



引文格式: 赵飞, 赵俊, 陈晓轩, 等. 地震拓频处理技术在金龙油田侏罗系薄砂岩储层预测中的应用[J]. 西北地质, 2025, 58(3): 120–130. DOI: 10.12401/j.nwg.2024094

Citation: ZHAO Fei, ZHAO Jun, CHEN Xiaoxuan, et al. Application of Seismic Frequency Expanding Processing Technology in the Jurassic Thin Reservoir Prediction of Jinlong Oilfield[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 120–130. DOI: 10.12401/j.nwg.2024094

地震拓频处理技术在金龙油田侏罗系薄砂岩 储层预测中的应用

赵飞^{1,2}, 赵俊³, 陈晓轩³, 许海红^{1,2,*}, 韩小锋^{1,2}, 路克崇⁴,
张慧元^{1,2}, 魏东涛^{1,2}, 崔海峰^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119; 2. 中国地质调查局北方古生界油气地质重点实验室, 陕西 西安 710119; 3. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000; 4. 中国石油集团西部钻探工程有限公司玉门钻井分公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 金龙油田侏罗系储层砂体厚度薄、横向变化快, 空间分布规律不清, 常规地震资料识别较为困难, 提高地震资料分辨率进行薄砂体储层预测成为侏罗系岩性油气藏勘探、开发的关键。通过采用 HFE 高分辨率拓频处理方法, 结合 AIW 波阻抗反演, 实现了薄砂体储层的有效预测。结果表明: 利用 HFE 高频拓展处理技术, 目的层地震资料的频带拓宽了 45 Hz(从 10~55 Hz 拓宽到 10~100 Hz), 提高了地震资料识别薄砂体储层的能力, 实现了对大于 8 m 的薄层砂岩的有效刻画; 同时, 以地震拓频资料为基础, 进行 AIW 波阻抗储层反演, 准确预测并刻画了研究区侏罗系三工河组 $J_1S_2^1$ 砂体的空间展布, 识别出含油气储层有利区 4 个, 其中 1 个有利区钻井已获高产工业油气流。实际钻井结果与储层预测结果吻合程度高, 储层预测钻井符合率 100%, 砂体厚度相对误差绝对值小于 4.29%。该方法对于侏罗系薄砂体储层预测有效, 且效果明显, 钻井吻合率高, 可以作为薄砂体储层预测的有效方法, 可为岩性油气藏的砂层预测提供可靠的技术支撑。

关键词: 储层预测; 薄砂岩储层; 拓频处理; 波阻抗反演; 侏罗系; 金龙油田

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)03-0120-11

Application of Seismic Frequency Expanding Processing Technology in the Jurassic Thin Reservoir Prediction of Jinlong Oilfield

ZHAO Fei^{1,2}, ZHAO Jun³, CHEN Xiaoxuan³, XU Haihong^{1,2,*}, HAN Xiaofeng^{1,2}, LU Kechong⁴,
ZHANG Huiyuan^{1,2}, WEI Dongtao^{1,2}, CUI Haifeng^{1,2}

(1. Xi'an Center of China Geological Survey/Northwest China Center of Geoscience Innovation, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Key Labo-

收稿日期: 2023-09-12; 修回日期: 2024-10-17; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目-面上项目“基于地球物理多元属性的银额盆地西部火成岩识别方法研究”(2023-JC-YB-273), 中国地质调查局地质调查项目“河西走廊盆地群油气地质调查评价”(DD20242183)、“鄂尔多斯盆地及周缘油气地质调查与评价”(DD20240049)联合资助。

作者简介: 赵飞(1978-), 男, 高级工程师, 主要从事油气地质资源调查与评价。E-mail: 66583685@qq.com。

* 通讯作者: 许海红(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事地球物理资料处理解释研究工作。E-mail: honghaiibeibe@163.com。

ratory of Paleozoic Oil and Gas Geology in North China, China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, Xinjiang, China; 4. Yumen Drilling Branch of CNPC Xibu Drilling Engineering Co., Ltd, Xi'an 710000, Shaanxi, China)

Abstract: The thickness of the Jurassic reservoir sand body in Jinlong Oilfield is thin, with rapid lateral changes and unclear spatial distribution patterns. It is difficult to identify conventional seismic data, and improving the resolution of seismic data for predicting thin sand body reservoirs has become the key to the exploration and development of Jurassic lithological oil and gas reservoirs. By using HFE high-resolution frequency extension processing method and combining with AIW acoustic impedance inversion technology, effective prediction of thin sand reservoir has been achieved. The results show that by utilizing HFE high-frequency expansion processing technology, the frequency band of target layer seismic data has been widened by 45 Hz (from 10~55 Hz to 10~100 Hz), improving the ability of seismic data to identify thin sand reservoirs and achieving effective characterization of thin sandstone layers larger than 8 m; At the same time, based on seismic frequency data, AIW wave impedance reservoir inversion was carried out to accurately predict and characterize the spatial distribution of the $J_{1s_2}^1$ sand body in the Jurassic Sangonghe Formation in the study area. Four favorable areas for oil and gas reservoirs were identified, with one favorable area having achieved high industrial oil and gas production through drilling. The actual drilling results are highly consistent with the reservoir prediction results, with a 100% accuracy rate for reservoir prediction drilling and an absolute error value of less than 4.29% for sand body thickness. This method is effective for predicting thin sand reservoirs in the Jurassic system, with obvious results and high drilling coincidence rate. It can be used as an effective method for predicting thin sand reservoirs and provide reliable technical support for predicting sand reservoirs in lithological oil and gas reservoirs.

Keywords: reservoir prediction; thin sandstone reservoir; frequency expanding processing; acoustic impedance inversion; Jurassic System; Jinlong Oilfield

地震勘探技术是目前油气勘探、开发过程中最重要的方法。综合利用地震、地质和测井资料的定量储层地质模拟技术是现代油藏描述研究的热点(宋维琪等, 2005; 张鹏飞等, 2021; 俞初安等, 2024)。随着油气勘探、开发程度的不断深入, 岩性油气藏正逐步成为油气勘探的重点目标。该类储层单层厚度薄、规模小、分布散, 纵向上相互叠置, 横向变化快, 非均质强, 受地震资料分辨率限制, 薄砂体储层的精细刻画是油气勘探、开发面临的难点问题(邹拓, 2015; 陈珊等, 2018; 孔省吾等, 2020; 刘鸿洲等, 2021; 张益等, 2023)。此外, 复杂地质条件下的精细构造地质解释、储层预测和精细油藏描述, 受常规地震资料分辨率限制已无法满足油气勘探和开发的需求, 尤其是对复杂目标区小断层、小构造和岩性体等小尺度勘探、开发目标的精细解释与地质刻画, 需要针对性的提高地震资料的分辨率和信噪比, 以解决油气精细勘探、开发阶段构造解释和储层预测的关键技术问题(刁瑞, 2020; 季焕成等, 2022)。

为了提高地震资料的信噪比和分辨率, 诸多学者

开展了多种方法的研究, 反褶积(蒋波, 2020)、谱白化(裴森奇等, 2020)、广义S变换(陈波等, 2021)、频谱恢复(李鹏飞等, 2022)、反Q滤波(张全等, 2023)等方法都得到了不同程度地应用, 完善和发展了地震资料的拓频处理技术, 显著提高了地震资料的分辨率。但现有的各种地震资料的拓频处理方法都避免不了地震子波带来的不利影响, 在拓宽频带的同时, 存在不同程度的子波旁瓣增多, 地震不保幅, 或频率分量部分存在冲零现象, 更有甚者多数拓频算法的输出结果改变了地震记录相位, 且子波旁瓣压制效果仍然不佳、地震波组特征不明确(王江等, 2021), 不利于薄储层的精细描述。HFE(High Frequency Expanding)高频拓展处理技术是HISPEC公司开发的地震数据处理技术, 克服了地震子波影响, 在保持原始数据信噪比、相对振幅关系和时频特性的同时, 拓展了地震数据的频宽, 提高了地震资料的分辨率, 并在薄砂体储层预测中见到明显的效果(周宗良等, 2015; 林帅等, 2018; 林火养等, 2019)。但此研究几乎没有在断裂发育区, 沉积环境复杂且原始地震资料分辨率低的地区开展过研究

工作。

近年来,随着准噶尔盆地油气勘探程度的不断提高,岩性油气藏已成为勘探、开发的重点领域(付爽等, 2018; 邹阳等, 2020)。盆地侏罗系三工河组发育的构造-岩性和岩性油气藏作为油田高效建产的主要对象被广泛关注。金龙油田在深层石炭系、二叠系油气取得重大发现的同时,在浅层侏罗系三工河组二段一砂组($J_1s_2^1$)也见到良好油气显示。侏罗系三工河组二段一砂组($J_1s_2^1$)储层主要以薄砂层为主,岩性为含砾中砂岩和中砂岩,砂层厚度约5~20 m,为三角洲前缘水下分流河道沉积,储层砂体横向变化大,分布不稳定。已有三维地震资料主频为35 Hz,频带宽10~55 Hz,砂岩层速度为3340 m/s,理论上只能分辨24 m以上的厚储层,对于分辨小于10 m的薄储层比较困难,直接影响了后续油藏的进一步勘探与开发。为了提高地震资料对薄砂体储层预测的可靠性,明确储层空间展布规律及油气藏规模,加快油气勘探开发进程,需要对地震数据进行提高分辨率处理,尽可能提高薄储层预测的精度。本文应用HFE地震拓频处理技术和

AIW储层反演,探索薄砂体储层分布预测方法,以期金龙油田侏罗系岩性油气藏及盆地其他区带岩性油气藏的勘探、开发提供技术支撑。

1 区域地质概况

准噶尔盆地是中国西部大型陆内叠合富含油盆地,盆地西北缘是重要的油气富集带(张誉洋等, 2022; 贾春明等, 2023; 赵飞等, 2024)。金龙油田位于西北缘克百断裂带东南部(图1a),处于克百断裂带和红车断裂带转换部位的中拐凸起东斜坡,其南部、东南部紧邻生烃凹陷沙湾凹陷和盆1井西凹陷,东北部紧邻玛湖凹陷,西部紧邻红车断裂带,构造格局整体呈一东南倾的单斜,是一个石炭纪—二叠纪的古隆起,形态北翼平缓,处于向玛湖凹陷过渡的斜坡部位,南翼受红3井东断裂的影响,区域构造位置十分有利,是准噶尔盆地富油气区带之一(王小军等, 2017)(图1b)。根据钻井及地震资料,地层在前石炭纪变质岩基底上自下而上发育有石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白

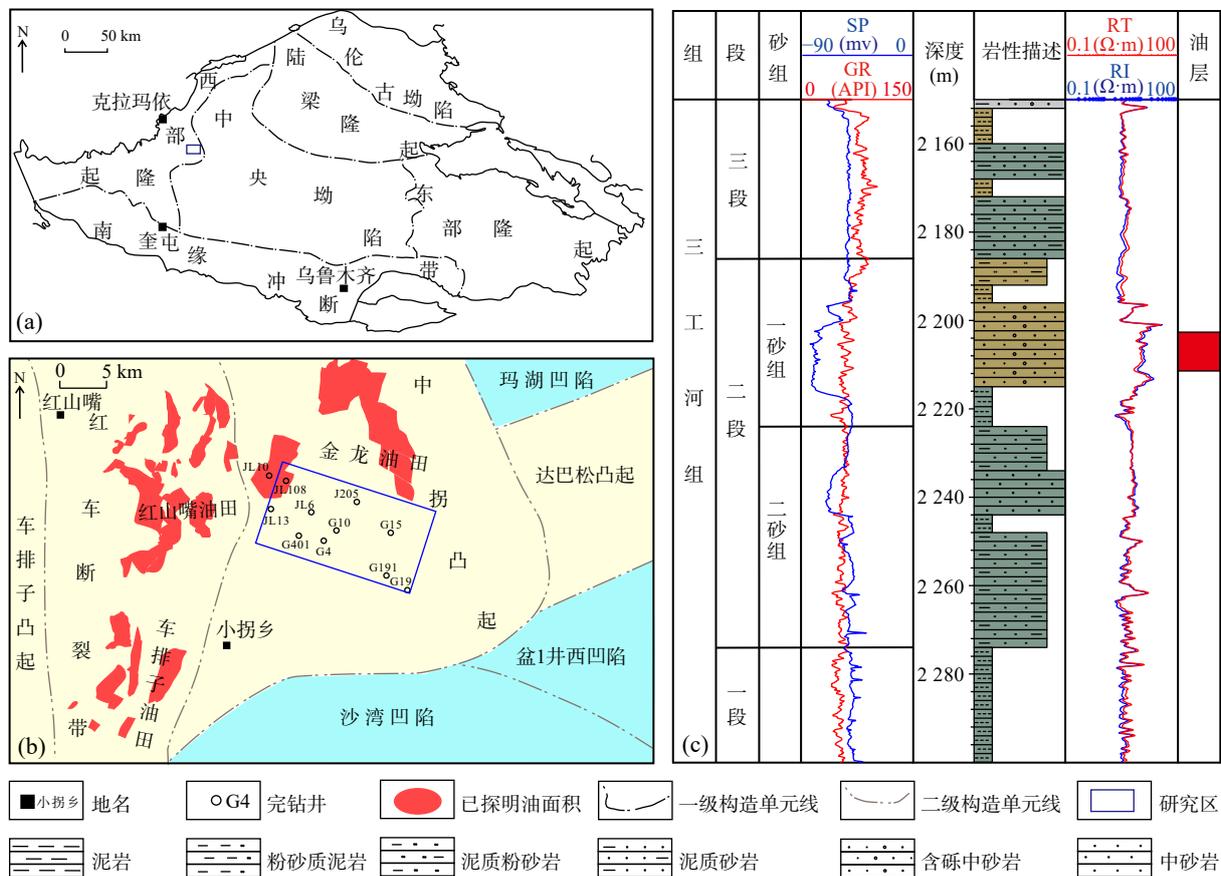


图1 研究区构造位置图(a、b)及侏罗系三工河组综合柱状图(c)

Fig. 1 (a、b) Structural location of the study area and (c) comprehensive histogram of the Jurassic Sangonghe Formation

歪系及新近系地层。油气受多期次断裂活动影响,呈多层系富集特征,目前已在石炭系,二叠系、侏罗系等多层系发现油气藏,表现为深部有大藏,浅部有小藏的“多层楼式”成藏特征。侏罗系油藏主要发育在三工河组二段一砂组($J_3s_2^1$)(图 1c),油气来源于深层二叠系,为晚期调整成藏,侏罗系内部的正断层断距普遍较小,断层与储层的配置关系是决定油气成藏的关键,油藏具有规模小、经济效益显著的“小而肥”的特征。侏罗系三工河组二段一砂组油藏储层薄,横向变化大,常规地球物理方法难以预测已成为制约油气藏勘探开发的关键因素。

2 地震资料拓频

三维地震资料处理中,精细成像和提频一直是获取高分辨率和高信噪比地震资料的关键(徐衍和, 2006)。地震资料拓频处理是在原始地震资料相对振幅保持不变的基础上,提升地震资料高频端弱信号的反射能量以此提高对薄储层的地震识别的能力。地震拓频处理技术是在小时窗内通过调谐地震振幅或地震相位,在频率域内根据不同频率、不同尺度的地质体的地震响应特征不同的特性来识别地质体,使地震识别能力突破常规地震主频所对应的 $1/4$ 波长极限,进行薄储层预测及精细地震解释的一种有效技术。

2.1 HFE 拓频处理原理

HFE 认为地震记录是反射系数序列在频率空间低频端的投影,在不改变反射系数序列只改变在频率向量空间中的位置,在频率向量空间将中低频端的地震记录反投影到更高、更宽的频带,即将一个由低频子波形成的地震数据转换为由高频子波形成的地震数据就能达到拓宽频带提高分辨率的目的。低分辨率地震记录 $y(t)$ 由低频子波 $w(t)$ 与反射系数 $r(t)$ 的褶积形成,可表示为:

$$y(t) = r(t) \times w(t) \quad (1)$$

高分辨率地震记录 $h(t)$ 由高频子波 $w(at)$ 与反射系数 $r(t)$ 的褶积形成,可表示为:

$$h(t) = r(t) \times w(at) \quad (2)$$

在式(1)、(2)中: t 为时间,单位为 ms; a 为子波压缩系数, $a > 1$,无量纲; $w(at)$ 为压缩 a 倍的低频子波。

HFE 高频拓展方法可归结为已知(1)式,但 $r(t)$, $w(t)$ 未知,需要根据原始地震数据的品质选取合适的压缩系数 a 值来求解(2)式,从而得到高分辨率的地

震资料数据。该方法的优点在于不要求取地震子波,通过压缩子波提高地震资料的主频和频宽,避免了常规反褶积拓频方法中子波难于准确求取的问题,很好地保持了地震子波的时变、空变特征,而且很好的保持了地震数据的波组特征和时频特性,具有较高保真,保幅和高分辨率,同时在保持地质构造形态不变的情况下能丰富构造细节,凸显地层界面在空间上的变化特点(周展等, 2020)。

2.2 地震资料去噪参数

由于受地震资料信噪比的影响,在进行高频拓展处理过程中需要针对地震数据进行必要的去噪处理。地震数据中通常都同时存在规则噪声和随机噪声,单独去除其中一种噪声时,都会对另一种噪声产生一定的畸变,达不到最佳的去噪效果(赵斌等, 2011)。地震资料高频拓展处理采用 FXDIPF 技术对数据进行高保真去噪处理,作为 F-X 域预测滤波的一项去噪技术,FXDIPF 的技术优势在于可同时去除随机地震噪声和相干噪声,确保了有效信号的保真度,使处理后的地震反射波形更加自然。最大切除倾角参数(MAXDIP)的正确选择是 F-X 域预测滤波高保真去噪技术 FXDIPF 的关键,选择的原则在于合理有效地切除相干噪声的同时,能保持陡倾角地层层面反射波和断面波不受影响。

2.3 拓频处理参数

子波压缩系数 a 是地震资料高频拓展处理过程中最关键的处理参数,直接确定地震资料拓频所能到达的最高频率,最高频率受原始地震数据信噪比和信号有效频带宽度限制并永远小于截止频率。当确定了地震品质以后如果最高频率选取过高,也就是子波压缩系数 a 值选取过大,拓频处理后得到的部分频率成分的资料的可信度就会有所降低,影响拓频处理后地震资料的质量(袁红军等, 2008)。

2.4 拓频前、后分辨率对比

根据拓频处理前、后地震数据的时频分析对比(图 2),研究区三维地震数据经高频拓展处理,地震数据的频带从 $10 \sim 55$ Hz 拓宽到 $10 \sim 100$ Hz,拓宽了 45 Hz,拓频后的地震数据的相对振幅关系和时频特性得到很好保持,更重要的是低频信息得到一定的补偿。同时,HFE 拓频前后对比可见,地震数据的主频由 35 Hz 提高到了 55 Hz,理论分辨能力达到 15 m,资料的分辨率得到了很大提升。

根据拓频处理前、后地震数据整体剖面对比可见(图 3),拓频处理后地震数据的信噪比得到基本保持,

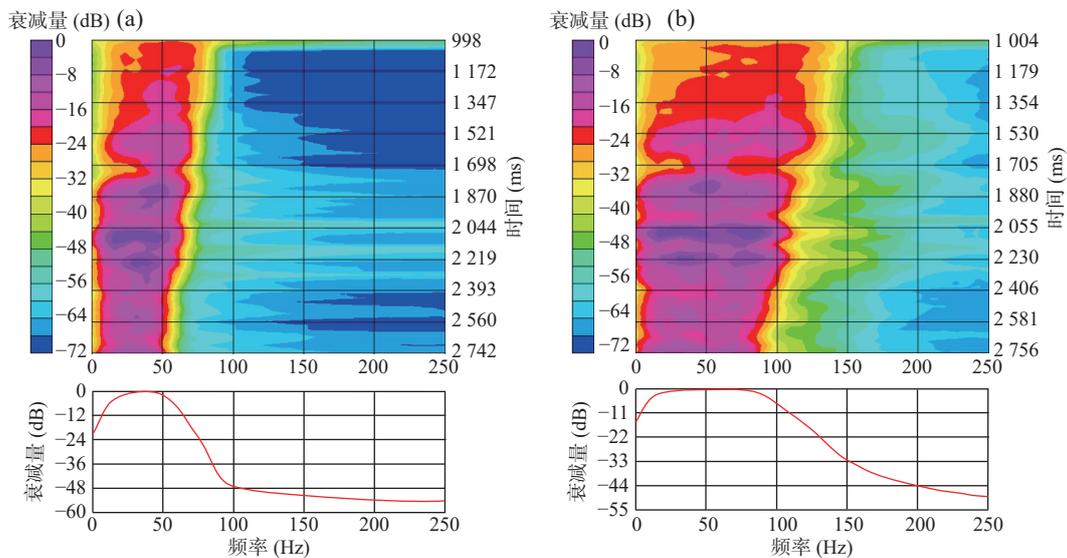


图2 拓频处理前(a)和拓频处理后(b)时频分析图

Fig. 2 Time-frequency analysis (a) before and (b) after frequency extension processing.

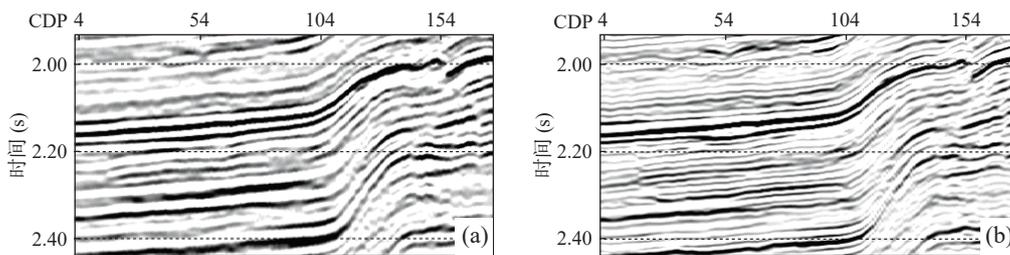


图3 拓频处理前(a)和拓频处理后(b)地震数据剖面对比

Fig. 3 Comparison of seismic data section (a) before and (b) after frequency extension processing.

剖面的相对振幅关系、波组特征及剖面结构保持不变。拓频处理后的地震剖面上大套复波被分离,显示的断层、断点更加清晰,层间出现更多的细节信息反射,呈现出的地震信息更加丰富、空间变化特征更加清晰,更有利于薄砂体储层的精细刻画描述。

2.5 剖面波组特征及井震关系

通过 HFE 拓频地震剖面与合成地震记录对比,目的层段在钻录井及测井资料上显示钻遇有砂层,但原始地震资料由于分辨率较低,地震剖面上无法识别。经过 HFE 拓频处理后,地震资料分辨率得到很大提高。

拓频前、后的合成地震记录表明在原始数据中与合成记录吻合较好的层位,在高频拓展处理结果中也能够很好的吻合。同时,高频拓展处理结果中分辨出来的薄层地震反射信息也能够与合成记录很好的吻合。通过对比(图4),拓频前的合成地震记录与原始数据井旁地震道对应良好。拓频后,在保持原有合成记录对应关系良好的基础上,与新分辨出的地震信息

的反射特征也有较好的对应关系。拓频后在目的层 21.2 m 的砂岩储层,顶底表现为波峰的反应,特征清晰,可以连续追踪,完全可以满足薄砂体储层的识别预测。

拓频处理前、后的地震对比剖面(图5), JL6 井测井资料表明该井在侏罗系三工河组 $J_1S_2^1$ 钻遇 16.5 m 的砂岩储层,在原始地震数据中反射特征为较大的复波谷反射,砂体与上、下围岩表现为复合响应,地震资料无法识别。拓频处理后复波谷得到分解,该套砂体表现为明显的波峰反射,顶底界面清楚,横向可对比追踪,地震资料分辨率得到提高,进一步说明 HFE 拓频处理可以使剖面保幅、保真,极大地提高了地震数据对于薄砂岩储层精细预测的精度需求。

3 AIW 波阻抗反演

波阻抗反演是储层分布预测和油藏描述的确定性方法,该方法将地震资料、测井资料和地质解释结

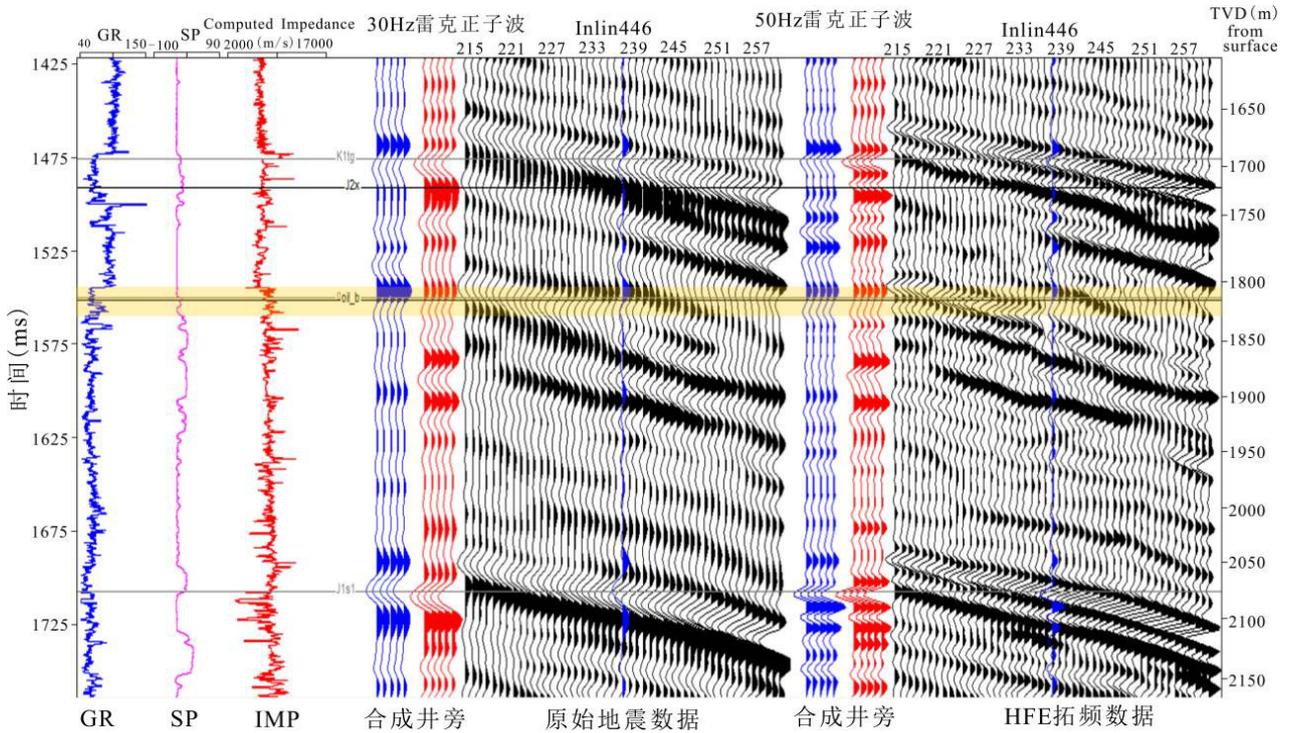


图4 JL108井拓频处理前后合成地震记录对比

Fig. 4 Synthetic seismogram comparison before and after frequency extension of Well JL108

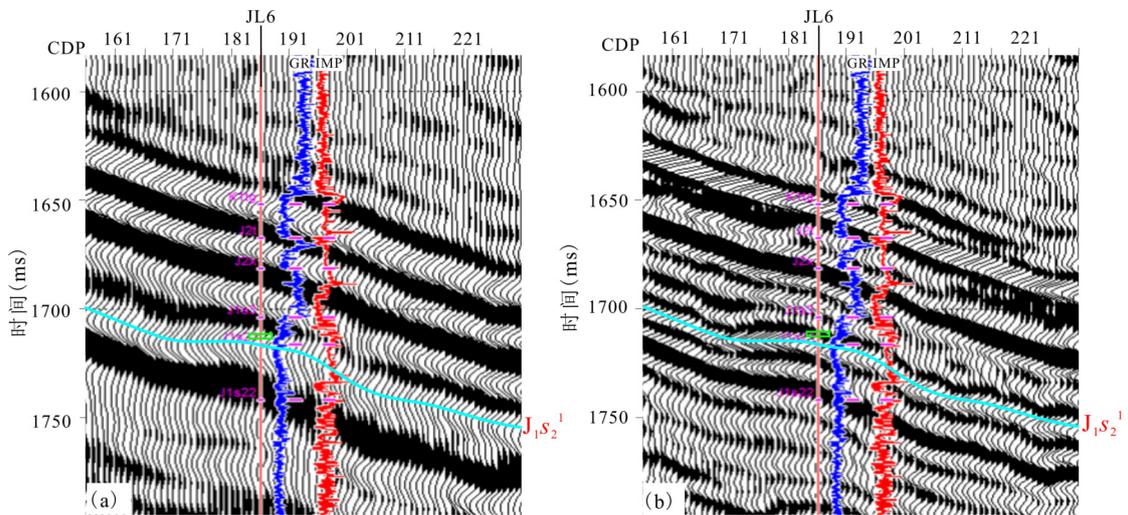


图5 JL6井拓频处理前(a)和拓频处理后(b)地震剖面

Fig. 5 Seismic section (a) before and (b) after frequency extension of Well JL6

果相结合,通过数学方法将地震剖面转换成波阻抗剖面,便于井震联合对比,能有效地研究地层岩性和物性的变化,指导油气藏的勘探和开发(谢裕江等, 2012)。常规的波阻抗反演方法存在的主要问题在于过于依赖初始模型和井的约束,薄储层识别精度及分辨率相对较低,反演结果常出现不稳定性 and 多解性(崔永福等, 2009)。基于小波边缘分析与井-震联合建模的波阻抗反演技术(AIW),利用小波边缘分析方法

从地震记录中直接提取地震属性特征参数,在断层参与的高密度层控构造框架约束下,同测井声波阻抗数据一起建立初始模型,相互约束、相互补充,减少了对井数据及初始模型的依赖程度,充分利用地震数据横向分辨率高、纵向控制层位密度大的优势,避免了常规波阻抗反演过程中初始模型建不准而产生的地质影响(王江等, 2023),反演结果更能真实的反映地下的地质情况。

3.1 储层地球物理响应特征

通过对研究区侏罗系三工河组二段一砂组($J_1s_2^1$)的岩性、测井曲线特征及测井解释成果进行综合分析表明,砂岩储层表现为低自然伽马、高电阻率、低密度、及高波阻抗特征。自然伽马与波阻抗交汇图可以清晰区分砂岩储层和泥岩,砂岩储层阻抗较泥岩阻抗有偏高趋势,阻抗值大于 $8000 [(m \cdot s^{-1}) \cdot (g \cdot cm^{-3})]$,泥岩阻抗值小于 $8000 [(m \cdot s^{-1}) \cdot (g \cdot cm^{-3})]$,交汇图图版可以很好的区分储层和非储层(图6)。

3.2 反演效果

地震资料通过拓频处理后,分辨率得到了提升,利用小波边缘分析方法从处理后的地震数据中提取反映岩性局部变化的地震属性特征参数信息,结合标定后的测井阻抗数据及地震解释的层位数据一起建立 AIW 波阻抗反演的初始模型,并参与迭代反演计算的控制,使反演运算收敛快速,反演结果正确(周展等, 2020)。根据反演结果及地震数据的信息,结合地质认识,可以预测目的层在平面和剖面上的分布。

从连井 AIW 波阻抗反演剖面(图7)可以看出,反演剖面纵向分辨率高,横向变化自然清晰,地层岩性

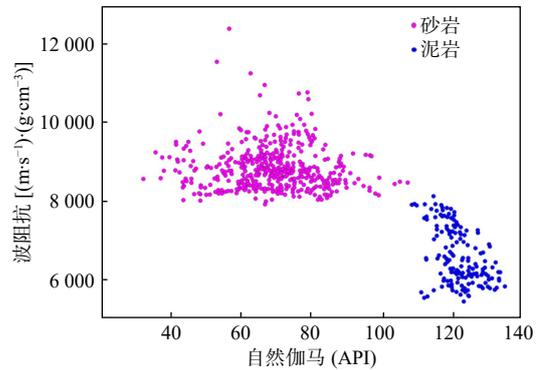


图6 侏罗系三工河组 $J_1s_2^1$ 自然伽马与波阻抗交会图
Fig. 6 Cross plot of natural gamma and impedance in $J_1s_2^1$ of the Jurassic Sangonghe Formation

信息丰富,反演结果能清晰的反映砂体之间的相互接触关系和岩性的横向变化,对薄砂体储层具有很好的识别能力。波阻抗反演剖面(图7a)上预测 G191 井砂体厚度为 9 m,实钻砂体厚度为 10 m,砂体厚度薄,分布范围小、横向不连续。纵向上预测的多套砂体空间叠置关系清晰(图7b),符合三角洲前缘水下分流河道砂体“厚度薄、纵向相互叠置、横向分布不连续”的特征(孙靖等, 2022; 于景维等, 2022),反演结果与实钻结果吻合程度高。

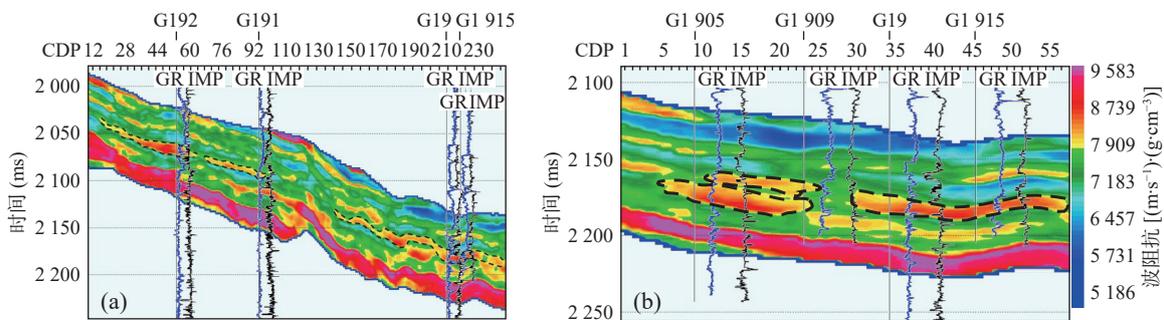


图7 AIW 波阻抗反演剖面

Fig. 7 Profiles of AIW acoustic impedance inversion

根据 AIW 反演结果,对侏罗系三工河组二段一砂组($J_1s_2^1$)砂体的顶、底界面进行精细层位追踪,以 $J_1s_2^1$ 砂组顶、底地震反射界面为层段时窗界限,按照砂岩和泥岩的波阻抗界限 $8000 [(m \cdot s^{-1}) \cdot (g \cdot cm^{-3})]$ 为阈值进行约束,预测了研究区侏罗系三工河组 $J_1s_2^1$ 砂体的厚度平面分布(图8a)。侏罗系三工河组 $J_1s_2^1$ 为三角洲前缘水下分流河道沉积背景(吴雨韩等, 2010; 梁爽等, 2019),由图8a可见,侏罗系三工河组 $J_1s_2^1$ 砂体的发育程度受沉积相带控制明显,来自于西南和西北方向的分支河道控制着砂体的平面展布,整

体平面厚度分布特征清晰,受分支河道影响,来自不同方向的砂体在工区中部交汇,砂体在分支河道中心区域较厚,边缘交汇区域较薄,横向连续性差,反演结果符合区域地质沉积规律,能相对客观地反映砂体的平面展布特征。区内断裂发育,是断层-岩性和岩性油气藏的发育区。通过地震拓频处理及储层反演共识别有利目标区4个(图8b),面积 $18.4 km^2$,其中1号目标区完钻的 JL108 井已获得 $12.4 t/d$ 的高产工业油流。实际钻井数据与储层预测结果对比后吻合程度较高,砂体厚度相对误差绝对值小于 $4.29%$ (表1),预

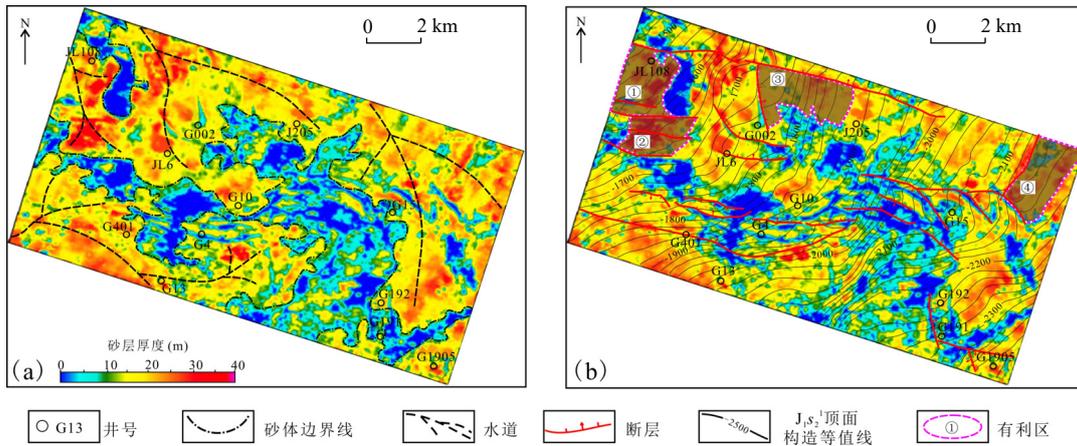


图8 侏罗系三工河组 $J_1s_2^1$ 砂层厚度预测图(a)及有利区(b)

Fig. 8 (a) Distribution prediction of sand body thickness of $J_1s_2^1$ and (b) favorable areas in the Jurassic Sangonghe Formation

表 1 侏罗系三工河组 $J_1s_2^1$ 砂体预测精度统计

Tab. 1 Statistics of sand body prediction accuracy of $J_1s_2^1$ in the Jurassic Sangonghe Formation

序号	井名	预测厚度(m)	实钻厚度(m)	相对误差(%)
1	JL101	21.00	20.70	1.45
2	JL061	8.30	8.50	-2.35
3	JL13	-	-	-
4	G401	6.70	7.00	-4.29
5	G13	17.10	16.50	3.64
6	JL6	22.50	22.70	-0.88
7	G002	10.10	9.80	3.06
8	G4	21.00	20.37	3.09
9	G10	17.30	18.00	-3.89
10	J205	17.50	18.00	-2.78
11	G15	15.10	14.50	4.14
12	G 191	9.80	9.50	3.16
13	G 192	23.10	23.50	-1.70
14	G 19	26.65	25.65	3.90
15	G1905	29.00	30.00	-3.33
16	G1909	35.00	34.00	2.94
17	G1915	22.85	23.50	-2.77
18	JL108	21.00	20.50	2.44

测精度满足薄砂体储层精细刻画的地质需求, 预测薄砂体储层的方法是可行的。

4 结论

(1)通过地震资料高频拓展处理, 三维地震数据的频带拓宽了 45 Hz, 地震数据的主频由 35 Hz 提高到

了 55 Hz, 提高了地震资料识别薄砂体储层的能力, 实现了对大于 8 m 的薄层砂岩的有效刻画。拓频地震资料反映的地震-地质信息更加丰富、层间反射细节清晰, 储层识别能力增强。

(2)以地震拓频资料为基础, 通过 AIW 波阻抗反演, 准确揭示了研究区侏罗系三工河组 $J_1s_2^1$ 砂体的空间展布, 识别出了 4 个含油气储层有利区, 钻井结果

与储层预测结果吻合程度高,实现了含油气薄储层的精细描述与预测。

(3)综合利用 HFE 高频拓展处理技术和 AIW 波阻抗反演可以有效提高薄砂体储层的识别精度,且效果明显,钻井吻合率高,可以作为薄砂体储层预测的有效方法,可为准噶尔盆地及其他地区岩性油气藏的勘探、开发提供可靠的技术支撑。

致谢:匿名审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- 陈波,朱国维,武延辉,等.基于广义 S 变换的透射槽波埃里相识别[J].物探与化探,2021,45(5):1303-1310.
- CHEN Bo, ZHU Guowei, WU Yanhui, et al. Research on identifying the airy phase of transmitted channel waves based on generalized S-transform[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1303-1310.
- 陈珊,徐兴友,罗晓玲,等.基于改进匹配追踪算法的时频属性在薄储层沉积微相研究中的应用[J].物探与化探,2018,42(5):1006-1012.
- CHEN Shan, XU Xingyou, LUO Xiaoling, et al. Time-frequency attribute based on modified matching pursuit algorithm and its application to sedimentary microfacies of thin reservoir area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(5): 1006-1012.
- 崔永福,彭更新,李国会,等.基于小波边缘分析建模的波阻抗反演技术[J].新疆石油地质,2009,30(2):261-263.
- CUI Yongfu, PENG Gengxin, LI Guohui, et al. Acoustic impedance inversion based on wavelet edge analysis and modeling[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(2): 261-263.
- 刁瑞.提高地震分辨率处理效果定量评价方法研究[J].物探与化探,2020,44(2):381-387.
- DIAO Rui. The quantitative evaluation method of seismic high resolution processing effect[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(2): 381-387.
- 付爽,纪宝强,李俊飞,等.准噶尔盆地石南地区中侏罗-下白垩统储层成岩作用研究[J].西北地质,2018,51(4):244-254.
- FU Shuang, JI Baoqiang, LI Junfei, et al. Diagenesis of Middle Jurassic Lower Cretaceous reservoirs in Shinan Area, Junggar Basin[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(4): 244-254.
- 季焕成,王江,刘荷冲,等.双向拓频高分辨率地震技术在乌夏断裂带的应用[J].地球物理学进展,2022,37(1):201-212.
- JI Huancheng, WANG Jiang, LIU Hechong, et al. Application of bidirectional extension frequency high-resolution seismic technique in Wuxia fault zone[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(1): 201-212.
- 贾春明,潘拓,余海涛,等.准噶尔盆地沙湾凹陷凤城组储层特征及物性控制因素分析[J].西北地质,2023,56(4):49-61.
- JIA Chunming, PAN Tuo, YU Haitao, et al. Controlling Factors on Physical Property and Reservoir Characters of Fengcheng Formation in Shawan Depression, Junggar Basin[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(4): 49-61.
- 蒋波.地震资料重处理的方法技术[J].石油物探,2020,59(4):551-563.
- JIANG Bo. Seismic data reprocessing[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(4): 551-563.
- 孔省吾,张云银,沈正春,等.波形指示反演在灰质发育区薄互层浊积岩预测中的应用-以牛庄洼陷沙三中亚段为例[J].物探与化探,2020,44(3):665-671.
- KONG Xingwu, ZHANG Yunyin, SHEN Zhengchun, et al. The application of waveform inversion prediction of thin turbidite reservoir to calcareous depositional area: A case study of E3s23 in Niuzhuang sag[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(3): 665-671.
- 李鹏飞,肖又军,成锁,等.频谱恢复高分辨处理技术在薄层识别研究中的应用[J].物探化探计算技术,2022,44(4):426-434.
- LI Pengfei, XIAO Youjun, CHENG Suo, et al. Application research of thin layer recognition based on spectrum recovery high resolution processing[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 44(4): 426-434.
- 梁爽,杜社宽.准噶尔盆地中拐凸起侏罗系三工河组储层特征及控制因素[J].沉积学报,2019,37(6):1269-1278.
- LIANG Shuang, DU Shekuan. Reservoir characteristics and factors controlling the Jurassic Sangonghe Formation in Zhongguai Uplift, Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(6): 1269-1278.
- 林火养,贺海波,吴佳朋,等.拓频技术在提高储集层预测精度中的应用[J].录井工程,2019,30(2):111-115.
- LIN Huoyang, HE Haibo, WU Jiapeng, et al. Application of frequency expanding technique in improving reservoir prediction accuracy[J]. Mud Logging Engineering, 2019, 30(2): 111-115.
- 林帅,王权国,张春. HFE 拓频处理技术在周清庄油田及周边地区的应用[J].录井工程,2018,29(03):36-40.
- LIN Shuai, WANG Quanguo, ZHANG Chun. HFE frequency expanding processing technique in Zhou qingzhuang oilfield and its surrounding areas[J]. Mud Logging Engineering, 2018, 29(03): 36-40.
- 刘鸿洲,王孟华,张浩,等.基于分频构形反演方法的河道砂精准预测-以华北冀中探区赵皇庄地区为例[J].物探与化探,2021,45(5):1311-1319.
- LIU Hongzhou, WANG Menghua, ZHANG Hao, et al. Accurate prediction of channel sand based on frequency divided configura-

- tion inversion method: A case study of Zhaohuangzhuang area in Jizhong Sag, Huabei Oilfield[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(5): 1311-1319.
- 裴森奇, 胡欣, 王兴志, 等. 四川盆地九龙山地区三叠系飞仙关组薄层鲕粒滩储层定量描述及预测[J]. *海相油气地质*, 2020, 25(2): 155-161.
- PEI Senqi, HU Xin, WANG Xingzhi, et al. Quantitative description and predication of thin oolitic shoal reservoir of Triassic Feixianguan Formation in Jiulongshan area, Sichuan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2020, 25(2): 155-161.
- 宋维琪, 赵万金, 冯磊, 等. 地震高分辨率反演和地质模拟联合预测薄储层[J]. *石油学报*, 2005, 26(1): 50-54.
- SONG Weiqi, ZHAO Wanjin, FENG Lei, et al. Prognoses of thin reservoir by combining seismic high resolution inversion technology and geological simulation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(1): 50-54.
- 孙靖, 薛晶晶, 费李莹, 等. 粗粒浅水三角洲沉积特征及模式——以准噶尔盆地莫北地区侏罗系三工河组为例[J]. *东北石油大学学报*, 2022, 46(2): 13-22.
- SUN Jing, XUE Jingjing, FEI Liying, et al. Sedimentary characteristics and model of coarse-grained shallow-water delta: a case study of Jurassic Sangonghe Formation in Mobei Area, Junggar Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022, 46(2): 13-22.
- 王江, 赵传军, 李国福, 等. 地震拓频处理技术在乌尔逊断陷北部储层预测中的应用[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(4): 125-131.
- WANG Jiang, ZHAO Chuanjun, LI Guofu, et al. Application of seismic frequency expanding processing technology in the reservoir prediction of North Wuerxun Rift[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(4): 125-131.
- 王江, 王雪峰, 付尤中, 等. 基于小波边缘分析与井-震联合建模的波阻抗反演技术在乌尔逊断陷储层预测中的应用[J]. *大庆石油地质与开发*, 2023, 42(2): 133-142.
- WANG Jiang, WANG Xuefeng, FU Youzhong, et al. Application of wave impedance inversion technology based on wavelet edge analysis and well-seismic joint modeling in reservoir prediction of Wuerxun rift[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2023, 42(2): 133-142.
- 王小军, 赵飞, 张琴, 等. 准噶尔盆地金龙油田佳木河组火山岩储层孔隙类型及特征[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(1): 144-151.
- WANG Xiaojun, ZHAO Fei, ZHANG Qin, et al. Pore types and characteristics of volcanic reservoirs of the Jiamuhe Formation in Jinlong oilfield, Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(1): 144-151.
- 吴雨韩, 吴采西, 瞿建华, 等. 克拉玛依中拐地区三工河组和八道湾组沉积相新认识[J]. *新疆石油地质*, 2010, 31(6): 590-592.
- WU Yuhan, WU Caixi, QU Jianhua, et al. New cognition of sedimentary facies of Sangonghe and Badaowan Formations in Karamay Zhongguai Area[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2010, 31(6): 590-592.
- 谢裕江, 郑金明, 刘高. 苏里格气田S区块有效砂岩储层波阻抗反演[J]. *工程地球物理学报*, 2012, 9(3): 311-316.
- XIE Yujia, ZHENG Jinming, LIU Gao. Acoustic impedance inversion for the reservoir of valid sandstone in the S area of Sulige Gas Field[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2012, 9(3): 311-316.
- 徐衍和. 优化高频拓展法在煤田勘探中的应用[J]. *中国煤田地质*, 2006, 18(2): 52-54.
- XU Yanhe. Application of optimized high-frequency expanding technique in coalfield exploration[J]. *Coal Geology of China*, 2006, 18(2): 52-54.
- 于景维, 张庆伟, 祁利祺, 等. 白家海地区下侏罗统三工河组高分辨层序地层格架内岩性油气藏研究[J]. *西北地质*, 2022, 55(2): 199-208.
- YU Jingwei, ZHANG Qingwei, QI Liqi, et al. Analysis of litho-stratigraphic reservoirs distribution in high-resolution sequence stratigraphic at the Lower Jurassic Sangonghe Formation in Baijiahai Area[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(2): 199-208.
- 俞初安, 司庆红, 彭胜龙. 砂岩型铀矿综合探测技术和实践——以二连盆地BYH铀矿为例[J]. *华北地质*, 2024, 47(3): 23-35.
- YU Reng'an, SI Qinghong, PENG Shenglong. Comprehensive exploration techniques and Practices for Sandstone type uranium deposit: a case study of BYH uranium deposit in Erlian Basin[J]. *North China Geology*, 2024, 47(3): 23-35.
- 袁红军, 吴时国, 王箭波, 等. 拓频处理技术在大牛地气田勘探开发中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2008, 43(1): 69-75.
- YUAN Hongjun, WU Shiguo, WANG Jianbo, et al. Application of frequency broadening processing technique in exploration and development of Daniudi gas field[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2008, 43(1): 69-75.
- 张鹏飞, 张世晖. 西湖凹陷平湖组砂泥岩岩性神经网络地震预测[J]. *物探与化探*, 2021, 45(4): 1014-1020.
- ZHANG Pengfei, ZHANG Shihui. Neural network seismic prediction of sand and mudstone lithology of Pinghu Formation in Xihu Sag[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(4): 1014-1020.
- 张益, 魏峰, 查玉强, 等. 地震拓频技术在涪洲6-12油气田薄储层刻画中的应用[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 38(2): 25-34.
- ZHANG Yi, WEN Feng, ZHA Yuqiang, et al. Application of seismic extension frequency technology in thin reservoir characteriza-

- tion of Weizhou 6-12 oil/gas field[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2023, 38(2): 25-34.
- 张誉洋, 李永军, 郑孟林, 等. 新疆车排子油田车探1井3 538~3 774 m井段孢粉组合及地质意义[J]. 西北地质, 2022, 55(2): 157-165.
- ZHANG Yuyang, LI Yongjun, ZHENG Menglin, et al. Sporopollen assemblage and geological significance of 3 538~3 774 m section in well Chetan1, Chepaizi oilfield, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(2): 157-165.
- 张全, 王一品, 张伟, 等. 地震波能量补偿的并行反Q滤波方法研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2023, 45(1): 24-32.
- ZHANG Quan, WANG Yipin, ZHANG Wei, et al. Research on Parallel Inverse Q Filtering Methods for Seismic Wave Energy Compensation[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2023, 45(1): 24-32.
- 赵斌, 明君, 马奎前, 等. 高频拓展处理技术在渤海H油田开发中的应用[J]. 石油地质与工程, 2011, 25(5): 45-49.
- ZHAO Bin, MING Jun, MA Kuiqian, et al. Application of high frequency expansion processing technology in Bohai Sea H oilfield development[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(5): 45-49.
- 赵飞, 韩宝, 钟磊, 等. 准噶尔盆地中拐地区致密砂岩气成藏特征及富集规律[J]. 西北地质, 2024, 57(5): 142-155.
- ZHAO Fei, HAN Bao, ZHONG Lei, et al. Accumulation Characteristics and Enrichment Regularity of Tight Sandstone Gas Reservoirs in Zhongguai Area, Junggar Basin[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(5): 142-155.
- 周展, 杨朝强, 洪楚侨, 等. 深水少井区重力流薄泥岩隔夹层预测方法[J]. 天然气工业, 2020, 40(12): 52-58.
- ZHOU Zhan, YANG Chaoqiang, HONG Chuqiao, et al. A prediction method of thin mudstone interlayers with gravity flow in deep water areas with fewer wells[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(12): 52-58.
- 周宗良, 吴刚, 肖建玲, 等. 地震拓频处理技术在歧口深层气藏储层预测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(5): 604-609.
- ZHOU Zongliang, WU Gang, XIAO Jianling, et al. The application of seismic frequency expanding processing technique to deep gas reservoir prediction in Qikou[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(5): 604-609.
- 邹拓. 港西油田六区河道砂体储层预测综合研究[J]. 地质学刊, 2015, 39(3): 475-480.
- ZOU Tuo. A comprehensive study of channel sand body prediction in block six of Gangxi oilfield[J]. Journal of Geology, 2015, 39(3): 475-480.
- 邹阳, 韦盼云, 朱涛, 等. 准噶尔盆地石西油田石南4井区侏罗系头屯河组储层特征及有利区展望[J]. 西北地质, 2020, 53(2): 235-243.
- ZOU Yang, WEI Panyun, ZHU Tao, et al. The reservoir characteristics and favorable zone prospect of the Jurassic Toutunhe Formation in Wellblock Shinan4, Shixi Oilfield, Junggar Basin[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(2): 235-243.