

井震联合高分辨率层序地层分析及软件实现

周 静¹, 殷 文²

(1. 山东科技大学 地质科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 东营职业学院 计算机系, 山东 东营 257091)

摘 要:以层序地层学理论为基础,结合地震和测井资料,采用时频分析技术开展高分辨率层序地层划分与对比研究。根据时频计算结果,获得各级层序体的层序旋回特征,结合水进/水退沉积相、沉积间歇面、储层、盖层分布等地质信息,划分沉积地层旋回及内部精细结构。通过井震联合的多尺度匹配方法建立层序地层格架,实现井震资料在相同级别研究目标的综合解释,对经过反射空白区或断层时的两侧反射层位进行对比,从而有效提高储层预测精度,指导地震反演数据的解释,对岩性体进行从定性到定量的精细描述。形成一套完整的层序地层分析软件系统,为薄互层研究和储层预测提供技术平台。

关键词:多尺度时频分析;井震综合解释;层序地层划分;软件集成

中图分类号:P631.429

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2012)03-0040-07

Method of Sequence Strata Analysis with Well-seism Coalition High-resolution and Its Software Realization

ZHOU Jing¹, YIN Wen²(1. College of Geological Sciences and Engineering, Shandong University of
Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Department of Computer Science, Dongying Vocational College, Dongying, Shandong 257091, China)

Abstract: Based on the theory of sequence stratigraphy and combined with the seismic and logging data, the division and contrast of sequence strata with high-resolution was studied by means of the time-frequency analysis technology. According to the result of time-frequency calculation, we have got the characteristics of the sedimentary cycles of different sequence bodies and divided the cycles of sedimentary strata, and the internal fine structure combining with such geological information as the distributions of the sedimentary facies in transgression and regression activities, the interstitial surface of sedimentation, the reservoirs and cap rocks, etc. The sequence strata framework was established with the well-seism coalition multi-scale matching method, realizing the comprehensive interpretation of seismic and logging data at the same level of research objectives, and in the meantime, through the contrast of both sides of reflective horizon of fault or reflective vacant area, it not only effectively improved the precision of reservoir prediction, but also directed the interpretation of inversion data as well as made fine descriptions of lithology qualitatively to quantitatively. A set of integrated analysis software systems for sequence strata was formed, providing an effective technical platform for thin interbed research and reservoir prediction.

Key words: multi-scale time-frequency analysis; well-seism integrated interpretation; sequence strata division; software integration

近几年来,以高分辨率层序地层学为代表的沉积学理论逐渐成为岩性油气藏勘探的主要理论基础^[1]。

收稿日期:2012-12-16

基金项目:国家高技术发展计划("863"计划)项目(2007AA09Z323-2);山东省自然科学基金项目(ZR2010DM016)

作者简介:周 静(1980—),女,山东邹平人,助理研究员,博士研究生,主要从事地球探测与信息技术方面的研究工作。

E-mail:dykjzhoujing@126.com

目前,层序地层学的研究存在诸多不足之处,如:根据测井曲线的变化来划分层序旋回,缺少量化标准;在井间层序地层对比的过程中缺少地震资料的约束等。因此,层序旋回划分的科学性、精度和效率等方面有待进一步提高和改进。

综合利用地震/测井、钻井及露头等地质资料,开展测井高分辨率层序地层划分方法研究,并结合地震时频计算方法进行多尺度匹配,建立地震和测井联合的高分辨率层序地层分析技术。利用该项技术研究沉积盆地的沉积旋回特性,进而确定沉积环境、沉积剖面的发育情况、岩性特征以及油气含量,能够提高储层预测精度,为开展精细地层的地震反演、储层精细描述及储层物性的展布提供保障。

1 构造层序解释

地震勘探把层序体作为勘探目标,不仅对构造特征,而且对旋回性层理结构及物质成分进行了深入研究^[2-3]。构造层序解释是将层序地层学与地震勘探相结合,结合传统地质方法,采用构造层序模型,建立地震层序分类方法。地震测井资料是各级别层序体的综合体,各层序体由相应级别的沉积间歇面所分割^[4-5]。作为地震旋回体,反射系数的分布与相应层序体的频率相关^[6]。构造层序解释主要有两个步骤:①构造层序分析,即各级层序体的详细划分、明确层序体分界面及内部结构,构建层序模型;②对层序体生成过程进行深入研究,并预测构造层序,主要采用的方法包括地质过程和构造层序的模拟^[1,7]。由此,对构造层序结构进行预测,实现地质剖面横向预测。构造层序预测和分析可以在勘探过程中的各个阶段反复开展,划分出低一级层序沉积特征。从区域研究到局部分析,从油气勘探到油气开发,逐级采用构造层序解释,不仅适用于大型层序体的研究,而且对于小规模层序旋回的分析也适用。

目前,构造层序解释仍存在问题:①井震标定后的层序界面有可能不在一个连续可追踪的地震轴上;②采用基于井曲线变化的方法作为层序旋回划分的标准不够明确;③在井间层序地层对比的过程中缺少地震资料的约束等。因此在层序地层划分的效率、精度和量化程度等方面仍需进一步提高。为提高层序旋回划分的精度,已开发出 News、Opentect 及 CycloLog 等相关软件。其中,Opentect 和 News 采用 Wheeler 域转换来划分沉积旋回,适用于小层追踪以及低勘探程度层序地层的研究;Cyclolog 基于测井资料进行层序旋回划分与对比,适应于高开发区的层序地层研究。从油气勘探的实际需求来看,这些软件普遍存在局限性,主要表现在地震、测井综合分析能力不够,应用范围有限,划分层序旋回的功能较单一等。

2 层序分析方法

2.1 三角形滤波器

对时间域的地震记录,通过傅氏变换可得到相应的频谱,但传统计算频谱的方法不足之处:一是计算精度受限于采样长度;二是计算量较大。理论上地震记录应取无限多个值才能得到精确的频谱,但实际上取值范围是有限的,因此计算精度将会受到影响。而精度越高,计算量随之就越大。因此,可以采用快速傅氏变换法来提高计算效率,同时,考虑到储层分析的需要,可加上窗函数,通过窗函数在时间轴上滑动,得到不同时段上的傅氏变换结果。

滤波器的特征参数决定了时频分析的最终效果。其特征包括:①要有足够的频带宽度,以确保滤波器的输出不产生振荡;②为确保地震记录的时间特征,应当使用零相位滤波器,也就是说时移量应当为零;③滤波器的频率响应极大值突出,旁极值低平;④要求滤波器的右截频和左截频对数陡度固定,即滤波器的滤波扫描响应基本相似。

结合上述要求,采用两倍频程零相位的三角形滤波器。根据地层反射系数的周期来确定扫描滤波的步长 Δf 。滤波器的优势频率满足公式

$$f_{n+1} = k f_n \quad (1)$$

其中: k —频率递归梯度,取决于滤波器的个数及主频 f_k ; f_n —第 n 个滤波器的优势频率。

$$k = \exp\left[\frac{1}{nf-1} \lg \frac{f_k}{f_n}\right] \quad (2)$$

一般情况下, k 的取值为 1.05 或 1.2, 即如果第一个滤波器的主频为 10 Hz, 则第二个滤波器的主频为 10.5 Hz 或 12 Hz, 如图 1 所示。不难看出, 相邻滤波器相互覆盖的部分为 $2/3$, 这就保证了每次改变滤波器后都能增加 $1/3$ 的新信息。

2.2 小波变换

小波变换克服了傅里叶变换的窗口大小不随频率变化及缺乏正交分解等缺陷, 同时具有良好的频域局部性和时域局部性, 是进行时频分析较为理想的工具^[8-9]。小波函数具有多样性, 在对地震信号进行小波分析时, 可以选择和地震子波形状相近的波形作为小波。

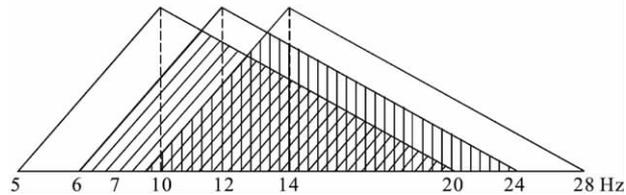


图 1 滤波器递推算算法示意图

Fig. 1 Sketch of recursive algorithm of filter

Morlet 小波是最常用到的复值小波, 通常小波系数的选取应满足归一化条件 $\|\varphi\|^2 = 1$ 。尺度为 σ 的 Morlet 小波 $\varphi_{\sigma,0}(t)$ 的傅里叶变换是

$$\varphi_{\sigma,\tau}(\omega) = \sigma\pi^{-1/4} e^{-(\omega_0 - \sigma\omega)^2/2} = \sigma\pi^{-1/4} e^{-\sigma^2(\omega_0/\sigma - \omega)^2/2} \quad (3)$$

这个尺度小波 $\varphi_{\sigma,0}(\omega)$ 的支撑区几乎是 $\omega > 0$ 的整个频域, 因为当 $\omega < 0$ 而 $\omega_0 > 5$ 时, $e^{-(\omega_0 - \sigma\omega)^2/2} < e^{-\omega_0/2} \approx 0$, 因此 $\varphi(\omega)$ 几乎趋于零而忽略不计。 $\varphi_{\sigma,0}(\omega)$ 的支撑区中心在 $\omega_{\varphi_{\sigma,\tau}}^0 = \omega_0/\sigma$, 波形宽度 $\delta = 1/\sigma$ 并随 σ 的减小而向外扩展; 而小波 $\varphi_{\sigma,0}(t)$ 本身的中心在 τ 处, 以 $\delta_{\varphi_{\sigma,\tau}} = \sigma$ 的方式随着 σ 增大向外扩展。

在使用 Morlet 小波信号 $f(t)$ 时, 需要画出 $|\langle f, \varphi_{\sigma,\tau} \rangle|^2$ 和 $\arctan \frac{I_m \langle f, \varphi_{\sigma,\tau} \rangle}{R_m \langle f, \varphi_{\sigma,\tau} \rangle}$ 两种不同曲线, 然后再分析和解释变换的实数部分表示的过程。

小波变换应当是在频域内进行分析, 而不是在时间域内。尺度范围可以通过以下原则确定: 如果信号 $f(t)$ 的采样间隔是 Δt , 那么根据 Shannon 采样定理, 采样频率 f_s 须是信号 $f(t)$ 所包含的最高频率的 2 倍, 因为 $f_s = 1/\Delta t, f_s \geq 2(f_0/\sigma_{\min}), \sigma_{\min}$ 是分析中的最小尺度, 由此可以得到

$$a_{\min} \geq \frac{\omega_0 \Delta t}{\pi} = \frac{2\pi f_0 \Delta t}{\pi} = 2f_0 \Delta t \quad (4)$$

分析的最大尺度 σ_{\max} 通过确定小波 $\varphi_{\sigma,\tau}(t)$ 的扩展宽度 δ 得出。考虑到 $|\sigma_{\sigma,\tau}|$ 的幅值在 $3\sigma_{\varphi_{\sigma,\tau}}$ 之处将下降到 99.9%, 因此可以附加一个条件 $3\sigma_{\varphi_{\sigma,\tau}} \leq (t_{\max} - t_{\min})/2$, 也就是说 Morlet 小波支撑区满足:

$$\sigma_{\max} \leq \frac{t_{\max} - t_{\min}}{6} \quad (5)$$

2.3 Fischer 曲线求取

首先, 根据测井资料建立的 ϕ - Z 关系为:

$$\phi_{\text{泥}} = 0.66e^{-8.15 \times 10^{-4} Z}; \phi_{\text{砂}} = 0.41e^{-4.34 \times 10^{-4} Z}$$

其次, 根据每一小层序中各种岩性百分比 b_i 计算出该小层序的平均厚度与深度之间的关系:

$$\bar{\phi}(Z) = b_1 \phi_1(Z) + b_2 \phi_2(Z) + \dots + b_i \phi_i(Z) + \dots$$

最后, 计算出各小层序原始厚度:

$$H_i = \int_{Z_i}^{Z_{i+1}} [1 - \bar{\phi}(Z)] dZ$$

其中, Z_i, Z_{i+1} 分别为小层序 i 的顶、底界埋深, 未脱压实校正厚度 $h_i = (Z_{i+1} - Z_i)$, m。

求取各旋回小层序原始厚度后, 即可得到 Fischer 曲线图。

3 井震联合层序分析

高分辨率层序地层对于高精度层序划分和分析研究具有重要意义。以高分辨率测井资料、地震剖面、岩芯和三维露头资料为基础, 进行精细层序划分和对比方法研究, 并建立不同级别储层的层序地层对比架构。

对生油层及储层分布进行评价,进而合理解释各种沉积单元在纵横向上的成因及相互关系^[10]。通过层序、体系域以及基准面旋回等的划分和识别,使其与沉积体在空间配置和时间序列的演化有机地联系起来。在等时地层框架内,地震、测井资料与高分辨率的岩心相结合,可以有效弥补常规层序地层分析方法的不足,并提高时间分辨率,进而可以有效提高地层预测的准确性。图 2 为开展井震联合进行层序地层分析的示意图。

传统的时频分析方法是从小波变换方法发展起来的,即将一维时间序列 $f(t)$ 变换成时频域,在时频域内进行层序分析。由于构造运动周期性的特点,随着水平面规律性的升高和沉降,地层的沉积也相应的表现出旋回性和韵律性,而这种旋回性恰好与时频特征的方向性相一致,根据时频特征可以确定沉积旋回,并进行层序解释^[11-12]。因此,对地震、测井资料进行时频分析,即将地震测井资料 $f(x, t)$ 变换到 $X-T-F(3D)$ 空间去研究层序地层。

设函数 $\psi(t)$ 为基本小波,函数簇为 $\psi_s(t) = (1/s)\psi(t/s)$,则地震道或测井曲线 $f(t)$ 经小波变换为

$$Wf(s, t) = f(t) * \psi_s(t); \tag{6}$$

对(6)式两边取傅里叶变换,得

$$\hat{W}f(s, \omega) = (1/s)\hat{f}(\omega)\hat{\psi}(s, \omega)。 \tag{7}$$

其中: s, ω —小波分量的中心频率, ω —基本小波中心频率。参数 s 的变化会影响滤波器分量中心频率的变化。每个滤波器分量实际上是带通的,采用滤波器各级从低频到高频分量对 $f(t)$ 进行滤波,即实现 $F-T$ 分析。

同理,对地震剖面或测井曲线 $f(x, t)$ 进行变换,得

$$Wf(x, s, t) = f(x, t) * \psi_s(t) \tag{8}$$

$$\hat{W}f(x, s, \omega) = \hat{f}(x, \omega)\hat{\psi}_s(t) \tag{9}$$

式(9)为 $f(x, t)$ 的变换 3D 时频分析的 $X-T-F$ 域表示式。这样可将 $f(x, t)$ 用变换方法进行 3D 时频分析变换成 $X-T-F$ 数据体,从而利用该数据体进行沉积旋回划分、层序界面追踪解释。

4 层序分析软件系统架构

在层序分析方法研究的基础上,建立适用于层序地层划分和分析的软件功能模块,按照软件工程和面向对象程序设计方法的要求,采用基于数据库设计思想建立文件及索引管理方式,并采用 Qt 技术开展井震层序地层分析软件系统的研发,最终形成功能完善、操作便捷、性能可靠的井震联合层序分析软件系统,实现对实际井震资料的时频计算和分析,并进行层序地层的划分和解释,为储层精细描述和薄互层的研究提供有效的技术平台,图 3 是研究的总体思路。

软件系统结构设计,采用层次化结构设计方法,各层次间相互独立,模块具有高内聚低耦合的特点,通过接口来实现模块间的通信。将软件结构对象化和层次化,有利于建立问题空间和软件空间之间的映射关系,同时,有利于软件的开发、测试、维护和复用。层序分析系统软件模块结构如图 4 所示。

该软件基于图形用户接口标准和交互式分析,建立了四层架构,分别是数据存储层、功能模块层、系统管理层和用户应用层。在用户接口方面采用 Model View Control(MVC)设计模式;数据管理方面基于数据库设计中的文件管理方式,通过建立多级文件索引,支持在 32/64 位系统上实现大规模数据文件的管理。该系统是集工区管理、地震/测井数据管理、滤波器工具管理、层序计算分析、井震层序解释、奇异属性计算与分析、井震时深标定、成果数据保存及显示等诸多功能于一体的软件系统,最终形成功能完善、性能稳定可靠的井震层序分析软件系统。

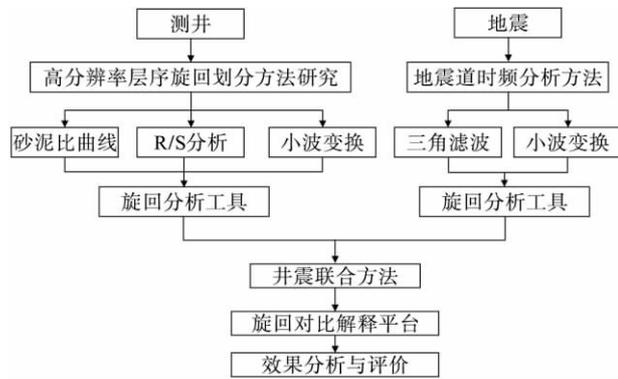


图 2 井震联合层序解释示意图

Fig. 2 Sketch of sequence explanation with well-seismic coalition

5 实际资料应用及效果

选取某油田的区块作为实际资料进行应用分析。图 5 所示为 ES-2 地震测线剖面图。不难看出,该地区的构造较为复杂,采用常规的时频分析方法实现断层或反射空白区两侧反射层位对比较为困难。因此,在等时地层框架内,基于时频分析技术进行井震联合的层序地层单元划分,能够有效弥补常规地层分析方法的不足。

由于以测井曲线形态变化为划分标准的层序划分方法缺少量化标准,为此,系统分别对深度域和时间域进行多级层序分析。并在制作合成记录的基础上,计算其对应的时频谱,为层序解释提供了依据,图 6 展示了对经过时深转换后时间域测井曲线的界面及旋回性层序分析的结果。

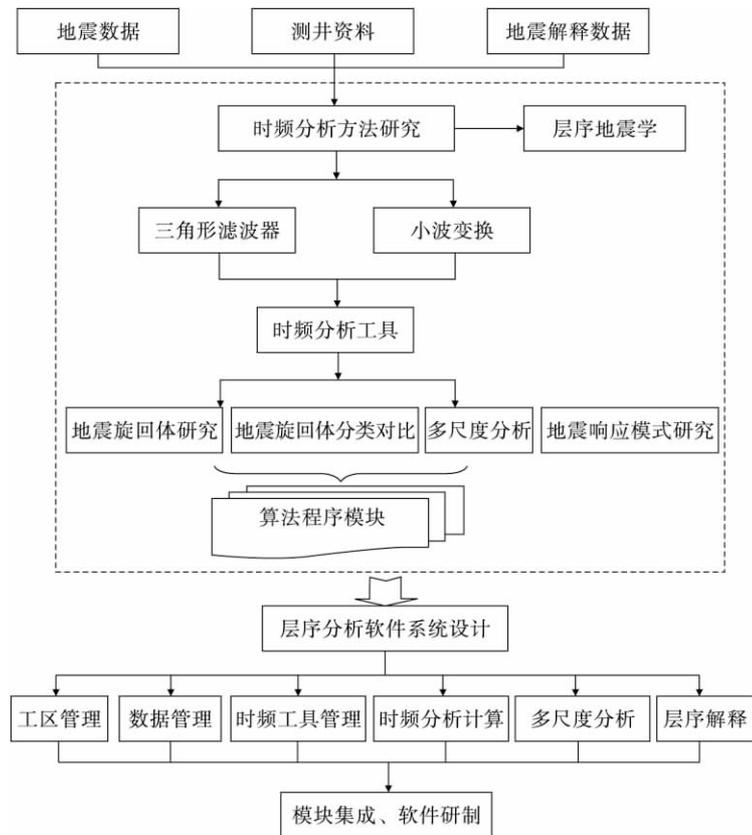


图 3 总体研究思路框图

Fig. 3 The flowchart of overall research idea

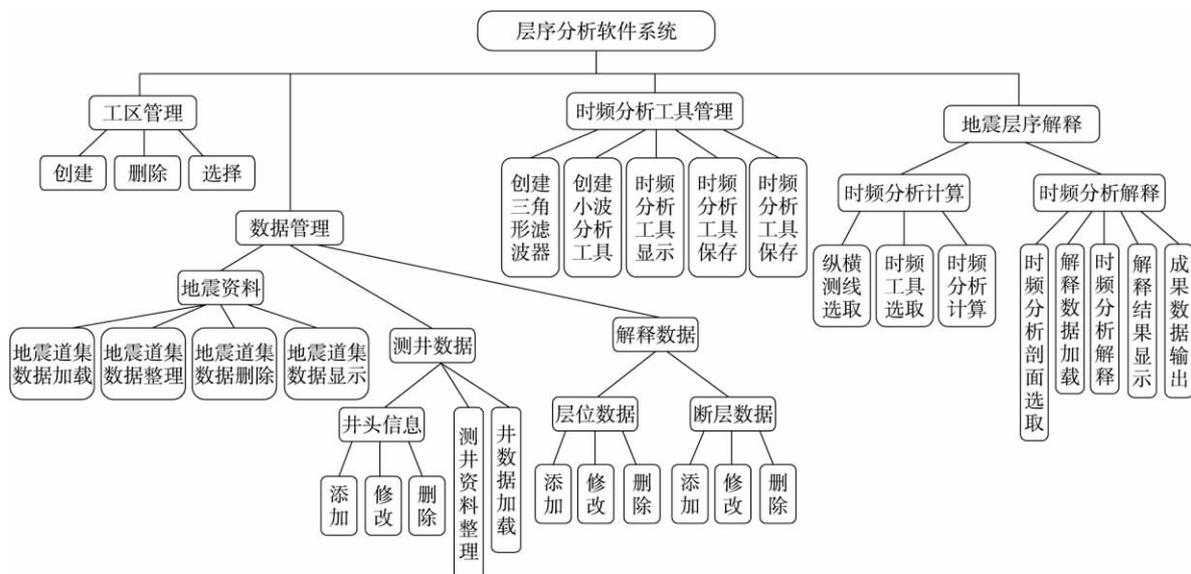


图 4 软件系统应用模块结构图

Fig. 4 Application module structure of software system

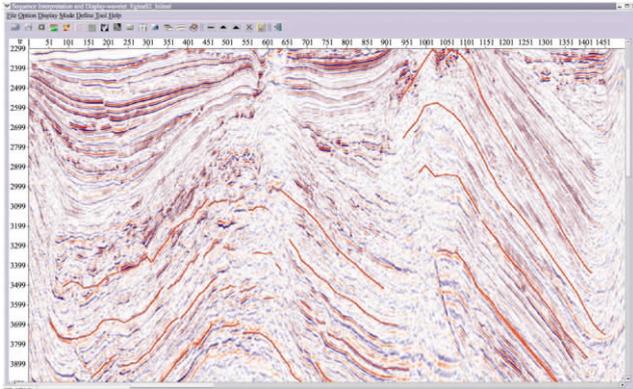


图 5 原始地震剖面及解释层位图

Fig. 5 Raw seismic profile and interpretation horizon

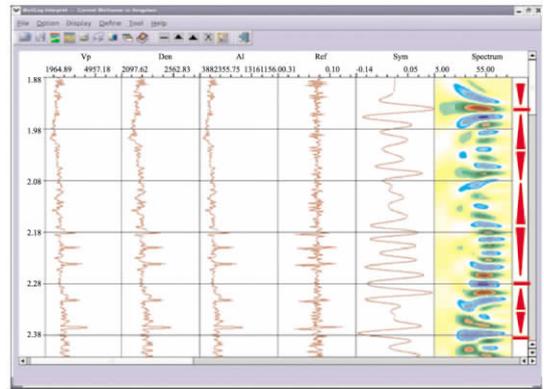


图 6 时间域测井曲线层序解释图

Fig. 6 Sequence interpretation of logging curve in time domain

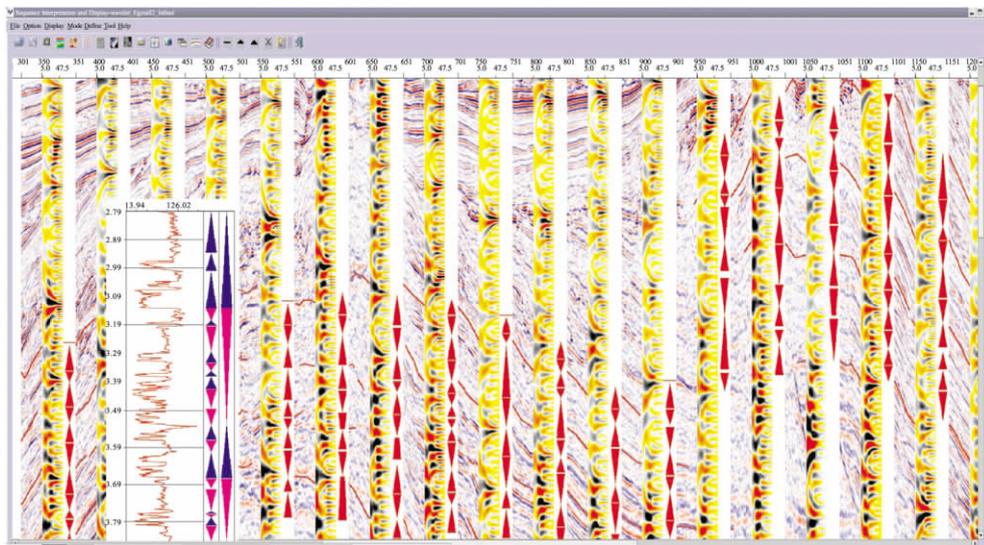


图 7 井震联合层序地层解释图

Fig. 7 Sequence strata interpretation with well-seismic coalition

另外,单纯建立依赖井间层序地层的对比格架,缺少地震资料对比,意义有限;反过来,仅以地震资料和地震时频谱来进行层序划分,缺少了测井资料的控制,可控性较差。为此,以测井资料多级层序旋回性为指导,基于地质层序体模式建立地震响应,划分井震层序旋回,通过井震联合的多尺度匹配方法建立层序地层格架,可实现地震和测井资料在同一级别研究目标上的综合解释。图 7 为井震联合层序地层解释图,图 8 为将不同级的层序解释成果投影到地震剖面的效果图。图 9 是地震剖面与时频计算多尺度剖面的对比分析图,不难看出,多尺度剖面提高了时间分辨率,能够更精细地识别沉积韵

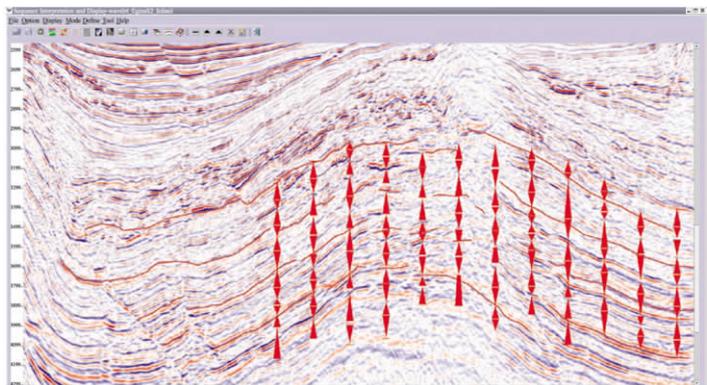


图 8 解释成果投影图

Fig. 8 The projection of interpretation result

不难看出,多尺度剖面提高了时间分辨率,能够更精细地识别沉积韵

律,有效提高了储层横向预测的准确性。

6 结论

随着地震勘探技术的不断发展,不仅可以利用地震和测井资料来解决构造圈闭问题,而且可以划分地层层序,研究沉积相,进行储层物性和油气预测以及油藏描述研究。利用时频分析技术研究地层层序的旋回特性,结合测井、地质资料分析旋回体的分布,以地震时频旋回控制大的层序旋回,单井层序旋回控制高频层序旋回。通过测井、地震等资料综合分析层序体的内部结构、沉积物的物性,可以成功地推断沉积过程,分析油藏的生、储、盖等条件,找到有利圈闭。

参考文献:

- [1] 吴国忱,康仁华,印兴耀. 三维时频分析方法在地震层序分析中的应用[J]. 石油大学学报:自然科学版,2000,24(1):81-84.
WU Guochen, KANG Renhua, YIN Xingyao. Application of 3D time-frequency analysis method to seismic sequence analysis [J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2000, 24(1): 81-84.
- [2] 武建新. 地震层序时频分析系统的设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2011.
- [3] 倪凤田. 基于地震属性分析的储层预测方法研究[D]. 东营:中国石油大学,2008.
- [4] LU S, MCMECHAN G A. Elastic impedance inversion of multichannel seismic data from unconsolidated sediments containing gas hydrate and free gas[J]. Geophysics, 2004, 69(1): 164-179.
- [5] QUAKENBUSH M, SHANG B, TUTTLE C. Poisson impedance[J]. The Leading Edge, 2006, 25(2): 128-126.
- [6] 刘传虎,刘福贵,李卫忠. 时频分析方法及在储层预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探,1996,31(S):11-20.
LIU Chuanhu, LIU Fugui, LI Weizhong. The method of time-frequency analysis and the application in reservoir prediction [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1996, 31(S): 11-20.
- [7] 于建国,姜秀清. 地震属性优化在储层预测中的应用[J]. 石油与天然气地质,2003,24(3):291-294.
YU Jianguo, JIANG Xiuqing. Application of seismic attribute optimization in reservoir prediction[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(3): 291-294.
- [8] HART B, CHEN M A. Understanding seismic attributes through forwarding modeling[J]. The Leading Edge, 2004, 23(9): 834-841.
- [9] 周静毅,印兴耀,吴国忱. 小波变换与地震奇异性属性[J]. 物探化探计算技术,2006,28(2):117-120.
ZHOU Jingyi, YIN Xingyao, WU Guochen. Wavelet transform and seismic singularity attribute[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 28(2): 117-120.
- [10] 印兴耀,吴国忱,张洪宙. 神经网络在储层横向预测中的应用[J]. 石油大学学报,1994,18(5):20-26.
YIN Xingyao, WU Guochen, ZHANG Hongzhou. The application of neural networks in the reservoir prediction[J]. Journal of the University of Petroleum, 1994, 18(5): 20-26.
- [11] 张璐,印兴耀,李红梅,等. 基于地震奇异性属性划分砂砾岩扇体沉积界面[J]. 物探化探计算技术,2009,31(4):361-368.
ZHANG Lu, YIN Xingyao, LI Hongmei, et al. Dividing the depositional interface of glutenite fans based on seismic singularity attribute[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2009, 31(4): 361-368.
- [12] 雍世和,张超谔. 测井数据处理与综合解释[M]. 东营:石油大学出版社,1996.

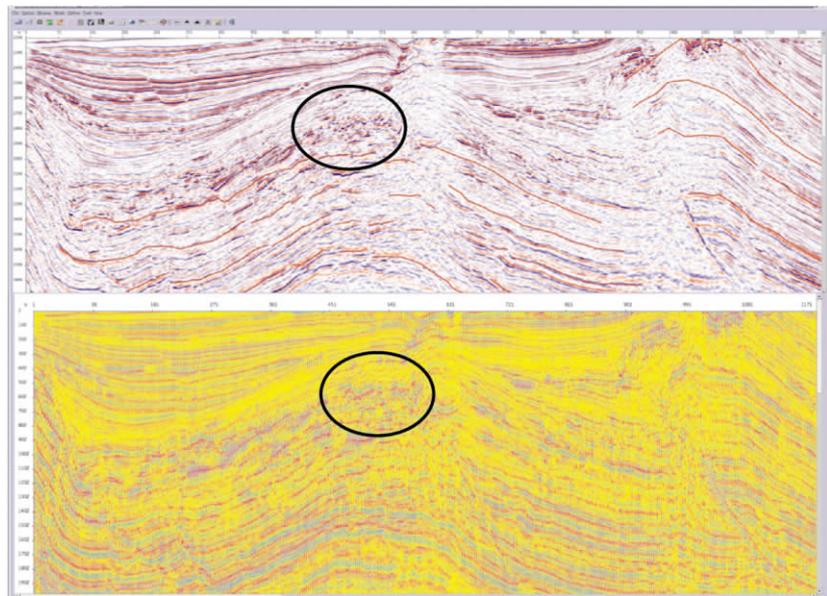


图9 地震剖面(上)与时频多尺度剖面(下)对比图

Fig. 9 Contrast of seismic profile (up) with time-frequency multi-scale profile (down)