

文章编号:0253-9985(2011)05-0718-06

基于谱分解技术的储层定量地震解释

边立恩, 于茜, 韩自军, 陈彬彬

[中海石油(中国)有限公司天津分公司 勘探开发研究院, 天津 300452]

摘要:谱分解技术是一项新的地震储层研究技术,它通过离散傅里叶变换或最大熵的方法将地震资料从时间域转换到频率域进行研究。根据地震波传播理论推导了薄层振幅谱的表达式,证实了薄层谱的频陷特性,即频陷周期的倒数等于薄层的时间厚度。并以此原理为基础,探讨了基于谱分解技术的储层厚度估算的研究思路和技术方法。在实际应用中,通过建立目的层精确的速度场分布和沿层调谐体中第一谱峰频率的求取来达到储层厚度的定量解释。应用实例表明,该方法预测的结果与实钻情况具有很高的吻合度,结果可信,为储层的定量地震解释提供了新的手段和方法,具有广阔的应用前景。

关键词:调谐体;速度场;定量地震解释;谱分解;储层预测

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

Quantitative seismic interpretation of reservoirs based on the spectral decomposition technique

Bian Li'en, Yu Qian, Han Zijun and Chen Binbin

(Research Institute of Exploration and Development, CNOOC Tianjin Company, Tianjin 300452, China)

Abstract: Spectral decomposition is a new technique for seismic reservoir research that transforms seismic data from time domain to frequency domain by discrete Fourier transform or maximum entropy approach. According to the theory of seismic wave propagation, this paper deduces the amplitude spectrum expression of thin beds and confirms their notches characteristics of spectrum, i. e. the reciprocal of notches period equals to the temporal thickness of thin bed. With this principle, we discuss ideas and methods of estimating reservoir thickness based on spectral decomposition. In practice, quantitative interpretation of reservoir thickness is realized by establishing a precise velocity field of targets and computing the first spectral peak frequency in target tuning cube. The application shows that the prediction results are consistent with the drilling data, indicating they are credible. Spectral decomposition provides a new approach and method for quantitative seismic interpretation of reservoirs and has broad application prospects.

Key words: tuning cube, velocity field, quantitative seismic interpretation, spectral decomposition, reservoir prediction

随着油气勘探开发程度的不断深入,地震解释亦向着更精更细的方向发展,其任务已不仅仅局限于描述地下构造的变化,更要求精细刻画储层的横向展布范围及厚度分布,即量化解释,由于受到地震资料分辨率的制约,储层尤其是薄层的定量地震解释^[1-5]一直都是摆在地球物理工作者面前的一大难题。

谱分解技术作为一项新型的地震储层研究技术,它从全新的视角出发,在频率域对地震资料进行革命性的成像,排除了时间域内各种不同频率成分的相互干扰,从而可得到高于传统分辨率的解释结果。但由于受显示方式的限制,该方法未能推广应用。近年来,随着三维地震勘探的普及及地震解释技术由单一的构造解释向三维可视化

收稿日期:2010-09-25;修订日期:2011-09-08。

第一作者简介:边立恩(1982—),男,助理工程师,地震资料解释与储层预测。

解释的发展以及各种切片技术的出现,谱分解技术得到了迅猛的发展。源于BP公司的谱分解技术^[6]已成功应用于沉积相的研究、断裂系统的识别及储层描述等^[7-14],并逐步成为储层预测的一个必不可少的重要工具。本文根据地震波传播理论推导了薄层振幅谱的表达式,并以此为基础探讨了应用谱分解技术进行储层厚度的定量解释方法与流程,应用结果与钻井揭示具有很高的吻合率。

1 基本原理

谱分解技术主要是利用短时窗离散傅里叶变换或最大熵的方法将地震数据从时间域转换到频率域进行研究。当采用传统的长时窗对地震道做频谱分析时,由于反射系数和噪音都是随机的,因此它们的谱都是白噪声,各为一常数,即地震波与子波的频谱形态一致,从地震波的频谱中无法反映薄层反射的信息。而当采用短时窗做频谱分析时,由于短时窗内只包括局部的几个薄层反射界面,这时反射系数不再是随机的,其谱也不再是白噪声,这样地震波的振幅谱和子波的频谱就出现了形态上的差异。这种差异主要表现为薄层的频谱发生了干涉效应,干涉的结果使得地震波的频谱表现为频陷的特征,而这一特征也正是谱分解用于定量地震解释的核心之所在。

1.1 薄层谱的周期性(频陷)

设有如图1所示的一个薄层,入射波 $P_1 = w(t)$, $w(t)$ 为波传波的时间函数;其频谱为 $W(\omega)$,其中 ω 为角频率, t 为波的传播时间, s ;薄层顶、底界面的反射系数为 R_1, R_2 ,顶面的透射系数为 T_1 ,则薄层顶面的反射波(P_{11})为:

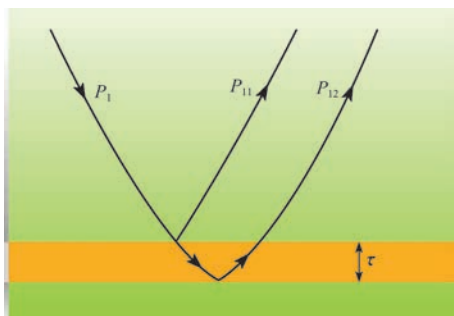


图1 薄层模型示意图

Fig. 1 Sketch of thin bed model

$$P_{11} = R_1 w(t) \quad (1)$$

在忽略多次波的情况下,可以得到经过薄层顶面透射、且在底面上发生发射再经过顶面透射的波(P_{12}):

$$P_{12} = T_1 R_2 T'_1 w(t - \tau) \quad (2)$$

式中: τ 为薄层的双程时间厚度, s ; T'_1 为波从底面向顶面入射时在顶面的透射系数。

根据入射与透射的关系可知:

$$T_1 = 1 - R_1 \quad (3)$$

$$T'_1 = 1 - (-R_1) = 1 + R_1 \quad (4)$$

在垂直入射的情况下 P_{11} 和 P_{12} 就会发生叠加^[15-17]。为便于讨论,图1将他们分开画出,这样薄层顶、底干涉形成的薄层反射波(P'_1)为:

$$P'_1 = P_{11} + P_{12} \quad (5)$$

将式(1),(2),(3),(4)代入式(5)有:

$$P'_1 = R_1 w(t) + (1 - R_1^2) R_2 w(t - \tau) \quad (6)$$

频谱 $[W'(\omega)]$ 为:

$$W'(\omega) = [R_1 + (1 - R_1^2) R_2 e^{i\omega\tau}] W(\omega) \quad (7)$$

可见薄层相当于一个滤波器,对穿过它的地震波的频谱进行了改造,其频率响应 $[H(\omega)]$ 为:

$$H(\omega) = R_1 + (1 - R_1^2) R_2 e^{i\omega\tau} \quad (8)$$

相位谱 $[\phi(\omega)]$ 为:

$$\phi(\omega) = \arctan \left[\frac{R_2 (1 - R_1^2) \sin(\omega\tau)}{R_1 + R_2 (1 - R_1^2) \cos(\omega\tau)} \right] \quad (9)$$

振幅谱 $|H(\omega)|$ 为:

$$|H(\omega)| = \sqrt{R_1^2 + (1 - R_1^2)^2 R_2^2 + 2R_1 R_2 (1 - R_1^2) \cos(\omega\tau)} \quad (10)$$

式中: ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$; f 为频率, Hz。

即有:

$$|H(f)| = \sqrt{R_1^2 + (1 - R_1^2)^2 R_2^2 + 2R_1 R_2 (1 - R_1^2) \cos(2\pi f\tau)} \quad (11)$$

由(10)式可见,薄层的频谱是一个周期谱,周期(T_f)为:

$$T_f = \frac{2\pi}{2\pi\tau} = \frac{1}{\tau} \quad (12)$$

频陷的周期为地层时间厚度的倒数,这也正是谱分解技术用于储层厚度计算的理论依据。如图2所示为一楔状体地质模型及其频谱分布,由

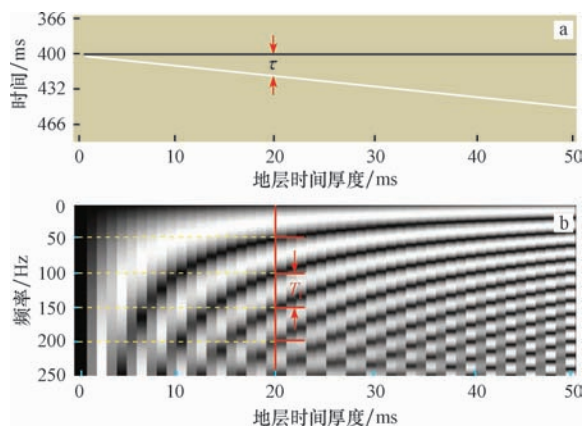


图2 理论模型实验

Fig. 2 Theoretical model test

a. 楔状体模型; b. 频谱分布

图上可以看到,地层时间厚度为 $\tau = 20$ ms 的地震道(图 2a)其对应的振幅谱(图 2b)表现为周期性频陷的特征,频陷周期 $T_f = 50$ Hz $= 1/\tau$ 。可见,地层时间厚度与频陷周期具有如式(12)的对应关系。

1.2 厚度估算

在实际应用中,并不是根据公式(12)来直接量取两个相邻频陷的频率之差,而是通过求取第一谱峰频率 f_0 即第一个振幅谱峰值对应的频率来计算时间厚度。根据频陷谱的周期性可知:

$$T_f = 2f_0 \quad (13)$$

由于

$$\tau = \frac{2z}{v} \quad (14)$$

式中: z 为薄层的厚度; v 为波在薄层内传播的速度。将式(12),(13)代入式(14)并整理可得到基于谱分解技术进行薄层厚度估算的实用化公式:

$$z = \frac{v}{4f_0} \quad (15)$$

2 应用实例

2.1 目标体储层地质概况

根据 X 油田钻井岩心观察与描述、壁心及录井资料,结合地震相、测井相、古生物资料以及区域沉积研究分析认为,该区明化镇组下段为曲流河沉积,是油田的主要含油层系。本次研究的目标层如图 3 所示,测井曲线(SP, GR)形态多为箱形。结合测井相分析认为,该时期物源供应充足、

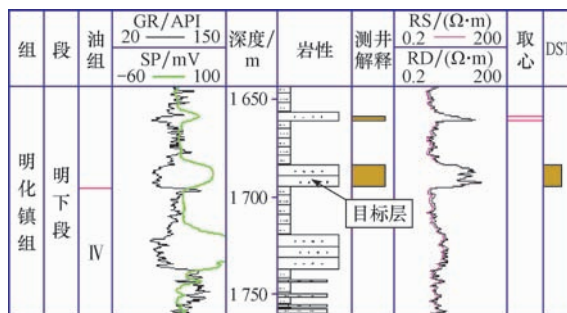


图3 油层综合柱状图

Fig. 3 Composite histogram of reservoir

水体环境稳定,主要发育曲流河河床滞留沉积微相及边滩微相。目标层段地层在纵向上主要表现为厚层的泥岩夹薄-中厚的砂岩,呈典型的泥包砂沉积模型。因此目标体的地质模型与本文讨论的方法中的理论模型是相似的,也即本文探讨的方法对该目标体是适用的。

2.2 地震资料的品质

本次研究目的层埋深 1 690 m 左右,地震资料信噪比较高,同相轴连续性较好,通过对目的层段的频谱分析(图 4),可以看到,地震资料的频带较宽,主频 40 Hz,速度以 2 300 m/s、按照四分之一波长计算,该层段地震资料纵向分辨率为 14.4 m,而井上钻遇的砂层厚度都低于甚至远低于这个值,而且砂体的厚度在横向变化大,这给砂体的厚度解释带来很大的难度。

通过谱分解技术即可以克服常规地震资料分辨率不足的缺陷又可以达到快速评价砂体厚度分布的目的,以确定其开发价值,优化钻井方案。由公式(15)可见,利用谱分解技术进行储层厚度估算需要获取两个变量的值。第一是薄层的速度场分布,第二是第一谱峰频率的求取。厚度估算的精度取决于这两个变量的精度。

2.3 速度场的建立

为了获取目的层比较精确的速度场,采用 DepthTeam Express 模块来进行速度场的建立。首先利用井上的时深关系曲线通过井间插值生成速度体(图 5)。由于该方法是通过井点速度在水平方向线性插值完成的,故得到的速度体呈水平层状分布,当地层起伏变化较大时,这样的速度场与真实的速度场往往差别较大。因为地层的速度分

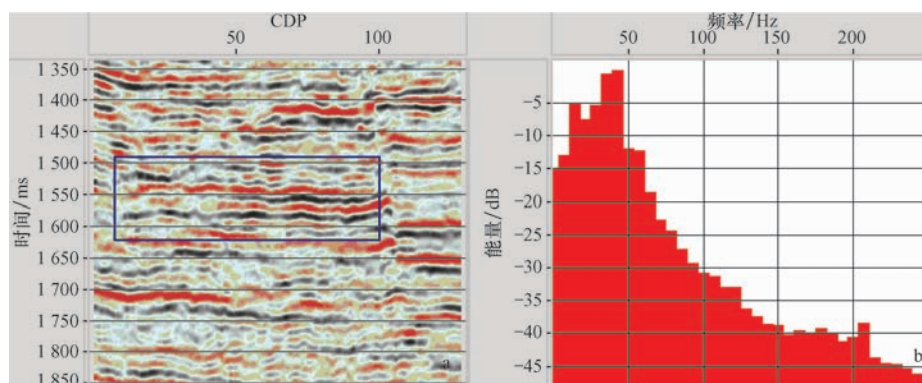


图4 目的层段频谱分析

Fig. 4 Spectrum analysis of target layer

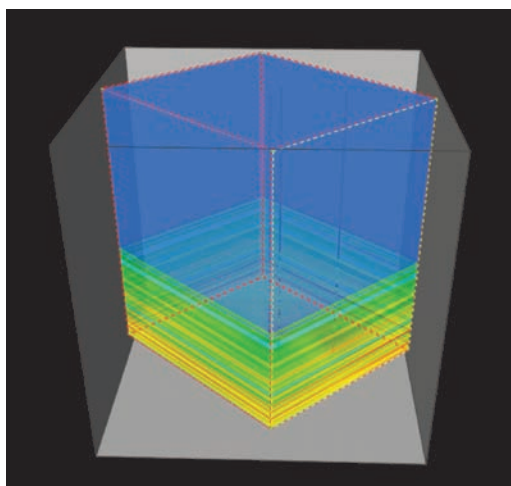


图5 井间插值生成速度体

Fig. 5 Velocity cube generated from interwell interpolation

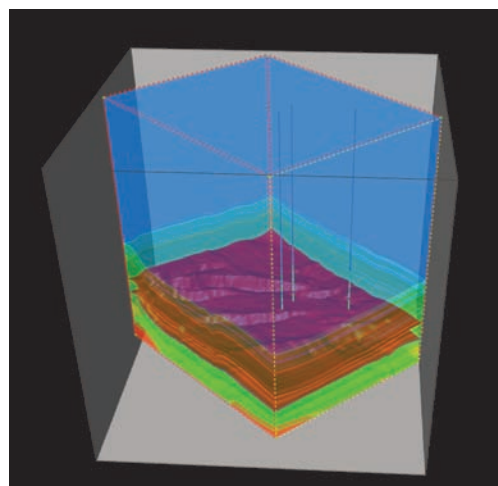


图6 校正速度体

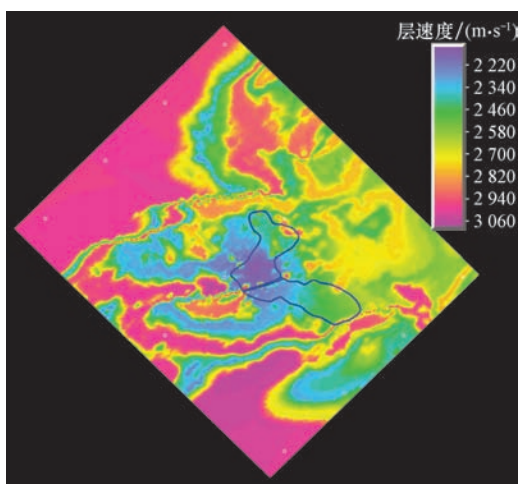
Fig. 6 Corrected velocity cube
(不同颜色的面代表不同的地震层位)

图7 目的层速度分布平面图

Fig. 7 Velocity distribution of target layer

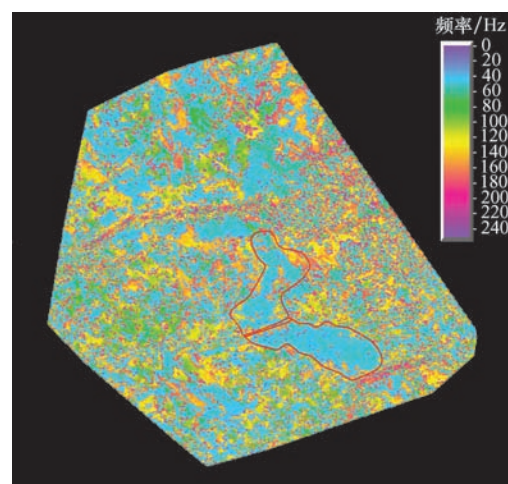


图8 第一谱峰频率的分布

Fig. 8 Distribution of first spectral peak frequency

布不仅与地层所处的深度有关还与地层的构造相关。因此我们把目标区解释的参考地震时间层位与钻井地质分层数据加入到刚刚建立的速度场中,通过由井分层和地震层位建立的伪速度模型对原模型进行校正便可得到由构造控制下的校正速度体(图6),然后沿目的层位提取速度场就得到目的层的速度分布(图7),图中蓝线所圈定的为砂体分布范围,这样就完成了储层厚度估算的第一步,即目的层速度场的建立。

2.4 第一谱峰频率的求取及厚度估算

本次研究采用的谱分解算法为短时窗离散傅里叶变换,窗函数采用高斯窗,考虑到目的层的厚度及上、下围岩的岩性,窗口长度取50 ms。通过对目的层的每一道做短时窗傅里叶变换,在频率域求取第一谱峰频率,这样就可以得到目的层第一谱峰频率的横向分布(图8)。这样,利用公式(15)进行数学计算就可以求得目的层的厚度分布(图9)。可以看到,该区域内分布的砂体主体厚

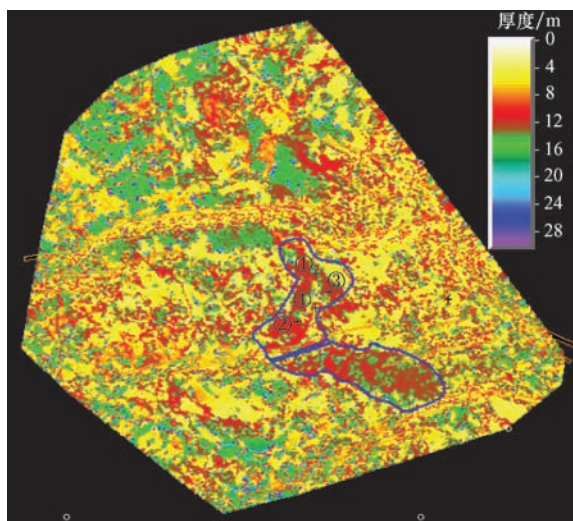


图9 目的层厚度分布

Fig. 9 Thickness distribution of target layer

表1 储层定量解释对比

Table 1 Comparison of quantitative interpretations of reservoirs

井号	实钻厚度/m	谱分解估算厚度/m	误差/m
①	9.7	11.3	1.6
②	10.9	10.4	0.5
③	11.0	12.5	1.5
④	4.3	4.7	0.4

度在10 m左右(红色),呈条带状分布,局部厚的地方达到14 m左右(绿色),边界处薄的地方厚度低于6 m(黄色),表1列出了工区内钻穿该砂体的4口井实钻的砂体厚度与基于谱分解技术的砂体厚度估算结果对比情况,可以看出,4口井点处储层厚度的估算与实钻厚度误差不超过2 m,基本是吻合的,可见厚度估算结果是可信的。

3 结语

谱分解技术突破了传统地震分辨率的限制,开辟了地震解释的新局面,它将地震数据由传统的时间域转换到频率域,不仅可用于定性储层预测,还可以定量的描述储层的空间展布,是储层研究的一种新手段和新方法,具有十分广阔的应用前景。对于砂泥岩薄互层,尤其是大套泥岩中的薄砂层,利用陷频谱的特征来进行储层厚度的预测,效果是显著的。

然而,由于实际地下地质体的复杂性及砂、泥岩不同的厚度分布与组合关系,频陷效应可能是一个非常复杂的现象,要更好地利用这一现象为地震解释服务还需要做进一步深入的理论研究和模型试验。当然了,要得到高精度的厚度预测结果,还需要有更为精确的速度建模方法,尤其是在构造比较复杂的情况下,这些都有待于进一步研究。同时,随着各种高精度时频分析方法如小波变换、S变换、广义S变换等的出现^[18-20],相信谱分解技术的精度会越来越高,在储层的定量地震解释中发挥越来越重要的作用。

参 考 文 献

- [1] 李来林,陈小宏. 定量地震解释[M]. 北京:石油工业出版社,2009:117-124.
Li Lailin, Chen Xiaohong. Quantitative seismic interpretation [M]. BeiJing: Petroleum Industry Press, 2009: 117-124.
- [2] 刘建华,刘天放,李得春. 薄层厚度定量解释研究[J]. 物探与化探,1997,21(1):23-28.
Liu Jianhua, Liu Tianfang, Li Dechun. Quantitative interpretation of thin bed thickness[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1997, 21(1): 23-28.
- [3] 张军华,陆文志,王月英,等. 薄层地球物理特征再认识[J]. 石油物探,2004,43(6):541-546.
Zhang Junhua, Lu Wenzhi, Wang Yueying, et al. Research of geophysical characteristics in thin-beds[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2004, 43(6): 541-546.

- [4] 龙建东. 薄层厚度与振幅、频率关系的神经网络 BP 法模拟[J]. 石油地球物理勘探, 1995, 30(6): 817-822.
Long Jiandong. Neural network BP modeling of the relation between thin bed thickness and amplitude & frequency[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1995, 30(6): 817-822.
- [5] 柏冠军, 吴汉宁, 赵希刚, 等. 地震资料预测薄层厚度方法研究与应用[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 554-558.
Bai Guanjun, Wu Hanning, Zhao Xigang, et al. Research on prediction of thin bed thickness using seismic data and its application[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2): 554-558.
- [6] Partyka G, Gridley J, Lopez J. Interpretational application of spectral decomposition in reservoir characterization[J]. The Leading Edge, 1999, 18(3): 353-360.
- [7] 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.
Sheng Qiuhong, Xiao Lanxiong. Application of spectrum imaging technique to the reservoir prediction of the Caixue Structure[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(1): 141-145.
- [8] 朱定, 孙素琴, 蒋进勇. 分频解释技术在塔河油田储层预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 49-53.
Zhu Ding, Sun Suqin, Jiang Jinyong. Application of frequency division interpretation technique to reservoir prediction in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 49-53.
- [9] 张延庆, 魏小东, 王亚楠, 等. 谱分解技术在 QL 油田小断层识别与解释中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(5): 584-591.
Zhang Yanqing, Wei Xiaodong, Wang Ya'nan, et al. Application of spectral factorization in recognition and interpretation of minor faults in QL oilfield[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41(5): 584-591.
- [10] 范洪军, 李军, 肖毓祥, 等. 地震分频技术在扇三角洲演化过程中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 682-686.
Fan Hongjun, Li Jun, Xiao Yuxiang, et al. Application of seismic frequency-division technology in the study of fan-delta evolution[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(5): 682-686.
- [11] 张江华, 林承焰, 于彦, 等. 分频解释技术在岩性储层描述中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(5): 70-76.
Zhang Jianghua, Lin Chengyan, Yu Yan, et al. Application of frequency-shared interpretation technique for lithology reservoir description[J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(5): 70-76.
- [12] 季玉新, 刘春园, 陈冬, 等. 分频反演方法及其在塔河 A 区储层预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 38-42.
Ji Yuxin, Liu Chunyuan, Cheng Dong, et al. Frequency-divided inversion and its application to reservoir prediction in Block A of Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 38-42.
- [13] 崔永谦, 秦凤启, 卢永和, 等. 河流相沉积储层地震精细预测方法研究与应用——以渤海湾盆地冀中坳陷古近系河道砂为例[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 668-672.
Cui Yongqian, Qin Fengqi, Lu Yonghe, et al. Research and application of detailed seismic prediction in fluvial reservoirs—an example from the palaeogene channel sand in the Jizhong Depression, the Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 668-672.
- [14] 张延章, 尹寿鹏, 张巧玲, 等. 地震分频技术的地质内涵及其效果分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 64-66.
Zhang Yanzhang, Yin Shoupeng, Zhang Qiaoling, et al. Geologic significance of the seismic spectral decomposition technology and its application analysis[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(1): 64-66.
- [15] 黄绪德. 薄层陷频法[J]. 勘探地球物理进展, 2002, 25(5): 1-6.
Huang Xude. Discussion on notches-in-thin-bed[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2002, 25(5): 1-6.
- [16] 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 山东 东营: 石油大学出版社, 1993: 291-302.
Lu Jimeng. Seismic exploration theory[M]. Shandong Dong Ying: China University of Petroleum Press, 1993: 291-302.
- [17] Widess M B. How thin is a thin bed? [J]. Geophysics, 1973, 38(6): 1176-1180.
- [18] 史燕红, 边立恩, 贺振华. 最优化广义 S 变换及其在油气检测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(2): 236-239.
Shi Yanhong, Bian Li'en, He Zhenhua. Optimal generalized S-transform and its application to hydrocarbon detection[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 236-239.
- [19] 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.
- [20] 刘伟, 曹思远. 基于小波变换的信号奇异性检测在层位识别中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(4): 530-533.
Liu Wei, Cao Siyuan. Application of wavelet transform-based signal singularity detection in horizon identification[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(4): 530-533.

(编辑 高岩)