

# 山西中北部地区地壳垂直形变时空演化特征 及与强震的关系\*

徐东卓<sup>1</sup>, 朱传宝<sup>2</sup>, 孟宪纲<sup>1</sup>, 尹海权<sup>1</sup>, 孙非非<sup>2</sup>

(1. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180; 2. 青海省第三地质矿产勘查院, 青海 西宁 810029)

**摘要:** 采用山西中北部地区 2006 期和 2015 期一等精密水准测量资料, 利用经典动态平差方法, 对区域近期地壳垂直形变时空演化特征进行了研究。结果表明: (1) 山西中北部地区近期整体表现为山地隆升, 盆地下沉的特点, 以继承性运动为主, 但局部也存在差异性。吕梁断块和太行断块表现为隆升, 活动速率分别为  $2 \sim 8 \text{ mm/a}$  和  $2 \sim 6 \text{ mm/a}$ ; 山西断陷带的系列盆地表现出相对下沉, 沉降速率为  $-3 \sim -10 \text{ mm/a}$ ; (2) 汶川地震显著影响了区域地壳垂直运动形变场。震前区域地壳运动表现为显著拉张特点, 震后张性减弱, 挤压增强; (3) 大同一化稍营、呼和浩特和榆次—石家庄一带存在地壳垂直形变高梯度带, 中长期尺度上存在地震危险性背景。

**关键词:** 山西中北部地区; 水准测量; 地壳垂直形变; 地震危险性

**中图分类号:** P315.725

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2018)03-0446-05

## 0 引言

地震的孕育、发生和发展过程中, 由于地壳深部构造的复杂性和介质的不均一性, 会在某些区域出现大幅度的变形, 而在震前某些特殊部位会出现强烈的异常变化。通过大地形变测量来获取地壳形变异常用于地震的长、中期预报, 具有积极有效的作用和实效(张祖胜等, 1996)。区域精密水准测量作为经典的大地测量方法, 具有覆盖面积大、精度高、历史资料丰厚、复测周期多的特点, 在监测区域地壳垂直运动变化上的作用不可或缺(苏建锋, 薄万举, 2016; 孙启凯等, 2017a; 徐东卓等, 2017a)。山西地区是中国大陆新生代断陷盆地的主要发育区之一, 也是历史破坏性地震多发区。自 1989 年大同一阳高 6.1 级地震后, 山西中北部地区距今已近 30 年未发生 6 级以上地震, 距上一次 7 级以上地震发生则更久, 中强震地震危险性背景显著。GPS 研究结果表明, 汶川 8.0 级地震对该区域地壳形变场产生了明显影响。刘峡等(2013)认为汶川地震前区域呈相对均一的北西向拉张, 震后以构造挤压为主, 南端为强烈拉张。汶川地震对太原盆地构造应力场的

影响显著, 应力场的方向和应力值的大小均发生了变化(张淑亮等, 2017)。

研究山西中北部地区现今地壳垂直形变的时空演化特征以及汶川地震对该区域地壳垂直运动的影响, 有助于分析华北地区新生代构造最新活动特征、岩石圈动力过程与地震活动的关系。本文整理了山西中北部地区 2006 和 2015 共 2 期一等精密水准测量资料, 利用经典动态平差方法, 得出并分析了现今区域地壳垂直形变时空演化特征, 对比研究了汶川地震前后的地壳形变, 并对该地区未来地震危险性给出一定推测。

## 1 地质背景及资料概况

山西地区位于华北克拉通内部的鄂尔多斯地块东缘, 地震活动强烈且频繁的山西地震带纵贯全境, 山西断陷带作为山西地震带的主体由一系列狭长而不对称的盆地组成, 整体呈北东至北东东走向, 右行斜列, 是典型的“S 型”或“多字型”构造体系(武烈等, 1993)。其中, 山西中北部地区主要包括延怀盆地、大同盆地、忻定盆地、太原盆地等, 各盆地之间以横向隆起相隔(图 1)。山西断陷带晚第四纪以来构造活动强烈, 控盆的

\* 收稿日期: 2018-04-23.

基金项目: 科技部科技基础性工作专项(2015FY210400)和中国地震局地震行业科研专项(201508009)共同资助。

主边界断裂活动显著, 两侧垂直差异运动强烈, 地形地貌高差较大(邓起东等, 2002; 王秀文等, 2010; 王同庆等, 2017)。山西断陷带历史地震活动强烈, 有记载以来共发生过10次7级以上地震, 其中包括1303年洪洞8.0级地震、1556年华县8.0级地震和1695年临汾8.0级地震。

本文共使用2期精密水准数据进行处理和分析, 第1期主要在2006年完成, 第2期主要在

2015年完成, 水准路线共形成多个闭合环, 覆盖了晋中—阳泉以北的山西中北部地区。使用的光学水准仪、电子水准仪以及配套的钢瓦水准标尺和尺台检验项目齐全, 各项限差均符合相关规范要求, 施测过程严格按照相关规范执行。

## 2 资料处理及分析

首先对2006期和2015期一等水准资料进行先期处理, 再利用平差方法进行数据处理。主要采用分段动态线性速率模型(黄立人, 匡绍君, 2000), 平差计算2期时间尺度内的地壳垂直形变速率, 以稳定的基岩水准点作为参考基准, 平差最终结果显示单位权中误差1.0 mm左右, 效果优良。然后对平差得到的结果进行梳理, 剔除单个量级过大或与相邻点差异过大的突跳点。采用多面函数法对最终处理结果进行格网化, 并计算每个格网点的梯度模值(孙启凯等, 2017b; 徐东卓等, 2017b), 绘制出垂直形变速率等值线图与梯度图。

由计算得出的研究区域垂直形变速率结果可知, 山西中北部地区表现出断陷盆地下沉, 断陷带两侧断块山地隆升的特征。其中, 由一系列盆地组成的南北向展布的山西断陷带北段整体呈现出下沉特点, 其两侧的太行山和吕梁山断块多显示为隆升(图2a)。汶川地震前后2期水准测量数据的解算结果与前期资料相较, 结果显示, 汶川地震前后区域地壳

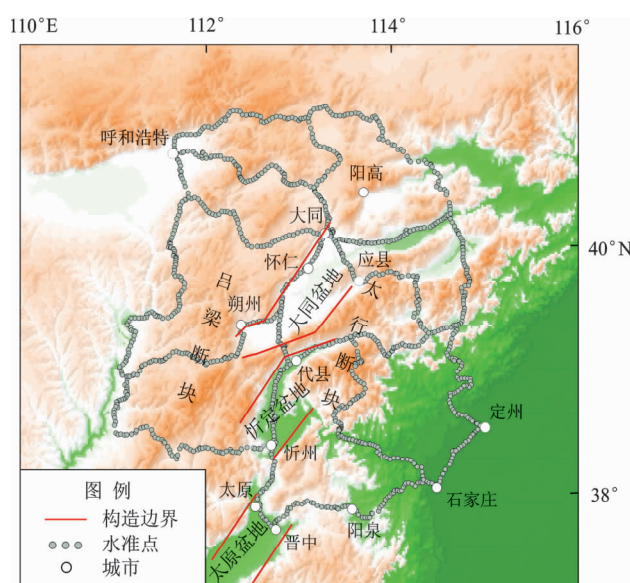


图1 山西地区主要构造单元及水准路线分布图

Fig. 1 Sketch map of main structural units and leveling line distribution in Shanxi region

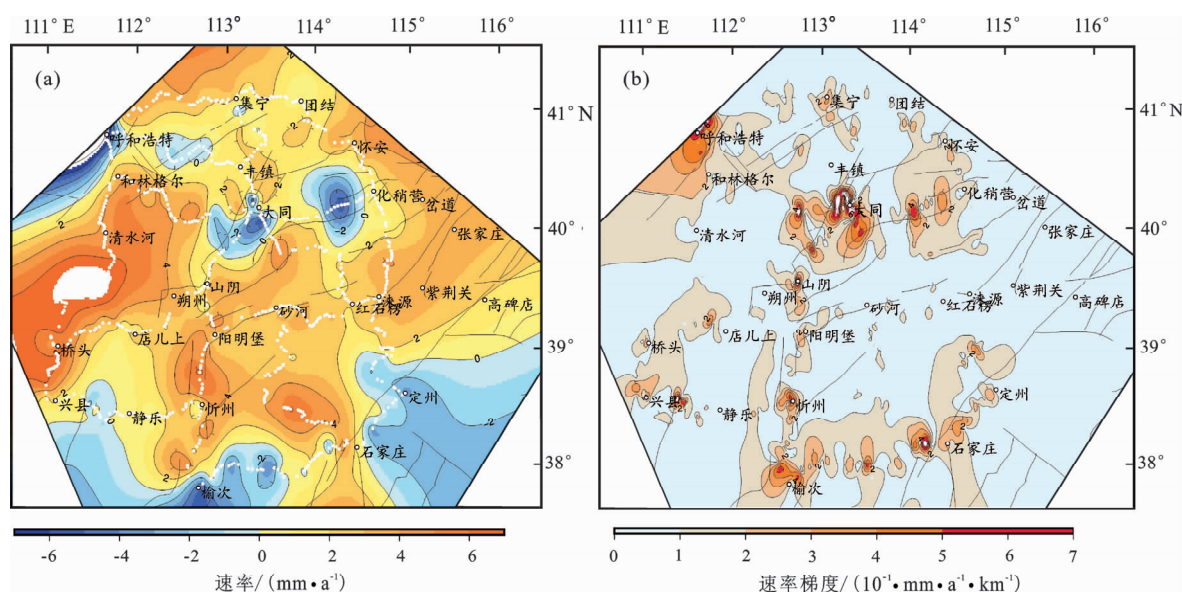


图2 研究区垂直形变速率等值线图(a)与梯度图(b)

Fig. 2 Contour map (a) and gradient map (b) of vertical crustal deformation in the study area

运动表现为拉张伸展减弱,挤压缩短增强。具体结果如下:

(1) 太行断块和吕梁断块表现出大范围差异性隆升。太行断块整体隆升速率  $2 \sim 6 \text{ mm/a}$ , 同时也存在差异性, 其北部速率为  $2 \sim 5 \text{ mm/a}$ , 其南部速率为  $3 \sim 6 \text{ mm/a}$ ; 吕梁断块整体隆升速率为  $2 \sim 8 \text{ mm/a}$ 。王敏(2009)利用自主导出的 62 个 IGS 站的位置与速率为基准, 通过 14 参数的相似变换将处理获得的综合松弛解转换到 IGS05 框架, 由此获得了中国大陆及周边地区 GPS 点的垂直运动速率, 其中分别位于太行断块和吕梁断块的 JB01 和 JB07 的垂直运动速率分别为  $(5.0 \pm 1.9) \text{ mm/a}$  和  $(4.2 \pm 1.6) \text{ mm/a}$ , 与本文结果基本吻合。研究区域受太平洋板块和印度板块相对于亚欧板块的俯冲推挤作用, 深部地幔物质上涌, 造成裂谷体系的断陷带显著下沉, 重力均衡作用下, 也造成两侧地壳形变上升, 形成现今盆山组合的构造样式。

(2) 山西断陷盆地主要表现出下沉特征。其中, 表现为下沉的区域主要有呼包盆地、大同盆地、阳原—蔚县盆地、太原盆地和石家庄—定州所在的华北平原区。呼包盆地的沉降速率为  $-3 \sim -5 \text{ mm/a}$ , 成因是鄂尔多斯地块旋转造成了周缘拉伸走滑, 形成一系列裂陷盆地, 并受不断俯冲推挤的印度板块和太平洋板块的互相作用, 持续下陷。大同盆地沉降年变速率为  $-3 \sim -10 \text{ mm/a}$ , 与瞿伟等(2013)利用区域内 GPS 数据解算得出的  $-10.8 \text{ mm/a}$  的下沉速率吻合, 阳原—蔚县盆地沉降速率为  $-3 \sim -8 \text{ mm/a}$ , 太原盆地沉降速率为  $-2 \sim -6 \text{ mm/a}$ , 总体特征与地质背景一致。受整体性的拉张运动影响, 由多个盆地构成的山西断陷带垂直形变呈现出晚第四纪以来的继承性下沉运动。并且, 全新世的沉降速率大于历史各期, 其量值为  $1 \sim 3 \text{ mm/a}$  (武烈等, 1993)。这一特征与地球物理资料所揭示的断陷盆地深部地幔物质上涌造成莫霍面局部上隆的结果一致(吴乾蕃等, 1991; 张崇立, 1993; 陈兆辉等, 2018)。盆地周缘布设的多处跨断层短水准测量也显示出断陷盆地下沉运动(李腊月等, 2014)。忻定盆地表现为隆升特征, 上升速率为  $2 \sim 5 \text{ mm/a}$ , 表现出了异于地质背景的特点, 原因有待分析。另外, 断陷盆地和华北平原区人口密度高, 人类活动过多抽取地下水也加剧了地面沉降。

(3) 汶川地震前后两期资料显示, 区域地壳运动整体表现为拉张伸展减弱, 挤压缩短增强。1985—2006 年 2 期水准测量结果显示吕梁断块的隆升速率为  $1 \sim 3 \text{ mm/a}$ , 中部断陷盆地的沉降下陷速率为  $-4 \sim -20 \text{ mm/a}$ , 太行断块具有差异性隆升和下降特点(塔拉等, 2014), 显示区域整体性拉张运动强烈。最新 2 期资料结果显示盆地沉降速率减小, 伸展运动放缓, 断块山地隆升速率上升, 挤压运动增强。汶川地震前后的 GPS 结果也显示震前区域地壳形变以拉张为主, 震后伸展运动减弱、缩短增强。可见汶川地震后, 受到大规模地球动力学变化影响, 鄂尔多斯地块与华北平原相对挤压和剪切运动增强, 导致山西地区地壳形变演化表现为拉张减弱、挤压增强。

(4) 在研究区域北部的大同一化稍营、呼和浩特附近和南部的榆次—石家庄一带, 存在地壳垂直形变速率的高梯度带(图 2b)。由大面积水准计算得出的形变高梯度带在指示 7 级以上强震发生区域上, 具有历史有效性, 应重点关注该区域中强震地震危险性。

### 3 讨论

受印度板块北东向应力和太平洋板块北西—西向应力叠加作用影响, 地球内部的热能改变了物质的相态, 并破坏地球内部的重力均衡, 从而引发上地幔的底辟和对流运动, 造成了盆地伸张让位, 山脉随盆地发育而上隆, 两大构造应力对华北盆地区地壳的隆起与凹陷的塑造起重要作用(武烈等, 1993; 张学民等, 2012)。关于山西断陷带盆地和两侧断块的深部动力学形成机制, 有过许多研究(张崇立, 1993; 王秀文等, 2010; 塔拉等, 2014)。笔者认为山西地区东部受到太平洋板块向亚欧板块的俯冲, 深部热物质上升导致伸展, 西部受到印度板块向亚欧板块的拼合推挤, 二者的共同作用使得刚性的鄂尔多斯断块发生旋转, 断块周缘一系列深大断裂形成。随着构造运动持续, 以深大断裂为中心开始发育断陷盆地, 同构造运动下两侧断块山地开始隆升, 同时受南北两端横向的秦岭构造带和燕山构造带的牵制作用, 断陷带呈现出“S”型展布。断陷裂谷带形成后, 地壳重力均衡状态被打破, 深部板块俯冲形成的地幔热物质沿构造薄弱的断裂带上拱, 断陷

作用和两侧断块隆升的差异性运动继续加强,并在全新世后更加显著。山西中北部地区现今断陷带盆地下沉和太行断块、吕梁断块隆升,均为继承性运动,应为上述地球动力学背景下的结果。

地震的孕育、发生和发展过程中,由于地壳深部构造的复杂性和介质的不均一性,会在某些区域出现明显的形变异常,同时震前一定范围内或某些特殊部位也会出现垂直形变的显著异常变化(张祖胜等,1996;薄万举等,1998)。大同一阳高6.1级地震前研究区垂直形变特征显示地壳垂直形变速率加大,特别是盆山交界地带或者与横向构造带交汇部位出现形变量增大的现象,说明边界断裂的构造活动增强,同时垂直形变速率等值线的方向性和梯度带明显,四象限特征突出(王秀文等,2010)。1998年张北6.2级地震前,区域内出现垂直形变条带。山西及邻近地区在经历了大同一阳高2次中强震后,区域垂直形变出现了明显大面积升降变化,受区域构造控制作用明显,升降变化交界部位往往形成梯度带,说明时段内地壳差异运动显著,是构造应力加强和集中的反映(李腊月等,2014)。据震例统计,如忻定盆地和临汾盆地内分别发生过3次7级以上和2次8级地震,山西地区中强震多发生在活动断陷沉降区,隆升区相对较少,说明中强震的发生明显受北东向断陷带的活动断裂控制,也与盆地深部地幔物质上涌造成的沉降活动存在联系。通过汶川地震前后的2期资料结果可知,区域地壳垂直形变整体发生构造运动改变,震前区域地壳运动表现为显著拉张特点,震后张性减弱,压性增强。综合可知,区域中强震前的地壳垂直形变特征主要表现为特殊区域地壳垂直形变速率加大,出现垂直形变高梯度带和垂直形变速率四象限分布;发震位置多位于断陷盆地和横向隆起构造带的交汇区域、盆山交界差异垂直运动强烈区域以及受地幔物质上拱引发的强烈沉降区域。

在地震预测研究中,利用大面积精密水准资料得出的地壳形变梯度带分析7级以上强震发震地点具有一定准确性(张祖胜等,1996)。通过震例分析发现,强震基本上都发生在区域形变速率图和梯度图上所显示的曲线密集、梯度较高的地区。由最新水准资料分析可知,大同一化稍营、呼和浩特和榆次—石家庄一带区域存在地壳垂直形变高梯度带,对未来7级以上地震有重要指示意义。

利用GPS数据进行数值模拟分析,结果显示汶川地震后山西地区的构造应力场显示出较大转变,有利于局部应力和能量积累,存在区域强震孕育、发生的可能(刘峡等,2013)。张希等(2013)利用GPS水平运动速度场资料,借助负位错反演,研究了全国主要构造区的能量积累闭锁段,得出山西北部晋冀蒙交界区域应变积累显著,存在强震危险性背景。利用综合物探方法对山西地区的地壳结构和强震时的地球物理场特征进行了研究,得出山西隆起区莫霍面平均深度40 km,康氏面平均深度26 km,在太行山西侧存在南北走向的重力梯度带,未来具备强震发生的有利条件(武烈等,1993)。

## 4 结论

本文利用山西中北部地区2006期和2015期一等精密水准测量资料,利用经典动态平差方法,对区域地壳垂直运动变化特征进行了研究,并探讨了汶川地震对区域地壳形变场的影响。结果表明:

(1) 山西中北部地区整体表现为断块山地隆升,裂陷盆地下沉的特点。吕梁断块和太行断块表现为继承性的隆升,局部存在差异性。前者活动速率为2~8 mm/a,后者活动速率为2~6 mm/a;山西断陷带的系列盆地表现出相对下沉,沉降速率为-3~-10 mm/a;

(2) 汶川地震前后,区域地壳垂直运动形变场发生了变化。震前区域地壳运动表现为显著拉张特点,震后张性减弱,压性增强;

(3) 大同一化稍营、呼和浩特和榆次—石家庄一带存在地壳垂直形变高梯度带,中长期尺度上存在地震危险性背景。

## 参考文献:

- 薄万举,谢觉民,郭良迁. 1998. 八宝山断裂带形变分析与探讨[J]. 地震,18(1):63-68.
- 陈兆辉,王椿镛,楼海. 2018. 鄂尔多斯地块地壳上地幔速度结构及构造意义[J]. 科学通报,63(3):327-339.
- 邓起东,张培震,冉勇康,等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学:地球科学,32(12):1020-1030.
- 黄立人,匡绍君. 2000. 论地面垂直变形监测中应用GPS技术的可能性[J]. 大地测量与地球动力学,20(1):30-37.
- 李腊月,许明元,何庆龙,等. 2014. 山西断裂带断层现今活动特征及与中强震关系浅析[J]. 地震,34(4):143-151.

- 刘峡,马瑾,占伟,等. 2013. 汶川地震前后山西断陷带的地壳运动[J]. 大地测量与地球动力学,33(3):5-10.
- 苏建锋,薄万举. 2016. 高噪声背景下 GNSS 垂向分量应用探讨[J]. 地震,36(1):105-116.
- 孙启凯,池国民,徐东卓. 2017a. 首都圈地区地壳垂直形变特征及剖面分析[J]. 大地测量与地球动力学,37(5):497-501.
- 孙启凯,池国民,畅柳,等. 2017b. 辽宁地区地壳垂直形变特征与地震危险性分析[J]. 地震学报,39(6):891-898,975.
- 塔拉,陈阜超,周海涛,等. 2014. 山西地区现代地壳垂直运动研究[J]. 大地测量与地球动力学,34(1):32-37.
- 王敏. 2009. GPS 观测结果的精化分析与中国大陆现今地壳形变场研究[D]. 北京:中国地震局地质研究所.
- 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.
- 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.
- 吴乾蕃,廉雨方,祖金华,等. 1991. 山西断陷带地热研究[J]. 科学通报,36(7):532-534.
- 武烈,贾宝卿,赵学普. 1993. 山西地震[M]. 北京:地震出版社.
- 徐东卓,焦守涛,朱传宝,等. 2017a. 芦山  $M_s 7.0$  地震前龙门山断裂带西南段区域形变特征分析及发震模型探讨[J]. 地质学报,91(10):2175-2184.
- 徐东卓,尹海权,朱传宝,等. 2017b. 九寨沟 7.0 级地震前后地壳形变时空演化特征及相关问题的讨论[J]. 中国地震,33(4):549-562.
- 瞿伟,张勤,李振洪,等. 2013. 山西清徐地震缝构造活动参数反演[J]. 武汉大学学报(信息科学版),38(4):421-425.
- 张崇立. 1993. 山西断陷带垂直形变特征及其成因初探[J]. 中国地震,9(4):41-47.
- 张淑亮,刘瑞春,王霞. 2017. 汶川地震前后太原盆地应力场变化特征研究[J]. 中国地震,33(1):46-55.
- 张希,郝明,贾鹏,等. 2013. 全国主要构造区 GPS 水平运动负位错反演与应变积累特性[J]. 地震研究,36(1):1-8.
- 张学民,杨文采,赵大鹏,等. 2012. 太行山构造带及其以东地区上地幔地震层析成像[J]. 地质学报,86(3):371-382.
- 张祖胜,杨国华,薄万举,等. 1996. 地壳垂直形变速率梯度、断层形变速率变化与强震危险区研究[J]. 中国地震,12(4):347-357.

## Temporal and Spatial Evolution Characteristics of Crust Vertical Deformation and Its Relationship with Strong Earthquakes in Central and Northern Shanxi

XU Dongzhuo<sup>1</sup>, ZHU Chuanbao<sup>2</sup>, MENG Xiangang<sup>1</sup>, YIN Haiquan<sup>1</sup>, SUN Feifei<sup>2</sup>

(1. The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China)

(2. Institute of Geology and Mineral Exploration of Qinghai Province, Xining 810029, Qinghai, China)

### Abstract

Based on two periods of 2006 and 2015 first-order leveling data in central and northern Shanxi, the temporal and spatial evolution characteristics of the crustal vertical deformation was studied by using the classical dynamic adjustment method. The conclusions are as follows: ① The recent overall performance in central and northern Shanxi shows uplift in the mountainous region and the subsidence in basins, which were mainly based on the inheritance movement, accompanied by differential movement. The Lvliang block and Taihang block are uplifting, with the rate of 2~8 mm/a and 2~6 mm/a, respectively. The basins in the Shanxi fault depression zone show relative subsidence and the rate is -3~-10 mm/a. ② Before and after the Wenchuan earthquake, the crustal movement in the study area changed. Before the earthquake, the regional crustal movement was characterized by tension, and after the earthquake the tension became weaken and the extrusion enhanced. ③ There is a high gradient zone of vertical crustal deformation in the Datong-Huashaoying, Huhehaote and Yuci-Shijiazhuang region, and it shows a seismic risk background in medium and long term.

**Keywords:** Shanxi central and northern region; precision leveling; crustal vertical deformation; seismic risk