

# 汉中盆地内梁山南缘断裂的活动性分析 ——以汉江大堤位置为例\*

李晓妮, 冯希杰, 任 隽, 李高阳, 李 苗

(陕西省地震局, 陕西 西安 710068)

**摘要:** 为获取梁山南缘断裂在汉江大堤上断点的具体位置、近地表断错、上断点埋深、最新活动时代及滑动速率等信息, 对其进行了浅层地震勘探和钻孔联合剖面探测。浅层地震解译结果显示断点两侧第四纪以来的12组反射波全被垂向错断, 最大错距约370 m, 影响带宽度约400 m, 影响带内地层起伏强烈。钻探结果反映主断层晚更新世中期的最大错距约28 m, 晚期错距约11 m, 平均滑动速率为0.38~0.49 mm/a, 上断点埋深为5~13 m, 属于晚更新世晚期活动断层。

**关键词:** 梁山南缘断裂; 浅层地震探测; 钻探; 活动速率; 晚更新世

**中图分类号:** P315.24

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2012)03-0341-06

## 0 引言

2008年5月12日汶川8.0级特大地震发生在龙门山断裂带上, 在中央断裂上形成了240余公里的地表破裂带, 在前山断裂上也形成了70余公里的地表破裂(徐锡伟等, 2008)。破裂沿着龙门山断裂和青川断裂向北东方向扩展, 止于汉中盆地南侧, 并对汉中盆地造成了一定的破坏(张宇翔, 袁志祥, 2010; 张希等, 2008)。青川断裂的活动主要以右旋走滑为主, 走滑分量较大, 错断多条河流1~2 km, 而汉中盆地是青川断裂尾部的变形构造, 吸收了青川断裂大部分的变形分量(樊春等, 2008)。汉中盆地内部需要通过断层活动释放部分能量以达到平衡状态, 所以对汉中盆地内部断裂的活动性调查尤为重要。我们在灾后恢复重建中对汉中盆地内部的6条主要断裂进行了活动性调查, 结果显示只有梁山南缘断裂属于晚更新世以来的活动断层。梁山南缘断裂向东延伸穿过汉中市, 如果该断裂的活动程度较高, 则可能对汉中市的城市发展构成潜在威胁。鉴于此, 我们对梁山南缘断裂进行了详细的地表地质调查, 浅层地震勘探和钻孔联合剖面探测, 以揭示梁山南缘断裂的活动情况。

## 1 梁山南缘断裂研究简述

汉中盆地是第四纪以来形成的断陷盆地, 位于秦岭南侧, 汉江穿过盆地中间, 盆地内发育第四纪冲积、洪积及残坡积等多种沉积类型, 沉积物厚度变化大、相变复杂。梁山南缘断裂是汉中盆地内部的一条主要活动断裂, 自西南向东北沿着梁山南麓分布, 途经宁强县城西北、漆树坝、杨家湾、岳家湾、玉泉寺、梁山镇南, 通往汉中市, 长约22 km, 走向 $70^{\circ}\sim 90^{\circ}$ , 倾向南东, 倾角大于 $50^{\circ}$ , 最新活动性质以正断层为主, 兼右旋走滑。该断裂控制新集—南郑盆地的北边界, 第四纪活动强烈, 在卫星影像上显示出清晰的线性特征。

梁山南缘断裂以梁山镇为界分为东西两段, 西段断层地貌表现为出露清晰的断层崖和断层陡坎, 局部也有断层槽地, 东段为汉中市覆盖的隐伏区, 错断情况不清楚。为了查明梁山南缘断裂是否向东延伸穿过汉中市, 我们在汉中市南北方向布设了5条浅层地震测线, 测线由西向东覆盖了整个汉中市。浅层地震测线解译结果显示: 5条测线解译出5个可靠的断层点, 将5个断点位置投影在地形图上, 发现5个断点的连线正是梁山南

\* 收稿日期: 2011-12-15.

基金项目: 灾后恢复重建项目汉中市活断层探测(陕发改投资〔2009〕1154号)资助.

缘断裂向东延伸的方向（图1）。初步说明梁山南缘断裂向东延伸穿过汉中市。为了探查断裂的详细活动信息，我们在汉江大堤浅层地震解译的断点位置布设了钻孔联合剖面。

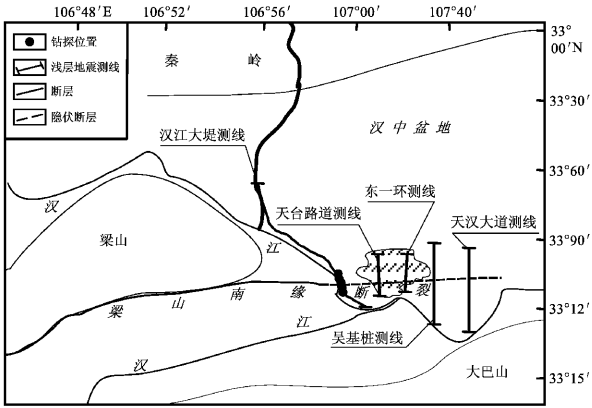


图1 梁山南缘断裂上钻孔和测线位置简图  
Fig. 1 Location of drilling and shallow seismic measuring line of Liangshan Southern Fault

2 浅层地震勘探

通常断层在浅层地震反射剖面上的表现可能为以下三种情况：（1）一侧数目突然增加或突然减少或是消失；（2）反射波同相轴形状突然变化，不再能从原来的轴线上连接过去，波组出现混乱情况；（3）反射波同相轴出现分叉、合并或扭曲等现象。梁山南缘断裂汉江大堤测线上所反映的属于第一种情况，即断层的一侧反射波组较多，覆盖层较厚，另一侧反射波组明显减少，覆盖层也相应变薄。

汉江大堤测线位于汉中市以西、汉江以东的河坝村到周家营村之间的汉江低漫滩上，测线由南东向北西布设，全长 12.9 km。观测系统道间距为 3 m，进行了 12 次覆盖，偏移距 18~36 m，炮间距 10~18 m，使用炸药量 1.0~1.5 kg。

汉江大堤地震反射波时间剖面 and 钻孔位置见图 2，从图中可以看出，断点出现在 CDP1296 处，依据反射波震相的不同，整个剖面以 CDP1296 和 CDP1454 为界，可由南东向北西分为 3 个区段，分别为（1）凹陷弧形、（2）构造变形区和（3）隆起弧形区。剖面南东端点至 CDP1296 之间，呈现出 12 个反射波组，即  $T_0^1 \sim T_0^{11}$  和  $T_0$ ，第四系底界面  $T_0$  反射成层性较好，反射波能量较强，同相轴

总体略呈由南向北倾斜延展。CDP1296 和 CDP1454 之间为断层的抬升区段，变形明显，显示出清晰的向北抬高的反射过渡。由于 CDP1296 和 CDP1454 之间为断层的主要控制区域，且反射层较多，所以该段显示较为混乱，难与两侧地层顺直连接对比，并且该段中南侧的 12 组反射层逐渐消失，尤其是  $T_0^8 \sim T_0^{11}$  反射层已经无法识别。CDP1454 至北西端为断层的上升盘，已过了断层主要控制区。该段反射波明显减少，仅有  $T_0^2$ 、 $T_0^9$  和  $T_0$  依然存在，其它波组均已消失，且与南东段相同波组之间存在较大的错距。CDP1454 以北，地层厚度变薄，并向北缓慢倾斜延展继续变薄。

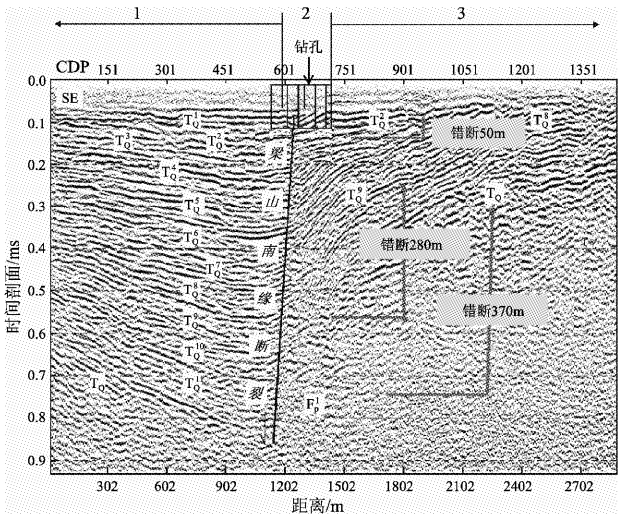


图2 汉江大堤地震反射波时间剖面 and 钻孔位置  
Fig. 2 Time section of earthquake reflection and the location of drillings in Hanjiang River levee

在剖面 CDP1296 附近出现了多组反射波同相轴被扭曲错断的现象（图 2），解释为视倾向南东的正断层  $F_p^1$ ，断层主要影响带宽度约 400 m，影响带内地层起伏强烈。断层可分辨的上断点埋深约 33 m，断点左侧反射界面呈凹陷弧形，右侧反射界面略呈隆起弧形，具有较明显的牵引构造特点。 $F_p^1$  断层的南侧第四系底界  $T_0$  埋深约为 650 m，在其北侧埋深仅为 280 m，第四系底界在断层两侧的错距约为 370 m。 $T_0^{11}$  和  $T_0^{10}$  在断层南侧反射界面清晰，沉积较厚，而在断层北侧因沉积太薄或抬升剥蚀并挤压而无法辨认。 $T_0^9$  在断层南侧的埋深约为 550 m，在断层北侧的埋深仅约 270 m， $T_0^9$  在断层两侧的错距约为 280 m。 $T_0^3 \sim T_0^8$  和  $T_0^1$  在断层南侧特征

明显,反射波能量较强,而在断层北侧却因能量较弱或是这些地层已经被抬升并被剥蚀而无法识别。 $T_0^2$  地层在断层南侧的埋深约为 130 m,在断层北侧的埋深仅有约 80 m, $T_0^2$  断层两侧的错距约为 50 m。通常认为第四纪底界的沉积年龄是 220 ~ 240 万年,梁山南缘断裂上第四纪底界垂直错断约 370 m,据此推断,自第四纪以来,梁山南缘断裂垂向差异运动的速率为 0.15 ~ 0.16 mm/a。

### 3 钻孔联合剖面探测

钻孔联合剖面探测活断层方法始于 20 世纪 90 年代(向宏发等,1990,1991,1993,2000),该方法作为隐伏活断层探测的主要手段,在“十五”期间的城市断层定位和活动性鉴定方面被广为应用,并取得了显著成效(徐锡伟等,2000,2002;邓起东等,2002,2003;中国地震局,2005;柴炽章等,2006;杨晓平等,2007;张世民等,2007;冯希杰等,2008;袁道阳等,2008;雷启云等,2008,2011;肖国桥等,2008)。

为了进一步查明梁山南缘断裂向地表延伸的情况,更准确地查明该断裂晚更新世以来的活动幅度,我们在浅层地震解译的断点位置进行了百米深的钻孔联合剖面探测。钻孔布置的原则是在断点两侧稍远距离各布设 1 个孔,如果两孔之间存在断层,再向中间加密进行探测,如果两孔之间没有错断,则分析具体情况向一侧稍远距离钻孔。汉江大堤钻孔布设在在浅层地震解译的断点两侧,共 6 个钻孔,由南向北钻孔的顺序依次为 2 孔、3 孔、4 孔、5 孔、1 孔和 6 孔,孔间距离分别为 150、40、30、30 和 50 m,2 孔和 3 孔在断层的下降盘南盘,后 4 个孔在断层的上升盘北盘(图 3)。

#### 3.1 钻孔岩心描述

层①:为杂色卵石层,卵石粒径多大于 3 cm,磨圆中等,硬度较大,分选较好,主要成分为红色砂岩团块、黑色泥岩团块和杂色砾岩团块等,层①以上为填土或充填砂。

层②:为杂色砾石碎屑,粒径为 2 ~ 10 mm,主要成分为乳白色石英团块、黑色页岩、砂岩团块和砾岩团块等,硬度较大,磨圆和分选均较好。

层③:为粗砂,在断层两盘的物质成分明显不同,断层南盘 2 孔和 3 孔主要为土黄色或褐黄色

粗砂,北盘 4 孔、5 孔、1 孔和 6 孔的岩性成分主要为中砂、粗砂、砾砂、卵石和粘土互层。

层④:为深灰绿灰黑色粘质砂,野外易于辨认,分布在上盘地层中。该层在 4 孔的埋深为 72.83 ~ 75 m,5 孔的埋深为 60.61 ~ 61.51 m,1 孔的埋深为 63.31 ~ 54.94 m。

层⑤:为土黄色砾砂层,结构松散,粒径介于 0.5 ~ 3 mm 之间,含少量粒径 2 ~ 5 mm 的砾石,含泥约 15%,主要矿物成分为石英、长石和云母等。

层⑥:为水泥灰色粘质砂,粘土约占 30%,粒径小于 0.5 mm 的中细砂占 35%,主要成分为石英、长石和云母等,捻动后有滑感。该地层主要分布在断层北盘。

层⑦:为粒径在 0.5 ~ 2 cm 的杂色中细砾,粘土约占 30%,大于 3 cm 的粗砾约占 10%,硬度较大,磨圆和分选均较好。

#### 3.2 标志层和断层错距分析

通过岩心分析及野外观察认为,剖面中相对稳定且连续的标志层主要有 4 层:层①大块杂色卵石层,层②杂色砾石碎屑,层④深灰色粘质砂层和层⑥水泥灰色粘质砂层。层①大块杂色卵石层是从地面向下的第一层,分布面广,发育较厚,粒径较大,磨圆较好,属于急流环境下的河床堆积。层②杂色砾石碎屑是卵石层下的一层,基本没有磨圆,棱角很尖,属于就近物源搬运堆积。层④深灰色粘质砂层和层⑥水泥灰色粘质砂层因颜色特殊显得极为醒目,明显区别于上下地层。

纵观整个钻孔岩心剖面,3 孔以南和 4 孔以北的地层不能顺畅联通,二者之间每一地层的顶底界均存在比较大的落差,表明主断层在 3 孔和 4 孔之间。层④和层⑥两个标志层由 4 孔向北逐渐抬升,表明 4 孔、5 孔、1 孔和 6 孔之间存在小断层。

将每一个标志层的厚度和错距做简要统计:层①在断点南侧 2 孔和 3 孔的底界埋深分别为 26.57 和 28.4 m,在断点北侧 4 孔、5 孔、1 孔和 6 孔底界埋深分别为 13、7.77、7.5 和 8 m,可以看出层①在断点南侧沉积厚,北侧沉积薄,北盘相对南盘抬升了 11 m。层②在南盘 2 孔和 3 孔的埋藏深度分别为 57.81 和 49.4 m,在北盘 4 孔、5 孔、1 孔和 6 孔的埋深分别为 21.22、12.2、18.12 和 18.41 m,层②在南盘沉积厚,北盘沉积薄,北盘相对南盘抬升了 28.2 m。层④顶界在 4 孔、5 孔和

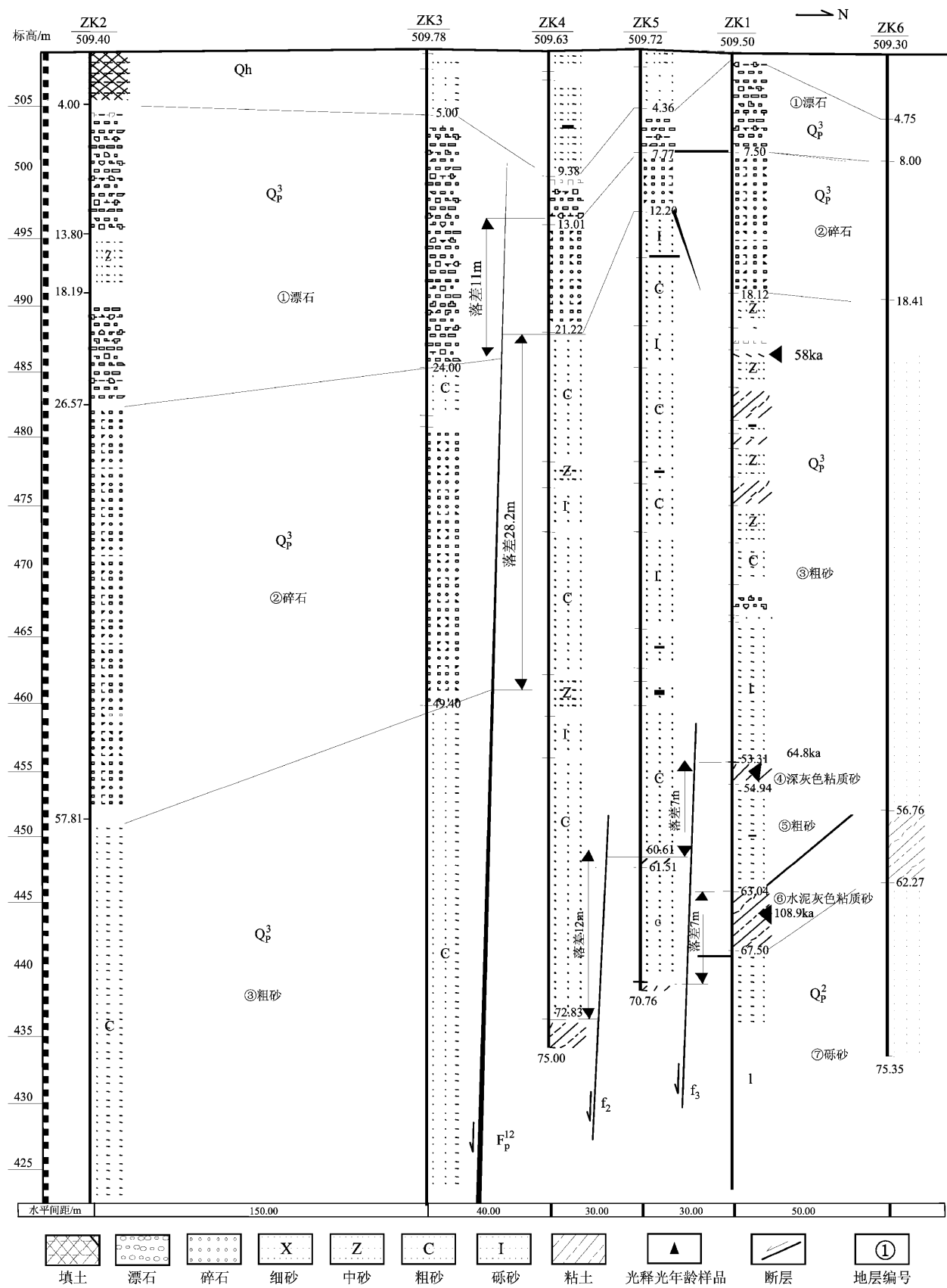


图3 汉江大堤钻孔联合地质剖面图

Fig. 3 Composite drilling geological section of Hanjiang River levee

1 孔的埋藏深度分别为 72.83、60.61 和 53.31 m，5 孔相对 4 孔抬升了 12，1 孔相对 5 孔抬升了 7 m。层⑥顶界在 5 孔、1 孔和 6 孔的埋藏深度分别为 70.16、63.04 和 56.76 m，1 孔相对 5 孔抬升了 7 m，6 孔相对 1 孔抬升了 6 m。钻孔显示的主断层和次级断层位置及向北抬升情况均与浅层地震解释结果一致。

3.3 沉积年龄

剖面中有 3 个可用的光释光测年结果，3 个样品均采自 ZK1 钻孔，第一个样品取自标志层②杂色砾石层的底部，埋深 22.4 m，年龄为  $(58 \pm 2.7)$  ka；第二个样品采自标志层③深灰色粘质砂层顶部，埋深 53.37 m，年龄为  $(64.8 \pm 4.5)$  ka；第三个样品采自标志层④水泥灰色粘质砂层中，埋深 64.3 m，年龄为  $(108.9 \pm 5.9)$  ka。另外，我们在本剖面东边的一个钻孔岩心中获取了卵石层顶部的年龄为 2.95 万年，汉中市普遍存在属于同一时期的较大卵石沉积层，因此该孔标志层①卵石层顶部的年龄约为 2.95 万年。

3.4 断层最新活动时代及滑动速率

汉江大堤钻孔剖面上层①~层⑦均被错断，断距自下而上依次减小，上断点位于孔 3 和孔 4 之间，两孔间距 40 m。层①底界被错断，顶界虽无明显落差，但层①在断层两侧厚度相差很大，由此判断层①中间可能被错断。限于钻孔间距和钻探分辨精度，初步将层①顶底界定为上断点上限和下限，即断层上断点位于 3 孔和 4 孔之间，上断点埋深至少在 5~13 m 处。根据倾角推算，断层地表投影应该在 4 孔附近。根据层①顶部的年龄推算，上断点深度的地层年龄应小于 29 ka，所以汉江大堤钻孔联合地质剖面解释的隐伏断层至少是晚更新世晚期以来的活动断层。

根据标志层垂直断距和沉积年龄得到晚更新世以来不同时段断层垂直位移及滑动速率列于表 1。从表中可看出：主要标志层①的年龄值约为 29 ka，垂直位移为 11 m，平均滑动速率为 0.38 mm/a；主要标志层②底部的年龄值约为 58 ka，垂直位移为 28.03 m，平均滑动速率为 0.49 mm/a。由上述数据可看出，晚更新世以来，主要断层的平均滑动速率比较大，在 0.38~0.49 mm/a 之间变化。同一时期，上升盘中的次级断层也在活动，次级标志层④深灰色粘质砂层顶部的年龄值约为

64.8 ka，垂直位移为 7 m，平均滑动速率为 0.11 mm/a；次级标志层⑥水泥灰色粘质砂层顶部的年龄值约为 108.9 ka，垂直位移为 7 m，平均滑动速率为 0.06 mm/a。由此看出晚更新世以来上升盘中次级断层向北抬升的速率在 0.06~0.11 mm/a 之间，比主断层的平均滑动速率约小 4 倍。

表 1 汉江大堤隐伏断层晚更新世以来不同时期断层垂直位移及滑动速率

Tab. 1 Vertical displacement and slip rate of buried fault in Hanjiang River levee during different phases since late Pleistocene

标志地层	年龄 /ka	垂直位移 /m	滑动速率 /(mm·a <sup>-1</sup> )	地质年代
主层①底	29	11	0.38	晚更新世晚期
主层②底	58	28.2	0.49	晚更新世中期
小层④顶	64.8	7	0.11	晚更新世中期
小层⑥顶	108.9	7	0.06	晚更新世早期

4 讨论与结论

本研究是在同一条剖面上采用两种探测方法，获得了梁山南缘断裂的位置、性质以及小于深度 650 m 的地层展布特征和断层构造图像。结果表明，该断层的断距由深到浅逐渐变小，约 650 m 深度的 T<sub>Q</sub>（Q1 底界）界面断距约 370 m，深度约 550 m 的 T<sub>9</sub> 界面断距约 280 m，深度约 80m 的 T<sub>2</sub> 界面断距约为 50 m。由下至上错距在逐渐减小，显示出断层具有明显的生长属性。

浅层地震勘探和钻孔联合剖面确定的断层位置具有很好的一致性，且地震剖面的反射波组层位与钻孔地质层位的抬升和转折部位也具有较好的对应关系。通过跨断层联合地质剖面钻探，确定了梁山南缘断裂主断层在汉江大堤的地表投影位置。根据联合地质剖面分析，主断层在地下 12~50 m 和 7~28 m 处的断距分别为 28.2 和 11 m，次级断层在地下 56~70 m 处的断距约为 7~12 m。钻探获得的断层可识别的上断点埋深为 5~13 m，至少属于晚更新世晚期活动断裂。

根据以上分析认为梁山南缘断裂为晚更新世晚期以来的活断层，并穿过汉江大堤进入汉中市區，对汉中市的城市建设可能构成一定的影响。

## 参考文献:

- 柴炽章, 孟广魁, 杜鹏, 等. 2006. 隐伏活动断层的多层次综合探测: 以银川隐伏活动断层为例[J]. 地震地质, 28(4): 536-544.
- 邓超东, 徐锡伟, 张先康, 等. 2003. 城市活断层探测的方法和技术[J]. 地学前缘, 10(1): 150-162.
- 邓超东. 2002. 城市活动断裂探测和地震危险性评价问题[J]. 地震地质, 24(4): 601-605.
- 樊春, 王二七, 王刚, 等. 2008. 龙门山断裂带北段晚新近纪以来的右行走滑运动及其构造变换研究[J]. 地质科学, 43(3): 417-433.
- 冯希杰, 李晓妮, 任隽, 等. 2008. 渭河断裂深、中、浅和近地表显示[J]. 地震地质, 30(1): 264-272.
- 雷启云, 柴炽章, 孟广魁, 等. 2008. 银川隐伏断层钻孔联合剖面探测[J]. 地震地质, 30(1): 250-262.
- 雷启云, 柴炽章, 孟广魁, 等. 2011. 隐伏活断层钻孔联合剖面对折定位方法[J]. 地震地质, 33(1): 45-55.
- 向宏发, 方仲景, 张晚霞, 等. 1991. 南口—孙河断裂活动性的初步研究[A]//中国地震年鉴. 1991. 北京: 地震出版社.
- 向宏发, 方仲景, 张晚霞, 等. 1993. 北京平原区隐伏断裂晚第四纪活动性的初步研究[J]. 地震学报, 15(3): 385-388.
- 向宏发, 方仲景. 1990. 北京平原区隐伏断裂的探测研究[A]//中国地震年鉴. 1990. 北京: 地震出版社.
- 向宏发, 王学潮, 魏顺民, 等. 2000. 聊城—兰考隐伏断裂第四纪活动性的综合探测研究[J]. 地震地质, 22(4): 351-359.
- 肖国桥, 郭正堂, 陈宇坤, 等. 2008. 渤海湾西岸 BZ1 钻孔的磁性地层学研究[J]. 第四纪研究, 28(5): 909-916.
- 徐锡伟, 计凤桔, 于贵华, 等. 2000. 用钻孔地层剖面记录恢复古地震序列: 河北夏垫断裂古地震研究[J]. 地震地质, 22(1): 9-19.
- 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 2008. 汶川  $M_s 8.0$  地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 30(3): 597-629.
- 徐锡伟, 吴为民, 张先康, 等. 2002. 首都圈地区地壳最新构造变动与地震[M]. 北京: 科学出版社.
- 杨晓平, 郑荣章, 张兰凤, 等. 2007. 浅层地震勘探资料地质解释过程中值得重视的问题[J]. 地震地质, 29(2): 1-11.
- 袁道阳, 王兰民, 何文贵, 等. 2008. 兰州市地震活断层探测新进展[J]. 地震地质, 30(1): 236-249.
- 张世民, 王丹丹, 刘旭东, 等. 2007. 北京南口—孙河断裂带北段晚第四纪活动的层序地层学研究[J]. 地震地质, 29(4): 729-743.
- 张希, 崔笃信, 王文萍, 等. 2008. 利用 GPS 资料分析汶川地震前后川滇及其邻区水平运动及应变积累[J]. 地震研究, 31(增刊): 464-470.
- 张宇翔, 袁志祥. 2010. 汶川 8.0 级地震陕西灾区震害特征分析[J]. 地震研究, 33(3): 329-335.
- 中国地震局. 2005. 中国地震活断层探测技术系统技术规程[Z]. 北京: 地震出版社.

## Activity Analysis of the Liangshan Southern Margin Fault in Hanzhong Basin ——A Case Study of Hanjiang River Levee

LI Xiao-ni, FENG Xi-jie, REN Jun, LI Gao-yang, LI Miao

(Earthquake Administration of Shannxi Province, Xi'an 710068, Shannxi, China)

### Abstract

Using the shallow seismic and composite drilling section exploration, we obtained actual position of the breakpoint, near-surface dislocation, buried depth of upper breakpoint, the latest active time and slip rate of Liangshan Southern Margin Fault on the Hanjiang River Levee. Shallow seismic interpretation results show that 12 reflected wave groups are vertically leaped by Liangshan Southern Margin Fault since Quaternary period. Maximum dislocation of bottom interface of the fault is about 370 m, and the width of the influence belt is about 400 m. The strata undulate strongly in the influence belt. The drilling results reflect that the maximum dislocation of the main fault is 28.2 m in middle period of late Pleistocene, it is about 11 m on late period of late Pleistocene. The average slip rate of the main fault is about 0.38~0.49 mm/a and the buried depth of its upper breakpoint is about 0.38~0.49 mm/a. The Liangshan Southern Margin Fault is the active fault on late period of late Pleistocene.

**Key words:** Liangshan southern margin fault; shallow seismic exploration; composite drilling section; activities rate; late Pleistocene