

文章编号: 0253-9985(2009)06-0779-07

地震频谱成像的地质含义及在沉积特征研究中的应用

张雷¹, 卢双舫¹, 张学娟¹, 杨志如², 何欣¹

(1 大庆石油学院, 黑龙江 大庆 163318 2 中国石油天然气股份有限公司 东方地球物理公司, 河北 涿州 072751)

摘要: 在总结地震频谱成像几方面地质含义的基础上, 通过井资料、砂岩预测厚度及地震属性等资料, 验证了松辽盆地北部朝阳沟油田朝 86 井区振幅调谐体分频切片所能反映出的地质信息: 该区扶余 I 油层东西两侧具有不同的沉积特点。东部单期河道发育厚度大, 但期次少, 砂岩总厚度小, 沉积物来自 东北方向; 西侧河道发育厚度薄, 期次多, 砂岩总厚度较大, 沉积物来自 西南方向。利用分频切片不但可以较准确地识别河道砂体展布形态、反映砂岩厚度分布特征, 同时还可反映出研究区沉积物源、薄储层纵向变化及平面分布规律等沉积特征。

关键词: 频谱成像; 分频切片; 河道; 储层预测; 朝阳沟油田; 松辽盆地 北部

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A

Geologic implications of seismic spectrum imaging and its application to researches on sedimentary features

Zhang Lei, Lu Shuangfang, Zhang Xuejuan, Yang Zhiru, He Xin

(1 Daqing Petroleum Institute Daqing Heilongjiang 163318 China)

(2 BGP PetroChina Company Limited Zhuozhou Hebei 072751 China)

Abstract: The accurate understanding and rational application of the geologic implications of seismic spectrum imaging are helpful to precise description of reservoir distribution patterns and sedimentary features. On the basis of summarizing geological implications of seismic spectrum imaging we validated the geological information reflected by the frequency division slice of amplitude tuning cube of the Chaog86 wellblock in the Chaoyanggou oilfield with well data estimated thickness of sandstone and seismic attributes. The Fu I oil layer in the study area has different sedimentary features in the east and west sides. In the east side although the single channel sandbody is thick the total thickness of sandstones is small due to the small number of superimposed channel sands. The sediments are sourced from the provenance in the northeast. In contrast in the west side although the single channel sandbody is thin the total thickness of sandstones is relatively large thanks to the large number of superimposed channel sands. The sediments came from the provenance in the southwest. Frequency division slices not only can accurately reflect the areal distribution and vertical thickness of the channel sandbodies but also can indicate the provenance, vertical variation and areal distribution of thin reservoirs.

Key words: spectrum imaging; frequency division slice; reservoir prediction; channel; Chaoyanggou oilfield; North Songliao Basin

地震频谱成像是一项基于频率谱分解的地震数据处理技术, 通过短时窗离散傅里叶变换 (DFT) 或广义 S 数学变换等将地震数据由时间域

转换到频率域, 所产生的调谐振幅数据可直接用于储层解释, 识别地层的时间厚度变化^[1~3]。基于薄层调谐原理的频谱成像技术可以很好地检测

收稿日期: 2009-10-30

第一作者简介: 张雷 (1979-), 男, 博士、讲师, 矿产普查与勘探。

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-04-0345)。

储层边界及其空间分布范围,其解释分辨率高于常规地震主频所能达到的分辨能力^[4~6]。

早期的频谱分解技术是沿地震反射层位方向进行频谱分析,用频率随时间的变化关系来研究薄层结构、判断沉积环境。1997年 Lopez等人提出短时窗内通过频谱分解研究薄层变化的地震频谱分解技术^[7~8]。随后,对短时窗频谱分析的数学方法的改进、技术参数的优选及在薄储层预测的实际应用等方面的研究工作不断取得进展^[4~9~17]。然而对于通过数学手段利用地震资料解决地质问题的频谱分析方法而言,关于地震资料频谱成像结果在具体地区可反映的地质含义还没有得到全面的认识和充分的利用。正确理解和利用地震频谱成像数据的地质含义,有利于我们对薄储层形态和厚度及储集层整体分布规律的预测,也有利于对地层纵向变化规律及沉积相带演变的认识,从而使我们能够更全面的理解和利用地震资料所带来的丰富地质信息。

1 方法原理及技术参数

当一个薄层顶部和底部厚度接近 1/4 波长时,振幅响应达到最大值,产生调谐效应^[9]。反射振幅最大时所对应的地层厚度为调谐厚度。

如果将目的时窗内地震数据中不同频率成分对应的振幅体现出来,那么平面上振幅能量强的位置即为发生调谐效应的位置,从而可确定时窗内该位置具有接近该频率调谐厚度的储层。频谱分析就是将时间域的地震记录转换到频率域,以识别地震记录各频率对应的振幅能量大小。

离散傅里叶变换(DFT)是将时间域函数(地震时间记录)变换为频率域表示,其数学表达式为

$$DFT = A(k) = \sum_{j=0}^{N-1} a(j) e^{ik/N} \quad (1)$$

式中: $k = \sqrt{-1}$; $a(j)$ 为地震时间道在样点 j 处的振幅值; $A(k)$ 为经过傅里叶变换后数据道在频率 k 处的振幅值; N 为时窗内的样点数。

将欧拉等式 $e^j = \cos\theta + i\sin\theta$ 代入上式,可得到如下计算公式:

$$DFT = A(k) = \sum_{j=0}^{N-1} a(j) \left[\cos\left[2\pi j \frac{k}{N}\right] + i\sin\left[2\pi j \frac{k}{N}\right] \right]$$

$$= A(k) + iA(k) \quad (2)$$

其输出结果为复数谱 $|A(k)| e^{i\gamma(k)}$ 。这里, $A(k)$ 为振幅谱; $\gamma(k)$ 为相位谱。振幅谱由公式 $|A(k)| = \sqrt{A(k) + A(k)}$ 计算; 相位谱由公式 $\gamma(k) = \arctan[A(k)/A(k)]$ 计算。

时窗的选择。时窗的选择一般依据地震剖面上反射波的视周期而定,通常取 $T/2 \sim 3T/2$ 。时窗小于 $T/2$ 时,不能完整地反映波峰或波谷,计算出的属性值不真实;时窗大于 $3T/2$ 时,多个反射同相轴同时出现,降低了目的层的分辨能力^[18]。根据目前的地震分辨率,时窗一般选在 30 ~ 60 ms 之间。

频带宽度确定。根据抽样定理,一般每个周期至少有两个采样点才能保证该波的最基本特征。因此频带宽度应为 0 至奈奎斯特(Nyquist)频率 $[f = 1/(2\Delta), \Delta$ 为采样率]。超出这个频率范围的其他频率的波都是不真实的^[7]。

地层时间厚度计算。厚度计算结果必须应用井点数据标定方为有效;相对厚度的确定,可根据频率的高低直接来确定^[1]。实际应用时通过求取第一优势频带的频率来计算时间厚度,即 $\Delta t = 1/(2f)$ 。式中, Δt 为时间域调谐厚度; f 为第一优势频带频率^[18]。

2 频谱成像地质含义

调谐体是目的层内对地震数据进行短时窗频谱分析数学变换,生成在垂向上频率连续变化的振幅数据体^[7]。调谐体的沿层切片,即时窗内同一频率成分对应振幅的能量平面分布图,又称分频切片。频谱分析调谐体分频切片包涵了丰富的地质信息,下面是对调谐体分频切片几方面地质含义的概括性分析。

2.1 分频切片反映薄储层空间展布

分频切片所反应的直接地质意义是时窗内与调谐厚度同一厚度级别的地质体在平面的展布形态,即分频切片上与该频率发生调谐效应的位置振幅较大,连续的大振幅在平面上会呈现出地质体的平面展布形态。在地震垂向分辨率不够的情况下,根据薄层地震反射振幅调谐的原理,薄层地震反射表现为横向振幅能量的差异性,分频切片

即为这种横向能量差异性的平面表现。由于每一种沉积微相所对应的地质体展布形态都有各自的特点, 因此在平面上可根据地质体的长宽比和几何形态来判断沉积体类型。河道砂体具有最大的长宽比和独特的蜿蜒几何形态, 所以在平面上研究河道沉积要比在剖面上相对容易^[19]。

2.2 分频切片反映薄储层信息特征

厚度在小范围内变化的地质体可显示在同一分频切片上; 相邻一定范围内的各频率切片对同一地质体均可有显示。图 1 为地震反射振幅与储层厚度的关系示意图, 当储层厚度为对应频率的四分之一波长时, 地震反射振幅最大, 发生调谐效应。而地震振幅向两侧的减小是逐渐的, 故在小范围内振幅值都较大, 处于同一颜色显示级别内。即在 $\lambda/4$ 厚度左右都可产生相对较大的振幅, 所以在某频率切片上所显示的具有一定形态连续分布的大振幅值区域, 为 $\lambda/4$ 左右一定厚度范围内的地质体的平面形态。同理, 在某频率发生调谐效应的位置, 在各相邻频率切片对应的位置处振幅值相对也较大, 故调谐频率切片相邻若干频率切片上对同一地质体均有显示。

2.3 储层信息显示效果与对应储层特征

当分频切片可清晰呈现地质体平面展布的特殊形态时, 解释结果较可靠, 此时对应地质体的地震反射能量强。目的层具有规模较大的河道或目的层内储层垂向分布层次分明等可产生强反射的情况; 当分频切片上地质体平面形态显示连续性差、不清晰时, 河道解释具有多解性, 通过分频切片解释河道等地质体时, 需要充分结合井资料及各方面地质信息, 提高解释的可靠性。一般这种

情况为目的层内地质体厚度较小或目的层内同厚度级别储层叠置分布复杂等地震反射较弱的地质情况。

2.4 低频切片反映厚储层发育情况

低频调谐振幅分频切片对应厚层调谐振幅, 适当时窗内可以指示储层厚度全区分布趋势, 因此可与相应时窗内地震反演预测砂岩的展布情况相互验证。

3 沉积特征分析应用

3.1 地质概况

研究区(朝 83—朝 86 井区)位于松辽盆地北部中央拗陷区东部朝阳沟阶地上, 其主要储层扶余和杨大城子油层(简称扶杨油层)是以三角洲分流平原河道砂及三角洲前缘水下分流河道砂为主, 由于沉积时期河道的横向迁移摆动频繁, 使砂体错叠连片, 且砂体单层厚度薄, 一般为 1~5 m。该区扶杨油层断裂发育, 其错叠连片的砂体被断层切割, 加之储层物性、局部构造等因素的影响, 油藏类型以构造—岩性和断层—岩性油藏为主^[16]。因此, 识别河道、寻找较厚河道砂体是扶杨油层勘探的关键和难题。

3.2 分频处理及河道解释的可靠性

依据地震层位解释结果, 沿主要目的层以 40 m 时窗滑动, 进行地震分频信息处理, 得到相应振幅调谐体, 在扶一段时窗内振幅调谐体高频(66 Hz)切片上, 可以较清晰的识别和描绘出研究工区内自东北向西南延伸的强振幅河道特征(图 2), 经地震剖面资料及钻井资料分析河道宽度为 110~130 m, 厚度为 7~9 m。朝 70 井、朝深 4 井恰好处于预测的河道位置, 而其对应深度位置测井曲线特征与预测结果显示良好的对应关系(图 3)。

图 3 分别为朝 70 井扶 I 中伽马曲线(红色)和电阻率曲线(绿色)、朝深 4 井扶 I 中伽马曲线(红色)和声波曲线(粉紫色)。河道沉积在测井曲线上表现为钟形或箱形; 自然伽马曲线呈负异常; 声波曲线值较低, 呈齿状; 电阻率曲线为齿化钟型。朝 70 井和朝深 4 井对应预测河道的深度

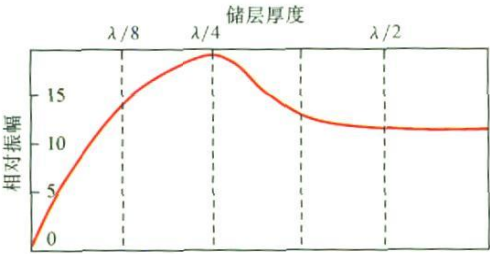


图 1 地震反射振幅与储层厚度的关系
Fig 1 Interrelation between seismic reflection amplitude and reservoir thickness

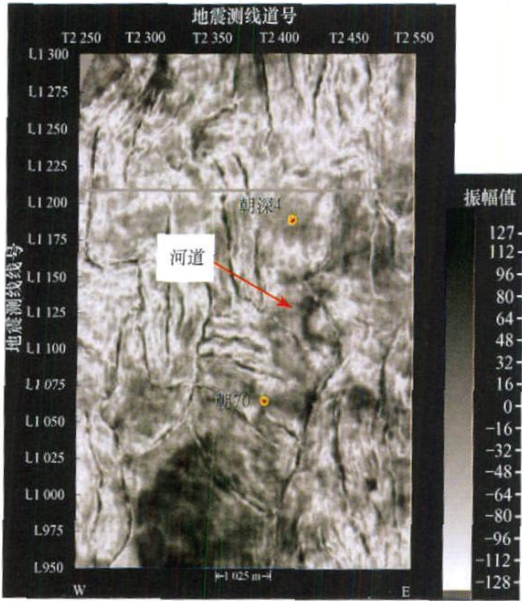


图 2 研究区 66 Hz 对应的调谐振幅
Fig. 2 Tuning amplitude corresponding to 66 Hz frequency in the study area

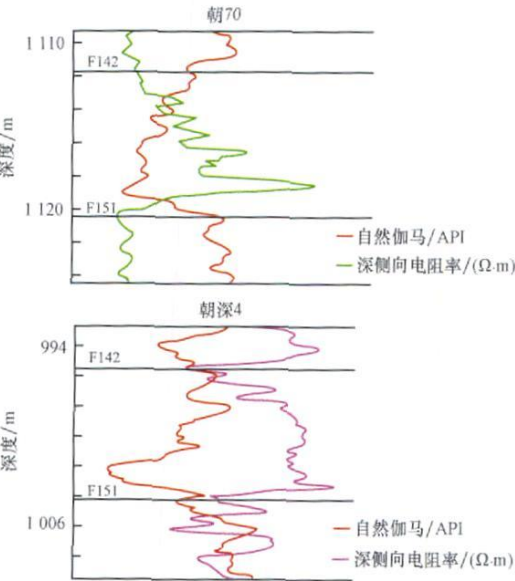


图 3 扶 I 油层组中部测井曲线特征
Fig. 3 Characteristics of logging curves in the middle part of Fuyu-I oil layer

位置测井曲线均显示河道特征,且两井位于同一小层内,砂岩厚度在 7~9 m。

在地震剖面对应平面预测的河道位置同样显示河道地震反射特征,如图 4 为主测方向 1 125 线,在箭头所示位置为对应平面预测河道的位置,显示典型的河道地震反射特征。通过钻测井资料

和地震剖面资料验证表明该预测的河道具有较高的可靠性。

3.3 分频切片反映沉积特征

除了可以利用频谱成像技术准确预测河道外,地震调谐体分频切片还可反映其它地质信息。

3.3.1 低频切片反映整体储层厚度

经对比分析振幅调谐体低频切片和对应时窗内反演砂岩厚度预测图(图 5)发现,振幅调谐体低频切片反映储层的整体平面规律与相应时窗内地震反演所得砂岩厚度规律基本一致,二者起到了相互验证的作用。

图 5 a、b 分别为扶 I 段(60 m 左右)时窗内地震反演砂岩厚度预测图、调谐振幅低频切片(25 Hz)。由图可知工区内扶 I 段储层分布特点,工区内西北部有一自西南向东北延伸的条带状砂岩发育区,工区西北角及工区东南部砂岩发育情况相对较差。总之,砂岩厚度预测图中砂岩发育区域对应调谐体低频切片振幅高值区域,两者对应关系良好。因此,适当时窗内地震振幅调谐体低频切片能够反映全区砂岩分布情况。

3.3.2 分频结果反映沉积特征差异

由频谱成像技术预测的河道位于工区内的东侧,但通过砂岩厚度预测图(图 5 a)可知此区域砂岩发育相对不是最好的,那么在砂岩发育较好的西侧为什么没有通过频谱成像技术找到可清晰识别的河道呢?

由工区内 138 口开发井、5 口探井砂岩数据统计发现(图 6),该地区扶余油层单砂层厚度在 0~9 m 之间,大部分单砂层厚度在 5 m 以内,厚度在 1~2 m 的单砂层最多。值得指出的是参与统计的开发井都位于工区内西侧,且单砂层厚度 7 m 以上的统计点层数 50% 来自工区内东侧的探井,除此之外位于工区内西侧的 140 口井中只有朝 83 井、芳 124-32、芳 102-24 和芳 105-25 井分别具有一个 7 m 以上的单砂层。工区东西两侧砂岩具有不同的沉积特点。如图 7 a 为工区内西侧具有代表性的一类开发井芳 106-16 井扶 I 上 40 m 时窗内砂泥岩曲线及波阻抗曲线,由曲线发现该井反映特点为同一厚度级别(1~2 m)的不同期次河道叠置发育,这种情况下,在同一调谐

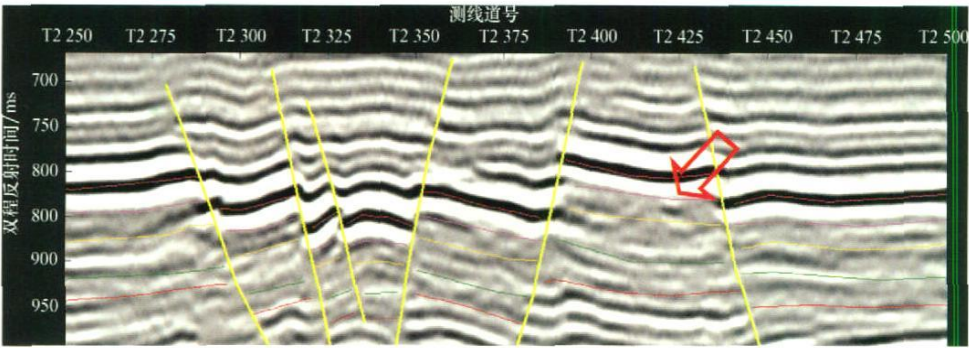


图 4 主测方向 1125 线地震剖面河道地震反射特征

Fig. 4 Seismic reflectance signatures of channel in the in-line section of Line 1 125

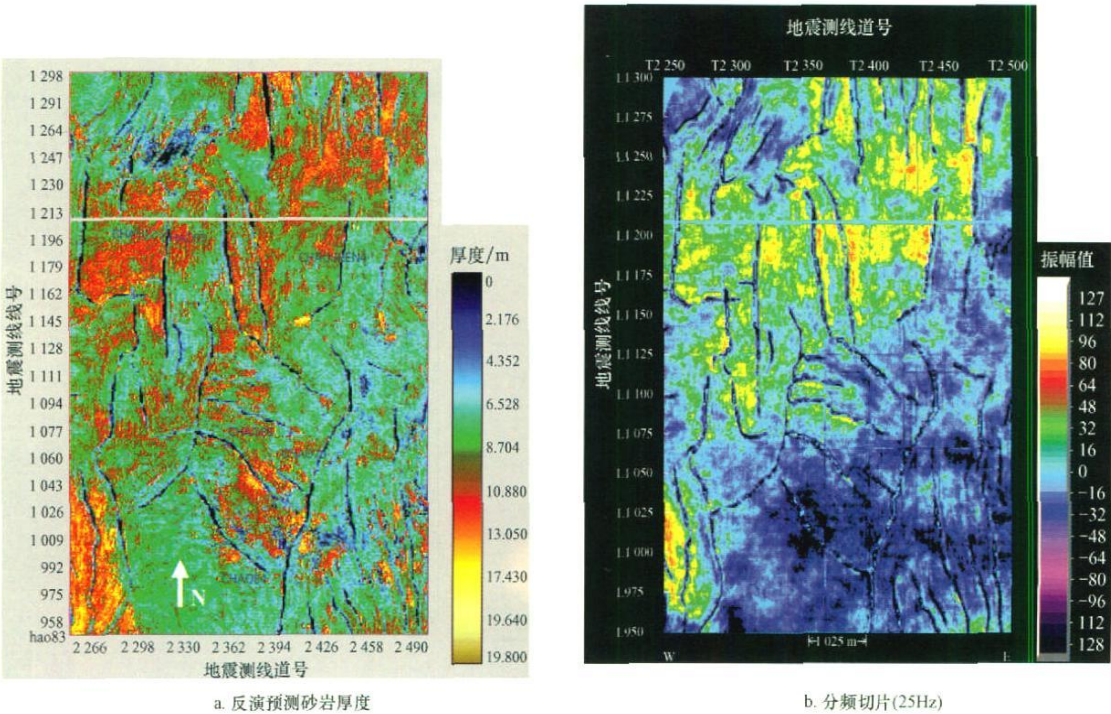


图 5 研究区扶 I 油层组反演预测砂岩厚度、25 Hz 分频切片和地震振幅属性

Fig. 5 Estimated thickness of sandstone by seismic inversion, frequency division slice (25 Hz) and seismic amplitude attributes of the Fuyu-I oil layer in the study area

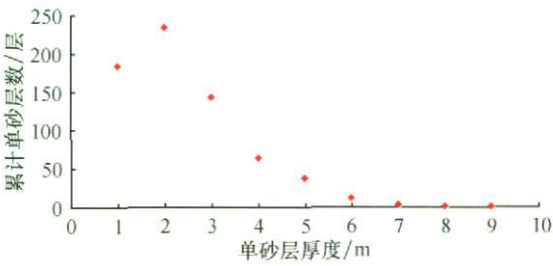


图 6 扶余油层单砂层厚度统计

Fig 6 Statistics of single sandbody thickness in Fuyu oil layer

振幅频率切片上, 多期河道共同显示, 所以单期河道形态不易识别; 如图 7 b 为工区西侧另一具有代表性的开发井芳 106—18 井扶 I 上 40 m 时窗内砂泥岩曲线及波阻抗曲线, 由砂泥岩曲线可发现时窗内该井位置砂岩发育 6 套, 单层厚度 1~3 m 呈上下两组分布, 每组内砂岩之间有 1~3 m 的间距, 通过波阻抗曲线可发现, 每组砂泥互层组内砂泥波阻抗差较小, 整组互层在曲线上共同显示为一组高阻特征, 这种情况即垂向叠置发育的多期河道, 经压实作用, 在地震记录中共同显示为一套

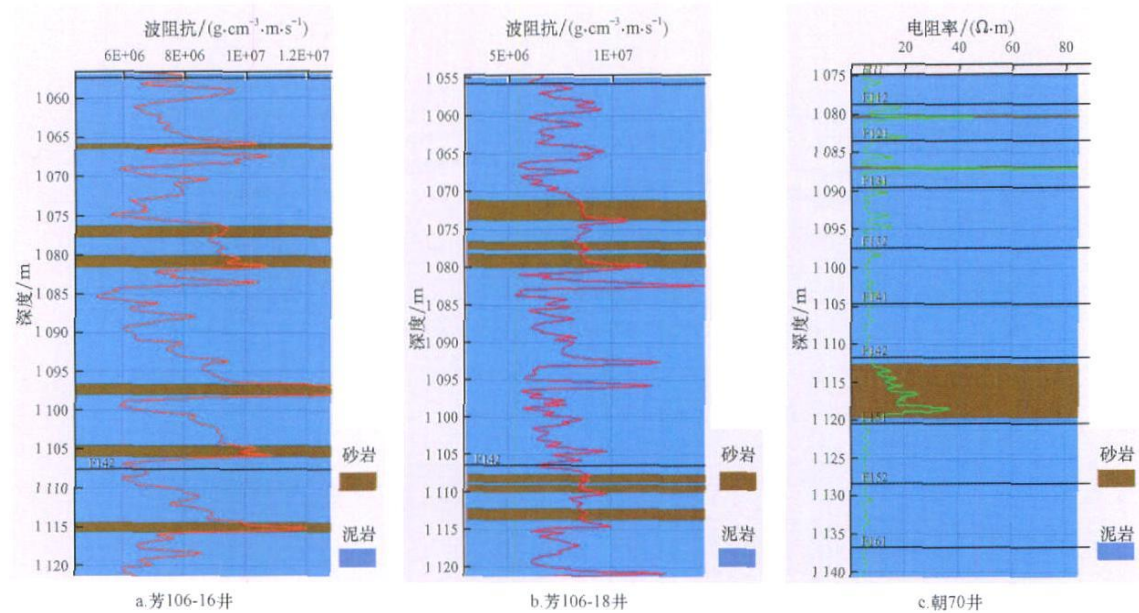


图 7 相同时窗内岩性曲线对比

Fig 7 Contrast of lithologic curves in the same time window

较厚砂岩的特征,在调谐振幅分频切片上同样不能呈现单期河道所具有的蜿蜒形态,因此不易识别。这也是为什么低频切片与砂岩厚度预测图比较吻合的原因之一。图 7 为工区东侧探井朝 70 井扶 I 上 40 m 时窗内砂泥岩曲线及电阻率曲线,该井时窗内发育砂岩 3 套,厚度分别为 0.3 0.4 7.3 m,具有单期厚度较厚的河道砂岩,除此之外的砂岩发育都较薄,这种情况下,河道砂岩与围岩波组抗差较大,反射能量相对较强。当地震道上振幅有明显增大时,沉积体主频附近有很清晰显示^[29]。因此在振幅调谐体同一频率切片上表现出横向振幅差异较强,且时窗内垂向相同级别砂岩发育较少,单期河道平面特征可较独立的显示于切片上,通过显示出的蜿蜒形态更容易识别出河道。

结合砂岩厚度预测图及工区内各单井砂泥岩曲线分析可得到以下初步认识,工区内西侧沉积的单层河道砂厚度较薄,多期河道交错叠置发育,因此砂岩总厚度较厚,且利用频谱成像分频技术识别河道形态难度较大。工区内东侧具有单层厚度相对较大的河道,但河道发育期次较少,所以砂岩总厚度没有西侧厚,但利用频谱成像技术识别河道形态相对容易些。

虽然该研究区西侧通过频谱成像技术不能识别出较清晰的河道形态,但是在砂岩较发育的西

侧仍然可以利用高频切片及地震剖面资料找到更多的河道特征,只是不够清晰且特征显示间断,不能较连续的将河道特征显示于平面之上。这是由于地质沉积特点造成的频谱成像识别困难,但是这种情况下分频切片依然包涵丰富的地质信息,可以进一步充分结合井资料来进行河道等特殊地质体的识别,避免分频切片河道解释的多解性。

4 总结

- 1) 分频切片所反应的直接地质意义是时窗内与调谐厚度相同厚度级别的地质体在平面的展布形态。因此在平面上可根据地质体的长宽比和几何形态来判断沉积体类型。
- 2) 振幅调谐体高频切片可用来预测特殊薄储层,振幅调谐体低频切片可以指示小时窗内储层在平面的整体展布规律。
- 3) 同一地质体的形态在相邻频率振幅切片上均有显示,因为调谐振幅向两侧是逐渐减小的;同一地质体在各频率调谐振幅叠合图中可显示储层空间变化细节,因为地质体厚度是在一定范围内发生变化的。
- 4) 利用地震频谱成像技术预测河道等特殊薄储层的应用效果,受实际地质情况、原始地震资料等条件的制约。具有薄储层相对规模较大、垂

向叠置关系简单等沉积特点的地区利用频谱成像技术识别河道效果较好; 反之, 具有储层较薄、垂向叠置关系复杂等沉积特点的地区由于地震记录在横向上反射振幅差异的减小或横向特征显示间断, 会使识别难度增大。与此同时这些难易特点也可反映出研究区的不同沉积特点, 结合测井等其它地质资料分析, 可以进一步的认识沉积物源、储层纵向变化及平面分布等沉积规律。

参 考 文 献

1 朱庆荣, 张越迁, 于兴河, 等. 分频解释技术在表征储层中的运用[J]. 矿物岩石, 2003 23(3): 104~108

2 范洪军, 李军, 肖毓祥, 等. 地震分频技术在扇三角洲演化过程研究中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2007 28(5): 682~686 692

3 徐丽英, 徐鸣洁, 陈振岩. 利用谱分解技术进行薄储层预测[J]. 石油地球物理勘探, 2006 41(3): 299~302

4 盛秋红, 肖兰雄. 频谱成像技术在采穴构造储层预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2008 29(1): 141~145

5 Parvka G, Gridley J, Lopez J. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization[J]. The Leading Edge 1999 18(3): 353~360

6 Peyton L, Bottjer R, Parvka G. Interpretation of incised valleys using new 3-D seismic techniques: A case history using spectral decomposition and coherence[J]. The leading Edge 1998 17(10): 1 294~1 298

7 赵力及. 利用地震频谱比进行河道砂体预测[J]. 石油实验地质, 2003 25(3): 244~246

8 Greg Parvka, James Gridley, John Lopez. Interpretational applica-

tions of apectral decomposition in reservoir characterization[J]. The Leading Edge 1999(3): 353~360

9 Widess M B. How thin is a thin bed? [J]. Geophysics 1973 38(6): 1 173~1 180

10 Aydin Akan, Luis F. Evolutionary chirp representation of non-stationary signals via Gabor transform[J]. Signal Processing 2001 81(1): 2 429~2 436

11 Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: the S-transform[J]. Signal Processing 1996 44(4): 998~1 001

12 刘丽丽, 赵中禾, 李亮, 等. 变尺度分形技术在裂缝预测和储层评价中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2008 29(1): 31~37

13 Pinnegar C R, Mansinha L. The S-transform with windows of arbitrary and varying shape[J]. Geophysics 2003 68(1): 381~385

14 John P, Shengjie Sun. Comparison of spectral decomposition methods[J]. EAGE 2006 24(1): 75~79

15 Yanhua Wang. Seismic time-frequency spectral decomposition by matching Pursuit[J]. Geophysics 2007 72(1): 13-20

16 张尔华, 宋永忠, 陈述民, 等. 松辽盆地扶杨油层河道砂体地震识别方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2004 23(5): 113~115

17 刘浩杰, 魏国华. 井间地震资料的频谱分析及其与地震资料的联合应用[J]. 油气地质与采收率, 2008 15(5): 56~58

18 杨林. 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

19 韩喜, 高兴友, 车延信, 等. 利用地震属性沿层分析方法研究河流相沉积环境[J]. 石油地球物理勘探, 2007 42(1): 120~124

20 胡光义, 王加瑞, 武士尧. 利用地震分频处理技术预测河流相储层[J]. 中国海上油气, 2005 17(4): 237~239

(编辑 董 立)

(上接第 778 页)

3 张淑品, 陈福利, 金勇. 塔河油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩储集层三维地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2007 34(2): 175~180

4 张希明, 杨坚, 杨秋来, 等. 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏描述及储量评估技术[J]. 石油学报, 2004 25(1): 13~18

5 韩革华, 漆立新, 李宗杰, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层预测技术[J]. 石油与天然气地质, 2006 27(6): 860~870 878

6 鲁新便. 塔里木盆地塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏开发地质研究中的若干问题[J]. 石油实验地质, 2003 25(5): 508~512

7 康志江, 李江龙, 张冬丽, 等. 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏渗流特征[J]. 石油与天然气地质, 2005 26(5): 634~640 673

8 胡广杰, 杨庆军. 塔河油田奥陶系缝洞型油藏连通性研究[J]. 石油天然气学报, 2005 27(2): 227~229

9 皇甫红英, 阳国进, 王玲. 碳酸盐岩中定容体的识别[J]. 新疆地质, 2004 22(1): 117

10 康志宏, 魏历灵. 动态评价技术在塔河碳酸盐岩缝洞型油气藏中的应用[J]. 天然气工业, 2006 26(08): 53~55

11 杨宇, 杨彦军, 蒋宏伟, 等. 利用类干扰试井判断塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型油藏的井间连通性[J]. 试采技术, 2007 28(1): 21~23

12 肖玉茹, 何峰煜, 孙义梅. 古洞穴型碳酸盐岩储层特征研究——以塔河油田奥陶系古洞穴为例[J]. 石油与天然气地质, 2003 24(1): 75~86

13 Lucia F J, Kerans C, Jennings J W, Jr. Carbonate reservoir characterization[J]. J Petrol Technol 2003 55(6): 70~72

14 Guan L, Wang S, Zhu H. Prediction of a fracture cavern system in a carbonate reservoir: a case study from Tahe oil field China[J]. The Leading Edge 2006 25(11): 1 396~1 400

(编辑 李 军)