

文章编号: 1001-1749(2023)04-0420-08

# 地震拓频处理技术在S油田 铜钵庙储层预测中的应用

李文涛

(1. 大庆油田有限责任公司 呼伦贝尔分公司, 呼伦贝尔 021000)

**摘要:** S油田主要含油层为铜钵庙组上部砂砾岩,为扇三角洲前缘分流河道砂体沉积。研究区纵向发育三套砂砾岩,是主要目的层,但砂体厚度薄,薄互层频率调谐严重,影响砂体分辨和储层预测。为实现三套砂砾岩的有效区分,采用井震结合的地震资料谱蓝化处理,将频带由10 Hz~60 Hz拓宽至10 Hz~90 Hz,极大提高了地震资料的分辨率和薄储层预测精度。在高分辨率地震数据基础上,采用波形指示反演,更高精度地描述了砂体纵向分布、平面展布及储层发育状况。实钻表明,基于地震拓频处理的砂体预测精度更高,在勘探开发及有利区评价和井位部署中能发挥更重要的作用。

**关键词:** 拓频处理; 谱蓝化; 分辨率; 薄储层; 砂体预测

**中图分类号:** P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.04.02

## 0 引言

随着油气勘探与开发程度的提高,勘探目标由常规的油藏向深层的致密油气藏转变。在此过程中,获得更高分辨率地震资料仍是研究的重点和难点<sup>[1-2]</sup>。为满足油气藏精细解释的需求,袁红军<sup>[3]</sup>在大牛地气田勘探实践中认为:地震数据拓频处理是薄储层反演、气藏描述的重要步骤。针对砂泥岩薄互层的研究,众多学者提出了多种地震数据拓频处理方法,推动了高分辨处理技术的发展。目前常见的地震数据拓频处理技术主要分为两大类型:①预测反褶积、压缩感知、盲反褶积及盲源分离等时间域高分辨处理技术;②反Q滤波、谱白化、谱蓝化<sup>[4]</sup>等频率域拓频技术<sup>[5-9]</sup>。

以S油田铜钵庙储层为例,研究地震拓频处

理技术及应用效果。研究区油层埋深在2 000 m~3 000 m,主要含油层位为下白垩统铜钵庙组I、II、III油组,为三套砂砾岩储层。其中,上下两套为纯砂砾岩层,中间为砂泥岩互层段,单砂体厚度为30 m左右。储层孔隙度为9.3%,渗透率概率中值为 $0.81 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,属特低孔隙、特低渗透致密储层。三套储层产能差异较大,上部砂砾岩体产量为下部两套储层产量的4.8倍,为主力产油层。下部两套砂砾岩体产能低,经济效益差。由于储层致密,上、中、下三套砂体在地震资料上的响应特征差异小,采用常规地震数据无法有效刻画上部优质储层分布特征,制约了区块开发评价以及井位部署。因此,需要在研究区开展拓频处理,有效提高原始数据分辨率,突出上部优质储层反射,为储层预测及精细构造解释奠定扎实资料基础。

收稿日期: 2022-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41930431)

第一作者: 李文涛(1983-),男,硕士,高级工程师,主要从事断块油田精细地质研究工作,E-mail:h\_liwt@petrochina.com.cn。



图 1 苏仁诺尔油田构造位置

Fig. 1 Structural location of surinuoer oilfield

## 1 储层地质特征

研究区位于海拉尔盆地乌尔逊凹陷的北部的 S 油田。海拉尔盆地属于复杂断陷盆地,断层多,断块碎,发育一系列东北向正断层控制形成的箕状断陷。乌尔逊凹陷是海拉尔盆地的主要含油区带(图 1)。铜钵庙组地层沉积时期,盆地断陷活动频繁,受东西两侧隆起区影响,存在两个方向物源,形成了大面积扇三角洲及近岸水下扇河道砂体。

研究区目的层为铜钵庙组,岩性以砂砾岩为主,含少量凝灰质砂岩及凝灰岩,中间局部含褐色、灰黑色、黑灰砂泥岩。地层厚度在 700 m 左右,中部地层与上部地层不整合接触。测井特征呈凹字形,可以划分为上、中、下三套储层,即 I、II、III 三个油层组(图 2)。

目的层沉积时期,盆地处于裂陷早期阶段,气候整体比较干燥,碎屑物少,水体浅水动力弱,沉积地层厚度大。研究区主要储集砂体有两大类:一是扇三角洲前缘水下分流河道砂体,二是近岸水下扇中主河道砂体,区别在于分选状况不一,分布位置不同。研究区发育大段的厚层砂砾岩体,砂地比高,单井砂地比在 0~0.99,平均值为 0.73。整体划分为 I、II、III 三个油层组,主力含油砂体集中分布在顶部 I 油组。I 油组为砂砾岩,箱状河道发育,因含泥量低,测井曲线特呈“一高一低”,即:电阻率高、声波时差大。产油强度高达 0.43 t/d·m,首年年产油达 3 000 t,为 主力 产 油 层 位。II 油 组 为 砂 泥 互 层,测井曲线为锯齿状,基本不产油。III 油组为砂砾岩,测井曲线呈钟型,自然伽马值大于 150 API,整体电

阻率值较 I 油组低一个台阶,为次要产油层位,产油强度仅 0.07 t/d·m,首年累计产油仅 500 t 左右。

由于上部南一段为纯泥岩,与铜钵庙地层波阻抗差异大,不管是否存在 I 油组主力砂体均会形成一个强反射,加之地震资料频率低,上下含油砂体的物性差异小,常规反演及属性切片无法区分。同时常规反演显示砂体大面积连续分布,实际钻井过程发现部分井上部高阻含油砂体缺失,导致低产低效。为实现 I 油组高阻砂砾岩体定量预测,有效区分上下含油砂体,有必要开展井震结合联合拓频处理,提高数据品质和优质储层预测精度。

## 2 谱蓝化拓频处理方法

常规谱白化处理假设反射系数属于白噪序列,通过对振幅谱拉平处理实现数据拓频。而实际情况下,井中反射系数往往不满足白噪谱的假设,数据处理精度会受到严重影响。测井数据分析发现,反射系数的频率与振幅具有正相关性,即“高频高振幅、低频低振幅”,呈“蓝色”趋势。因此,可采用谱蓝化技术对地震数据进行提高分辨处理。

地震信号  $S(t)$  由反射系数序列  $R(t)$  与子波  $W(t)$  褶积获得式(1)。

$$S(t) = R(t) * W(t) \quad (1)$$

转换到频率域:

$$A_S(f) = A_R(f) \cdot A_W(f) \quad (2)$$

式中的三个量分别为地震信号、反射系数序列和子波的频谱,  $f$  为频率。其中,反射系数序列的频谱是白噪反射系数频谱和测井数据得到的理想反射系数频谱的乘积。理想情况下白噪的频谱取 1,因此反射系数频谱可以近似由测井数据得到。反射系数的参数化方法可用  $z$  变换来表示<sup>[10]</sup>:

$$F(z) = \frac{1 - \alpha z}{1 - \beta z} \quad |\alpha| < 1, |\beta| < 1 \quad (3)$$

式中:  $\alpha, \beta$  为两个待定参数。其数值通过与测井数据得到的反射系数频谱进行最小二乘拟合得到:

$$\sum |F(z) - A_R(f)|^2 = \min \quad (4)$$

利用地震频谱与反射系数频谱匹配设计滤波算子(即谱蓝化算子)对地震记录进行补偿,得到高保真、高信噪比及高分辨率地震数据。其流程如图 3 所示,利用实测的声波时差、密度曲线求取地层的反射系数谱,并拟合振幅随频率变化的关系曲线,得到“蓝谱”;然后循环设定不同的谱蓝化算子,迫使地震数据获得的频谱与测井反射系数谱逐步相似,并

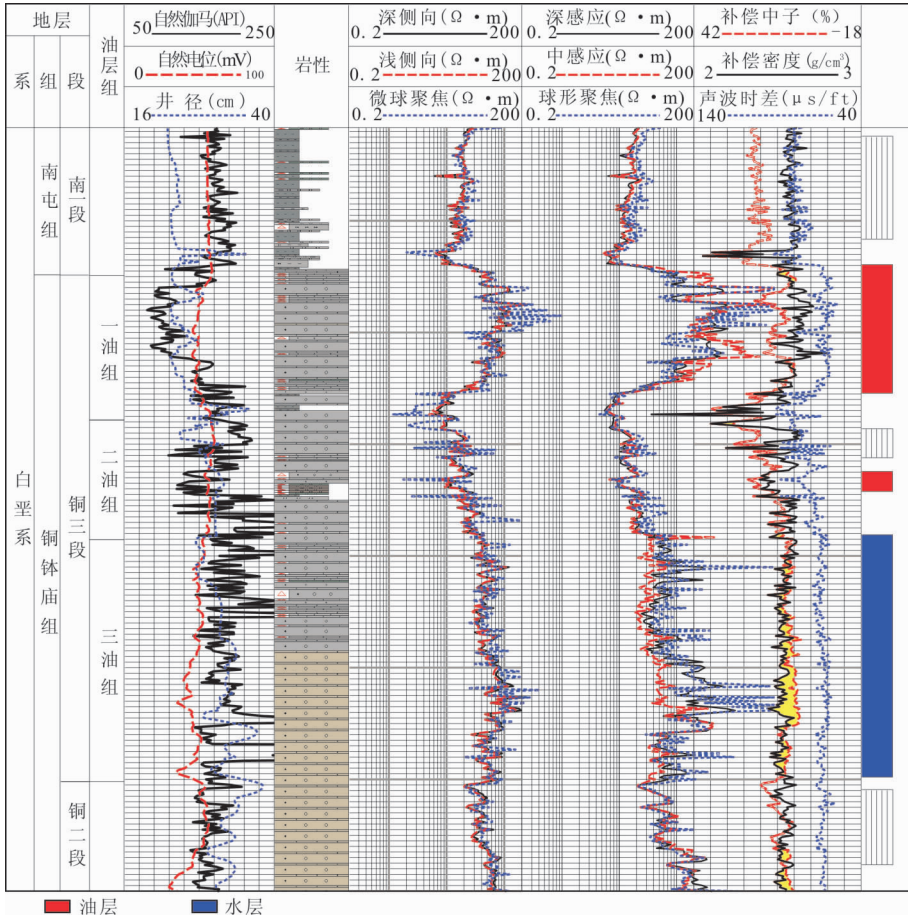


图 2 储层综合柱状图(井 1)

Fig. 2 Comprehensive column of reservoir (Well 1)

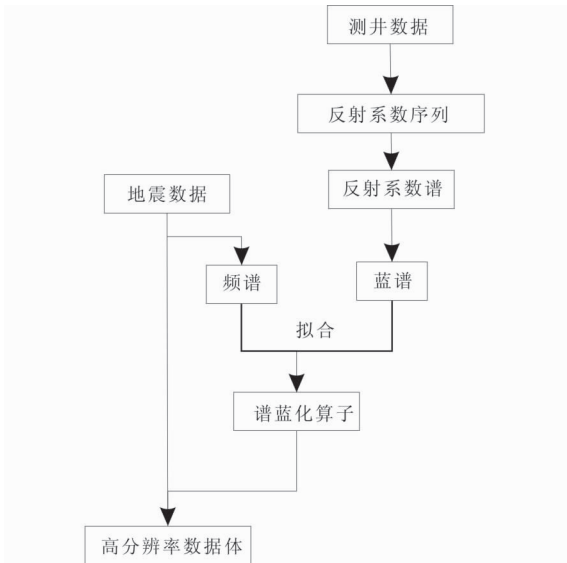


图 3 谱蓝化拓频处理流程图

Fig. 3 Flow chart of well seismic simulation frequency

分。采用该方法处理后的拓频数据体的振幅谱曲线形态与采用测井曲线计算得到的地层实际反射系数谱形态极为相似,可以提升原始地震资料的纵向分辨率。不同地区的实际应用结果表明该方法可操作性强,对薄层的刻画具有明显的优势<sup>[11]</sup>。

### 3 谱蓝化拓频处理

#### 3.1 谱蓝化算子求取

谱蓝化拓频的核心步骤是谱蓝化算子的计算。利用完钻井的测井资料计算反射系数频谱,拟合振幅与频率的关系如图 4 蓝色曲线所示。对原始地震资料进行分析得到平均频谱如图 5 所示,可以看出低截频率为 4 Hz,高截频率为 152 Hz;对平均振幅谱拟合得到光滑的振幅谱如图 6(a)所示;循环设定不同的谱蓝化算子,直至地震数据的平均频谱(图 6(b)红色曲线)与测井求取的反射系数频谱形态相似,且符合上述求取的振幅与频率的关系,计算谱蓝化算子如图 7 所示。

将该算子与地震数据褶积(谱蓝化拓频处理)得到新的数据体,恢复地震数据中信号严重衰减的高频部

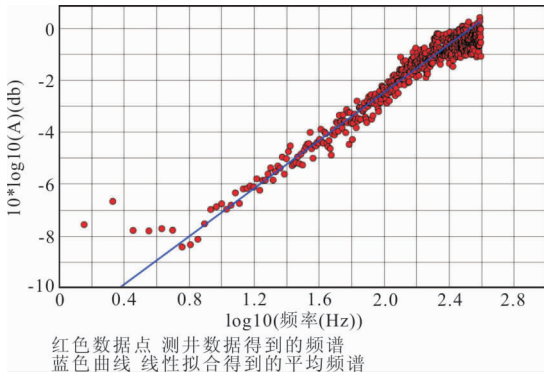


图 4 测井反射系数平均频谱

Fig. 4 Average spectrum of logging wave impedance

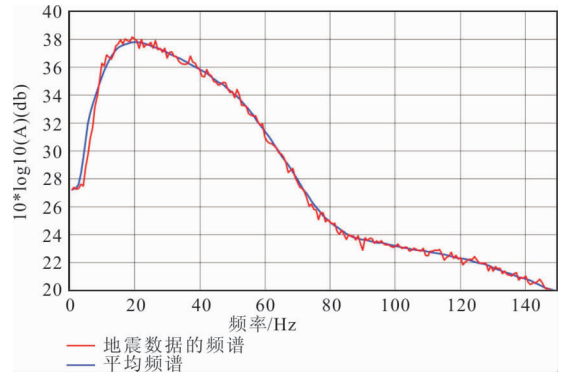


图 5 地震道平均频谱

Fig. 5 Average spectrum of seismic channels

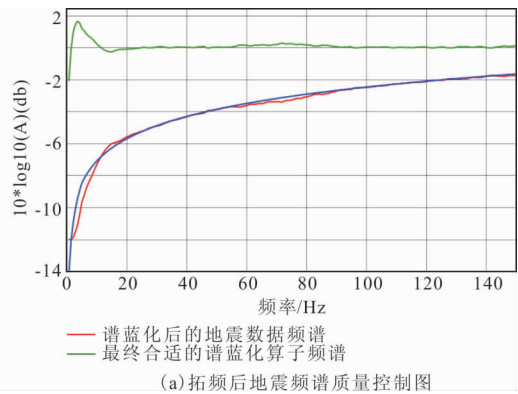
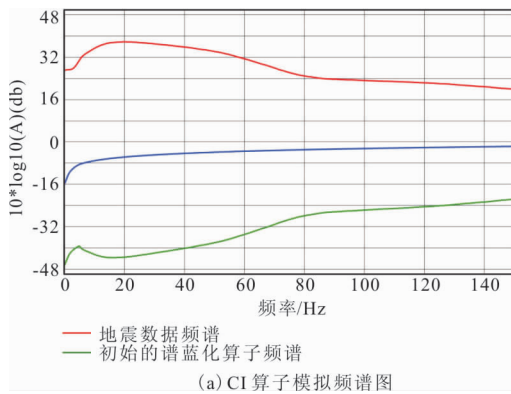


图 6 谱蓝化算子匹配(蓝色曲线为测井得到的反射系数频谱)

Fig. 6 Spectral bluing operator

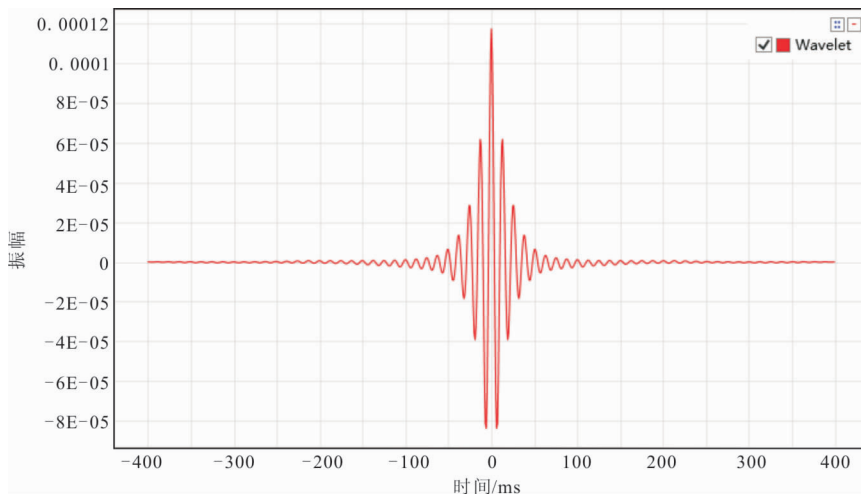


图 7 谱蓝化算子(时间域)

Fig. 7 Time domain amplitude spectrum of spectral bluing operator

### 3.2 拓频处理

对地震资料进行谱蓝化拓频处理,拓频前后的单道地震记录时频谱如图 8 所示。对比时频谱可看出,拓频后地震数据 60 Hz~110 Hz 的高频能量得

到增强,有效提高了单道分辨率。图 9 为谱蓝化拓频处理前后的地震剖面 and 地震信号频谱对比图,对比发现,处理后的过井的地震剖面纵向分辨率得到明显改善,地震资料的主频由原先的 30 Hz 提升至

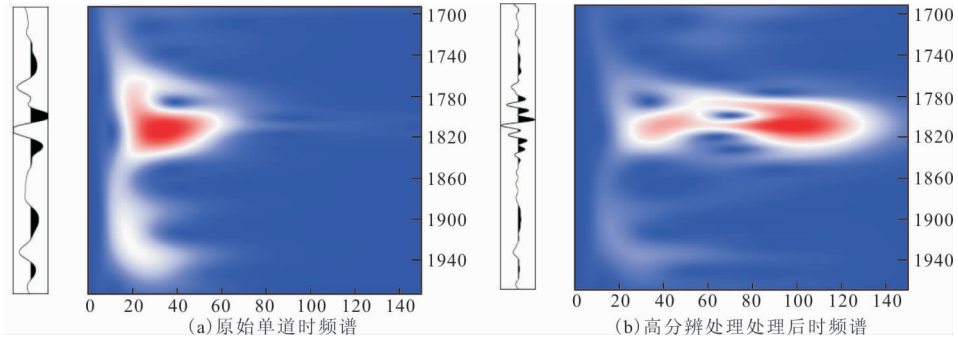


图 8 目的层时频分析结果对比

Fig. 8 Comparison of time-frequency analysis results of target layer

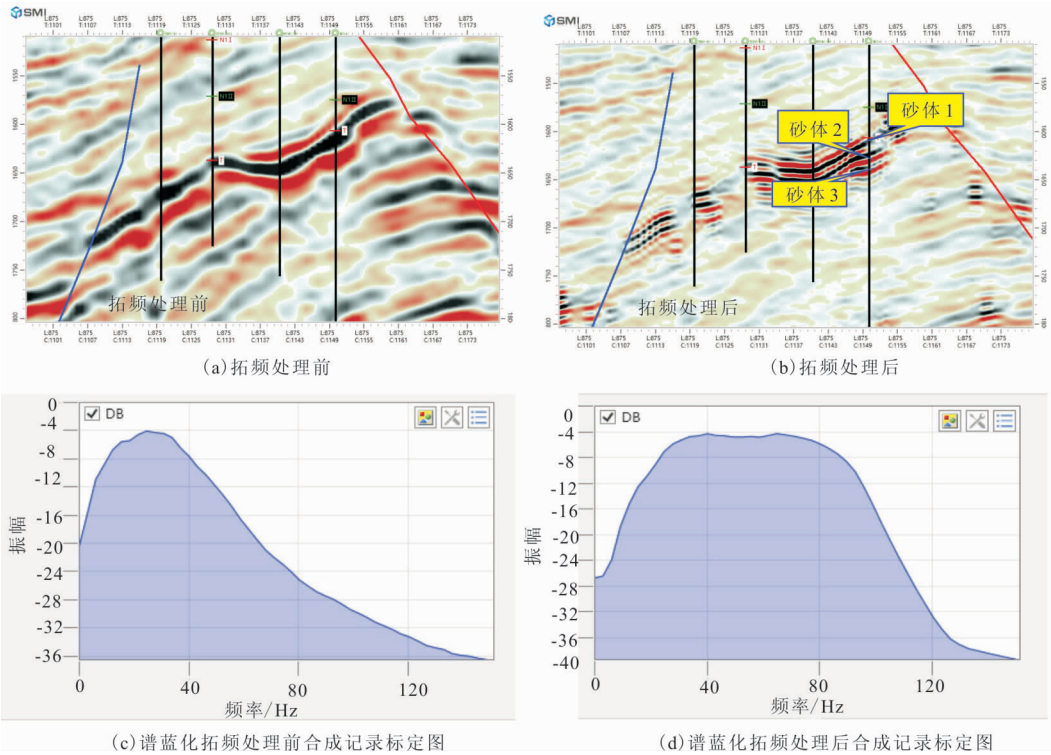


图 9 谱蓝化拓频处理前后地震剖面与地震信号频率谱对比图

Fig. 9 Comparison of seismic profile and seismic signal frequency spectrum before and after well seismic simulation frequency extension processing

50 Hz,有效信号的频带宽度由 10 Hz~60 Hz 拓宽至 10 Hz~90 Hz,其中 40 Hz~90 Hz 能量明显提高。处理后的剖面层位更清晰,断点更加明显,有效提高了原始地震资料的分辨率。

对比处理前后地震资料合成记录标定结果,可以看出,合成记录标定相关系数由 0.73 上升到 0.97。铜钵庙上部高阻层由 1 个同向轴变成 3 个。测井曲线显示此处为三个砂体叠置,表明处理后的地震资料与砂体特征一致。地震拓频处理后的剖面可以体现铜钵庙地层内部不同层序沉积体的差异,可以甄别出不同砂体在地震上的反射特征。同时,

利用高频子波对拓频后的地震数据重新进行标定发现,反射系数与合成记录相关性增强,标定吻合率提升,纵向分辨率显著提高(图 10)。波阻抗曲线表明储层砂体的波阻抗数值在  $11\ 085\ \text{m/s} \times \text{g/cm}^3 \sim 13\ 485\ \text{m/s} \times \text{g/cm}^3$  之间。

## 4 应用效果

在拓频处理后的资料基础上,对处理前后的地震数据开展叠后波形指示反演并结合岩石物理分析明确研究区砂岩与泥岩的阻抗特征。图 11 为高分

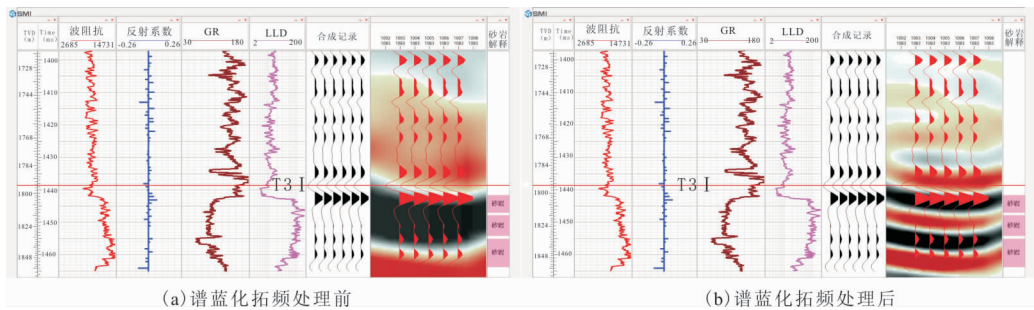


图 10 谱蓝化拓频处理前后合成记录标定对比图

Fig. 10 Calibration comparison of synthetic records before and after well seismic simulation frequency extension processing

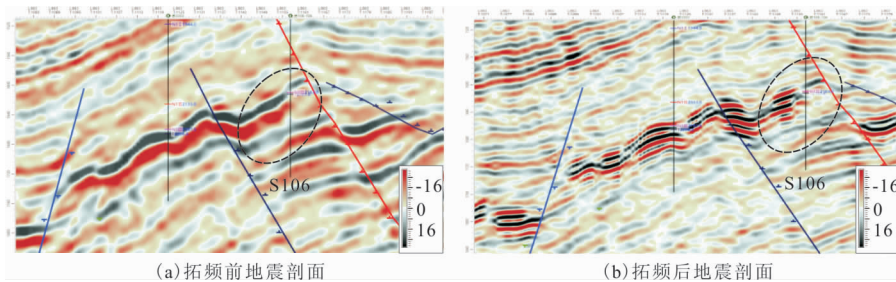


图 11 过 S106 井拓频地震剖面

Fig. 11 Seismic profile frequency extension of well guo S106

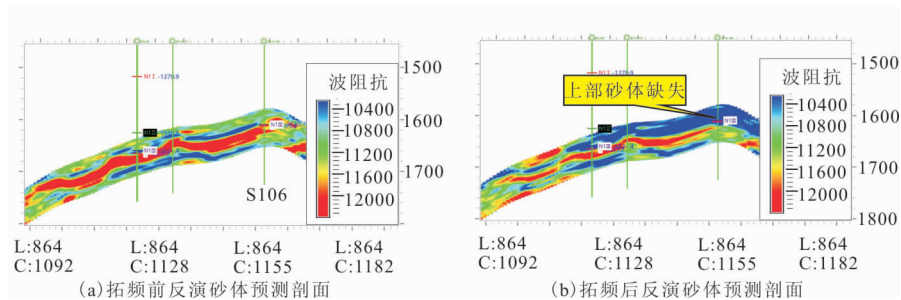


图 12 过 S106 井拓频反演砂体预测剖面

Fig. 12 Inversion sand body prediction profile of well guo S106

辨前后的地震数据,图 12 为拓频前后的反演结果,对比图 12(a)和图 12(b)可看出,拓频后反演结果的砂体边界刻画更清晰。图 12(b)的 S106 井上部波阻抗小于  $11\ 000\ \text{m/s} \times \text{g/cm}^3$  表明砂体不发育,而钻井表明 S106 井上部砂体不发育,这一结果与图 12(b)吻合,可见拓频处理后反演结果准确度更高,更有利于储层的识别。

对比苏 33 区块,拓频前后预测的砂体分布状况(图 13)可以看出,部分区域砂体预测结果发生大的变化。由于拓频之前的地震分辨率较低,低频地震信号反应的是多个薄层叠加效应,而拓频之后由于高频信号能够区分出较薄的砂体,使得波阻抗切片反应的是单个砂体的阻抗,这可能是导致拓频前后

地震资料反演结果出现了一定差异的原因。其中苏 33 西侧断块,原预测砂体发育差,拓频后预测砂体发育,为新发现的潜力目标区。

2021 年利用拓频后的反演结果,进行顶部优质砂体重新预测,在有利区部署设计井位 60 口(含水平井 1 口),目前已完钻 47 口井。其中,46 口井钻遇上部优质储层,单井钻遇有效厚度为 36.8 m,较方案设计增加 9.0 m。储层预测符合率由 2020 年的 83.2% 提升至 97.8%,其中水平井钻遇有效砂体为 699 m,钻遇率为 100.0%,油斑显示为 612 m,有效支撑了开发方案部署及钻井现场跟踪。

应用成果表明,谱蓝化拓频处理后地震资料分辨率提高了,以此为基础获得的反演结果与实际钻

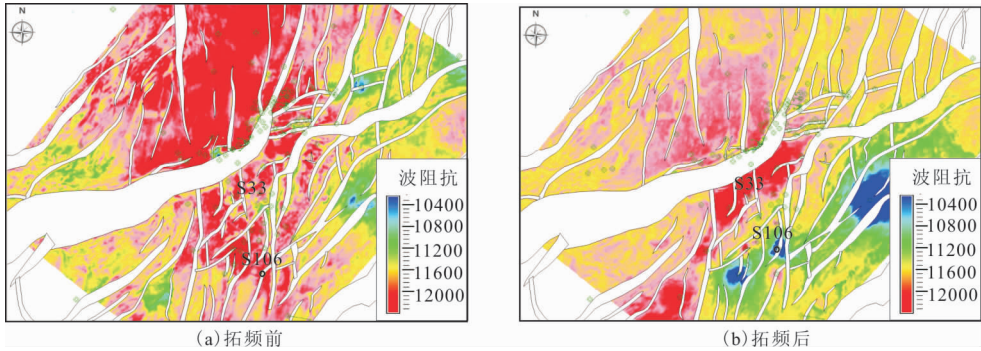


图 13 拓频处理前后砂体预测分布状况对比图

Fig. 13 Comparison diagram of sand body predicted distribution before and after frequency extension treatment

井效果符合率更高,砂体厚度预测也更精确,达到了提高可靠预测储层的目的,在效益开发中发挥了重要作用。

## 5 结论

通过井震结合的地震资料谱蓝化处理、波形指示反演来描述砂体纵向分布、平面展布及储层发育状况,取得了以下结论:

1) 谱蓝化拓频技术,可以将地震和测井数据有机融合在一起,在不改变原始地震资料信噪比、时频特性及相对振幅特征的前提下,提高地震资料的分辨率。

2) 通过谱蓝化拓频处理,原始数据的主频得到明显提高(30 Hz 提高到 50 Hz),频带得到有效拓宽(10 Hz~60 Hz 拓宽至 10 Hz~90 Hz),处理后的数据体层间反射细节更加清晰,能更好地反映薄储层分布特征。

3) 在拓频地震资料的基础上开展波形指示反演,能更有效刻画砂体平面展布,识别顶部优质储层,提高优质储层预测精度,可为油田开发井位部署和优化调整提供重要支撑。

## 参考文献:

[1] 王月蕾. 基于保幅纯波的多属性模型回归在储层描述中的应用:以准西车排子地区沙一段 1 砂组为例[J]. 特种油气藏, 2013, 20(2): 48—51.  
WANG Y L. Application of multi-attribute model regression based on amplitude preserving pure wave in reservoir description taking sand formation 1 of Shahejie Formation in zhunchepaizi area as an example[J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2013, 20(2): 48—51.

(In Chinese)

[2] 陈学国. 谱反演拓频处理技术在车排子地区白垩系储层描述中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(1): 138—143.  
CHEN X G. Application of the spectral-inversion extended frequency processing technique in the characterization of cretaceous reservoirs in Chepaizi area[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(1): 138—143. (In Chinese)

[3] 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 H J, WU SH G, WANG J B, et al. Application of extension frequency processing technology in exploration and development of Daniudi gas field[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2008, 43(1): 69—75. (In Chinese)

[4] 杨培杰. 复数域约束最小二乘拓频[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(6): 1244—1253.  
YANG P J. Constrained least square frequency extension in complex field[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(6): 1244—1253. (In Chinese)

[5] 曹鉴华, 邱智海, 郭得海, 等. 叠后地震数据的谱反演处理技术及其应用浅析[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 387—393.  
CAO J H, QIU Z H, GUO D H, et al. Post-stack seismic spectral-inversion technique and its application[J]. Progress in Geophys, 2013, 28(1): 387—393. (In Chinese)

[6] 孙夕平, 张研, 张永清, 等. 地震拓频技术在薄层油藏开发动态分析中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(5): 695—699.  
SUN X P, ZHANG Y, ZHANG Y Q, et al. Application of seismic frequency extension technique in devel-

- opment performance analysis of thin-layer reservoirs [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2010, 45(5): 695-699. (In Chinese)
- [7] 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, 21(5): 45-49.  
ZHAO B, MING J, MA K Q, et al. Application of high frequency extended processing technology in the development of Bohai H Oilfield[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2011, 21(5): 45-49. (In Chinese)
- [8] 刘建伟, 高秋菊, 师涛. 谱蓝化技术在大王庄油田储层预测中的应用[J]. *复杂油气藏*, 2016, 9(1): 31-34.  
LIU J W, GAO Q J, SHI T. Application of spectral bluing frequency technology in reservoir prediction of Dawangzhuang area[J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2016, 9(1): 31-34. (In Chinese)
- [9] 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 J, ZHAO C J, LI G F, 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. (In Chinese)
- [10] WALDEN A T, NUNN K R. Correcting for coloured primary reflectivity in deconvolution[J]. *Geophysical Prospecting*, 1988, 36(3): 282-297.
- [11] 纪甜甜, 张武, 任红, 等. 谱蓝化拓频处理技术在春光区块的应用[J]. *非常规油气*, 2015, 2(3): 22-26.  
JI T T, ZHANG W, REN H, et al. Application of spectral bluing frequency-broadening technique in Chun-guang block[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2015, 2(3): 22-26. (In Chinese)

## Application of seismic frequency extension processing technology in prediction of Tongbomiao reservoir in S Oilfield

LI Wentao

(Hulunbeier subsidiary of daqing oilfield Co., Ltd, Inner Mongolia, Hulunbeier 021000, China)

**Abstract:** The main oil-bearing reservoir in the S oilfield is the glutenite in the upper part of the Tongbomiao formation, which is the distributary channel sand body deposition in the front of the fan delta. Three sets of glutenites are developed longitudinally in the study area, which is the primary target strata. However, the sand body is thin, and the frequency tuning is serious, which affects the sand body resolution and reservoir prediction. In order to effectively distinguish the three sets of glutenite, this paper adopts the spectral blue processing of seismic data combined with well seismic data, effectively broadening the frequency band of the study area from 10~40Hz to 10~90Hz, which significantly improves the reservoir resolution and prediction accuracy. Based on high-resolution seismic data, waveform indication inversion research was conducted to accurately depict the sand body boundary, plane distribution, and reservoir development. The actual drilling verification shows that this paper's sand body prediction accuracy is high, which has a particular guiding significance for the subsequent well location deployment.

**Keywords:** frequency extension processing; spectral blue processing; resolving power; thin reservoir; sand body prediction