

DOI: 10.11720/wtyht.2014.3.25

毕俊凤, 杨培杰. 有色反演技术在少井区岩性体预测中的应用[J]. 物探与化探, 2014, 38(3): 558-565. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.3.25>
Bi Junfeng, Yang Peijie. The application of colored inversion to reservoir prediction in sparse well zone[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(3): 558-565. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.3.25>

有色反演技术在少井区岩性体预测中的应用

毕俊凤^{1,2}, 杨培杰²

(1. 中国地质大学 地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国石化胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015)

摘要: 阐述了有色反演的基本原理, 并给出了反演流程。通过模型试算, 明确有色反演关键参数的物理意义及取值范围, 并在孤南洼陷实际工区应用, 较好地刻画出沙三下早期低位扇体的横向展布范围。与常规地震属性相比, 反演结果更加符合沉积规律, 与实钻井岩性分布情况吻合程度高。表明有色反演在保留地震数据原始现象的基础上, 分辨率明显提高, 适合无井或少井区的地层或岩性解释。

关键词: 有色反演; 频率域; 匹配算子; 少井区; 岩性体预测

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2014)03-0558-08

常规地震资料反映了岩层界面的起伏变化, 经过反演可以把界面型的地震资料转换成岩层型的波阻抗资料。近几十年来, 叠前叠后波阻抗反演取得了巨大进展, 已形成了多种成熟技术^[1-6]。其中, 稀疏脉冲波阻抗反演是储层预测中常用的反演方法之一, 其纵横向分辨率较高, 但井资料特别是边界井资料对反演结果具有显著的控制作用^[7]。同时, 稀疏脉冲反演中子波的极性、频率、相位对反演结果影响很大, 通常子波是很难提取准的, 它受到时窗大小、子波计算方法、子波的时变与空变等诸多因素的影响^[8-9]。所以很多情况下, 反演中的一些细节变化是子波引起的, 而不是岩性体边界造成的。道积分和递归反演适合少井或无井区的岩性体识别, 但分辨率不高, 满足不了隐蔽油藏勘探的需求。

有色反演是在有色滤波技术的基础上发展起来的一种新的反演方法, 最早由国外的学者提出^[10], 用来解决测井约束反演中处理速度慢、流程复杂的问题。近几年来国内陆续有研究人员用到有色反演理念进行储层预测, 主要目的是进行层序研究或识别薄储层^[11-12], 但对控制反演关键参数的物理意义、与其他反演方法的对比及适用性评价方面的研究不多。为提高有色反演的精度, 最大限度发挥有色反演在储层预测中的作用, 我们对有色反演进行

了深入的研究。从模型设计、参数试算、与其他反演软件的对比到实际资料应用, 客观评价其算法特点, 指出其应用条件。

1 有色反演基本原理

有色反演是一种频率域测井约束波阻抗反演方法, 其核心是用地震的频谱和井的波阻抗频谱相匹配来完成反演。这种反演方法没有明显的子波提取过程, 也不需要初始模型来约束, 纵向分辨率比稀疏脉冲反演高, 但比模型反演低。其特点是对井的依赖程度小, 全局优化, 反演人为因素少, 地质现象反映客观。考虑地震记录的褶积模型为

$$s_i(t) = r_i(t) * w(t), \quad (1)$$

其中: $r_i(t)$, $i=1, 2, \dots, n$ 表示反射系数, n 为道数; $s_i(t)$, $i=1, 2, \dots, n$ 表示地震记录; $w(t)$ 表示地震子波。将褶积模型变换到频率域, 则

$$S_i(\omega) e^{-j\Phi_i(\omega)} = [R_i(\omega) e^{-j\Psi_i(\omega)}] [W_i(\omega) e^{-j\varphi_i(\omega)}], \quad (2)$$

其中: $R_i(\omega)$ 为反射系数振幅谱, $\Psi_i(\omega)$ 为反射系数相位谱, $W_i(\omega)$ 为子波振幅谱, $\varphi_i(\omega)$ 为子波相位谱, 则

$$\begin{cases} S_i(\omega) = R_i(\omega) W_i(\omega), \\ \Phi_i(\omega) = \Psi_i(\omega) + \varphi_i(\omega), \end{cases} \quad (3)$$

因此

$$\ln S_i(\omega) = \ln R_i(\omega) + \ln W_i(\omega) \quad (4)$$

假设各道的波阻抗为 $z_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$, 将其变换到频率域, 有

$$Z_i(j\omega) = Z_i(\omega) e^{-j\Omega_i(\omega)} \quad (5)$$

其中: $Z_i(\omega)$ 为波阻抗振幅谱, $\Omega_i(\omega)$ 为波阻抗相位谱。根据波阻抗与反射系数之间的计算公式

$$R_i = (Z_{i+1} - Z_i) / (Z_{i+1} + Z_i),$$

可以将波阻抗序列变为反射系数序列, 由 $Z_i(\omega)$ 得到 $R_i(\omega)$, 并带入式(4), 可求得频率域匹配算子 $W_i(\omega)$ 。

需要注意的是, 当井的波阻抗谱和地震记录振幅谱的能量相差很大时, 在作反演之前需要对井上各道的波阻抗谱和地震记录振幅谱能量进行均衡化

处理。

2 方法流程及参数意义

有色反演基本步骤如下: ①对井的波阻抗作谱分析; ②对地震资料的波阻抗作谱分析; ③在频率域设计匹配算子使地震的谱和井的波阻抗谱匹配; ④施加匹配算子到地震数据, 然后转换回时间域, 完成地震有色反演, 具体方法流程如图 1 所示, 步骤 3 中绿线为平滑后的单井波阻抗能量分布曲线, 蓝线为平滑后的地震道波阻抗能量分布曲线, 红线为匹配算子能量分布曲线, 图 3~图 5 类同。其中, 匹配算子的设置是有色反演的关键步骤, 影响反演结果的好坏。

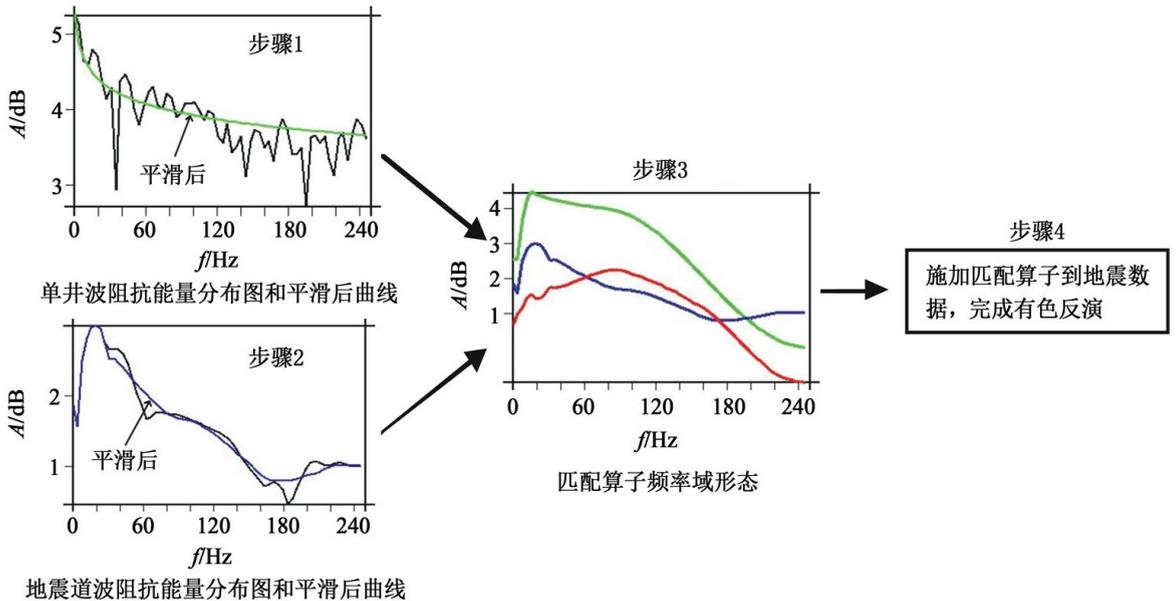


图 1 有色反演方法流程

有色反演处理的主要参数有低通频率、高通频率和匹配算子能量截取百分比参数, 这三个参数直接决定了匹配算子在频率域或时间域的形态。低通频率的大小决定匹配算子频率域低频段的形态, 原则上低频端的尖峰不要太高, 越高, 反演的分辨率会有所降低。高通频率决定着匹配算子频率域高频端的形态, 为高频衰减的起始参考点, 理论上以 Nyquist 频率为取值极限, 但具体应用过程中应以地震资料频谱特征为依据, 频率若太高, 难免会加进去高频噪声, 降低反演结果的信噪比。匹配算子能量截取值的大小决定了匹配算子时间域的形态, 反演时窗越长, 算子越长, 截取值应越大。截取值太小, 算子损失的能量太多, 反演结果的值域变窄, 分辨率越低。该参数选取时, 同样应根据实际地震资料的频谱分析, 考虑适当切掉部分噪声干扰。

3 模型试算

设计一套低速泥岩背景中夹高速砂体, 各套地层速度分布如图 2a 所示, 砂体最大厚度在 10 m 左右。鉴于砂体厚度、围岩厚度及二者速度匹配关系, 在与 25 Hz 子波褶积后得到的合成地震道上, 砂体与下覆岩层形成复合波形, 常规地震反射不足以反映砂体的分布特征(图 2b)。

首先对低通频率进行参数调试, 其他参数相同, 观察匹配算子在频率域和时间域的形态特征, 分析不同参数下反演结果的差异。图 3a 和图 3b 分别为低通频率参数取值为 10 和 15, 高通频率均为 60, 能量截取值均为 99 时匹配算子的形态特征。可以看出, 匹配算子在时间域里的频谱形态基本上相似, 但在频率域, 低通频率值越小, 低频尖峰相对越高, 反

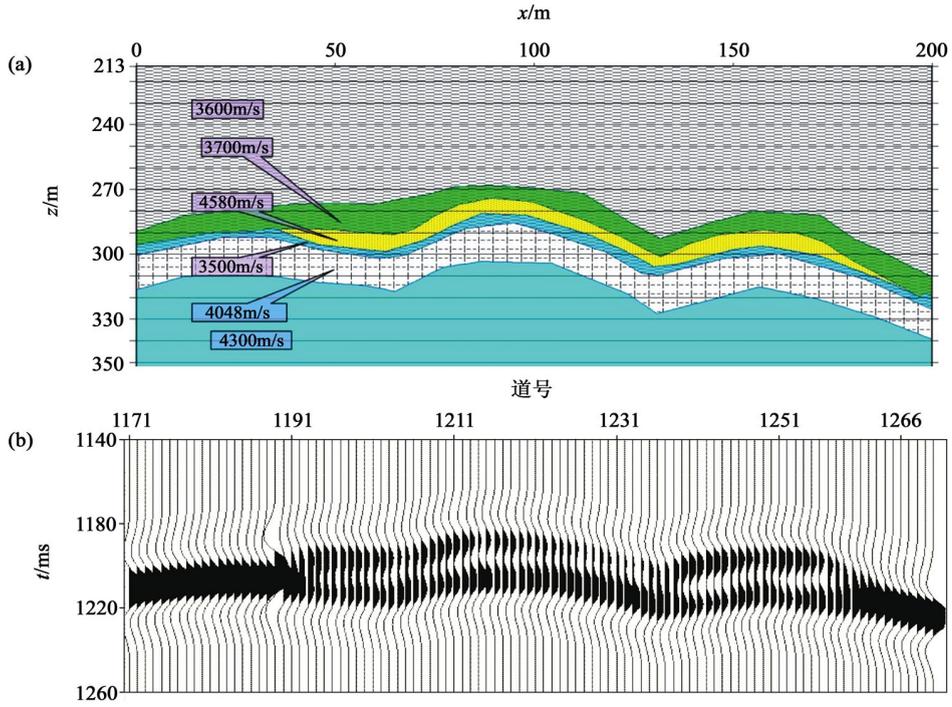
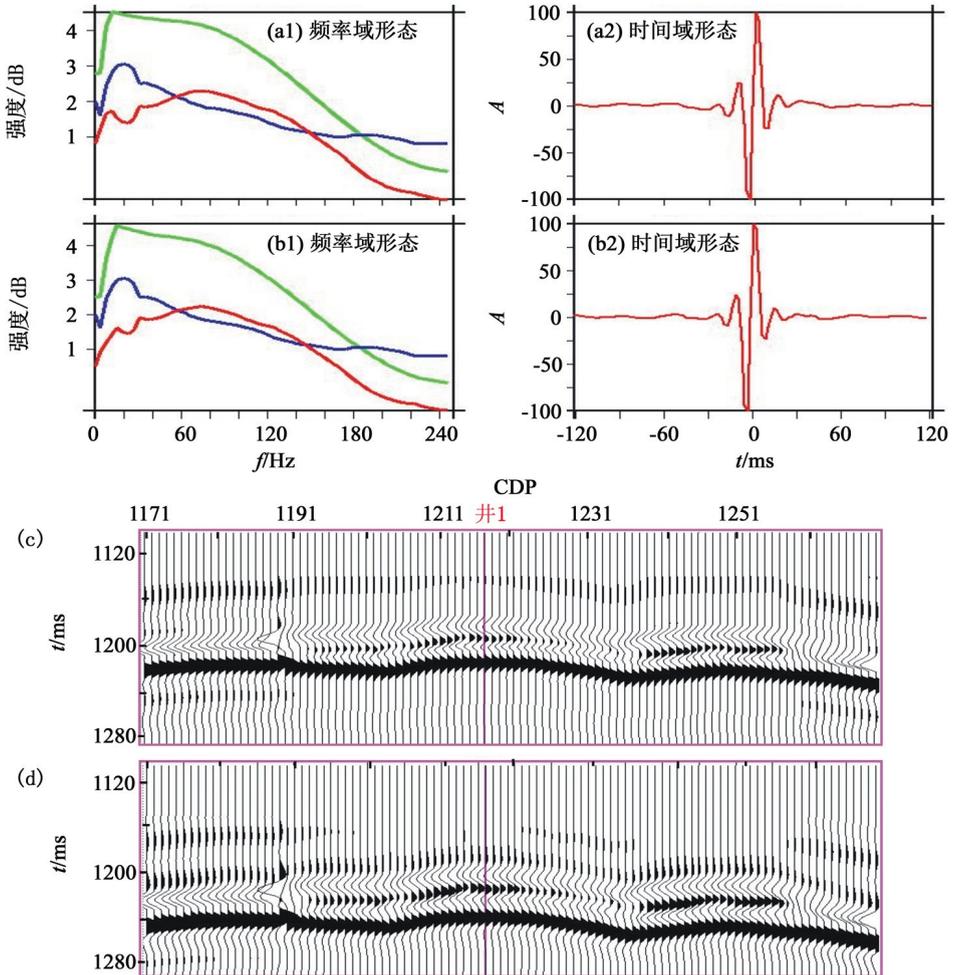
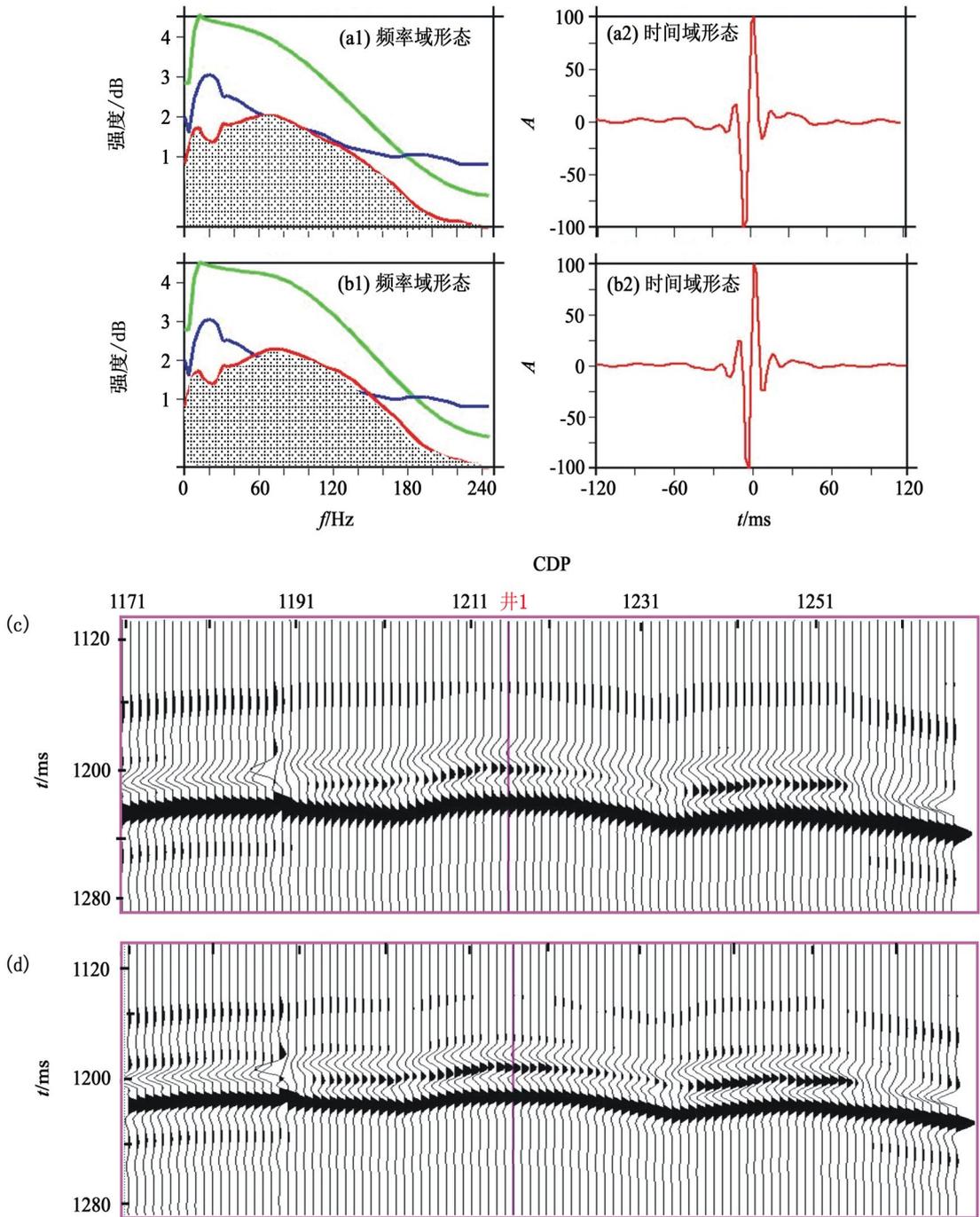


图 2 低速泥岩夹高速砂体的地质模型 (a) 及其合成地震记录道 (b)



a、b—低通频率分别为 10、15 时匹配算子频率域及时间域形态；c、d—低通频率分别为 10、15 时有色反演结果

图 3 不同低通频率参数取值匹配算子频谱形态及反演结果



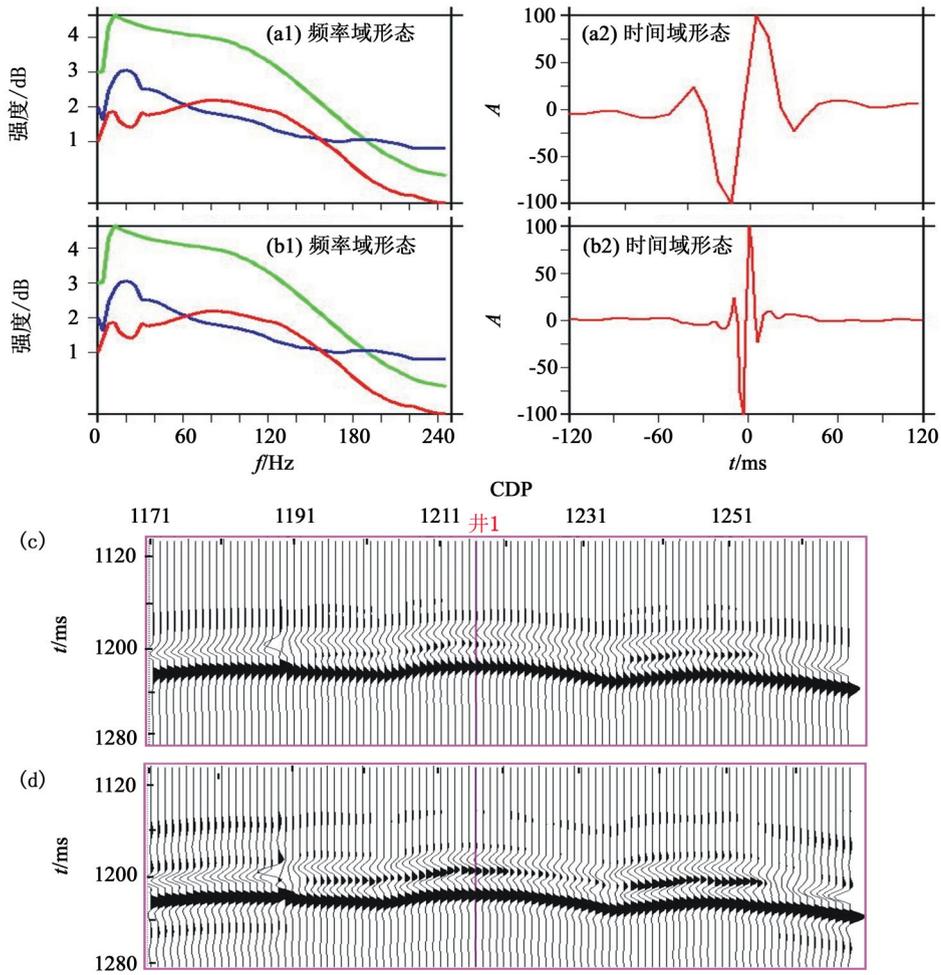
a、b—高通频率分别为 60、80 时匹配算子频率域及时间域形态;c、d—高通频率分别为 60、80 时有色反演结果

图 4 不同高通频率参数取值匹配算子频谱形态对比及反演结果

演结果的分辨率相对越低(图 3c)。总体来说,图 3c 与图 3d 变化不大,说明该参数对反演结果不太敏感。

图 4a、图 4b 显示出高通频率取值分别为 60 和 80,其他两个参数相同时匹配算子频谱形态的改变。可以看出,高通频率参数取值越大时,频率域的频谱上高频端能量明显提升,频谱宽度变大,时间域上算子能量相对集中,反演结果的纵向分辨能力明显提高(图 4c、图 4d)。

能量截取百分比参数主要影响匹配算子时间域的形态特征。图 5a 和图 5b 分别为该参数取值为 60 和 99 时匹配算子的频谱形态对比。截取值越低,匹配算子损失的能量越多,时间域上频谱能量越分散,反演结果的值域越窄,分辨率越低。原则上该参数取值应为 100%,即保留所有的能量,但考虑到噪声的客观存在,应适当调节该参数,切掉部分噪声。该参数对反演结果敏感性很强,图 5c 和 5d 分别为两个参数下的反演结果。不难看出,能量截取值



a、b—能量截取分别为 60、99 时匹配算子频率域及时间域形态；c、d—能量截取分别为 60、99 时有色反演结果
 图 5 不同能量截取百分比参数取值匹配算子频谱形态对比及反演结果

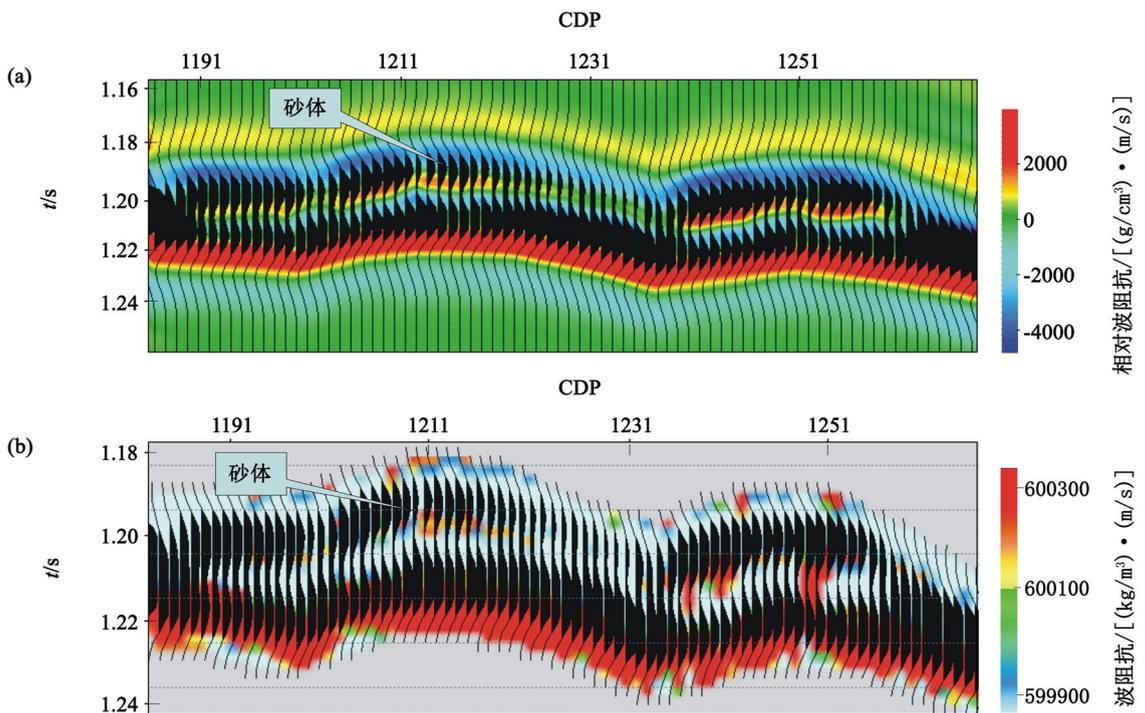


图 6 有色反演 (a) 与常规反演 (b) 结果对比

为 99 时反演结果中砂体的纵向分辨率和横向连续性都明显变好,与模型的合成地震道相比,能够较好地反映出地质模型中的砂体厚度及横向展布特征。

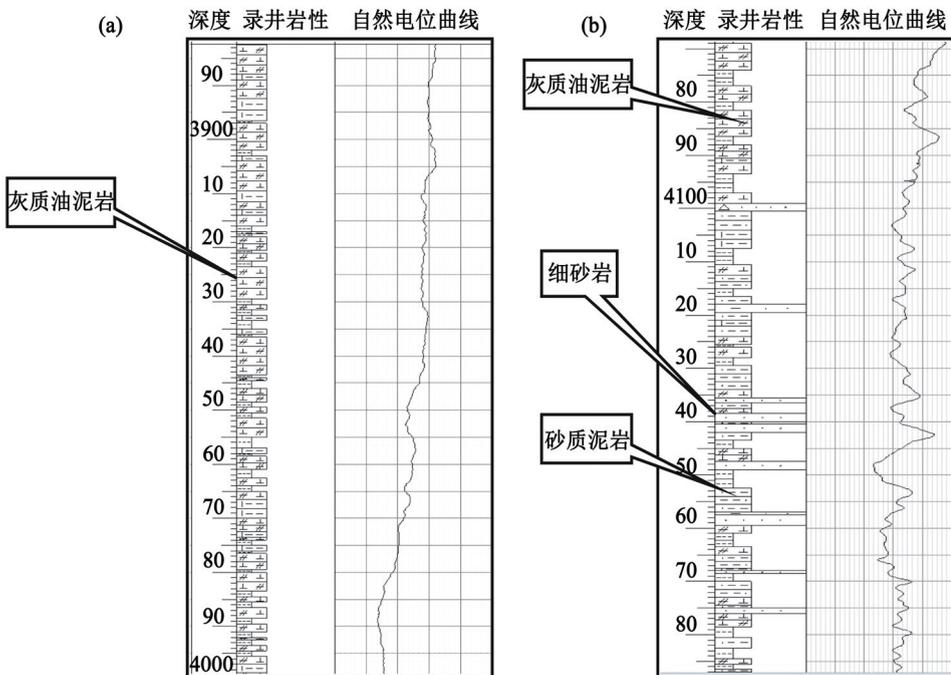
通过模型试算,综合分析对比认为,低通频率取值范围在 10~15 Hz 之间,高通频率取值应根据实际地震资料频谱特征适当调节,以高频能量开始下降点为参考,不能太大。能量截取百分比取值范围在 80~99 之间。对设计的地质模型,低通频率、高通频率、能量截取参数取值分别为 15、60 和 99 时为最佳的参数选择。图 6a 为该参数下地质模型的有色反演结果,图 6b 为常规反演方法所得结果。不难看出,有色反演得到的砂体形态完整,连续性好,砂体纵横向展布范围及厚薄关系与最初设计的模型基本一致,而常规反演剖面上砂体断续分布、形态模糊不完整。

4 应用实例

孤南洼陷是渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷的一个次级构造单元,呈北东东向长条状分布,为一北断南超的后期沉降型洼陷,沙三期是主要沉降期。沙三下早期,在孤南断裂下降盘发育一系列小型近岸水下扇、滑塌扇等早期砂体^[13]。本次研究区为孤南洼陷带北部的孤南 30 井区,处于孤南断裂带的下降盘,是低位扇体集中的发育区。

从储盖组合关系看,沙三下段属于半深湖—深湖沉积,暗色泥岩、油泥岩、油页岩发育,沉积厚度大;低位扇体夹在油页岩及油泥岩当中,单层厚度小,累加厚度在 8~10 m 之间,是非常良好的储层(图 7)。低位扇体地震反射特征表现为 T6 反射强轴之上的复波反射,而油页岩、油泥岩与泥岩组合整体表现为 T6 强反射,局部也表现为紧邻 T6 轴的复波反射,但同低位扇体地震反射相比,频率略微偏低(图 8)。常规的属性分析方法无法预测出低位扇体的分布范围,特别是无法区分同是复波反射的区域。

通过模型试算确定最佳的反演参数之后,在精细的合成地震记录标定及层位解释的基础上,对三维数据体进行有色反演处理。反演剖面的分辨率明显高于常规地震剖面,较好地刻画出低位扇体的横向展布范围,扇体与非扇体在反演剖面上的差异一目了然(图 9)。反演平面图上,低位扇体发育在断层下降盘沟谷处,形态完整,边界清楚,与实钻井吻合情况较好,如图 10(左)中虚线所示。孤南 133 井位于扇体边部,井上钻遇砂体厚度为 13 m。而孤南 30 井目的层段内没有钻遇扇体,位于反演属性异常区之外,但是在常规地震数据体提取的弧长属性图上,扇体与非扇体属性值相近,根本无法有效区分二者的边界(图 10 右)。



a—正常地层岩性组合(孤南 30 井);b—低位扇体岩性组合(孤南 133 井)

图 7 典型井岩性组合特征对比

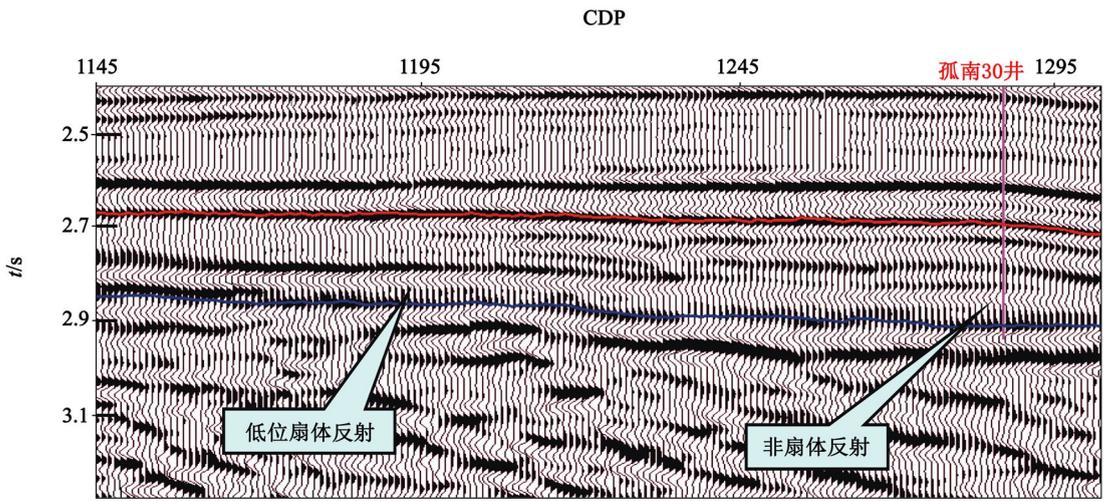


图 8 地质体在地震剖面上的反射特征

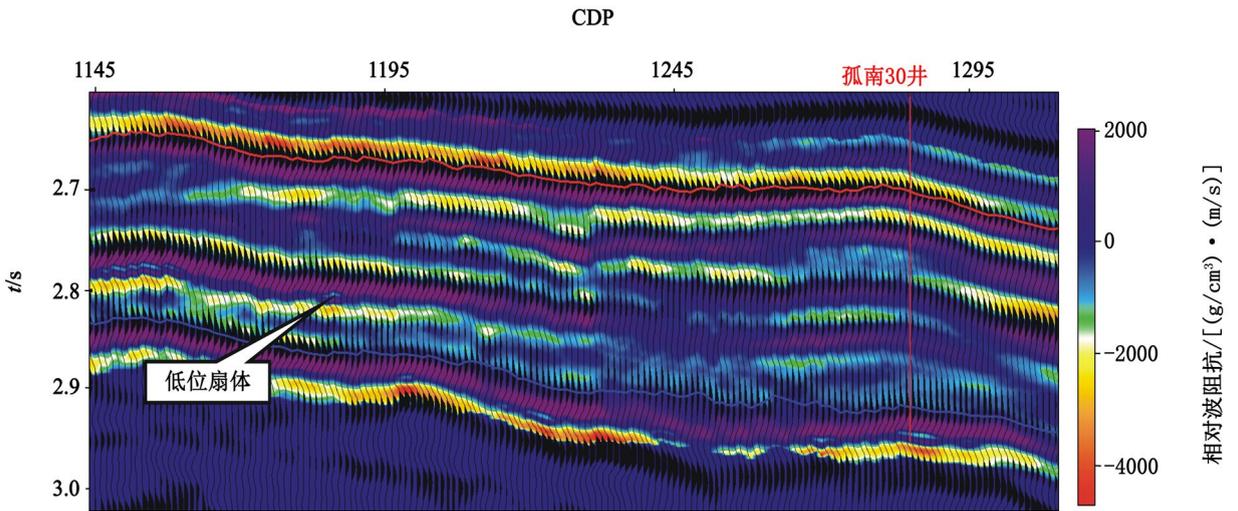


图 9 过孤南 30 井东西向有色反演剖面

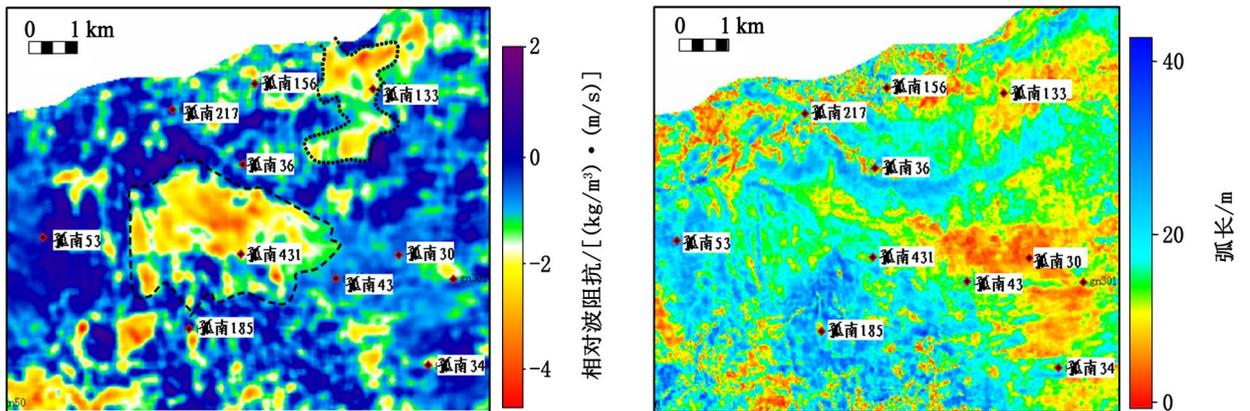


图 10 有色反演平面预测结果(左)与常规弧长属性(右)的对比

5 结论

在无井或少井地区开展反演工作,可以快速的将地震资料的界面信息转换为岩层信息,帮助了解储层特征的空间变化,为新区预测有利目标提供依据。实际应用结果表明,有色反演技术具备纵向分辨率高且无需初始模型的优势,反演周期短,人为干预少,地质现象客观,能够适用于勘探程度略低地区的地层和岩性研究。

参考文献:

- [1] Hu Wenyi, Abubakar A, Habashy T M. Simultaneous multifrequency inversion of full-waveform seismic data [J]. *Geophysics*, 2009, 74(2): 7-14.
- [2] German J, Danilo Velis. Thin-bed prestack spectral inversion [J]. *Geophysics*, 2009, 74(4): 49-57.
- [3] Yang H J, Xu Y Z, Huang Z B, et al. Comparison between several multi-parameter seismic inversion methods in identifying plutonic igneous rocks [J]. *Mining Science and Technology (China)*, 2011, 21: 325-331.
- [4] Gislain B, Madiba G A, McMechan. Seismic impedance inversion and interpretation of a gas carbonate reservoir in the Alberta Foot-hills, western Canada [J]. *Geophysics*, 2003, 68(5): 1460-1469.
- [5] 杨海长,李智,徐建永,等.叠前反演在 LHK 地区烃类检测中的应用 [J]. *物探与化探*, 2011, 35(5): 666-670.
- [6] 何火华,李少华,杜家元,等.利用地质统计学反演进行薄砂体储层预测 [J]. *物探与化探*, 2011, 35(6): 804-807.
- [7] 穆星.稀疏脉冲波阻抗反演参数对反演结果的影响研究 [J]. *工程地球物理学报*, 2005, 2(2): 104-108.
- [8] 许升辉,马劲风.波阻抗反演中多井条件下的子波提取方法 [J]. *地球物理学进展*, 2003, 18(4): 699-702.
- [9] Yuan S Y, Wang S X. Influence of inaccurate wavelet phase estimation on seismic inversion [J]. *Applied Geophysics*, 2011, 8(1): 48-59.
- [10] Lancaster S, Whitcombe D. Fast track 'coloured' inversion [C]// 70th Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts, 2000: 1572-1575.
- [11] 王濮,李国发,张立勤,等.岐口凹陷西斜坡沙一段薄储层预测 [J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2008, 32(2): 30-32.
- [12] 谢玉洪,陈志宏,陈殿远.含气储层非均质性评价技术研究极其应用 [J]. *石油物探*, 2007, 46(4): 355-356.
- [13] 郑宁,姜在兴,张乐,等.渤海湾盆地孤南洼陷沙河街组三段中、下亚段沉积特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(54): 823-829.

The application of colored inversion to reservoir prediction in sparse well zone

Bi Junfeng^{1,2}, Yang Peijie²

(1. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Geoscience Research Institute of Shengli Oilfield, Sinopec, Dongying 257015, China)

Abstract: Every inversion method has its own characteristics and applicable conditions. The inversion based on model can obtain high resolution in vertical and horizontal direction, but the inversion result is affected obviously by wells and wavelet. So it can be used to interpret lithologic body in multiple wells area. Colored inversion is a kind of frequency domain inversion method, which does not depend on initial model and needs limited wells. Moreover, the inversion result is faithful to seismic data and the inversion process is relatively simple. By building forward model and testing parameter, the authors got to know the physical meaning and range of inversion parameters. By using this method, the authors preferably depicted the lateral distribution characteristics of fan body in lower Es3 of Gunan sag. Compared with conventional seismic attributes, the colored inversion results are more coincident with the deposition rules and the lithologic distribution of the actual drilling wells. It is shown that the colored inversion method could improve the resolution of seismic data based on keeping the original phenomena, and hence it is suitable to interpreting the strata or lithologic characteristics in sparse or no well zone.

Key words: colored Inversion; frequency domain; matching operator; sparse well zone; reservoir prediction

作者简介: 毕俊凤(1972-),女,高级工程师,在读博士,主要从事油气勘探研究工作。