

# 基于频变 AVO 反演的频散属性 估算方法及其应用

郝前勇\*<sup>①</sup> 张世鑫<sup>②</sup> 张峰<sup>③</sup> 郑明<sup>④</sup>

(<sup>①</sup>中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266555; <sup>②</sup>中海石油研究总院,北京 100027;  
<sup>③</sup>中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院,北京 102249; <sup>④</sup>德州职业技术学院,山东德州 253034)

郝前勇,张世鑫,张峰,郑明. 基于频变 AVO 反演的频散属性估算方法及其应用. 石油地球物理勘探, 2013, 48(2):255~261

**摘要** 地震波在含油气储层传播时会发生较强的能量衰减和速度频散,以特定的频散属性定量地表征速度频散程度,并可将其作为一种新的烃类指示因子用于储层预测。基于介质界面反射系数随频率变化的数学关系,本文研究了频变振幅随炮检距的变化规律;应用贝叶斯反演理论,可从分频叠前道集中反演出表征纵波速度频散程度和频散程度随炮检距变化的梯度等属性参数。模型测试结果验证了本文所述方法的可行性及频散属性识别油气的有效性,实际应用则进一步说明据此反演得到的频散属性可为储层烃类检测提供较可靠的数据支撑,有效地降低了烃类检测的多解性。

**关键词** 频散属性 频变 AVO 反演 烃类检测 储层预测 贝叶斯理论

**中图分类号**:P631 **文献标识码**:A

## 1 引言

可靠的烃类检测可降低勘探风险与投入成本,对储层评价和油气勘探具有重要意义<sup>[1,2]</sup>。自 20 世纪 70 年代以来,基于地震振幅差异和储层弹性参数的烃类检测技术一直是主导应用技术,如最初的“亮点”和 AVO 分析技术<sup>[3,4]</sup>,以及后来的 LMR(拉梅参数)技术、Russell 流体因子和泊松阻抗方法等<sup>[5~7]</sup>。这些技术虽然在提高油气勘探成功率上做出了巨大的贡献,但随着勘探主体变为隐蔽岩性油气藏或深海油气藏,单纯依靠振幅异常和储层弹性参数的烃类检测技术在实际储层预测中逐渐显露出局限性。首先,隐蔽岩性油气藏的气水关系复杂、储层非均质性强、地震振幅响应与弹性参数异常特征不明显,常规方法的多解性严重;另外,海上钻井较少,叠前地震反演的实

施难度较大,影响了弹性参数的精确求取。考虑到地震波在含油气储层中传播时会发生能量衰减异常,可利用衰减特征参数进行储层烃类检测,这样不仅能较好地弥补无法实施传统方法的不足,而且可与其他相关方法相互补充验证,降低预测结果的多解性。

利用衰减特征进行烃类检测的方法主要有基于“低频阴影”、基于特定优势频段及基于品质因子  $Q$  等衰减特征参数的三类方法<sup>[8]</sup>。其中衰减特征参数物理意义明确且普适性较强,是现阶段的主流方法。考虑到地震波的强衰减过程一般伴有速度频散现象,类比于品质因子  $Q$  等衰减特征参数,将速度频散程度定量地表征为特定的频散属性,可将其作为一种指示因子用于储层烃类检测。现今利用频散特征进行储层描述的方式多是采用基于岩石物理模型及数值模拟技术的理论指导,利用谱分解方法进行储层描述<sup>[9,10]</sup>,而一些学者则通过研究

\* 山东省青岛市中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,266555。Email:haoqianrong@gmail.com

本文于 2012 年 5 月 21 日收到,最终修改稿于 2013 年 2 月 16 日收到。

本研究受国家科技重大专项(2011ZX05030-004-002)资助。

黏弹介质界面的反射系数, 试图从地震振幅信息中提取表征速度频散的属性。如 Cooper<sup>[11]</sup> 研究了线性黏弹性介质界面处的反射与透射系数; Krebs<sup>[12]</sup> 和 Nechtschein 等<sup>[13]</sup> 对黏弹性介质反射和透射系数进行了定量分析; Ursin 等<sup>[14]</sup> 研究了黏弹性薄互层的反射和透射系数; Sidler 等<sup>[15]</sup> 分析了 VTI 衰减介质中的反射和透射系数。由于黏弹性介质界面的反射特征方程形式复杂, 因此利用这些复杂的反射特征方程提取黏弹性属性的难度较大。Wilson 等<sup>[16]</sup> 对两项 AVO 反演近似公式进行扩展, 借助频谱分解技术, 提出了一种更为实用的频散属性计算方法, 并通过模型分析验证了纵波速度频散属性在油气识别方面的有效性; 随后, Wu 等<sup>[17]</sup> 将此类方法进一步应用于实际资料, 同样取得了较好的烃类检测效果。

本文基于地震波相速度频散的假设, 借鉴 Wilson 等<sup>[16]</sup> 的思想, 从佐普里兹方程 Shuey 近似公式出发, 推导了包含表征纵波速度频散程度和频散程度随炮检距变化梯度属性的反射系数近似公式, 且不依赖频谱分解技术, 直接基于贝叶斯频变 AVO 反演实现了相应频散属性的估算。通过模型试算和实际应用, 验证了反演的频散属性可为储层烃类检测提供较可靠的数据支撑。

## 2 方法原理

### 2.1 频变 AVO 属性

Shuey<sup>[18]</sup> 在推导各向同性介质 PP 波反射系数近似公式时, 首次提出了 AVO 截距和梯度的概念, 并指出在入射角小于 30° 时, 反射系数可用两项近似表示为

$$R_{PP}(\theta) \approx P + G \sin^2 \theta \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为平均入射角度;  $P$  为纵波法线(垂直)入射反射系数, 称为 AVO 的截距;  $G$  为 AVO 的梯度, 主要与岩石的泊松比有关。

进一步将式(1)中 AVO 截距项展开, 可得

$$R_{PP}(\theta) \approx \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) + G \sin^2 \theta \quad (2)$$

如果以  $V_{P1}$  和  $\rho_1$  分别表示上层介质纵波速度和密度,  $V_{P2}$  和  $\rho_2$  分别表示下层介质的纵波速度和密度,

则式(2)中存在

$$\begin{aligned} V_P &= \frac{V_{P1} + V_{P2}}{2} & \rho &= \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \\ \Delta V_P &= V_{P2} - V_{P1} & \Delta \rho &= \rho_2 - \rho_1 \end{aligned}$$

在实际地层中, 式(2)中的速度是指纵波的群速度(即振幅包络)。根据 Chapman 等<sup>[19]</sup> 的观点, 地震波传播到频散介质界面时, 频散造成的相速度差异会使反射系数随频率发生变化。如果假设界面两侧主要是纵波速度随频率变化、密度不会随频率变化, 则式(2)可简单地表示为入射角度与频率的函数

$$R_{PP}(\theta, f) \approx \frac{\Delta V_P}{2V_P}(f) + \frac{\Delta \rho}{2\rho} + G(f) \sin^2 \theta \quad (3)$$

式中:  $\theta$  为入射角度;  $f$  为频率。

对式(3)关于频率  $f$  做一阶泰勒展开, 得到

$$\begin{aligned} R_{PP}(\theta, f) &\approx \frac{\Delta V_P}{2V_P}(f_0) + (f - f_0) \frac{\partial}{\partial f} \left( \frac{\Delta V_P}{2V_P} \right) + \\ &\frac{\Delta \rho}{2\rho} + G(f_0) \sin^2 \theta + (f - f_0) \frac{\partial G(f)}{\partial f} \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (4)$$

假设  $f_0$  是地震记录频带范围内某一频率, 且  $R_{PP}(\theta, f_0) = \frac{\Delta V_P}{2V_P}(f_0) + \frac{\Delta \rho}{2\rho} + G(f_0) \sin^2 \theta$ , 则可将式(4)简化为

$$\begin{aligned} R_{PP}(\theta, f) &\approx R_{PP}(\theta, f_0) + (f - f_0) \left[ \frac{\partial}{\partial f} \left( \frac{\Delta V_P}{2V_P} \right) + \right. \\ &\left. \frac{\partial G(f)}{\partial f} \sin^2 \theta \right] \end{aligned} \quad (5)$$

以  $\Delta R(\theta, f)$  表示  $R_{PP}(\theta, f) - R_{PP}(\theta, f_0)$ ,  $D_P$  表示  $\frac{\partial}{\partial f} \left( \frac{\Delta V_P}{2V_P} \right)$ ,  $D_G$  表示  $\frac{\partial G(f)}{\partial f}$ , 最终得到

$$\Delta R(\theta, f) = (f - f_0) D_P + D_G (f - f_0) \sin^2 \theta \quad (6)$$

式中:  $D_P$  表征纵波速度频散程度;  $D_G$  是借鉴 AVO 梯度的意义表征纵波频散程度随炮检距的变化梯度。  $D_P$  和  $D_G$  即是待反演的频散属性参数。

### 2.2 正演方程

构建正演方程的过程中, 为简化问题首先考虑两个炮检距( $\theta_1$  和  $\theta_2$ )、两个深度采样点(用上标 1 和 2 表示)和两个频率( $f_1$  和  $f_2$ )的情况。对式(6)做块状化处理, 可将其表示为矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \Delta R^1(\theta_1, f_1) \\ \Delta R^2(\theta_1, f_1) \\ \Delta R^1(\theta_2, f_1) \\ \Delta R^2(\theta_2, f_1) \\ \Delta R^1(\theta_1, f_2) \\ \Delta R^2(\theta_1, f_2) \\ \Delta R^1(\theta_2, f_2) \\ \Delta R^2(\theta_2, f_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 - f_0 & 0 & (f_1 - f_0)a_{\theta_1}^1 & 0 \\ 0 & f_1 - f_0 & 0 & (f_1 - f_0)a_{\theta_1}^2 \\ f_1 - f_0 & 0 & (f_1 - f_0)a_{\theta_2}^1 & 0 \\ 0 & f_1 - f_0 & 0 & (f_1 - f_0)a_{\theta_2}^2 \\ f_2 - f_0 & 0 & (f_2 - f_0)a_{\theta_1}^1 & 0 \\ 0 & f_2 - f_0 & 0 & (f_2 - f_0)a_{\theta_1}^2 \\ f_2 - f_0 & 0 & (f_2 - f_0)a_{\theta_2}^1 & 0 \\ 0 & f_2 - f_0 & 0 & (f_2 - f_0)a_{\theta_2}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_P^1 \\ D_P^2 \\ D_G^1 \\ D_G^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中  $a_{\theta_i}^j$  ( $i=1,2$ ) 表示炮检距为  $\theta_i$ 、深度域位于第  $j$  个采样点的三角函数形式的系数。

据以上矩阵构建方式类推至  $m$  个炮检距、 $n$  个采样点和  $l$  个频率的情形,将矩阵做块状化处理,可得

$$\begin{bmatrix} \Delta R_1^1 \\ \Delta R_2^1 \\ \vdots \\ \Delta R_m^1 \\ \Delta R_1^2 \\ \vdots \\ \Delta R_m^2 \\ \vdots \\ \Delta R_m^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta F^1 & A_1^1 \\ \Delta F^1 & A_2^1 \\ \vdots & \vdots \\ \Delta F^1 & A_m^1 \\ \Delta F^2 & A_1^2 \\ \vdots & \vdots \\ \Delta F^2 & A_m^2 \\ \vdots & \vdots \\ \Delta F^l & A_m^l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_P \\ D_G \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $\Delta R_i^j$  ( $i=1,2,\dots,l; j=1,2,\dots,m$ ) 表示第  $i$  个炮检距、频率为  $f_j$  所对应的共  $n$  个采样点的列向量;  $\Delta F^i$  ( $i=1,2,\dots,l$ ) 是频率  $f_i$  与  $f_0$  之差构成的斜对角矩阵;  $A_j^i$  ( $i=1,2,\dots,l; j=1,2,\dots,m$ ) 是第  $i$  个炮检距、频率为  $f_j$  所对应斜对角系数矩阵;  $D_P$  和  $D_G$  分别表示待反演的表征纵波速度频散程度和频散梯度的属性列向量。

利用卷积运算的线性性质,将地震子波矩阵引入式(8),得到方程

$$\begin{bmatrix} D_1^1 \\ D_2^1 \\ \vdots \\ D_m^1 \\ D_1^2 \\ \vdots \\ D_m^2 \\ \vdots \\ D_m^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \Delta F^1 & W_1 A_1^1 \\ W_1 \Delta F^1 & W_1 A_2^1 \\ \vdots & \vdots \\ W_1 \Delta F^1 & W_1 A_m^1 \\ W_2 \Delta F^2 & W_2 A_1^2 \\ \vdots & \vdots \\ W_2 \Delta F^2 & W_2 A_m^2 \\ \vdots & \vdots \\ W_l \Delta F^l & W_l A_m^l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_P \\ D_G \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:  $D_j^i$  ( $i=1,2,\dots,l; j=1,2,\dots,m$ ) 是第  $i$  个炮检距、频率  $f_i$  与频率  $f_0$  对应的振幅信息组成的列向量;  $W_i$  ( $i=1,2,\dots,l$ ) 是频率  $f_i$  对应的子波矩阵。

需要注意的是,构建  $D_j^i$  ( $i=1,2,\dots,l; j=1,2,\dots,m$ ) 需要不同频带的地震道集数据,在此借鉴小波分解方法对地震记录进行分频处理,在地震频谱分析基础上选择合适尺度实小波对原始地震信号进行多尺度分离,通过尺度—频率转化最终实现地震信号不同频段的信息分离。较常用的梯形窄带滤波器分频方法,基于小波变换进行分频具有一定的自适应分辨分析特性,可将地震记录分解为一系列具有中心频率的窄带剖面,实现不同频带范围的地震振幅信息分离,较好地克服了常规梯形滤波器分频方法对信号的较强正弦调谐影响。子波矩阵  $W_i$  ( $i=1,2,\dots,l$ ) 是根据卷积的线性特性,利用相应频带子波对原始子波进行卷积而成。

向量  $D$  和  $G$  分别定义为如下形式

$$D = \begin{bmatrix} D_1^1 \\ D_2^1 \\ \vdots \\ D_m^1 \\ D_1^2 \\ \vdots \\ D_m^2 \\ \vdots \\ D_m^l \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} W_1 \Delta F^1 & W_1 A_1^1 \\ W_1 \Delta F^1 & W_1 A_2^1 \\ \vdots & \vdots \\ W_1 \Delta F^1 & W_1 A_m^1 \\ W_2 \Delta F^2 & W_2 A_1^2 \\ \vdots & \vdots \\ W_2 \Delta F^2 & W_2 A_m^2 \\ \vdots & \vdots \\ W_l \Delta F^l & W_l A_m^l \end{bmatrix} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9),可得最终正演方程

$$D = G \begin{bmatrix} D_P \\ D_G \end{bmatrix} \quad (11)$$

### 2.3 贝叶斯反演

基于贝叶斯反演框架,通过求解最大后验概率密度函数构建反演目标函数。具体到频变 AVO 反

演问题,后验概率密度函数可表示为

$$P(\mathbf{R} | \mathbf{d}, \mathbf{I}) = P(\mathbf{d} | \mathbf{R}, \mathbf{I})P(\mathbf{R} | \mathbf{I}) \quad (12)$$

式中:  $P(\mathbf{d} | \mathbf{R}, \mathbf{I})$  为似然函数;  $P(\mathbf{R} | \mathbf{I})$  为先验分布函数;  $\mathbf{d}$  表示随入射角度和频率变化的频变道集数据;  $\mathbf{I}$  表示基本地质信息;  $\mathbf{R}$  为待反演模型参数,是表征纵波速度频散程度和频散梯度的属性参数。

假定频变数据的观测噪声符合高斯分布,且不同测量条件下的结果是独立的,则利用乘积准则得到方差为  $\sigma^2$  的似然函数

$$P(\mathbf{d} | \mathbf{R}, \mathbf{I}) = (2\pi)^{\frac{M}{2}} \sigma^{-M} \times \exp\left[-\sum_{m=1}^M \left(\sum_{n=1}^2 G_{mn} r_n - d_m\right)^2 / 2\sigma^2\right] \quad (13)$$

鉴于先验正则约束可较好地稳定求解反问题,在此假定先验分布服从零均值、 $\sigma_r^2$  方差的高斯正态分布,则先验函数为

$$P(\mathbf{R} | \mathbf{I}) = \frac{1}{2\pi\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{\mathbf{R}^T \mathbf{R}}{2\sigma_r^2}\right) \quad (14)$$

将上述似然函数和先验函数代入后验概率密度函数,取对数后求其梯度,再令梯度为零,得到方程

$$[\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \mathbf{Q}]\mathbf{R} = \mathbf{G}^T \mathbf{d} \quad (15)$$

再采用共轭梯度算法对目标函数  $\mathbf{R}$  进行目标寻优,得到最终反演结果。式中  $\mathbf{Q} = \frac{\sigma^2}{\sigma_r^2}$ , 该项主要是用于约束反演参数的稀疏程度,而参数  $\sigma_r^2$  则需根据以广义最小二乘方式求取的频散属性初值来确定。

### 3 模型数据测试

为验证频散属性反演方法的可行性,在此设计一个理想模型对算法和频散属性的油气检测能力进行测试。设计为三层水平层状模型(图 1):上、下层分别是不含流体的泥岩,中间砂岩层自左向右分别为含水砂岩、含气砂岩和含水砂岩。假设水层与气层的弹性参数的差异不大,两者物理性质的区别主要通过设置不同数值的品质因子  $Q$  予以表征,其中含气砂岩具有最低  $Q$  值,而上覆泥岩和下伏泥岩则近似于完全弹性。选用主频为 40Hz 的雷克地震子波,最大炮检距为 500m,道间距为 50m。采用反射率法进行正演模拟,经动校正处理后得到的叠前道集记录剖面如图 2 所示。从该图中可看到砂岩含气后使得地震能量衰减、频带变窄,且地层吸收造成了

速度频散,低  $Q$  介质的地震波同相轴产生了一定程度的下拉现象。

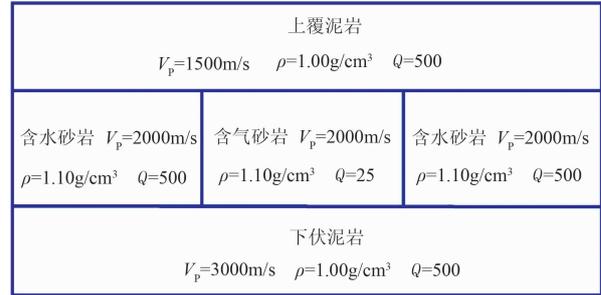


图 1 理论模型

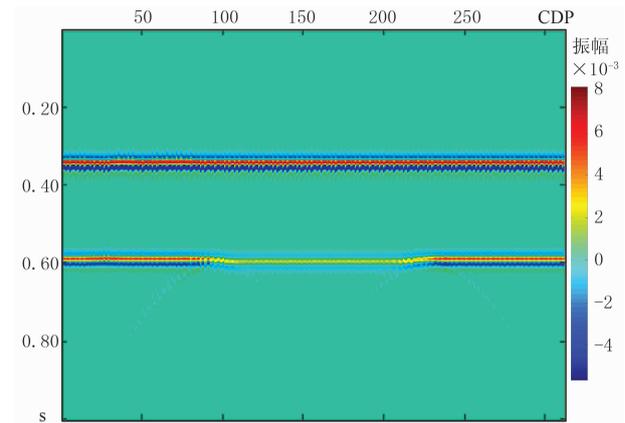


图 2 叠前道集剖面

分别截取含水砂岩范围的 CDP50 和含气砂岩范围的 CDP200 道集数据进行算法测试。首先对两个测试道集进行小波分频处理,得到不同频带范围的频变道集数据,再借鉴吴小羊<sup>[20]</sup>提出的频带选取方法,通过分析零炮检距地震数据的时频分析结果得到含气层位置处的优势频带范围,在此基础上选择频变 AVO 趋势变化明显的对应频带进行频散属性估算。针对该测试数据选用的频率分别为 15, 20, 30 和 40Hz,通过频变 AVO 反演得到纵波速度频散程度属性  $D_P$  和频散梯度属性  $D_G$ 。为方便比较,对频散属性进行归一化处理,具体结果如图 3 所示。从该图可看到:与含水砂岩相比,在两种频散属性的含气储层的顶、底界面处均存在较大异常值。根据 Chapman 等<sup>[19]</sup>的研究,其主要原因是地震波在含烃储层中传播时会发生较为严重的能量衰减与速度频散现象,含烃储层与不含烃储层分界面的纵波速度相对变化量随频率的变化较严重,因此地层界面处纵波速度相对变化量随频率的变化程度  $D_P$  可用于定量表征储层频散程度,且受入射角和传播

路径关系的影响,储层界面处的纵波速度频散程度随炮检距的变化梯度同样表现为异常。从该图中还可看到,含气储层顶、底的  $D_P$  属性分别表现为正异常值和负异常值,这主要是由于地震波频散时,纵波速度随频率的增加而增大,模型中泥岩速度随埋藏深度的增加而增大,因此储层顶、底界面纵波速度相对变化量均为正值,频散时储层纵波速度随频率增加而变大导致顶、底界面的  $D_P$  符号相反,即含气储层顶界面的纵波速度相对变化量随频率的增加而增加,而底界面的纵波速度随频率的变化趋势则相反。频散梯度属性在顶界面表现为负异常,而在底界面表现为正异常值,其主要受地震波传播路径及顶、底界面参数差异综合效应影响。模型测试表明,通过本文方法反演得到的频散属性可在一定程度上表征储层频散程度,结合测井数据和钻井资料便可将其

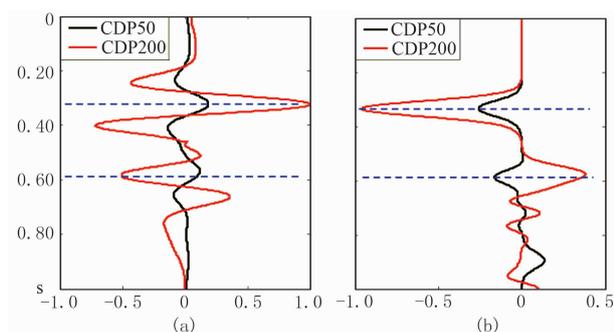


图 3 频散属性反演结果

(a)纵波速度频散程度属性  $D_P$ ; (b)频散梯度属性  $D_G$   
蓝色虚线表示储层顶、底界面位置

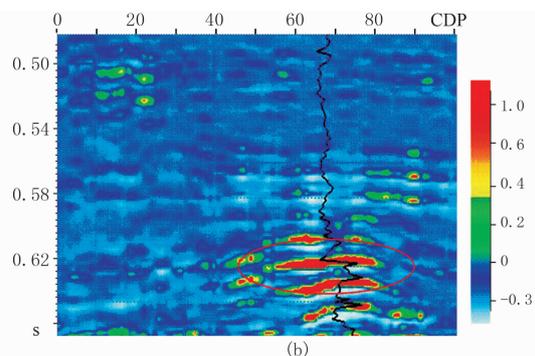
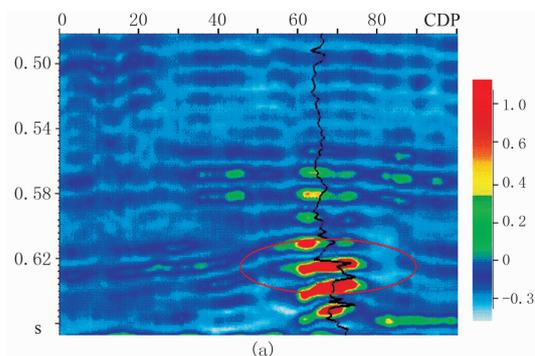


图 5 频散属性反演结果

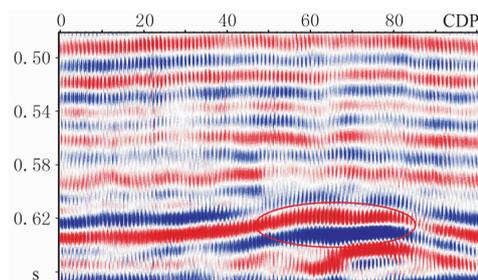
(a)纵波速度频散程度属性  $D_P$ ; (b)频散梯度属性  $D_G$ 。椭圆指示含气层位置,测井曲线为纵波速度曲线

## 4 实例分析

频散属性反演方法对叠前资料品质要求较高,在对叠前地震资料进行高信噪比、高分辨率和高保

用于含气层等强衰减储层的烃类检测。

为了进一步验证频散属性反演方法对实际资料的有效性和实用性,还对更接近于实际情况的二维资料做了算法测试。本次选用 Hampson-Russell 软件自带的加拿大阿尔伯塔地区二维叠前道集数据,选取了 100 个 CMP,每个 CMP 道集含有 8 道,炮检距为 70~560m,选取的原始叠前道集数据如图 4 所示,并在剖面上 0.62~0.64s 之间用红色椭圆标出了含气目的储层位置。该数据含气层为典型的亮点型气层,可较好地测试反演方法的适用性。按照前面建立的频散属性估算流程,在对原始地震道集数据进行分频处理之后,抽取 5 个频率分量 (10,15,20,30 和 40Hz) 进行最终反演并得到图 5 所示结果。从该图可见,正异常的  $D_P$  属性与负异常的  $D_G$  属性可指示含气层的存在。算法测试结果证明:该方法具有一定的可行性,且频散属性在储层烃类检测方面具有较好的应用效果。

图 4 Hampson-Russell 软件的测试道集  
椭圆指示含气层位置

真度处理的基础上,将上述频散属性反演方法应用于某实际工区数据,并综合测井和地质资料,将反演得到的频散属性与常规流体因子和利用 QVO 方法计算的品质因子  $Q$  进行对比,从不同侧面实施储层烃类检测。

研究区储层为三角洲前缘相沉积,图 6 为该 M 测线的叠后地震剖面。图中所投测井柱状图为测井解释结果,其中红色表示含气层,绿色表示含油层,蓝色表示含水层,白色为泥岩。图中 2.61s 附近有一套含气砂岩,与 2.64s 附近的一套气层和油层构成储层组。图 7 为基于叠前反演结果计算的 Russell 流体因子,从其中的测井解释柱状图可看到,2.61s 和 2.64s 附近的含油气砂岩储层显示较明显的低值异常,且深度大于 2.60s 的砂体的数据区间普遍偏低,特别是 2.64s 储层的下倾地层也表现较明显的低值异常,因此单一依靠 Russell 流体因子对其无法进行有效的含烃检测。利用 QVO 技术计算的 M 测线的品质因子  $Q$  如图 8 所示,可看到在

2.61s 和 2.64s 附近的含油气储层位置呈现较明显的低值异常,且 2.64s 砂组的下倾位置并没有出现强衰减异常,但因时间分辨率较低,难以有效刻画储层细节。

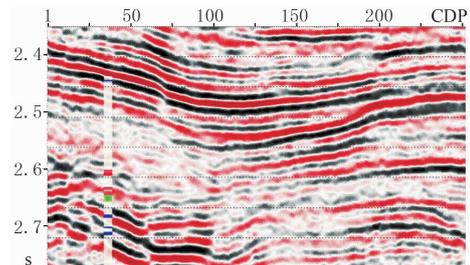


图 6 M 测线叠后地震剖面

测井解释柱状图中红色表示气层、绿色表示油层、蓝色表示水层、白色表示泥岩;图 7、图 8、图 9 同

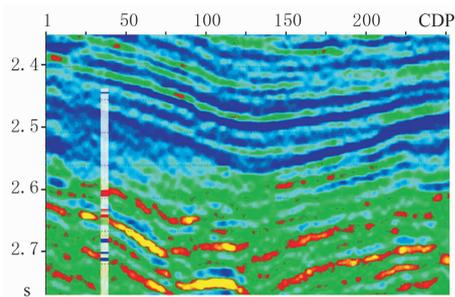


图 7 M 测线 Russell 流体因子剖面

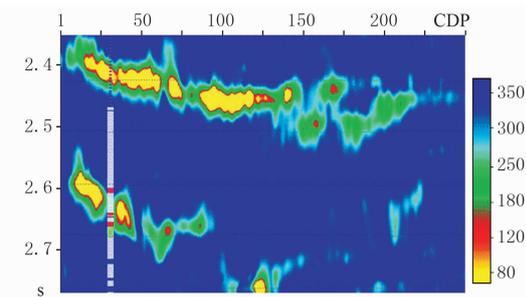


图 8 M 测线品质因子  $Q$  剖面

图 9 是利用频变 AVO 反演得到的频散属性剖面,其中纵波速度频散程度和频散梯度两个属性体均做过归一化处理。与测井解释结果进行对比可看到,2.61s 和 2.64s 附近两套含油气砂岩具有较明显的频散异常显示,且与测井解释结果较好匹配;而在 2.64s 储层下伏地层位置未出现明显的频散异常区域,这与地质认识相一致,进一步降低了含油气预测结果的多解性。对比发现,与图 8 所示的常规衰减特征属性不同,依据图 9 所示频散属性可较清晰地划分储层的纵向分布,即上、下边界清楚,

其主要原因是在反演过程中消除了地震子波带通滤波效应的影响,使得到的频散属性属于地震尺度下的界面性参数,它具有比常规衰减特征属性更高的时间分辨率。与此同时,综合测井与钻井资料可知,图 9a 中 2.50s 以上显示的较强频散异常区域主要是因薄层调谐造成的,因此在采用本文方法进行实际储层烃类检测时,宜兼顾地质资料和测井数据,采用多种方法进行相互补充或验证,以甄别非含烃因素造成的假含烃亮点,最终取得可靠的预测结果。

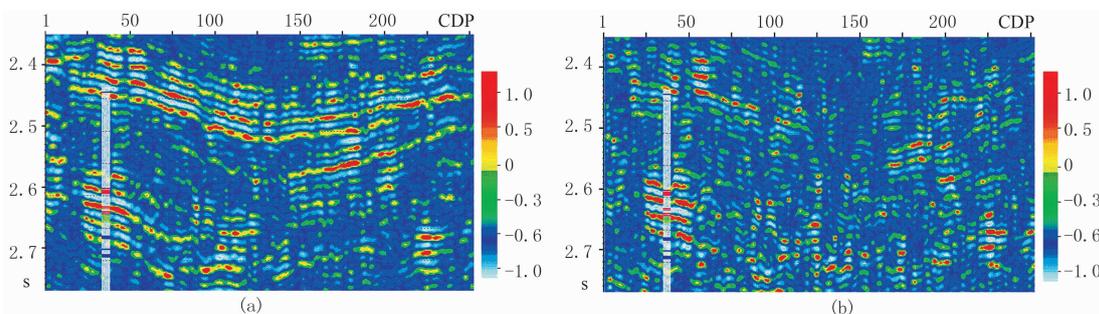


图 9 M 测线频散属性剖面

(a) 纵波速度频散程度属性  $D_p$ ; (b) 频散梯度属性  $D_g$

## 5 结束语

频散属性可作为一种烃类检测因子参与储层烃类检测,利用频变 AVO 反演方法可较可靠地取得纵波速度频散程度和频散梯度两种参数。算法测试与实际应用结果均验证了本文所述反演方法的可行性及在烃类检测方面的实用性。结合地质、测井等资料,并与其他方法交互验证,可进一步降低烃类检测的多解性,与常规烃类检测因子相比,本文反演得到的频散属性属于界面参数,具有更高的时间分辨率。

需要强调的是,速度频散的产生机理复杂多样,为了更有效地甄别非含烃因素产生的含油气假象,在实际应用中宜结合地质、测井及其他地球物理手段进行综合分析,以提高烃类检测结果的可靠性。

### 参考文献

- [1] 印兴耀,韩文功,李振春等. 地震技术新进展. 山东东营:中国石油大学出版社,2006
- [2] 李庆忠. 走向精确勘探的道路. 北京:石油工业出版社,1993
- [3] 殷八斤,曾灏,杨在延. AVO 技术的理论与实践. 北京:石油工业出版社,1995
- [4] Hilterman F J 著;孙夕平等译. 地震振幅解释. 北京:石油工业出版社,2006
- [5] Goodway B, Chen T, Downton J. Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters, " $\lambda\rho$ ", " $\mu\rho$ " & " $\lambda/\mu$  fluid stack", from P and S inversions. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1997, 16
- [6] Russell B H, Hedlin K, Hilterman F J et al. Fluid-property discrimination with AVO: A Biot-Gassmann perspective. *Geophysics*, 2003, 68(1): 29~39
- [7] Quakenbush M, Shang B, Tuttle C. Poisson impedance. *The Leading Edge*, 2006, 25(2): 128~138
- [8] 张世鑫,印兴耀,梁锴等. 利用基于 T-K 算子的非线性能量衰减分析技术进行储层含油气检测. 地球物理学进展, 2011, 26(6): 2107~2113  
Zhang Shixin, Yin Xingyao, Liang Kai et al. Utilizing T-K operator-based nonlinear energy attenuation analysis to conduct reservoir hydrocarbon identification. *Progress in Geophys*, 2011, 26(6): 2107~2113
- [9] 陈小宏,田立新,黄饶. 地震分频 AVO 方法研究现状与展望. 海相油气地质, 2009, 14(4): 60~66  
Chen Xiaohong, Tian Lixin, Huang Rao. Research progressing on frequency dependent AVO analysis. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2009, 14(4): 60~66
- [10] 黄饶,陈小宏,李景叶. 基于谱分解的气藏识别技术与应用. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1): 35~39  
Huang Rao, Chen Xiaohong, Li Jingye. Spectral decomposition based gas reservoir identification technique and its application. *OGP*, 2010, 45(1): 35~39
- [11] Cooper H F. Reflection and transmission of oblique plane waves at a plane interface between viscoelastic media. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1967, 42(5): 1064~1069
- [12] Krebes E S. On the reflection and transmission of viscoelastic waves—Some numerical results. *Geophysics*, 1984, 49(8): 1374~1380
- [13] Nechtschein S and Hron F. Effects of anelasticity on reflection and transmission coefficients. *Geophysical Prospecting*, 1997, 45(5): 775~793
- [14] Ursin B and Stovas A. Reflection and transmission responses of a layered isotropic viscoelastic medium. *Geophysics*, 2002, 67(1), 307~323
- [15] Sidler R and Carcione J M. Wave reflection at an anelastic transversely isotropic ocean bottom. *Geophysics*, 2007, 72(5): SM139~SM146
- [16] Wilson A, Chapman M and Li Xiangyang. Frequency-dependent AVO inversion. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2009, 28: 341~345
- [17] Wu X, Chapman M, Wilson A et al. Estimation seismic dispersion from pre-stack data using frequency-dependent AVO inversion. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2010, 29: 425~429
- [18] Shuey R. A simplification of the Zoeppritz equations. *Geophysics*, 1985, 50(4): 609~614
- [19] Chapman M E, Liu E and Li X. The influence of fluid-sensitive dispersion and attenuation on AVO analysis. *Geophysical Journal International*, 2006, 167(1): 89~105
- [20] 吴小羊. 基于频谱分析技术的频散 AVO 反演研究 [博士学位论文]. 湖北武汉:中国地质大学(武汉), 2010  
Wu Xiaoyang. *Frequency Dependent AVO Inversion Using Spectral Decomposition Techniques* [D]. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei, 2010

(本文编辑:朱汉东)