

弹簧式连续重力观测非线性漂移影响因素分析\*

韦 进<sup>1,2,3)</sup> 刘高川<sup>4)</sup> 李 辉<sup>1,2)</sup> 申重阳<sup>1,2)</sup> 姚 焱<sup>1,2)</sup>

- (1)武汉大学测绘学院,武汉 430079  
(2)中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室),武汉 430071  
(3)中国地震局地壳应力研究所武汉科技创新基地,武汉 430071  
(4)中国地震台网中心,北京 100045

**摘 要** 利用姑咱地震台超过3年半的连续重力观测资料、降雨数据、地下水位资料和全球陆地水模型观测资料,采用多项式拟合和相关分析研究弹簧重力仪非线性漂移特征与外界因素干扰的关系。结果表明:姑咱地震台DZW型重力仪长期连续重力观测的漂移具有明显的线性特征(约 $1\,200\times10^{-8}\text{ms}^{-2}/\text{a}$ ),并且在人员进洞调整仪器时还会产生非线性漂移。在考虑固体潮、气压潮和极潮的影响后,利用多项式分段进行非线性漂移改正,重力残差变化量级为 $\pm(10\sim15)\times10^{-8}\text{ms}^{-2}$ ,而且3年间4次雨季都同步有明显的重力正异常变化相对应。研究不仅揭示了弹簧重力仪的非线性漂移与外界影响因素的关系,同时也为改正漂移与排除水负荷对重力的干扰提供了新的分析和处理方法。

**关键词** 连续重力观测;弹簧重力仪;漂移规律;水负荷;季节性  
**中图分类号:**P312.4 **文献标识码:**A

ANALYSIS OF NON-LINEAR DRIFT OF SPRING GRAVIMETER

Wei Jin<sup>1,2,3)</sup>, Liu Gaochuan<sup>4)</sup>, Li Hui<sup>1,2)</sup>, Shen Chongyang<sup>1,2)</sup> and Yao Yao<sup>1,2)</sup>

- (1) School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079  
(2) Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071  
(3) Wuhan Base of Institute of Crustal Dynamics, CEA, Wuhan 430071  
(4) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045

**Abstract** More than 3 years gravity data recorded at Guza seismostation using DZW gravimeter are analyzed along with ground water, precipitation and two global continental water storage models (GLDAS, CPC). It is shown that the linear drift of the instrument is about  $1\,200\times10^{-8}\text{ms}^{-2}/\text{a}$  stably. Furthermore, after artificial disturbance (such as power interrupt, re-start, lightning), the instrument drift is inconsistent with the previous, so called non-linear drift that is different from linear drift. Corrected with polynomial fitting method considering the barth tide, air pressure and polar tides, the gravity residual is  $\pm(10-15)\times10^{-8}\text{ms}^{-2}$  and shows 4 gravity anomalous variations synchronous with the precipitation for 3 years. So, this research indicates that the drift rule of spring gravity for long time and supply a new method for correcting drift and obtaining gravity variations affected by water loading.

**Key words:** continuous relative gravimeter; spring gravimeter; drifting pattern; water load; seasonality

\* 收稿日期:2012-03-09  
基金项目:国家自然科学基金(41204058,40974015);全国重力台网学科中心运行经费(201201008);中国地震局地震研究所所长基金(IS201156069)  
作者简介:韦 进,男,1981年生,助理研究员,博士,主要从事连续重力观测数据处理及地球物理解释. E-mail: pierce212@163.com

# 1 引言

连续重力观测能够精确探测到地球系统各圈层物质迁移引起的重力变化效应,包括叠加在一起的长期(多年的)或短期(季节性的)的变化<sup>[1-3]</sup>。中国地震局在全国 22 个省市先后安装了约 60 台套弹簧型重力仪<sup>[4,5]</sup>。然而在提取重力非潮汐变化时,除了仪器自身的故障、人为因素或供电系统的干扰外,重力长期变化通常被弹簧重力仪的漂移所淹没。为此 Riccardi<sup>[6]</sup> 利用 gPhone054 弹簧重力仪和 GWRC026 比测研究了 gPhone 重力仪的漂移特性,认为可以利用多项式对弹簧重力仪的漂移进行改正。并且改正后的残差时间序列能够反映重力的非潮汐变化。文献[7]利用分段多项式拟合漂移的方法对数字地震观测网络中的 7 台 gPhone 重力仪超过 2 年的观测数据进行了分析,认为残差时间序列和全球水负荷模型之间都共同存在着季节性因素的影响。考虑到比测条件的苛刻和全球模型和本地台站之间的差异,本文以 DZW 型连续重力观测仪和辅助观测较为全面的姑咱地震台为例,利用多项式拟合研究其漂移特性<sup>[8-11]</sup>和改正方法。利用降雨观测、地下水位观测、全球陆地水模型验证漂移改正的结果,为弹簧型连续重力观测仪的数据处理提供可行的办法来研究由于物质迁移引起的重力变化。

# 2 漂移模型

考虑到弹簧型重力仪的长期重力非潮汐变化的主要影响包括潮汐的影响和重力非潮汐影响(公式(1))。本文假设自然因素的影响、人为因素的影响、重力仪弹性特征引起的线性特征构成了弹簧重力仪的重力非潮汐特征(公式(2))。

$$g_{\text{spring\_gravimeter}} = g_{\text{tide + ocean}} + g_{\text{non-tide}} + \varepsilon \tag{1}$$
$$g_{\text{non-tide}} = g_{\text{non-linear-drift}} + g_{\text{linear-drift}} + \varepsilon_1 \tag{2}$$
$$g_{\text{non-linear-drift}} = g_{\text{human}} + g_{\text{envirment}} + \varepsilon_2 \tag{3}$$

方程(1),重力观测数据  $g_{\text{spring\_gravimeter}}$  主要由潮汐部分  $g_{\text{tide + ocean}}$ , 非潮汐部分  $g_{\text{non-tide}}$  和误差  $\varepsilon$  组成; 方程(2),假设非潮汐部分主要是有弹簧固有的线性漂移  $g_{\text{linear-drift}}$  和自然环境、人为因素的影响产生的  $g_{\text{non-linear-drift}}$ 。方程(3),环境因素影响  $g_{\text{envirment}}$  主要是由地球自转导致的极移潮  $g_{\text{pol}}$ , 气压负荷  $g_{\text{air}}$ , 水负荷  $g_{\text{waterload}}$ , 构造变化  $g_{\text{structure}}$  组合而成。而由于地面仪器通常需要人工干预才能正常运行因此认为该部分重力变化为  $g_{\text{human}}$ 。上述自然和人为影响以及模型误差  $\varepsilon_2$  组成重力非线性漂移特征。

# 3 姑咱 DZW 重力仪漂移特性分析

弹簧类重力观测系统不仅存在弹簧本质特征产

生的线性漂移,而且受到外界因素的干扰产生非线性漂移。

1) 弹簧重力仪线性漂特征分析

在剔除明显的错误数据后,将传统的 Nakai 检验算法<sup>[12,13]</sup> 应用到姑咱地震台 DZW 型重力仪 2007-07-01—2011-04-29 的分钟采样观测数据中,以 1 天 1440 分钟为窗长进行分析。比例系数、多项式常数项、一次项和二次项分析结果见图 1(图 1(a) 中白色线为比例系数线性拟合线;图 1(c,d) 中白色线为傅里叶级数拟合弹簧重力仪漂移一次和二次项序列)。

如图 1 所示,比例系数的时间序列值在 1.125 ~ 1.175 之间变化。观测时间序列中比例系数出现了超过 3 倍中误差以上的观测时段,然而整个时间段内该重力仪的潮汐观测基本稳定。漂移和外界因素干扰的参数如图 1(b)、(c)、(d) 所示。分钟采样观测数据不仅存在超过  $1\,200 \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}/\text{a}$  (约合  $3.53 \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}/\text{d}$ ) 的稳定线性漂移,残差部分观测数据 1 次项(振幅  $\pm 15 \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}/\text{d}$ ) 和 2 次项(振幅  $\pm 15 \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}/\text{d}^2$ ) 中都存在明显的周期性变化规律。这表明,该弹簧重力仪能较为稳定地进行潮汐观测。此外重力观测的最大影响是重力仪的线性漂移。

2) 非线性漂移的特征判定

假设在没有人有干扰情况下,该弹簧漂移长期处于稳定状态。因此利用一次线性函数改正图 1(b) 中的重力常数项时间序列中的线性漂移。根据公式(3),改正后的残差主要包含了非线性漂移(如图 2(a))。利用 3 次人为进洞时间点作为分段处,将长达 3 年多的观测数据分为 4 段进行非线性漂移特征的研究,效果如图 2(a) 和表 1。

从图 2(a) 中的常数项时间序列可以明显看到,工作人员在 2008、2009、2010、2011 年初都进洞进行仪器调整。除 2008 年外,其他各年份年初和年末均出现了重力的异常变化。对图 2(a) 的重力残差时间序列用 1~9 天的窗长分布进行差分计算,分析非线性漂移、噪声水平和采样数之间的相互关系。

如表 1 所示:窗长的选择对漂移项的影响(只有  $(0.01 \sim 0.03) \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}/\text{d}$  的差异)远远小于时段的。而观测整体时段的非线性漂移仅与 A 时段的基本一致。这些表明:虽然弹簧重力仪长期存在较为稳定的线性漂移,但外界因素的影响,导致了弹簧重力仪漂移特征的改变,形成非线性漂移。

根据超导重力仪的数据分析方法,列举可能影响重力场变化的各项因素(气压、极移、陆地水)。图 2 计算了这些因素同时间段的影响时变规律。结

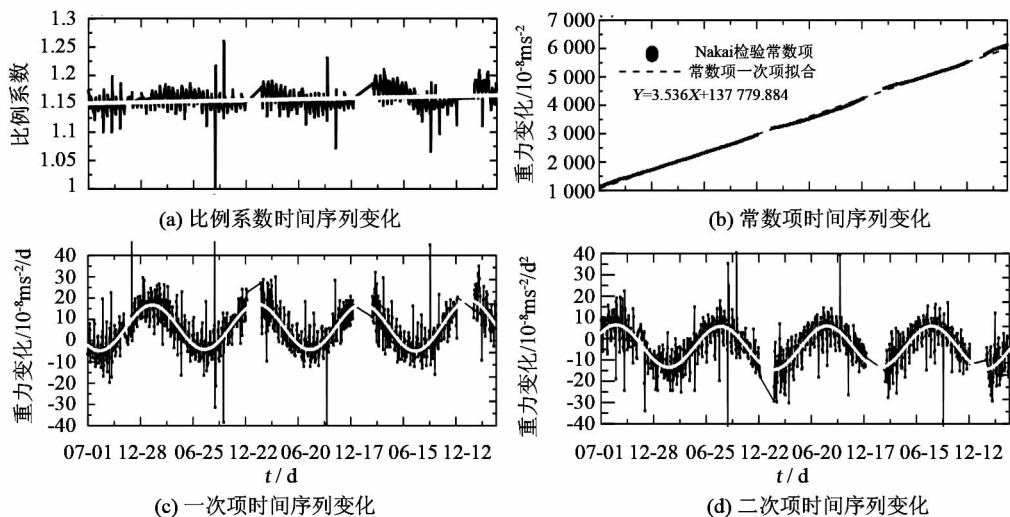


图 1 比例系数、常数项、一次项、二次项时间序列变化

Fig. 1 Time series of the variation of constant, linear, quadratic and proportion coefficient

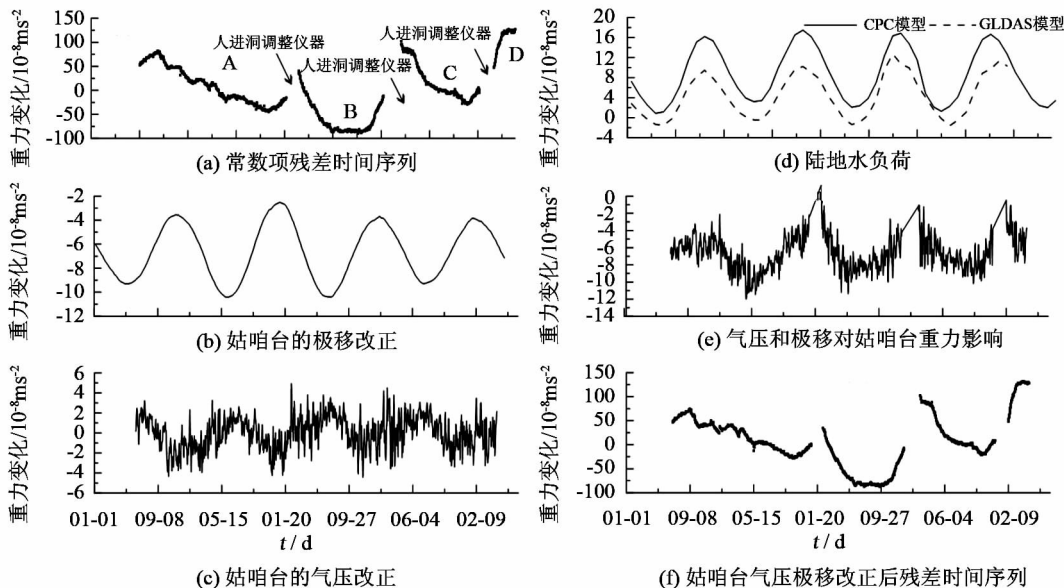


图 2 线性漂移改正后的时间序列

Fig. 2 Constant time series corrected by linear fitting

果表明:姑咱地震台的外界环境因素通常形成了振幅为 $\pm(4\sim10)\times10^{-8}\text{ms}^{-2}$ 、周期为年的重力变化,约只有图 2(a)非线性漂移( $\pm(50\sim100)\times10^{-8}\text{ms}^{-2}$ )的 1/10 的量级。同时文献[14]的研究表明,即使在构造运动变化剧烈的地区引起的重力变化通常是一个超过年周期且变化缓慢的过程。而且量级也无法和上述非线性漂移时间序列中段期骤变现象对应。考虑全球陆地水模型<sup>[15]</sup>的区域特征和本地特征的独特差异,将残差时间序列仅进行气压和极移改正后(如图 2(e)、(f))。重力残差时间序列的量级没有发生明显的变化。这表明图 2(a)中短期剧烈的重力变化不是自然环境或构造运动产生的,而是人为进洞因素导致弹簧特性改变形成的。

因此为了提取微弱的、长期的周期性变化的地球物理信号,必须分别对人为干扰因素产生的非线性漂移分时段地进行改正。本文利用 1 天为窗长和分段多项式拟合的方式对残差时间序列中的非线性漂移进行改正获得了更加微弱的重力变化信号。

4 非线性漂移分析及其检验

1) 分段漂移改正和特征分析

利用分段多项式对已经进行了气压和极移改正的非线性漂移时间序列进行改正获得重力残差。同时利用全球陆地水模型、地下水位观测以及日降雨量和改正后的重力残差时间序列进行比较和分析,其分析结果如表 2 及图 3。

表 1 窗长、漂移和时序噪声水平相关性  
Tab. 1 Correlation between windows length, drift rate and noise level

时段长度	采用窗长	平均漂移 $10^{-8}\text{ms}^{-2}/\text{天}$	噪声水平 $10^{-8}\text{ms}^{-2}/\text{天}$	采样数	时段长度	采用窗长	平均漂移 $10^{-8}\text{ms}^{-2}/\text{天}$	噪声水平 $10^{-8}\text{ms}^{-2}/\text{天}$	采样数
A	1	-0.124 2	2.091 1	545	D	1	0.996 7	2.181 6	79
	3	-0.131 7	1.080 5	181		3	0.971 4	1.383 8	26
	5	-0.124 2	0.787 9	109		5	0.978 6	1.388 4	15
	7	-0.132 2	0.638 5	77		7	0.974 4	1.129 5	11
	9	-0.131 3	0.601 7	60		9	1.012 95	1.186 5	8
B	1	-0.169	1.910 3	316	C	1	-0.353 7	2.056 7	292
	3	-0.166	1.128 1	105		3	-0.367 38	1.165 2	97
	5	-0.166 6	1.071 3	63		5	-0.348 41	0.914 1	58
	7	-0.166 6	0.966 5	45		7	-0.340 57	0.828 6	41
A,B	9	-0.166 6	0.925 3	35	A,B	9	-0.343 06	0.790 3	32
	1	-0.118 3	2.064	1 232		7	-0.123 3	0.829 3	172
C,D	3	-0.111 9	1.182 8	407	C,D	8	-0.129 3	0.813 5	152
	5	-0.115 8	0.944 7	244		9	-0.121 6	0.784 6	133

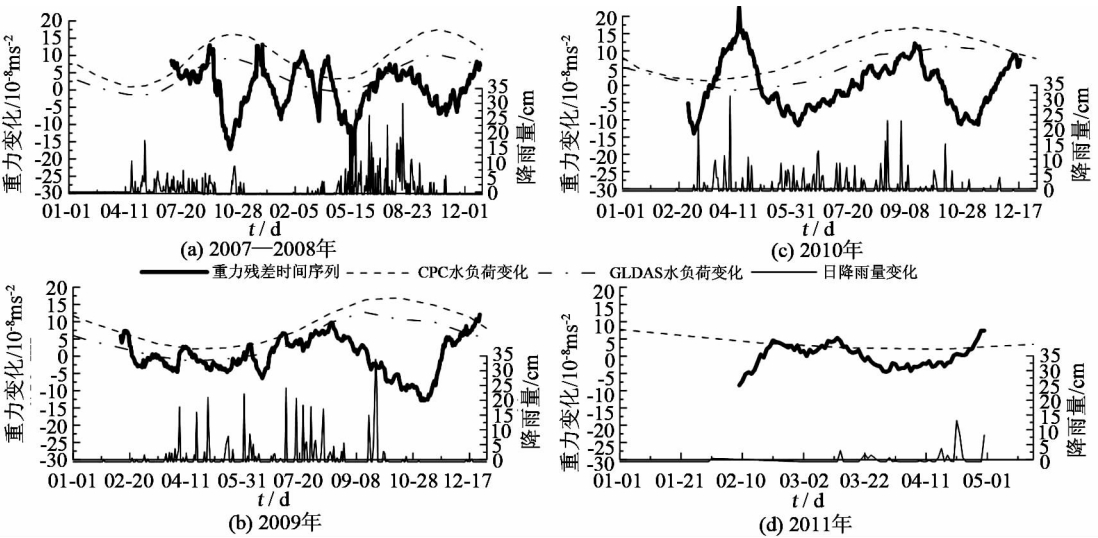


图 3 分段拟合后的重力残差时间序列、水负荷和降雨量的比较  
Fig. 3 Comparison of residual gravity corrected by linear fitting with water loading and rainfall

表 2 年降雨量和残差变幅相关性  
Tab. 2 Correlation between the yearly rainfall and the amplitude of residual gravity

年份	2007	2008	2009	2010	2011
降雨量 (cm)	344.84	678.53	490.53	479.73	58.05
残差变幅 ( $10^{-8}\text{ms}^{-2}$ )	$\pm 5$	$\pm 13$	$\pm 10$	$\pm 10$	$\pm 5$
CPC 水储量变幅 ( $10^{-8}\text{ms}^{-2}$ )	$\pm 6$	$\pm 6$	$\pm 6$	$\pm 5$	—
GLDAS 水储量变幅 ( $10^{-8}\text{ms}^{-2}$ )	$\pm 5$	$\pm 6$	$\pm 6$	$\pm 5$	—

如图 3 所示,2007—2011 年,姑咱地震台经过了 4 个雨季(2011 年观测数据不在雨季时间序列之内)。而表 3 中统计的各年降雨量和重力残差时间序列的变幅统计表表明:2008 年降雨量是观测期内

年降雨量最多的年份,同时也是残差时间序列变幅最大的年份(约  $\pm 13 \times 10^{-8}\text{ms}^{-2}$ )。2007 年的降雨量相对较少,重力残差时间序列也仅表现约为  $\pm 5 \times 10^{-8}\text{ms}^{-2}$ 。连续 4 年的降雨量和重力残差变幅都呈现为正相关特征。上述规律和全球模型存在差异,认为主要是因为本地台站的局部特征和全球水负荷模型的区域特征之间的差异。

从全球陆地水负荷、日降雨量和重力残差时间序列的比较来看,无论是日降雨量还是全球陆地水模型之间都呈现年度周期性变化特征。日降雨量和重力残差时间序列相比,2008 年 5—8 月,2009 年 4—7 月和 2010 年 3 月和 9 月降雨高峰时,重力残差时间序列呈现波峰状态;而在非雨季(2007 年 10—2008 年 5 月,2009 年 10—2010 年 2 月)也出现

了重力超过  $\pm 5 \sim 10 \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}$  的变化,这一变化是否与本地区其它因素有关还有待研究。

2)分段数据组合

将上述4个连续重力观测时间段合并起来,和台站日降雨量、地下水位变化以及全球陆地水模型(CPC和GLDAS)观测序列整体进行比较。结果表明:在2009年和2010年日降雨量增加时段内地下水位呈现突增现象,而没有明显降雨的时段地下水位呈现缓慢下降。同时,除和陆地水模型之间存在明显的约1~2个月的相位滞后特征外,日降雨和本地地下水位及其区域水负荷模型也具有极好的一致性规律。在2007年—2011年5年间的4次雨季内,依次都有对应的重力异常变化与之对应。而非雨季时段出现的重力异常变化特征,可能和本地区其它因素影响有关(图4)。由图4可见,姑咱地震台4年的连续重力观测重力残差时间序列仅  $\pm 5 \sim 10 \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}$  的振幅变化。该结果与GLADS和CPC模型所模拟的大陆水负荷变化的振幅基本一致。重力残差时间序列和日降雨量相比表明:当日降雨量增大时,残差时间序列出现明显的重力抬升现象,而日降雨量减小时,重力残差回落(见图3)。且这一规律和地下水位变化也基本一致,即地下水位上升重力增加,反之减小。

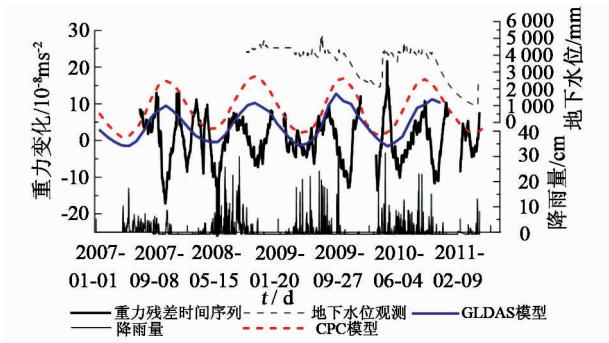


图4 重力残差时间序列与降雨量、地下水等之间的关系  
Fig.4 Relations between the residual of gravity and water loading, rainfall

5 结论和讨论

利用姑咱台超过3年的连续重力观测数据,研究了弹簧重力仪的漂移规律。结果表明:弹簧重力仪存在约  $1\ 200 \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}/\text{a}$  (约合  $3.53 \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}/\text{d}$ ) 的线性漂移规律;人为进洞产生的干扰的量级为  $\pm (50 \sim 100) \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}$ ,超过了由本地气压、极移、陆地水负荷甚至是构造等自然界物理现象的影响。再以3次进洞调整仪器作为时间断点,将整体时间序列分为4个研究部分的基础上,改正了气压和极移的影响后,利用多项式拟合的方法,改正

弹簧重力仪的非线性漂移特征获得重力残差时间序列。同时将改正后结果和本地降雨以及和全球陆地水模型结果进行比较。结果表明:在时变规律上日降雨无论是和全球陆地水模型还是和地下水位结果都具有明显的一致性变化规律。在改正了线性漂移、非线性漂移、固体潮、气压潮和极潮的影响因素后,2007—2011年4月,明显出现的4次雨季都依次有重力异常变化与之正相关。这一规律也由地下水位变化印证。然而在非雨季也出现了重力超过  $\pm (5 \sim 10) \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}$  的重力变化可能本地区其他因素影响有关。综上所述:除仪器自身线性漂移外,人进洞干扰会导致重力观测产生直接掩盖自然界物理现象产生的重力影响。通过分段多项式拟合的方法可以在一定程度上改正弹簧的非线性漂移,为识别和排除水负荷等微弱重力信号提供了新的分析和处理方法。

参 考 文 献

- 1 Sun Wenke, 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, L02303, doi:10.1029/2008GL036512.
- 2 Sun Wenke, et al. A reinvestigation of crustal thickness in the Tibetan plateau using absolute gravity, GPS and GRACE data [J]. Terr. Atmos. Ocean, 2011, 22(2):109-119.
- 3 Sun Heping, et al. Precise tidal gravity recorded with superconducting gravimeters at station Wuhan(China) and Kyoto (Japan) [J]. Journal of Geodesy, 2001, 74:720-729.
- 4 韦进,等. 日本 Mw9.0 地震前的连续重力观测异常[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, (2): 9-11. (Wei Jin, et al. Gravity anomalies in before Mw9.0 earthquake in Japan observed by continuous relative gravimeter in China[J]. Journal of geodesy and geodynamics, 2011, 31(2): 9-11)
- 5 刘子维,等. 日本 Mw9.0 地震前的重力高频扰动[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, (2): 4-8. Liu Ziwei, et al. Pre-seismic gravity disturbance of high frequency before Mw9.0 earthquake in Japan [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31(2): 4-8)
- 6 Riccardi U, Rosat S and Hinderer J. Comparison of the Micro-g LaCoste gPhone-054 spring gravimeter and the GWR-C026 superconducting gravimeter in Strasbourg (France) using a 300-day time series[J]. Metrologia, 2011, 48:28-39.
- 7 Kang Kaixuan, et al. Seasonal variations in hydrological influences on gravity measurements using gPhone[J]. Terr Atmos Ocean, 2011, (22):157-168.
- 8 邢乐林,等. CG-5 重力仪零漂特性研究[J]. 地震学报, 2010, 32(3): 369-373. (Xing Lelin, et al. Study on zero drift characteristics of CG-5 gravimeter [J]. Acta Seismolog-

- ica Sinica, 2010, 32(2):369–373)
- 9 刘子维, 等. SG-053 超导重力仪的观测结果分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, (6):157–160. (Liu Ziwei, et al. Analysis of observations of superconducting gravimeter SG-053 [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, (6):157–160)
  - 10 徐建桥. 重力固体潮汐理论及分析方法——武汉台超导重力仪观测资料的分析处理[D]. 中国科学院测量与地球物理研究所, 1997. (Xu Jianqiao. The theory and analysis of gravity tidal-superconducting gravimeter data analysis and processing in Wuchang station[D]. Institute of Geodesy and Geophysics Chinese Academy of Sciences, 1997)
  - 11 田桂娥, 等. VAV 和 ETERNA 潮汐分析方法的比较和研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, (2): 96–99. (Tian Guie, et al. Comparison and investigation of VAV and ETERNA tidal analysis methods [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, (2):96–99)
  - 12 韦进, 等. 超导重力观测噪声水平的极大似然估计[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, (3): 69–74. (Wei Jin, et al. Noise level measurement of SG-053 with MLE[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, (3):69–74)
  - 13 张锐, 等. 用 SGC053 超导重力仪观测资料对 gPh058 重力仪格值的精密测定[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, (5): 151–155. (Zhang Rui, et al. Accurate determination of scale value of gPh058 gravimeter by use of observations with SGC053 superconducting gravimeter [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, (5): 151–155)
  - 14 孙文科, 等. 高斯滤波在处理 GRACE 数据中的模拟研究: 西藏的重力变化[J]. 中国科学(地球科学), 2011, 41(9): 1327–1333. (Sun Wenke, et al. Effects of Gaussian filter in processing GRACE data: Gravity rate of change at Lhasa, southern Tibet [J]. Sci China Earth Sci., 2011, 54:1 378–1 385, doi: 10.1007/s11430-011-4233-y.
  - 15 周江存, 孙和平, 徐建桥. 用地表和空间重力测量验证全球水储量变化模型[J]. 科学通报, 2009, 54(9): 1 282–1 289. (Zhou Jiangcun, Sun Heping and Xu Jianqiao. Validating global hydrological models by ground and space gravimeter [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(9):1 282–1 289)

(上接第 136 页)

- 学报, 2010, 39(1):1–6. (Yang Yuanxi. Progress, contribution and challenges of Compass/Beidou satellite navigation system[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1):1–6)
- 2 Han S and Rizos C. The impact of two additional civilian GPS frequencies on ambiguity resolution strategies[A]. Proceedings of ION Annual Technical Meeting[C]. Cambridge, MA, 28–30 June, 1999: 315–321.
- 3 伍岳. 第二代导航卫星系统多频数据处理理论及应用[D]. 武汉大学, 2005. (Wu Yue. The theory and application of multi-frequency data processing of GNSS 2[D]. Wuhan University, 2005)
- 4 喻国荣. GPS 三个频率整周模糊度相关性研究[J]. 全球定位系统, 2002, 27(6):38–41. (Yu Guorong. Study on correlation of the three frequencies' ambiguities [J]. GPS World of China, 2002, 27(6):38–41)
- 5 常志巧, 等. 改进的 GPS 模糊度联合降相关算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(12):1 403–1 406. (Chang Zhiqiao, et al. An improved united ambiguity decorrelation for GPS ambiguity solution[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(12):1 403–1 406)
- 6 范建军, 王飞雪, 郭桂蓉. GPS 三频非差观测数据周跳的自动探测与改正研究[J]. 测绘科学, 2006, 31(5):24–26. (Fan Jianjun, Wang Feixue and Guo Guirong. Automated cycle-slip detection and correction for GPS triple-frequency undifferenced observables [J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, :31(5):24–26)