

doi: 10.11720/wtyht.2021.1019

雍凡, 刘子龙, 蒋正中, 等. 城市三维地震资料处理浅层成像关键技术[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1266-1274. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1019>

Yong F, Liu Z L, Jiang Z Z, et al. The key technology of shallow imaging in urban 3D seismic data processing[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1266-1274. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1019>

# 城市三维地震资料处理浅层成像关键技术

雍凡<sup>1,2</sup>, 刘子龙<sup>2</sup>, 蒋正中<sup>2</sup>, 罗水余<sup>2</sup>, 刘建生<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000)

**摘要:** 浅层三维地震勘探数据量大、偏移归位准确、横向分辨率高,能够克服二维地震勘探在城市中受障碍物限制致使测线布设与构造走向斜交,浅层小构造控制程度较差和断层归位不够准确等问题。因此浅层三维地震探测可以为城市地下空间探查、活动断裂探测和地质灾害勘查等方面提供更高质量的数据。然而城市三维地震勘探面临表层速度分布不均匀、环境干扰大和障碍物多导致炮点分布不均匀等影响浅层成像的问题。本文以实际三维地震资料为例,针对城市三维地震资料的特点,采用了层析静校正、叠前多方法组合去噪、叠前数据规则化插值和精细动校拉伸切除等技术手段对城市三维地震资料进行处理,提高了浅层成像质量。

**关键词:** 城市地下空间探测; 三维地震勘探; 数据处理; 浅层成像

**中图分类号:** P631.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2021)05-1266-09

## 0 引言

高精度浅层反射地震勘探能够得到从深度几十米到几千米的地下构造信息,是城市地下空间探测的重要手段。二维高分辨率地震勘探已经成为城市活动断裂勘查的主要技术手段,在多个城市取得了良好应用效果<sup>[1-6]</sup>。然而,采用二维地震探测存在中浅层小构造控制程度较差,在地层倾角较大地区断层归位不够准确,受建筑物和其他障碍物限制致使测线布设与构造走向斜交等问题<sup>[7]</sup>。三维地震数据量大、偏移归位准确、横向分辨率高、探测深度范围大,有利于对复杂构造和小构造的研究,可以克服二维地震勘探在城市中使用大偏移距、单边激发观测系统,对浅部地层的探测不利的问题<sup>[8]</sup>。因此开展城市浅层三维地震勘探的应用研究对提高目前我国城市地下空间探测精度具有重要意义。

虽然国内城市浅层三维地震勘探的实际应用研究较少,但是许多学者开展了相关的试验研究<sup>[9-11]</sup>。

为了检验三维地震勘探方法在城市工程勘察中的应用效果,尹喜玲在学校、公园和公路的实验场地进行了三维地震勘探方法应用试验<sup>[12]</sup>,通过大量的处理参数实验以及模块选择实验,获得了一套适用于该工区浅层数据的处理流程和参数,表明了浅层三维地震技术也可为城市地下空间探查、地质灾害勘查等提供更高质量的数据。夏训银等结合工程实例,介绍了三维地震在城市活断层探测中的应用<sup>[8]</sup>。刘影等回顾了城市活断层探测现状,从理论上分析了三维地震勘探的优势,认为三维地震勘探可以较好地解决由于二维地震勘探本身的技术缺陷和地表环境、地质条件影响所造成的断层定位不准的问题<sup>[7]</sup>。通过实例剖析,论证了利用三维地震探测在城市进行活断层精确定位中的可行性及其意义。

国外,浅层三维地震在冰川沉积层、浅部断裂、古河道、含水层以及喀斯特地区地面沉降方面的调查中得到较好的应用效果<sup>[13-21]</sup>。Bachrach 等设计了一套完整的高分辨率浅层地震反射系统,甚至可

收稿日期: 2021-01-13; 修回日期: 2021-06-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFE0208300)、中国地质科学院基本科研业务费专项经费资助(JYYWF20180303)和物化探所中央财政科研项目结余资金项目(JY202108)

第一作者: 雍凡(1984-),男,2009年毕业于中国地质大学(武汉),主要从事地震勘探工作。Email: yfan@mail.cgs.gov.cn

以仅用一台便携计算机实现质量控制和实时三维成像<sup>[22-26]</sup>。但在城区环境开展浅层三维地震的报道较为少见。

通过文献调研和对实际采集的地震数据分析表明,在城市中开展三维地震工作存在着以下几个突出的问题:

1) 城市地震勘探中,虽然通常地形起伏不太大,但是浅表层由于地质结构和人为活动的影响存在着表层速度分布不均匀的现象,导致地震记录上反射波不连续出现较为明显的抖动现象。

2) 在城市三维地震勘探中,面临着更多的环境噪声,如车辆行驶、厂矿生产以及人们的日常生活活动都会造成相当的环境噪声。甄别和消除这些噪声对地震资料处理的品质尤为重要。

3) 由于城市地震勘探障碍物多,不能埋置检波器,不能激发的勘探点非常多,造成了较多的空道和空炮。并且由于受城市施工环境的限制,炮点分布极不均匀,存在大量空炮的区域,导致覆盖次数相应地也十分不均匀。

针对上述问题,必须在资料处理中采用相应的处理手段,才能消除影响提高成像质量。在常规地震资料处理流程上,本文以实际三维地震资料为例,针对城市三维地震特殊环境,采用了层析静校正、叠前多方法组合去噪、叠前数据规则化插值和精细动校拉伸切等技术手段对城市三维地震资料进行处理,提高了浅层成像质量。

## 1 数据采集与基本处理流程

### 1.1 数据采集

勘探区域位于北方某城市建成区域内,面积共约 3 km<sup>2</sup>。工区内居民区、学校和工厂分布密集,对施工安全要求非常高,不适合采用炸药震源,因此采

用了两台大功率可控震源。震源参数如下:2 台 28 t 可控震源同时激发;扫描长度 12 s;扫描频率范围为 10~120 Hz;扫描方式选择线性扫描;垂直叠加次数为 2 次。采用观测系统参数如下:面元大小为 5 m×10 m;道间距 10 m;覆盖次数为 4×6;单线接收道数 96 道;炮点距 20 m;接收线距 60 m;炮线距 80 m;最大炮检距 1 046.95 m;激发方式为端点激发;束线重复接收线 4 条。

### 1.2 数据处理基本流程和主要处理参数

本次处理主要包括了预处理、静校正、叠前去噪、振幅恢复、反褶积、速度分析、叠前插值、叠加和偏移等主要处理步骤,具体处理流程和处理参数分别如图 1 和表 1 所示。

## 2 浅层成像的关键技术

### 2.1 层析静校正

城市地震勘探中,虽然通常地形起伏不太大,但是浅表层由于地质结构和人为活动的影响存在着表层速度分布不均匀的现象,导致地震记录上反射波不连续出现较为明显的抖动现象。静校正对原始地震数据要进行地形校正、激发深度校正、低速带校正消除浅地表结构速度的变化以及高程变化对同相轴的影响。

本次地震资料处理中采用了折射层析静校正,该方法是 Osypov 于 1999 年提出的,首先利用初至旅行时进行视速度和延迟时的估计,然后利用 Herglotz-Wiechert 公式进行速度模型估计,进而实现静校正量的计算。这种方法采用非显式的射线追踪反演求解近地表模型,能利用所有的偏移距信息,它既有首波作为初至波反演的优点(不需要初始模型或射线追踪),又有回转波反演的灵活性,具有较强的适用性。

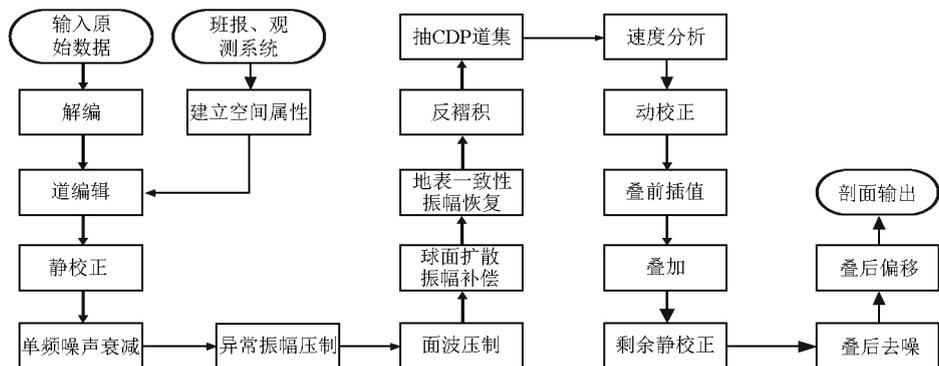


图 1 处理流程

Fig. 1 Data processing flow

表 1 主要处理参数  
Table 1 Key processing parameters

处理流程	主要参数
三维网格定义	面元大小:5 m×10 m
层析静校正	最终基准面高程为 100 m; 替换速度为 2 000 m/s; 直达波偏移距范围 0~50 m; 折射波最小偏移距为 200 m, 最大偏移距由程序自动计算; 反演层数 5 层
滤波	叠前采用低截频率为 15 Hz, 高截为 120 Hz 的带通滤波参数; 叠后采用 25~100 Hz 的带通滤波
单频噪声衰减	噪声频率 50 Hz, 回馈增益 0.05, 压制第一、第二谐波
异常振幅衰减	处理窗口长度 300 ms; 窗口重叠 30%; 最小处理频率 0 Hz; 最大处理频率 200 Hz; 处理频带宽度 3 Hz; 空间中值滤波宽度 35 道; 最大插值半径 3 道; 中值压制百分比 10%
球面补偿	初至速度 1 500 m/s
预测反褶积	预测步长 8 ms; 算子长度 180 ms
动校拉伸切除	拉伸切除因子: 1.2; 最小切除偏移距: 100 m
叠前插值	主方向辛格函数长度 5; 副方向辛格函数长度 5; 辛格频率平滑因子 1.0
叠后时间偏移	方法: 相移偏移; 偏移速度: 0.55 叠加速度

层析静校正方法消除了由于浅地表结构速度的变化以及高程变化造成的同相轴抖动的现象。经过静校正后的地震原始记录明显改善, 初至变得非常光滑, 原本辨认不清的反射波同相轴也变得显而易见。静校正叠加剖面中, 同向轴变得光滑连续, 数据的相关性得到加强, 证明静校正方法和参数选择合理, 应用效果理想(图 2)。

### 2.2 叠前多域联合去噪

在城市三维地震勘探中, 面临着更多的环境噪声, 如车辆行驶、厂矿生产以及人们的日常生活活动都会造成相当的环境噪声。图 3 为实际采集数据单炮记录中的一部分, 可见面波等规则干扰以及 50 Hz 工业电和车辆通行形成的干扰。甄别和消除这些噪声对地震资料处理的品质尤为重要, 噪声的特征不同, 相应的去噪方法也就不同。

各种工业电干扰严重, 记录上表现为自上而下频率单一的周期性强振幅干扰。经过分析, 工区范围内主要的单频干扰频率有 35 Hz 和 50 Hz 两种, 而有效波的频率范围为 20~60 Hz, 如果对全区进行统

一的单频陷波处理, 势必将部分有用信号也去除了。为了尽可能地保留有用信号, 仅在受单频噪声干扰的地震道运用单频滤波的方法是一种有效的处理手段。本次处理中, 先设计了一个从零到初至时间的时窗, 该时窗内实际包含的都是背景噪声。然后计算该时窗内每一地震道的主频, 再根据主频的大小, 分选出受单频噪声干扰的地震道进行单频噪声的压制。最后再将滤波处理完的地震道与其他地震道合并, 从而达到精准滤波的目的, 最大限度地保留有用信号。

野外地震数据采集时, 同时穿过多个村庄和厂区, 沿线车流量大, 外界随机噪声干扰严重。这些随机噪声是非相干的且频带丰富, 常规的频率滤波、视速度滤波难以使其衰减, 而高能压噪处理技术正是消除随机噪声的有效手段。采用的高能压噪处理技术在炮集记录上以道数和时间段为边界设置窗口, 对窗口内所有的波形进行能量均衡, 衰减局部强振幅能量团, 去除随机噪声的干扰。

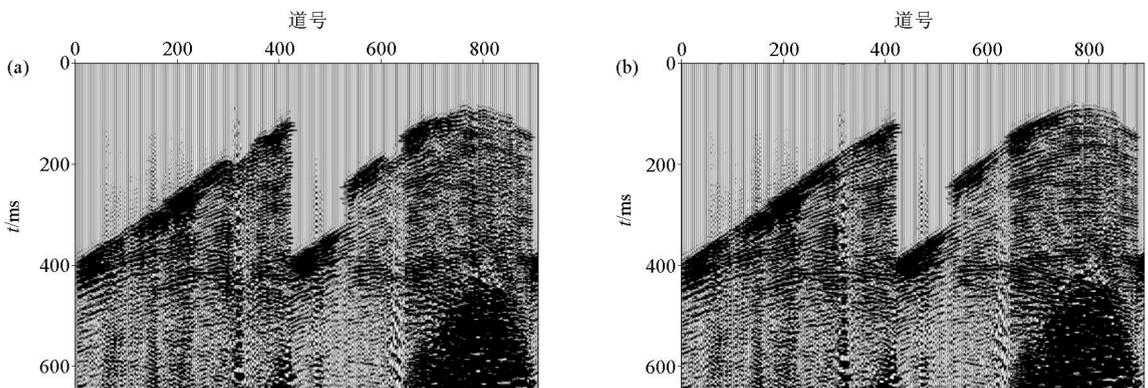


图 2 炮集静校正前(a)后(b)对比

Fig. 2 Comparison of shot gather between before(a) and after(b) static correction

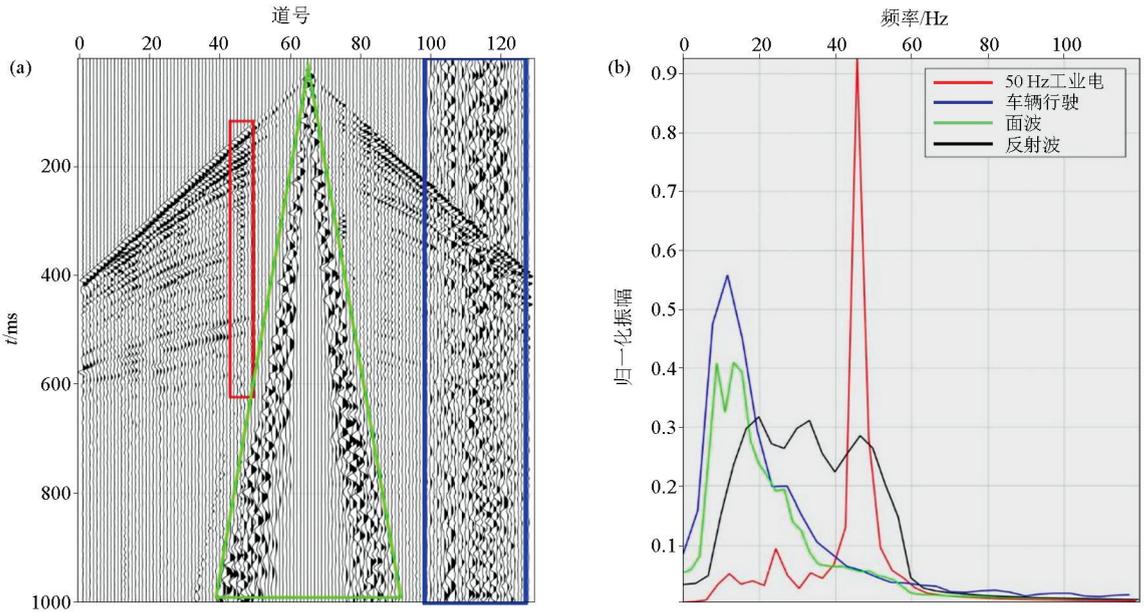


图 3 单炮记录上的噪声 (a) 和对应的频谱 (b)

Fig. 3 Noise on shot gather (a) and their frequency spectrum (b)

频率分析表明该区域内面波的频率主要集中在 0~20 Hz, 但 20~40 Hz 范围内面波的能量依然很强。简单的带通滤波不能有效地压制面波干扰。因此,本次处理采用了基于振幅能量统计原理的区域异常噪声衰减法对面波进行压制。首先在面波频带内拾取异常振幅信息,然后在有效波频带范围内拾取进行分解。对上述拾取和分解的结果在应用时进行带通滤波,输入地震数据的低频成分,即可得到面波频带,也就是低频成分的有效信号。然后从地震

数据中将得到的低频有效信号减去,也就得到了纯面波干扰。理论上,该信号包含面波和面波频带内的异常噪声,其能量的大小与地震数据有关。最后从原始输入地震数据中,将滤波得到的纯面波干扰减去,就得到滤波后的有效信号。

通过单频噪声压制、异常振幅衰减和面波压制这 3 种方法联合对叠前数据进行去噪处理,从处理前后的地震记录(图 4)对比可以看到,单频噪声和车辆行驶等环境噪声基本消除,面波得到了有效压制。

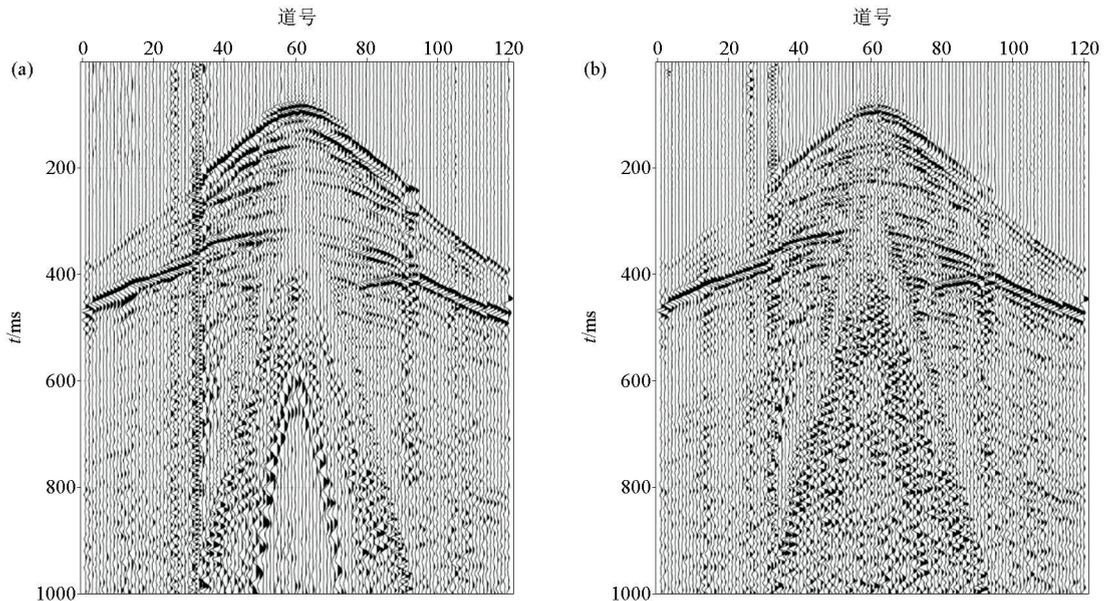


图 4 叠前去噪前 (a) 后 (b) 炮记录对比

Fig. 4 Comparison between before (a) and after (b) denoise on shot gather

### 2.3 叠前插值与规则化

由于城市地震勘探障碍物多,不能埋置检波器,不能激发的勘探点非常多,造成了较多的空道和空炮,影响了数据质量,并给后续处理带来困难(图5)。并且由于受城市施工环境的限制,炮点分布极不均匀,存在大量空炮的区域,导致覆盖次数相应地也十分不均匀(图6)。此外,浅层地震数据的最大有效偏移距小且分布不均匀,时间切片上容易出现采集脚印。

本次处理采用频率—空间域叠前数据规则化处理方法,将空间上不规则的样点插值成规则均匀样点,在一定范围内补全缺失的地震道,消除因地震资料空间采样不规则对成像效果造成的影响。频率—空间域叠前数据规则化方法利用加权法对叠前道集进行规则化处理,通过最小中值平方差,用加权法估

计差值误差。插值距离(即输入道与插值道之间距离)和参与插值的输入道个数是两个重要的数据质量控制参数。最大插值距离越大,参与插值的道数越多,插值信噪比越高,但平均效应越大,会降低浅层信号的分辨率。因此最大插值距离的选择应该兼顾信噪比和分辨率。在给定最大插值距离的情况下,由于浅层数据的缺失不规则,有的插值道的输入道数量会很少,过少的输入道会导致插值道信噪比低。为保证插值后的数据质量,通过统计参与插值的输入道的数量,把输入道过少的插值道舍弃。

图7为插值规则化前后三维叠加数据体时间切片对比。插值前的时间切片上,条带状的采集脚印十分明显,严重切割了有效信号。另外由于障碍物的影响,在浅层时间切片上存在着明显的空洞。插值之后的时间切片上,采集脚印几乎全部消失,由于数据缺失产生的空洞也得到一定的弥补。

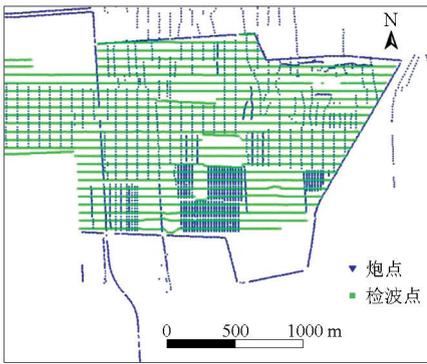


图5 检波点和炮点布置

Fig. 5 Layout of receivers and shot points

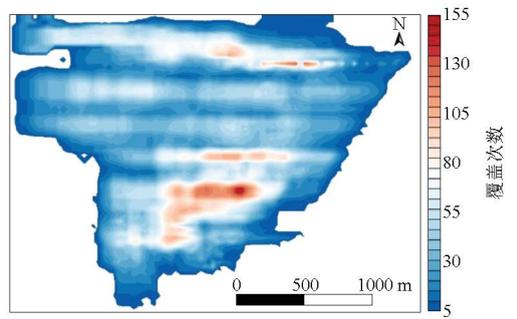


图6 覆盖次数

Fig. 6 CMP fold

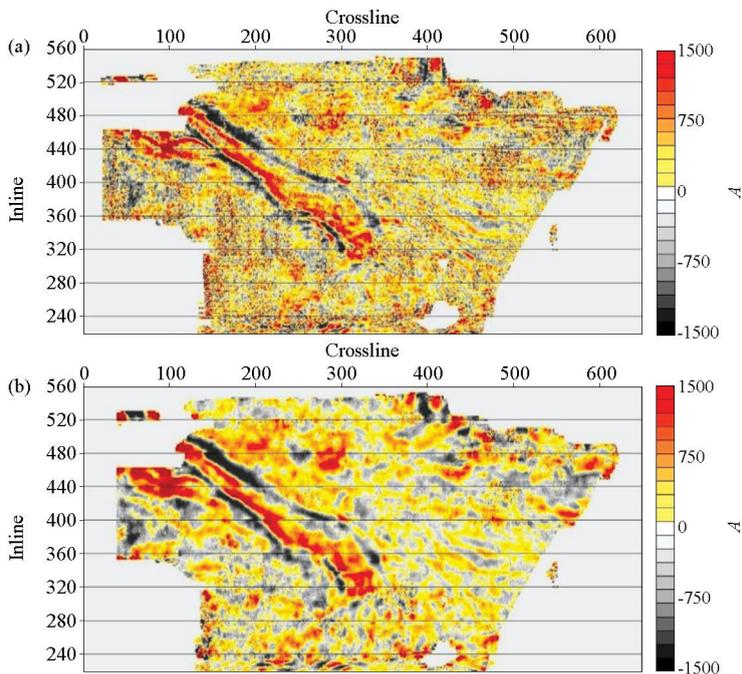


图7 插值前(a)后(b)叠加数据时间切片对比

Fig. 7 Comparison of time slice between before (a) and after (b) interpolation

从叠后时间剖面对比(图 8)上可以看到,插值后的地震剖面浅层同相轴变得连续自然、振幅均衡,浅部的部分数据缺口得以补充,有效消除了野外采集数据不规则对成像造成的影响,改善了浅部地层的成像质量。

### 2.4 动校拉伸切除

动校正是地震资料处理的重要内容之一,是实现高分辨率水平叠加的基础。但是动校正拉伸使得道集中反射波波形发生畸变,具体表现为波形拉长,频率向低频方向移动。目前在地震数据处理中常用的克服动校正拉伸的方法是将拉伸比严重的区域进行切除。动校正拉伸畸变具有不同的分布规律,浅层和大炮检距情况下,拉伸畸变大,因而浅层多被切除,所以当目的层位于深层时,切除方法是可取的。但当目的层较浅的情况下,切除会使得浅层的覆盖次数降低,能量变弱,影响浅层成像效果。因此对于城市三维地震,为了尽可能多地保留浅层覆盖次数,必须对动校拉伸切除方法和参数进行谨慎的选择,避免有用信号被切除。本次研究首先通过测试,选

取了合适的拉伸切除因子和最小切除偏移距,对大偏移距和深层数据校正拉伸变形进行了初步切除,然后通过手工拾取的方式定义了全区空变的切除参数,对小偏移距和浅层数据进行精细动校拉伸切除。

地震数据动校后会出现波形拉长的畸变,通常通过设置一个拉伸切除因子使得当波形形变超过这个阈值后的地震道数据被切除。在动校正之中,浅层和大偏移距拉伸畸变最为严重。通过选取最小切除偏移,即小于该偏移距的地震道即使动校拉伸变形超过了拉伸变形切除因子也不进行切除,可以保护浅层小偏移距的数据不被切除,而深部大偏移距的数据不受影响。如果选取的最小偏移距过小时,浅层数据丢失的较多,剖面出现了明显的缺口。但随着最小切除偏移距的增大,剖面上由于动校拉伸变形产生的低频信息逐渐凸显,拉伸变形的痕迹在剖面上变得非常明显,降低了剖面的分辨率,破坏了同相轴的连续性。因此通过测试选取合适最小切除偏移,达到保护浅层信息。

实践证明,采用手工切除动校拉伸是保证浅层

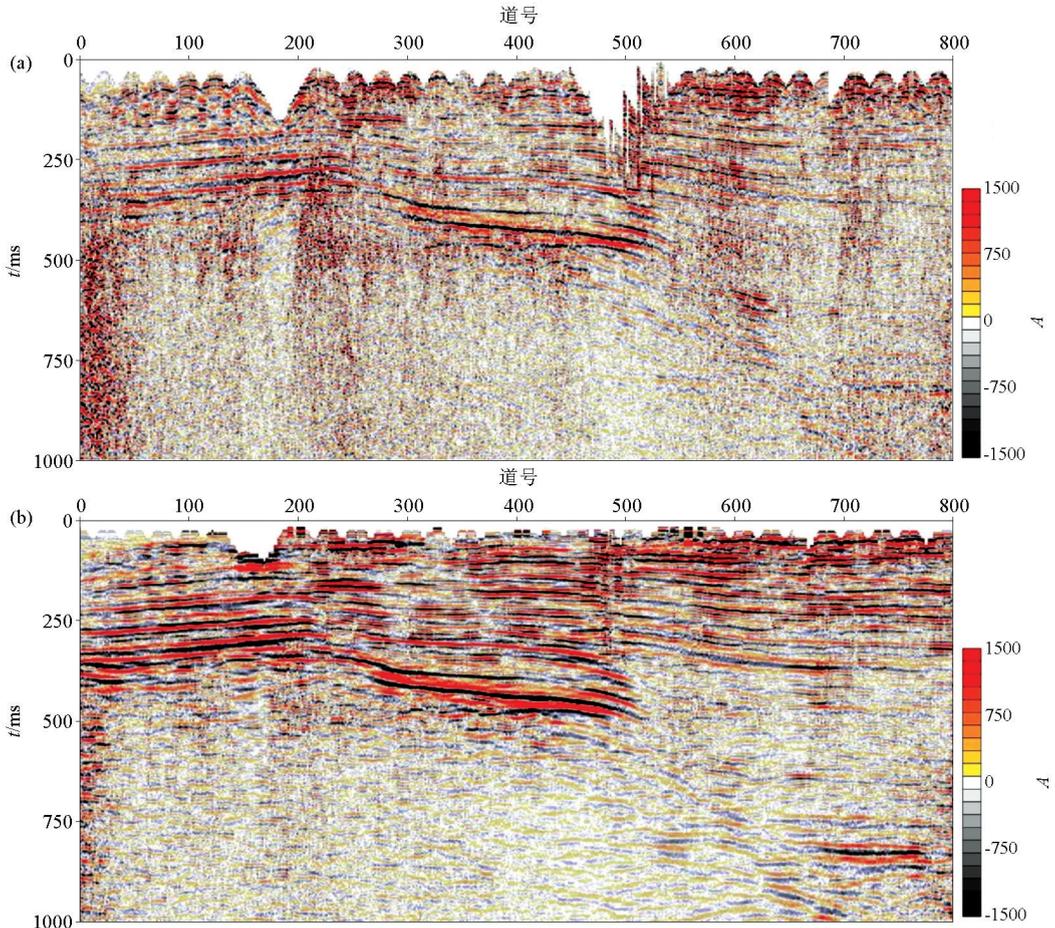


图 8 插值前(a)后(b)叠加剖面对比

Fig. 8 Comparison of time stack profile between before (a) and after (b) interpolation

覆盖次数,提高浅层资料信噪比的有效手段。通过应用前文所述的带有偏移距保护的动校拉伸切除之后,偏移距大于 100 m 动校拉伸畸变基本已被完全清除。而为了保留浅层信息,偏移距小于 100 m 的地震道中仍然包含有拉伸畸变,降低了剖面分辨率。针对这部分地震道集,采用人工拾取的方法对浅部拉伸变形进行精细的切除,最大限度地保留浅层覆盖次数。首先参考速度分析设置,在全区均匀选择部分 CMP 点,对这些参考 CMP 点应用无切除的动

校正。然后在动校之后的 CMP 道集上手工拾取切除点,再以插值的方法建立全区空变的拉伸切除参数,最后按照建立好的切除模型对地震道进行切除。

对比精细动校拉伸切除与常规动校拉伸切除的时间叠加剖面后可以看出(图 9),本文采用的精细动校拉伸切除后浅层拉伸变形基本得到消除,较好地保留了浅层的反射信息(100 ms 以上),有利于最浅层成像。

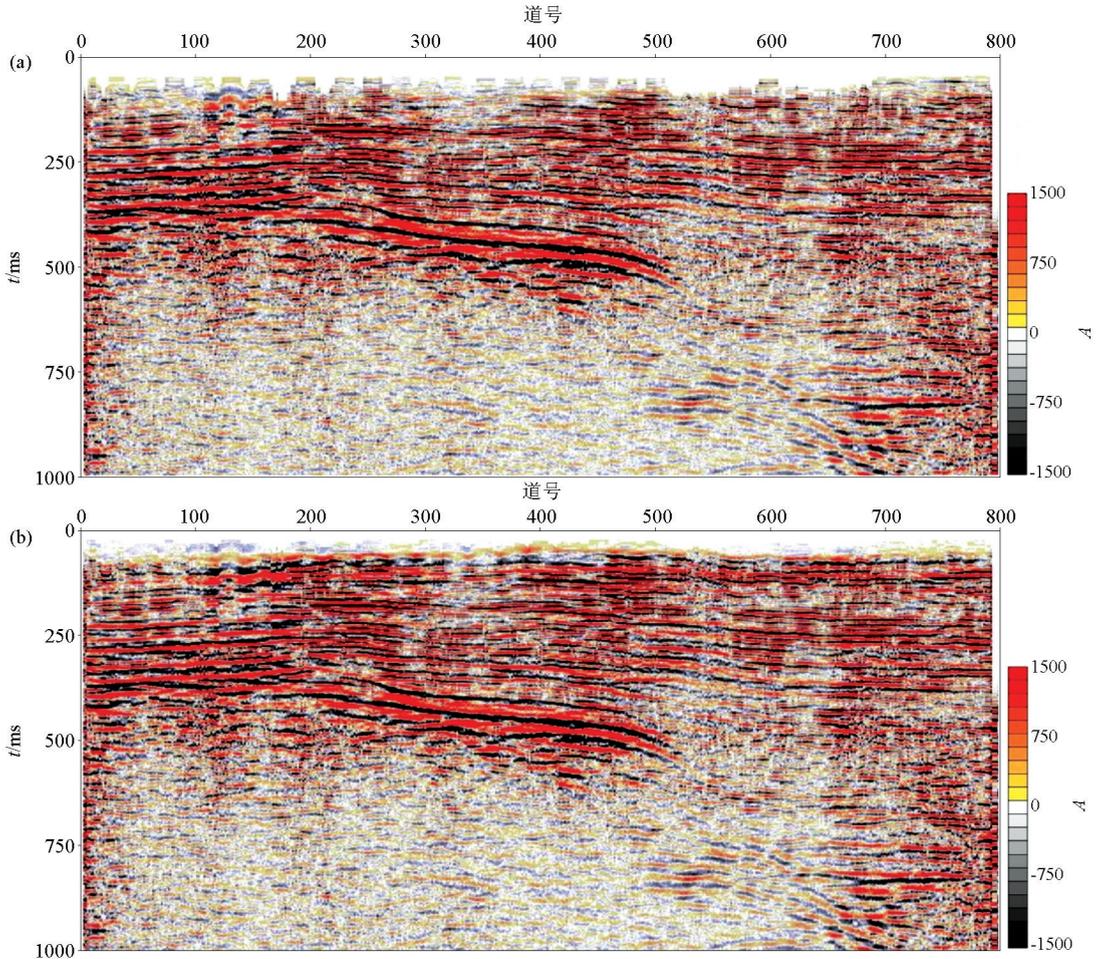


图 9 常规处理动校拉伸切除 (a) 与浅层保护处理动校拉伸切除 (b) 结果对比

Fig. 9 Comparison of the moveout stretching correction results between conventional processing (a) and shallow-protect processing (b)

### 3 结论

本文针对城市三维地震资料处理中浅层成像面临的几个关键问题,分别采用了合理的处理手段,得到了良好的处理效果。

1) 采取了层析静校正方法消除了由于浅地表结构速度的变化以及高程变化造成的同相轴抖动的现象。

2) 采用单频噪声压制、异常振幅衰减和面波压制 3 种去噪方法,对叠前数据进行了去噪处理,取得了较好的处理效果。

3) 采用了频率—空间域叠前数据规则化处理方法,将空间上不规则的样点插值成规则均匀样点,在一定范围内补全缺失的地震道,消除因地震资料空间采样不规则对成像效果造成的影响。

4) 选取了拉伸变形切除因子和最小切除偏移距来保护浅层覆盖次数,同时采用手工精细切除的

方法,尽可能多地保护浅层数据。切除后浅层的拉伸变形基本得到消除,也较好地保留了浅层的反射信息,有利于最浅层成像。

## 参考文献 (References):

- [1] 徐建宇. 地震方法在城市浅覆盖区活断层调查中的应用[J]. 物探与化探, 2016, 40(6): 1103 - 1107.  
Xu J Y. The application of seismic method to the investigation of active faults in urban shallow Quaternary sediment area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(6): 1103 - 1107.
- [2] 张保卫, 沈鸿雁. 三分量地震散射波成像在天津蓟县城市活断层探测中的应用[J]. 物探与化探, 2014, 38(3): 504 - 509.  
Zhang B W, Shen H Y. The application of three-component scattering wave seismic imaging in detecting city active fault in Ji district, Tianjin city [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(3): 504 - 509.
- [3] 邓起东, 徐锡伟, 张先康, 等. 城市活动断裂探测的方法和技术[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 94 - 104.  
Deng Q D, Xu X W, Zhang X K, et al. Method and techniques for surveying and prospecting active faults in urban areas [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(1): 94 - 104.
- [4] 柴铭涛, 高景华. 城市活断层探测中的反射地震数据采集和处理技术[J]. 物探与化探, 2007, 31(4): 365 - 369.  
Chai M T, Gao J H. Seismic data collection and processing in the active fault detection of urban areas [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31(4): 365 - 369.
- [5] 雍凡, 蒋正中, 罗水余, 等. 夏垫断裂北段浅部构造的高分辨率地震反射勘探研究[J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(6): 832 - 836.  
Yong F, Jiang Z Z, Luo S Y, et al. The seismic reflection study on high-resolution profile of shallow structure in North Part of Xiadian Fault [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2014, 11(6): 832 - 836.
- [6] 李颜贵, 蒋正中, 刘子龙, 等. 地震纵波横波联合勘探方法寻找近地表第四系内隐伏断裂方法研究[J]. 物探化探计算技术, 2014, 36(6): 692 - 699.  
Li Y G, Jiang Z Z, Liu Z L, et al. Joint P-wave and S-wave seismic reflection to investigate the quaternary blind fault near surface [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 36(6): 692 - 699.
- [7] 刘影, 沈月霞, 牛小军. 三维地震勘探在城市活断层精确定位中的意义[J]. 地震学报, 2012, 34(1): 97 - 104.  
Liu Y, Shen Y X, Niu X J. Significance of 3D seismic exploration in urban active fault fine locating [J]. Acta Seismologica Sinica, 2012, 34(1): 97 - 104.
- [8] 夏训银, 左万宝, 张进国, 等. 三维地震在城市活断层探测中的应用[J]. 勘察科学技术, 2010(1): 58 - 61.  
Xia X Y, Zuo W B, Zhang J G, et al. Application of three-dimensional seismic method in urban active fault detection [J]. Site Investigation Science and Technology, 2010(1): 58 - 61.
- [9] 王瑞芳, 吕进英. 城镇覆盖区野外三维地震勘探方法及效果[J]. 安徽地质, 2008, 18(3): 210 - 211.  
Wang R F, Lyu J Y. Field three-dimension seismic exploration method and result for city cover area [J]. Geology of Anhui, 2008, 18(3): 210 - 211.
- [10] 张光德, 丁伟, 胡立新, 等. 城区三维地震观测系统设计与应用效果[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(2): 129 - 132.  
Zhang G D, Ding W, Hu L X, et al. Design of 3-D seismic geometry in urban area and applied effects [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41(2): 129 - 132.
- [11] 周曲曼, 江宏, 姚一林, 等. JH 城区三维地震勘探方法探讨[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(5): 588 - 593.  
Zhou Q M, Jiang H, Yao Y L, et al. Three-dimensional seismic exploration method in JH city [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2011, 8(5): 588 - 593.
- [12] 尹喜玲. 城市浅层三维地震勘探方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.  
Yin X L. Study on shallow 3-d seismic survey in urban engineering investigation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [13] Heggland R, Nygaard E, Gallagher J W, et al. Techniques and experiences using exploration 3D seismic data to map drilling hazards [C]//Houston Texas; the Offshore Technology Conference, 1996.
- [14] McConnell D R, Others. Optimizing deepwater well locations to reduce the risk of shallow-water-flow using high-resolution 2D and 3D seismic data [C]//Houston Texas; the Offshore Technology Conference, 2000.
- [15] Posamentier H W. Seismic geomorphology: Imaging elements of depositional systems from shelf to deep basin using 3D seismic data: Implications for exploration and development [J]. Geological Society London Memoirs, 2004, 29(1): 11 - 24.
- [16] Trude K J. Kinematic indicators for shallow level Igneous Intrusions from 3D Seismic Data: Evidence of Flow Direction and Feeder Location [J]. Geological Society London Memoirs, 2004, 29(1): 209 - 218.
- [17] Schmelzbach C, Horstmeyer H, Juhlin C. Shallow 3D seismic-reflection imaging of fracture zones in crystalline rock [J]. Geophysics, 2007, 72(6): B149 - B160.
- [18] Milkereit B, Berrer E K, King A R, et al. Development of 3-D seismic exploration technology for deep nickel-copper deposits—A case history from the Sudbury basin, Canada [J]. Geophysics, 2000, 65(6): 1890 - 1899.
- [19] Malehmir A, Bellefleur G. 3D seismic reflection imaging of volcanic-hosted massive sulfide deposits: Insights from reprocessing Halfmile Lake data, New Brunswick, Canada [J]. Geophysics, 2009, 74(6): B209 - B219.
- [20] Buker F, Green A G, Horstmeyer H. 3-D high-resolution reflection seismic imaging of unconsolidated glacial and glaciolacustrine sediments; Processing and interpretation [J]. Geophysics, 2000, 65(1): 18 - 34.
- [21] Davies T A, Austin J A. High-resolution 3D seismic reflection and coring techniques applied to late Quaternary deposits on the New Jersey shelf [J]. Marine Geology, 1997, 143(1): 137 - 149.
- [22] Bachrach R, Mukerji T. Fast 3D ultra shallow seismic reflection imaging using portable geophone mount [J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(1): 45 - 48.

- [23] Bachrach R, Dvorkin J, Nur A M. Seismic velocities and Poisson's ratio of shallow unconsolidated sands [J]. *Geophysics*, 2000, 65 (2): 559 - 564.
- [24] Bachrach R, Mukerji T. Portable dense geophone array for shallow and very shallow 3D seismic reflection surveying; Part 1-Data acquisition, quality control, and processing [J]. *Geophysics*, 2004, 69 (6): 1443 - 1455.
- [25] Bachrach R, Dvorkin J, Nur A. High-resolution shallow-seismic experiments in sand, Part II: Velocities in shallow unconsolidated sand [J]. *Geophysics*, 1998, 63(4): 1234 - 1240.
- [26] Bachrach R, Nur A. High-resolution shallow-seismic experiments in sand, Part I: Water table, fluid flow, and saturation [J]. *Geophysics*, 1998, 63(4): 1225 - 1233.

## The key technology of shallow imaging in urban 3D seismic data processing

YONG Fan<sup>1,2</sup>, LIU Zi-Long<sup>2</sup>, JIANG Zheng-Zhong<sup>2</sup>, LUO Shui-Yu<sup>2</sup>, LIU Jian-Sheng<sup>2</sup>

(1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China)

**Abstract:** The shallow 3D seismic reflection exploration has a large amount of data, accurate migration, and high lateral resolution. It can overcome some difficulties of the 2D seismic exploration in the city caused by the obstacles, such as obliquely intersection of the survey line with the structural strike, poor shallow structure detecting, and inaccurate fault locating. Therefore, shallow 3D seismic exploration can provide higher-quality data for urban underground space exploration, active fault detection, and geological disaster prospecting. However, urban 3D seismic exploration faces some challenges of shallow imaging, such as inhomogeneity of surface velocity, strong environmental noise, and uneven distribution of shot points caused by obstacles. To improve shallow imaging, tomographic static correction, pre-stack multi-method combination denoising, regularized interpolation of pre-stack data, and combined normal moveout strength cutting. The result shows our processing can improve the quality of shallow imaging of 3D seismic data.

**Key words:** urban underground space exploration; 3D seismic exploration; data processing; shallow imaging

(本文编辑:叶佩)