



武汉九峰地震台重力变化与地壳垂直形变分析

王嘉沛^{1,2,3,4} 张新林^{1,2} 张毅^{1,2} 李忠亚^{1,2,3,4}
胡敏章^{1,2} 申重阳^{1,2}

1 中国地震局地震研究所,湖北 武汉,430071

2 武汉引力与固体潮国家野外科学观测研究站,湖北 武汉,430071

3 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院,湖北 武汉,430077

4 中国科学院大学,北京,100049

摘要:长期的重力变化和地壳形变观测是研究地下物质运动的重要手段。基于武汉九峰地震台2013—2020年的绝对重力和全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)观测数据,计算了长期的重力与地壳垂直形变的变化趋势,并以1年、2年和3年的时间间隔分段,进行线性趋势拟合,分别获得不同时间段的绝对重力年变化率、地壳垂直形变速率以及对应的比值。研究表明,武汉九峰地震台长期的重力年变化率为 $0.4799 \mu\text{Gal/a}$,地壳垂直形变速率为 -1.2 mm/a ,两者的比值为 $-0.3999 \mu\text{Gal/mm}$,与理论值存在一定的偏差,可能与该区域的地下水活动有关。将不同时间段的重力变化与地壳垂直形变的数据展布在一张图中,发现数据点离散分布在不同区域,由此可初步判断地下物质运动过程,为区域动力学机制解释提供参考。

关键词:绝对重力变化;地壳垂直形变;比值;物质运动;武汉九峰地震台

中图分类号:P223

文献标志码:A

重力变化是地球内部的物质密度变化或者物质运动等物理信息的综合反映,能深入到地壳内部挖掘物质运动过程,为人们揭示地球内部动力学过程提供了最直接的观测信息。大地测量观测的地表几何形变信息是地壳整体运动信息的综合反映,能表现出地壳运动的基本形态与特征,为研究地壳内部的物质运动提供重要的边界条件。两种手段联合起来研究,可直观地反映地球内部各种运动的动力学过程,对于地球动力学的基础研究具有重要的理论和实际意义^[1]。

在早期相对重力与水准局部同址观测中,少量数据研究表明,地表重力变化与局部垂直形变呈负线性相关^[2-3],比值在 $-0.15 \sim -0.35 \mu\text{Gal/mm}$ 之间^[4]。但同时发现,根据重复大地测量资料估计的高程变化所能引起的重力场变化远比所观测到的实际重力变化小,如海城地震和唐山地震,地表垂直形变难以解释地震前后重力变化的量级和形态^[5],说明地震的孕育和发生应该还伴随着地下物质运动。由于早期的观测条件和观

测精度的限制,以及地表重力和形变同址观测资料的缺乏,使得两者往往是分离式研究,难以捕捉到真正的地壳内部运动信息^[6]。随着现代精密大地测量技术的高速发展,以及重力和形变同址观测的大规模开展,现有的丰富数据和资料足以为大尺度精确地分析和研究重力与形变之间的关系提供了可能。近年来,利用重力与形变数据开展了山体隆升机制^[7-8]、地下水位变化^[9-10]、城市地表沉降^[11]、大地水准面^[12]、火山活动^[13]等方面的研究,取得了丰富的成果。在研究过程中发现,地壳抬升(沉降)与重力变化减小(增大)的规律基本一致^[14],但是比值系数与理论值存在较大差异^[15-16]。这种差异可能是由于地表沉降或抬升过程中地壳内物质密度或体积发生变化造成的^[17]。但由于缺乏长期高精度的数据支持,以至于可能无法准确掌握和总结物质运动过程的规律。

本文以武汉九峰地震台为例,利用多年来积累的绝对重力和全球卫星导航系统(global navi-

收稿日期:2022-05-16

项目资助:国家重点研发项目(2018YFE0206100, 2017YFC1500204);武汉引力与固体潮国家野外科学观测研究站开放研究基金(WHYWZ202108)。

第一作者:王嘉沛,博士生,助理研究员,主要从事地壳形变与重力变化的分析研究。wang_jia_pei@163.com

通讯作者:张新林,博士生,助理研究员。xinlinzhang2012@163.com

gation satellite system, GNSS) 观测资料, 对该测点的重力变化与地壳形变的关系进行了分析研究, 深入探讨了重力变化、重力变化与地壳形变的比值和地下物质运动三者之间的关系, 为区域动力学机制解释提供重要参考。

1 研究区域和数据

1.1 武汉九峰地震台环境

武汉九峰地震台位于湖北省武汉市, 属于武汉引力与固体潮国家野外科学观测研究站(简称武汉站)的一部分。武汉站由中国地震局武汉基准地震台和华中科技大学引力实验中心两部分组成。在 2000 年 12 月被科技部批准为第三批国家重点野外观测试验站(试点站), 在 2007 年被科技部正式批准为国家野外科学观测研究站。从地理位置上看, 武汉站位于中国中部, 地处长江

的中游, 地貌上属鄂东南丘陵区与平原东缘的过渡地带, 中间低平, 北南部分别为低山丘陵区。从大地构造上看, 该站位于江汉断拗与鄂东南褶断带的交接地带, 断裂褶皱发育。在新构造时期以来, 该区域构造运动强度不大, 属相对稳定的构造区块, 地震活动频度相对较低, 强度也相对较小。

武汉站主要开展以重力固体潮为主的综合地球物理观测, 由重力固体潮观测台、GNSS 连续站、九峰地震台、地磁台、流动卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)观测站和比长基线场逐步建设发展而成, 如图 1 所示。武汉九峰地震台始建于 1968 年, 是中国重力固体潮观测的标准台, 也是国际固体潮中心确认的重力固体潮基准站之一, 拥有国际一流的重力观测设施, 为多种重力观测技术的配套使用、重力场基准的确立和重力场随时间变化观测提供了必要条件。

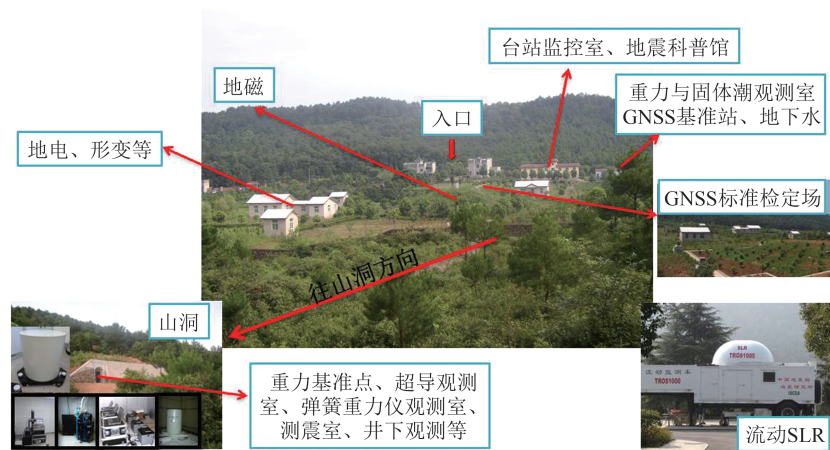


图 1 武汉九峰地震台概况

Fig.1 Overview of Wuhan Jiufeng Seismic Station

1.2 绝对重力长期变化

武汉九峰地震台作为国家级重力基准站, 每年至少要进行一次绝对重力测量来维持其绝对重力基准的长期稳定性和有效性。本文收集到的武汉九峰地震台 2013—2020 年的绝对重力数据, 数据来自国家重力台网中心。该数据全部是由 FG5 型绝对重力仪进行观测, 并多次参加国内外比对, 各仪器之间不存在明显的系统偏差, 可满足相关地震监测和科学研究需求^[18]。所选用的数据中, 对每组有效下落观测值计算组均值及其组内标准差, 当按 3 倍标准偏差迭代剔除的下落次数不大于 25% 时, 该组数据有效。当有效观测组数在 25 组及以上, 测量精度均优于 5 μGal 时, 该成果可采纳使用。绝对重力仪原始测量值是在指定测量位置的平均自由落体加速度, 需要

进行多项改正, 包括地球固体潮和海潮改正、大气压改正 ($-0.3 \mu\text{Gal}/\text{hPa}$)、极移改正、仪器高改正等, 极移改正根据天体历表极点相对于国际地球自转服务(international earth rotation service, IERS)参考极点的坐标进行估算。本次绝对重力数据处理采用仪器自带的软件中的 ET-GTAB 潮汐模型对固体潮、海潮进行改正, 并利用 Micro-g 公司提供的绝对重力数据处理软件 g9 进行处理。本文重力单位统一为 μGal , $1 \mu\text{Gal} = 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

经过数据处理后, 可获得绝对重力测点的绝对重力值和不确定度, 通过最小二乘进行线性拟合, 并求取 95% 的置信区间, 结果如图 2 所示, 其中红色直线表示线性拟合直线, 黄色曲线表示 95% 置信区间的上限和下限。结果显示, 2013—

2020年武汉九峰地震台绝对重力年变化率为 $0.4799\ \mu\text{Gal}/\text{a}$,绝对重力基准长期以来比较稳定,呈缓慢增长趋势,均处于95%的置信区间范围,拟合结果相对可靠。所收集并处理的绝对重力数据中,不同时间的绝对重力值相差在 $15\ \mu\text{Gal}$ 以内。

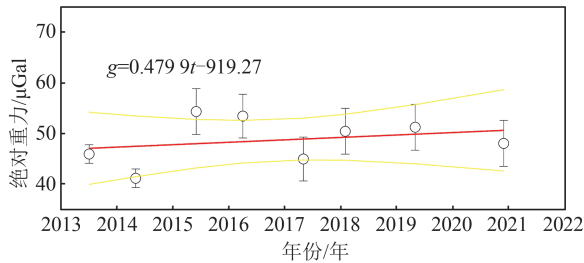


图2 绝对重力观测结果及其拟合

Fig.2 Results of Absolute Gravity Observation and Its Fitting Results

1.3 重力垂直梯度长期变化

本文武汉九峰地震台重力垂直梯度数据来自两台相对重力仪进行1 m高度的来回测量,所使用仪器为CG-5或CG-6。在每年年初进行观测之前均进行了有效的格值标定,满足相关规程要求^[19]。在重力垂直梯度成果中,每次往返测量经潮汐和零漂改正计算1个重力差成果,各成果间相互独立;对所有独立观测结果计算重力差平均值及中误差。中误差均优于 $4\ \mu\text{Gal}$ 的结果记为一个有效成果,每台仪器达到精度要求的有效独立成果数不得少于5个。通过最小二乘对重力垂直梯度观测结果的长期变化趋势进行线性拟合,结果如图3所示,其中红色直线表示线性拟合直线。结果显示,武汉九峰地震台重力垂直梯度年变化率是 $0.0007\ \mu\text{Gal}/(\text{cm}\cdot\text{a})$,表明武汉站的重力垂直梯度变化比较平缓,基本保持不变。

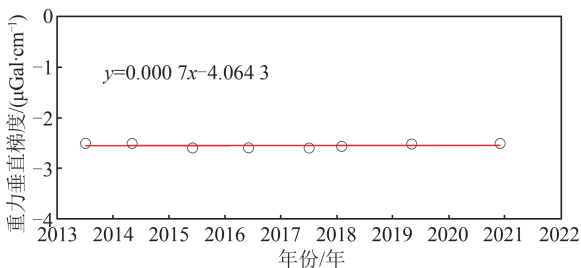


图3 重力垂直梯度长期变化趋势

Fig.3 Long-term Variation Trend of Gravity Vertical Gradient

1.4 地壳垂直形变

武汉九峰地震台作为综合地球物理观测台

站,同时也拥有GNSS连续观测站进行地壳形变的长时间连续观测。本文收集到武汉九峰地震台2011—2021年的GNSS垂向变形数据,来源于中国地震局GNSS数据产品服务平台^[20],该数据是由Bernese软件解算获得的ITRF2014参考框架下的单日解。同时,由于垂直形变速率较小,小幅阶跃或波动都会对结果造成一定影响,所以对于本次时间序列进行筛选,剔除不稳定和观测质量差的数据,最终武汉九峰地震台地壳垂直形变时间序列如图4所示,其中黑色直线表示线性拟合直线。

由图4可以看出,武汉站在本时间段内整体处于沉降状态,在小时间段范围内存在正常的向上波动。线性拟合结果显示,该站点整体平均沉降速率是 $1.2\ \text{mm}/\text{a}$,与绝对重力长期变化呈明显的负相关,与理论规律保持一致,即当地壳下沉时,重力值增加;地壳抬升时,重力值减小。

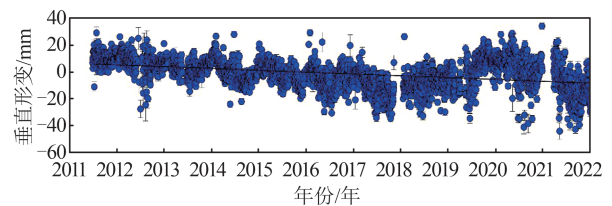


图4 地壳垂直形变时间序列

Fig.4 Time Series of Vertical Crustal Deformation

2 重力变化与地壳垂直运动的关系

地表观测的重力长期变化综合反映了局部地壳运动和地壳内部物质密度变化的过程。绝对重力可作为一种快速、经济的监测地壳垂直运动手段,目前地表高精度的重力连续或重复观测可以识别几个毫米的地壳垂直位移^[21]。在理论上,重力变化与垂直形变存在近似的比例关系,不同的比值系数包含的物理含义不同,一般认为 $-0.1967\ \mu\text{Gal}/\text{mm}$ 为同时考虑高程和密度变化, $0.1119\ \mu\text{Gal}/\text{mm}$ 为仅考虑密度变化, $-0.3086\ \mu\text{Gal}/\text{mm}$ 为仅考虑高程变化^[22]。本文利用武汉九峰地震台绝对重力长期变化数据与地壳垂直形变数据相比,其比值为 $-0.3999\ \mu\text{Gal}/\text{mm}$,与理论值存在一定差异,这可能是由于武汉九峰地震台及周边地区在地表垂直沉降的过程中,局部地壳内部发生了较大的物质密度变化,可能存在地下水、周边环境变化等因素影响。

绝对重力的长期趋势变化反映的是整体效

应,为了进一步分析武汉九峰地震台重力变化与地壳垂直形变的关系,以及可能存在的地下物质运动过程,本文将 2013—2020 年以来的绝对重力变化和地壳垂直形变数据,按照 1 年、2 年和 3 年的间隔进行分段,并进行线性趋势拟合,分别获得绝对重力变化年变化率、地壳垂直形变以及对应的比值,见表 1。

在 1 年期的结果中,最大的绝对重力年变化率为 2014—2015 年的 $12.1 \mu\text{Gal}/\text{a}$,最大的垂直形变速率为 2014—2015 年的 $7.3 \text{ mm}/\text{a}$,整体比值在 $-1.00 \sim 3.54 \mu\text{Gal}/\text{mm}$ 之间,地壳垂直形变与重力变化的对应关系不明显,与理论比值差异很大。

在 2 年期的结果中,最大的绝对重力年变化率为 2014—2016 年的 $6.7 \mu\text{Gal}/\text{a}$,最大的垂直形变速率为 2016—2018 年的 $-6.9 \text{ mm}/\text{a}$,整体比值在 $-2.93 \sim 2.38 \mu\text{Gal}/\text{mm}$ 之间,基本呈现出地壳沉降(抬升)、重力增加(减少)的规律,但在有些时间段内呈现出相反的规律。

在 3 年期的结果中,最大的绝对重力年变化率为 2013—2016 年的 $4.0 \mu\text{Gal}/\text{a}$,最大的垂直形变速率为 2017—2020 年的 $6.4 \text{ mm}/\text{a}$,整体比值在 $-1.25 \sim -0.55 \mu\text{Gal}/\text{mm}$ 之间,大部分呈现出地壳沉降(抬升)、重力增加(减少)的规律,与理论规律基本保持一致。

表 1 重力与形变的计算结果

Tab.1 Calculation Results of Gravity and Deformation

时间间隔	观测时间	绝对重力年变化率/ $(\mu\text{Gal}\cdot\text{a}^{-1})$	地壳垂直形变速率/ $(\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$	比值/ $(\mu\text{Gal}\cdot\text{mm}^{-1})$
1 年	2013-06—2014-04	-5.7	5.7	-1.00
	2014-04—2015-05	12.1	7.3	1.65
	2015-05—2016-05	-1.0	-1.1	0.91
	2016-05—2017-06	-7.8	-2.2	3.54
	2017-06—2018-01	7.3	4.8	1.52
	2018-01—2019-04	0.6	4.3	0.14
	2019-04—2020-11	-2.0	-1.6	1.25
2 年	2013-06—2015-05	4.7	-1.6	-2.93
	2014-04—2016-05	6.7	-3.7	-1.81
	2015-05—2017-06	-5.0	-2.1	2.38
	2016-05—2018-01	-2.1	-6.9	0.30
	2017-06—2019-04	2.9	6.6	0.44
	2018-01—2020-11	-0.9	5.7	-0.16
3 年	2013-06—2016-05	4.0	-3.2	-1.25
	2014-04—2017-06	1.1	-4.3	-0.25
	2015-05—2018-01	-2.4	-4.3	0.55
	2016-05—2019-04	-0.2	1.9	-0.10
	2017-06—2020-11	0.6	6.4	0.10

通过统计所有比值,绘制重力变化与垂直形变的比值统计的直方图,如图 5 所示。由图 5 可以看出,比值集中在 $-3 \sim 4 \mu\text{Gal}/\text{mm}$ 之间,在理论值的两侧对称分布。

将上述数据绘制在垂直形变-重力变化的坐标系中,其点位分布图如图 6 所示,蓝色和棕色直线的斜率分别为 $-0.308 6$ (仅考虑高程变化的近似理论值)和 $-0.196 7$ (同时考虑高程和密度变化的近似理论值)。由图 6 可以看出,重力变化与地壳垂直形变的数据点分布比较分散,并不存在理论上预期的线性关系,并且不同时间间隔的比值关系各不相同,大多数集中在原点附近,并向原点中心靠拢。根据数据点的分布情况,将图 6

划分成 4 个象限,第一象限位于地表抬升和重力增加两个方向之间,表示地壳抬升过程中,重力随之增加;第二象限位于地表抬升和重力减少两个方向之间,表示地壳抬升过程中,重力随之减少;第三象限位于地表沉降和重力增加两个方向之间,表示地壳沉降过程中,重力随之增加;第四象限位于地表沉降和重力减少两个方向之间,表示地壳沉降过程中,重力随之减少。从整体分布来看,数据点分布在第一和第四象限,少量分布在第二和第三象限。

3 讨论

在理论上,地壳形变与重力变化是呈线性关

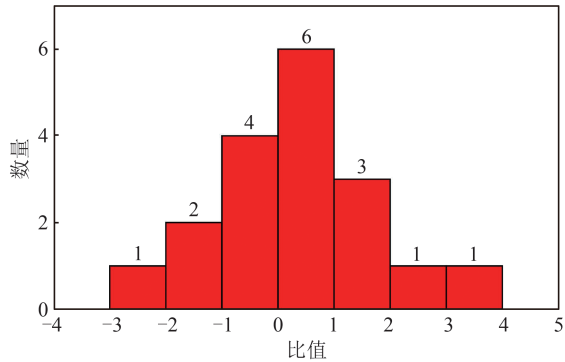


图5 重力变化与垂直形变的比值统计

Fig.5 Statistics of Ratio of Gravity Variation to Vertical Deformation

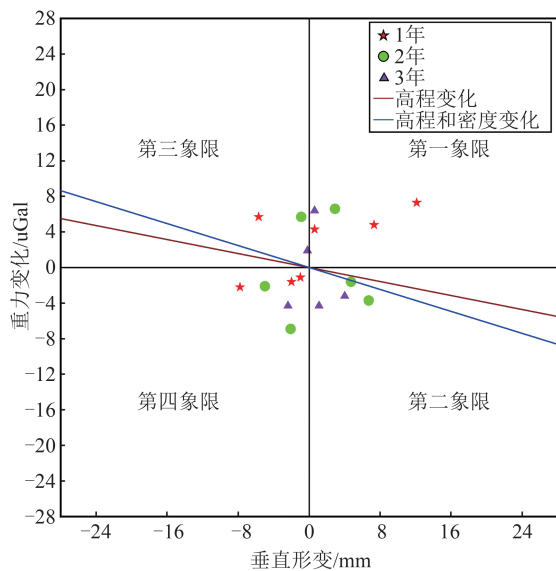


图6 垂直形变—重力变化的点位分布图

Fig.6 Point Distribution Map of Vertical Deformation-Gravity Variation

系,其斜率为 -0.3086 (图6中蓝线)或者 -0.1967 (图6中棕线)。但这两个理论值是假设测点周围地形是无限平坦的,并且地下物质密度设定为 2.67 g/cm^3 。如果考虑地下水位变化的影响,则密度应设为 1.0 g/cm^3 ,其比值对应为 -0.2667 。只有满足上述假设条件时,才会出现理论比值。但在实际观测过程中,由于受到地形起伏、密度分布不均等影响,两者的比值往往不会分布在理论值的棕线或者蓝线上,而是在理论值附近无规律的分布,验证了图5的统计结果。

从理论上进行分析,计算测点重力垂直梯度的理论公式^[23]为:

$$g_z = 0.3086(1 + 0.0007\cos(2\varphi)) - 0.07H \quad (1)$$

式中, g_z 是重力垂直梯度,单位是 $\mu\text{Gal/mm}$; φ 是测点的地理纬度; H 是测点的高程,单位为 m 。

由理论公式可以看出,重力垂直梯度理论上

是地球重力场在铅垂线方向上的变化率,主要受到测点的高程和纬度的影响。重力垂直梯度在某个固定观测点上关于高程的线性函数,且高程越低,重力垂直梯度的绝对值越小。根据武汉九峰地震台的经纬度和高程坐标信息,可以计算出该站点的理论重力垂直梯度值为 $0.3087\ \mu\text{Gal/mm}$ 。由于地表环境变化和地形起伏等因素影响,实际观测值与理论计算值存在差距。

图6中第一和第二象限为地表抬升区,第三和第四象限为地表沉降区。前述研究表明,武汉站重力变化除了地壳变形,主要与地下水等物质密度变化有关。地下水位的上升或下降、空隙的填充或排水都会引起重力的变化。当数据落在第一象限时,表明在地表抬升过程中有物质侵入,填充了原有的缝隙或空洞,使得密度增大,从而重力减小速度放缓,甚至可从负值增加到正值;当数据落在第二象限时,表明在地表抬升过程中,重力值随之减小,甚至存在原有物质的流失,形成了新的缝隙或空洞,从而重力值进一步减小,甚至超过了理论值(棕色和蓝色直线);当数据落在第三象限时,表明在地表沉降过程中,重力值随之增大,甚至有新的物质侵入,填充原有缝隙或空洞,或者原来存在的缝隙或空洞被压实,使得物质密度增大,从而重力进一步增大,甚至超过了理论值(棕色和蓝色直线);当数据落在第四象限时,表明在地表沉降过程中,有物质流失,形成了新的缝隙或空洞,从而重力增大速度放缓,甚至减小到负值。在武汉九峰地震台,排除岩浆或者地幔柱等影响,物质的侵入或者流失过程最有可能就是局部地下水的活动。

武汉九峰地震台所在区域位于古老、稳定的扬子地台,周边地区没有明显的活动断裂和褶皱,地震活动性很弱,没有明显的局部构造变形;同时,武汉及其邻近区域的重力均衡异常非常小,几乎为零,表明区域地壳达到了平衡状态^[24],其垂直运动的机制可能来自于区域动力学过程。然而通过观测到的绝对重力变化与地壳垂直变形的结果来看,在地壳垂直运动过程中,局部地壳内部可能存在比较大的物质质量调整。由于武汉及其邻近区域非常稳定,不存在明显的构造运动和地壳均衡调整,因此局部地下水活动可能是局部物质调整的主要来源之一。通过长期的绝对重力和GNSS同址观测,获得了武汉九峰地震台地壳垂直运动伴随的重力变化与地壳形变的比值为 $-0.3999\ \mu\text{Gal/mm}$,与前人利用超导重

力仪和 GNSS 数据的结果基本一致^[25]。而在短期(1年、2年、3年尺度)的对比中发现,数据点在图 6 中分布不均,其结果与理论值有一定差距。大部分数据点集中在理论值直线的四周位置,而长期的比值更加聚集在零点附近。这说明了长期的重力观测更有利于监测地下物质运动的过程,短期的数据中可能还包含了少量周期性变化信息,未能较好反映实际趋势变化信息。通过其比值所处位置,基本可以判断地下物质的运动过程可为分析地下物质运动提供一种新的模式。当然,如需得到更加精确物质运动信息,还需要相关水文资料的进一步积累和综合应用。本文的研究结果可为区域重力场长期变化和地壳垂直运动的观测研究,以及区域动力学机制解释提供重要的参考。

4 结 语

地表观测的重力变化包含了丰富的地球物理信息,利用重力变化和地壳垂直形变资料可研究地下物质运动过程。本文利用武汉九峰地震台 2013—2020 年绝对重力变化和地壳垂直形变资料,计算了绝对重力与地壳形变的长期和不同时间间隔的变化趋势,分析了两者的比值关系,并根据比值点位分布图,总结了地下物质运动的规律。武汉九峰地震台地下水活动丰富,下一步将结合地下水文资料,刻画更加精细的物质运动过程。本文的研究模式可为区域动力学的研究与解释提供重要参考。

致谢:感谢武汉九峰地震台、国家重力台网中心、中国科学院精密测量科学与技术创新研究院、中国地震局 GNSS 数据产品服务提供的数据支持和帮助。

参 考 文 献

- [1] Zhu Yiqing, Liang Weifeng, Li Hui, et al. On Gravity Field Variations and Geodynamic Characteristics in Chinese Mainland [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(3): 246-250 (祝意青, 梁伟锋, 李辉, 等. 中国大陆重力场变化及其引起的地球动力学特征[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2007, 32(3): 246-250)
- [2] Torge W. Gravity and Height Variations Connected with the Current Rifting Episode in Northern Iceland [J]. *Tectonophysics*, 1981, 71(1/2/3/4): 227-240
- [3] Wang Y. Theoretical Modeling of Local Gravity Changes and Deformation Caused by Dilatancy with the Magmatic Intrusion [M]// *Gravity, Geoid and Marine Geodesy*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997: 289-296
- [4] Jachens R C, Eaton G P. Geophysical Observations of Kilauea Volcano, Hawaii, 1. Temporal Gravity Variations Related to the 29 November, 1975, M = 7.2 Earthquake and Associated Summit Collapse [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1980, 7(3/4): 225-240
- [5] Li R H, Fu Z Z. Local Gravity Variations Before and After the Tangshan Earthquake (M = 7.8) and the Dilatation Process [J]. *Tectonophysics*, 1983, 97(1/2/3/4): 159-169
- [6] Shen Chongyang. Preliminary Analysis of Coupling Movement Between Crustal Deformation and Density Change [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 2005, 25(3): 7-12 (申重阳. 地壳形变与密度变化耦合运动探析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2005, 25(3): 7-12)
- [7] Sun W K, Wang Q, Li H, et al. Gravity and GPS Measurements Reveal Mass Loss Beneath the Tibetan Plateau: Geodetic Evidence of Increasing Crustal Thickness [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(2), DOI: 10.1029/2008GL036512
- [8] Xing Lelin, Wang Linhai, Hu Minzhang, et al. Determination of Crust Uplifting and Thickening of Qinghai-Tibet Plateau from Time-Variable Gravity Measurements [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(5): 569-574 (邢乐林, 王林海, 胡敏章, 等. 时变重力测量确定青藏高原地壳隆升与增厚速率[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2017, 42(5): 569-574)
- [9] Wei Jin, Li Hui, Liu Ziwei, et al. Observation of Superconducting Gravimeter at Jiufeng Seismic Station [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(6): 1894-1902 (韦进, 李辉, 刘子维, 等. 武汉九峰地震台超导重力仪观测分析研究[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(6): 1894-1902)
- [10] Xu Jianqiao, Zhou Jiangcun, Chen Xiaodong, et al. Long-Term Observations of Gravity Tides from a Superconducting Gravimeter at Wuhan [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(10): 3091-3102 (徐建桥, 周江存, 陈晓东, 等. 武汉台重力潮汐长期观测结果[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(10): 3091-3102)
- [11] Chen Xiaodong, Li Hang, Deng Mingli, et al. Experimental Study of the Surface Subsidence in the City Using Gravity Observing Techniques [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(8): 2882-2892 (陈晓东, 李航, 邓明莉, 等. 用重力测量技术观测城市地表下沉的实验研究[J]. *地球物理学报*, 2020, 63

- (8): 2882-2892)
- [12] Li Jiancheng. The Recent Chinese Terrestrial Digital Height Datum Model: Gravimetric Quasi-Geoid CNGG2011[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5): 651-660 (李建成. 最新中国陆地数字高程基准模型: 重力似大地水准面 CNGG2011 [J]. 测绘学报, 2012, 41(5): 651-660)
- [13] Charco M, Fernández J, Luzón F, et al. Some Insights into Topographic, Elastic and Self-Gravitation Interaction in Modelling Ground Deformation and Gravity Changes in Active Volcanic Areas[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, 164(4): 865-878
- [14] Liu Jie, Fang Jian, Li Honglei, et al. Secular Variation of Gravity Anomalies within the Tibetan Plateau Derived from GRACE Data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(10): 3496-3506 (刘杰, 方剑, 李红蕾, 等. 青藏高原 GRACE 卫星重力长期变化 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(10): 3496-3506)
- [15] Hu Yaxuan, Wang Xiong. Analysis of the Characteristics of Magma Activity Based on the Deformation and Gravity Measurements in Tengchong Volcano Region[J]. *Seismology and Geology*, 2009, 31(4): 655-663 (胡亚轩, 王雄. 应用形变和重力资料分析腾冲火山区岩浆的活动特征[J]. 地震地质, 2009, 31(4): 655-663)
- [16] Wang J P, Shen C Y, Xuan S B, et al. Rigorous Evaluation of Gravity Change Due to Crustal Vertical Deformation[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2021, 178(6): 2077-2089
- [17] Bagnardi M, Poland M P, Carbone D, et al. Gravity Changes and Deformation at Kilauea Volcano, Hawaii, Associated with Summit Eruptive Activity, 2009-2012 [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(9): 7288-7305
- [18] Zhang Xinlin, Han Yufei, Wang Jian, et al. Comparisons of Absolute Gravimeters Measurements from Crustal Movement Observation Network of China During 2010 and 2018[J]. *Earthquake Research in China*, 2020, 36(4): 872-878 (张新林, 韩宇飞, 汪健, 等. 2010—2018年中国大陆构造环境监测网络绝对重力仪比测结果分析[J]. 中国地震, 2020, 36(4): 872-878)
- [19] Hao Hongtao, Li Hui, Sun Heping, et al. Application of Zero Drift Correct and Detection of Scale Parameters of CG-5 Gravimeter[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(9): 1265-1271 (郝洪涛, 李辉, 孙和平, 等. CG-5 重力仪零漂改正及格值系数检测应用研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(9): 1265-1271)
- [20] Yu J S, Tan K, Zhang C H, et al. Present-Day Crustal Movement of the Chinese Mainland Based on Global Navigation Satellite System Data from 1998 to 2018 [J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(2): 840-856
- [21] Zhang Weimin, Wang Yong, Zhan Jingang, et al. Absolute Gravity Determination in the Crustal Movement Observation Network of China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(3): 227-230 (张为民, 王勇, 詹金刚, 等. 中国地壳运动观测网络中的绝对重力测定[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(3): 227-230)
- [22] Camp M V, Viron O D, Scherneck H G, et al. Repeated Absolute Gravity Measurements for Monitoring Slow Intraplate Vertical Deformation in Western Europe [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116: B08402
- [23] Li Ruihao. Introduction of Gravity [M]. Beijing: Seismological Press, 1988 (李瑞浩. 重力学引论 [M]. 北京: 地震出版社, 1988)
- [24] Chen Shi, Wang Qianshen, Xu Weimin, et al. Thermal Isostasy of North China and Its Gravity Isostasy and Deep Structure[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(11): 2864-2875 (陈石, 王谦身, 徐伟民, 等. 华北地区热均衡、重力均衡与深部构造[J]. 地球物理学报, 2011, 54(11): 2864-2875)
- [25] Xu Jianqiao, Zhou Jiangcun, Luo Shaocong, et al. Study on Long-term Characteristics of Gravity in Wuhan Gravity Station [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(5): 583-588 (徐建桥, 周江存, 罗少聪, 等. 武汉台重力长期变化特征研究[J]. 科学通报, 2008, 53(5): 583-588)

Analysis of Gravity Variation and Vertical Crustal Deformation at Wuhan Jiufeng Seismic Station

WANG Jiapei^{1,2,3,4} ZHANG Xinlin^{1,2} ZHANG Yi^{1,2} LI Zhongya^{1,2,3,4}
HU Minzhang^{1,2} SHEN Chongyang^{1,2}

1 Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

2 National Observation and Research Station of Gravitation and Earth Tide, Wuhan 430071, China

3 Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

4 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract: Objectives: Long period observation of gravity variation and crustal deformation is one of the important means to study the movement of underground material. However, long-term monitoring of regional material migration law is rarely carried out. **Methods:** Based on the absolute gravity and global navigation satellite system (GNSS) observation data of Wuhan Jiufeng seismic station from 2013 to 2020, we calculate the variation trend of long-period gravity and vertical crustal deformation. The linear fitting trend is carried out at the intervals of 1 year, 2 years and 3 years, and the annual change rate of absolute gravity, vertical crustal deformation and the corresponding ratio in different time periods are obtained. **Results:** The results show that the long-term gravity change rate of Wuhan Jiufeng seismic station is $0.4799 \mu\text{Gal/a}$, the vertical crustal deformation is -1.2 mm/a , and the ratio is $-0.3999 \mu\text{Gal/mm}$. There is a certain deviation from the theoretical value, which may be related to the groundwater activities in this area. It is found that the data points are discretely distributed in different regions and close to the theoretical value. **Conclusions:** Through the study of the long-term trend of gravity change and crustal deformation and the distribution map of different periodic data, the process of underground material movement can be preliminarily judged, which provides an important reference for the interpretation of regional dynamic mechanism. **Key words:** absolute gravity variation; vertical crustal deformation; ratio; material movement; Wuhan Jiufeng seismic station

First author: WANG Jiapei, PhD candidate, assistant researcher, specializes in crustal deformation and gravity variation. E-mail: wang_jia_pei@163.com

Corresponding author: ZHANG Xinlin, PhD candidate, assistant researcher. E-mail: xinlinzhang2012@163.com

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China (2018YFE0206100, 2017YFC1500204); Open Fund of Wuhan, Gravitation and Solid Earth Tides, National Observation and Research Station (WHYWZ202108).

引文格式: WANG Jiapei, ZHANG Xinlin, ZHANG Yi, et al. Analysis of Gravity Variation and Vertical Crustal Deformation at Wuhan Jiufeng Seismic Station[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(6):964-971. DOI:10.13203/j.whugis20220157 (王嘉沛, 张新林, 张毅, 等. 武汉九峰地震台重力变化与地壳垂直形变分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(6):964-971. DOI:10.13203/j.whugis20220157)