

# 高台地震台 PET 重力潮汐参数观测结果 及影响因素的初步分析\*

李兴坚<sup>1,2,3</sup>, 李建康<sup>1</sup>, 冯红武<sup>1</sup>, 刘小明<sup>1</sup>

(1. 甘肃省地震局 高台地震台, 甘肃 高台 734300; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;  
3. 兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 用维尼迪科夫 (Vinedikov) 调和分析方法, 计算了 2008 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日高台地震台重力潮汐观测资料, 获得几个主要潮汐的重力潮汐参数。对日均值采用最小二乘拟合法, 分析了非潮汐重力变化信息。基于一元线性回归, 分析了气压对重力潮汐观测的影响。结果表明: 高台台重力观测精度较高, O1、M2 波潮汐因子变化稳定在 1‰之内, 与国家重力台网中心结果基本一致。

**关键词:** PET 重力仪; 潮汐参数; 最小二乘拟合法; 非潮汐变化; 一元线性回归

**中图分类号:** P315.726 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2013)01-0063-06

## 0 引言

高台地震台 (以下简称高台台) 重力观测是在“十五”网络数字化项目中, 安装架设于 2006 年 6 月, 观测仪器为 PET 相对重力仪。该仪器经过武汉地震研究所改造完善, 成为集观测、数据采集、数据存储、数据实时监控一体的观测系统, 并增加气象三要素的观测, 和重力观测数据一并实现了网络化的传输, PET 型重力仪能同时输出 12 个辅助测项。同时该仪器自备了 UPS 电源和铷原子钟, 保证了仪器的正常运转和时间精度 (张新林等, 2007)。武汉地震研究所在鹭峰地震台对该仪器观测对比发现, 仪器在出厂时已经对观测值进行了格值转换, 而武汉地震研究所的对比观测格值比例系数为 1.005 2, 对观测精度不会产生重大影响, 但对潮汐分析还是有一定的影响。从重力技术管理部 2008 年和 2009 年的运行报告<sup>①</sup>显示, 高台台重力观测资料质量较高, 观测资料的各项精度指标达到了国内同类仪器最好水平, 可以用于地震监测及科学研究工作。为了更好地提高观测质量、发挥其在地震监测及科学研究意义, 有必要对高台台观测资料进行系统、长期地质量监控, 分析影响和制约观测值质量的干扰因素。

## 1 高台台重力观测环境

高台地震台地处祁连山—河西走廊中部, 位于高台县城以北 7 km, 距黑河北岸约 2 km。地质构造上位于合黎山—龙首山褶皱带南缘与走廊断陷的分解处, 河西系高台—榆木山隆起与祁吕西褶皱外缘与古北西向构造斜撞复合部位。区域地质构造以合黎山—龙首山北西西向隆起带为主。重力观测仪器安装在台站院内的地下室, 观测台基岩性为花岗岩。地下室深 5 m, 通道长 17 m, 通道内有 5 道塑钢门, 观测室内玻璃隔断。地下室的顶部旁侧覆盖层无植被, 覆盖层厚度小于 6 m。

## 2 数据预处理

为了使数据具有连续性和完整性, 对缺值基于理论值进行外推或内插来补齐。根据去除固体潮影响的漂移曲线, 区分出随机错数和掉格, 采用平滑方法改正, 对大于限定值的掉格, 则采用平滑基线法加以改正。为了剔除意外干扰数据对分析结果的影响, 采用 Nakai 拟合检验方法逐次对 48 h 间隔 (维尼迪科夫数字滤波器间隔) 作拟合检验, 再用统计方法给出拟合方差的限值, 最后

\* 收稿日期: 2012-01-30.

基金项目: 兰州地震研究所青年地震科学基金项目 (2010265) 资助。

① <http://www.gncc.ac.cn/>.

在潮汐参数计算时根据各组的方差大小进行合理取舍(唐九安, 1981, 1990a, b)。

对高台台 2008 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日重力观测值的 Nakai 检验结果显示: 潮汐响应比例因子  $A = 1.151\ 2$ , 略小于潮汐响应理论平均值 1.16; 相位误差  $B = 0.03^\circ$ , 观测数据拟合均方差的均值  $SMD = 0.68$ , 同时求得漂移模型一次项漂移系数  $K1 = 0.27 \times 10^{-8}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

3 重力观测潮汐参数计算结果

在对观测数据进行预处理后, 使用维尼迪科夫数字滤波调和和分析方法计算潮汐参数(唐九安, 徐敬文, 1986; 唐九安, 1999), 给出了 3 种时间序列的计算结果。

(1) 逐月调和和分析结果。逐月计算中对各月的天数约定为: 1~4 月、6~7 月、9~11 月都有 30 d、5 月有 30 d (闰年 32 d)、8、12 月有 32 d, 由于双天原因, 各月结果的起止日期将有跨月现象, 但最多只在月首或月尾跨 1 d。每个月结果均

列出 12 个主波群的潮汐参数, 其中含 6 个日波群、5 个半日波群、1 个 1/3 日波群。图 1 为全日波 O1、K1, 半日波 S2、M2 波 4 个主波群的月序列结果。

(2) 年序列调和和分析结果, 对同一数据文件按年度求解潮汐参数。每年均列出 15 个主波群的潮汐参数, 其中含 8 个日波群、6 个半日波群、1 个 1/3 日波群。表 1 给出了全日波 O1、K1、S1, 半日波 S2、M2, 1/3 波 M3 共 6 个主波群的年序列结果: 全日波 O1、K1、S1 波振幅因子分别为 1.16、1.14、0.97, 全日波中 O1、K1 波的振幅因子变化平稳, S1 波振幅因子变化幅度较大。半日波 S2、M2 波振幅因子分别为 1.151、1.15, 两个波的振幅因子变化平稳, 数值非常接近。1/3 波 M3 的振幅因子为 1.06, 变化平稳。

(3) 几个主波群全序列调和和分析结果, 对同一数据文件的全系列数据作一次性潮汐参数解算。每个结果均列出了 18 个主波群的潮汐参数, 包含 11 个日波群、6 个半日波群、1 个 1/3 日波群, 见表 2。

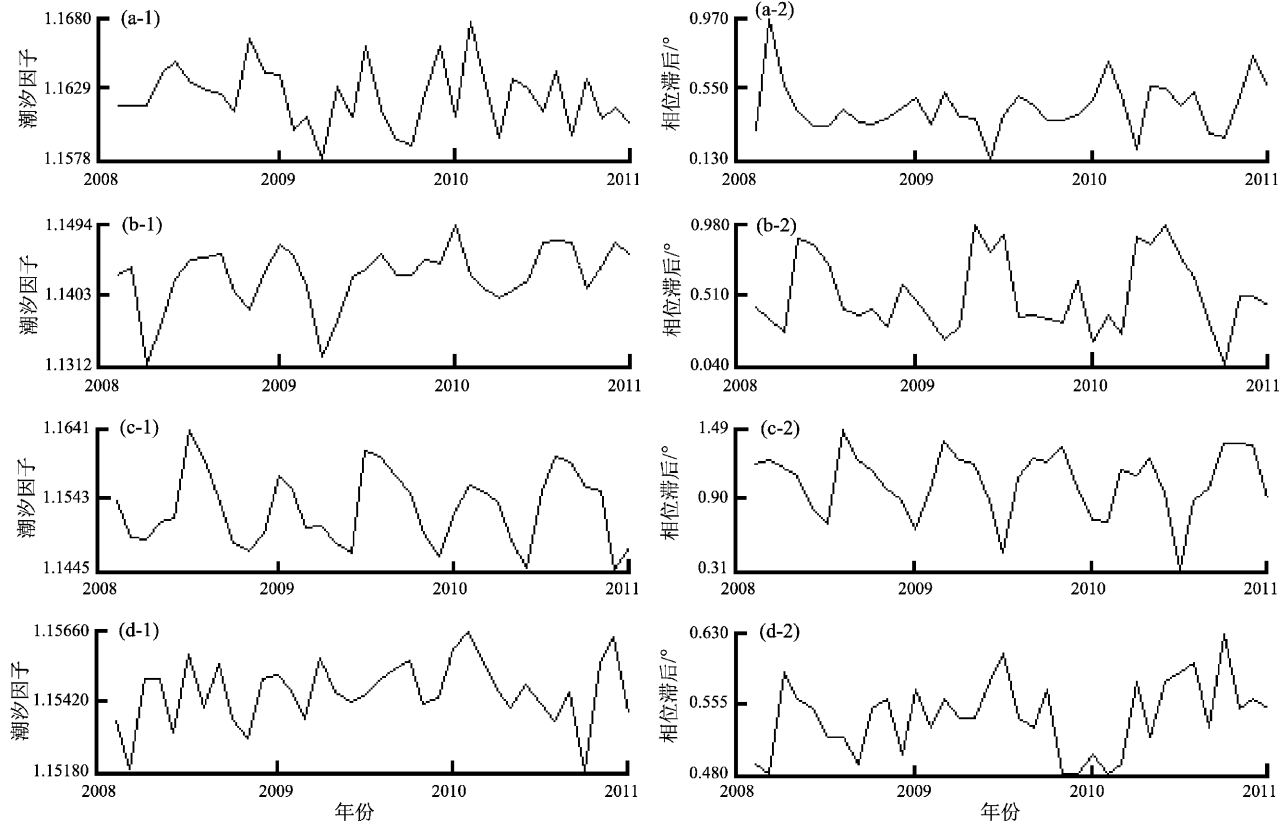


图 1 高台台重力观测月序列潮汐参数

Fig. 1 Tidal parameters of month series in gravity observation at Gaotai Station

表 1 高台台重力潮汐参数年度数据调和分析结果

Tab. 1 Harmonic analysis results of annual gravimetric parameters at Gaotai Station

时间/年-月-日	个数	潮汐因子		相位		潮汐因子		相位		拟合方差
		O1				K1				
2008-01-01~2008-12-27	177	1.163 0	0.000 7	0.44	0.04	1.142 1	0.000 5	0.51	0.03	1.5
2009-01-01~2009-12-30	180	1.161 2	0.000 7	0.39	0.04	1.142 6	0.000 5	0.49	0.03	1.5
2009-12-31~2010-12-31	178	1.162 4	0.000 9	0.49	0.04	1.143 6	0.000 6	0.55	0.03	1.7
MEAN	535	1.162 2	0.000 8	0.44	0.04	1.142 8	0.000 5	0.52	0.03	1.57
SMD		0.000 9	0.000 1	0.05	0	0.000 8	0.000 1	0.03	0	0.12
		S1				S2				
2008-01-01~2008-12-27	177	0.910 7	0.111 3	-25.15	7.09	1.152 6	0.000 6	1.04	0.03	0.7
2009-01-01~2009-12-30	180	1.247 3	0.106 5	-39.02	4.91	1.152 7	0.000 6	1.06	0.03	0.7
2009-12-31~2010-12-31	178	0.737 8	0.121 7	-37.85	9.5	1.152 8	0.000 7	1.02	0.04	0.9
MEAN	535	0.965 3	0.113 2	-34.01	7.17	1.152 7	0.000 6	1.04	0.03	0.77
SMD		0.259 1	0.007 8	7.69	2.3	0.000 1	0.000 1	0.02	0.01	0.12
		M2				M3				
2008-01-01~2008-12-27	177	1.154 4	0.000 3	0.54	0.01	1.060 2	0.01 5	1.61	0.81	0.6
2009-01-01~2009-12-30	180	1.154 7	0.000 3	0.53	0.01	1.039 6	0.014 2	0.38	0.78	0.6
2009-12-31~2010-12-31	178	1.154 6	0.000 3	0.56	0.02	1.085 5	0.017 6	0.27	0.92	0.7
MEAN	535	1.154 6	0.000 3	0.54	0.01	1.061 8	0.015 6	0.75	0.84	0.63
SMD		0.000 2	0	0.02	0.01	0.023	0.00 18	0.74	0.07	0.06

表 2 高台台重力潮汐参数全系列数据调和分析结果

Tab. 2 Harmonic analysis results of all range gravimetric parameters at Gaotai Station

固体潮波	潮汐因子		相位滞后程度		最大波幅	
Q1-001-062, 62	1.159 2	0.002 3	0.29	0.11	6.75	0.02
O1-063-088, 26	1.162 2	0.000 5	0.44	0.02	35.37	0.02
M1-089-110, 22	1.161 4	0.006 1	0.06	0.3	2.78	0.02
P11-111-113, 3	1.122 8	0.018 1	0.06	0.92	0.93	0.02
P12-114-120-7	1.155 6	0.001 1	0.71	0.05	16.37	0.02
S1-121-123, 03	0.957	0.065 1	325.45	3.93	0.32	0.02
K1-124-134, 11	1.142 7	0.000 3	0.52	0.02	48.9	0.02
F10-135-136-2	1.357 4	0.043 6	3.37	1.84	0.46	0.02
F11-137-143-7	1.146 8	0.025 6	359.64	1.28	0.7	0.02
J1-144-165, 22	1.154 8	0.005 3	0.18	0.27	2.76	0.01
OO1-166-197, 32	1.156 8	0.00 82	0.19	0.4	1.52	0.01
2N2-198-236, 39	1.152 1	0.004 7	0.69	0.24	1.59	0.01
N2-237-260, 24	1.151 7	0.000 9	0.62	0.05	9.96	0.01
M2-261-286, 26	1.154 6	0.000 2	0.54	0.01	52.14	0.01
L2-287-300, 14	1.187 8	0.008 7	1.88	0.42	1.52	0.01
S2-301-309, 09	1.152 6	0.000 4	1.04	0.02	24.22	0.01
K2-310-347, 38	1.149 4	0.001 2	1.78	0.06	6.57	0.01
M3-348-363, 16	1.061 8	0.009	0.73	0.49	0.73	0.01

4 潮汐因子稳定性分析

潮汐因子的稳定性可基于 O1 波和 M2 波的维尼迪科夫调和分析逐月计算并进行讨论,表 3 给出了不同时段逐月潮汐的统计结果。从表中可以看出,在 3 年的观测期间,O1 波和 M2 波潮汐因子变化相对稳定,稳定性在 1‰之内。

表 3 O1、M2 波潮汐因子统计结果					
Tab. 3 Statistics results of tidal factor of O1、M2 waves					
时段/年-月	月数	均值	方差	百分比相对差‰	
O1	2008-01~2008-12	12	1.163 0	0.000 7	0.602
	2009-01~2009-12	12	1.161 2	0.000 7	0.602
	2010-01~2010-12	12	1.162 4	0.000 9	0.774
M2	2008-01~2008-12	12	1.154 4	0.000 3	0.260
	2009-01~2009-12	12	1.154 7	0.000 3	0.260
	2010-01~2010-12	12	1.154 6	0.000 3	0.260

5 重力观测非潮汐变化分析

采用对日均值进行最小二乘拟合来提取非潮汐重力变化信息。非潮汐分析就是利用原始曲线滤掉潮汐和线性漂移部分后对剩余的残差进行分析的方法。残差值可表征该观测点的微重力变化。从高台台相对重力观测日均值曲线(图 2)可以看出,相对重力变化呈倾斜上升变化趋势。从图 2 可以看出,2008~2010 年微重力相对变化还是比较大,每年呈现不同的变化趋势。总体特点是,2008 年相对呈倾斜性上升变化趋势;2009 年变化相对平稳,略有下降趋势;2010 年完全呈现呈下降趋势。

高台地震台地所在地区北部以祁连山山前断裂及榆木山、大黄山、文殊山 3 个隆起的北边界断裂为界(可能包括了整个河西走廊构造带),并与阿拉善地块相连;东部以六盘山断裂、龙门山断裂和海源断裂带相接,与鄂尔多斯地块相邻;南边以东昆仑断裂为界,与藏北地块毗连;西北以阿尔金山断裂为界,与塔里木地块相接。该地区边界动力学上是受到阿尔金断裂左旋剪切、青藏地块相对向北东推挤,阿拉善地块相对向南推挤,以及鄂尔多斯块体的阻挡的共同作用,所造成的

巨大左旋运动的构造复合体。正是由于以上边界断裂和构造体运动的共同作用,其影响为区域应力的集中分布,也使得该区域重力梯度大,差异运动强烈。高台重力观测到得微重力变化明显差异,反应了该地区重力梯级大,差异运动强烈,构造运动比较剧烈的区域构造应力特点。

微重力变化梯级较大的 2008 年和 2010 年,青藏块体分别发生 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级特大地震和 2010 年 4 月 14 日青海玉树 7.1 级大地震,而微重力变化较为平稳的 2009 年,在青藏板块及周边未发生 7 级以上大地震。说明祁连山—河西地区构造的形成、发展、演化及现今活动都和青藏高原的整体活动密切相关,该区的构造应力活动方式等方面都与青藏高原的活动一致。在动力学上主要以青藏块体向北东向的推挤作用为主。

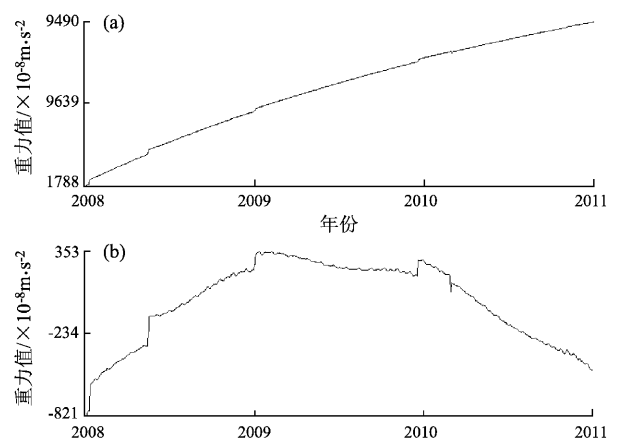


图 2 高台台重力观测潮汐变化日均值 (a) 及拟合残差 (b)  
Fig. 2 Daily mean values (a) and their fitting residual (b) of gravimetric parameters at Gaotai station

6 温度、气压对重力观测的影响分析

温度和气压是对重力潮汐观测的主要影响因素(唐九安,徐敬文,1986;唐九安,1999;孟晓春,2005;熊仲华,2006)。一般对于像 PET 重力仪一样的弹簧重力仪,需要考虑观测台站大气的影

因为温度变化与气压变化呈正相关性，所以温差的变化大多来自气压变化的影响。为了准确得到气压对重力观测结果的影响，笔者对观测值与理论值进行残差计算（图 3），用重力残差值与气压值做一元线性回归  $Y = A + BX$ ，拟合计算了重力潮汐观测值的残差值与气压的相关系数  $R$ 、改正系数  $B$  的关系。拟合结果为：气压对重力观测的相关系数  $R$  为 0.299 3，改正系数  $B$  为 0.12。从图 4 中拟合结果可以看出，重力潮汐变化与台站气压的相关性较差，尚不能清楚地反映气压对重力观测产生的影响。高台重力潮汐观测自架设以来一直存在趋势性正向漂移，应该与仪器弹性系统的弹簧变形引起的零漂有关。

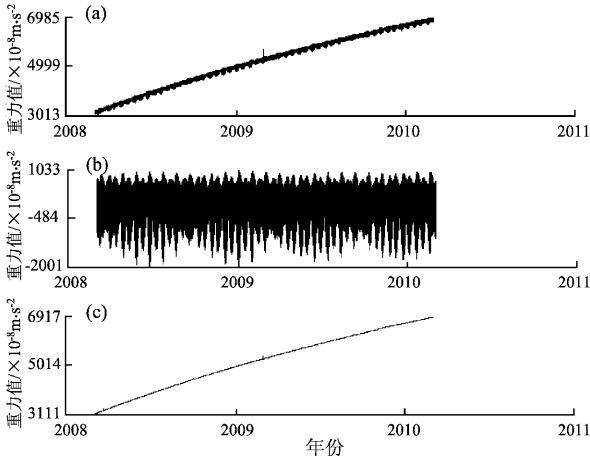


图 3 高台台重力潮汐观测值与理论值残差结果  
Fig. 3 Residuals between observed and theoretical values of tidal gravity at Gaotai Station

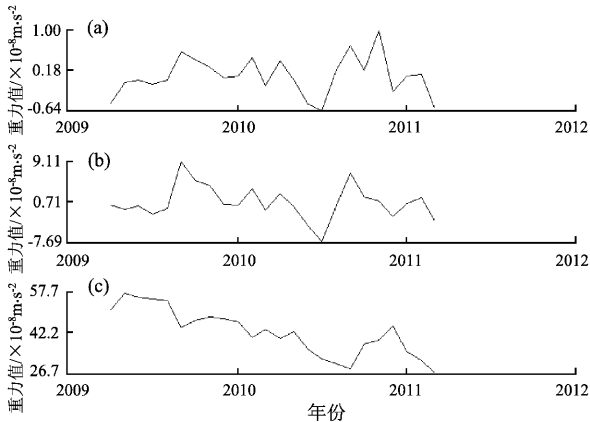


图 4 高台台重力潮汐残差值与气压一元线性回归结果  
Fig. 4 Residuals value of tidal gravity and atmospheric pressure linear regression at Gaotai Station

7 结论

通过以上对高台台重力观测资料的研究分析，得出以下结论：

(1) 从 NAKAI 检验求得一次漂移系数  $K_1 = 0.27 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，结果说明高台台重力观测仪器存在趋势性正向漂移。

(2) 分别对高台重力观测资料的逐月、年度以及全系列调和和分析计算，获得了高台台重力观测的各个主波群的潮汐参数。其中月序列 M2 波潮汐因子平均值为 1.154 5，均方差 0.001 1，相位滞后  $0.54^\circ$ ，均方差为 0.04。

(3) 基于 O1、M2 波的维尼迪科夫调和和分析逐月计算结果分析，3 年内 O1、M2 波潮汐因子变化稳定在 1‰之内。这与国家重力台网中心发布的观测运行评价月报中高台台重力观测资料 M2 波精度的统计分析结果基本一致。

(4) 通过对重力观测日均值进行最小二乘拟合，去除固体潮变化，获得了高台台微重力变化信息。从残差值结果看，高台重力观测到微重力变化差异明显，这种差异变化正好反映了该地区重力梯级大，差异运动强烈，构造运动比较剧烈的区域构造应力特点。2008、2010 年微重力变化梯级较大，青藏块体分别发生了 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级特大地震和 2010 年 4 月 14 日青海玉树 7.1 级大地震，而 2009 年微重力变化较为平稳，在青藏板块及周缘未发生 7 级以上大地震。这可能说明了祁连山—河西地区构造的形成、发张、演化及现今活动都和青藏高原的整体活动密切相关，该区的构造应力活动方式等都与青藏高原的活动一致。在动力学上主要以青藏块体向北东向的推挤作用为主。

(5) 高台台重力观测呈趋势性的倾斜变化，一般引起这种倾斜漂移的原因主要有仪器零点漂移、温度、气压等。该仪器自身内部加载了恒温装置，进行温度补偿，并采取全封闭结构，进行气压改正。通过对重力潮汐观测值残差（去掉理论值）与气压基于一元线性回归分析发现，高台重力潮汐变化与大气压力的相关性很差，对重力观测产生的影响不能清楚反映。而高台重力潮汐观测自架设以来一直存在趋势性正向漂移，应该

与仪器弹性系统的弹簧变形引起零漂有关,正是弹簧变形产生的零漂影响远比气压引起的变化大的多,才导致回归分析结果体现不出气压的影响,关于这种漂移现象将进一步做深入研究分析。

感谢甘肃省地震局唐九安研究员在本次研究中给予的悉心指导和帮助。

#### 参考文献:

- 孟晓春. 2005. 地震信息分析技术[M]. 北京:地震出版社, 132-179.
- 唐九安,徐敬文. 1986. 气压对重力仪的影响及观测资料的气压改正

- [J]. 西北地震学报, 8(4): 37-42.
- 唐九安. 1981. 固体潮观测数据的预处理[J]. 西北地震学报, (3): 73-77.
- 唐九安. 1990a. 拟合检验计算中固体潮理论值的一阶微商值最优计算方法讨论[J]. 华北地震科学, 8(2): 31-36.
- 唐九安. 1990b. 天顶距微分公式用于重力、倾斜和应用固体潮资料的拟合检验[J]. 地壳形变与地震, 10(2): 1-8.
- 唐九安. 1999. 计算固体潮潮汐参数的非数字滤波调和分析方法[J]. 地壳形变与地震, 19(1): 49-55.
- 熊仲华. 2006. 地震观测技术[M]. 北京:地震出版社, 390-439.
- 张新林,李辉,王晓权,等. 2007. 便携式潮汐观测仪(PET)数据处理研究[J]. 大地测量与地球动力学, 27(专刊): 116-135.

## Preliminary Analysis on Observation Results of PET Gravity Tide Parameter at Gaotai Seismic Station and its Influence Factors

LI Xing-jian<sup>1,2,3</sup>, LI Jian-kang<sup>1</sup>, FENG Hong-wu<sup>1</sup>, LIU Xiao-ming<sup>1</sup>

(1. Gaotai Seismic Station, Earthquake Administration of Gansu Province, Gaotai 734300, Gansu, China)

(2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

(3. Lanzhou National Geophysical Research Station Field of Scientific Observation, Lanzhou 730000, Gansu, China)

#### Abstract

Basing on the gravity tide observation data recorded by Gaotai Seismic Station from Jan. 1, 2008 to Dec. 31, 2010, we obtained the gravity tidal parameters of several main tidal waves by Vinedikov harmonic analysis method. Then we analyzed the non-tidal gravity variation of daily mean value by least-squares fitting method and the effects of atmospheric pressure on gravity tide observations basing on one-dimensional linear regression. The results showed that the precision of gravity observation at Gaotai Station is high, the variation of tidal factors of O1, M2 waves stabilized at 1‰, which is consistent with that in Gravity Network Center of China.

**Key words:** PET gravity; tidal parameter; least squares method; non-tidal changes; one-dimensional linear regression