

doi: 10.11720/wtyht.2019.1267

夏亚良,魏小东,叶玉峰,等.广义 S 变换多频解释技术及其在薄层评价中的应用[J].物探与化探,2019,43(1):168-175.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1267

Xia Y L, Wei X D, Ye Y F, et al. Generalized S transform multi-frequency interpretation technique and its application in thin reservoir evaluation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(1): 168-175. http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1267

## 广义 S 变换多频解释技术及其在薄层评价中的应用

夏亚良<sup>1</sup>, 魏小东<sup>1</sup>, 叶玉峰<sup>2</sup>, 陈鑫<sup>1</sup>, 王红梅<sup>1</sup>, 李艳静<sup>1</sup>, 马英哲<sup>2</sup>, 严晓欢<sup>1</sup>

(1. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司研究院, 河北 涿州 072751; 2. 中油国际(伊拉克)哈法亚公司, 北京 100032)

**摘要:** 为了利用时频转换后地震资料完成高速围岩屏蔽薄层定量评价,应用广义 S 变换对目标地震开展解释性处理,落实薄层时频域地震可识别程度。结合实钻砂体发育数据、频谱分析、薄层时频特征等,开展时频转换数据优选,提取频率梯度属性定性分析目标区沉积储层平面展布特征。构建实钻数据与频率梯度数学关系,完成薄层定量评价。对中东地区实际资料处理解释表明,基于广义 S 变换的多频解释技术对于高速围岩屏蔽的薄层评价具有较好的应用效果,提高了储层预测精度,为利用地震资料开展储层定量评价提供了一套技术思路,具有广阔的应用前景。

**关键词:** 薄层; 高速围岩; 广义 S 变换; 时频特征; 多频解释; 频率梯度; 中东地区

**中图分类号:** P631.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2019)01-0168-08

### 0 引言

薄层是油气勘探评价的重点与难点,其是指厚度小于 1/4 波长的地层,1/4 波长为薄层调谐厚度,是地震时间域的极限分辨率<sup>[1]</sup>。地震波通过薄层顶底界面时会发生相互干涉,响应特征差<sup>[2]</sup>,且薄层通常与泥页岩互层,纵向上多期次叠置,平面上受水体能量、水退、水进等影响,岩相变化快,分布零散,采用常规地震属性分析及反演等技术手段较难完成薄储集层评价,尤其针对高速围岩屏蔽的薄层评价,常规地震储层评价方法更显得无能为力<sup>[3]</sup>。地震薄储集层评价其核心在于提高地震资料分辨率,但受限于带通地震资料频带窄、主频不高的特点,其较难实现,特别是完成针对米级别的薄储集层识别。谱分解利用信号处理中的时频转换方法,将地震资料从时间域转换到频率域,生成频率连续变化的多个振幅体,在频率域内通过调谐相位或振幅

预测储层的平面展布规律,落实地质体形态、边界,其薄层识别厚度远小于主频所对应的 1/4 波长,被广泛应用于薄储集层评价<sup>[4-7]</sup>。

谱分解技术关键在于时频转换方法的优选,常用的实现方式包括短时傅里叶变换<sup>[5]</sup>、Gabor 变换<sup>[8]</sup>、连续小波变换<sup>[9-10]</sup>、S 变换<sup>[11]</sup>和广义 S 变换<sup>[12-14]</sup>等。其中,Gabor 变换是利用高斯函数代替固定时窗分析的一种特殊短时傅里叶变换。S 变换兼具短时傅里叶变换和小波变换的优点,时频分析窗口随频率变化,与地震波时变特征吻合,但 S 变换中小波是固定的,窗函数不能满足能量归一化条件,窗函数的幅值随着频率变化,谱分解结果会出现局部失真。因此,高静怀<sup>[15]</sup>等人根据信号本身时变特性,利用广义高斯函数替换 S 变换的高斯窗函数,而推导出了广义 S 变换,其时频谱的频率分辨率得到明显提高,更有利于对地震资料进行谱分解。由于谱分解处理的单频调谐厚度便不是真实的砂体厚度,因此国内外学者大多数研究主要还停留在利用

收稿日期: 2018-07-13; 修回日期: 2018-11-20

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司“十二五”重大专项(2011E-2501)

作者简介: 夏亚良(1986-),男,硕士,工程师,现从事井震联合储层预测及评价研究工作。

谱分解定性描述薄储层的平面展布<sup>[16-20]</sup>。

本文在广义 S 变换目标处理的基础上,综合利用地震、地质、钻井等资料,建立了基于广义 S 变换多频解释技术方案,最终有效预测了中东地区某油田高速围岩屏蔽作用下的深层薄储层展布特征,解决了该地区薄储集层评价的技术难题。

## 1 方法简介

### 1.1 方法原理

#### 1.1.1 广义 S 变换

对于一个平方可积信号  $s(t)$ , 其 S 变换定义为<sup>[21]</sup>:

$$ST(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) w(t - \tau) \exp(-i2\pi f\tau) d\tau, \quad (1)$$

式中:  $t$  为时间,  $f$  为频率,  $w(t - \tau)$  为高斯窗函数:

$$w(t, f) = \frac{1}{\sigma(f) \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{t^2}{2\sigma^2(f)}\right], \quad (2)$$

式中:  $\sigma(f)$  为标准差:

$$\sigma(f) = 1/|f|, \quad (3)$$

S 变换把高斯窗函数作为局部化窗函数, 谱分解结果与窗函数密切相关。Pinnegar<sup>[22]</sup> 等人应用广义高斯函数代替基本高斯窗得到广义 S 变换, 广义高斯函数定义为:

$$w_{GS}(\tau - t, f, p) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi p}} \exp\left[-\frac{f^2(\tau - t)^2}{2p^2}\right], \quad (4)$$

式中:  $p$  为广义高斯函数的时窗调节系数,  $w_{GS}(\tau - t, f, p)$  为广义高斯函数。

将式(4)代入式(1)得到广义 S 变换表达式:

$$GST(\tau, f, p) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi p}} \exp\left[-\frac{f^2(t - \tau)^2}{2p^2}\right] \cdot \exp(-i2\pi ft) dt. \quad (5)$$

可以看出, 通过引入时窗调节参数  $p$ , 广义 S 变换比 S 变换更方便调节时窗分析窗口, 时频分辨率更高。

#### 1.1.2 频率梯度

相对于围岩而言, 薄储层通常具有较高的渗透率, 其是表征优质储层的主要参数之一, 因此薄层的地震预测可以从预测薄层的渗透性着手。Silin 等人<sup>[23]</sup> 的研究表明, 低频条件下, 地震反射系数与地震波频率、岩石骨架、流体类型及岩石渗透率紧密相关, 其计算公式为:

$$R = R_0 + R_1 \sqrt{\frac{k\omega\rho(i - \omega\tau)}{\eta}} \quad \omega\tau > 1, \quad (6)$$

式中:  $R$ 、 $R_0$ 、 $R_1$  分别为地层总反射系数、岩石骨架反射系数及地层流体反射系数,  $k$  为岩石渗透率,  $\omega$  为

地震波角频率,  $\eta$  为流体粘度,  $\rho$  为流体密度,  $\tau$  为流体驰豫时间。由于式(6)中不同流体的相关参数可以从实验室获取, 而流体类型、岩石骨架反射系数及岩石渗透率是影响地震记录的关键因素。因此薄层渗透性地震预测的关键在于如何消除岩石骨架及流体类型对地震反射系数的影响。

频率梯度是地震资料在其有效频带内地震反射振幅随频率的变化率, 其有效融合了地震资料的振幅及频率信息, 被定义为<sup>[24-25]</sup>:

$$G(t, f) = \frac{\partial A(t, f)}{\partial f} = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{A(t, f + \Delta f) - A(t, f - \Delta f)}{2\Delta f} \quad (7)$$

式中:  $A(t, f)$  为地震资料振幅分量,  $f$  为频率。由式(7)可知, 频率梯度最大限度消除了岩石骨架及流体类型对于地震记录的影响, 能较好地反应地层的渗透性变化特征, 其可被近似描述为:

$$G(t, f) = \frac{\partial A(t, f)}{\partial f} \approx -C \sqrt{\frac{k\rho}{\eta f}}, \quad (8)$$

式中:  $C$  为常数。继而可以利用频率梯度近似表征储层渗透性的变化, 开展薄层的地震预测研究。

### 1.2 薄储层识别技术方案

影响薄储集层预测精度的因素较多, 其中地震资料主频对应分辨率与薄层厚度不匹配是主要原因之一。利用谱分解可以有效提高地震对薄层的识别能力, 从而开展薄层识别及储层展布特征研究。但谱分解处理的单个频率对应的是确定的调谐厚度而不是真实的薄层厚度, 因此, 利用基于谱分解的多频解释技术对薄层评价关键在于如何综合地震、地质、钻井等, 建立单频地震数据与砂体展布参数之间的关系(图 1)。该方法具体实现可以分为以下几个步

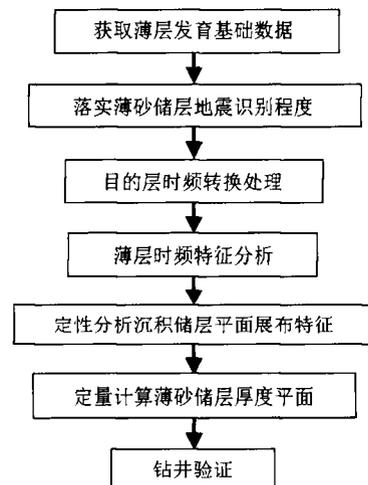


图 1 多频解释技术薄层评价技术流程  
Fig.1 Thin reservoir evaluation workflow by multi-frequency interpretation technique

骤:①根据岩芯、测井、岩性录井等数据,获取研究区砂体发育基础数据;②开展地震资料频谱分析、岩石物理研究、地震属性分析、地震反演、模型试验等,落实地震对研究区薄砂储集层的识别程度;③对地震资料进行时频转换处理,分析薄砂储集层的时频响应特征;④以实钻薄层砂体厚度为基础,以薄层时频响应特征为依据,结合薄层地震识别程度分析结果,开展时频转换结果优选,提取目的层频率梯度属性,定性分析薄砂储层平面展布特征;⑤结合钻井,建立频率梯度与砂体厚度之间联系,定量计算薄砂储集层厚度;⑥勘探建议及钻井验证。

## 2 实际应用

### 2.1 研究区概况

研究区油田位于伊拉克美索不达米亚盆地南

部,阿拉伯地台外侧,WS为阿拉伯台地和阿拉伯地盾,EN为扎格罗斯山前拗陷和扎格罗斯断裂带。油田构造简单、断裂不发育,为一个NW—SE走向的长轴背斜。盆地从寒武纪开始沉积,岩性包括碳酸盐岩、碎屑岩、膏盐等,基底为寒武纪早期花岗岩。目的层为白垩系浅海细粒碎屑岩沉积,埋深3900~4100 m之间,沉积厚度40~60 m,上覆、下伏地层皆为碳酸盐岩,全区稳定分布,厚度都在200~300 m。

综合岩芯、录井、测井等资料分析,目标油藏为一套障壁岛海岸体系沉积,可以识别出障壁岛、潮汐通道、砂质潮坪3种沉积砂体(图2),单砂体厚度1~15 m,平均4~6 m。现有钻井资料揭示该油藏砂体纵向相互叠置,平面零散展布,砂体连通性非常复杂,为构造—岩性复合油藏。

研究发现,该油藏储层地震预测主要存在以下几个难点:

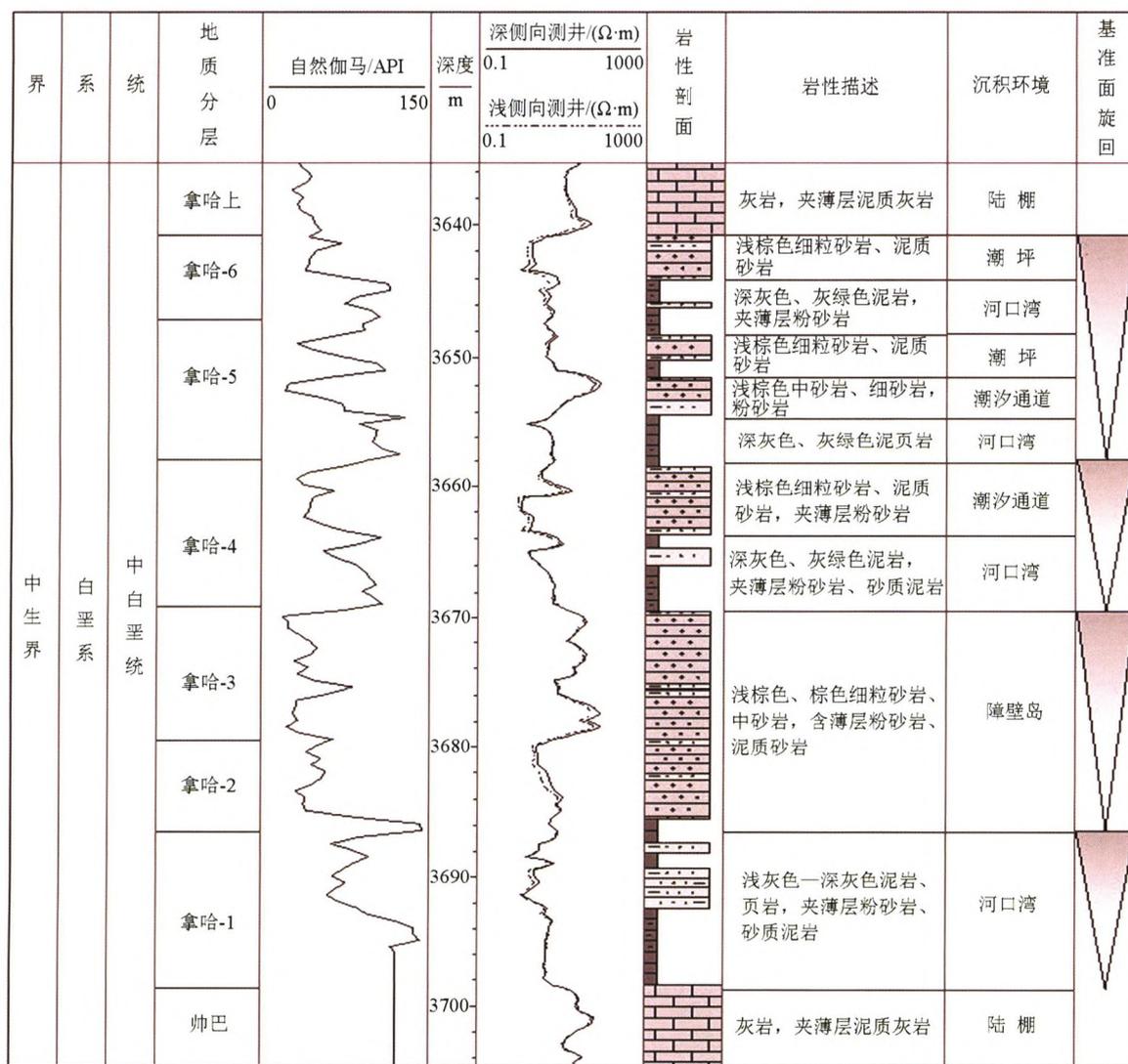


图2 研究区单井地质综合柱状图

Fig.2 The composite columnar section of study area

1) 地震资料主频 28 Hz, 频宽 8~80 Hz, 该油藏砂岩速度为 4 100~4 500 m/s, 由此计算地震主频所对应的单砂体分辨率为 19~21 m, 大于油藏最大单砂体厚度。

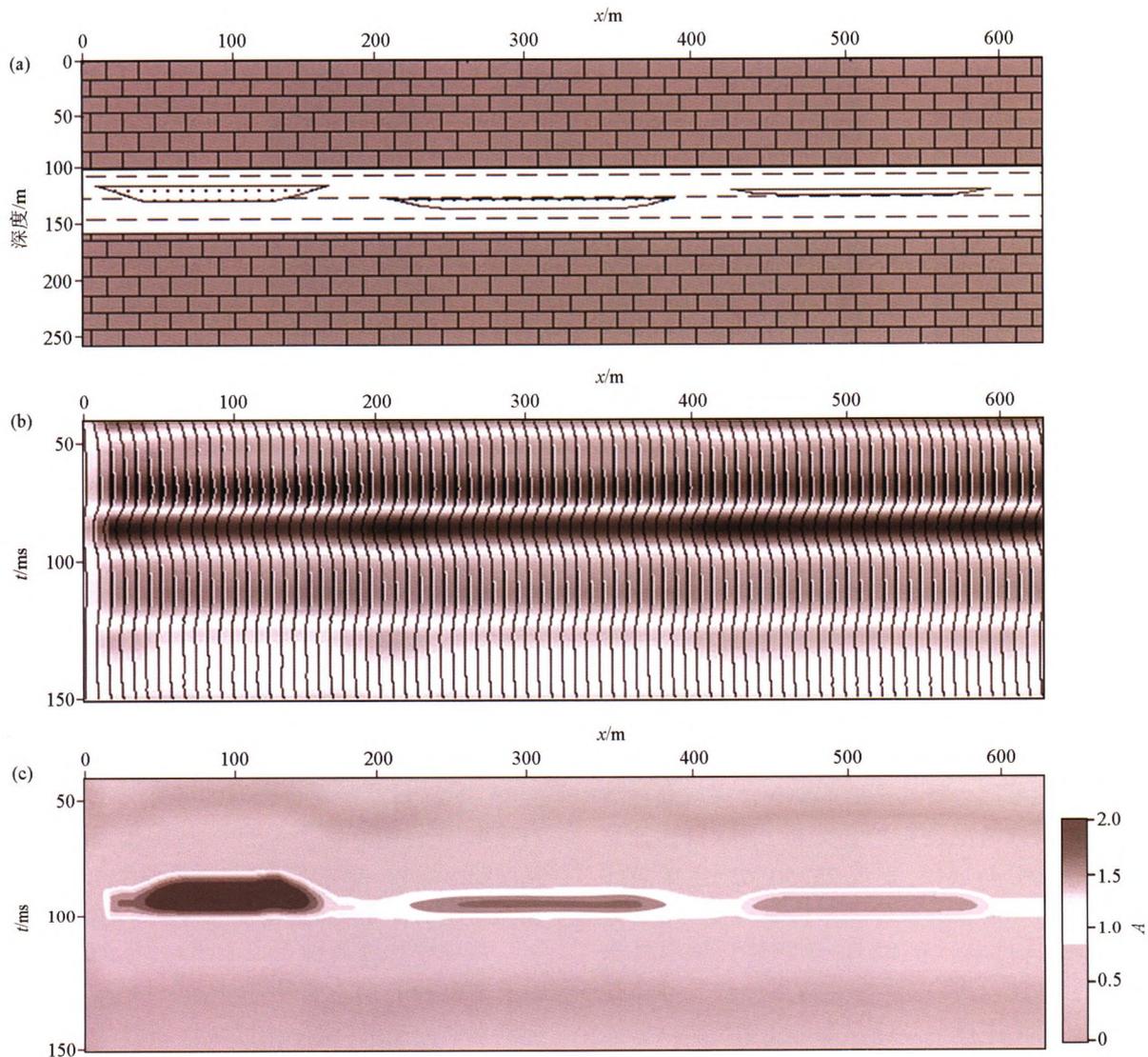
2) 目的层地层厚度小, 上覆、下伏高速碳酸盐围岩与目的层阻抗差异大, 形成的低频强振幅反射屏蔽了目的层薄砂储层地震响应特征。

3) 目的层埋深大, 随着埋深的增加, 砂岩、泥页岩、泥质砂岩速度分布范围相互叠置, 岩石物理分析目的层砂岩速度 4 100~4 500 m/s, 密度 2.25~2.55 g/cm<sup>3</sup>, 波阻抗 8 000~11 000 kg/(m<sup>2</sup>s); 泥页岩速度 3 200~4 000 m/s, 密度 2.2~2.55 g/cm<sup>3</sup>, 波阻抗 7 000~10 500 kg/(m<sup>2</sup>s); 泥质砂岩 4 150~4 600 m/s, 密度 2.3~2.55 g/cm<sup>3</sup>, 波阻抗 8 500~11 500 kg/(m<sup>2</sup>s)。

上述难点严重制约了目的层薄砂储层地震响应特征分析、沉积相划分及储层预测等。

## 2.2 研究区地质模型试验分析

根据研究油藏构造地质情况, 结合测井、录井等资料, 构建目的层地质模型(图 3a), 包括目的油藏的砂泥岩薄互层以及上下两套致密灰岩。其中目的层地层厚度为 60 m。根据单井实钻单砂体厚度情况, 将砂体厚度分别设置为 15、10、5 m, 速度 4 200 m/s; 上覆、下伏灰岩厚度为 100 m, 速度为 5 300 m/s; 泥岩速度为 3 800 m/s。图 3b 为采用 28 Hz, 零相位雷克子波激发得到的地震正演结果。从图可以看出, 由于受到上覆高速灰岩的低频强振幅反射影响, 目的层油藏的 3 套砂体地震反射特征非常模糊, 根据正演剖面较难确定 3 套砂体的发育情况。通过对



a—地质模型; b—模型正演; c—广义 S 变换处理结果(50 Hz)

a—geologic model; b—forward modeling; c—generalized S transformation processing results(50 Hz)

图 3 目的油藏模型试验分析

Fig.3 Model test analysis of target reservoir

正演地震结果进行广义 S 变换处理,结合实际地质情况,对比分析其单频体响应特征,优选出 50 Hz 广义 S 变换处理结果(图 3c),由图可见,三套砂体时频转换后被完美地刻画出来,砂体发育位置与地质模型中的位置一致,且厚度 5 m 的薄层在广义 S 变换剖面中同样被识别出来,表明通过广义 S 变换处理明显降低了高速围岩对目的层薄储集体的屏蔽作用,提高了地震对薄层的识别能力。因此,可以利用广义 S 变换谱分解提高研究区地震资料分辨率,从而有效预测薄砂储层的平面展布。

### 2.3 广义 S 变换谱分解

#### 2.3.1 典型井时频特征分析

应用广义 S 变换对目的层进行时频转换处理,

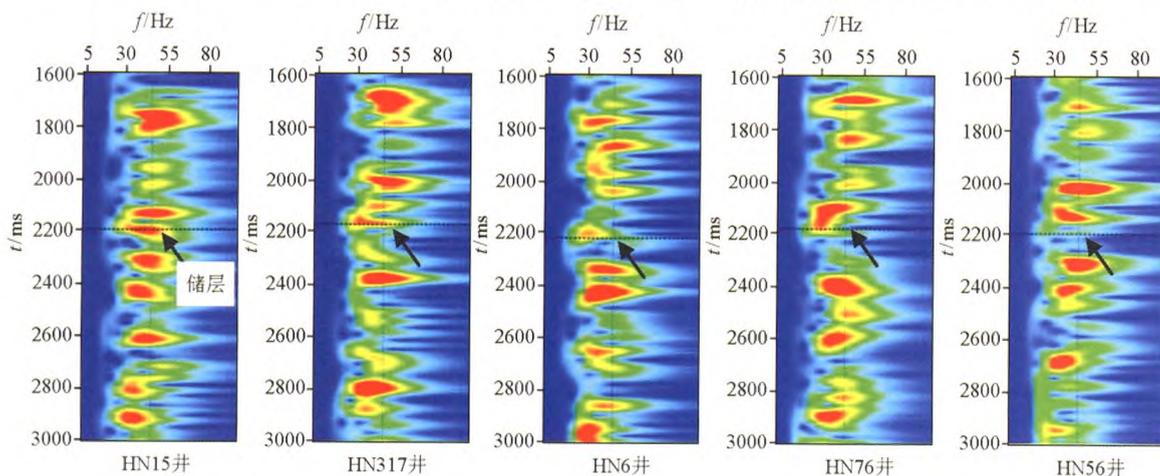


图 4 薄层时频特征分析

Fig.4 Time frequency characteristics analysis of thin reservoir

厚度与振幅具有较好的正相关关系。

#### 2.3.2 储层展布特征及预测效果

上述时频分析结果表明,时频转换后上覆、下伏高速围岩对目标油藏的屏蔽作用降低,50 Hz 的单频数据对薄层具有较好的分辨能力,但目标油藏砂体纵向叠置严重,单一采用某一频率所对应的调谐砂体厚度分布较难准确完成油藏砂体平面展布预测。通过对目标油藏谱分解处理后的单频体振幅属性结合实钻砂体发育情况进行扫描分析,兼顾目标油藏地震资料频谱分析成果,发现 25、50、65 Hz 单频体振幅属性与目标油藏的砂体展布特征具有较好的一致性。因此,优选 25、50、65 Hz 单频体振幅属性及其三色融合属性(图 5),定性分析目标油藏砂体平面展布特征。图中黄色及红色为与实钻校验后砂体展布特征,由图可见,目标油藏砂体呈 NW—SE 向展布,与盆地展布特征一致。根据低频对应厚砂体,高频对应薄层的原则,目的油藏较厚的砂层组主要分布在油藏中部与北部,平面展布相对零散;薄砂储层主要分布在油藏的北部和西南部。同时,在谱分

开展目标油藏单井薄砂储集层时频特征分析(图 4)。图 4 为目的油藏砂体发育比较典型的五口井,其中 HN15 井实钻单砂体厚度为 3~12 m,砂组厚度 21.7 m;HN317 井单砂体厚度为 2~11 m,砂组厚度 18.2 m;HN6 井单砂体厚度为 1~5 m,砂组厚度 11.9 m;HN76 井单砂体厚度为 2~4 m,砂组厚度 8 m;HN56 井单砂体厚度为 1~2 m,砂组厚度 5 m。由图可见,相对于常规地震剖面而言,时频转换剖面在纵向上分辨率明显提高,上覆、下伏高速灰岩层对目标油藏的屏蔽作用明显降低,随着频率的升高,其屏蔽作用明显减弱。对比五口井的时频剖面可知,随着砂层组厚度的逐渐变小,时频剖面上目的层的振幅反射逐渐减弱,特别是在 45~50 Hz 地方,最大砂组

解处理基础上,提取目的油藏的频率梯度属性(图 6b),可以看出频率梯度属性与 25、50、65 Hz 单频属性三色融合结果所描述的储层展布特征大体一致,与常规均方根振幅属性相比(图 6a),其有利储层发育区域与现有钻井的砂体吻合程度明显较常规振幅属性更好,砂体展布特征与区域地质背景一致。统计油藏 32 口钻井储层发育情况与频率梯度属性的吻合率,共 27 口储层发育较好的井在频率梯度属性上有显示,定性符合率为 84.3%,较振幅属性储层预测精度明显提高,表明基于广义 S 变换的多频解释技术预测高速围岩背景下的薄层具有较好的应用效果。

从频率梯度属性可以看出,目标油藏砂体除了具有 NW—SE 向展布特征外,同时呈现从 WS—EN 逐渐发散的趋势,结合该区域地质背景,岩心、钻井等资料综合分析认为该油藏的物源应在油藏的 WS 方向。同时划分了 3 种有利沉积砂体的平面展布特征,油藏的 WS 方向以潮坪沉积砂体为主,油藏中部以障壁岛沉积砂体为主,呈 NW—SE 向条带展布,被 NE—SW 向的潮汐通道划分几个障壁砂坝发育

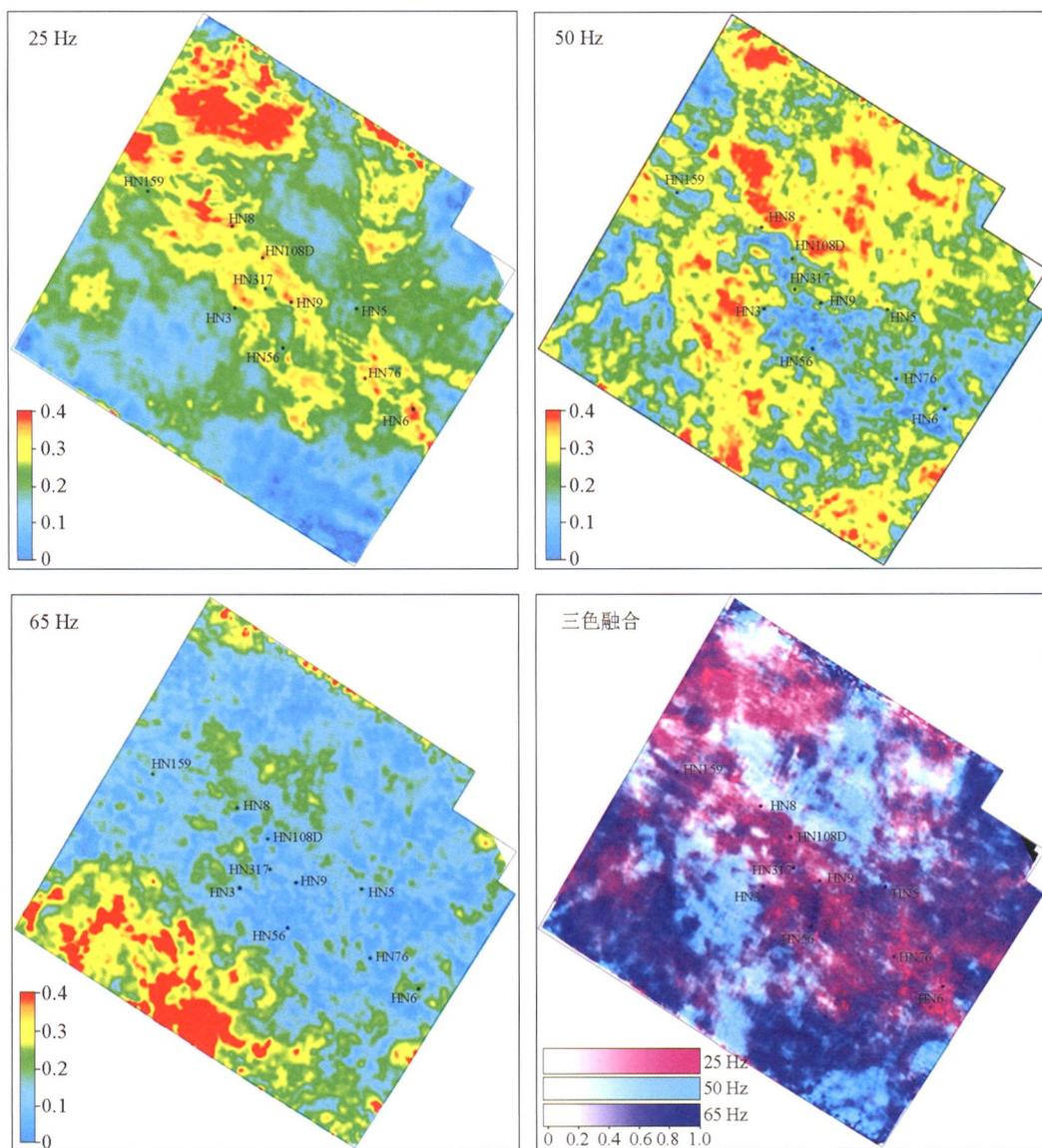
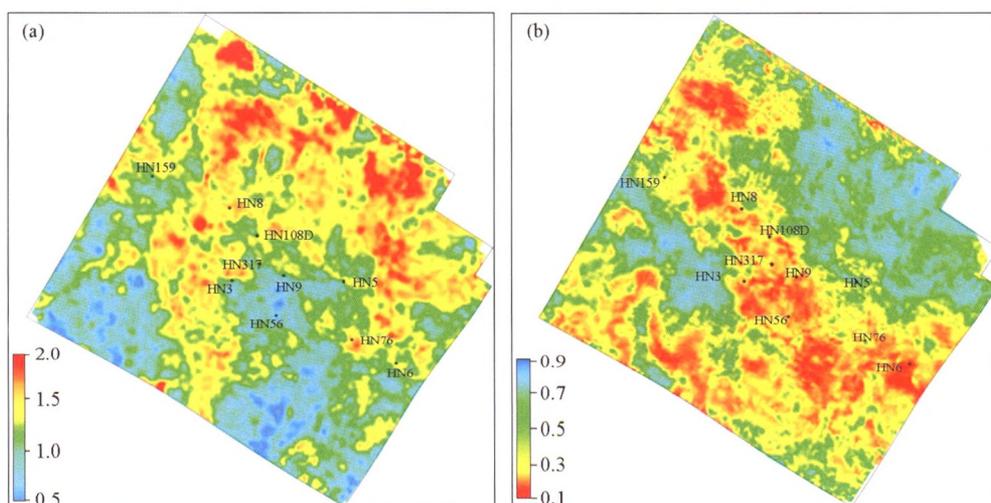


图 5 单频地震数据振幅属性平面图

Fig.5 Amplitude attribute of single frequency seismic data



a—均方根振幅属性;b—频率梯度属性

a—RMS amplitude attribute;b—frequency gradient attribute

图 6 地震属性储层预测结果对比

Fig.6 Reservoir prediction results comparison by seismic attribute

区(图 6b)。目前钻井主要集中在油藏中部障壁岛砂坝及潮汐通道砂体发育区,WS 方向的潮坪砂体发育区将成为下一步岩性油藏勘探评价的有利目标区域。

为了进一步落实油藏砂体厚度,结合实钻砂体解释成果,建立频率梯度与砂体厚度之间的关系(图 7),从图可以看出,频率梯度与砂体厚度具有较好的线性关系,随着频率梯增大,井上砂体呈减薄趋势,由此定量计算油藏砂体平面厚度。从图 7 可以看出,采用此方法定量评价所预测的砂体厚度与实钻误差基本都在 5 m 以内,精度高。综合目标油藏构造及多频解释研究成果,开展井位建议,其中建议井 HN108D 实钻在 3 955~3 990 m 获得荧光显示,全烃浓度 4.6%~9.2%,测井综合解释油层厚度 23 m,与预测绝对误差 3 m,进一步证明了本文提出的基于谱分解的多频解释方法能有效完成对高速围岩屏蔽下的深层薄砂层的评价,可以为井位部署提供可靠地质依据,保障钻井成功率。

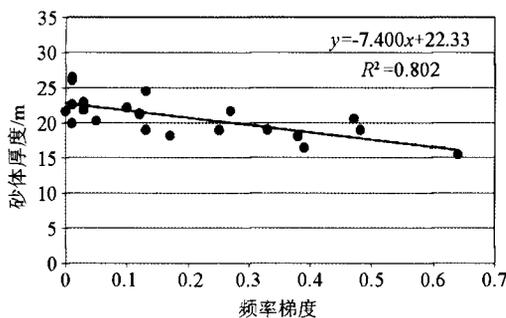


图 7 频率梯度与实钻砂体厚度关系  
Fig.7 Relationship between frequency gradient and reservoir thickness

### 3 认识与结论

1) 利用广义 S 变换对地震资料进行时频转换处理,能有效降低高速围岩对目标油藏屏蔽作用,提高地震对薄层的识别能力。基于广义 S 变换的多频解释技术能有效完成对研究区高速围岩屏蔽下的薄储层评价。

2) 研究区目标油藏砂体呈 NW—SE 向条带状展布,物源来自于油藏的西南方向,主要发育潮汐通道、砂质潮坪及障壁砂坝三种沉积砂体。

3) 目标油藏中部以障壁砂坝和潮汐通道砂体沉积为主,而西南方向为砂质潮坪沉积有利区域,是下一步岩性油藏勘探的有利目标区。

### 参考文献(References):

- [1] 张军华,王庆峰,张晓辉,等.薄层和薄互层叠后地震解释关键技术综述[J].石油物探,2017,56(4):459-471.  
Zhang J H, Wang Q F, Zhang X H, et al. Poststack interpretation key techniques for thin layer and thin interbed reservoir[J]. Geophysical Processing for Petroleum, 2017, 56(4): 459-471.
- [2] 徐林.地震频谱分解技术应用中有关问题的讨论[J].石油物探,2008,47(4):405-409.  
Xu L. Discussion on the problems in using the technology of seismic spectral decomposition[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008, 47(4): 405-409.
- [3] 顾雯,章雄,徐敏,等.强屏蔽下薄储层高精度预测研究——以松辽盆地三肇凹陷为例[J].石油物探,2017,56(3):439-448.  
Gu W, Zhang X, Xu M, et al. High precision prediction of thin reservoir under strong shielding effect and its application: a case study from Sanzhao Depression, Songliao Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(3): 439-448.
- [4] 刘俊,吴淑玉,陈建文,等.北黄海碎屑岩薄砂体储层识别技术及其应用[J].地球物理学进展,2017,32(3):1384-1392.  
Liu J, Wu S Y, Chen J W, et al. Classic thin sandbody reservoir identification technique and its application in the North Yellow Sea Basin[J]. Progress in Geophys., 2017, 32(3): 1384-1392.
- [5] 田仁飞,杨春峰,胡宇,等.识别岩性油藏薄储集层的谱分解技术[J].天然气地球科学,2015,26(2):360-361.  
Tian R F, Yang C F, Hu Y, et al. Thin lithologic reservoir identification with spectral decomposition techniques[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(2): 360-364.
- [6] 韩利,刘春成,张益明,等.地震复谱分解技术及其在烃类检测中的应用[J].地球物理学报,2016,59(3):1095-1101.  
Han L, Liu C C, Zhang Y M, et al. Seismic complex spectral decomposition and its application on hydrocarbon detection[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2016, 59(3): 1095-1101.
- [7] 刘喜武,张宇,勾永峰,等.地震勘探信号时频分析方法对比与应用分析[J].地球物理学进展,2008,23(3):743-753.  
Liu X W, Zhang N, Gou Y F, et al. The comparison and application of time-frequency analysis methods to seismic signal[J]. Progress in Geophys., 2008, 23(3): 743-753.
- [8] 陈红,彭真明,王峻,等.地震信号分数阶 Gabor 变换谱分解方法及应用[J].地球物理学报,2011,54(3):867-873.  
Chen H, Peng Z M, Wang Jun, et al. Spectral decomposition of seismic signal based on fractional Gabor transform and its application[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2011, 54(3): 867-873.
- [9] 马志霞,孙赞东. Gabor-Morlet 小波变换变频技术及其在碳酸盐岩储层预测中的应用[J].石油物探,2010,49(1):42-46.  
Ma Z X, Sun Z D. Spectral decomposition technique based on Gabor-Morlet wavelet transform and its application to carbonate reservoir prediction[J]. Geophysical Processing for Petroleum, 2010, 49(1): 42-46.
- [10] Morlet J, Arens G, Fourgeau E, et al. Wave propagation and sampling theory-Part I: Complex signal and scattering in multilayered media[J]. Geophysics, 1982, 47(2): 203-221.
- [11] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe T P. Localization of the complex spectrum: The S transform [J]. IEEE Transaction on Signal pro-

- cessing, 1996, 44(4): 998 - 1001.
- [12] 马跃华, 吴蜀燕, 白玉花, 等. 利用谱分解技术预测河流相储层 [J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(3): 502 - 509.  
Ma Y H, Wu S Y, Bai Y H, et al. River sedimentary microfacies prediction based on spectral decomposition [J]. OGP, 2015, 50(3): 502-509.
- [13] 王宝江, 张永常, 王大兴, 等. 广义 S 变换用于含煤地层薄砂体预测研究 [J]. 地球物理学进展, 2012, 27(3): 1219 - 1226.  
Wang B J, Zhang Y C, Wang D X, et al. Predicting and detecting of thin sand bodies by general transform in coal-bearing strata [J]. Progress in Geophys. (in Chinese), 2012, 27(3): 1219-1226.
- [14] 王长江, 杨培杰, 罗红梅, 等. 基于广义 S 变换的时变分频技术 [J]. 石油物探, 2013, 52(5): 490 - 493.  
Wang C J, Yang P J, Luo H M, et al. Time-variable frequency division based on generalized S transforms [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(5): 490-493.
- [15] 高静怀, 陈文超, 李幼铭, 等. 广义 S 变换与薄互层地震响应分析 [J]. 地球物理学报, 2003, 46(4): 526 - 532.  
Gao J H, Chen W C, Li Y M, et al. Generalized S transform and seismic response analysis of thin interbed [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2003, 46(4): 526-532.
- [16] Partyka G, Gridley J, Lopez J. Interpretation application of spectral decomposition in reservoir characterization [J]. The Leading Edge, 1999, 18(1): 353 - 3601.
- [17] 彭军, 周家雄, 王宇, 等. 基追踪在薄层识别中的研究与应用 [J]. 地球物理学进展, 2017, 32(3): 1243 - 1250.  
Peng J, Zhou J X, Wang Y, et al. Basis pursuit study and application in the identification thin layer [J]. Progress in Geophys., 2017, 32(3): 1243-1250.
- [18] 尹继尧, 钟磊, 张吉辉, 等. 基于连续小波变换目标处理技术在储层预测中的应用 [J]. 石油物探, 2016, 55(3): 434 - 440.  
Yin J Y, Zhong L, Zhang J H, et al. Target processing by continuous wavelet transform coefficients applied to reservoir prediction [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(3): 434-440.
- [19] Satish S H, Partha S R, Phil D A. Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transforms [J]. Geophysics, 2005, 70(6): 19 - 251.
- [20] 边立恩, 于茜, 韩自军, 等. 基于谱分解技术的储层定量地震解释 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(54): 718 - 722.  
Bian L E, Yu Q, Han Z J, et al. Quantitative seismic interpretation of reservoir based on the spectral decomposition technique [J]. Oil & GAS geology, 2011, 32(54): 718-722.
- [21] Pinnegar C R, Mansinha L. The S-transform with windows of arbitrary and varying shape [J]. Geophysics, 2003, 68(1): 381 - 385.
- [22] 陈学华, 贺振华, 黄德济. 基于广义 S 变换的地震资料高效时频谱分解 [J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(5): 530 - 534.  
Chen X H, He Z H, Huang D J. High efficient time-frequency spectrum decomposition of seismic data based on generalized S transform [J]. OGP, 2008, 43(5): 530-534.
- [23] Silin D B, Korneev V M, Goloshubin G M, et al. A hydrologic view on Biot's theory of poroelasticity [J]. LBNL Report 54459, 2004.
- [24] 魏小东, 张延庆, 曹丽丽, 等. 地震资料振幅谱梯度属性在 WC 地区储层评价中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(2): 281 - 284.  
Wei X D, Zhang Y Q, Cao L L, et al. Application of amplitude spectrum gradient for reservoir evaluation in WC project [J]. OGP, 2011, 46(2): 281-284.
- [25] Wang X J, Wei X D, Cai J M, et al. Application of amplitude spectrum gradient in thin bed identification [C]//Expanded Abstracts of the 83<sup>rd</sup> Annual SEG Meeting, Society of Exploration Geophysicists, 2013: 1483 - 1486.

## Generalized S transform multi-frequency interpretation technique and its application in thin reservoir evaluation

XIA Ya-Liang<sup>1</sup>, WEI Xiao-Dong<sup>1</sup>, YE Yu-Feng<sup>2</sup>,

CHEN Xin<sup>1</sup>, WANG Hong-Mei<sup>1</sup>, LI Yan-Jing<sup>1</sup>, MA Ying-Zhe<sup>2</sup>, YAN Xiao-Huan<sup>1</sup>

(1. Geophysical Research Institute of BGP, CNPC, Zhuozhou 072751, China; 2. PetroChina International Iraq FZE Iraq Branch, Beijing 100032, China)

**Abstract:** In order to quantitatively evaluate thin reservoir of high speed surrounding rock shielding by seismic data after time frequency conversion, the generalized S transform is applied to processing for target seismic, and then ascertain the time and frequency seismic recognition extent for thin reservoir. Combined with basic sand parameter, frequency spectral analysis, and time frequency characteristics of thin reservoir, carry out single frequency seismic optimization, and extract frequency gradient attribute to qualitatively analysis the plane distribution of sedimentary reservoir. Construct the mathematical relationship between drilling data and frequency gradient to finish quantitatively evaluation for thin reservoir. The practical example in Middle East shows that the multi-frequency interpretation techniques based on generalized S transform has a good application result for thin reservoir of high speed surrounding rock shielding, and the reservoir prediction accuracy was improved. It provides a set of technical ideas for quantitative reservoir evaluation by seismic data and has broad application prospects.

**Key words:** thin reservoir; high speed surrounding rock; generalized S transform; time frequency characteristics; multi-frequency interpretation; frequency gradient; Middle East region

(本文编辑:叶佩)