

doi: 10.11720/wtyht.2018.1580

陈珊, 徐兴友, 罗晓玲, 等. 基于改进匹配追踪算法的时频属性在薄储层沉积微相研究中的应用[J]. 物探与化探, 2018, 42(5): 1006–1012. http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1580

Chen S, Xu X Y, Luo X L, et al. Time-frequency attribute based on modified matching pursuit algorithm and its application to sedimentary microfacies of thin reservoir area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(5): 1006–1012. http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1580

基于改进匹配追踪算法的时频属性在薄储层沉积微相研究中的应用

陈珊¹, 徐兴友¹, 罗晓玲², 白静¹, 刘力辉³, 陆蓉³

(1. 中国地质调查局 油气资源调查中心, 北京 100083; 2. 中国地质调查局 发展研究中心, 北京 100037; 3. 北京诺克斯达石油科技有限公司, 北京 100192)

摘要: 匹配追踪算法具有较高的时频分辨率和局部自适应性, 能同时在时间域和频率域获得较准确的定位, 但仍存在低频阴影和运算效率低等问题, 影响了该技术在实际工作中的运用。为提高匹配追踪算法的计算精度和运算效率, 在基于 Ricker 子波匹配追踪方法的基础上, 通过优化迭代方案, 改进原子主频计算方法和压缩原子旁瓣的方式, 提高了频率定位的准确性和时频谱的时间分辨率; 采用自适应获取原子参数的方法, 大大提高了算法的运算效率。模型实验结果和实际地震资料证明了该算法的有效性, 在某薄储层地区应用该改进算法提取时频属性, 切片结果很好地表征了砂岩的展布特征, 有助于沉积微相的刻画。

关键词: 匹配追踪; 时频属性; 峰值频率; 沉积微相

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2018)05-1006-07

0 引言

砂、泥岩薄(互)层是我国陆相盆地中常见的储层发育模式, 也是东部油区的主要储层。但由于薄互层具有调谐作用, 地震响应复杂, 通过地震资料识别薄储层是当今油气勘探的一项重大难题。

在薄互层地区(地层厚度小于 1/4 波长), 不同反射界面发生调谐作用, 一个反射同相轴通常是多个薄层之间相互干涉的综合反映, 且振幅的强弱还受岩石波阻抗相对大小的影响, 利用振幅属性来进行沉积或储层分析, 非常复杂, 具有很大的多解性^[1]。而时频属性利用时频技术将时间域的地震信号转换到频率域, 在频率域挖掘地震资料的有用信息, 受波形和能量的影响均较小, 适合于薄层地区。

时频技术, 如短时傅里叶变换、小波变换和广义

S 变换等早已广泛应用于沉积相研究、储层预测、油气检测等研究领域^[2-7], 但这些技术都有各自的缺点, 无法同时获得高时间分辨率和高频率分辨率。匹配追踪分解(MPD)算法是目前热门的算法, 它具有较高的时频分辨率及局部自适应性, 能同时在时间域和频率域获得较准确的定位。

许多学者利用该算法获取时频属性, 用于储层预测和油气检测; 部分学者通过改进该算法, 以提高算法的计算效率或精度。Zhang 等^[8]采用两步法的匹配追踪算法, 提取吸收系数、振幅梯度等频变属性来检测流体; 陈林等^[9]选用 Morlet 小波作为时频原子来匹配, 得到时频分辨率较高的时频分布; 冯磊等^[10]利用匹配追踪算法寻找有利储层砂体; 屈念念等^[11]利用奇异值分解计算匹配 Ricker 子波, 减少迭代次数, 提高运算效率; Wang^[12]提出利用邻近地震道的横向相关性作约束, 解决匹配原子的多解性问题, 有效增强时频谱的横向连续性和合理性。刘小

收稿日期: 2017-12-22; **修回日期:** 2018-07-19

基金项目: 国土资源部全国油气资源战略选区调查项目(DD20160202)

作者简介: 陈珊(1983-), 女, 现任职中国地质调查局油气资源调查中心, 工程师, 博士, 主要从事地震资料解释、油气储层预测评价及页岩油资源调查工作。Email: chenshan_000@126.com

龙等^[13]根据 Liu 的基于 Morlet 小波的匹配追踪算法,引入自由尺度参数,增强时频原子库对非平稳地震信号的匹配能力,提取分频切片用来刻画火山岩储层的边界。黄捍东等^[14]通过引入能量衰减因子及动态扫描多个匹配原子的方式,提高匹配的准确性和效率,提取衰减梯度属性用于生物礁的油气识别。

笔者在匹配追踪分解算法的原理基础上,优化迭代方案和原子库的扫描方式,以提高匹配分解的效率;改进基于 Ricker 子波的原子匹配方式,以提高地震信号匹配分解的精度。通过模型实验证明了该算法有助于提高地震信号匹配分解的精度和运算效率,并在某薄互层地区进行应用,提取的时频属性能够较好地表征砂体展布特征,进行地震沉积研究。

1 基于 Ricker 子波的匹配追踪算法

1.1 基本原理

Mallat 等^[15]首次提出应用过完备原子库对信号进行分解的匹配追踪法(matching pursuit, MP),但由于计算量过于庞大,耗时巨大。Castagna^[16]提出了匹配追踪分解法(MPD)和指数追踪算法(EPD)的想法和实现思路,但没有给出详细的计算方法和步骤。Liu^[17]提出了基于 Ricker 子波匹配追踪的详细计算方法,引入了信号的瞬时特征,由信号的复分析可以得到瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率,以瞬时振幅最大处对应的时间作为延时的初始值,并得到延时处的瞬时相位和瞬时频率,依靠信号的瞬时特征给出控制参数的初始值,避免了整个子波库的搜索,缩小了过完备子波库的搜索范围,大大加快了匹配追踪的计算效率,缩短了匹配追踪的耗时。

匹配追踪算法的核心思想是将信号表示为一系列与信号局部结构特征最佳匹配的时频原子的线性组合(图 1)。简单来说,就是通过计算地震信号的局部瞬时属性,选择匹配最佳的时频原子进行叠加重构。

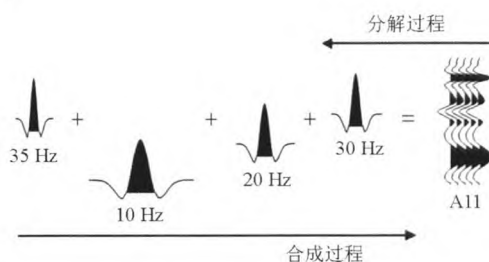


图 1 匹配追踪时频分析核心思想

主频为 f_j 的零相位 Ricker 子波表达式如下:

$$w_R(t, f_j) = [1 - 2\pi^2 f_j^2 t^2] \exp(-\pi^2 f_j^2 t^2), \quad (1)$$

其对应傅里叶谱为:

$$W_R(f, f_j) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{f_j^2}{f_j^3} \exp\left(-\frac{f^2}{f_j^2}\right), \quad (2)$$

信号的稀疏表达式为

$$s(t) = \sum_{j=1}^m a_j w(t - t_j, f_j, \phi_j) + R_s^{(m)}(t), \quad (3)$$

其中: $s(t)$ 为带限地震信号, $R_s^{(m)}(t)$ 是匹配后的残余信号, m 是迭代的原子个数,通过设置的阈值来判断迭代终止条件,进而确定迭代的原子个数。原子通过 4 个参数 t_j (延时)、 f_j (主频)、 a_j (相关系数)、 ϕ_j (相位)来控制。

Liu^[17]提出的一种求取时频谱的解析表达式:

$$u(t, f) = \sum_{j=1}^J a_j W_R(f, f_j) \text{env}[w_R(t - t_j, f_j)] \cdot \exp\{i[2\pi f(t - t_j) + \phi_j]\}, \quad (4)$$

其中, env 是 W_R 的瞬时振幅。

1.2 原子匹配

目前实现原子分解匹配的方法主要有以下两种,但都存在一定问题:

1) 建立完备的原子库,逐个参数扫描求解。该方法能求得准确的匹配原子,及对原始地震记录的瞬时属性准确定位,但该方法需要庞大的计算量,耗时巨大,不能满足实际生产的需要。

2) 依据瞬时属性计算方法,得到各参数初始值,然后在邻域范围内扫描求解。该方法大幅度地提高了运算效率,但是对计算原子各参数的初始值要求较高,容易造成匹配原子不够准确,影响最终结果的真实性;另外计算迭代过程中容易发散,造成弱反射相对于强反射匹配不出来,或是匹配多次后,集中在 10 Hz 处能量团多,在时频谱上表现出低频阴影。

针对以上问题,笔者提出三点改进措施,用于提高计算效率和准确匹配原子。

1) 根据地震信号自适应地获取原子参数,避免建立大规模的原子库进行扫描。

2) 优化迭代方案,改进原子主频计算方法,通过 Hilbert 变换获得瞬时频率的最大值、最小值范围,进行约束扫描原子主频,解决频率定位不准得问题,并提高效率。

3) 通过压缩原子旁瓣方式来降低匹配原子旁瓣造成的二维谱在时间上的干涉效应,有效提高时频谱的时间分辨率。

此方法在保证计算效率的同时能保证地震记录瞬时属性计算的准确性,并能保持较高的时频分辨率。

1.3 效果分析

选用 John P. Castagna 文献^[16-17] 中一个经典的模型数据,来检验改进的基于 Ricker 子波匹配追踪算法对地震信号匹配分解的有效性。合成记录分别由 12 个 10、20、30、40 Hz 主频 Ricker 子波合成(图 2)。可以看到,改进后匹配追踪的时频谱较常规算

法时间分辨率更高,频率定位更准。

对研究区实际井旁地震道分别采用常规匹配追踪和改进后的匹配追踪算法进行频谱特征分析(图 3),二维谱整体上看匹配原子的时间定位比较一致,但改进后的匹配追踪时间分辨率更高,而且没有出现低频阴影,频率定位更加准确。

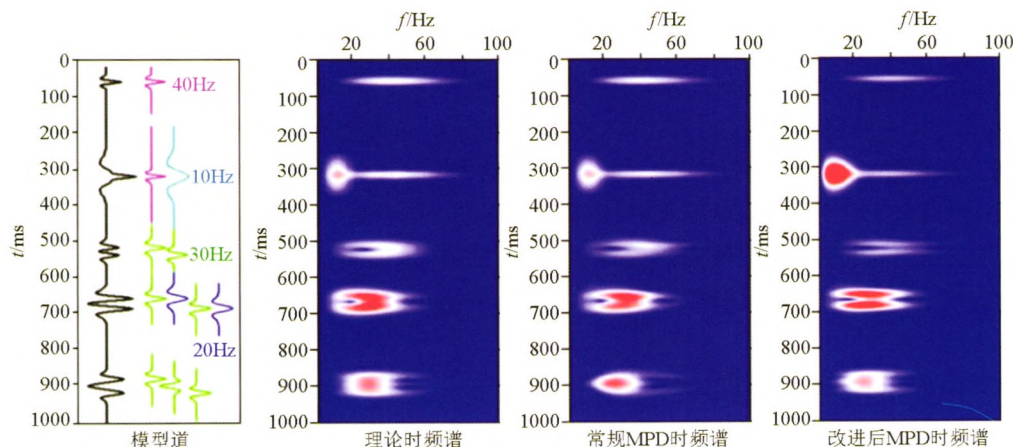


图 2 模型信号的时频谱效果对比

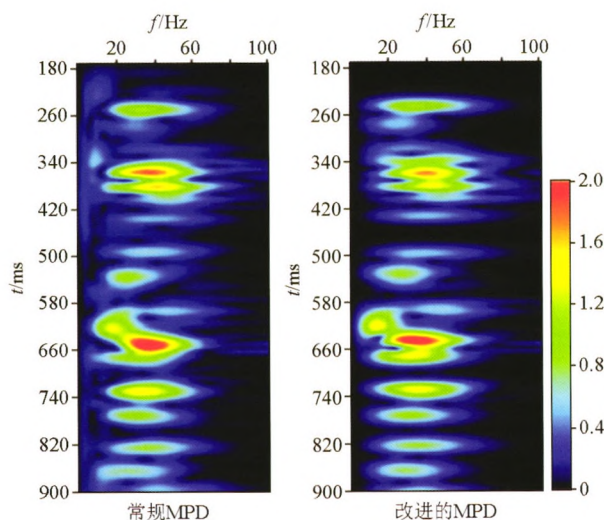


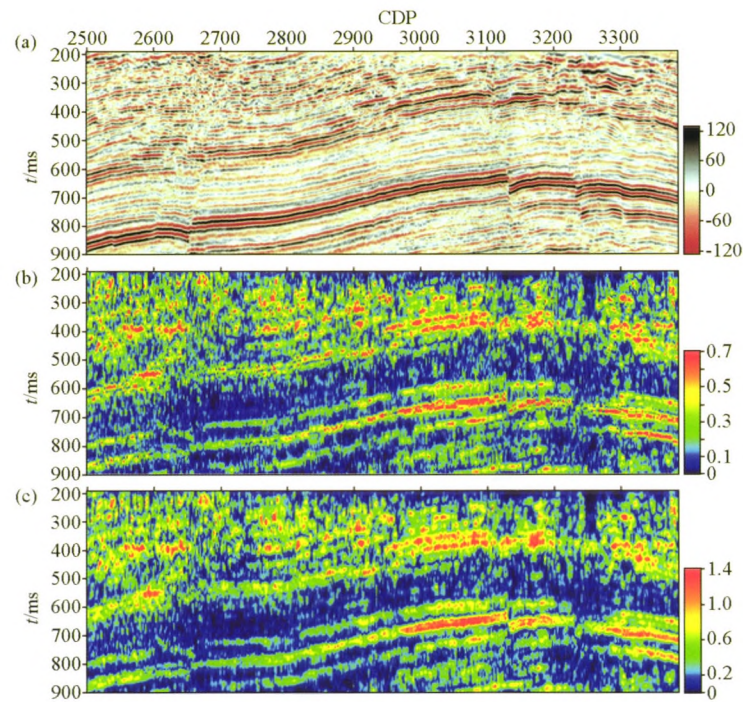
图 3 井旁道二维谱效果对比

在实际工作中,常通过计算地震四维时频谱,提取多种时频属性,如单频体、峰值振幅和峰值频率等,用于储层预测和油气检测等方面。单频体是指某一个特定主频的单频能量,单频剖面是该特定主频的能量剖面。峰值频率是时频体频率域内最大振幅所对应的频率,峰值频率切片是在峰值频率数据体上提取的某一目的层所在位置的频率值,常用于检测薄层厚度。

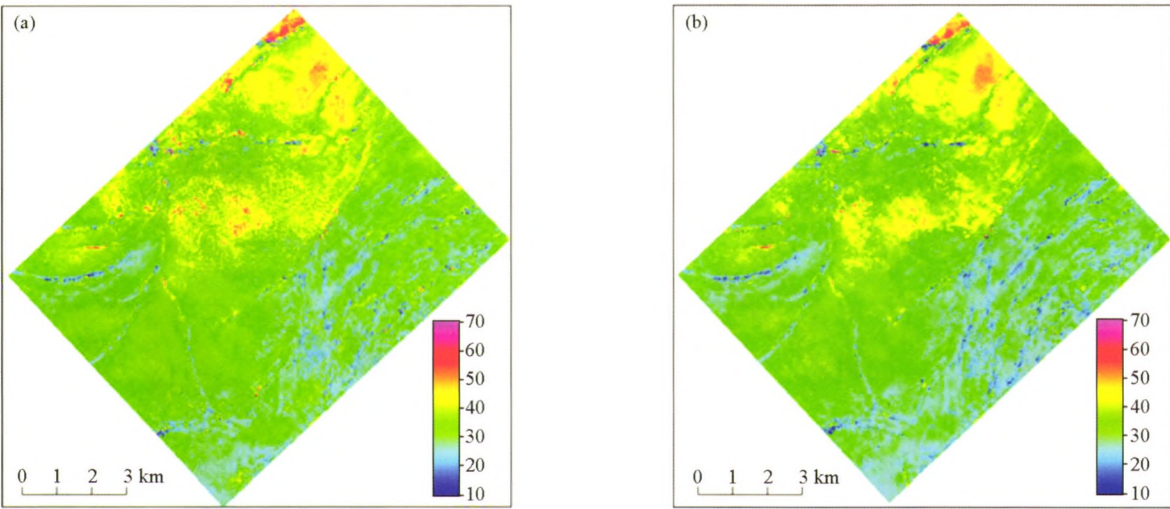
分别采用改进前后的匹配追踪算法对实际地震资料进行处理,提取单频剖面和峰值频率平面切片,验证算法改进后的效果。可以看到,改进后的单频

剖面(图 4)信噪比提高,说明改进后频率定位更加准确,高频噪声减少了。改进后的峰值频率切片(图 5)显示储层的横向连续性明显变好,信噪比也有所提高,说明算法改进后提取的时频属性更有利于表征储层的沉积分布特征。

最后,测算了改进前后算法的运算效率,改进之后的匹配追踪算法计算速度比常规方法提高了 40 倍。以 100×100 道,2 ms 采样间隔,1 s 记录的工区为例,常规匹配追踪方法需要 10 h,改进之后仅需 15 min。计算效率得到了大幅度提高,大大增强了匹配追踪算法在实际生产中的实用性。



a—原始地震剖面;b—常规 MPD 计算的 60 Hz 单频剖面;c—改进后 MPD 计算的 60 Hz 单频剖面
图 4 MPD 算法改进前后单频剖面效果对比



a—常规 MPD 计算的峰值频率;b—改进后 MPD 计算的峰值频率
图 5 MPD 算法改进前后峰值频率切片效果对比

2 基于匹配追踪算法的时频属性应用

2.1 地质背景及研究难点

研究区位于渤海湾盆地冀中坳陷饶阳凹陷西部,为一个宽缓的斜坡构造,其倾向上古地形起伏不大,原始坡度很小,区内断裂不发育,寻找岩性圈闭是该区的重点。利用地震沉积研究寻找有利沉积相带是关键。

目的层为古近系沙河街组二段,是一套砂、泥岩

互层的地层,地层厚度 20~60 m,单砂层较薄,一般为 1.5~6.0 m。前人研究表明物源来自西部及西北部,单井沉积微相研究表明,该区主要发育辫状河三角洲平原沉积,辫状河道砂体是研究区的骨架砂体。

一般来说,沉积相研究中最重要的是砂地比图和一张能够反映沉积体边界或特征的地震属性图件。但是由于目的层单层较薄,地震资料振幅信息既包含了薄互层间的干涉信息,又包含了岩性信息,加大了地震属性反映岩性的多解性。同时,该区岩石物理分析表明,砂岩和泥岩的波阻抗差异不大,砂

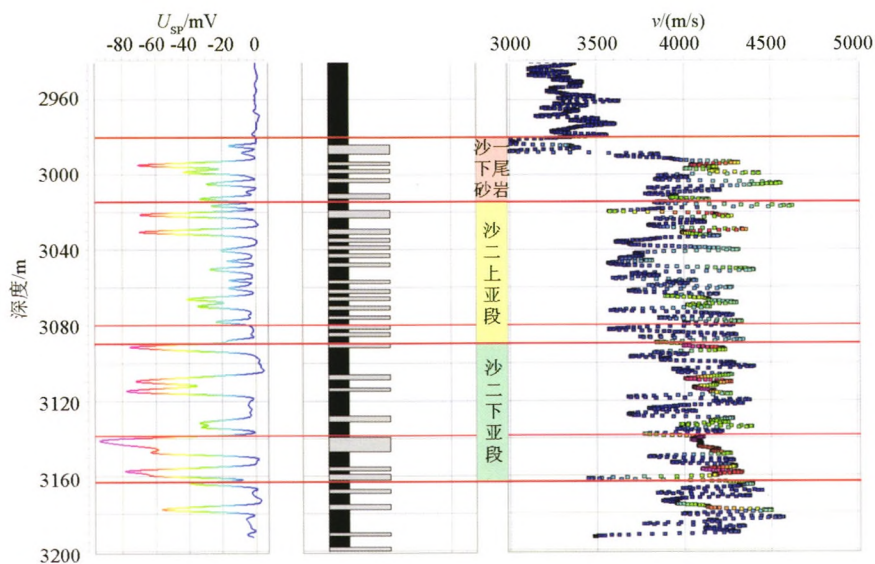


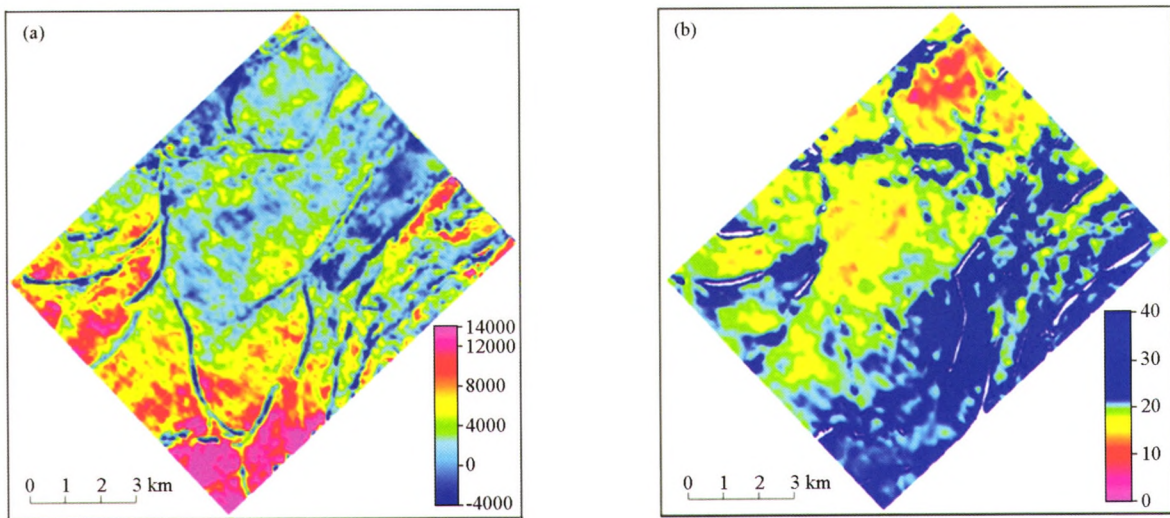
图 6 单井岩石物理分析图

岩阻抗相对稍高,岩石物理规律不明显(图 6),说明振幅属性及叠后反演难以区分岩性,因此考虑选用时频属性来进行地震沉积研究。

2.2 地震属性优选

利用研究区三维地震资料,分别提取目的层处的均方根振幅切片和基于改进匹配追踪算法的峰值频率切片(图 7)。从图上看,振幅切片与频率切片

表现的特征完全相反。振幅属性显示,在研究区西南部砂岩较发育,北部砂岩较少,根据越靠近物源砂岩越发育的沉积规律,可以推断物源来自南部和南西部;而峰值频率切片显示,研究区西北部和中南部砂岩较发育,东部与南部砂岩不发育,指示物源方向应来自西北部。



a—振幅切片;b—峰值频率切片

图 7 目的层段地震属性切片

从井上砂地比图来看(图 8),钻井揭示在研究区西北部砂岩非常发育,这与峰值频率所表现的沉积特征一致,也与前人研究的西北部物源一致。因此,研究区的沉积相带应自西北部的高部位区向东南部展布。同时也说明,振幅属性所表现的沉积规律不正确,不能作为该区地震沉积研究的关键地震属性图件。

与砂地比图结合起来,在地质认识的指导下可

进一步在地震属性图上画出沉积微相的边界(图 9),最终得到沉积微相图(图 10)。研究区内近 30 口钻井的单井相分析结果显示,目的层为辫状河三角洲平原亚相沉积,可划分为辫状河道和冲积平原微相。该沉积微相图与井点处沉积微相完全吻合,因此认为,该微相图对未钻井区的沉积微相和储层展布预测比较可靠,可以作为井位部署的依据。该沉积微相图比传统的沉积相图刻画更加精细,边界

不再只是模式,而是由地震属性所指示的沉积边界来控制,微相内部的等值线根据砂地比的等值线编制,是一种半定量的综合成果图件,不仅可以在河道内部划分出河道主体、河道侧翼等,还可以指示重点相带内有利储层的可能发育部位,为寻找“甜点”目标提供更加可靠的依据。

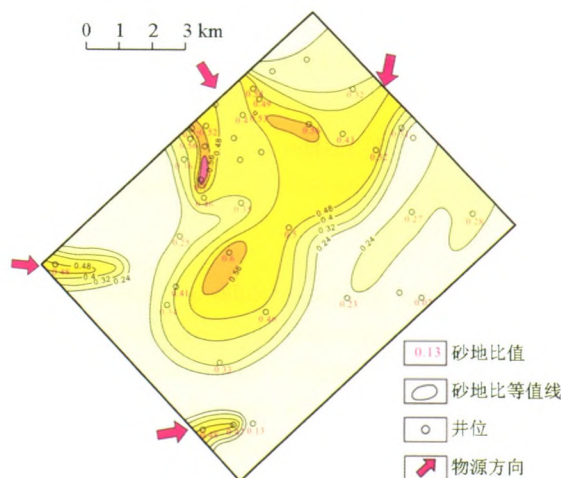


图8 井点砂地比图

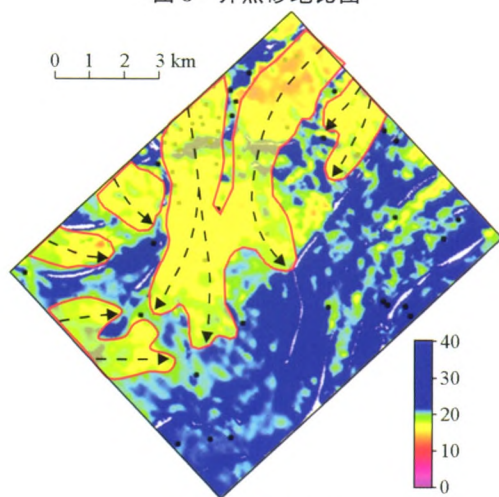


图9 地震沉积图

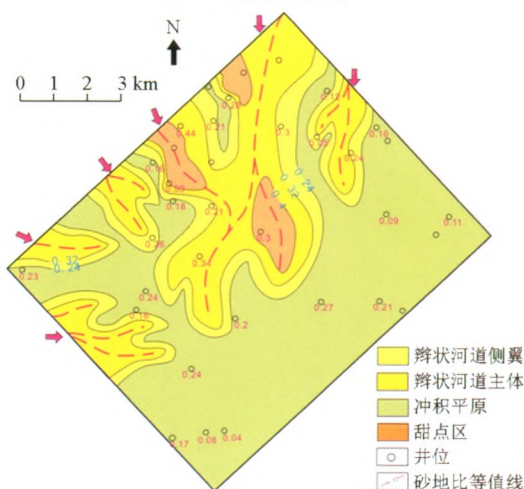


图10 沉积微相图

3 结论

1) 根据匹配追踪的原理,采用基于三瞬属性获取匹配原子参数的方式,保证原子库完备的同时,准确确定匹配原子振幅、主频、相位、延时四参数,有效减少了时频谱上不合理的低频阴影。

2) 采用瞬时频率约束下的主频扫描方式,给出原子主频的初始值,缩小了原子库的搜索范围,并设置合适的迭代终止阈值,大大提高了匹配追踪算法的计算效率,生产上实用性更强。

3) 时频属性比振幅属性更适合于岩石物理特征不明显的薄互层地区,可以较好地反映岩性信息,为沉积微相研究提供合理的地震属性图件,提高沉积微相图的可靠程度,为井位部署提供依据。

参考文献:

- [1] 李国发,岳英,熊金良,等.基于三维模型的薄互层振幅属性实验研究[J].石油地球物理勘探,2011,46(1):115-120.
- [2] 张建锋,崔树军,李国敏.常用小波及其时—频特性[J].地学前缘,2012,19(6):248-253.
- [3] 董宁,杨立强.基于小波变换的吸收衰减技术在塔河油田储层预测中的应用研究[J].地球物理学进展,2008,23(2):533-538.
- [4] 马志霞,孙赞东.Gabor-Morlet 小波变换分频技术及其在碳酸盐岩储层预测中的应用[J].石油物探,2010,49(1):42-53.
- [5] 李曙光,徐天吉,甘其刚,等.频率域小波变换分频处理在川西地震勘探中的应用[J].石油物探,2010,49(5):500-503.
- [6] 刁瑞,李振春,韩文功,等.基于广义 S 变换的吸收衰减分析技术在油气识别中的应用[J].石油物探,2011,50(3):260-265.
- [7] 刘喜武,宁俊瑞.地震时频属性及其在油气地震地质技术中应用的综述[J].勘探地球物理进展,2009,32(1):18-22.
- [8] Zhang T Q, Li X Y, Mark C. Estimating frequency-dependent seismic attributes by matching pursuit: a case study[C]//Las Vegas: Expanded Abstracts of the 78th Annual SEG Meeting, Society of Exploration Geophysicists, 2008:3023-3027.
- [9] 陈林,宋海斌.基于 Morlet 小波匹配追踪算法的地震时频属性提取[J].石油地球物理勘探,2008,43(6):673-679.
- [10] 冯磊,姜在兴.基于匹配追踪的谱分解方法及其应用[J].勘探地球物理进展,2009,32(1):33-36.
- [11] 屈念念,刘江平,李家斌.Ricker 子波匹配追踪算法及其改进[J].工程地球物理学报,2009,6(6):740-745.
- [12] Wang Y H. Multichannel matching pursuit for seismic trace decomposition[J]. Geophysics, 2010, 75(4): V61-V66.
- [13] 刘小龙,刘天佑,王华.基于匹配追踪算法的频谱成像技术及其应用[J].石油地球物理勘探,2010,45(6):850-855.
- [14] 黄捍东,郭飞,汪佳蓓,等.高精度地震时频谱分解方法及应用[J].石油地球物理勘探,2012,47(5):773-780.
- [15] Mallat S G, Zhang Z F. Matching pursuits with time-frequency dictionaries[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41

- (12); 3397 - 3415.
- [16] Castagna J P, Sun S J. Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons[J]. The leading edge, 2003, 2; 119 - 127.
- [17] Liu J L. Spectral decomposition and its application in mapping stratigraphy and hydrocarbons[D]. Houston: Geosciences University of Houston, 2006.

Time-frequency attribute based on modified matching pursuit algorithm and its application to sedimentary microfacies of thin reservoir area

CHEN Shan¹, XU Xing-You¹, LUO Xiao-Ling², BAI Jing¹, LIU Li-Hui³, LU Rong³

(1. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 2. Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China; 3. Beijing Rockstar Petroleum Technology Co. Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: The matching pursuit algorithm has higher time-frequency resolution and local adaptive capability and obtains precise position both in time and frequency domain. It is difficult to apply it in practical work due to the low-frequency shadow and low computation efficiency. This paper proposes a method to improve the calculation precision and operation efficiency of Ricker wavelet matching pursuit algorithm. The accuracy of frequency localization and time resolution of time-frequency spectrum is improved by optimizing iteration scheme which improves the calculating method of atom main frequency and compressed atom's sidelobe. The efficiency of algorithm is greatly improved by adaptive acquisition of atomic parameters. By using model experiment and actual seismic data, the effect of improved algorithm is proved. And in some thin reservoir area, the distribution of sandstone is characterized well by the time-frequency slice calculated by improved algorithm. It would help the sedimentary microfacies characterization.

Key words: matching pursuit; time-frequency technique; peak frequency; sedimentary microfacies

(本文编辑:叶佩)