

河西地区重力变化与2013年门源 $M_s5.1$ 地震研究^①

梁伟锋, 赵云峰, 徐云马, 祝意青, 郭树松, 刘 练

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要:基于2010年5月—2013年10月的6期在河西地区流动重力测量资料获得的重力场时空变化结果,分析该区近期重力场变化及与2013年门源 $M_s5.1$ 地震的关系。结果表明:河西地区重力场变化空间分布显示在活动断裂附近重力变化较大,沿祁连山北缘断裂、昌马—门源断裂及庄浪河断裂形成与断裂带走向基本一致的重力变化高梯度带,反映了断裂构造活动引起的重力局部异常变化特征。2013年门源 $M_s5.1$ 地震发生在重力变化的高梯度带附近。

关键词:河西走廊地区;重力变化;活动断裂;门源 $M_s5.1$ 地震

中图分类号: P315.726

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-1008-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.1008

Study on the Gravity Variation in Hexi Area and the Menyuan $M_s5.1$ Earthquake

LIANG Wei-feng, ZHAO Yun-feng, XU Yun-ma, ZHU Yi-qing, GUO Shu-song, LIU Lian

(Second Monitoring Center, China Earthquake Administration, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: To study the relationship between gravity field variation and earthquakes, this study analyzes the relationship between gravity field variation in the Hexi area and the $M_s5.1$ earthquake area near Menyuan in 2013 on the basis of gravity field variations obtained through mobile gravity observation in the Hexi area from May 2010 to October 2013. On the basis of gravity change in the Hexi area during the study period, the accumulated gravity change in a longer period is applied using the line from Minle to Tianzhu in the northern Qilian Mountain as a borderline of positive and negative gravity. The gravity change is positive in the Hexi Corridor north of the borderline and negative in the Qilian Mountain area south of the line. In the north and south region of the borderline, the accumulated gravity variation changes sharply from positive to negative. Moreover, a high gradient belt of gravity change located on the North Qilian Mountain Fault is formed between Tianzhu and Minle, and the accumulated gravity positive change is up to $70 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ in the northern region. The accumulated gravity change forms two negative extreme value zones in E'bao and Tianzhu, where the minimum is $-70 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$, and a negative depression zone is formed between Tianzhu and E'bao, where the 2012 $M_s4.9$ and 2013 $M_s5.1$ earthquakes near Menyuan occurred. The results shows that the gravity field variation is larger near the active faults in the Hexi area, including the Qilianshan North Rim Fault located between E'bao, Menyuan, and Gulang, and the Changma—Menyuan and Zhuanglang River faults. Moreover, a high gradient belt of gravity variation in these regions is consistent with these faults. The Menyuan $M_s5.1$ earthquake occurred between E'bao and Menyuan near the high gradient zone of gravity variation. The

^① 收稿日期: 2014-01-19

基金项目: 中国地震局监测、预测、科研三结合课题(201308009, 14301); 中国地震局2014年度震情跟踪专项(2014010201)

作者简介: 梁伟锋(1968—), 男, 高级工程师, 主要从事重力监测与地震预测研究. E-mail: lwfbox@163.com

gravity variation shows the local gravity anomaly characteristics caused by fault tectonic activity.

Key words: Hexi Corridor area; gravity variation active fault; Menyuan $M_s5.1$ earthquake

0 引言

重力场的时空动态变化能较好地反映深部物质运移与地壳密度变化等构造活动信息。研究重力场的时空动态演化特征可为进一步探讨现今的地壳构造与强震孕育、发生的相互联系提供一定的根据。地震与重力场时变是紧密关联的,伴随着地震的发生,地球重力场也随之发生明显变化。有些地震前后可观测到数十至上百微伽的重力异常变化。如 1964 年日本新泻地震和 1964 年美国阿拉斯加地震、1965—1967 年日本松代震群、1968 年新西兰因南格华(Inangahua)地震、1971 年美国费尔南多地震等。在我国也有 1975 年海城地震和 1976 年唐山地震^[1-2]、1996 年丽江 7.0 级地震^[3]、2001 年昆仑山口西 8.1 地震^[4]和 2008 年汶川 8.0 级地震^[5]等。汶川地震前震中附近也出现明显的重力异常变化,祝意青等对此进行了较为准确的中期预测,尤其是地点的预测^[6-8]。褚庆忠等也分析了地震重力异常的形成机理,认为重力异常可以用来预报地震^[9]。

1 台网与构造背景

河西流动重力测网位于青藏块体东北缘,地理范围为 $N36.11^{\circ}\sim39.41^{\circ}$, $E99.44^{\circ}\sim105.52^{\circ}$,分布于甘肃、青海、宁夏、内蒙古等四省区境内。全网共 178 个测点,188 个测段,单程测线长 3 700 km,包

括 3 个跨断层综合观测场地的 30 个测点、160 km 的测线。测区内从北向南主要分布有晚第四纪强烈活动的 NWW 向的龙首山南缘断裂、祁连—海原断裂、香山—天景山断裂等,这些断裂具有挤压逆冲—左旋性质;NNW 向断裂主要有榆木山东缘断裂、拉鸡山断裂、庄浪河断裂等,这些断裂具有挤压右旋性质。本区 NWW 构造不仅规模大,而且新构造运动强烈;NNW 向断裂较 NWW 向断裂小,但它形成晚,现今活动性也很强烈,对 NWW 构造通常有改造作用。

河西地区自 1990 年使用拉科斯特—隆贝格 G 型重力仪(LCR-G)进行流动重力监测以来,已发生过 1995 年永登 $M_s5.8$ 、1996 年天祝 $M_s5.4$ 、2000 年景泰 $M_s5.9$ 、2003 年民乐 $M_s6.1$ 、2008 年门源 $M_s5.0$ 、2012 年武威 $M_s4.9$ 、2013 年门源 $M_s5.1$ 等地震。本文选取河西流动重力测网 2010 年 5 月—2013 年 10 月的 6 期观测重力观测资料。在资料的处理过程中采用中国地震局实用化攻关推广的应用软件——LGADJ,选取 1、7、24、57、117、129、139 号点为拟稳点(图 1 中红色点位),对各期流动资料进行了统一的拟稳平差,对各种系统误差进行了检验。在平差计算中,为了取得合理的平差精度,先进行多期平差资料的整体分析,初步了解各台仪器的方差后,再作几次调整,合理确定各台仪器的先验方差,

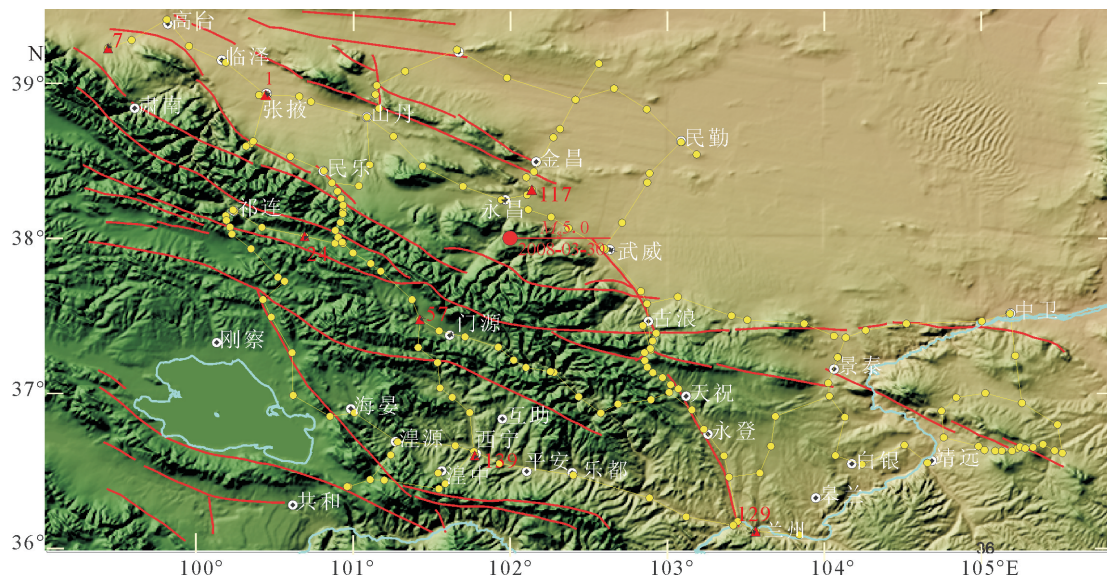


图 1 河西流动重力测网路线及构造略图

Fig.1 The mobile gravity survey network and tectonic sketch in Hexi area

以求得到最佳解算结果。同时使用最小二乘配置对重力观测数据进行拟合推估,最佳地确定网格化后的地表重力值,突出显示构造因素的重力效应。

在干扰因素分析方面,由于河西测区干旱、少雨等特殊地理条件,地下水活动对测量结果的干扰比较小;观测期间测区高程变化年速率最高为 10 mm/a,相应的重力效应小于 $3 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,因此地面高程的变化对重力变化影响较小。考虑到河西地区重力测点很少破坏,测点周围环境很少改变,对少许因环境变化和人为因素而产生变化的点位直接剔除。

2 河西地区重力场的空间演化特征

图 2 为河西地区 1 年尺度重力变化等值线图。图 2(a)显示,2010 年 05 月至 2011 年 5 月期间河西测区重力变化平缓。测区北部的河西走廊盆地和祁连山北麓为重力负值变化,负值最大为 $-50 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$;测区南部的祁连山为重力正值变化,正值最大为 $70 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$;在门源与互助之间有一重力正负变化的梯度带,重力变化正负差异为 $120 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。据此我们在 2012 年度的地震趋势预测意见中提出了“在祁连山东段段的互助北至湟中出现垂直于主要构造断裂的重力正负变化高梯度带,重力正负变化达到 $100 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,2012 年度互助、门源、湟中之间($N37.20^\circ$ 、 $E101.90^\circ$ 为中心,半径 80 km 范围内)有 6 级左右地震发生的可能”的意见。2012 年 05 月 11 日在 $N37.70^\circ$ 、 $E102.10^\circ$ 发生了 $M_s4.9$ 地震。震中与预测的地点经纬度分别为 0.2° 和 0.5° ,震级比预测的稍小。

图 2(b)显示,在 2011 年 5 月至 2012 年 5 月期间,河西地区的重力变化与 2010 年 5 月至 2011 年 5 月期间的重力变化反向:重力变化的零值线几乎和祁连山主断裂一致,北部的河西走廊盆地与祁连山北麓重力正值变化,祁连山区与南部地区重力负值变化。祁连至张掖之间榆木山断裂和昌马—峨堡断裂的交汇部位出现了一 $50 \sim 80 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 的重力变化高梯度带;重力变化剧烈的地区在甘肃的天祝、古浪与青海的门源之间,门源与古浪一线形成重力正负变化高梯度带,重力正负差异高达 $140 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。

图 2(c)为 2012 年 5 月至 2013 年 5 月期间的重力同期次年变等值线图。可看出河西重力变化呈现出测区东部及北部重力负值变化,西南的祁连山区正值变化的逆继承性重力变化,重力的正负变化

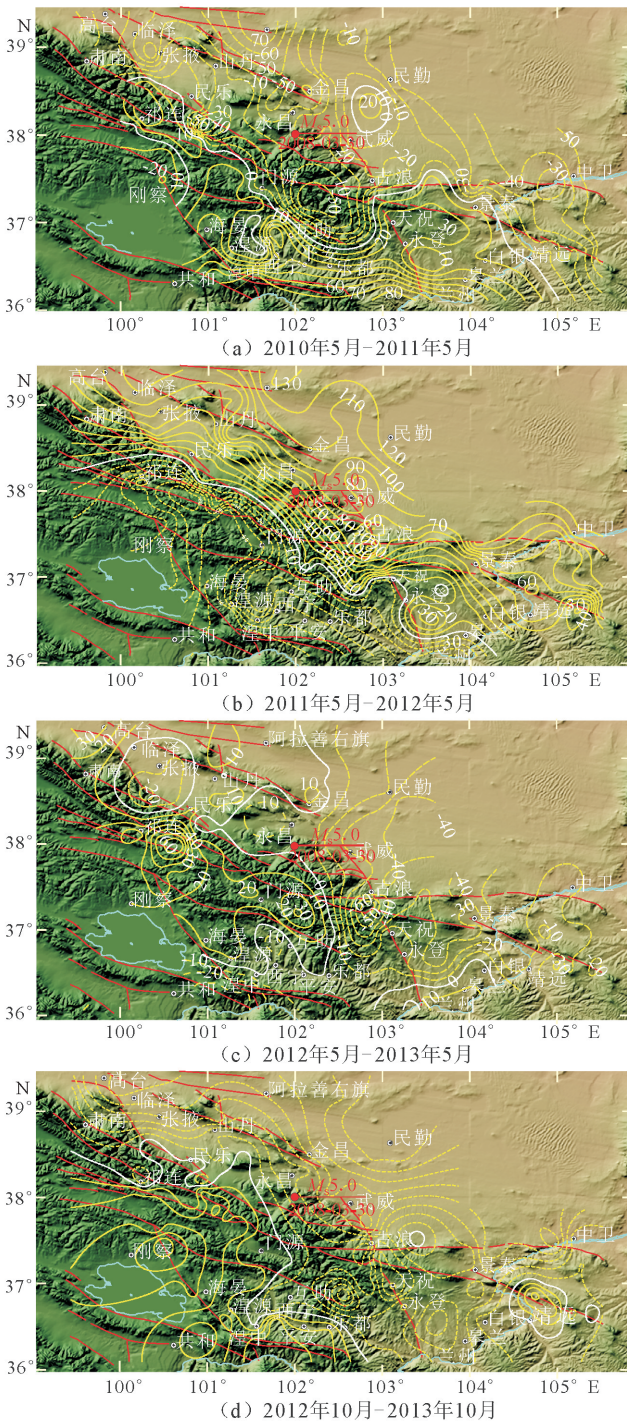


图 2 河西地区一年尺度重力变化等值线图
(2010 年 5 月—2013 年 10 月)

Fig.2 Isopleth of gravity variation in Hexi area during 2010-05 to 2013-10

分解线在祁连山中部基本与祁连山主干断裂一致,在张掖与祁连、古浪与门源、肃南至祁连间形成了两个重力变化高梯度带,古浪与门源、肃南至祁连间重力变化的正负差异达 $80 \sim 90 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。据此我们曾提出根据 2010 年月 5 月至 2012 年 5 月的重力

资料显示,古浪附近重力变化累积异常,2013 年度($N37.40^\circ$ 、 $E102.82^\circ$ 为中心,半径 80 km 范围内)有 5~6 级地震发生的可能。2013 年 9 月 20 日在两个重力变化高梯度带之间的甘肃肃南与青海门源间($N37.70^\circ$ 、 $E101.50^\circ$)发生了 $M_s5.1$ 地震,震中位于预测区域边缘。

2012 年 10 月至 2013 年 10 月河西测区重力变化(图 2(d))和 2012 年 5 月至 2013 年 5 月期间的变化基本一致,重力变化由 SW 到 NE 呈现由正向负的变化,正值重力变化集中在测区的西南部,其余地区均为负值重力变化,但重力变化比较平缓,古浪、天祝附近重力负值变化较大,2012 年 5 月至 2013 年 5 月的重力变化也反映了这个异常区的存在。发生了 2012 年 5 月 11 日古浪、天祝地区西北 $M_s4.9$ 地震和 2013 年 9 月 20 日甘肃肃南与青海门源间($E101.50^\circ$ 、 $N37.7^\circ$) $M_s5.1$ 地震,显示该地区断层活动强烈,具有更强的能量积累。

从河西地区 2010 年 5 月至 2013 年 5 月年较长时间的重力变化累积图(图 3)可见,河西地区较长时期的重力累积变化为继承性的重力变化:以祁连山北缘的民乐—天祝一线为界,该线以北的河西走廊盆地重力变化累积为正值,以南的祁连山区的重力变化累积为负值,该分界线的北南两侧重力累积变化从正向负变化剧烈,天祝—民乐一线形成一 EW 向的重力变化高梯度带,该梯度带位于祁连山北缘断裂上,在北部的重力累积正值最大为 $70 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$;重力变化累积在祁连山中段的峨堡和东部的天祝附近形成 2 个负值最大区,最大达 $-70 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,天祝—峨堡之间形成一重力累积变化的负值凹陷区,门源附近 2012 年 $M_s4.9$ 和 2013 年 $M_s5.1$ 地震发生于该负值凹陷区的中间部位。

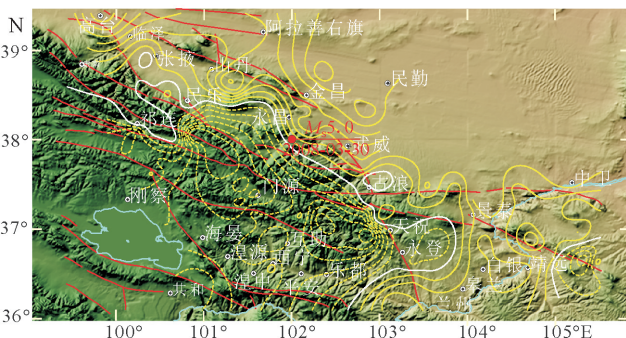


图 3 河西地区重力累积变化等值线图(2010 年 5 月—2013 年 5 月)

Fig.3 Isopleth of gravity variation in Hexi area during 2012-05 to 2013-05

3 剖面重力变化

重力时序变化能较好地突出异常测点的动态变化。本文对测区中的民乐、华藏寺和沙沟河三个跨断层综合场地的重力变化特征进行分析。

3.1 民乐跨断层综合场地

民乐跨断层综合场地跨越祁连山北缘断裂和昌马—峨堡断裂。该场地 2010—2011 年断层两侧的 7S~15S 间由上期的正值变化转为负值变化,量值达 $60 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。2011—2012 年的变化集中在昌马—峨堡断裂两侧及其以南的祁连山区,表现为重力负值变化,最大达 $77 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。2012—2013 年月的重力负值变化最大仅为 $29 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,较前两期负值变化最大达 $77 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 平缓,变化集中在两条断层的两侧(图 4)。

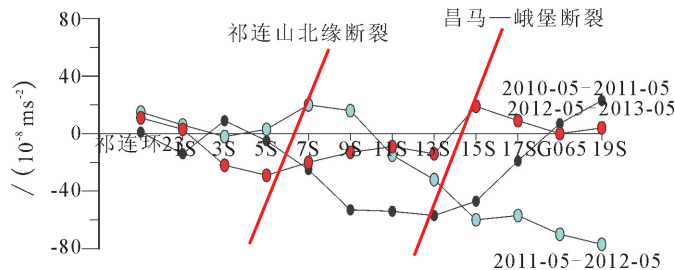


图 4 民乐跨断层综合场地重力变化(相地于祁连环 23)

Fig.4 Curves of gravity variation on Minle comprehensive sites across the fault

3.2 华藏寺跨断层综合场地

华藏寺跨断层综合场地从南至北分别跨越庄浪河断裂、毛毛山断裂和冷龙岭断裂。2010 年 5 月至 2011 年 5 月华藏寺场地本期的重力变化比较平缓,2011 年 5 月至 2012 年 5 月期间在三个断裂处变化剧烈,尤其是北部的冷龙岭断裂和南部的庄浪河断裂处,重力变化分别达到正负 $80 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 以上。2012 年 5 月至 2013 年 5 月期间乌梢岭以南的天祝和以北的古浪变化相反:南部的天祝由上期的负值变化转为正值变化,北部的古浪由上期的正值变化转为负值变化,但量值都不大,恢复到 2010 年 5 月至 2011 年 5 月的变化水平(图 5)。

3.3 沙沟河跨断层综合场地

沙沟河场地走向为 EW 走向,跨越海原断裂。其点位分布见图 6,最西面是河靖 33E,然后依次为沙沟河 1S~19S,最东端为西安州。该场地比较的变化平缓,重力变化集中在东端的沙沟河 19S、西安州和西端的河靖 33E。2010 年 5 月—2011 年 5 月

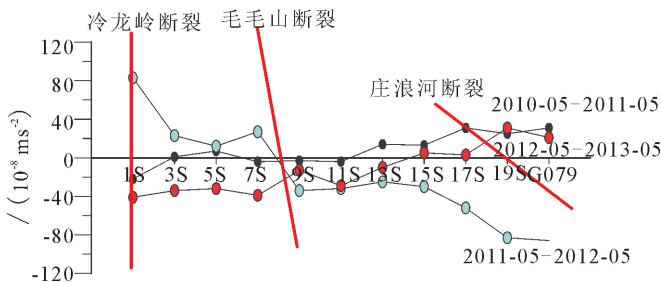


图5 华藏寺跨断层综合场地重力变化(相对于华藏寺1S)

Fig.5 Curves of gravity variation on Huazhangsi comprehensive sites across the fault

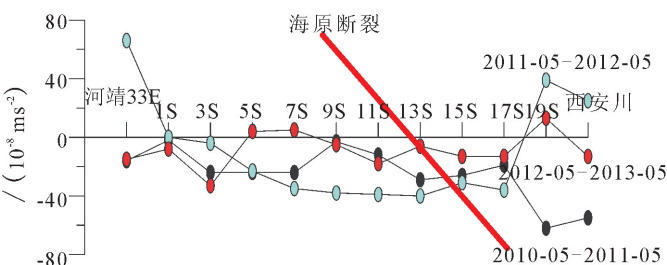


图6 沙沟河跨断层综合场地重力变化(相对于河靖33E)

Fig.6 Curves of gravity variation on Shagouhe comprehensive sites across the fault

期间东端的沙沟河19S和西安州变化量值最大达 $40 \sim 60 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,其余点位基本都维持在 $20 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 以内的负值变化;2011年5月—2012年5月期间西端的河靖33E、东端的沙沟河19S和西安州相对上期反向正值变化,但变化量值最大达 $30 \sim 65 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$;2011年5月—2012年5月期间变化平缓,没有异常出现。

4 结论与认识

重力变化能较好地反映地下深部物质运移与地壳密度变化等构造活动信息。沿活动断裂带由于其差异运动强烈而构造变形非连续性最强,最有利于应力的积累而孕育强震,地震大都发生在活动板块的边界或活动断裂带上。2010年5月—2013年10月期间河西走廊盆地的重力变化为负-正-负的变化,祁连山区则表现为正-负-正的变化,重力变化主要集中在祁连山中东段的峨堡-门源-古浪天祝一线间的祁连山北缘断裂、昌马-门源断裂和庄浪河断裂等附近,形成与断裂走向基本一致的重力变化高梯度带,并在重力变化高梯度带附近的峨堡-门源间分别发生了2012年 $M_s 4.9$ 和2013年 $M_s 5.1$

两次地震。这两次地震的发生预示着祁连山中东部断裂地下应力的不断积累导致物质运移活动加剧,结合该地区多年未发生 $M_s 6.0$ 以上地震的事实,也许会是该地区的能量更进一步释放的前兆,值得后期关注^[10-12]。

参考文献(References)

- [1] 卢造勋,方昌流.重力变化与海城地震[J].地球物理学报,1978,21(1):1-8.
LU Zao-xun, FANG Chang-liu. Variations of Gravity and Haicheng Earthquake[J]. Chinese J Geophys, 1978, 21(1): 1-8. (in Chinese)
- [2] 陈运泰,顾浩鼎,卢造勋,等.1975年海城地震与1976年唐山地震前后的重力变化[J].地震学报,1980,2(1):21-30.
CHEN Yun-tai, GU Hao-ding, LU Zao-xun, et al. Variations of Gravity Before and After Haicheng Earthquake, 1975 and Tangshan Earthquake, 1976 [J]. Acta Seismologica Sinica, 1980, 2(1): 21-31. (in Chinese)
- [3] 吴国华,罗增雄.丽江7.0级地震前后滇西实验场的重力异常变化特征[J].地震研究,1997,20(1):101-107.
WU Guo-hua, LUO Zeng-xiong. Gravity Abnormal Variation Characteristics Before Lijiang $M_s 7.0$ Earthquake in the Experiment Field in Western Yunnan[J]. Journal of Seismological Research, 1997, 20(1): 101-107. (in Chinese)
- [4] 祝意青,王双绪,江在森,等.昆仑山口西8.1级地震前重力变化[J].地震学报,2003,25(3):291-297.
ZHU Yi-qing, WANG Shuang-xu, JIANG Zai-sen, et al. Gravity Variation Before Kunlun $M_s 8.1$ Earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(3): 291-297. (in Chinese)
- [5] 祝意青,梁伟锋,徐云马,等.汶川 $M_s 8.0$ 地震前后的重力场动态变化[J].地震学报,2010,32(6):633-640.
ZHU Yi-qing, LIANG Wei-feng, XU Yun-ma. Dynamic Variation of Gravity Field before and After Wenchuan $M_s 8.0$ Earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 2009, 32(6): 633-640. (in Chinese)
- [6] 祝意青,胡斌,朱桂芝,等.民乐 $M_s 6.1$ 级、岷县5.2级地震前区域重力场变化[J].大地测量与地球动力学,2005,25(1):24-29.
ZHU Yi-qing, HU Bin, ZHU Gui-zhi, et al. Research on the Variation of Gravity Field Before Minle $M_s 6.1$ and Minxian $M_s 5.2$ Earthquakes [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005, 25(1): 24-29. (in Chinese)
- [7] 祝意青,梁伟锋,李辉,等.中国大陆重力场变化及其引起的地球动力学特征[J].武汉大学学报:信息科学版,2007,32(3):246-250.
ZHU Yi-qing, LIANG Wei-feng, LI Hui, et al. Studies on Gravity Field Variations and Geodynamic Characteristics in Mainland of China [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(3): 246-250. (in Chinese)
- [8] 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.
ZHU Yi-qing, XU Yun-ma, LV Yi-pei, et al. Relations between

- Gravity Variation of Longmenshan Fault Zone and Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake[J].Chinese J Geophys,2009,52(10):2538-2546.(in Chinese)
- [9] 褚庆忠,武泽,邵先杰,等.地震重力异常形成机理及其在地震预报中的作用[J].地震工程学报,2014,36(1):201-206.
CHU Qing-zhong,WU Ze,SHAO Xian-jie,et al.Mechanism of Gravity Anomaly before Earthquake and Its Role in Earthquake Prediction[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,36(1):201-206.(in Chinese)
- [10] 张晶.中强震前重复流动重力异常的模糊识别[J].壳形变与地震,1996,16(4):66-70.
ZHANG Jing.Fuzzy Recognition of Abnormal in Repeat Mobile Gravity Before Moderate Earthquake[J].Crustal Deformation and Earthquake,1996,16(4):66-70.(in Chinese)
- [11] 李辉,申重阳,孙少安,等.中国大陆近期重力场动态变化图像[J].大地测量与地球动力学,2009,29(3):1-10
LI Hui,SHEN Chong-yang,SUN Shao-an,et al.Dynamic Gravity Change in Recent Years in China Continent[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2009,29(3):1-10.(in Chinese)
- [12] 任镇寰,李健梅,乔计花,宫会玲.广西灵山地区深部断裂系统的重力资料解释[J].华南地震,2012,32(2):1-8.
REN Zhen-huan,LI Jian-mei,QIAO Ji-hua,GONG Hui-ling.Interpretation of Gravity Data of Deep Fault System in Lingshan Region of Guangxi[J].South China Journal of Seismology,2012,32(2):1-8.(in Chinese)

(上接 1002 页)

- [10] 韩森,段燕玲,孙欢,等.近断层地震动特征参数对基础隔震结构地震响应的影响分析[J].土木工程学报,2013,46(6):8-13.
HAN Miao,DUAN Yan-ling,SUN Huan,et al.Influence of Characteristics Parameters of Near-fault Ground Motions on the Seismic Responses of Base-isolated Structures[J].China Civil Engineering Journal,2013,46(6):8-13.(in Chinese)
- [11] Anil k Chopra,著.谢礼立,吕大刚,等.结构动力学理论及其在地震工程中的应用[M].北京:高等教育出版社,2013:141-177.
Anil K Chopra,Editor.XIE Li-li,LV Da-gang,et al.Theory and Applications to Earthquake Engineering[M].Beijing:Higher Education Press,2013:141-177.(in Chinese)
- [12] 李爱群,丁幼亮.工程结构抗震分析[M].北京:高等教育出版社,2010:73-78.
LI Ai-qun,DING You-liang.Analysis of Earthquake Resistance of Engineering Structures[M].Beijing:Higher Education Press,2010:73-78.(in Chinese)
- [13] 杜永峰,张尚荣,李慧.多级串联非比例阻尼隔震结构地震响应分析[J].西北地震学报,2012,34(4):319-323.
DU Yong-feng,ZHANG Shang-rong,LI Hui.Seismic Response Analysis on Multistage Series Non-proportion Damping Isolated Structure[J].Northwestern Seismological Journal,2012,34(4):319-323.(in Chinese)