



宽方位宽频带保幅处理技术在页岩油勘探中的应用

张丽艳¹, 李 昂¹, 黄一鸣¹, 李 舰², 李士超¹, 姚玉来¹

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 大庆油田勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712

摘 要: 中国页岩油勘探进入了全新的勘探领域, 页岩油储层比常规储层复杂得多, 如何提高页岩油储层的成像精度是页岩油地震勘探的关键环节。宽方位三维地震技术是目前普遍采用的地震勘探技术, 因为宽方位地震在提供高品质地震资料的同时还能够解决相对较难的地质问题。以松辽盆地齐家古龙凹陷 Y88 研究区为例, 利用宽方位资料进行针对页岩油储层处理, 分析了宽方位资料的波场特征、信噪比及频率等特征, 在此基础上确定了宽方位资料的处理流程, 并采用了宽方位、宽频带的高分辨率保幅特色处理技术进行处理, 取得较好的成像结果。

关键词: 页岩油勘探; 宽方位; 宽频带; 保幅; 成像精度

APPLICATION OF WIDE-AZIMUTH AND BROADBAND AMPLITUDE PRESERVING PROCESSING TECHNIQUE IN SHALE OIL EXPLORATION

ZHANG Li-yan¹, LI Ang¹, HUANG Yi-ming¹, LI Jian², LI Shi-chao¹, YAO Yu-lai¹

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

2. Daqing Oilfield Exploration and Development Research Institute Co., Ltd., Daqing 163712, Heilongjiang Province, China

Abstract: Shale oil exploration in China has entered a new field. As shale oil reservoir is much more complex than conventional reservoir, the improvement of imaging accuracy of shale oil reservoir is the key to shale oil seismic exploration. The wide-azimuth 3D seismic technique is widely used in seismic exploration currently as it can solve relatively difficult geological problems while providing high-quality seismic data. Taking the study area Y88 in Qijia-Gulong depression of Songliao Basin as an example, the paper conducts shale oil reservoir processing by wide-azimuth data, and analyzes the characteristics of wave field, signal-to-noise ratio and frequency. On this basis, the processing flow of wide-azimuth data is determined and the wide-azimuth and broadband high-resolution amplitude-preserving processing technique is adopted for better imaging.

Key words: shale oil exploration; wide azimuth; broadband; amplitude preserving; imaging accuracy

收稿日期:2021-03-01;修回日期:2021-03-28. 编辑:李兰英.

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目“油气勘探中宽方位 OVT 处理方法及其应用研究”(41804138);中国地质调查局项目“松辽盆地北部页岩油战略调查与评价”(DD20190114).

作者简介:张丽艳(1980—),女,博士,教授级高级工程师,现从事多波多分量、高分辨率地震资料处理、各向异性成像等方面研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//moonliyan@sohu.com

通信作者:李昂(1980—),男,硕士,高级工程师,现从事油气地震资料解释、储层等方面研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//275712780@qq.com

0 引言

随着常规油气产量的不断下降,勘探理念逐渐由常规油气勘探转向非常规油气勘探,非常规油气资源已成为油气勘探的重要目标之一^[1-2]。非常规油气勘探中的页岩油、页岩气勘探开发是目前国内各大油田增储的热点领域。国外进行页岩油勘探相对较早,主要是美国和加拿大。美国页岩油的勘探开发主要集中在 Bakken、Eagle Ford 和 Barnett 等海相页岩层系内,其页岩油产量从 2005 年开始迅猛增加,2011 年达到了 2.973×10^4 t,2012 年页岩油产量达到顶峰,相当于其国内石油产量的 12.5%。中国对页岩油的勘探开发相对较晚,在借鉴国外的页岩油勘探开发经验的基础上,结合中国基础地质条件的差异进行了不断的探索,取得了一些理论认识和实践进展^[3-4]。松辽盆地、渤海湾盆地、南襄盆地等中生代、新生代陆相盆地的泥页岩层段中,相继已不同程度地获得了工业油流。辽河油田曙古 165 井沙河街组三段泥岩裂缝井段获自喷性工业油流,产量最高达 $24 \text{ m}^3/\text{d}$ 。渤海湾盆地的济阳拗陷,在沙河街组一段、沙河街组四段页岩中获得低产油气流。三塘湖盆地马朗、条湖凹陷二叠系芦草沟组 4 口井获得工业油流^[5-6]。中国地质调查局沈阳地质调查中心 2017 年分别在松辽盆地北部齐家凹陷杏西地区和古龙凹陷巴彦查干地区部署实施了松页油 1 井、松页油 2 井钻探工程。两口井在青山口组一段泥岩储层段直井压裂均获得了 $3 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上的页岩油工业油流,实现了松辽盆地北部页岩油调查的重大突破,随即部署的两口水平井松页油 1HF 井和松页油 2HF 井获得了 $10 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上的高产工业油流,带动了松辽盆地页岩油勘探开发的步伐。

松辽盆地拗陷期地层自上而下发育有黑帝庙、萨尔图、葡萄花、高台子、扶余、杨大城子 6 套油层,是目前勘探的主体。青山口组是主要生油层,尤其是青一、二段暗色泥岩是主力生油层,有机质丰度好,成熟度高,凹陷主体区 R_o 为 $1.0\% \sim 2.0\%$,青山口组一段成熟度高,是页岩油勘探的重点层系。大庆油田在松辽盆地北部钻遇青山口组的钻井有 1330 口,主体区已被三维地震所覆盖,面积约 $16\,075 \text{ km}^2$ 。青山口组泥岩见油气显示井 77 口,试油井 40 口,工业井 9 口。6 口井位于古龙凹陷内,3 口井位于齐家凹陷内,齐家-古龙凹陷是页岩油勘探成果最好的地区。

页岩油储层类型主要有两种:一种是基质孔隙为主要储集空间的泥页岩储集层,即基质型;第二种是大规模天然裂缝十分发育的泥页岩储集层,即裂缝型。无论是哪种类型的储层,地震勘探对于页岩油储层预测和甜点识别都非常重要,如何提高页岩油储层的成像精度是页岩油地震勘探的重要环节。宽方位三维地震技术是一种前缘性地震勘探技术,能够提供高品质地震资料,利用其解决相对较难的地质问题。宽方位地震采集可以获得较完整的地震波场信息。利用宽方位资料可以增强地层断层、岩性及裂缝的识别能力,在解决各向异性问题方面也具有较大的优势^[7-9]。本文以松辽盆地齐家-古龙凹陷 Y88 研究区为例,利用宽方位资料进行针对页岩油储层处理,分析了宽方位资料的波场特征、信噪比及频率等特征,在此基础上确定了宽方位资料的处理流程,并采用了宽方位、宽频带的高分辨率保幅特色处理技术提高成像精度,从而体现了宽方位地震勘探对页岩油储层刻画的优势。

1 研究区地质概况及原始资料分析

研究区位于松辽盆地北部长垣南齐家-古龙凹陷中,见图 1(蓝色方框标注处)。研究区地势总体较为平坦,呈现东部低、西部高的特征,高程范围在海拔 $125.9 \sim 165.1 \text{ m}$ 。通过对研究区地表调查发现,研究区地物主要以村镇、皮革城、采油作业区,沼泽草地、林带、稻田、耕地为主(图 2)。其中,农田区主要位于研究区中、东部,海拔高程介于 $130.1 \sim 145.1 \text{ m}$,占全区面积的 47.2%;沼泽草地区位于研究区西南部,海拔高程在 $128.1 \sim 130.1 \text{ m}$,占全区面积的 15.4%;高岗耕地区位于研究区西部,呈南北向条带状分布,海拔高程 $145.1 \sim 165.1 \text{ m}$ 之间,占研究区总面积的 28.6%。研究区表层结构简单,大部分为两层结构,低速层速度 $190.8 \sim 800 \text{ m/s}$,厚度 $1.4 \sim 15.7 \text{ m}$ 。研究区采集观测系统参数如表 1 所示。从表 1 可以看出,本次地震采集的观测系统类型正交观测系统:面元大小为 10 m (纵) $\times 20 \text{ m}$ (横),覆盖次数为 192 次,采样间隔为 1 ms ,纵横比为 0.75,为宽方位采集。

图 3 为研究区不同位置的原始单炮记录,从图 3 中可以看出,研究区内发育面波(蓝色方框)、折射波(绿色方框)等规则干扰,以及强机械、强环境产生的异常振幅值(红色方框)和低频随机噪音等不规则干扰。

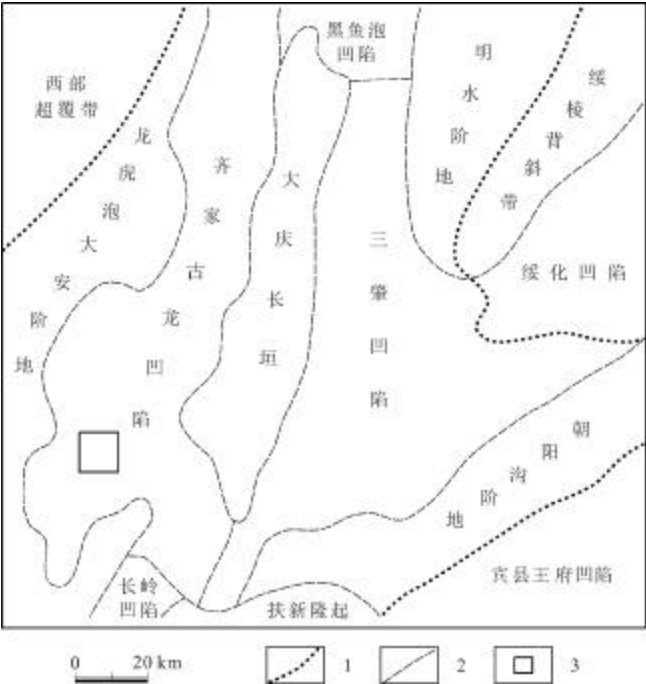


图 1 研究区构造位置图

Fig. 1 Tectonic location of the study area

1—一级构造单元界线 (boundary of first-order tectonic unit); 2—二级构造单元界线 (boundary of second-order tectonic unit); 3—研究区位置 (study area)

波. 其中,面波的频率较低,全区分布,扇形特征清楚,视速度在 300~650 m/s 之间,能量较强,对资料的品质影响较大. 高岗区低降速带厚度不断变化,折射波干

表 1 Y88 北三维地震采集观测系统

Table 1 3D seismic acquisition geometry in northern Y88 area

名称	参 数	名 称	参 数
观测方式	正交	观测系统	24L4S256R
纵向排列方式	2550-10-20-10-2550	接收道数/道	6144
面元/(m×m)	10×20	覆盖次数	192
道距/m	20	激发点距/m	40
激发线距/m	160	最大炮检距/m	3180
接收线距/m	160	最小炮检距/m	10
束间滚动距/m	160	最大最小炮检距/m	205
纵横比	0.75	最大非纵距/m	1900
主要目的层 (T ₂)纵横比	0.95	道密度/(道/km ²)	312.5
炮道密度/(万道/km ²)	96	炮密度/(炮/km ²)	156
时间采样间隔/ms	1	记录长度/s	6

扰严重, 同时伴生大量低速线性噪音. 线性噪音视频率 5~23 Hz, 视速度 100~300 m/s, 折射波视频率 5~25 Hz, 视速度 1 500~2 500 m/s. 全区的静校正问题比较严重, 尤其是高程变化剧烈区(高岗区). 从原始资料叠加剖面图(图 4)可以看出, 高岗区静校正问题比较突出, 而由于静校正问题突出导致同相轴横向连续

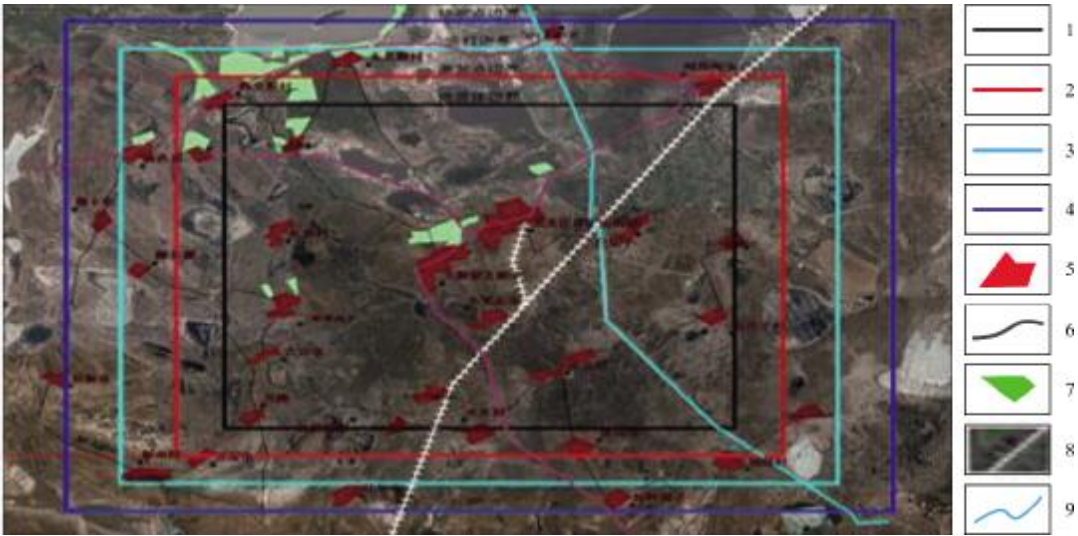


图 2 研究区卫星图像

Fig. 2 Satellite image of the study area

1—满覆盖边界 (boundary of full coverage); 2—炮点边界 (boundary of shot spots); 3—数据边界 (data boundary); 4—检波点边界 (boundary of receiver point); 5—村庄 (village); 6—公路 (road); 7—林地 (forest); 8—铁路 (railway); 9—南引水渠 (diversion channel from South)

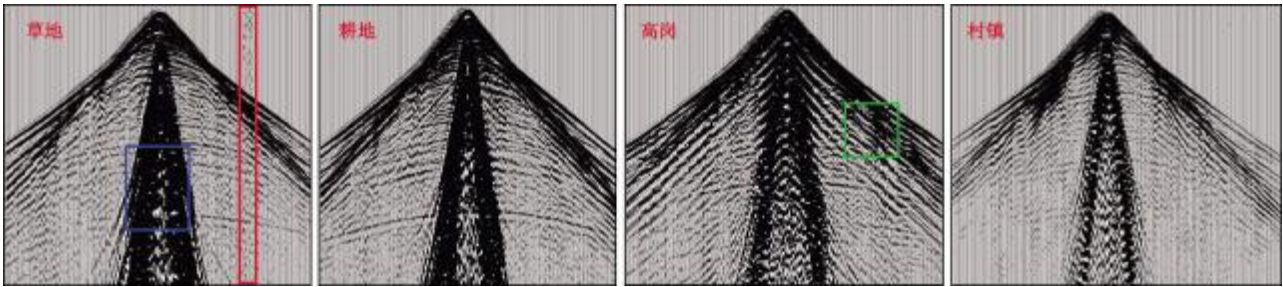


图 3 不同位置的原始单炮
Fig. 3 Original single shots in different locations

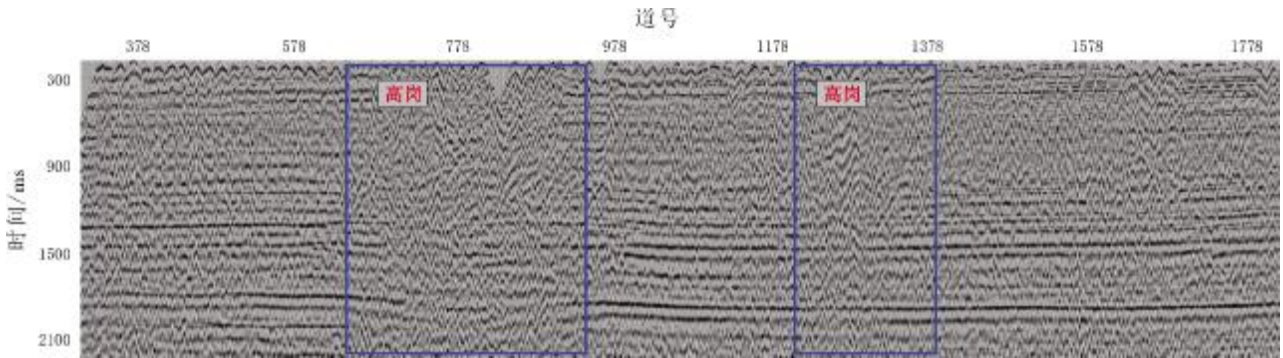


图 4 原始资料叠加剖面
Fig. 4 Stacked profile of original data

性变差,成像困难. 从整个研究区的信噪比(图 5)可以看出,研究区的信噪比为 0.7~1.3. 图 6 有效信号频谱图中显示出整个研究区有效信号的频带大约为 5~65 Hz.

2 宽频带处理技术

结合上述原始资料特征和本研究区地质任务,主要采用宽频带、宽方位地震处理技术进行提高分辨率处理,其具体处理技术流程如图 7 所示. 流程中绿色的部分是处理的关键技术,主要包括模型约束的高静校正技术、多域分步去噪技术、近地表吸收衰减补偿技术及宽方位 OVT(炮检距向量片)域处理技术.

2.1 模型约束的层析静校正技术

由于本区地表条件复杂,低降速带速度、厚度变化大,造成静校正问题比较突出. 仅依靠表层调查资料的静校正方法不能有效地解决静校正问题,而折射波静校正又不能很好地解决中低频静校正量,所以需要综合折射波信息和表层调查资料来解决. 本文采用折射波层析静校正与微测井静校正相结合的方式计算静校正量. 首先将两种方法求得的炮点、检波点的静校正量,分解成低频分量和高频分量,应用层析静校正量的高频分量和微测井静校正量的低频分量相结合求取

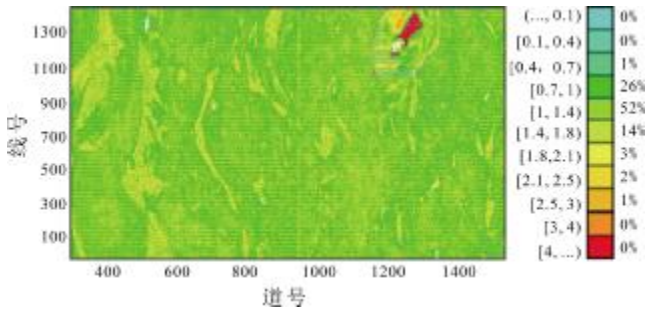


图 5 信噪比图
Fig. 5 Signal-to-noise ratio map

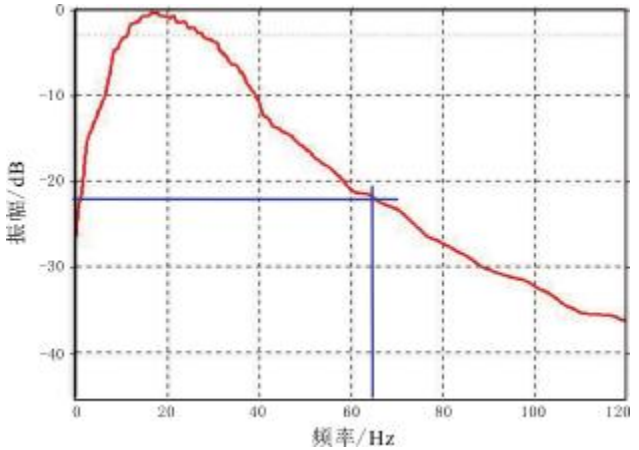


图 6 有效信号频谱
Fig. 6 Effective signal spectrum

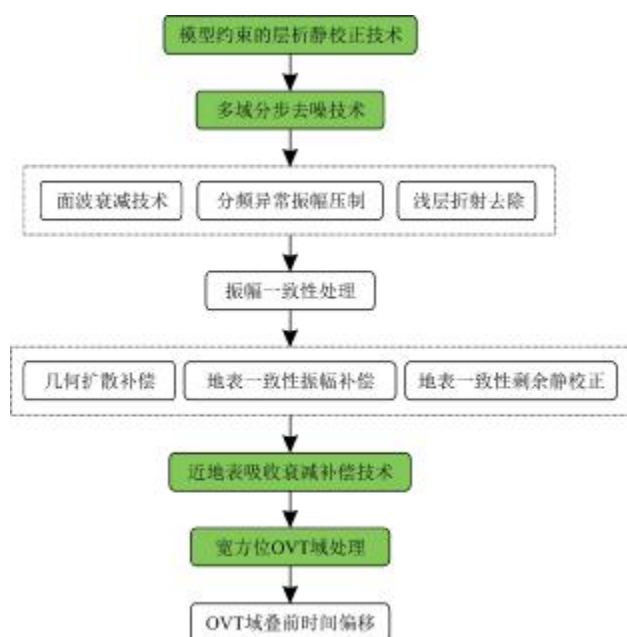


图7 宽方位宽频带地震资料处理技术流程

Fig. 7 Processing flowchart for wide-azimuth and broadband seismic data

全区统一静校正量,解决研究区的静校正问题,最终依靠精细速度分析与剩余静校正迭代解决剩余静校正量,保证地震低、中、高频信号实现同相叠加。图8是静校正前后叠加剖面对比,可以看出,模型约束的层析静校正能够有效地解决静校正问题,尤其是高岗地区的静校正问题(图中蓝色方框标注处),静校正后剖面的同相轴更连续,信噪比得到提高。

2.2 多域分步去噪技术

该研究区地表条件复杂,地表障碍物多,信噪比差异较大,干扰波类型较多,且不同区域(耕地、草地、高岗、村镇等)干扰波发育不同。在叠前去噪处理时,针对面波、浅层折射波、异常幅值等干扰波在频率、能量和视速度等方面与有效波存在一定差异的特点,在叠前识别并去除,整体的原则就是在进行压制噪音的同时,确保有效波的损失控制在最小,在相对保真的前提下提高资料的信噪比。

由于研究区普遍存在面波干扰,对近道产生严重

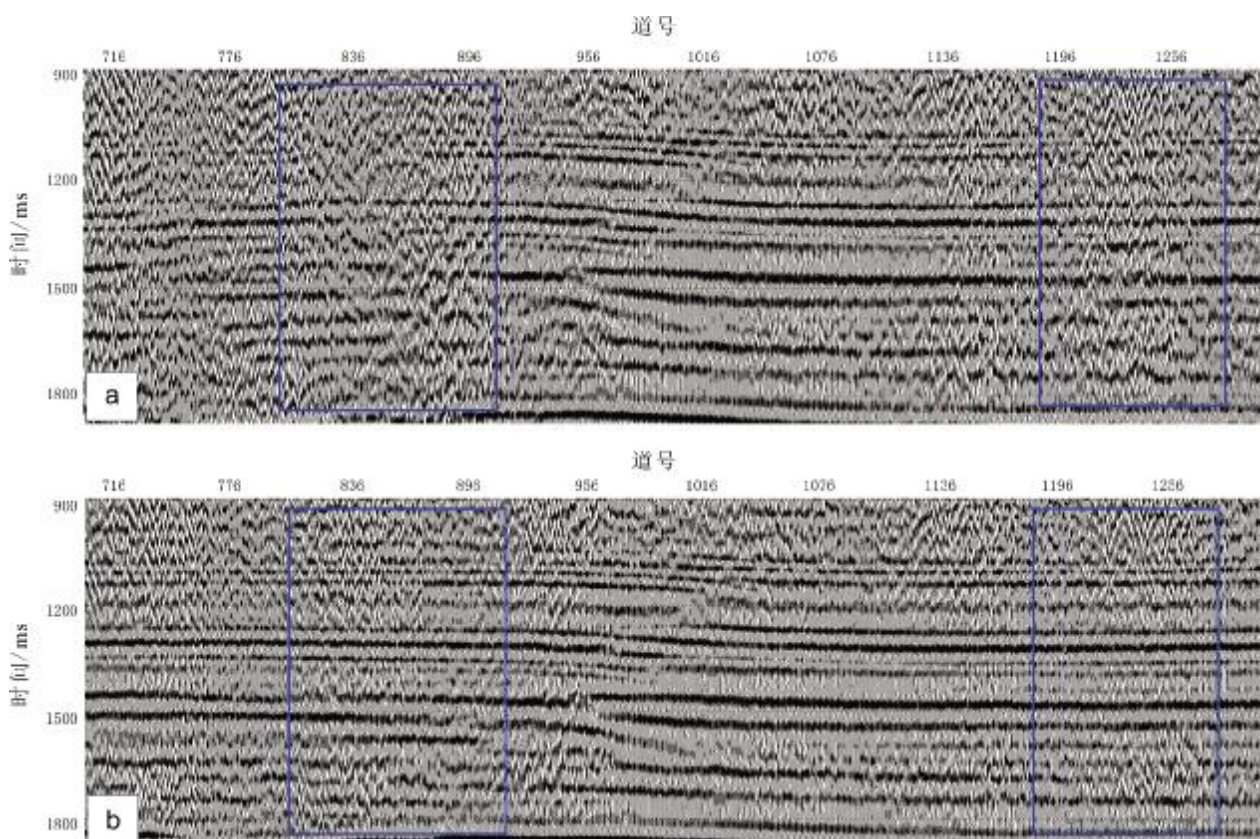


图8 静校正前后剖面对比

Fig. 8 Comparison of profiles before and after static correction

a—静校正前(before static correction); b—静校正后(after static correction)

的影响,其频率主要在 12 Hz 以下,视速度在 300~650 m/s 之间。根据其低频、强振幅的特点,采用区域异常噪音衰减技术对面波进行压制,具体做法:首先对原始单炮进行分频处理,利用低频段面波能量较强的特点,与中高频段有效信号较强的能量做比值处理,通过设置门阈参数,以此来识别面波的能量,并设计衰减因子,求出低频段的有效信号并从低频段减去,这样就估计出了面波的能量,然后再从原始单炮中减去,求出的面波能量,即可完成对面波衰减。这种方法最大的特点是相对保幅性较好,在衰减面波的同时可以很好

地保护低频段的有效信号。针对折射波干扰,采用 F-X 域的信噪分离方法。由于其干扰能量较强,干涉频带较宽,压制较为困难,且容易伤害到有效信号。同时由于折射干扰在炮域的线性特征比较明显,因此采取在炮域对其进行压制,再根据折射波在不同区域的频率、线性特征和发育程度不同,采取分区压制折射波干扰。对于部分单炮上存在的幅值较大的异常振幅干扰,主要根据这些噪音的振幅能量与有效波振幅能量的明显差异,采用地表一致性异常振幅压制技术对其进行压制。

通过采取上述综合性的处理方法对研究区噪音进

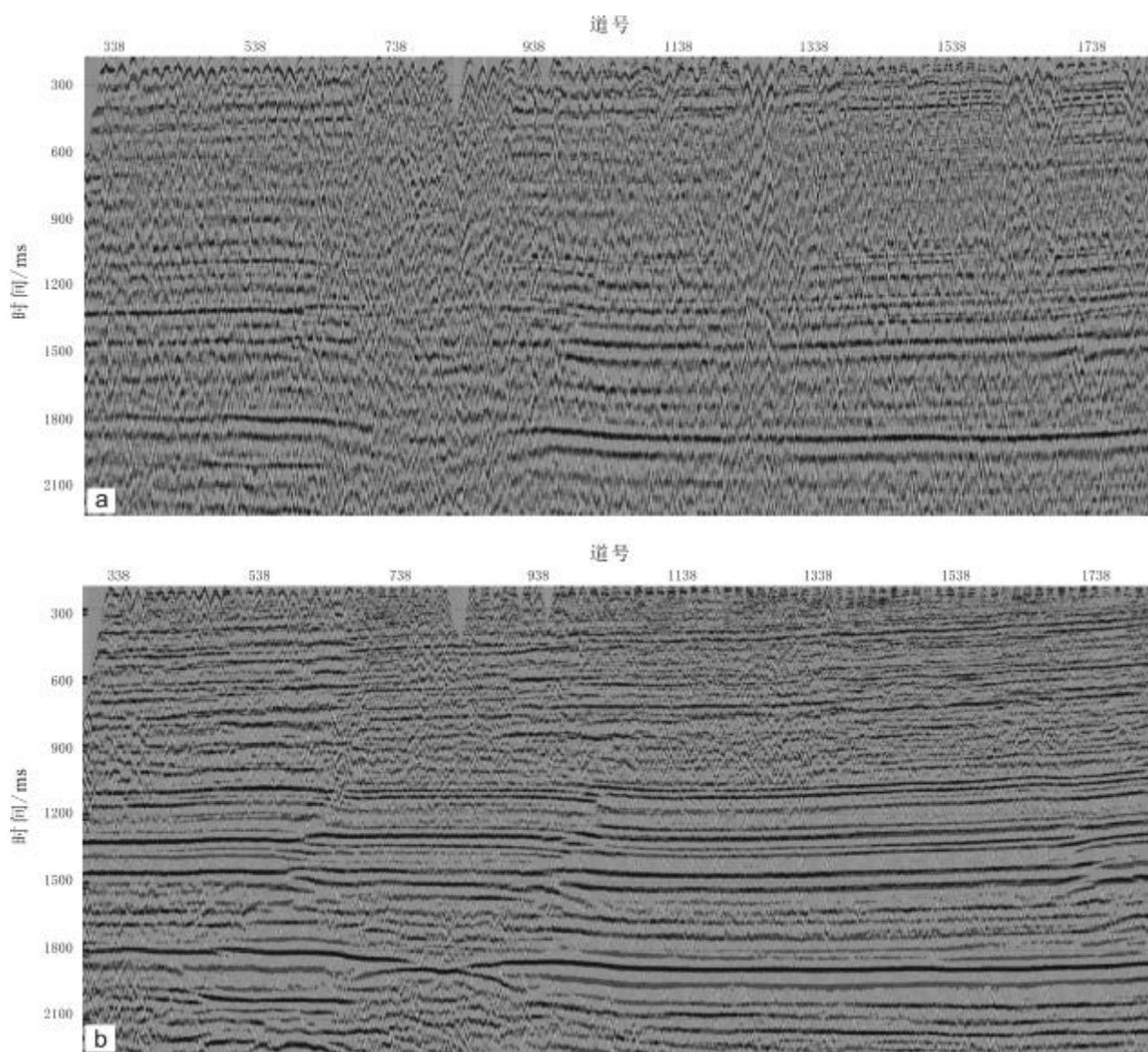


图 9 去噪前后叠加剖面对比

Fig. 9 Comparison of stacked profiles before and after denoising
a—去噪前(before denoising); b—去噪后(after denoising)

行去除,对比叠前综合去噪前后的叠加剖面(图 9)可以看出,叠前去噪有效地去除了面波、折射、异常振幅等干扰,剖面信噪比明显提高,各反射层的连续性得到增强.从去噪前后的信噪比图(图 10)可以看出,去噪前剖面的信噪比 0.7~1.0(图 10a),而去噪后信噪比提高到 1.3~3(图 10b),信噪比得到了大幅度的提高.

2.3 表层吸收补偿技术

近地表吸收衰减了一部分有效地震信号.另外,由于近地表介质的吸收和频散作用的横向变化,造成能量和相位的不一致,对成像也会产生很大影响.所以,要提高地震资料的分辨率,就必须解决地层的吸收衰减问题,特别是近地表的吸收问题.地表调查的微测井资料中包含了大量的表层信息,地面检波器或井底检波器接收的地震信号,其振幅及频率变化规律能够较好地反映表层吸收情况,因此,利用微测井资料获

得高精度近地表 Q (品质因子)值,通过反 Q 滤波处理,可以有效提高地震资料的分辨率.具体做法:首先,利用微测井资料求取表层绝对 Q 值.其次,利用地震资料求取相对 Q 值.用微测井井点的绝对 Q 值标定相对 Q 值,建立整个研究区的 Q 场,最后利用稳健的反 Q 滤波方法进行近地表吸收衰减补偿,使有效信号得到较好的恢复.将该方法应用于整个研究区进行近地表吸收衰减补偿,使高频端得到较好的恢复.图 11 为近地表吸收衰减补偿前后的剖面对比.从图 11 可以看出,经过近地表补偿后,高频端得到较好的恢复,弱信号的能量得到加强(图中蓝色方框标注处).从图 12 可以看出,近地表吸收衰减补偿前剖面的频带宽度为 3~36 Hz,补偿后剖面的频带宽度为 4~44 Hz,与近地表吸收衰减补偿前相比经过表层 Q 补偿后的剖面频带拓宽 7 Hz 左右.

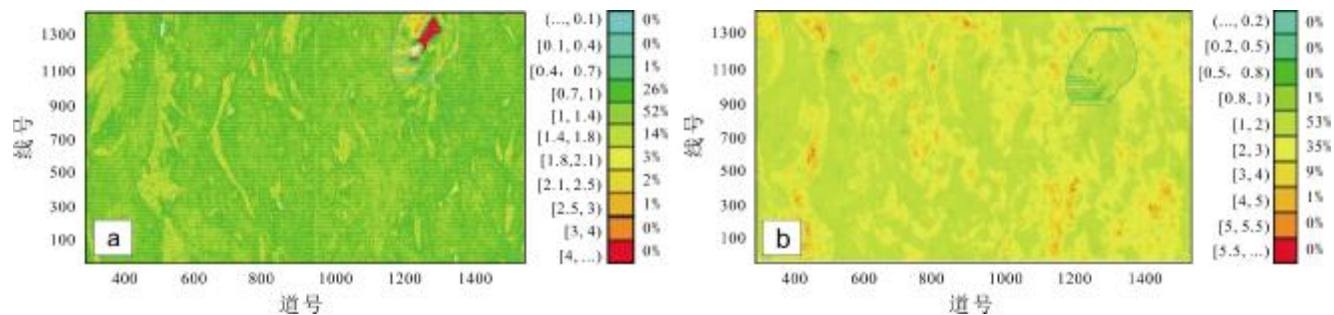


图 10 去噪前后信噪比对比

Fig. 10 Comparison of signal-to-noise ratios before and after denoising
a—去噪前(before denoising); b—去噪后(after denoising)

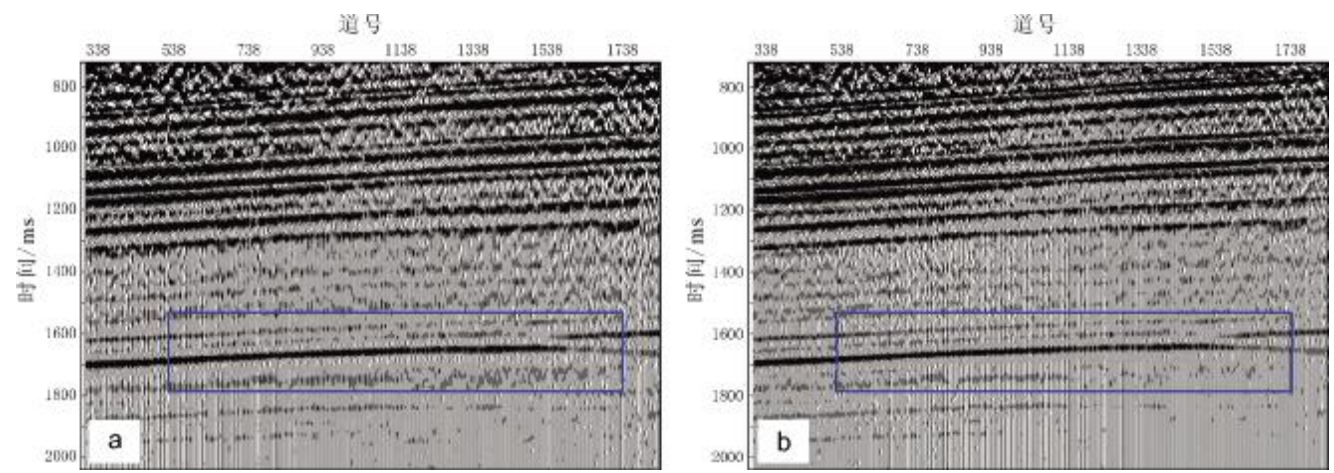


图 11 近地表吸收衰减补偿前后剖面对比

Fig. 11 Comparison of profiles before and after near-surface absorption attenuation compensation
a—补偿前(before compensation); b—补偿后(after compensation)

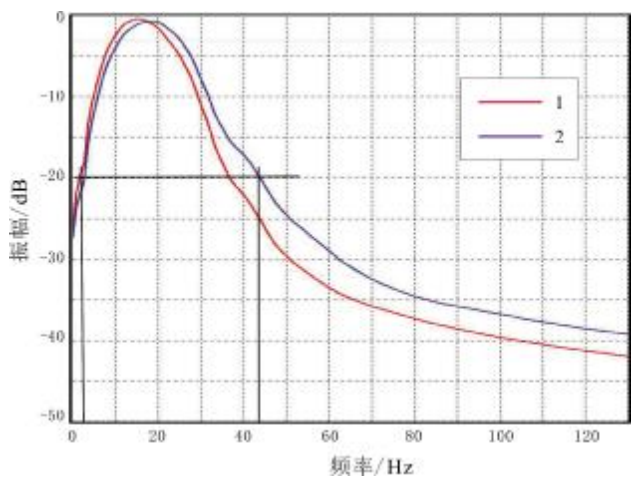


图 12 近地表吸收衰减补偿前后频谱对比

Fig. 12 Comparison of spectrum before and after near-surface absorption attenuation compensation
1—补偿前(before compensation); 2—补偿后(after compensation)

3 宽方位处理技术

本研究区资料的纵横比达到 0.75,为宽方位采集,能够更全面的刻画地下的波场信息和弥补照明引起的不均现象,所以针对宽方位资料应该采取针对性的体现宽方位特征的处理技术,既 OVT 域的处理^[10-12],主要包括 OVT 域的去噪、规则化、偏移以及各向异性校正等处理.因为方位各向异性特征在宽方位资料上表现的更完整,通过方位各向异性校正处理,能够消除各向异性的影响,提高地震资料的分辨率^[13-16].

OVT 域叠前时间偏移与共炮检距域叠前时间偏移均采用克希霍夫叠前时间偏移方法.由于受束状观测系统的影响,不同炮检距的覆盖次数存在差异,造成共炮检距域叠前时间偏移后的 CRP 共反射点道集存在能量不均衡现象,表现为道集的中炮检距能量强,近、远炮检距能量弱,该能量关系不能真实反映地下地质层位空间能量的变化^[17-20].而 OVT 域偏移后的“蜗牛”道集解决了由于观测系统带来的叠前时间偏移后近、远炮检距能量弱的问题,能够更真实地反映 AVO (振幅随偏移距变化)响应,同时由于方位信息的保留还可以有利的开展 AVA (振幅随方位角变化)等流体检测工作^[21-23].图 13 为 OVT 域偏移后的道集进行方位各向异性校正前后的对比.图 13a 的 OVT 域方位道集体现的是在 360°范围内,地震波场的随方位的变化,体现了地下方位各向异性的特征.其中紫色的线代表偏移距的变化,绿色的线代表方位角 0~360°内方位的变化.从图 13 中可以看出,由于方位各向异性的影响,偏移后的方位道集存在波浪形曲线形状,这种特征在图中 1.0~1.2 ms 区间表现尤其明显(图中红色方框标注处),波浪形曲线的顶点和底点分别代表各向异性的主方向和垂直方向(也就是裂缝的走向和垂直方向).通过方位各向异性校正后,消除了这种方位各向异性的影响,同相轴校平(图 13 所示).图 14 是方位各向异性校正前后成像剖面的对比,可以看出,校正后的剖面(图 14b)在成像精度和信噪比方面

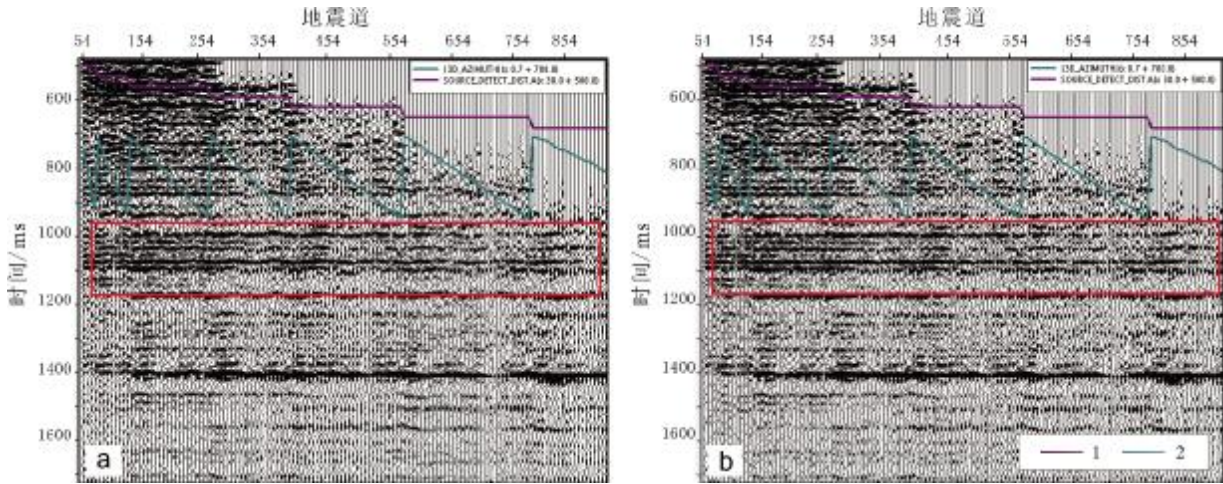


图 13 宽方位 OVT 域方位各向异性校正前后道集对比

Fig. 13 Comparison of gathers before and after OVT-domain wide-azimuthal anisotropy correction
a—校正前(before correction); b—校正后(after correction); 1—偏移距变化(offset change); 2—方位角变化(azimuth change)

都要优于校正前的剖面(图 14a),而且经过方位各向异性校正后,层间的弱信号能量得到加强(图中箭头指示处).

4 应用效果分析

图 15、16 为采用图 7 的处理技术流程进行处理的新老资料最终成像剖面及频谱对比.从二者的剖面可以看出,新处理后的成果能够使小断层成像更清晰,断

点收敛更干脆,层间信息更丰富,整个剖面的信噪比相对较高(图 15a).另外从二者的频谱上也可以看出,新资料成果的有效频宽为 6~82 Hz(图 16 中蓝色曲线),老资料成果的有效频宽为 13~78 Hz(图 16 中红色曲线).相比而言,新成果不但低频信息丰富,高频信息也远高于老资料,整个资料的频带宽度比老资料成果高 11 Hz,对后续页岩油储层识别和甜点提供了高质量数据.

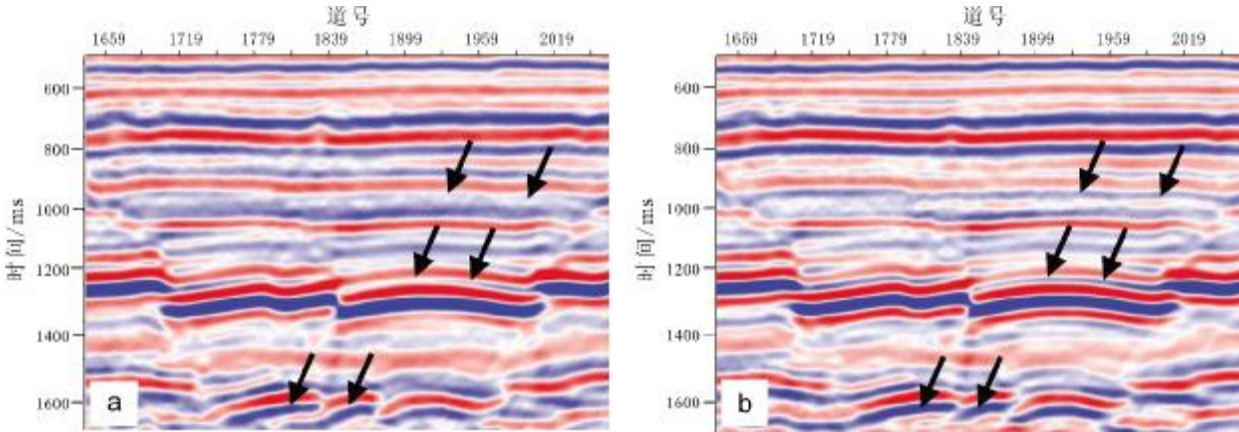


图 14 宽方位 OVT 域方位各向异性校正前后成像剖面对比
Fig. 14 Comparison of imaging profiles before and after OVT-domain wide-azimuthal anisotropy correction
a—校正前(before correction); b—校正后(after correction)

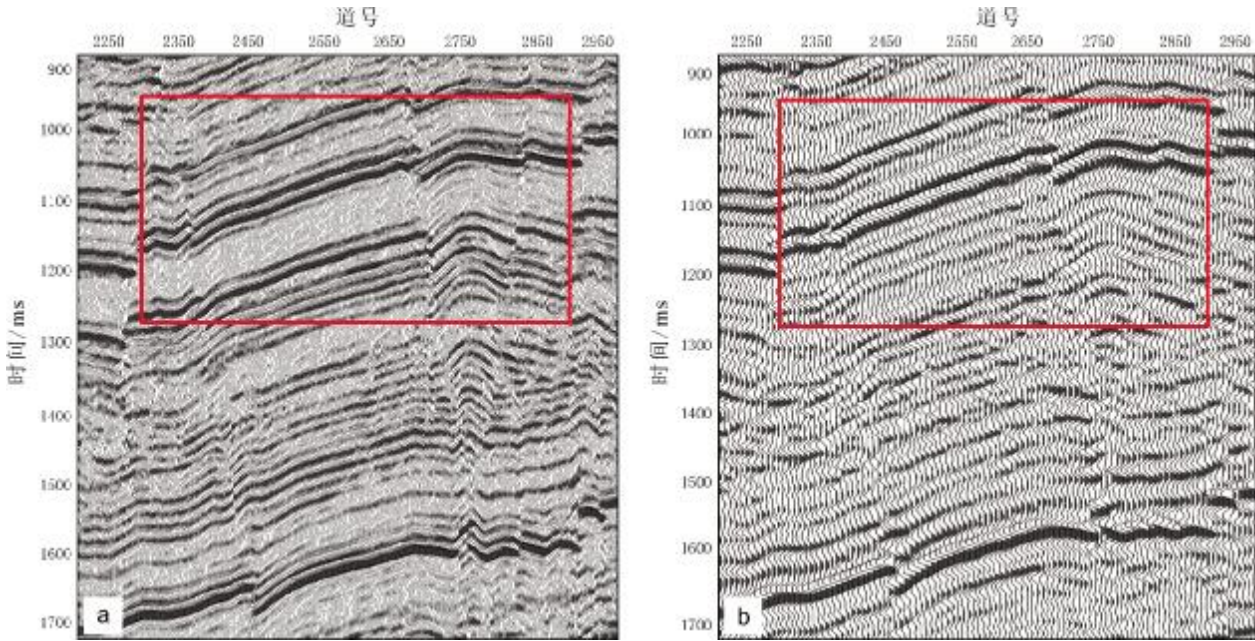


图 15 新老资料成果处理剖面对比图
Fig. 15 Imaging profile comparison of new and old data results
a—新资料(new data); b—老资料(old data)

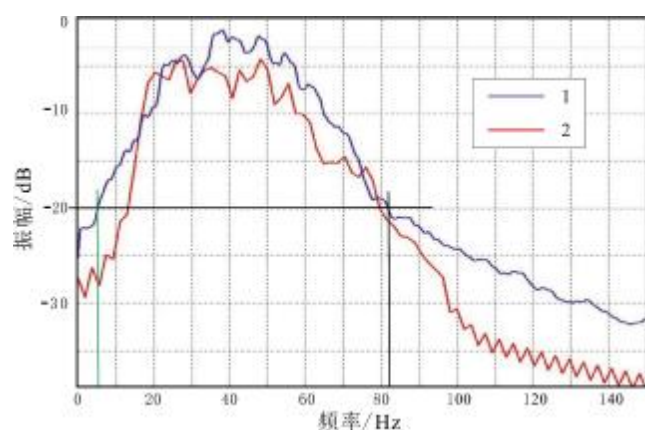


图 16 新老资料成果频谱对比

Fig. 16 Spectrum comparison of old and new data results

1—新资料(new data); 2—老资料(old data)

5 结论

松辽盆地齐家-古龙凹陷是页岩油勘探的重点区域。利用宽方位、宽频带处理技术对松辽盆地齐家-古龙凹陷 Y88 研究区进行了高分辨率保幅处理,得出主要结论和认识如下。

(1)模型约束层析静校正技术、多域分布去噪技术以及近地表吸收衰减补偿等宽频处理技术能够有效地提高资料的信噪比、分辨率及成像精度。

(2)宽方位 OVT 域处理能够充分利用宽方位资料的方位角优势,使偏移后的道集同时含有炮检距和方位角的信息,通过方位各向异性校正能够较好的解决方位各向异性问题。

(3)宽频、宽方位保幅处理技术能够有效地提高地震成像精度和分辨率,使较老资料频带拓宽 11 Hz,为后续的储层预测和甜点识别提供了高质量的数据。

参考文献(References):

- [1]张保庆,周辉,左黄金,等.宽方位地震资料处理技术及应用效果[J].石油地球物理勘探,2011,46(3):396-400,406.
Zhang B Q, Zhou H, Zuo H J, et al. Wide Azimuth data processing techniques and their applications[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(3): 396-400, 406.
- [2]张军华,朱焕,郑旭刚,等.宽方位角地震勘探技术评述[J].石油地球物理勘探,2007,42(5):603-609.
Zhang J H, Zhu H, Zheng X G, et al. Summary of wide-azimuth seismic exploration technique[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007,

42(5): 603-609.

- [3]王学军,于宝利,赵小辉,等.油气勘探中“两宽一高”技术问题的探讨与应用[J].中国石油勘探,2015,20(5):41-53.
Wang X J, Yu B L, Zhao X H, et al. Development and application of "2W1H" technique in oil and gas exploration[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(5): 41-53.
- [4]孔德政,于敏杰,刘新文,等.两宽一高地震采集技术在复杂山前带的应用及效果分析[J].新疆石油天然气,2016,12(1):33-38.
Kong D Z, Yu M J, Liu X W, et al. Application and effects of The "two-wide one-high" seismic acquisition technique in complex piedmont[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2016, 12(1): 33-38.
- [5]王兆磊,公亨,李隆梅,等.高密度宽方位地震资料处理技术研究进展[J].物探化探计算技术,2015,37(4):465-471.
Wang Z L, Gong T, Li L M, et al. The new progress of high-density and width azimuth seismic data processing[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 37(4): 465-471.
- [6]裴家学.宽方位地震资料在陆西凹陷勘探中的应用[J].大庆石油地质与开发,2015,34(5):146-150.
Pei J X. Application of the wide azimuth seismic data in the exploration of Luxi Sag[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(5): 146-150.
- [7]刘益永.吉林舒兰煤田地地震勘探资料处理效果分析[J].地质与资源,2013,22(3):192-194.
Liu Y Y. Analysis on the processing result for geophysical exploration data of Shulan coalfield in Jilin Province[J]. Geology and Resources, 2013, 22(3): 192-194.
- [8]冯魁,张晓帆,陈川,等.开发地震技术及进展[J].地质与资源,2009,18(1):64-69.
Feng K, Zhang X F, Chen C, et al. Advances in development seismic technology[J]. Geology and Resources, 2009, 18(1): 64-69.
- [9]徐明才,高景华,荣立新,等.从金属矿地震方法的试验效果探讨其应用前景[J].中国地质,2004,31(1):108-112.
Xu M C, Gao J H, Rong L X, et al. Application prospects of the seismic method as discussed from the experimental effects of the method for metal exploration[J]. Geology in China, 2004, 31(1): 108-112.
- [10]Cary P W. Common-offset-vector gathers: an alternative to cross-spreads for wide-azimuth 3-D surveys[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1999, 18(1): 1496-1499.
- [11]Starr J. Method of creating common-offset/common-azimuth gathers in 3-D seismic surveys and method of conducting reflection attribute variation analysis: USA, 6026059[P]. 2000-02-15.
- [12]Vermeer G J O. Processing orthogonal geometry: What is missing? [J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2005, 22: 2201-2204.

(下转第 365 页/Continued on Page 365)

- Ren C F, Zhao H B, Chen B J, et al. Analysis of location precision factors in surface microseismic monitoring acquisition geometry: A case study of an SZ exploration area in Daqing, China [J]. *Petroleum Geophysical Prospecting*, 2018, 57(5): 668–677.
- [18]李红梅. 微地震监测技术在非常规油气藏压裂效果综合评估中的应用[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(3): 129–134.
- Li H M. Application of micro-seismic monitoring technology to unconventional hydrocarbon reservoir fracturing evaluation [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(3): 129–134.
- [19]芮拥军. 地面微地震水力压裂监测可行性分析[J]. *物探与化探*, 2015, 3(2): 341–345.
- Rui Y J. Feasibility analysis of surface micro-seismic hydraulic fracturing monitoring[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 3(2): 341–345.
- [20]张伟, 王海, 李洪臣, 等. 用变换时窗统计能量比法拾取地震初至波[J]. *物探与化探*, 2009, 33(2): 178–180.
- Zhang W, Wang H, Li H C, et al. The application of statist energy ratio of transform time windows to the pickup of seismic first arrival wave [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2009, 33(2): 178–180.
- [21]王程, 王维红. 基于背景噪声和特征值下降比的微地震 SVD 去噪改进方法[J]. *东北石油大学学报*, 2020, 44(5): 1–12, 124.
- Wang C, Wang W H. Optimal method of SVD for micro-seismic data based on background noise and wigenvalue ratio of reduction [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2020, 44(5): 1–12, 124.
- [22]Julian B R, Foulger G R. Time-dependent seismic tomography [J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 182(3): 1327–1338.
- [23]杨瑞召, 李德伟, 庞海玲, 等. 页岩气压裂微地震监测中的裂缝成像方法[J]. *天然气工业*, 2017, 37(5): 31–37.
- Yang R Z, Li D W, Pang H L, et al. Fracture imaging of the surface based microseismic monitoring in shale gas fracking: Methods and application [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(05): 31–37.
- [24]吴建光, 张平, 吕昊, 等. 基于震幅叠加的微地震事件定位在地面监测中的应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(1): 255–264.
- Wu J G, Zhang P, Lv H, et al. Application of microseismic event location using amplitude summation in surface monitoring [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, 47(1): 255–264.

(上接第 394 页/Continued from Page 394)

- [13]Schapper S, Jefferson R, Calvert A, et al. Anisotropy velocities and offset vector tile prestack-migration set vector domain [J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2009, 28: 1172–1176.
- [14]Craft K L, Mallick S, Meister L J, et al. Azimuthal anisotropy analysis from P-wave seismic traveltimes data [J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1997, 16(1): 1214–1217.
- [15]Fatkhani R, Urosevic M. The use of P-wave reflectivity to detect fractured sands and anisotropy clays [J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2001, 118–121.
- [16]Cordsen A, Galbraith M. Narrow-versus wide-azimuth land 3D seismic surveys[J]. *The Leading Edge*, 2002, 21(8): 764–770.
- [17]Thompson A, Rich J, Ammerman M. Fracture characterization through the use of azimuthally sectorized attribute volumes [J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2010, 1433–1437.
- [18]Kallweit R S, Wood L C. The limits of resolution of zero-phase wavelets[J]. *Geophysics*, 1982, 47(7): 1035–1047.
- [19]Williams M, Jenner E. How important is the effect of azimuthal anisotropy in 3-D seismic data? Enhancing data quality and extending the potential of the 3-D interpretation [J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2001, 126–128.
- [20]Williams M, Jenner E. Interpreting seismic data in the presence of azimuthal anisotropy; or azimuthal anisotropy in the presence of the seismic interpretation [J]. *The Leading Edge*, 2002, 21(8): 771–774.
- [21]赵忠华. 炮检距矢量道集非刚性匹配方位各向异性时差校正[J]. *大庆石油地质与开发*, 2019, 38(1): 141–146.
- Zhao Z H. Azimuthal anisotropy moveout correction by non-rigid matching for the offset vector gather [J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2019, 38(1): 141–146.
- [22]马涛, 王彦春, 李扬胜, 等. OVT 属性分析方法在采集设计中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2019, 54(1): 1–8.
- Ma T, Wang Y C, Li Y S, et al. Application of OVT attribute analysis in seismic acquisition [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2019, 54(1): 1–8.
- [23]孟阳, 许颖玉, 李静叶, 等. OVT 域地震资料属性分析技术在断裂精细识别中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(S2): 289–294.
- Meng Y, Xu Y Y, Li J Y, et al. Fault identification with OVT-domain seismic attribute analysis [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(S2): 289–294.