

夏垫断裂夏垫段浅部构造特征地震探测^①

冉志杰¹, 李 皓¹, 吕国军¹, 温 超¹, 杨 柳¹,
杨歧炎¹, 孟立鹏¹, 彭远黔¹, 骆艳欣²

(1. 河北省地震局, 河北 石家庄 050011; 2. 石家庄市地震局, 河北 石家庄 050020)

摘要:采用高分辨率浅层地震勘探技术对夏垫断裂夏垫段进行了探测, 获得高质量、高分辨率的地震勘探剖面图。划分出 9 条断裂构造, 通过地震时—深转换剖面对比钻孔地层资料确定出断裂的上断点埋深, 从而确定了断裂的活动时代。探测结果表明: 夏垫断裂是由四条断裂组成, 其中的主断裂至今仍在活动; 在断裂的上盘还探测到三条活动时代较新的断裂构造。

关键词: 浅层地震勘探; 夏垫断裂; 浅部活动特征; 高分辨率

中图分类号: P631.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-0844(2013)03-0656-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0651

Seismic Detecting for the Shallow Tectonic Features of the Xiadian Fault

RAN Zhi-jie¹, LI Hao¹, LV Guo-jun¹, WEN Chao¹, YANG Liu¹,
YANG Qi-yan¹, MENG Li-peng¹, PENG Yuan-qian¹, LUO Yan-xin²

(1. Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050011, China;

2. Seismological Bureau of Shijiazhuang City, Shijiazhuang, Hebei 050020, China)

Abstract: The Xiadian fault is a Holocene active fault in the north China plain. It exists from Pinggu in Beijing, to Mafang and Pangezhuang in the southwest, and it ends in Yongledian in the south. It is oriented towards NE 45° and the total length is 45 km. Many scholars have studied the characteristics of the quaternary period activity on this fault, and of a magnitude 8 earthquake which happened in 1679. But the Xiadian fault is a complicated structure and the understanding of the shallow structural features of the fault are not entirely accurate. In this paper, the Xiadian fault is detected with high resolution shallow seismic exploration. The observation system contains 72 records, a 4 m interval, an 8 m shot interval, 18 CMP stacking, and a unilateral trigger. A combination of a 60 Hz vertical geophone and an 80 kg rammer artificial lamping source are used, and each shot point was hammered on above 25 times. The data acquisition parameters are: a sampling interval of 0.25 ms, a recording time of 1 000 ms, a 15 Hz low cutoff frequency, and a 500 Hz high cutoff frequency. Vista2D / 3D seismic processing software is applied for data processing. The following aspects are focuses of this study: careful removal of the primary wave, ensurance of the shallow reflection wave, consistent compensation processing of amplitude and surface, suppression of interference, improved signal-to-noise ratio, consistent deconvolution of the surface, wavelet processing (in order to improve the resolution and fidelity), velocity analysis, residual static correction and good post-stack migration processing, and so on. Rich strata of the interface appear in the period of less than 700 ms reflection wave group sections, according to

① 收稿日期: 2013-06-16

基金项目: 河北省地震局地震科研基金项目(2012011)

作者简介: 冉志杰(1979-), 男(汉族), 河北石家庄人, 工程师, 主要从事工程地震研究. E-mail: ranzhijie0927@126.com

wave group characteristics, and the profile can be roughly divided into two parts of the south and north. The strong reflections on the southern section are greater the reflection power is stronger with better continuity—while in the north the weak reflection energy leads to poor continuity. According to the characteristics of the rupture and the distortion in the seismic section, the entire section is divided into nine fracture structures by a breaking F_5 fault. The sections in the south and north display obvious differences: the southern section of the reflection in the phase axis is continuous and the layer is clear, while the north section of the reflection phase axis is messy. According to the characteristics of the seismic profile, nine tectonic faults were confirmed. From the time-depth conversion profile comparison with the borehole data, the depths of faults' up-breakpoints were determined and the faults' activity periods were also determined. The detection results show that the fracture is composed of four faults, one of the main faults is still active and three new active faults were detected in the hanging wall of the fracture. According to the characteristics of Xiadian fault, it is a high dip angle fault to near the surface and the quaternary active fault zone. The results show that the Xiadian fracture structure is complex.

Key words: shallow seismic prospecting; the Xiadian fault; shallow activity characteristics; high resolution

0 引言

夏垫断裂是华北平原区北部一条重要的全新世活动断裂^[1],它北起平谷岳各庄,向西南经马坊西、潘各庄,南至永乐店村南,总体走向 $NE45^\circ$,全长 45 km。1679 年该断裂上曾发生三河—平谷 8 级大地震。20 世纪 70 年代末以来,许多学者对夏垫断裂的第四纪活动特征及 1679 年 8 级地震的发震构造进行了研究。孟宪梁等(1983,1988)、向宏发等(1988,1994)调查了该 8 级地震的地表破裂带^[2],并开挖了潘各庄等探槽;冉勇康^[3]开挖了东柳河屯探槽;江娃利等^[4]对地表破裂带的古地震特征进行了研究,确定了断裂的最新活动时代;向宏发等(1995)、黄礼良(1997)、张先康等(2002)、高景华等(2008)、赵成彬等(2010)、刘保金等(2011)对夏垫断裂进行了探测研究^[5-8],显示了夏垫断裂的深、浅部构造特征和地层结构及断裂特征等信息,但夏垫断裂结构复杂,所获得该断裂的浅部构造特征并不完全准确。为此,我们在进行河北省地震局地震科研基金重点课题项目中采用高分辨率地震勘探技术,对夏垫镇附近的夏垫断裂浅部活动特征进行详细探测,进一步展示夏垫断裂的浅部特征。

1 地震测线布设与地震数据采集处理

在分析已有地震构造、断裂出露情况以及物探资料的基础上,在夏垫镇夏垫断裂经过的大棋盘村东侧、永太辛庄村西侧之间布设地震勘探剖面 XD—1 测线(图 1)。剖面走向 $NW15^\circ$,起点坐标 116°

$56'03.7515''$, $39^\circ58'04.8432''$;终点坐标 $116^\circ55'52.5353''$, $39^\circ58'37.3745''$ 。剖面与断裂走向相交,长度为 1 054 m。地震数据采集使用 Geometries 公司 StrataVisornzxp—96 浅层高分辨率地震仪,24 位 A/D 转换,动态范围 144 dB,仪器频带为 1.75 Hz ~ 20 kHz。数据采集的仪器采样参数为:采样间隔 0.25 ms,记录时间为 1 000 ms,低截频率 15 Hz、高截频率 500 Hz 的带通滤波器。采用单边激发滚动方式,72 道记录、道间距 4 m、炮间距 8 m 的 18 次共中心点叠加观测系统,60 Hz 垂直组合检波器接收。80 kg 夯锤人工夯击震源激发,在每个震源上锤击 25 次以上进行共炮点叠加,以便提高信号能量,压制噪声和干扰^[9-10]。

应用 Vista2D/3D 地震处理软件对资料进行处理,重点注意以下方面的处理工作:细致切除初至波,确保取得尽可能浅的反射波,以满足断裂浅部活动特征的研究;进行振幅补偿和地表一致性振幅处理,压制干扰、提高信噪比;反褶积和地表一致性子波处理,以便提高分辨率和保真;剩余静校正和速度分析反复迭代,提高动静校正精度,确保反射界面叠加成像准确;做好叠后偏移处理,确保构造形态正确和断裂清晰;通过反射波资料处理时获得的叠加速度(也称 NMO 速度)和时间剖面上不同界面反射波的双程垂直到时 t_0 ,由迪克斯(DIX)公式获得不同地层反射界面以上的平均速度(\bar{V}),经时—深转换获得地震勘探的深度剖面,以便了解反射波的地层埋深度、断裂的空间位置等参数。通过这样的处理,

为夏垫断裂研究提供高品质的地震剖面^[11](图2)。

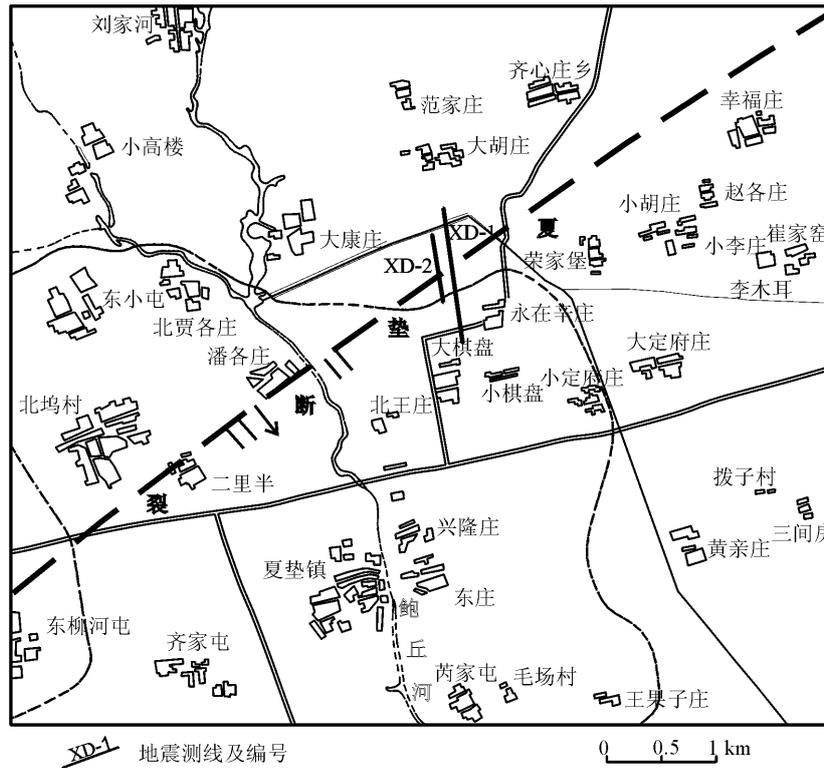


图1 夏垫断裂夏垫段地震勘探剖面位置图

Fig.1 Location of the seismic detecting profile cross Xiadian fault near Daqipan village

2 地震剖面的解释分析

夏垫断裂的浅部特征是本文的研究重点。因此针对能够很好反映断裂浅部特征的 XD-1 线偏移剖面(图2(b))以及深度剖面进行了详细的解释和地质分析^[12],结果示于图3。

2.1 剖面的地震特征

2.1.1 波组特征

丰富的地层界面反射波组出现在剖面 700 ms 以上的时间范围内。根据剖面波组特征,以 CDP341 为界,剖面大致可以分为南、北两部分。在南段剖面上反射震相较多,反射能量较强,连续性较好;在北段反射能量较弱,连续性较差。

在剖面南段的 600 ms 之上,存在 3 组反射能量较强、横向连续性较好的反射波组,自上至下命名为 T_1 、 T_2 、 T_3 。这些反射波组呈略微向北倾斜展布,并且在一些地段出现同相轴的扭曲和变形现象。在剖面北段存在反射能量较强、横向连续性较好的 T_1 、 T_2 反射波组,基本呈水平状展布, T_3 反射波组极不明显。

值得注意的是在剖面南段 350~750 ms 之间存在一倾斜的反射波组,错断 T_3 波组,终止于 T_2 波

组之下。

总体而言,3 套波组的波形有明显的横向变化,从南向北振幅由弱变强、由强变弱直至消失,反射波组的同相轴出现扭曲和变形现象。

2.1.2 断裂特征

由图3可见,剖面上总体被断裂切割形成相间排列的“断陷构造”。根据地震剖面中反射同相轴出现错动、扭曲等断裂构造特征,整个剖面划分出 9 条断裂构造。以断裂 F_5 为界,剖面的南段和北段反射波显示出明显的差异性。南段的反射同相轴较连续,层状性明显,而北段反射同相轴零乱。细致分析,在图3上可以看到,断裂 F_4 、 F_5 和 F_7 共存于 T_3 反射波组中,视倾都向 SE,由此可见夏垫断裂是由 4 条断裂组成($F_4 \sim F_7$), F_4 、 F_5 和 F_7 是夏垫断裂的主体断裂, F_6 则是伴生断裂,其中 F_5 是目前通常所指的夏垫断裂, F_4 视倾角稍缓,并呈铲型向下延伸,与赵成彬等^[1]发现的断裂形态一致,但断裂的上断点埋深存在差异。

为进一步确认夏垫断裂的组构形态,在 XD-1 线西侧 200 m 处,平行于 XD-1 测线布设一条 526 m 的勘探测线 XD-2。剖面起点坐标 $116^{\circ}55'53.5694''$, $39^{\circ}58'10.2650''$;终点坐标 $116^{\circ}55'46.8016''$,

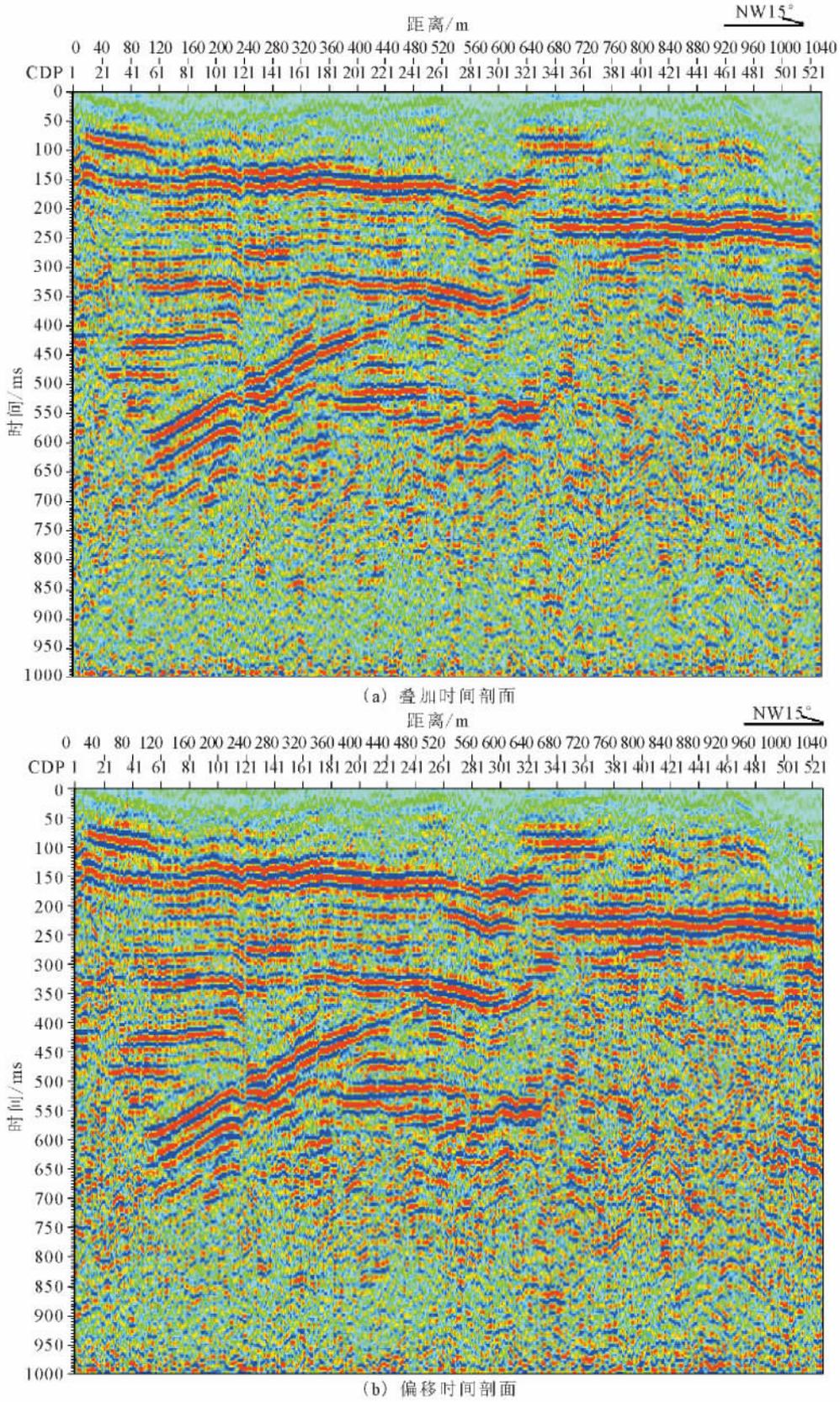


图 2 XD-1 测线处理后的地震剖面

Fig. 2 Seismic profiles of XD-1 line

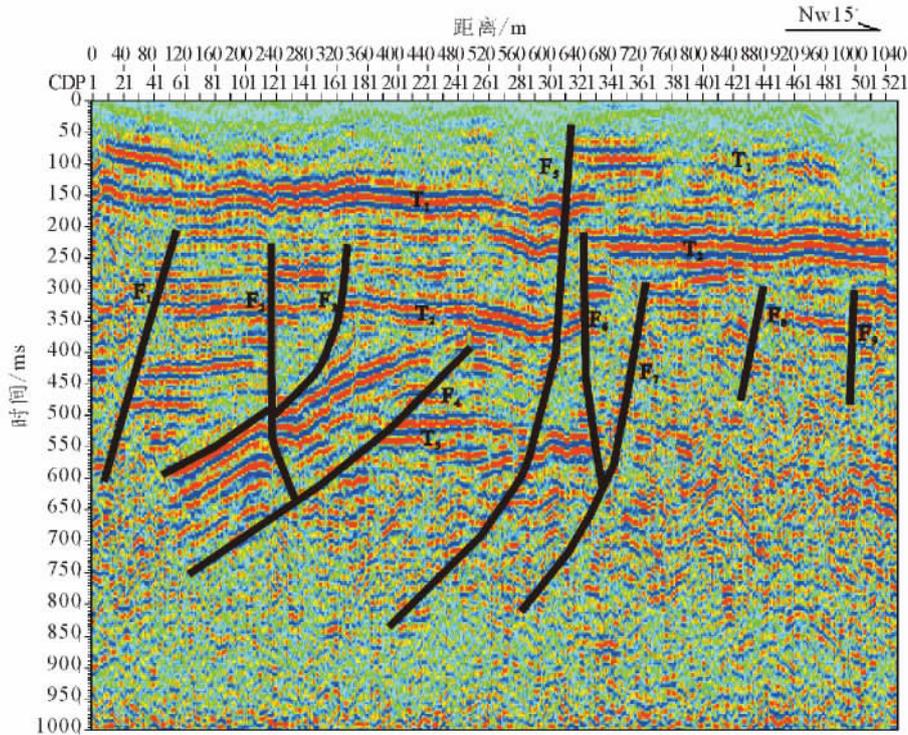


图3 XD-1测线偏移地震剖面解释结果

Fig. 3 Offset seismic profile of XD-1 line

表1 断裂参数

Table 1 The parameters of faults

断裂编号	断点位置/m	错断地层界面	上断点埋深/m	视倾向	断裂性质	备注
F ₁	120	Q ₁ 、Q ₂	110	南	正断裂	
F ₂	200	Q ₁ 、Q ₂	140	北	逆断裂	错断 F ₃ 断裂
F ₃	340	Q ₁ 、Q ₂	140	南	正断裂	
F ₄	485	Q ₁	285	南	正断裂	
F ₅	630	Q ₁ 、Q ₂ 、Q ₃ 、Q ₄	地表	南	正断裂	夏垫断裂
F ₆	650	Q ₁ 、Q ₂	140	北	逆断裂	
F ₇	720	Q ₁ 、Q ₂	205	南	正断裂	
F ₈	885	Q ₂	210	南	正断裂	
F ₉	1 000	Q ₂	210	南	正断裂	

39°58′26.5867″。根据断裂构造在地震剖面上特征,划分出3条断裂构造,分别与XD-1测线上的断裂F₄、F₅、F₇具有相似的构造特征(图4)。

根据剖面上所反映的特征,可以看出夏垫断裂是一条高倾角、错断至近地表的第四纪活动断裂带,该断裂带由四条断裂组成,视倾向SE,其中断裂F₇是本次发现的一条新断裂。

由地震剖面可见,在夏垫断裂的上盘还存在一些规模较大的断裂(F₁~F₃),在下盘有一些规模小的断裂(F₈、F₉)。

2.2 XD-1线剖面的地质特征分析

图5为XD-1测线经时-深转换后所获得地

震勘探的深度剖面。对比夏4#孔地层资料(Q₃ 44.7 m、Q₁ 370 m),反射时间剖面中的波组T₁对应于上更新统(Q₃)的底界面,T₃对应于下新统(Q₁)的底界面。

在XD-1剖面上所有划分出的9条断裂构造参数见表1。

从上述分析可以看出:①夏垫断裂是由四条断裂组成,其中F₄断裂视倾角稍缓,并呈铲型向下延伸,错断了下新统(Q₁)界面,断裂上断点埋深285 m;F₅断裂倾角较陡,断裂出露地表(图6,中国地震局震害防御中心清理出的断层剖面,2012);F₇断裂倾角较陡,错断了下新统(Q₁)界面,断裂上断点埋

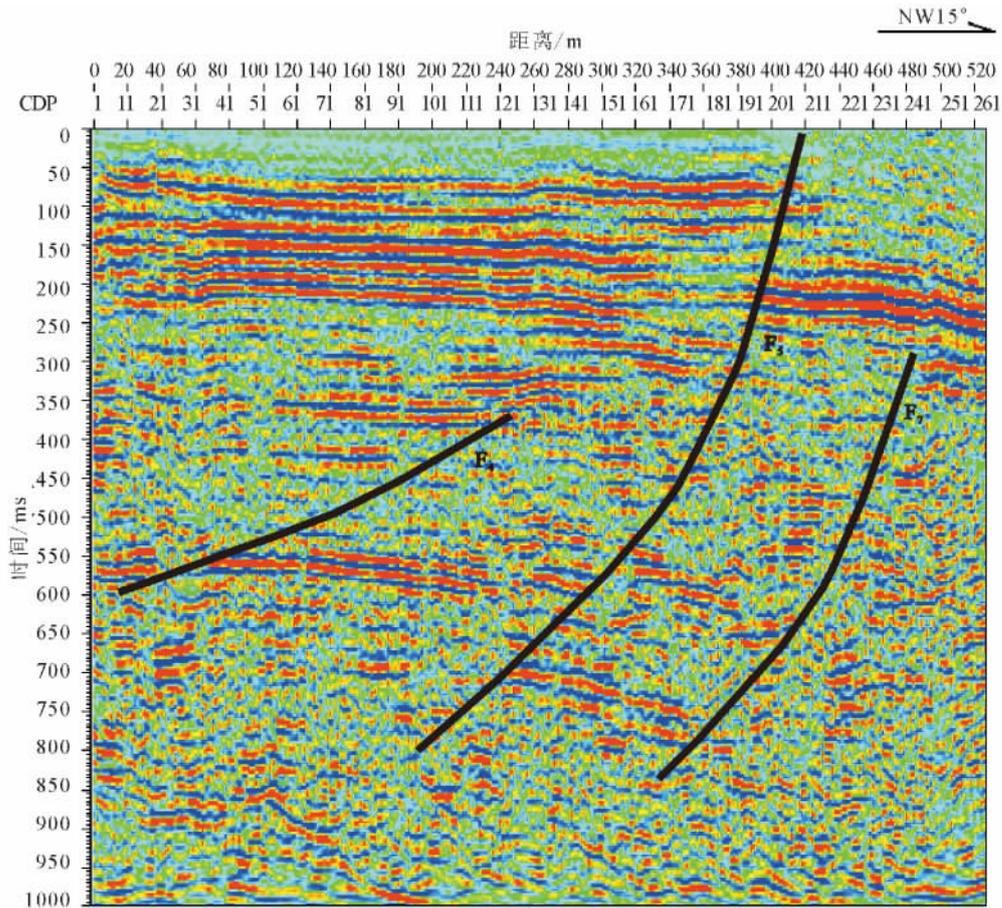


图 4 XD-2 测线偏移地震剖面解释结果

Fig. 4 Offset seismic profile of XD-2 line

深 205 m; F_6 则是伴生断裂, 断裂上断点埋深 140 m。②断裂 F_4 、 F_7 在 T_2 之后停止了活动; 断裂 F_5 则目前仍在活动; 伴生断裂 F_6 仅在一定的时段活动。③断裂的上盘存在一系列活动时代较新的断裂 ($F_1 \sim F_3$), 其中 F_2 断裂错断了 F_3 断裂。

3 结论

采用高分辨率浅层地震勘探技术, 获得夏垫断裂浅部清晰的断裂结构形态, 为进一步开展夏垫断裂探测研究提供了可靠资料, 并为夏垫断裂的整体特征研究提供了可靠的依据。结果表明, 夏垫断裂构造复杂, 在其附近还存在一系列断裂, 这些断裂与夏垫断裂组成了夏垫断裂带。

参考文献 (References)

- [1] 赵成彬, 鄢少英, 秦学业, 等. 夏垫断裂浅部特征高分辨率反射地震探测研究[J]. 地震研究, 2010, 33(1): 81-85.
ZHAO Cheng-bin, FENG Shao-ying, QIN Xue-ye, et al. Research on the Shallow Structure Characteristics of Xiadian Fault Using High-resolution Artificial Seismic Exploration

Method[J]. Seismological Research, 2010, 33(1): 81-85. (in Chinese)

- [2] 孟宪梁, 杜春涛, 王瑞. 1679 年三河—平谷大震的地震断裂带[J]. 地震, 1983, (3): 18-23.
MENG Xian-liang, DU Chun-tao, WANG Rui. Rupture of the Sanhe-Pinggu earthquake of 1679[J]. Earthquake, 1983, (3): 18-23. (in Chinese)
- [3] 冉永康, 邓起东, 杨晓平, 等. 1679 年三河—平谷 8 级地震发震断层的古地震及重复间隔[J]. 地震地质, 1997, 19(3): 193-201.
RAN Yong-kang, DENG Qi-dong, YANG Xiao-ping, et al. Paleoequakes and Recurrence Interval on the Seismogenic Fault of 1679 Sanhe—Pinggu M8 Earthquake, Hebei and Beijing[J]. Seismology and Geology, 1997, 19(3): 193-201. (in Chinese)
- [4] 江娃利, 侯治华, 肖振敏, 等. 北京平原夏店断裂齐心庄探槽古地震事件分析[J]. 地震地质, 2000, 22(4): 413-422.
Jang Wa-li, Hou Zhi-hua, Xiao Zheng-min, et al. Study on Paleoequakes of Qixinzhuang Trench at the Xiadian Fault, Beijing Plain[J]. Seismology and Geology, 2000, 22(4): 413-422. (in Chinese)
- [5] 徐锡伟, 计凤桔, 于贵华, 等. 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, 2000, 22(1): 9-

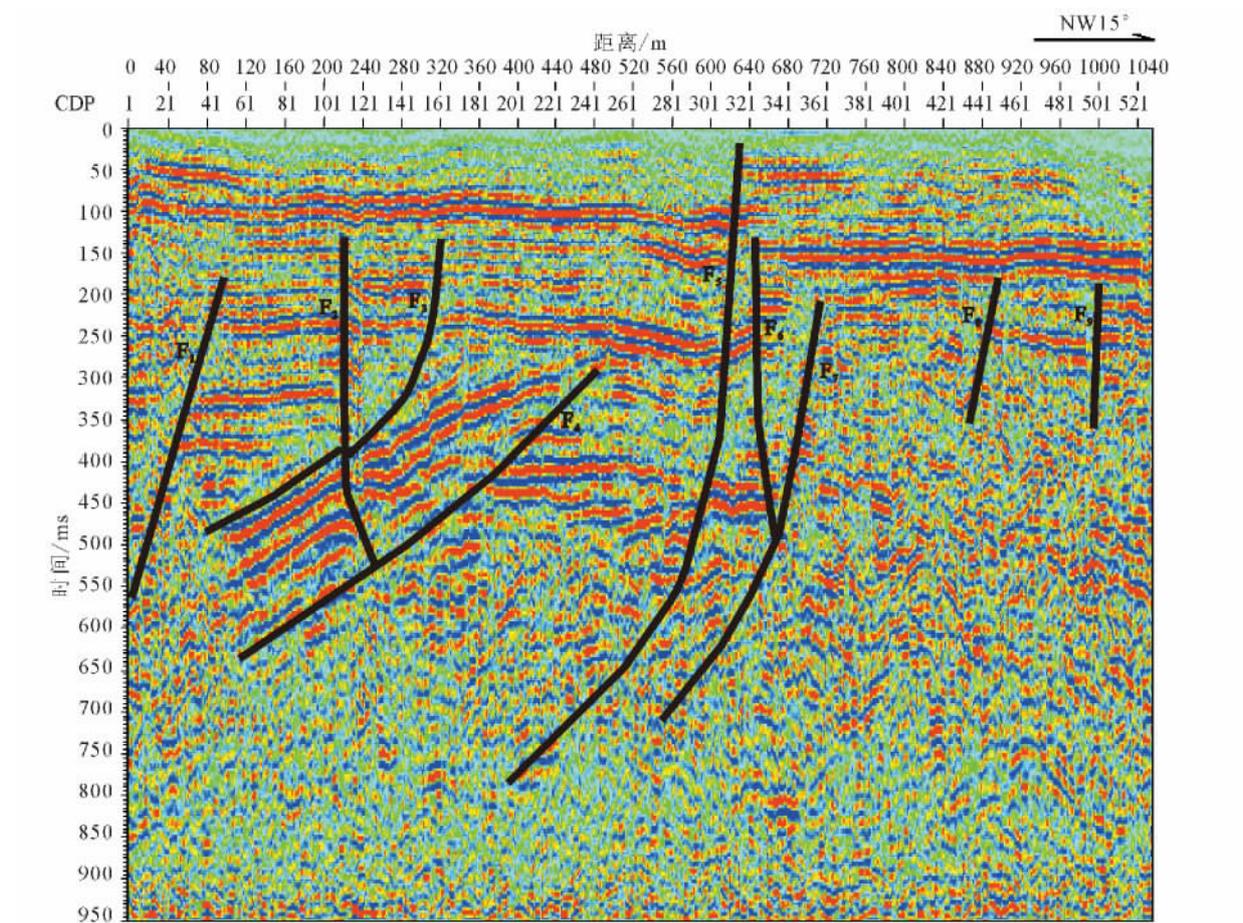


图5 XD-1测线地质分析剖面

Fig. 5 Geological sections of XD-1 line



图6 夏垫断裂的地表出露(镜头向东)

Fig. 6 The photo of exposure site of Xiadian fault

19.

XU Xi-wei, JI Feng-ju, YU Gui-hua, et al. Reconstruction of Paleoeathouake Sequence Using Stratigraphic Records from Drill Logs: A Study at the Xiadian Fault, Hebei[J]. Seismology and Geology, 2000, 22(1): 9-19. (in Chinese)

[6] 张先康, 赵金仁, 刘国华, 等. 三河—平谷 8.0 级大震区震源细

结构的深地震反射探测研究[J]. 中国地震, 2002, 18(4): 326-336.

ZHANG Xiang-kang, ZHAO Jin-ren, LIU Guo-hua, et al. Study on Fine Crustal Structure of the Sanhe—Pinggu Earthquake(M8.0) Region by Deep Seismic Reflection Profiling[J]. Earthquake Research in China, 2002, 18(4): 326-336. (in Chinese)

[7] 刘保金, 张先康, 陈颢, 等. 三河—平谷 8.0 级地震区地壳结构和活动断裂研究——利用单次覆盖深反射和浅层地震剖面[J]. 地球物理学报, 2011, 54(5): 1251-1259.

LIU Bao-jin, ZHANG Xiang-kang, CHEN Yong, et al. Research on Crustal Structure and Active Fault in the Sanhe—Pinggu Earthquake(M8.0) Zone Based on Single-fold Deep Seismic Reflection and Shallow Seismic Reflection Profiling [J]. Chinese J. Geophys., 2011, 54(5): 1251-1259. (in Chinese)

[8] 高景华, 徐明才, 荣立新, 等. 利用地震剖面研究夏垫断裂西南段的活动性[J]. 地震地质, 2008, 30(2): 497-503.

GAO Jing-hua, XU Ming-cai, RONG Li-xin, et al. Activity of the Southwest Segment of Xiadian Fault Investigated by Seismic Reflecton Profiling[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(2): 497-503. (in Chinese)

[9] 马文涛, 唐文榜, 徐锡伟, 等. 北京黄庄—高丽营隐伏断裂立水

- 桥段浅部活动特征的地震探测[J]. 物探与化探, 2005, 29(6): 503-505.
- MA Wen-tao, TANG Wen-bang, XU Xi-wei, et al. Seismic Exploration of Shallow Deformation along Lishuiqiao Section of Huangzhuang—Gaoliying Active Fault in Bering Urban Area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 29(6): 503-505. (in Chinese)
- [10] 李晓妮, 冯希杰, 任隽, 等. 临潼—长安断裂第四纪活动性勘探[J]. 西北地震学报, 2012, 34(4): 398-404.
- LI Xiao-ni, FENG Xi-jie, REN Jun, et al. Exploration on Lintong—Chang'an Fault for Its Activities since Quaternary Period [J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(4): 398-404. (in Chinese)
- [11] 卢育霞, 王振明, 王兰民, 等. 兰州盆地活断层的高分辨率浅层地震勘探技术[J]. 西北地震学报, 2008, 30(4): 344-353.
- LU Yu-xia, WANG Zhen-ming, WANG Lan-min, et al. High-resolution Shallow Seismic Prospecting Techniques for Active Fault Investigation in Lanzhou Basin [J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(4): 344-353. (in Chinese)
- [12] 付兆辉, 秦伟军. 断陷盆地陡坡带高精度地震勘探技术应用[J]. 西北地震学报, 2012, 34(2): 114-120.
- FU Zhao-hui, QIN Wei-jun. High-precision Seismic Exploration Techniques and Application on the Abrupt Slope Belt of Faulted Basin [J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2): 114-120. (in Chinese)

(上接 646 页)

- [36] Sammis C G, Smith S W. Seismic Cycles and the Evolution of stress Correlation in Cellular Automation Models of Finite Fault Networks [J]. Pure Appl. Geophys., 1999, 155: 307-34.
- [37] Reasenber P A. Second-order Moment of Central California Seismicity 1969 — 1982 [J]. J. Geophys. Res., 1985, 90: 5479-495.
- [38] Keilis-Borok V I, L Knopoff. Bursts of Aftershock of Strong Earthquakes [J]. Nature, 1980, 283 (P5744): 259-63.
- [39] 陈凌, 刘杰, 陈颢, 等. 地震活动性分析中余震的删除 [J]. 地球物理学报, 1998, 41(增刊): 244-52.
- CHEN L, LIU J, CHEN Y, et al. Aftershock Deletion in Seismicity Analysis [J]. Chinese J. Geophys., 1998, 41(S1): 244-52. (in Chinese)
- [40] Turcotte D L, W I, Newman, R Shcherbakov. Micro-and Macro-copic Models of Rock Fracture [J]. Geophys. J. Int., 2002, 152: 718-28.
- [41] Sornette D, C G Sammis. Complex Critical Exponents from Renormalization Group Theory of Earthquakes; Implications for Earthquake Predictions [J]. J. Phys. I., 1995, 5: 607-619.