

识别弱地震响应碳酸盐岩储层

李 闯*^① 高妍芳^① 敬 兵^② 孙 东^① 姚清洲^① 谢 恩^②

(^①中国石油勘探开发研究院西北分院,甘肃兰州 730020; ^②中国石油塔里木油田分公司,新疆库尔勒 841000)

李闯,高妍芳,敬兵,孙东,姚清洲,谢恩. 识别弱地震响应碳酸盐岩储层. 石油地球物理勘探, 2015, 50(5): 951-955.

摘要 针对弱地震响应的碳酸盐岩储层识别难的问题,分两步进行预测:①利用储层厚度约束的剩余信号匹配追踪法识别碳酸盐岩储层顶界。该方法是将地震数据进行多子波地震道分解,对分辨率低于测井解释最大储层厚度的分解原子进行剔除,从剩余地震道分解原子中筛选出最能体现储层特征的原子进行地震重构;②通过对地震复赛谱域提取的混合相位子波做反褶积来适当提高主频,从而识别呈弱地震响应特征的碳酸盐岩内幕储层。反褶积结果以实时动态交互显示,并以测井解释成果作为标定依据反复迭代,最终获得满足储层识别需求的地震数据体,突出包含储层信息的弱地震响应。在TZ45井区碳酸盐岩储层预测中,该技术组合有效刻画出完整的“串珠”状反射特征,识别了内幕弱反射有效储层。

关键词 碳酸盐岩储层 弱地震响应 剩余信号匹配追踪 混合相位子波 反褶积

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.05.019

1 引言

碳酸盐岩储层类型主要包括洞穴型、孔洞型、裂缝—孔洞型、裂缝型等,其地震响应主要与储集体的孔隙发育程度、空间展布范围、岩石骨架、岩石物理特征等因素有关^[1]。如今对具有明显地震响应的岩溶储层已取得较好的地震预测效果^[2~5],但对地震响应特征不明显的岩溶储层几乎无法识别。由于碳酸盐岩储层的发育规模及其在地下分布位置的特殊性,碳酸盐岩储层的弱地震响应特征主要表现为:①储层发育于碳酸盐岩与碎屑岩接触面附近,由于在纵向上岩性界面阻抗差异大,调谐效应致使储层横向变化信息被强地震反射所掩盖;②碳酸盐岩内幕的小孔隙度岩溶储层虽然具有一定的延伸范围,但几乎没有明显的地震响应。本文针对碳酸盐岩储层的弱地震响应特征,提出利用储层厚度约束的剩余信号匹配追踪法识别碳酸盐岩储层顶界;通过对由地震复赛谱域提取的混合相位子波做反褶积来适当提高主频,从而识别呈弱地震响应特征的碳酸盐岩内幕储层。在塔中地区应用上述技术组合有效识别

了不同类型、不同级别的碳酸盐岩储层,获得了较好的勘探效果。

2 剩余信号匹配追踪原理

识别碳酸盐岩储层顶界面临的问题是地震分辨率与储层厚度不匹配。为了获得与储层厚度匹配的地震分辨率,笔者通过改进匹配追踪时频分析法^[6]提出了剩余地震信号匹配追踪法。改进算法的核心思想是:将地震数据进行多子波地震道分解,由钻井数据获得的储层厚度信息作为约束条件,将分辨率低于储层厚度的地震道分解子波剔除,从剩余地震道分解原子中筛选出最能体现储层特征的原子进行重构,从而合成出更利于预测储层的新地震数据体。频率约束条件体现在阈值的控制上,地震信号的稀疏表达式为

$$s(t) = \sum_{j=1}^n a_j \omega(t - t_j, f_j, \phi_j) + Rs^{(n)}(t) \quad (1)$$

式中: $s(t)$ 为带限地震信号; $Rs^{(n)}(t)$ 为匹配后的残余信号,其中 n 为迭代的原子个数,通过设置的阈值判断迭代终止条件,进而确定迭代的原子个数;

* 甘肃省兰州市城关区雁儿湾路525号中国石油勘探开发研究院西北分院西部勘探所1209室,730020。Email:lichuang@petrochina.com.cn
本文于2014年5月15日收到,最终修改稿于2015年7月6日收到。

t_j (延时)、 f_j (主频)、 a_j (相关系数)、 ϕ_j (相位)为控制原子的四个参数^[7,8]。

将地震信号 $s(t)$ 分解为原子库

$$\mathbf{D} = \{\omega_k, k = 1, 2, \dots, K\}$$

利用不同频率的原子识别不同厚度的地层,即“地层厚度”与“原子主频”有对应关系。将期望分辨的储层厚度作为标准,将 \mathbf{D} 分解为 \mathbf{D}_1 和 \mathbf{D}_2 ,其中 \mathbf{D}_1 中均为“高频”原子,每个原子满足 $\lambda/4 \leq H(\lambda$ 为波长, H 为目的层最大储层厚度),即 \mathbf{D}_1 中每个原子对目的层储层“可分辨”。剩余的“低频”原子组合构成了 \mathbf{D}_2 , \mathbf{D}_2 即为需要剥离的“低频”背景。

假设识别储层的最小频率为 f_{\min} ,给定原子库

$$\mathbf{D} = \{\omega_k, k = 1, 2, \dots, K\}$$

将 \mathbf{D} 分解为

$$\mathbf{D}_1 = \{\omega_i, i = 1, 2, \dots, I\}$$

和

$$\mathbf{D}_2 = \{\omega_m, m = 1, 2, \dots, M\}$$

两个原子库, \mathbf{D}_1 中每个原子满足 $f_{\min} \geq f_i$, \mathbf{D}_2 中的原子满足 $f_{\min} < f_m$,且 $\|\omega_k\| = 1$ 、 $\|\omega_l\| = 1$,从而将 \mathbf{D} 向量扩展成 N 维 Hilbert 空间。对于任意地震信号 $s(t)$,从 \mathbf{D}_1 中寻找与其最匹配的原子 ω_r ,而将 \mathbf{D}_2 中所有原子的叠加做为约束阈值,并满足如下匹配条件

$$|\langle s, \omega_r \rangle| = \sup_{i \in \mathbf{D}_1} |\langle s, \omega_i \rangle| \quad (2)$$

式中 $\langle \dots \rangle$ 代表内积。 \mathbf{D}_2 中所有原子的叠加可用 $s'(t)$ 表示,则有

$$s'(t) = \sum_{j=1}^m a_j \omega(t - t_j, f_j, \phi_j) \quad (3)$$

如果用 $\text{Rs}^{(i)}(t)$ 表示投影值和信号的差值, $\text{R}'s^{(i)}(t)$ 表示剩余信号残差,并满足

$$\text{Rs}^{(i)}(t) = s'(t) + \text{R}'s^{(i)}(t) \quad (4)$$

式中 i 表示信号经过第 i 次迭代,且 $i \geq 0$; 当 $i = 0$ 时,有

$$\text{R}'s^{(0)}(t) = s(t) - s'(t)$$

$$\text{Rs}^{(0)}(t) = s(t)$$

经过一次迭代后信号可以表示为

$$s(t) = \langle s, \omega_{i_0} \rangle \omega_{i_0} + \text{Rs}^{(1)}(t) \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)得

$$s(t) = \langle s, \omega_{i_0} \rangle \omega_{i_0} + \text{R}'s^{(1)}(t) + s'(t) \quad (6)$$

显然 $s(t)$ 和 $s'(t)$ 是定值,因此式(6)可以写为

$$s(t) - s'(t) = \langle s, \omega_{i_0} \rangle \omega_{i_0} + \text{R}'s^{(1)}(t) \quad (7)$$

在初始条件下

$$s(t) - s'(t) = \text{R}'s^{(0)}(t)$$

根据式(2)的寻优算法, ω_{i_0} 和 $\text{R}'s^{(0)}(t)$ 需要满足正交关系,即

$$\|\text{R}'s^{(0)}(t)\|^2 = |\langle s, \omega_{i_0} \rangle|^2 + \|\text{R}'s^{(1)}(t)\|^2 \quad (8)$$

通过逐次迭代,使 $\text{R}'s^{(i)}(t)$ 残差的能量最小化,使投影 $|\langle s, \omega_{i_0} \rangle|$ 最大化。而第 n 次残差能量与第 $n+1$ 次残差能量满足

$$\text{R}'s^{(n)}(t) = |\langle \text{R}'s^{(n)}, \omega_{i_n} \rangle| \frac{\omega_{i_n}}{\|\omega_{i_n}\|^2} + \text{R}'s^{(n+1)}(t) \quad (9)$$

则最终信号被分解为

$$s(t) = \sum_{r=1}^{n-1} \langle \text{R}'s^{(r)}(t), \omega_{i_r} \rangle \omega_{i_r} + \text{R}'s^{(n)}(t) + s'(t) \quad (10)$$

匹配追踪法算法是通过迭代扫描整个函数集合,为了获得期望的分辨率,利用 $s(t)$ 作为阈值对函数集合进行约束,即 $s(t) - s'(t)$ 为剩余信号,重构地震信号所用的原子全部为向量 \mathbf{D}_1 中的原子。

3 提取混合相位子波原理

前人对混合相位子波提取方法进行了广泛研究^[9-11]。对在复赛谱域提取的混合相位子波做反褶积处理可以适当地提高地震资料的分辨率,以识别弱地震响应特征的内幕碳酸盐岩储层。设 $P(t)$ 和 $Q(t)$ 分别为子波 $W(t)$ 的最大和最小分量,则有

$$W(t) = P(t) * Q(t) \quad (11)$$

对上式做傅里叶变换,且等式两边取对数得

$$\ln W(\omega) = \ln P(\omega) + \ln Q(\omega) \quad (12)$$

考虑相位谱,上式可写为

$$\ln |W(\omega)| + i\Phi_W(\omega) = \ln |P(\omega)| + i\Phi_P(\omega) + \ln |Q(\omega)| + i\Phi_Q(\omega) \quad (13)$$

将上式转换到复赛域,即

$$2\tilde{W}_0(t) = \tilde{P}(t) + \tilde{Q}(t) + \tilde{P}(-t) + \tilde{Q}(-t) \quad (14)$$

式中: $\tilde{W}_0(t)$ 为振幅谱的复赛谱,在复赛谱的正、负轴上呈对称出现; $\tilde{P}(t)$ 、 $\tilde{Q}(t)$ 、 $\tilde{P}(-t)$ 、 $\tilde{Q}(-t)$ 均为相位函数的复赛谱^[12]。

利用式(14)可以在复赛谱上确定子波的最大分量和最小分量。最终通过交互扫描,确定一组具有相同振幅谱但不同相位的子波集合,利用交互方法从该子波集合中寻找用于反褶积的子波,并将反褶

积结果以实时动态交互方式显示,获得满足储层预测需求的地震数据体。

4 应用实例

TZ45 井区位于塔里木盆地塔中北部斜坡区的最西端,勘探层系为奥陶系,埋深大于 5500m,地震信号主频约为 22Hz。上奥陶统地层自上而下依次为桑塔木组、良里塔格组。其中桑塔木组岩性为海相碎屑岩,局部发育层状灰岩;良里塔格组岩性为碳酸盐岩。桑塔木组与良里塔格组由于岩性的差异,在地震剖面上呈“强波峰”反射特征。灰岩顶界的局部储层无明显的地震响应特征,而灰岩内幕的小级别储层与围岩波阻抗差小,地震识别难度较大。

4.1 灰岩顶界储层预测

对 TZ45 井区良里塔格组一、二段储层厚度的

统计分析表明,储层发育区平均厚度为 17m,地震分辨频率为 25Hz。结合实际内幕地震信号主频(22Hz),最终将 25Hz 作为筛选原子的阈值。在 Hilbert 空间中主频大于 25Hz 的原子参与地震信号重构,重构时窗长度与灰岩顶界的强地震反射时间长度一致,重构地震数据将提高灰岩顶界的地震横向分辨率。图 1 为剩余信号匹配追踪剖面效果对比,由图中可见:灰岩顶界呈连续强地震反射,横向分辨率低(图 1a);通过剩余信号匹配追踪重构后横向出现“星点”状地震反射,横向分辨率明显提高,由波峰一波谷一波峰组成的串珠状地震反射形态完整,清晰可辨,并位于灰岩顶界(图 1b)。

图 2 为剩余信号匹配追踪平面效果对比图,由图中可见,剩余信号匹配追踪重构地震数据均方根振幅具有多个“串珠”状地震反射目标,提高了横向分辨率(图 2b)。

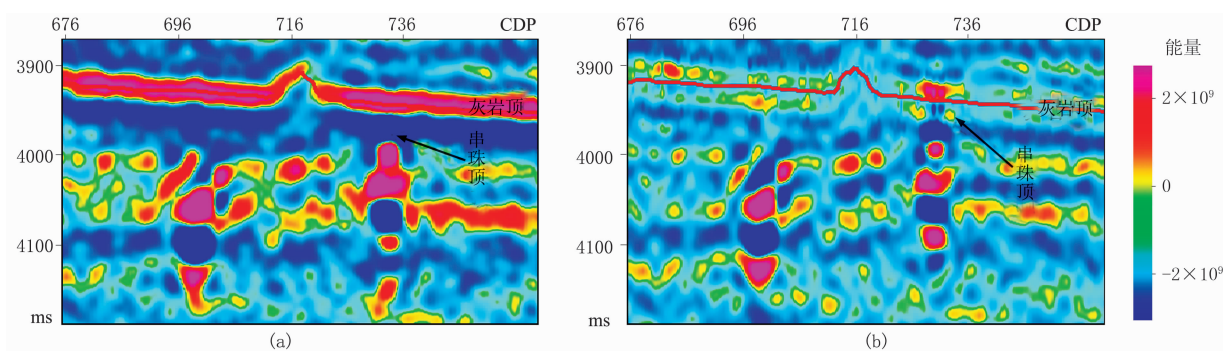


图 1 剩余信号匹配追踪剖面效果对比
(a)原始地震剖面; (b)剩余信号匹配追踪重构地震剖面

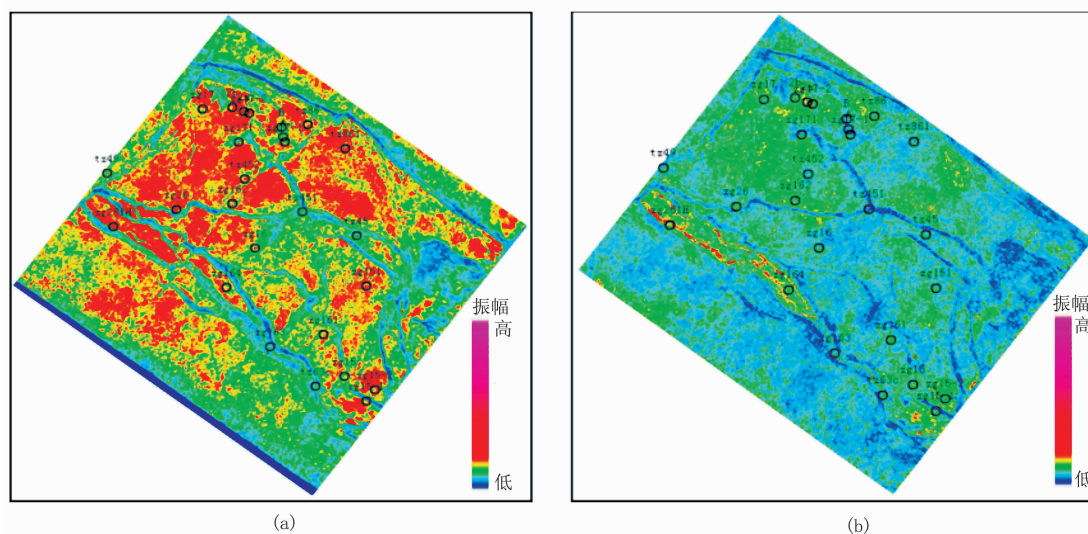


图 2 剩余信号匹配追踪平面效果对比图
(a)原始地震数据均方根振幅; (b)剩余信号匹配追踪重构地震数据均方根振幅

4.2 碳酸盐岩内幕弱地震反射储层识别

在剩余信号匹配追踪的基础上,首先以井旁道作为褶积效果监控点(图 3)。在测井储层解释结果中有四套 II 类储层(图 3a),在原始地震道上只有第三段、第四段储层有较明显的响应特征(图 3b 左)。通过反褶积处理后,四段储层均有响应(图 3b 右),且目的层上、下波阻特征对应一致,地震分辨率得到

明显提高,满足了储层预测的要求。

图 4 为混合相位子波反褶积处理剖面对比,由图中可见:Z1H 井在 A 点处发生漏失,在原始地震剖面上 A 点几乎没有地震响应(图 4a);由反褶积处理地震剖面可以看出,A 点实际经过“串珠”地震反射的顶部(图 4b)。实钻漏失揭示了弱地震反射特征储层的存在,其响应特征被加强为“串珠”反射,使

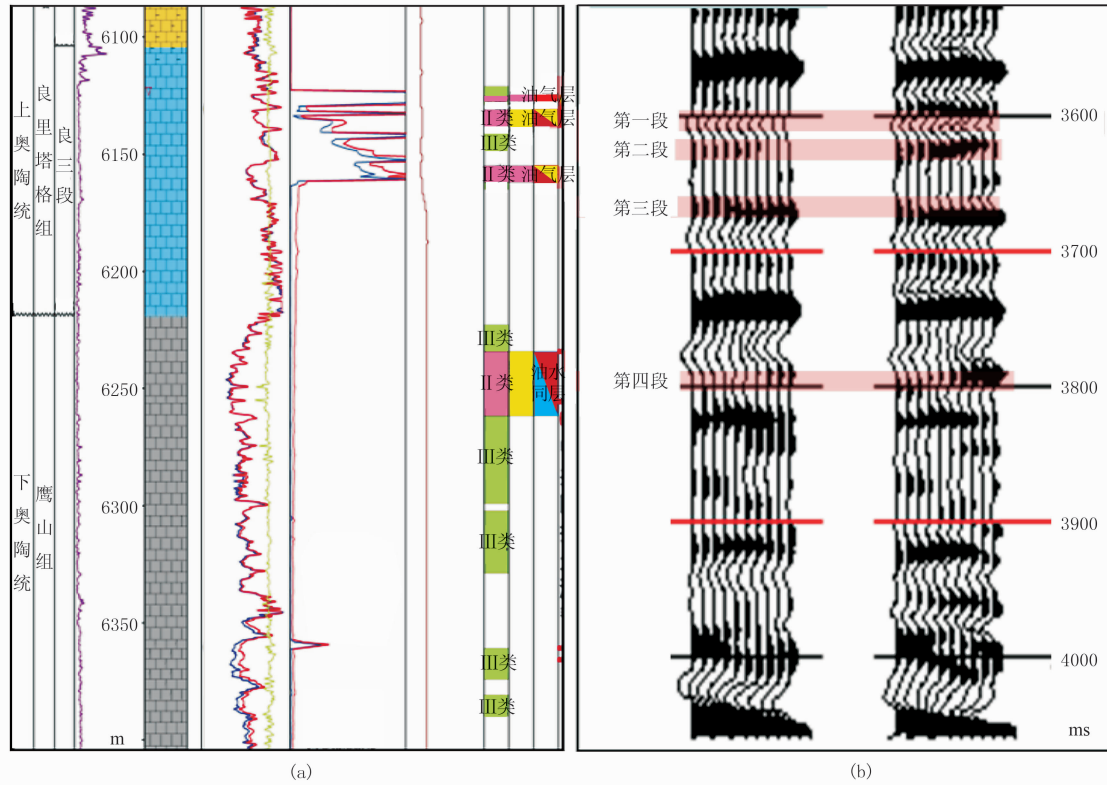


图 3 混合相位子波反褶积质量监控
(a)测井储层解释;(b)反褶积处理前(左)、后(右)地震道

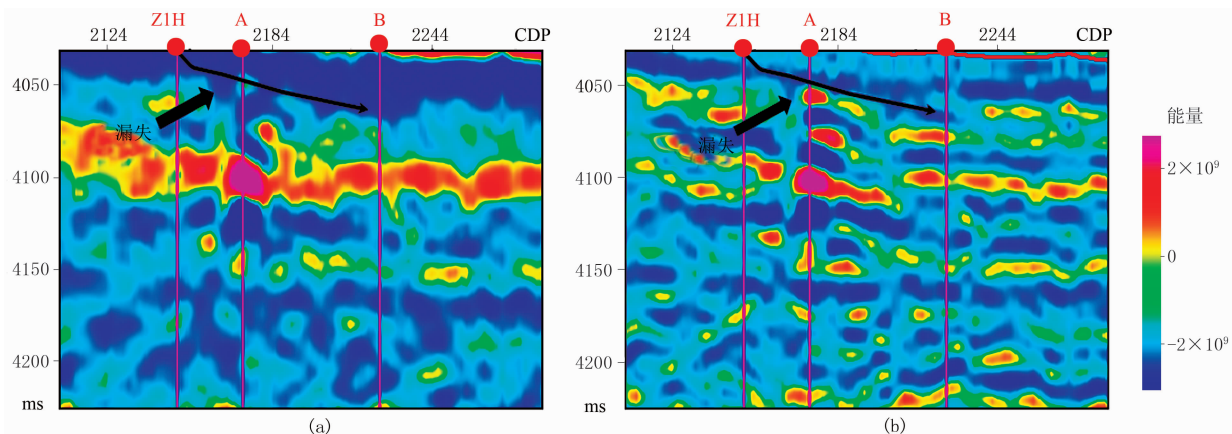


图 4 混合相位子波反褶积处理剖面对比
(a)原始地震剖面;(b)反褶积处理地震剖面

得预测该类储层成为可能。

5 结束语

由于调谐效应的存在,灰岩顶界的强反射界面掩盖了地层横向变化信息,通过剩余信号匹配追踪法,改善了灰岩顶界的横向分辨率,还原了“串珠”状反射的完整形态,提高了储层识别精度。在复赛谱域提取混合相位子波进行反褶积处理可改善碳酸盐岩内幕的地震资料品质,在一定程度上提高了地震分辨率,可有效识别出灰岩内幕储层。

参考文献

- [1] 倪新锋,沈安江,潘文庆等. 优质碳酸盐岩缝洞型储集层地质建模——以塔中北斜坡及塔西南缘奥陶系为例. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 414-422.
Ni Xinfeng, Shen Anjiang, Pan Wenqing et al. Geological modeling of excellent fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case study of the Ordovician in the northern slope of Tazhongpalaeouplift and the southern area of Tabei slope, Tarim Basin. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 414-422.
- [2] 张远银,孙赞东,唐志远等. 基于 AVO 反演的溶蚀孔洞型碳酸盐岩储层预测. 石油地球物理勘探, 2013, 48(1): 109-113, 120.
Zhang Yuanyin, Sun Zandong, Tang Zhiyuan et al. Caved carbonate reservoir prediction based on AVO inversion. OGP, 2013, 48(1): 109-113, 120.
- [3] Yang P, Liu Y L, Hou Y P et al. Carbonate-reservoirs prediction strategy and technologies in Tarim Basin of China. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2007, 26: 2738-2742.
- [4] 杨海军,胡太平,于红枫等. 塔中地区上奥陶统礁滩复合体储层地震预测技术. 石油与天然气地质, 2008, 29(2): 230-236, 251.
Yang Haijun, Hu Taiping, Yu Hongfeng et al. Seismic reservoir prediction of reef-flat complexes in the Upper Ordovician, Tazhong area. Oil & Gas Geology, 2008, 29(2): 230-236, 251.
- [5] 王振卿,王宏斌,张虎权等. 塔中地区岩溶风化壳裂缝型储层预测技术. 天然气地球科学, 2011, 22(5): 889-893.
Wang Zhenqing, Wang Hongbin, Zhang Huquan et al. Prediction technologies of Weathering crust and fracture reservoirs in Tazhong area. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(5): 889-893.
- [6] Mallat S, Zhang Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries. IEEE Trans Signal Processing, 1993, 41(12): 3397-3415.
- [7] Liu J, Wu Y, Han D et al. Time-frequency decomposition based on Ricker wavelet. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2004, 23: 1937-1940.
- [8] Liu J, Marfurt K. Marching pursuit decomposition using Morlet wavelets. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2005, 24: 786-789.
- [9] Gregory D L. Mixed-phase wavelet estimation using fourth-order cumulants. Geophysics, 1993, 58(7): 1042-1051.
- [10] 张海燕,李庆忠. 几种常用解析子波的特性分析. 石油地球物理勘探, 2007, 42(6): 651-657.
Zhang Haiyan, Li Qingzhong. Research on the methods for wavelet stability of homomorphic deconvolution. OGP, 2007, 42(6): 651-657.
- [11] 李国发,牟永光,王濮. 交互地震子波提取技术. 石油大学学报, 2005, 29(5): 33-36.
Li Guofa, Mu Yongguang, Wang Pu. A interactive technique for seismic wavelet extraction. Journal of China University of Petroleum, 2005, 29(5): 33-36.
- [12] 张猛,匡斌,孟祥宾. 混合相位地震子波提取及应用. 油气地球物理, 2007, 5(3): 14-17.
Zhang Meng, Kuang Bin, Meng Xiangbin. The extraction of mixed-phase seismic wavelet and its application. Petroleum Geophysics, 2007, 5(3): 14-17.

(本文编辑:刘勇)

作者简介



李闯 工程师,1982年生;2004年本科毕业于苏州科技学院,获学士学位;一直致力于塔里木盆地海相碳酸盐岩油气勘探。现在中国石油勘探开发研究院西北分院从事地震、地质综合解释、地震岩石物理研究。