

# 2011 年新疆伽师 $M_s$ 5.8 地震重力场前兆异常特征\*

朱治国, 刘代芹, 李杰, 王晓强

(新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 利用 2011 年 8 月 11 日新疆伽师  $M_s$  5.8 地震前喀什—伽师流动重力网 2009 年 4 月至 2011 年 7 月的重力复测数据, 绘制区域重力场差分 and 累计动态变化图像。分析表明: (1) 地震发生在断裂带重力变化正、负异常密集区的零等值线附近和重力场的反向恢复变化过程中; 地震发生前一年出现“闭锁”的重力变化特征; (2) 区域重力场差分变化反映出震前伽师—西克尔地区地壳物质运动信息; 区域重力场的“平静—活跃”过程, 反映出伽师—西克尔区域重力场短期局部构造运动; 区域重力场累计动态变化反映出地壳运动的背景特征; (3) 地震震前重力变化等值线平行于断层分布, 临震时重力变化等值线近垂直于断层, 是一个显著的重力特征。

**关键词:** 伽师地震; 重力场; 动态变化; 等值线; 前兆异常

**中图分类号:** P315.72      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2012)02-0201-06

## 0 引言

地震是地壳构造运动过程中内部能量集中释放的一种特殊表现形式, 地壳形变测量给出的地壳形变图像是地壳运动的一种外部表象, 两者都是地球内部物质运动的反映。地震与重力的关系是以地壳变形和密度(质量)变化而紧紧地联系在一起。在地震孕育过程中, 随着震源区应力的不断积累, 导致地面点的空间位置变化, 此外, 应变过程也伴生地壳介质密度的变化, 所有这些都导致地面重力场的变化。因此, 重力测量可以较好地反映活动断层的物质迁移和构造形变引起的地表重力变化, 通过定点重力连续观测或定期流动重力重复观测, 有可能捕捉到与震源变化有关的重力前兆信息(祝意青等, 2008)。

## 1 监测网概况及资料处理

新疆维吾尔自治区地域辽阔、气候干燥, 居民相对集中在城市和居民点。重力观测点多布设在野外人烟稀少的戈壁荒漠地区。新疆维吾尔自治区地震局为获取重力场变化信息, 于 2005 年初建立喀什—伽师流动重力监测网, 2007 年将监测网扩大至乌什、阿克苏等地。自建成后每年观测

两次, 观测时间选择每年春季和秋季, 每期观测外部条件大致相同。全网共由 46 个流动重力监测点组成, 平均间距 20 ~ 30 km, 基本覆盖了喀什、伽师、巴楚、乌恰及邻近地区(图 1)。

喀什—伽师流动重力监测网观测前期采用两台 LCR-G 型高精度重力仪, 后期采用两台高精度 CG-5 型重力仪(表 1), 观测采取双程往返测量

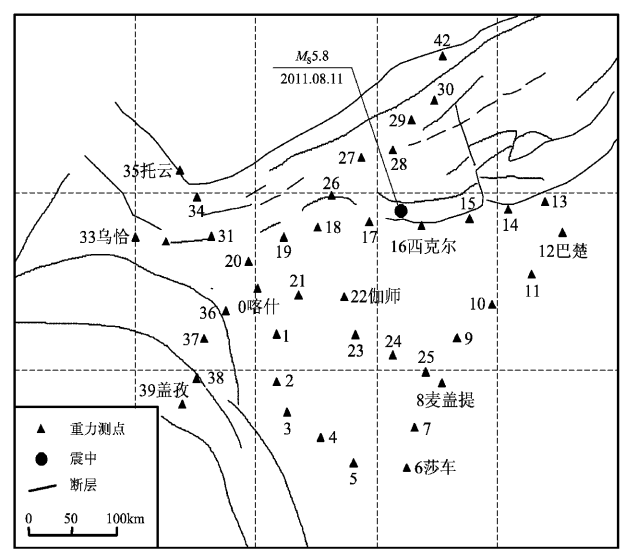


图 1 区域流动重力网布局与震中分布示意图  
Fig. 1 Layout of regional flow gravity network and distribution of epicenter

\* 收稿日期: 2011-09-09.  
基金项目: 新疆地震科学基金(201116)、(201117)、地震科技星火计划项目(XH1030)和新疆维吾尔自治区自然科学基金(2012211B56)联合资助。

方式。外业观测每测段自差均小于  $25 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，观测互差小于  $30 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。内业资料处理采用中国地震局推广的 LGADJ 软件进行整体计算，

表 1 喀什—伽师地区重力测量精度统计表  
Tab. 1 Precision statistics of the gravity measurement in Kashi-Jiashi area

观测时间 /年-月	仪器类型	仪器号	点值中误差 / $\times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
2009-04	LCR-G	808#、818#	9.6
2009-08	LCR-G	808#、818#	9.7
2010-03	CG-5	509#、524#	3.9
2010-07	CG-5	509#、524#	5.3
2011-03	CG-5	509#、524#	6.2
2011-07	CG-5	509#、524#	5.2

除进行一次项、固体潮、零漂改正外，还进行了仪器高改正。进行平差计算时，对多期观测资料计算结果进行整体分析，在初步了解各台仪器的观测精度后，合理确定各台仪器的先验方差，选取测点间段差变化较小，靠近盆地中间，距离断层较远，区域地质活动相对平静的三点做为拟稳点，进行拟稳平差计算，以得到最佳解算结果。

2 地震前区域重力场差分动态变化

2011 年 8 月 11 日新疆伽师发生  $M_s 5.8$  地震，震中位于喀什—伽师流动重力监测网中，以半年为时间尺度，对地震前后两年时间里喀什—伽师区域重力场进行分析，发现区域重力场有显著异常变化特征。

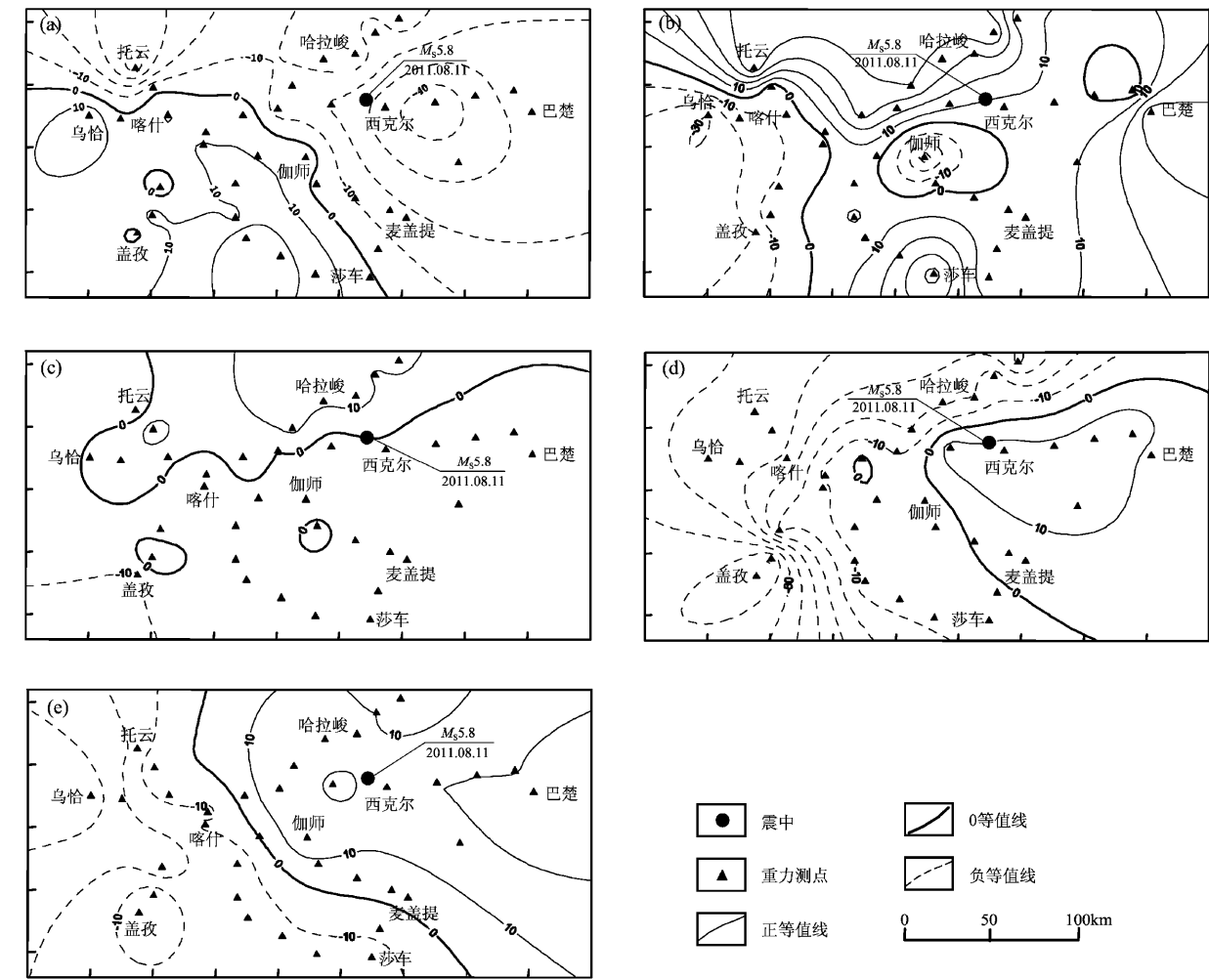


图 2 重力场差分动态变化等值线图  
(a) 2009 年 4 月~2009 年 8 月; (b) 2009 年 8 月~2010 年 3 月; (c) 2010 年 3 月~2010 年 7 月;  
(d) 2010 年 7 月~2011 年 3 月; (e) 2011 年 3 月~2011 年 7 月

Fig. 2 Isoline map of dynamic change of gravity field difference

图2a是2009年4~8月区域重力场差分等值线图,在图中可看出“0”等值线沿乌恰—喀什—伽师—莎车联线分布,把区域重力场分为两部分,联线的东北区域负向异常变化,西南区域正向变化,负向异常最大值( $> -40 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )出现在西克尔附近。

图2b是2009年8月至2010年3月区域重力场差分等值线图,在图中可以看出经过半年区域重力场变化发生较大逆转,重力场活动剧烈。图2a中的负向异常区域转为正向异常,正向变化区域转为负向异常。区域重力场变化的“0”等值线沿断层分布,出现在乌恰、伽师、西克尔等地。在伽师—西克尔区域重力场变化沿柯坪断裂两侧分异,北部呈现正向异常,南部呈现负向异常,重力异常等值线平行于断层并密集出现在断层附近,正向异常变化值达到 $+40 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。整个监测区域重力场变化呈现沿断层南北对称变化。

图2c是2010年3~7月区域重力场差分等值线图,这期间区域重力场变化延续了图2b所示变化趋势,伽师—西克尔区域重力场变化依然沿断层两侧分异。断层南北区域的异常区域消失,整个区域重力场变化减弱,呈“闭锁”状态,重力变化“0”等值线沿断层控制整个监测区域。

图2d是2010年7月至2011年3月区域重力场差分等值线图,从图中可看出重力场变化“0”等值线依然在西克尔—伽师—麦盖提联线,该联线以西是大面积的重力负向异常变化区域(最大值 $> -60 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ),以东是正向异常变化区域。与图2b比较发现伽师—西克尔区域重力场异常发生了完全的反向转换(朱治国等,2011),这反映出在此期间地壳内部物质沿重力梯度带发生快速迁移,地壳应力逐渐积累的过程。2009年8月到2011年3月伽师—西克尔区域重力场(图2b、c、d)区域重力变化等值线平行于断层,且沿断层两侧分异,重力场梯度变化方向垂直于断层,变化量累计达到 $-70 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,这可能是伽师5.8级地震的一个前兆异常信息。

图2e是2011年3~7月区域重力场差分等值线图,从图中可以看出这期间重力场变化延续图2d所示的变化趋势,正向变化区域有所扩大,量值有所增加,负向变化区域减小,变化量绝对值减小。结合2009年8月至2010年7月重力场变化观测结果,2010年7月至2011年7月区域重力场

变化趋势可能预示在以后半年期间伽师—西克尔区域不会发生强于2011年8月11日伽师 $M_{\text{s}}5.8$ 地震。

### 3 地震前区域重力场累积动态变化分析

图3是2009年4月至2011年7月,以2009年4月的观测为起点,对喀什—伽师流动重力监测网进行累计变化量分析,得到半年期区域重力场累积动态时空变化等值线图。

图3b与图3a比较,反映出区域重力场短时间内发生重大变化,区域重力场活动较为活跃,托云—喀什—伽师—西克尔联线的南、北部区域重力场均出现正向异常变化,南部区域正向异常增大,整个区域出现南北正向异常变化,东西负向异常变化,正向异常呈两个“楔形”,有从南北向中间楔入趋势。图3c与图3b比较发现,在图3b中西克尔—伽师—莎车—巴楚所围负向异常变化区域和托云—喀什—盖孜以西负向异常区域在图3c中依然为负向异常区域,区域重力场异常变化区没有发生变化,但是区域异常变化量有所增强,区域应力场增大。从图3d中可以看出,区域重力场在较短时间发生了较大变化,区域重力场正向异常区域增大,南北两个“楔形”在喀什—伽师区域相会,并且向东扩散使得图3c中西克尔—伽师—莎车—巴楚所围负向异常变化区域明显缩小,重力场格局发生较大变化。图3e与图3d比较发现区域重力场格局进一步发生变化,柯坪断裂以北区域重力场正向变化进一步增大,以南区域重力场负向变化面积再度缩小。在2011年8月11日伽师发生 $M_{\text{s}}5.8$ 地震。从重力场累积动态时空变化等值线图中反映出区域重力场长期积累的背景效应。这种动态运动趋势的背景效应对地震预报有一定的预示意义。

### 4 垂直形变对重力测量的影响分析

地表垂直形变运动对地表重力变化有一定影响,一般来说地表每抬升(或下降)1 cm将引起地表测点约 $3.086 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的下降(或上升)重力变化。目前高精度地表垂直运动观测主要通过水准测量来获得,但因其观测周期长,且与重力观测不同步或不匹配,故只能利用有关水

准测量测量成果粗略估算地表垂直运动对重力的影响。

1951~1982 年全国精密水准测量所获得的中国大陆第一幅现今垂直形变速率图表明,区域垂直运动速率一般在 $(+2\sim+5)\text{ mm/a}$ 之间,并从北往南呈逐步加大和发散之势,反映出较长背景性运动特征,其相当于 $(-0.6\sim+1.5)\times 10^{-8}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{a}$ 的重力变化(申重阳等,2011)。

区域水准测量结果表明:1955~1980 年南天山构造带垂直形变运动速率变化范围是 $(-2\sim+2)\text{ mm/a}$ ,其相当于 $(-0.6\sim+0.6)\times 10^{-8}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{a}$ 的重力变化量;1980~1995 年南天山构造带垂直形变运动速率变化范围是 $(0\sim+2)$

$\text{mm/a}$ ,相当于 $(0\sim+0.6)\times 10^{-8}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{a}$ 的重力变化量;综合分析 1955~1995 年南天山构造带的垂直形变运动速率变化范围是 $(0\sim+2)\text{ mm/a}$ (王晓强等,2009),相当于 $(0\sim+0.6)\times 10^{-8}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{a}$ 的重力变化量。乔学军(2011)通过 InSAR/GPS 对柯坪推覆构造的研究发现柯坪推覆构造体内的垂直运动与主要推覆体的构造活动密切相关,即山体褶皱带隆升,谷地沉降,隆升及沉降的速率约为 $(+1\sim+1.5)\text{ mm/a}$ ,其相当于 $(+0.3\sim+0.45)\times 10^{-8}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{a}$ 。

总之,已有研究成果及观测资料表明,水准观测获取的高精度垂直运动结果对重力变化的影响并不明显,基本在流动重力测量精度以内。

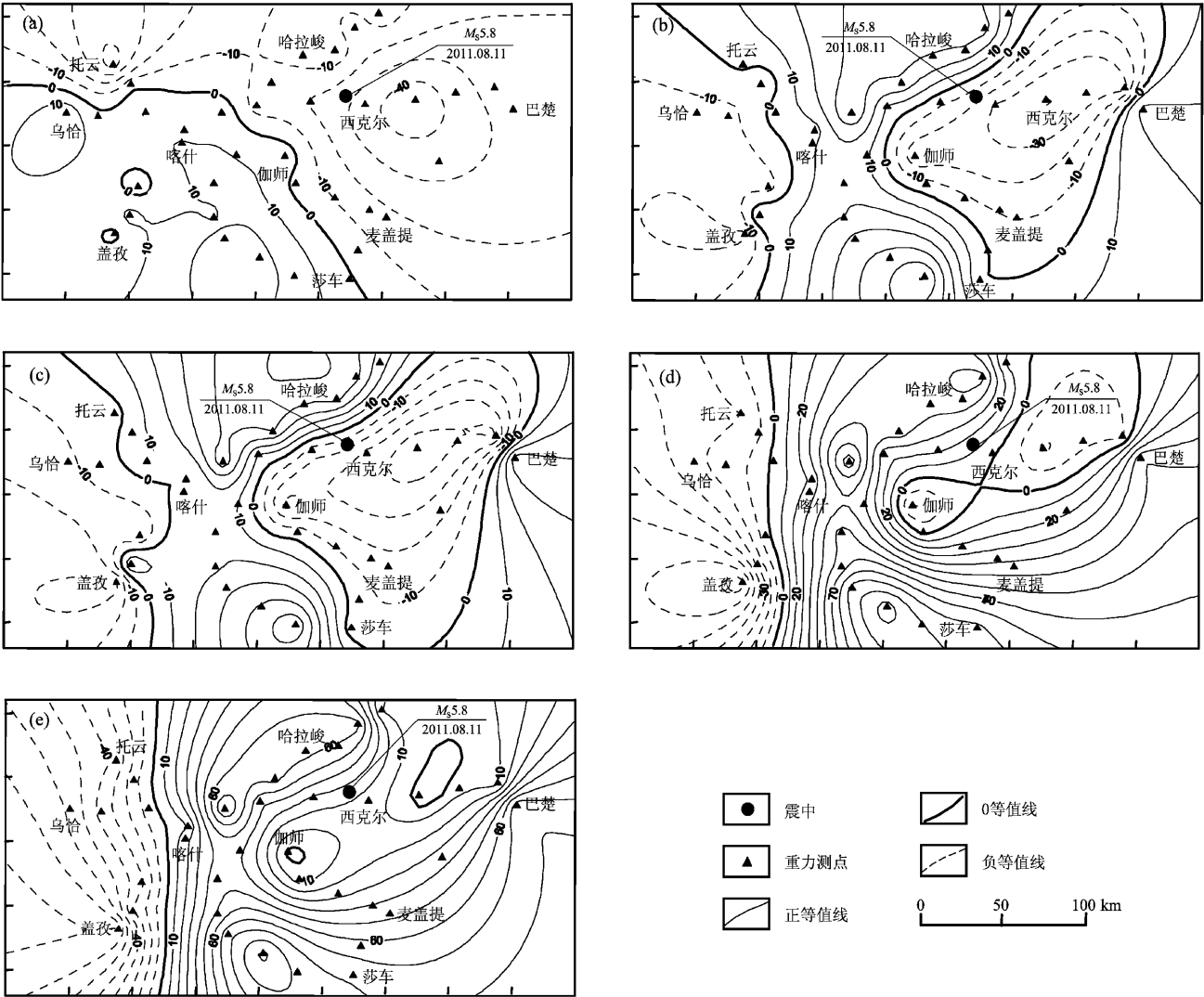


图3 重力场累积动态变化等值线图

(a) 2009 年 4 月~2009 年 8 月; (b) 2009 年 4 月~2010 年 3 月; (c) 2009 年 4 月~2010 年 7 月;  
(d) 2009 年 4 月~2011 年 3 月; (e) 2009 年 4 月~2011 年 7 月

Fig. 3 Isoline map of dynamic change of gravity accumulation

## 5 重力变化与构造活动

重力场变化包含了大量的构造活动信息,既有区域应力场作用下深大断裂活动,也有震源应力场作用下局部断裂活动的结果。受印度板块向北推挤和西北利亚地块的阻挡作用,中国新疆地面的地质构造比较复杂,形成了三山夹两盆的构造格局。由南向北,断裂系分为西昆仑、阿尔金、天山、西域断裂系。新疆地区重力变化较显著的梯度带主要位于山体与盆地的过渡地带,这些地带地表坡度陡,重力梯度值大,地壳厚度突变,莫霍面向山体陡倾,现今构造活动强烈,在这些地方地震易于发生(祝意青等,2003)。

震区处于南天山西南柯坪阶梯状断块翘起与塔里木断陷的过渡地带,柯坪断裂为构造体的分界断裂,微观震中位于柯坪推覆体西段,柯坪断裂为走向近东西、南北倾的逆冲断层。震害调查显示,破坏严重的地区位于柯坪断裂南缘,该断裂为柯坪推覆体的前缘,活动性较强,此次地震震源深度为 8 km,震源机制结果表明地震震源错动方式为逆冲型,因此柯坪断裂更可能为此次地震发震构造。

从半年尺度的区域重力场差分动态变化等值线图(图2)可以看出,伽师—西克尔区域震前地壳中物质运动呈现南北向运动趋势,与背景性构造运动基本一致,印证了伽师及邻近地区地壳主压应力为近南北方向的研究成果(王晓强等,2002)。震前重力变化等值线平行断层分布(图2b~d),临震重力变化等值线近垂直断层(图2e),震前两年时间里区域重力场变化出现一个“活跃—平静—活跃”的过程。重力场的动态变化较好的反映出地壳中物质运动趋势,差分动态变化反映出伽师—西克尔区域短期局部效应。

从区域重力场累积动态变化等值线图(图3)中可以看出,区域物质运动受到断裂运动影响和分割(申重阳等,2011),柯坪断裂对区域物质运动具有控制作用,震前断层两侧出现密集重力梯度带,“0”等值线分布在断层附近,临震时“0”等值线远离断层,重力变化等值线较稀疏。重力场变化等值线在伽师—西克尔区域始终平行断层走向,反映出该区域存在稳定背景应力场,最大压应力  $P$  轴方向近于 SN,最小应力  $T$  轴方向近

EW(屠泓为等,2008)的地壳运动背景特征。

## 6 认识与讨论

(1) 地震发生在重力变化正、负异常区密集带上的零值线附近地区,且处在断层上;震前区域重力场变化量累计达到  $-70 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,对震级的预测有一定意义;地震多发生在重力场的反向恢复变化过程中;地震发生前一年多重力场变化出现“闭锁”的重力特征变化。

(2) 区域重力场差分动态变化反映出伽师—西克尔区域物质运动信息,震前区域重力场变化较平静,临震变化活跃,区域重力场的“平静—活跃”过程,反映出伽师—西克尔区域重力场短期局部效应;区域重力场累计动态变化反映出地壳运动的背景特征。

(3) 地震震前重力变化等值线平行断层分布,临震重力变化等值线近垂直断层,反映出该区域在地震前应力的积累释放过程,是一个显著的重力异常前兆标志。

通过对伽师  $M_s5.8$  地震前重力场动态变化分析及其他震例的总结,可以看出重力场动态变化对区域地壳运动和地震具有重要指示意义,可为未来中强地震的中长期预测提供重要的震例经验和参考。

### 参考文献:

- 贾民育,孙少安,项爱民,等. 1995. 滇西北地区水循环的重力效应[J]. 地震学报,17(3):340-346.
- 乔学军. 2011. 中国西部活动断层的 InSAR/GPS 观测与构造活动研究[J]. 国际地震动态,(3):36-37.
- 申重阳,谈洪波,郝洪涛,等. 2011. 2009 年姚安  $M_s6.0$  地震重力场前兆变化机理[J]. 大地测量与地球动力学,31(2):17-22.
- 屠泓为,万秀红,高歌,等. 2008. 1977 年至 2006 年新疆伽师地震断层面性质及应力场变化原因初探[J]. 地球物理学进展,23(4):1038-1044.
- 王晓强,路星,刘斌,等. 2009. 新疆地区现今地壳垂直运动及地震活动研究[J]. 大地测量与地球动力学,29(6):22-31.
- 王晓强,王琪,程瑞忠,等. 2002. 新疆伽师及临近地区现今地壳变形的 GPS 监测研究[J]. 西北地震学报,24(3):20-24.
- 朱治国,王晓强,刘代芹,等. 2011. 2005-2009 年喀什伽师地区重力场变化与地震[J]. 地震研究,34(2):31-35.
- 祝意青,胡斌,李辉,等. 2003. 新疆地区重力变化与伽师 6.8 级地震[J]. 大地测量与地球动力学,23(3):66-69.
- 祝意青,徐云马,梁伟锋. 2008. 新疆于田  $M_s7.3$  地震的中期预测[J]. 大地测量与地球动力学,28(5):13-15.

## Precursory Anomaly Features of Gravity Field before Jiashi $M_s5.8$ Earthquake, in Xinjiang in 2011

ZHU Zhi-guo, Liu Dai-qin, LI Jie, WANG Xiao-qiang

(Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, Uygur Autonomous Region, China)

### Abstract

Using the gravimetric data of the second measuring from Apr. , 2009 to Jul. , 2011 in Kashi-Jiashi mobile gravity network before Jiashi  $M_s5.8$  earthquake on Aug. 11 , 2011 , we obtained dynamic differential and cumulative change maps of regional gravity field. The results show as follows: (1) The earthquakes occurred near the “0” contour line in the concentrated region of gravity positive and negative anomalies of the fault zone and in the reverse recovery process of the gravity field. (2) Difference changes of regional gravity field reflected crustal substance movement in JiaShi-Xiker area before Jiashi  $M_s5.8$  Earthquake. “Peace-active” process of regional gravity field reflected the local tectonic movement in short time. The accumulated dynamic change of region gravity field reflected the background characteristics of crustal movement. (3) The contour line of gravity variation paralleled to the fault before earthquake, however it perpendiculated to the fault before the shock, which was an significant gravity characteristics.

**Key words:** Jiashi earthquake; gravity field; dynamic change; contour line; precursory anomaly