科学通报 2008 年 第 53 卷 第 5 期: 583 ~ 588
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

武汉台重力长期变化特征研究

徐建桥, 周江存, 罗少聪, 孙和平

中国科学院测量与地球物理研究所, 动力大地测量学重点实验室, 武汉 430077
E-mail: xujq@asch.whigg.ac.cn

2007-09-11 收稿, 2007-12-03 接受
中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KZCX2-YW-133)和国家自然科学基金资助项目(批准号: 40574034, 40730316)

摘要 利用武汉台超导重力仪长期连续观测资料, 结合 FG5 和 GPS 同址观测结果, 研究了重力长期非潮汐变化特征及其与局部气压和水储量变化及地壳垂直运动之间的关系. 结果表明, 超导重力仪观测的重力长期变化存在非常显著的季节性变化, 其总能量的大约 70%来自于局部大气和水储量变化, 其中周年变化超过 95%的能量都来自于这两种环境因素的影响. 由于缺乏区域水储量(特别是地下水)变化的实际观测资料, 采用的全球陆地水同化模型 LaD 和 GLDAS 不能客观地描述台站局部水储量的实时变化, 由此得到的重力变化与实际观测之间存在大约 55 d 的时间延迟. 通过与 FG5 绝对重力仪的对比观测获得了超导重力仪的长期漂移率为 17.13 nm·s^{-2}·a^{-1}, 同址 GPS 观测表明台站局部区域的地壳呈缓慢沉降态势, 其沉降速率为(3.71±0.16) mm·a^{-1}, 与之对应的局部重力场变化为(13.88±0.22) nm·s^{-2}·a^{-1}, 即伴随着局部地壳运动的重力变化与高程变化的比值大约为 −37.41 nm·s^{-2}·cm^{-1}, 表明在地壳垂直运动过程中局部伴随着比较大的物质质量调整, 其力学机制有待进一步研究.

关键词
超导重力仪
重力长期非潮汐变化
气压
水储量变化
地壳垂直运动

地表长期连续重力观测综合反映了伴随着各种环境变化和动力学过程的地球内部和表面物质的迁移、交换和地球的形变. 超导重力仪(SG)是目前性能最好的重力观测仪器, 具有非常高的稳定性和灵敏性, 观测精度达到 0.5 nm·s^{-2}(1 nm·s^{-2} 大约为地表平均重力加速度值的 10^{10} 分之一), 漂移极低, 年漂移率介于 10~40 nm·s^{-2}·a^{-1} 之间, 是局部重力长期变化观测与研究最理想的观测仪器. 自 1997 年底, 中国唯一的一台超导重力仪C023 在生产厂家升级后, 安装在位于武汉市郊外九峰山的动力大地测量中心实验站, 工作状态一直非常好, 获得了高质量的连续观测资料, 在重力固体潮、大气和海潮负荷、地球自由核章动、地球自由振荡等全球动力学方面的研究与检测发挥了重要作用 [1~8]. 定期用FG5 绝对重力仪实施对比观测, 为超导重力仪精密标定 [9]和漂移模型的确定提供可靠保障; 同址还开展了GPS同步连续观测, 为局部环境变化和地壳长期运动监测和研究奠定了基础.

水循环和海平面变化是目前国际地学界非常关注和非常复杂的前沿问题, 对于人类生存环境和气候的演化具有重要意义. 在全球水循环和海平面变化过程中涉及到大量的物质迁移和交换, 导致地球重力场大尺度变化, 这些变化可以采用地球表面高精度重力仪观测到 [10,11]. 事实上, 在局部重力场时间变化观测中, 季节项主要就是来自于全球大气和水(包括地表水和地下水)储量变化等环境因素 [12~14], 而其中大气负荷部分采用全球气压观测资料与大气重力格林函数的全球褶积积分即可很好确定 [12,15]; 对于全球水储量变化, 一方面可以采用大陆水文和气象等手段获得的大陆水储量随时间变化的数值模型, 利用地表负荷理论, 通过负荷重力Green函数与这些负荷质量的褶积积分, 研究全球水循环导致的重力变化的空间和频谱特征, 验证这些水储量变化数值模型, 解释长期连续重力观测的季节性变化

[13,14]; 或通过重力和局部水井的连续观测资料对比和相关分析, 确定局部重力长期变化和地下水位变化之间的关系 [16].

地壳运动是局部动力学过程最重要的观测量之一, 是动力学研究重要的地表约束. GPS技术发展和普遍应用, 基本上揭示了中国大陆地壳的水平运动状态 [17~19], 但由于其垂直方向上的观测精度所限, 至今还无法很好地确定地壳的垂直运动态势. 区域性高精度时变重力场观测包含了非常精确的局部地壳垂直运动的信息, 研究表明局部重力与高程变化的比值介于–15 ~ –35 $nm\cdot s^{-2}\cdot cm^{-1}$ 之间, 在局部没有质量变化的“自由空气”情形下, 这个比值大约为 –30 $nm\cdot s^{-2}\cdot cm^{-1}$. 换言之, 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. 1998~2004 年FG5 绝对重力仪在青藏拉萨重复测量结果表明, 该地区的重力值随时间减小, 反映了青藏高原的隆升态势, 其隆升速率大约为 8.7 mm/a[20]. SG比FG5 的观测精度高得多, 通过超导重力仪和GPS长期并址观测, 以FG5 观测作为约束, 可精密确定地壳垂直位移 [21], 采用区域性SG观测网络可能观测到冰后回弹和地震位错导致的垂直形变和重力变化 [22,23].

本文将采用武汉台 SG 和 GPS 同址连续观测资料, 研究局部重力场非潮汐长期变化特征, 分离环境变化导致的季节效应和长期地壳运动引起的长期变化趋势, 为局部环境变化和地壳垂直运动的监测与研究提供必要的信息和有效约束.

1 武汉台超导重力观测

动力大地测量中心实验站所在的严家山, 绝对标高 93.6 m, 相对高度差 35 m 左右, 山体呈东西走向的长条状, 西高东低, 主要由二叠系硅质岩夹薄层页岩组成, 岩性坚硬, 抗风化能力强, 稳定性好, 是观测站理想的地基岩体, 表层多覆盖 20~150 cm 厚的第四条风化残坡积物. 所有的观测基墩都建设在基岩上, 为了避开风化层, 向下挖了 2~3 m, 用钢筋混凝土进行整体浇铸, 并留有 10 cm 左右的隔震槽, 以减少外界活动的影响. 重力观测室采用半地下室的结构, 将山体开挖后傍山而建, 在屋顶覆盖了 1 m 多厚的土层, 以减少外界温度变化的影响, 以保证观测资料的可靠性和高精度要求.

采用国际标准分析处理软件对武汉台SG 1998 年 1 月 1 日~2005 年 12 月 31 日连续观测资料进行了综合的分析处理. 采用可视化的固体潮数据预处理软件T-Soft[24], 通过人机对话消除记录中的尖峰、突跳、掉格和地震扰动等, 对一些小的间断进行线性或多项式插值, 采用低通数字滤波器消除高频噪音, 并将高密度采样数据转化为每小时采样. 采用标准调和分析软件Eterna 3.30[25], 对观测数据作调和分析, 精密确定了重力潮汐信号, 分析结果表明, 在此期间SG具有极高的观测精度和稳定性. 在调和分析和重力残差计算中采用了Tamura[26]推导的包含 1200 个潮波分量的引潮位展开表. 在SG原始观测中扣除重力潮汐和地球自转(包括极移和日长)变化引起的重力变化, 获得了武汉台非潮汐重力长期变化(如图 1(b)所示). 与其他技术相比, SG的观测精度高得多, 可以认为其观测是足够精确的, 因此图中没有给出其观测的误差棒.

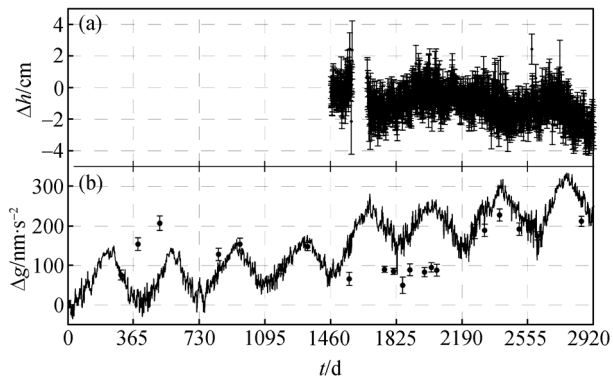


图 1 武汉台观测的垂直位移和重力变化

(a) 2002 年 1 月 1 日~2005 年 12 月 31 日 GPS 观测的垂直位移; (b) 曲线为 1998 年 1 月 1 日~2005 年 12 月 31 日 SG 观测的非潮汐重力变化, 圆点为 FG5 观测的绝对重力变化(其中 1998 年 10 月 23 日测量的绝对重力值为(9793393630±12) $nm\cdot s^{-2}$, 并归算到该时间 SG 的观测值)

在SG观测过程中, 先后21次采用FG5 绝对重力仪进行过有效对比观测, 以标定SG[9], 采用生产厂家提供的Newton2.2 软件, 经过了潮汐、极移和局部大气负荷改正, 精密确定了武汉台在不同时间的绝对重力值, 其平均观测精度为 14 $nm\cdot s^{-2}$. 为了便于与SG观测比较, 以第一次对比观测时的SG观测值作为参考, 将FG5 绝对重力观测值都减去 1998 年 10 月 23 日绝对重力值((9793393630±12) $nm\cdot s^{-2}$)与该时间SG的观测值之差(见图 1(b)). 从 2002 年 1 月 1 日至 2005 年 12 月 31 日, 同址采用Javad GPS接收机进行台站坐标的连续观测, 由于更换、调试新的接收机, GPS

观测从 2002 年 4 月 30 日起出现 2 个半月的中断. 利用GAMIT软件对GPS观测资料作分析处理, 获得了每天台站高程随时间的变化, 其平均观测精度为 0.84 cm. 在此仅关心观测时间段台站的高程变化(垂直位移), 图 1(a)给出了台站相对于 2002 年 1 月 1 日的垂直位移.

观测结果表明, 武汉台的重力非潮汐变化具有非常显著的季节项, 其变化幅度达到 150 nm·s^{-2}, 且以周年变化为主, 可能与大气和水储量(包括地表水、土壤湿度和地下水等)等环境因素的变化有关, 这些环境因素的变化可以看作是表面负荷, 采用经典负荷理论[27,28]获得. 从总体上看, 重力变化呈长期增大趋势, 结合GPS观测结果, 发现区域地壳缓慢下降.

2 大气和水的负荷效应

采用经典负荷理论, 大气和水储量变化的负荷效应可以表示为相应的负荷Green函数与负荷压强的全球褶积积分[27,28]:

$$L(\lambda,\vartheta,t)=\iint_S G(\psi)P(\lambda',\vartheta',t)\mathrm{d}S, \qquad (1)$$

式中L为负荷导致观测站(λ, θ)在t时刻的重力变化或垂直位移, S为整个地球表面, $G(\psi)$为到观测站角距为ψ处相应的负荷Green函数, $P(\lambda'$, θ', $t)$为积分面元dS在t时刻的负荷压力, λ'和θ'分别为积分面元的经、纬度. 对于水储量变化, 负荷压力P为水的密度与等效水位高的乘积; 对于大气负荷, P为地表气压, 气压引起的重力变化除了地表的压力外, 还必须考虑大气密度的空间分布, 采用大气重力Green函数[12,15]. 在下面大气和水负荷计算中, 分别采用了基于G-B地球模型的大气重力Green函数[29]和点质量负荷Green函数[28].

采用全球 2.5°×2.5° NCEP(National centers for environmental prediction, USA)再分析海平面气压数据(1998 年 1 月 1 日~2005 年 12 月 31 日)以及 1°×1°的LaD (Land Dynamics, 1998 年 1 月 1 日~2001 年 12 月 31 日, 时间分辨率为 1 月, 线性内插为 1 d)和GLDAS (Global land data assimilation system, 2002 年 01 月 01 日~2005 年 12 月 31 日, 时间分辨率为 1 d)全球陆地水同化模型[30,31], 以及相应的负荷Green函数, 通过(1)式的全球褶积积分, 从理论上模拟全球大气和水循环导致的武汉台重力和高程变化(分别如图 2 和 3 所示).

结果表明, 全球气压变化导致的武汉台重力变化幅度大约为 145 nm·s^{-2}, 垂直位移达到 1.5 cm, 具有非常显著的周年性, 且与 SG 观测的重力变化之间存在非常强的相关性. 谱分析结果表明 SG 观测的非潮汐周年重力变化大约 80%的能量来自全球大气负荷效应. 采用不同角距范围内负荷的积分讨论了局部大气的影响, 结果表明, 大气影响的区域很小, 台站 50 km 区域的大气负荷效应达到全球负荷效应的 90%, 而 100 km 区域的大气负荷效应超过全球负荷的 95%.

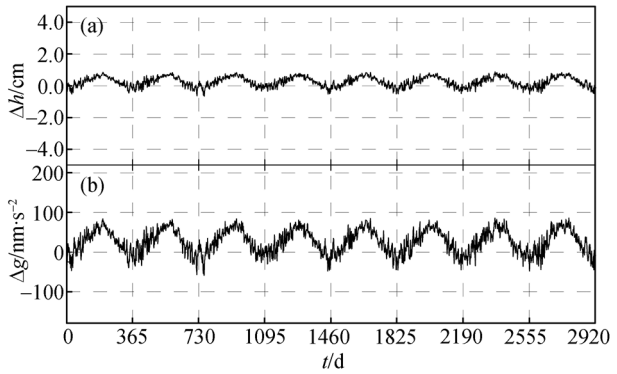


图 2 全球气压导致的武汉台垂直位移和重力变化

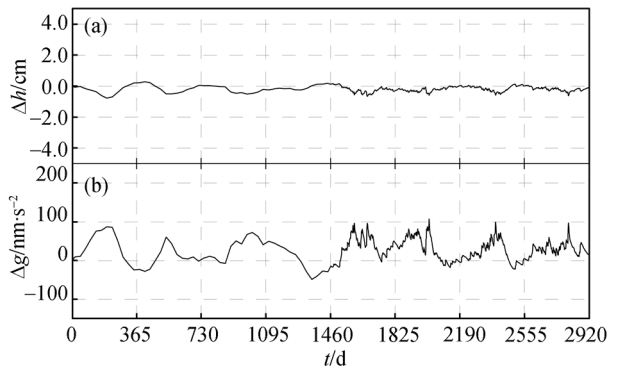


图 3 全球水循环导致的武汉台垂直位移和重力变化

全球陆地水导致的武汉台重力变化幅度大约为 155 nm·s^{-2}, 垂直位移大约为 1 cm, 表现为复杂的季节性变化特征. 当然, 要精确考虑全球水循环的影响, 还必须考虑全球海平面(海底压力)变化. 而数值试验结果表明, 与大气负荷效应相比, 虽然水负荷的影响区域大得多, 但是, 要达到全球水负荷的 90%, 只需考虑台站 100 km 区域的水储量变化; 而要达到全球水负荷的 95%, 也只需考虑台站 250 km 区域的水储量变化; 对于垂直位移的影响具有类似的特点. 事实上, 由于武汉台是一个内陆观测台站, 远离海洋, 全球海平面的变化对该台站的重力和垂直位移观测的

影响非常微弱, 不足陆地水影响的 3%.

图 4 直观地给出了武汉台 SG 观测的重力季节变化与全球陆地水循环导致的重力变化之间的关系, 前者为重力残差(图 1(b))扣除大气负荷效应(图 2(b))和长期(线性)趋势项. 分析表明, 重力的季节性变化和全球水循环的负荷效应之间存在非常强的相关性, 说明除大气负荷以外, 重力的季节变化主要来自于全球水循环的贡献; 但是, 两者之间存在大约 55 d 的时间延迟, 这种延迟并非来自于负荷本身的响应滞后(地球对表面负荷的响应主要表现为弹性), 而是在构制水模型时, 没有很好考虑到某些区域的具体情况(如台站局部水储量变化的实际观测资料, 特别是地下水), 从而导致其提供的该地区陆地水分布与实际情况存在时间延迟. 从图 4 可以看出, 2001 年 SG 观测值与基于 LaD 全球陆地水模型获得的重力变化之间存在非常大的差异, 这段时间没有显著区域动力学现象出现, 其主要原因只能是 LaD 模型, 特别是其在 2001 年中国大陆区域部分可能存在比较严重的问题. 正因为如此, 导致大气和全球水循环负荷改正以后, 重力长期变化在这段时间出现明显异常(见图 5(b)).

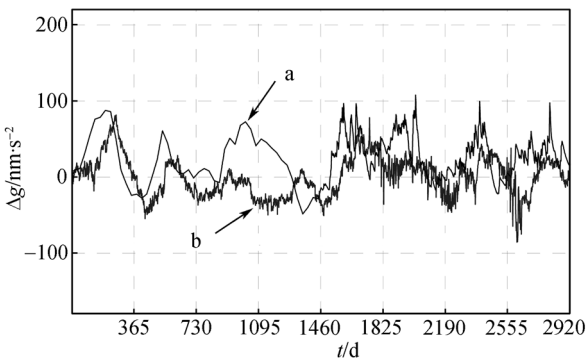


图 4 武汉台重力季节变化与水循环负荷效应的比较

a 全球水循环导致的重力变化; bs SG 观测的重力季节变化, 在 SG 观测的重力非潮汐长期变化(图 1(b))中扣除大气负荷效应(图 2(b))和长期趋势项得到. 两者之间存在大约 55 d 的时间延迟

从重力长期变化和垂直位移(如图 1 所示)中扣除全球大气和水循环负荷效应的相应理论模拟结果(如图 2 和 3 所示), 结果如图 5 所示, 不难发现 SG 观测的重力季节性变化明显减弱. 频谱分析结果表明, 改正以后重力季节变化(周期介于 1 月和 1.5 年之间)的总能量大约降低了 70%, 其中重力周年变化的总能量降低了 95%以上. 根据以上分析不难发现, SG 观测到的重力季节性变化主要来自于台站局部区域的大气和水储量变化的影响. 如果在 LaD 和 GLDAS 全球陆地水同化模型的基础上, 考虑台站区域的局部水储量变化的实际观测资料, 将会获得更好的改正效果. 在实际研究过程中, 根据讨论问题的要求和应用资料的精度情况, 仅需要考虑台站不同范围的局部气压和水储量变化的负荷效应. 同时, 气压和水储量变化导致了非常显著的季节性地表重力场变化和垂直位移, 其幅度远远超过了目前高精度观测的要求, 这些影响在今后的重力(包括绝对和相对重力连续或重复)测量和高程(包括水准、GPS 等连续或重复)测量中必需予以充分考虑.

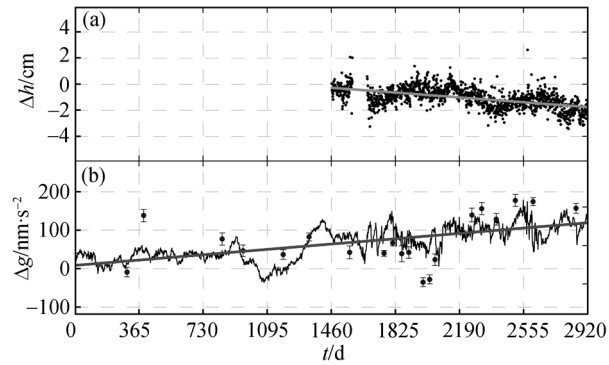


图 5 武汉台观测的地壳垂直运动和重力长期变化

(a) GPS 观测的垂直位移扣除了全球大气和水储量变化导致的季节项, 其长期趋势为(−0.371±0.016) cm·a^{-1}; (b) 曲线为 SG 观测的非潮汐重力变化扣除全球大气和水储量变化导致的季节项以及 17.13 nm·s^{-2}·a^{-1} 的长期漂移, 其长期趋势为(13.88±0.22) nm·s^{-2}·a^{-1}; 圆点为 FG5 观测的绝对重力变化

3 局部地壳的垂直运动

SG 是一相对重力仪, 还存在比较小的长期漂移, 通过与 FG5 绝对重力仪的定期对比观测可知, 武汉台 SG 存在长期向上漂移的趋势, 在 1998~2005 年间仪器的漂移非常小, 其平均漂移率仅为 17.13 nm·s^{-2}·a^{-1}. 仪器极高的精度和稳定性、极低的漂移率为局部重力场长期变化和地壳垂直运动的观测与研究奠定了基础.

采用线性回归模型拟合武汉台 SG 和 GPS 长期观测值(拟合结果见图 5 中的直线), 即可得到局部重力和高程变化速率. GPS 观测结果表明, 在 2002 年至 2005 年期间, 武汉以(3.71±0.16) mm/a 的速率沉降. 由于武汉位于古老、稳定的扬子地台, 周边地区没有明显的活动断裂和皱褶, 地震活动性很弱, 没有明显

的局部构造变形; 同时, 重力场观测结果表明, 武汉及其邻近区域的均衡重力异常非常小, 几乎为 0, 表明区域地壳达到极好的平衡状态. 其垂直运动的机制有可能来自于深部动力学过程, 具体研究工作有待进一步深入.

地球表面观测的重力长期变化综合反映了局部地壳的垂直运动和内部物质质量(密度)调整. 武汉台 SG 连续观测的局部重力长期变化为(13.88±0.22) $\mathrm{nm\cdot s^{-2}\cdot a^{-1}}$, 1998 年至 2005 年间, 采用 LaCoste G 型重力仪先后在武汉台作了 3 次重力梯度测量, 获得该区域重力梯度的平均值大约为–28 $\mathrm{nm\cdot s^{-2}\cdot cm^{-1}}$(没有质量调整的“自由空气”情形). 假设台站局部没有质量调整, SG 观测的重力长期变化对应的局部地壳沉降速率大约为(4.96±0.08) mm/a, 与 GPS 观测结果之间存在 34%的差异, 表明在垂直运动过程中, 局部地壳可能具有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, 因此局部地下水的长期变化可能是局部物质调整的主要来源之一. 当然, 要得到明确的结论, 还需相关工作的进一步深入和相关资料的进一步积累和综合应用. 通过 GPS 和 SG 同址观测的对比, 获得了武汉局部地壳垂直运动伴随的重力与高程变化的比值 $\Delta g/\Delta h$ 为–37.41 $\mathrm{nm\cdot s^{-2}\cdot cm^{-1}}$, 为区域重力场长期变化和地壳垂直运动的观测研究及局部地壳垂直运动的动力学机制研究提供了重要的约束参数.

通过上述讨论可以看出, 大气和水循环等环境因素变化和一些短波长地壳运动(如地震位错等)都将导致非常显著的局部地壳运动, 其幅度远远超过了目前地壳垂直运动观测的精度要求, 有时甚至超过了地壳垂直运动信号本身, 并且在传统的水准、重力和 GPS 等重复测量过程中很难精确改正, 严重影响了测量精度和观测结果的可靠性. 地表高精度的重力(特别是超导重力)和 GPS 并址、长期、连续观测是局部地壳垂直运动及其力学机制一种理想观测和研究模式. 一方面, 采用其他技术(如气象、水文、地震等)的观测研究成果和相应的数值模拟技术, 可以有效剔除并址、连续重力和 GPS 观测中的环境因素干扰和短波长地壳运动的影响, 获得更可靠的观测结果; 另一方面, 这两种观测技术不仅可以相互检核和约束, 由于重力记录的实际上是一个物理量, 在反映测站高程变化的同时, 还包含了区域物质运动和动力学效应的丰富信息, 为区域地壳垂直运动力学机制的研究提供了高质量的可靠依据.

4 结语及讨论

武汉台 SG 观测的非潮汐重力长期变化存在非常显著的季节性变化. 采用经典的地表负荷理论和全球大气观测数据及陆地水同化模型的数值模拟结果表明, 两者的负荷效应可以解释 SG 观测的重力季节变化能量的 70%, 特别是 SG 观测的重力周年变化几乎全部(超过 95%)来自于全球大气和陆地水的负荷影响. 大气和陆地水负荷导致的台站重力变化主要来自台站非常狭小的局部区域大气和陆地水的贡献, 因此, 采用地表局部重力场长期连续观测网络数据, 通过数字滤波技术分离出季节变化, 经有效的全球或局部大气负荷改正以后, 有可能反演局部水储量的变化情况, 为局部水储量变化的监测和研究提供又一可靠手段. 由于采用的陆地水同化模型 LaD 和 GLDAS 不确定性, 特别是没有充分考虑台站附近水储量(包括陆地水和地下水)的实际观测资料, 导致理论计算结果和 SG 实际观测结果之间存在大约 55 d 的时间延迟, 和某些时段比较大的差异.

根据SG相对重力和FG5绝对重力的定期对比观测, 精密确定了武汉台 SG 1998 年至 2005 年长期漂移率为 17.13 $\mathrm{nm\cdot s^{-2}\cdot a^{-1}}$. 长期连续精密的重力测量, 特别是超导重力测量可以监测到毫米量级地壳的垂直运动, 与 GPS 的并址、长期、连续观测是研究局部地壳垂直运动及其力学机制一种理想观测和研究模式, 观测结果表明武汉地区地壳具有明显的长期缓慢沉降的趋势, 沉降速率为(3.71±0.16) mm/a, 并伴随比较大的局部物质质量调整, 与之对应重力长期变化为(13.88±0.22) $\mathrm{nm\cdot s^{-2}\cdot a^{-1}}$, 局部地壳运动伴随的重力与高程变化的比值 $\Delta g/\Delta h$ 约为–37.41 $\mathrm{nm\cdot s^{-2}\cdot cm^{-1}}$, 有关地球垂直运动的动力学机制必须结合区域大陆构造环境和应力场特征, 作进一步的研究.

国家发改委已经立项并即将启动国家重大科技基础设施建设项目“中国大陆构造环境监测网络”, 包括原有的和“十一五”期间布设的台站, 重力场时间变化观测网络拥有 56 个高精度连续重力观测的基准站, 并在青藏高原拉萨建立超导重力仪观测站, 同时在这些站还匹配 GPS 观测设备作并址连续观测. 我国大陆地区形成的这样一个高空间分辨率的区域性地壳形变观测网络, 为研究中国大陆水储量变化和地壳垂直运动提供了良好的契机.

致谢 中国科学院测量与地球物理所动力大地测量中心实验站提供了高质量 SG, FG5 和 GPS 观测数据, 李军提供了 GPS 垂直位移时间序列, 在此表示衷心感谢.

参考文献

1 Xu J, Sun H, Ducarme B. A global experimental model for gravity tides of the earth. J Geodyn, 2004, 38: 293—306[DOI]
2 孙和平, 许厚泽, 周江存, 等. 武汉超导重力仪观测最新结果和海潮模型. 地球物理学报, 2005, 48(2): 299—307
3 徐建桥, 郝兴华, 孙和平. 武汉基准台气压对重力潮汐观测的影响. 测绘学报, 1999, 28(1): 75—79
4 徐建桥, 孙和平, 罗少聪. 利用国际超导重力仪研究地球自由核章动. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2001, 31(9): 719—726
5 雷湘鄂, 许厚泽, 孙和平. 由 5 个国际超导重力仪台站资料检测到的秘鲁 8.2 级大地震所激发的球型自由振荡现. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(5): 483—491
6 Park J, Alex Song TR, Tromp J, et al. Earth's free oscillations excited by the 26 December 2004 Sumatra-Andaman earthquake. Science, 2005, 308: 1139—1144[DOI]
7 徐建桥, 孙和平, 傅容珊. 利用全球超导重力仪数据检测长周期核模. 地球物理学报, 2005, 48(1): 69—77
8 孙和平, 徐建桥, Ducarme B. 基于国际超导重力仪观测资料检测地球固态内核的平动振荡. 科学通报, 2004, 49(8): 803—813
9 孙和平, 陈晓东, 许厚泽, 等. GWR 超导重力仪潮汐观测标定因子的精密测定. 地震学报, 2001, 23(6): 651—658
10 Kroner C. Hydrological effects on gravity at the Geodynamic Observatory Moxa. J Geodet Soc Jpn, 2001, 47(1): 353—358
11 Sato T, Fukuda Y, Aoyama Y, et al. On the observed annual gravity variation and the effect of sea surface height variations. Phys Earth Planet Int, 2001, 123: 45—63[DOI]
12 Boy J P, Gegout P, Hinderer J. Reduction of surface gravity data from global atmospheric pressure loading. Geophys J Int, 2002, 149: 534—545[DOI]
13 Abe M, Takemoto S, Fukuda Y, et al. Hydrological effects on the superconducting gravimeter observation in Bandung. J Geodyn, 2006, 41: 288—295[DOI]
14 Harnisch G, Harnisch M. Hydrological influences in long gravimetric data series. J Geodyn, 2006, 41: 276—287[DOI]
15 罗少聪, 孙和平, 徐建桥. 大气变化对位移、重力和倾斜观测影响的理论计算. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1288—1292
16 Kroner C, Jahr T. Hydrological experiments around the superconducting gravimeter at Moxa Observatory. J Geodyn, 2006, 41: 268—275[DOI]
17 Wang Q, Zhang P, Freymueller J T, et al. Present day crustal deformation in China constrained by global positioning system. Science, 2001, 294: 574—577[DOI]
18 马宗晋, 陈鑫连, 叶叔华, 等. 中国大陆现今地壳运动的 GPS 研究. 科学通报, 2001, 46(13): 1118—1120
19 张培震, 王琪, 马宗晋. 中国大陆现今构造运动的 GPS 场和活动地块. 地学前缘, 2002, 9(2): 430—441
20 王勇, 张为民, 詹金刚, 等. 重复绝对重力测量观测的滇西地区和拉萨点的重力变化及其意义. 地球物理学报, 2004, 47(1): 95—100
21 Richter B, Zerbini S, Matonti F, et al. Long-term crustal deformation monitored by gravity and space techniques at Medicina, Italy and Wettzell, Germany. J Geodyn, 2004, 38: 281—292[DOI]
22 Crossley D, Hinderer J, Boy J P. Regional gravity variations in Europe from superconducting gravimeters. J Geodyn, 2004, 38: 325—343[DOI]
23 Imanishi Y, Sato T, Higashi T, et al. A network of superconducting gravimeters detects submicrogal coseismic gravity changes. Science, 2004, 306: 476—478[DOI]
24 Vauterin P. Tsoft: Graphical & interactive software for the analysis of Earth tide data. In: Ducarme B, Paquet P, eds. Proc 13th Int Sympos on Earth Tides. Brussels: Royal Observatory of Belgium, 1998. 481—486
25 Wenzel G. The nanogal software: Data processing package ETERNA 3.3. Bull Inf Marées Terrestres, 1996, 124: 9425－9439
26 Tamura Y. A harmonic development of the tidal generating potential. Bull Inf Marées Terrestres, 1987, 99: 6813—6855
27 Longman I M. A Green's function for determining the deformation of the earth under surface mass loads, 1. Theory. J Geophys Res, 1962, 67: 845—850
28 Farrell W E. Deformation of the earth by surface loads. Rev Geophys Space Phys, 1972, 10(3): 761—797
29 孙和平. 大气重力格林函数. 科学通报, 1995, 42(15): 1640—1646
30 Milly P C D, Shmakin A B. Global modeling of land water and energy balances. Part I: The land dynamics (LaD) model. J Hydromet, 2002, 3(3): 283—299[DOI]
31 Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. The global land data assimilation system. Bull Am Met Soc, 2004, 85: 381—394[DOI]