

# 夏垫断裂浅部特征高分辨反射地震探测研究\*

赵成彬<sup>1</sup>, 酆少英<sup>1</sup>, 秦学业<sup>2</sup>, 刘保金<sup>1</sup>, 寇昆朋<sup>1</sup>, 郭新景<sup>1</sup>, 李吉昌<sup>1</sup>, 孙振国<sup>1</sup>

(1. 中国地震局地球物理勘探中心, 郑州 450002; 2. 河南省有色金属地质矿产局第五地质大队, 郑州 450016)

**摘要:** 在夏垫断裂上采用浅层纵、横波相结合的联合探测方法, 获得了多条反映不同深度的高质量叠加时间剖面图, 这些图像清晰地显示了夏垫断裂的浅部构造特征和地表以下浅至几米的地层结构和断裂特征信息, 使得采用人工地震方法探测地表下 10 m 以内的断裂成为可能。本次探测工作中, 还在夏垫断裂的南侧发现了 1 条倾角较缓、呈铲型向下延伸的断裂, 表明夏垫断裂是由 2 条断裂组成的断裂带。

**关键词:** 夏垫断裂; 活动断裂; 可控震源; 时间剖面

**中图分类号:** P315.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2010)01-0081-05

## 0 引言

夏垫断裂是北京平原区一条重要的活动断裂。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, 并开挖了潘各庄等探槽, 冉勇康 (1997) 开挖了东柳河屯探槽, 江娃利等 (2000) 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。但是由于地表地质调查、探槽及钻探方法仅能确定断裂的浅部特征, 而断裂向下的延伸情况及空间分布图像尚不清楚, 因此有必要采用浅层高分辨率地震勘探方法查明夏垫断裂的浅部特征, 以便研究浅部断裂与深部发震断裂之间的关系, 对断裂未来的地震活动性以及可能造成的地震灾害进行预测。

夏垫断裂位于松散覆盖层较厚的平原地区, 处于隐伏状态, 因此需要采用有效的探测方法提高断裂的定位精度。隐伏断裂探测主要以纵波反射探测方法为主 (王振东, 1982; 赵成斌等, 2007; 姚姚, 2005; 何强等, 2001), 由于纵波的传播速度快、波长长, 受各种干扰的影响大, 对

浅部地层和薄地层的分辨能力低, 而高分辨率地震勘探不仅要准确确定断裂的位置, 更重要的是确定断裂的上断点埋深、断距及断裂的最新活动年代。由于断裂的上断点距地面一般都较浅, 因此探测深度要浅、范围要大, 探测成果的分辨率要高, 分辨薄地层的能力要强。由于横波的传播速度慢、波长短, 对浅部地层和薄地层的分辨能力强, 有利于准确地确定浅部断裂的上断点埋深和判定断裂的最新活动年代 (赵成斌等, 2001); 而纵波波长长, 探测深度大, 有利于确定断裂的特征及向深部的延伸形态, 因此, 我们在夏垫断裂上开展了浅层纵波和横波联合探测的研究, 以便在城市活断层探测工作中采用纵、横波联合探测方法开展高分辨率地震探测。

## 1 测区地质构造概况

夏垫断裂是华北平原区北部一条重要的隐伏活动断裂。断裂走向 N50°E, 倾向 SE, 倾角 50°~70°, 是北京东侧大厂凹陷和通县凸起两个第四纪构造单元间的边界断裂 (图 1) (车兆宏, 1993)。受夏垫断裂正断倾滑运动的影响, 大厂凹陷持续沉降, 堆积了厚约 600~700 m 的第四系松散沉积物。通县凸起则相对隆升, 第四系松散沉积物厚度仅 300~400 m。研究表明, 夏垫断裂两侧第四

\* 收稿日期: 2009-01-16.

基金项目: 国家发展与改革委员会项目“城市活断裂试验探测”(2004-1138)资助。

中国地震局地球物理勘探中心科技成果论著编号: RCEG 200726.

系下更新统夏垫组的垂直位移达 319 m, 中更新统翟里组 139 m, 上更新统军营组 15 m。1679 年三河—平谷 8 级地震在地表形成了一条西起东柳河屯, 经夏垫镇北, 东止东兴庄, 长约 10 km 的地震断裂陡坎, 这些地震断裂陡坎共分为 6 段, 总体走向北东—南西。研究人员在夏垫断裂上开展的钻井和探槽开挖研究结果显示, 夏垫断裂呈现东南

盘下降、西北盘抬升的正断倾滑性质, 兼有右旋走滑分量 (黄礼良, 1997; 张晚霞等, 1995)。据已有的古地震探槽资料推测, 距今 20 ka 以来夏垫断裂上曾发生过 4 次地表破裂型古地震, 其中 1679 年的三河—平谷 8 级大地震是夏垫断裂上最新的一次地震活动 (江娃利等, 2000; 徐锡伟等, 2000)。

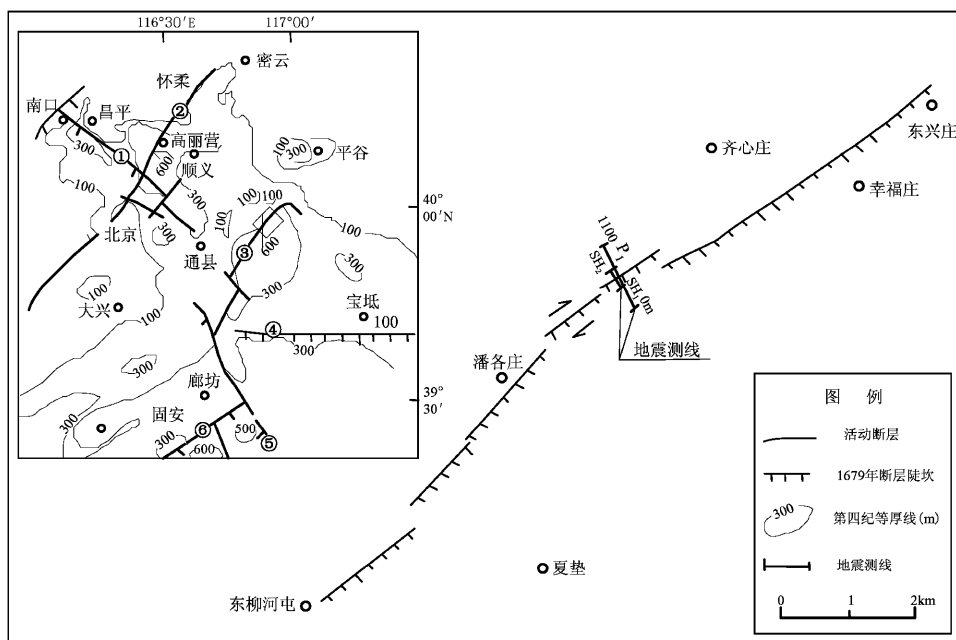


图 1 地质构造及测线位置图

Fig. 1 Geological structure and the location of the reflected seismic profile

## 2 测线位置和数据采集方法

### 2.1 测线位置

本次浅层反射地震测线位于潘各庄和齐心庄之间, 垂直于夏垫断裂陡坎布设 (图 1)。按照不同的探测方法, 测线共分 3 条:  $P_1$  (纵波) 测线, 全长 1 100 m;  $SH_1$  (横波) 测线与  $P_1$  测线完全重合, 全长 1 100 m;  $SH_2$  (横波) 测线位于  $P_1$  测线上的 400 ~ 660 m 处, 与  $P_1$  测线重合, 全长 260 m。

### 2.2 数据采集和处理方法

本次反射地震探测数据采集仪器采用德国 DMT 公司生产的 SUMMIT 高分辨率遥测数字地震仪。 $P_1$  测线采用井中炸药爆炸震源, 井深 3 m, 药量 300 g, 道间距 2 m;  $SH_1$  测线采用 18 t 横波机械变频可控震源, 道间距 2 m; 横波  $SH_2$  测线采用 24

磅锤击扣板震源, 道间距 0.5 m。采用中间激发、多次覆盖的观测系统接收, 覆盖次数 15 次。检波器分别采用 100 Hz 的纵波检波器和 28 Hz 的横波检波器。数据处理采用水平多次叠加的方法, 主要处理方法有数字滤波、反褶积、速度分析、叠加、偏移等 (尹军杰等, 2004)。

## 3 地震反射剖面特征

### 3.1 $P_1$ 测线

图 2 为  $P_1$  纵波测线的反射时间剖面图。根据剖面波组特征, 该剖面大致可以分为南、中、北三部分。在南、北两段剖面上反射震相比较多, 反射能量较强, 连续性较好; 在中段反射能量较弱, 连续性较差。在该剖面上存在 7 组反射能量较强、横向连续性较好的反射震相 ( $T_1 \sim T_7$ ), 这些反射

震相在南、北两段基本呈水平展布，但在中段出现同相轴的扭曲和变形现象，这表明剖面经过地段内的地层在沉积过程中所处的沉积环境比较稳定，但在沉积过程中由于断裂的作用造成了地层的扭曲和错断。在测线桩号 420 m 和 542 m，反射同相轴出现明显的分叉、扭曲或畸变现象，表明在这两处存在断裂（ $F_{P_1}$  和  $F_{P_2}$ ），这两条断裂都是正断裂，视倾向南东，其中  $F_{P_1}$  断裂视倾角较缓，错断了  $T_3 \sim T_7$  各反射同相轴， $F_{P_2}$  断裂视倾角较陡，错断了  $T_1 \sim T_7$  各反射同相轴，该处  $T_4$  同相轴虽有错动和能量变化但不明显，但在后面的横波剖面上明显被错断，并且有继续向下延伸的趋势。

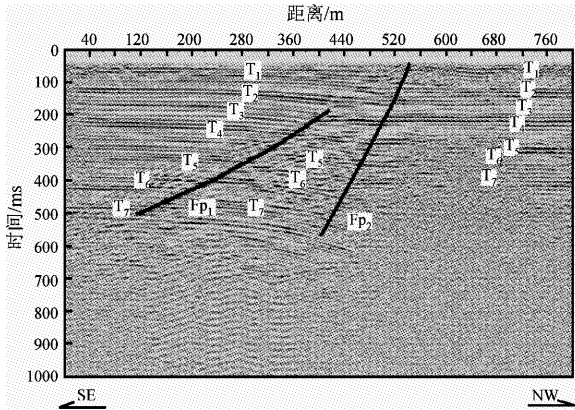


图 2  $P_1$  测线地震反射时间剖面图  
Fig. 2 Time section of seismic exploration on  $P_1$  profile

3.2  $SH_1$  测线

图 3 为  $SH_1$  横波测线的时间剖面图。我们综合分析了该横波剖面 and  $P_1$  纵波剖面的反射震相特征以及速度参数，确定了这两条剖面上的震相对应关系。与  $P_1$  纵波剖面相比，该剖面纵向和横向分辨率明显提高，反射同相轴特征更加清晰。除了在  $P_1$  剖面上的 7 个震相（ $T_1 \sim T_7$ ）之外，在它们之间还出现了 6 个反射震相  $T_{01}$ 、 $T_{02}$ 、 $T_{11}$ 、 $T_{12}$ 、 $T_{21}$  和  $T_{41}$ 。而且由于这 6 个震相的出现，使断裂特征、断裂位置和上断点特征更加清晰，断裂的定位更加准确。根据这些反射同相轴的横向连续性，在桩号 420 m 的  $F_{P_1}$  断裂向上延伸错断到  $T_{21}$  反射同相轴，而桩号 542 m 的  $F_{P_2}$  断裂向上延伸错断了  $T_{01}$  反射同相轴，断点位置也延伸到了桩号 550 m，这表明  $F_{P_1}$  断裂形成得较早， $F_{P_2}$  断裂形成得较晚，但都是第四纪活动断裂。

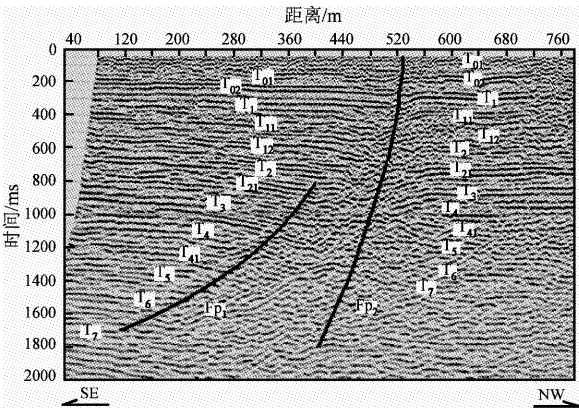


图 3  $SH_1$  测线地震反射时间剖面图  
Fig. 3 Time section of seismic exploration on  $SH_1$  profile

3.3  $SH_2$  测线

图 4 为  $SH_2$  横波测线的时间剖面图。该测线使用锤击扣板震源，激发频率明显较高，纵向分辨率高于  $P_1$  和  $SH_1$  剖面，横向分辨率也明显提高。桩号 550 m 的断裂更加明显，位置更加准确，形态更加清楚。图 4 中的 4 个反射同相轴（ $T_{01}$ 、 $T_{02}$ 、 $T_1$  和  $T_{11}$ ）与图 3 中的同相轴相同，可以看出在这些同相轴之间还存在多个连续性较好的反射同相轴，而且能量较强。这表明随着震源激发频率的提高和点距的减小，地震剖面的分辨率（纵向和横向）明显提高。在图 5 的综合解释深度剖面图的上部，由于分辨率的提高，所反映的地层层位细节更为清楚，可以分辨出较薄、较浅的地层，所能分辨的最浅地层深度为 3 m 左右，从而使  $F_{P_2}$  断裂的上断点位置向上可以追踪到 3 m 左右。

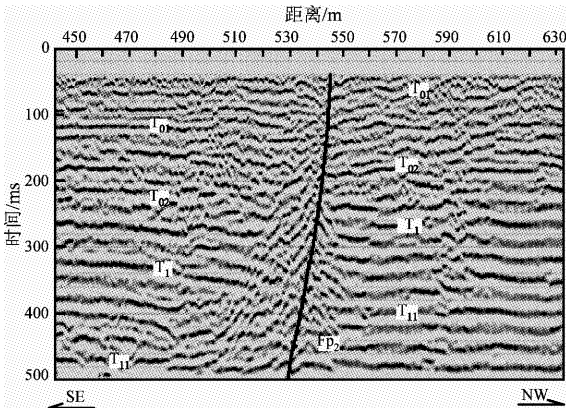


图 4  $SH_2$  测线地震反射时间剖面图  
Fig. 4 Time section of seismic exploration on  $SH_2$  profile

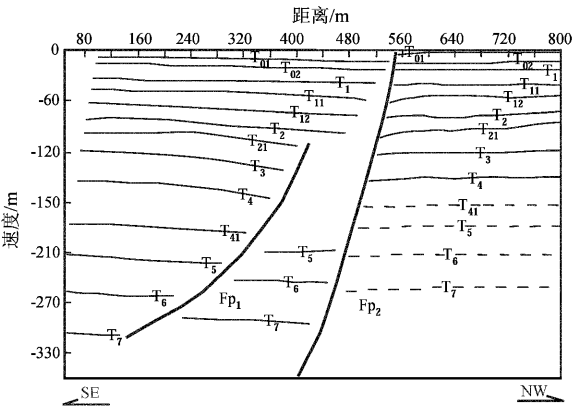


图 5 纵、横波综合解释深度剖面图

Fig. 5 Depth section of joint seismic exploration of P and S waves

3.4 夏垫断裂浅部构造特征

根据各条剖面上所反映的夏垫断裂的特征，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。该断裂带由两条正断裂组成，视倾向南东（图 5）。其中  $F_{P2}$  断裂视倾角较陡、约  $60^\circ$ ，是目前通常所指的夏垫断裂； $F_{P1}$  断裂视倾角稍缓，并呈铲型向下延伸，是本次工作中发现的一条新断裂，断裂参数见表 1。这两条断裂在浅部相距较近，向深部逐渐分开，随着深度的增加距离越来越远。

表 1 断裂参数

Tab. 1 List of fault parameters

| 断点<br>编号 | 对应<br>层位 | 断点位置<br>/m | 上断点埋深<br>/m   | 垂直断距<br>/m  | 视倾向 | 断裂<br>性质 |
|----------|----------|------------|---------------|-------------|-----|----------|
| $F_{P1}$ | $T_{21}$ | 420        | $\approx 110$ | $\approx 3$ | 南东  | 正断裂      |
| $F_{P2}$ | $T_{01}$ | 550        | 3             | 6           | 南东  | 正断裂      |

4 结论

（1）夏垫断裂是由两条断裂组成的断裂带。我们采用浅层纵、横波联合探测方法查明了夏垫断裂的位置、性质、活动性以及断裂浅部的结构形态，获得了夏垫断裂在浅部地层中的定量解释结果，并在夏垫断裂的南侧发现了一条倾角较缓、并呈铲型向下延伸的断裂。该断裂的发现表明夏垫断裂不是一条简单的断裂，而是由两条断裂组

成的断裂带。这两条断裂在活动规模和活动时间上都不相同，其中新发现的断裂  $F_{P1}$  相对于断裂  $F_{P2}$  不仅活动规模较小，而且最新活动时间也较早。

（2）采用纵、横波联合探测可以提高探测结果的分辨率。本次浅层纵、横波联合探测采用炸药震源、横波机械可控震源和锤击扣板震源相结合的激发方式，获得了不同探测深度、不同分辨率的反射时间剖面图，得到了不同精度的探测结果。尤其是采用锤击扣板横波震源，使最浅探测深度达到了近地表 3 ~ 5 m，纵向分辨率达到了 0.4 m 左右（速度 100 m/s、主频 80 Hz），大大提高了浅层反射地震探测的分辨率。

参考文献：

车兆宏. 1993. 首都圈断裂活动性研究[J]. 华北地震科学, 11(2): 23-34.

黄礼良. 1997. 北京夏垫断裂活动地段又一新发现[J]. 地震地质, 19(3): 218-219.

何强, 黎大虎, 赖敏, 等. 2001. 反射波法地震勘探在工程勘察中的应用[J]. 地震研究, 24(3): 258-261.

江娃利, 侯治华, 肖振敏, 等. 2000. 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, 22(4): 413-422.

孟宪梁, 杜春涛, 王瑞. 1983. 1679 年三河—平谷大震的地震断裂带[J]. 地震, (3): 18-23.

孟宪梁, 杜春涛, 业成之, 等. 1988. 1679 年三河—平谷 8 级地震[C]//郭增建, 马宗晋. 中国特大地震研究[M]. 北京: 地震出版社. 98-117.

冉勇康, 邓超东, 杨晓平, 等. 1997. 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, 19(3): 193-201.

王振东. 1982. 浅层地震勘探应用技术[M]. 北京: 地质出版社.

向宏发, 方仲景, 贾三发, 等. 1994. 隐伏断裂研究及其工程应用——以北京平原区为例[M]. 北京: 地震出版社.

向宏发, 方仲景, 徐杰, 等. 1988. 三河—平谷 8 级地震区的构造背景与大震重复性研究[J]. 地震地质, 10(1): 15-28.

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.

姚姚. 2005. 多波地震勘探的发展历史和趋势展望[J]. 勘探地球物理进展, 28(3): 169-173.

尹军杰, 吴子泉, 李文慧. 2004. 叠前深度偏移技术在活动断层探测中的应用[J]. 地震研究, 27(2): 191-197.

张晚霞, 向宏发, 李如成. 1995. 夏垫隐伏断裂土壤气氮分布特征的初步研究[J]. 西北地震学报, 17(2): 46-50.

赵成斌, 孙振国, 冷欣荣, 等. 2001. 横波技术在工程物探中的应用[J]. 西北地震学报, 23(1): 53-59.

赵成斌, 袁洪克, 李德庆, 等. 2007. 松散覆盖层内隐伏断裂探测研究[J]. 大地测量与地球动力学, 27(2): 107-113.

# Research on the Shallow Structure Characteristics of Xiadian Fault Using High-resolution Artificial Seismic Exploration Method

ZHAO Cheng-bin<sup>1</sup>, FENG Shao-ying<sup>1</sup>, QIN Xue-ye<sup>2</sup>, LIU Bao-jin<sup>1</sup>, KOU Kun-peng<sup>1</sup>,  
GUO Xin-jing<sup>1</sup>, LI Ji-chang<sup>1</sup>, SUN Zhen-guo<sup>1</sup>

(1. *Research Center of Exploration Geophysics, CSB, Zhengzhou 450002, Henan, China*)

(2. *No. 5 Geology Team, Henan Bureau of Nonferrous Geology and Mineral Resources, Zhengzhou 450016, Henan, china*)

## Abstract

In the prospecting work, we obtain many high quality stack time sections that reflect different depth using Joint Shallow Exploration method of P and S waves on the Xiadian fault. These sections display clearly the shallow structure characteristics of Xiadian fault and the information of stratum structure and the fault characteristics within several meters below the surface. Artificial seismic method is able to prospect the fault within 10 m below the surface. In addition, a listric fault with gentle dip is found in the south of Xiadian fault in the prospecting work. The work gives us new knowledge that Xiadian fault is a fault zone consisting of two faults.

**Key words:** Xiadian fault; active fault; controlled seismic source; time section