# 兰州盆地活断层的高分辨率浅层地震勘探技术

卢育霞<sup>1,2</sup>, 王振明<sup>3</sup>, 王兰民<sup>1,2</sup>, 石玉成<sup>1,2</sup>, Edward W. Woolery<sup>4</sup>

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地,甘肃 兰州 730000;

中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000; 3. 肯塔基地质调查局,美国 肯塔基州 40506-0107;
 4. 肯塔基大学地球与环境科学系,美国 肯塔基州 40506-0107)

摘 要:针对城市活断层浅层地震探测的一些技术问题,在兰州盆地的金城关断层和刘家堡断层沿 线开展活断层浅层(50 m 以内)地震勘探技术研究。主要采用纵波和横波多次覆盖共 CMP 点地震 反射方法,获得了目标场地地震图像资料,尤其横波地震剖面更加清晰地反映出超浅层构造空间特 征。以红艺村测线(HYC)和师范学校西测线(SFXX)为例,分析总结了数据采集、资料处理、剖面 解释三方面浅层活断层地震探测的技术要点。结果可以为兰州市及类似复杂构造地区活断层地震 调查提供技术参考。

关键词: 浅层地震勘探; 活断层; 横波反射; 纵波反射; 兰州盆地 中图分类号: P631.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2008)04-0344-10

## High-resolution Shallow Seismic Prospecting Techniques for Active Fault Investigation in Lanzhou Basin

LU Yu-xia<sup>1, 2</sup>, WANG Zhen-ming<sup>3</sup>, WANG Lan-min<sup>1, 2</sup>, SHI Yu-cheng<sup>1, 2</sup>, Edward W. Woolery<sup>4</sup>

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Gansu Lanzhou 730000, China;

Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China; 3. Kentucky Geological Survey, Kentucky 40506 - 0107, USA;
 Department of Earth and Environment Sciences, University of Kentucky, Kentucky 40506 - 0107, USA)

Abstract: Focused on some technique problems in the shallow seismic prospecting for active faults in urban area, research work on the high-resolution shallow seismic prospecting technique is taken across the Jinchengguan fault and the Liujiapu fault in Lanzhou basin. Both P- and SH- wave CMP reflection methods are used to find out the characteristics of active fault in the very shallow strata ( $\leq 50$  m). Those seismic profiles of the target area reveal the characteristics of tectonic deformation evidently, especially the SH-reflection profiles. In the paper, the key technical points such as data acquisition, data processing and profile interpretation are summarized by using HYC and SFXX survey lines as the examples. The result will be beneficial to further geophysical investigation for active faults in Lanzhou and other area. Key words: Shallow seismic prospecting; Active faults; SH-wave reflection; P-wave reflection;

#### Lanzhou basin

0 引言

兰州是全国地震重点防御城市,地处新构造活动强烈的青藏高原东北边缘地貌阶梯带附近,历史 上曾多次遭受过强震袭击,其中最大历史地震为 1125 年7级地震<sup>[1]</sup>。因此,探查省会城市兰州是否 存在活断层,活断层的具体位置及其活动特性对其 城市建设和震灾防御都具有非常重要的意义。

基金项目: 地震预测研究所基本科研业务费项目(2007693); 中国地震局"十五"重点项目(1-4-28-1); 中国地震局兰州地震研究 所论著编号: LC2008062

收稿日期:2008-06-24

作者简介:卢育霞(1978-),女(汉族),甘肃玉门人,助理研究员,主要从事工程地震与岩土工程方面的研究.

2005年起,兰州市及其周边地区先后开展了多 次浅层人工地震活断层勘探研究,都是利用常规的 纵波反射技术。中国地震局物探中心承担兰州浅层 地震勘探时,在一些地区曾出现反射探测失效的情 况<sup>①</sup>。煤炭科学研究总院西安分院对兰州控制性浅 层人工地震勘探也做了大量工作<sup>②</sup>,他们采用炸药 震源,重点选择好的激发层获得了较好的地下地震 影像资料。如图1所示,纵波反射剖面清晰地揭示 了兰州盆地及其内部断层。然而这些传统的纵波地 震探测剖面无法准确判定断层的活动性质和活动时 代,特别是在晚更新统和全新统。因此,如何获得浅 部几米至几十米深度范围构造信息是人工地震活断 层探测需要解决的技术问题。

纵波勘探作为传统的地震勘探方法广泛应用于 地下构造探测研究中,主要用来探测覆盖层与基岩 界面以及覆盖层内部反射界面<sup>[2-3]</sup>。近年来横波特 别是水平向剪切波(SH-wave)更有效地应用于探测 第四纪浅部地质及其构造<sup>[4-10]</sup>。其中 Woolery 等人 利用横波地震勘测方法研究了美国中部 Hovey lake 断层的性质与位置,采用小重量锤击震源、小道间距 观测系统获得了基岩断裂上部 10~30 m 之间第四 系沉积覆盖层的信息,最浅的近地表第四系沉积层 反射显示在地下 5 m 深处发生了 2 m 左右的高角度 逆向位移<sup>[7]</sup>。

在借鉴国外经验<sup>[47,11-12]</sup>的基础上,兰州地震研 究所在兰州盆地开展了活断层浅层地震试验探测工 作<sup>3</sup>,采用小重量锤击震源,联合纵波、横波勘探进 行了以多次覆盖共 CMP 点地震反射方法为主的地 震调查,获得了目标场地地震图像资料,尤其横波地 震剖面清晰地反映出极浅层(50 m 以内)构造的空 间特征,为兰州市活断层定性与解释提供了重要证 据。本文总结兰州活断层探测的经验与技术要点, 可为该地区进一步活断层地震勘探提供技术基础, 也能够为类似复杂构造区获得高分辨率、高信噪比 的活断层地震勘探提供技术参考。

1 地震地质条件

兰州市位于一个狭长的 NWW 向新生代河谷断 陷盆地,黄河自西向东横贯其中,地形地貌总体为 南、北高(黄土沟墚区),中间低(河谷盆地区),相对 高差达 500 m。上世纪 80 年代兰州盆地开展了水 文钻探、城市区域地质调查和电法勘探等工作,结合 地震地质调查提出"兰州是一个存在多条活动断层 的断陷盆地"的认识(图 2),并逐渐占居了主导地 位。兰州盆地位于 NWW 向马衔山一兴隆山左旋逆 走滑活动断裂系和 NNW 向拉脊山北缘断裂、庄浪 河断裂等弧形逆冲断褶带两组活动构造的交汇部 位,历史上曾发生过多次中、强破坏性地震<sup>[12]</sup>。图 2 中金城关断层(F<sub>1</sub>)和刘家堡断层(F<sub>2</sub>)被认为是内 部次级断裂,对兰州市建设和震灾防御都具有非常 重要的影响。试验性浅层地震勘探首先开展了对这 两条断层的研究,期望控制其走向、具体延伸位置及 其活动特性。

测区新生界为风积黄土、冲、洪积砂砾岩、泥岩 及砂岩、泥岩互层,其下为白垩系、奥陶系、前寒武系 或花岗岩等。浅层地震勘探主要涉及地层为第四系 和第三系。盆地北边界金城关断裂带可探及逆冲地 层为前寒武系变质岩。盆地内第四系厚度变化较 大,大多数地区平均厚约20~50m,主要为河流相 的砂、卵石层,在Ⅰ、Ⅱ级阶地及河漫滩冲积砂砾石 层厚度为10~30 m,含水层厚度一般不超过15 m, 其埋藏深度多在5~20 m之间;河谷平原内含水层 往往不是连续分布,以第三系为隔水底板。测区地 表第四纪风积黄土对激发的高频能量吸收衰减作用 较强;冲、洪积砾石层及疏松岩石本身成层性不好, 物性单一不易形成地震波阻抗界面;第三纪泥岩则 为河流相沉积,半成岩,其中的砂岩、泥岩分层可形 成一些地震波阻抗界面。在七里河断陷盆地内,早 更新世砾石层和第三纪泥岩产状局部倾角变化范围 为45°~80°,地层倾角越往北越大,对地震探测不 利。总之,在兰州市开展活断层浅层地震探测存在 一定难度。

## 2 方法

横向剪切波在近地表地震调查中获得普遍认 可,这是因为:①横波在介质中的传播是通过岩石 (或土质)骨架传播,与地层孔隙水无关,因而横波 速度直接反映地层介质的性质,而纵波受含水量的 影响很可能会掩饰真实的沉积层形变;②由于纵波 比横波传播速度快,致使纵波解释浅层地下构造反 射具有相对小的时间窗口,横波速度通常是纵波的 1/5 至1/10,虽然频率相对较低,但最小分辨率可提

① 中国地震局地球物探中心.兰州市活断层探测与地震危险 性评价-控制性浅层地震探测报告.2006.

② 煤炭科学研究总院西安分院.兰州市活断层探测与地震危险性评价-控制性浅层地震探测报告.2006.

③ 甘肃省地震局.兰州市活断层探测与地震危险性评价-兰 州市活断层浅层人工地震试验勘探报告.2006.



图 1 SS15 测线地震时间剖面构造解释图<sup>20</sup>(据煤炭科学研究总院西安分院,2006) (图中解释的断层 F<sub>15-1</sub>, F<sub>15-2</sub>, F<sub>15-3</sub>分别对应图 2 中推测断层 F<sub>5</sub>, F<sub>2</sub> 及 F<sub>1</sub>。SS15 测线地理位置见图 2)







图 2 兰州盆地推测活断层及浅层地震测线位置图 Fig. 2 Map of the projected faults and main shallow seismic survey lines.

高2~3倍<sup>[6]</sup>,大大加宽了横波反射最佳窗口(图 3);③SH波以任何角度入射到界面上时,其反射波 和折(透)射波都是SH波,并不发生波型转换。以 上三个特点对于横波浅层反射相当有利,采用"最 佳窗口"技术更易获得较清晰的有效波信号,可追 踪地层岩性横向变化;而且对常被纵波探测忽略的 近地表垂直地层往往能够得到更详细的分层,易于 准确判定活动构造上断点位置。 鉴于此,为准确掌握金城关断层和刘家堡断层 的延伸位置及其断裂活动特性,我们联合浅层纵波 探测法与超浅层横波探测法,共选测线 20 条(图 2),其中纵波测线 16 条,横波测线 4 条<sup>3</sup>。本文以 探测金城关断层的红艺村测线(HYC)和探测刘家 堡断层的师范学校西测线(SFXX)为例,主要介绍 多次覆盖共 CMP 点地震反射方法的技术要点。

#### 2.1 数据采集



图 3 红艺村横波、纵波地震数据最佳窗口处理前后对比

Fig. 3 Comparison of optimum windows between P-wave and SH-wave with raw and processed data in HYC site.

合理的数据采集技术是浅层高分辨率地震勘探的基础,根据测区工作环境和地震地质条件,基本采 集参数见表1。

通过兰州盆地 20 条测线的地震勘探,我们仍须 强调以下几个方面的重要性:

## (1) 配备适宜的高性能仪器设备

本次所使用的数据采集仪器是美国 Geometrics 公司的 StrataVisor<sup>NZ</sup> 48 道数字地震仪,24-bitA/D 转 换,动态范围 144 dB,0.02~16.0 ms 采样率,有宽 频带和可选滤波器以记录不同频谱范围的地震信 号,其各项指标均能满足浅层勘探的要求。纵波勘 探中,我们分别使用垂直向组合检波器 60 Hz(6 个/ 组)、100 Hz(6 个/组)及 40 Hz(单个)检波器进行 了反射信号接收试验。由于兰州地表黄土层对高频 信号衰减迅速,采用检波器组合接收压制地滚波和 声波的方法会严重衰减记录中的高频成分,不利于 提高分辨率,因而后期工作主要采用 40 Hz 单个检 波器采集纵波反射信息。横波勘探使用美国 Kentucky 大学提供的 30 Hz 单个水平极性检波器。

	衣1 未果梦奴	
参数	纵波	横波
采集仪器	Geometrics StrataVisorNZ	Geometrics StrataVisorNZ
道数	48	48
道间距/m	1~5	1
检波器类型	垂直40 Hz/60 Hz、100 Hz	水平 30 Hz
检波器组合	单个/组合(6)	单个
最小偏移距/m	变化的	1
炮点距/m	1~5	1
震源 10	kg 大锤/36.3 kgESS200 落锤	3.5 kg 锤
垂直叠加/次	5~15	6 ~ 10
最大覆盖次数	24	24
采样率/ms	0.25	0.125 0.25
记录长度/s	1.0	1.0
采焦滤波/Hz	任切 35· 陷50	任切15/25·路频50

#### (2) 震源是数据采集的关键技术

由于目的层较浅,需控制震源高频能量激发,而 且场区位于城市建筑物密集的居民区或工厂区,故 简便有效的电动落锤震源和小重量人工锤击震源成 为试验探测的主要手段。本次研究中纵波勘探使用 36.3 kg 电动落锤或 10 kg 锤垂直敲击地面锤击板, 以激发相对高能量及宽频的 P 波;横波震源使用3.5 kg 小锤敲击 3 kg 工字型钢板,双向激发 SH 波,以 抵消纵波干扰,同时加强横波振幅。数据采集中为 了助于细节保真,注重垂直叠加质量,保证同一地点 多次激发能量均衡稳定。

(3) 目标层深度决定最佳观测系统组合

探槽和钻孔资料证明,此次探测目标金城关断 层和刘家堡断层的构造突变都发生在百米以内,特 别是揭露刘家堡断层的文华嘉园探槽在地表以下8 m 左右的沉积层内就有明显的横向岩性变化。欲探 知这样超浅层构造特征,一方面要使用小重量锤击 震源激发高主频信号以提高浅层分辨率;另一方面 更要采用短排列、小偏移距、小道间距观测系统。本 次探测中为提高分辨率,纵波勘探一般采用1~5 m 道问距,最大最小偏移距的选择依据"最佳时窗"原 则。如红艺村纵波测线道距1m,为尽量避免浅层 反射波被干扰波所掩盖,采用最小偏移距为30m, 可有效地消除震源产生的噪音信号,同时也损失了 部分浅层有效信号;而在横波勘探使用1m道距,1 m 偏移距就可以弥补缺失的浅部信息(图3)。我们 采用单边激发多次覆盖共 CMP 点地震反射方法,48 道接收,炮点距一般与道间距相同,水平覆盖次数最 大可达到24次(表1)。

(4) 场地地表条件直接影响接收效果

兰州测区地表多为干燥黄土盖层,地层倾斜大, 卵石层在测区内普遍存在,实践证明这种地表条件 不但对高频成分衰减严重,还可能造成反射信号差 或无反射信号。中国地震局物探中心承担兰州地区 的浅层地震勘探时出现反射失效被认为主要是由激 发接受条件造成的<sup>①</sup>。此次探测除了干燥黄土、粉 砂地表,还遇到干燥坚硬的卵砾石层,甚至芦苇丛生 的砂卵石河漫滩,这些都不是理想的地震勘探场地。 其突出的缺点在于检波器与大地的耦合效果难以保 障,尖尾椎的检波器难以直接插入地面,使用金属耦 合板置于粗粒卵石层上无法与大地良好耦合。所以 应尽量选取适宜场地进行地震勘探。

(5) 应用滤波器具有重要作用

高分辨率地震勘探中应用低频切除滤波很必 要。首先,城市活断层浅层地震勘探一般都探测百 米以内的地质构造,采用小偏移距短排列,受声波和 面波干扰大,同时城市人口密集、交通繁忙,很容易 受人为干扰影响。这些基本都是低于 100 Hz 的低 频干扰,由于地表震源没有足够的能量压制低频噪 音的振幅,所以必须靠滤波器来衰减;其次,实际上 检波器接受到地震震源的低频能量大于高频能量; 第三,高频能量比低频衰减快,即地球可看作低通滤 波器。Knapp 和 Steeples 对相同条件下采用预加重 低切滤波的数据和没有采用滤波器的宽频带数据进 行频谱分析对比,研究结果表明前者比后者有更宽 的有效频率范围<sup>[9]</sup>。因此根据兰州测区噪音环境 及检波器的主频条件,我们采用纵波探测低切35 Hz,横波探测低切15 Hz 或25 Hz,除特殊场地外一 般不使用高频切除。此外还需要根据场地交流电干 扰情况选择使用陷频滤波器。

### 2.2 资料处理

由于横向剪切波与纵波的传播方式不同、传播 速度不同,造成这两种体波对岩石和液体的响应不 同,从而使两种地震剖面有明显的分辨率差别,并在 相同场地得到地下不同深度的信息,但就两种地震 数据的处理来讲,其基本步骤是相同的(表2)。

本次所选测线场地相对地势平坦,地形起伏对 资料的影响不是很大,因此除进行常规编辑和校正, 最主要的环节应是叠前去噪和叠加速度提取。

(1)预处理中注意对原始资料对比分析,选取 最佳窗口记录作为基本资料以获得最佳叠加剖面。 图 3 为红艺村资料处理中纵波测线和横波测线的最 佳信号窗口。可见纵波反射有效信号的纵向时间范 围相对较小,同时横向最佳窗口由于受面波声波的 影响出现在较大偏移距处,通常可能接收到的是浅 层宽角反射;而横波记录纵向有效信号时间窗口较

#### 第4期

大,横向空间几乎近垂直反射,有效信号与干扰波清 晰可辨。

#### 表2 数据处理步骤

1. 资料解编,格式转换
2. 増益恢复(能量补偿)
3. 定义观测系统, 置道头
4. 静校正
5.频谱分析
6. 叠前去噪(一维、二维滤波)
7. AGC 自动增益控制
8. 坏道编辑
9. 切除
10. 叠前炮集 FK 滤波
11.速度分析
12. 动校正
13. 初始叠加
14. 剩余静校正
15. 最终 CMP 集叠加
16.叠后修饰

(2)图3中红艺村纵波和横波原始记录(上) 和经滤波、增益恢复等处理后的单炮记录(下)对比 显示,处理后反射波组清晰可见。其中带通滤波器



(a) 未用叠前FK滤波

是根据每一条地震测线的有效波主频设定的,因此 先进行频谱分析以掌握数据中有效波的主频,然后 在主频范围内采用不同带通滤波器对数据滤波效果 进行分析对比确定最佳滤波参数。为提高分辨率, 数据处理中F-K滤波主要用来衰减混叠波和向后 散射波,实际经验表明浅层资料中的地面干扰明显 且复杂,在叠前使用F-K滤波效果会更好(图4)。

(3)叠加速度提取是常速度分析之后再采用速 度谱分析,分析速度谱时采用较小的速度增量和 CMP 间隔增量进行分析。波速大小直接影响到动 校正及叠加效果。地表浅层波速敏感多变,为求取 准确的叠加速度,采取了剩余静校正与波速分析的 多次迭代处理。在有条件的场地结合钻孔波速资料 可保证速度拾取达到最佳效果。表3为红艺村横波 地震资料分析得到的平均叠加速度,这也是进行地 震剖面时间 - 深度转换计算的主要依据。由表3可 知该场地近地表亚砂土剪切波速度小于100 m/s, 通过计算就能得到相应的浅层速度结构。



(b) 使用叠前FK滤波



表3 红艺村横波地震记录平均叠加	速度
------------------	----

双程旅行时间/ms	75	155	185	210	270	315
叠加速度/[ m・s ⁻¹ ]	85	160	235	275	345	365

(4) 浅层地震数据虽然受到的干扰因素较多, 但考虑到任何处理手段在消除干扰波的同时或多或 少都会降低资料的分辨率,而且常用于地球深部资 料的反褶积、偏移等技术对浅层地震数据的改进效 果不明显,本文最终地震剖面图在处理中没有应用 这些方法。全部浅层资料处理在尽量保持原始数据 特征的基础上,采用严格细致参数流程进行测试分 析。例如图5显示根据 CMP 编号可对应红艺村横 波地震记录最佳窗口与叠加剖面上的地下信号。由 于横波地震勘探中使用1 m 小偏移距和道间距,所 得图像接近垂直反射,因此不需要考虑浅层宽角反射的问题。当然,本次纵波勘探为了获得最佳反射窗口,有大于道间距几十倍的最小偏移距,浅层资料中存在宽角反射,在地震剖面地质解释时需要清楚地了解这一点。

## 3 结果与分析

城市活断层探测的主要目标是要确定断层的位置和产状。在叠加时间剖面上通过对反射波组对比就可以确定反射层的构造形态、接触关系及断层的分布情况。根据反射波组特征、波速变化、地层构造等重点环节进行分析,并结合其他地球物理资料及地质调查结果确定断层位置和活动时代。下面以红



学

图 5 红艺村横波测线反射界面在单炮记录和叠加地震剖面中的对应关系 Fig. 5 Corresponding relations of the reflections between the shot records and the stacked SH-wave profile from HYC site.

#### 3.1 红艺村测线(HYC)

红艺村测线用于探测金城关断层,位于黄河Ⅱ 级阶地后缘(图2),包括纵波和横波两条测线。据 分析,该场地纵波和横波有效反射波的主频分别约 为70 Hz、40 Hz,探测得到相应的有效反射波的速度 范围分别在 420~700 m/s、100~300 m/s 之间,故 纵波、横波地震剖面从上到下分辨率为 1.5~2.5 m、0.6~1.9 m。可见,横波勘探探测浅部沉积层信 息可达到较高的分辨率。图 6(c) 中纵波地震剖面 显示可分辨地下反射信息位于 100 ms 以下,在 100 ms 以上由于大偏移距无有效信号或因干扰波严重 信息被切除,但100 ms(约20 m)以下地震图像清晰 地呈现了逆冲断层的特征,在 CMP170 左右两侧的 波组明显不同。图 6(a) 显示的地层界线与钻孔图 像的解释(图6(b))比较相近:在50 ms 和100 ms 处的两条浅层反射可以分别与亚砂土和坡积砾石层 的上界面对应;100 ms 以下的波组杂乱无章,可确 定断层位于 CMP40 左右位置, 倾角较陡, 上盘向南 西方向逆冲;下盘岩层也倾向南西,变形发生的深度 约为地下20m左右, 地震图像反映断层很可能错断 了阶地砾石层。根据图 6(b),黄河 Ⅱ级阶地底部砾 石层、中上部砂土层在横向上均可对比,因处于阶地 后缘(不远即有前寒武系变质岩出露),黄河Ⅱ级阶 地砾卵石层逐渐变浅,但无断错证据。砂土光释光 样鉴定 II级阶地年代为晚更新世中期; ZK2-4 中最 下部的砾岩层内 13 个孢粉样品鉴定结果认为孢粉 组合带的地质时代可大致定为早更新世(Q,),说明 该套砾岩为早更新世时期形成的。

钻孔剖面结合纵波、横波地震剖面综合反映断 层很可能错断了阶地砾石层,推测断层倾角达77° 左右,并且该断层活动至少发生在晚更新世中期 (60.4±8.9 ka)以后,但晚第四纪活动不明显。

#### 3.2 师范学校西测线(SFXX)

该测线用于刘家堡断层的探测(图2)。断层北 侧 8~27 m 即为新近系, 而南侧 45~348 m 才见新 近系,断距达250 m 以上<sup>[13]</sup>。很多早期建筑工程描 述中提到过断层两侧地层差异明显。师范学校西测 线根据推测刘家堡断层往 NW 方向延伸可能通过的 场地布置,地形平坦开阔,选用1m道距,1m偏移 距,由南向北进行了横波地震勘探。通过精细的数 据处理得到如图 7 所示的地震剖面,图中可见多组 较明显的反射波组,根据平行于测线东 500 m 左右 的钻孔资料对比,可确定130 ms 处强反射层应来自 亚砂土与砾卵石层分界;130 ms 以上为粉土、亚砂 土内部反射;130 ms 以下好几处同相波组断续或伴 有强绕射波出现,可标出构造异常(虚线),尤其在 CMP500 附近反射波组变化明显,两侧砾卵石层反 射同相轴有约2m的"垂直断距",其下部波组亦有 断层特征。因此,所谓的刘家堡断层应从测线 CMP500 左右的位置通过。

但是,根据此测线东南方向安宁文华嘉苑探槽 揭露<sup>3</sup>:场地上部盖层为黄河 I 级阶地堆积,下部南

СМР

50

100

150

200

250

300

350

5

time/ms



红艺村横波测线和纵波测线地震剖面与钻孔解释剖面的对比 图 6 Fig. 6 Comparison of the drilling figure with both the SH- and P-wave profiles at HYC site.





西为早更新世砾石层( $Q_1$ ),北东为上新世( $N_2$ ),两 侧地层内均有互层结构,整体显示为高角度不整合 接触,产状均60°~70°。同时结合兰州断陷盆地从 古至今整体地质结构调查资料,地质学家断定所谓 的刘家堡断层实际上就是早更新世砾石层与上新世 砂、泥岩地层的高角度地层界线。面对这个结果,首 先可能想到早期钻探结果对新生界地层产状不易判 别,故会将向斜地层误认为是断层;其次,地震剖面 上反映的界面是根据不同岩性地层的波阻抗差异得 出的,同世的互层结构高角度不整合接触在地震剖 面上也显示出多组断裂特征,单从近地表地震剖面 波组特征很难区分断层和高角度不整合地层界面; 另外,值得注意的是曾有纵波深长剖面的地震勘探 资料显示了兰州断陷盆地向斜构造的地层趋势(图 1)。但由于城市发展规模限制,清晰的整体构造获 得还有困难,需要进一步调查研究。总之,探查浅层 地下构造的空间展布还需要深部构造资料的佐证。 所以地震剖面的正确解释必须依赖于其他地球物理 资料、地质调查结果及查明相应的深部构造联系,以 进行对比验证。

## 是通过试验研究和摸索,结合其他地球物理、化学探测方法、及钻孔探槽等资料,我们基本上控制了金城 关断层的走向、具体延伸位置及其活动特性;并对刘 家堡推测断层有了新的认识:以前所认为的刘家堡 断层很可能是早更新世砾石层与第三系砂泥岩的高 角度地层接触面。这一结果为兰州市的土地利用和 城市建设规划、减轻地震灾害、保障社会经济的可持 续发展提供了重要依据。

作为了解城市地下构造空间展布特征的重要手 段之一,浅层地震勘探在兰州市活断层探测中发挥 了主要作用。本文高分辨率浅层地震勘探研究中我 们得到了宝贵的实践经验:

(1) 野外采集到的原始数据质量的好坏决定了 数据处理和资料解释成果图件的质量,因此,开展高 分辨率浅层地震勘探调查工作最根本的还是要从数 据采集入手,注重采用高性能的勘探设备,确定适宜 的震源,选择最佳的观测系统,避免不利的地震激发 接收条件,利用合理的抗干扰手段,以获得最佳地震 记录。

(2)浅层地震数据处理以提高分辨率为主要目的,每一步都应采用严格细致参数流程进行质量控制分析。叠前滤波手段视数据具体干扰情况而定。 地表浅层波速敏感多变,为求取准确的叠加速度,分

## 4 结论

兰州地区浅层地震勘探虽然存在很多困难,但

析速度谱时采用较小的速度增量和 CMP 间隔增量 进行分析;一般需要剩余静校正与波速分析的多次 迭代处理;在有条件的场地结合钻孔波速资料可保 证速度拾取达到最佳效果。浅层地震数据在达到要 求分辨率的基础上,修饰手段越少越好。

(3)由于第四纪覆盖层对地震动的压制作用, 对于断层是否为活动断层并不能完全依赖于断层上 断点的解释,还应考虑第四系覆盖层对强地震动断 错地层的削弱因素;活断层探测需要了解地下非常 浅的断裂信息,也需要掌握浅部断裂与深部构造的 联系,因为浅部构造的具体定性需要深部资料的支 持。

(4) 横波勘探在超浅层活断层调查中具有明显 优势,其反映的浅部覆盖层变化不但分辨率高而且 定位准确,能够弥补传统纵波勘探丢失的近地表沉 积层信息。浅层地震勘探工作中,可联合横波、纵波 勘探,拓宽其任意单项技术的探测范围,清晰掌握地 下结构由浅至深的空间展布形态。

致谢:特别感谢袁道阳提供兰州市活断层探测 相关地质资料。感谢袁中夏、张元生、陈永明、秋仁 东、孙军杰、徐舜华、王平、胡明清、何丽君、王恒知、 王强、李稳等在数据采集中的大力帮助。

#### [参考文献]

- [1] 国家地震局兰州地震研究所,甘肃省计划委员会.甘肃省地震 危险区划研究[M].兰州:兰州大学出版社,1993.
- [2] 刘保金,孙振国,赵成斌,等.延庆一怀来地区的浅层高分辨率 地震反射剖面[J].地震地质,1999,21(4):425-430.
- [3] 赵成斌,袁洪克,李德庆,等.松散覆盖层内隐伏断层探测研究[J].大地测量与地球动力学,2007,27(2):106-113.
- [4] Woolery E W, Street R L, Wang Z, et al. Near-surface deformation in the New Madrid seismic zone as imaged by high-resolution SH-wave seismic methods [J]. Geophysical Research Letters, 1993, 20(15): 1615-1618.
- [5] Woolery E W, Wang Z, Street R L, et al. A P and SH wave

seismic investigation of the Kentucky Bend fault scarp in the New Madrid seismic zone [J]. Seismological Research Letters, 1996, 67(2): 67-74.

- [6] Woolery E W, Street R. Quaternary fault reactivation in the Fluorspar Area Fault Complex of western Kentucky: evidence from shallow SH-wave reflection profiles [J]. Seismological Research Letters, 2002, 73 (5): 628-639.
- [7] Woolery E W. Geophysical and geological evidence of neotectonic deformation along the Hovey Lake fault, Lower Wabash Valley Fault System, Central United States [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2005, 95(3): 1193-1201.
- [8] Harris J B. Shear-wave splitting in Quaternary sediments: Neotectonic implications in the central New Madrid seismic zone[J]. Geophysics, 1996, 61(6): 1871-1882.
- [9] Williams R A, Stephenson W J, Frankel A D, et al. Correlation of 1 - to 10 - Hz earthquake resonances with surface measurements of S - wave reflections and refractions in the upper 50 m [J]. Seismological Society of America Bulletin, 2000, 90 (5): 1323-1331.
- [10] Street R, Woolery E, Chiu J M. Shear-wave velocities of the post-Paleozoic sediments across the upper Mississippi embayment
  [J]. Seismological Research Letters, 2004, 75: 390-405.
- [11] Bexfield C E, McBride J H, Pugin A J M, et al. Integration of P- and SH-wave high - resolution seismic reflection and microgravity techniques to improve interpretation of shallow subsurface structure: New Madrid seismic zone[J]. Tectonophysics, 2006, 420: 5-21.
- [12] Wang Z, Madin I P, Woolery E W. Shallow SH-Wave Seismic Investigation of the Mt. Angel Fault[J]. Tectonophysics, 2003, 368: 105-117.
- [13] 袁道阳,刘小凤,郑文俊,等.兰州地区活动构造格架与变形 特征[J].地质学报,2004,78(5):626-632.
- Knapp R W, Steeples D W. High-resolution common-depth-point seismic reflection profiling: Field acquisition parameter design
  [J]. Geophysics, 1986, 51(2): 276-282.
- [15] 刘兴旺,袁道阳,葛伟鹏.兰州黄河阶地高精度 GPS 测量与构 造变形研究[J].西北地震学报,2007,29(4):341-346.
- [16] 王爱国,马巍,张向红,等.隐伏断层电性特征及浅层电法探测[J].西北地震学报,2006,28(3):242-247.