

高好林, 2013, 关中地区 3 次中小地震前后的重力变化, 中国地震, 29 (3), 367 ~ 376。

# 关中地区 3 次中小地震前后的重力变化

高好林

陕西省地震局, 西安市边家村水文巷 4 号 710068

**摘要** 采用拟稳平差方法对关中地区近 20 年流动重力观测资料重新进行了处理, 并结合其它观测资料和研究结果, 对区域内重力场变化过程、3 次中小地震前后重力场变化机理、构造活动以及区内外地震间的关系等进行了较深入地分析和研究。

**关键词:** 关中地区 构造活动 重力场变化 最大剪应变率

[文章编号] 1001-4683 (2013) 03-0367-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

自 1992 年采用拉克斯特重力仪观测以来, 在关中流动重力网测区内, 先后于 1998 年 1 月 5 日、2002 年 2 月 5 日和 2009 年 11 月 5 日发生了泾阳 4.8、宝鸡 3.5 和高陵 4.4 级地震 (以下简称泾阳地震、宝鸡地震和高陵地震), 笔者震前曾对其做过一定程度的预测, 并对于前两次地震发生前后有关重力场变化、跨断层形变和 GPS 观测结果做过一定的研究, 得到一些有意义的认识和结果 (高好林等, 2005a、2005b、2006a、2006b; 戴王强等, 2007; 高好林等, 2009)。

为了进一步研究关中地区重力场的变化特征, 本文对关中重力网近 20 年的重力复测资料采用拟稳平差方法进行了重新计算, 并结合其他资料, 对区内泾阳、宝鸡和高陵等 3 个中小地震前后的重力场变化进行了系统分析。

## 1 测网概况与资料处理方法

陕西省关中地区流动重力测网始建于 20 世纪 70 年代末, 后于 1991 年进行了优化改造, 由 11 个闭合环、10 条支线和 116 个测点组成。

测网跨越的主要断裂有: 秦岭山前断裂、周至-余下断裂、渭河隐伏断裂、扶风-三原断裂、口镇-关山断裂和陇县-岐山-马召断裂, 以及与宝鸡地震和高陵地震有关的固关-八渡断裂和高陵-渭南断裂 (图 1)。

测网改造后, 自 1992 年开始每期使用两台拉克斯特重力仪进行观测, 2008 年以前每年观测 1 期, 其后每年 2 期, 至今已积累了 20 余期观测资料。

在 2012 年之前, 一直沿用以三原测点为起算点的经典平差方法对历年观测资料做平差

[收稿日期] 2013-03-15

[作者简介] 高好林, 男, 1956 年生, 高级工程师, 曾长期从事流动重力监测、分析预报及相关研究, 现从事地震速报工作。E-mail: ghaolin2005@163.com

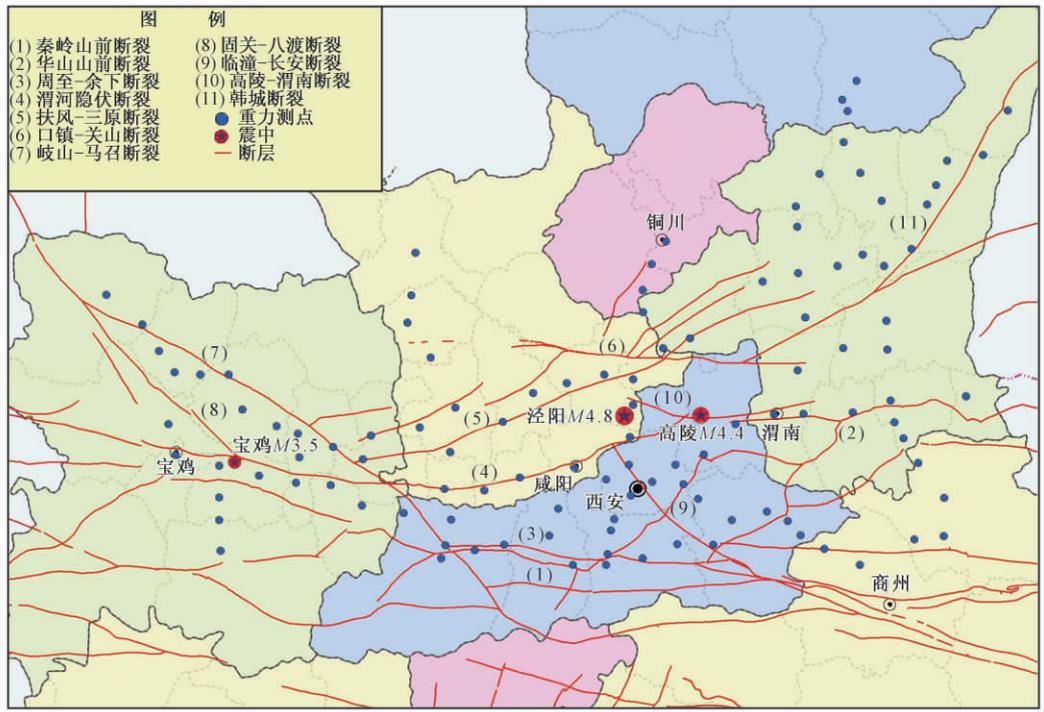


图1 关中地区重力点位、震中与断裂分布图

处理。由于泾阳地震震中位于三原测点正南约14km,高陵地震震中位于三原测点东南约28km,且两个地震震中相距仅27km,地震对起算点的影响可能会干扰和扭曲震中区附近地震前后重力变化的结果,不利于地震重力异常信息的提取。

基于经典平差的上述弊端,本文采用拟稳平差方法对观测资料重新进行了处理。拟稳点的选取原则为:①拟稳点所在区域地质构造相对稳定;②在研究时间段内,点位没有变动,观测资料连续;③点位稳定可靠,观测期间内没有出现段差变化超限和测点重力变化异常;④拟稳点大致位于研究区的中部,以减小传递误差的影响。据此原则,在远离震中区的西南方向选取楼观台、九峰和户县等3个点作为拟稳点进行平差计算,求出各测期的重力变化。

有关问题说明:①历年的观测时段多集中于6~8月,这在一定程度上抵消了由于季节因素导致地下水位变化对重力场的影响。②在所研究时段内,关中地区只进行过一次大面积水准测量。从1986~1996年地形变观测结果看,西安市城区附近为特殊沉降区,沉降最大可达几十mm/a,其它地区升降变化较小(胡斌等,2006)。而西安城区有关测点和测区东部的韩城、潼关等测点(可能也与点位沉降有关),1992~2011年的重力场累积变化量在 $+(108\sim 196)\times 10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。为了客观地反映关中地区重力场演化的真实形态,图中舍去了那些观测结果具有长期单调性变化特征的测点。③为了更好体现每测期的测量时间以及各测期次的时间长度,取作业起止日期中间点作为本测期观测日期。

## 2 中小地震前后区域重力场变化特征

### 2.1 重力场累积变化的时空分布

研究区域重力场随时间的累积变化,须以相同的时间为基准,其结果可以反映区域重力场的时序变化(孙少安等,2012)。图 2 是以上各时段相对于各自时间基准所做的等值线图。从中可以看出:区内中小地震发生前后,区域重力场变化过程大致如下:2~3 年的正向变化→1 年左右的负向变化→在负向变化的过程中发震→震后重力场处于恢复过程中。

1994 年 6 月~1996 年 8 月,全区重力场呈正向变化,测区中西部的等值线由南向北逐渐增大,在烟霞、三原附近达到  $45 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,而泾阳地震震中就位于重力变化梯度带上(图 2(a))。

1994 年 6 月~1997 年 8 月,除眉县以西重力场呈小幅度正向变化外,其他区域均呈负向变化,泾阳地震震中北侧三原至铜川、西南侧周至至咸阳等区域重力变化量等值线均达到  $-15 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ (图 2(b))。

1994 年 6 月~1998 年 10 月,除测区西南太白、眉县、周至一线呈小幅负向变化外,其他区域均呈正向变化,中心区在烟霞至三原附近,约为  $40 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。可见,震中区附近震后重力场处于明显恢复状态(图 2(c))。

1999 年 7 月~2000 年 8 月,全区重力场呈正向变,测区北部和西部重力场变化显著,乾县-三原-蒲城一线以北在  $30 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  以上;其次,以宝鸡为中心也是一个局部高值区,等值线近南北走向,形成一个重力变化梯度带,中心区重力变化量约为  $40 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。宝鸡地震震中区就位于该梯度带附近。(图 2(d))。

1999 年 7 月~2001 年 5 月,西部重力场负向变化显著,在陇县附近达  $-45 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。中东部虽为正向变化,但变化幅度明显减小,最大仅为  $15 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。表明全区重力场出现转折变化(图 2(e))。

1999 年 7 月~2002 年 4 月,西部陇县附近重力变化等值线由上期  $-45 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  变为  $-15 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,表明震中区附近重力场处于恢复变化中。而东部重力场呈负向变化,在东部南、北两个区域的重力变化均达  $-25 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ (图 2(f))。

2007 年 8 月~2009 年 6 月,测区绝大部分区域重力场呈正向变化,而测区中东部重力变化量大于西部,在白水、黄龙一带可达  $35 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。高陵地震震中区附近重力变化相对显著,夹持于南、北两条  $25 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  等值线之间(图 2(g))。

2007 年 8 月~2009 年 9 月,3 个月的测量结果表明,除包括震中区在内的三原至渭南一小片区域出现小于  $10 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  的正向变化外,大部分区域都表现出  $-10 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  左右的负向变化。可见,全区重力场变化出现由正向负的转折性变化。一个月之后的 2009 年 11 月 5 日发生了高陵 4.4 级地震。

2007 年 8 月~2010 年 11 月,除关中西部及潼关和黄龙局部地区的重力场呈正向变化外,其他区域则呈负向变化,西安和大荔附近重力变化等值线约为  $-25 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ (图 2(h))。

2007 年 8 月~2011 年 7 月,除渭河盆地中心地带的重力场呈小幅负向变化外,其他区域均为正向变化。东部南、北两侧及西部太白附近重力变化量约为  $15 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  左右。

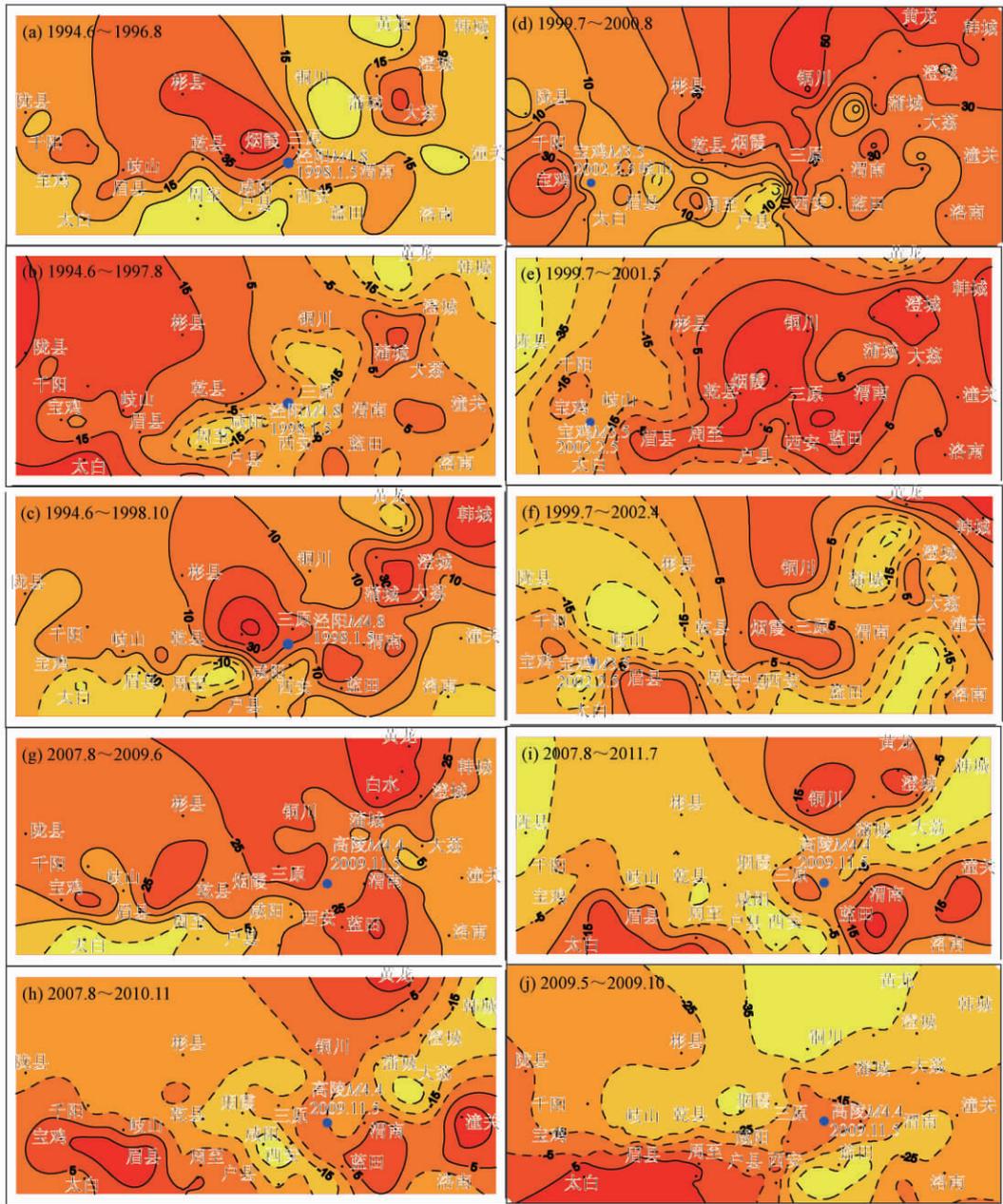


图2 重力场累积动态变化等值线图

可见,重力场处于恢复状态(图2(i))。

### 2.2 震中区重力测点变化

图3是3次中小地震前后震中区附近重力测点变化曲线(为了使两条曲线绘制在同一幅图中时既可使纵横比例协调又不影响其变化形态,特将潘家湾测点曲线整体沿纵轴上移 $60 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )。从图中可以看出,其变化特征是所在区域重力场变化的缩影。

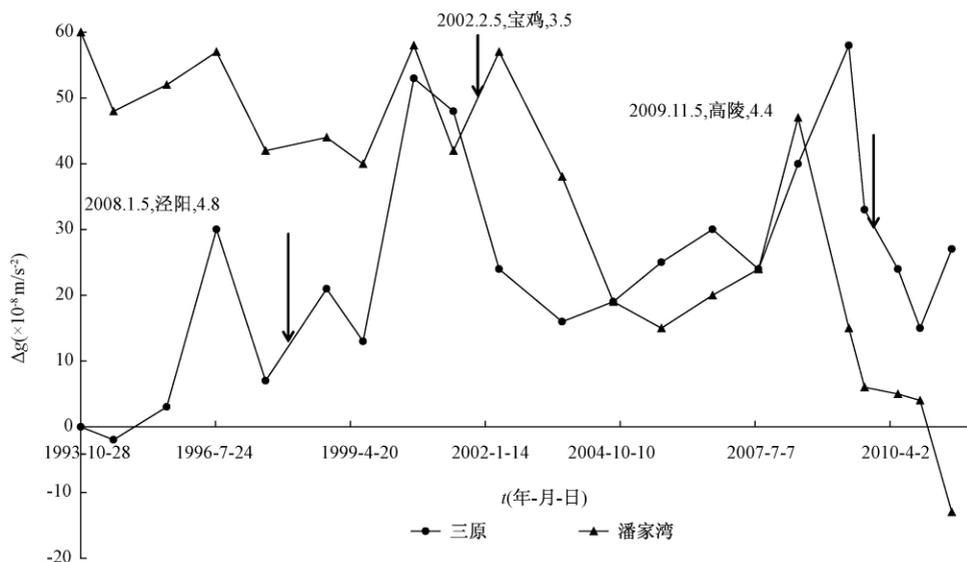


图3 震中区测点的重力变化曲线

### 3 分析与讨论

#### 3.1 重力场变化与地震孕育过程分析

在泾阳、宝鸡和高陵等 3 个中小地震前后,关中地区尤其是震中区附近的重力场在震前有 2~3 年的正向变化,其后在反向变化过程中发震,震后又逐渐恢复。

关中地区重力场背景在 3 次中小地震前后的变化特征,可以用地震扩容模式(李瑞浩等,1987)加以解释,即在地下岩体压缩-膨胀-流体扩散的 3 个阶段,重力值将出现上升-下降-上升的变化过程。

在孕震初期,由于区域应力场作用力的持续增强,震源区附近介质密度增加,区域重力场随之增加即呈正向变化。当区域应力场达到一定程度后,震源区的岩石介质就会出现许多大致平行于最大压缩方向的微破裂,致使岩石产生膨胀扩容,地表出现隆起,于是重力值减小。地震后,震源区的裂隙或闭合或被填充,重力值则出现回升。

李瑞浩等(1987)根据扩容理论讨论了地震前后区域重力场变化全过程。假设震源体是半径为 40km、高为 20km 的圆柱体,膨胀阶段地面上升 300mm。在给定制引力常数、地壳密度、泊松比、构造应力和杨氏模量的情况下,可以得到震中区附近地震孕育发生过程中重力场在各个阶段的变化量。经计算,当震源区分别处于压缩阶段、膨胀阶段和流体扩散阶段时,其相应的重力变化依次是  $108.1 \times 10^{-8}$ 、 $-79.0 \times 10^{-8}$  和  $7.5 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。该结果与唐山地震前后重力场的变化基本吻合(国家地震局科技监测司,1989)。

表 1 是渭河盆地 3 次中小地震前后震中区附近重力测点在孕震过程中各个阶段的重力升降变化情况。从表 1 中可以看出,在孕震过程中的 3 个阶段,重力场的升降变化规律基本符合扩容理论。但具体到每个地震,同一阶段的时长和变化幅度不尽相同,不同阶段的时长和变化幅度也有很大差别。分析认为,其原因有:①测点距震中都在 10~28km 之间,不能

完全反映震中区重力场真实变化情况;②重力复测周期长,不能准确捕捉到重力场各个变化阶段的拐点部位;③重力测量结果受各种因素的干扰和影响,其中难免包含许多无法剔除的非地震信息。尽管如此,这种变化规律是值得重视和关注的。

表 1 孕震过程中各阶段震源区附近重力测点变化(重力单位:  $\times 10^{-8} \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )

地震孕发不同阶段	时间与变化量	测点		
		三原	潘家湾	三原
压缩	起止时间(年-月)	1994-06 ~ 1996-08	1999-07 ~ 2000-08	2007-08 ~ 2009-06
	时长(月)	25	12	22
	重力变化量 ( $\times 10^{-8} \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	+32	+18	+34
膨胀	起止时间(年-月)	1996-08 ~ 1997-08	2000-08 ~ 2001-05	2009-06 ~ 2010-11
	时长(月)	12	10	17
	重力变化量 ( $\times 10^{-8} \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	-23	-16	-43
流体扩散	起止时间(年-月)	1997-08 ~ 1998-10	2001-05 ~ 2002-04	2010-11 ~ 2011-07
	时长(月)	15	11	8
	重力变化量 ( $\times 10^{-8} \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	+14	+15	+12
地震	发震时间(年-月-日)	1998-01-05	2002-02-05	2009-11-05
	震级	4.8	3.5	4.4
	地点	泾阳	宝鸡	高陵

### 3.2 构造活动与地震的关系

渭河盆地西部的陇宝地区,位于鄂尔多斯地块西南缘和南北地震带北段东侧。来自青藏块体东北缘 NE 向挤压是鄂尔多斯地块运动的主要驱动力,从而使鄂尔多斯地块逆时针旋转(范俊喜等,2003)。根据鄂尔多斯西南缘地震流动观测资料的接收函数偏移成像结果,莫霍面在鄂尔多斯西南缘是不连续的,显示青藏块体对整体相对稳定的鄂尔多斯地块具有持续而巨大的推挤作用力<sup>①</sup>。

陇西旋卷构造的主旋带——乌鞘岭-六盘山旋褶带,自天祝经海原过六盘山进入本区,从陇县向东南撒开插入秦岭。在布格重力异常图上,伴随旋褶带途经之地,是一条布格重力异常梯度带绵延伸展,表明旋褶带可能切割莫霍面进入上地幔。该旋褶带南端自西向东由桃园-龟川寺-固关-八渡-千阳-彪角和陇县-岐山-马召等 4 条断裂带组成<sup>②</sup>。

从 20 世纪 80 年代以来,该区中小地震活跃。其中,较大地震除了 1980 年 6 月 24 日相继发生在陕西陇县与甘肃崇信、灵台三县交界处的 4.3 级和 3.8 级两次地震外,还有 2002 年 2 月 5 日发生在固关-八渡断裂与渭河隐伏断裂交汇部位的宝鸡 3.5 级地震。

宝鸡地震前震中区附近重力变化等值线整体呈近南北走向,与固关-八渡断裂走向基本一致,且形成重力变化梯度带。可见,固关-八渡断裂对宝鸡地震孕育发生的控制作用是明显的。

2001 ~ 2002 年的 GPS 观测结果显示(戴王强等,2003):渭河盆地西部固关-八渡断裂与

① 陕西省地震局,2010,2011 年度陕西省地震趋势研究报告

② 陕西省地震局综合队,1980,陕西省关中盆地地质构造与地震活动关系研究报告

渭河隐伏断裂交汇部位附近主压应变速率、最大剪应变速率和面应变速率依次高达  $-6 \times 10^{-8}$ 、 $7 \times 10^{-8}$  和  $-8 \times 10^{-8}/a$ , 其变化量居盆地之首, 该地区受挤压作用显著。在 GPS 站点运动矢量图上(相对于榆林 D058 站点), 陇宝地区站点矢量为南东向, 与固关-八渡断裂走向基本一致。表明宝鸡地震前, 震中区附近区域应力场增强, 受南东向应力场作用, 孕震断层活动加剧引发了这次地震。

宝鸡地震震级较小, 但地震前后不但震中区附近重力变化较大, 而且测区北部重力场变化也较显著。2001 年 11 月 14 日新青交界昆仑山口 8.1 强震前, 昆仑山地区重力场出现大范围的下降变化, 震后回升。在此期间, 关中地区重力场也经历了相似的变化过程。虽然二者相距甚远, 由于乌鞘岭-六盘山旋褶带的绵延贯通, 从而使两地重力场的同步变化成为可能。因此, 其异常显示是新青交界昆仑山口 8.1 级强震孕育发生过程中区域应力场变化信息与宝鸡地震前兆的叠加(高好林等, 2005a)。

作为青藏块体与鄂尔多斯地块连接部位的陇宝地区, 近 10 余年间渭河盆地 GPS 观测资料表明: 来自青藏块体东北缘北东向的推挤作用力持续增强。因此, 该地区将是未来强震活动地区之一<sup>③</sup>。

泾阳地震与高陵地震都发生在渭河北岸, 震中相距约 27km。因其构造背景相同, 根据二者位置关系, 其发震构造很可能属同一断层。

泾阳地震发生在 1997 年 11 月 8 日西藏玛尼 7.5 级地震之后, 主应力方向与华北地区应力场同向, 说明本次地震受华北区域应力场的控制(高好林等, 2005a; 王卫东等, 1998)。对于泾阳地震前后的重力场变化笔者已做过一些分析(高好林等, 2005a、2005b、2006a、2006b), 此处不再赘述。

2008 年 5 月初(汶川地震前), 渭河盆地南北向水准长剖面测量结果显示, 相对于 2007 年, 扶风-三原断裂北盘上三原附近的几个测点, 相对于南盘突降约 30mm。口镇-关山断裂水准场地 N1-A 观测曲线也显示, 2007 年 11 月~2008 年 2 月, 南盘相对于北盘快速下降 1.47mm。也就是说, 汶川地震前, 不但扶风-三原断裂与口镇-关山断裂之间的地块呈快速下降变化, 而且三原以北的地块也表现为整体下降变化, 与图 2(g) 所反映的重力场变化特征是一致的。笔者据此认为, 该地区将是潜在震源区, 值得关注(高好林等, 2009)。

2008~2009 年 GPS 速度场显示: 渭河盆地大部分站点运动方向由先前的正东、北东或南东转为正南或西南。该时间段最大剪应变速率在铜川-三原-户县一线东西两侧各有 1 个最大变化量为  $16 \times 10^{-8}/a$  的高值区, 东侧中心区由高陵、蓝田和渭南等 3 地所围, 西侧中心区在乾县附近(图 4(a))。中心区最大变化量为  $-6 \times 10^{-8}/a$  的面应变速率压缩区在西部和中、东部各有 1 个: 即以太白附近和以蓝田以南为中心区面应变负值区。中、东部面应变压缩区向北一直延伸到黄陵附近(图 4(b))。显然, 高陵地震前, 震中区处于面应变速率压缩区(2010 年的山西河津 M4.8 地震也发生在面应变速率压缩区), 最大剪应变速率高达  $16 \times 10^{-8}/a$ 。这一现象表明: 在高陵地震前, 盆地中东部受到挤压作用, 区域应力场有所增强。

高陵地震前两期流动重力复测结果显示(图 2(j)): 时隔 3 个月, 测区重力场由先前以正向变化为主转为大范围的负向变化, 尤其是在震源区附近, 南北两侧负向变化显著, 在铜

③ 陕西省地震局, 2009, 2010 年度陕西省地震趋势研究报告



中区域应力场震前增强、震后调整的结果。而高陵地震则是区域应力场调整过程中,局部构造活动引发的一次中小地震。关中地区重力场的升降变化,既有区域应力场的变化信息,也有高陵地震的孕震前兆。

## 4 结论

(1) 关中地区 3 次中小地震发生前后,区域重力场背景呈现出同样的时空变化特征。其变化过程可以用地震扩容模式加以解释,即在地下岩体的压缩-膨胀-流体扩散 3 个阶段,重力值则出现上升-下降-上升的变化过程。

(2) 区内 3 次中小地震发生前,外围地区分别有 1997 年 11 月 8 日西藏玛尼 7.5 级、2001 年 11 月 14 日新青交界昆仑山口 8.1 级和 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震活动。据分析:在区内 3 次中小地震前后,关中地区重力场的异常变化是区外相应特大地震孕育发生过程中区域应力场的变化与区内地震前兆的叠加。

(3) 宝鸡地震前,震中区附近主压应变速率、最大剪应变率和面应变率变化量依次为  $-6 \times 10^{-8}$ 、 $7 \times 10^{-8}$  和  $-8 \times 10^{-8}$  /a, 居渭河盆地之首,地壳受挤压作用显著。在 GPS 站点运动矢量图上,陇宝地区站点矢量为南东向,与固关-八渡断裂及其附近重力变化等值线走向基本一致。表明宝鸡地震前,震中区附近区域应力场增强,受南东向应力场作用,孕震断层活动加剧而引发了这次地震。

由于震中区附近受到挤压作用,面应变处于收缩状态,地下介质密度增加。于是,震后重力场出现恢复性正向变化。

(4) 高陵地震前,不但区域重力场在 3 个多月的时间内由正向变化突然转为大面积的负向变化,而且由 GPS 观测结果所得的最大剪应变率在渭河盆地中东部明显增强,震中区附近最大剪应变率高达  $16 \times 10^{-8}$  /a,震中位于面应变压缩区。表明地震前震中区附近区域应力场有所增强。

## 参考文献

- 戴王强、高好林、窦玛丽等,2007,陕西中部地区近年来重力和应变场变化特征研究,大地测量与地球动力学,27(6),105~108。
- 戴王强、冯希杰、曹娟娟等,2003,基于 GPS 观测分析鄂尔多斯块体南缘现今地壳运动和地应变特征,世界地质,22(2),129~135。
- 范俊喜、马瑾、甘卫军,2003,鄂尔多斯地块运动的整体性与不同方向边界活动的交替性,中国科学(D辑),33(增),119~123。
- 高好林、邵辉成,2005a,关中地区重力场动态演化特征与地震活动分析,大地测量与地球动力学,25(1),91~97。
- 高好林、孙兵林、戴王强,2005b,泾阳 4.8 级地震前后重力变化探析,地震地磁观测与研究,26(2),82~88。
- 高好林、戴王强、曹建平,2006a,陕西泾阳 4.8 级地震前后重力变化与断裂活动,灾害学,21(1),73~77。
- 高好林、祝意青,2006b,重力段差变化与断裂垂直位移的对比分析,大地测量与地球动力学,26(增),31~36。
- 高好林、祝意青、韩美涛等,2009,渭河盆地地形变特征研究,大地测量与地球动力学,29(3),60~66。
- 国家地震局科技监测司,1989,地震监测与预报方法清理成果汇编-重力、地倾斜、地应力分册,94~96 北京,地震出版社。
- 胡斌、祝意青、江在森,2006,关中地区垂直形变场及其动态演化特征,地震研究,29(2),151~155。
- 李瑞浩、付兆珠,1987,唐山地震( $M=7.8$ )前后的区域重力变化和扩容过程,内陆地震,1(4),426~434。

- 孙少安、康开轩、黄邦武,2012,关于区域重力场变化基准的思考,大地测量与地球动力学, **32**(1),17~20。
- 王卫东、王平,1998,泾阳4.8级地震的震源参数和震源机制,西北地震学报, **20**(6),656~658。
- 邢西淳、毛娟、邵辉成,2011,汶川8级地震前后陕西地形变异常特征分析,高原地震, **23**(4),17~23。
- 祝意青、刘芳、付广裕等,2012,汶川地震前后青藏高原东北缘重力场动态变化研究,地震, **32**(2),88~94。

## The change of gravity background of Guanzhong region before and after 3 medium and small earthquakes

*Gao Haolin*

Earthquake Administration of Shaanxi Province, Xi'an 710068, China

**Abstract** It calculated the observation data of mobile gravity in the Guanzhong region for the recent 20 years. Using the quasi-stable adjustment and other observation data and research results, we explored the variation process of regional gravity field, gravity variation characteristics in the region before and after 3 medium and small earthquakes, and tectonic activity and the relationship between earthquakes inside or outside of this region.

**Key words:** The Guanzhong region Tectonic activity Gravity field variation Maximum shear strain