

沈宁, 朱鹏涛, 赵宁, 等. 银川站同址 gPhone 型与 GS-15 型重力仪观测资料对比分析[J]. 华南地震, 2023, 43(3): 52-62. [SHEN Ning, ZHU Pengtao, ZHAO Ning, et al. Comparative Analysis of Observation Data of gPhone and GS-15 Gravimeter in Yinchuan Station [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(3): 52-62]

银川站同址 gPhone 型与 GS-15 型重力 仪观测资料对比分析

沈宁¹, 朱鹏涛², 赵宁¹, 张燕霞¹

(1. 宁夏回族自治区地震局银川地震监测中心站, 银川 750001; 2. 宁夏回族自治区地震局, 银川 750001)

摘要: 基于银川站同址 gPhone 和 GS-15 重力仪两年的观测资料, 进行潮汐分析和提取重力非潮汐残差处理, 从潮汐参数精度、记震能力、抗干扰能力、映震能力等方面进行了对比分析。利用 VAV 调和计算了气压改正前后两台仪器的潮汐参数, 发现该站 gPhone 各波群潮汐参数精度均低于 GS-15 这一现象, 即 GS-15 运行更为稳定。气压改正后显示 GS-15 有 3 种波群潮汐参数变化较大, 而 gPhone 只有 S1 波较明显。非潮汐残差显示 gPhone 受抽水影响较 GS-15 严重, 两次地震前有扰动现象。

关键词: 重力仪; 对比分析; 调和计算; 潮汐参数; 非潮汐变化

中图分类号: P315.63

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)03-0052-11

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.03.07

Comparative Analysis of Observation Data of gPhone and GS-15 Gravimeter in Yinchuan Station

SHEN Ning¹, ZHU Pengtao², ZHAO Ning¹, ZHANG Yanxia¹

(1. Yinchuan Earthquake Monitoring Central Station, Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China; 2. Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China)

Abstract: Based on the two-year observation data of gPhone and GS-15 gravimeter at the same site of Yinchuan Station, the tidal analysis and extraction of gravity non-tidal residuals are carried out, and the comparative analysis is made from the tidal parameters accuracy, the earthquake recording ability, anti-interference ability and earthquake reflection ability. The tidal parameters of the two instruments before and after atmospheric correction are calculated by using VAV harmonic analysis. It is found that the accuracy of tidal parameters of each wave group of gPhone is lower than that of GS-15, that is, GS-15 is more stable. It is also found that the tidal parameters of three wave groups of GS-15 vary greatly after atmospheric correction, while only S1 wave is more obvious in Gphone. The non-tidal residuals show that the gPhone data is more seriously disturbed by pumping than

收稿日期: 2022-09-20

基金项目: 中国地震局监测、预测、科研三结合课题(CEA-JC/3JH-16300X)

作者简介: 沈宁(1985-), 男, 工程师, 从事地震监测与研究方面的工作。

E-mail: shenning_47@163.com

GS-15, and there is disturbance before the two earthquakes.

Keywords: Gravimeter; Comparative analysis; Harmonic analysis; Tidal parameters; Non-tidal variation

0 引言

台站重力观测是利用高精度重力仪连续记录区域重力场的时间变化特征和规律^[1]。国际上有专门工作机构负责选定特定地点进行绝对重力仪的比测^[2]，国内外研究学者也做过很多相对重力仪对比研究^[3]，研究表明超导重力仪是目前观测精度最高的重力仪^[3-5]。同时，良好的外部观测环境，也可以使得弹簧重力仪的潮汐观测精度达到超导重力仪(SG)的观测量级^[6-7]。

不同台站不同潮汐波群的振幅因子和相位差测定精度为同一量级，但有所差异，除了仪器本身外，主要是台站周边气温、气压、地下水和地质结构的不同决定，经过各种改正后观测精度有所提高^[3]。那么同一台站不同仪器的观测资料有何差异，以及他们对温度、气压等干扰因素的反应有何不同，利用国内外重力研究方法与结果，有必要对两者进行一系列的评估研究。

银川地震监测中心站(以下简称银川站)现有两套相对重力观测设备，处于同一个观测山洞内，至今仍并行观测。GS-15是德国阿斯卡尼亚公司生产金属弹簧重力仪，70年代稳定运行至今。gPhone是由美国 Micro-g 公司生产的金属零长弹簧相对重力仪^[8]，是“中国大陆构造环境监测网络”(简称

“陆态网络”)^[9]在2010年投入使用的连续重力仪。

本文将从两台重力仪记录情况，观测资料潮汐参数精度，仪器稳定性，记震能力以及抗干扰能力等方面做深入的对比分析，同时对非潮汐数据的变化做了分析。为重力仪器研发，地震预测研究，提取地震前兆信息奠定良好基础。

1 台站及观测系统概况

银川站位于银川断陷盆地腹部，位于贺兰山东麓断裂，贺兰山东麓有较宽的断裂带，断层活动性强，断层崖面清晰，山体相对上升，冲沟发育，沟谷坡降比大，深切呈“V”字型，沟口洪积扇发育，呈洪积倾斜平原带，其上有第四纪全新世以来的活动断层陡坎。

银川站观测山洞为基岩型台站，岩性由前震旦系的花岗片麻岩构成，弱富裂隙水。观测山洞位于贺兰山东麓断裂西侧，海拔1545 m，进深90余米，宽1.6 m，呈“之”字型，日温差<0.01℃，年温差<0.5℃，平均温度为12.87℃，相对湿度<50%，山洞顶部基岩覆盖层厚度大于50 m。GS-15重力仪位于2号洞室，gPhone位于5号洞室，图1所示。距山洞西偏南270 m沟谷中有一深112.58 m井，每年3~11月份间歇性抽水，对观测资料造成不同程度的影响。

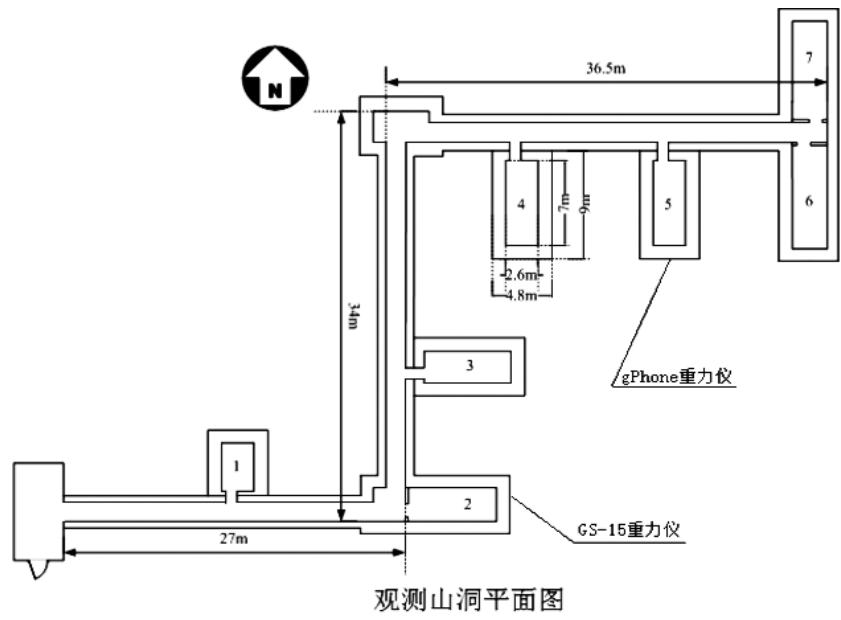


图1 观测山洞平面示意图

Fig.1 Schematic plan of observation cave

银川站现运行的GS-15重力仪是中国地震局重力台网观测基本台之一,仪器编号:125。于1974年架设,1981年将该重力仪移至山洞内观测,该仪器直接量程 $2\times10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,分辨率 $0.5\times10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,仪器每月零漂小于 $1\times10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,采样率为1次/min。2001年完成数字化改造,至今已运行40多年,积累了大量可靠资料。同时,银川站也是“陆态网络”连续重力站之一,在山洞内有

gPhone重力仪1台,仪器编号:065,自2010年8月开始运行,拥有连续稳定的重力变化连续观测数据。gPhone重力仪是由美国Micro-g公司生产的金属弹簧相对重力仪,直接量程 $7000\times10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,精细测量过程中的动态量程为 $100\times10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,分辨率 $0.1\times10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,仪器每月零漂小于 $1\times10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,可保证仪器的长期观测,而不用调整量程,目前采样率为1次/s^[8]。

表 1 两台重力仪指标
Table 1 Indicators of two gravimeters

型号	产地	构造标准	直接量程 ($10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	零飘 ($10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{月}$)	读数分辨率 ($10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	设计精度 ($10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	采样率	运行时间/年
GS-15	德国阿斯卡尼亚	斜拉金属弹簧	2	≤ 1	0.5	1	1 min	1974
gPhone	美国劳雷	斜拉金属零长弹簧	7000	≤ 1	0.1	1	1 s	2010

2 数据处理与分析

在利用重力潮汐仪器观测时间序列的同时,除了将地震信息记录下来,不可避免的会受到干扰信号。式(1)可知两台重力仪观测到的原始数据包括潮汐、非潮汐及其它干扰信号。

$$\Delta g_{\text{obs}} = \Delta g_{\text{tide}} + \Delta g_{\text{sin gal}} + \Delta g_{\text{drift}} + \varepsilon \tag{1}$$
式(1)中, Δg_{obs} 为重力仪观测到的重力固体潮观测值, Δg_{tide} 为潮汐数据, $\Delta g_{\text{sin gal}}$ 为非潮汐数据, Δg_{drift} 为重力仪的零漂, ε 为噪声数据。

研究固体潮汐,通常需要用数字滤波从潮汐变化背景值上分离出非潮汐成分。而为了全面评价某套重力仪观测资料的精度,通常用Nakai检验均方误差,潮汐因子的稳定性以及调和分析的精度指标来衡量。而所记录到的非潮汐变化,可用于研究与地震的关系。

2.1 数据处理

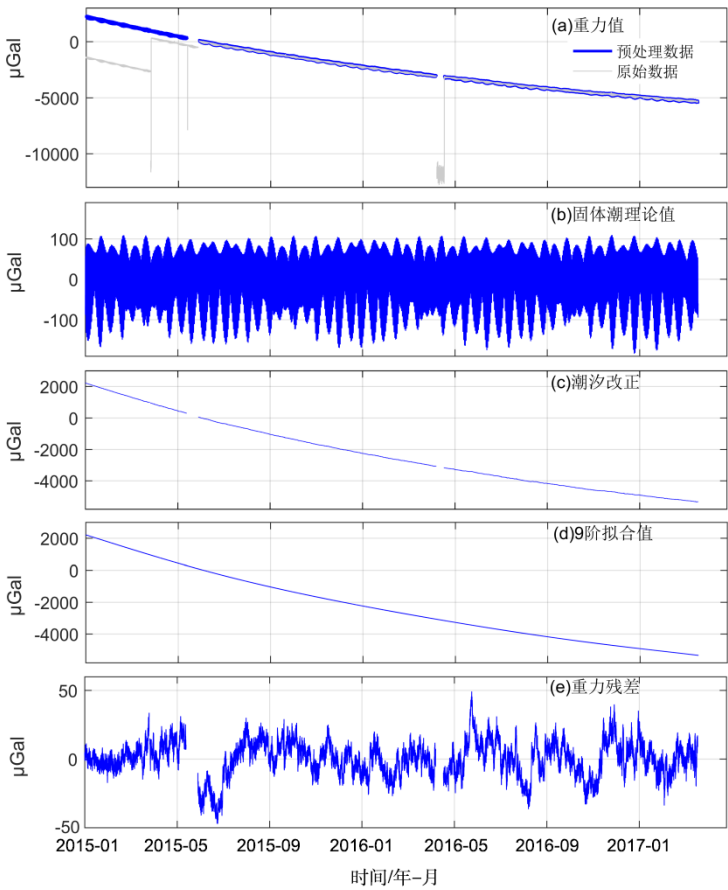
选取两台重力仪数据时间范围从2015年1月1日至2017年3月6日。观测数据中包含较多突跳、缺数、台阶和地震干扰等,特别是gPhone数据受断电或网络因素影响较多造成了一些台阶和断数并非连续稳定。这些干扰信号会影响后续分析,需进行识别和消除^[14-15]。利用Tsoft等软件可以完成各种干扰的改正工作。

因为gPhone重力仪数据为秒采样,还需对其进行降采样处理,提取出分钟值数据。图2显示了

银川站两台重力仪原始数据时间序列及去除零漂后的重力残差,gPhone具有负向线性零飘且零飘大的特点,年变幅为 $3\times10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{年}$ 。GS-15年变化规律,正向零漂,年变幅为 $1\times10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{年}$ 。gPhone的零漂比GS-15的大很多。

去除零漂后GS-15的观测值在 $-150\sim100(10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ 之间变化,表现出“夏高东低”的年变化趋势,这与洞温保持一致性,图3所示。因GS-15为70年代引进,恒温系统欠合理,加热丝布设稀疏,其温度系数仍为 $500\times10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}/^{\circ}\text{C}$,所以抗温度干扰能力较低^[16]。而gPhone的观测值在 $-100\sim600(10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ 之间变化。因其是双层恒温结构,恒温系统更为先进,保证了仪器不受外界温度变化的影响^[8]。

利用“消去法”将大地震扰动、尖峰、仪器的突然掉格和台站的特殊干扰信号去除,并根据资料中断的长度分别采用线性二次或三次回归模型对中断的潮汐数据进行内插,得到完整的残差序列。GS-15数据采用了4阶多项式分段拟合的方法去零漂,消除掉了洞温造成的影响。gPhone数据因零飘较为线性采用9阶多项式拟合去零漂。然后再用“恢复法”将消去干扰的信号恢复,从而获得完整的重力潮汐观测资料^[14-15]。非潮汐数据是利用“消去法”将原始数据曲线减去线性漂移,固体潮理论值即滤掉潮汐数据,并经过气压改正后得到的剩余的重力残差,它可表征该观测点的微重力变化,图5所示。



(a)重力值(b)固体潮理论值(c)潮汐改正(d)9阶多项式拟合值(e)重力残差
图2 gPhone 重力仪原始数据处理过程及去零漂后残差

Fig.2 The original data of gPhone gravimeter and residual error after zero drift removal

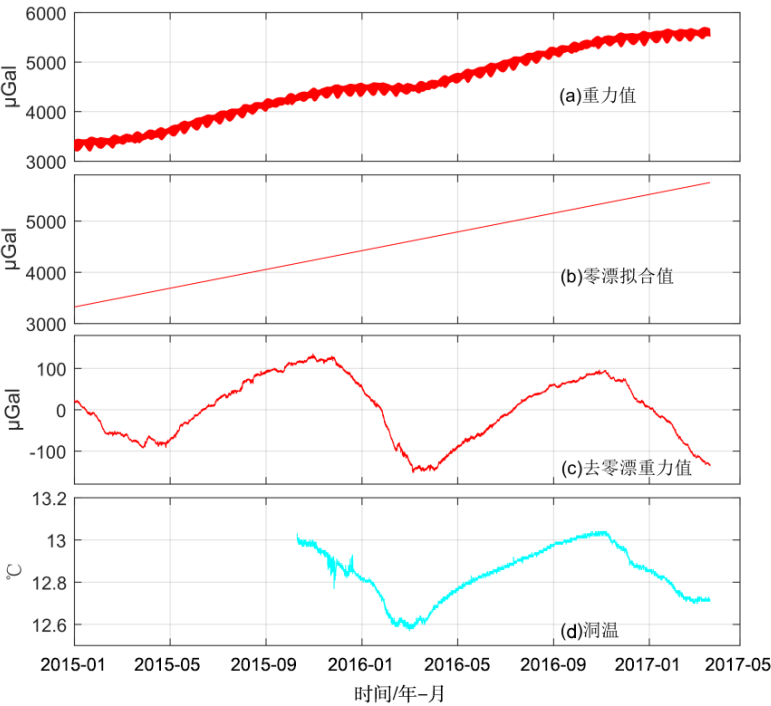
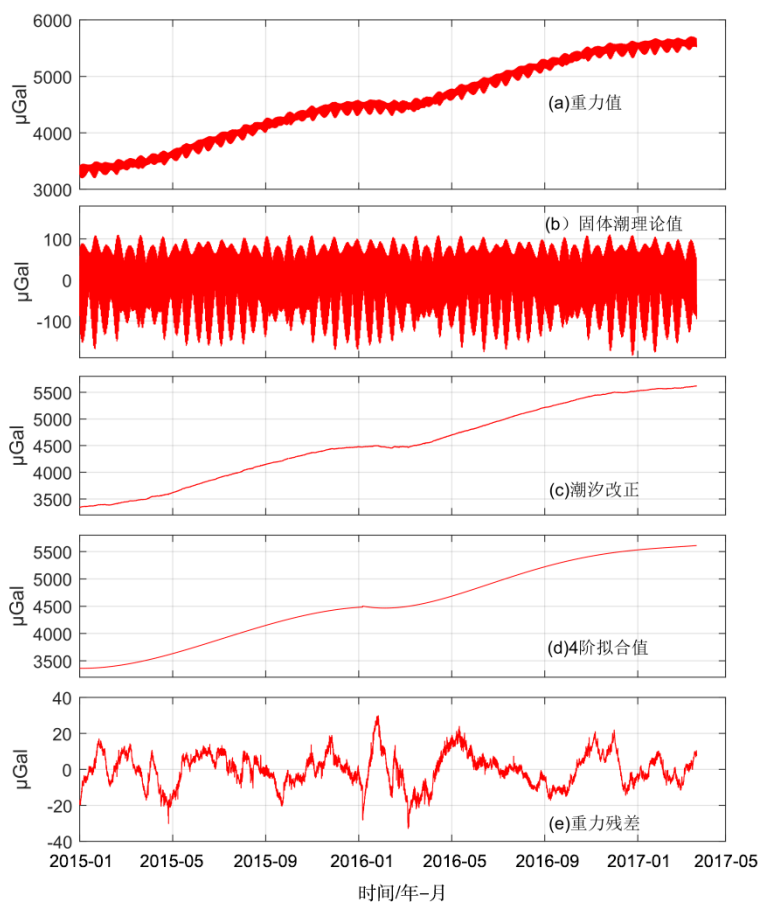


图3 GS-15 重力仪受洞温影响相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of GS-15 gravimeter influenced by the cave temperature



(a)重力值(b)固体潮理论值(c)潮汐改正(d)4阶多项式拟合值(e)重力残差

图4 GS-15重力仪数据处理过程及去零漂后残差

Fig.4 Data processing of GS-15 gravimeter and residual error after zero drift removal

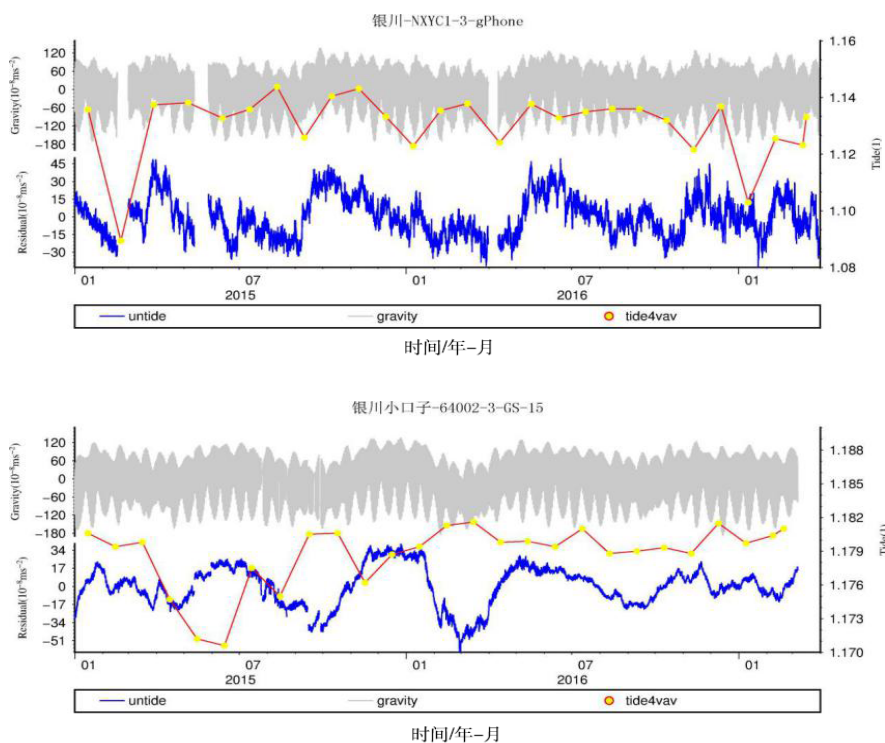


图5 “消去-恢复”法处理后得到的重力固体潮及残差时间序列

Fig.5 Gravity tide and residual time series obtained by "elimination recovery" method

2.2 潮汐分析

将银川站两台重力仪潮汐数据分别进行 VAV 调和分析与 NAKAI 检验, 获得主要潮波的潮汐参数(8个周日波、6个半日波和1个1/3日波初始潮汐因子和相位滞后值)。

调和分析结果由表3可知, GS-15重力仪振幅在 $10\times10^{-9}\text{m/s}^2$ 以上的主要潮波项 O1、P1、K1、2N2、M2 和 S2, 除了 P1 和 2N2 外, 潮汐因子观测精度均可以达到 0.1% 量级, 其中又以 M2 波精度最

高, 可以达到 0.000 68。表4显示 gPhone 重力仪振幅在 $10\times10^{-9}\text{m/s}^2$ 以上的主要潮波项 O1、P1、K1、2N2、M2 和 S2, 只有 M2 潮汐因子观测精度可以达到 0.1% 量级, 为 0.001 02。

图6是两台重力仪各波群潮汐因子及中误差对比结果, 显示 gPhone 重力仪各波群潮汐参数均低于 GS-15 重力仪。而且经过 NAKAI 检验计算, GS-15 总段数为 398 段, 小于 2 的段数为 387 段。而 gPhone 总段数 383 段, 小于 2 的段数只有 27 段, 表2所示。

表 2 GS-15 潮汐参数 VAV 分析结果
Table 2 VAV analysis results of GS-15 tidal parameters

波群名	起始频率/(cpd)	结束频率/(cpd)	潮波振幅/ ($10^{-9}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	潮汐因子	潮汐因子中 误差	相位滞后/ ($^{\circ}$)	相位滞后中误 差/($^{\circ}$)
Q1	0.820 351 312	0.903 576 788	6.836 32	1.178 32	0.006 25	0.025 6	0.304 09
O1	0.923 765 701	0.939 868 435	35.757 95	1.180 04	0.001 22	-0.472	0.059 45
M1	0.958 232 665	0.974 188 045	2.842 27	1.192 85	0.011 91	0.320 99	0.572 05
P1	0.991 786 533	0.998 028 093	16.471 57	1.167 96	0.002 07	-0.249 18	0.101 47
S1	0.999 999 869	1.000 147 225	0.517 43	1.547 22	0.120 81	-8.559 94	4.560 93
K1	1.001 971 907	1.010 951 507	49.374 45	1.158 6	0.000 79	-0.483 81	0.038 8
J1	1.031 434 868	1.044 652 469	2.813 75	1.180 88	0.014 52	-0.453 96	0.704 34
OO1	1.065 607 383	1.112 688 307	1.633 28	1.251 05	0.036 48	-4.144 38	1.671 19
2N2	1.787 107 029	1.872 141 92	10.347 03	1.178 43	0.003 51	-1.514 44	0.170 81
N2	1.890 211 963	1.903 576 657	1.649 96	1.176 91	0.017 28	-1.001 98	0.841 51
M2	1.924 678 928	1.940 487 213	54.115 6	1.18	0.000 68	-1.165 3	0.304 09
L2	1.960 970 575	1.969 478 359	1.544 39	1.191 3	0.025 89	-2.427 83	0.059 45
S2	1.974 041 081	2.000 618 909	25.254 52	1.183 65	0.001 46	-0.929 21	0.572 05
K2	2.002 737 779	2.079 119 303	0.233 99	0.040 3	0.042 32	-18.806 56	0.101 47
M3	2.825 827 13	2.971 906 814	0.785 96	1.115 92	0.014 41	-1.581 66	4.560 93

表 3 gPhone 潮汐参数 VAV 分析结果
Table 3 VAV analysis results of gPhone tidal parameters

波群名	起始频率/(cpd)	结束频率/(cpd)	潮波振幅/ ($10^{-9}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	潮汐因子	潮汐因子中 误差	相位滞后/($^{\circ}$)	相位滞后中误 差/($^{\circ}$)
Q1	0.820 351 312	0.903 576 788	6.639 83	1.146 78	0.015 55	0.458 98	0.777 32
O1	0.923 765 701	0.939 868 435	34.747 22	1.149 02	0.003 03	0.326 07	0.151 23
M1	0.958 232 665	0.974 188 045	2.671 86	1.123 61	0.029 63	0.014 04	1.510 92
P1	0.991 786 533	0.998 028 093	16.059 59	1.141 07	0.005 13	0.213 84	0.257 85
S1	0.999 999 869	1.000 147 225	0.500 89	1.500 82	0.301 78	-61.490 55	11.566 19
K1	1.001 971 907	1.010 951 507	48.192 61	1.133 17	0.001 95	0.342 98	0.098 58
J1	1.031 434 868	1.044 652 469	2.723 1	1.145 16	0.035 96	4.071 94	1.798 95

(转下表)

(接表 3)

波群名	起始频率/(cpd)	结束频率/(cpd)	潮波振幅/ ($10^{-9}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	潮汐因子	潮汐因子中 误差	相位滞后/($^{\circ}$)	相位滞后中误 差/($^{\circ}$)
Q1	0.820 351 312	0.903 576 788	6.639 83	1.146 78	0.015 55	0.458 98	0.777 32
O1	0.923 765 701	0.939 868 435	34.747 22	1.149 02	0.003 03	0.326 07	0.151 23
M1	0.958 232 665	0.974 188 045	2.671 86	1.123 61	0.029 63	0.014 04	1.510 92
P1	0.991 786 533	0.998 028 093	16.059 59	1.141 07	0.005 13	0.213 84	0.257 85
S1	0.999 999 869	1.000 147 225	0.500 89	1.500 82	0.301 78	-61.490 55	11.566 19
K1	1.001 971 907	1.010 951 507	48.192 61	1.133 17	0.001 95	0.342 98	0.098 58
J1	1.031 434 868	1.044 652 469	2.723 1	1.145 16	0.035 96	4.071 94	1.798 95
OO1	1.065 607 383	1.112 688 307	1.586 2	1.217 45	0.091 04	-3.398 84	4.285 44
2N2	1.787 107 029	1.872 141 92	10.112 42	1.143 76	0.005 25	0.328 34	0.263 1
N2	1.890 211 963	1.903 576 657	1.614 34	1.143 55	0.025 96	-1.240 49	1.300 78
M2	1.924 678 928	1.940 487 213	52.709 45	1.141 41	0.001 02	0.591 49	0.051 08
L2	1.960 970 575	1.969 478 359	1.507 69	1.154 96	0.038 69	0.691 53	1.919 28
S2	1.974 041 081	2.000 618 909	24.490 68	1.139 92	0.002 18	0.890 73	0.109 53
K2	2.002 737 779	2.079 119 303	0.452 09	0.077 32	0.063 35	-125.452 11	46.944 88
M3	2.825 827 13	2.971 906 814	0.778 67	1.094 15	0.050 47	3.659 75	2.643 43

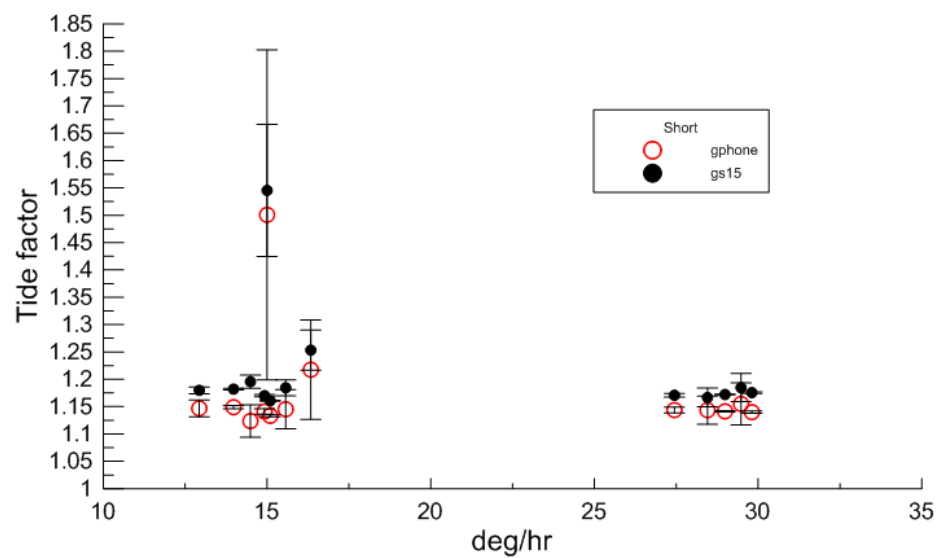


图6 两台重力仪潮汐频段对比

Fig.6 Comparison of tidal frequency bands between two gravimeters

表 4 两台重力仪主要潮波及 NAKAI 检验比较

Table 4 Comparison of main tidal waves and Nakai inspection of two gravimeters

重力仪名称	潮汐参数		NAKAI 检验	
	M2 波潮汐因子	中误差	总段数 398	小于 2 段数
GS-15	1.180 0	0.000 68	398	387
gPhone	1.141 4	0.001 02	383	27

2.3 气压改正前后对比分析

银川站 GS-15 重力仪残差序列的变化与气压变化存在高度的负相关, 气压变化是引起重力漂移的影响因素之一, 这符合气压负荷理论。将气压改正后的重力残差序列利用“恢复法”与固体潮理论值合并得到经过气压改正的潮汐数据。为简化计算, 这里直接使用其他学者计算的银川小口子气压导纳值 $-0.42 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} / \text{mbar}$ 与气压的乘积确定大气重力效应^[17]。虽然可以通过计算获得更为可靠的气压导纳值, 其结果并不影响最终输出结

果^[18]。通过气压改正, 一定程度上提高了潮汐参数精度。

经气压改正后, GS-15 有 3 种波群(S1、M1、M2)潮汐因子和中误差变化较大, 而 gPhone 只有一种波群(S1)变化较明显, 说明 gPhone 的抗气压能力要优于 GS-15, 因 gPhone 对内层空间进行了真空处理, 减少了外部气压变化对仪器的影响。gPhone 的 S1 波潮汐因子在气压改正后下降幅度较大, 达到 23%。两套仪器的 S1 波精度都较差, 气压改正后也无明显变化, 说明除了气压干扰外, 还存在其他因素的影响。

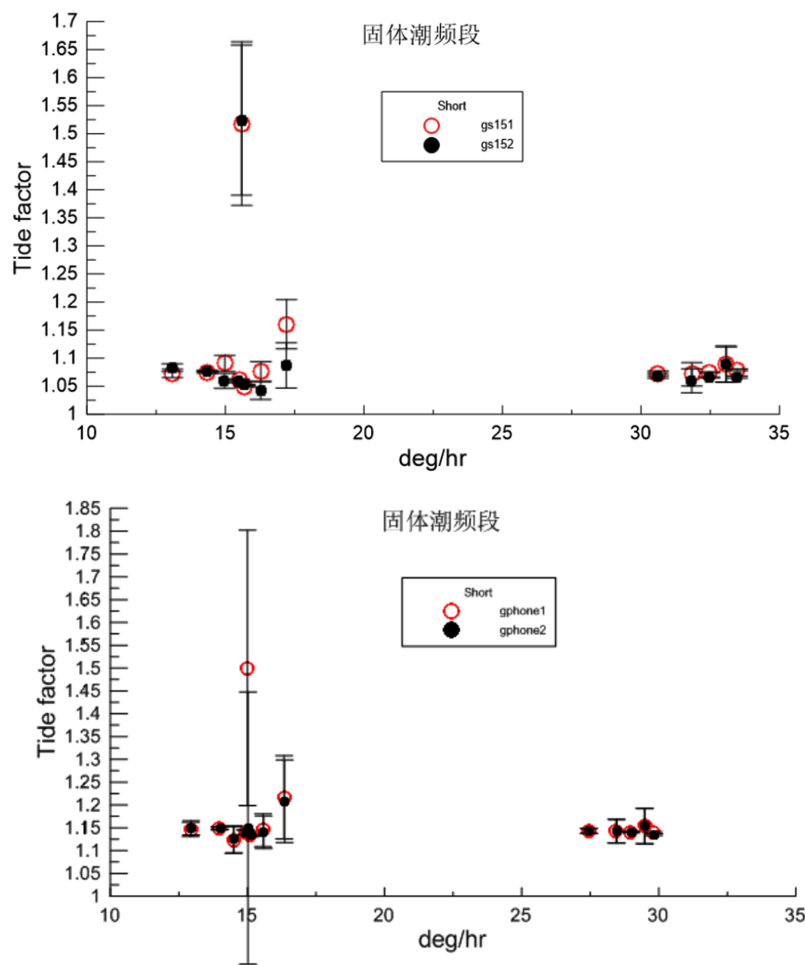


图7 GS-15 和 gPhone 重力仪气压改正前后潮汐参数对比

Fig.7 Comparison of tidal parameters of GS-15 and gPhone gravimeters before and after atmospheric correction

2.4 非潮汐数据分析

非潮汐变化的因素, 远比潮汐变化的因素复杂, 它与地球内部等变化有关, 甚至与地球表层

改正后的非潮汐数据时间序列进行对比。如图6所示。数据显示 gPhone 重力仪非潮汐时间序列总体呈下降趋势, 变化幅度约为 $20 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。GS-15 非潮汐时间序列变化总体平稳, 变化幅度约为 $5 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

地震从孕育到发生是一个从应力积累到能量

释放的过程。在地震孕育过程中,随着震源区应力的不断积累,使得地壳内部的物质发生迁移,致使地壳内部密度发生变化,从而使得该处地表的重力值发生变化^[20]。研究表明,秒采样的重力仪经常记录到大地震前数天之内的扰动异常^[19],为检验银川站两台重力仪在震前有无扰动现象,对2015年4月15日15:39:28内蒙古左旗5.8级和2015年4月25日14:11:24尼泊尔8.1级地震前的数据进行处理。结果显示,gPhone重力仪在两次典型地震前25天有明显扰动现象,图6为去除潮汐和洞温影响,进行气压改正后,非潮汐数据。gPhone从2月中旬开始出现明显的“M”型震前扰动,最大幅度出现在3月底,达到 $40 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,而在此之前非潮汐数据较为平稳,未受到抽水等干扰。分钟采样的GS-15在两个地震前无明显扰动显示。这反应出gPhone对震兆有较好的指示能力。

结合以往银川站的重力资料对宁夏周边中强地震有一定的短临预测意义^[21],该站两台重力仪值得密切关注,这种震前重力变化现象是否为临震异常,需增加震例作进一步的研究。

抽水对银川站山洞内各套仪器观测资料造成不同程度的影响,特别是洞体应变伸缩仪的东西分量,已记录不到固体潮汐,受抽水干扰时畸变较为突出,可以很直观的作为衡量抽水情况的判断标志。将其与重力非潮汐数据同时段进行比较发现gPhone重力仪1月至3月较为平稳,但进入4月份以后,抽水较为频繁,非潮汐数据与抽水时段伸缩仪的变化有明显的对应关系,相关性较好。而GS-15重力仪在抽水时并无明显干扰,非潮汐数据较为平稳。gPhone架设的观测洞室位置同处于伸缩仪东西分量附近,该洞室受到的干扰是否更为严重,还需要做进一步的研究。

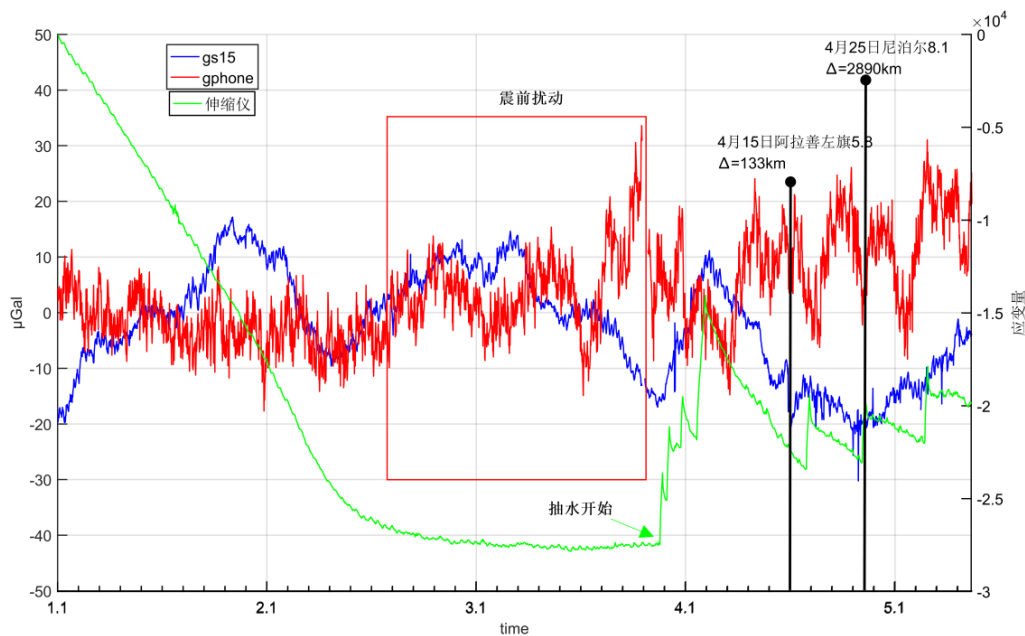


图8 非潮汐重力残差数据分析

Fig.8 Analysis of non-tidal gravity residual data

3 记震能力的对比

重力仪可凸显高频部分的优势,不但能清晰地反映周期在几十秒到几小时的地球自由振荡,也可清晰的记录地震波形,国内外许多学者研究了重力仪同震响应^[10-13]。依据中国地震台网地震目录,选取多个典型地震,利用两套重力仪记录的同震响应情况进行对比(见表3、4。)

通过研究不同震级、震中距的地震对两台重力仪观测数据的影响关系发现。两台重力仪都能很好的记录典型地震同震响应信号,但gPhone记震精度和分辨率远高于GS-15。因gPhone在读数分辨率上远高于GS-15,(gPhone为 $0.1 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,GS-15为 $0.5 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。gPhone动态量程大($100 \times 10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$),远大于GS-15($2 \times 10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$),而GS-15记录到较大地震时会出现限幅(尼泊尔8.1级地震)。

表 5 全球大震及区域典型地震记录情况
Table 5 Global major earthquakes and regional typical earthquake records

发震时刻		震级/(<i>M</i>)	参考位置	震中距	GS15 变化幅度/ (10 ⁻⁵ m·s ⁻²)	gPhone 变化幅度/ (10 ⁻⁵ m·s ⁻²)
2015-04-25	14:11:24	8.1	尼泊尔	20.4°	3.685	17
2015-09-17	06:54:31	8.2	智利中部	172.7°	0.7	0.9
2016-12-09	01:38:45	7.8	所罗门群岛	71.3°	0.8	1.05
2015-04-15	15:39:28	5.8	内蒙古阿拉善左旗	133km	0.6	15.5
2016-01-21	01:13:12	6.6	青海门源	389km	0.105	20

gPhone 的这种高动态响应和秒采样的记录优势同样体现在记录近震及地方震中, 表 4 是 gPhone 重力仪对于宁夏区内典型地震的记震情况。gPhone 可以记录到 1.0 级的地方震响应, 同震响应持续时间随震中距增大而减小, 随震级增大而增大。而

GS-15 对于 >1000 km, 并 <4.5 级的远震无同震响应。说明有着超大动态量程和高灵敏度的 gPhone 重力仪记录到的高频数据对地震破裂过程研究具有重要意义^[13]。

表 6 gPhone 重力仪宁夏区内典型地震记震情况
Table 6 Typical earthquakes in Ningxia recorded by gPhone gravimeter

发震时刻/年-月-日 h:min:s	震级/(<i>M</i>)	参考位置	震中距/(km)	初动时刻	结束时刻	持续时间/(s)
2016-07-16 12:13:00	2.9	大武口	44	12:13:06	12:15:05	119
2015-07-08 06:08:48	2.3	海原	211	06:09:50	06:09:55	5
2016-07-22 01:39:26	1.9	平罗	44	01:39:43	01:40:37	54
2015-03-18 01:23:21	1.6	永宁	44	01:23:27	01:24:09	42
2015-11-25 11:03:19	1.0	银川	33	11:03:25	11:03:36	11

4 结论与思考

通过对银川站同台址的两台重力仪(GS-15 和 gPhone)在 2015 年 1 月至 2016 年 3 月的时间序列观测资料进行潮汐分析, 并以此为基础提取了非潮汐重力残差得出以下结论:

- (1)GS-15 年变幅为 1×10⁻⁵m·s⁻²/年, gPhone 年变幅为 4×10⁻⁵m·s⁻²/年。GS-15 为正向零漂, 年变趋势呈现“夏高冬低”的规律, 主要是由于洞温的季节微弱变化引起的。而 gPhone 具有负向线性零飘且零漂大的特点该仪器自身内部恒温装置的温度补偿能力要远优于 GS-15。
- (2)gPhone 的高动态响应和秒采样的记录优势可以使它记录到 1.0 级的地方震响应, 同震响应持续时间随震中距增大而减小, 随震级增大而增大。而 GS-15 对于 >1 000 km, <4.5 级的远震无同震响应, 并且受到较大地震时会超量程而限幅。两

台仪器对于地震频段和潮汐频段的噪声水平值得研究。

- (3)调和分析和 NAKAI 检验结果发现银川站 gPhone 重力仪各波群潮汐参数均低于 GS-15 重力仪。gPhone 重力仪 M2 波潮汐因子为 1.141 4, 中误差 0.001 02, NAKAI 检验小于 2 的段数只有 27 段。GS-15 重力仪 M2 波潮汐因子为 1.180 0, 中误差 0.000 68, 观测精度均可以达到 0.1% 量级对于, 较为稳定。对此, 我们认为可能是 gPhone 所处洞室受抽水干扰、背景噪声较 GS-15 大, 亦或是观测系统等原因影响了观测精度, 还需做进一步深入分析。
- (4)经气压改正后, GS-15 有 3 种波群(S1、M1、M2)潮汐因子和中误差变化较大, 而 gPhone 只有一种波群(S1)变化较明显。从仪器构造角度来看, 因 gPhone 采取全封闭结构, 抗气压能力要优于 GS-15。
- (5)非潮汐数据显示 gPhone 重力仪受抽水干扰

较GS-15严重,并且两次典型地震前有约40微伽重力扰动现象出现,这种扰动是否为临震异常的重力变化,还需作进一步的研究。

参考文献

- [1] 魏望生. 我国台站重力观测工作的进展[J]. 地壳形变与地震, 1990, 10(04): 93-101.
- [2] 邢乐林, 申重阳, 李辉, 等. 欧洲 Walferdange 绝对重力仪比对观测[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(03): 77-79.
- [3] 孙和平, Ducar, B. 中, 比, 法三国超导重力仪潮汐观测资料综合对比分析与研究[J]. 科学通报, 1998, 43(13): 1433-1438.
- [4] 孙和平, 陈晓东, 刘明, 等. LCR-ET20 弹簧型潮汐重力仪观测结果的分析 and 比较[J]. 地震学报, 2002(05): 510-515.
- [5] Goodkind J M. The superconducting gravimeters principals of operation, current performance and future prospects[C]//Proceedings of the Workshop on Non-tidal Gravity Changes. Luxembourg: Conseil de L' Europe Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, 1991.
- [6] 王新胜, 贾路路, 韩宇飞, 等. 陆态网络腾冲台连续重力观测质量分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(1): 50-52.
- [7] 刘子维, 李辉, 郝洪涛, 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, 30(06): 157-160.
- [8] 刘子维, 李辉, 徐中华, 等. gPhone 重力仪数据采集系统性能的改进[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(S2): 102-104.
- [9] 甘卫军, 李强, 张锐, 等. 中国大陆构造环境监测网络的建设与应用[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2012(04): 16-23.
- [10] 王林松, 陈超, 梁青, 等. 东日本大地震重力信号同震响应[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(11): 1348-1351.
- [11] 周江林, 沈萍, 田鑫. 北京地震台 gPhone 重力仪同震响应特征分析[J]. 中国地震, 2015, 31(03): 553-561.
- [12] 杨婕, 占惠, 卓群, 等. 厦门地震台重力仪同震响应特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(S1): 96-99.
- [13] 周磊, 申重阳, 韦进, 等. gPhone 重力仪记录的汶川 8.0 地震高频信号研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(S1): 16-19.
- [14] 陈晓东, 孙和平. 一种新的重力潮汐数据预处理和分析方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(03): 83-87.
- [15] 徐伟民, 陈石, 高孟潭, 等. 中国大陆重力场非潮汐时空变化特征的初步分析[J]. 地球物理学进展, 2012(3): 861-871.
- [16] 张勤耕, 李家明, 胡国庆. Gs 重力仪改进设计[J]. 地壳形变与地震, 1999(03): 72-76.
- [17] 李国斌, 马禾青, 李春贵, 等. 气压对银川基准台重力观测的影响[J]. 高原地震, 2008, 20(1): 48-51.
- [18] Dirk B, David C. Noise levels of superconducting gravimeters at seismic frequencies[J]. Geophysical Journal International, 1999, 139(1): 87-97.
- [19] 张克亮, 马瑾, 魏东平. 超导重力仪检测 2011 年日本东北 Mw9.0 级地震前的重力扰动信号[J]. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2292-2302.
- [20] 祝意青, 徐云马, 吕弋培, 等. 龙门山断裂带重力变化与汶川 8.0 级地震关系研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(10): 2538-2546.
- [21] 吕俊强, 李国斌, 马禾青. 银川地震台数字化重力资料映震情况分析[J]. 内陆地震, 2008, 22(2): 182-187.