

中国东部深层地震资料处理新技术研究

徐基祥 崔化娟

(中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘 要 东部深层是中国油气资源主要勘探目标之一,具有巨大的潜力。面对深层信号弱、信噪比低、波场复杂等难点,开展了深层信号增强技术和深层目标成像技术的攻关,形成了一系列深层地震资料处理新技术,在深层古潜山成像应用中见到了明显的效果。得到了清晰的奥陶系顶面及其内幕的成像,可用于构造评价和储层预测。

关键词 中国东部深层 地震资料处理 奥陶系潜山 潜山内幕 信号增强 目标成像

New Methods for Processing Seismic Data of Deep-Seated Strata in Eastern China

XU Jixiang CUI Huajuan

(China Institute of Petroleum Exploration and Development , Beijing , 100083)

Abstract One of the exploration objects is the exploration of the eastern deep area of China. There are enormous potential oil and gas resources in the deep area. The explorative difficulty lies in such bad quality seismic data as weak signals, low signal-to-noise ratios and complex seismic waves. For the purpose of solving the key problem, some new methods are put forward to strengthen weak signal and to refine object imaging in the deep area. Obvious effects have appeared in the application of these new methods to imaging the deep old hide hill. Clear sections of the Ordovician hilltop and the low-down of the hide hill are obtained. These sections are useful to structure evaluating and reservoir forecasting.

Key words deep strata in eastern China seismic data processing Ordovician hide hill low-down of the hide hill signal strengthening object imaging

东部深层是中国油气资源主要勘探目标之一,具有巨大的潜力,尤其是 1998 年大港油田在千米桥深层潜山取得突破性进展(获亿吨储量),东部深层已成为稳定油气产量的重要勘探目标。然而,由于地震勘探目标体埋藏较深,受深层地震地质条件和大地滤波吸收衰减作用的影响,野外原始资料深层有效波的能量较弱、干扰强、信噪比低;另外,深层构造复杂、地层倾角大、断面波、绕射波发育,使得速度纵横向变化大,给速度分析和叠加偏移成像带来极大困难(李庆忠,1993;伊尔马兹,1994)。

增强深层有效反射波信号、压制干扰波、改善深层地震资料信噪比、提高速度场精度、加强中深层复杂构造的成像质量是东部深层地震勘探取得突破性进展的关键技术(徐基祥等,2000)。处理技术攻关的目的是为了探索东部深层奥陶系顶面及其内幕反

射波地震资料处理方法,为深层油气勘探提供可用于构造评价和储层预测的地震剖面。

1 东部深层特点

1.1 东部深层地质特点

中国东部深层泛指松辽盆地泉二段以下、渤海湾盆地第三系以下的地层。一般埋深都在 3 500 m 以下,而其油气资源却具有巨大潜力,其中石油资源量为 78×10^8 t,天然气资源量为 $25\ 500 \times 10^8$ m³。在松辽盆地深层石油资源量为 28×10^8 t,天然气资源量为 $18\ 000 \times 10^8$ m³;在渤海湾盆地深层石油资源量为 50×10^8 t,天然气资源量为 $7\ 500 \times 10^8$ m³。

地质综合研究指出,东部深层油气勘探存在 4 个勘探领域:①生油凹陷内的深层背斜带;②盐下深层断裂背斜带;③深凹陷内部深层挤压背斜带;④深

凹陷内部浊积岩体油气富集区。所要寻找的具体目标是潜山披覆背斜、浊积砂体以及深层盐下和高压层下的各类隐蔽圈闭。因此埋藏深、地质复杂、纵横向速度变化大和隐蔽性强是东部深层油气勘探目标的基本地质特点。

1.2 东部深层地震资料特点

东部深层油气勘探目标的基本地质特点决定了东部深层地震资料的特点。

(1) 有效信号弱: 由于上覆地层的压实作用, 深部地层速度随深度增大而增大, 并且不同岩性间速度之差随深度增大而变小, 因此深层反射系数较小。另外在地震勘探中, 震源激发的地震波是球面波, 球面扩散作用造成深层介质中的地震波能量大幅度降低。

(2) 主频低: 大地吸收作用使得较高频率地震波信息逐步衰减, 使得深层资料的主频向低频漂移。一般深层资料的主频为 10 Hz 左右。

(3) 信噪比低: 受环境噪声和随机噪声的影响, 微弱的深层有效信号常常湮没在噪声中。主要噪声有强能量的声波、猝发脉冲、簇状噪声和高能干扰。

(4) 波场复杂: 地震波经过中浅地层中的传播, 再反射到地表, 所经过的路径已很难用水平层状介质中的规律来描述。从波动角度来看, 随着深度的增加, 第一费涅尔带也增大, 绕射面愈大, 以至各种绕射互相影响, 使得深层波场愈加复杂。

(5) 分辨率低: 深层资料的主频低, 垂向分辨率与中浅层相比变低。若人为地补偿频率过高, 势必增加噪声, 影响构造的成像。另外受费涅尔带的影响, 深层横向分辨率也会有所下降(徐基祥等, 2001)。

2 地震资料处理新方法

根据东部深层地震资料特点, 最突出的难题是深层反射资料信噪比普遍很低和深层构造成像不清楚。以这两大难题作为攻关突破口, 开展深层信号增强技术和深层目标成像技术研究。

2.1 深层信号增强技术

由于大地吸收作用、球面扩散作用以及上覆地层的反射, 地震波传到深层的能量已非常微弱, 高频信号也几乎衰退殆尽, 而在地表接收时所用的仪器动态范围小, 为了压制面波又用低频截止, 使得深层反射信号的低频又受到损失。这样深层信号的能量级别往往低于由地表所引起的随机噪声的能量级

别。另外, 受面波等相干噪声的干扰, 深层反射信号被湮没的情况常常很严重。因此, 将深层弱信号能量释放出来是十分困难的。这个问题是开展深层勘探的关键难点。

目前, 根据有效信号相干性所设计的信号增强方法有很多, 如相干加强、频谱展宽法、频率空间域预测滤波、多项式拟合、径向滤波等。其实, 水平叠加技术就是一种非常有效的信号增强方法。但其有效性主要受到 3 个条件的限制: 地下地层倾角不大、地层层速度横向变化不太剧烈、叠加速度要准。

当地下地层倾角较陡、而速度变化不太剧烈时, 可以采用 DMO 技术或叠前时间偏移技术。当地下介质速度横向变化较大时, 应该用叠前或叠后深度偏移技术。但是, 这些技术与水平叠加技术都有一个影响资料质量的关键因素: 成败与否取决于相应的速度是否正确。尤其是叠前深度偏移, 对速度的精度要求相当高。由此可见, 速度问题是关键。而影响速度精确提取的主要因素就是叠前数据的信噪比。涉及到所设计的信号增强问题。所以信号增强技术应该在叠前道集上应用, 这样可以提高速度提取的精度, 利用求准的速度场进而发挥信号增强的目的。

前面提及的数种信号增强技术在研制时都以叠后数据为考虑对象, 大部分技术只适应单值情况。比如相干加强、多项式拟合、径向滤波等在空间某点只加强一个优势相干信号, 对其他数据不管是相干信号或是随机干扰均予以压制。频率波数域升幂法则是一种多值相干信号增强技术。而有效信号在叠前域经常出现相交现象。如倾斜地层与平层之间、绕射波与反射波之间、低速层反射与下覆高速层反射之间均会出现有效反射波之间的相交情况。因此, 在叠前域采用频率波数域升幂法信号增强方法比较合适。该方法一般在频谱展宽法之后应用更有效。

针对叠前信号增强技术, 研制了叠前频率波数域频谱升幂法和频谱展宽法。

2.1.1 叠前频率波数域频谱升幂法信号增强技术

频率波数域频谱升幂法信号增强技术是较常用的一种叠后信号增强技术。它能较好地保持原始信号特征, 而对随机噪声有较强的压制作用, 比较适合于叠前信号增强处理。为此专门研制了叠前频率波数域频谱升幂法信号增强处理模块。

实现步骤如下 :将多道、时变窗口内的数据变换到频率波数域 ,对频率波数域每个样点振幅值升幂 ,而相位谱保持不变 ,在将升幂后的信号反变换到时空域。从而完成了该窗口内信号升幂工作。再分别沿时间、空间方向滑动半个窗口 ,重复以上实现步骤。最后对窗口内数据进行斜坡加权 ,就可获得整个道集的升幂信号增强结果。

当频率波数域数据的幂升高到大于 1 时 ,在频率波数空间较强且较集中的能量就会变得更强 ,随机噪声的幅值相对变低。所以该过程增强了信号的连续性 ,提高了线性地震能量。

因为线性同相轴比弯曲同相轴映射到频率波数域时能量更集中 ,所以升幂法对弯曲同相轴加强较差 ,而对平层和斜层反射信号增强明显。因此 ,为了增强弯曲同相轴信号 ,应减少窗口的空间道数。当然 ,这势必增加计量。在应用中可对不同的时间、空间窗口进行试验^①。

升幂法在实施过程中 ,把零频率和 Niquist 频率处的振幅设置为零 ,这等于对数据应用了一个非常宽的带通滤波。对于很短的时间窗口 ,这种滤波影响很大 ,所以不要用太短的时间窗口。

2.1.2 频谱展宽法高频恢复技术 为了恢复深层被损失的高频信号 ,对道集应用一个零相位反褶积算子 ,保持其相位不变 ,仅修改其振幅谱 ,增加期望恢复的频档内的能量。实施中采用分频进行。具体步骤如下 :①把时间域的数据经快速傅里叶变换 ,变

到频率域 ;②将数据分成几个频带 ,带宽可以不等 ,并允许重叠 ;③在每个频带的中点 ,利用该频率和其振幅计算比例因子 ;④用反傅里叶变换将每个频带内数据返回到时间域。这样把原始道分解为几个频带成分的地震道 ;⑤对每个分解道应用自动增益控制 ;⑥将第③步计算的比例因子分别作用于上步结果 ;⑦将这些道求和 ,形成最终输出道。

上述的频谱展宽法尤其适用于受激发产生的噪声干扰的数据 ,如空气波、地滚波等。一般这些噪声具有异常频率特征 ,所以这种频谱展宽法能明显提高信噪比。当噪声的能量明显强于信号能量时 ,由于频谱展宽法将所有谱分量都均匀到同一级别 ,这样总的噪声能量相对就减弱了。一般反褶积也具有频谱均衡作用 ,但这种频谱展宽法可连续时变 ,因此 ,它更适合于具有时变特征的噪声数据。其他算法仅依赖于数据的窗口 ,不会达到这种效果。

在应用之前需对数据作自动增益补偿。为了保幅处理 ,可在频谱展宽法之后去掉自动增益补偿。该方法对叠后数据信号增强也很有用 ,可得到更一致性的子波 ,这对后续处理和解释都有利。

图 1 是频谱展宽法应用前后对比图。图 1-a 为输入道集 ,近炮检距上的能量几乎被湮没在面波之中。图 1-b 为输出道集 ,面波干扰得到充分压制 ,有效反射信号获得释放。通过频谱分析可以发现主频由原来的 20 Hz 升到 30 Hz ,明显拓宽了有效频带宽度 ,提高了分辨率。

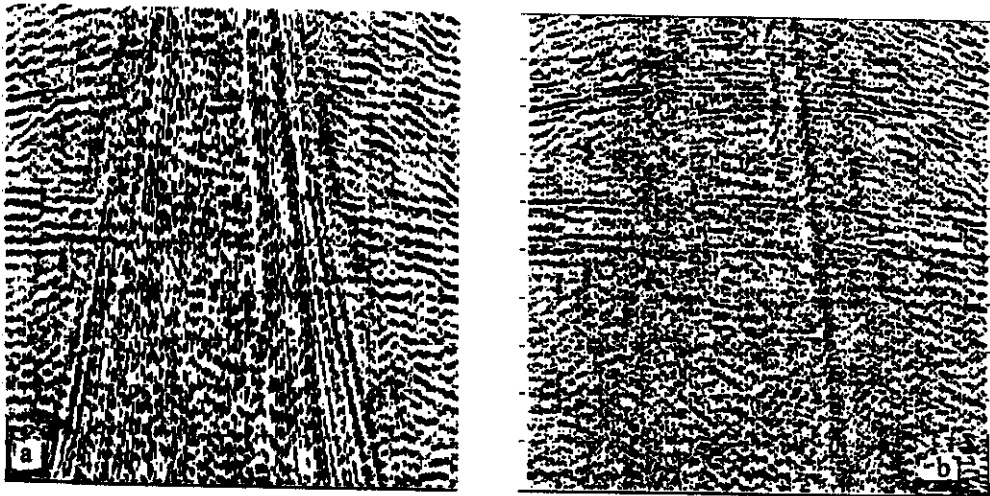


图 1 频谱展宽法应用对比

Fig.1 Application of the frequency spectrum unfolding method
a-应用前 b-应用后

①徐基祥等,“中国东部深层地震资料处理新方法研究.”九五”CNPC 课题研究报告.

2.2 深层目标成像技术

在中国东部地区,地表情况比较简单,静校正不是主要问题。地表相对平缓,激发也多属胶质泥土环境,地震资料的信噪比相对较高。地下中浅层为第三系平缓沉积复杂正断裂,中深部为下第三系扭曲地层复杂正断构造并下覆中古生界挤压扭曲变形构造,深部有中古生界的潜山埋覆。第三系与中古生界的接触既有角度不整合也有古潜山风化壳类型,形成较剧烈的速度突变界面。地震波在这些界面上会发生较强的折射。对于研究中古生界区域的油藏,传统时间域偏移的处理方法已不能解决成像问题,有效的技术手段是叠前深度偏移。由于围岩及目标区的构造比较复杂,导致建立速度模型的困难很突出。

深层信号成像研究的重点是速度建模方法和成像方法研究。需研发了解析速度建模技术、井约束速度建模技术、V-H 联合速度分析方法、高倾角 DMO 和常速扫描叠偏技术等。解析速度建模技术的特点可以保证速度和界面深度同时收敛,明显提高了计算效率,井约束速度建模技术利用井资料可以提供一个较好的初始速度深度模型。这里着重介绍 V-H 联合速度分析方法和常速扫描叠偏技术。

2.2.1 V-H 联合速度分析技术 由于深层构造的多解性,给深层层位解释带来较大难度,用逐层速度分析会把误差传递到深层。所以采用一条新的途径来进行深度-速度分析。

(1)垂直速度分析 把 DMO 速度直接转化为深度域层速度,形成层速度体,进行叠前深度偏移。在离散的 CDP 位置上用叠前深度偏移道集作垂直速度分析。图 2 是第 1 次迭代和第 10 次迭代的垂直延迟谱,图 2-a 同相轴不平,存在明显延迟,图 2-b 延迟明显趋于零,中浅层同相轴趋于平直。然而深层仍然存在延迟,当上覆地层速度知道后,利用下一步可基本解决深层的速度场问题。

(2)沿层速度分析:在以上层速度分析的基础上(深度域解释层位)上,把上面得到的速度转化为沿层的层速度,另外还可以从该速度中求得平均梯度。再与叠前深度偏移迭代,作沿层剩余速度分析,解释沿层延迟谱,并作全局层析成像。如果认为上面的层位速度已理想了,可直接作局部层析成像,只对深层作速度和深度校正。经过几次迭代,就可以得到较理想的深层速度场。图 3 为最终第 3、5、7 层的沿层延迟谱,可以看到基本上不存在延迟,说明速度场比较理想。

2.2.2 常速扫描叠偏技术 深层复杂波场的成像一直受成像方法与速度分析方法的困扰,主要原因是深层绕射波场互相干扰,同一时间同一位置上存在多个绕射波场,而各个绕射波场对应于不同的速度,所以很难用某一个速度能使它们都合适归位。目前一般的速度分析方法很难解决该问题,为此,借助于速度扫描分析的方法,用常速叠加,然后用该常速进行偏移。

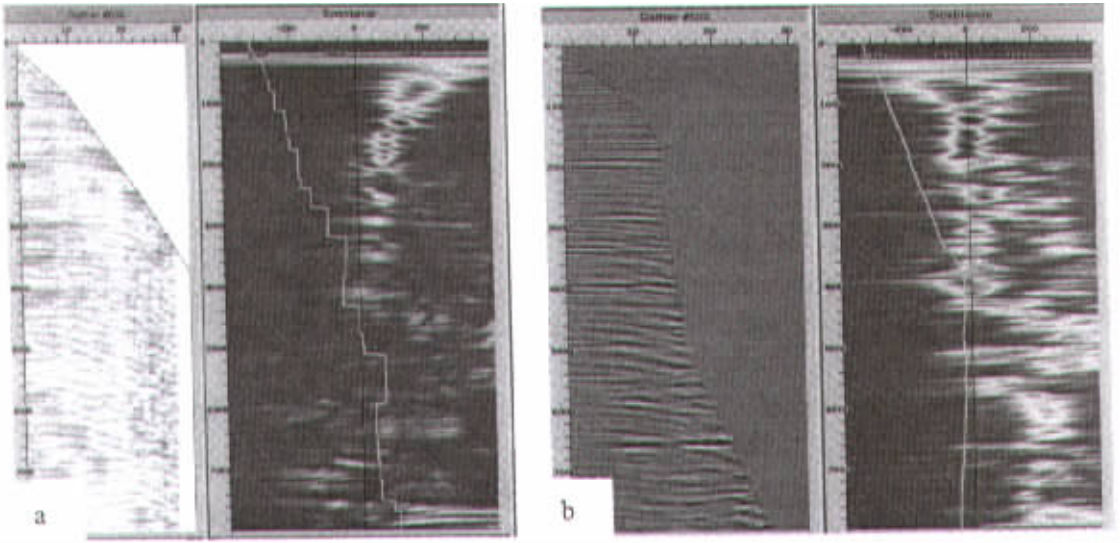


图 2 垂直延迟谱对比

Fig. 2 The vertical delay spectrum

万方数据

a-为第 1 次迭代延迟谱 b-为第 10 次迭代延迟谱

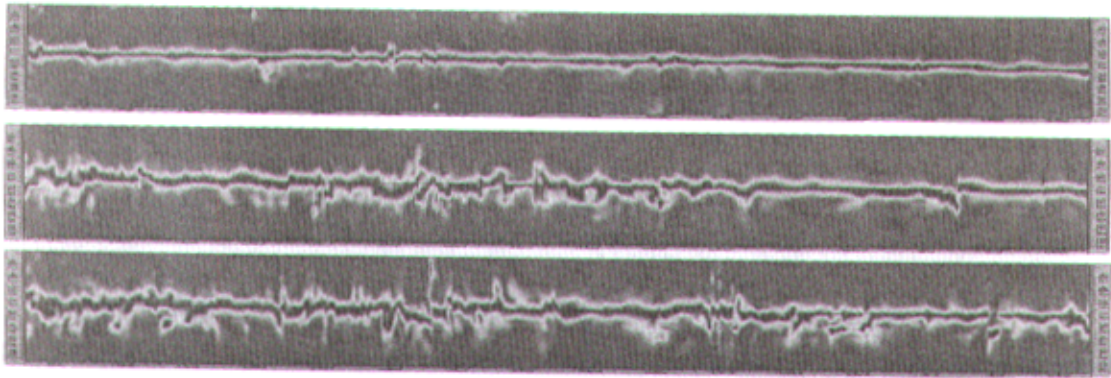


图3 第3、5、7层的沿层延迟谱

Fig.3 The horizontal delay spectrum of third、fifth and seventh layer

由于无法得知深层速度的分布 ,又因为深层信号较弱 ,那么就避开用合适的偏移速度进行偏移 ,改用常速来偏移 ,即用不同的常速对 DMO 道集进行动校正、叠加、偏移 ,从成像的效果上来选择适当的速度。具体实施步骤如下 :①对去噪后的道集进行 DMO 处理 ,得到 DMO 道集 ;②用多个(如 30 个)常速分别对该道集进行动校正 ,叠加 ;③用当前的常速

对叠加剖面进行 F-K 常速偏移 ;④重复前三步 ,就得到偏移剖面-速度数据体 ;⑤在该数据体上 ,根据成像的效果在切片上拾取速度 ;⑥经拾取 ,得到各个位置上的速度 ;⑦沿所拾取的速度点位置提取叠加数据 ,就可获得理想的时间域成像剖面。图 4 为最终拾取的成像剖面。

该方法的特点是对深层复杂绕射波场用不同

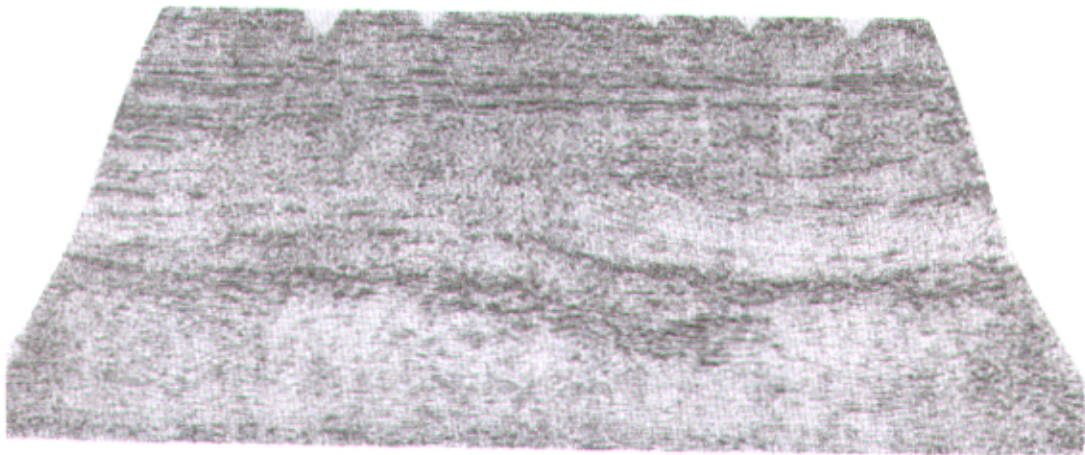


图4 常速扫描叠偏成像剖面

Fig.4 The image section of the constant velocity stack and migration

的速度依次对其成像 ,在获得合理成像速度的同时 ,也得到合理的成像剖面。该速度更接近于合理的均方根速度 ,将其转化为深度域层速度 ,可用于深度偏移。

3 应用效果

从构造背景上看 ,千米桥潜山位于印支期古隆起背景上 ,是高部位上的隆起 ,由于地层的抬升、剥蚀 ,自西南向东北方向基本缺失上古生界煤系地层。

到晚侏罗世—白垩纪 ,下古生界灰岩顶面广泛沉积了中生界地层 ,最厚处可达近千米。由于中生界和上古生界地层披覆于下古生界灰岩潜山古风化壳之上 ,使奥陶系潜山形成内幕型古潜山。随着断裂活动的加剧 ,新生代到了稳定地台沉积的解体时期 ,形成以第三系平缓沉积 ,复杂正断层为主的地质结构。由于千米桥地区奥陶系潜山埋藏深、内幕反射比较弱 ,目标区有效波的信噪比、分辨率都与上覆地层有很大不同 ,故在研究中以搞清潜山构造形态为重点。

采用上述有关处理新技术,按照全三维目标处理流程,做好保真、速度分析和成像等环节,恢复深层弱反射信号,成像的结果见图 5。这是千米桥地区老三维资料与新采集的三维资料处理效果的对比。

可以看到新三维资料较老三维资料处理效果在各个方面都有新的进展。这一方面说明了老三维区重新采集新三维的采集方法的进步,另一方面也说明了处理方法进步促进了处理效果的进一步提高。

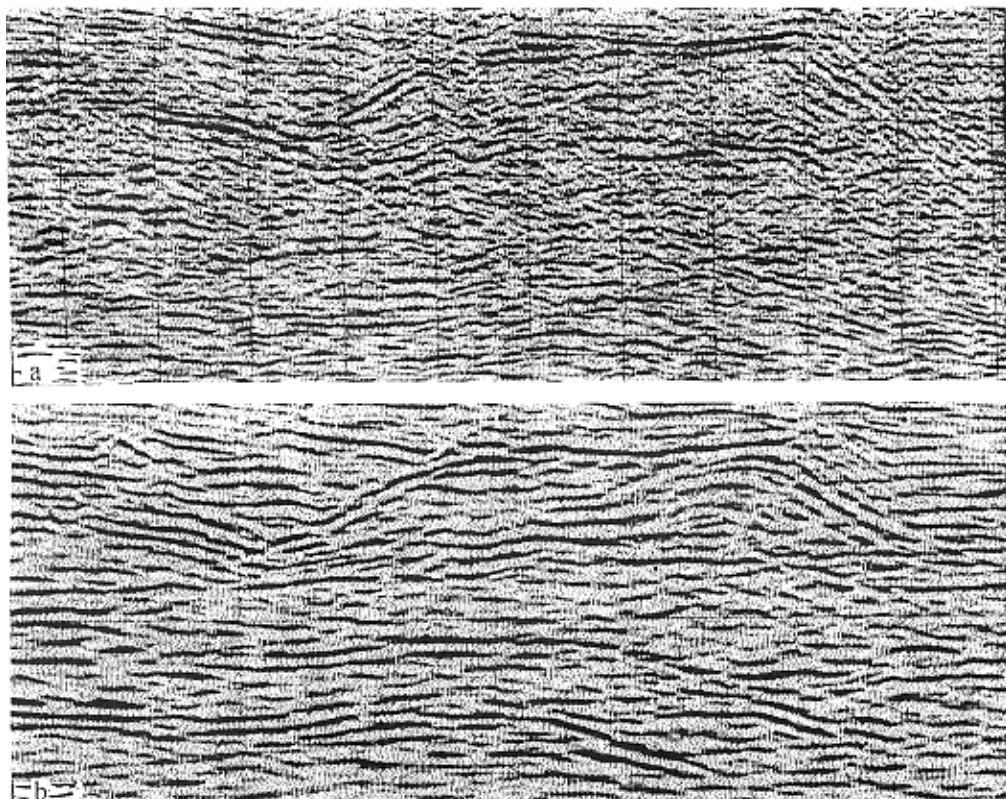


图 5 深层古潜山成像效果对比

Fig. 5 The image section of the deep old hide hill

a-老剖面 b-新剖面

表明采用深层系列处理新技术在深层资料的信噪比、层组特征、断层归位和断面波成像等方面有明显的改进,从图上可以看出,剖面层位清晰、深层地层成像理想、断面波和绕射波归位正确、潜山面和内幕比较明确,该方法可用于构造评价和储层预测。

4 结论

在详细分析中国东部深层地震资料特点的基础上,把深层信号增强和深层目标成像作为研究重点,研制和开发了多种针对性的处理新技术,取得了较好的应用效果。东部深层资料处理是一项复杂的系统工程,针对深层资料的特点,需要有的放矢地发展处理新技术,选择适合深层资料特点的方法处理流程及参数。有效压制噪音干扰、保护弱能量的有效

信号、提高深层资料信噪比是基础,应用高精度的叠加、偏移成像技术,提高深层复杂构造成像质量是关键,加强资料处理与资料解释的结合,用地质概念指导资料处理是保障。

致谢 本文是 CNPC“九五”攻关项目“东部深层地震勘探技术研究”中的部分内容。在该项目整个研究过程中,得益于多家单位的合作,在此向 CNPC 科技发展部、项目办公室和合作单位表示感谢。

参 考 文 献

- 李庆忠. 1993. 走向精确勘探的道路. 北京:石油工业出版社.
- 渥 伊尔马兹著,黄绪德,袁明德译. 1994. 地震数据处理. 北京:石油工业出版社.
- 徐基祥等. 2000. 投影解析速度建模. 地学前沿 (增刊): 159~170.