

基于重力和 GPS 的山西地区形变特征分析*

王同庆¹, 王树发^{1♣}, 杨博¹, 李真², 陈兆辉¹, 张品¹

(1. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180; 2. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 利用山西地区多年来积累的流动重力和区域 GPS 资料, 从段、线、面对山西地区 ($34^{\circ} \sim 41^{\circ} \text{N}$, $110^{\circ} \sim 115^{\circ} \text{E}$) 2009—2015 年重力场动态变化特征进行精细处理和详细分析, 同时将水平总梯度分析方法用于重力场动态变化的异常提取中, 最后对比相同时间尺度的重力场和应力应变场获得近年来山西地区地壳形变精细变化特征。结果表明: 重力水平总梯度具有比重力异常更高的灵敏度, 两者的动态变化特征都显示出, 在山西北部恒山断裂、六棱山断裂和口泉断裂附近的阳原—大同一带、南部中条山断裂的临汾—夏县一带和中东部太行山山前断裂的邯郸—安阳附近都存在着较为显著的异常变化; 通过对比分析认为相同时间尺度的重力场和应变场有较好的对应关系, 联合分析重力和应变场有助于对地壳形变和深部物质变化产生的孕震机理获得更深刻的认识。

关键词: 重力场; 水平总梯度; 应变场; 形变特征; 山西地区

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2017)01-0101-10

0 引言

流动重力和区域 GPS 测量是 2 种常规的前兆形变观测手段, 多期的重复测量可以较好地反映出地球重力场和地壳形变的变化特征 (李辉等, 2009; 祝意青等, 2012; 陈石等, 2011; 王小亚等, 2002; 刘峡等, 2006)。在地震的孕育过程中, 地壳内部应力的作用、应变的积累、介质密度的变化和物质迁移等都将导致区域重力场和应变场不同程度的变化 (申重阳等, 2009; 祝意青等, 2009; 杨国华等, 2012; 武艳强等, 2013)。因此综合分析重力和应变场的动态变化, 从中提取具有前兆意义的异常, 可以为地震趋势研判提供可靠的判定依据 (戴王强等, 2007; 陈石等, 2011)。

山西断陷带位于鄂尔多斯块体与华北平原块体衔接部位, 是华北主要地震活动带之一, 其强震活动频繁、地震灾害严重 (王秀文, 1995)。该断陷带由一系列断陷盆地及其间的横向隆起组成的一条北北东向的活动构造带构成, 总体呈“S”型, 区域内主要活动断裂为北东、北北东和北东

东向 3 组, 它们控制着盆地的边界和盆地的发育 (国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组, 1988)。目前针对山西断陷带重力场和 GPS 应变场的研究成果并不少见 (祝意青等, 2013; 李真等, 2013; 冯建林等, 2013; 玄松柏等, 2014; 贾宇鹏等, 2015; 王秀文等, 2016; 郭良迁等, 2010; 王秀文等, 2010), 但大多是将重力和 GPS 单独进行分析, 本文着重在分析山西断陷带 2009—2015 年最新的重力场变化特征的基础上, 结合相同时间尺度的应变场, 共同探讨地下物质密度变化引起的地表重力变化与反映地表微形变的应变场的时-空变化特征的一致性, 以获得新的见解和认识。

1 资料选取及处理情况

随着地震监测预报工作的深入开展, 观测技术不断发展, 全国地震流动重力测网的监测能力也在不断提升, 中国地震局于 2009 年对大华北地区主要活动构造带上的地震重力区域网进行了调整、优化和改造 (李辉等, 2010), 使很多分散的区域网有效地连接起来, 并对测网进行绝对重

* 收稿日期: 2016-02-16.

基金项目: 科技基础性工作专项 (2015FY210400)、中国地震局震情跟踪定向工作任务 (2015010220) 和地震行业科研专项 (201508009) 联合资助。

♣通讯作者: 王树发 (1962-), 高级工程师, 主要从事地震形变监测、流动重力数据处理与分析研究。

E-mail: 13821274201@163.com.

力控制,形成了完整的大华北重力监测网。山西地区的重力监测网主要由中国地震局地球物理勘探中心每期使用2~6台LCR-G型仪器完成,每年观测两期。为了使处理结果更加准确、可靠,平差精度更高,本文使用山西地区及其周边河北、河南、首都圈等多个测网2009年以来共13期的流动重力复测资料进行联合平差计算,测区重力测网分布如图1所示。

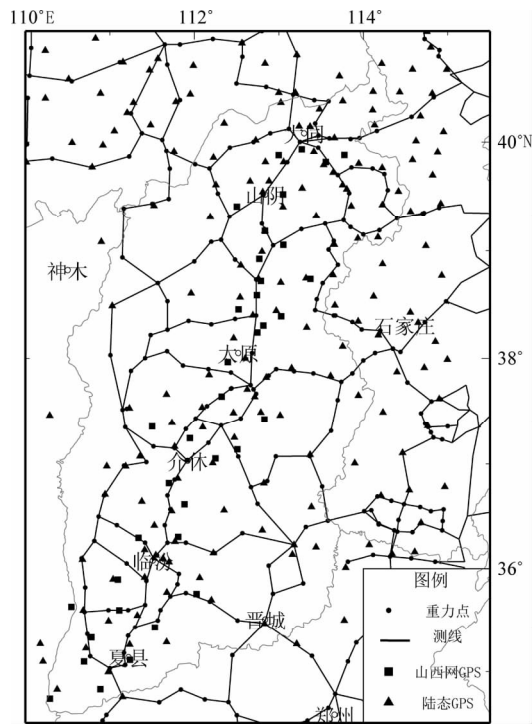


图1 山西及邻区重力测网及GPS测点分布图
Fig. 1 Distribution map of gravity survey network and GPS measuring sites in Shanxi and its adjacent areas

每期资料处理均采用同期绝对重力控制下的相对重力联测的经典平差方法,其中绝对重力点选取的是太原、郑州、白家疃、托克托,绝对重力控制的均匀分布可有效减小相对重力联测中传递误差的影响。平差后单期重力观测资料的点值平均精度均优于 $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ (表1),说明本研究使用的观测资料和处理结果是可靠的。

为了有效地监测山西断陷带地壳运动和大震活动趋势,山西省地震局于1995年沿山西带两侧布设了由40个点组成的GPS监测网,点位分布跨越了山西地区南北向的主要断裂带,且分布较为均匀,相邻点距约为十几至数十千米不等。目前除3个测站遭到破坏外,其余37个测站均能正常

使用。计算时,为了使对研究区场的描述更加清晰和全面,除了该地区的37个测站外,还使用了周边网络工程和陆态网络的区域站观测资料一同解算。

表1 山西及周边地区重力测量资料情况
(LCR-G型重力仪)

Tab. 1 Information of gravity survey in Shanxi and its adjacent area (using LCR-G gravity meters)

观测时间/ 年-月	点值平均精度/ $10^{-8} (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	观测时间/ 年-月	点值平均精度/ $10^{-8} (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
2009-09	8.8	2013-04	7.9
2010-03	9.1	2013-09	8.3
2010-08	7.9	2014-03	8.2
2011-03	8.1	2014-08	7.6
2011-08	8.3	2015-04	7.9
2012-03	6.4	2015-09	8.7
2012-09	7.9		

2 重力场动态变化特征

2.1 重力场累积变化特征

为了分析研究测区较长时段的区域重力场累积变化特征,以2009年观测资料为时间基准,分别绘制了各期相对首期的区域重力场累积变化动态图象(图2),其中每年均使用8~9月第二期的测量结果进行处理分析,以便较好地去除降雨等季节性因素的影响。

从多年累积重力场变化中可以看出,山西断陷带2015年之前的累积特征基本呈现南正北负的姿态并逐步增强,2009—2015年则以太行山山前断裂带为界,体现了西正东负的变化特征。其中以断陷带北段的重力负异常变化最大,其中值得注意的是阳原—大同一山阴一带处于几个正负值异常区中心,该区域在不同时段的重力负异常变化缓慢,仅有 $20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 左右,可能反映出大同盆地及其周缘的NE、NEE向的口泉断裂、恒山山前断裂、六棱山山前断裂等运动和变形受阻,处于高应力的闭锁状态(祝意青等,2013)。

2012年以来的累积图象显示石家庄以南至安阳一带大体沿太行山山前断裂的NNE向梯度带中南段的重力变化梯度持续增高,最大差异达到 $100 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 以上,应注意该地区近年来的构造

活动情况。同时山西南部临汾—夏县一带的正值变化在 2012 年后开始呈现上升趋势。石家庄附近在 2012 年之前呈现出明显的负值异常中心，可能是由于华北地区地下水开采导致地下物质密度减小所致，2013—2014 年随着南水北调工程东线、

中线正式通水运行之后有所缓解恢复。

2.2 重力场差分变化特征

对测区 2011—2015 年每年 9 月共 5 期观测资料进行处理获得研究区一年尺度区域重力场的差分变化特征（图 3），分析表明：2015 年之前，南

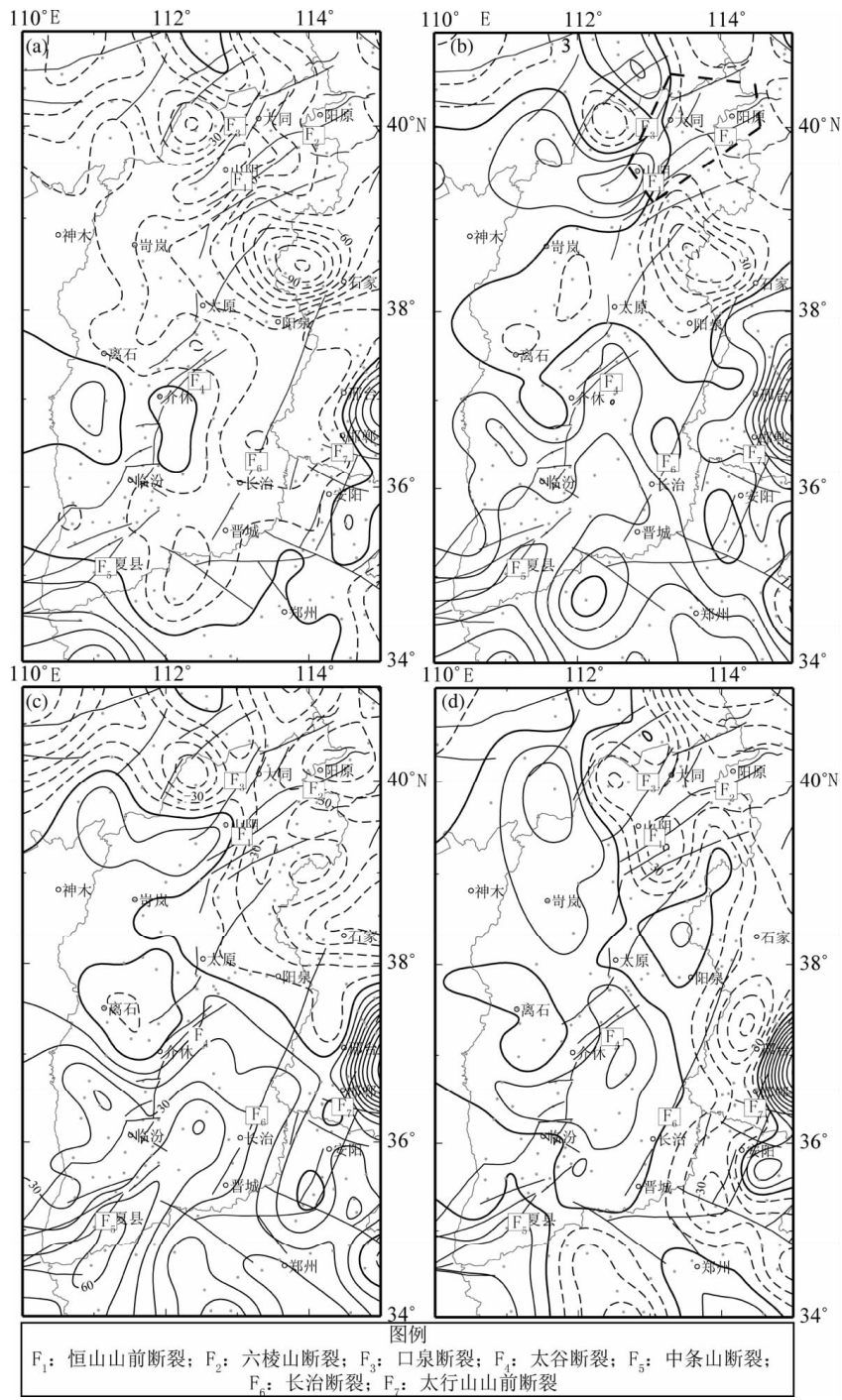


图 2 2009—2012 年 (a)、2009—2013 年 (b)、2009—2014 年 (c) 和 2009—2015 年 (d)
山西及邻区重力场累积动态变化图像 (单位: 10^{-8} m/s^2)

Fig. 2 Maps showing cummulative dynamic changes of gravity relative to 2009 in Shanxi and its adjacent areas in 2009—2012 (a), 2009—2013 (b), 2009—2014 (c) and 2009—2015 (d) (unit: 10^{-8} m/s^2)

部临汾一带表现为持续的重力累积正变化,在2014—2015 最新一期的变化中突然发生由正到负的大面积反转,随后于2016 年3 月12 日发生了运城4.4 级地震,重力场的变化对此次地震有较好的反映。北部大同一山阴一带出现了由重力负变化

到反向正变化的演化过程,体现了能量积累的过程。且2013—2014 年重力变化等值线相对2011—2012 年发生近90°转折,同时沿大同一石家庄一带形成了正负差异约 $60 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的梯级带,具有一定的孕震重力特征,应对大同盆地边缘断裂具

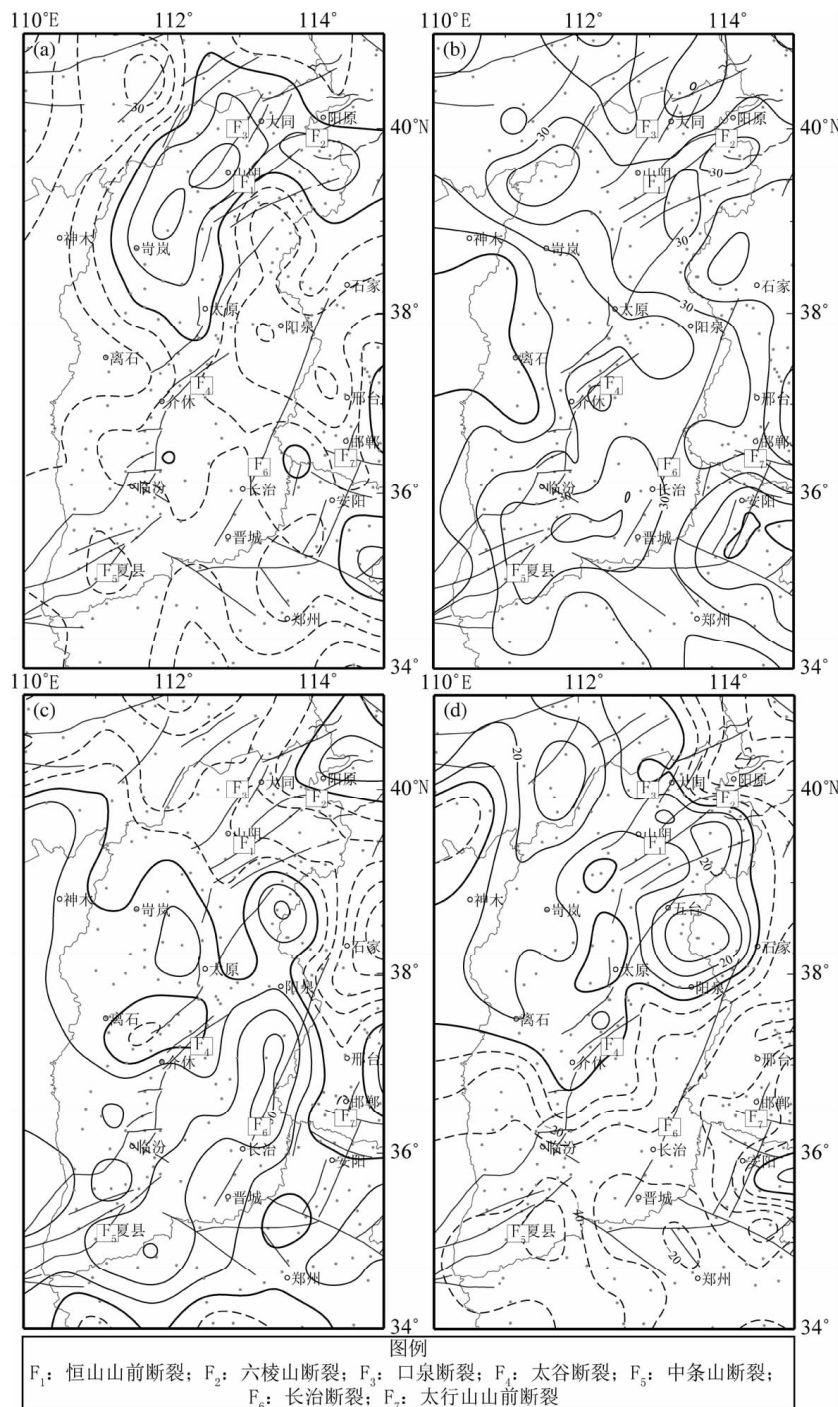


图3 2011—2012 年 (a)、2012—2013 年 (b)、2013—2014 年 (c) 和 2014—2015 年 (d)
山西及邻区重力场差分动态变化图像 (单位: 10^{-8} m/s^2)

Fig. 3 Maps showing annual gravity changes in Shanxi and its adjacent areas in 2011—2012 (a),
2012—2013 (b), 2013—2014 (c) and 2014—2015 (d) (unit: 10^{-8} m/s^2)

有一定的孕震重力特征，的活动性予以关注。

在累积变化中异常明显的邯郸—安阳一带，最新一期的差分结果显示在该地区沿太行山山前断裂形成了明显的梯度带，并在安阳附近等值线发生转折弯曲，这些都较好地反映了构造变形及伴随活动断层的物质迁移引起的地表重力变化效应，也在一定程度上反映了该区域的构造活动较为显著。

2.3 水平总梯度动态变化特征

目前，重力梯度在对流动重力资料的处理与分析中尚未得到应用，但其能够反映场源体的边界细节，具有比重力异常更高的分辨率，而且重力梯度数据包含有更丰富的信息，可以加强位场数据的地质解释（曾华霖，1999）。在位场数据的处理和分析中，通常利用水平总梯度的极大值来确定场源体的边界、断裂构造等线性特征的位置等。本文对一年尺度的重力变化求取其水平总梯度，并尝试根据梯度的动态变化获取更直观、明显、有意义的异常特征。

对于水平梯度的求取，我们采用计算速度快、实现简单的频域率计算方法，只需将观测数据进行傅里叶变换，换算至频率域乘以相应的梯度换算因子再进行反变换即可（陈石等，2015）：

$$\Delta G(u, v) = F[\Delta g(x, y)]. \quad (1)$$

式中， F 表示二维傅里叶变化， (x, y) 为异常点的空间位置， (u, v) 为异常点的频率位置， $\Delta G(u, v)$ 为重力变化 $\Delta g(x, y)$ 的频率域表示。在频率域内，重力场的变化在 x 和 y 方向（即沿经度和纬度方向）的梯度为

$$\Delta g_x(x, y) = \frac{\partial \Delta g(x, y)}{\partial x} = F^{-1}[iu\Delta G(u, v)], \quad (2)$$

$$\Delta g_y(x, y) = \frac{\partial \Delta g(x, y)}{\partial y} = F^{-1}[iv\Delta G(u, v)]. \quad (3)$$

那么重力变化的水平总梯度为

$$\Delta g_{\text{THD}}(x, y) = \sqrt{[\Delta g_x(x, y)]^2 + [\Delta g_y(x, y)]^2}. \quad (4)$$

一年尺度的重力水平总梯度的动态变化显示如图4所示，水平总梯度的极大值位置与断陷带内断裂的走向和分布大体一致。从2014—2015年最新一期的结果中可以更加直观明显地看出，在山

西北部恒山断裂、六棱山断裂和口泉断裂附近的阳原—大同一带、南部中条山断裂的运城—夏县一带和中东部的太行山断裂安阳附近，形成了水平总梯度的高值区集中区，与同期重力场动态变化的异常位置十分一致且异常更为突出。

2.4 重力测段段差时序变化特征分析

在分析重力场的动态变化特征基础上，为了研究局部地段的重力变化特征，分别选取山西北部、中部和南部区域部分跨断裂和不跨断裂的测段，分析对比其段差的时序变化特征，尝试对测段所属的构造及区域的活动性进行定性描述。

首先对山西北部大同一山阴附近跨口泉断裂、恒山北缘断裂和六棱山断裂的测段进行处理分析。从图5b、d可以看出，北部的跨断裂测段的段差时序变化特征总体上呈现下降趋势，最大达 $80 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ，在2015年有所上升，这和前面描述的一年尺度重力场动态变化特征是比较一致的。同时，该区域不跨断裂测段的段差时序变化（图5c、e）有升有降，变化幅度较小，整体在 $20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 以内，与跨断裂测段形成明显差别。也进一步表明重力变化主要是伴随应力作用和构造运动的增强引起的断层深部物质变迁和构造变形的效应。

分析山西中部太原盆地内部分测段段差时序变化特征可以看出（图5f、g）：中部与北部测段呈现相同的下降趋势，但是变化量级较北部测段小，最大差异约为 $(15 \times 10^{-8} \sim 20 \times 10^{-8}) \text{ m/s}^2$ ，也间接表明了太原盆地内构造活动性相对较弱。

如图5h、i所示，山西南部的跨断裂测段从2013年开始出现明显的转折上升趋势，和区域重力场的正变化特征一致（图2、3），我们认为在能量累积的大背景下该区域的断裂构造有可能开始变得活跃起来。

在对山西南部地区不跨断裂测段段差进行分析时发现，同样是不跨断裂的，位于临汾盆地内的襄汾—侯马测段（图6c）比处于盆地外的安泽—张店测段（图6b）变化趋势更为剧烈，根据2个测段的分布所示，这也间接反映了在周缘断裂的控制和局部应力作用下，临汾盆地的构造活动呈现加剧趋势，位于山西南部的运城地区于2016年3月12日发生了4.4级地震。

3 垂直形变效应

由于地表重力变化既是对深部物质运动信息

的反映,同时地表变形运动也会对重力变化产生一定影响。一般来说,考虑地表垂直变形产生的重力效应时,把垂直形变 δH 产生的重力变化 δg 用自由空气校正公式(曾华霖,1999)表示: $\delta g = -0.308 \ 6\delta H$,即每抬升或下降 1 cm,将引起约

$3.086 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的重力下降或上升变化。目前高精度垂直运动观测主要通过区域水准观测来获取,但由于其观测周期长,无法与重力观测同步,只能利用有关水准测量成果粗略估算地表垂直运动对重力变化的影响(申重阳等,2009)。

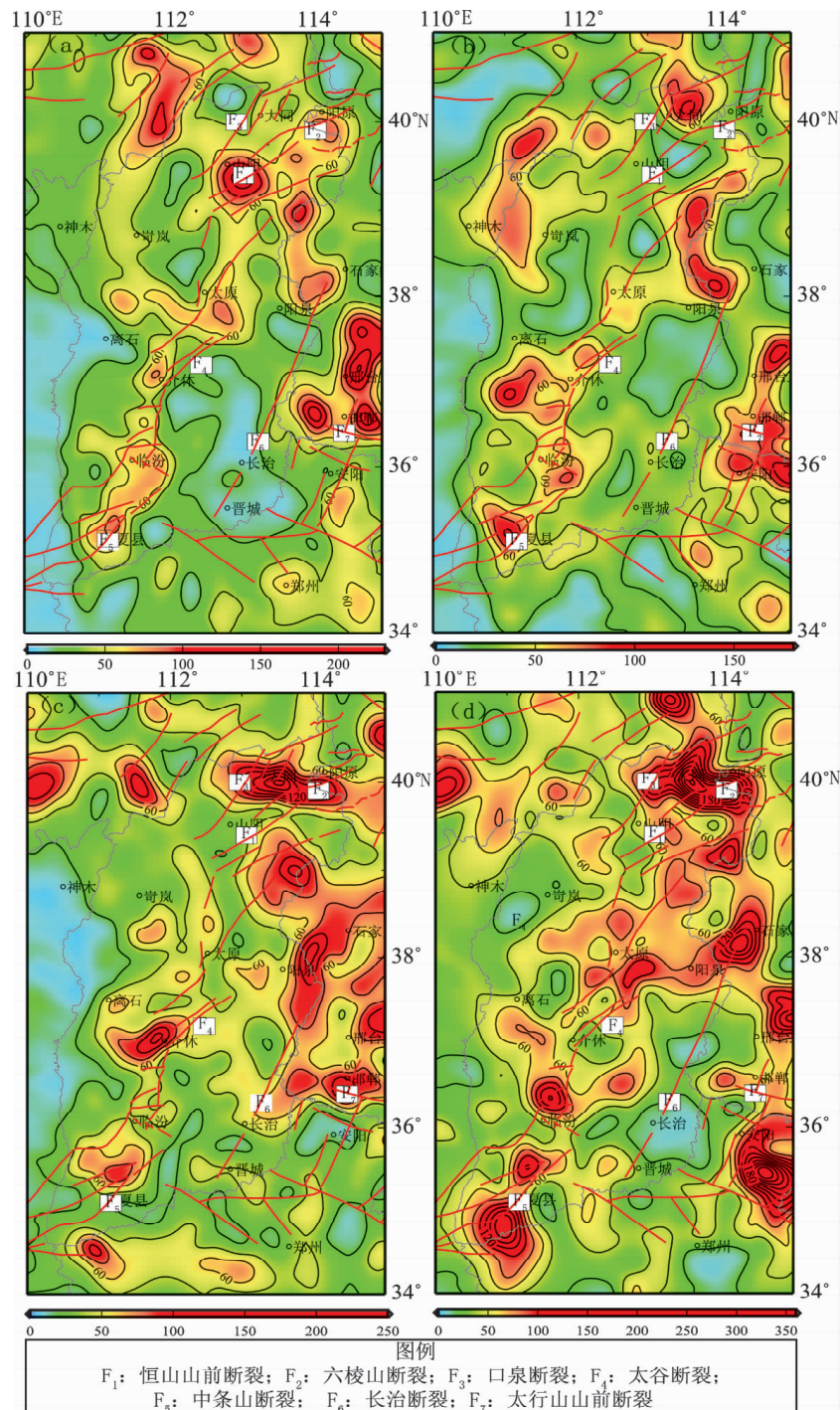


图 4 2011—2012 年 (a)、2012—2013 年 (b)、2013—2014 年 (c) 和 2014—2015 年 (d)
山西及邻区重力水平总梯度动态变化图像 (单位: $10^{-8} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}/^\circ$)

Fig. 4 Maps showing total horizontal gradient of gravity changes in Shanxi and its adjacent areas in 2011—
2012 (a), 2012—2013 (b), 2013—2014 (c) and 2014—2015 (d) (unit: $10^{-8} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}/^\circ$)

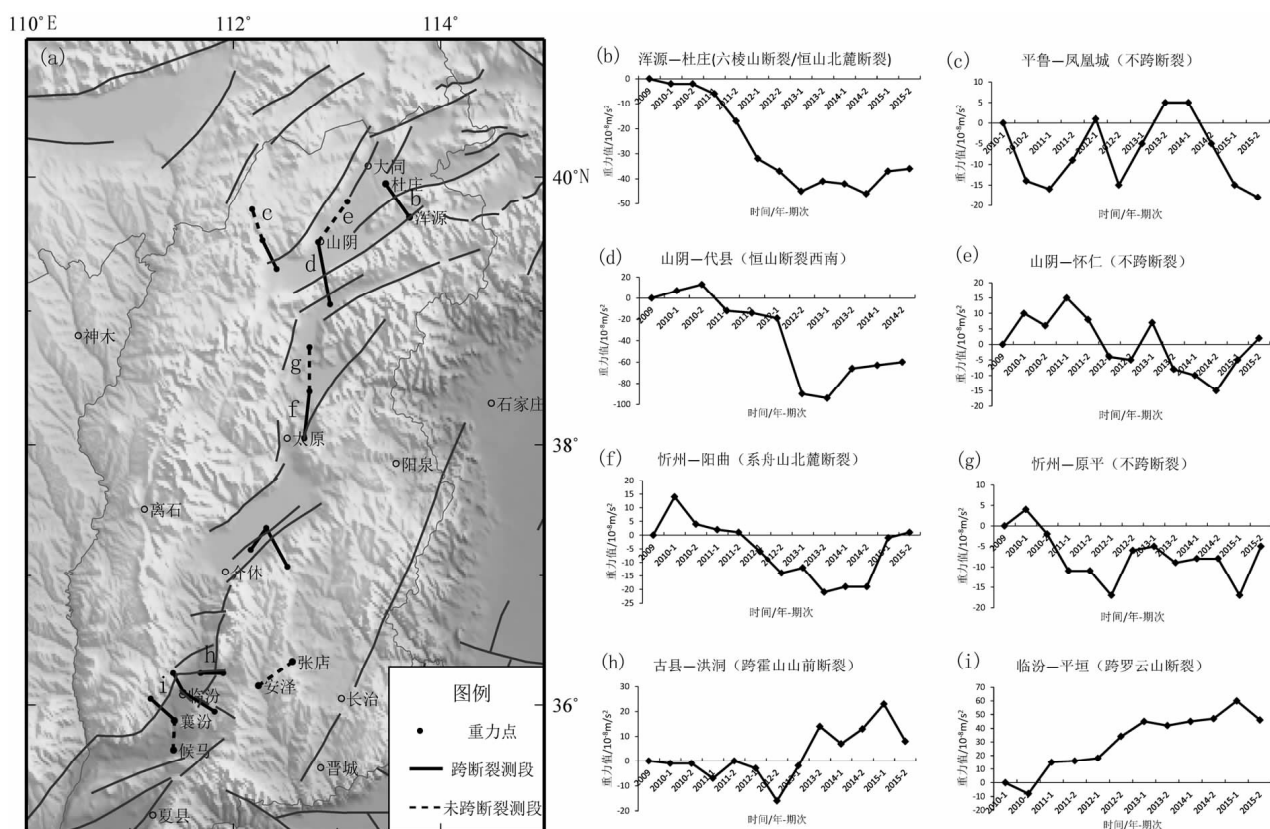


图5 山西地区部分测段分布 (a) 及不同测段段差时序变化特征 (b) ~ (i)

Fig. 5 Partial segments distribution (a) and the temporal variation characteristics of segments (b) ~ (i) in the Shanxi area

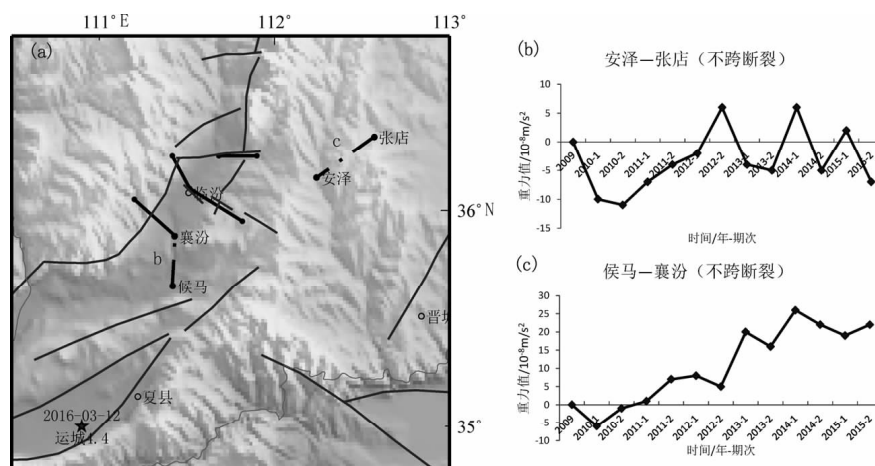


图6 山西南部不跨断裂测段分布 (a) 及段差时序变化特征 (b) ~ (c)

Fig. 6 The temporal variation characteristics (b) ~ (c) and distribution (a) of segments for the non-cross faults in the south of Shanxi

本文利用由精密水准观测结果解算的垂直向位移信息, 获得山西北部 and 晋冀蒙交界范围内 2006—2013 年期间的垂直形变速率, 如图 7 所示 (水准测量和计算结果由一测中心监测二队完成提供)。

垂直形变场反映出晋冀蒙交界地区山区上升、盆地下沉的运动格局, 总体小于 10 mm/a 。按前述自由空气校正公式和垂直形变年速率计算, 研究区高程变化对重力场的影响每年不超过 $3 \times 10^{-8}\text{ m/s}^2$ 。

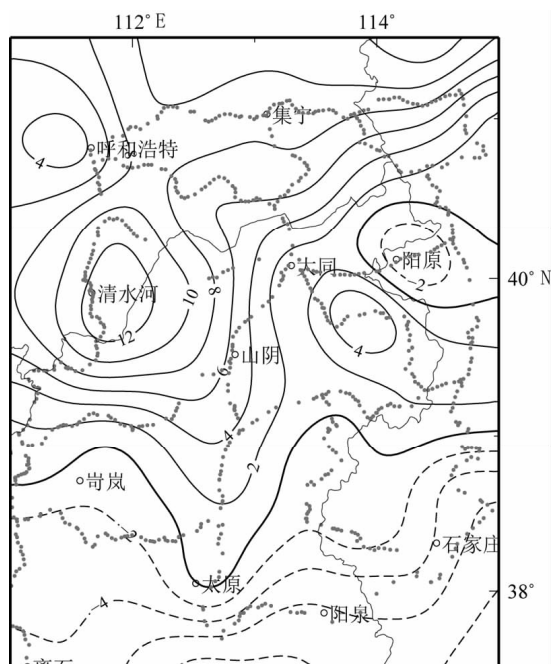


图 7 2006—2013 年晋冀蒙地区垂直变形速率 (单位: mm/a)

Fig. 7 Map of vertical deformation velocities in Shanxi - Hebei - Inner Mongolia area for the period from 2006 to 2013 (unit: mm/a)

在北部的集宁—清水河一带为主要的相对隆升区,南部太原—阳泉—石家庄地区相对下降,下降速率并不大,平均为 $4 \sim 8 \text{ mm/a}$ 。图 2b 显示该区域同期的重力呈现负变化,重力和水准并没有呈现理论的负相关关系,分析认为该地区可能由于华北地下水开采导致地面下沉和重力负变化。

4 相同时间尺度的 GPS 应变场与重力变化特征

在深入分析山西断陷带及邻区近年重力变化特征后,本文尝试将相同时间尺度的重力场和 GPS 观测反映的应变场相结合,初步探讨山西断陷带地下物质密度变化引起的地表重力变化与反映地表微形变的应变场的时-空变化特征的一致性。

最大剪应变反映的是局部区域构造活动性的强弱,面应变的值在一定程度上反映了地壳中应变能的状态及大小,负值表示该区收缩,正值表示该区膨胀。

2013—2015 年山西断陷带的重力场和应变场的变化特征整体显现出:在重力场正负变化零值

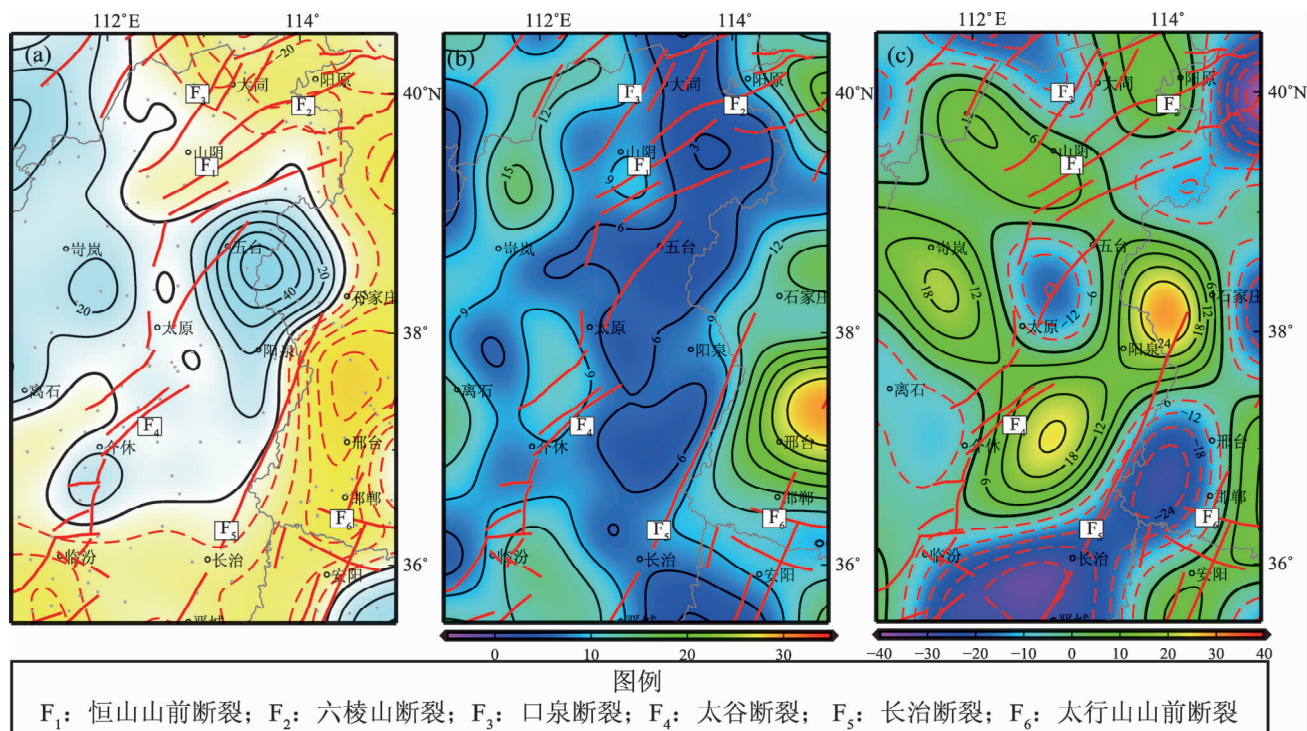


图 8 2013—2015 年山西地区重力重力变化 (单位: 10^{-8} m/s^2) (a)、最大剪应变 (单位: $10^{-9}/\text{a}$) (b) 和面应变 (单位: $10^{-9}/\text{a}$) (c)

Fig. 8 Gravity change (unit: 10^{-8} m/s^2) (a), Maximum shear strain (unit: $10^{-9}/\text{a}$) (b) and Surface strain (unit: $10^{-9}/\text{a}$) (c) in Shanxi area during 2013 and 2015

线附近基本对应着最大剪应变的几个高值区,同时面应变表现为挤压收缩和膨胀拉伸变形的过渡区域,表明这段时间内随着应力积累局部应变持续增大,地下物质密度产生变化,这些地区的构造活动性处在一个较强的状态,同时存在部分小震活动;研究区东南部面应变和重力变化的零值线都沿太行山山前断裂展布,说明断裂两侧的重力场和面应变膨胀率分别呈现2种不同的状态,二者具有一定的共生性特征。值得注意的是,面应变结果显示在五台—阳泉区域形成了负值中心,最大剪应变显示该地区相对闭锁,位于几个构造相对活跃的中心,同一时期的重力变化特征显示在同一区域表现为重力累积正变化,说明该区域地壳中应变能在周边膨胀拉伸的包围下处于挤压收缩的状态,深部物质向该区迁移,导致局部区域密度增高,这也进一步表明 GPS 所揭示的地表微形变是对物质运移的一种间接反映,与地下物质密度变化具有较好一致性。

由于本文旨在尝试对比相同时间尺度的重力场和 GPS 所揭示的应变信息的相关性和时空一致性,又由于流动 GPS 观测反映的垂向位移变化精度较低,其误差与变化量基本在同一量级,难以在重力观测误差精度中得到认证和分辨,故文中并没有列出 GPS 垂向变化结果。

5 结论及认识

通过处理分析山西及邻区 2009—2015 年重力场及其水平总梯度的动态变化特征,结合重点地区跨断裂测段的段差时序变化特征详细分析局部地段的异常特征,最后将相同时间尺度的重力场和应变场放到一起,初步探讨山西断陷带重力场变化与反映地表微形变的速度和应变场的时空变化特征的一致性,得到以下初步结论:

(1) 山西北部阳原—大同至晋冀蒙交界区域在累积重力场变化中表现为持续的负变化,重力场差分变化特征在该地区出现了由负到正变化的演化过程,且等值线发生了近 90° 的弯曲,显示出大同盆地及其周缘的 NE、NEE 向的口泉断裂、恒山山前断裂、六棱山山前断裂等活动构造区域具有一定的重力孕震特征;山西南部临汾—夏县一带在多年的累积变化中呈现重力上升趋势,体现了该地区能量在不断积累,在最新的一期重力场

差分变化中突然发生由正到负的大面积反转,并于 2016 年 3 月 12 日发生了运城 4.4 级地震。

(2) 近期的重力场动态变化显示晋冀豫交界的邯郸—安阳一带沿太行山山前断裂形成了正负差异达 $100 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 左右的高梯度带,并在安阳附近等值线发生转折弯曲,同时最大剪应变也显示该区域处于相对高值活跃期,应予以关注。

(3) 重力水平总梯度具有比重力异常更高的分辨率,根据一年尺度的重力水平总梯度的动态变化特征,更加直观地显示出,在山西北部恒山断裂、六棱山断裂和口泉断裂附近的阳原—大同一带、南部中条山断裂的运城—夏县一带和中东部的太行山断裂安阳附近,形成了水平总梯度的高值区集中区,与重力场所反应的异常位置十分一致且异常更为明显。

(4) 跨断裂测段段差的时序变化较好地突出局部地段的重力异常变化特征,也间接反映了山西北部的大同盆地和南部的临汾盆地在周缘断裂的控制下正处在一个相对活跃的时期。

(5) 研究区内由地壳垂直运动引起的地表重力变化较为有限,重力场变化是对地壳深部介质密度变化和物质迁移过程的主要反映。

(6) 通过对比分析认为相同时间尺度的重力场和应变场有较好的对应关系,联合分析重力和应变场有助于对地壳形变和深部物质的变化产生的孕震机理获得更深刻的认识。

参考文献:

- 陈石,王谦身,祝意青,等. 2011. 汶川 $M_s 8.0$ 震前区域重力场变化与震中研究[J]. 地球物理学进展, 26(4): 1147–1156.
- 陈石,徐伟民,蒋长胜. 2015. 中国大陆西部重力场变化与强震危险性关系[J]. 地震学报, 37(4): 575–587.
- 陈石,徐伟民,祝意青,等. 2011. 震前重力场变化质源体边界和危险区划定方法研究[J]. 地震, 31(4): 98–107.
- 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[J]. 大地测量与地球动力学, 27(6): 106–108.
- 冯建林,孙少安,秦建增,等. 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, 27(增刊 I): 49–52.
- 郭良迁,占伟,杨国华,等. 2010. 山西断陷带的近期位移和应变率特征[J]. 大地测量与地球动力学, 30(4): 36–42.
- 国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组. 1988. 鄂尔多斯周缘活动断裂系[M]. 北京:地震出版社.
- 贾宇鹏,秦建增,李真,等. 2015. 2014 年山西平遥 $M_s 4.1$ 地震前后重力场变化特征分析[J]. 地震研究, 38(3): 377–383.
- 李辉,申重阳,孙少安,等. 2009. 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, 29(3): 1–9.
- 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):15-18.
- 李真, 秦建增, 陈石, 等. 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.
- 刘峡, 傅容珊, 杨国华, 等. 2006. 用 GPS 资料研究华北地区形变场和构造应力场[J]. 大地测量与地球动力学, 26(3):33-39.
- 申重阳, 李辉, 孙少安, 等. 2009. 重力场动态变化与汶川 $M_s 8.0$ 地震孕育过程[J]. 地球物理学报, 52(10):2547-2557.
- 王小亚, 朱文耀, 符养, 等. 2002. GPS 监测的中国及周边现时地壳形变[J]. 地球物理学报, 45(2):198-209.
- 王秀文, 崔子健, 杨国华, 等. 2016. 山西裂谷带形变应变场演化特征及与地震的关系[J]. 大地测量与地球动力学, 36(1):52-56.
- 王秀文, 宋美琴, 杨国华, 等. 2010. 山西地区应力场变化与地震的关系[J]. 地球物理学报, 53(5):1127-1133.
- 王秀文. 1995. 山西中强地震前形变前兆的异常特征[J]. 山西地震, (2):3-8.
- 武艳强, 江在森, 王敏, 等. 2013. GPS 监测的芦山 7.0 级地震前应变积累及同震位移场初步结果[J]. 科学通报, 58(20):1910-1916.
- 玄松柏, 申重阳, 邢乐林, 等. 2014. 现今太原盆地重力变化与地表沉降[J]. 大地测量与地球动力学, 34(1):24-27.
- 杨国华, 杨博, 占伟, 等. 2012. GPS 资料反映大震前后青藏高原东北缘的水平形变[J]. 地震研究, 35(3):295-302.
- 曾华霖. 1999. 重力梯度测量的现状及复兴[J]. 物探与化探, 23(1):1-6.
- 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.
- 祝意青, 徐云马, 吕弋培, 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):2539-2546.

Analysis of Deformation Features in Shanxi Area Based on Gravity and GPS Measurements

WANG Tongqing¹, WANG Shufa¹, YANG Bo¹, LI Zhen¹, CHEN Zhaohui¹, ZHANG Pin¹

(1. First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China)

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

Abstract

We use campaign gravity and regional GPS data accumulated over the years to process and analyze 2009 – 2015 dynamic variation of gravity field of Shanxi rift zone and its adjacent areas based on the segment, line, face. Then we apply horizontal total gradient method to extract anomaly information from the dynamic variation of gravity field. Finally, we compare the gravity field and strain field in recent years on the same time scale to obtain the precise variation of crustal deformation in Shanxi area. The results show that: (1) Horizontal total – gradient gravity field has higher sensitivity than gravity anomaly. Both of their dynamic variations show more significant changes in the area of Yangquan – Datong near Hengshan fault, Liulengshan fault and Kouquan fault in northern Shanxi, the area of Linfen – Xiaxian near the Zhontiaoshan fault in southern Shanxi, and the area of Handan – Anyang near the Taihang mountain Shanqian faults in mid – eastern Shanxi; (2) The same time – scale gravity and strain field corresponded well from the comparative analysis. Joint analysis of gravity and strain field can help us to study the crustal deformation and seismogenic mechanisms generated by the changes of deep physical properties.

Keywords: gravity field; horizontal total – gradient; strain field; deformation features; Shanxi area