

刘瑞春, 荆红亮, 2015. 临汾水准巨幅形变的位错理论模拟与异常性质判定. 震灾防御技术, 10 (2): 397—404.  
doi: 10.11899/zzfy20150220

# 临汾水准巨幅形变的位错理论模拟 与异常性质判定<sup>1</sup>

刘瑞春<sup>1, 2)</sup> 荆红亮<sup>3)</sup>

1) 山西省地震局预报中心, 太原 030021

2) 太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站, 太原 030021

3) 临汾中心地震台, 临汾 041000

**摘要** 在假设临汾台水准出现 2 次巨幅形变异常为断裂错动的情况下, 笔者基于矩形断层位错模型模拟了罗云山断裂(土门-峪里段)错动所引起的垂直形变场分布, 并通过 D-InSAR 技术对研究区域内的地面形变场进行了实测。分析结果表明: ①从理论上讲, 罗云山断裂(土门-峪里段)错动是可以产生长轴与断裂走向平行的椭圆状变形区域, 其中, 位于断裂上盘的区域中心变形量最大, 变形量向外围逐渐衰减为零; 2 次错动导致的变形波及范围分别约为长轴 18km 和 26km, 短轴 12km 和 17km; 显著变形幅度分别约为 1—3mm 和 4—14mm。②而同期 D-InSAR 实测形变场显示, 临汾台水准出现 2 次巨幅异常期间, 研究区域内未发现与断裂走向一致连续变形区域, 仅在盆地内部存在可能由于过量开采地下水所导致的地面沉降, 其变形范围约为 10—12mm 和 1—5mm。③实测形变场与理论形变场在变形区域和变形幅度上均不一致, 说明断裂活动不是临汾台水准出现 2 次巨幅形变的主要原因, 可能为断裂上盘的土层点局部变形所致。④通过断层位错模型的理论模拟与 D-InSAR 技术的实际监测相结合, 可以有效地确定临汾台跨断层水准出现的 2 次巨幅形变异常的性质, 可为重大水准异常的核实提供科学依据。

**关键词:** 临汾水准 巨幅形变 断层位错模型 D-InSAR 异常性质判定

## 引言

临汾地震台水准自观测以来, 跨罗云山断裂的 2—3 测线在近 15 年年均变化约 5mm 的背景下, 于 2009 年 7 月至 2010 年 2 月接连出现 2 次巨幅变化, 其变化幅度分别达到 18.5mm 和 114.1mm。巨幅形变异常在我国的地震预报实践中并不少见, 对于巨幅形变异常与地震关系的研究, 很多研究者都做过不同方面的探索。例如: 杨志荣(1987)和李忠华等(1998)通过研究发现, 巨幅形变与强震关系密切, 并通过异常的性质判定给出了较为准确的地震预测意见; 而苏琴等(2009)和朱航等(2010)则通过多种观测方法的对比及数值模拟后认为, 巨幅形变异常的原因为局部干扰, 其与随后发生的强震无关。特别备受关注的, 薄万举等

1 基金项目 山西省科技攻关计划项目(20140313023-1); 地震行业科研专项“中国综合地球物理场观测——鄂尔多斯地块周缘地区”(201208009-14); 山西省青年科技研究基金(2011021024-1)

[收稿日期] 2014-05-26

[作者简介] 刘瑞春, 男, 生于 1982 年。2007 年获硕士学位, 工程师。现主要从事地震地壳形变方面的研究。  
E-mail: 24547716@qq.com

(2001)通过总结以往多次巨幅形变异常与强震之间的关系后认为,即便巨幅形变事件在存在干扰的情况下,在其之后仍有强震发生的可能,因此,巨幅形变事件具有预测强震发生的特殊价值,不能简单地归结为一般的干扰所引起。

Okada (1985; 1992)在总结位错理论的基础上,给出了在各向同性的半空间均匀介质中,任意倾角的矩形位错面以任意方向的常位错分布而产生的地表以及地球内部位移场的通用表达式,使矩形断层均匀位错模型达到了比较完善的程度。此后,Okada 模型得到了广泛的应用,无论是对地震的同震变形正反演研究,还是对非震变形研究,Okada 模型均可对传统地球物理学测量所获得的近场及远场数据给出较为满意的解释。上世纪 90 年代前,由于缺乏监测大区域地壳形变的手段,Okada 模型的应用主要集中在对同震变形的模拟(陈运泰等,1975; 1979)。但随着 GPS、InSAR 等空间大地测量技术的成功应用,对大尺度、高精度的区域地壳形变场的监测已成为可能,断层活动与地面形变场的关系有了实验观测的依据,位错理论在模拟断层活动与地面形变场的关系中也得到了很大的发展(Heki 等,1997; 申重阳等,2002; 张永志等,2006)。尤其是基于断层位错模型可以模拟并研究断层错动的重力和形变效应的特殊图象特征,有助于从观测资料中提取断层活动引起的重力变化和形变信息(白志明等,1999; 张永志等,2004),这为地震前兆异常性质的判定提供了重要的依据。

本文在假设临汾水准巨幅形变异常由断裂错动引起的假设下,结合异常观测数据以及相关断裂要素,采用断层位错模型对断裂错动所导致的区域地面形变分布进行了正演计算,并将所得结果与区域同期 D-InSAR 监测结果进行了对比分析,判定了临汾水准巨幅形变异常的性质。

## 1 有限矩形位错模型的表达式

该模型假设断层活动段为在弹性介质半空间( $Z \leq 0$ )的一个矩形位错源,其活动的几何参数  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  分别表示断层上盘相对下盘的走滑、倾滑和拉张分量; $L$ 、 $W$ 、 $d$  分别表示断层的长、宽和下盘面深度; $\alpha$ 、 $\delta$  分别为断层的走向和倾角,具体如图 1 所示。图中断层的下盘用以下方式表示:即以地面断层走向为  $x$  轴,地面的垂线方向为  $z$  轴,在不考虑地球曲率的前提下,以地球表面为弹性半空间的边界面, $Z \leq 0$  为弹性体, $x$  方向平行于断层走向, $z$  轴垂直于地表, $y$  轴与  $x$ 、 $z$  轴构成右手坐标系。

根据上述断层位错模型,矩形断层的走滑、倾滑以及拉张运动引起的地面位移场在垂直轴方向的分量,可通过断层面上的位移分量表示为(Okada, 1985):

$$u'_z = -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{d}q}{R(R+\eta)} + \frac{q \sin \delta}{R+\eta} + I_1 \sin \delta \right] \quad (1)$$

$$u''_z = -\frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{d}q}{R(R+\xi)} + \sin \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} + I_2 \sin \delta \cos \delta \right] \quad (2)$$

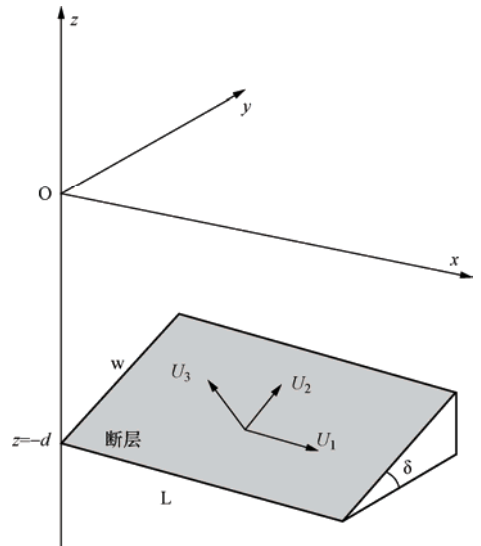


图 1 断层位错模型示意图

Fig. 1 Sketch of fault dislocation model

$$u_z''' = \frac{U_3}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{y}q}{R(R+\xi)} + \cos\delta \left\{ \frac{\xi q}{R(R+\eta)} - \tan^{-1} \frac{\xi\eta}{qR} \right\} - I_2 \sin^2 \delta \right] \quad (3)$$

式中符号“||”为函数替代符号, 其定义为:

$$\begin{aligned} f(\xi, \eta) &= f(x, p) - f(x, p-W) - f(x-L, p) + f(x-L, p-W) \\ I_1 &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{\cos\delta} [\ln(R+\tilde{d}) - \sin\delta \ln(R+\eta)] \\ I_2 &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{2}{\cos\delta} \tan^{-1} \frac{\eta(x+q\cos\delta) + x(R+x)\sin\delta}{\xi(R+x)\cos\delta} \end{aligned} \quad (4)$$

当  $\cos\delta=0$  时,

$$\begin{aligned} I_1 &= -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{q}{R+\tilde{d}} \\ I_2 &= -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{\xi \sin\delta}{R+\tilde{d}} \end{aligned} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} p &= y\cos\delta + d\sin\delta \\ q &= y\sin\delta - q\sin\delta \\ \tilde{y} &= \eta\cos\delta + q\sin\delta \\ \tilde{d} &= \eta\sin\delta - q\cos\delta \\ R^2 &= \xi^2 + \eta^2 + q^2 = \xi^2 + \tilde{y}^2 + \tilde{d}^2 \\ x^2 &= \xi^2 + q^2 \end{aligned}$$

式中,  $\lambda, \mu$  为拉梅常数;  $\tilde{x}, \tilde{y}$  为地面变形点在局部坐标系中的坐标;  $\xi, \eta$  为断层面上质点在局部坐标系中的坐标。

这样, 断层的三维运动在地面局部断层坐标系中的垂直位移场可表示为:

$$u = u_z' + u_z'' + u_z''' \quad (6)$$

## 2 罗云山断裂(土门-峪里段)错动引起的地表形变

临汾台水准观测场地位于临汾盆地西缘, 其监测的断裂为罗云山断裂的土门-峪里段。土门-峪里段延伸长度约 18km, 断面倾角约 70°, 走向 N30°E, 倾向 SE; 该段断裂的东盘下降, 西盘上升, 表现为正断层。区内出露的基岩为奥陶系中统马家河组灰岩, 覆盖层为第四系上更新统松散洪积堆积物。该段在中更新世末至晚更新世初, 以及晚更新世末至全新世初均发生过强烈活动, 全新世晚期以来断裂仍在活动, 以蠕滑运动为主, 它是罗云山断裂中最活动的一段(王挺梅等, 1993)。

临汾台水准测线共有 3 个测段, 4 个水准点。埋设于断层下盘的水准点 BM1、BM2 为普通基岩标石; 埋设于断层上盘的水准点 BM3 和 BM4 为土层标石。2009—2010 年, 跨断裂的 2—3 测线接连出现 2 次巨幅异常变化, 如图 2 所示。第 1 次巨幅异常变化的幅度约 18.5mm, 持续了 28 天; 第 2 次巨幅异常变化的幅度约 114.1mm, 持续时间 45 天。

笔者采用断层位错模型对罗云山断裂(土门-峪里段)活动所产生的地面形变场进行模拟, 选取这 2 次巨幅变化量作为断裂活动的倾滑分量, 并假设走滑和拉张分量固定为零。利用李

自红等 (2014) 给出的地质与地球物理研究结果, 笔者得出了断层位错模型的参数, 具体如下表 1 所示; 图 3 为利用断层位错模型模拟的垂直形变场结果。

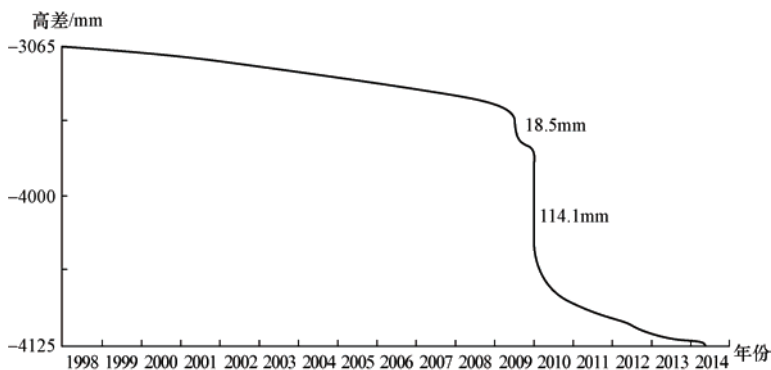


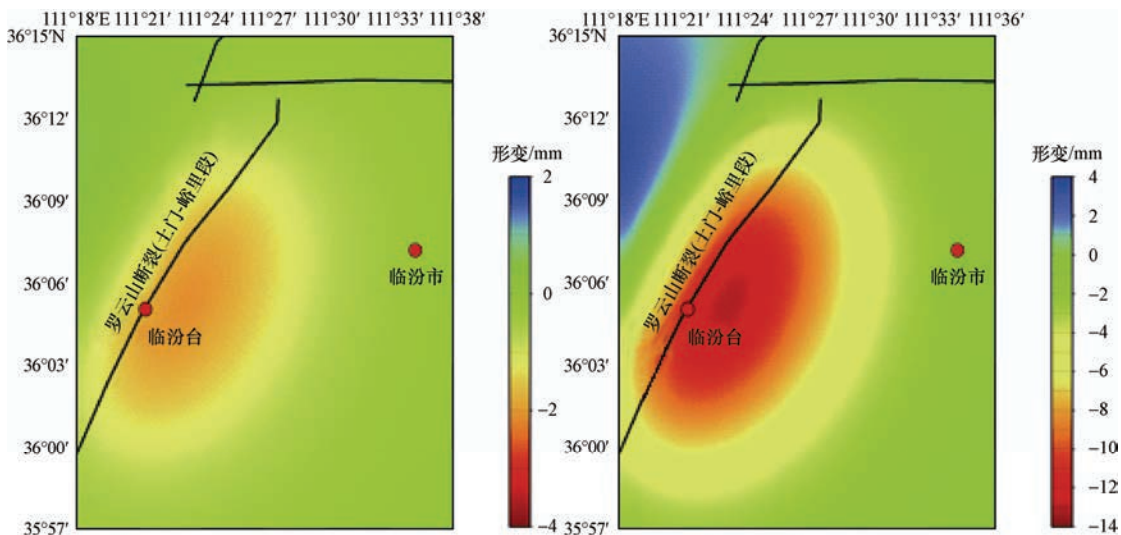
图 2 临汾水准 2—3 测线高差曲线

Fig. 2 Height difference curve of Linfen leveling along "2-3" measuring line

表 1 罗云山断裂 (土门-峪里段) 模型参数选取表

Table 1 Model parameters used for Luoyunshan fault (Tumen-Yuli section)

东经 (°)	北纬 (°)	走滑 $U_1$ /mm	倾滑 $U_2$ /mm	拉张 $U_3$ /mm	长度 $L$ /km	宽度 $W$ /km	深度 $D$ /km	走向 $\alpha$ /°	倾角 $\delta$ /°
111.319	36.026	0	-18.5	0	18	6	15	60	70
111.319	36.026	0	-114.1	0	18	6	15	60	70



(a) 第 1 次错动的理论地面垂直形变场

(b) 第 2 次错动的理论地面垂直形变场

图 3 断层位错模型模拟的罗云山断裂 (土门-峪里段) 垂直形变场结果

Fig.3 Simulation results of Luoyunshan fault(Tumen-Yuli section)

movement computed by the dislocation model

从图 3 可以看出,从理论上讲罗云山断裂(土门-峪里段)错动是可以产生长轴与断裂走向平行的椭圆状变形区域,其中,位于断裂上盘的区域中心变形量最大,且变形量向外围逐渐衰减为零。断裂的第 1 次错动可导致长轴约 18km、短轴约 12km 的变形区域,其显著变形范围约 1—3mm;断裂的第 2 次错动可导致长轴约 26km、短轴约 17km 的变形区域,其显著变形范围约 4—14mm。

### 3 临汾盆地同期 D-InSAR 监测结果

为了验证模拟结果与实际观测结果的匹配程度,笔者采用 D-InSAR 技术获取了临汾水准 2 次出现巨幅异常期间区域地面的形变场。

数据处理采用瑞士研发的 GAMMA 软件,以覆盖研究区域的获取时间分别为 2009.02.20、2009.10.23、2010.01.01、2010.03.12 的 04 景 ENVISAT ASAR 影像作为输入数据,分别将 2009.02.20 和 2009.10.23 以及 2010.01.01 和 2010.03.12 的影像组成干涉对进行两轨法 D-InSAR 处理,两个干涉对的垂直基线分别为 76m 和 77m,满足形变提取的要求,其主要研究区域的相干系数均在 0.8 以上,因此可获得较为靠的形变结果。同时在处理过程中,外部 DEM 使用美国宇航局(NASA)发布的 SRTM v4.1 免费 DEM,多视因子为 2:10。

图 4 是 2009.02.20—2009.10.23 干涉对的结果,图中给出了临汾水准第 1 次巨幅变化期间的区域形变场;图 5 是 2010.01.01—2010.03.12 干涉对的结果,图中给出了临汾水准第 2 次巨幅变化期间的区域形变场。

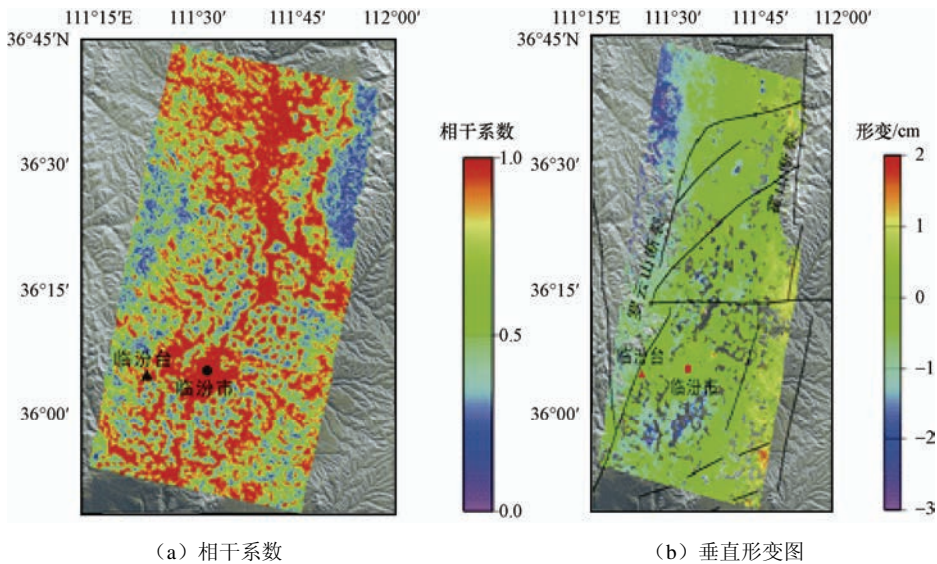


图 4 2009.02.20—2009.10.23 干涉对处理结果

Fig.4 Processing results of interference image pair (2009.02.20—2009.10.23)

从图 4 可以看出,在临汾台水准第 1 次出现巨幅形变异常期间,沿罗云山断裂(土门-峪里段)无明显形变,在临汾市区的南部有一个 10—12mm 的变形区域,其展布方向为近东西向。据笔者调查,该形变区域位于临汾盆地内部第四系覆盖层上,该区域内无活动断裂分布,但分布有众多的厂矿,可能是由于两幅影像间隔时间近 8 个月,观测到了地下水过量开



采所导致的大范围地面沉降。

从图 5 可以看出, 在临汾台水准出现第 2 次巨幅形变异常期间, 在盆地内部分布有众多幅度约 1—5mm 的变形区域, 这些变形区域范围较小、空间分布不连续, 可能是由于两幅影像间隔时间仅有两个月, 观测到了地下水开采所导致的小范围的沉降漏斗。

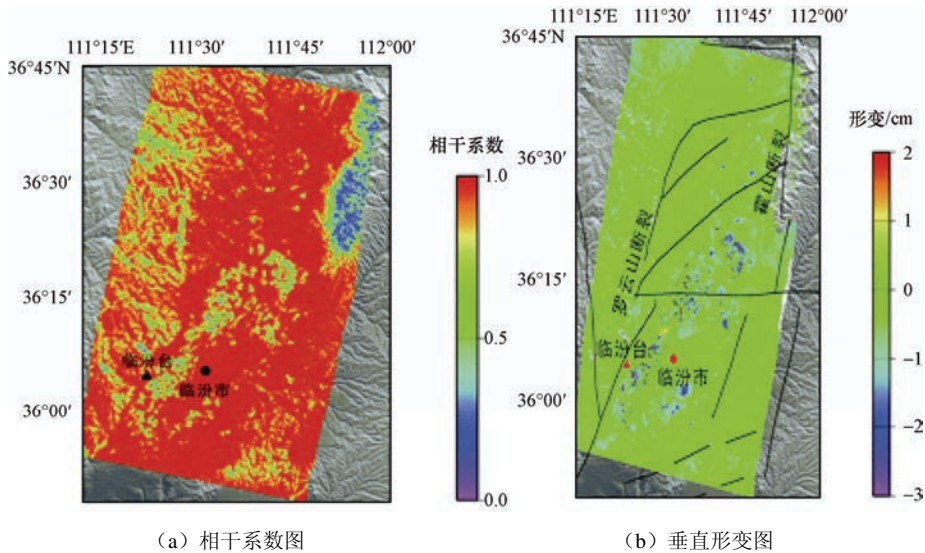


图 5 2010.01.01—2010.03.12 干涉对处理结果

Fig.5 Processing results of interference image pair (2010.01.01—2010.03.12)

## 4 结论与认识

本文以临汾台水准出现 2 次巨幅形变异常期间的观测数据为约束, 通过断层位错模型模拟了罗云山断裂(土门-峪里段)错动所导致的地面垂直形变场, 并利用 D-InSAR 技术获得了实际的干涉对结果。通过地面垂直形变场与实际干涉对结果的对比分析, 笔者获得了以下结论和认识。

(1) 从理论上讲, 罗云山断裂(土门-峪里段)错动是可以产生长轴与断裂走向平行的椭圆状变形区域, 其中, 位于断裂上盘的区域中心变形量最大, 变形量向外围逐渐衰减为零; 2 次错动所导致的变形波及范围分别约为长轴 18km 和 26km, 短轴 12km 和 17km; 显著变形范围分别约为 1—3mm 和 4—14mm。而同期 D-InSAR 实测结果显示, 区域内未发现与断裂走向一致连续变形区域, 仅在盆地内部存在过量开采地下水所导致的地面沉降, 变形幅度约为 10—12mm 和 1—5mm。

(2) 实测形变场与理论形变场在变形范围和变形幅度上均不一致, 说明断裂活动不是临汾台水准 2 次出现巨幅形变的主要原因, 可能为断裂上盘的土层点局部变形所致。

(3) 由于临汾台跨断层水准覆盖范围小、且空间分辨率低, 所以临汾台水准出现 2 次巨幅形变异常时还难以确定其是否与断裂活动有关。而通过断层位错模型的理论模拟和 D-InSAR 技术的实测相结合, 可以有效地确定临汾台跨断层水准出现的 2 次巨幅形变异常的性质, 可为重大水准异常核实提供科学依据。

## 参考文献

- 白志明,王椿镛,申重阳,1999.不同产状断层错动的地表重力变化和形变.地震学报,21(6):634—641.
- 薄万举,华彩虹,2001.地形变强震前兆指标探讨.地震,(1):25—32.
- 陈运泰,林邦慧,林中洋等,1975.根据地面形变的观测研究1966年邢台地震的震源过程.地球物理学报,18(3):164—180.
- 陈运泰,黄立人,林邦慧等,1979.用大地测量资料反演的1976年唐山地震的位错模式.地球物理学报,22(3):201—217.
- 李忠华,苏有锦等,1998.丽江7.0级地震滇西实验场区跨断层短基线短水准测量的变化特征.中国地震,14(2):140—149.
- 李自红,刘保金,袁洪克等,2014.临汾盆地地壳精细结构和构造——地震反射剖面结果.地球物理学报,57(5):1487—1497.
- 申重阳,王琪,吴云等,2002.川滇菱形块体主要边界运动模型GPS数据反演研究.地球物理学报,2002,45(3):352—361.
- 苏琴,朱航等,2009.耿达短水准异常与汶川8.0级地震.大地测量与地球动力学,(增刊):103—105.
- 王挺梅,郑炳华,李新元等,1993.罗云山山前断裂第四纪活动特征.见:山西临汾地震研究与系统减灾.北京:地震出版社.
- 杨志荣,1987.1987年1月24日新疆乌什6.4级地震前兆异常及其预报.中国地震,13(4):6—12.
- 张永志,王卫东,祝意青等,2004.青藏高原东北侧断层活动引起的地壳三维变形与重力场变化研究.地球学报,25(5):583—586.
- 张永志,王卫东,魏玉明等,2006.利用GPS资料反演祁连山断层的三维滑动速率.大地测量与地球动力学,26(1):31—35.
- 朱航,苏琴等,2010.耿达短水准观测资料在汶川 $M_s$ 8.0地震前后异常的辨别.地震学报,32(6):649—958.
- Heki K., Miyazaki S., Tsuji H.,1997. Silent fault slip following an interplate earthquake at the Japan Trench. Nature, 386: 595—597.
- Okada Y., 1985. Surface Deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bull. Seis. Soc. Am., 82: 1018—1040.
- Okada Y., 1992. Internal Deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bull. Seis. Soc. Am., 82: 1018—1040.

# Simulation by Dislocation Model and Anomaly Property Determination of Huge Leveling Deformation at Linfen Seismostation

Liu Ruichun<sup>1,2)</sup> and Jin Hongliang<sup>3)</sup>

1) Forecasting Center of Earthquake Administration of Shanxi Province, Taiyuan 030021, China

2) Continental Rift Valley Dynamics State Observatory of Taiyuan, Taiyuan 030021, China

3) Linfen Central Seismic Station, Linfen 041000, China

**Abstract** In this paper, supposing the two times of huge leveling deformation anomaly at Linfen seismostation were caused by Luoyunshan fault (Tumen-Yuli section) movement, we computed the vertical deformation field distribution based on rectangular fault dislocation model, meanwhile we monitored the ground deformation field of study area by D-InSAR technology. The results are as follows: (1) Theoretically, the ground vertical deformation field caused by fault movement could be within the elliptical deformation area with the long axis parallel to the fault strike. The largest deformation region locates in the center of the area in the hanging wall of the fault, and the deformation gradually decreases to zero toward the periphery, the two times of movement lead to the different area of effect. The long axes are about 18km and 26km, the short axes are about 12km and 17km, the obvious deformation range is about 1-3mm and 4-14mm. (2) The measured deformation field by D-InSAR shows that there is no continuous deformation area consistent with the fault strike, and only exists land subsidence possibly caused by groundwater excessive exploitation, with the deformation range about 10-12mm and 1-5mm. (3) The measured deformation field is not consistent with the theoretical result in deformation area and amplitude, which indicates that the fault movement is not the main cause of Linfen huge leveling deformation, it may be because of local deformation of the soil mark stone in hanging wall of the fault. (4) By combining the fault dislocation model simulation with the D-InSAR technology measurement, we can determine the anomaly property effectively when the cross fault leveling huge deformation occurs, which can provide scientific basis for the great leveling anomaly verification.

**Key words:** The leveling at Linfen seismostation; Huge deformation; Fault dislocation model; D-InSAR; Anomaly property determination