

渭河断裂咸阳段活动性研究^{*}

田勤虎, 段蕊, 李晓妮, 卞菊梅, 魏青珂

(陕西省地震局, 陕西 西安 710068)

摘要: 通过地貌追踪、浅层地震、钻孔联合剖面勘探及探槽开挖等, 查明了渭河断裂咸阳段(杨家村—窑店)的展布和最新活动时代。结果表明, 渭河断裂咸阳段从咸阳市北侧渭河阶地前缘陡坎通过, 考虑到断裂在金家庄、东耳村一带存在一个左阶斜裂区, 阶区宽约1 km, 可将断裂分为东、西两段, 即: 杨家村—金家庄段和东耳村—窑店段。断裂总体走向NE, 倾向S, 倾角 $65^{\circ} \sim 75^{\circ}$, 为同生正断层。程家村探槽显示断裂错断全新统黑垆土底界15 cm, 该层底界 ^{14}C 测年结果为2 255 BP, 顶界光释光(OSL)年龄测年结果为 $(3.7 \pm 0.41) \text{ ka}$, 说明断裂在全新世有活动。渭河断裂咸阳段自晚更新世以来活动性逐渐减弱, 全新世平均活动速率为 $0.04 \sim 0.12 \text{ mm/a}$ 。

关键词: 渭河断裂; 浅层地震; 钻孔联合剖面; 探槽; 全新世活动断裂

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)02-00250-07

0 引言

渭河断裂西起宝鸡, 经眉县、武功、兴平、咸阳、西安, 东到渭南^①, 是一条区域性隐伏活动断裂。历年来, 众多学者围绕这条断裂持续做了很多工作, 以探明其展布及活动时代(严阵, 1965; 邓起东, 尤惠川, 1985; 陕西省地质矿产局, 1989; 李永善, 1992; 彭建兵, 1992; 陕西省地震局, 1996; 冯希杰等, 2003, 2008; 权新昌, 2005)。“十五”国家重大建设项目“西安市活断层探测与地震危险性评价项目”查明了渭河断裂在西安市规划区范围内(窑店以东)的展布、深部结构特征及活动性^②, 认为渭河断裂由窑店—张家湾断层和船张—咀头断层组成, 近东西走向, 全新世有活动(师亚芹等, 2008)。而窑店以西的渭河断裂穿越咸阳城区, 长期以来认为晚更新世有活动, 但具体位置未定。城市范围内隐伏活动断裂的突发错动会产生大地震和地表位错, 将形成巨大灾害, 并可能使作为当代政治、经济活动

中心的城市毁于一旦(邓起东, 2002)。

考虑到渭河断裂从咸阳城区通过, 对咸阳市危害性较大, “咸阳市活断层探测与地震危险性评价”项目将渭河断裂咸阳段(杨家村—窑店段)作为主要断裂进行了浅层人工地震、钻孔联合剖面、探槽开挖等勘探与研究, 查明了渭河断裂咸阳段的位置及活动性, 本文即为该项目的部分研究成果。

1 研究区断裂展布

作为一条由物探资料推测的被渭河冲积物所掩盖的隐伏断裂, 渭河断裂最初位置难以确定。随着窑店、庇李村(师亚芹等, 2007, 2009)等断裂剖面的发现, 在地貌上, 断裂位置均处于渭河北岸阶地陡坎前缘, 我们以此作为渭河断裂追踪的方向。从兴平往东经咸阳市区到窑店, 渭河阶地之间存在着一个明显的陡坎, 推测为断裂通过位置。

“咸阳市活断层探测与地震危险性评价”项目

^{*} 收稿日期: 2013-09-17。

基金项目: 中国地震局地质研究所基本科研业务费专项(IGCEA1220)、陕西省自然科学基金研究计划(2011JM5012)、中国地震局地震科技星火计划项目(XH13023Y)与陕西省防震减灾“十一五”重点项目“咸阳市活断层探测与地震危险性评价”(SCZC2008)联合资助。

① 陕西大地地震工程勘察中心. 2011. 咸阳市地震小区划工作报告。

② 陕西省地震局. 2007. 西安市断层探测与地震危险性评价项目。

重点在杨家村到窑店段布设了9条控制性浅层地震测线(图1)和5条浅层地震详勘测线,测线总长度为34.6 km,并在多处浅层地震异常点处进行了钻孔联合剖面验证。

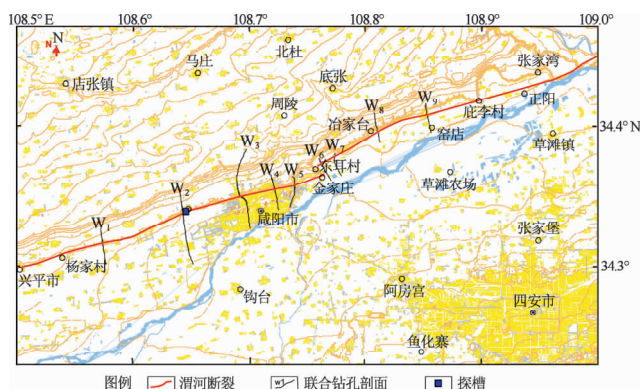


图1 渭河断裂勘探及其展布图

Fig. 1 Exploration of the Weihe Fault and its distribution

通过地貌追踪、浅层地震、钻孔联合剖面等资料综合分析,渭河断裂咸阳段位于咸阳市北侧渭河 III 级阶地前缘,考虑到断裂在金家庄、东耳村一带存在一个左阶斜裂区,阶区宽约 1 km,可将断裂分为东、西两段(图1)。西段杨家村—金家庄断裂西起杨家村,经齐家堡、程家村、魏家泉,到达金家庄,走向 NE,倾向 SE,正断层,长约 23 km;东段为东耳村—窑店断裂,东起东耳村,经陈家台到达窑店,与渭河断裂西安段相接,走向 NE,倾向 SE,正断层,长约 10 km。

2 断裂活动性研究

笔者重点在咸阳市西侧南北走向的咸平路开展了浅层地震勘探、钻孔联合剖面验证及探槽开挖工作,以明确渭河断裂的活动特征。

2.1 咸平路浅层地震勘探

渭河断裂咸阳段是穿越咸阳市城区的隐伏活动断裂,浅层地震勘探是城市活动断裂探测中解决隐伏断裂定位及切割地层层位的最主要方法之一(邓起东等, 2003)。根据前期资料收集和周围地质地貌调查,笔者在咸阳市西面的咸平路沿南北方向布设了一条浅层地震测线(编号 W_2),测线南端起于西宝高速咸阳西出口北公路拐弯处,北端止于下底王村西(图2),全长 5 600 m,跨越

了渭河北岸 I、II、III 级阶地。根据城市地质结构特点和强干扰源的类型可有针对性地选择地震勘探方法、观测系统、震源类型等(王振东, 1988),咸平路浅层地震测线使用道间距为 4 m、炮间距 20 m、180 道零偏移距不对称接收、18 次覆盖的观测系统,震源为震源车。

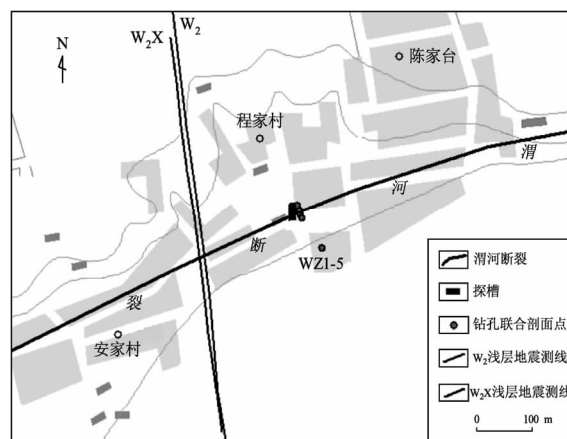


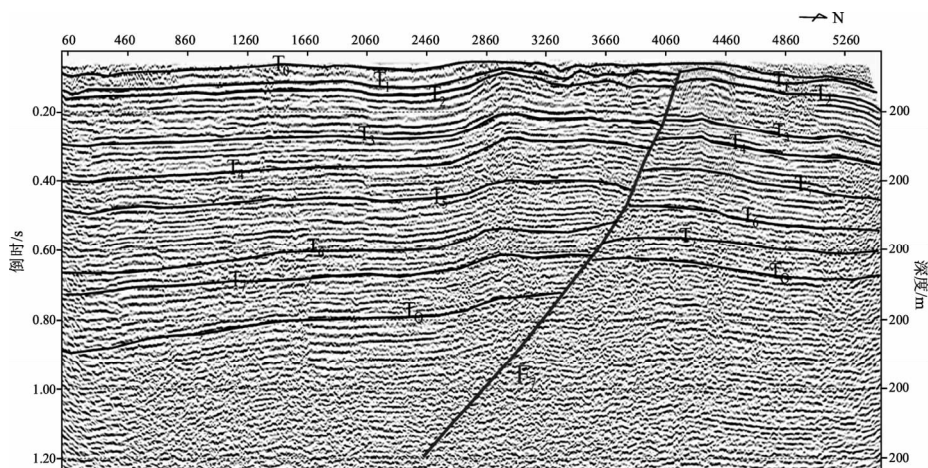
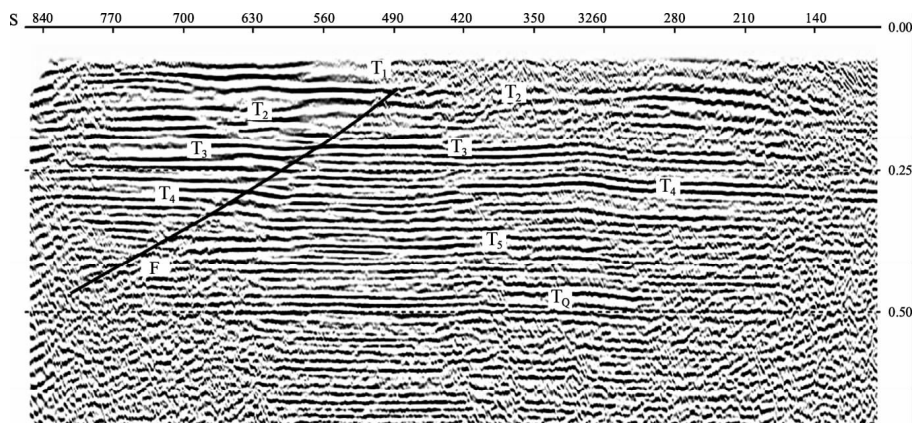
图2 咸平路附近渭河断裂勘探图

Fig. 2 Exploration of the Weihe Fault near Xianping road

图3为咸平路测线地震反射叠加时间剖面,根据剖面显示的反射波组特征,推测 T_0 反射界面可能是第四纪的底界。在测线桩号 4 106 左右, $T_2 \sim T_0$ 之间地层反射均出现较为明显的同相轴扭曲和反射波能量的变化,根据剖面特征推断这些变化可能是断层的反映,在剖面图中用 F_7 标出。断裂在剖面上显示为向南倾的正断层,可分辨的上断点埋深在 45 ~ 48 m 之间,断裂在 T_2 反射界面的垂直断距约为 3 ~ 5 m。

为了验证 W_2 浅层地震异常是否真实存在,笔者在咸平路 W_2 浅层地震测线之上,自北向南又布设了一条浅层地震详勘测线 W_2X (图2)。测线北端起自于 W_2 测线桩号的 4 600,南端止于 W_2 测线桩号的 3 698,总长 902 m。该测线使用道间距为 2 m、跑间距 10 m、180 道 20 m 偏移距不对称接收、18 次覆盖的观测系统,震源为震源车。

由图4反射波叠加时间剖面图可以看出, T_2 以下的地层反射均出现较为明显的同相轴扭曲和反射波能量的变化, F 断裂异常上断点延伸到测线桩号 492 左右,对应于 W_2 测线的 4 108 处。该断裂异常错断了剖面上 T_2 以下的所有地层反射,其

图3 W_2 测线地震反射叠加时间剖面Fig. 3 Stacking time section of seismic reflection along W_2 measuring line图4 W_2X 测线地震反射叠加剖面图 (道间距 2 m)Fig. 4 Stacking time section of seismic reflection in W_2X measuring line (group interval is 2 m)

可分辨的上断点埋深同样在 45 ~ 48 m 之间, 在该深度上地层的垂直错距为 2 ~ 3 m。

从这两条同一位置的浅层地震测线解释来看, 两条测线解释出的断层位于桩号 4 106 和 4 108 左右, 均错断了 T_2 以下的所有地层反射。异常点基本上处于地面上同一位置, 且位于渭河 II、III 级阶地交汇部位。根据当地地层资料及浅层地震可分辨的上断点埋深, 45 ~ 48 m 深度为中更新统地层, 如果渭河断裂在此处活动, 则可以推断断裂中更新世有活动, 断距在 2 ~ 3 m 之间。

2.2 程家村钻孔联合剖面

为进一步研究断裂活动状况, 验证 W_2 和 W_2X 浅层地震断裂异常, 并考虑到后期探槽开挖场址等问题, 我们在距 W_2 浅层地震测线向东约 200 m 的程家村进行了钻孔联合剖面勘探 (图 2)。剖面

以浅层地震异常点沿地貌陡坎方向, 布设了 5 个钻孔, 自南向北钻孔编号分别为: $WZ1-5$ 、 $WZ1-3$ 、 $WZ1-1$ 、 $WZ1-2$ 、 $WZ1-4$, 剖面线总长 115.2 m。相邻钻孔间距分别为 83.4 m、10.5 m、11.3 m、10 m, 孔深均为 80 m, 剖面线横跨了渭河 II 级阶地后缘和 III 级阶地前缘。

钻孔联合剖面图显示 (图 5), 钻探深度内地层可划分出 4 个明显的大层:

① 黄土 Q_p^{3col} : 晚更新统风积层, 黄褐色, 埋深 8.2 ~ 13.2 m, 地层向南倾斜。

② 粉质粘土 Q_p^{3al} : 晚更新统河流冲积相细粒沉积层, 局部夹砂层, 颜色为黄褐至红褐色, 剖面南部夹有灰色土层; 北侧地层较薄, 南侧较厚, 地层微向南倾; 北侧地层底界埋深 21.0 ~ 24.0 m, 层厚 14.0 ~ 15.0 m, 南侧地层底界埋深 29.0 ~

31.0 m, 层厚约 17.0 ~ 21.0 m。

③ 砂砾石层 Q_p^{2al} : 中更新统晚期河流冲积相粗粒沉积层, 以中—细砂为主, 局部夹有厚层圆砾, 地层微向南倾, 层底埋深 43.0 ~ 47.0 m, 地层厚度 21.0 ~ 24.0 m。

④ 粉质粘土与中砂互层 Q_p^{2al+1} : 中更新统晚期河湖相沉积层, 粉质粘土颜色为黄褐至红褐色, 砂层为灰黄色, 地层微向南倾, 粉质粘土与中砂互层, 分层厚度较大, 钻探深度内未揭穿该层。

从整个钻孔联合剖面图可以看出, 剖面中部存在明显的地层不连续现象。不连续部位位于 WZ1-1、WZ1-2 号钻孔之间, 这个位置与浅层地震测线异常点位置相吻合。该异常上断点位于 3 m 附近的人工填土层中, 向下延伸到 WZ1-3 号钻孔南侧。断层面向南倾, 致使南侧地层下沉, 沉积厚度增大, 北侧地层相对上升, 沉积地层厚度相对减薄, 说明了断裂存在, 推测为渭河断裂咸阳段通过位置。根据断裂上断点位置所对应的地层, 渭河断裂极有可能延伸到了全新统地层。

2.3 程家村探槽所揭示的断裂最新活动时代

经过浅层地震、钻孔联合剖面勘探, 渭河断裂位置证据充分。且定位到了一个比较准确的位置, 我们实施了探槽开挖。

探槽布设在程家村钻孔剖面西侧空地上 (图 2)、钻孔联合剖面 WZ1-1 ~ WZ1-4 号钻孔之间,

南北走向, 长 20 m, 上宽 10 m, 下宽 5 m, 深 10 m, 呈对称梯形。探槽所揭露的地层均为全新统和晚更新统地层, 探槽 (图 6) 可见明显的断层面。

2.3.1 地层分层

探槽揭露的地层从上而下依次为:

① 填土 (Q_h^{ml}): 以粘土为主, 厚 3.5 ~ 5.5 m, 含砖石等碎块。

② 黑垆土 (Q_h^{el}): 棕褐色, 较纯净, 层厚 0.6 ~ 1.0 m, 埋深 3.8 ~ 5.8 m, 北高南低, 有明显的挠曲现象, 高差约 1.0 m。在该地层底部取光释光 (OSL) 年龄样, 测试结果为 (3.7 ± 0.4) ka, 上部地层 ^{14}C 年龄样测试结果为 2 255 BP。

③ 黄土 (Q_p^{3el}): 褐黄色, 具针状孔隙, 土质均匀, 有柱状节理, 层底埋深 7.0 ~ 8.0 m, 层厚 2.5 ~ 3.0 m。在其顶部及中下部取光释光样, 测试结果为 (7.0 ± 0.4) ka ~ (19.1 ± 1.8) ka, 推测该层的底界形成年龄在 2 万年左右。

④ 粉质粘土 (Q_p^{3al}): 黄褐色, 含铁锰质斑点, 下盘层底埋深在 7.0 m 左右, 上盘在探槽加深至 14.0 m 深度内未揭穿, 上盘取年龄样, 光释光 (OSL) 测年结果为 $(23.7 \pm 2.5) \sim (25.3 \pm 2.2)$ ka。

⑤ 含砂粘土 (Q_p^{3al}): 黄褐色, 含铁锰质, 砂质含量较高, 局部有小砾石夹层下盘, 层底埋深 9.0 ~ 10.0 m, 在断裂附近有明显的拖曳牵引构造特征。

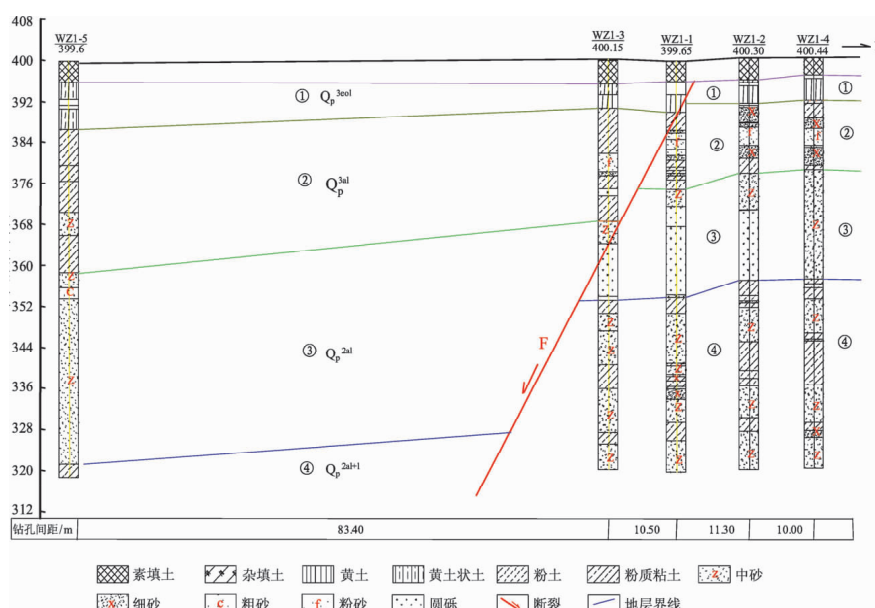


图 5 程家村钻孔联合剖面图

Fig. 5 Drilling composite section at Chengjia Village

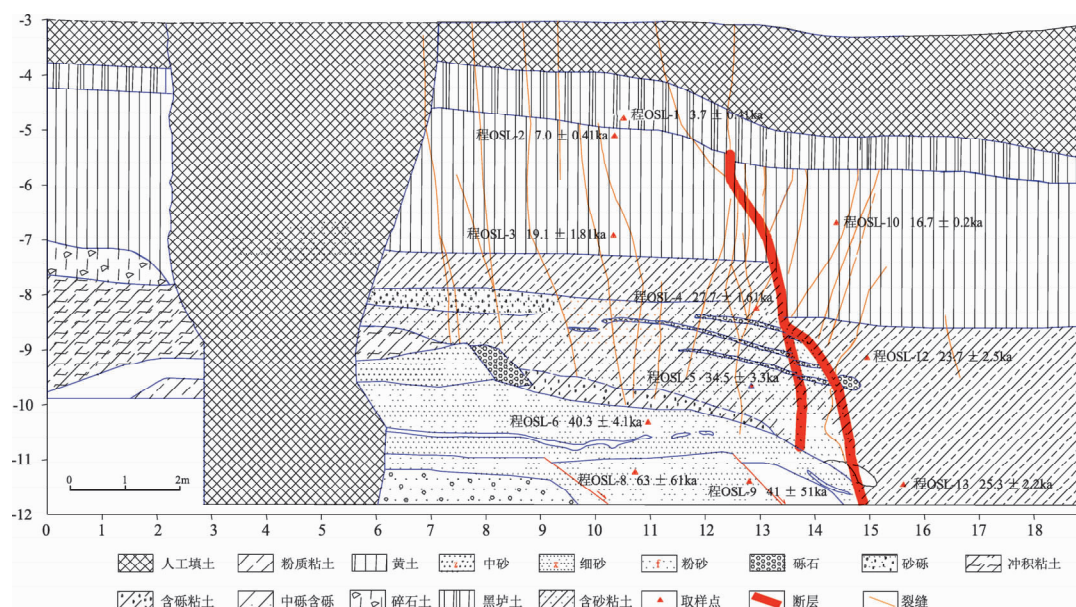


图6 程家村探槽东壁素描图

Fig. 6 Interpretation map of the east wall of the trench at Chengjia Village

断层下盘取年龄样，光释光（OSL）测年结果为 $(27.7 \pm 1.6) \sim (34.5 \pm 3.3)$ ka。

⑥ 含砾粘土 (Q_p^{3al})：黄褐色，含铁锰质，夹砾石，仅在断层下盘出露；上盘未揭露出。

⑦ 细砂层 (Q_p^{3al})：灰黄色，以细砂为主，仅在断层下盘出露，年龄样测试结果为 (40.3 ± 4.1) ka。

⑧ 中砂层 (Q_p^{3al})：以中砂为主，局部相变为砂砾石，颜色为灰黄色，仅在断层下盘出露，光释光（OSL）测年结果为 $(41 \pm 5) \sim (63 \pm 6)$ ka。

另外，在探槽北部3~6 m为一大的人工填土坑，填土深12 m未见底，从当地居民处了解得知该处为一古井，后废弃填埋。

2.3.2 剖面断裂分析

① 断裂走向72°，倾向S，倾角67°，由探槽素描图7可以看出，断裂错断了全新统—晚更新统地层。

② 层黑垆土在断层位置有明显的挠曲，并且在挠曲底部有断错现象，断错地层底界高差约15 cm。在黑垆土顶部取 ^{14}C 样，测年结果为2 255BP，在黑垆土底部取光释光（OSL）年龄样，测年结果为 (3.7 ± 0.41) ka，说明断裂在全新世晚期有活动，平均活动速率0.04 mm/a。

③ 层黄土层底界被明显错断，垂直错距1.2 m，且断裂下盘地层厚度较上盘厚度小，说明渭河断裂为同生断层；根据③层黄土的形成时间2万年，计算得出晚更新世晚期以来断裂的平均活动速

率为0.06 mm/a。

④ 层粉质粘土层底界在下盘埋深约8.0 m，上盘探槽底界14.0 m未揭露其底界，说明断距大于6.0 m；且该层厚度差别很大，下盘厚度仅1.0 m，上盘厚度大于6.0 m，结合钻孔资料分析断距约6.4 m；由该层的测年结果3万年，计算得出其平均活动速率为0.20 mm/a。

⑤ 主断面配套有多组次级断裂，在层⑧中砂层中形成多个小断面，断面走向、倾向与主断面一致，带宽约9.0 m。

另外，在探槽剖面中发现了多条与断层配套的裂缝，裂缝宽约0.5~1.0 cm，内部主要由灰黄色土壤所充填，两侧地层无错断现象，应该为断裂活动而引起的张性裂缝。

由程家村探槽揭示的断层分析得出，渭河断裂错距在此处随着地层年龄的增大而增大，断层活动速率也在增大，总体介于0.04~0.2 mm/a之间。

3 结论与讨论

根据地貌追踪、浅层地震勘探、钻孔联合剖面勘探，渭河断裂咸阳段位于咸阳市北侧渭河阶地前缘陡坎。考虑到断裂在金家庄、东耳村一带存在一个左阶斜裂区，阶区宽约1 km，可将渭河断裂咸阳段分为杨家村—金家庄段和东耳村—窑店两段。断裂总体走向

北东 NE, 倾向 S, 倾角 $65^{\circ} \sim 75^{\circ}$, 为同生正断层, 并配套有多组次级断裂, 断裂带宽约 9.0 m。

以往对渭河断裂的研究停留在渭河阶地与黄土台塬地貌差异性上(易学发, 师亚芹, 1994)及单个探槽、钻孔联合剖面的基础之上(师亚芹等, 2007; 戴王强等, 2010)。本次我们进行了大量浅层人工地震勘探、钻孔联合剖面、探槽开挖、年龄样品测试等工作, 为我们精确研究渭河断裂咸阳段活动性提供了可靠的基础资料。根据程家村探槽揭露, 渭河断裂咸阳段错断全新统地层。但从其活动性来说, 自晚更新世以来断裂活动逐渐减弱, 通过研究区地貌、阶地、钻探等综合手段分析^①, 渭河断裂全新世活动速率介于 0.04 ~ 0.12 mm/a 之间。

在 W_2 和 W_2X 浅层地震异常点附近发现有条北东向的地裂缝, 地裂缝位置处于地貌分界线附近。地裂缝成群产出, 与现今构造变形、断层运动等相关(吴珍汉等, 2003), 咸阳地裂缝出现的位置与区域构造线吻合, 说明与区域地质构造环境密切相关, 而承压水头的急剧下降, 最终使地裂缝的出现成为可能(于国新, 2006)。此位置的地裂缝, 一方面说明咸阳地裂缝是地下断裂在地表的反映(刘俊峰等, 2003), 另一方面也说明断裂活动与地下水变化共同作用加剧了渭河断裂咸阳段的危险性, 这是做活断层探测及其危害性研究所要重视的。

参考文献:

- 戴王强, 韩恒悦, 冯希杰, 等. 2010. 渭河断裂窖店浅层地震与钻孔联合剖面研究[J]. 内陆地震, 24(1): 14-17.
- 邓起东, 徐锡伟, 张先康, 等. 2003. 城市活动断裂探测的方法和技术[J]. 地学前缘, 10(1): 93-103.

- 邓起东, 尤惠川. 1985. 鄂尔多斯周缘断陷盆地带的构造活动特征及其形成机制[A]//: 国家地震局地质研究所. 1985. 现代地壳运动研究(1)[C]. 北京: 地震出版社, 58-78.
- 邓起东. 2002. 城市活动断裂探测和地震危险性评价[J]. 地震地质, 24(3): 601-605.
- 冯希杰, 戴王强, 董星宏. 2003. 从陕西省扶风县古水路塬剖面剖析渭河断裂第四纪活动[J]. 中国地震, 19(2): 188-193.
- 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.
- 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, 96-207.
- 刘俊峰, 罗长胜, 刘渭. 2003. 陕西咸阳市某厂工程场地地裂缝初步研究[J]. 地质灾害与环境保护, 14(4): 6-10.
- 彭建兵. 1992. 渭河断裂带的构造演化与地震活动[J]. 地震地质, 14(2): 113-120.
- 权新昌. 2005. 渭河盆地断裂构造研究[J]. 中国煤田地质, 17(3): 1-8.
- 陕西省地震局. 1996. 秦岭北缘活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社, 1-201.
- 陕西省地质矿产局. 1989. 陕西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1-398.
- 师亚芹, 冯希杰, 戴王强, 等. 2008. 渭河断裂西安段的展布及其结构特征[J]. 地震学报, 30(6): 634-647.
- 师亚芹, 冯希杰, 种瑾, 等. 2009. 黄土覆盖的阶地陡坎附近渭河断裂活断层探测[J]. 地震地质, 31(1): 10-21.
- 师亚芹, 李晋, 冯希杰, 等. 2007. 渭河断裂带古地震研究[J]. 地震地质, 29(3): 607-616.
- 王振东. 1988. 浅层地震勘探应用技术[M]. 北京: 地质出版社.
- 吴珍汉, 胡道功, 吴中海, 等. 2003. 青藏铁路沿线构造裂缝的地质特征及工程危害[J]. 水文地质与工程地质, 30(6): 15-20.
- 严阵. 1965. 渭河谷地第四纪旋转大断裂[J]. 中国第四纪研究, 4(2): 117-118.
- 易学发, 师亚芹. 1994. 周原的历史演变与渭河大断裂的最新活动. 地震学报, 16(3): 341-345.
- 于国新. 2006. 咸阳地裂缝成因分析[J]. 安全与环境工程, 13(3): 1-4.

^① 陕西省地震局. 2011. 咸阳市地震活动断层探测项目技术报告.

Research on Activities of Xianyang Segment of Weihe Fault

TIAN Qin-hu, DUAN Rui, LI Xiao-ni, BIAN Ju-mei, WEI Qing-ke

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

Abstract

Based on the terrain tracking, the shallow earthquake, the drilling composition section exploration and the trench excavation etc., we ascertained the distribution of Xianyang Segment (Yangjia Village-Yaodian) of Weihe Fault and its latest active period. The result shows that the Xianyang Segment of Weihe Fault passes through the scarp on the leading edge of Weihe terrace in the north of Xianyang City. Considering that there is a left order oblique fissure zone with the wide of about 1 km around Jinjiazhuang and Dong'er Village on the fault, the fault can be divided into two sections: the segments of Yangjia Village-Jinjiazhuang in the east and Dong'er Village-Yaodian in the west. The Xianyang Segment of Weihe Fault is a synsedimentary normal fault, and the overall trend and the tendency of it is NE and S respectively, and the dip angle of it is $65^{\circ} \sim 75^{\circ}$. The exploratory trench in Chenjia Village displayed that the bottom boundary of the Holocene Heilu soil was dislocated about 15 cm by the fault. The ^{14}C dating result of the bottom boundary was 2 255 BP and the result of age dating on Optically Stimulated Luminescence (OSL) of the top boundary was (3.7 ± 0.41) ka, which indicated that the fault was active in the Holocene. The activities of Xianyang segment of Weihe Fault weakened gradually since the late Pleistocene, and its average active rate was 0.04 ~ 0.12 mm/a in the Holocene.

Key words: Weihe Fault; shallow earthquake; drilling composition section; trench; Holocene active fault