

晋冀蒙交界区重力场动态变化及潜在危险区分析*

贾宇鹏, 郝鹏飞, 檀玉娟, 李洋洋, 李勇江, 刘冬阳

(中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 对2013—2017年晋冀蒙交界区的流动重力观测资料重新进行整体平差计算, 对比分析了该区域不同尺度的重力场变化特征, 再结合重力场变化和深部构造特征探讨了潜在危险区。结果表明: 测区出现了区域性重力异常, 形成了与构造断裂较为一致的重力梯度带, 这可能预示着存在构造运动或应力增强作用, 同时应注意大同一张家口和石家庄—邢台一带的地震危险性。

关键词: 晋冀蒙; 重力场; 地壳速度模型; 地震危险区

中图分类号: P315.726

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2019)03-0398-07

0 引言

重力场是地球基本物理场之一, 对重力场及其变化的研究为揭示地球内部构造及其变化提供了基础。重力场的时空动态演化特征可为研究现今地壳构造与地震孕育发生的相互关系提供一定的根据。国内专家利用地震前后重力场变化资料在寻求发震机理、探讨地震趋势分析等方面做了大量工作, 取得了诸多的研究成果(祝意青等, 2012, 2013; 梁伟锋等, 2012; 刘善华等, 2011; 陈石等, 2011; 郝洪涛等, 2014; 王同庆等, 2018; 陈兆辉等, 2018; 张永奇等, 2017)。

晋冀蒙交界地区是华北乃至中国大陆东部地震活动最为活跃的地区之一, 历史上曾发生过多中强地震。山西中部到晋冀蒙交界区的重力场变化一直受到关注, 有很多的研究成果值得借鉴(王同庆等, 2017; 贾宇鹏等, 2015; 李真等, 2013; 冯建林等, 2013)。深入研究该地区重力场随时间的变化对地震预测预报工作有重要意义。

本文收集2013—2017年晋冀蒙交界区的流动重力资料, 以绝对重力点作为控制基准, 采用中国地震局《LGADJ》程序对观测资料进行经典平差处理, 获得了该地区差分及累积重力场变化图像。同时结合华北地壳深部模型和地震展布情况对重点区域的重力场变化特征进行讨论。

1 观测资料与数据处理

1.1 资料选取

本文主要研究区域($36^{\circ} \sim 42^{\circ} \text{N}$, $111^{\circ} \sim 117^{\circ} \text{E}$)和重力联测路线如图1所示。所选数据包含了中国地震局地球物理勘探中心、中国地震局地球

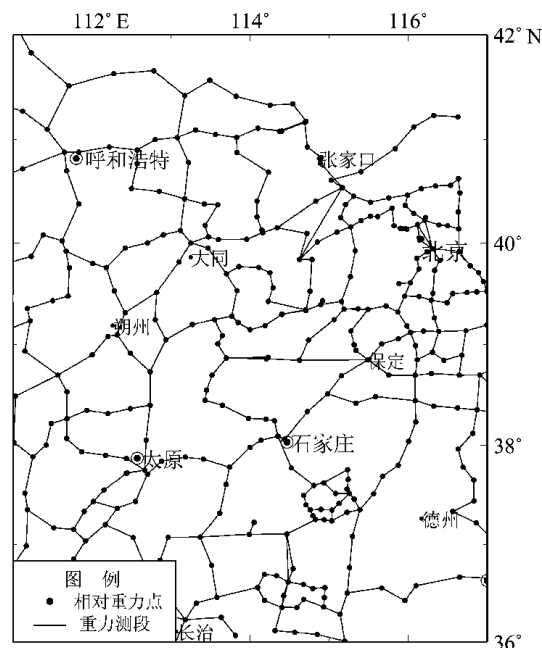


图1 研究区重力联测路线

Fig. 1 The gravity joint surveying routes in the study area

* 收稿日期: 2018-09-30.

基金项目: 中国地震局震情跟踪定向工作任务(2018010234)、地震监测运维(流动重力)和川滇国家地震监测预报实验场项目(2016CESE0103)联合资助。

物理研究所、河北省地震局、山东省地震局等单位的10期相对重力联测资料,以及中国地震局地震研究所提供的绝对重力观测资料。观测仪器为LCR-G型重力仪和CG-5重力仪,测量之前均对仪器进行细致调试,仪器状态良好,观测资料可靠。

1.2 数据处理

采用经典平差方法,在绝对重力(太原、长治、包头、白家疃、乌加河等)控制下,对2013—2017年的流动重力观测资料进行整网统一平差计算。对各单位公共点段的异常情况进行重点核实,去除非数据原因引起的重力场畸变;对一些突跳的重力点值具体分析并进行修正。在相对重力资料处

理过程中作了固体潮、一次项系数等改正,获得了不同时间段的重力场动态变化结果。相对重力联测均每年观测2期,精度优于 $15 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。

2 区域重力场动态变化特征

2.1 半年尺度重力场动态变化

从2015—2017年半年尺度的重力场变化特征(图2)可以看出,重力场主要是小幅调整变化,幅值受季节影响下重力场的正常状态,约为 $(-30 \sim 30) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。2015-09—2016-04,重力场总体呈现小幅正值变化;2016-04—2016-09,重力

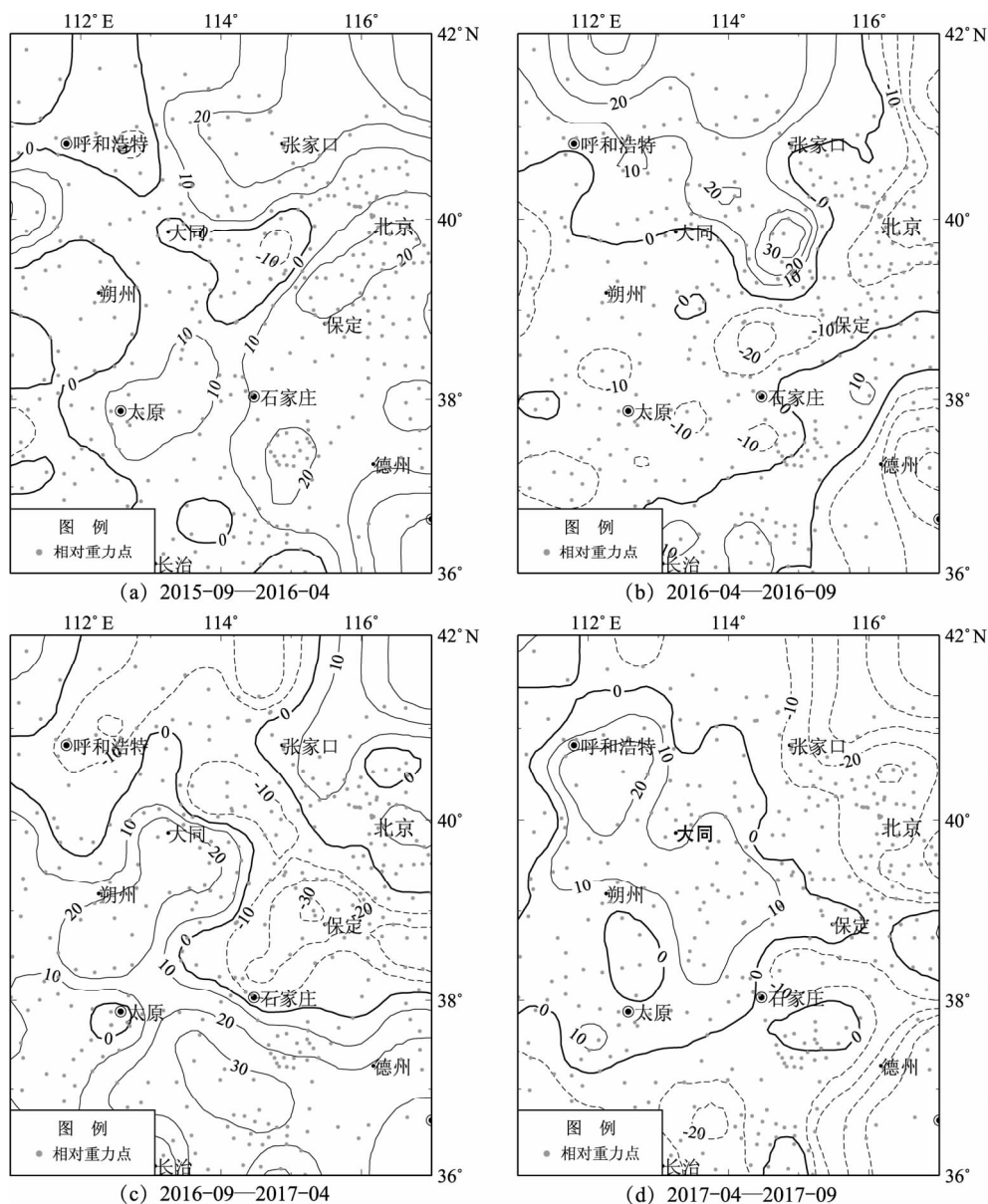


图2 半年尺度的重力场变化图(单位: 10^{-8} ms^{-2})

Fig. 2 Gravity change patterns in a half-year period (unit: 10^{-8} ms^{-2})

场出现南北小幅正值、中间负值变化的情形；2016-09—2017-04，南部的重力场正值变化向北扩大且幅值小幅增加，中部重力场负值范围缩小，但是幅值小幅增加，北部范围缩小；2017-04—2017-09，重力场中西部出现正值变化，最大约为 $20 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ，周边地区出现大面积负值变化，但幅值不大。

2.2 一年尺度重力场动态变化

2013—2017 年一年尺度的重力场变化特征（图 3）显示：重力场主要是调整变化，幅值约为 $(-40 \sim 40) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ，重力零值线在大同附近，并形成持续重力梯度带，幅值约为 $50 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。图 3

中所示的 6 个地震中有 5 个发生在重力场反转的时段，仅 2016 年 12 月 18 日清徐 M4.3 地震发生在重力场持续变化过程中。2013-09—2014-09，重力场主要是负值变化，最大幅值约为 $40 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。2014-09—2015-09，重力零值线基本沿呼和浩特—大同—保定方向延伸，重力场呈现南正北负的特征。2015-09—2016-09，重力场发生反转，在此过程中发生了 3 次 4 级以上地震，重力零值线依旧在大同附近。2016-09—2017-09，重力场呈现西南正东北负的情形，此期间发生了 2 次 4 级以上地震。重力零值线基本沿呼和浩特—大同—石家庄方向延伸。

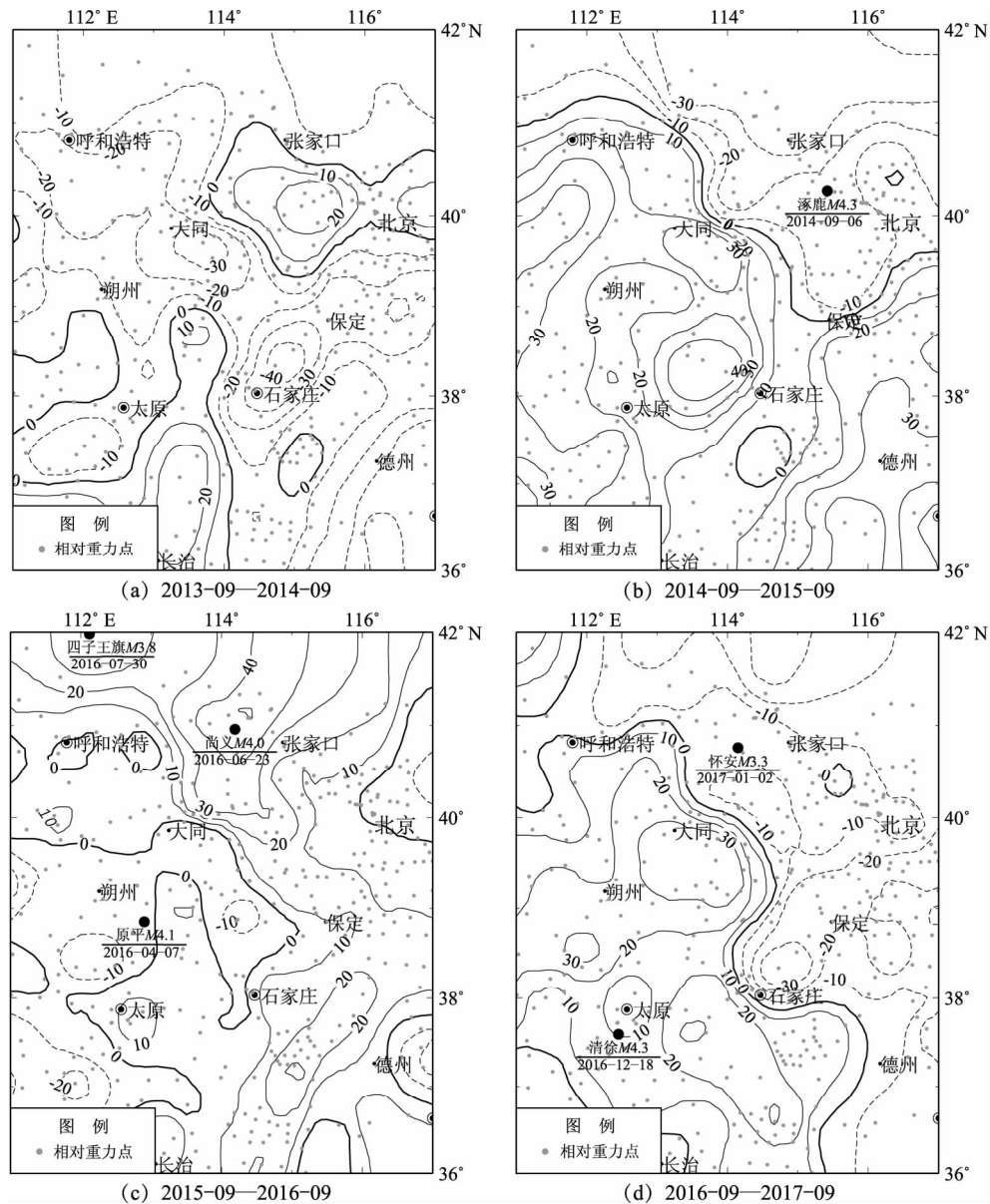


图 3 一年尺度的重力场变化图（单位： 10^{-8} ms^{-2} ）

Fig. 3 Gravity change patterns in one-year period (unit: 10^{-8} ms^{-2})

2.3 重力场累积动态变化

2013—2017年重力场累积的变化特征见图4。总体来看,重力场东部变化比较剧烈,西部变化相对平缓,张家口一带重力零值线出现拐弯,重力持续累积形成梯度带,幅值约为 $40 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$;石家庄一带重力变化最为显著,持续累积形成NNE向梯度带,幅值约为 $70 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。2013-09—2014-09,重力场基本呈现大面积负值变化,最大变化幅值约为 $40 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$;2013-09—2015-09,重力场较上期在南部呈现大面积的正值变化,石家庄—邢台一带持续呈现负异常,并出现重力梯度带;2013-09—2016-09,重力场变化整体延续

了上一期的变化趋势,正值范围有所扩大。大同一张家口和石家庄—邢台一带依然处于重力零值线和梯度带附近,并且重力场持续加强。2013-09—2017-09,重力场整体延续了上一期的正值变化,幅值不大。

2.4 重力测点时序变化

从图5可以看出,所选重力测点主要分布在太行山山前断裂带和山西断陷带。不同测点的变化趋势基本一致,总体呈上升变化。2015年第一期到第二期,所有测点重力值均是上升状态;2015年第二期到2016年第一期,除后房子和五寨以外,其余测点重力值保持上升;2016年第一期到2017年

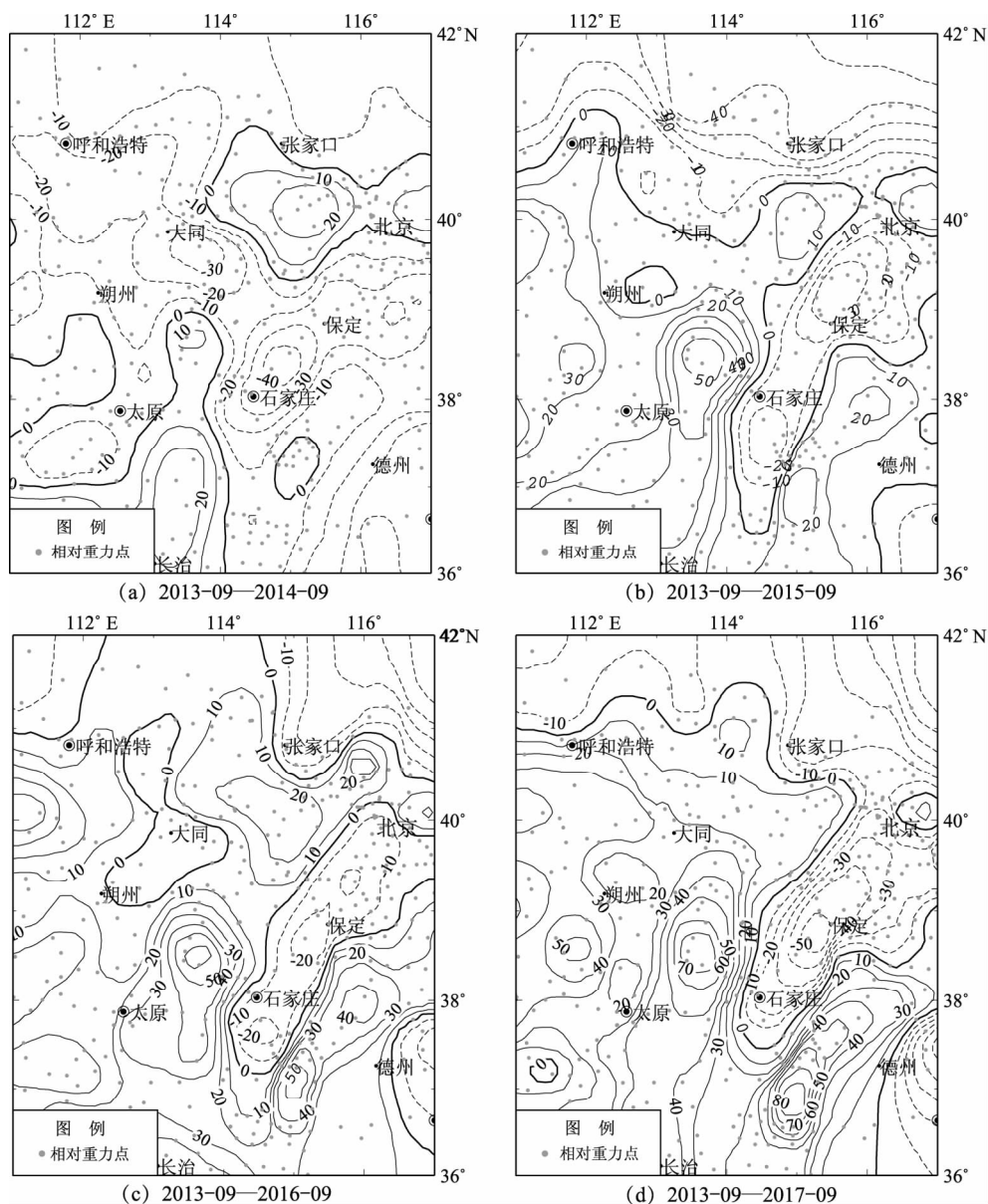


图4 累积年尺度的重力场变化图 (单位: 10^{-8} ms^{-2})

Fig. 4 Gravity change patterns in one or more years periods (unit: 10^{-8} ms^{-2})

第一期,重力值变化较为平缓,部分测点出现转折调整;2017 年第一期到 2017 年第二期,除原平以外,其余测点重力值均保持上升。太行山附近的东山乡测点重力变化最大,幅值近 $70 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,山西断陷带北部的凤凰山测点重力变化最小,幅值约为 $25 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。

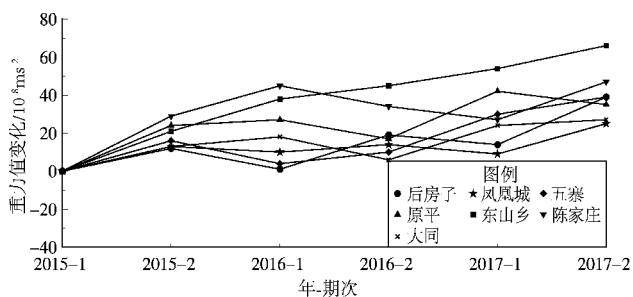


图 5 部分测点重力点值时序变化图

Fig. 5 Time series gravity changes at some observation stations

2.5 垂直形变和地下水对重力场变化的影响

观测重力值会受到地形变、地下水等变化的共同作用,因此在重力场分析中考虑环境因素的变化尤为重要。

(1) 分析 GPS 观测结果解算的垂直向位移信息对重力场变化的影响。一般考虑地表垂直形变产生的重力效应时,把垂直形变 δ_H 产生的重力变化用 δ_g 表示, δ_g 可用自由空气校正公式计算:

$$\delta_g = -0.3086 \delta_H \quad (1)$$

从式 (1) 可看出,高程每抬升或下降 1 cm,将引起约 $3.086 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 的重力下降或者上升变化,其远小于重力场的观测误差,因此垂直形变的影响可以忽略不计。

(2) 一些学者对地下水对重力测量造成的影响做了细致分析。如地下水位变化 3 m,无限平面层引力效应的垂直分量远区域很小;潜水位对唐山地震前 2 期的重力测量结果影响较小,最大不超过 $9 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,因此,引起唐山震前重力场变化的主要原因不是地下水(贾民育等,1983)。引起水文运动的因素很多,只从单个因素着手不能准确估计对重力场变化的影响效果。从地下水的渗透方程出发解决了这样的问题,武汉九峰站地下水变化引起的重力效应,峰对峰重力变化幅度约为 $16 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ (贺前钱等,2016)。

研究区东南部位于华北平原,近些年地下水流失对重力场的变化造成一定的影响,重力值下降约 $10 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,在分析重力场变化时应将下降的幅值考虑进去;研究区西部与北部地下水流失相对不大,造成的重力值下降很小,分析重力场变化特征时,地下水的影响可以忽略不计。

3 讨论

重力场主要分析一定空间范围、数年尺度的变化情况,而速度结构和地震展布反映了大范围、长时间尺度的发震背景。重力场的变化对地震的发生位置具有较好的指示作用,应重点关注重力

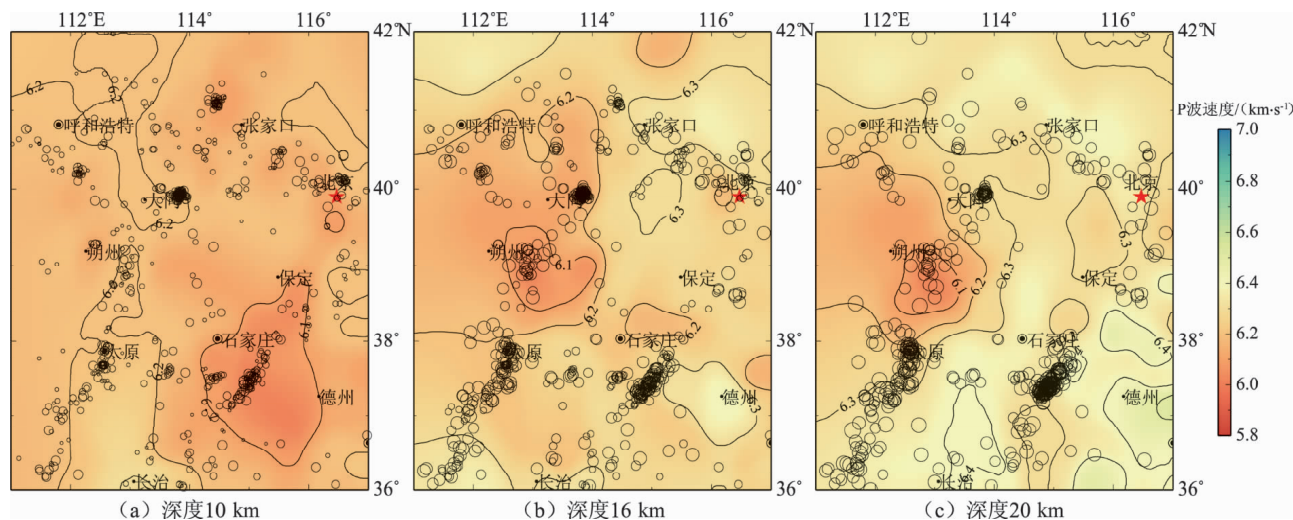


图 6 不同深度 P 波速度地震投影

Fig. 6 The seismic projection of P wave at the difference depths

零值线和重力梯度带附近;中上地壳P波速度的高、低速交界偏高速区域一般较容易发生地震,高速区域一般代表稳定刚性的地块,低速一般代表被破坏的或者被改造的区域;地震震中的投影一般沿着断裂带分布,差异大的高、低速之间的区域和断裂在地表以下的延伸有一定关系。重力场变化图、P波速度图和震中投影图中具有相关性的区域对地震发生的位置有一定的指示性,应重点进行跟踪。

分析华北地区三维地壳结构并收集模型数据(段永红等,2002,2016;魏文博等,2007;陈凌等,2010),使用HBCrust1.0模型将1970—2017年研究区发生的3.0级以上地震,按照3个不同深度分别投影到对应的P波速度图(图6)上。由图6可见,地震主要沿着山西断陷带和太行山东山前断裂展布,在大同、张家口、太原和邢台附近集中分布。而大同一张家口和石家庄—邢台一带处于在三者差异均较明显的区域,应重点关注这2个区域的地震危险性。

4 结论

通过对晋冀蒙交界区流动重力资料的整理计算,对比分析不同尺度的重力场变化特征,探讨了重力场变化和深部构造在地震孕育发生过程中的联系,得到以下主要结论:

(1) 重力场的变化能够较好地反映构造断裂的活动和深部物质迁移等信息。重力场累积尺度变化中,大同附近持续3年出现重力零等值线;张家口重力场变化表现为持续负变化,重力零值线出现拐弯;石家庄—邢台一带形成比较显著的NNE向梯度带。

(2) 地震容易发生在地壳速度差异较大的区域,地震震中投影显示了沿断裂带地震分布的情况,重力场的变化对地震发生位置具有指示性,结合这3点可以对孕震位置做出更好的判断。

(3) 大同一张家口和石家庄—邢台一带处于重力场变化图、P波速度图和震中投影图差异均较

明显的区域,因此在未来1~5年内,应重点关注这2个区域的地震危险性。

参考文献:

- 陈凌,危自根,程骋.2010.从华北克拉通中、西部结构的区域差异性探讨克拉通破坏[J].地学前缘,17(1):212-228.
- 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.
- 陈兆辉,王同庆,刘金钊,等.2018.南北地震带近期重力量变化与指标量分析[J].地震研究,41(3):480-486.
- 段永红,王夫运,张先康,等.2016.华北克拉通中东部地壳三维速度结构模型(HBCrust1.0)[J].中国科学:地球科学,46(6):845-856.
- 段永红,张先康,方盛明.2002.华北地区上部地壳结构的三维有限差分层析成像[J].地球物理学报,45(3):362-369.
- 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,33(增刊1):49-52.
- 郝洪涛,李辉,张志坚.2014.岷县—漳县6.6级地震前后重力场变化[J].大地测量与地球动力学,34(3):43-47.
- 贺前钱,罗少聪,孙和平,等.2016.武汉九峰站地下水变化对重力场观测的影响[J].地球物理学报,59(8):2765-2772.
- 贾民育,游泽霖,万素凡,等.1983.地下水活动对精密重力测量的影响及排除方法[J].地壳形变与地震,(1):50-67.
- 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,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.
- 王同庆,陈石,梁伟锋,等.2018.2016年门源 $M_s6.4$ 地震前的区域重力场变化与定量参数分析[J].地震地质,40(2):349-360.
- 王同庆,王树发,杨博,等.2017.基于重力和GPS的山西地区形变特征分析[J].地震研究,40(1):101-110.
- 魏文博,叶高峰,金胜,等.2007.华北地区地壳P波三维速度结构[J].地球科学—中国地质大学学报,32(4):441-445.
- 张永奇,丁晓光,曹建平,等.2017.关中流动重力测网的中小地震映震能力分析[J].地震研究,40(2):248-256.
- 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 of Gravity Field and Earthquake Prone Region in the Shanxi-Hebei-Mongolia Border Area

JIA Yupeng, HAO Pengfei, TAN Yujuan, LI Yangyang, LI Yongjiang, LIU Dongyang
(*Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, Henan, China*)

Abstract

Using the observation data of mobile gravity measurements in Shanxi-Hebei-Mongolia border area from 2013 to 2017, we recalculated all the data based on the adjust method. Then, we analyzed the spatial-temporal variation of the regional gravity field at different time periods. Finally, we discussed the earthquake prone regions based on gravity changes and deep tectonics. The result mainly shows that, the regional gravity anomaly appeared in the whole study region, forming gravity gradient zones consistent with tectonic faults, which may indicate tectonic movement or stress enhancement. We should pay attention to the potential earthquake risk in Datong-Zhangjiakou and Shijiazhuang-Xingtai area.

Keywords: Shanxi-Hebei-Mongolia; gravity field; crustal velocity mode; earthquake prone region