

# GRACE 揭示的现阶段青藏高原及邻域重力变化趋势\*

姜永涛<sup>1</sup>, 王丽美<sup>1</sup>, 高春春<sup>1</sup>, 杨九元<sup>2</sup>

(1. 南阳师范学院 环境科学与旅游学院, 河南 南阳 473061; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 利用2003和2013年的GRACE月重力场模型, 求算2003~2013年青藏高原及邻域的现今重力变化图像, 利用该趋势图像中若干特征点上的月重力变化数据, 由最小二乘拟合其长期重力变化, 验证重力变化图像的可靠性, 最后简要探讨青藏高原重力变化的原因。结果显示, 现今青藏高原及邻域未呈现整体尺度的重力变化趋势; 近年来青藏高原强震主要发生在重力变化呈现明显四象限分布特征的大型断裂带上; 相对于地壳均衡效应不明显的青藏高原东缘地区, 高原腹地的地壳均衡效应更加显著。

**关键词:** 青藏高原及邻域; GRACE; 重力场; 地壳均衡效应

**中图分类号:** P315.726

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)04-0574-05

## 0 引言

青藏高原的形成源于印度板块和欧亚板块的碰撞 (Harrison *et al*, 1992; 许志琴等, 1999), 由于强烈的构造运动, 现今欧亚大陆90%以上的强震都发生在青藏高原及其边缘地区。地球重力场及其变化图像一直是地震监测预报研究的基本信息源。祝意青等 (2003) 利用地壳重力网1998~2000年间的两期绝对重力和相对重力观测资料, 初步分析了2001年11月14日昆仑口西8.1级强震与震前青藏高原重力变化特征的关系; 申重阳等 (2010) 研究了2008年于田 $M_s7.3$ 地震前重力场动态变化特征, 发现此次地震孕育过程中的相关重力变化呈“增大—加速增大—减速增大”特征。不仅大震同震过程会引起地表大的重力变化, 在大震孕育过程中, 断层附近地壳应力和质量的变化也会产生重力场变化信号 (Li 等, 1997)。因此, 通过定点重力连续观测或定期流动重力网重复观测, 有可能会捕捉到与震源变化有关的重力前兆信息。祝意青等 (2008a, b) 研究认为, 地面重力观测资料可对汶川 $M_s8.0$ 地震震发三要素 (地点、时间和震级) 进行较好的中期预测, 该中期预测方法同样适用于新疆于田 $M_s7.3$ 大震。

青藏高原及邻域的绝对重力观测点较少, 拉

萨、大理和昆明绝对重力观测点的现今重力变化呈下降趋势。Sun 等 (2009) 利用这些测点上的绝对重力和GPS资料, 研究认为这些点的负重力变化部分是由于Moho面起伏变化造成的, 但在Sun的研究中仅利用青藏高原中南部和东南部边缘地带的三个绝对重力点观测资料, 很难真实地反映出高原整体的重力变化趋势。因此, 本文利用重力观测卫星GRACE从2003年和2013年的月重力场模型, 求算2003~2013年青藏高原的现今重力变化趋势, 并通过该趋势图上若干特征点的月重力变化, 通过最小二乘拟合得到其长期变化趋势, 验证了重力变化图像的可靠性, 最后本文探讨了青藏高原重力变化的可能成因。

## 1 数据与方法

于2002年3月17日升空的GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) 双星系统由美国NASA和德国航天研究中心DLR共同研制, 旨在获取高精度的地球重力场中长波部分, 尤其是GRACE提供的时变重力场为研究全球物质迁移和季节性变化提供的重要数据。姜永涛等 (2014) 对比分析了GRACE月重力场滤波方法的优缺点, 研究认为去相关平滑滤波算法优于高斯滤波和直接截断法, 且去相关平滑滤波DDK5处理得到的卫

\* 收稿日期: 2016-02-21.

**基金项目:** 国家自然科学基金重点基金——断层滑动和转动与大地变形的向错-位错组合模型研究 (41374028) 和南阳师范学院博士专项项目——利用大地测量数据研究断层活动 (ZX2016007) 联合资助。

星重力动态变化图像与地面观测结果符合最好,表明 GRACE 卫星时变重力场可以用来分析大区域重力动态变化。

由 GRACE 月重力场模型计算椭球面上的重力变化公式为 (Heiskanen, Moritz, 2006)

$$\Delta g(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} (n-1) \left( \frac{R}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n \left[ \Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda \right] \cdot \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (1)$$

式中,  $\theta$ 、 $\lambda$  分别为地心余纬和经度;  $r \approx a(1 - f \cos^2 \theta)$  为椭球面上一点的矢径,  $a$ 、 $f$  分别为参考椭球的长半轴和扁率;  $GM$  为地心引力常数;  $R$  为地球平均半径;  $n$ 、 $m$  分别为模型位系数的阶和次;  $\bar{P}_{nm}(\cos \theta)$  为完全正则化勒让德函数;  $\Delta \bar{C}_{nm}$ 、 $\Delta \bar{S}_{nm}$  为所选重力场模型相应阶次的位系数差值。

## 2 GRACE 反映的青藏高原现今重力变化

为尽量消除季节性因素影响,得到可靠的长期重力变化结果,本文利用 2003 年和 2013 年的 GFZ RL05 DDK5 数据 (Barthelmes, Köhler, 2012) 中的公共月份重力场模型,分别求取 2003 年和 2013 年的年平均重力场位系数,然后对应阶次求差得到  $\Delta \bar{C}_{nm}$ 、 $\Delta \bar{S}_{nm}$ ,最后根据式 (1) 计算了青

藏高原及邻域的长期重力变化图像,如图 1 (图中等值线间隔为  $0.25 \mu\text{Gal/a}$ ) 所示。

由图 1 可以看出,2003 ~ 2013 年,青藏高原并非呈现整体特征的重力变化趋势。GRACE 重力结果显示,现今高原内陆呈正重力变化趋势,最大可达  $1.2 \mu\text{Gal/a}$ ; 青藏高原南部,如东构造结、喜马拉雅造山带和印度东北部区域呈现负重力变化,并在 ( $78^\circ\text{E}$ ,  $30^\circ\text{N}$ ) 和 ( $94^\circ\text{E}$ ,  $30^\circ\text{N}$ ) 形成了两个负重力变化高值区,变化率最大可达  $-1.5 \mu\text{Gal/a}$ ; 青藏高原西北部的帕米尔高原区域呈正重力变化,量值约  $0.3 \mu\text{Gal/a}$ ; 甘孜—玉树断裂带和鲜水河断裂带东北部的阿坝次级块体和四川盆地为青藏高原东缘的两个正重力变化高值区,而龙门山次级块体为相对较低的正重力变化区域; 川滇块体南部区域呈现弱的负重力变化。

图 1 显示,2003 ~ 2013 年,拉萨、大理和昆明地区的 GRACE 卫星重力变化率分别为  $-0.6$ 、 $-0.2$  和  $-0.4 \mu\text{Gal/a}$ ,与地面绝对重力变化结果 (Sun *et al.*, 2009) 较为一致,量值上的差别,可能是 GRACE 卫星恢复重力场阶数有限 (本文重力场模型为 90 阶) 的缘故。

结合青藏高原大型走滑断裂分布可以发现,高原腹地重力变化梯度带与大型断裂带走向呈现近似正交的特征,且近年发生的几次走滑型强震,如昆仑山口西  $M_s 8.1$  地震、玉树  $M_w 7.1$  地震、新疆于田  $M_s 7.3$  地震均位于重力变化梯度带的零值区附近; 同样,青藏高原东缘的走滑型强震,如鲁甸  $M_6.5$  地震和普洱  $M_6.6$  地震也发生在正负重力梯度带的零值区附近。青藏高原东缘的逆冲型地震,如汶川  $M_w 7.9$  地震和芦山  $M_s 7.0$  地震发生在两个重力变化高值区的鞍部地区,也处于重力变化梯度带上。通过 2000 年以来的大震震中和重力变化图像的位置关系可以看出,强震往往发生在大型断裂带上,且重力变化呈现出明显四象限分布特征的区域,这可能说明现今重力场变化模式对断层面上积累的应力有一定的触发作用,可视为强震的重力中短期前兆。

为进一步验证区域重力变化图像的可靠性,本文利用 GRACE 卫星 2003 ~ 2013 年的所有月重力场模型,计算了图 1 中 8 个特征点位置上的长期重力变化曲线,并对其进行了最小二乘拟合,结果如图 2 和表 1 所示。

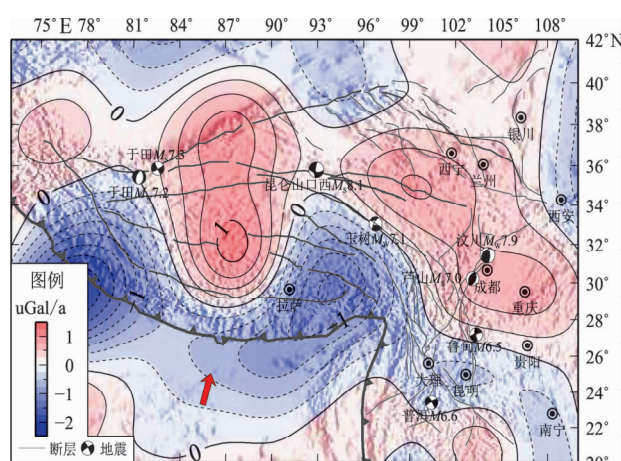


图 1 2003 ~ 2013 年青藏高原及邻域卫星重力年变化率图像

Fig. 1 Annual variation rate of satellite gravity in Tibet plateau and its adjacent area from 2003 to 2013

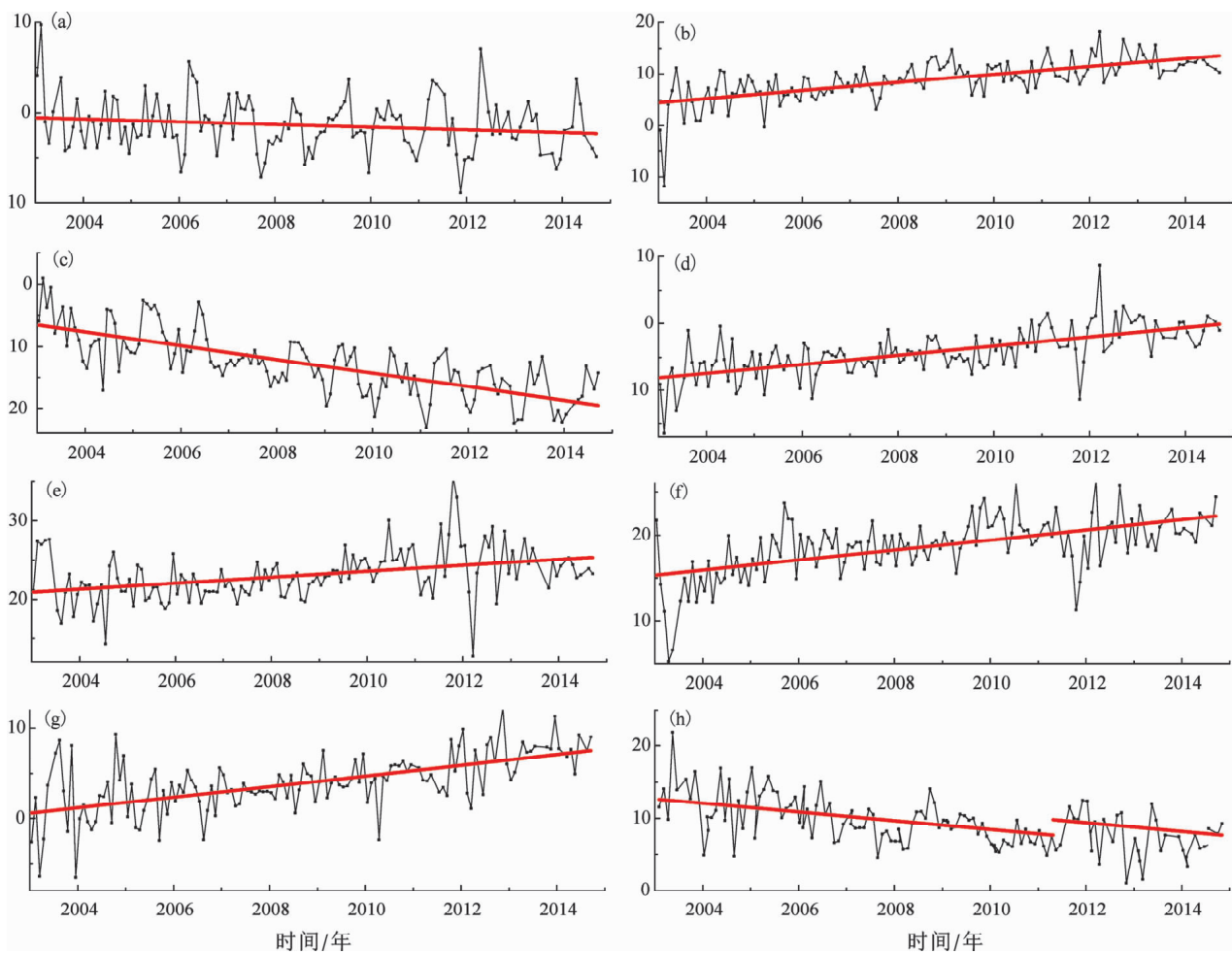


图 2 8 个重力变化特征点上的月重力变化特征及拟合曲线 (单位:  $\mu\text{Gal}$ )

Fig. 2 Monthly gravity change and its fitted curve of eight gravity change feature points (unit:  $\mu\text{Gal}$ )

表 1 图 1 中特征点上一维拟合斜率

Tab. 1 The one – dimensional fitting slopes of eight gravity change feature points in Fig. 1

特征点	拟合斜率/ $\mu\text{Gal} \cdot \text{a}^{-1}$
a (79.8°E, 33.8°N)	-0.152 17
b (87.6°E, 32.0°N)	0.778
c (93.9°E, 29.6°N)	-1.097 95
d (86.4°E, 36.2°N)	0.679 83
e (93.6°E, 36.8°N)	0.375 28
f (99.3°E, 35.2°N)	0.587 75
g (105.6°E, 29.4°N)	0.592 08
h (91.1°E, 29.7°N)	-0.597 39

由拟合曲线的斜率 (重力年变化率) 可以看出, 这 8 个特征点上的重力变化呈现出有别于季节性 (周期性) 变化的长期重力变化趋势, 且变化趋势与图 1 的结果一致, 进一步验证 GRACE 卫星

重力可以获取可靠的区域长期重力变化趋势 (孙文科等, 2011)。

### 3 青藏高原及邻域现今 Moho 起伏特征

卫星重力结果是一种空间重力异常, 对地表高程变化不敏感, 忽略青藏高原地区冰后回弹效应、剥蚀效应和季节性重力效应 (Sun *et al*, 2009), 现今青藏高原卫星重力变化主要反映了高原地壳物质垂向迁移变化, 即 Moho 面起伏的变化。

根据高原增厚一维模型, 由重力变化对应的 Moho 面变化为 (Sun *et al*, 2009)

$$\Delta h = \frac{\Delta g}{2\pi G \Delta \rho} \tag{2}$$

式中,  $\Delta g$  为由 Moho 面升降引起的重力变化, Moho 面密度差  $\Delta \rho = (0.8 \pm 0.2) \text{ g/cm}^3$  (取地壳平均密



度  $2.6 \text{ g/cm}^3$ , 上地幔密度  $3.4 \text{ g/cm}^3$ ),  $G$  为万有引力常数 ( $6.674\ 08 \pm 0.000\ 31$ )  $\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$ 。

由式 (2) 可计算青藏高原地区 Moho 年变化率, 如图 3 所示。

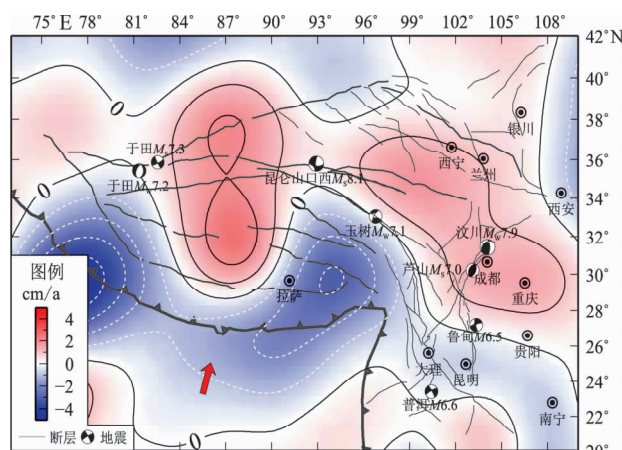


图 3 青藏高原及邻域 Moho 面年变化率

Fig. 3 The gravity annual change of Moho in Tibet Plateau and its adjacent area

图 3 表明, 现今青藏高原及邻域 Moho 面年变化率差异性较大, 在青藏高原中部 ( $87^\circ\text{E}$ ,  $34^\circ\text{N}$ ) 区域的 Moho 面呈现抬升趋势, 速率可达  $2 \text{ cm/a}$ ; 在高原的西南 ( $78^\circ\text{E}$ ,  $30^\circ\text{N}$ ) 和东南 ( $94^\circ\text{E}$ ,  $30^\circ\text{N}$ ) 的 Moho 面呈现下降趋势, 年变化率可达  $-4 \text{ cm/a}$ 。青藏高原东北缘呈现 Moho 面抬升趋势, 可达  $1.5 \text{ cm/a}$ 。

根据地壳均衡原理, Moho 面下降区域的地表应呈现隆升特征, Moho 面上升的区域地表则呈现下降特征, Liang 等 (2013) 的 GPS 观测结果证实了在青藏高原中部 ( $87^\circ\text{E}$ ,  $34^\circ\text{N}$ ) 附近区域的地表呈现下降特征, 高原其余区域呈现地壳抬升态势。青藏东缘的 Moho 面年变化率为抬升, 而水准观测资料 (Hao *et al.*, 2014) 显示该区域为整体隆升 (伴随个别拉张盆地的下降), 这看似矛盾的特征表明青藏高原腹地的地壳均衡效应明显, 而高原东缘地区的地壳均衡效应不明显。

由以上讨论可知, 在印度板块和欧亚板块的碰撞作用下, 高原腹地处于高温高压条件下的深部地壳在其上覆岩石的重力载荷下已作韧性流动 (Ji, 2008), 因此地壳均衡效应显著, 在受到深部地壳物质差应力和高原北部塔里木克拉通的阻挡作用, 高原物质离开青藏高原腹地转向压力低的

东侧逃逸。东侧逃逸的高原物质受青藏高原东缘岩石圈构造环境控制, 呈现出地壳不均衡状态。

## 4 结论

本文获取了 2003 ~ 2013 年青藏高原及邻域的长期卫星重力变化图像, 讨论了青藏高原及邻域的地壳运动状态, 得出了以下结论: (1) 现今青藏高原及邻域并非呈现整体特征的重力变化趋势; (2) 2000 年以来, 青藏高原区域的强震主要发生在大型断裂带上, 且卫星长期重力变化呈明显四象限分布的区域, 这可能说明青藏高原的现今重力场变化模式对断层面上积累的应力有触发作用; (3) 根据高原增厚一维模型获取的青藏高原及邻域 moho 面年变化率差异性较大, 结合近年 GPS 和水准资料研究结果发现, 青藏高原腹地地壳均衡效应显著, 而青藏高原东缘地区的地壳均衡效应不明显。

## 参考文献:

- 姜永涛, 张永志, 王帅等. 2014. GRACE 时变重力场滤波方法研究 [J]. 测绘通报, (11): 1-5.
- 申重阳, 李辉, 孙少安等. 2010. 2008 年于田  $M_s 7.3$  地震前重力场动态变化特征分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 30(4): 1-7.
- 孙文科, 张新林, 沈嗣钧等. 2011. 高斯滤波在处理 GRACE 数据中的模拟研究: 西藏拉萨的重力变化率 [J]. 中国科学: 地球科学, 41(9): 1327-1333.
- 许志琴, 杨经绥, 姜被等. 1999. 大陆俯冲作用及青藏高原原缘造山带的崛起 [J]. 地学前缘, 6(3): 139-151.
- 祝意青, 梁伟锋, 徐云马. 2008a. 重力资料对 2008 年汶川  $M_s 8.0$  地震的中期预测 [J]. 国际地震动态, (7): 36-39.
- 祝意青, 王双绪, 江在森等. 2003. 昆仑山口西 8.1 级地震前重力变化 [J]. 地震学报, 25(3): 291-297.
- 祝意青, 徐云马, 梁伟锋. 2008b. 2008 年新疆于田  $M_s 7.3$  地震的中期预测 [J]. 大地测量与地球动力学, 28(5): 13-15.
- Barthelmes F., Köhler W. 2012. International Centre for Global Earth Models (ICGEM) [J]. Journal of Geodesy, The Geodesists Handbook, 86(10): 932-934.
- Hao M., Wang Q., Shen Z., *et al.* 2014. Present day crustal vertical movement inferred from precise leveling data in eastern margin of Tibetan Plateau [J]. Tectonophysics, 632: 281-292.
- Harrison T M., Copeland P., Kidd W S F., *et al.* 1992. Raising Tibet [J]. Science, 255(5052): 1663-1670.
- Heiskanen W A., Moritz H. 2006. Physical geodesy [M]. Springer Science & Business Media.
- Ji S C. 2008. Deformation Mechanisms, Rheology and Seismic Properties of Rocks [M]. Beijing: Geological Publishing House.

- Li R H, Huang J L, Li H, *et al.* 1997. The mechanism of regional gravity changes before and after the Tangshan earthquake [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 10(4): 497 – 500.
- Liang S M, Gan W J, Shen C Z, *et al.* 2013. Three – dimensional velocity field of present – day crustal motion of the Tibetan Plateau derived from GPS measurements [J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 118(10): 5722 – 5732.
- Sun W, Wang Q, Li H, *et al.* 2009. Gravity and GPS measurements reveal mass loss beneath the Tibetan Plateau; Geodetic evidence of increasing crustal thickness [J]. *Geophysical Research Letters*, 36(2), DOI:10. 1029/2008GL036512.

## Long – term Gravity Change of Tibet Plateau and its Surrounding Area Derived from GRACE

JIANG Yongtao<sup>1</sup>, WANG Limei<sup>1</sup>, GAO Chunchun<sup>1</sup>, YANG Jiuyuan<sup>2</sup>

(1. *School of Environment Science and Tourism, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, Henan, China*)

(2. *School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China*)

### Abstract

Based on the GRACE monthly gravity models from 2003 to 2013, we first indicated the long – term gravity change pattern of Tibet plateau and its adjacent areas. Then we studied the monthly gravity variation data of eight feature points in gravity variation tendency graphy and fitted its long period gravity variation by the least squares method, which validated the reliability of the gravity change pattern. Finally the possible reasons for the gravity change were discussed in Tibet plateau and its adjacent areas. The result shows as follows: The nowadays gravity change does not show a whole – level pattern in Tibet plateau and its adjacent areas. The strong earthquakes for these years broke out on the big faults where the gravity change presented four – quadrant distribution pattern. The crustal isostatic effect in central Tibet plateau is more significant comparing to that of eastern Tibet plateau.

**Key words:** the Tibet plateau and its adjacent area; GRACE; gravity field; crustal isostatic effect