

刘保金, 赵成斌, 田勤俭, 刘尧兴, 鄯少英, 2007. 地震勘探资料揭示郑州老鸦陈断层特征. 震灾防御技术, 2(3): 221—229.

地震勘探资料揭示郑州老鸦陈断层特征¹

刘保金¹⁾ 赵成斌¹⁾ 田勤俭²⁾ 刘尧兴³⁾ 鄯少英¹⁾

1) 中国地震局地球物理勘探中心, 郑州 450002

2) 中国地震局震害防御中心, 北京 100081

3) 河南省地震局, 郑州 450003

摘要 断层活动性的探测研究是城市地震预测和防震减灾的基础性工作。为了查明郑州老鸦陈断层的位置、性质及其活动性, 2006年底, 在郑州市北郊横跨老鸦陈断层进行了不同探测深度的浅层地震勘探, 通过采用爆破震源和可控震源相结合、不同观测系统参数相结合的工作方法, 获得了探测深度30—6000m范围内的地下结构与构造图像。结果表明, 老鸦陈断层为一条倾向NE、走向NW的正断层, 该断层错断了新第三纪(N)以前的地层, 在Q+N地层内部没有发现断层引起的地层错断现象。

关键词: 老鸦陈断层 浅层地震勘探 断层活动性 信噪比

引言

浅层地震勘探方法是探测研究地壳浅部地质结构与构造的一种有效的地球物理勘探手段。浅层地震勘探方法主要包括折射波、反射波、透射波和面波勘探方法, 这些勘探方法各有其特点(王振东, 1988)。其中浅层地震反射波方法以其分辨率高、对地下构造的重现性好以及有利于利用多次覆盖技术压制干扰、提高资料的信噪比和分辨率等优点, 在煤田、工程等探测领域得到了广泛应用。我国地震系统在隐伏活动构造探测和“九五”期间开展的首都圈深、浅构造耦合关系探测研究中无一例外的也采用了浅层地震反射波勘探方法(李金森等, 1994; 刘保金等, 1999a; 赵成斌等, 1999)。“十五”期间, 城市活动断层探测工作在全国20个大城市全面展开, 鉴于城市内强烈的外界背景干扰以及第四纪覆盖层内部地层界面反射能量弱、断层延伸到第四系内部后其断距较小等不利因素, 地震系统于2001年在福州市针对城市复杂环境开展的抗干扰高分辨率浅层地震方法研究取得了重要进展, 并解决了城市复杂环境条件下的地震波激发与接收、室内资料处理与综合分析解释等方面的技术问题(刘保金等, 2002; 潘纪顺等, 2002; 徐朝繁等, 2002)。福州、银川、沈阳、宁波等城市的浅层地震勘探和钻探验证结果表明, 浅层地震勘探方法在第四纪覆盖区的活动断层定位和初步判定断

1 国家发展计划委员会(2001977)与河南省人民政府“十五”重点项目联合资助。中国地震局地球物理勘探中心科技论著编号0617

[收稿日期] 2007-08-25

[作者简介] 刘保金, 男, 生于1962年。高级工程师。主要从事深地震反射和浅地震勘探方法研究与应用。E-mail: LBJ001@126.com

层的活动性方面可起到关键作用(邓起东等, 2003; 柴焱章等, 2006; 刘保金等, 2006)。

郑州市地处中原, 地质构造和城市环境较为复杂, 地表大面积覆盖的第四纪松散沉积物使得通过郑州市区的断裂均处于隐伏状态。为了调查郑州市的活动构造, 20 世纪 80 年代, 河南省地震局和郑州市地震局围绕通过郑州市区的老鸦陈断层开展了包括地球化学探测和浅层地震勘探方面的探测研究工作(姚文斌, 1992)。2006 年, 在郑州市活断层探测与地震危险性评价项目中, 为了进一步查明老鸦陈断层的位置及其活动性, 我们在郑州市北郊的古荥镇和老鸦陈村附近, 横跨老鸦陈断层以及与断层平行的地表陡坎开展了不同探测深度的地震勘探工作, 通过采用爆破震源和可控震源相结合、不同观测系统参数相结合的工作方法, 取得了沿剖面 30—6000m 深度范围内的地下细结构图像, 揭示了老鸦陈断层的形态和特征, 为评价老鸦陈断层的活动性和郑州市的地震危险性和危害性提供了地震学证据。

1 测区地质构造和已有工作概况

郑州市位于华北平原区, 地表被第四纪地层覆盖。地质资料和钻孔资料表明¹, 郑州地区的新生代地层由西南向东北逐渐变厚, 在郑州市的西南部, 新第三系(N)的底界埋深仅 200—300m, 在东北部, 新第三系底界埋深 2000 多米。测区第四系厚度也呈西南薄、东北厚的趋势, 钻孔资料揭示, 测区内的第四系全新统(Q₄)底板埋深几米至十几米, 上更新统(Q₃)底板埋深约为 20—70m, 中更新统(Q₂)底板埋深约为 80—150m, 下更新统(Q₁)底板埋深约为 140—200m; Q+N 的厚度为近千米。

郑州市附近的断层主要以北西、北西西和近东西向为主(图 1)。其中, 北西-北西西向的断层主要有老鸦陈断层、古荥断层和花园口断层。近东西向的断层主要有须水断层、上街断层和中牟断层。在这些断层中, 老鸦陈断层、须水断层和上街断层穿过郑州市区, 对郑州市未来的城市规划和建设影响较大。为了查明须水断层和上街断层的位置及其活动性, 2003—2005 年间, 郑州市地震局对这 2 条断层和穿过郑州东区的花园口断层开展过专题研究², 结果表明, 这 3 条断层均为前第四纪断层(赵成斌等, 2007)。

20 世纪 80 年代, 围绕老鸦陈断层也开展过不同程度的探测研究工作。1988 年郑州市地震小区划期间, 河南省地震局和郑州市地震局对以往的地球物理探测资料, 特别是人工地震勘探资料进行了重新分析, 发现在郑州市沿京广铁路存在一条 NNW 向的老鸦陈断层。为了查明该断层的位置和性质, 1988 年 6 月, 委托河南煤田物测队在郑州市北郊的老鸦陈村附近完成了一条道间距 10m、48 道接收、8 次覆盖的地震勘探剖面(图 1 中的 4 测线), 4 测线的探测结果表明, 老鸦陈断层错断了埋深约 900m 以下的老第三系和二叠系地层, 在 Q+N 地层内部, 多组地层反射均具有较高的信噪比和较好的横向连续性, 没有发现断层存在的迹象(姚文斌, 1992)。

根据卫星影像和航片资料, 在郑州市北郊的古荥镇至郑州市区的大石桥一线存在一条与老鸦陈断层近于平行的北西向的地表陡坎, 该陡坎在郑州市北郊的古荥镇至邙山一带较为清楚, 可以认为与老鸦陈断层、特别是老鸦陈断层北段的第四纪活动有关³。为了调查地表陡坎

1 河南省地震局, 1989. 郑州市地震小区划研究报告。

2 郑州市地震局, 2005. 郑州市东区活断层探测与地震小区划研究报告。

3 郑州市地震局, 1992. 郑州市区老鸦陈隐伏断裂综合研究报告。

是否与老鸦陈断层的活动有关，本项探测研究设计的地震测线均跨过了地表陡坎。

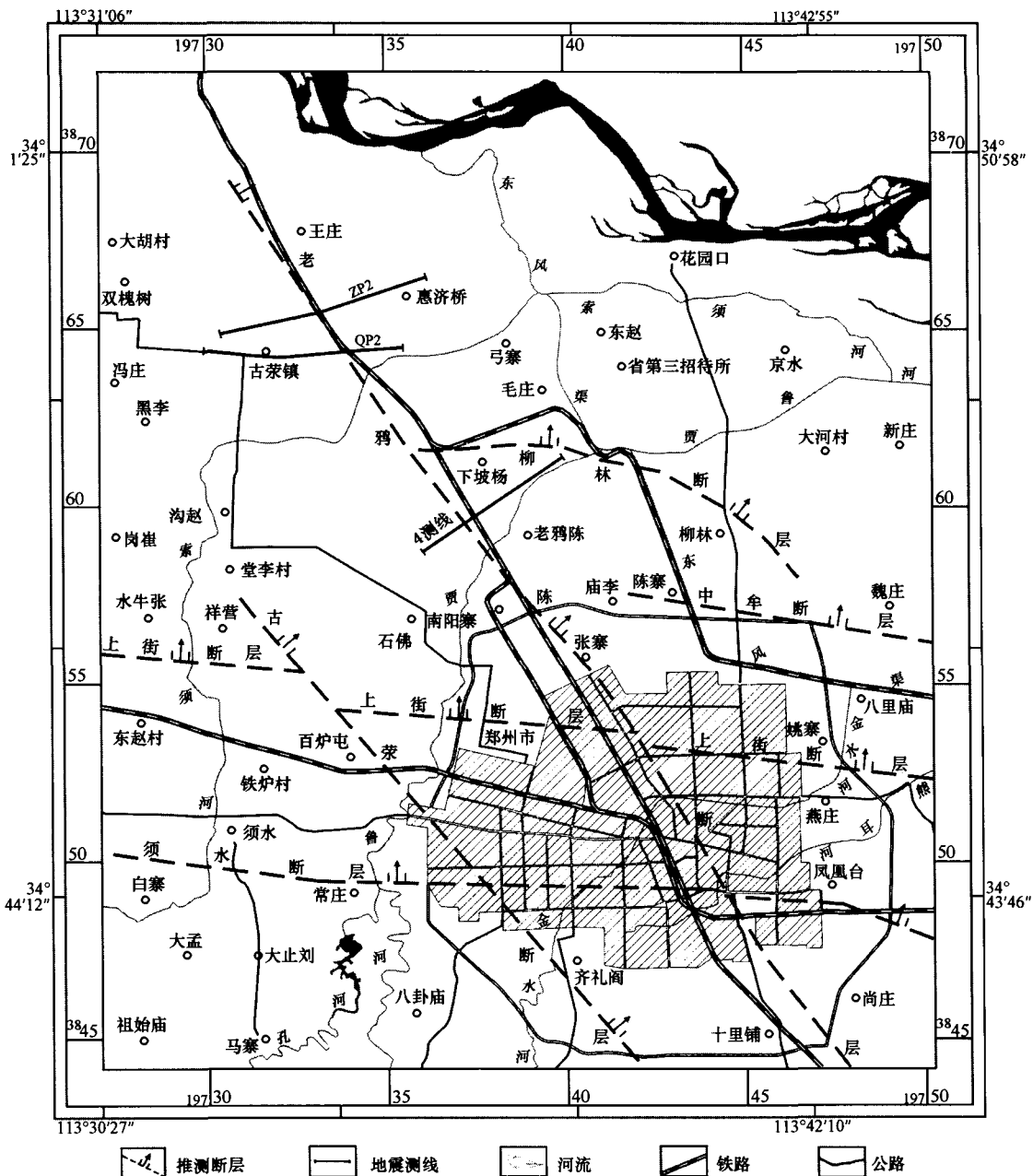


图1 测区地质构造和浅层地震测线位置图

Fig. 1 Geological features and location of shallow seismic profiles

2 浅层地震勘探的工作方法

2.1 测线位置

为了确定老鸦陈断层的位置及其由深到浅的构造形态和特征，以便为钻孔联合剖面的布设和断层活动性的判定提供依据，本项探测研究在郑州市北郊的古荥镇附近，横跨推测的老

鸦陈断层位置和地表陡坎,设计了2条不同探测深度的地震测线(图1)。其中,ZP1测线位于古荥镇北的农田内,测线方向为北东-南西向,长度为6300m,设计探测深度为300—3000m。该测线在桩号2720m左右穿过江山路,桩号3200—3280m之间为京广铁路,地表陡坎位于测线桩号4650m左右。QP2测线位于ZP2测线南约350m左右的大河路上,测线方向为近东西向,测线长度为5600m,设计探测深度为30—300m。该测线在桩号810m左右穿过江山路,桩号1590—1630m之间为京广铁路,地表陡坎位于测线桩号3310m左右。

2.2 数据采集和处理方法

2.2.1 数据采集方法

用浅层地震勘探方法进行隐伏构造探测,一般应根据不同测区或测线的工作环境、地质条件以及探测目标层深度要求,采取有针对性的探测方法技术(刘保金等,1999b)。本项探测研究,作者根据ZP2测线的探测目标层深度较深,工作条件相对较好,QP2测线上车辆、行人较多,外界干扰较强的特点,在地震波激发时分别采用了爆破震源和可控震源。地震数据采集使用了德国DMT公司生产的抗干扰能力强、动态范围大,且具有可控震源信号实时相关功能的SUMMIT数字地震仪。通过大量的现场试验,在2条测线上采用的地震波激发参数和观测系统参数分别为:

(1) ZP2测线采用钻孔爆破震源激发地震波,激发孔深15m,炸药量3kg。观测系统参数为:道间距10m、炮间距50m、双边200道零偏移距不对称观测、20次覆盖。地震波接收使用了4个/串40Hz的检波器。

(2) QP2测线采用可控震源激发地震波,震源工作参数选择为:扫描频带30—240Hz;扫描长度8s;震源激发力60%(约12.8吨)。观测系统参数为:道间距2m、偏移距10—20m、震源距8m、120道接收、15次覆盖。为压制低频干扰、提高地震信号的有效高频信息,地震波接收时使用了4个/串100Hz的高频检波器。

2.2.2 数据处理方法

在获得的原始地震记录上,来自第三系内部的地层界面反射波能量较强,而来自第四系和二叠系内部的地层界面反射波能量相对较弱。因此,在数据处理流程和处理参数的选择上都把提高地震资料的信噪比放在了首位,在确保资料信噪比的前提下,最大限度地提高资料的分辨率。

数据处理采用FOCUS地震反射处理系统,其数据处理流程和方法主要包括:静校正、时变带通滤波、二维倾角滤波、反褶积、时变谱白化、速度分析、正常时差校正(NMO)、共中心点叠加(CMP)和叠后去噪等。

实践表明,采用上述的工作方法和观测系统参数以及有针对性的地震数据处理方法,对获得信噪比和分辨率较高的地下结构和构造图像是合适的。

3 浅层地震反射剖面特征

图2和图3分别为古荥ZP2测线和QP2测线的反射波叠加时间剖面图。为便于对剖面反射波组进行层组划分和地质解释,根据资料处理时获得的地震波速度资料和时间剖面上不同界面反射波的双程到时,计算出了相应地层反射界面的埋藏深度,其结果标在了剖面图的右侧。在对剖面反射波组进行地质分层时,参考了郑州市地震小区划资料以及测区附近的地质钻孔资料。

3.1 古荥 ZP2 测线的剖面特征

由古荥 ZP2 测线的反射波叠加剖面（图 2）可以清楚地看出，测线经过地段内的地下界面反射非常丰富。剖面双程到时 1.0s（深度约 1000m）以浅，从剖面上可识别出多组反射能量较强、横向连续性较好的反射波同相轴，其中，来自新第三系（N）的底界面反射波 T_N 反射能量最强、横向连续性最好， T_N 界面的埋深在剖面上自东向西逐渐变浅。在剖面东端，其深度约为 1000m；在剖面的西端，其深度变浅至 800m 左右。另外，在新第三系内部，还可以看到几组反射能量差别不大，在横向上能连续可靠追踪的 T_1 — T_5 反射波。第四系的底界面反射波 T_Q 在剖面上出现的时间大约始于 130—150ms，对应界面埋深约为 100—120m。该反射波在剖面上自西向东倾伏，说明该测线的第四系厚度为西薄、东厚。强反射波 T_N 之下的剖面图像与其上部的剖面图像明显不同，在 T_N 反射波之上，出现在剖面上的是些反射层组较为密集、界面产状近于水平，且视频率较高的反射波同相轴。而在强反射波 T_N 之下，剖面揭示的是一系列视频率相对较低、延续相位较多的反射波同相轴，且它们在剖面上一律自西向东倾伏。在靠近 T_N 反射面附近，这些倾斜的地层反射与 T_N 反射波出现合并，地层出现明显的尖灭现象，说明该套地层与上覆地层之间呈角度不整合接触。

古荥 ZP2 测线剖面所揭示的断层特征非常清楚。在测线桩号 4700m 附近，剖面双程到时 1.0s 以下的反射波均出现有明显的波形畸变和反射波同相轴的明显错断，并伴有反射能量的突变和同相轴的横向间断等现象。另外，地层产状在该位置两侧也出现有明显的不同，桩号 4700m 以西，地层产状近于水平；桩号 4700m 以东，所有的地层界面一律向东倾斜，这些现象表明在该处应有断层存在。从断层在剖面上出现的位置和性质来看，该断层应是老鸦陈断层的反映。老鸦陈断层在剖面上倾向北东，视倾角约为 60° — 70° ，为正断层。该断层错断了二叠系、石炭系或奥陶系地层，推测向下延伸至结晶基底。从 T_N 反射波及其以浅的各反射波同相轴的横向连续性来看，在 Q+N 地层内部均没有出现断层引起的地层错断现象，尤其是强能量的标准反射波 T_N 在剖面上连续性非常好，说明老鸦陈断层为一条新第三纪之前的断层。该剖面揭示的地下界面展布形态和老鸦陈断层的特征均与 1988 年老鸦陈村附近的 4 测线剖面特征相一致。

3.2 古荥 QP2 测线的剖面特征

QP2 测线的浅层地震反射叠加剖面如图 3 所示。由图可以看出，在双程到时 400ms 以上，从剖面上可识别出多组反射能量较强、横向连续性较好、界面起伏变化形态明显的反射波同相轴。与古荥 ZP2 测线的叠加剖面（图 2）相比可以发现，由于该测线在数据采集时采用了高、宽频带激发与接收的工作方法，且通过缩小道间距提高了地震资料的空间采样密度，从而使得该剖面上的浅部地层反射变得更加清楚，对地层的分层也更为详细。这主要表现在：①在图 3 中不但可以清楚地看到第四系底界反射波 T_Q 出现的起伏变化，而且，在第四纪覆盖层内部还能划分出 T_{01} 、 T_{02} 和 T_{03} 3 组反射震相；②在第三系内部除了能看到信噪比较高、横向连续性较好的 T_1 和 T_2 反射波外，根据该剖面特征还能划分出 T_{11} 、 T_{21} 和 T_{31} 3 组地层反射。剖面信噪比和分辨率的提高，不仅使得对剖面反射波组的详细分层成为可能，而且，也有利于利用获得的资料来判定剖面上是否存在落差较小的断层。

总的看来，QP2 测线经过地段内的第四纪地层界面在横向上起伏变化不大，仅在剖面的中部出现小的隆起。而在双程到时 200ms 以下的新第三系内部，所有的地层反射均呈西高东低的单斜形态，且随着深度的增加，这些反射面的倾角逐渐变大。从剖面反射波同相轴的横

向连续性来看, 这些反射同相轴在横向上都比较连续, 尤其是标准反射波 T_0 和 T_2 在整个剖面上都能被连续可靠追踪, 且不存在反射波同相轴的错断现象, 因此, 在该测线范围内不存在第四纪活动断层, 即表明老鸦陈断层没有延伸到第四系内部。

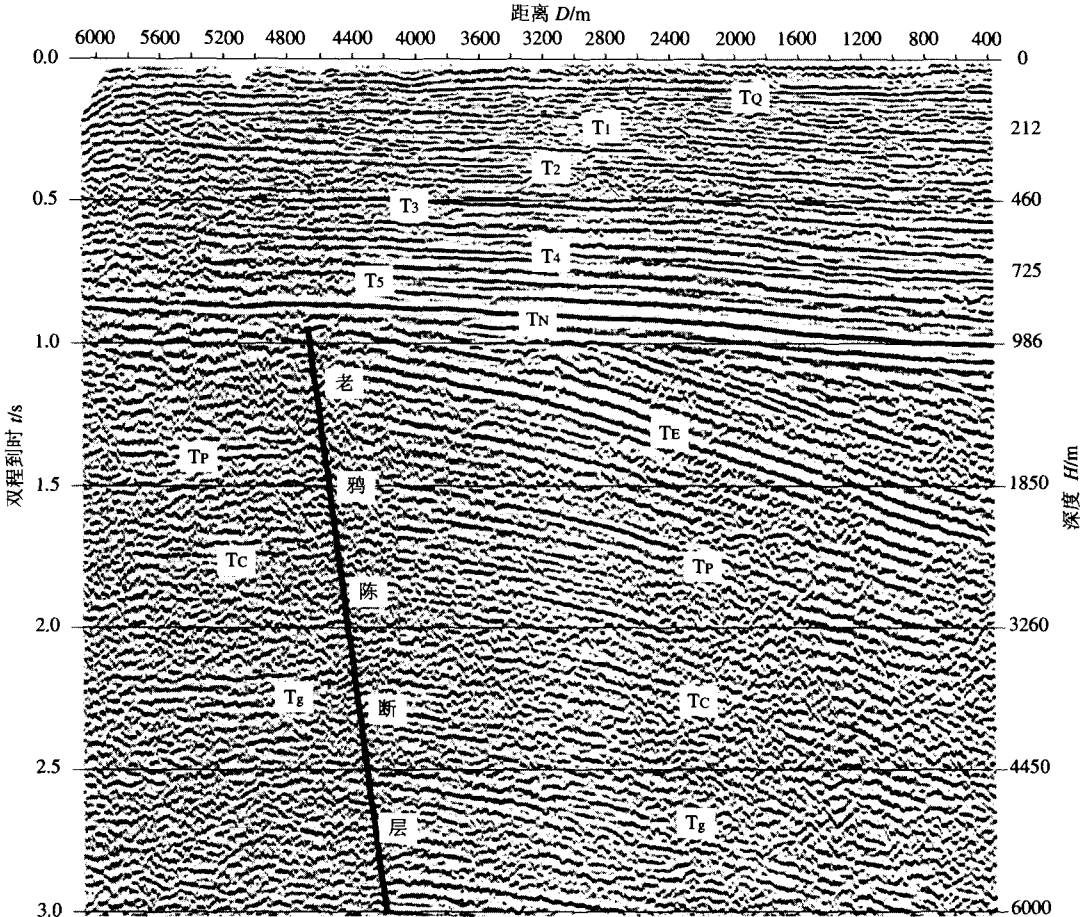


图 2 ZP2 测线浅层地震反射波叠加剖面
Fig. 2 Stacked section of shallow seismic reflection in ZP2 profile

跨地表陡坎的钻孔联合剖面揭示¹, 在深度 80—85m 以上, 根据钻孔岩性可划分出 3 个明显的地层标志层。第 1 个标志层为埋深约 21m 的马兰黄土与粘土质粉砂的分界, 浅层地震剖面揭示的 T_{03} 反射界面位于这一深度上; 第 2 个标志层为埋深约 53.9m 的钙质砂砾粘土层, 浅层地震剖面揭示的 T_{02} 反射界面埋深与该深度相一致; 第 3 个标志层为钙质粉砂层, 其埋深为 61.9m, 浅层地震剖面上的 T_{01} 反射界面与其吻合较好。钻孔联合剖面揭示的这 3 个标志层, 在地表陡坎的两侧均没有出现深度上的变化, 每个标志层几乎都位于同一个地面高程上。虽然在 ZP2 测线剖面 850—900m 的深度上有老鸦陈断层存在, 且其位于地表陡坎之下, 但是, 在 ZP2 测线剖面 800m 以浅以及 QP2 测线的浅层地震剖面上, 并没有发现断层存在的迹象。结合浅层地震和钻孔联合剖面分析, 老鸦陈断层至少在第 3 标志层之后就没有活动。因此,

1 钻孔联合剖面资料由中国地震局地质研究所尹功明研究员提供。

该地表陡坎不应是老鸦陈断层活动的结果。

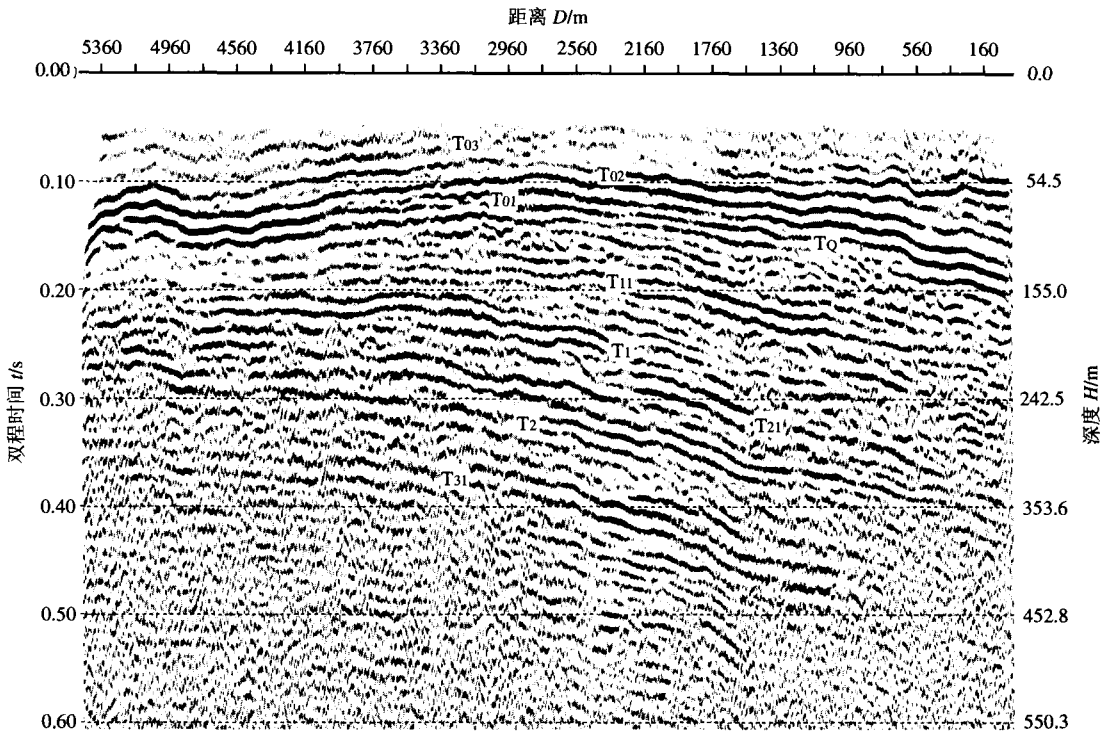


图 3 QP2 测线浅层地震反射波叠加剖面

Fig. 3 Stacked section of shallow seismic reflection in QP2 profile

4 讨论与结论

近年来，浅层地震反射波勘探在第四纪覆盖区的城市活动断层探测中得到了广泛应用。通过本次在郑州北郊老鸦陈断层上开展的浅层地震探测研究使我们认识到，在新生代地层较厚、且目标断层的位置、性质以及断层活动性不确定时，应首先通过较深目标层的探测来初步确定目标断层的位置及形态，然后再通过较浅目标层的探测来准确确定断层的位置及其向第四系内部的延伸情况，以判定被测断层是否为活动断层。

地震勘探资料对地下结构和构造的成像效果依赖于所采用的工作方法。而工作方法的选取依赖于工作区的地质条件、工作环境等因素。一般而言，当工作环境和地质条件较好、外界干扰相对较小时，采用常规的工作方法便可获得好的探测效果；当工作环境较为复杂、外界干扰噪声较强时，为压制干扰、提高资料的信噪比，需采用具有抗干扰能力的地震方法技术。如本次探测研究在工作条件相对较好的 ZP2 测线上，采用“大能量激发、大道间距和长排列接收”的工作方法，获得了 50—6000m 深度范围内非常清楚的地下结构图像以及目标断层的位置、形态及特征；而在外界干扰较强的 QP2 测线上，则采用了可控震源和具有实时相关处理功能的地震仪以及“小道间距、小偏移距、高覆盖次数以及高宽频带激发与接收”的工作方法，获得了 20—400m 深度范围内高分辨率的地下细结构图像，为判定目标断层是否延伸到第四系内部提供了可靠证据。

由于受地震勘探分辨率的限制，对延伸到第四系内部的一些落差较小的断层，仅靠地震

勘探资料往往难以分辨, 这需要结合钻探和槽探等地质勘探方法。本项探测研究通过浅层地震和钻探联合剖面相结合的探测方法, 不但获得了老鸦陈断层的位置、性质及特征, 而且也为断层活动性的评价提供了可靠的地质学和地震学证据。

致谢: 本项探测研究工作得到了河南省地震局、郑州市地震局以及郑州市政府有关部门的大力支持与配合。研究工作得到了国地震局活断层监理组邓起东院士、杨主恩研究员、卢造勋研究员的指导, 在此一并表示感谢。

参考文献

- 柴焯章, 孟广魁, 杜鹏等, 2006. 隐伏活动断层的多层次综合探测——以银川隐伏活动断层为例. 地震地质, **28** (4): 536—545.
- 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. 地学前缘, **10** (1): 93—103.
- 李金森, 王恩福, 张正墨等, 1994. 高分辨率浅层地震勘探在探测隐伏断层中的应用. 东北地震研究, **10** (4): 50—54.
- 刘保金, 赵成斌, 孙振国等, 1999a. 延庆—怀来地区的浅层高分辨率地震反射剖面. 地震地质, **21** (4): 425—430.
- 刘保金, 张天航, 冷欣荣, 1999b. 不同地区工程勘察的高分辨率地震反射探查. 西北地震学报, **21** (1): 55—61.
- 刘保金, 张先康, 方盛明等, 2002. 城市活断层探测的高分辨率浅层地震数据采集技术. 地震地质, **24** (4): 524—532.
- 刘保金, 姬计法, 徐朝繁等, 2006. 共偏移距地震反射波法用于城市活断层探测. 地震地质, **28** (3): 411—418.
- 潘纪顺, 刘保金, 朱金芳等, 2002. 城市活断层高分辨率地震勘探震源对比试验研究. 地震地质, **24** (4): 533—541.
- 王振东著. 1988. 浅层地震勘探. 北京: 地质出版社, 120—132.
- 徐朝繁, 张先康, 朱金芳等, 2002. 复杂介质结构中折射界面的哈格多恩波前成像. 地震地质, **24** (4): 542—547.
- 姚文斌主编, 1992. 郑州市地震小区划研究文集. 北京: 地震出版社, 56—65.
- 赵成斌, 孙振国, 刘保金等, 1999. 邢台地震区浅部构造特征及其与深部构造的耦合关系. 地震地质, **21** (4): 417—424.
- 赵成斌, 李德庆, 赵景尧等, 2007. 郑州东区浅部断层的构造特征研究. 中国地震, **23** (1): 65—73.

The Characteristics of Zhengzhou Laoyachen Fault Revealed by Seismic Exploration Data

Liu Baojin¹⁾, Zhao Chengbin¹⁾, Tian Qinjian²⁾, Liu Yaoxing³⁾ and Feng Shaoying¹⁾

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

2) Earthquake Hazard prevention Center, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

3) Earthquake Administration of Henan Province, Zhengzhou 450003, China

Abstract In order to find out the location, characteristics and activities of Zhengzhou Laoyachen fault, the shallow seismic surveys at different exploration depths that are across Laoyachen fault in northern area of Zhengzhou city, were carried out in 2006. By using explosive and Vibrator seismic sources, the combined work methods of diverse observation geometry with different parameters are applied to obtain the subterranean structural and tectonic image in the depth ranging from 30 to 6000m. The results show that Laoyachen fault is a normal fault inclining to NE and trending in NW, which offsets the stratum before late Tertiary period. However, there are no fault displacement found in since then.

Key words: Laoyachen fault; Shallow seismic exploration; Fault activity; S/N