

花鑫升, 鄞少英, 姬计法, 石金虎, 赵成彬, 秦晶晶, 李吉昌, 2020. 用地震反射剖面研究汤阴地堑上地壳结构与断裂特征. 震灾防御技术, 15 (4): 811—820. doi: 10.11899/zfy20200415

用地震反射剖面研究汤阴地堑上 地壳结构与断裂特征¹

花鑫升 鄞少英 姬计法 石金虎 赵成彬 秦晶晶 李吉昌

(中国地震局地球物理勘探中心, 郑州, 450002)

摘要 汤阴地堑位于太行山脉与华北平原的过渡带, 是太行山前重要的地质构造单元。为研究汤阴地堑上地壳结构和断裂特征, 利用安阳市与新乡市活断层探测获得的深、浅地震反射剖面, 结合研究区已有地震、地质资料, 对汤阴地堑浅部结构、汤东断裂特征进行分析研究。结果表明, 汤阴地堑北部与南部地壳结构差异明显。地堑北部是由汤东断裂控制的半地堑, 地堑内反射震相丰富、反射波层组关系清晰, 多组新生代、古生代沉积层强反射不整合地覆盖在自西向东倾伏的结晶基底反射 T_g 上, 且随着深度增加, 地层倾角增大, 显示出明显的多期掀斜运动特征。地堑南部表现为由汤东、汤西断裂共同控制的断陷型地堑, 地堑内新近系底界面反射波 TN 自西向东倾伏, 其下为一些横向呈水平或东倾、延续性较短的反射震相。地堑南部与北部不同的反射震相特征表明, 测线控制区域内的汤阴地堑沉积环境与运动特征可能有所差异。汤东断裂为走向 NE, 倾向 NW 的铲型正断层, 汤西断裂为走向 NE、倾向 SE 的正断层, 北部中深层地震反射剖面上未发现该断层的存在。

关键词: 汤阴地堑 汤东断裂 地震反射剖面 浅层地震勘探

引言

汤阴地堑西靠太行山隆起, 东依内黄隆起, 是太行山前断裂带的重要组成部分。大量学者研究认为, 汤阴地堑南部是断陷型地堑, 汤东、汤西断裂是其东西边界断裂; 北部是东深西浅的箕型半地堑, 具有清晰的上、中、下地壳结构特征 (韩慕康等, 1980; 杨承先, 1984)。深地震测深资料表明, 汤阴地堑壳幔结构复杂, 下地壳存在低速层, 莫霍面向上突起, 复杂的深部构造环境使得中强地震的发生成为可能 (任青芳等, 1998)。深地震反射资料揭示了汤阴地堑地壳与莫霍面的构造特征及断裂的深、浅交切关系 (刘保金等, 2012)。布格重力资料给出了汤东、汤西断裂向下延展情况与空间展布特征, 认为汤东、汤西断裂等太行山山前断裂是分割地块、深切下地壳、规模宏大的断裂带 (徐志萍等, 2015; 姜磊等, 2018)。煤田、石油资料的研究表明, 汤东、汤西断裂处在地震活动期, 现今仍在活动, 断裂所在区域为地

1 基金项目 国家自然科学基金 (41674140)

[收稿日期] 2019-10-30

[作者简介] 花鑫升, 男, 生于 1980 年。高级工程师。主要从事深、浅地震勘探方面的研究和应用。E-mail: huaxs123@163.com

[通讯作者] 鄞少英, 男, 生于 1967 年。博士, 高级工程师。主要从事地壳深、浅结构的反射地震探测研究。E-mail: fsyny@163.com

震活动带(于慎谔等, 2012)。这些研究成果为研究汤阴地堑壳幔结构、断裂深部构造特征及地震危险性评价提供了重要的基础资料。

地震反射波法是探测地壳内部结构和构造的有效技术手段, 该方法通过采用多次覆盖同相叠加技术, 突出有效波、削弱干扰波, 提高地震资料的信噪比, 所得到的地震剖面能够直观形象地反映地下结构与构造, 该方法已在石油勘探、煤田勘探、壳幔结构探测以及活断层探测研究中得到广泛应用。汤阴地堑及其邻区深部构造的研究成果较多, 但对地堑地壳浅部结构及断裂浅部构造特征研究较少, 特别是汤阴地堑南、北部地壳结构差异性研究缺乏可靠的地震资料。本文通过对安阳市与新乡市活断层探测深地震反射剖面数据重新解译, 得到反映汤阴地堑北部与南部地下结构和断裂特征的高分辨率中深层地震反射剖面图像。利用获得的中深层地震反射剖面, 结合研究区已有的浅层地震反射剖面, 通过中、浅地震反射剖面相结合的方法, 对汤阴地堑地壳浅部结构、隐伏断裂特征进行分析研究。研究结果不仅为汤阴地堑上地壳结构研究、断裂特征分析提供了基础资料, 同时为地堑周边城市建设如何有效避让断裂带提供了科学依据。

1 研究区地质背景及主要断裂概况

汤阴地堑是太行山前断裂带的重要组成部分, 整体呈北北东走向, 南北被新乡-封丘断裂与安阳断裂所围限, 东西被汤东、汤西断裂所控制。多期下沉是其新生代的主要构造活动, 地堑内覆盖着较厚的新生代沉积层, 其东界汤东断裂的活动性要强于西界汤西断裂。(梁生正等, 2003; 郑建彬, 2015)。

汤东断裂是汤阴地堑的主要控制性断裂, 影响并控制了汤阴地堑的形成、演化与发展。断裂为走向北东、倾向北西的正断层, 长约 90km。断裂以东为内黄隆起, 其基底由太古界与古生界岩层组成, 地表覆盖新近纪与第四纪地层; 断裂以西为汤阴地堑, 其内沉积了较厚的新生代地层(花鑫升等, 2018)。

汤西断裂是汤阴地堑的西界断裂, 也是太行山与南华北平原的主要分界线, 为走向北东、倾向南东的正断层, 断裂南起新乡市西侧, 向北延伸至汤阴宜沟附近。该断裂南段古近纪、新近纪时期有过强烈的构造活动, 上升盘一侧的太行山隆起区局部出露太古界、古生界及少量的古近纪与新近纪地层, 而下降盘一侧的汤阴地堑则覆盖着厚度千米以上的新生代沉积层。

2 测线位置和方法

中深层地震反射剖面 ML1 位于汤阴地堑北部汤阴县附近, 探测方向为自东向西, 剖面起点位于汤阴县菜园镇小坡村村北(35°57'39.8"N, 114°33'47.6"E), 终点位于鹤壁市鹤壁集前柳江村东约 400m 处(35°58'57.9"N, 114°13'20.6"E), 剖面长约 31km(图 1)。采用炸药作为震源激发地震波, 药量 24kg, 井深 25—30m, 使用固有频率为 10Hz 的检波器串(12 个/道, 线性组合)接收地震波, 地震仪使用法国 Sercel 公司生产的 408UL 数字地震仪。

中深层地震反射剖面 ML2 位于汤阴地堑南部新乡市附近, 探测方向为自西向东, 长度约 35km(图 1), 起点位于新乡市凤泉区陈堡村村北晋新高速附近(35°22'59.8"N, 113°51'15.4"E), 终点位于新乡市延津县胡庄村东(35°16'44.9"N, 114°13'22.2"E)。采用炸药作为震源激发

地震波，药量 40kg，井深 25—30m，使用固有频率为 10Hz 的检波器串（12 个/道，线性组合）接收地震波，地震仪使用加拿大 GEO-X 公司生产的 ARIES 数字地震仪。

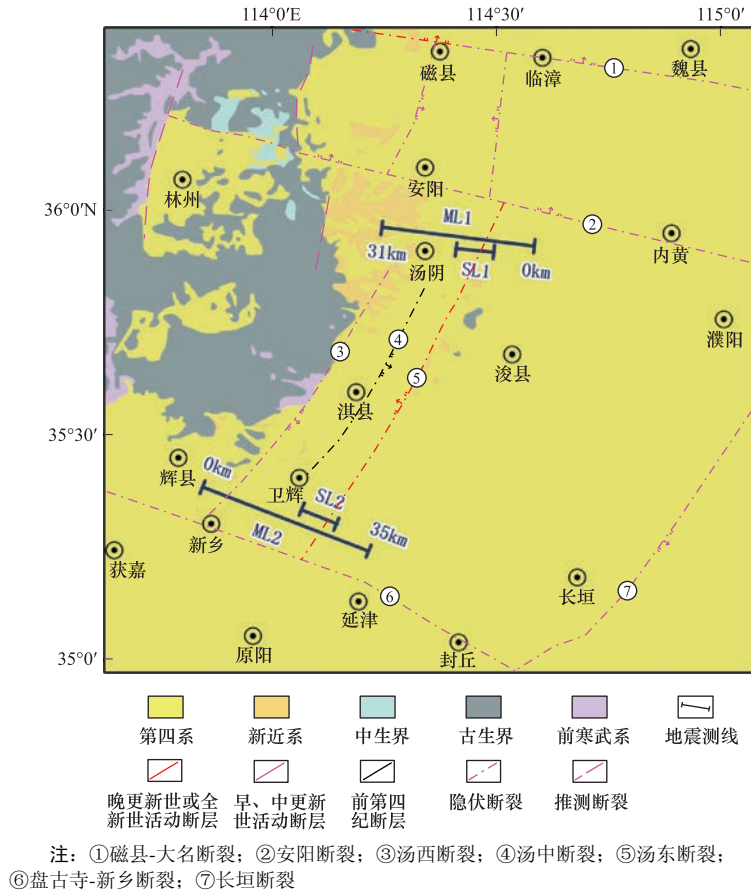


图 1 地震反射剖面位置示意图

Fig. 1 Location of the seismic reflected profiles

中深层地震反射剖面可获得汤阴地堇 6—8km 以浅的地壳结构及隐伏断裂的位置与性质，但对于隐伏活动断裂的近地表结构还未能准确判断，因此本文采用中深层地震剖面附近的高分辨率的浅层地震反射剖面。

浅层地震反射剖面 SL1 位于中深层地震反射剖面 ML1 南约 1.5km，剖面长约 3.3km。采用美国生产的 M612-18 型可控震源激发地震波，扫描频率 30—200Hz，扫描长度 8s。使用固有频率为 60Hz 的检波器接收地震波，地震仪使用德国 SUMMIT 数字地震仪。

浅层地震反射剖面 SL2 位于中深层地震反射剖面 ML2 北约 1km，剖面长约 4km。采用美国产 M612-18 型可控震源激发地震波，扫描频率 20—200Hz，扫描长度 8s。使用固有频率为 60Hz 的检波器接收地震波，地震仪使用德国 SUMMIT 数字地震仪。

不同的探测目的需要采用不同的探测方法和观测系统参数（刘保金等，2008）。表 1 为本研究地震反射剖面的观测系统参数。

表 1 地震反射剖面观测系统参数表

Table 1 Observation system parameters of the seismic reflect profiles

剖面名称	道间距/m	炮间距/m	接收道数	覆盖次数	剖面长度/km
ML1	30	120	280	35	31
ML2	40	280	800	57	35
SL1	2	10	200	20	3.3
SL2	4	16	160	20	4

3 中深层地震反射剖面特征

3.1 中深层地震反射剖面 ML1

图 2 给出的中深层地震反射时间剖面 ML1 地层界面反射丰富,多组反射波同相轴可以被连续、可靠追踪。从图中可以看出,剖面桩号 7km 为界东西两侧反射波震相明显不同。7km

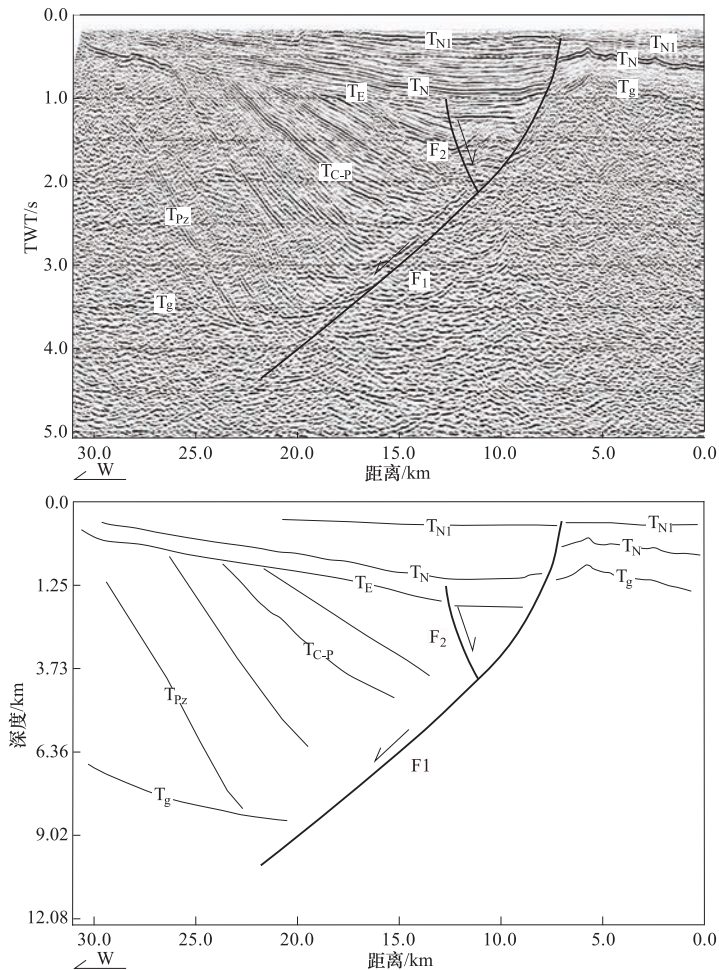


图 2 ML1 中深层地震反射时间剖面与深度解释剖面

Fig. 2 Time section and depth profile of the mid-deep seismic reflection in ML1

以东的内黄隆起区可看到 3 组横向上可连续追踪、纵向上层组关系清晰的界面反射波 (T_{N1} 、 T_N 、 T_g)，新近系内部界面反射波 T_{N1} 基本呈水平展布、局部略有起伏变化，新近系底界面反射波 T_N 向上隆起的特征明显，剖面桩号 6km 处其埋深最浅，以东则向下倾伏。说明该区域新近纪早期构造活动剧烈，造成地层隆起、褶皱、倾伏，而后构造活动减弱，沉积环境较为稳定，地层基本呈水平展布。新近系之下为反射能量较弱、界面展布特征与新近系底界面类似的结晶基底反射 T_g ，其下为一系列弱振幅、不连续、短小的反射震相，说明结晶基底之下岩石的波阻抗差异较小，无法形成有效的、能量较强的界面反射。在剖面桩号 7km 以西汤阴地堑内沉积盆地反射特征明显，多组沉积层强反射不整合的覆盖在自西向东倾伏的结晶基底反射 T_g 上，且随着深度的增加，地层倾角增大，显示出明显的多期掀斜运动特征。根据地质资料可知，这套沉积地层反射是来自新生代、中生代和古生代的地层界面反射，且某些地质时期地层缺失、不整合接触明显，可能与该区域强烈的构造运动与地层沉降有关。

中深层地震反射时间剖面 ML1 (图 2) 所揭示的断裂特征非常清楚，根据剖面上反射波能量差异、同相轴横向连续性及时层产状不同共分为 2 条断裂 (F_1 、 F_2)，断裂 F_1 是汤东断裂的主断裂， F_2 是其分支断裂。主断裂 F_1 为西倾铲型正断层，断裂浅部倾角较陡，而后逐渐变缓，断裂向上错断了新近纪地层 T_{N1} ，向下错断了所有的沉积层，延伸至结晶基底 T_g 之下。汤东断裂的分支断裂 F_2 为东倾正断层，与主断裂呈“Y”字型构造特征，断裂 F_2 向上错断了古近纪地层。

3.2 中深层地震反射剖面 ML2

图 3 给出了中深层地震反射时间剖面 ML2。从图中可以看出，TWT1.5s 以上的地层界面反射波能量较强、同相轴分段连续性较好，可识别出 3 组地层界面反射 (T_Q 、 T_N 、 T_g)。这些界面反射波在纵向上层组关系清晰，横向上块状结构特征明显。剖面自东向西依次经过内黄隆起、汤阴地堑和太行山隆起。不同的块体剖面所揭示的反射波震相明显不同。剖面桩号 25km 以东内黄隆起区可识别震相较多，但界面反射波能量相对较弱，横向上地层基本呈水平展布，仅结晶基底 T_g 局部有起伏变化。剖面桩号 6km 以西的太行山隆起区仅识别出横向上呈水平展布的新近系底界面反射 T_N ，其反射波能量强，埋深相对较浅，反射波 T_N 以下为一系列短小、不连续、能量相对较弱的反射震相。剖面中段汤阴地堑内地层自西向东倾伏，反射波同相轴局部扭曲、错断明显，新近系底界面反射 T_N 之下为一些横向延续性较短、能量相对较弱反射震相。

根据剖面上反射波同相扭曲、错断及时层产状的不同，共分为 3 条断裂 (F_3 、 F_4 、 F_5)，根据区域地质资料，可知 F_3 是汤东断裂， F_4 是汤中断裂， F_5 是汤西断裂。从图中可以看出，汤东断裂 F_3 为西倾铲型正断层，断裂向上错断第四系底界面反射 T_Q ，向下错断新近系底界面 T_N ，延伸至结晶基底之下的变质岩系中。汤西断裂 F_5 为东倾正断层，断裂向上错断新近系底界面 T_N ，在汤西断裂附近 TWT2s 以下，可以看到能量较弱、以较大角度向东倾伏的断面波，说明断裂两侧波阻抗存在差异，地层岩性可能不同，从而在断裂面上形成了弱能量的界面反射波。汤中断裂 F_4 为东倾正断层，断裂向上错断新近系底界面 T_N 。

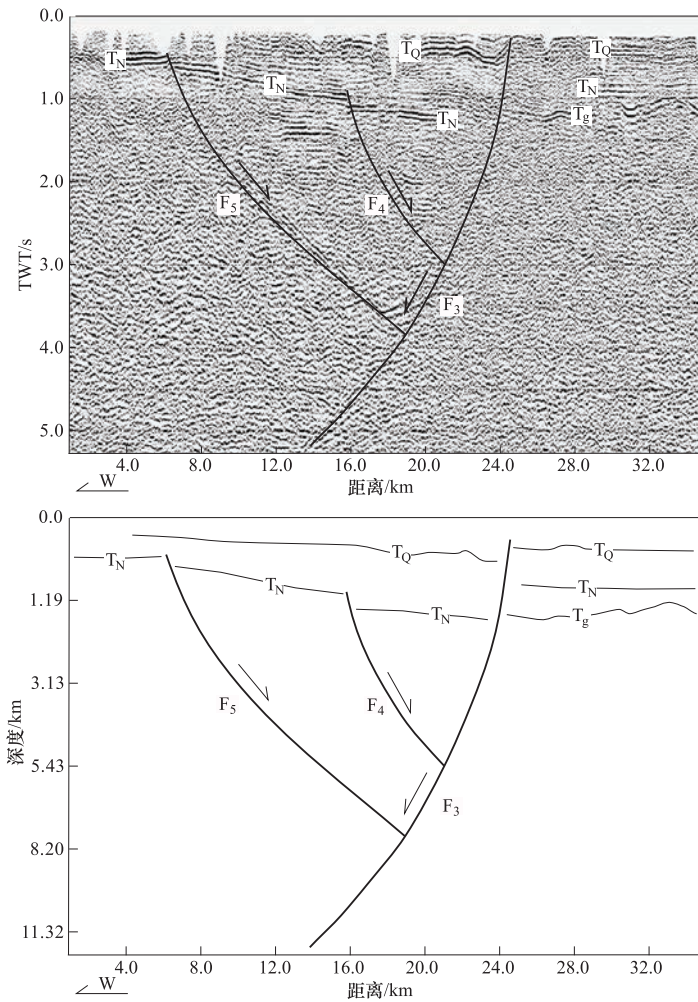


图3 ML2 中深层地震反射时间剖面与深度解释剖面

Fig. 3 Time section and depth profile of the mid-deep seismic reflection in ML2

4 浅层地震反射剖面特征

4.1 浅层地震反射剖面 SL1

从图 4 的浅层地震反射剖面 SL1 可以看出，剖面横向上不同地段的反射震相特征明显不同。剖面桩号 2500m 以东，第四系底界面 T_Q 基本呈水平展布，新近系沉积较薄，新近系底界面 T_N 自东向西倾伏， T_N 之下为一些横向延续性较短、反射能量较弱的反射震相，根据地质资料推测其可能是来自太古代或元古代变质岩系的反射。剖面桩号 1200m 以西，第四系底界面 T_Q 自东向西倾伏，新近纪地层呈水平展布，且沉积较厚，新近系之下为连续性较好的古近纪沉积层。剖面中段可以看到界面反射波扭曲、错断非常明显，可知是由于汤东断裂的活动造成附近地层起伏、褶皱，从而使得地层界面反射波出现了扭曲、变化。从图中可以看出，汤东断裂的近地表是由 2 条东倾正断裂与 3 条西倾正断裂组成。断裂 F_{P2} 是汤东断裂的主断裂，倾向为西，断裂错断了浅部地层 T_Q ，上断点埋深较浅，向下依次错断了新近系、古

近系并延伸至剖面之外。断裂 F_{P2} 西侧有 3 条次级正断裂，与主断裂形成“Y”型构造。断裂 F_{P1} 是汤东断裂的分支断裂，倾角较陡，向上延伸至新近系内部，上覆的第四系底界面反射波连续性较好，并未发现错断。通过跨主断裂 F_{P2} 的钻孔联合地质剖面揭示其上埋深为 20m，断裂错断了中更新世中晚期地层，因此该区域汤东断裂为中更新世活动断裂（刘保金等，2012）。

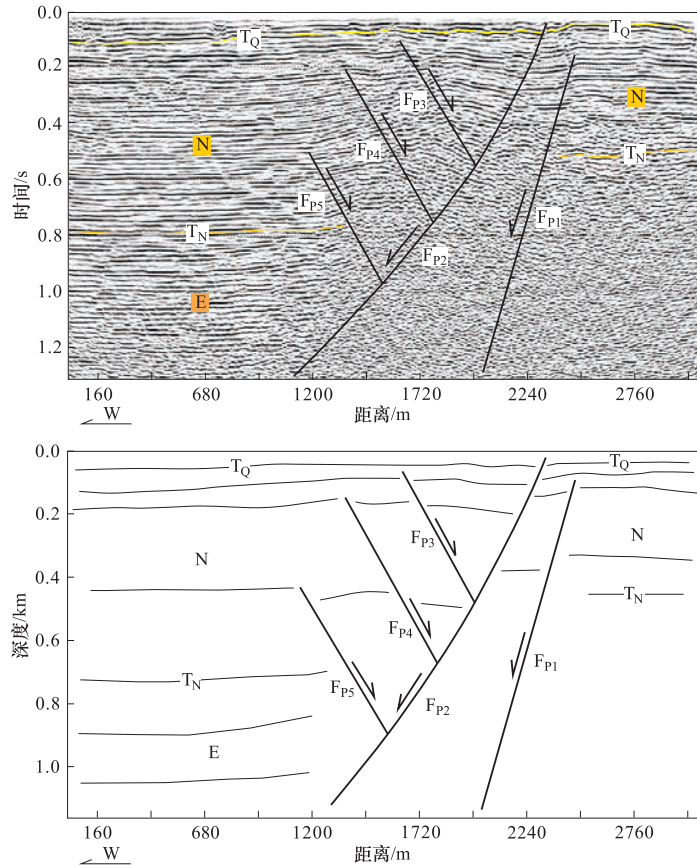


图 4 SL1 浅层地震反射时间剖面和深度解释剖面（刘保金等，2012）

Fig. 4 Stacked section and depth profile of the shallow seismic reflection in SL1 (Liu et al., 2012)

4.2 浅层地震反射剖面 SL2

图 5 的浅层地震反射剖面 SL2 具有较高的分辨率，且地层界面反射较为丰富。根据本区域地质及钻孔资料可知，反射波 T_{01} 为第四系内部的界面反射， T_Q 为第四系底界面反射。剖面清晰的揭示了汤东断裂浅部特征，在断裂附近可清晰看到同相轴扭曲、错断及断点的绕射波，且断裂两侧反射波组特征与界面起伏形态差异明显。在断裂上盘，地层界面反射非常丰富，第四纪地层基本呈水平展布，新近纪地层反射波能量较强，局部呈凹陷特征，尤其以 TWT500ms 附近地层界面反射最为明显。在断裂下盘，地层界面反射明显较少，且所有地层在断裂附近均呈向上隆起特征。汤东断裂向上错断浅部地层 T_{01} ，上断点埋深约 40m，根据跨断裂完成的钻孔联合地质剖面，确定该区域汤东断裂为晚更新世活动断裂（徐增波等，2019）。

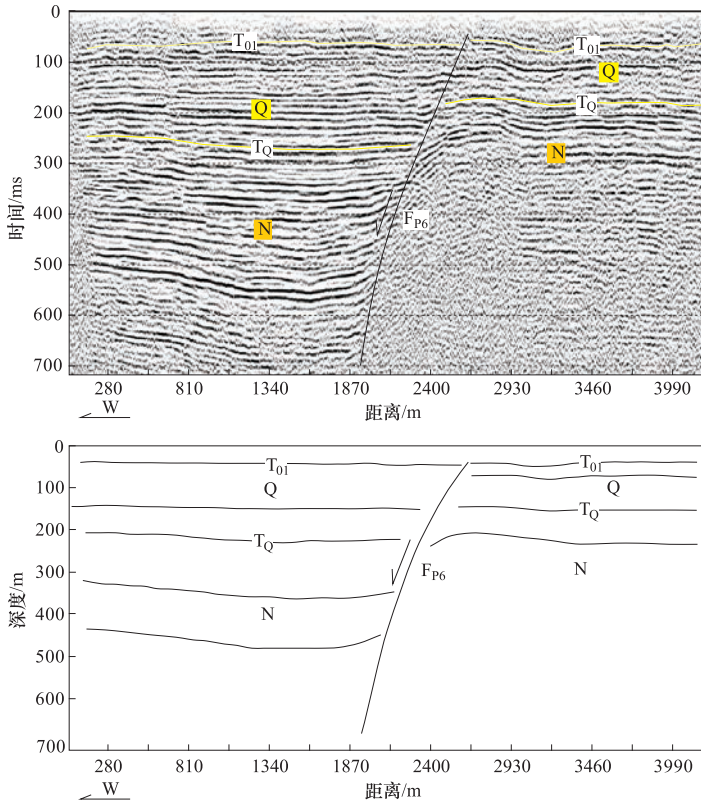


图5 SL2 浅层地震反射时间剖面 and 深度解释剖面 (徐增波等, 2019)

Fig. 5 Stacked section and depth profile of the shallow seismic reflection in SL2 (Xu et al., 2019)

5 结论

本文利用中深层地震反射剖面获得汤阴地堑北部与南部的上地壳结构、新生代沉积层分布特征以及断裂特征与性质, 同时利用浅层地震反射剖面获得汤东断裂的近地表特征。研究结果为分析汤阴地堑的形成与演化、汤东断裂特征与活动性研究提供了科学依据。

已有资料表明, 汤阴地堑是夹持在太行山隆起与内黄隆起间的断陷型盆地。中深层地震反射剖面同样揭示了这种盆岭相间的构造格局, 测线控制范围内汤阴地堑与其两侧块体的新生代沉积厚度明显不同, 汤阴地堑内沉积较厚的新生代地层, 而两侧隆起区新生代地层明显较薄, 地堑内新生代地层自西向东倾伏且新生代沉积层逐渐变厚, 最厚处出现在汤东断裂附近, 表明研究区汤东断裂控制并影响汤阴地堑新生代时期的活动与演化。内黄隆起区新生代沉积层较薄, 结晶基底 T_g 埋深较浅, 结晶基底之上直接覆盖新近纪沉积层, 缺失古生代、中生代地层, 说明测线控制范围内黄隆起可能经过了多期隆起抬升, 地层受到了分化与剥蚀。太行山隆起区新生代沉积相对最薄, 局部太古界变质岩系直接出露。

地堑北部与南部的地壳浅部结构与构造差异明显。地堑北部表现为由汤东断裂控制的箕型半地堑, 地堑内多组沉积地层不整合的覆盖在自西向东倾伏的结晶基底 T_g 上, 且随着深度的增加, 地层倾角增大, 显示出明显的掀斜运动与多期构造活动特征。汤阴地堑南部表现为

由汤东、汤西断裂共同控制的断陷型地堑，地堑内地层界面反射波自西向东倾伏，新近纪地层底界面表现出强反射震相特征。结合已有地质资料，认为汤东断裂是汤阴地堑的主控边界断裂，控制着汤阴地堑演化与新生代地层的沉积，断裂为走向 NE，倾向 NW 的铲型正断层，向上错断了第四纪地层，向下错断所有沉积地层，延伸至结晶基底之下的变质岩系中。汤西断裂为走向 NE、倾向 SE 的正断层，向北延伸至汤阴宜沟附近，北部中深层地震反射剖面上未发现该断裂的存在。

致谢 本文的写作与资料解释得到了刘保金研究员的指导，在此表示衷心的感谢！同时非常感谢审稿专家，使得本文更加完善！

参考文献

- 韩慕康, 赵景珍, 1980. 河南汤阴地堑的地震地质特征与地震危险性. 地震地质, **2** (4): 47—58, 90—91.
- 花鑫升, 石金虎, 谭雅丽等, 2018. 浅层地震勘探资料揭示汤东断裂特征. 震灾防御技术, **13** (2): 276—283.
- 姜磊, 徐志萍, 方盛明等, 2018. 利用重震资料研究豫北及邻区地壳结构特征与地震分布. 地震地质, **40** (2): 323—336.
- 梁生正, 李春燕, 王奇等, 2003. 太行山前断陷带南部天然气勘探前景. 天然气工业, **23** (2): 1—5.
- 刘保金, 柴焯章, 鄢少英等, 2008. 第四纪沉积区断层及其上断点探测的地震方法技术——以银川隐伏活动断层为例. 地球物理学报, **51** (5): 1475—1483.
- 刘保金, 何宏林, 石金虎等, 2012. 太行山东缘汤阴地堑地壳结构和活动断裂探测. 地球物理学报, **55** (10): 3266—3276.
- 任青芳, 张先康, 张成科等, 1998. 汤阴地堑及邻区的壳幔结构与地震危险性. 中国地震, **14** (2): 157—166.
- 徐增波, 刘保金, 姬计法等, 2019. 太行山南端浅层速度结构成像和隐伏断裂探测. 大地测量与地球动力学, **39** (1): 88—92.
- 徐志萍, 姜磊, 杨利普等, 2015. 利用布格重力资料研究太行山东南缘断裂构造特征. 大地测量与地球动力学, **35** (3): 503—507.
- 杨承先, 1984. 邯郸、汤阴断陷地质结构及其活动性. 地震地质, **6** (3): 59—66.
- 于慎谔, 赵俊香, 杨承先等, 2012. 太行东断裂的性状与分布. 中国地震, **28** (1): 78—87.
- 郑建彬, 2015. 新乡市第四纪地层划分与沉积环境研究. 北京: 中国地质大学(北京).

Study on the Upper Crustal Structure of Tangyin Graben by Seismic Reflection Profiles

Hua Xinsheng, Feng Shaoying, Ji Jifa, Shi Jinhu, Zhao Chengbin,
Qin Jingjing and Li Jichang

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

Abstract Tangyin graben, located in the transitional zone of the Taihang mountains and the North China plain, is a key geological structure unit of Taihang piedmont. In order to find out the upper crustal structures, the fault structure characteristics of Tangyin graben, we applied the deep and shallow seismic reflection profiles of active fault exploration in Anyang City and Xingxiang City. Based on the deep and shallow seismic reflection profiles and the geological and seismic data available in the study area, the shallow structure of Tangyin graben and the structural characteristics of Tangdong fault are analyzed and studied. The results show that the shallow crustal structures in the north and south of Tangyin graben are obviously different. the northern part of the graben is a semi-graben controlled by Tangdong fault. the graben internal reflection seismic phase is rich, and reflection layer group relations is clear. several group of strong reflection waves from Cenozoic to Paleozoic sediments uncomfortably cover the crystalline basement reflection T_g dipping from west to east, and the dip angle of stratum increases with the increase of depth. the graben shows obvious multi-period tilted movement characteristics. The southern part of the graben is a faulted graben controlled by the Tangdong and Tangxi faults, the reflected wave T_N at the Neogene bottom interface dips from west to east, and there are some reflection phases with horizontal or Eastern dips and short reflection phase below T_N . On the whole, The different characteristics of reflected seismic facies in the south and north of the graben indicate that the sedimentary environment and movement characteristics of the Tangyin graben may be different in the area controlled by the survey line. The Tangdong fault is a shovel-type normal fault striking NE and trending NW. The Tangxi fault is a normal fault striking NE and trending NW, and no fault is found in the mid-deep seismic reflection section of the Northern Tangyin graben.

Key words: Tangyin graben; Tangdong fault; Seismic reflection profile; Shallow seismic exploration