15 日,中国地震局地震研究所利用 1 台 FG5 型绝对重力仪(#232)和 7 台相对重力仪(2 台 LCR 型、5 台 CG-5 型)对庐山基线场 14 个测点进行了重力观测。其中,对 JZ01、JZ02 和 JZ04 测点进行了绝对重力观测和重力垂直梯度观测,对 13 个测段(JZ01~G01、G01~G02、G02~G03、G03~G04、G04~G05、G05~JZ02、JZ02~G14、G14~G16、G16~G17、G17~G19、G19~G20、G20~G21、G21~JZ04)进行了相对重力联测,并对观测数据进行了各项改正,获得了庐山重力短基线最新的重力观测成果。

1.1 绝对重力观测

绝对重力观测的意义有两方面:提供已知段差,为相对重力仪格值系数标定提供参考;提供绝对重力基准,为相对重力联测提供重力控制基准。绝对重力按照《地壳运动监测技术规程》(地壳运动监测工程研究中心,2014)的相关测量技术规程,采用 FG-5 型绝对重力仪进行观测,该仪器标称精度优于 $5\mu\text{Gal}$,同类型不同仪器之间的差异值为 $1\sim 2\mu\text{Gal}$,无明显系统偏差(Xing et al,2009)。绝对重力测定按每 1h 观测 1 组、每组下落 100 次,计算每次下落有效高度处的重力观测值,并进行固体潮、气压、光速有限和极移等的改正。每点标准差不大于 $\pm 5.0\mu\text{Gal}$ 的有效组数不少于 25 组,因此绝对重力仪在每测点的有效观测落体数均不少于 2500 次。

1.2 垂直梯度观测

重力垂直梯度观测的目的是将绝对重力仪落体仓高度处的绝对重力观测值改正到观测墩面上,以实现与相对重力联测参考平面的统一。垂直梯度观测利用 2 台 CG-5 型相对重力仪按低—高一低或高一低—高进行往返观测,每次往返测量经潮汐和零漂改正,计算 1 个重力差成果,各成果间独立。高、低点仪器高度差一般设置为 130cm,与 FG5 型绝对重力仪落体仓的参考高度一致。垂直梯度独立观测成果的限差为 $4.0\mu\text{Gal}$,每个测点的独立成果数不少于 5 个。

1.3 相对重力联测

相对重力联测的意义在于测定两点之间的重力差,将绝对重力观测获得的重力基准逐点推求各点的重力值。相对重力联测采用不同测点 A—B—C—D、D—C—B—A 的往返对称观测方法,每次观测读取 3 个合格读数,每一测段的闭合时间均在 1 天以内。联测资料的野外记录和计算采用陆态网络相对重力联测专用记簿程序完成。一条测线联测结束之后,进行该测线的野外计算,获得该记录工程的段差及联测中误差。为检校参与相对重力联测的 7

台相对重力仪的漂移线性情况,本次相对重力联测与动态精度测试一同进行,根据《国家重力控制测量规范》(国家市场监督管理总局等,2019)要求,对所有测段进行了4个测回对称观测,每个工程闭合时间均大于8h。

1.4 重力数据处理

绝对重力数据的处理包括气压、极移、固体潮和光速有限等各项内部改正,观测数据经上述各项改正后才能获得自由落体有效高度处的绝对重力值。利用 FG-5 绝对重力仪的专用数据处理软件 G9,通过输入测点经纬度、高程、观测时间(GMT 时)、极移参数^①、气压值等观测参数,对绝对重力观测数据进行标准化处理。

垂直梯度数据处理包括固体潮改正和漂移改正。其中,固体潮改正公式为

$$\delta_t = \delta_{th} \times G(t) - \delta_{tc} \quad (1)$$

式中, δ_t 为固体潮改正值; $G(t)$ 为固体潮理论值; δ_{th} 为重力潮汐因子,取为 1.16; δ_{tc} 表示永久性潮汐对重力的直接影响。漂移改正采用线性零漂方式,漂移改正值与漂移率和测段观测时长成正比,漂移率可由漂移量与测段时长相除而得,而漂移量为测点经固体潮改正后往返测重力值的差值。

相对重力联测数据处理包括一次项因子标定、基于绝对重力基准的平差计算和动态精度分析三部分。在相对重力仪一次项因子标定中,将已知绝对点观测成果以 $5\mu\text{Gal}$ 精度定权重,相对重力联测资料的权重依各台相对重力仪观测精度而定,观测精度的单位权设定为 $15\mu\text{Gal}$ 。重力平差时需对观测数据进行固体潮、漂移、大气压力和仪器高改正。其中,大气压力改正公式为

$$\begin{aligned} \delta_g &= 0.3(P - P_0) \\ P_0 &= 1.01325 \times 10^5 (1 - 0.0065H/288.15)^{5.2559} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, P_0 为相对于测站高程 H 的标准大气压, P 为实测气压值。

仪器高改正公式为(韩宇飞等,2017)

$$\delta_h = \delta_v \times H_e \quad (3)$$

式中, δ_v 为垂直梯度值, H_e 为相对重力仪的仪器高,一般取仪器表面至地面的距离。绝对重力观测归算至地面重力值时取相应仪器高处的重力垂直梯度实测值(FG5 型仪器高设置为 1.3m,A10 型一般设置为 0.7m),相对重力观测归算至地面一般取 $-3.086\mu\text{Gal}/\text{cm}$ 。

动态精度是相对重力仪仪器性能的重要指标之一,表征着相对重力仪漂移的线性特征。动态精度计算过程需对相对重力观测数据做固体潮和漂移改正,计算各台仪器的段差观测值,各台仪器动态观测精度计算公式为

$$m_d = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{l-n}} \quad (4)$$

式中, m_d 为仪器的动态精度, v 为重力仪测段各个段差观测值与平均值之差, l 为段差观测值个数, n 为测段的个数。

2 观测结果

2018 年绝对重力观测和垂直梯度观测结果如表 1 所示。

^① <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>



表 1 绝对重力和垂直梯度观测结果

点号	东经 /(°)	北纬 /(°)	高程 /m	观测日期 (年-月-日)	观测 组数	使用 组数	垂直梯度 /($\mu\text{Gal}\cdot\text{cm}^{-1}$)	垂直梯度 段差精度 / μGal	地面重力值 / μGal	标准差 / μGal
JZ01	116.01	29.64	96	2018-01-11	30	30	-2.5967	3.2216	97 ***** 96.45	± 0.88
JZ03	116.04	29.63	390	2018-01-14	25	25	-3.2839	2.5133	97 ***** 56.38	± 2.20
JZ04	115.99	29.58	1091	2018-01-12	25	25	-3.0577	1.4217	97 ***** 23.75	± 1.99

注：因“地面重力值”属保密数据，采用“*”省略中间几位数字。

以绝对重力观测值为已知值，对参与相对重力联测的 7 台仪器进行一次项因子标定，结果如表 2 所示。

表 2 相对重力仪一次项因子标定结果

仪器类型	仪器号	一次项因子	标定精度	标定时间(年-月-日)
LCR-G	G829	1.000675	0.000098	2018-01-10
	G1003	1.000332	0.000096	2018-01-10
CG-5	C1056	0.999806	0.000085	2018-01-11
	C216	1.000679	0.000066	2018-01-11
	C509	0.998899	0.000082	2018-01-11
	C1333	1.000377	0.000063	2018-01-11
	C1121	0.999835	0.000077	2018-01-11

基于绝对重力观测结果作为重力基准，对相对重力联测数据进行平差后的各测点重力值、相邻点间段差及其精度如表 3 所示。

表 3 庐山基线场各测点重力值及相邻点重力段差结果

点号	重力值/($10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	点值精度/ μGal	测段	重力段差/($10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	段差精度/ μGal
JZ01	253.1988	4.5			
G01	266.2856	5.0	JZ01-G01	13.0868	2.0
G02	259.4250	5.0	G01-G02	-6.8606	3.5
G03	249.6308	5.0	G02-G03	-9.7942	3.1
G04	241.4565	4.8	G03-G04	-8.1743	5.2
G05	232.0649	4.6	G04-G05	-9.3916	2.2
JZ02	189.2530	3.7	G05-JZ02	-42.8119	3.1
G14	141.1700	4.0	JZ02-G14	-48.0830	6.0
G16	119.4785	4.3	G14-G16	-21.6915	6.1
G17	108.6419	4.4	G16-G17	-10.8366	4.6
G19	85.9842	4.7	G17-G19	-22.6577	3.6
G20	73.7446	4.8	G19-G20	-12.2396	1.0
G21	63.4839	4.7	G20-G21	-10.2607	2.4
JZ04	38.6249	5.0	G21-JZ04	-24.8590	5.7

各台仪器动态精度和漂移率计算结果如表4所示。

表 4 联测相对重力仪动态精度与漂移率

仪器类型	仪器号	动态精度/ μGal	漂移率/ $(\mu\text{Gal} \cdot \text{h}^{-1})$
LCR-G	G829	14.12	4.056 ± 5.751
	G1003	10.67	0.385 ± 5.106
CG-5	C1056	13.00	17.455 ± 4.223
	C216	7.86	7.600 ± 2.990
	C509	15.35	24.443 ± 4.112
	C1121	9.39	37.193 ± 3.789
	C1333	6.93	41.250 ± 2.778

相对重力仪的仪器性能是获得高精度重力观测资料的关键,动态精度是表征相对重力仪漂移线性特征的重要指标。相对重力仪零点漂移的线性成分可通过一定的数学模型进行改正,非线性漂移成分严重影响仪器观测精度和稳定性,因此动态精度成为考核重力仪性能特征的重要参数。由表4可知,7台相对重力仪的动态精度均小于 $16\mu\text{Gal}$,符合《国家重力控制测量规范》中小于相对重力仪标称精度2倍的限差要求。目前应用广泛的重力仪类型中,绝对重力仪因采用动力法测量方式,系统结构更为精细、采样数更为密集,其精度明显高于相对重力仪,其中FG-5绝对重力仪标称精度优于 $5\mu\text{Gal}$,A10绝对重力仪标称精度为 $10\mu\text{Gal}$;相对重力仪多采用静力法观测平衡状态,LCR型、CG-5型和CG-6型相对重力仪未给出明确的标称精度,但精度均应 $>10\mu\text{Gal}$,故本次联测所使用的相对重力仪动态精度满足规范要求,观测资料可靠性高。联测所用的7台相对重力仪中,LCR-G型重力仪的漂移率(均值 $2.22\mu\text{Gal/h}$)明显小于CG-5型(均值 $25.58\mu\text{Gal/h}$),这与仪器所采用的弹簧类型相关。LCR-G型是较早期的相对重力仪,采用金属弹簧设计,漂移率较低,而CG-5型重力仪采用石英弹簧,漂移率相对较高(汪健等,2016)。各台仪器的动态精度与漂移率的不确定度对比关系如图2所示,两者间呈正相关关系。不确定度较大的重力仪,其漂移率变化幅值大、漂移非线性成分高,其动态精度值也相应增加,重力仪精度降低。

3 分析与讨论

3.1 重力变化

2018年庐山重力基线场重力观测数据平均点值精度为 $4.6\mu\text{Gal}$,优于设计精度 $5.0\mu\text{Gal}$ 。相比2000、2015年,2018年重力观测结果如图3所示(因2000年观测结果未给出各段的段差精度,故以其段差精度最大值 $4.2\mu\text{Gal}$ 设定为各段精度)。

由图3可知,2015~2018年庐山基线场复测的13个测段重力变化范围为 $-11.6\sim 13.4\mu\text{Gal}$,均值为 $-0.962\mu\text{Gal}$ 。庐山基线场各测段重力变化不均,重力正、负变化最大测段分别为G16~G17、G01~G02测段,大部分测段(10个测段)重力变化幅值在 $-10\sim 10\mu\text{Gal}$ 区间,整体呈正负相间的重力低值变化特征,较小的重力变化值也表明庐山短基线重力场较为稳定。不确定度也是评价重力变化结果的重要参数,2015~2018年段差重力变化结果的不确定度分布区间为 $\pm 2.236\sim \pm 6.083\mu\text{Gal}$,平均值为 $\pm 4.489\mu\text{Gal}$,不确定度分布区间约为重力段差变

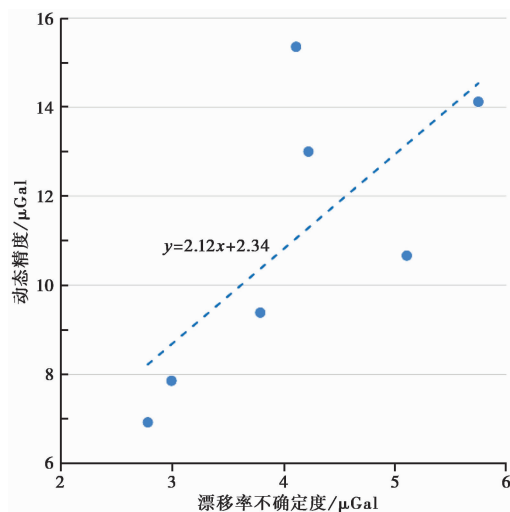


图 2 动态精度与漂移率不确定度对比关系

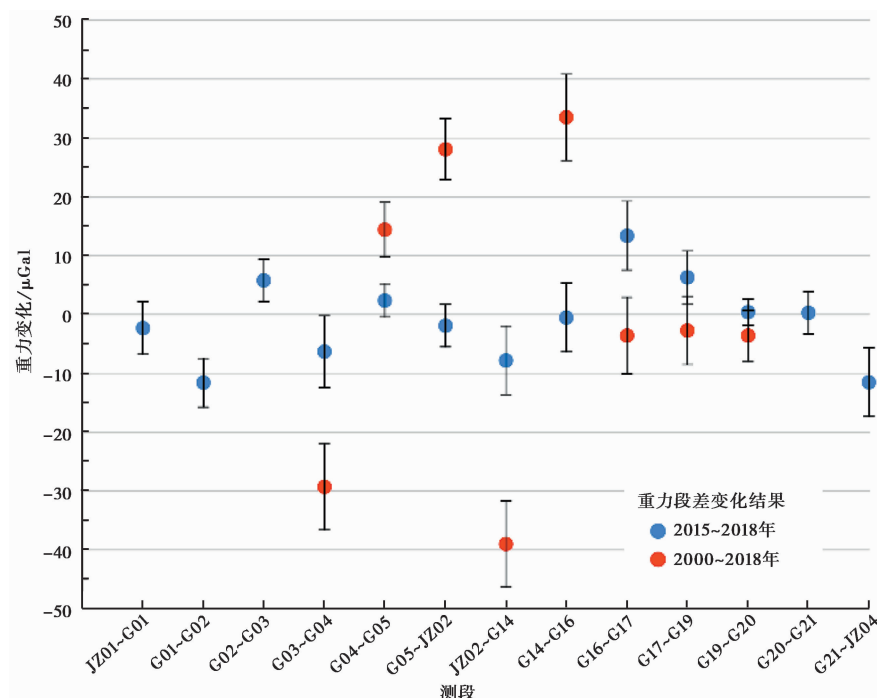


图 3 庐山基线场重力段差变化结果

化分布区间的 $1/2$ 。

2000~2018 年庐山基线场复测的 8 个测段重力变化范围为 $-39 \sim 33.5 \mu\text{Gal}$, 均值为 $-0.275 \mu\text{Gal}$, 重力正、负变化最大测段分别为 G14~G16 和 JZ02~G14 测段。设测段重力变化与相应测段段差的比值为 B , 则 2000~2018 年度 B 值分布范围为 $1.19 \times 10^{-4} \sim 3.58 \times 10^{-3}$, 若应用以往观测结果进行相对重力仪性能测试和格值标定, 必将对观测结果产生较大影响,

减小此类系统误差的途径为重力基线场的定期维护和复测。与 2015~2018 年测段重力变化结果相比,2000~2018 年的整体累积重力变化结果更为剧烈。以 G16 测点为界呈分化特征,下山侧(G03~G04、G04~G05、G05~GZ02、JZ02~G14、G14~G16)重力变化较剧烈、质量分布变化较明显;而上山侧(G16~G17、G17~G19、G19~G20)测段重力变化值相比其他测段变化平缓(均约为 $-3\mu\text{Gal}$),表明该区间质量迁移小,地质构造环境稳定。值得注意的是,上山侧 G04 和 G14 测点两端测段均存在重力变化正、负相间且幅值近似相等的特征,表明可能因 G04 和 G14 测点重力值变化显著导致两端测段重力变化相反,为此分别对 G04 和 G14 测点 1985~2018 年的重力值进行了对比分析。由测点的重力值时序图(图 4)可知,G04 和 G14 测点前 4 期重力值平稳,自 2000 年始重力值均呈持续负变化趋势,其中 2000~2018 年 G04、G14 测点重力变化分别为 $-24.95\mu\text{Gal}$ 、 $-18.5\mu\text{Gal}$,因 G04 和 G14 测点重力值变化对 G03~G04、G04~G05、JZ02~G14、G14~G16 测段重力段差变化的贡献量分别为 85.15%、70.28%、47.43%和 55.22%,因此 G04 和 G14 测点 2010~2018 年重力值变化是导致上山侧(G03~G16)重力变化剧烈的主要原因。G04 和 G14 测点位于庐山北坡公路侧边、距离北坡公路较近,随着庐山景区逐渐改造(尤其 2011 年庐山北门自北坡山顶移至庐山山脚),北坡公路不断建设、地基抬高,G04 和 G14 测点周边地形、地物改变较大,导致了重力值变化剧烈,该区域段差重力变化特征也反映了各测站地形、地物的变化信息。

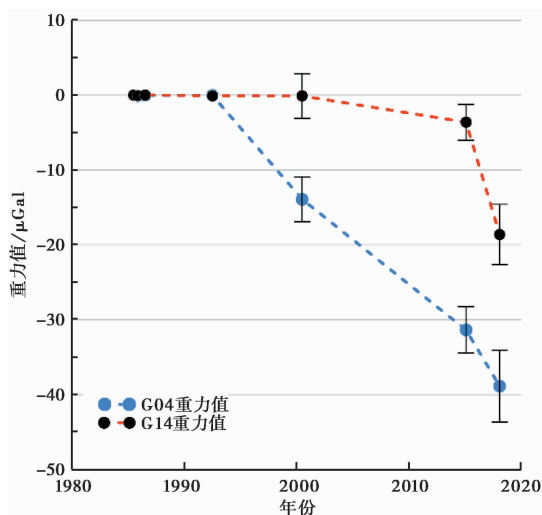


图 4 G04 和 G14 测点的重力值时序图(以 1985 年建场值为基准)

2011~2018 年庐山重力基线场复测测段仅有 G03~G17,该测段重力观测结果如表 5 所示,G03~G17 测段的重力变化为 $-14\pm 6.24\mu\text{Gal}$,相比其他期观测结果,2011 年的重力结果偏高。与其他期观测系统不同,2011 年观测结果基于 A10 便携式绝对重力仪进行观测,而其他 3 期为基于 FG5 绝对重力基准控制下的相对重力联测,观测系统及数据处理方法的不同导致了重力段差结果的差异,且 2011 年观测数据中 G17 测点的组间标准差($3.58\mu\text{Gal}$)最大,较大的标准差也影响了重力段差结果。

重力是引力和离心力的合力,地球表面重力场具有随时间和空间不断变化的特征。重力场变化的核心是物质质量分布的改变,重力场变化反映了地球不同圈层及圈层内部质量

表 5 G03~G17 测段历年重力观测结果

观测年份	段差值/mGal	精度/ μ Gal	观测时段(年)	重力变化/ μ Gal	精度/ μ Gal
2000	-140.9930	5.94	2011~2018	-14.0	6.24
2011	-140.9749	3.99	2015~2018	-1.1	6.41
2015	-140.9900	4.25	2000~2018	4.1	7.63
2018	-140.9889	4.80			

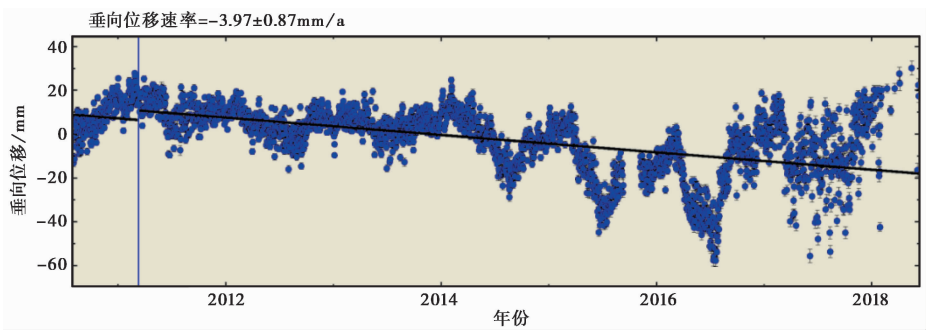


图 5 湖口 GNSS 站垂向运动速率结果^②

迁移的动态过程。重力场具有多源性,引起地表重力变化的因素主要包括地表垂直形变、陆地水循环和深部构造运动。图 5 为距离庐山基线场最近的连续 GNSS 站(湖口基准站)的 GPS 垂向运动时序图,去除粗差和地震干扰后的垂向长期运动速率为 $-3.97 \pm 0.87\text{mm/a}$ 。因庐山基线场与湖口 GNSS 站距离较近(直线距离约 30km),可近似看作同一地块,在不考虑垂向变形引起地表密度变化的情况下,地表垂向运动引起的重力效应为 $0.7543 \pm 0.16\mu\text{Gal/a}$ 。陆地水储量变化是引起地表重力非潮汐变化的重要因素,重力的季节性变化与全球水循环有着直接的联系。邢乐林等(2016)综合利用 GLDAS 提供的 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 格网点处的积雪数据以及 1~4 层的土壤水分数据,得到了庐山基线场的总水储量及其变化值,其研究表明陆地水储量引起的重力变化振幅为 $-5 \sim 5\mu\text{Gal}$,年变率为 $-0.5\mu\text{Gal/a}$ 。深部构造运动(例如地震和火山)可引起重力场显著变化,庐山南麓发育一套变细碧-石英角斑岩系火山岩,属晋宁期火山喷发产物(黄传冠等,2000),第四纪以来无火山活动迹象。2009 年以来庐山基线场及其周边 150km 范围内的地震活动分布情况如图 6 所示,庐山基线场及其周边共发生地震 488 次,地震活动性呈现震级丛集的特征。其中, $M_s \geq 3.0$ 地震 5 次, $M_s \geq 4.0$ 地震 2 次,期间最大地震为 2011 年 9 月 10 日瑞昌 $M_s 4.5$ 地震,2005 年 11 月 26 日该区域曾发生 $M_s 5.7$ 强震及 $M_s 4.8$ 余震,前人对瑞昌地震的震源机制进行研究,发现发震构造可能为隐伏在瑞昌盆地内的洋鸡山-武山-通江岭 NW 向断裂(吕坚等,2008)。庐山周边地震主要沿 6 组断裂构造分布,分别为庐江-广济断裂带、襄樊-广济断裂带、武宁-瑞昌断裂带、NE 向的九江-靖安断裂带、铜陵-九江断裂带以及东至断裂带(田素素,2019)。2015~2018 年期间,庐山及其周边地区未发生 $M_s \geq 4.0$ 地震,小震引起同震重力变化量小,且震中

^② <http://www.neiscn.org>

远离庐山,同震重力变化随震中距迅速减小(Sun et al,1998),因此,2015~2018 年庐山基线场重力变化受地震影响较小。

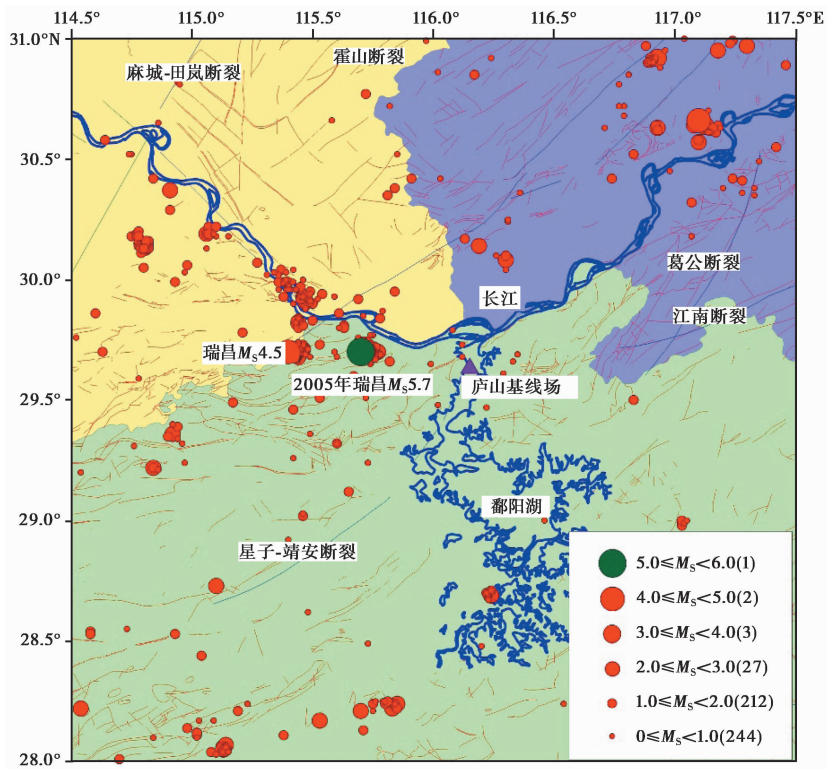


图 6 2009 年以来庐山及其周边地区地震活动分布

3.2 一次项系数标定精度分析

应用广泛的相对重力仪类型包括:LCR、Burris、CG-5 和 CG-6,其中 LCR 型及 Burris 型金属弹簧重力仪的一次项较稳定,基本不变,而 CG-5 型石英弹簧重力仪的一次项逐年减小,应每年利用绝对基准进行实测标定(梁伟锋等,2015)。重力基线场是进行一次项系数标定主要基础设施,若基线场缺少实时观测成果,常利用往期段差进行一次项因子标定。设往期段差值为 C 、测量段差值为 A 、测段重力变化与相应测段段差比值为 B 、观测中误差为 M ,则实际段差变化为 $B \times C$,利用往期资料进行一次项系数标定与实际一次项系数的差异 ΔK 及其校正精度差异 ΔP 可表示为

$$\begin{cases} \Delta K = \frac{A}{C} - \frac{A}{(1+B)C} = \frac{A}{C} \times \frac{B}{1+B} \\ \Delta P = \left| \frac{M}{C} - \frac{M}{(1+B)C} \right| = \left| \frac{M}{C} \times \frac{B}{1+B} \right| \end{cases} \tag{5}$$

庐山重力基线场最大重力差绝对值为 227.6607mGal (G01~JZ04,2018 年观测结果),G01~JZ04 测段 2015~2018 年重力变化为 $-10.2\mu\text{Gal}$,因此 $B = -4.48 \times 10^{-5}$,依照《国家重力控制测量规范》(GB/T-20256-2019)、《地壳运动监测技术规程》和《地震观测进网技术要求-

重力仪》(中国地震局,2007)要求,重力短基线格值标定校正精度应优于 5.0×10^{-5} ,因此式(5)变为

$$\begin{cases} \Delta K = \frac{A}{C} \times (-4.4798 \times 10^{-5}) \approx -4.4798 \times 10^{-5} \\ \Delta P = \frac{M}{C} \times 4.4798 \times 10^{-5} \leq 2.24 \times 10^{-9} \end{cases} \quad (6)$$

利用 2015 年庐山重力基线场 G01~JZ04 测段的重力观测结果对 2018 年基线场的相对重力仪进行一次项系数标定,引起一次项系数的误差约为 -4.4798×10^{-5} ,引起校正精度的误差小于 -2.24×10^{-9} 。由此可见,重力场动态变化对一次项系数的影响较大,与格值标定精度的限差 (5×10^{-5}) 相仿,而对校正精度的影响几乎忽略不计。

因 JZ02 和 JZ04 测点均为绝对重力测站,观测墩埋深大,受周边噪声、震动影响小,重力观测单位也常利用 JZ02~JZ04 测段(2018 年段差结果为 -150.628 mGal)进行一次项因子标定。利用 2015 年观测结果对 2018 年相对重力仪进行标定,JZ02~JZ04 测段 2015~2018 年的重力变化为 $1.4 \mu\text{Gal}$,此时 $B = 9.29 \times 10^{-6}$,一次项因子和校正精度误差分别为: $\Delta K \approx 9.2899 \times 10^{-6}$ 、 $\Delta P \leq 4.64 \times 10^{-10}$ 。与利用最大重力差 G01~JZ02 测段进行标定相比,JZ02~JZ04 测段一次项系数误差较小。若缺乏最新观测成果,建议利用 JZ02~JZ04 测段进行格值标定,此时因重力场时变引起的一次项系数标定误差较小。

3.3 庐山重力基线场效能评估

庐山重力短基线场已进行了多期重力观测,高精度的重力短基线场主要服务于相对重力仪的性能测试,包括 LCR、CG-5、CG-6、ZSM-6 和 Burris 等类型相对重力仪一次项系数、动态精度、动态零漂率、重复性和一致性等技术指标的检验。进行一次项系数标定时,若测区量程可被庐山重力短基线场最大重力段差覆盖,则可满足技术指标要求,否则还应进行重力长基线标定,短基线场标定结果可作为长基线标定的初始参考模型,通过不断迭代计算,获得最终格值因子。

在现有重力仪性能测试和新购重力仪验收测试方面,庐山重力基线场均提供了稳定的试验场地和高精度的重力基准。然而,随着庐山风景区道路维修、建设开发,庐山重力基线场同时也面临由局部环境质量重新分布引起的重力变化,从而对观测结果产生不可忽略的影响,定期维护和复测是保障庐山基线场高精度重力基准的有效途径。

4 结论

(1) 2018 年重力观测平均点值精度为 $4.6 \mu\text{Gal}$,优于设计精度 $5.0 \mu\text{Gal}$,相对重力仪动态精度与漂移不确定度呈正比关系。2015~2018 年庐山基线场测段重力变化为 $-11.6 \sim 13.4 \mu\text{Gal}$,均值 $-0.962 \mu\text{Gal}$,大部分测段的重力变化为 $-10 \sim 10 \mu\text{Gal}$,较小的重力变化值表明庐山短基线重力场较稳定。

(2) 2000~2018 年庐山重力基线场测段重力变化为 $-39 \sim 33.5 \mu\text{Gal}$,均值 $-0.275 \mu\text{Gal}$ 。其总体以 G16 测点为界呈分化特征,上山侧(G16~JZ04)重力变化较平缓(约 $-3 \mu\text{Gal}$);下山侧(G03~G16)因 G04、G14 测点重力值变化显著(分别为 $-24.95 \mu\text{Gal}$ 和 $-18.5 \mu\text{Gal}$),导致相邻测段重力变化剧烈,段差重力变化特征也反映了各测站地形、地物的变化信息;测段重力

变化与段差比值(B)分布为 $1.19 \times 10^{-4} \sim 3.58 \times 10^{-3}$, 重力场动态变化对相对重力仪性能测试影响较大。

(3) 庐山重力基线场及其周边地区由地表垂直运动引起的重力变化速率为 $0.7543 \pm 0.16 \mu\text{Gal/a}$, 近期研究区地震活动性呈震级小、沿断裂带集中分布特征。

(4) 重力段差的动态变化对相对重力仪一次项系数标定结果影响较大, 对校正精度影响小。时变重力场引起格值标定的误差正比于重力变化与段差之比。利用 2015 年观测结果对 2018 年相对重力仪一次项系数进行标定, 绝对重力测段 JZ02~JZ04 优于最大重力差测段 G01~JZ04, 一次项因子误差约为 9.2899×10^{-6} 。定期维护和复测是保障庐山高精度重力短基线场持续发挥良好效能的关键。

致谢: 中国地震台网中心提供了庐山基线场 2015 年观测结果, 中国地震局第二监测中心、安徽省地震局、云南省地震局、陕西省地震局协助实施了 2018 年庐山基线场重力观测, 在此一并表示感谢。

参考文献

- 地壳运动监测工程研究中心, 2014. 地壳运动监测技术规程. 北京: 中国环境出版社.
- 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会, 2019. GB/T 20256-2019 国家重力控制测量规范. 北京: 中国标准出版社.
- 韩宇飞, 何志堂, 刘阳, 等, 2017. 灵山重力标定基线场的升级改造与复测. 测绘地理信息, **42**(4): 69~72.
- 黄传冠, 钟春根, 2000. 庐山地区新元古代海相火山活动及岩石特征. 江西地质, **14**(2): 100~105.
- 梁伟锋, 刘芳, 祝意青, 等, 2015. 重力仪一次项系数对重力场动态变化的影响研究. 大地测量与地球动力学, **35**(5): 882~886.
- 刘冬至, 王晓权, 邢灿飞, 等, 2002. 《2000 国家重力基本网》短基线的检定与分析. 大地测量与地球动力学, **22**(4): 61~65.
- 吕坚, 郑勇, 倪四道, 等, 2008. 2005 年 11 月 26 日九江-瑞昌 $M_s 5.7$ 、 $M_s 4.8$ 地震的震源机制解与发震构造研究. 地球物理学报, **51**(1): 158~164.
- 田素素, 2019. 江西九江地区断裂活动性研究. 硕士学位论文. 南昌: 东华理工大学.
- 汪健, 孙少安, 邢乐林, 等, 2016. CG-5 重力仪的漂移特征. 大地测量与地球动力学, **36**(6): 556~560.
- 王林松, 陈超, 杜劲松, 等, 2012. A10-022 绝对重力仪在庐山短基线的测量试验与分析. 测绘学报, **41**(3): 347~352, 365.
- 邢乐林, 王林海, 孙少安, 等, 2016. 庐山重力短基线场初值测定. 大地测量与地球动力学, **36**(9): 753~756.
- 中国地震局, 2007. DB/7 23-2007 地震观测进网技术要求-重力仪. 北京: 地震出版社.
- Sun W K, Okubo S, 1998. Surface potential and gravity changes due to internal dislocations in a spherical earth- II . Application to a finite fault. Geophys J Int, **132**(1): 79~88.
- Xing L L, Li H, Li J C, et al, 2009. Comparison of absolute gravity measurements obtained with FG5/232 and FG5/214 instruments. Geo-spatial Inf Sci, **12**(4): 307~310.

Stability Analysis of the Lushan Gravity Baseline

Wang Jian^{1,2)} *Han Yufei*³⁾ *Zhang Xinlin*¹⁾ *Shen Chongyang*¹⁾ *Hu Minzhang*¹⁾
*Liang Weifeng*⁴⁾ *Song Hao*⁵⁾ *Xu Rugang*⁶⁾ *Liu Shaoming*¹⁾ *Tan Hongbo*¹⁾

1) Key Library of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, China

2) College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

4) The Second Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, China

5) Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China

6) Anhui Earthquake Agency, Hefei 230000, China

Abstract In this article we use the absolute and relative gravity observation data in 2018 to analyze the stability of the Lushan gravity baseline, in which the relative gravity measurement is under control of the absolute gravity observation. The results show that the Lushan baseline gravity variation during 2015 ~ 2018 is $-11.6 \sim 13.4 \mu\text{Gal}$ and the average value is $-0.962 \mu\text{Gal}$. The small gravity variation indicates that the Lushan short gravity baseline is relatively stable. The gravity variation during 2000 ~ 2018 is $-39 \sim 33.5 \mu\text{Gal}$ with average value of $-0.275 \mu\text{Gal}$. G16 is as a turning point, where gravity changes on the uphill side (G16 ~ JZ04) are relatively gentle (about $-3 \mu\text{Gal}$), and the downhill side (G03 ~ G16) changes significantly due to the gravity change at the G04 and G14 station (respectively $-24.95, -18.5 \mu\text{Gal}$). The ratio of gravity change to section gravity difference (B) is $1.19 \times 10^{-4} \sim 3.58 \times 10^{-3}$. Rate of gravity change caused by vertical movement in Lushan area is $0.7543 \pm 0.16 \mu\text{Gal/a}$. The recent seismic activity is characterized by small magnitudes and concentrated distribution along the fault zone, and gravity changes have a greater impact on the calibration results of the relative gravimeter (proportional to the value of B), while little influence on correction accuracy. When using the previous gravity observation results to calculate calibration, the error influence of the absolute gravity measurement section JZ02 ~ JZ04 is less than the maximum gravity difference section. Regular maintenance and re-measurement are effective way to maintain high-precision gravity baseline.

Keywords: Lushan Gravity baseline; Gravity change; Scale calibration; Absolute gravity observation; Relative gravity measurement