

华山山前断裂中段全新世垂直活动速率的重新厘定^{*}

许建红, 惠旭辉, 何斯渊

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 全新世以来, 距今越近, 华山山前断裂中段的垂直活动速率越大, 甚至出现跳跃式的增长。重新梳理该断裂带 40 多处断层陡坎测量结果, 发现这种不合理应与 1556 年华县 8 $\frac{1}{4}$ 级地震有关。通过减掉 1556 年华县大地震的同震位移量, 消除了这次大震的同震位移对活动速率计算值的放大作用, 而且不同时期地貌陡坎的计算结果均表现出了很好的稳定性, 说明这种处理是必要和有效的。最后, 应用上述处理方法得到了华山山前断裂中段全新世以来较为可靠的平均垂直活动速率为 $(1.56 \pm 0.2) \text{ mm/a}$ 。

关键词: 华山山前断裂; 全新世垂直活动速率; 正断层

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)03-0359-06

0 引言

断层活动速率是指某一时段活动断裂两盘相对运动的平均速率, 反映了一条断裂应变能释放的平均速率以及长期平均活动水平, 可用于比较不同断裂的活动水平。活动速率还与同震位移一起用于估计强震或大地震的平均复发间隔, 进而估计最晚地震的离逝率与潜在地震的发生概率。因此, 活动速率是断层活动性研究及断层地震危险性评价的一个重要参数 (邓起东, 闻学泽, 2008)。美、日等国的地质学家分别从 20 世纪 60 年代末至 70 年代中期开始, 通过断错地貌测量与相应地貌面沉积物年代测试来估计活动断裂的平均活动速率 (邓起东, 闻学泽, 2008), 现今也有通过其它手段 (刘智荣等, 2013; 周海涛等, 2013) 获取断层的活动速率。我国从 80 年代开始将活动断裂的平均活动速率研究作为中国活动构造定量研究的重要内容 (邓起东, 闻学泽, 2008)。

针对华山山前断裂中段全新世以来的平均垂直活动速率, 很多学者 (李祥根, 冉勇康, 1983; 张安良等, 1989; 李永善, 1992; 杨源源等, 2012) 进行过研究, 但发现所取研究时间段越短, 即距今时间越近, 计算出该段的活动速率越大。其中, 距今 10 000 年以来, 断裂的平均垂直活动速率为 $1 \sim 2 \text{ mm/a}$ (李祥根, 冉勇康, 1983); 距

今 6 000 年以来, 前人计算的结果分别为 $0.6 \sim 2.0 \text{ mm/a}$ (张安良等, 1989)、 2.4 mm/a (李永善, 1992)、 1.485 mm/a (杨源源等, 2012) 等; 距今 2 700 年以来, 张安良等 (1989) 计算的结果为 $0.5 \sim 2.3 \text{ mm/a}$, 距今 2 000 年以来, 杨源源等 (2012) 计算的结果为 3.73 mm/a ; 而距今 710 年 (被错断的最新一期地貌面年龄) 以来, 《西安地裂及渭河盆地活断层研究》 (李永善, 1992) 表 5.1 中计算出的活动速率显示, 其平均值高达 4.78 mm/a 。同一条断裂, 自全新世以来, 只是选取的距今时间段不同而计算出的活动速率也不同, 且差距很大; 而且距今越近, 计算出的活动速率越大, 甚至出现跳跃式的增长, 说明这种不合理与距今较近的大地震活动有关, 该地震应是 1556 年华县 8 $\frac{1}{4}$ 级大地震。

本文以李永善 (1992) 对断裂带渭南塬前及华山山前 40 多处断层陡坎及其地貌面年代所做的系统性工作的数据为基础, 对此不合理的现象做出解释, 并给出华山山前断裂中段全新世以来的平均垂直活动速率。

1 全新世以来的断错地貌

华山山前断裂是渭河盆地南界断裂的东段, 东起潼关, 西止于蓝田流峪口。它在华县以东呈东西走向, 经潼关向东可继续延至灵宝附近, 与

^{*} 收稿日期: 2015-03-25.

基金项目: 中国综合地球物理场观测——大华北地区项目 (201508009) 资助.

北东向的三门峡—灵宝断裂相交；而在华县以西则向南西方向延伸至秦岭山前，与秦岭北缘断裂相接，平面上呈舒缓波状，长约 100 km（国家地震局“鄂尔多斯周缘活动断裂系”课题组，1988），如图 1 所示。倾向 NW、N，倾角 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ ，为一典型正断层。华山山前断裂中段从华县石堤峪口至华阴杜峪口，走向 NEE—EW，长约 40 km。

1556 年华县 $8\frac{1}{4}$ 级地震破坏严重，人口死亡数量是地震史上有记载以来最多的一次（贺明静，1986），极震区（IX 度及其以上烈度区）范围包括今陕西渭南、华县、华阴和山西永济四县（王景明，1980），长轴方向总体呈 NEE 向。多数研究者认为，这次大震发生在华山山前断裂带上或与该断裂相关（郭增建，1957；韩恒悦等，1987；雷姚琪，张安良，1985；国家地震局“鄂尔多斯周缘断裂系”课题组，1988；张安良等，1989；李永善，1992；环文林等，2003；原廷宏，冯希杰，2010；杨源源等，2012），只有个别研究者（王景明，1980；侯建军，1985）提出了不同看法。根据野外考证（李永善，1992），沿渭南塬前及华山山前赤水河至杜峪等峪口的最新阶地（一般相当于 $T_0 \sim T_1'$ ）或最新洪积扇地形面，该期地貌面形

成于元—明代，普遍存在 2~4 m 高的断层陡坎，与历史地震的极震区位置、长轴方向（原廷宏，冯希杰，2010）和烈度等震线特征对比，它们只可能是 1556 年华县大地震的产物，该地表破裂带全长约 50 km，其中主要地表破裂位于华山山前断裂中段，即华县石堤峪口—华阴杜峪口。

华山山前断裂中段全新世以来的断裂活动在很多冲沟沟口及断裂带上都可以观察到。在野外地质剖面上可以看到清晰的正断层垂直错断晚更新世至全新世地层。在较大的峪口，全新世或晚更新世以来的数级阶地、洪积扇或多级侵蚀台面均被断层垂直错断，形成阶梯式断层陡坎。陡坎的高度与所在阶地年龄成正比，其中有的漫滩阶地也被错断。在多数峪口附近，可以看到断层多期活动在下降盘形成洪积扇叠加地貌，其中以杜峪口最为典型，以洪积扇的叠置关系可以划分出了 3~4 期洪积扇活动，考古发现杜峪口这 3 期洪积砾石层的顶部分别含有以红色陶片为主的仰韶文化（5 000~7 500 a），以灰色陶片为主的龙山文化（4 000~5 000 a）及含元代瓷片的元代文化（620~710 a）。在龙山期洪积扇上还发育较低一级侵蚀台面，应为周秦期的地貌面，反映了华山山前断裂中段全新世以来主要有 4 期活动（李永善，1992）。

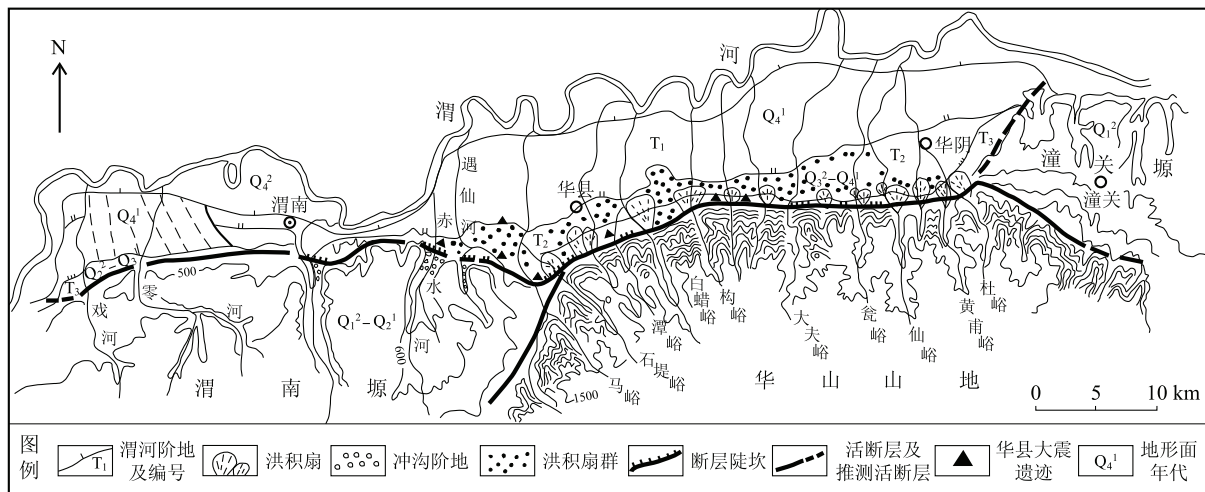


图 1 华山山前断裂带地貌图（李永善，1992）

Fig. 1 Geomorphology map along the Huashan Piedmont Fault (Li, 1992)

2 平均活动速率计算存在的问题分析

李永善（1992）对渭南塬前及华山山前断裂

上 40 余处广泛分布的各种类型的断层陡坎进行了野外跨断层测量及断层陡坎形成年代的考古样分析，取得了迄今为止最为系统、详细的华山山前断裂中段主要断层陡坎的测量结果。其中断层陡坎的测量，为了减小误差，作了如下校正：一是

跨断层陡坎进行长尺度测量，以恢复上、下原始地形面的形态，减少人工影响；二是延伸上、下原始地形面至断层出露处或断层陡坎中点处的高度作为垂直位移，以减少上升盘的剥蚀和下降盘的堆积所引起的误差（卞菊梅，1995）。其中地貌面年代的确定利用了断裂带附近地层中丰富的文物碎片，对比了考古文物与地层、地貌面形成年代之间的关系，并作了少量 ^{14}C 样予以验证（李永善，1992）。因此，本文将直接引用《西安地裂及渭河盆地活断层研究》（李永善，1992）中表5.1和图5.21中的数据，只做梳理，不做任何修改。

表1给出了不同时期地貌面的陡坎高度和地貌面年龄的平均值，并计算出了相应的垂直活动速率。该数据与《西安地裂与渭河盆地活断层研究》（李永善，1992）图5.21中的数据是一致的，其中平均陡坎高度11.8、10.11、7.3及3.25 m是平均分布时限内位移的加权平均值，笔者推测权重

可能与《西安地裂及渭河盆地活断层研究》（李永善，1992）表5.1中的可信度有关。若按常用方法，用陡坎高度除以地貌面年龄来计算，距今6500年来，断裂的平均垂直活动速率为1.82 mm/a，即坐标轴0点至该位移-时间点斜线的斜率 $\tan(\theta_4)$ ；距今4500年以来为2.25 mm/a，即 $\tan(\theta_3)$ ；距今2600年以来为2.81 mm/a，即 $\tan(\theta_2)$ ；距今680年以来为4.78 mm/a，即 $\tan(\theta_1)$ ，这样才能得到图2中的平均斜率（平均位移速率） $K \approx 2.9$ mm/a。

从根据不同时期的地貌面计算出的垂直平均活动速率可以看出， $4.78 \text{ mm/a}(680 \text{ a}) > 2.81 \text{ mm/a}(2600 \text{ a}) > 2.25 \text{ mm/a}(4500 \text{ a}) > 1.82 \text{ mm/a}(6500 \text{ a})$ ，可见距今越近、计算出的垂直活动速率越大，甚至出现跳跃式的增长。从图2也可以看出， $\tan(\theta_1) > \tan(\theta_2) > \tan(\theta_3) > \tan(\theta_4)$ ，同样说明距今越近，这种方法所导致的活动速率越大。

表1 华山东前断裂中段不同时期地貌面错断数据

Tab. 1 Data of landform surface of the middle segment of Huashan Piedmont Fault in different stages

分期地貌面	平均陡坎高度/m	平均地貌面年龄/a	垂直活动速率/mm·a ⁻¹
仰韶期	11.8 ± 3.1	6500 ± 500	1.82 ± 0.50
龙山期	10.11 ± 1.8	4500 ± 500	2.25 ± 0.47
周秦期	7.3 ± 2.1	2600 ± 500	2.81 ± 0.97
元明期	3.25 ± 0.5	680 ± 200	4.78 ± 1.59

注：平均陡坎高度误差采用标准误差；平均地貌面年龄误差由图2给出；垂直活动速率的误差由误差传播定律确定。

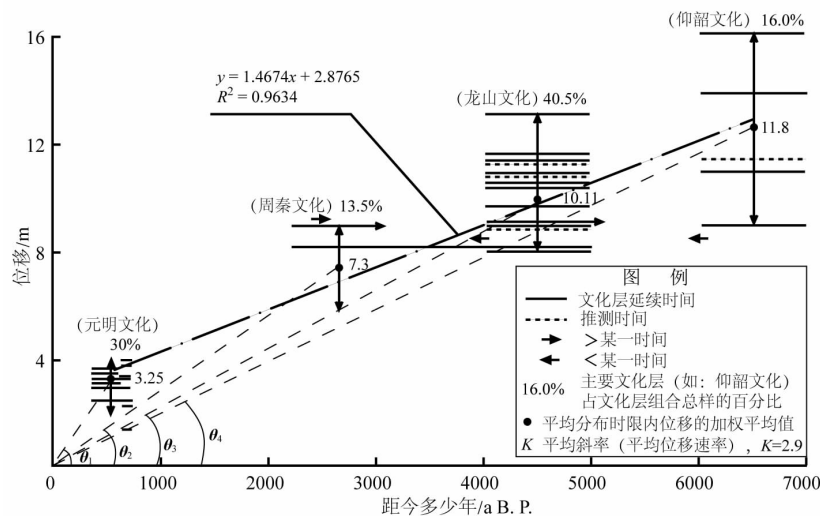


图2 断裂带位移-时间分布图（据李永善，1992）

Fig. 2 Distribution of offset-time along Huashan Piedmont Fault (modified from Li, 1992)

分析出现该不合理现象的原因,发现前人在计算该断裂中段平均垂直活动速率时习惯性地采用陡坎高度除以地貌面年龄的方法,忽略了离逝时间很短(距今约 450 a)的 1556 年华县大地震对垂直活动速率的放大作用。也就是说,1556 年的华县 8 $\frac{1}{4}$ 级地震使之前的断层陡坎高度又平均增加了 3.25 m,但前人计算时并没有在时间项上也增加一个可以形成 3.25 m 陡坎的时间(或称复发周期)。

以下按不同时期地貌面的平均值来计算活动速率,并说明上述问题:

(1) (680 \pm 200) a B. P. 的地貌面。在 1556 年华县大地震中被错断,形成平均高度为 (3.25 \pm 0.5) m 的陡坎。实际上应该用单次地震事件的陡坎高度除以大震复发周期,才能反映断裂带较为真实的平均垂直活动速率,即 3.25 m/2 000 a \approx 1.63 mm/a (华山山前断裂带大震的复发周期约为 2000 a)。笔者认为形成如此规模的陡坎(或地震)不仅需要足够长的积累时间(复发周期),还与 1556 年的华县大地震这种突发事件恰好被 680 a B. P. 这一期非常年轻的地貌面记录到了有关。

(2) (4 500 \pm 500) a B. P. 的地貌面,平均垂直位移量为 (10.11 \pm 1.8) m,应为断层多次活动的结果。计算断裂带平均垂直活动速率较为合理的方法是我们可以用 680 a B. P. 到 4 500 a B. P. 的平均活动速率来代表断裂带 4 500 a B. P. 以来的平均活动速率,体现在计算方法上就是对位移和时间项同时进行处理,即 (10.11 - 3.25) m/(4 500 - 680) a \approx 1.80 mm/a。上述方法的本质是计算两点之间的斜率,在实际应用中需要知道的参数较多。考虑到 3.25 m 对位移项的影响为 32%,680 a 对时间项的影响仅为 15%,且 4 500 a B. P. 年龄本身就存在 \pm 500 a 的误差,因而本文也可以忽略时间项的影响,只对位移项进行校正,即用陡坎的平均高度 10.11 m 减去 1556 年华县大地震错断的平均垂直位移 3.25 m,这样断裂带 4 500 a B. P. 以来的平均垂直活动速率为 (10.11 - 3.25) m/4 500 a \approx 1.52 mm/a。以下计算出于同样的考虑。

(3) (2 600 \pm 500) a B. P. 的地貌面,位移校正结果为 (7.3 - 3.25) m/2 600 a \approx 1.56 mm/a。

(4) (6 500 \pm 500) a B. P. 的地貌面,考虑到其距今时间足够长,对 1556 年华县大地震的同震位移具有一定的“稀释”作用,且该时期的陡坎侵蚀破坏也较为严重,所以不再对其进行校正,

直接计算得出断裂带 6 500 a B. P. 以来的平均活动速率为 11.8 m/6 500 a \approx 1.82 mm/a。

从以上初步的计算可以看出处理后的结果保持了非常好的稳定性。另外,通过对不同时期地貌面错断数据,即 (3.25 m, 0.68 ka)、(7.3 m, 2.6 ka)、(10.11 m, 4.5 ka) 和 (11.8 m, 6.5 ka) 这 4 组数进行线性回归(图 2),结果表明断裂带陡坎高度与地貌面年龄之间存在很强的线性相关性(相关系数 $R^2 \approx 0.96$),回归曲线的斜率约为 1.47,也与上述结果比较接近,说明这种处理是有效的和必要的。

3 断裂带中段全新世垂直活动速率

通过前文的分析,可以看出直接用陡坎高度除以地貌面年龄的方法来计算华山山前断裂带中段全新世以来的垂直活动速率会严重偏离事实,因为离逝时间很短的 1556 年华县大地震所产生的垂直位移直接增加了之前陡坎的高度,但在时间项上忽视了该位移增加量所需要的时间。下文采用 (4 500 \pm 500) a B. P. 的地貌面陡坎数据,并使用校正位移的方法计算断裂带中段全新世以来的平均活动速率主要基于以下考虑:

(1) 同震位移可由野外实际测量得到,而复发周期则是由同震位移除以活动速率或采用其它方法计算得到的,因此采用校正位移的方法。

(2) 4 500 a B. P. 左右的地貌面陡坎数据相对最多、最全面,在断裂带上分布也较为均匀。

(3) 4 500 a B. P. 时间相对足够长,足以包含 2 次(或 2 次以上)地震的发生,且剔除 1556 年华县大地震后,可认为在该段时间上地震的分布是相对均匀的。

(4) 利用同一点或距离最近点的元明期地貌面错断数据来表示该点 1556 年华县大地震的同震位移并用于位移校正。

(5) 计算中去掉了位移量过大的 3 个值和过小的 1 个值,这样参数便集中地分布于某一置信区间内,并保证了结果的可靠性。

具体计算如表 2 所示,计算结果表明断裂带在 4 500 a B. P. 以来平均垂直活动速率为 (1.56 \pm 0.2) mm/a,与线性回归结果 1.47 mm/a 比较接近,该值可以用来代表断裂带中段全新世以来的平均垂直活动速率。

表2 重新厘定的华山山前断裂中段不同地点全新世垂直活动速率

Tab. 2 Collating the vertical slip rate in different place of the middle segment of Huashan Piedmont Fault in Holocene

河流	龙山期地貌面 错断位移/m	相邻地点元明期地 貌面错断位移/m	位移差/m	地貌面年龄 4 500 a B. P. 的 垂直活动速率/mm · a ⁻¹
马峪	11.4	3.2 (马峪)	8.2	1.82
太平峪	9.7	3.3 (潭峪)	6.4	1.42
潭峪	14	3.3 (潭峪)	10.7	—
小夫峪	12.7	3.3 (潭峪)	9.4	—
白腊峪	11	4 (瓶峪)	7	1.56
方山峪	9	4 (瓶峪)	5	—
罗夫峪东	8.6	3.4 (葱峪)	5.6	1.24
七水沟	12	3.4 (葱峪)	8.6	1.91
恶野沟	11	3.5 (瓮峪)	7.5	1.67
九峪	10.4	3.5 (瓮峪)	6.9	1.53
瓮峪	10.7	3.5 (瓮峪)	7.2	1.60
台峪	9	3 (好汉沟)	6	1.33
黄甫峪	11.4	3.5 (杜峪)	7.9	1.76
西鞍沟	9.2	3.5 (杜峪)	5.7	1.27
杜峪	13.2	3.5 (杜峪)	9.7	—
平均值				1.56 ± 0.2

注：误差采用标准误差。

4 讨论和结论

通过对华山山前断裂带中段不同时期地貌面错断形成的陡坎数据进行分析计算，发现如果直接采用陡坎高度除以地貌面年龄的简单办法来计算断裂带的垂直活动速率，会导致距今越近、计算出的活动速率越大，甚至会出现跳跃式增长的不合理现象。产生这一问题的根本原因是陡坎高度在1556年华县大地震中被再次增加了，但时间项上没有考虑陡坎高度产生这一增量所需的时间（这一时间应与复发周期有关）。

在不同时期地貌面断错数据样本足够多的情况下，采用线性回归仍是最佳的办法，但数据较少时，对于离逝时间较短的发震构造，计算其活动速率时必须要考虑最近的一次大震对计算是否会产生影响，并对这种影响进行合理的处理。活动速率 $S = (O_1 - O_2) / (T_1 - T_2)$ ，其中 O_1 、 O_2 为不同时期地貌面的位错量； T_1 、 T_2 为相应的地貌面年龄。以下2种情形可对该公式进行适当简

化：（1）当 $O_1 \gg O_2$ 、 $T_1 \gg T_2$ 时，公式可简化为 $S \approx O_1 / T_1$ ，对应实际应用，即可直接用较老且较大的位错量除以它的地貌面年龄来近似代表断裂的活动速率；（2）当 $O_1 > O_2$ 、 $T_1 \gg T_2$ 时，公式可简化为 $S \approx (O_1 - O_2) / T_1$ ，对应实际应用，即当 T_2 较小，对时间项的影响也较小时，可以用该简化公式来近似计算断裂的活动速率。

对于华山山前断裂带中段，利用 680 a B. P. 和 4 500 a B. P. 两期地貌陡坎来计算断裂的垂直活动速率时，680 a 对于时间项的影响仅为 15%，且 4 500 a B. P. 年龄本身就存在 ± 500 a 的误差，而 3.25 m 对位移项的影响为 32%，可以使用简化公式 $S \approx (O_1 - O_2) / T_1$ 。即通过减掉 1556 年华县大地震的位移量，消除了这次大震的同震位移对活动速率计算值的影响，不同时期地貌面的计算结果表现出了很好的稳定性，计算得到的华山山前断裂中段全新世以来较为可靠的平均垂直活动速率为 $(1.56 \pm 0.2) \text{ mm/a}$ ，这一结果与通过对不同时期地貌面错断数据进行线性回归得到的 1.47 mm/a 比较接近，说明该方法是必要和有效的。

参考文献:

- 卞菊梅. 1995. 地形面方法在渭河盆地活断层研究中的应用[J]. 西安地质学院学报, 17(1): 61–68.
- 邓起东, 闻学泽. 2008. 活动构造研究 – 历史、进展与建议[J]. 地震地质, 30(1): 1–30.
- 郭增建. 1957. 1556 年 1 月 23 日关中大地震[J]. 地球物理学报, 6(1): 59–68.
- 国家地震局"鄂尔多斯周缘活动断裂系"课题组. 1988. 鄂尔多斯周缘活动断裂系[M]. 北京: 地震出版社.
- 韩恒悦, 贺明静, 李永善. 1987. 渭河盆地东部地区的活断层[J]. 地震地质, 9(2): 85–90.
- 贺明静. 1986. 华县大地震与断裂活动[J]. 地震研究, 9(4): 427–432.
- 侯建军. 1985. 1556 年陕西华县大地震的地震地质条件[J]. 西北地震学报, 7(1): 66–74.
- 环文林, 时振梁, 李世勋. 2003. 对 1556 年 8 $\frac{1}{4}$ 级大地震震中位置和发震构造的新认识[J]. 中国地震, 19(1): 20–32.
- 雷姚琪, 张安良. 1985. 关于渭河盆地的活动断裂、断裂深度及孕震的断裂深部展布条件[J]. 西北地震学报, 增刊 1: 75–80.
- 李祥根, 冉勇康. 1983. 华北北坡及渭南塬前活断层[J]. 华北地震科学, 1(2): 10–18, 9.
- 李永善. 1992. 西安地裂及渭河盆地活断层研究[M]. 北京: 地震出版社.
- 刘智荣, 黄静宜, 洪顺英等. 2013. 基于 PS-InSAR 技术的丽江断裂形变监测研究[J]. 地震研究, 36(3): 319–323.
- 王景明. 1980. 1556 年陕西华县大地震的地面破裂[J]. 地震学报, 2(4): 430–437.
- 杨源源, 高战武, 徐伟. 2012. 华山山前断裂中段晚第四纪活动的地貌表现及响应[J]. 震灾防御技术, 7(4): 335–347.
- 原廷宏, 冯希杰. 2010. 一五五六年华县特大地震[M]. 北京: 地震出版社.
- 张安良, 米丰收, 种瑾. 1989. 1556 年陕西华县大地震形变遗迹及华山山前断裂古地震研究[J]. 地震地质, 11(3): 73–81.
- 周海涛, 周伟, 杜雪松等. 2013. 利用跨断层形变资料研究近期唐山断裂活动性[J]. 地震研究, 36(3): 286–291.

Collation of the Vertical Slip Rate of Middle Segment of Huashan Frontal Fault Zone in Holocene

XU Jianhong, HUI Xuhui, HE Siyuan,

(The Second monitoring and Application Center, CEA, Xian 710054, Shaanxi, China)

Abstract

There exist the unreasonableness that the vertical slip rate of the Huashan Frontal Fault jumpily becomes higher since Holocene when the period is shorter from present. Through reviewing the measuring results of more than 40 fault scarps of the Huashan Frontal Fault, we found that these unreasonable results are close related to the latest earthquake, Huaxian 8 $\frac{1}{4}$ earthquake in 1556. Subtracting the coseismic displacement of the Huaxian 8 $\frac{1}{4}$ earthquake in 1556, we eliminated its amplification effect on the calculated value of activity slip velocity. The calculated result of fault scarps in different periods show steady, which indicates that this processed method is necessary and effective. Finally, we applied this processed method to get a more reliable average value of vertical activity velocity of about 1.56 mm/a in the middle section of Huashan Frontal Fault zone since Holocene.

Key words: Huashan Frontal Fault Zone; Holocene vertical slip rate; normal fault