

芦花台断裂的三维结构特征^{* 1}

赵成彬 刘保金 鄧少英 姬计法 李春周

(中国地震局地球物理勘探中心,郑州 450002)

摘 要 为研究芦花台断裂的空间展布特征、断裂的活动性以及断裂向下的延伸形态,以芦花台断裂为中心布设了一个 550 m×875 m 的三维地震探测区。探测结果表明,芦花台断裂由两条隐伏活动断裂组成,断裂带走向 N20°~22°E,最新活动时代为中更新世末期。主断裂 F₁ 倾向 SE,次断裂 F₂ 倾向 NW,都是正断层。主断裂 F₁ 的活动时代比次断裂 F₂ 新,断距也比次断裂 F₂ 的大,F₁ 的上断点埋深在工作区内具有自北向南逐渐加深的趋势。在工作区内断裂 F₁ 和 F₂ 在平面上的距离由北向南逐渐增大,在垂直剖面上的距离随着深度的增加逐渐减小,大约在深度 780~800 mF₂ 断裂归并到 F₁ 断裂上。

关键词 三维地震技术;隐伏活动断裂;倾角时差校正;相干数据分析;可视化技术

中图分类号:P546

文献标识码:A

THREE DIMENSION STRUCTURE OF LUHUATAI FAULT

Zhao Chengbin, Liu Baojin, Feng Shaoying, Ji Jifa and Li Chunzhou

(Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002)

Abstract In order to investigate geometry shape and activity of Luhutai Fault Zone which locates in the north-west Yinchuan Basin, a 3D seismic exploration was completed whin an area of 550 m×875 m. The results show that it is a buried active fault zone and consisted of two faults, main fault F₁ and secondary fault F₂. The fault zone moved untill the late stage of Middle Pleistocene. Trend of F₁ is SE, and F₂ is NW, both of them are normal faults. The activity time of F₁ is newer than that of F₂, and the fault throw of F₁ is larger than that of F₂. The buried deepth of the up-breakpoint of F₁ has a trend of increasing from North to South. The distance between F₁ and F₂ increases gradually from North to South on the horisontal plane, reduces gradually with depth increase on the vertical profile, and F₂ merges into F₁ at the depth of about 780–800 m.

Key words: 3D seismic technique; buried active fault; DMO correction; coherent data analysis; visualization technology

1 引言

石油反射地震剖面表明,在银川地堑浅部主要分布有 4 条规模较大的隐伏断裂:贺兰山东麓断裂带、芦花台断裂、银川断裂和黄河断裂,这些断裂结

构复杂,形态各异,形成了银川地堑复杂的构造形态^[1]。本文采用浅层三维反射地震勘探方法,获得了芦花台断裂在地壳浅部的精细结构图像,揭示了芦花台断裂的三维空间形态和各条断裂之间的相互组合关系。

* 收稿日期:2013-06-27

基金项目:中国地震局项目(200908001)。中国地震局地球物理勘探中心论著编号(RCEG201303)

作者简介:赵成彬,男,生于 1955 年,高级工程师,长期从事活断层探测研究。E-mail: ZCB001001@sina.com

2 研究区地质构造背景

银川地堑南北长 160 km, 东西宽 50 ~ 55 km。地质资料表明, 盆地内的新生代厚度约 7 000 m, 第四纪地层厚度 800 ~ 1 000 m, 最大厚度约 1 200 ~ 1 400 m^[2,3]。银川地堑形成于渐新世初期, 盆地四周都由断裂控制, 东界是黄河断裂, 西界是贺兰山东麓断裂带, 南界是牛首山东麓断裂带, 北界是正谊关断裂带; 已有地质和物探资料表明, 除贺兰山东麓断裂带和黄河断裂两条规模较大的东西边界断裂外, 在银川地堑内还存在多条北东-南西向的第四纪隐伏活动断裂, 其中规模较大、活动性较强的为银川断裂和芦花台断裂^[4,5], 这两条断裂分别在银川市城区的东部和西部通过, 属 NE-SW 走向的正断层(图 1)。

2005 年, 中国地震局地球物理勘探中心在银川盆地内完成了一条 68 km 长的深地震反射探测剖面^[6], 结果表明, 盆地内主要有 4 条规模较大的隐伏断裂, 按照盆地内的断层规模及其对沉积、构造的控制作用, 可将银川地堑分为 3 个构造单元: 1) 贺兰山东麓断裂和芦花台断裂之间的西部斜坡区; 2) 芦花台断裂和银川断裂之间的中部凹陷区; 3) 银川断裂和黄河断裂之间的东部断阶斜坡区。芦花台断裂在深地震反射剖面的浅部有非常清楚的错断显示。

3 地震数据采集和资料处理

三维浅层地震勘探区地势比较平坦, 无公路、房屋等明显的地表障碍物, 非常有利于激发点和地震测线的布设。研究区以北约 7 km 为横跨贺兰山东麓断裂带、芦花台断裂、银川断裂和黄河断裂的深地震反射测线, 研究区的北边界为横跨芦花台断裂的二维浅层地震反射测线。

三维反射地震探测采用 8 线 10 炮制的束状三

维观测系统^[7], 在 550 m × 875 m 的工作区内共布设了 5 束 28 条地震波接收线, 50 条地震波激发线, 实际布设地震波激发点 1 292 个。接收道距 5 m, 接收线距 20 m; 激发点距 30 m, 激发线距 10 m。每炮 8 束接收线, 每炮接收道数为 384 道。覆盖次数 16 次(纵向 4 次, 横向 4 次)。地面采样网格 5 m × 20 m, CMP 网格 2.5 m × 5 m。激发方式为单边追逐放炮。

资料处理采用 FOCUS 和 GRISYS 地震反射数据处理系统。在室内资料处理工作中, 针对所获得的原始地震记录特征和三维地震勘探的特点, 通过试验分别采用叠前内切除面波压制、空间域随机噪声衰减、三维静校正、三维速度分析、三维 DMO 校正和三维偏移等处理方法^[8,9], 获得了信噪比和分辨率较高的三维浅层地震数据体, 尤其是采用了三维倾角时差校正(DMO)技术, 解决了因大倾角地层存在倾角时差而影响反射波叠加效果的问题, 使叠加剖面上大倾角反射波的能量和同相轴的连续性得到了明显的增强, 剖面信噪比也得到了一定程度的提高, 因此在获得的所有纵、横剖面上都能非常清楚地看到多组特征明显、反射能量较强的反射震相。

4 芦花台断裂的三维构造特征

4.1 芦花台断裂的横向和纵向展布特征

图 2 为深度切片图。不同深度切片上的等值线反映了地下不同反射层在平面上的起伏变化形态以及断层在不同深度反射层位上的展布形态。从图 2 不但可以清楚地看到断层的平面展布, 而且还可以看到断层所错断的反射层位以及断层向深处的延伸状态。根据图 2 等值线的变化可以看到该处地层在平面上浅部变化相对较小, 等值线较稀; 深部变化相对较大, 等值线较密, 呈现出四周较高中间较低的形态, 尤其是东西向较为明显。根据地层的变化特征可以看出存在 2 条断层 F_1 和 F_2 , F_1 断层在不同深度平面上的展布形态基本上是一条直线, F_2 断层在不同深度平面上的展布形态变化较大, 上部呈曲线、中部呈直线、下部呈弧形, 表明 F_1 断层面形态相对简单, F_2 断层面形态相对复杂。

断层 F_1 错断了 $T_2 \sim T_7$ 反射层, 断层 F_2 错断了 $T_3 \sim T_7$ 反射层。两条断层的走向基本都是 NE-SW, 两条断层之间的距离在平面上由北向南逐渐增大, 在纵向上随着深度的增加而逐渐减小。两条断层的断距也不同, 断层 F_1 的断距明显大于 F_2 断层, 这些现象表明, 断层 F_1 的规模要大于断层 F_2 。

图 3 为垂直切片图, 它不仅反映了不同反射层位在东西和南北方向平面上的展布形态, 而且还反映了断层在纵向和横向上的延伸形态以及断层在深

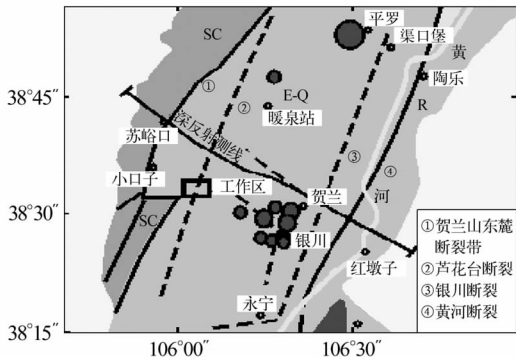


图 1 研究区地质构造和三维地震探测区位置图

Fig. 1 Geological structure and location of 3D seismic exploration area

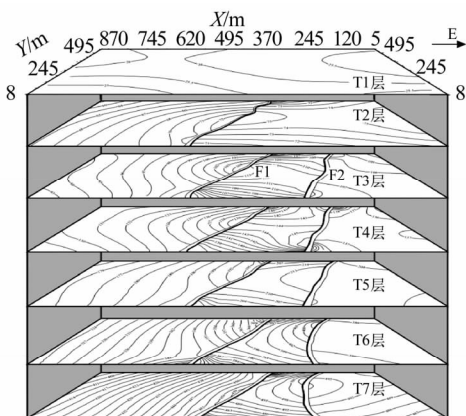


图2 芦花台断裂在不同深度反射层上的显示
Fig.2 Locations of Luhtai fault in different depth

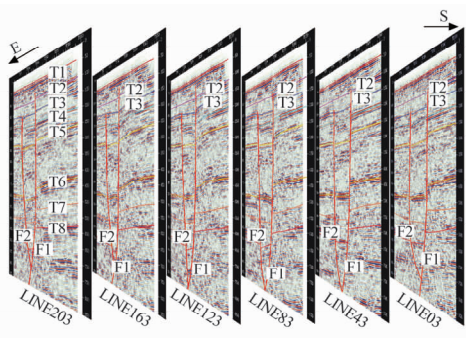


图3 芦花台断裂在不同垂直剖面上的显示
Fig.3 Locations of Luhtai fault on different seismic profiles

度方向上的相互组合关系。在平面上断层 F_1 和 F_2 的间距由北向南逐渐增大。在纵向上断层 F_1 和 F_2 呈“Y”字形分布,其中 F_1 为芦花台主断层,倾向南东; F_2 为次级断层,倾向北西,在深度 780 ~ 800 m,倾向北西的断层 F_2 归并到倾向南东的断层 F_1 之上。主断层 F_1 的上断点埋深在不同剖面(切片)上表现也不同,在测线 Line03 ~ Line83 之间的剖面上,上断点埋深为 40 ~ 45 m,而在 Line123 ~ Line203 之间的剖面上,上断点埋深为 30 ~ 35 m,这表明主断层 F_1 的上断点埋深在工作区范围内由北向南有逐渐加深的趋势;而次级断层 F_2 则相反,其上断点埋深由北向南有逐渐变浅的趋势。

4.2 芦花台断裂的空间展布特征

图4为组合显示图,在垂直剖面上地层的横向变化和断点都非常清晰,芦花台断层由 F_1 和 F_2 两条断层组成,它们从上到下错断了多组反射震相。在水平剖面上,在 250 ms 的相干数据体的水平切片上南北向的两条不相干异常也非常清楚,并表现出两条断层之间的距离由北向南逐渐增大。

图5清晰地显示了芦花台断层的空间形态和地层的形态变化。主断层 F_1 为倾向 SE、走向 NE 的正

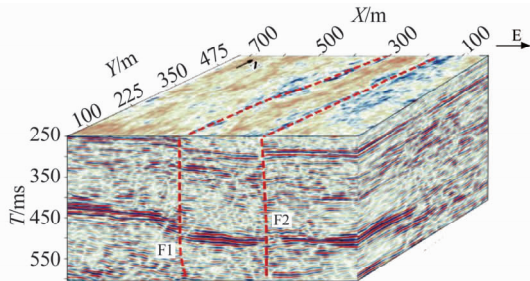


图4 相干数据体时间切片和垂直剖面组合显示图
Fig.4 Combination showing of the coherent data body time slice and the seismic profiles

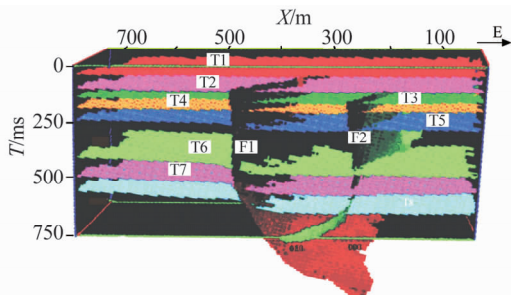


图5 地层和断层的空间形态及相互关系
Fig.5 Spatial form and relationship of the strata and the faults within the studied area

断层,该断层在最北侧的纵测线上位于桩号 330 m 左右,在最南侧的纵测线上位于桩号 560 m 左右,由此可得到断层 F_1 的走向为 $N20^\circ \sim 22^\circ E$ 。断层 F_1 的上断点埋深自北向南逐渐加深,在最北部上断点埋深为 30 ~ 35 m,而在最南部上断点埋深为 40 ~ 45 m,另外,断层 F_1 的断距由浅到深也逐渐增大。根据本区已有的地质和物探资料,深度 33 m 处为砂粘土层的底界,对应 T_1 反射界面,断距约为 5 m;对应埋深 60 ~ 65 m 的 T_2 反射界面的垂直断距约为 10 ~ 12 m;对应埋深 110 ~ 120 m 的 T_3 反射面的断距约为 18 ~ 20 m;对应埋深 190 ~ 200 m 的反射面 T_4 的断距约为 30 ~ 35 m;而对应埋深约 460 ~ 500 m 的第四纪覆盖层底界 T_6 的断距约为 50 ~ 55 m。次级断层 F_2 为倾向 NW、走向 NE 的正断层,在平面上位于主断层 F_1 东边 180 ~ 250 m,两条断层之间的距离由北向南逐渐增大,在最北侧的测线上二者相距约 180 m,在最南侧的测线上二者相距约 250 m。在纵向上两条断层之间的距离随着深度的增加逐渐减小,在深度 780 ~ 800 m 两条断层归并到一起。断层 F_2 的断距明显小于断层 F_1 ,而上断点埋深为 110 ~ 120 m,明显大于断层 F_1 。 F_1 和 F_2 断层都呈铲形向下延伸,在深度 780 ~ 800 m 向北西倾的 F_2 断层归并到向南东倾的 F_1 断层之上, F_1 断层继续向下延伸。

图 6 为三维探测的垂直切片(剖面)与二维探测剖面、钻孔剖面对比图。三维垂直剖面(图 6(a))比二维剖面(图 6(b))的分辨率和信噪比都明显提高,地层特征更加明显,断层更加清晰。尽管二维剖面和三维剖面所反映的地下界面形态基本相同,但三维剖面比二维剖面所反映的剖面细节、地层和断层特征以及断层的相互组合关系都明显要高。图 6(c)为位于三维剖面(图 6(a)) F_1 断层上的钻孔剖面,钻孔剖面显示深度 25.8 m 以上的中、细砂层没有被断层错动,深度 33 m 处的砂粘土底界出现有 5.02 m 的垂直落差,结合该区地质资料,芦花台断裂应为中更新世末期活动断裂^[5],这与(图 6(a))的解释结果吻合较好。

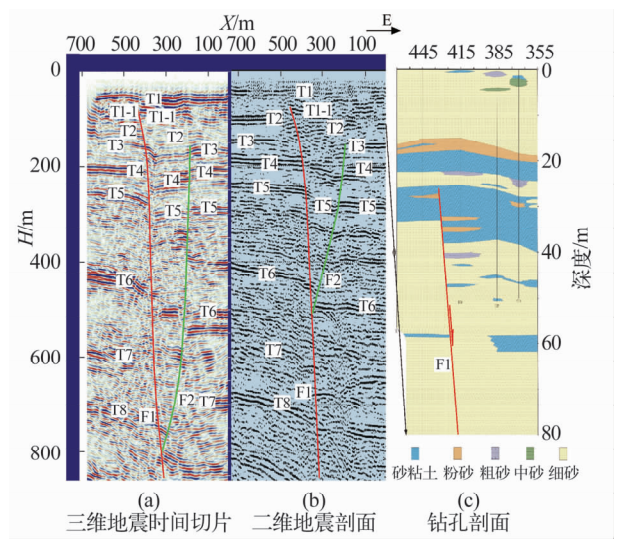


图 6 三维垂直切片、二维剖面和钻孔剖面对比
Fig. 6 Comparison of 3D seismic slice, 2D seismic profile and drilling section

5 结论与讨论

5.1 结论

芦花台断裂是由两条断裂组成的断裂带,其中主断裂 F_1 走向 NE、倾向 SE,次断裂 F_2 走向 NE、倾向 NW,都是正断层。该断裂带在工作区内走向为 $N20^{\circ} \sim 22^{\circ}E$ 。在工作区内主断裂 F_1 的上断点埋深具有自北向南逐渐加深的趋势,在北部上断点埋深为 30 ~ 35 m,在南部上断点埋深为 40 ~ 45 m。次断裂 F_2 的上断点埋深为 110 ~ 120 m,因此主断裂 F_1 的活动时代比次断裂 F_2 新。

主断裂 F_1 的断距由浅到深逐渐增大。深度 33 m 处的砂粘土层底界的垂直断距约为 5 m,埋深 60 ~ 65 m 的 T_2 反射界面的垂直断距为 10 ~ 12 m,埋深 110 ~ 120 m 的 T_3 反射界面的垂直断距为 18 ~ 20 m,埋深 190 ~ 200 m 的 T_4 反射界面垂直断距为 30

~ 35 m,而埋深 460 ~ 500 m 的第四纪覆盖层底界(T_6)的垂直断距为 50 ~ 55 m。次断裂 F_2 的垂直断距明显小于主断裂 F_1 。

在工作区内断裂 F_1 和 F_2 之间在平面上的距离由北向南逐渐增大,在北侧的剖面上,二者相距约 180 m,在南侧的剖面上,二者相距约 250 m。在剖面上,两条断裂之间的距离随着深度的增加逐渐减小,在深度 780 ~ 800 m F_2 断裂归并到 F_1 断裂上。

5.2 讨论

在构造复杂地区和构造复杂部位,仅采用二维地震探测难以获得准确的探测结果,而采用三维地震探测方法能够准确地确定断裂构造的位置、性质、特征及其错断的最新地层时代,确定断裂的活动性。由于三维地震探测采用了来自多方位信号的叠加,能够更有效地压制随机干扰,消除侧反射的影响,因此三维地震探测结果的信噪比和分辨率比二维地震探测结果更高,这从图 6 可以看出,尽管二维剖面和三维剖面所反映的地下界面形态基本相同,但二者所反映的剖面细节、断层相互关系以及剖面的信噪比和分辨率却存在较大差别。在三维地震剖面上断层的错断特征非常清楚,而在二维地震剖面上断层的错断特征明显低于三维剖面,这主要表现在以下几个方面:

- 1) 二维地震剖面 T_3 及以上地层界面反射波的信噪比较低、反射同相轴连续性较差。
- 2) 二维地震剖面上 T_7 反射波的分辨率和同相轴的连续性明显不如三维地震剖面上的 T_7 反射波。
- 3) 在二维地震剖面上,位于多组强反射同相轴之间的弱反射波(如 $T_3 \sim T_5$ 之间)因能量较弱而难以追踪,而在三维地震剖面上,这些能量较弱的反射震相也能被清晰地识别和追踪,因此利用三维地震剖面更加有利于对地下地层进行详细分层,以便更加准确地确定断层。
- 4) 次级断层 F_2 在二维和三维地震剖面上都有非常清楚地显示,但二维和三维探测结果所反映的断层向剖面深部的延伸情况却差别较大。根据二维剖面的反射波组特征,断层 F_2 大约在 500 ms 左右归并到 F_1 断层上,而在三维剖面上断层 F_2 向下一直可延伸至 800 ms 左右才归并到 F_1 断层上。在三维剖面上判断断层 F_2 向下延伸的主要依据是反射波 T_6 和 T_7 的错断以及强、弱反射能量变化的分界,而在二维剖面上这两个特征都不清楚,因此,根据二维地震剖面难以准确地判断断层 F_2 向剖面深部的延伸情况。

(下转第 48 页)