

2013年甘肃岷县漳县 M_s 6.6 地震 跨断层形变异常研究*

杨晓东, 李 宁, 刘立炜, 张四新

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 通过对2013甘肃岷县漳县交界发生 M_s 6.6 强震的发震构造区在地震前后跨断层形变研究发现: 四店、麻界滩和毛羽沟场在震前出现形变异常, 3个场地临震单期形变是往期平均值的2~7倍; 3个场地地震前形变异常持续时间不超过4个月, 震后4个月除毛羽沟场地外其余场地基本恢复到往期平均水平; 四店场地临震形变 ΔV (5.5 mm) 约是麻界滩和毛羽沟的2倍, 产生这种形变差异的原因可能是由于岷县地震主要动力来源是西秦岭北缘断裂的活动产生, 因此主断裂上的形变异常大于分支断裂; 临潭—宕昌断裂具有差异性活动特征, 断裂中东段活动性强于西段, 岷县漳县地震的复发周期约为 (220 ± 40) a, 震级为6~6.6级。

关键词: 岷县漳县 M_s 6.6 地震; 跨断层水准; 累积形变; 单期形变; 震前异常

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)04-0578-09

0 引言

中国地震台网中心测定, 2013年7月22日在甘肃岷县漳县交界发生 M_s 6.6 强震, 震中位于 $(34.5^\circ\text{N}, 104.2^\circ\text{E})$, 震源深度约20 km。另据美国地质调查局 (USGS) 测得震中位置为 $(34.499^\circ\text{N}, 104.243^\circ\text{E})$, 震源深度为9.8 km, 震级为 M_w 5.9。岷县漳县 M_s 6.6 地震的发震构造是青藏高原东北缘甘东南地区的临潭—宕昌断裂, 断裂走向 NWW, 倾向 NNW, 是一条规模较大的晚更新世—全新世有过活动的走滑兼逆冲型断裂 (郑文俊, 2007a, 2013a, 2013b; 李志强等, 2013; 许冲等, 2013)。临潭—宕昌断裂位于东昆仑断裂带与西秦岭北缘断裂带这两条大型走滑断裂之间, 由于处在两条断裂带应变传递和构造转换的中间过渡区, 因此在区域构造应力变化和构造挤压过程中形成应力和应变集中, 发生的中等强度地震较多 (袁道阳等, 2004; 郑文俊等, 2007b)。此次岷县漳县地震是继2003年岷县5.2级地震 (郑文俊等, 2005) 和2004年岷县—卓尼5.0级地震 (何文贵等, 2006) 后, 该地区发生的又一次强度较大的

地震。

断层作为地壳形变的薄弱地带, 对构造应力场的变化最为敏感, 在捕捉地震孕育信息中扮演着十分重要的角色 (操启明, 祝意青, 2004)。跨断层测量是研究断层现今活动特征的重要手段之一, 这些观测蕴含了区域和断层带地球动力学过程和地震孕育发展变化的宝贵信息, 是较为重要的地震监测预报手段 (焦青, 范国胜, 2007; 黄建平等, 2010; 张希等, 2007, 2009)。岷县漳县地震发生后, 一些专家对这次地震的震源机制、发震构造、震害分布、地震滑坡、区域形变等进行了深入地研究, 取得了一定进展 (李志强等, 2013; 郑文俊等, 2013a, b; 许冲等, 2013; 王双绪等, 2013), 但是对于该地震跨断层形变的研究非常不足, 而且目前对于一次地震震前断层形变异常的判定仍然存在较大争议, 单期形变量多大判定为形变异常至今没有一个明确的认识。本文在前人工作的基础上, 通过对岷县漳县 M_s 6.6 地震跨断层数据的计算分析, 首次研究了岷县 M_s 6.6 地震震前断层形变异常范围、大小和持续时间, 以及岷县地震的复发周期, 并提出对震前形变异常的初步判定方法。

* 收稿日期: 2014-01-08.

基金项目: 中国地震局2014年度震情跟踪专项工作任务 (2014010206) 和陕西省科学技术研究发展计划项目 (2014KJXX-18) 联合资助。

1 跨断层资料概况

目前，西秦岭地区监测断裂带活动的跨断层场地共有 11 处，分别是口子门 G1、四店 G2、盘古川 G3、武家河 G4、柳家沟 G5、毛集 G6、江口 G7、毛羽沟 G8、巴沙沟 G9、麻界滩 G10、奈子沟 G11。从图 1 中可以看出，纵向上这些场地分布在西秦岭北缘断裂、临潭—宕昌断裂和礼县—罗家堡断裂上，跨度约 120 km；横向上它们分布在西秦岭断裂中段和东段、临潭—宕昌断裂东段和礼县—罗家堡断裂中南段，东西跨度约 180 km，初步形成了一个形变观测网，基本上覆盖了西秦岭

地区的主要活动断裂。2013 年 7 月 22 日岷县漳县 6.6 级地震发生时，正值中国地震局第二监测中心对发震区（西秦岭构造区）进行短水准流动场地实施的该年度第 2 期观测，所获得的数据比较及时，对于研究震前特别是临震的断层形变有重要意义。地震后二测中心又安排了两次加密观测，希望获取地震前后跨断层形变的动态变化特征。通过对以往震例的经验总结及对断层形变异常场地的检测落实调查分析，我们发现震前可能有 3 处场地的跨断层测段出现形变异常，并且在震后得到有效恢复，这 3 处场地分别是四店、麻界滩和毛羽沟，四店场地横跨西秦岭北缘断裂，麻界滩和毛羽沟场地横跨临潭—宕昌断裂（图 2，表 1）。

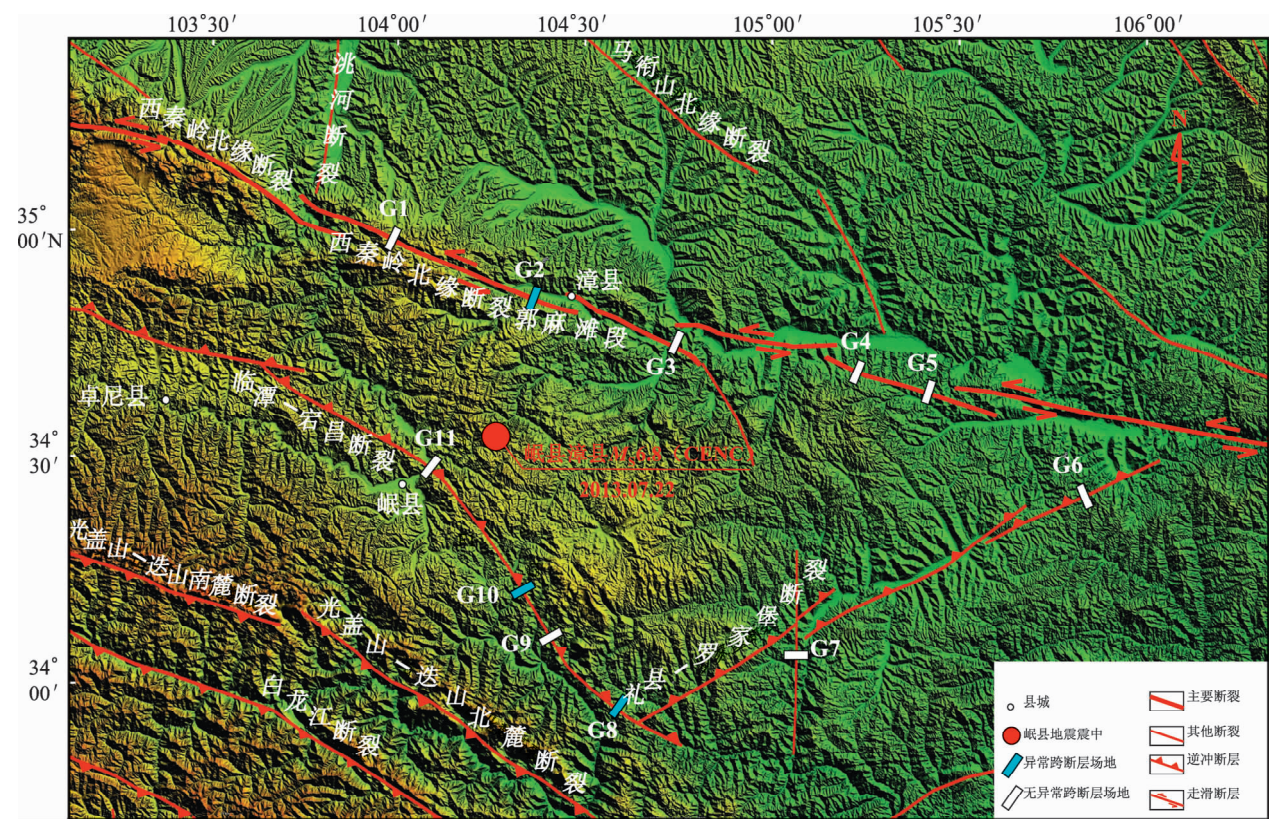


图 1 2013 年岷县漳县 $M_s6.6$ 地震区域构造图

Fig. 1 Regional tectonic setting of the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake in 2013

表 1 跨断层场地资料概况

Tab. 1 The information about cross-fault sites

场地名称	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	震中距/km	所跨断层	测量时间/年-月	年测量期次
四店	34.93	104.40	49.10	西秦岭北缘断裂	1984-05~2013-11	1~6 期
麻界滩	34.19	104.31	34.50	临潭—宕昌断裂	2011-11~2013-11	1~4 期
毛羽沟	33.96	104.61	68.60	临潭—宕昌断裂	2005-03~2013-07	1~5 期

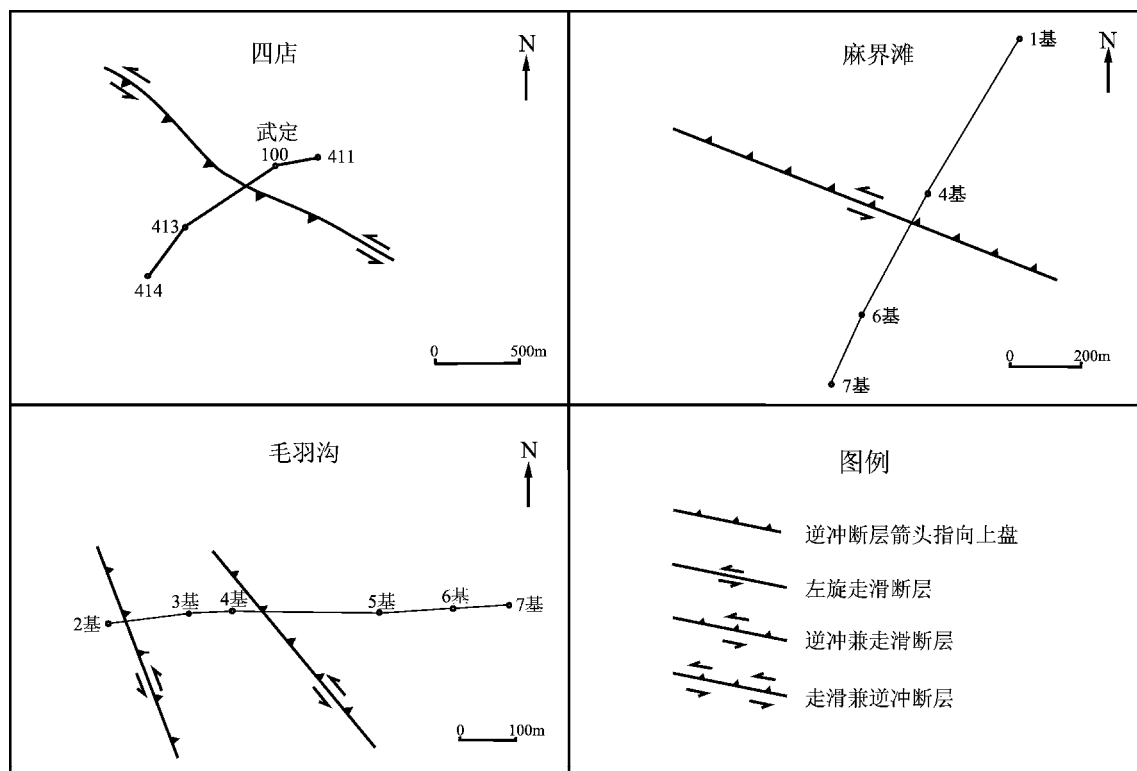


图2 2013年岷县漳县 $M_s6.6$ 地震震前形变异常跨断层场地构造简图

Fig. 2 Geological map of cross-fault sites of deformation anomaly of Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake in 2013

2 数据选取与处理

笔者首先选取了可能产生形变异常的跨断层测段所有监测数据,以初次测得两水准点高差为初始值 A ,记为0,利用第 n 期测得高差值 A_n 与初始高差值 A 之差作为第 n 期累积形变 ΔH_n ,即 $\Delta H_n = A_n - A$ 。单期形变 ΔV 为该期累积形变与上期累积形变之差, $\Delta V_n = \Delta H_n - \Delta H_{n-1}$ 。以时间为横轴, ΔH_n 为纵轴,获得跨断层水准点的动态变化曲线。一般来讲,对于逆断层, ΔH_n 随时间推移持续增加,但是考虑到实际因素的影响,比如气温、降雨、人为干扰、测量误差以及地震等,因而每期测得的 ΔH_n 并非持续增加,而是在一定范围内出现波动和折返,但是从长期来看,形变曲线仍表现整体上升的形态。

因为距离发震时间最近的监测数据可能更好地反映震前和震后形变特征,因此笔者又单独选取了震前2期和震后2期数据进行计算,分别获得 ΔH_n 和 ΔV_n 。为方便区分,将4期数据按时间顺序

依次命名为震前、临震、震后和最新。由于毛羽沟场地震后只测了一期数据,因此总共只讨论3期数据。

除去以上4期监测数据,我们将之前所有监测数据命名为以往数据。以往数据反映了震前观测时段内断层的形变特征,以此作为是否存在临震形变异常的参考分析。因此,笔者计算了以往断层最大、平均累积形变 ΔH 和单期形变 ΔV ,将这些结果分别与地震前后4期数据进行比较分析,从而获得对于震前断层形变异常的定量化认识,以及断层在震后形变恢复特征。

3 岷县漳县 $M_s6.6$ 地震跨断层形变特征

3.1 四店场地形变特征

四店场地位于西秦岭构造区,震中距 69.1 km (图1~2,表1)。场地位于陇西系旋转构造与祁吕山字形西翼交汇处的骆驼巷—四店—武山深大断裂上,即西秦岭北缘断裂中段。断层北盘(下盘)为第三系下统猪肝色厚层砂砾岩,南盘(上

盘) 为白垩系紫红色砂砾岩、砂质泥岩、页岩夹灰白色砂质泥岩。断层产状: 走向 NWW, 倾向 SW, 倾角 $50^\circ \sim 60^\circ$ 。岷县漳县地震的发震构造是西秦岭北缘断裂的分支断裂临潭—宕昌断裂, 该断裂先期形成主要受控于西秦岭北缘断裂, 而后期的构造变形不仅与西秦岭北缘断裂向两侧的扩展有关, 也受到了来自东昆仑断裂向 NE 的挤压影响 (郑文俊等, 2013a)。由于暂时没有横跨东昆仑断裂的形变数据, 因此本文只讨论西秦岭北缘断裂的跨断层形变特征。

从 1984 年初次对四店场地观测开始, 至今已连续观测了 30 年, 累计观测数据 105 期 (图 3a)。从场地短水准曲线变化与地震的对应情况来看, 该场地所跨断层的异常变化能较好地反映周边地区中强以上地震活动。414←411 测段为跨断层测段, 2013 年 3 月 14 日测得震前累积形变 ΔH 和单期形变 ΔV 分别是 0.80 mm 和 1.10 mm, ΔH 与往期平均值 0.80 mm 一致, 比往期最大值 4.50 mm 小 3.70 mm, ΔV 大于往期平均值 0.81 mm, 比往期最大值 4.20 mm 小 3.10 mm, 震前断裂活动水平较低 (图 4a、d 和表 2); 但是仅仅 4 个月之后, 7 月 19 日测得临震 ΔH 和 ΔV 大幅上升, 分别高达 4.70 mm 和 5.50 mm, 这也是该测段自观测以来的最大幅度, 远大于往期平均值, ΔH 是往期平均值 0.80 mm 的 6 倍以上, ΔV 约是往期平均值 0.81 mm 的 7 倍, ΔH 和 ΔV 比往期最大值分别大 0.20 mm 和 1.30 mm, 随即于 7 月 22 日发生岷县漳县 $M_s6.6$ 地震 (图 4a 和 4d); 7 月 26 日又及时进行了震后检测, 仅在临震观测 8 d 后, 累积形变值 ΔH 降至 2.00 mm, ΔV 下降了 2.70 mm, 震后断层形变得到了显著恢复; 11 月 15 日测得 ΔH 和 ΔV 分别是 0.70 mm 和 1.30 mm, 震后 4 个月内断层形变已基本恢复到往期平均水平 (图 3a, 表 2, 图 4a、d)。

3.2 麻界滩场地形变异常

麻界滩场地震中距 34.5 km, 是 3 个可能产生形变异常场地中距离震中最近的。场地横跨岷县地震发震构造临潭—宕昌断裂, 走向 NWW, 倾向 NNE, 表现为一条向北凸出的弧形断裂 (图 1~2, 表 1)。北东盘为二叠系下统含炭板岩夹砂岩, 南西盘为三叠系薄层灰岩、泥灰岩、灰质板岩、灰质砂岩等。临潭—宕昌断裂带是一条规模较大的晚更新世—全新世有过活动的断裂带, 大致可分

为 3 条次级断裂段: 西段 (合作断裂段) 北支为早更新世或前第四纪活动断裂, 西段 (合作断裂段) 南支最西端活动性较差, 为早中更新世活动断裂, 东端为晚更新世活动断裂; 中段 (临潭断裂段) 北支可能为全新世早期活动断裂, 南支为早中更新世—晚更新世早期活动断裂; 东段 (岷县—宕昌断裂段) 的主干断裂活动性较差, 为前第四纪断裂, 其北缘的两条次级断裂中最北边的一条可能在第四纪晚期 (全新世) 有恢复活动的迹象, 沿洮河的一条断裂最新活动时间应为早中更新世 (郑文俊等, 2005)。

麻界滩场地位于临潭—宕昌断裂带东段, 场地 6 (09) ← 4 (11) 测段为近年来新增测段, 其中 6 号点为 2009 年新增点, 4 号点为 2011 年新增点, 2011 年至今已经累计观测了 8 期数据。从曲线的变化情况来看, 观测以来曲线变化幅度一直较稳定 (图 3b), 从图 4b、e 和表 2 可以看出, 2013 年 3 月 15 日观测震前 ΔH 和 ΔV 分别是 0.30 mm 和 0, 震前 ΔH 比往期平均值 0.74 mm 小 0.44 mm。与四店场地

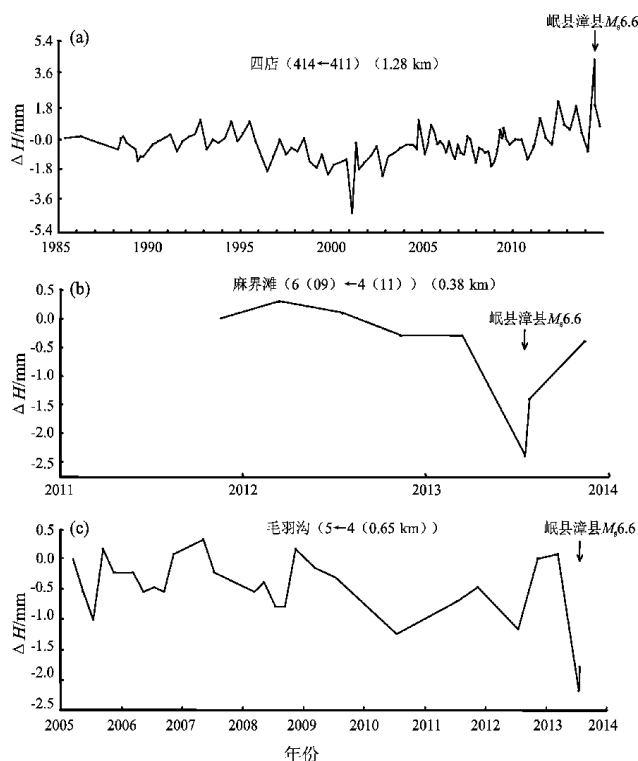


图 3 2013 年岷县漳县 $M_s6.6$ 地震异常跨断层形变图

Fig. 3 Profiles of cross-fault deformation of Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake in 2013

不同的是,麻界滩震前 ΔV 为 0,表明 2012 年 11 月至 2013 年 3 月断裂并未发生形变;然而仅 4 个月后,在震前 3 天的 7 月 19 日,监测到断层临震前发生了显著形变,单期形变 ΔV 高达 2.10 mm,约是往期平均值 0.71 mm 的 3 倍,是往期最大值 1.00 mm 的 2.1 倍, ΔH 显著上升至 2.40 mm,比震前 ΔH

(0.30 mm) 增加 7 倍,是往期 ΔH 平均值 0.74 mm 的 3 倍多,约是往期最大值 1.40 mm 的 2 倍;7 月 27 日测得震后 ΔH 已经降至 1.40 mm,单期形变 ΔV 为 1.00 mm,断层形变恢复明显;最新一次 11 月 15 日观测的最新结果 ΔH 和 ΔV 分别是 0.40 mm 和 1.00 mm,断层基本恢复到震前形变水平。震后和最

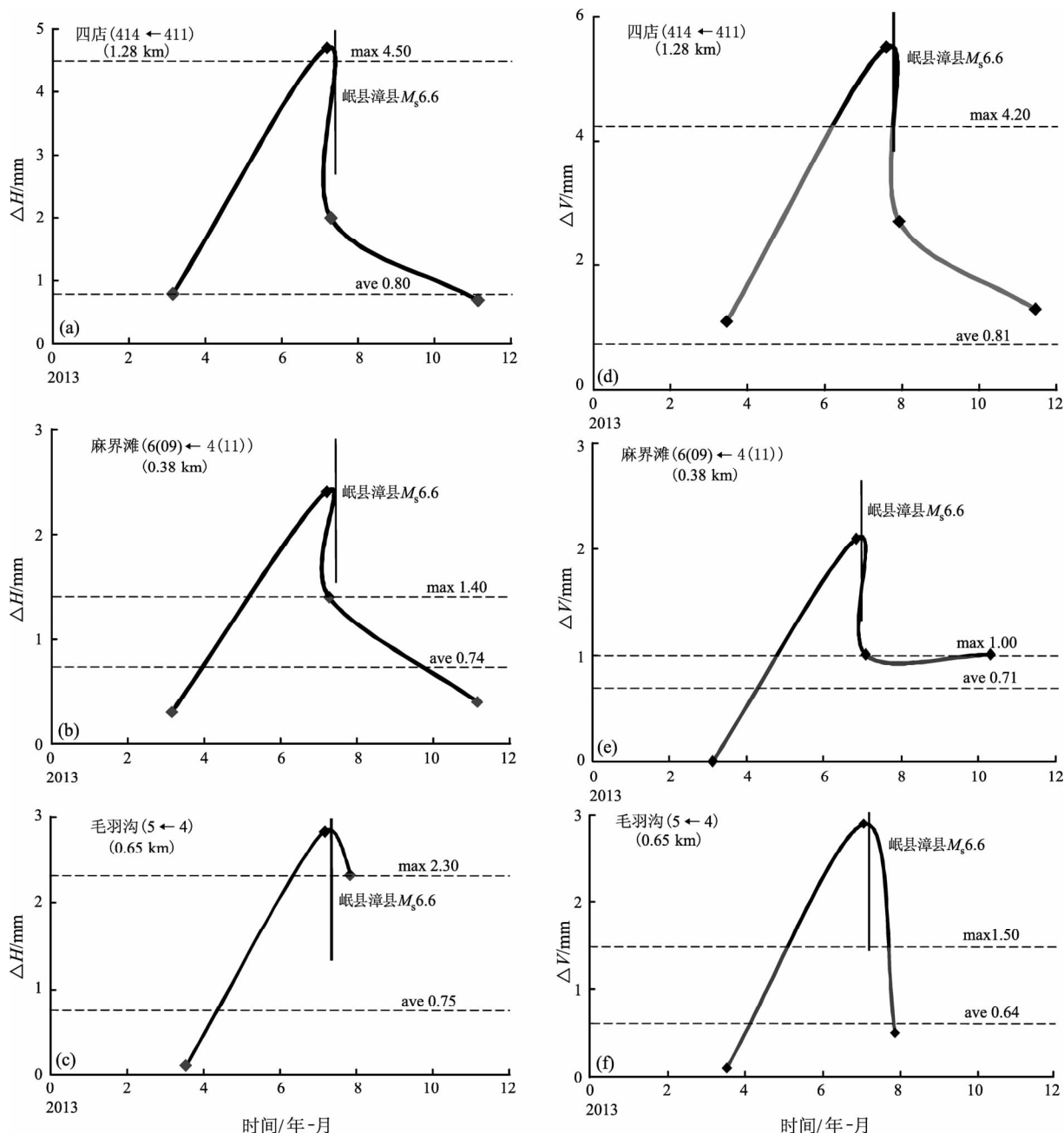


图 4 2013 年岷县漳县 $M_s6.6$ 地震异常跨断层场震前、临震、震后和最新的断层累积形变和单期形变剖面图 (1.28 km 表示测点距离, max 和 ave 分别代表往期最大和平均值)

Fig. 4 Profiles of the newest cumulative and single period deformation before earthquake, impending earthquake, after earthquake and latest measurement of Minsian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake in 2013 (1.28 km represents the distance of measuring points, max and ave represent the maximum and average value in the period respectively)

新两期数据的单期形变 ΔV 一致，都是 1.00 mm（图 3b，表 2，图 4b 和 4e）。

3.3 毛羽沟场地形变异常

毛羽沟场地位于西秦岭构造区，震中距 68.6 km（图 1~2，表 1）。场地跨临潭—岷县—宕昌弧形断裂带东段的新城子—岷县—凤凰梁—寺顶山断层，断层长达 300 km 左右，为构造分区的交界断层，规模大并长期活动。断裂产状：断层总体走向为 NWW，东南端转为近 EW 向，断面产状大部分地区不清楚，断面倾向 NE，倾角 60°，在场地处有两条相距约 1 km 的平行断面，其中东边一条为主断面，走向为 NW，倾向 NE，倾角 60°。断面上有 1 m 多厚的断层泥，破碎带宽约 150 m，北东盘（上盘）为泥盆系中统两汉水群灰色中薄层细砂岩、粉砂岩、千枚岩及薄板状微粒灰岩，南西盘（下盘）为三叠系砂岩、板岩及灰岩。

毛羽沟场地从 2005 年开始观测至今已经连续观

测了 9 年，累计观测数据 27 期（图 3c）。近年来跨断层 5←4 测段曲线总体趋势平稳，2013 年 3 月 16 日测得震前累积变化 ΔH 为 0.10 mm，比往期平均值 0.75 mm 低 0.65 mm，仅是往期最大值 2.30 mm 的 4%，单期形变 ΔH 为 0.10 mm，比往期平均值 0.64 mm 低 0.54 mm，和麻界滩场地类似，断层在震前形变量非常小，很可能处于闭锁阶段（表 2，图 4c 和 4f）；2013 年 7 月 20 日震前两天观测到临震 ΔH 和 ΔV 出现大幅突跳和转折， ΔV 单期变化 2.90 mm， ΔH 转折下降至 -2.80 mm，取绝对值为 2.80 mm，形变幅度远远超出近些年来曲线变化范围，异常较为显著。 ΔV 和 ΔH 约是往期平均值的 2 倍和 4 倍，7 月 22 日发生岷县漳县 6.6 级地震；7 月 26 日震后 4 天测得 ΔV 为 0.50 mm，曲线再次折返，断层 ΔH 上升至 -2.30 mm，取绝对值为 0.23 mm，曲线变化有明显恢复且幅度减小的趋势（图 3c，图 4c、f，表 2）。

表 2 岷县漳县 M_s6.6 地震跨断层形变实测结果（单位：mm）

Tab. 2 Results of real deformation from cross-fault measurements of Minxian-Zhangxian M_s6.6 earthquake (unit: mm)

场地名称	往期	往期	震前	临震	震后	最新
	平均累积形变	平均单期形变	累积形变	累积形变	累积变化	累积变化
	最大累积形变	平均单期形变	单期形变	单期变化	单期变化	单期变化
四店	0.80	0.81	0.80	4.70	2.00	0.70
	4.50	4.20	1.10	5.50	2.70	1.30
麻界滩	0.74	0.71	0.30	2.40	1.40	0.40
	1.40	1.00	0	2.10	1.00	1.00
毛羽沟	0.75	0.64	0.10	2.80	2.30	
	2.30	1.50	0.10	2.90	0.50	

注：四店场地震前、临震、震后和最新测量时间分别是 2013 年 3 月 14 日、7 月 18 日、7 月 28 日和 11 月 14 日；麻界滩场地震前、临震、震后和最新测量时间分别是 2013 年 3 月 15 日、7 月 19 日、7 月 27 日和 11 月 15 日；毛羽沟场地震前、临震、震后和最新测量时间分别是 2013 年 3 月 16 日、7 月 20 日和 7 月 26 日。

4 讨论

4.1 岷县漳县 M_s6.6 地震影响范围

四店、麻界滩和毛羽沟 3 处场地距岷县漳县地震震中距离分别是 49.1 km、34.5 km 和 68.6 km，四店场地横跨西秦岭北缘断裂，该断裂是岷县漳县地震发震断裂临潭—宕昌断裂的主断裂，麻界滩和毛羽沟场地横跨临潭—宕昌断裂，属于西秦岭北缘断裂的分支断裂。显然此次地震在主断裂和发震断裂上的影响范围是不同的。对于主断裂，

岷县漳县地震的影响范围是 68.6 km，对于发震断裂，岷县漳县地震的影响范围约是 49.1 km，不超过 50 km，地震在主断裂上的影响范围大于分支断裂。

4.2 岷县漳县 M_s6.6 地震跨断层形变

对于逆冲断层，断层两盘以垂直运动为主，断层上盘相对于下盘向上运动，下盘相对于上盘向下运动；对于走滑断层，断层倾角较大，断面近直立，断层两盘以水平运动为主，垂直运动不显著。西秦岭北缘断裂是一条走滑兼逆冲型断裂，走滑为主逆冲为辅。四店场地横跨西秦岭北缘断

裂,跨断层测段 414←411 标示上盘至下盘,即为下盘相对于上盘的运动(图 2,图 3)。由图可知,从短期来看,跨断层测点相对位移围绕着初始值 0 上下略微浮动,这种浮动可能是季节性年变造成的,但是从 28 a 的观测时长来看,跨断层测点基本在初始值附近,没有出现显著地持续下降或者上升,表明断层两盘垂直运动不显著,这一观测结果与断层运动性质基本一致(图 3a)。临潭—宕昌断裂是一条逆冲兼走滑断裂,逆冲为主走滑为辅,断层下盘相对于上盘向下运动。我们所选跨断层测段的观测点均为上盘至下盘,代表下盘相对于上盘的运动。由图 3b 和 3c 可知,2~7 a 的跨断层观测时长,断层下盘相对于上盘位移值基本在初始值 0 以下,说明断裂以逆冲运动为主,下盘向下,上盘向上,这与断裂运动特征相符。这 3 处场地的观测结果与所跨断裂运动性质基本一致,说明监测结果可靠,可以进行进一步分析讨论。

2013 年 3 月震前监测结果显示,四店场地与往期平均水平基本一致,说明该期断裂活动状态处于正常水平,没有显著的应变累积和断裂闭锁;麻界滩场地单期形变为 0,自 2012 年 11 月至 2013 年 3 月断裂并未发生形变,处于闭锁阶段,断裂垂直滑动速率为 0,而且震前累积形变 0.3 mm 远小于往期平均值 0.74 mm,仅占往期平均的 40%;毛羽沟地震前累积变化 0.1 mm 仅占往期平均值 0.75 mm 的 13%,是往期最大值 2.3 mm 的 4%,单期形变 0.1 mm 是往期平均值 0.64 mm 的 16%,仅占往期最大值 1.5 mm 的 7%,毛羽沟与麻界滩场地类似,表明临潭—宕昌断裂震前可能处于闭锁阶段,由于震前观测周期短,数据量有限,因此这一认识还需长期监测结果检验和证实。

7 月 18~20 日观测的四店、麻界滩和毛羽沟 3 个场地,距发震时间 7 月 22 日非常接近,基本可以代表断层临震形变。3 个场地监测结果均显示,临震断层形变发生大幅度上升,其中四店场地单期形变高达 5.5 mm,几乎达到往期平均值 0.81 mm 的 7 倍,累积形变 4.50 mm 是往期平均值 0.80 mm 的 6 倍以上;麻界滩场地临震单期形变 2.1 mm 约是往期平均值 0.71 mm 的 3 倍,累积形变显著上升到 2.40 mm,比震前增加了 7 倍,是往期平均值 0.74 mm 的 3 倍多;毛羽沟场地临震单期形变 2.9 mm,达往期平均值 1.5 mm 的近 2 倍,

累积形变 2.8 mm 约是往期平均值 0.75 mm 的 4 倍。从各个场地监测结果来看,临震单期形变是往期平均值的 2~7 倍。为了获得更可靠的形变异常结果,我们又参考了以往岷县两次 5 级左右地震、迭部 5.9 级地震以及发生在海原—祁连断裂带上的多次 5 级、6 级地震跨断层数据和文献资料。邹明吾等(1995)研究发现 1987 年迭部 5.9 级地震前距震中 180 km 的松潘形变台短水准有较大幅度变化近于异常指标的 3 倍,跨断层水准测量显示该区域北西西向断裂南盘相对上升,地壳向北倾斜的趋势;除此之外,针对震前跨断层单期形变与往期结果对比研究的文献较少,这方面公开发表资料主要集中于跨断层形变异常量化指标、区域形变特征(祝意青等,1997;王双绪等,2001;张希等,2009,2010;王双绪等,2013),或者关于跨断层形变曲线特征的定性描述(李瑞莎等,2012),针对临震形变与往期大小的分析较少。由于观测时间短,特别是麻界滩和毛羽沟场地只有 2~7 a 的观测时长,因此“临震形变是往期平均值的 2 倍以上可作为形变异常”这一认识还有待检验。我们希望利用今后更长时间尺度更短测量周期的结果来讨论地震前断层形变异常,从而获得更为可信的异常认识。

震后观测结果显示,除毛羽沟场地外,其余两处场地形变得到显著恢复。7 月 28 日四店场地累积形变值降至 2 mm,11 月 14 日观测显示累积形变下降到 0.7 mm,基本恢复到震前水平;7 月 27 日麻界滩场地累积形变降至 1.4 mm,11 月 15 日下降到 0.4 mm;7 月 26 日毛羽沟场地累积形变降至 2.3 mm。所有检测结果均表明,仅在震后 6~8 d 场地单期形变约 0.50~2.70 mm,震后 4 个月内基本恢复到震前平均水平。震后麻界滩和毛羽沟场地断层形变得到了一定程度的恢复,部分段落可能解锁,但是这一认识有待今后监测数据检验。

3 处场地临震形变异常的大小有所不同,四店场地临震单期形变达到 5.50 mm,麻界滩达 2.10 mm,毛羽沟为 2.90 mm,发生在西秦岭北缘断裂上的形变异常规模远大于临潭—宕昌断裂,前者约是后者的 2 倍。为什么场地远离震中异常越大,靠近震中异常越小?笔者认为虽然这次地震是发生在临潭—宕昌断裂上,但是该断裂先期形成主要是受控于西秦岭北缘断裂,而且后期的构

造变形还受到西秦岭北缘断裂向两侧的扩展作用，临潭—宕昌断裂的主要动力来源是西秦岭北缘断裂的活动产生，当主断裂的形变传递到分支断裂上，其大小和规模发生衰减，所以震前主断裂上产生的形变异常规模较大，几乎是分支断裂的 2 倍。毛羽沟场地临震单期形变 2.90 mm 比麻界滩场地临震单期形变大 2.10 mm，也表明了该地震破裂方向是从 SEE 向 NWW 向发展的，随着破裂的扩展，地震波能量逐步衰减，断层形变程度也相应减弱，造成了如此的形变随位移衰减特征，这与中国地震局地球物理所的地震震源机制解结果是一致的。许冲等（2013）通过对岷县漳县地震滑坡体分布特征的研究发现地震滑坡的主体分布范围与震中位置表明了构造破裂是从 SEE 向 NWW 方向发展的，证明发震构造对地震滑坡发生与空间分布起控制作用，且在沿着发震构造的方向上发育程度不同，反映着不同段落发震构造特征的差异。

4.3 岷县漳县 $M_{\text{s}}6.6$ 地震震前异常时间

尽管 3 次形变异常测得时间略有差别，但无法确定 3 次形变异常是否先后产生，因为目前还未能同时监测 3 个跨断层场地形变情况。一般来说，每期野外测量是逐个监测完成各个场地。但是，对于震前几个月的时间尺度来看，可以认为这些形变异常是同时产生的。而且我们在震前 2~4 d 所获得的数据非常接近发震时间，对于一次 6.6 级地震的孕震周期来看，几乎是临震的一瞬间，因此

基本上代表了发震前临界状态下的断层形变。至于异常持续时间，则很难判断，因为目前还没有做到实时跨断层监测，我们只能根据跨断层形变监测结果初步判断这些异常是在震前到临震的 4 个月内产生的，震前形变异常持续应该时间不超过 4 个月。

4.4 临潭—宕昌断裂活动性分析

临潭—宕昌断裂带不同段落的活动差异性明显，且每个段落内呈现出活动的不均匀性，通过多条次级断裂实现构造转换。此次发震段落为临潭—宕昌断裂东段（岷县—宕昌段），主支断裂活动性较弱，断裂段主要部分为前第四纪或早更新世活动，仅有少量地段呈现出中晚更新世有过活动的特征，其北缘的两条次级断裂中最北边的一条可能在第四纪晚期（全新世）有复活的迹象，沿洮河的一条断裂最新活动时间应为早中更新世，而其最南端的斜接断裂活动时间与主干断裂一致，为第四纪早期或前第四纪（郑文俊等，2007a）。据考证，在 1573 年和 1837 年临潭—宕昌断裂东段（岷县—宕昌段）曾发生过两次历史地震，1573 年岷县地震震级为 $6\frac{1}{2}$ 级，极震区烈度为Ⅷ~Ⅸ度，震中位于（34.50°N，104.0°E），震中精度为 2 类，震中位置偏差≤25 km；1837 年岷县地震震级为 6 级，震中（34.7°N，103.9°E），极震区烈度为Ⅷ度（表 3）（谢敏寿，蔡美彪，1987；谢敏寿，1983；顾功叙，1983；郑文俊等，2007a，b）。

表 3 发生在临潭—宕昌断裂上 3 次 6 级以上地震参数对比

Tab. 3 Comparisons of parameters of three $M \geq 6.0$ earthquakes occurred on Lintan-tanchang Fault

时间/年	震级	$\varphi_{\text{N}}/(^{\circ})$	$\lambda_{\text{E}}/(^{\circ})$	极震区烈度	发震断裂	参考文献
1573	$6\frac{1}{2}$	34.40	104.0	Ⅷ~Ⅸ	临潭—宕昌断裂东段(岷县—宕昌段)	郑文俊等(2007a);谢毓寿等(1987,1993)
1837	6	34.7	103.9	Ⅷ	临潭—宕昌断裂东段(岷县—宕昌段)	谢毓寿等(1987,1993);郑文俊等,(2007b)
2013	$M_{\text{s}}6.6$	34.50	104.2	Ⅷ	临潭—宕昌断裂东段(岷县—宕昌段)	郑文俊等(2013a,2013b);李志强等(2013)

由表 3 可知，考虑到历史地震判断的误差性，1573 年和 1837 年两次历史地震和 2013 岷县漳县 $M_{\text{s}}6.6$ 地震震级较为接近，基本一致；3 次地震震中经纬度略有偏差，也在误差范围内，因为对于历史地震，主要根据历史记载和房屋建筑的破坏程度确定宏观震中，存在一定的不确定性；3 次地震极震区烈度均为Ⅷ度，1573 年岷县地震极震区烈度偏高一些，局部地震区可达到Ⅸ度，这可能与该地区在 1573 年间房屋建筑设施抗震能力有关；

结合地震烈度图和野外考察表明 3 次地震的发震断裂均是临潭—宕昌断裂东段（岷县—宕昌段）。以上 3 次的地震的发生，充分说明了临潭—宕昌断裂东段部分地段有全新世活动特征，具备产生 6~6.6 级中强地震的构造条件。基于以上几点因素，如果这 3 次地震是特征地震，那么岷县 6.6 级地震的复发周期约为（220±40）a。这一认识还需更加深入的活动构造考察论证，复发周期有待古地震检验。

5 结论

(1) 岷县漳县 $M_s6.6$ 地震在主断裂西秦岭北缘断裂上的影响范围约是 68.6 km, 在发震断裂临潭—宕昌断裂上的影响范围约是 49.1 km。

(2) 3 个场地临震单期形变是往期平均值的 2~7 倍。由于观测时间短, 暂时不能判断震前临潭—宕昌断裂东段是否处于闭锁阶段。

(3) 岷县漳县 $M_s6.6$ 地震的震前形变异常持续时间不超过 4 个月, 除毛羽沟场地外, 震后 4 个月内断裂形变基本恢复到正常水平。

(4) 位于西秦岭北缘断裂上的临震形变 ΔV (5.5 mm) 约是麻界滩和毛羽沟的 2 倍, 产生这种差异的原因可能是由于此次地震的主要动力来源是主断裂活动产生, 主断裂上的形变异常大于分支断裂。

(5) 如果 1573 年 1837 年发生在临潭—宕昌断裂上的两次历史地震和此次 6.6 级地震是特征地震, 那么岷县漳县地震的复发周期约为 (220 ± 40) a, 震级为 6~6.6 级, 这一认识还需进一步研究检验。

感谢审稿人对本文提出的建设性意见, 感谢穆元虎在野外考察中给予的帮助, 向在青藏高原东北缘艰苦环境下工作的一线监测人员致敬!

参考文献:

- 操启明, 祝意青. 2004. 青藏高原北缘跨断层形变监测[J]. 高原地震, 16(2): 49-54.
- 顾功叙. 1983. 中国地震目录[M]. 北京: 科学出版社, 96.
- 何文贵, 周志宇, 马尔曼, 等. 2006. 2004 年 9 月 7 日岷县—卓尼 5.0 级地震的基本特征和地质背景研究[J]. 地震研究, 29(3): 57-62.
- 黄建平, 石耀霖, 李文静. 2010. 从跨断层短基线观测计算地应变的方法探讨以唐山台地形变数据为例[J]. 地球物理学报, 53(5): 1118-1126.
- 焦青, 范国胜. 2007. 河北文安地震前后首都圈跨断层位移的变化特征[J]. 大地测量与地球动力学, 27(6): 17-21.
- 李瑞莎, 张希, 唐红涛, 等. 2012. 玉门、民乐等地震前跨断层形变异常及于定点前兆观测的相互印证[J]. 西北地震学报, 34(4): 388-392.
- 李志强, 姜立新, 李亦纲, 等. 2013. 2013 年 7 月 22 日甘肃岷县漳县 $M_s6.6$ 地震灾害特点分析[J]. 地震地质, 35(3): 593-603.
- 王双绪, 江在森, 陈文胜, 等. 2001. 景泰 5.9 级地震的断层形变异常及中短期预报[J]. 23(2): 151-158.
- 王双绪, 蒋峰云, 李宁, 等. 2013. 岷县漳县 6.6 级地震前区域地壳运动变形背景与断层形变异常特征[J]. 地震工程学报, 35(3): 503-512.
- 谢毓寿, 蔡美彪. 1987. 中国地震历史资料汇编(第三卷下册)[M]. 北京: 科学出版社.
- 谢毓寿. 1983. 中国地震历史资料汇编(第一卷)[M]. 北京: 科学出版社.
- 许冲, 徐锡伟, 郑文俊, 等. 2013. 2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级地震触发滑坡及其构造分析[J]. 地震地质, 35(3): 616-626.
- 袁道阳, 张培震, 刘百箴, 等. 2004. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J]. 地质学报, 78(2): 270-278.
- 张希, 薛福平, 王继英. 2009. 青藏块体东北缘主要断裂带断层形变时序特征与强震关系[J]. 地震研究, 32(1): 1-5.
- 张希, 薛福平. 2007. 祁连山构造带红外测距观测揭示的应变强度时空演变特征[J]. 高原地震, 19(4): 10-15.
- 张希, 薛富平, 贾鹏. 2010. 甘肃及其边临地区断层形变特征强度时序变化与强震关系[J]. 国际地震动态, (10): 43-48.
- 郑文俊, 雷中生, 袁道阳, 等. 2007a. 1573 年甘肃岷县地震史料考证与发震构造探讨[J]. 中国地震, 23(1): 73-83.
- 郑文俊, 雷中生, 袁道阳, 等. 2007b. 1837 年甘肃岷县北 6 级地震考证与发震构造分析[J]. 地震, 27(1): 120-130.
- 郑文俊, 刘小凤, 赵广坤, 等. 2005. 2003 年 11 月 13 日甘肃岷县 $M_s5.2$ 地震基本特征[J]. 西北地震学报, 27(1): 61-65.
- 郑文俊, 闵伟, 何文贵, 等. 2013a. 2013 甘肃岷县漳县 6.6 级地震震害分布及发震构造分析[J]. 地震地质, 35(3): 604-615.
- 郑文俊, 袁道阳, 何文贵, 等. 2013b. 甘东南地区构造活动与 2013 年岷县—漳县 $M_s6.6$ 地震孕震机制[J]. 地球物理学报, 56(2): 4058-4071.
- 祝意青, 陈兵, 王庆良. 1997. 永登 5.8 级地震的地形边异常分析[J]. 地壳形变与地震, 17(2): 87-91.
- 邹明吾, 潘颖凌, 郭守年, 等. 1995. 1987 年 1 月 8 日甘肃迭部 5.9 级地震与地形边特征[J]. 地震地磁观测与研究, 16(3): 35-40.
- 中国地震局地球物理研究所. 2013. 2013 年 7 月 22 日甘肃岷县漳县 6.6 级地震[EB/OL]. (2013-07-22)[2014-01-08] <http://www.cea-igp.ac.cn/tpwx/267408.shtml>.

Research on Cross-fault Deformation Abnormity of Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake in Gansu in 2013

YANG Xiao-dong, LI Ning, LIU Li-wei, ZHANG Si-xin

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

Abstract

An $M_s6.6$ earthquake occurred at the boundary between Minxian and Zhangxian Counties on Jul. 22, 2013. Studying the cross fault deformation of seismogenic structure area before and after the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake, we found that the deformation anomaly appeared in Sidian, Majietan and Maoyugou sites before the earthquake. The deformation in single period were 2 ~ 7 times than the average value, and the duration of deformation anomaly was less than 4 months before the earthquake in these three sites. The deformation recovered to average value in 4 months after the earthquake except for Maoyugou site. The impending deformation ΔV in Sidian site (5.5mm) was about 2 times than that in Majietan and Maoyugou sites, which were due to the main dynamic source was from the activity of North margin of Western Qinlin Fault, so the deformation anomaly in main fault was larger than that of branch fault. The characteristic of Lintan-Tanchang Fault is the diversity of activity, and the activity of the eastern section of active faults is stronger than that in the western part. The recurrence period of Minxian-Zhangxian earthquake is about (220 ± 40) a, the magnitude of it is from 6.0 to 6.6.

Key words: Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake; cross-fault measurements; cumulative deformation; single deformation; anomaly before earthquake