

# 2014年山西平遥 $M_s$ 4.1 地震前后重力场变化特征分析\*

贾宇鹏<sup>1</sup>, 秦建增<sup>1</sup>, 李真<sup>1</sup>, 黎哲君<sup>2</sup>, 檀玉娟<sup>1</sup>, 冯建林<sup>1</sup>

(1. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002; 2. 安徽省地震局, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 利用2012~2014年山西省绝对重力和流动重力观测资料, 平差计算得到该时间段重力场变化值, 分析区域重力场演化特征与2014年4月平遥  $M_s$  4.1地震的关系。研究发现: (1) 地震发生前研究区域出现了区域性的重力异常变化, 在震中附近产生局部重力异常变化, 形成了与活动断裂走向基本一致的重力变化高梯度带, 这可能预示着与地震发生相关的构造运动或应力增强作用。(2) 地震前后研究区重力场累积变化表现为应力场增强—持续增强—局部运动受阻超过临界值—能量突然释放, 震后重力场变化恢复到平稳状态。

**关键词:** 重力场; 联合平差; 动态变化; 平遥地震

**中图分类号:** P315.72

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2015)03-0377-07

## 0 引言

随着高精度重力仪的发展及流动重力测网的不断优化, 流动重力测量对地震活动的监测能力不断提高(李辉等, 2010; 申重阳, 李辉, 2007)。流动重力测量反映的是区域重力场的非潮汐变化, 可以反映地壳内部的物质迁移、组成地壳物质的密度变化以及地壳构造和地震的形成过程等。强震或大地震受区域应力场及主要活动断裂带的控制, 通常孕育并发生在活动断裂带应力高度积累部位, 这些部位及其附近在孕震阶段的显著差异构造运动, 通常伴有显著的重力场变化(陈运泰等, 1980; 张培震等, 2002; 张国民等, 2005)。国内很多学者在探索地震前、后的重力场变化特征、寻求变化规律的过程中做了大量的工作, 并取得了显著的成效(祝意青等, 2008, 2010, 2012, 2013; 梁伟锋等, 2013, 2012; 陈石等, 2011; 秦建增等, 2007; 姚家骏等, 2012)。

中国地震局地球物理勘探中心在山西省开展过多年多期次的流动重力观测, 获得了宝贵的数据资料。特别是2009年以来, 监测水平的提高使得山西地区的流动重力测网可以更好地反映地震前后的重力场的变化。

2014年4月4日, 山西平遥附近发生  $M_s$  4.1地震震中位置(37.3°N, 112.2°E), 震中位于太

谷活动断裂上, 通过流动重力资料获得的重力场变化对此次地震有较好的反映。笔者采用2012年3月~2014年8月期间的流动重力观测资料, 统一算标准, 引入绝对重力值(郑州、太原、托克托、白家疃)来控制平差计算重力场变化, 绘制山西地区重力场动态变化图像, 并对山西平遥  $M_s$  4.1地震孕育发生过程中重力场变化的时空演化特征及变化机理进行探讨, 希望有助于本地区的中短期地震预报研究。

## 1 重力观测与资料处理

研究区域主要为山西地区(35°~40°N, 110°~114°E)(图1)。采用中国地震局推广的LG-ADJ程序对观测资料进行经典平差处理。在数据处理中, 由于仅采用山西省的观测数据会因控制点过少, 导致获得的重力场动态变化图像在离控制点较远的地区产生畸变, 也不能有效消除仪器标定系统所引起的测量误差。因此本文将计算范围扩大至华北强震强化监视跟踪网结合绝对重力观测资料与同期的流动重力观测, 采用固定的绝对重力点作为控制基准, 进行联合平差计算, 得到反映了平遥地震前后重力场的动态变化特征的山西地区的重力场动态变化图。对相对重力资料处理中作固体潮、一次项系数等改正。一些学者研究了重力数据的联合平差计算和山西省的重力场变化特征(李真等, 2012,

\* 收稿日期: 2015-01-16.

基金项目: 中国地震局地球物理勘探中心青年基金项目(YFGEC2014006)和中国地震局震情跟踪合同制项目(2014010204)共同资助.

2013; 冯建林等, 2013)。

重力数据由中国地震局地球物理勘探中心、湖北省地震局和河北省地震局测量得到。其中山西测区由物探中心组建观测小组用 2 台 LCR-G 型重力仪作业, 每年观测两期。为确保相对重力联测精度, 减少仪器误差影响, 仪器一次项系数测前在国家长基线上均进行了统一的标定, 每个测段均在 3 天内闭合。每个绝对重力点值测定的精度高于  $5 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ , 相对重力单程联测精度优于  $15 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。测网分布如图 1 所示, 共有 150 个测点, 其中含有普通重力测点和绝对重力测点, 180 个测段, 平均点距为 30 km。

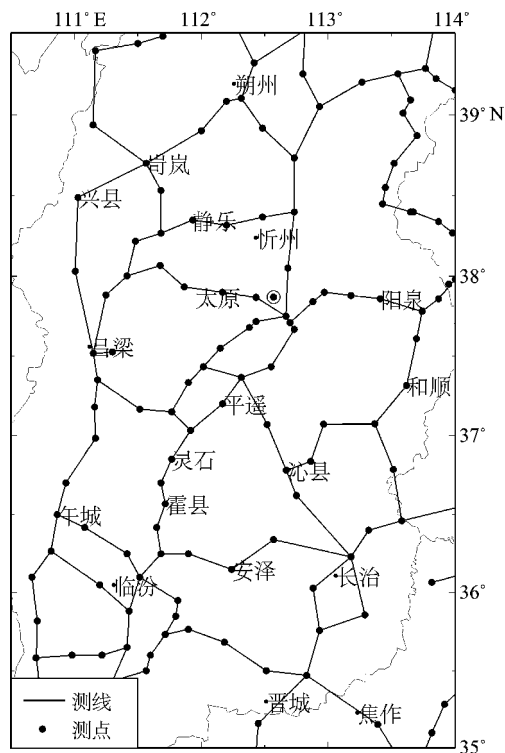


图 1 山西重力网联测路线

Fig. 1 Map of the surveying routes in gravity network in shanxi

## 2 重力场演化特征

笔者主要分析了 2012 年 3 月以来研究区重力场变化特征, 即山西平遥  $M_s 4.1$  地震前后的重力场动态变化, 分析了重力场差分动态变化、累积变化的动态图像、震中附近重力点值和部分测段段差的变化情况 (图 2~5)。

### 2.1 重力场差分动态变化

从研究区重力场差分动态变化图 (图 2) 中可

以看出:

(1) 2012-08 ~ 2013-03 期间 (图 2a), 研究区域总体以正值变化为主, 平遥地震震中区及其附近重力变化平缓。测区中部朔州、静乐、霍县附近出现小幅的负异常变化。

(2) 2013-03 ~ 2013-08 期间 (图 2b), 区域重力变化表现为西负东正、正值为主的变化。在兴县—吕梁—午城一带西侧有大于  $-30 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$  的重力异常变化。而其东侧大面积地区延续了上一期正值变化趋势, 仅在沁县附近出现小幅负值变化。

(3) 2013-08 ~ 2014-03 期间 (图 2c), 研究区域重力场总体态势由上一期的自西向东由负到正的趋势转化为自北向南由负到正的趋势变化。大致以平遥—阳泉为界, 测区北部主要表现为重力场负变化的趋势, 仅在静乐附近出现小幅正异常区域。测区南部则为正值变化, 安泽、和顺一带变化明显。重力零值线在平遥附近, 与断裂带方向基本一致。

(4) 2014-03 ~ 2014-08 期间 (图 2d), 地震之后, 比较前两期可以看出, 重力场变化基本以调整恢复为主, 表现为轻微的正变化, 小范围出现小幅负值区域。

### 2.2 重力场累积动态变化

为了分析研究区较长时段的区域重力场累积变化特征, 以 2012 年 3 月山西网观测资料为对比基准, 分别绘制了山西平遥  $M_s 4.1$  地震震前、震后各期相对基准的区域重力场累积变化动态图像 (图 3)。从图 3 中可以看出, 研究区的重力场正累积范围逐步增加, 负累积变化逐步增强。在震中附近产生局部重力异常变化区, 平遥—灵石一带形成了与太谷断裂走向基本一致的重力变化高梯度带, 可能预示着与地震发生相关的构造运动或应力增强作用。

(1) 2012-03 ~ 2013-03 期间 (图 3a), 研究区域自北向南整体表现正负相间的格局, 北部重力场正值变化较为平缓, 中部出现大面积负值变化, 南部临汾一带显示正值变化, 长治一带形成了较大幅度的正异常, 幅值超过  $30 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。长治与临汾正值变化有着“呼应、联合”的态势。

(2) 2012-03 ~ 2013-08 期间 (图 3b), 北部重力场正值变化有扩大趋势, 在岢岚—静乐—忻州一带形成正负异常变化区分界线。中部负值

变化区域有所减小，但是幅值增大。南部的临汾、长治的正异常区域也联合起来向北发展。研究区域整体呈现南部、北部对中部平遥地区的挤压态势，并且在平遥—灵石一带形成的重力变化高梯度带与太谷断裂带走向基本一致。平遥处于重力变化零值线上。

(3) 2012-03~2014-03期间(图3c)，整

个研究区域的重力变化剧烈，具有四象限分区现象。阳泉一带重力场持续负值变化，范围向北有所扩大；临汾—霍县—沁县一带的正异常持续增加，使得平遥—灵石沿太谷断裂走向的重力高梯度带进一步加剧，幅值超过  $45 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。平遥处于重力变化高梯度带的拐弯部位。

(4) 2012-03~2014-08期间(图3d)，地

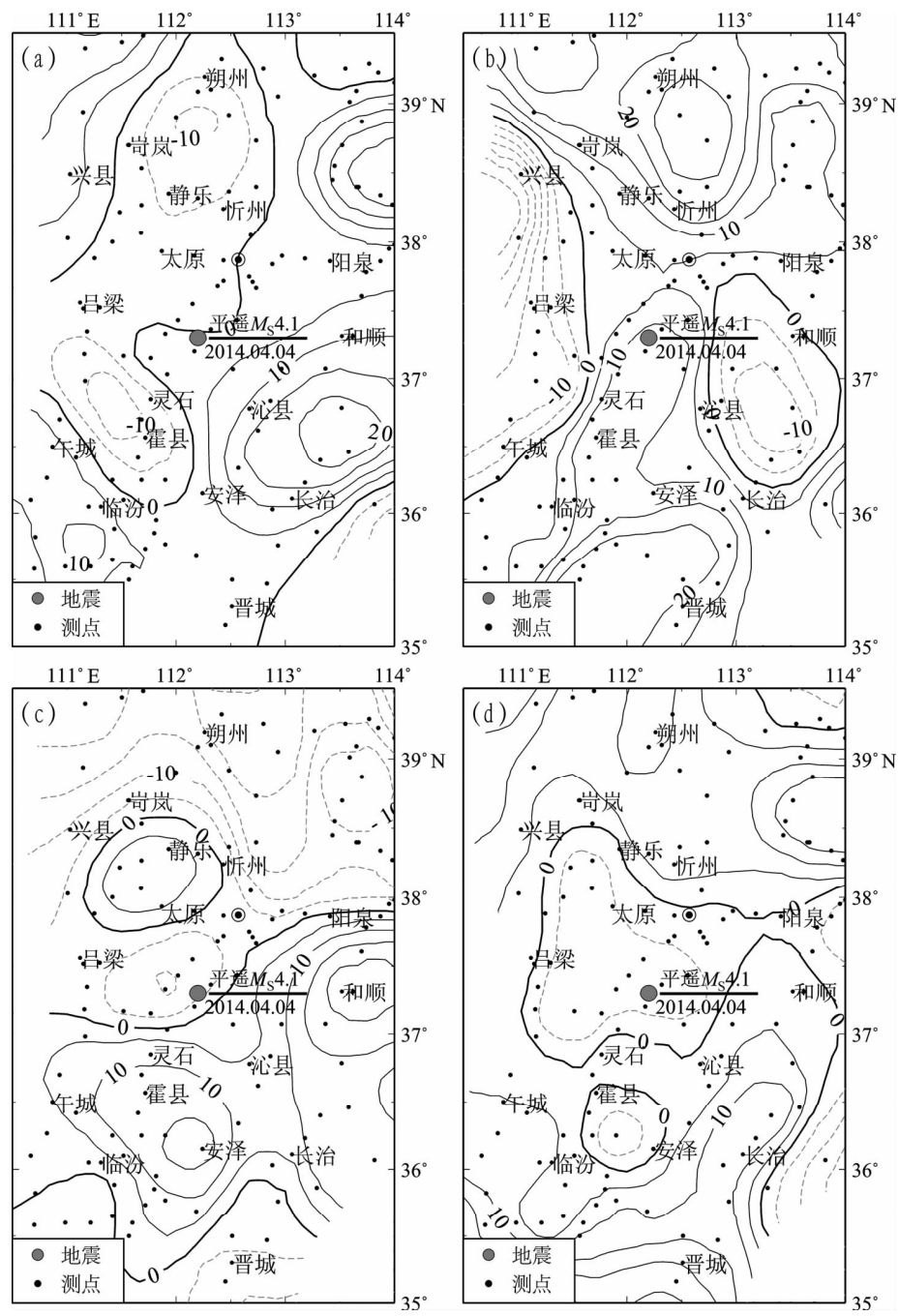


图2 重力场差分动态变化图像 (单位:  $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )

(a) 2012-08~2013-03; (b) 2013-03~2013-08; (c) 2013-08~2014-03; (d) 2014-03~2014-08

Fig. 2 Maps of dynamic variation of gravity field difference (uint:  $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )

震之后,可以明显看出南部临汾—霍县—沁县一带的重力正值变化有所减退,平遥附近的重力变化“零”值线向南偏移。这应该是震前加载在太谷断裂上的应力在震后得到释放,使得平遥地区的物质密度下降从而导致重力场的变化重新分布。同样还可看到阳泉附近的负异常范围缩小恢复到震前稍长一段时间的水平。

### 2.3 重力点值时序变化

重力点值时序变化能较好地突出异常测点的动态变化,可以分析不同位置测点的重力变化累积程度。选取平遥  $M_s 4.1$  地震震中附近的 9 个测点(图 4),这些测点都(除分水岭)处于重力累积变化负值区。绘制其重力点值变化图(图 5)可以研究距离震中不同距离、不同断裂带上变化的

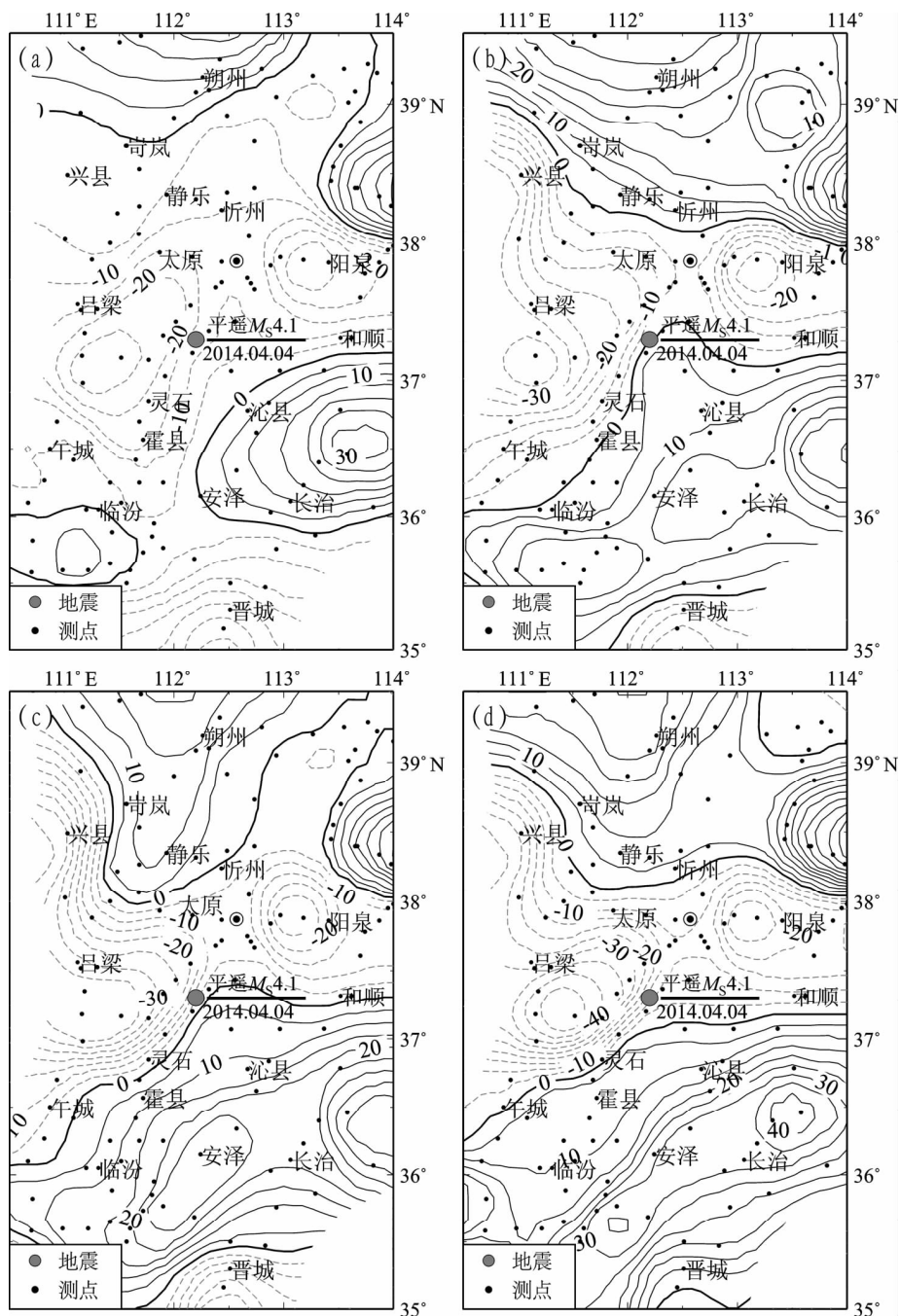


图 3 重力场累积变化动态图像(单位:  $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )

(a) 2012-03 ~ 2013-03; (b) 2012-03 ~ 2013-08; (c) 2012-03 ~ 2014-03; (d) 2012-03 ~ 2014-08

Fig. 3 Maps of cumulated dynamic change of gravity field (unit:  $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )

积累程度。2012 - 03 ~ 2014 - 08 期间，平差计算后这些测点的点值平均精度为  $5.6 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。

从图 4b 可以看出，震中附近测点的重力值变化有着较好的同步性，重力值基本都出现了下降—平缓—较大幅值上升—下降—下降的变化过程，太谷断裂附近（黑线）重力变化幅度明显大于交城断裂附近（虚线）。2013 年 3 月之前，这 2 个断裂附近测点的重力值变化基本一致；2013 年 3 月

至 2014 年 8 月，地震发生前一年左右，各个测点的趋势近乎一致，出现较大幅值的上升后转为下降，在随后反向恢复过程中发生平遥  $M_s4.1$  地震。2013 年 8 月之后的两个时间段，重力点在时空演化上显示出一定的规律性，太谷断裂附近出现下降—持续下降（实线），而交城断裂则是平缓—下降（虚线），相比而言有一定的滞后性，其变化幅值明显小于前者。

段差的变化可以反映测段之间梯度的变化。太古断裂两侧的“祁县—平遥”，“祁县—太谷”，“祁县—分水岭”的测段平差后的段差值（表 1），段差变化如图 5 所示。段差变化可能对于深入认识构造活动和孕震过程有一定指示意义。由图可以看出，2012 - 03 ~ 2013 - 03 期间，这 3 个测段的变化趋势基本一致；2013 - 03 ~ 2014 - 03 期间，祁县—平遥，祁县—分水岭测段重力段差持续上升，祁县—太谷测段变化较平缓；2014 - 03 ~ 2014 - 08 期间，地震之后祁县—太谷转而上升。由于平遥地震震级较小，震中附近重力段差在震前一年时间变化较为明显。

两条断裂对造成地震的应力积累和物质迁移有着“阻碍”作用，造成了不同程度的重力负累积。特别是地震前重力场在太谷断裂的西北侧的负累积和东南侧的正累积，形成挤压、闭锁态势，当能量超过临界值后就发生了地震。

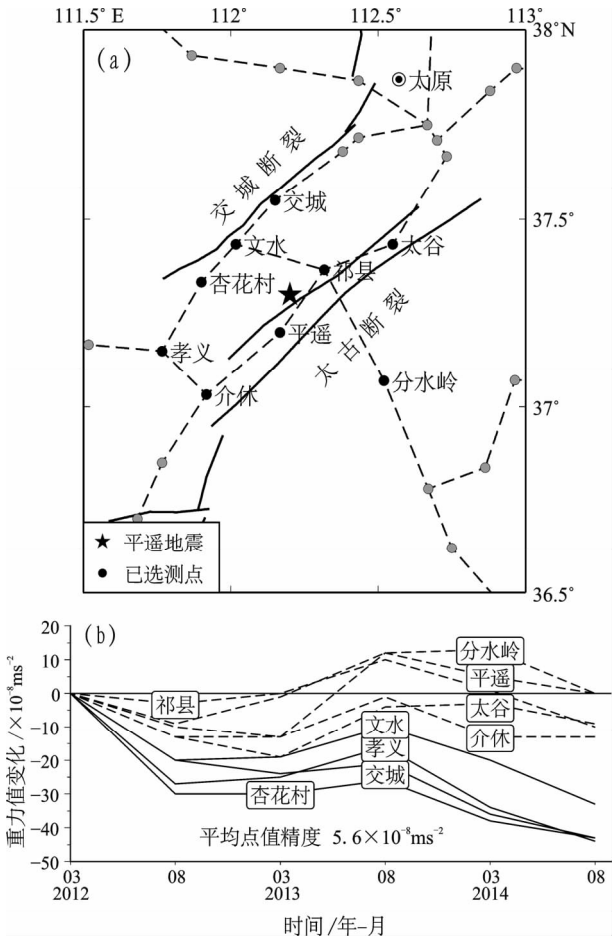


图 4 平遥  $M_s4.1$  地震震中附近重力点 (a) 及其重力测值的时序变化 (b)

Fig. 4 Gravity points around the epicenter of the Pingyao  $M_s4.1$  earthquake (a), and their sequence variation of gravity measuring (b)

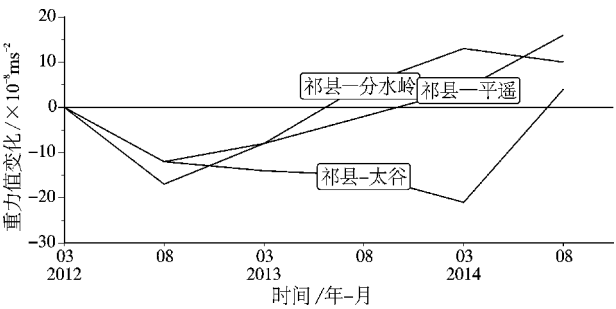


图 5 太古断裂两侧部分测段的段差变化  
Fig. 5 Gravity difference variation on both sides of the Taigu Fault

表 1 太古断裂两侧部分测段的段差（单位： $10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ ）

Tab. 1 Gravity difference on both sides of the Taigu Fault (unit:  $10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ )

测段	2012 - 03	2012 - 08	2013 - 03	2013 - 08	2014 - 03	2014 - 08
平遥—祁县	20.674	20.691	20.682	20.676	20.67	20.658
祁县—太和	-9.44	-9.452	-9.454	-9.455	-9.441	-9.436
祁县—分水岭	-108.55	-108.562	-108.558	-108.545	-108.537	-108.54

### 3 结论与讨论

本文给出了2014年4月平遥  $M_s4.1$  地震前2年至震后半年(2012-03~2014-08)的区域重力场变化图像,并初步分析了区域与震区附近的重力场演化特征及其与该地震的关系,获得一些认识并进行讨论:

(1) 在空间分布上,地震发生前测区均出现区域性的重力异常变化及与构造活动断裂走向基本一致的高梯度带,可能体现了活动断裂附近的应力积累和物质迁移所引起的重力变化,从而触发地震的产生并在震中或邻区产生局部重力变化异常区。

(2) 时间序列上,重力场累积动态变化图像较清晰地反映了平遥地震孕育、发震、震后恢复的演化过程。可以看出地震发生前后,由于应力积累和物质迁移,震中附近的重力场在震前约2年形成了重力异常区,在震前1年内急剧变化。研究区域北部和南部的正值区域对中部的负值区域持续的挤压,在平遥震中附近形成闭锁状态,达到临界值之后突然释放发生地震,震源区附近的应力应变的释放调整,震后重力场变化恢复到平稳状态。平遥  $M_s4.1$  地震由于震级比较小,孕震时间较短。分析图4b点值变化,在震前一年左右的时间内,重力测点的变化较明显,出现较大幅值的上升后转为下降,这可能对于判断地震形势具有一定的意义。

(3) 震中部位与发震构造运动一致的重力变化梯级带有利于破裂发展。平遥  $M_s4.1$  地震前最大累积重力变化达  $45 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ,大同  $M_s6.1$  地震前最大累积重力变化达  $60 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$  (刘善华等,2011),汶川  $M_s8.0$  地震8年累积重力变化幅差最大约  $200 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$  (申重阳,李辉,2007),这可能为强震强度预测提供了参考依据。虽然平遥  $M_s4.1$  地震的区域性重力场变化幅值不大,但在此次地震发生前后重力场积累变化有一

定的反映。地震发生是复杂的物理过程,其产生的机制机理还在不断地探索当中,只有在不断地研究和总结当中才会有所突破。

### 参考文献:

- 陈石,王谦身,祝意青,等.2011.汶川  $M_s8.0$  震前区域重力场变化与震质中研究[J].地球物理学进展,16(4):1147-1156.
- 陈运泰,顾浩鼎,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.
- 冯建林,孙少安,秦建增.2013.绝对重力控制下的山西地震带2009—2012重力场动态变化[J].大地测量与地球动力学,33(增刊):49-52.
- 李辉,徐如刚,申重阳,等.2010.大华北地震动态重力监测网分形特征研究[J].大地测量与地球动力学,30(5):16-18.
- 李真,陈石,秦建增,等.2012.多网重力数据联合平差和系统误差改正[J].地震,32(2):95-104.
- 李真,秦建增,陈石.2013.山西地震重力监测网起算基准扰动分析[J].地震,33(3):60-66.
- 梁伟锋,刘芳,徐云马,等.2013.青藏高原东缘重力观测及对芦山  $M7.0$  地震的反映[J].地震工程学报,35(2):266-271.
- 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.
- 刘善华,李民,孙铭心,等.2011.大同6.1级地震前后首都圈重力场动态变化图像[J].地震研究,34(2):148-152.
- 秦建增,李清林,郭德科,等.2007.河南范县  $M_s4.3$  地震前后的重力场与预测过程[J].西北地震学报,29(4):380-384.
- 申重阳,李辉.2007.研究现今地壳运动和强震机理的一种方法[J].地球物理学进展,22(1):49-56.
- 姚家骏,万永革,王培玲,等.2012.利用重力资料检测日本9.0级地震激发的地球自由振荡[J].地震研究,35(1):53-58.
- 张国民,马宏生,王辉,等.2005.中国大陆活动地块边界带与强震活动[J].地球物理学报,48(3):602-610.
- 张培震,邓起东,张国民.2002.中国大陆活动地块与强震[J].中国科学(D辑),32(增刊):5-11.
- 祝意青,梁伟锋,徐云马,等.2010.汶川  $M_s8.0$  地震前后的重力场动态变化[J].地震学报,32(6):633-640.
- 祝意青,梁伟锋,徐云马.2008.重力资料对2008年汶川  $M_s8.0$  地震的中期预测[J].国际地震动态,(7):36-39.
- 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,张晶,等.2013.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.

## Analysis on Dynamic Variation Characteristic of Gravity Field before and after Pingyao $M_s4.1$ Earthquake in 2014

JIA Yu-peng<sup>1</sup>, QIN Jian-zeng<sup>1</sup>, LI Zhen<sup>1</sup>, LI Zhe-jun<sup>2</sup>, TAN Yu-juan<sup>1</sup>, FENG Jian-lin<sup>1</sup>

(1. *Geophysical Exploration Center, CEA, Zhengzhou 450002, Henan, China*)

(2. *Anhui Earthquake Administration, Hefei 230031, Anhui, China*)

### Abstract

Using the observation data of absolute and flow gravity measurements in Shanxi region from 2012 to 2014, we obtained gravity field and its dynamic variations by adjustment, and analyzed the spatial-temporal evaluation of the regional gravity field and their relationship to Pingyao  $M_s4.1$  earthquake. The research result mainly shows that: (1) Before Pingyao  $M_s4.1$  earthquake, there appeared the regional gravity anomaly in the study region and the local gravity anomaly near the epicenter. The high gradient belt of gravity change formed in accordance with the strike of the active tectonic fault, which could predict the tectonic activity or stress enhancing related with the preparation and occurrence of the earthquake. (2) Before and after the earthquake, the patterns of the gravity field accumulation variation appeared the following process in the study area: the regional stress field strengthened first, then continued to strengthen, and the local movement of it was locked somewhere, the earthquake came about during the energy exceeded the critical value. Finally, the gravity field change was back to the steady state after the earthquake.

**Key words:** gravity field; combined adjustment; dynamic variation; Pinyao  $M_s4.1$  earthquake