

# 关中流动重力测网的中小地震映震能力分析\*

张永奇<sup>1,2</sup>, 丁晓光<sup>1,2</sup>, 曹建平<sup>1</sup>, 翟宏光<sup>1</sup>, 苏利娜<sup>1,2</sup>, 郑增记<sup>1</sup>

(1. 陕西省地震局, 陕西 西安 710068; 2. 中国地震局地质研究所, 北京 100029)

**摘要:** 采用拟稳平差方法对 1992—2011 年陕西关中重力测网流动观测资料进行平差计算, 获得各期高精度重力值, 利用 Kriging 插值算法获得差分及累积重力场变化图像, 结合 1998 年 1 月 5 日泾阳  $M_s4.8$  地震及 2009 年 11 月 5 日高陵  $M_s4.4$  地震, 分析 2 次地震前后重力场及重力点值时序变化特征。结果表明: (1) 2 次地震前后都有较明显的重力异常变化, 变化过程表现为正向—负向—正向重力变化, 符合地震扩容模式; (2) 2 次地震的发生与渭河断裂及泾阳—渭南断裂构造活动有关, 震中位置处于重力等值线零值线及拐弯处, 但 2 次地震前重力累积变化不明显; (3) 关中西部重力测点在 2 次地震前后重力值变化显著, 关中东部重力点值变化不明显, 震中附近的测点在泾阳地震前后变化明显, 在高陵地震前后变化不明显。

**关键词:** 关中地区; 流动重力测量; 重力场变化; 泾阳  $M_s4.8$  地震; 高陵  $M_s4.4$  地震

**中图分类号:** P315.726

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2017)02-0248-09

## 0 引言

我国流动重力测量始于 20 世纪 60 年代邢台地震发生后, 其结果反映的是区域重力场的非潮汐变化信息。地震在孕育过程中伴随着区域构造应力场变化、地壳内部物质迁移以及地球介质密度变化, 这些信息可以被流动重力测量观测到 (陈运泰等, 1980; 顾功叙等, 1997)。随着高精度重力测量仪器的发展和流动重力网的优化改造, 流动重力的监测能力得到进一步的提高 (李瑞浩等, 1997)。研究表明, 在大、中强地震前后可以观测到显著的重力变化, 甚至在一些中小地震前后都可以观测到重力变化 (陈运泰等, 1980; 祝意青等, 2012, 2013b; 李清林等, 1997; 李天生, 范文, 1992; 梁伟锋等, 2012; 郑兵等, 2015; 贾宇鹏等, 2015)。因此通过研究重力场变化特征, 可为区域地震趋势的研判提供参考依据。优化改造重力监测网的布局, 对捕捉地震前兆信号尤为重要 (贾民育, 1996; 贾民育, 詹洁晖, 2000; 项爱民等, 2007)。近年来, 我国学者在 6 级以上地震的中短期预测预报方面进行了深入探索, 取得了较好的成绩, 研究结果进一步表明重力测量是

一项有效的地震前兆监测手段 (祝意青等, 2009, 2013a)。

陕西关中重力测网始建于 20 世纪 80 年代, 于 90 年代初进行了优化改造。重力测网每年观测 1 期, 2008 年汶川  $M_s8.0$  地震发生后, 加密为每年观测 2 期。重力测网观测期间, 发生了 1998 年 1 月 5 日泾阳  $M_s4.8$  地震、2009 年 11 月 5 日高陵  $M_s4.4$  地震, 针对这 2 次地震事件, 不同的学者对其发震构造、震源机制、地壳形变等方面进行了较为深入的研究, 得出一些重要的结论 (王卫东, 2002; 戴王强等, 2007; 高好林等, 2005, 2006; 曹建平等, 2017)。笔者在前人研究成果的基础上, 基于关中重力测网重复观测资料, 对泾阳  $M_s4.8$  地震、高陵  $M_s4.4$  地震前后的重力场、重力点值时序变化特征进行分析, 探讨重力场异常变化与地震活动的相关性, 同时对地震前后重力变化进行机理分析。

## 1 测区概况及数据处理

关中地区位于鄂尔多斯块体、甘青块体、华北及华南块体之间, 在我国现代构造变形的大陆动力学格局中具有特殊的地位。关中地区不仅是

\* 收稿日期: 2016-07-04.

**基金项目:** 陕西省地震局起航与创新基金课题——基于重力资料研究陕西省断裂分布与构造分区 (2015-14) 和中国地震局监测、预测、科研三结合课题——陕西重力资料的深挖掘及地震潜在危险区判定 (162704) 联合资助。

我国东西部大地构造的分界带和解耦带，也是鄂尔多斯、华北、华南等构造块体差异运动的调节带。区域内发育了大量左旋走滑及正断性质的断裂，如陇县—宝鸡断裂带、渭河断裂、华山山前断裂、秦岭北麓断裂、口镇—关山断裂等，这些断裂不仅控制着区域内构造应力场分布格局，对地震的孕育过程也具有重要的影响。1998 年 1 月 5 日泾阳  $M_s4.8$  地震、2009 年 11 月 5 日高陵  $M_s4.4$  地震均发生在渭河断裂附近的泾阳—渭南断裂上(吴富春等, 2000; 王平等, 2014)。

关中重力测网主要覆盖关中地区，大体范围是 ( $34^{\circ}\text{N} \sim 35.8^{\circ}\text{N}$ ,  $106.5^{\circ}\text{E} \sim 110.5^{\circ}\text{E}$ )。自 1992 年起，每期由 2 台 LCR-G 型重力仪开展观测。为了确保相对重力联测精度，减少仪器误差影响，仪器格值在测前都按照规范要求进行了长基线场地标定，观测精度达到规范要求。关中重力测网包括 121 个测点，但由于破坏及改造，每期测点个数及网形不尽相同，但基本保持观测 120 个点左右，关中地区重力网及主要构造见图 1。平差计算采用中国地震局实用化攻关推广软件 LGADJ，平差起算基准采用拟稳基准，拟稳点的选取遵循以下原则：①观测资料连续，没有中断和停测；②点值变化平稳，没有明显的趋势性变化；③测点处于相对稳定的构造区，离活动断裂相对较远；④墩标稳定，属于混凝土埋石点。按照上述原则选择了测区的 9 个测点，拟稳点具体情况见表 1。平差计算过程如下：①资料预处理，进行固体潮、气压、一次项、仪器高、周期误差等改正；②对多期重力资料计算结果进行整体分析，了解不同仪器的观测精度，以此确定各台仪器的先验方差，再进行平差计算，确保结果合理可靠；③采用 krig-

ing 插值算法进行重力值拟合推估，同时进行样条平滑和高斯滤波。最终得到重力测点精度平均值优于  $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，精度统计详见表 2。

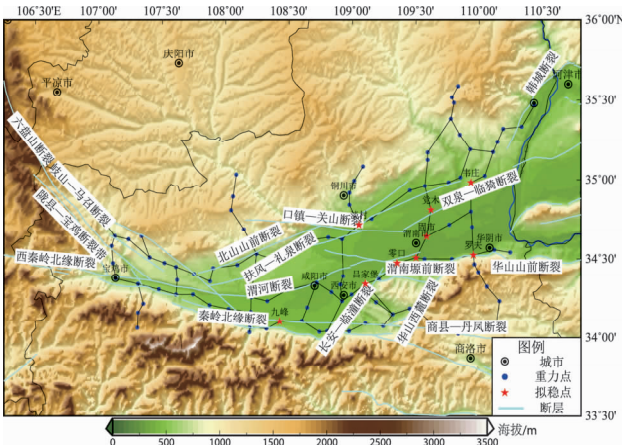


图 1 关中重力测网测点分布及断裂略图  
Fig. 1 The sketch of gravity network measuring points and faults in Guanzhong area

表 1 拟稳点信息  
Tab. 1 The information of quasi stable points

点号	点名	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	埋石类型
61003100	固市	34.6	109.5	混凝土埋石点
61003400	韦庄	34.9	109.9	混凝土埋石点
61004000	党木	34.8	109.6	混凝土埋石点
61005100	零口	34.4	109.3	混凝土埋石点
61005200	渭南	34.5	109.5	混凝土埋石点
61004900	吕家堡	34.3	109.1	混凝土埋石点
61005500	罗夫	34.5	109.9	混凝土埋石点
61006800	九峰	34.1	108.4	混凝土埋石点
61010700	淡村	34.7	109.0	混凝土埋石点

表 2 关中重力测网测量情况  
Tab. 2 The information of Guanzhong gravity network

仪器型号	观测时间/年-月	点值精度均值/ $10^{-8} \text{ (m} \cdot \text{s}^{-2})$	仪器型号	观测时间/年-月	点值精度均值/ $10^{-8} \text{ (m} \cdot \text{s}^{-2})$
LCR-G829、G843	1995-07	6.0	LCR-G829、G843	2005-07	6.4
LCR-G829、G843	1996-07	6.5	LCR-G999、G027	2006-08	6.9
LCR-G829、G843	1997-07	6.5	LCR-G808、G818	2007-07	6.8
LCR-G808、G818	1998-10	6.8	LCR-G843、G829	2008-05	7.0
LCR-G829、G843	1999-07	6.8	LCR-G003、G134	2009-05	6.0
LCR-G829、G843	2000-07	7.5	LCR-G003、G134	2009-09	7.2
LCR-G793、G854	2001-05	8.3	LCR-G999、G027	2010-06	7.2
LCR-G003、G999	2002-04	6.7	LCR-G999、G027	2010-11	5.7
LCR-G829、G843	2003-07	8.0	LCR-G999、G027	2011-06	6.6
LCR-G829、G843	2004-08	7.2	LCR-G999、G027	2011-11	6.9

## 2 重力场时空变化特征分析

### 2.1 泾阳 $M_s 4.8$ 地震前后重力场动态差分变化

本文首先分析 1998 年 1 月 5 日泾阳  $M_s 4.8$  地震前后重力场变化特征, 如图 2 所示。由图 2a (1995 年 7 月—1996 年 7 月) 可知, 渭河盆地内部重力场等值线空间展布基本沿着渭河断

裂、扶风—礼泉断裂和北山山前断裂等, 渭河断裂南侧重力场主要表现为负值变化, 其北侧主要表现为正值变化, 预示着该时段重力场变化特征受活动断裂带控制。在永寿、三原及大荔等地区出现重力线拐弯现象, 研究表明这些拐弯部位有利于地震孕育, 近年来多个震例显示这种重力线拐弯处易于地震发生 (祝意青, 2009, 2013a, b)。总体上看, 图 2a 中重力变化幅度不大, 基本在

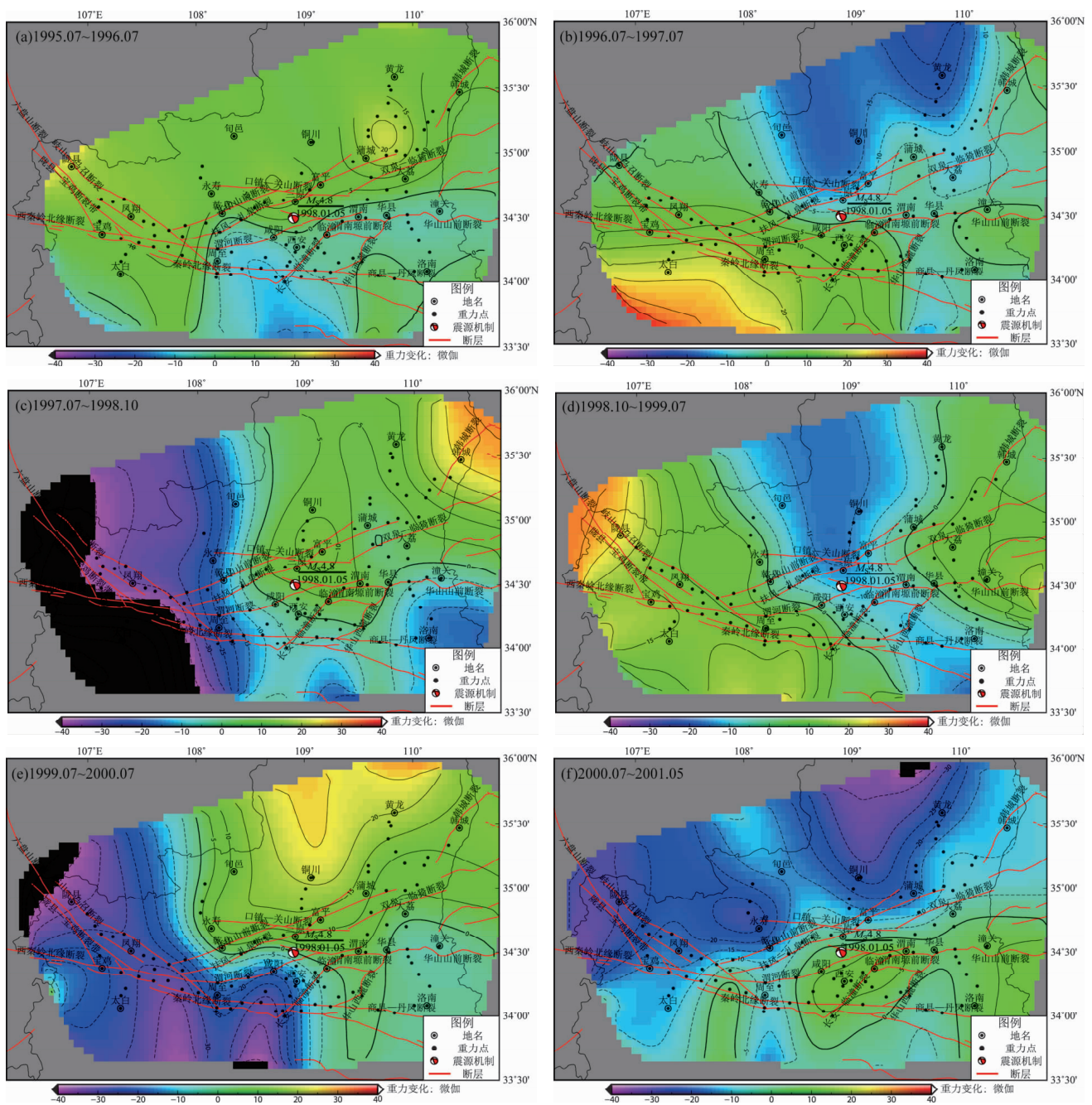


图 2 泾阳  $M_s 4.8$  地震前后重力场变化图像 (单位:  $10^{-8} \text{ m/s}^2$ )

Fig. 2 Maps of the gravity changes before and after the Jingyang  $M_s 4.8$  earthquake (Unit:  $10^{-8} \text{ m/s}^2$ )



( $-20 \sim 30$ )  $\times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  变化。由图 2b (1996 年 7 月—1997 年 7 月) 可知, 本期重力场变化幅度有所增强, 同时变化趋势出现反转, 基本以永寿—泾阳—临潼一线为界, 其东北向区域重力场呈现较大范围负值变化, 西南向区域重力场呈现为正值变化。图 2c (1997 年 7 月—1998 年 10 月) 显示, 关中西部出现大范围的重力场负值变化, 尤其是凤翔以西地区重力场最大负值变化达  $-50 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。关中东部出现大范围的重力场正值变化, 最大变化集中在韩城附近, 量值达  $35 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。重力场零等值线分布在咸阳—西安—蓝田一带, 泾阳位于零等值线附近的西北侧, 并形成重力变化梯度带, 正负差异变化达到  $45 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ , 1998 年 1 月 5 日在泾阳发生了  $M_{\text{s}}4.8$  地震。图 2d (1998 年 10 月—1999 年 7 月) 显示泾阳  $M_{\text{s}}4.8$  地震后重力场变化再次出现反转, 震中附近重力场由正值变化转为负值变化, 这与震后物质重新分布、应力重新调整的特征有一定的对应关系。图 2e (1999 年 7 月—2000 年 7 月) 出现了和上期 (图 2d) 不同的变化趋势, 以永寿—泾阳—临潼为界, 西南部出现大范围重力场负值变化, 东北部出现大范围正值变化, 重力变化高梯度带依然在泾阳附近, 差异变化约  $50 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。图 2f (2000 年 7 月—2001 年 5 月) 显示重力等值线分布格局与震前状态 (图 2a) 相似, 量值变化与震前水平相当, 区别在于渭河断裂以南地区重力场表现为正值变化, 以北表现为负值变化。总体上泾阳  $M_{\text{s}}4.8$  地震前后震中区重力场变化遵循正向—负向—正向变化的动态演化过程, 符合地震扩容模式, 即地下岩石压缩—膨胀—流体扩散的 3 个阶段的演化特征, 只是这种变化有稍许的滞后效应。

## 2.2 高陵 $M_{\text{s}}4.4$ 地震前后重力场动态差分变化

2009 年 11 月 5 日陕西省高陵县发生了  $M_{\text{s}}4.4$  地震, 该地震前后重力场变化特征如图 3 所示。图 3a (2006 年 8 月—2007 年 7 月) 显示重力场自西向东表现为正值—负值—正值变化特征, 分界线大体为彬县—咸阳—西安和黄龙—大荔—华县, 但重力场变化幅度较小, 基本在 ( $-30 \sim 20$ )  $\times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  之间, 只在韩城、蒲城形成 2 个局部重力异常区, 量值分别是  $25 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 、 $-30 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。图 3b (2007 年 7 月—2008 年 5 月) 与

上期 (图 3a) 相比出现重力场反向变化, 震中高陵地区由上期的负值变化变为正值变化。旬邑—麟游一周至以西出现较大范围的重力负值变化, 但变化量值不大, 另外在韩城出现较大范围重力场负值变化。临潼—渭南—华县以南出现大范围的重力正值变化, 变化达  $50 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。震中高陵处于重力正值变化区域。图 3c (2008 年 5 月—2009 年 5 月) 显示关中地区重力场变化特征进一步发生调整, 整个关中地区重力场以正值变化为主, 正向变化值位于永寿、旬邑附近, 达  $40 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。咸阳—三原—铜川—大荔一线的东南地区重力场出现负值变化, 负向变化最大值位于洛南地区, 达  $-35 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ , 零值线位于三原附近, 震中高陵位于零值线附近。由图 3d (2009 年 5—9 月) 可知, 高陵地震前震中附近形成重力四象限分布格局, 地震震中处于四象限的鞍部。这种重力场分布格局可能受 2008 年 5 月 12 日四川汶川  $M_{\text{s}}8.0$  地震远场效应影响。汶川地震后地震能量沿北川—青川断裂向北东方向扩散, 引起北东方向的陕西南部及关中地区应力场重新调整, 物质重新分布, 从而导致关中中部渭河断裂出现局部应力集中, 进而诱发 2009 年 11 月 5 日的高陵  $M_{\text{s}}4.4$  地震。图 3e (2009 年 5 月—2010 年 6 月) 显示高陵  $M_{\text{s}}4.4$  地震后由于震后应力场松弛效应, 高陵震中附近重力变化梯度带消失, 重力场由  $0 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  变化为  $-5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ , 相比上期 (图 3d) 重力场分布格局发生顺时针旋转。图 3f (2010 年 6 月—2011 年 6 月) 显示重力场在进一步应力场调整作用下, 负值变化区域显著缩小, 正值变化区域明显扩大。高陵地震前后重力场变化也符合地震扩容理论。

## 2.3 2 次地震前重力场累积变化

重力场累积变化图像可以直观判断研究区域重力累积变化情况, 可以对研究区域未来地震发震概率研判提供一定的参考。为此本文分析了泾阳  $M_{\text{s}}4.8$  地震、高陵  $M_{\text{s}}4.4$  地震前的重力累积变化情况, 如图 4 所示。图 4a (1993 年 7 月—1997 年 7 月) 显示, 重力场累积变化并不显著, 整个关中地区重力场基本以正值变化为主, 铜川—泾阳—蒲城以北出现重力场局部负值变化, 周至地区出现局部的负值变化。泾阳  $M_{\text{s}}4.8$  地震震中位于重力场变化的零值线附近, 重力变化幅度不大,

研究表明这种现象属于局部“硬化”,表明该地区附近的渭河断裂构造活动加强,而震中闭锁程度增大(祝意青等,2013b)。除此之外,地震往往发生在重力变化零值线及等值线拐弯处(申重阳等,2010;祝意青等,2013a,b),而1998年1月5日泾阳 $M_s4.8$ 地震恰好发生在具有这种特征的位置。图4b(2006年7月—2009年9月)显示,与泾阳 $M_s4.8$ 地震前重力场累积变化相似,高陵

$M_s4.4$ 地震前重力累积变化也不显著,在震中北部和南部出现2个较大的重力场负值变化区,量值分别为 $-35 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 、 $-25 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ,震中处于重力场变化零值线及等值线拐弯附近,同样高陵 $M_s4.4$ 地震前也属于局部“硬化”现象(祝意青等,2013b)。另外2次地震的震源机制解与重力场变化等值线展布具有一定的对应关系。从泾阳 $M_s4.8$ 地震和高陵 $M_s4.4$ 地震前的重力累积变化

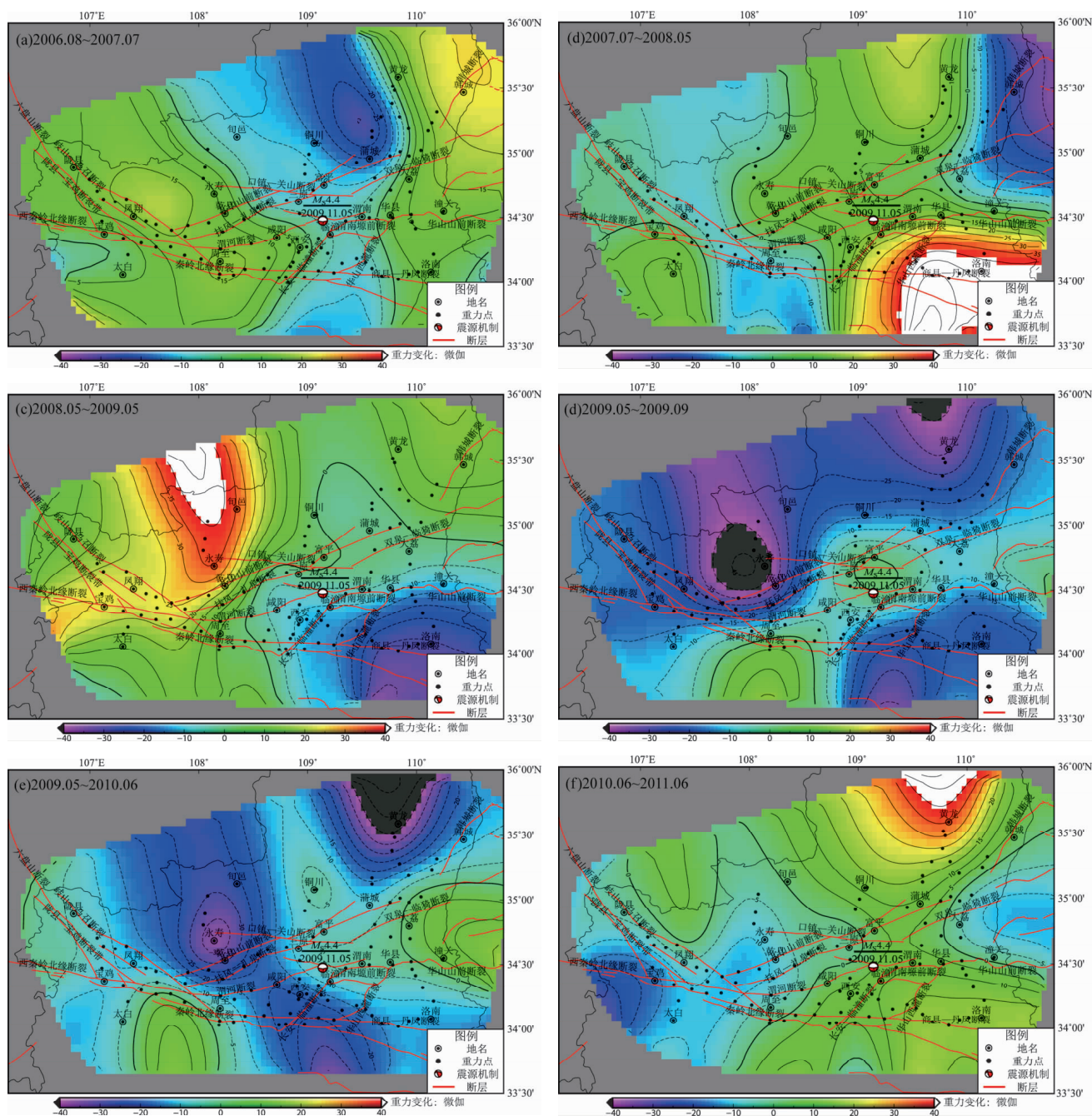


图3 高陵 $M_s4.4$ 地震前后重力场变化图像(单位: $10^{-8} \text{ m/s}^2$ )

Fig. 3 Maps of the gravity changes before and after the Gaoling  $M_s4.4$  earthquake (Unit:  $10^{-8} \text{ m/s}^2$ )

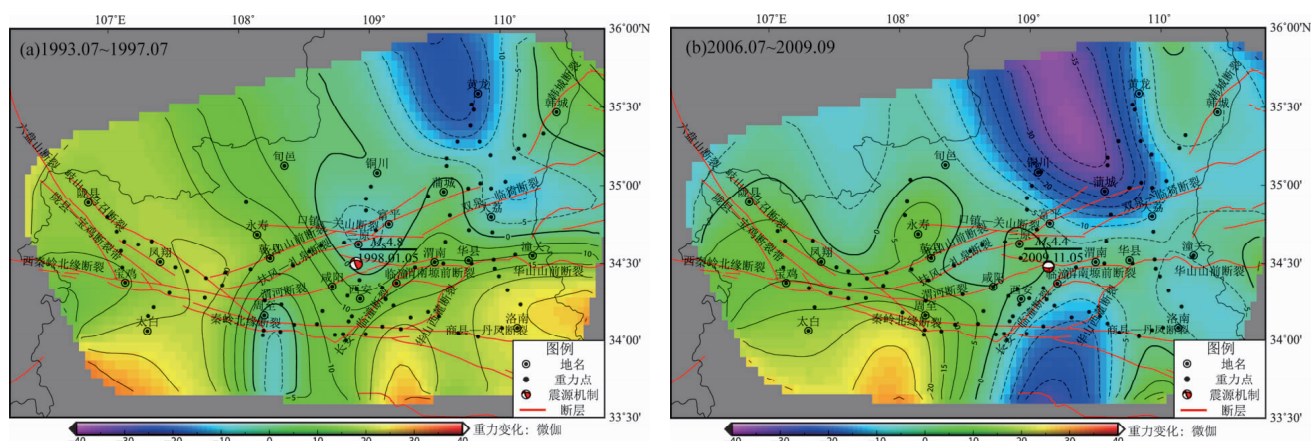


图4 2次地震前重力场累积变化图像

Fig. 4 Maps of accumulated gravity changes filed before two earthquakes (Unit:  $10^{-8} \text{ m/s}^2$ )

来看,重力的累积量较小,尤其是4~5级左右的中小地震,震前很难发现明显的重力累积变化。但2次地震震中都处于重力变化零值线及等值线拐弯处,因此可将该特征作为中小地震的研判指标(申重阳等,2010;祝意青等,2009,2012,2013a,b)。

#### 2.4 2次地震前后重力点值时序变化

重力点值时序变化可以反映地震前后重力点异常变化的情况,从而可以分析距离地震震中不同距离、不同方位、不同断裂附近重力点值的变化过程及趋势。限于篇幅,本文只选取了关中西部、中部、东部地区不同断裂部位的18个重力点(图5),绘制了这些测点1992—2012年时间序列,重点分析这些测点对泾阳 $M_{5.4.8}$ 和高陵 $M_{5.4.4}$ 两次地震的响应关系,具体如图6所示。选取的18个重力测点中部分测点在2次地震前后变化显著,变化量大于2.5倍的点值精度均值,有的变化不显著,甚至与点值精度均值大小相当。但这些测点都可以在一定程度上反映2次地震前后重力变化过程。

图6a表示的是关中西部的重力点值变化情况,其中凤翔、岐山、扶风测点位于陇县—岐山—马召断裂附近,距离2次地震震中相对较远,泾阳 $M_{5.4.8}$ 地震前后这3个点都出现上升—下降—加速上升—下降(发震)—小幅上升—加速下降的变化过程,而地震发生在重力值下降的过程中;高陵 $M_{5.4.4}$ 地震前后这3个点的变化过程是:下降—上升—下降—上升(发震)—小幅上升—下降,与泾

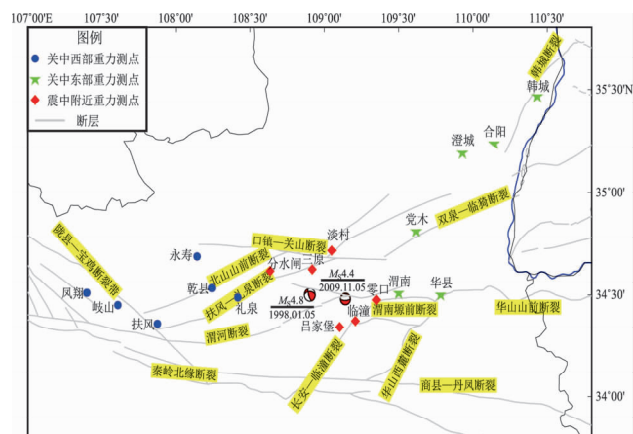


图5 重力点分布及构造略图

Fig. 5 Distribution of gravity points and structure diagram

阳地震发震时不同,高陵地震发震时处于重力上升过程。永寿、礼泉、乾县测点位于口镇—关山断裂、北山山前断裂、扶风—礼泉断裂附近,泾阳地震前重力变化比较平缓,发震在重力负值变化过程中,高陵地震前后经历了快速上升—快速下降—缓慢上升(发震)—缓慢下降的变化过程。

图6b表示的关中东部的重力点值变化情况,其中澄城、韩城、合阳测点位于韩城断裂附近,泾阳 $M_{5.4.8}$ 、高陵 $M_{5.4.4}$ 地震前后重力变化幅度不大,地震发生时这3个测点都是处于重力正值变化过程;华县、党木、渭南测点分别处于华山山前断裂、双泉—临猗断裂、渭南塬前断裂附近,这3个测点在2次地震前后重力变化幅度也不大,基本在重力正向变化过程中发生地震。



图 6c 表示的是关中中部即 2 次地震震中附近重力点值变化情况。其中零口、临潼、吕家堡位于长安—临潼断裂、长安—临潼断裂、渭南塬前断裂附近, 泾阳  $M_s4.8$  地震前后这 3 个测点重力变化相对较大, 基本在重力下降过程中发生地震, 高陵  $M_s4.4$  地震前后重力变化比较平稳, 只有吕家堡测点在震前出现快速上升和下降的过程; 而处于震中西侧的三原、淡村、分水闸的 3 个测点,

分别位于扶风—礼泉断裂、北山山前断裂附近, 2 次地震前后重力点值变化比较明显, 尤其是泾阳地震前后, 重力处于快速上升—下降—上升—下降的变化过程。与图 6a 中测点相比, 变化更加剧烈, 同时变化趋势发生转向, 如凤翔等测点在泾阳地震发震时处于下降变化, 而三原等测点则处于上升变化, 同样的, 高陵地震发震时 2 个区域的测点也出现变化趋势转向的情况。

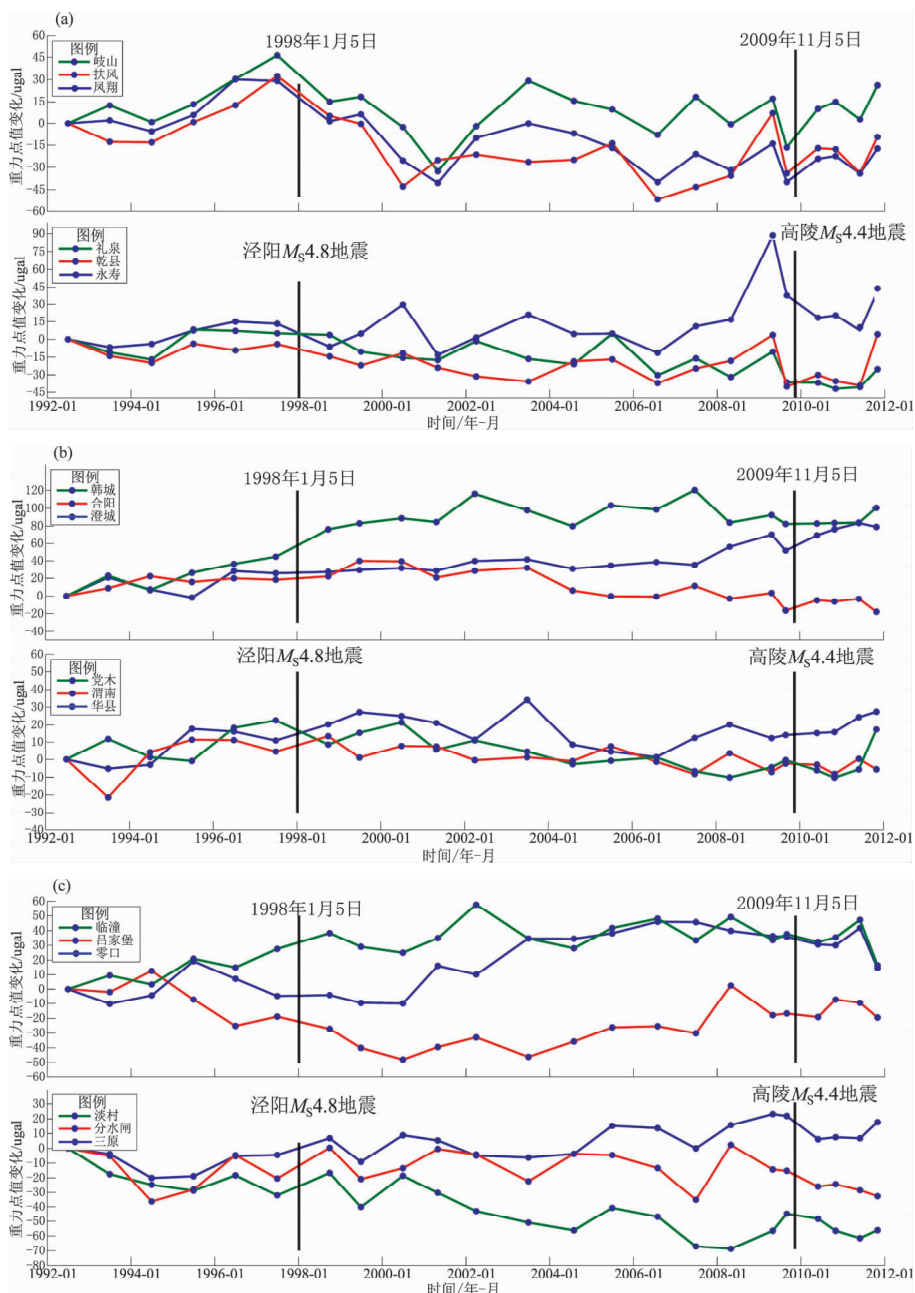


图 6 2 次地震前后关中西部 (a)、东部 (b)、中部 (c) 重力点值时序变化

Fig. 6 The time series variation of gravity points in western (a)、eastern (b) and central (c) of Guanzhong before and after two earthquakes

### 3 结论与讨论

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(祝意青等, 2009)。陕西关中地理位置特殊, 活动断裂发育, 泾阳  $M_s4.8$  地震、高陵  $M_s4.4$  地震都发生在渭河断裂与渭南塬前断裂交叉部位, 因此必然受到断裂活动的影响。

泾阳  $M_s4.8$  地震发生在渭河断陷盆地内的乾县—咸阳塬断块和固市—西安断块的交接部位, 北侧是口镇—关山断裂, 南侧是渭河隐伏断裂, 东侧是泾阳—渭南断裂, 关于发震断裂, 不同的学者研究结果不同, 但基本认为与渭河断裂有关(王卫东, 2002; 吴富春等, 2000)。泾阳地震震中既是莫霍面等深线急剧变化的地段, 也是地壳 P 波和 S 波高速带的边缘地段, 符合强震发生的构造背景和条件。泾阳地震发震时处于重力下降过程中, 与区域布格重力异常同向负值变化, 表明在地震孕育过程中物质发生运移、密度重新分布, 同时表明区域应力场得到增强(王卫东, 2002)。由重力场差分变化图像和累积变化图像可知, 泾阳地震前重力变化不显著, 累积变化不明显, 可能的原因是在泾阳地震孕育过程中, 震源区应力作用方式是以水平为主的左旋走滑, 断裂主要表现为水平错动, 断裂两盘质量密度差异变化较小, 故而重力异常变化不显著(高好林等, 2005)。

高陵  $M_s4.4$  地震发生在渭河盆地内部的泾阳—渭南断裂, 震源机制解表明该地震为正断型, 节面走向为东西向, 与泾阳—渭南断裂的构造特征吻合(王平等, 2014)。高陵地震震中与泾阳地震震中相距较近, 但震源机制却不尽相同, 从重力场演变角度来看两者也存在差异, 表明高陵地震主要受泾阳—渭南断裂活动控制, 震前重力场动态演化经历了下降—上升—下降的变化过程, 震前 1 年时间内震中周缘都处于重力场负值变化, 而震中却表现为较弱的正值变化, 显示出局部“硬化”现象(祝意青等, 2013b), 震后震中重力场进一步向负值变化, 表明应力场进行局部调整, 两年后震中重力场由负值变化转向正值变化, 符合地震扩容理论变化规律。2 次地震重力累积变化

不明显, 没有形成显著的正或负变化异常区, 这与强震孕育中会产生较大的重力累积变化量不符(申重阳等, 2010)。

通过计算并分析 2 次地震前后的重力场、重力点值时间序列, 得到如下结论:

(1) 基于 1992—2011 年的陕西关中重力测网数据, 分析了泾阳  $M_s4.8$ 、高陵  $M_s4.4$  地震前后的重力场动态演化图像, 发现地震孕育过程中重力场符合正向—负向—正向变化的规律, 符合地震扩容理论, 即地下岩体的压缩—膨胀—流体扩散 3 个阶段。在 2 次地震震中都出现了局部“硬化”现象(祝意青等, 2013b), 表明震中区处于闭锁增强阶段, 重力场动态图像表明 2 次地震均发生在重力场负向变化过程中。

(2) 泾阳  $M_s4.8$ 、高陵  $M_s4.4$  地震都发生在渭河断裂和泾阳—渭南断裂附近, 震源机制解表明 2 次地震受 2 条断裂的活动影响。2 次地震震中都位于重力场等值线拐弯处及零值线附近, 表明地震易于在重力正负交替变化的部位, 尤其是转折部位发生(申重阳等, 2010; 祝意青等, 2009, 2012, 2013a, b)。但 2 次地震前重力累积变化不显著, 可能与地震震级较小有关。

(3) 从泾阳  $M_s4.8$ 、高陵  $M_s4.4$  地震前后的重力点值时间序列来看, 关中西部重力点值在震前、震后变化幅度较大, 尤其是陇县—宝鸡断裂带附近的测点, 且 2 次地震发生时这些测点都处于重力负向变化; 而关中东部在 2 次地震前后变化不是很明显, 且发震时重力测点处于正向变化; 关中部即震中附近的测点对泾阳地震的同震反映较大, 而对高陵地震反映不明显。

感谢两位审稿专家对本文提出的宝贵意见和建议, 对于本文质量的提高大有益处。同时对陕西省地震局流动重力室同事的辛勤工作表示衷心的感谢。

#### 参考文献:

- 曹建平, 郑增记, 张永奇, 等. 2017. 陕西高陵  $M4.4$  地震前后断裂活动垂直形变特征综合分析[J]. 大地测量与地球动力学, 37(4): 335—338.
- 陈运泰, 顾增鼎, 卢造勋. 1980. 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, 2(1): 21—31.
- 戴王强, 高好林, 窦玛丽, 等. 2007. 陕西中部地区近年来重力和应力场变化特征研究[J]. 大地测量与地球动力学, 27(6): 105—109.



- 高好林,戴王强,曹建平,等. 2006. 陕西泾阳 4.8 级地震前后重力变化与断裂活动[J]. 灾害学, 21(1): 73-77.
- 高好林,孙兵林,戴王强. 2005. 泾阳 4.8 级地震前后重力变化探析[J]. 地震地磁观测与研究, 26(2): 82-88.
- 顾功叙,郭宗汾,刘克人,等. 1997. 中国京津唐张地区时间上连续的重力变化与地震的孕育和发生[J]. 科学通报, 42(18): 1919-1930.
- 贾民育,詹洁晖. 2000. 中国地震重力监测体系的结构与能力[J]. 地震学报, 22(4): 360-367.
- 贾民育. 1996. 滇西动态重力网的分形特征及空间分辨力[J]. 地壳形变与地震, 16(4): 26-30.
- 贾宇鹏,秦建增,李真,等. 2015. 2014 年山西平遥  $M_s4.1$  地震前后重力场变化特征分析[J]. 地震研究, 38(3): 377-383.
- 李清林,张文玉,张瑞敏. 1997. 太原 4.3 级和灵石 4.4 级地震前后的重力场变化[J]. 山西地震, (3): 41-45.
- 李瑞浩,黄建梁,李辉,等. 1997. 唐山地震前后区域重力场变化机制[J]. 地震学报, 19(4): 399-407.
- 李天生,范文. 1992. 重力变化与小汤山 4.0 级地震[J]. 华北地震科学, 10(2): 87-90.
- 梁伟锋,祝意青,徐云马,等. 2012. 文安 5.1 级地震前后不同时间尺度的重力变化分析[J]. 地震研究, 35(3): 318-322.
- 申重阳,李辉,孙少安,等. 2010. 2008 年于田  $M_s7.3$  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.
- 王平,赵韬,狄秀玲,等. 2014. 陕西高陵  $M_L4.8$  级地震特征[J]. 地震地磁观测与研究, 35(5/6): 58-63.
- 王卫东. 2002. 泾阳  $M_s4.8$  地震的发震构造与破裂特征[J]. 地震学报, 24(5): 552-555.
- 吴富春,段锋,柯长安,等. 2000. 1998 年泾阳 4.8 级地震的一些特征[J]. 西北地震学报, 22(1): 53-57.
- 项爱民,孙少安,李辉,等. 2007. 流动重力运行状态及质量评价[J]. 大地测量与地球动力学, 27(6): 109-104.
- 郑兵,王青华,罗海元,等. 2015. 2012 年宁蒗-盐源 5.7 级地震前的重力变化[J]. 地震研究, 38(2): 370-376.
- 祝意青,梁伟锋,湛飞并,等. 2012. 中国大陆重力场动态变化研究[J]. 地球物理学报, 55(3): 804-813.
- 祝意青,闻学泽,孙和平,等. 2013a. 2013 年四川芦山  $M_s7.0$  地震前的重力变化[J]. 地球物理学报, 56(6): 1887-1894.
- 祝意青,闻学泽,张晶,等. 2013b. 华北中部重力场的动态变化及其强震危险含义[J]. 地球物理学报, 56(2): 531-541.
- 祝意青,徐云马,吕戈培,等. 2009. 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, 52(10): 2538-2546.

## Seismic Capacity Analysis of Medium and Small Earthquakes of Guanzhong Gravity Network

ZHANG Yongqi<sup>1,2</sup>, DING Xiaoguang<sup>1,2</sup>, CAO Jianping<sup>1</sup>,  
ZHAI Hongguang<sup>1</sup>, SU Lina<sup>1,2</sup>, ZHENG Zengji<sup>1</sup>

(1. Administration of Shaanxi Province, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

(2. Institute of geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

### Abstract

Using the quasi stable adjustment method, we estimate and calculate the data of Shaanxi Guanzhong gravity network, and obtain the value of the high precision gravity. Using Kriging interpolation algorithm, we obtain the differential and cumulative variation of gravity field images. Combined with 1998 January 5, Jingyang  $M_s4.8$  earthquake and 2009 November 5, Gaoling  $M_s4.4$ , we analyzed the characteristics of the gravity field and the time series variation of gravity before and after two earthquakes. The results show that: (1) There are obvious gravity anomalies before and after two earthquakes, and the change process is the positive-negative-positive change, to meet the expansion mode; (2) The two earthquakes is related with tectonic activities of the Weihe Fault and Jingyang-Weinan Fault, the location of the epicenter is nearly in gravity zero line and corner of iso-line, however, the earthquake gravity cumulative change is not obvious before two earthquakes; (3) The gravity change is obvious in western of Guanzhong before and after two earthquakes, however, in eastern of Guanzhong, the gravity values change is not obvious. The gravity points near the epicenter change is more obvious before and after the Jingyang earthquake than that of Gaoling earthquake.

**Keywords:** Guanzhong region; mobile gravity measurement; gravity change; Jingyang  $M_s4.8$  earthquake; Gaoling  $M_s4.4$  earthquake