

基于高阶多道同步挤压广义S变换的多属性融合储层预测技术研究及应用

赵慧言¹, 高欢¹, 严海滔², 文冉¹, 宋修艳³

1 四川长宁天然气开发有限责任公司; 2 成都理工大学; 3 北京普瑞斯安能源科技有限公司

摘要 时频域地震精细解释建立在高分辨率时频分析算法的基础上。为适应高精度勘探开发的要求,在多道同步挤压广义S变换(MSGST)的基础上,提出了高阶多道同步挤压广义S变换(HMSGST),进一步聚焦时频分辨率,提高储层预测的精准性。通过理论信号、理论加噪信号对比6种时频算法的计算结果,验证了HMSGST具有高时频分辨率,对复杂信号具有更好的刻画能力。以某三维工区海相砂岩为例,基于HMSGST在时频域沿主要油气储层(T2层)提取时间切片,开展频率衰减梯度、分频相干等属性分析以增强对短轴河道、次级断裂等目标的识别能力和烃类检测能力,进一步结合曲率属性开展RGB多属性融合精细雕刻。对于不同工区、不同地质条件的地震数据,需要进行HMSGST的参数分析,适合的参数是达到更为准确的计算结果的前提。

关键词 时频分析; 高阶多道同步挤压广义S变换; 时频分辨率; 多属性融合; 储层预测

中图分类号:P631 **文献标识码**:A

引用: 赵慧言, 高欢, 严海滔, 等. 基于高阶多道同步挤压广义S变换的多属性融合储层预测技术研究及应用[J]. 海相油气地质, 2024, 29(2): 207-214.

ZHAO Huiyan, GAO Huan, YAN Haitao, et al. Research and application of reservoir prediction technology based on High-order Multi-channel Synchrosqueezing Generalized S-Transform and multi-attribute fusion[J]. Marine origin petroleum geology, 2024, 29(2): 207-214.

0 前言

在地质条件复杂、地震信号处理难度大的情况下,如果仅对地震信号进行时间域分析,会存在较多问题。由于反映地下反射介质特性的丰富信息被记录在地震信号的各种频率成分中,因此将时间域地震记录通过时频转换工具转换至频率域,再将地震信号在时间域与频率域内各时刻的瞬时幅值结合起来表示,就可以将信号的时频分布清楚地描述出来。利用时频分布对地震信号特性进行分析,不仅可使各种频率成分在地震信号中的有效信息得到利用,而且对分析地震数据的频率属性提供了很大便利。傅里叶变换结果揭示了信号在频率域内的特性,但不能给出某一点时间与频率的对应及其变换情形,仅适用于平稳信号的处理^[1]。Gabor变换开创了时频分析的先河^[1],采用加窗傅里叶变换的思路,导致了时频分辨率的问题,即海森堡测不准

原理。Morlet提出的小波变换,最早在地震信号处理中应用了时频分析理论,并在地震勘探中得到广泛的应用^[2]。但是,小波变换受自身窗函数的制约,使得处理缺乏灵活性,而且小波变换后得到的是时间尺度谱。Stockwell等^[3]提出S变换(S-Transform, ST),对信号中的高频率、低频率分量进行了较好的刻画,并且ST是由傅里叶变换推导出来的,可以做到无损逆变换。与小波变换相比,ST得到的时频谱更为直观,对于地震信号的处理更为适用。高静怀等^[4]认为ST中的基本小波不适用于地震资料处理,通过对ST加以推导得到了广义S变换(Generalized S-Transform, GST),其基本小波不必满足容许性条件,因此更加适用于非平稳信号的处理。陈学华等^[5]通过GST得到了分辨率更高的时频谱,但同样受制于测不准原理,而且它的频谱分辨率在时间上无法达到最佳。Wigner-Ville分布作为一种非线性的时频分析方法,摆脱了测不准原理的限制,其分

收稿日期: 2023-09-04; 改回日期: 2024-04-01

第一作者: 赵慧言, 硕士, 工程师, 主要从事油气地球物理勘探相关研究工作。通信地址: 610066 四川省成都市成华区猛追湾街99号世茂大厦26楼; E-mail: zhaohuiyan@petrochina.com.cn

通信作者: 宋修艳, 硕士, 高级工程师, 主要从事地应力、储层及裂缝预测等方面的研究工作。通信地址: 610000 四川省成都市锦江区春熙路四川川报大厦B区506; E-mail: songxiuyan@precise-energy.com

频率和时频集合度都很高,但交叉项的存在使该方法对信号的时频分析受到了限制。Daubechies等^[6]提出了同步挤压小波变换:将小波变换后的结果挤压,在时频域内进行重排,使信号的瞬时频率更接近于真实频率,从而提高信号分析的时频聚焦性。黄忠来等^[7-8]为了获得更准确的瞬时频率信息,在同步挤压S变换(Synchrosqueezing S-Transform, SST)的基础上进行了瞬时频率的优化,提出了二阶同步挤压S变换。Pham等^[9]提出高阶同步挤压S变换(High-order Synchrosqueezing S-Transform, HSST)。

同步挤压广义S变换(Synchrosqueezing Generalized S-Transform, SGST),是在GST和SST的基础上发展起来的,结合了GST高斯窗函数的可变性和SST高时频聚焦能力的优势^[10]。由于SGST只是对单道进行处理,忽略了横向的波组信息,这导致SGST的横向分辨率有待提升。针对此问题,巫南克等^[11]在SGST基础上,基于地层倾角约束,于2020年提出多道同步挤压广义S变换(Multi-channel Synchrosqueezing Gener-

alized S-Transform, MSGST),保留了地层横向连续性特征,可以达到很高的纵横向分辨率。

在实践过程中发现,高精度勘探需要更高精度的处理解释算法。本文结合HSST的思路,提出高阶多道同步挤压广义S变换(High-order Multi-channel Synchrosqueezing Generalized S-Transform, HMSGST),在保证横向分辨率的同时,进一步提高纵向分辨率。文中首先采用合成的理论信号来验证HMSGST的优势,同时参与验证的算法还有ST、GST、SST、SGST、MSGST;其次将HMSGST应用于时频域含油气性检测,计算频率衰减梯度;最后对三维数据体利用HMSGST计算分频相干体,并结合RGB开展多属性融合进行储层预测。

1 原理及理论信号

为了更进一步逼近信号的真实频率,对MSGST首次挤压重排的结果继续进行迭代挤压,得到公式(1):

$$HMSGST_{h(n)}(f_0, t) = \begin{cases} (f_0)^{-1} \sum_{f_m: |f_h(f_0, t) - f_0| \leq \Delta f/2} \frac{1}{(2L+1)} \sum_{l=-L}^{L} |GST_{h(n+l)}(f_0, \tau - D \times l)| f_m \Delta f_m & i=1 \\ \sum_{f_m: |f_h(f_0, t) - f_0| \leq \Delta f/2} (f_0)^{-1} \sum_{i=1}^q \frac{1}{(2L+1)} \sum_{l=-L}^{L} |GST_{h(n+l)}(f_0, \tau - D \times l)| f_m \Delta f_m & i>1 \end{cases} \quad (1)$$

公式(1)中:GST为广义S变换; $h(n)$ 表示信号; f_0 、 f_m 、 f_h 分别表示挤压后时频谱上的频率点、挤压前时频谱上的频率点、信号的瞬时频率; Δf 、 Δf_m 分别表示挤压后时频谱上的频率间隔、挤压前时频谱上的频率间隔;函数中的 n 、 t 、 l 、 L 、 τ 、 D 分别表示信号长度、时间、窗口长度、一半窗口的大小、时频谱上的时间点、倾角; i 、 q 为常数,它们控制挤压的阶数(当 $i=1$ 时,表示只进行一次挤压,即开展MSGST;当 $1 < i < q$ 时,则进行HMSGST)。需要说明的是, q 并不是越大越好,其值的选择与勘探区有关,不同的工区需要采用适合的 q 才能达到好的效果。在实际应用过程中,可先对 q 进行参数实验,即提取井旁道进行HMSGST来确定该区的挤压阶数,确保效果达到最佳。

为了讨论时频分析算法的时频聚焦能力,合成了如图1a所示的理论交叉信号:信号的长度为1 s,采样间隔为1 ms(依据工区地震采样间隔设定),频率设定在地震有效频带范围内,在20~120 Hz内递增以及递减。对理论信号分别进行ST、GST、

SST、SGST、MSGST和HMSGST,结果如图2所示。ST的高斯窗函数形态固定,对信号的时频聚焦能力有限;GST的高斯窗函数更加灵活,调控时间分辨率和频率分辨率的2个参数需要根据实际工区不同而调整,从而使得时频分辨率达到最佳;SST是ST的后处理过程,其分辨率受ST的影响;SGST属于GST的后处理过程,分辨率受GST的影响;MSGST是在信号分析过程中增加截断窗函数,使得信号的横向分辨率更好,多道分析的窗函数选取3×3更佳;HMSGST的挤压阶数需要根据工区的不同而选取,一般挤压阶数不超过4次。通过对比分析可知:ST的时频谱受海森堡测不准原理影响最大,产生的虚假频宽更为严重。相较于ST,SGST的高斯窗函数受参数调控,可以得到较高的分辨率,但是GST的时频聚焦能力依旧存在虚假频宽以及时频算法引起的误差(蓝色区)。对ST、GST的结果分别进行挤压重排得到SST、SGST,它们具有超高的时频分辨率(图2c, 2d)。SST时频谱误差相对于SGST更大(蓝色)。因此本文选择SGST作为后处理

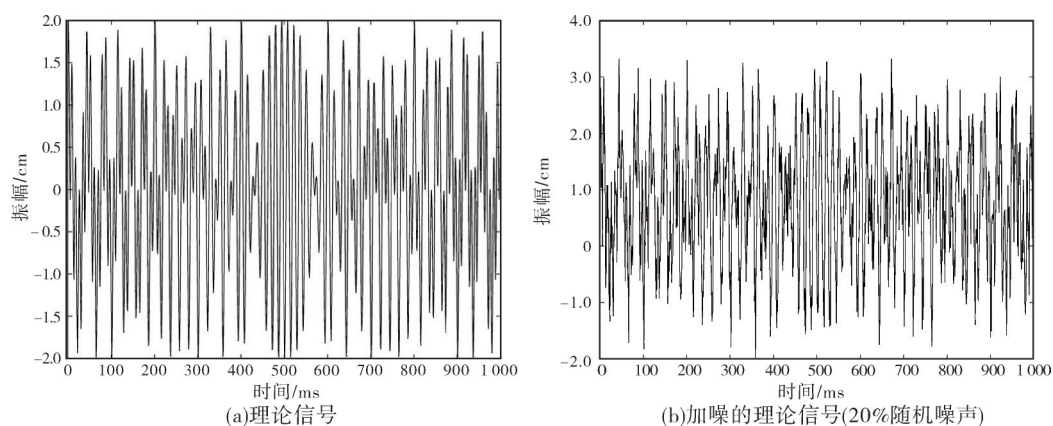
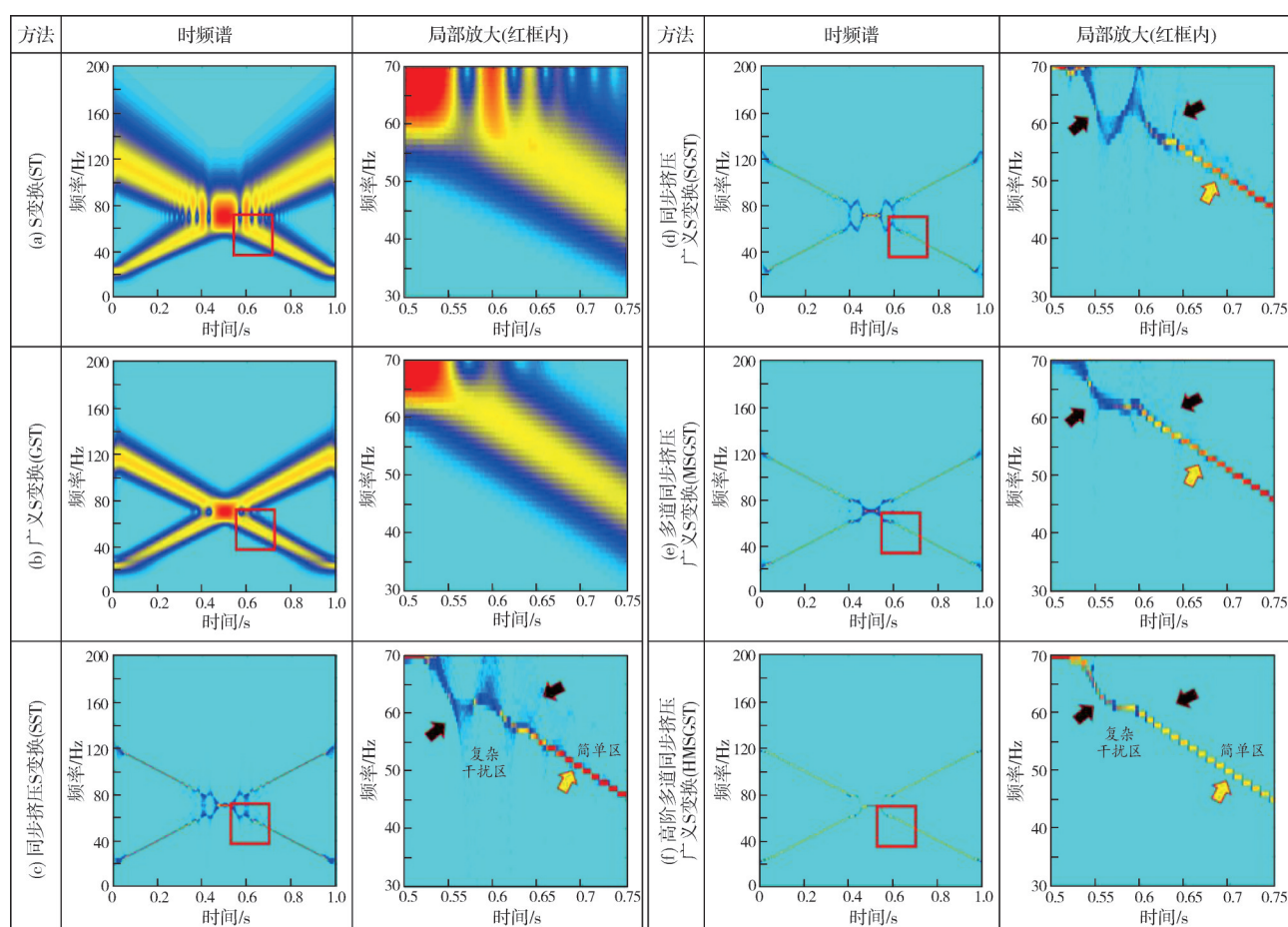


图1 合成的理论交叉信号(频率为20~120 Hz)
Fig. 1 Synthetic theoretical cross signal (frequency: 20~120 Hz)



注：ST、GST存在虚假频宽，HMSGST相较于SST、SGST、MSGST具有更高的时频聚焦能力，对复杂干扰区域信号可以准确识别。

频谱：低 高

图2 理论信号时频谱

Fig. 2 Theoretical signal time-frequency spectrum

的基础算法。对SGST进行多道挤压后得到了如图2e所示的结果。对比图2e、图2d可以发现,在0.4~0.6 s的时频谱中,时频交叉干扰受到了极大压制,横向连续性得到了极大提高,但是依旧存在时频误

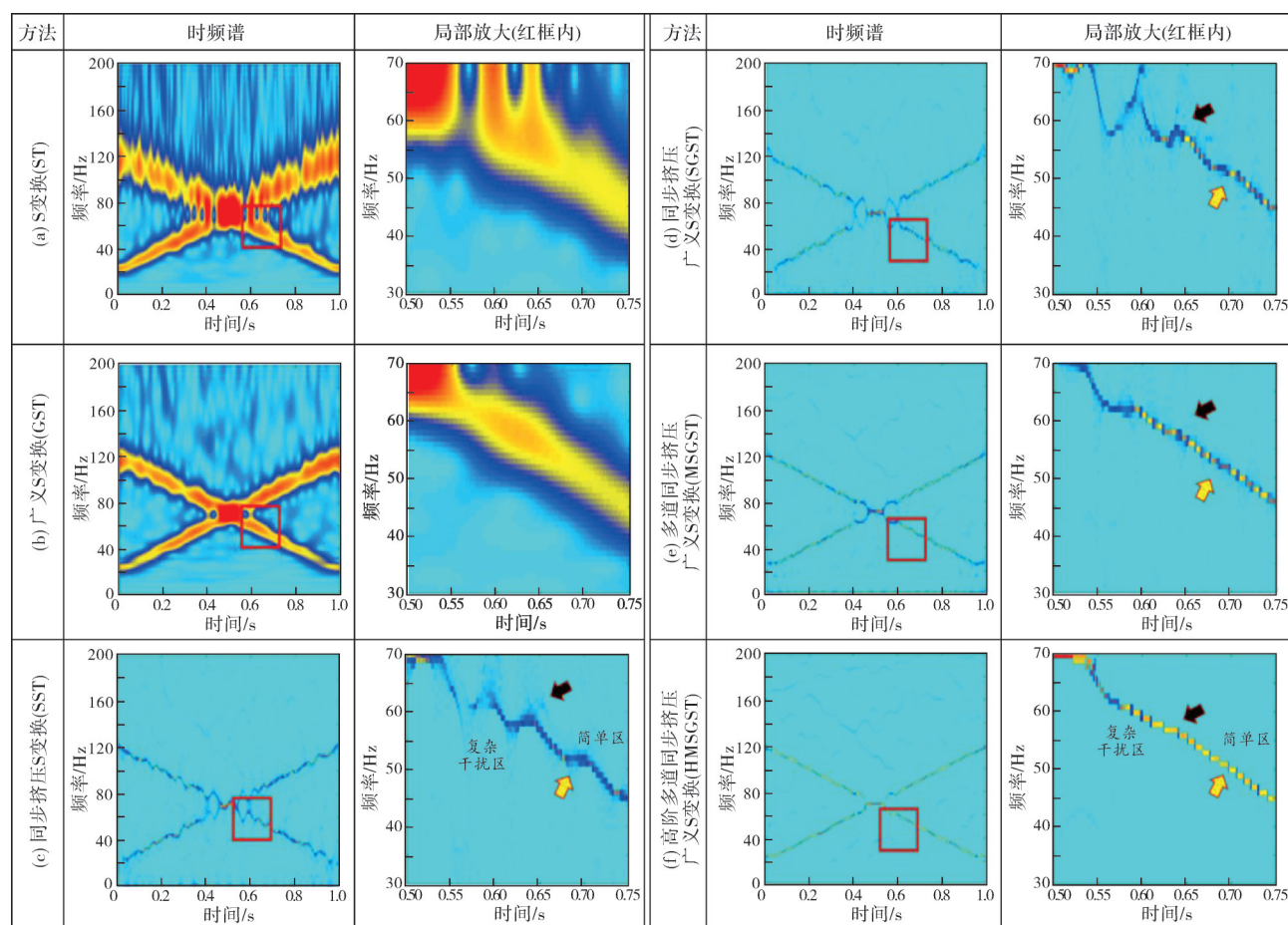
差(蓝色)。借鉴高阶同步挤压变换的思路,开展HMSGST得到了如图2f所示的结果。对比图2e、2f, HMSGST时频谱准确度大大提高。

为了验证并对比ST、GST、SST、SGST、MSGST和

HMSGST的抗噪能力及在高噪声环境下对有效信号的分辨识别能力,对添加20%随机噪声的信号(图1b)分别进行ST、GST、SST、SGST、MSGST和HMSGST处理。与图2对比,可以直观地发现图3中每一个时频结果都出现了一定的扰动,但是HMSGST的时频谱依旧具有高时频分辨率,且受噪声的影响最小。

基于上述合成信号的时频变换结果可知:ST、GST、SST、SGST、MSGST、HMSGST都具有较高的时

频分辨率,但是HMSGST的时频聚焦能力很强,抗噪音能力也很强,更适合处理复杂的地震信号。通过试验对比分析得知,当信号的信噪比低于70 dB时,HMSGST的抗噪能力开始变差,有效信号的时频谱出现扰动,无法准确刻画信号的时频特征。因此,对不同工区、不同地质条件的地震数据需要首先进行HMSGST的参数分析,据此找到适合的参数,进而达到更为准确的计算结果。



注: ST、GST受噪声影响有效信息受到了较大的扰动;MSGST对噪声的免疫力强于SST、SGST,依旧存在噪声的干扰;HMSGST时频变换结果并未受到噪声的太大干扰。

频谱: 低 高

图3 理论信号加噪时频变换结果

Fig. 3 Time-frequency transform results of theoretical signal with noise

2 实际应用

2.1 工区简况

以中国东部某断陷盆地三维工区作为实例,区内NE向主控断裂发育,整体西高东低。受中央隆起带控制,区内断裂、短轴型河道发育。古近系沙河街组、东营组发育断层控制下的多套海相砂岩储

层。区内6口探井,除W1井处于构造低部位外,其他皆位于潜山顶。受地震资料分辨率的限制,传统的断裂识别算法对短轴河道的刻画能力有限,无法准确表征其展布。本文基于HMSGST在时频域开展频率衰减梯度、分频相干等属性分析,从而增强对短轴河道、次级断裂等目标的识别能力和烃类检测能力。

2.2 频率衰减梯度

含油气储层对地震波高频成分的吸收能力更强,因此可通过计算频率衰减梯度进行油气检测。计算频率衰减梯度因子,通常在时频域截取一段频率范围进行子波振幅谱拟合,提取衰减的斜率。根据时频总能量的65%、85%及其分别对应的频率值,计算两点斜率作为衰减梯度值。本文基于叠后地震数据(采样间隔为2 ms),对连井剖面应用HMSGST开展频率衰减梯度计算(图4)。区内T8层对应潜山顶部,T2层对应含油气储层(图4a)。除W6井为干井外,其他皆为油气井,且W4井、W5井产量较高。在基于HMSGST计算的频率衰减梯度剖面上(图4b),T2层横向连续性较好,整体呈高衰减特征,与油气响应具有较好的一致性;受断层遮挡,W6井未见油气显示,其衰减值偏小。

2.3 分频相干

为精细刻画工区内断裂与储层分布,结合

HMSGST开展分频相干计算。首先,基于叠后地震数据分别提取了不同构造部位4口代表井的井旁地震道,并应用HMSGST拓展到时频域内确定优势频带范围;其次,在优势频带范围内提取单频体;最后,对单频体进行相干计算。

如图5所示,在井旁道记录中T2、T8层处于波峰位置;在HMSGST时频变换结果中,红色框所示为储层的优势频带范围,大约介于20~80 Hz。在这个频带范围内提取的单频体,具有更丰富的有效信息。

基于优势频带范围,分别提取出30 Hz、50 Hz、60 Hz的单频体及全频带数据体进行相干计算。对分频相干体沿T2层提取时间切片(图6),刻画断裂、短轴河道。对比全频带相干切片(图6a)可知:在分频相干切片中细节特征反映得更清晰,并且随着频率的增加,反映的内容层次更丰富。如图6中红色箭头所示位置,断裂下盘的近南北向的短轴河道被雕刻出来,同时北东向的次级断裂得到更清晰的刻画(图6c,6d)。

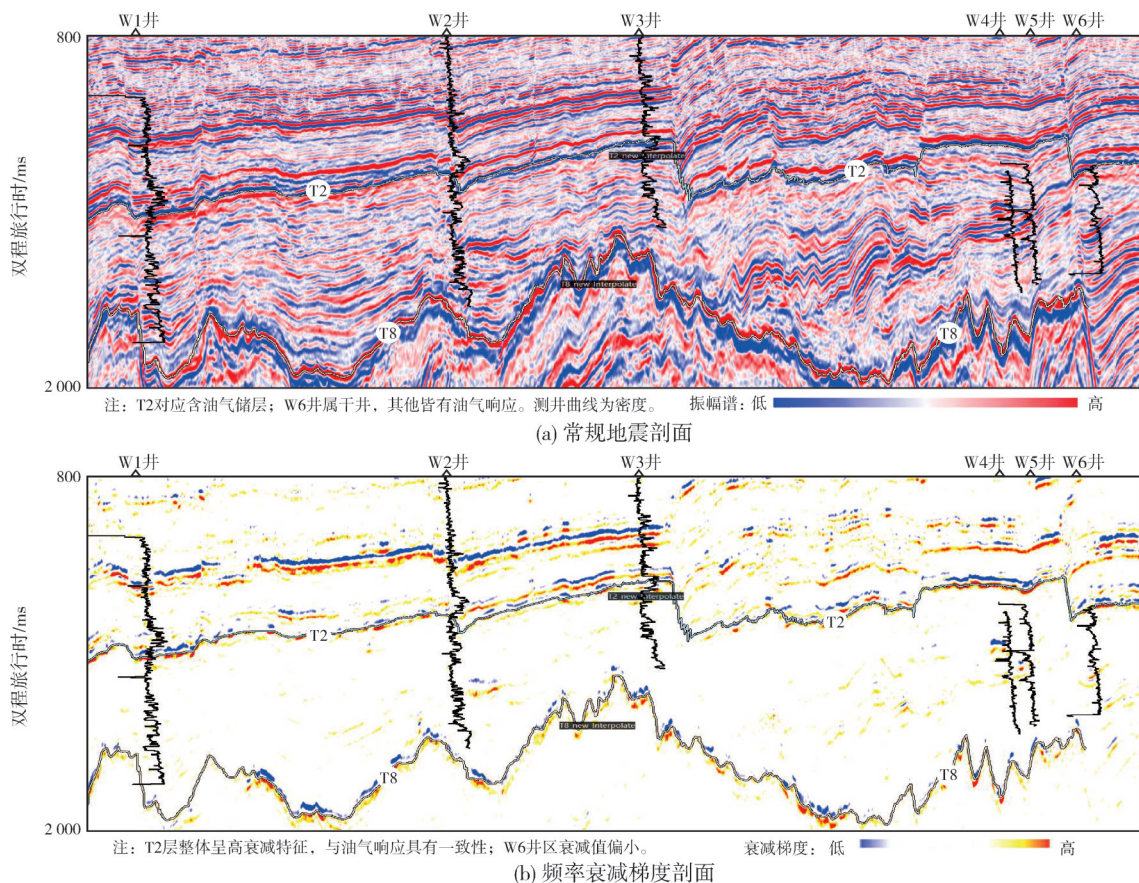


图4 基于HMSGST计算的频率衰减梯度剖面

Fig. 4 Frequency attenuation gradient profile calculated based on HMSGST
(Well-1,2,3,4,5 all have oil and gas response, Well-6 belongs to dry well with small attenuation value)

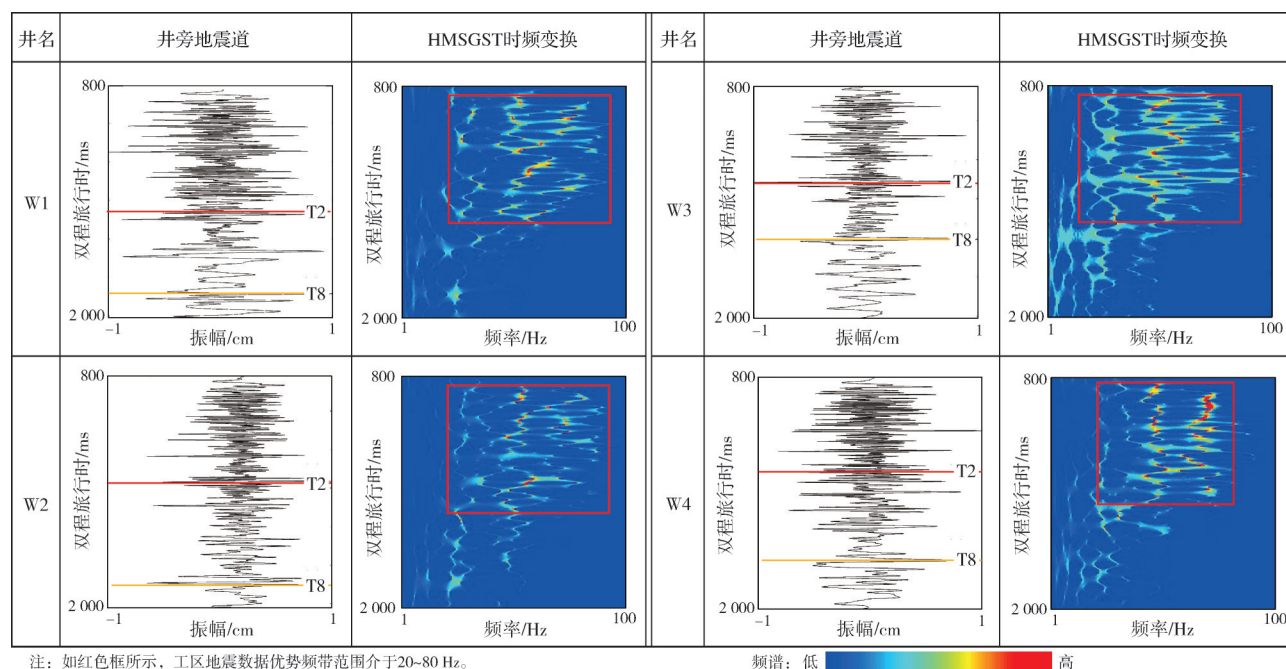


图5 井旁地震道HMSGST时频变换结果

Fig. 5 Well-side seismic traces and time-frequency transform results

(Red box shows that the dominant frequency band of seismic data is about 20~80 Hz, in which it is more reliable to extract single-frequency data volume)

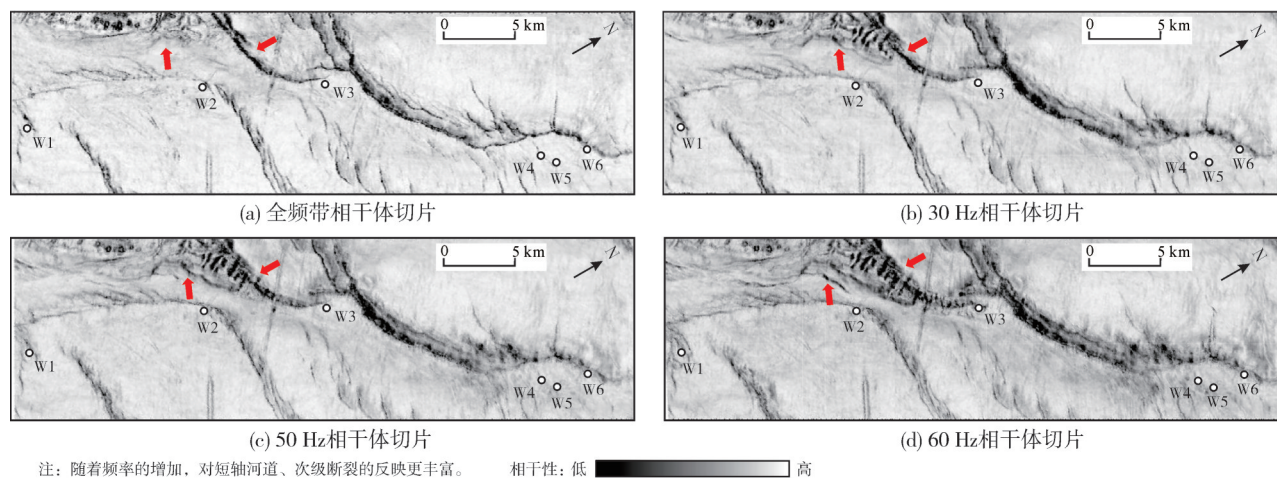


图6 分频相干体沿T2层的时间切片 (白色圆圈代表井位)

Fig. 6 Time slices of frequency-division coherence along T2 layer (white dots indicate well location)

2.4 多属性综合分析

为了更直观地表征沉积特征,对T2层开展RGB多属性融合分析:基于红、绿、蓝三原色,给这3种颜色分别配置一个0~255的数值,再根据不同的比例将它们进行融合,最终得到比原始的单一属性更清晰、信息更丰富的结果^[12]。首先,在基于HMSGST计算得到的频率衰减梯度体上沿T2层得到时间切片(图7a);其次,在基于HMSGST计算得到的分频相干数据体上沿T2层得到时间切片(图6);然后,基于

原始数据体计算曲率属性(图7b);最后,应用RGB算法对相干体属性、曲率属性、频率衰减属性进行融合,得到沿T2层的时间切片(图8)。

在图8红框范围内,W4井、W5井处于高衰减区(油气产量较高),而W6井处于低衰减区(干井),与油气显示具有较好的一致性。结合图4a分析,这是W5井、W6井之间存在断层遮挡而影响了油气运移所致。在图8红色箭头所示的潜山顶部位,全频带计算所得到的融合结果无法刻画短轴河道,而分频率的融合结果对短轴河道的刻画更清晰。处于构造相对低部位

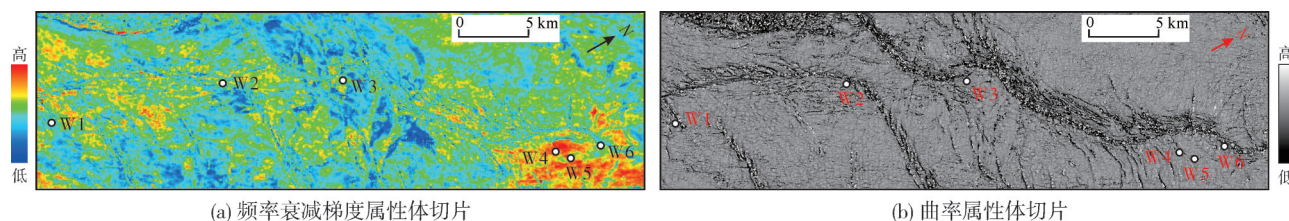
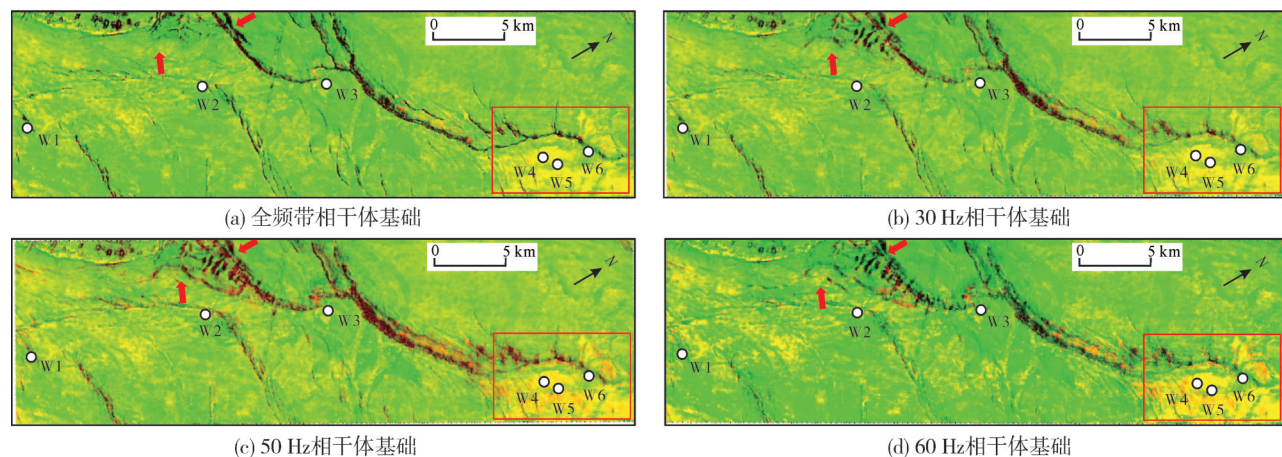


图7 频率衰减梯度属性体、曲率属性体沿T2层的时间切片(白色圆圈表示井位)

Fig. 7 Time slices of frequency attenuation gradient attribute and curvature attribute bodies along T2 layer (white dots indicate well location)



注: 红色箭头位置, 随着频率的增加, 对短轴河道、次级断裂的反映更丰富。红框内W4井、W5井区频率衰减更大。

图8 RGB多属性融合沿T2层的时间切片(白色圆圈表示井位)

Fig. 8 Time slices of RGB multi-attribute fusion results along T2 layer (white dots indicate well location)

的W2井,测井解释为产油气井。如图8、图7a所示, W2井和短轴河道所在区域之间油气衰减较大;中高频融合结果(图8c,8d)显示,W2井附近发育NE向次级断裂,可作为油气运移通道。

3 结论

高分辨率的时频分析算法是开展时频域地震精细解释的基础。多道同步挤压广义S变换(MSGST)极大改善了复杂干扰信号的时频聚焦能力。为了适应高精度勘探开发要求,本文引入高阶挤压思路,提出了高阶多道同步挤压广义S变换(HMSGST)。通过理论信号、加噪信号验证了HMSGST具有更强的时频聚焦能力,但当信号的信噪比低于70 dB时,HMSGST的时频抗噪能力开始变差,有效信号的时频谱出现扰动,无法准确刻画信号的时频特征。

地震数据的不同频率信息可以反映不同的地质信息,地震高频往往对薄储层的识别更有利。基于HMSGST的频率衰减梯度、不同频率成分的地震数据体相干结果,并结合曲率属性,开展RGB多属性融合分析,将含油气异常结果、断裂信息融合,可以准确刻画短轴河道,定位油气藏位置。

参考文献

- [1] GABOR D. Theory of communication [J]. Journal of Institute for Electrical Engineers - part iii: radio and communication engineering, 1946, 93(26): 429-457.
- [2] LU Wenkai, ZHANG Qiang. Deconvolutive short-time Fourier transform spectrogram [J]. IEEE signal processing letters, 2009, 16(7): 576-579.
- [3] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: the S transform [J]. IEEE transactions on signal processing, 1996, 44(4): 998-1001.
- [4] 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 Jinghui, CHEN Wenchao, LI Youming, et al. Generalized S transform and seismic response analysis of thin interbeds [J]. Chinese journal of geophysics, 2003, 46(4): 526-532.
- [5] 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 Xuehua, HE Zhenhua, HUANG Deji. High-efficient time-frequency spectrum decomposition of seismic data based on generalized S transform [J]. Oil geophysical prospecting, 2008, 43(5): 530-534.
- [6] DAUBECHIES I, LU Jianfeng, WU H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: an empirical mode decomposition-like tool [J]. Applied and computational harmonic analysis, 2011, 30 (2): 243-261.
- [7] 黄忠来, 张建中. 同步挤压S变换[J]. 中国科学(信息科学), 2016, 46(5): 643-650.

- HUANG Zhonglai, ZHANG Jianzhong. Synchrosqueezing S-transform [J]. Science in China (information sciences), 2016, 46(5): 643–650.
- [8] 黄忠来, 张建中, 邹志辉. 二阶同步挤压S变换及其在地震谱分解中的应用[J]. 地球物理学报, 2017, 60(7): 2833–2844.
- HUANG Zhonglai, ZHANG Jianzhong, ZOU Zhihui. A second-order synchrosqueezing S-transform and its application in seismic spectral decomposition [J]. Chinese journal of geophysics, 2017, 60(7): 2833–2844.
- [9] PHAM D H, MEIGNEN S. High-order synchrosqueezing transform for multicomponent signals analysis: with an application to gravitational-wave signal [J]. IEEE transactions on signal processing, 2017, 65(12): 3168–3178.
- [10] 严海滔, 黄饶, 周怀来, 等. 同步挤压广义S变换在南海油气识别中的应用[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(3): 1229–1235.
- YAN Haitao, HUANG Rao, ZHOU Huailai, et al. Application of Nanhai oil and gas identification based on synchrosqueezing generalized S transform [J]. Progress in geophysics, 2019, 34(3): 1229–1235.
- [11] WU Nanke, ZHOU Huailai, WANG Yuanjun, et al. Multi-channel synchrosqueezing generalized S-transform for time-frequency analysis of seismic traces [J]. Interpretation, 2020, 8(4): T793–T801.
- [12] 姜秀娣, 翁斌, 刘亚茹, 等. 分频混色技术在高精度地震解释中的应用[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 882–888.
- JIANG Xiudi, WENG Bin, LIU Yaru, et al. Application of spectral decomposition RGB plotting technique for spectral components in high accuracy seismic interpretation [J]. Progress in geophysics, 2013, 28(2): 882–888.

编辑:董庸

Research and application of reservoir prediction technology based on High-order Multi-channel Synchrosqueezing Generalized S-Transform and multi-attribute fusion

ZHAO Huiyan¹, GAO Huan¹, YAN Haitao², WEN Ran¹, SONG Xiuyan³

1. Sichuan Changning Natural Gas Development Co. Ltd;

2. College of Geophysics, Chengdu University of Technology; 3. Precise-energy Group

Abstract: The fine interpretation of time-frequency domain is based on high-resolution time-frequency analysis algorithms. Reviewed the evolution of time-frequency analysis algorithms including S-Transform (ST), Generalized S-Transform (GST), Synchrosqueezing S-Transform (SST), High-order Synchrosqueezing S-Transform (HSST), Synchrosqueezing Generalized S-Transform (SGST), Multi-channel Synchrosqueezing Generalized S-Transform (MSGST), it is claimed that MSGST has high vertical and horizontal resolution. To meet the requirements of high-precision exploration and development, a High-order Multi-channel Synchrosqueezing Generalized S-Transform (HMSGST) is proposed to focus on time-frequency resolution and improves the accuracy of reservoir prediction. By comparing the calculation results of six time-frequency algorithms with theoretical signals and theoretical noise signals, it is verified that HMSGST has high time-frequency resolution and better characterization ability for complex signals, but when the signal-to-noise ratio of the signal is below 70 dB, the time-frequency noise resistance of HMSGST begins to deteriorate, and the time-frequency spectrum of the effective signal is disturbed, making it difficult to accurately characterize the time-frequency characteristics of the signal. Taking the marine sandstone in a certain 3D survey as an example, based on HMSGST, time slices are extracted along the main oil and gas reservoirs (T2 layer) in the time-frequency domain. Due to the corresponding relationship between frequency and geological information, high seismic frequency is often more advantageous to the identification of thin reservoir. Attribute analysis such as frequency attenuation gradient and frequency coherence are carried out to enhance the ability of hydrocarbon detection and recognition of short axis river channels and secondary faults. Furthermore, RGB multi-attribute fusion including the former and curvature attribute is carried out with fine carving for geological details, especially in the time slice of T2 layer based on medium-high frequency coherence. For seismic data from different survey and geological condition, parameter analysis of HMSGST is required, and suitable parameters are a prerequisite for achieving more accurate calculation results.

Key words: time-frequency analysis; High-order Multi-channel Synchrosqueezing Generalized S-Transform (HMSGST); time-frequency resolution; multi-attribute fusion; reservoir prediction

ZHAO Huiyan, First author: MSc, Engineer, mainly engaged in geophysical exploration related research. Add: 26th floor, Shimao Building, No. 99 Mengzhuiwan Street, Chenghua District, Chengdu, Sichuan 610066, China. E-mail: zhao-huiyan@petrochina.com.cn

SONG Xiuyan, Corresponding author: MSc, Senior Engineer, mainly engaged in in-situ stress, reservoir and fracture prediction. Add: Office 506, Block B, Sichuan Chuanbao Building, Chunxi Rd., Jinjiang District, Chengdu, Sichuan 610000, China. E-mail: songxiuyan@precise-energy.com