

# 利用 GPS 技术研究山西跨断裂剖面垂直形变<sup>\*</sup>

秦姗兰, 王文萍, 季灵运, 周琳

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 利用 2009 ~ 2012 年山西 3 个跨断裂综合剖面的 GPS 和水准资料, 分别获取了这 3 个剖面的垂向形变速率。结果表明: 在时间间隔较短 (数月至 1 年左右)、观测时间不同步的情况下, GPS 观测与水准观测获得的垂直形变速率偏差较大; 在观测时间间隔较长 (3 年及以上) 时, 二者之间有较好的一致性, 同时也验证了在较长时间尺度上利用 GPS 技术获取跨断裂综合剖面垂直形变的可行性。

**关键词:** 垂直形变; GPS; 精密水准; 一致性

**中图分类号:** P315.72

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)03-0421-06

## 0 引言

地壳垂直运动观测是地球构造运动研究、地震与火山灾害研究、地面沉降地质灾害研究、全球或区域精密高程基准维护等多项工作的重要基础。对于地表垂直运动的观测, 多年来一直沿用精密水准测量方法, 这是迄今为止精度最高的测量方法, 其垂直位移测量精度可达毫米甚至亚毫米级, 但其作业效率低、劳动强度大的缺陷也同样明显。相对于水准测量, GPS 技术具有全天候、全天时、观测效率高、劳动强度低等优势, 并且能够同时提供地表三维的形变信息。随着全球参考框架精度提高和数据处理技术的发展, GPS 观测被越来越多地应用在地表垂直运动监测研究等方面, 其应用领域涵盖全球或区域地壳长期垂直运动监测研究、地震同震和震后垂直位移监测研究、地面沉降监测研究等。国内外学者在理论上分析了利用 GPS 技术监测地表垂直形变的可行性 (陈永奇, 1989; 黄立人, 匡绍君, 2000; 顾国华, 2005; 董克刚等, 2008), 还有学者进行了实验分析 (张风霜等, 2009; 顾国华, 王武星, 2011; Ahmed *et al.*, 2007; Kuo-En *et al.*, 2011)。前人大量研究结果表明: GPS 垂向观测精度虽较水平分量弱一些, 但对厘米级以上的大变形事件有

比较稳健的监测能力。对于年毫米级变化的区域地壳垂直运动, 利用长时间尺度的连续 GPS 垂直位移时间序列资料, 也可以获得比较可靠的垂直形变 (速率) 结果。与连续 GPS 大量成功应用于地壳垂直运动监测不同, 区域流动 GPS 观测能否应用于正常背景下的构造垂直运动监测, 至今尚无定论。本文在前人研究的基础上, 利用跨断裂带剖面资料研究探讨了 GPS 技术在研究区域地表垂直形变方面的可行性。

## 1 数据来源及处理

### 1.1 数据来源

通过 GPS 和水准观测获取的高程是不同的高程系统, 黄立人和匡绍君 (2000) 通过定量比较站心坐标系下 U 分量变化与水准测得的高差变化, 发现当研究区域不大 (小于 110 km) 时, 可以用站心坐标系下 U 分量的变化来考察 GPS 测定高差变化的精度, 即在研究区域的范围较小时, GPS 和水准测量 2 种手段得到的高程变化可以进行直接比较。在此基础上本文选取了 2009 ~ 2012 年中国地震局第二监测中心在山西断陷带布设的 3 条跨断裂综合观测场地 4 期的 GPS 和一等精密水准观测资料, 观测时间如表 1 所示。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2015-07-03.

**基金项目:** 地震科技星火计划项目——跨断裂综合剖面 GPS-水准垂直形变对比研究 (XH14070Y) 和地震行业科研专项——中国综合地球物理场观测—大华北地区 (201508009) 联合资助。

表 1 研究区水准和 GPS 观测时间  
Tab. 1 The observation times of precise leveling and GPS in the study area

剖面名称	水准观测时间 年-月-日	GPS 观测时间 年-月-日
山阴	2009-07-28~08-07	2009-09-30~10-03
	2010-01-02	2010-02-04~02-07
		2010-10-15~10-16
	2011-04-25~05-05	2011-08-10~08-13
介休	2012-05-04~05-12	2012-10-05~10-08
	2009-07-15~07-25	2009-10-08~10-11
	2010-01-02	2010-01-27~01-31
		2010-10-21~10-22
临汾	2011-04-12~04-22	2011-07-28~07-31
	2012-04-22~05-03	2012-09-27~09-30
	2009-07-03~07-13	2009-10-13~10-17
	2010-01-02	2010-02-01~02-05
		2010-10-24~10-26
	2011-04-12~04-22	2011-08-02~08-05
	2012-04-11~04-20	2012-09-22~09-25

使用 2 种方法观测 3 个场地的共同点点位分布,如图 1 所示,山阴场地(112°44′~112°51′E、39°11′~39°33′N)西北起自山西省山阴县岱岳乡下沙河村,东南止于山西省代县白草乡雁门关陡沟梁村,布设路线西北端跨口泉断裂,东南端跨六棱山前断裂。介休场地(112°00′~111°41′E,36°57′~37°09′N)西北起自山西省孝义市内,东南止于山西省介休市龙凤镇渠池村,路线西北端至中部在孝义至介休的小断裂西侧,中部跨介休东北—西南走向的小断裂,东南端跨太谷断裂。临汾场地西北起自山西省临汾市土门镇西涧北村,东南止于山西省蔚临汾市浮山县张庄乡西佐村。

1.2 数据处理

GPS 观测资料处理采用 GAMIT/GLOBK 软件(Herring *et al*, 2009),解算时加入研究区域周围

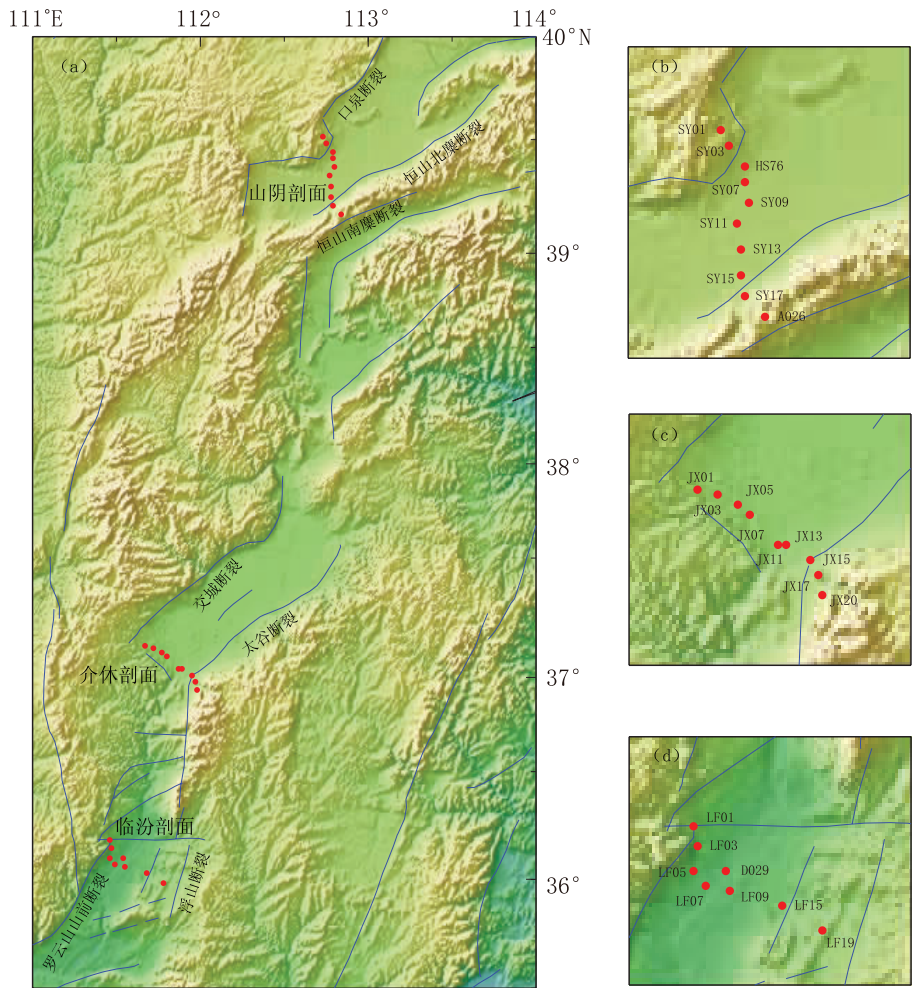


图 1 跨断裂剖面点位分布图 (a)、山阴剖面 (b)、介休剖面 (c) 以及临汾剖面 (d) 示意图  
Fig. 1 Distribution of the points of fault-crossing profile (a), and schetch maps of Shangyin profile (b), Jiexiu profile (c) and Linfen profile (d)

的中国地壳运动观测网络 GPS 连续站以及中国大陆周边的 IGS 站进行联合解算。在数据处理时采用 ELEV 模型对天线相位中心偏差做改正, 消除天线相位中心变化的影响。采用 GPT 模型加马尔科夫随机过程估算 (Ahmed *et al*, 2007) 改正解决 GPS 信号传输过程中大气对流层天顶延迟的影响, 并对每个 GPS 测站点每小时估计 1 个天顶方向对流层延迟参数, 并进行线性插值估算, 投影映射函数采用高程方向应用精度最高的 VMF1 投影映射函数, 以提高垂向的解算精度。在求取各站点相对 ITRF08 参考框架的运动速率后 (Altamimi *et al*, 2011), 采用 GLOBK 软件计算测站点在 ITRF2008 框架下的坐标, 各 GPS 测站点大地高方向的中误差均小于 4 mm, 然后分别计算出每个 GPS 点间隔 1 年、2 年和 3 年的垂向变化量。水准数据是采取往返测观测获取的, 并加入尺长改正和水准面不平行改正, 选取的 3 个跨断裂剖面每千米往返测高

差中误差最大不超过 0.356 mm。随后利用 3 个跨断裂剖面的水准数据计算出同样时间间隔内的垂向变化量。为了方便比较, 处理时选定每条剖面的 01 号监测点为基准, 分别得到其他站点相对于 01 号站点的垂直形变速率, 将两种结果进行比较分析。

## 2 结果分析

山西断陷带由 10 多个大小不等的 NE、NNE 走向的地堑和半地堑式盆地组成, 主要活动断裂既控制了每个盆地的主要边界, 也控制了盆地的发育; 震源机制解结果表明, 山西断陷带南北两端为拉张带, 中部断层活动仍然以拉张型正断层为主, 反映出山西断陷带整体的张性活动。文中 3 个跨断裂剖面分别分布在山西断陷带的南北段及中部, 根据计算结果, 3 个跨断裂剖面反映出的山西断陷带的垂直形变特征如图 2~4 所示。

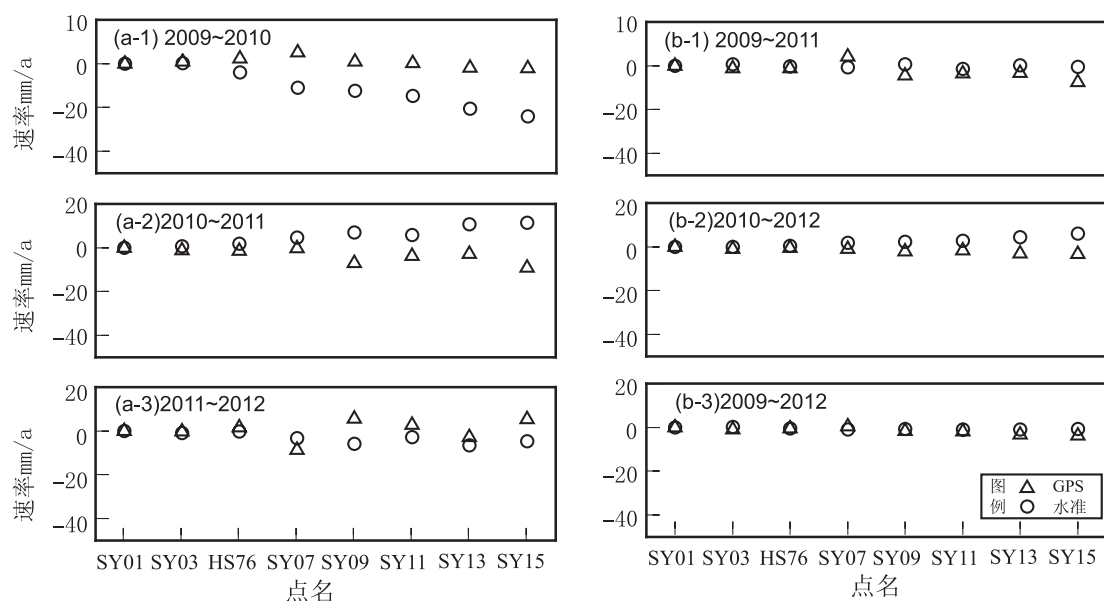


图2 山阴跨断裂剖面2期(a)和多期(b)观测数据的垂向速率对比结果

Fig. 2 Comparison results of vertical deformation velocities of Shangyin fault-crossing profile in two periods (a) and more than two periods (b)

从图2可以看出, 山阴跨断裂剖面两种观测手段1年尺度的对比结果差异相对较大, 尤其是2009~2010年差异尤其大, 但总的运动趋势比较一致, 而间隔2年和3年时间尺度的对比结果吻合较好, 最大差异小于5 mm/a。山阴场地位于山西断陷带的北部, 相对于场地西部山地稳定区域, 整个山阴场地呈逐年下沉的趋势, 随着观测周期

的增长, 下沉量变大, 其中恒山北麓断裂两侧下沉量比较大, 这也反映出该区域总体表现出右旋拉张断陷运动的特点。

根据图3可以看出, 介休跨断裂剖面的GPS和水准对比结果在间隔2年时间尺度和3年时间尺度上均显示出了较好的趋势一致性, 但间隔3年时间尺度的相关性更高, 总体差异更小。间隔1年尺

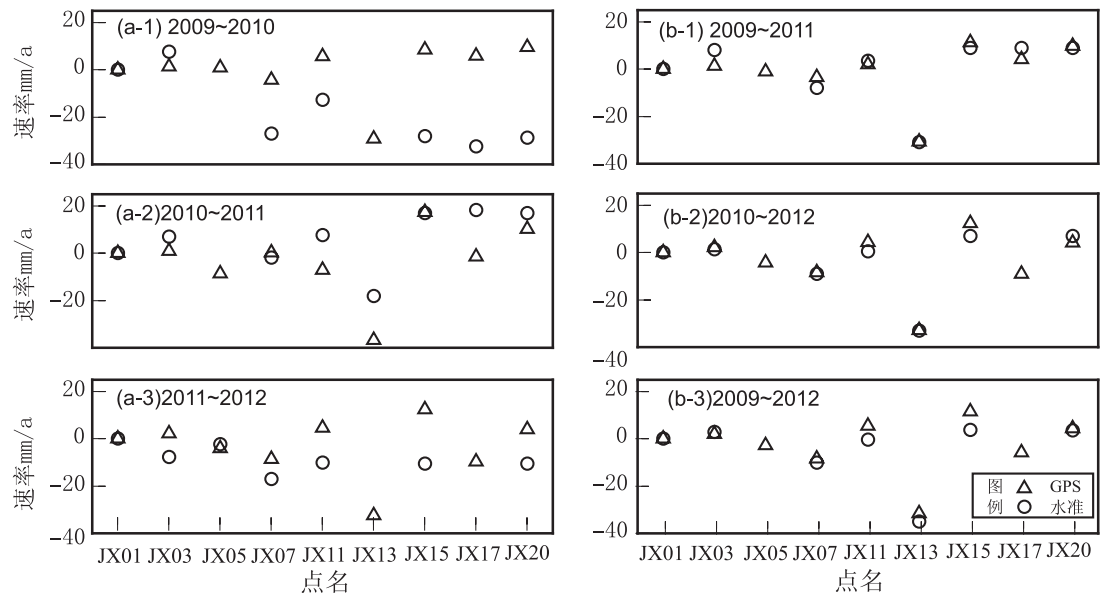


图3 介休跨断裂剖面两期 (a) 和多期 (b) 观测数据的垂向速率对比结果  
Fig. 3 Comparison results of vertical deformation velocities of Jiexiu fault-crossing profile in two years (a) and more than two years (b)

度差异性较大, 其中 JX15 在 2009 ~ 2010 年与 2011 ~ 2012 年时间段、JX17 在 2009 ~ 2010 年和 2010 ~ 2011 年时间段均表现出较大的差异性。介休场地位于山西断陷带中部太原盆地内, 太原盆地南以灵石隆起与临汾盆地相邻, 北以石岭关隆起与忻定盆地相连, 夹在位于东南的太行山与西北部的吕梁山之间, 历史上发生过 3 次大于 6 级的地震,

垂直差异运动强烈, 是山西断陷带沉积厚度最大的盆地。介休场地位于内部点相对于两侧稳定块体呈下沉趋势, 且沉降量具有随时间周期增大而逐渐增大的特点, 场地边缘区域的沉降量最大, 最大可达到 37 mm, 整体上和 GPS 速率剖面在区域反映出的拉张性质相吻合。

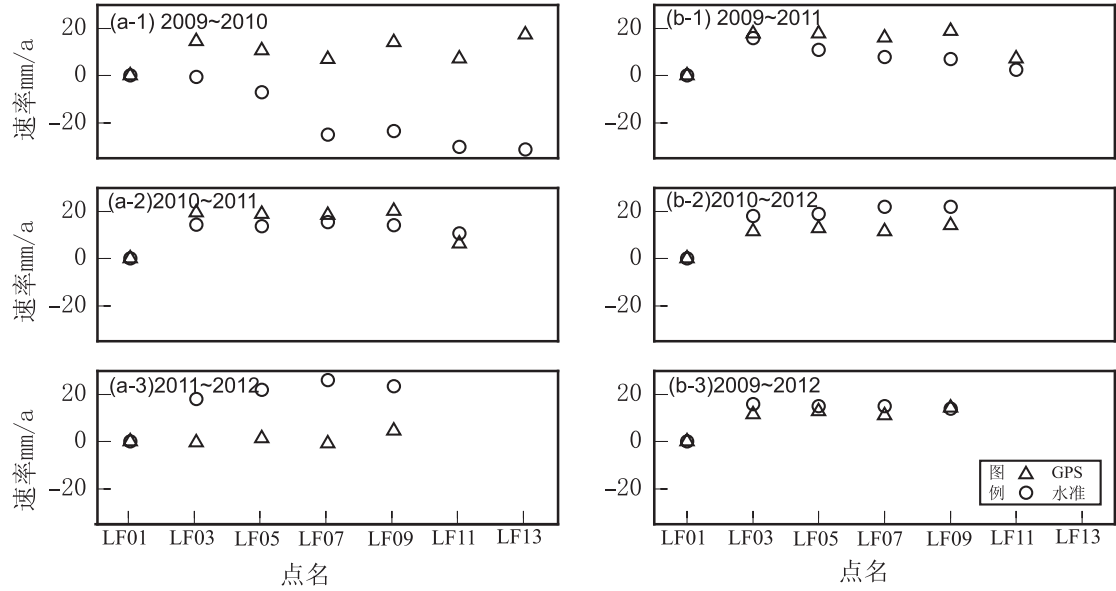


图4 临汾跨断裂剖面2期 (a) 和多期 (b) 观测数据的垂向速率对比结果  
Fig. 4 Comparison results of vertical deformation velocities of Linfen fault-crossing profile in two years (a) and more than two years (b)

从图4可以看出,临汾跨断裂剖面在1年时间尺度的对比结果较差,其中2009~2010年两种手段对比结果在整体趋势上存在差异,而2009~2012年较长时间尺度的观测结果比较一致,差异也较小,最大不超过4 mm/a。临汾场地位于山西断陷带的南端,临汾盆地南以峨嵋台地与运城盆地相邻,北以灵石隆起与太原盆地相隔,东、西分别以大断裂与浮山、罗云山相邻,是山西断陷带地震活动最强烈的地区。介休场地内的点呈现整体下沉趋势,西边的点相对于东部的点沉降量明显增大,而且表现出随时间周期增大沉降量逐渐增大的特点。

根据各剖面不同时段GPS与水准测量两种手段获取的区域地表垂直形变速率,剔除个别变化量大的异常点,计算出各剖面2种观测手段对比结果的均方差,如表2所示。

表2 剖面比对结果统计表

Tab.2 Statistic of comparison result of three fault-crossing profiles

剖面名称	时间间隔/a	均方差/mm·a <sup>-1</sup>
山阴	1	10.2
	2	6.6
	3	3.9
介休	1	15.7
	2	8.9
	3	5.3
临汾	1	13.9
	2	7.3
	3	3.2

从表2可以看出,2种观测手段1年尺度的结果差异相对较大,而间隔2年和3年时间尺度就显示了较好的趋势一致性,间隔3年时间尺度的总体差异更小。因此可以看出,时间间隔越长,利用GPS获取的垂直形变就相对越可靠。

### 3 影响因素分析

从3个跨断裂短水准剖面的不同时段GPS与水准测得的垂直形变对比结果来看,短时间尺度(1年)的结果差异较大,个别监测点差异超过20 mm/a,而较长时间尺度(2~3年)的结果差异较小,一致性较好,绝大多数监测点的差异在3 mm/a以内。对于短期的这种较大的差异性,分析可能有以下几个方面的因素:(1)GPS观测的

时间基本上在每年的9、10月,而水准测量只有在2009年测量时与GPS观测时间较为接近,其余3年的观测时间均在1~5月,季节性的变化对于形变的影响可能会导致结果的差异;(2)GPS野外观测时,天线高的量取精度较差,部分站点的天线高量取方式可能有误;(3)天线相位中心偏差的影响。天线相位中心在理论上应与其几何中心保持一致,但由于天线本身特性及机械加工等原因,相位中心会随信号输入方向和强度不同而变化(郭际明等,2007)。因此,天线相位中心的瞬时位置(一般称相位中心)与理论上采用的相位中心位置并不重合,存在一定的偏差,在GPS解算过程,虽已采用ELEV模型进行了相位中心偏差改正,但其对垂向的影响仍不能完全消除。

### 4 结论

本文通过对3个跨断裂带综合剖面的GPS和水准数据进行处理对比分析,验证了GPS、水准垂直形变观测结果的一致性和差异性,其结果表明:时间间隔较短(数月至1年左右)、观测时间不同步的情况下,GPS观测与水准观测垂直形变速率之间偏差较大;在观测时间间隔较长(3年及以上)时,GPS观测与水准观测垂直形变速率之间有较好的一致性,与Geoffrey和David(2002)的研究结果比较一致。这表明GPS技术测得的垂直形变在较长时间尺度上是可靠的,同时也为区域流动GPS三维地壳运动观测提供了重要基础依据。

### 参考文献:

- 陈永奇. 1989. 用GPS监测地面的垂直运动[J]. 工程勘察, (5): 61-64.
- 董克刚, 易长荣, 许才军等. 2008. 利用GPS监测天津市地面沉降的可行性研究[J]. 大地测量与地球动力学, 28(4): 68-71.
- 顾国华. 2005. GPS观测得到的中国大陆地壳垂直运动[J]. 地震, 25(3): 1-8.
- 顾国华, 王武星. 2011. 区域网GPS观测得到的汶川大地震前后的地壳垂直运动[J]. 地震, 31(3): 1-8.
- 郭际明, 史俊波, 汪伟. 2007. 天线相位中心偏移和变化对高精度GPS数据处理的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 32(12): 143-146.
- 黄立人, 匡绍君. 2000. 论地面垂直形变监测中应用GPS技术的可能性[J]. 地壳形变与地震, 20(1): 30-37.
- 张风霜, 胡新康, 陈聚忠等. 2009. 北京天津地区垂直形变剖面复测结果的GPS检验[J]. 华北地震科学, 27(4): 26-30.
- Ahmed M, Hamdy, Pil-Ho Park, et al. 2007. Vertical velocity from the

- Korean GPS Network (2000 – 2003) and its role in the South Koreanne – tectonics [J]. *Earth Planets& Space*, 59(5):337 – 341.
- Altamimi Z, Collilieux X, Métivier L. 2011. ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame [J]. *J Geod*, 85(8):457 – 473.
- Geoffrey B, David L. 2002. Effect of annual signals on geodetic velocity [J]. *Journal of geophysical research*, 107(B7):ETG 9 – 1 – ETG 9 – 11.
- Herring T A, King R W, McClusky S C. 2009. GAMIT reference manual, Release10.35. [M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
- Kuo – En C, Meng – Long H, Johnson K M, *et al.* 2011. Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000 – 2008 [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(B8):125 – 157.

## Research on Vertical Deformation of Fault-crossing in Shanxi by GPS Technotogy

QIN Shanlan, WANG Wenping, JI Lingyun, ZHOU Lin

(*Second Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, China*)

### Abstract

After processing and computing the GPS data and precise leveling observation data of three comprehensive fault-crossing profiles from 2009 to 2012, we compared the obtained vertical deformation rate of these three profiles. The results showed that when the observation time interval is shorter (from a few months to one year) and the observation time is not synchronized, the difference of vertical deformation rate between GPS and precise leveling observations are larger. When the observation time interval is longer (for three years or more than three years), the vertical deformation rate between them have good consistency, which verified the feasibility of application of GPS technology to the vertical deformation of fault-crossing comprehensive profiles in the longer time scale.

**Key words:** vertical deformation; GPS; precise leveling; consistency