

频变 AVO 反演在顺南地区碳酸盐岩裂缝型储层流体识别中的应用

秦喜林^{1,2}, 李向阳^{1,2}, 陈双全^{1,2*}, 孙绍寒³, 李宗杰⁴, 刘军⁴

1 中国石油大学(北京)油气资源与工程国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)CNPC物探重点实验室, 北京 102249

3 东方地球物理勘探有限公司物探技术研究中心, 涿州 072750

4 中石化西北油田分公司勘探开发研究院, 乌鲁木齐 830000

* 通信作者, chensq@cup.edu.cn

收稿日期: 2017-05-02

国家自然科学基金项目(41574108)和中国石油天然气集团公司科技项目(2016A-3303)联合资助

摘要 顺南地区碳酸盐岩储层作为塔里木盆地天然气勘探开发的重点区块, 对其进行流体检测是提高效益的有效手段。因此本文结合多尺度裂缝岩石物理模型和频变 AVO 反演方法建立了一套流体检测的技术流程。首先, 基于研究区钻井、测井和地质资料, 建立 Chapman 等效模型来模拟顺南地区裂缝型储层, 并使用反射率法正演模拟储层在饱和油气水不同类型流体时的地震响应特征; 其次, 开展不同流体类型储层的地震属性敏感性分析, 确定地震频散属性对流体较为敏感; 最后, 针对顺南地区三维地震资料的实际情况, 建立了一套基于岩石物理模型和频变 AVO 反演进行流体检测的技术流程, 并进行实际应用。经流体检测结果与实钻井验证, 表明本文提出的方法技术具有很好的实用性, 为进行此类型油气藏的流体检测提供了方法技术。

关键词 频变 AVO 反演; 流体检测; 裂缝型孔隙介质; 碳酸盐岩; 频散属性

0 引言

油气勘探开发实践表明, 裂缝型油气藏是我国含油气盆地中非常重要的一类油气藏, 其已探明地质储量约占目前探明油气资源总量的三分之一以上^[1]。特别是我国西部的碳酸盐岩裂缝型油气藏, 其储层的储集空间通常包含孔隙和裂缝两种类型。其中储集空间较大的为孔隙, 为主要的流体充填空间; 而裂缝储集空间较小, 但是它主要影响储层的渗透性^[2]。顺南地区位于塔里木盆地腹部, 其奥陶系碳酸盐岩具有储层发育的地质条件及成藏基础, 但是其储层埋藏深度大、

纵横向非均质性强和裂缝发育等特点^[3-4]。随着油田的不断开发, 由于顺南地区下奥陶统碳酸盐岩储层的油水关系非常复杂, 油气分布规律不清楚, 钻遇水井的概率增大^[5]。因此, 对于碳酸盐岩裂缝型油气藏的储层精细描述与流体识别均十分重要。基于等效介质岩石物理模型正演分析是连接实际地震数据响应特征与裂缝型储层及其含油气特征的桥梁, 也是对碳酸盐岩裂缝型储层进行精细描述的理论基础。

近几十年, 等效介质理论得到快速的发展, 其中有一些较为通用。如 Gassmann 早在 1951 年就通过分析孔隙压力与岩石刚性的关系, 建立了饱和和流体岩石的等效

引用格式: 秦喜林, 李向阳, 陈双全, 孙绍寒, 李宗杰, 刘军. 频变 AVO 反演在顺南地区碳酸盐岩裂缝型储层流体识别中的应用. 石油科学通报, 2017, 03: 344-354

QIN Xilin, LI Xiangyang, CHEN Shuangquan, SUN Shaohan, LI Zongjie, LIU Jun. Application of frequency-dependent AVO inversion to identify fluid in fractured carbonate reservoirs in the Shunnan area. Petroleum Science Bulletin, 2017, 03: 344-354. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.03.032

弹性模量与岩石骨架的表达式^[6]；Biot在考虑岩石孔隙流体与矿物骨架之间的黏滞性，推导了流体饱和和岩石与频率相关的理论公式^[7]；White在各向同性介质背景下通过考虑岩石饱和地层水但包含球形气体的孔隙岩石来分析斑块状饱和情况下的纵波速度和衰减^[8]；Mavko和Nur提出一种从微观尺度描述流体与骨架相互作用的理论，即喷射流理论^[9]；Murphy验证了喷射流机制是引起地震波能量衰减和速度频散的主要因素^[10]。然而，针对裂缝描述的等效介质理论模型还在发展中，如Thomsen的等径孔隙模型率先定量表征了流体流动效应对各向异性的影响^[2]；Hudson的孤立裂缝模型分析了裂缝与孔隙背景介质间的压力松弛作用^[11-12]；Schoenberg的线性滑动模型给出了裂缝的等效柔度张量^[13]。这些等效介质模型都是假设频率与尺度相互独立，不能量化裂缝的尺寸、裂缝密度和流体类型，并无法模拟裂缝储层中流体流动引起的地震波频散特征。为了克服这一局限性，Chapman等考虑地震波引起的中观裂缝、微裂隙与背景等径孔隙间两种尺度(中观尺度和颗粒尺度)的耦合流体流动，利用Biot理论将裂缝和喷射了机制相结合得到了全频带范围的频散模型^[14]，并在此基础上分析了与频率相关的速度频散和衰减^[15]。Batzie等通过实验发现了地震波能量在地震频段内产生剧烈的衰减，并证实了这种衰减是由孔隙流体的相对流动所引起的^[16]，也进一步验证了Chapman模型的有效性。

随着Chapman频散模型的提出，裂缝型储层的频散特征引起了广泛的关注，并有人尝试用频散特征来识别流体。Wilson等联合频谱分解方法和AVO近似公式，提出频变AVO反演方法，旨在从叠前数据中直接提取频散属性^[17]。吴小羊等基于平滑伪Wigner-Ville分布(SPWVD)算法引入了频散AVO反演方法，并在北海地区进行了实际应用研究^[18-19]。Chen等通过对物理模型数据进行频变特征分析说明调谐效应和流体流动是反射波产生频散的主要原因，进一步验证了可以利用频散属性来定量解释含气饱和度^[20-22]。郝前勇等基于Shuey近似公式，推导了纵波频散程度和频散程度随炮检距变化梯度属性的反射系数的近似公式，在贝叶斯理论下实现频变AVO反演^[23]。王晓钧等基于White模型，分析了地震波频散与流体饱和度的对应关系，并推导了频变反射系数的近似表达式^[24]。兰慧田基于Chapman模型对裂缝型孔隙介质波场特征进行分析并结合频变AVO反演方法来获取储层参数^[25]。赵万金和杨午阳从频变AVO技术发展的基本状况入手，将频变AVO技术发展过程分为分频识别、分频AVO分析、频散AVO分析和基于岩石物理频率扫描

的频变AVO分析四个阶段^[26]。张震等构建了新的流体因子，并结合连续小波变换来进行流体检测，并用于实际数据^[27]。Qin等运用频变AVO反演方法在致密砂岩储层进行储层预测取得较好效果^[28]。李坤等将Morlet小波的快速动态匹配追踪算法引入到频变AVO反演来提取频散属性，然后利用频散属性进行流体类型检测^[29]。印兴耀等指出了岩石物理是地震流体识别的基础，并着重评述国内外岩石物理驱动下地震流体识别研究的主要进展^[30]。李博南等提出基于动态等效介质模型的频变AVO反演方法来反演裂缝参数，并通过模型测试验证反演方法的有效性^[31]。上述方法大多是基于理论模型分析，然后实际应用大多是研究砂泥岩储层，针对碳酸盐岩裂缝型储层的频变AVO反演研究相对较少。随着频散等效介质理论不断发展，频变AVO反演越来越成为流体检测所关注的焦点，该方法通过扩展AVO技术并引入高分辨率的时频分析方法来提取地震数据与流体相关的信息，在储层预测中具有独特的优势。

本文利用频变AVO反演方法从叠前地震数据提取频散属性，结合等效介质模型来实现流体检测。首先，本文回顾了Chapman多尺度裂缝模型和频变AVO反演方法的推导；其次，利用测井和地质资料，正演模拟饱和不同流体的储层的地震响应特征，并优选流体敏感属性；最后，将本文方法应用于顺南地区碳酸盐岩裂缝型储层的流体识别，并与实际钻井结果相对比。

1 方法与原理

1.1 裂缝型孔隙介质模型

实际裂缝型储层岩石中通常广泛发育中观尺度(即远大于孔隙尺寸，并远小于弹性波波长)裂缝。地震波在地下介质中传播时遇到不同尺度地质体以及不同频带范围内会发生能量衰减和速度频散。然而，这种速度频散与能量衰减是与岩石孔隙流体的流动(Wave-induced fluid flow, WIFF)密切相关。裂缝型孔隙介质模型是一个基于中观尺度流体流动机制的典型模型。针对这种裂缝型孔隙介质Chapman等人在喷射流理论的基础上，提出了一个速度随频率变化的裂缝型孔隙介质模型，用于描述岩石中裂缝与孔隙之间和不同裂缝之间流体的相对流动所引起地震波速度的频散和能量的衰减^[15]。

本文采用Chapman多尺度裂缝岩石物理模型开展正演模拟研究，该模型的等效刚度张量如下式所示：

$$C_{ijkl}(\omega) = C_{ijkl}^0 - \phi C_{ijkl}^p(\omega) - \varepsilon_1 C_{ijkl}^f(\omega) - \varepsilon_2 C_{ijkl}^l(\omega) \quad (1)$$

其中, C^0 是岩石基质的各向同性弹性刚度矩阵, 可用拉梅系数 λ 和 μ 表示, C^p , C^f , C^l 分别表示来自孔隙、微裂隙和裂缝的附加贡献, 分别乘以孔隙度 ϕ , 微裂隙密度 ε_1 以及裂缝密度 ε_2 , ω 代表频率。然而本文中只考虑了球形孔隙和一组定向排列的垂直缝。因为球形孔的孔隙度远大于微裂隙的孔隙度, 此时微裂隙对岩石等效模量影响近似为零^[11]。模型中控制着频散的一个关键参数是颗粒尺度的时间延迟 τ , 其与流体黏滞性、渗透率以及裂缝的半径等参数相关, 当微裂隙的纵横比非常小时, τ 可近似为:

$$\tau \approx \frac{4\eta a^3(1-\nu)}{9\kappa\zeta\mu} \quad (2)$$

其中, ζ 为颗粒尺度, ν 为固体矿物泊松比, κ , η 分别为流体的渗透率和黏滞度, a 为裂缝长轴半径。

可以用此模型来计算任意频率时与喷射流机制相关的地震波速度频散与能量衰减, 在低频极限处该模型给出的地震波速度与 Gassmann 方程预测的结果一致。Chapman 理论模型中流体的流动同时出现在两个尺度, 分别为微观颗粒尺度和中观裂缝尺度, 因此同时存在两个延迟时间与特征频率。裂缝与微裂隙之间的流体交换与低特征频率(大时间尺度)有关, 取决于裂缝的密度。两个延迟时间之间存在以下关系:

$$\tau_f = \frac{a_f}{\zeta} \tau \quad (3)$$

其中, τ_f 为裂缝尺度对应的延迟时间, a_f 为裂缝长轴半径。

1.2 频变 AVO 反演

地震波在含烃储层中传播的速度与频率相关, 而速度的频散特征可以用来检测流体的类型。本文采用 Wilson 等推导的频变 AVO 反演公式进行反演^[17]。

$$R(\theta, f) \approx A(\theta) \frac{\Delta V_p}{V_p}(f) + B(\theta) \frac{\Delta V_s}{V_s}(f) \quad (4)$$

其中, R 为频变的地震波反射系数, θ 为地震波入射角, ΔV_p 、 ΔV_s 分别为反射界面下的地层速度与上覆地层的速度之差, V_p 、 V_s 分别为反射界面上下地层的纵波速度和横波速度的平均值, A 和 B 为与角度有关的项, f 为频率。

令(4)式在参考频率 f_0 处对纵横波速度变化率进行泰勒级数的展开, 舍去高阶项, 仅保留一阶导数项

即可得到:

$$R(\theta, f) \approx A(\theta) \frac{\Delta V_p}{V_p}(f_0) + (f - f_0) A(\theta) I_a + B(\theta) \frac{\Delta V_s}{V_s}(f_0) + (f - f_0) B(\theta) I_b \quad (5)$$

其中, I_a 和 I_b 为纵、横波速度变化率 $\left(\frac{\Delta v}{v}\right)$ 对频率 f 的导数, 其表征了速度变化率随频率变化的快慢程度, 是频散程度的一种度量:

$$I_a = \frac{d}{df} \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} \right), \quad I_b = \frac{d}{df} \left(\frac{\Delta V_s}{V_s} \right) \quad (6)$$

对参考频率 f_0 的道集进行最小二乘反演, 可以得到参考频率处纵横波速度变化率的值。为了求解 I_a 和 I_b 的值, 将(5)式调整为:

$$R(\theta, f) - A(\theta) \frac{\Delta V_p}{V_p}(f_0) - B(\theta) \frac{\Delta V_s}{V_s}(f_0) \approx [(f - f_0) A(\theta) \quad (f - f_0) B(\theta)] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} \quad (7)$$

通过求解方程组就能得到了表征频散属性的参数值, 同时结合裂缝型孔隙介质模型建立频变 AVO 反演流体检测的技术流程, 如图 1 所示。

1.3 技术流程

本文的基本思路是从等效岩石物理模型出发, 分析不同流体饱和情况下的地震响应特征, 来指导实际数据的储层预测和流体识别。

本文具体的技术流程如图 1 所示, 具体实现分为以下几个步骤:

(1) 利用 V-R-H 平均理论计算多种基质矿物的等效颗粒模量, 矿物组分参数通过多个岩样进行矿物组分分析获取。

(2) 利用 Chapman 理论将孔隙、竖直排列的裂缝和流体加入固体岩石中, 形成等效的裂缝孔隙岩石, 并得到具有 VTI 各向异性的弹性刚度矩阵, 其中孔隙度参数和裂缝参数参考测井解释结果。

(3) 根据实际的地质资料, 建立等效的数值模型, 并将裂缝层的弹性刚度矩阵输入 ANISEIS 进行全波场正演, 并对 Z 分量数据进行频变 AVO 反演, 得到模型的频散属性。

(4) 利用测井数据构建纵横波速度模型, 利用频变 AVO 反演方法对实际数据进行频变 AVO 反演, 得到频散属性。

(5) 利用模型数据的反演结果, 来分析饱和不同流

体裂缝层的频散属性值的相对大小，从而来定性一半定量的流体解释。

2 实际数据应用研究

顺南三维区位于塔里木盆地塔中北斜坡，是一个形成较早的古隆起，经历了加里东、海西、印支—燕山、喜山等多期构造运动。在晚加里东期—早海西构造运动时期，受南北挤压构造作用，古城墟隆起定型，沉积地貌特征呈东高西低之势。海西期以后，古城墟隆起西段以继承性演化为特点，构造运动对古城墟低隆影响不大，断裂作用基本停止，构造活动以地层整体抬升为主，主要表现为断裂及上覆构造不发育。研究区下奥陶统实钻发育多套储层(图 2)，纵向可分为三套：蓬莱坝组、鹰山组下段、一间房组—鹰山组上段顶，其中以鹰山组下段最为发育。储层类型以裂缝型、裂缝孔洞型为主，分别获得油气突破和显示，证实了该区奥陶系良好的油气勘探前景。本次研究的目的层位为一间房组、鹰山组上段和鹰山组下段，一间房组和鹰山组上段储层类型主要是裂缝型为主，岩性以深灰、灰黑色泥晶灰岩为主，裂缝、缝合线普遍发育，微孔和洞发育程度一般；鹰山组下段储层类型以裂缝—孔洞型为主，岩性以灰、浅灰色晶微灰岩为主，

溶洞发育而裂缝少量发育。

2.1 岩石物理模型

结合研究区的地质特征，设计了一个三层模型，第一层为各向同性层，对应恰尔巴克组的地层，纵波速度 6 000 m/s，横波速度 3 510 m/s，密度 2.65 g/cm³；第二层裂缝型储层，代表研究区的目的层，其厚度为 600 m，孔隙度为 0.1，其背景介质的纵波速度 6 200 m/s，横波速度 3 606 m/s，密度 2.7 g/cm³；第三层为各向同性层，对应蓬莱坝组的地层，纵波速度 6 400 m/s，横波速度 3 702 m/s，密度 2.78 g/cm³。建立三个模型，模型 1、2、3 分别为裂缝层饱和天然气、油、地下水的模型。裂缝层的岩石物理参数见表 1，其中固体矿物的模量和密度通过各矿物组分进行 V-R-H 平均求取，裂缝参数通过岩心资料和成像测井观测数据统计得到裂缝延伸长度、裂缝密度和扁平比。裂缝密度表示裂缝长度所对应立方体占总体积的百分比，裂缝扁平比为裂缝椭球体的长轴与短轴之比。

目前同时考虑流体和裂缝的模型中较为经典的是 Chapman 模型，它是基于 Biot 理论模型并将裂缝引入到喷射模型中得到的一种多尺度的频散模型，能很好的分析不同尺度流体流动的频散特征。Chapman 模型中的时间延迟参数与流体的黏滞度密切相关。表 2 为

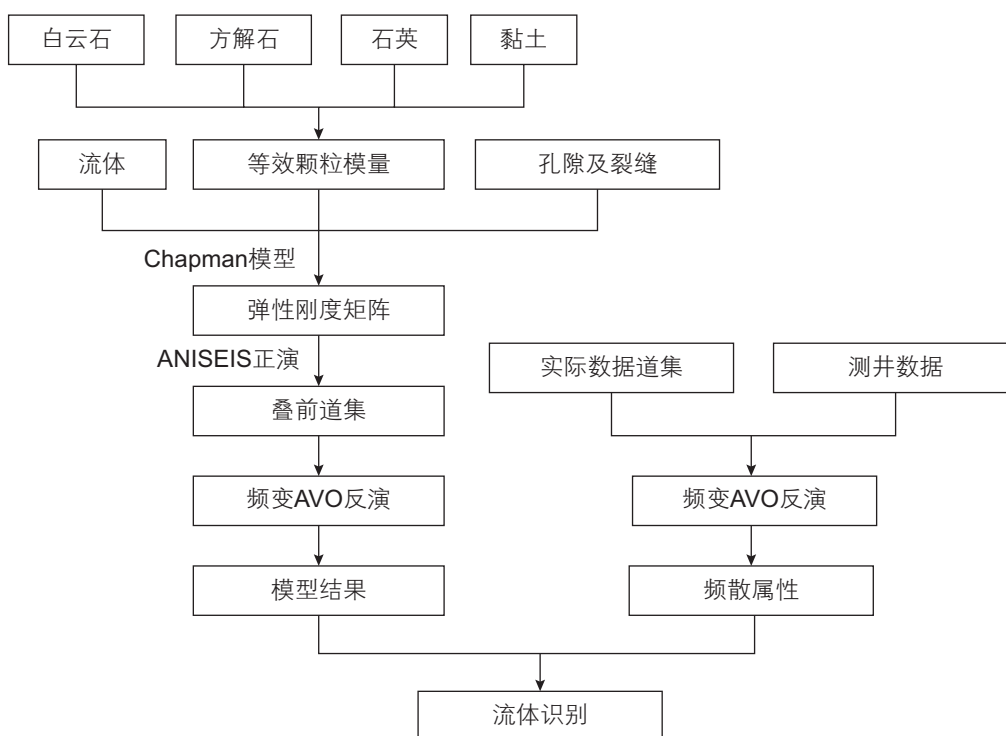


图 1 频变 AVO 反演检测流体的技术流程图

Fig. 1 The workflow of detecting fluid by frequency-dependent AVO inversion

塔中北坡奥陶系碳酸盐岩地层综合柱状图表

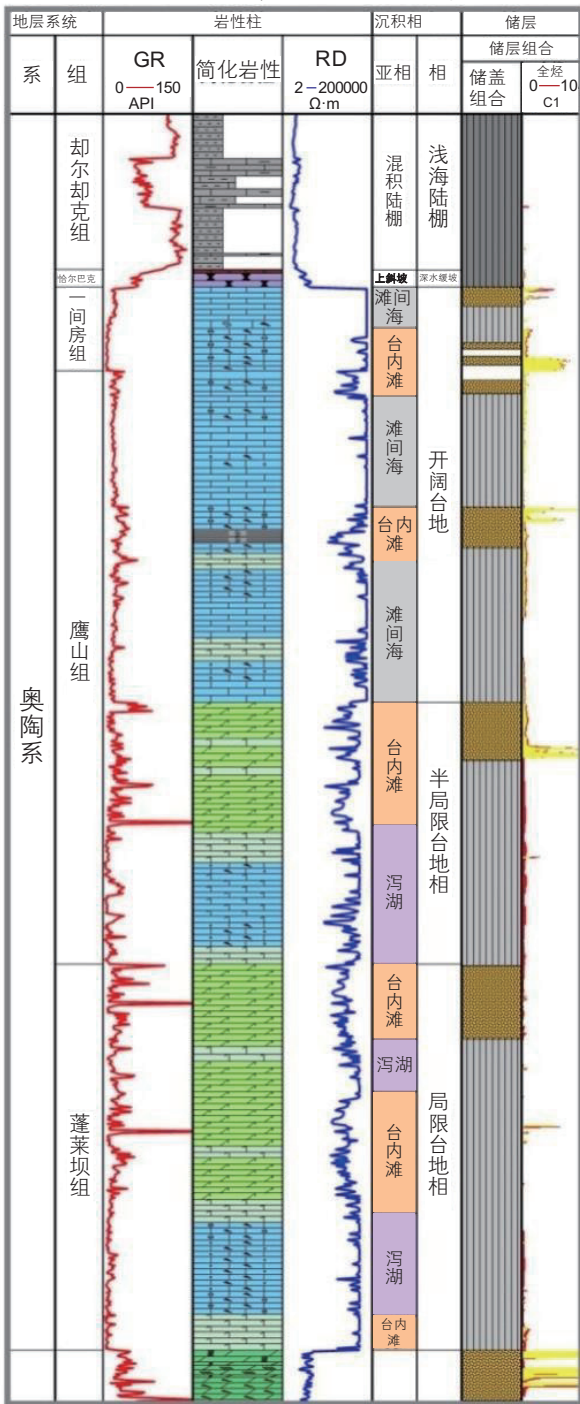


图2 塔中北坡奥陶系碳酸盐岩地层综合柱状图
Fig. 2 The histogram of Ordovician carbonate strata in the northern slope of Tazhong area

表2 流体参数
Table 2 Parameters of fluid

流体	体积模量/MPa	密度/(g/cm ³)	黏滞度/(Pa·s)
地下水	2.25	1.04	0.003
油	1.2	0.7	0.001
天然气	0.04	0.11	0.000 15

研究区地下水、油和天然气的基本参数，数据均由实验室测得。一般情况下油的黏滞度会高于地下水的黏滞度，然而研究区原油为轻质油，因此会出现油的黏滞度低于地下水的黏滞度。

将上述参数通过Chapman模型计算可以得到纵波速度和纵波衰减系数随频率的变化曲线。

图3为Chapman模型模拟裂缝层得到的纵波速度和纵波衰减系数随频率的变化曲线，该模型描述的地震波频散机制包含三部分：不发生频散的低频段、不发生频散的高频段和发生明显频散和衰减的过度频段。在过度频段范围内，不同类型流体中传播的地震波频散出现的频带范围不一样，黏滞度大的流体需要更大的时间尺度因子来达到新的压力平衡状态，导致其在更低频带范围就能观察到频散现象。从纵波的衰减系数图上可以直观的看到地震波在饱和不同流体的裂缝层中衰减系数的峰值大小不一样，对应的峰值频率也不同。其中饱和水模型的衰减系数峰值频率接近1 Hz，饱和油的模型约在5 Hz，饱和气的模型在20 Hz附近。因此，可以利用这种频率差异来识别流体。

为了进一步分析地震反射界面处的响应特征，计算了模型裂缝层顶界面的纵波频散(如图4)，即公式6中的 I_a ，其含义为速度变化率对频率的导数，横轴为频率，纵轴为频散强度。当裂缝层饱和水时，地震波发生频散的过度频带最窄，只有1~5 Hz，此时的频散强度极大值在1 Hz左右；当裂缝层饱和油时，过度频带次之，在2~12 Hz，频散强度最大在5 Hz；当裂缝饱和气时，过度频带最宽，在10~100 Hz，频散最强大约在20 Hz左右。从频散属性可知在地震频带10~100 Hz范围内含气储层的频散最强，而含水储层

表1 裂缝层的岩石物理参数
Table 1 Rock physics parameters of fracture layer

体积模量/MPa	63.7
剪切模量/MPa	30.7
密度/(g/cm ³)	2.7
裂缝密度	0.05
裂缝长度/m	0.2
扁平比	0.000 1

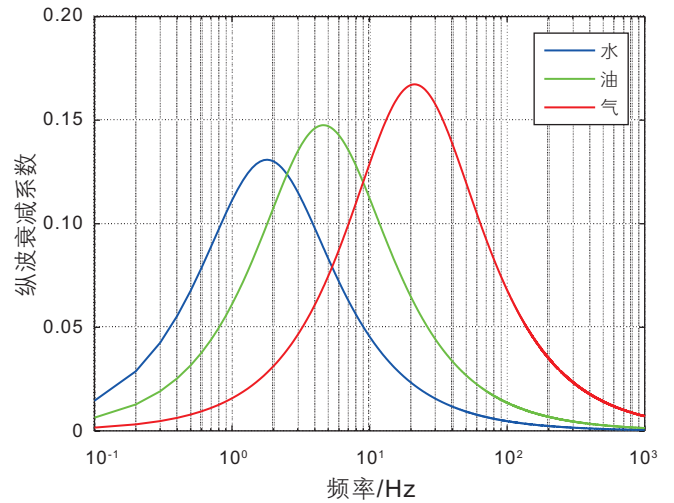
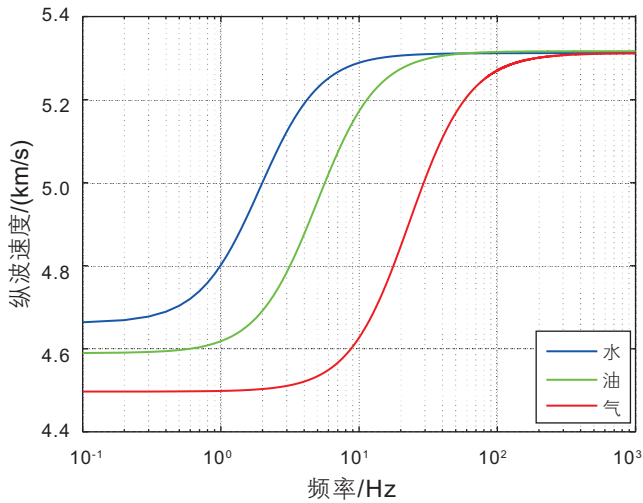


图3 裂缝层充填不同流体的纵波速度和衰减系数

Fig. 3 The P wave velocity and attenuation coefficient of fracture layer filled with different fluids

的频散很弱，接近零值。在低于 10 Hz 范围内，饱和油、气、水的储层频散强度曲线相互交错，这一范围内不能很好的利用频散强度检测流体；在 10~30 Hz 频带范围内含气储层明显高于油水储层，含油储层的频散强度略高于含水储层，因此可以利用这一特征来检测地震频带内的流体；在高于 30 Hz 范围内，含油储层和含水储层的纵波频散强度接近，无法利用这一属性来识别油层和水层。因此，研究区对流体敏感的频带为 10~30 Hz。

2.2 正演模拟及属性优选

为了分析不同流体的地震响应特征，利用 ANISEIS 软件分别对模型 1、2、3 进行正演得到叠前道集。图 5 为模型 1、模型 2 和模型 3 通过正演得到的单炮的 Z 分量道集，在 1 s 处的波谷为裂缝层顶界面的反射，1.24 s 处的波峰为裂缝层底界面的反射。

从叠前道集数据很难直接观测模型 1、模型 2 和模型 3 的差异，但可以看出裂缝层顶界面表现为第 4 类 AVO，零偏移距反射系数为负，反射系数随偏移距的增大而减小。图 6 为 1 s 处不同流体饱和模型的反射振幅随偏移距的变化特征，均表现为第 4 类 AVO 特征，且饱和天然气的模型 1 振幅绝对值大于饱和油的模型 2 和饱和地下水的模型 3。由于实际数据提取真振幅很难，并且研究区资料信噪比较低，所以用振幅属性来检测流体可信度较低。

为了优选流体敏感属性，对正演的道集分别进行叠前 AVO 反演和频变 AVO 反演。利用 Smith&Gidlow 的两项近似公式对叠前道集进行叠前 AVO 反演，可得

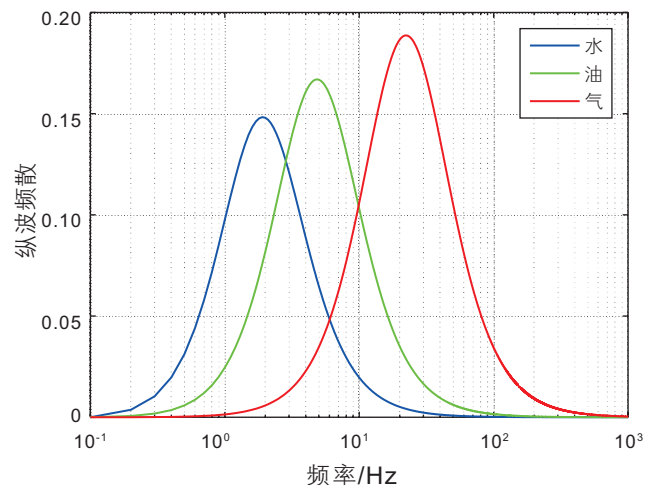


图4 模型裂缝层顶界面处的纵波频散

Fig. 4 The P wave dispersion on the top of the fracture layer

到纵波速度变化率，即 $\frac{\Delta V_p}{V_p}$ 。图 7 为不同模型相对的纵波速度变化率，这是通过两项 AVO 近似公式直接利用振幅反演得到，没有消除子波影响，展示结果是相对值。从图 7 可以看出不同流体饱和情况下的纵波速度变化率差异不大，因此利用速度的变化率来检测流体不能取得准确的结果。

图 8 为不同模型的频散曲线特征。裂缝层的顶界面在三种不同流体饱和的情况下都会产生频散，其中饱和气情况下频散最强，饱和水的频散最弱。对比纵波速度变化率曲线和频散曲线，证明研究区的频散属性较 AVO 属性能更好的检测流体。

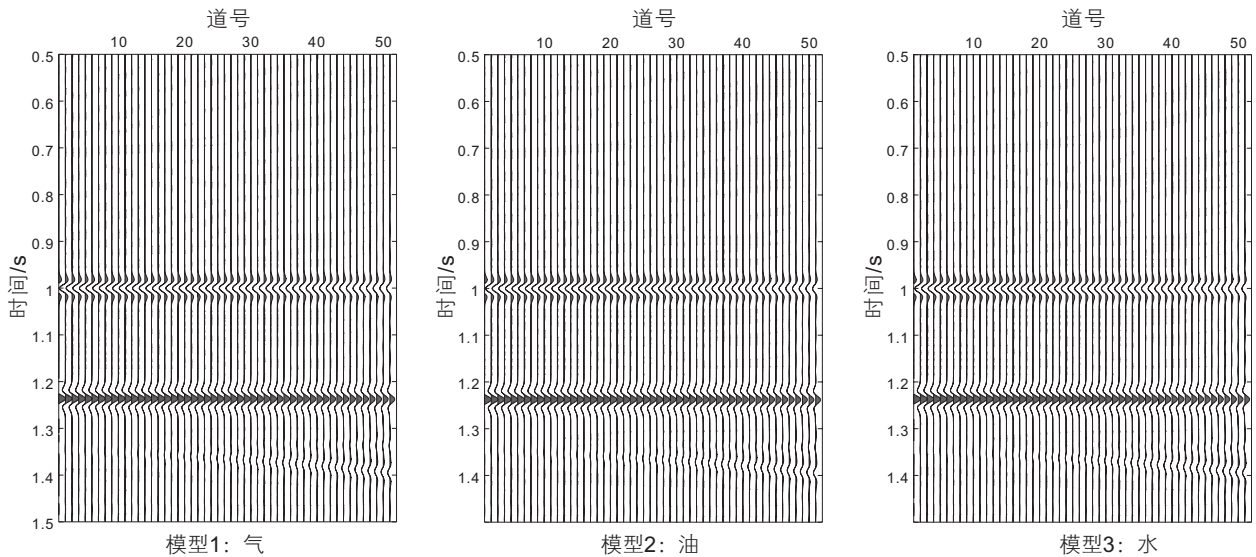


图5 饱和不同流体模型的合成记录

Fig. 5 The synthetic record of models saturated with different fluid

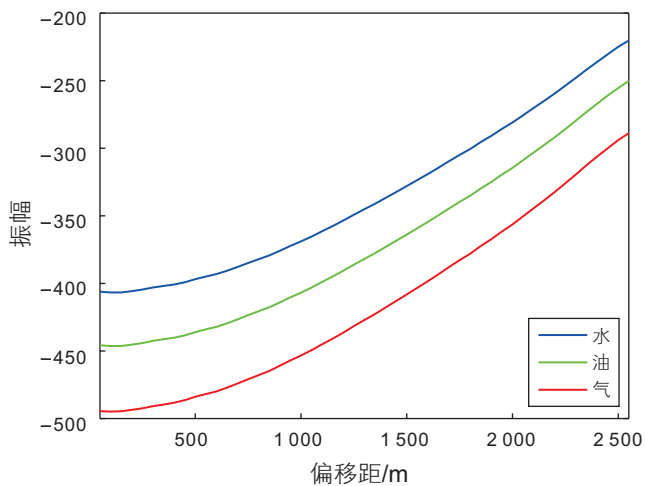


图6 不同模型裂缝层顶界面反射振幅随偏移距的变化曲线

Fig. 6 The amplitude varies with the offset at the top of fracture layer of different models

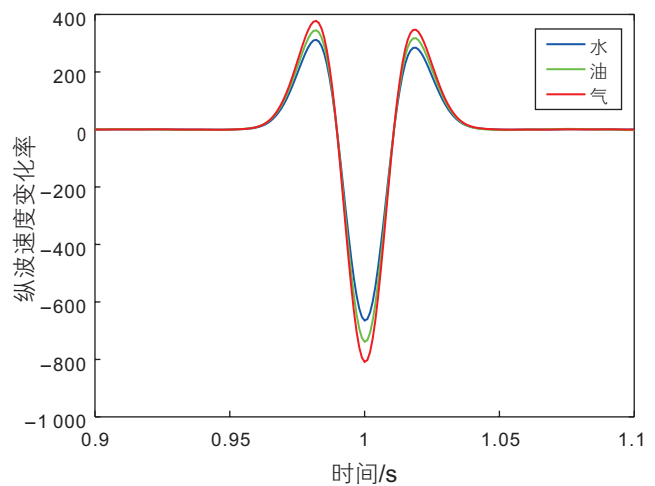


图7 不同模型的纵波速度变化率曲线

Fig. 7 The velocity changing rate curves of different models

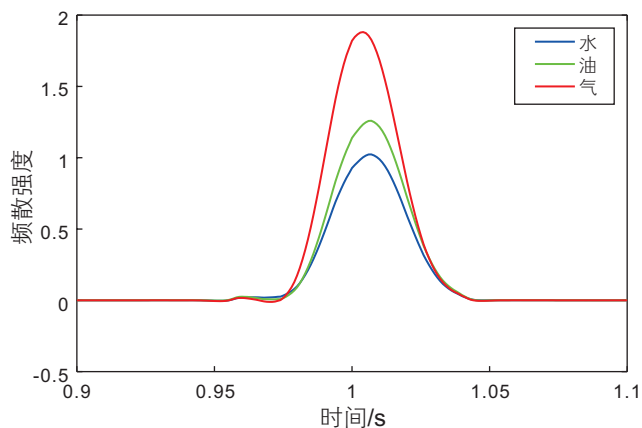


图8 不同模型的频散曲线

Fig. 8 The dispersion curves of different models

2.3 实际数据应用

根据Chapman计算得到的纵波速度和频散衰减等曲线,本研究区在地震频带范围内能较好的识别储层流体。顺南三维区叠前地震资料频带窄,地震主频低为15 Hz。该频率对应着Chapman模型计算的含气储层频散属性的峰值,而含油储层的频散属性值低于含气储层但远高于含水储层的频散属性值。含油和含水的储层的频散峰值分别在低频5 Hz和超低频2 Hz。由于研究区目的层的频带窄,在低频和超低频能量分布很弱,信噪比也很低,于是选取15 Hz作为反演的参考频率,得到15 Hz处的纵波频散属性,利用纵波频

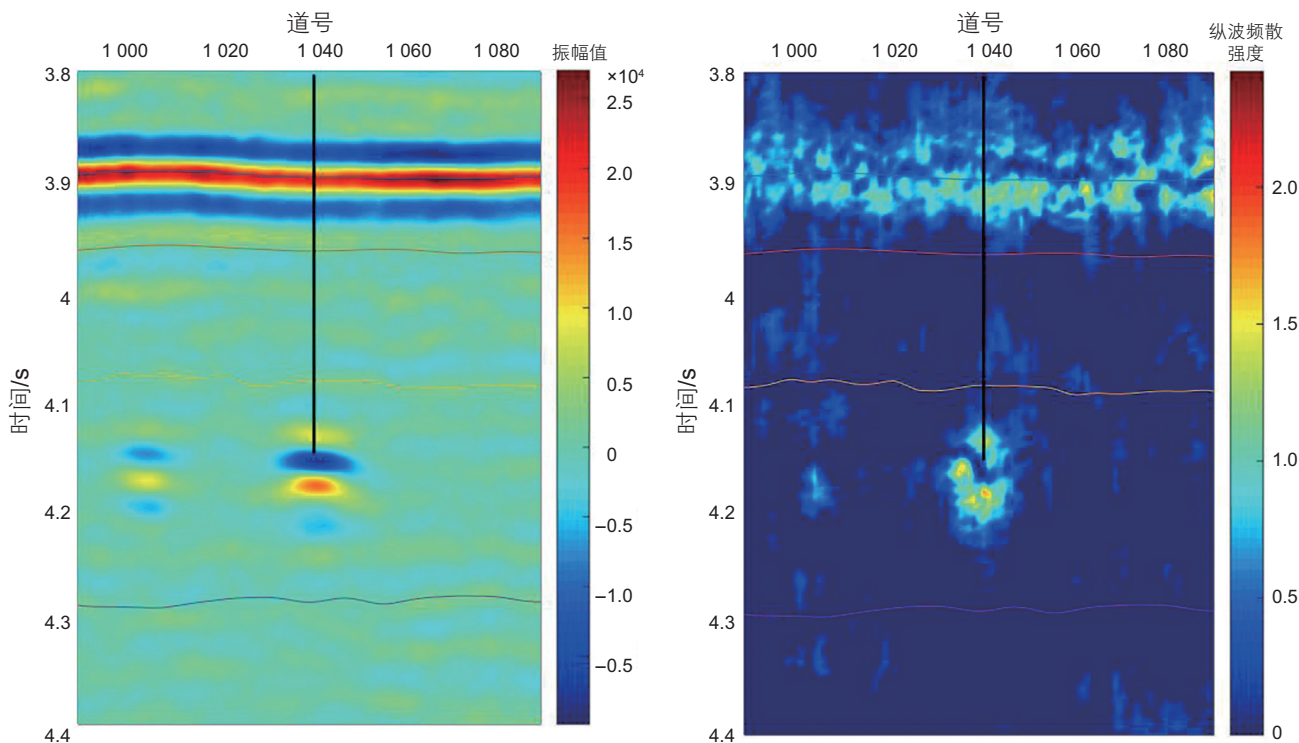


图 9 顺南 5 井叠后剖面 and 纵波频散

Fig. 9 The post-stack profile and P wave dispersion profile in around Shunnan 5 well

散属性来识别储层流体是可行的。

顺南 5 井的油气储层主要为一间房组和鹰山组下段。顺南 5 井成像测井显示一间房组裂缝较发育，顶部见扩溶缝和溶蚀孔洞发育特征，节流循环点火成功，焰高可达 3~10 m。顺南 5 井鹰山组上段储层不发育，孔洞大多被方解石充填。图 9 为顺南 5 井周围叠后地震剖面和纵波频散属性。图中可以看出鹰山组下段地震剖面上显示为串珠状，主要发育溶洞，是顺南 5 井的有利含气储层。对比反演得到的纵波频散属性发现，顺南 5 井周围一间房组的纵波频散强度为 1.3 左右，表现为中等强度，而鹰山组下段的溶洞对应强的纵波频散属性值。

为了进一步分析流体横向上的展布，对纵波频散属性提取层间均方根振幅属性。图 10 为一间房组纵波频散属性平面图，亮色为频散高值，蓝色为频散低值。顺南 5 井、顺南 5-1 井、顺南 5-2 井和顺南 7 井在一间房组有油气显示，是主要的产气井，其对应的纵波频散值分别约为 1.3、1.5、1.1、1.4；而顺南 4 井、顺南 4-1 井和顺南 401 井对应的纵波频散强度均小于 0.6 为低产井。

图 11 为鹰山组上段的纵波频散结果，在鹰山组上段主要的产气井为顺南 4 井和顺南 401 井，其中顺南

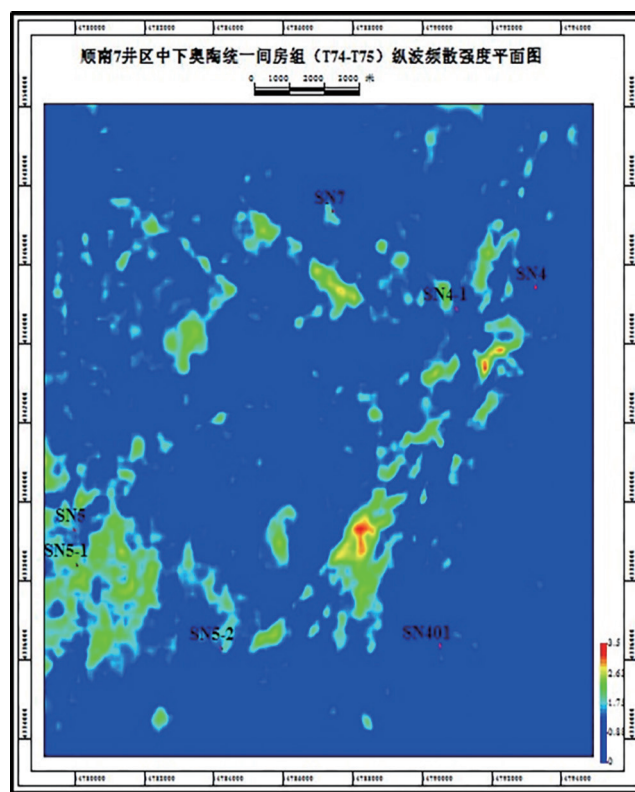


图 10 一间房组 (T74-T75) 纵波频散属性图

Fig. 10 The map of P wave dispersion of Yijianfang Formation (T74-T75)

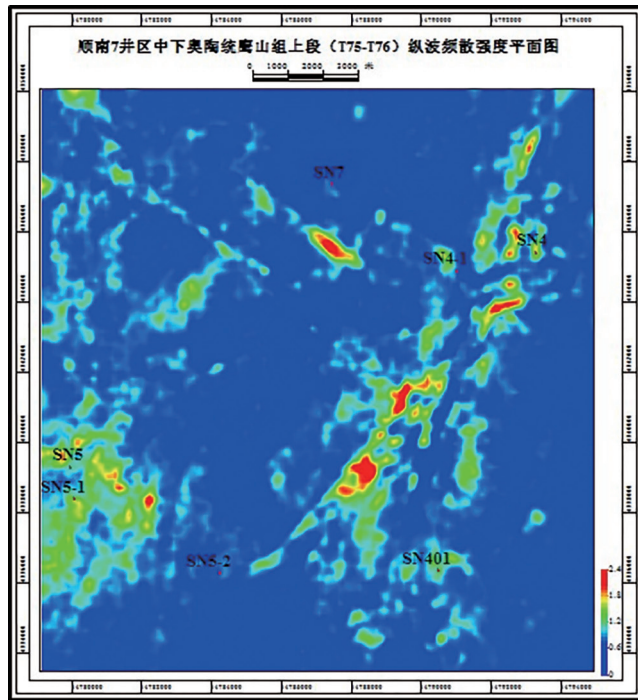


图 11 鹰山组上段 (T75-T76) 纵波频散属性图

Fig. 11 The map of P wave dispersion of upper Yingshan Formation (T75-T76)

4 井累计产量为 1 193 万 m^3 ，对应的纵波频散强度为 1.86；顺南 401 井累计产量为 339.8 万 m^3 ，对应的纵波频散强度为 1.25，单井产气量与纵波频散强度呈正相关关系。

图 12 为鹰山组下段的纵波频散结果，在鹰山组下段主要的产气井为顺南 5 井、顺南 7 井、顺南 5-2 井和顺南 5-1 井。在顺南 5 井处频散强度最强为 3.23，缝洞体积 488 万方，顺南 7 井频散强度值为 2.36，缝洞体积 427 万 m^3 ，顺南 5-2 井频散强度值为 1.89，缝洞体积 145 万 m^3 ，顺南 5-1 井频散强度值为 1.26，缝洞体积 55 万 m^3 ，总体来说单井预测缝洞体积越大，可采储量越高，则频散强度也越大。

统计顺南三维区各层系预测频散强度与实钻含油气性情况，结果表明叠前频变 AVO 反演频散强度与含气富集程度成正比，缝洞含气性综合预测与钻井符合率高达 90% 以上，规模大缝洞体含气性预测成功概率高，如鹰山组下段，而裂缝等小规模储层含气性预测精度需要进一步提高，如一间房组和鹰山组上段。

一间房组和鹰山组上段储层含气层主要发育在研究区西南部，断裂的属性响应特征也较为明显，鹰山组下段含气性特征主要表现为零星点状分布，与串珠

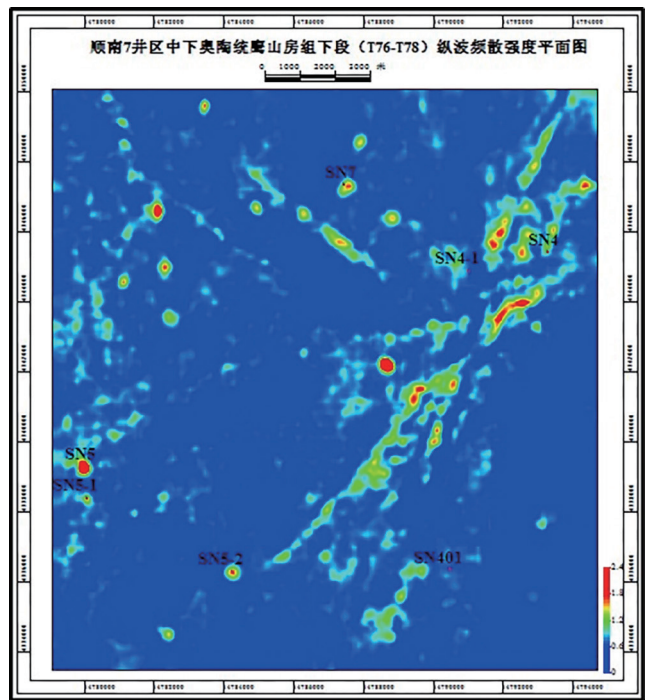


图 12 鹰山组下段 (T76-T78) 纵波频散属性图

Fig. 12 The map of P wave dispersion of lower Yingshan Formation (T76-T78)

有较好的对应关系，并且频散强度值与钻井油气产量或可采储量呈正相关。叠前频散 AVO 反演在储层刻画及含气性检测方面具有较好的效果，纵波频散属性都能和测井解释的含气层吻合度高。高值异常断续且零散分布，局部富集，流体分布呈条带状或片状，符合该区缝洞储层含气性分布的特征。

3 结论

本文提出的流体检测方法充分利用了 Chapman 模型可以描述裂缝储层频变特征的优势，更加符合实际裂缝储层的岩石物理特征，为碳酸盐岩储层流体检测提供理论支撑；将高分辨率的分频方法和 AVO 反演方法相结合，直接从地震数据中提取频散属性是切实可行的；经过模型和实际数据测试结果证明频散属性在流体检测方面要优于速度变化率属性，在本研究区纵波的频散强度与储层的储量成正比；本文方法为利用叠前地震资料进行流体检测提供了一种有效的方案，并在实际工区的应用中取得了较好的效果，因此本方法具有较为广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 周刚. 塔南碳酸盐岩裂缝型储层地震综合预测技术研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2012. [ZHOU G. The techniques of comprehensive seismic analysis in prediction of fractured carbonate reservoir in Southern Tahe[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.]
- [2] HOMSEN L. Elastic anisotropy due to aligned cracks in porous rock [J]. *Geophysical Prospecting*, 1995, 43: 805–829.
- [3] 王保才, 刘军, 马灵伟, 等. 塔中顺南地区奥陶系缝洞型储层地震响应特征正演模拟分析[J]. *石油物探*, 2014, 53(3):344–350.[WANG B C, LIU J, Ma L W, et al. Forward modeling for seismic response characteristics of the fracture-cavity Ordovician reservoir in Shunnan area of central Tarim Basin[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2014,53(3):344–350.]
- [4] 杨子川, 刘军, 陈黎, 等. 顺南地区奥陶系碳酸盐岩储层地震识别与评价[J]. *石油物探*, 2017, 56(2):280–287.[YANG Z C, LIU J, CHEN L, et al. Seismic identification and evaluation of Ordovician carbonate reservoir in Shunnan area[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2017,56(2):280–287.]
- [5] 李宗杰, 刘群, 李海英, 等. 塔河油田缝洞储集体油水识别的谐频特征分析技术应用研究[J]. *石油物探*, 2014,53(4):484–490.[LI Z J, LIU Q, LI H Y, et al. Application of HFC technique for hydrocarbon identification in fracture-cave reservoirs of Lower-Ordovician carbonate in Tahe Oilfield[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2014,53(4):484–490.]
- [6] GASSMANN F. Elastic waves through a packing of spheres [J]. *Geophysics*, 1951, 16(4): 673–685.
- [7] BOIT M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, 28(2): 168–178.
- [8] WHITE J E. Computed seismic speeds and attenuation in rocks with partial gas saturation [J]. *Geophysics*, 1975, 40: 224–232.
- [9] MAVKO G, NUR A. Melt squirt in the asthenosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80(11): 1 444–1 448.
- [10] MURPHY W F. Effects of microstructure and pore fluids on the acoustic properties of granular sedimentary materials [D]. San Francisco: Stanford University, 1982.
- [11] HUDSON J A. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1981, 64: 133–50.
- [12] HUDSON J A, LIU E, Crampin S. The mechanical properties of materials with interconnected cracks and pores[J]. *Geophysical Journal International*, 1996, 124: 105–112.
- [13] SCHOENBERG M. Elastic wave behavior across linear slip interfaces[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 68(5): 1 516–1 521.
- [14] CHAPMAN M. Frequency dependent anisotropy due to mesoscale fractures in the presence of equant porosity [J]. *Geophysical Prospecting*, 2003, 51: 369–379.
- [15] CHAPMAN M, LIU E, LI X Y. The influence of fluid-sensitive dispersion and attenuation on AVO analysis[J].*Geophysics*, 2006,167, 89–105.
- [16] BATZLE M L, HAN D H, HOFMANN R. Fluid mobility and frequency-dependent seismic velocity-direct measurements [J]. *Geophysics*, 2006, 71(1):1–9.
- [17] WILSON A, CHAPMAN M, and LI X Y. Frequency-dependent AVO inversion[C]. 79th Annual SEG Meeting Expanded Abstracts, 2009, 28, 341–345.
- [18] 吴小羊. 基于频谱分析技术的频散 AVO 反演研究[D], 北京: 中国地质大学, 2010. [WU X Y. Frequency dependent AVO inversion using spectral decomposition techniques [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.]
- [19] WU X Y, CHAPMAN M, LI X Y, et al. Quantitative gas saturation estimation by frequency-dependent amplitude-versus-offset analysis [J]. *Geophysical Prospecting*, 2014, 62, 1 224–1 237.
- [20] CHEN S Q, LI X Y, WANG S X. The analysis of frequency-dependent characteristics for fluid detection: a physical model experiment [J]. *Applied Geophysics*, 2012, 9 (2), 195–206.
- [21] CHEN S Q, LI X Y, WU X Y, Application of frequency-dependent AVO inversion to hydrocarbon detection[J]. *Journal of Seismic Exploration*, 2014, 23: 241–264.
- [22] CHEN S Q, CHAPMAN M, LI X Y, et al. The application of quantitative gas saturation estimation based on the seismic wave dispersion inversion [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, 120: 81–95.
- [23] 郝前勇, 张世鑫, 张峰, 等. 基于频变 AVO 反演的频散属性估算方法及其应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2013, 48(2): 255–261. [HAO Q Y, ZHANG S X, ZHANG F, et al. Dispersion attributes estimation based on frequency-dependent AVO inversion and its application in hydrocarbon detection[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2013, 48(2): 255–261.]
- [24] 王晓钧, 陈双全, 王磊, 等. 基于斑块饱和模型利用地震波频散特征分析含气饱和度 [J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49 (4):715–722.

- [WANG Y J, CHEN S Q, WANG L, et al. Gas saturation analysis with seismic dispersion attribute based on patchy-saturation model[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49 (4):715–722.]
- [25] 兰慧田, 裂缝性孔隙介质波场模拟与频变AVO储层参数反演 [D]. 长春: 吉林大学, 2014. [LAN H T. Wave field modeling in fractured porous media and frequency-dependent AVO reservoir parameters inversion [D]. Changchun: Ji Lin University, 2014.]
- [26] 赵万金, 杨午阳. 频变AVO油气检测技术进展[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(6): 2 858–2 865. [ZHAO W J, YANG W Y. Progress of frequency-dependent AVO hydrocarbon detection technology [J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(6): 2858–2868.]
- [27] 张震, 印兴耀, 郝前勇. 基于AVO反演的频变流体识别方法[J]. *地球物理学报*, 2014,57(12):4 171–4 184.[ZHANG Z, YIN X Y, HAO Q Y. Frequency-dependent fluid identification method based on AVO inversion. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014,57(12):4 171–4 184.]
- [28] QIN X L, CHEN S Q, LI X Y, et al. The application of frequency-dependent AVO inversion in tight reservoirs area[C]. 86th Annual SEG Meeting Expanded Abstracts, 2016:3 548–3 552.
- [29] 李坤, 印兴耀, 宗兆云. 基于匹配追踪谱分解的时频域FAVO流体识别方法[J]. *石油学报*, 2016, 37(6):777–786.[Li K, YIN X Y, ZONG Z Y. Time-frequency-domain FAVO fluid discrimination method based on matching pursuit spectrum decomposition[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016,37(6):777–786.]
- [30] 印兴耀, 宗兆云, 吴国忱. 岩石物理驱动下地震流体识别研究[J]. *中国科学:地球科学*, 2015,45(1):8–21.[YIN X Y, ZONG Z Y, WU G C. Research on seismic fluid identification driven by rock physics[J]. *Science China: Earth Science*, 2015,45(1):8–21.]
- [31] 李博南, 刘财, 郭智奇. 基于等效介质模型和频变AVO反演的裂缝储层参数估算方法[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(1): 234–244. [LI B N, LIU C, GUO Z Q. Estimation of fractured reservoir parameters based on equivalent media model and frequency-dependent AVO inversion [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*,2017,47 (1): 234–244.]

Application of frequency-dependent AVO inversion to identify fluid in fractured carbonate reservoirs in the Shunnan area

QIN Xilin^{1,2}, LI Xiangyang^{1,2}, CHEN Shuangquan^{1,2}, SUN Saohan³, LI Zongjie⁴, LIU Jun⁴

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 CNPC Key Laboratory of Geophysical Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 BGP Research & Development Center of CNPC, Zhuozhou 072750, China

4 Research Institute of Exploration and Development, Northwest Oilfield Branch of Sinopec, Urumqi 830000, China

Abstract Carbonate reservoirs in the Shunnan area are the key target for natural gas exploration and development in the Tarim Basin. Fluid identification is an effective method to improve exploration efficiency. Therefore, this paper combines a multi-scale fractured rock physical model and frequency-dependent amplitude vs offset (AVO) inversion method to establish a set of fluid detection technologies. Firstly, based on the drilling, logging, seismic, and geology data, we use the Chapman equivalent model to simulate the fractured reservoirs in the Shunnan area, and use the reflectivity method for forward modeling the seismic wave response feature of reservoirs saturated with different types of fluids. Secondly, it is necessary to carry out seismic attribute sensitivity analysis of different types of reservoir to determine which seismic dispersion is more sensitive to fluid. Finally, based on the situation of seismic data in the study area, we establish a technical process based on the petrophysical model and the frequency-dependent AVO inversion, and apply it in the Shunnan area. The results of fluid detection and real drilling verification show that the method proposed in this paper is practical and provides a method for fluid detection in this type of oil and gas reservoir.

Keywords frequency-dependent AVO inversion; fluid detection; fractured porous media; carbonate rocks; dispersion attribute

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.03.032

(编辑 付娟娟)