

2013年岷县漳县6.6级地震孕育—发生过程的地形变联合反演分析*

张希, 张四新, 秦姍兰, 贾鹏, 李瑞莎

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 基于西秦岭构造区区域水准、长水准剖面观测资料, 结合 GPS 速度场约束和跨断层短水准观测数据, 借助三维负位错联合反演, 分析 2013 年岷县漳县 6.6 级地震前相关断裂的中长期闭锁背景, 讨论断裂活动的中—短临动态演变以及震后变化。结果表明: 1999—2006 年, 岷县漳县地震前的震区所在块体即西秦岭北缘断裂与临潭—宕昌断裂之间水平最大剪应变率、挤压性质的面应变率、垂向梯度率都较大, 与构造和动力学背景一致的三维差异运动明显, 有利于能量积累和孕育强震。包含漳县地区的西秦岭北缘断裂中段、临潭—宕昌断裂中东段即发震构造的主断裂段闭锁明显, 挤压逆断兼左旋, 显示中长期能量积累背景。跨西秦岭北缘断裂漳县段至临潭—宕昌断裂中东段岷县地区的长水准剖面显示震前的 2008—2011 年, 西秦岭北缘断裂具有与 GPS 观测一致的差异运动增强特性; 震前数天, 位于这两条闭锁段或其端部的四店、毛羽沟短水准场地出现显著短临突变异常; 震后均显示垂向差异运动呈减弱—恢复趋势。

关键词: 三维负位错联合反演; 岷县漳县地震; 断裂闭锁; 断裂活动动态变化

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2019)01-0040-09

0 引言

西秦岭构造区位于甘肃省的东南部、青藏高原东北缘, 东昆仑断裂带东段及相连的塔藏断裂以北, 从北至南由西秦岭北缘、临潭—宕昌、礼县—罗家堡、光盖山—迭山北麓和南麓、成县盆地北缘、迭部—白龙江、康县北等多条断裂构成。2013 年 7 月 22 日岷县、漳县间 (34.5°N , 104.2°E) 发生 6.6 级强震, 打破了该区 1936 年 $6\frac{3}{4}$ 级与 6.0 级地震后长达 77 年的 6 级以上地震平静期。此次地震震发构造为临潭—宕昌断裂中东段的次级断层, 震源深度约 20 km, 发震断裂以逆冲为主、兼左旋走滑性质。临潭—宕昌断裂是东昆仑断裂与西秦岭北缘断裂之间的构造转换区, 青藏高原东北部东昆仑断裂的向北挤压和向东运动、西秦岭北缘断裂走滑及向南北两侧逆冲“花状构造”, 是临潭—宕昌断裂带构造应力集中、继而发生强震的主要动力因素 (何文贵等, 2013; 郑文俊等, 2013)。

2013 年岷县漳县 6.6 级地震发生前, GPS 连

续站资料无显著异常反映 (朱爽, 周伟, 2015)。而对 1999—2007 年、2009—2011 年 GPS 区域站速度场资料的剖面计算和应变场分析表明, 西秦岭构造区存在水平挤压高应变积累 (王双绪等, 2013), 2008 年汶川 8.0 级大震及震后调整, 还使岷县漳县地震孕震区的左旋运动增强, 从而加速了能量积聚 (杨博等, 2014)。负位错反演显示, 西秦岭北缘断裂中—西段 1999—2007 年相对闭锁 (张希等, 2014a; 赵静等, 2016), 2009—2013 年包含漳县地区的断裂中段的闭锁程度增强, 但 GPS 站点在西秦岭构造这一小范围区域仅数十个, 且点距较大, 针对逆冲为主的岷县漳县地震错动, 更缺乏近场和垂向观测控制, 反映的闭锁特性不够全面、精细, 对临潭—宕昌发震构造更是没有做闭锁程度、深度等的相关反演。王双绪等 (2013) 综合 1999—2006 年西秦岭构造区水准观测所得垂直形变场图像以及 GPS、重力资料总结了该次地震的孕育背景, 区域水准观测从 20 世纪 70 年代始, 整网复测 2006 年截止, 沿测线点间距较小 (1~5 km 左右), 可作为三维负位错联合反演的

* 收稿日期: 2018-07-29.

基金项目: 中国地震局监测预报专项“2021—2030 年全国地震重点监测防御区确定研究”资助.

垂向位移控制。另外,西秦岭构造区还有十几处跨断层短水准场地,始测于20世纪80年代,常规复测每年3期,测线数百米长、场地跨度不超过1 km,以监视近场构造活动为目的,岷县漳县地震前短期阶段部分场地观测到突跳性前兆异常(王双绪等,2013;杨晓东等,2014;张希等,2014b)。

Matsu'ura等(1986)的负位错模型认为,受现今地壳运动驱动下的各个活动地块间的相对运动在地块边界处有可能受到阻碍,从而导致应力应变积聚。即视块体边界区域的地表位移为刚性块体的运动减去边界上部(由若干断裂段构成,每条断裂段用1985年Okada弹性均匀介质半空间的矩形位错模拟)对块体相对运动的锁定或部分锁定在地表产生的位移。这样,利用地表位移观测、块体划分与负位错模型,就可以通过反演获取与强震孕育有关的断裂闭锁信息。因而被许多专家应用于GPS或水准资料反演,并在模型中增加块体应变、倾斜参量或拓展至分层非均匀位错模型(伍吉仓,许才军,2002;张希等,2004,2005,2011;赵静等,2016)。GPS与区域水准有三维互补的观测意义,但负位错联合反演的研究却很少,仅张希等(2007)开展过研究,且所用资料、研究区与本文不同,更没有结合跨断层短水准测线即近断层观测数据。

地震是地壳、上地幔物质在构造力作用下长期变形的结果,地壳形变是反映强震孕育—发生过程的直接证据。本文针对以逆冲为主的2013年岷县漳县6.6级地震,基于西秦岭构造区区域水准观测资料,结合GPS速度场和跨断层短水准观测约束,首次尝试3种手段资料的负位错联合反演,获取孕震过程中断裂闭锁的定性定量分析结果。进而联合跨西秦岭北缘断裂、临潭—宕昌断裂的长水准剖面测线在20世纪80年代至2014年多时段速率变化数据,以及相关的跨断层短水准场地观测结果,分析岷县漳县地震前跨断裂垂直形变的动态演变以及震后变化。

1 地壳运动的三维负位错联合模型

1.1 资料说明与模型构建

将西秦岭构造区作为研究区,西秦岭北缘断裂、临潭—宕昌断裂作为反演对象,根据断裂(张培震等,2013)与测点分布划分块体与反演断裂段,见

图1。其中,GPS资料为1999—2007年42个站点的水平运动速度场结果;区域水准资料为王双绪等(2013)所用1999—2006年垂直形变速率值,测点135个,时间仅差1年,可以构建三维联合负位错模型,获得公共时段,即1999—2006年的联合反演结果。另外,西秦岭构造区17处跨断层短水准场地中有5处场地(口子门、四店、柳家沟、奈子沟、毛羽沟)的跨断层情况、场地条件与资料连续性好,正好位于这两条待反演断裂带上,且距区域水准测线很近。1999—2006年5个场地年变速率分别为 -0.13 , 0.04 , -0.34 , 0.10 , -0.02 mm/a(负值、正值分别表示逆断、正断特性),对口子门和四店场地、奈子沟和毛羽沟场地年变速率分别求均值,结果为 -0.05 mm/a, 0.04 mm/a,加上柳家沟场地 -0.34 mm/a的年变速率,分别作为图1中CD、VW、EH段反演时的垂向蠕滑量约束。

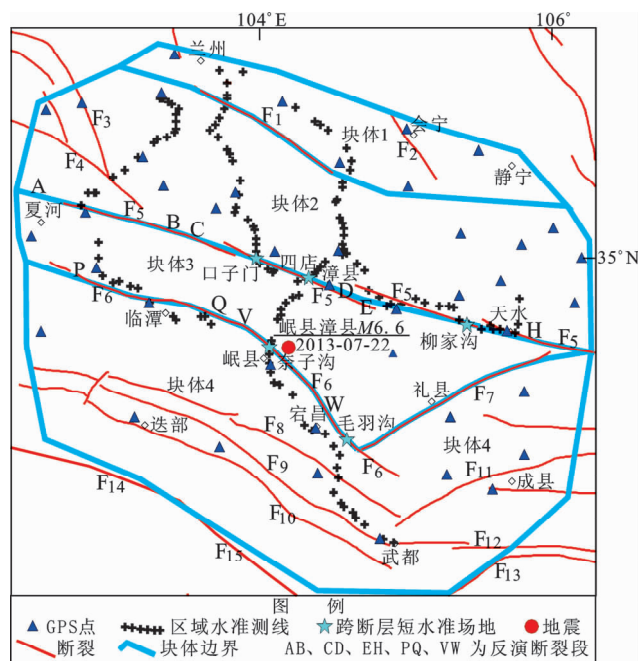


图1 西秦岭构造区地形变测点、断裂及负位错反演所用块体划分、断裂段分布
F₁: 马街山断裂; F₂: 会宁—义岗断裂; F₃: 拉脊山断裂; F₄: 青海南山—循化南山断裂; F₅: 西秦岭北缘断裂; F₆: 临潭—宕昌断裂; F₇: 礼县—罗家堡断裂; F₈: 光盖山—迭山北麓断裂; F₉: 光盖山—迭山南麓断裂; F₁₀: 迭部—白龙江断裂; F₁₁: 成县盆地北缘断裂; F₁₂: 康县北断裂; F₁₃: 文县断裂; F₁₄: 东昆仑断裂带的东段; F₁₅: 塔藏断裂

图1 西秦岭构造区地形变测点、断裂及负位错反演所用块体划分、断裂段分布

Fig. 1 Distribution of observational points for crustal deformation and fractures, division of blocks and fault segments used for inversion of negative dislocation at the Western Qinling Mountains tectonic area

表 1 反演断裂段构造活动信息

Tab. 1 Information of tectonic activities of inverted fault segments

反演断裂段	所属断裂名称	地质信息	倾向	倾角/(°)
AB, CD, EH	西秦岭北缘断裂	左旋兼逆断	SW	40 ~ 80
PQ, VW	临潭—宕昌断裂	逆断兼左旋	NE	50 ~ 70

注：源自陈长云等（2012）、张波等（2012）、何文贵等（2013）以及“基于 GIS 的地震分析预报系统 Mapsis”的“中国断层_邓起东.TAB”文件。

1.2 地壳运动的三维负位错联合模型

针对西秦岭构造区 42 个 GPS 站点、135 个水准测点的年速率值（形变场等值线与速度矢量分布见图 3a、图 4），负位错模型由图 1 所示 4 个块体和 5 条断裂段组成。设 (x_i, y_i) 为 GPS 或水准测点经纬度经高斯投影所得平面坐标，位于第 j ($j=1, 2, 3, 4$) 个块体内， $V_{0x}^j, V_{0y}^j, V_{0z}^j$ 为该块体质心 (x_0^j, y_0^j) 的正东向、正北向及垂向平移量， $\varepsilon_x^j, \varepsilon_{xy}^j, \varepsilon_y^j, \omega^j, t_x^j, t_y^j$ 为在原 Matsu'ura 负位错模型基础上借助 Taylor 展式增加的块体（相对质心）水平面均匀应变（ x 向正应变、剪应变、 y 向正应变、旋转）及倾斜分量（因只在曲面上观测，故仅设倾斜量），那么该测点的水平（GPS 站点）与垂直（水准测点）运动观测方程可表示如下：

$$V_x^i + \gamma_x^i = V_{0x}^j + \varepsilon_x^j \Delta x + \varepsilon_{xy}^j \Delta y + \omega^j \Delta y - \sum_{k=1}^5 F_x^k(x_i, y_i, U_1^k, U_2^k, \delta^k, W^k) \quad (1)$$

$$V_y^i + \gamma_y^i = V_{0y}^j + \varepsilon_{xy}^j \Delta x + \varepsilon_y^j \Delta y - \omega^j \Delta x - \sum_{k=1}^5 F_y^k(x_i, y_i, U_1^k, U_2^k, \delta^k, W^k) \quad (2)$$

$$V_z^i + \gamma_z^i = V_{0z}^j + t_x^j \Delta x + t_y^j \Delta y - \sum_{k=1}^5 F_z^k(x_i, y_i, U_1^k, U_2^k, \delta^k, W^k) \quad (3)$$

式中：等式左边第 1, 2 项分别为观测与改正值； $\Delta x = x_i - x_0^j, \Delta y = y_i - y_0^j$ ；右边求和项的具体函数解析式见 Okada (1985) 的研究， $U_1^k, U_2^k, \delta^k, W^k$ 分别为第 k 个断裂段的锁定走滑量、倾滑量、倾角、宽度。图 2 为 Okada 弹性均匀介质半空间矩形位错模型，并假设断裂延伸至地表。

将 GPS 水平与区域水准资料作为地表位移约束，通过贝叶斯最小二乘法（张希等，2004，2005，2007，2014a）可以反演块体及其边界断裂

段的各项参数（由于地质资料已定断裂轨迹和块体边界，断裂长度、走向、中点坐标不作为参数反演）。反演时先利用只有块体运动与应变、倾斜参量的地壳运动模型，根据最小二乘法确定等式右边前 9 个参数的初值及其先验误差，再通过这几项初值、断裂附近站点观测值反映的块体间相对运动及边界断裂活动状况、表 1 所示断裂活动信息等确定断层参数初值。实际计算中还要扣除正好位于断裂及其延伸线上的测点，这样的反演过程稳定，不会出现奇异问题。

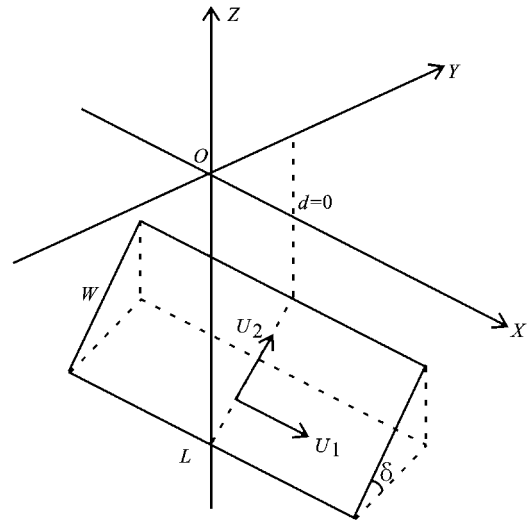


图 2 弹性均匀介质半空间矩形位错模型

Fig. 2 Rectangular dislocation model in half space of elastic homogeneous medium

由于块体相对运动在其边界导致的应变能积聚由负位错描述，可利用年均负位错地震矩 $M_0^k = \mu L^k W^k / \sqrt{(U_1^k)^2 + (U_2^k)^2}$ 来反映断裂段积累能量的大小（ μ 为地壳刚性系数，取 $4 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ），由于真实的初始状态未知，得到的是观测时段的年均增量；并用锁定位错总量（水平面走滑与法向张压、垂向三分量的平方和求根）与断裂两侧块体间差异运动三分量的平方和求根之百分比来度量闭锁程度。由块体水平面的正应变、剪应变及垂向倾斜量，还可以推算水平面的最大剪应变、面应变率以及梯度值 $\sqrt{(t_x^j)^2 + (t_y^j)^2}$ ，以反映块体内部三维运动差异程度。

1.3 模型特点与反演可靠性分析

首先，位错模型能够在三维空间描述断层的几何与运动学特征，由其发展而来的负位错模型

则有反映断裂闭锁状态的特点和优势;考虑到本文研究区有数个块体和断裂段,还要综合多手段资料,故采用相对简化的 Okada 位错模型来反映每条断裂段的总体活动特征与能量积累状况。

其次,对 GPS 与区域水准观测分别进行 Globk 与拟稳平差后,中误差均为 1 mm/a 量级,相差不大,考虑到中误差量值大小与平差方法甚至处理时参数设定等有关,反演前去掉误差较大的测点,再取所用观测值(GPS 与区域水准)等权,能更充分、客观地利用两种手段观测资料来反映地壳三维运动状况。笔者也尝试对两种资料设权比参数,结果显示:若降低 GPS 观测值的权,本来点数就少的 GPS 资料,其参与联合反演的意义势必削弱;若增加 GPS 观测值的权,其拟合效果还不如等权。

反演都有多解性,本文仅反演每条断裂段的锁定走滑量、倾滑量、倾角、宽度 4 个参数。图

3a、图 4 为实际观测所得垂直形变速率场(最小二乘配置拟合所得等值线分布)和水平运动矢量分布。左右旋、正逆断特性由断裂两侧实际观测反映的差异运动所定;断层倾向、倾角根据表 1 由程序加以控制(反演倾角不超出表 1 给出的倾角范围);约束断层深度(断层宽度乘以倾角的正弦函数)小于 25 km(认为锁定作用主要发生在上地壳),对断层宽度也有一定约束。将跨断层短水准观测所得年变速率作为反演的垂向蠕滑量约束,即要求待定倾滑锁定参量在垂向方向的投影小于或等于块体相对垂向变化减去同时段跨断层短水准变化量,即前述 CD, EH, VW 段垂向活动量分别为 -0.05 mm/a , -0.34 mm/a , 0.04 mm/a ,所选场地跨度虽不到 1 km,但确定跨断层,且资料连续性好。虽不能完全排除反演多解性,至少可以获得既符合观测实际,也符合地质信息的相对合理、可靠的解,有一定意义。

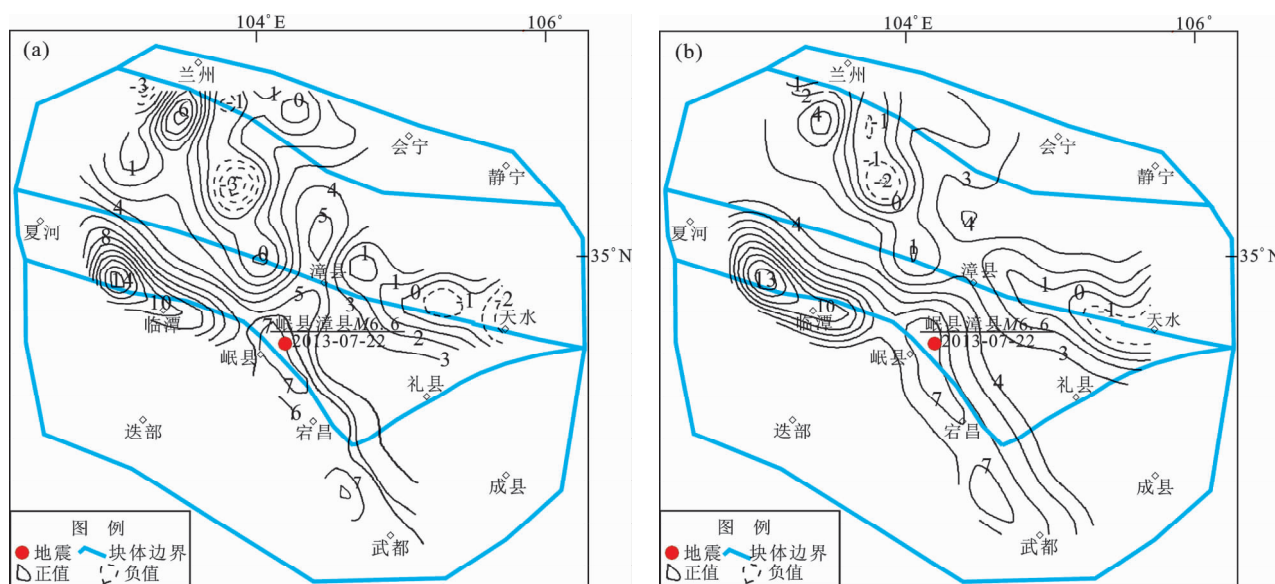


图 3 垂直形变速率观测值 (a) 与负位错模型理论速率值 (b) 分布 (单位: mm/a)

Fig. 3 Distribution of observational values of vertical deformation rate (a) and theoretical rate values of negative dislocation model (b) (unit: mm/a)

2 负位错反演揭示的断裂闭锁特性

图 3、图 4 为负位错模型理论速率场与实际观测所得速率场的对比结果。尽管本文所用的 Okada 位错模型相对简化,但由于块体水平变形包含平移、应变及旋转多个参数,因此图 4 显示模型理论

值与实际观测值较为接近。垂向方向只有平移和倾斜参量,实际观测值和理论值存在差异,但图 3 显示变化趋势基本一致。负位错反演的拟合中误差为 0.85 mm/a , 小于 GPS 站点年速率值的平均中误差 1.28 mm/a 和水准测点年速率值的平均中误差 1.47 mm/a , 左右旋、正逆断特性与表 1 所示地质资料一致,结果相对合理和可靠。

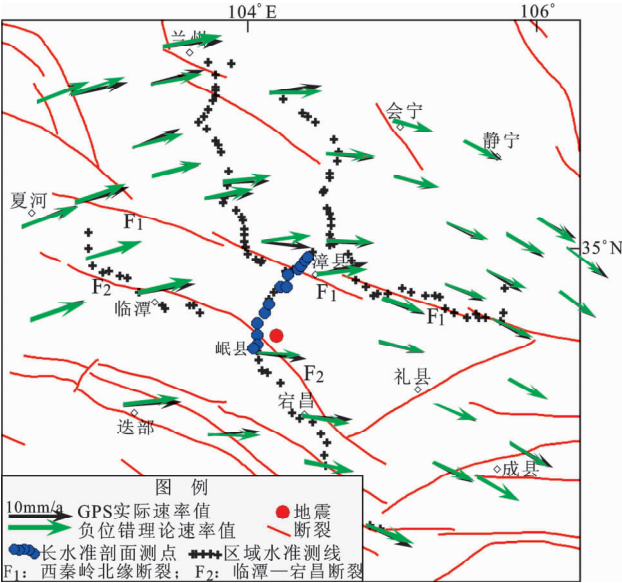


图4 GPS水平运动矢量与负位错模型理论值、长水准剖面测点分布

Fig. 4 Distribution of GPS horizontal movement vector and theoretical values of negative dislocation model, observational points of long-leveling profile

(1) 由表2可见,西秦岭构造区各块体均表现为水平面挤压特征,与青藏高原东北缘近NE向挤压的动力背景一致,最大剪应变率、面应变率和垂向梯度率最高的都是发生岷县漳县6.6级地震的块体3,即西秦岭北缘断裂与临潭—宕昌断裂、礼县—罗家堡断裂所围区域,揭示相对显著的差异运动特征,有利于应变积累和孕育强震(江在森等,2001)。(2)由表3可见,能量积累年增量(用负位错地震矩度量)和闭锁程度(80%以上)较大的是发震构造临潭—宕昌断裂中东段VW段及其东北侧的西秦岭北缘断裂中段CD段;西秦岭北缘断裂西段AB段也反映一定程度闭锁(闭锁程度约50%)。(3)表3显示VW

段闭锁深度18.5 km,与地质调查认为的震源深度(约20 km)接近。

表2 负位错反演所得块体水平应变和垂向梯度率

Tab. 2 Horizontal strain and vertical gradient rate of blocks obtained by negative dislocation inversion

块体	水平面最大剪应变率/ ($10^{-8} \cdot a^{-1}$)	水平面应变率/ ($10^{-8} \cdot a^{-1}$)	垂向梯度率/ ($10^{-8} \cdot a^{-1}$)
1	3.8	-2.8	3.7
2	1.8	-1.2	1.7
3	3.9	-2.9	14.4
4	3.1	-0.1	9.6

注:面应变率负值为挤压、正值为拉张特性。

综合分析,岷县漳县地震前的1999—2006年,GPS、区域水准和跨断层短水准3种地形变手段资料的负位错联合反演显示,震区两侧的西秦岭北缘断裂中段至岷县—宕昌断裂段逆断挤压兼左旋的闭锁最为显著,反映中长期能量积累背景。赵静等(2016)利用单一GPS资料对西秦岭北缘断裂进行了负位错反演,显示1999—2007年西秦岭北缘断裂中—西段相对闭锁,闭锁程度0.6~1.0、深度不小于20 km,与本文反演结果相比,闭锁深度较深,而闭锁特性、位置和程度与本文大体一致。

3 长水准剖面、跨断层短水准观测反映的地震前后垂直形变

尽管西秦岭构造区整网水准复测于2006年截止,但跨前述负位错反演揭示的西秦岭北缘断裂中段和临潭—宕昌断裂中东段闭锁段却有一条测线(图4中蓝点标注),距岷县漳县地震震中最近,且2007,2008,2011和2014年实施过复测,有十几个测点,2006—2008年变化不大,但2008—2011年

表3 负位错反演所得主要锁定断层参数

Tab. 3 Main parameters of locked faults obtained by negative dislocation inversion

断裂段	锁定走滑量/ ($mm \cdot a^{-1}$)	锁定倾滑量/ ($mm \cdot a^{-1}$)	倾角/ ($^{\circ}$)	宽度/ km	深度/ km	年均负位错地震矩/ ($10^{16} Nm \cdot a^{-1}$)	锁定 程度	特性
AB	1.62 ± 0.4	1.54 ± 0.4	SW (70.16 ± 6.6)	13.50 ± 1.3	12.70	11.0	50%	左旋逆断
CD	1.62 ± 0.3	2.76 ± 0.5	SW (71.86 ± 6.9)	14.79 ± 0.8	14.05	19.0	81%	逆断左旋
EH	0.39 ± 0.2	0.22 ± 0.2	SW (57.08 ± 6.6)	14.86 ± 0.8	12.47	2.7	15%	左旋逆断
PQ	0.07 ± 0.1	0.08 ± 0.1	NE (62.48 ± 7.3)	14.99 ± 1.3	13.29	0.6	5%	逆断左旋
VW	1.30 ± 0.4	2.28 ± 0.5	NE (56.75 ± 6.2)	22.08 ± 1.1	18.47	18.4	83%	逆断左旋

变幅明显增大, 且 2008 年观测时间还在汶川 8 级地震后。本文根据该测线上各测点距图 1 中西秦岭北缘断裂 CD 段的垂向距离排序, 获得了 1987—1999 年, 1987—2008 年, 1987—2011 年, 1987—2014 年的长时间尺度的垂直形变速率变化曲线 (图 5a) 和 1987—1999 年、1999—2008 年、2008—2011 年、2011—2014 年 4 个主要时段的垂直形变速率动态变化 (图 5b)。

然而图 4、5 所示剖面在西秦岭北缘断裂以北和岷县—宕昌断裂以南点位太少, 无法进行负位错反演。但从图 5b 还是可以看出, 1987—1999 年、1999—2008 年速率曲线在 $-1.6 \sim 0.6 \text{ mm/a}$ 的较小范围内波动, 图 5a 显示的 1987—2008 年长时间段也如此, 与前述负位错反演所得闭锁特性相符; 然而 2008—2011 年, 西秦岭北缘断裂南侧 20 km 以外加速下降, 西秦岭北缘、临潭—宕昌断裂两侧差异运动明显加快, 最大下降速率达 6.7 mm/a 。尽管由于西秦岭北缘断裂的 SW 向倾斜和临潭—宕昌断裂的 NE 向倾斜, 导致图 5b 显示出 2008—2011 年西秦岭北缘断裂正断加速、临潭—宕昌断裂逆断加速的特性, 但这与杨博等 (2014) 认为的汶川地震后 2009—2011 年岷县漳

县地震的孕震区左旋运动增强、能量积累加速的推测并不矛盾。图 5b 显示 2011—2014 年 (震后一年) 反向抬升、包含同震变形, 图 5a 所示 1987—2014 年最长时间尺度变化则揭示断裂两侧差异运动减小, 有恢复以往变化形态的趋势。陈长云和贺建明 (2016) 根据 GPS 资料分析认为西秦岭北缘断裂漳县段 2009—2013 年较 1999—2007 年滑动速率和主张应变增大, 鉴于岷县漳县地震发生在 2013 年 7 月底, 2009—2013 年 4 年的变化不仅含同震变形, 更应包含震前变化。因此, 图 5b 显示的 2008—2011 年差异运动增强, 及西秦岭北缘断裂局部段落显示正断特性也有了佐证。考虑到图 5 测线长仅 60 km, 不足以反映断裂活动全貌, 相对断裂单侧二三百千米长的 GPS 剖面 (王双绪等, 2013), 测点密度和空间尺度差异较大, 且水准测线仅穿过断裂局部段落, 由于断裂展布的复杂性和可能的分段活动差异, 出现局部段落正断变化也属正常; 加之水准观测实施于地表, 受地形地貌影响, 左旋运动增强也可能引起垂向方向的差异变化, 综合分析可以得出汶川地震后至 2011 年西秦岭北缘断裂两侧三维差异运动增大的结论。

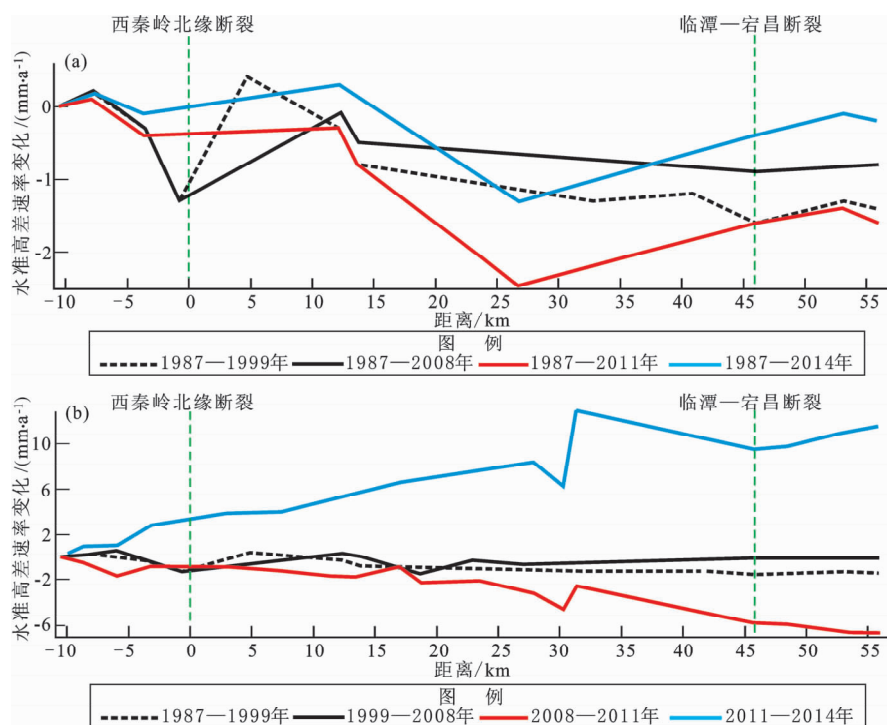


图 5 长水准剖面变形速率曲线

Fig. 5 Velocity curves of deformation of long-leveling profile

毛羽沟、四店场地是对岷县漳县地震有较好短临前兆反映的跨断层短水准场地,震前 4 天这 2 个场地有显著正断突跳(四店场地高达 5.5 mm),于震后转折恢复。两处场地分别位于 1999—2006 年明显闭锁的发震构造南端和西秦岭北缘断裂中段(图 1)。图 6 所示观测曲线反映的是断层下盘测点相对上盘测点的垂向变化,曲线向上为正断特性。毛羽沟场地变化形态与杨晓东(2013)、王双绪(2013)所用曲线形态相反,原因是 2017 年《全国跨断层场地优化改造》项目对该场地地质调查后认为以往的场地图将断裂倾向标反了。需要

说明的是,跨断层短水准场地因测线和观测周期都短,多呈振荡波动状态,两处场地起测 30 多年来,逆断下降(尽管速度缓慢)的时段稍长,即逆断特征略占优势,与地质资料相符,周边永登 5.8 级、景泰 5.9 级地震前观测到显著的变幅加剧或尖点突跳变化。岷县漳县 6.6 级地震前数天出现的正断突跳与逆冲为主的地震错动不一致,可能反映临震前断层解锁甚至小范围区域的亚失稳事件或其产生的扰动影响(这种与大区域 GPS 挤压特性相反的正断变化也不排除与断裂展布复杂性的可能关联)。

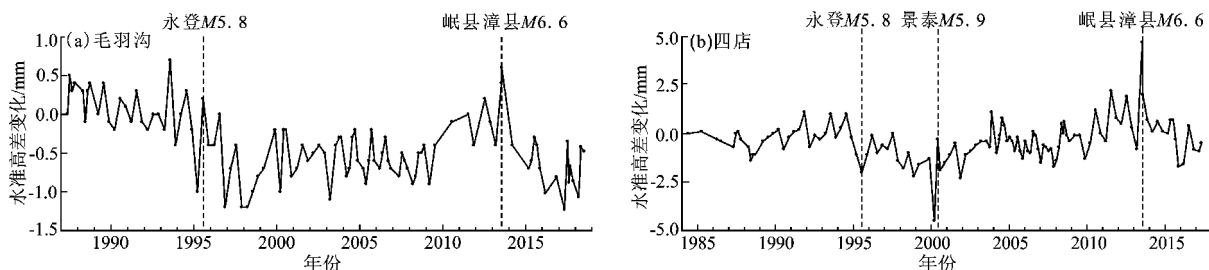


图 6 岷县漳县地震前数天内出现大幅突跳变化的跨断层短水准观测曲线

Fig. 6 Observational curves of cross-fault short-leveling reflecting obvious jumping variation several days before the Minxian-Zhangxian earthquake

4 结论

本文基于 2013 年岷县漳县 6.6 级地震前西秦岭构造区 1999—2007 年 GPS 观测、1999—2006 年区域水准观测所得水平、垂直三维速度场资料,结合跨断层观测数据,首次尝试 3 种手段资料的负位错联合反演,获取孕震过程的能量积累定性定量分析结果;进而联合跨西秦岭北缘断裂、临潭—宕昌断裂的长水准剖面测线 20 世纪 80 年代至 2014 年多时段速率变化数据,以及相关的跨断层短水准场地观测结果,分析岷县漳县地震前跨断层垂直形变的中—短临动态演变及震后变化。

以上分析结果表明:岷县漳县 6.6 级地震前的 1999—2006 年(GPS、区域水准资料公共时间段),震区所在块体即西秦岭北缘断裂与临潭—宕昌断裂之间水平面最大剪应变率、挤压性质的面应变率、垂向梯度率都较大,与构造和动力学背景一致的三维差异运动明显,有利于能量积累和孕育强震;而西秦岭北缘断裂中—西段尤其是包

含漳县地区的断裂中段、临潭—宕昌断裂中东段,即发震构造的主断裂段闭锁明显,具有挤压逆断兼左旋特性,显示中长期能量积累背景。而汶川地震后至岷县漳县地震前 2 年的 2008—2011 年,跨西秦岭北缘断裂中段漳县地区和临潭—宕昌断裂中东段岷县地区的长水准剖面显示断裂两侧差异运动增强,与 GPS 资料一致;震前数天,位于西秦岭北缘断裂中段闭锁段的四店短水准场地、临潭—宕昌断裂闭锁段南端的毛羽沟短水准场地甚至观测到最高达 5.5 mm 的短临突变异常;震后跨断层长水准剖面、短水准场地呈现的垂向差异运动均大幅减弱,呈恢复趋势。

参考文献:

- 陈长云,贺建明. 2016. 西秦岭北缘断裂分段运动变形特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 36(9): 784–788.
- 陈长云,任金卫,孟国杰,等. 2012. 巴颜喀拉块体北东缘主要断裂现今活动性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 32(3): 27–30.
- 何文贵,郑文俊,王爱国,等. 2013. 临潭—宕昌断裂新活动特征与岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震关系研究[J]. 地震工程学报, 35(4): 751–760.

- 江在森,丁平,王双绪,等. 2001. 中国西部大地形变监测与地震预测[M]. 北京:地震出版社.
- 王双绪,蒋锋云,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.
- 伍吉仓,许才军. 2002. 利用GPS资料反演华北块体运动的负位错模型参数[J]. 武汉大学学报(信息科学版),27(4):352–357.
- 杨博,朱爽,杨国华,等. 2014. 岷县漳县 M_s 6.6地震前区域形变场的特征[J]. 地震,34(2):115–123.
- 杨晓东,李宁,刘立伟,等. 2014. 2013年甘肃岷县漳县 M_s 6.6地震跨断层形变异常研究[J]. 地震研究,37(4):578–587.
- 张波,何文贵,袁道阳,等. 2012. 西秦岭北缘断裂带西端晚第四纪活动特征及其西延问题[J]. 地震,32(1):136–143.
- 张培震,邓起东,张竹琪,等. 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程[J]. 中国科学:地球科学,43(10):1607–1620.
- 张希,崔笃信,郝明,等. 2014a. 全国主要构造区近期应变积累动态演化研究[J]. 地震工程学报,36(1):61–68.
- 张希,江在森,王琪,等. 2005. 青藏块体东北缘弹性块体边界负位错反演与强震地点预测[J]. 地震学报,27(6):620–629.
- 张希,江在森,王双绪,等. 2007. 青藏块体东北缘GPS与水准资料的三维负位错联合反演[J]. 国际地震动态,343(7):61–66.
- 张希,李心然,唐红涛. 2014b. 青藏块体东北缘断层形变综合指标异常与岷县漳县6.6级等强震关系[J]. 地震研究,37(4):572–577.
- 张希,王庆良,唐红涛,等. 2011. 汶川地震孕震背景与同震变化的铲形断层位错模拟[J]. 地球学报,32(2):189–194.
- 张希,张四新,王双绪. 2004. 昆仑山口西8.1级地震前后地壳垂直运动的负位错模型[J]. 地震研究,27(2):153–158.
- 赵静,牛安福,李强,等. 2016. 陇西块体周边断层闭锁程度与滑动亏损特征研究[J]. 地震研究,39(3):352–358.
- 郑文俊,袁道阳,何文贵,等. 2013. 甘肃东南地区构造活动与2013年岷县—漳县 M_s 6.6级地震孕震机制[J]. 地球物理学报,2013,56(12):4058–4071.
- 朱爽,周伟. 2015. 甘肃岷县漳县6.6级地震前后区域地壳形变分析[J]. 地震工程学报,37(3):731–738.
- Matsu'ura M, Jackson D D, Cheng A. 1986. Dislocation model for aseismic crustal deformation at Hollister, California[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 91(B12):12661–12674.
- Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 75(4):1135–1154.

Analysis of Crustal Deformation Joint Inversion for Preparation and Occurrence Process of the 2013 Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake

ZHANG Xi, ZHANG Sixin, QIN Shanlan, JIA Peng, LI Ruisha

(The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract

Based on observational data of the regional leveling and long-distance leveling profiles at the Western Qinling Mountains tectonic area, combined with the GPS velocity field constraints and the cross-fault short-leveling observational data, we analyzed the middle and long term locking background of the related fractures before the 2013 Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake, and discussed the middle-short term dynamic and aftershock variation, aided by the first associated three-dimensional negative dislocation inversion. The results show that, the maximum shear strain rate, compressional surface strain rate and vertical gradient rate of the block between the West Qinling Mountains north edge fault and Lintan-Dangchang fault were larger during 1999 and 2007 before the earthquake. The three-dimensional difference movement, which was consistent with the tectonic and dynamic background, was obvious, which was beneficial to the accumulation of energy and the occurrence of strong earthquake. The middle segment of the West Qinling Mountains north edge fault containing the Zhangxian area, and the middle-eastern segment of Lintan-Dangchang fault which is the main fracture of seismic tectonic, displayed obvious locking feature, and the compressive reverse and left-lateral strike, showed the background of the medium and long term energy accumulation. Moreover, the long-distance leveling profile from the Zhangxian segment of the West Qinling Mountains north edge fault to the Minxian area of the middle-eastern segment of the Lintan-Dangchang fault, showed that the difference movement of the West Qinling Mountains north edge fault enhanced in two years before this earthquake, was consistent with that of the GPS observations. Several days before the earthquake, Sidian and Maoyugou sites located at these two faults reflected large short-impending suddenly change abnormality; after the earthquake, the vertical differential movement decreased and recovered.

Keywords: joint 3D-negative dislocation inversion; the Minxian-Zhangxian earthquake; locking of fracture; dynamic variation of fracture activities