

doi: 10.11720/wtyht.2018.1.15

周家雄, 谢玉洪, 刘力辉, 等. 射线域频变 AVO 含气性识别探索与实践[J]. 物探与化探, 2018, 42(1): 127–133. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1.15>

Zhou J X, Xie Y H, Liu L H, et al. Investigation and case study of frequency-dependent AVO in ray domain for gas detection[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(1): 127–133. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1.15>

射线域频变 AVO 含气性识别探索与实践

周家雄¹, 谢玉洪¹, 刘力辉², 丁燕², 李建海²

(1. 中海石油(中国)有限公司 湛江分公司, 广东 湛江 524057; 2. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 流动性是预测低孔渗气藏含气性关键参数之一, 但如何预测流动性一直是地球物理界难题。在孔隙粘弹性介质中, 流体的存在导致地震波发生不同程度的频散和衰减, 研究表明 P 波频散和流体的流动性有关, 而流动性是渗透率与流体粘滞度的比值, 因此流动性的概念和参数能极大地帮助流体粘滞度与渗透率的预测。笔者利用 Wang Yanghua 射线参数域表示的 Zoeppritz 近似方程, 将频率因子引入到 AVO 分析中, 推导出射线域频变 AVO 表达式。同时提出了频变属性表达式以衡量速度频散的大小, 分析随频率变化的速度频散异常特征。将速度频散和流体的流动性联系起来, 在莺歌海盆地 DF 区高温高压岩性气藏油气检测中进行了实际应用, 结果表明速度频散能有效预测流体流动性、储层含气性。

关键词: 射线域频变 AVO; 频变属性表达式; 速度频散; 流体的流动性

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2018)01-0127-07

0 引言

用地震资料做储层流体的识别是一项长期的探索性工作。人们试图通过从地震中提取各种参数对油气进行检测。地震勘探初期, 油气检测技术^[1]建立在完全弹性理论基准之上, 如 AVO 分析和叠前弹性参数反演^[2-7]。随着粘滞弹性波动理论的发展, 基于粘滞参数的等效吸收系数^[8,9]逐渐成为油气检测的重要参数。因为真实的油气储层是多孔的、多相态的粘弹性介质, 所以油气检测技术的发展必然是从完全弹性走向粘弹性, 从单相介质理论走向双相介质理论, 从叠后走向叠前。

地震波经过油气储层后, 由于液体喷射流动^[10](或局部粘滞流动)会引起地震波吸收衰减和速度频散等异常, 可以考虑用地震资料的频率信息进行流体识别。Gassmann 利用骨架特性研究了流体替

换对地震波速度等参数的影响, 建立了 Gassmann 理论^[11]。Batzle 等^[12]揭示了纵波速度频散和流体的流动性有关, 并定义了流体的流动性, 即岩石渗透率与流体粘滞性的比值($M_L = k/\eta_f$)。Chapman 等^[13]从理论上研究了两个弹性层之间夹一个填充流体导致衰减和频散的频散层组成模型的 AVO 特征, 认为弹性层和频散层之间的界面会导致地震反射系数随频率发生变化, 这种变化与 AVO 的类型有关。Wilson^[14]等进一步扩展了这一研究, 引入与频率有关的 AVO 反演这一概念, 目的在于直接从实际地震资料中计算地震波的速度频散。

因为流体的流动性和粘滞度有关, 所以可以通过速度频散识别流体。本文从射线理论入手, 利用 Wang Yanghua 射线参数表示的 Zoeppritz 近似方程, 将频率因素引入 AVO 分析中, 考虑反射振幅随频率的变化特征, 开展与频率有关的地震属性研究, 探索用速度频散进行储层预测和流体识别。

收稿日期: 2016-11-09; 修回日期: 2017-04-30

基金项目: 中海石油总公司重大科研专项“南海西部海域典型低孔低渗油气藏勘探开发关键技术研究及实践”(CNOOC-KJ125ZDXM07LTD02ZJ11)

作者简介: 周家雄(1971-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 中海油湛江分公司研究院物探总师, 研究方向为地震勘探方法技术及综合应用。

Email: zhoujiax@cnooc.com.cn

1 射线域频变 AVO 理论

在含烃岩石中,地震波传播速度与频率有关,这种速度频散可作为流体识别的标志。目前有关速度频散的推导均从角度域出发,推导出包含表征纵波速度频散程度的反射系数近似公式^[14-18],角度域近似公式存在以下问题:为简化计算,通常需要假设纵横波速度比为已知;此外在求取频散属性之前需要知道不同频率的角度道集,角度域理论采用的是直射线路径,不符合实际的地震波传播理论。Wang Y H 射线域的 AVO 近似式^[19-20]没有纵横波速度比已知的假设,而且射线域理论采用的是弯曲射线路径,得到的射线域道集在大角度处更加准确,能够明确区分流体和固体项,因此在射线域进行速度频散分析,能够得到更加准确的流体识别。

Wang Y H 等人^[20]提出的用流体因子及射线参数表示的近似反射系数:

$$R_{pp} = R_f - \left[2 \frac{\Delta\mu}{\rho} - (1 - R_f) q_\alpha q_\beta \left(\frac{\Delta\mu}{\rho} \right)^2 \right] P^2, \quad (1)$$

其中, P 为射线参数, ρ 表示密度, μ 表示剪切模量, Δ 表示变化量, q_α 、 q_β 分别为纵、横波慢度; Bortfeld^[19] 将反射系数分解为流体部分 R_f 和刚体部分 $2 \frac{Dm}{r} P^2$ 之和, 这就是式(1)的前两项。

将 Bortfeld 定义的流体反射系数改写为:

$$R_f = A_0^R + A_4^R \frac{P^2 V_p^2}{1 - P^2 V_p^2}, \quad (2)$$

其中, $A_0^R = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)$, $A_4^R = \frac{1}{2} \frac{D V_p}{V_p}$ 。将式(2)代入式(1)前两项,并引入 Gardener 经验公式 ($Dr/r = DV/4DV$) 化简为:

$$R_{pp} = \left[\frac{1}{8} + \frac{1}{2(1 - P^2 V_p^2)} \right] \frac{\Delta V_p}{V_p} - 2 \frac{P^2}{\rho} \Delta\mu, \quad (3)$$

其中, V_p 表示纵波速度。

根据 Chapman 等^[13]关于速度频变的观点,假定由于界面两侧频变性质的差异,反射系数会随着频率的变化而变化,即反射系数可以看成是射线参数 p 和频率 f 的函数,同时把与纵横波速度变化率相关的量也看成是频率的函数^[21],即:

$$R_{pp}(P, f) = \left[\frac{1}{8} + \frac{1}{2(1 - P^2 V_p^2)} \right] \frac{\Delta V_p}{V_p}(f) - 2 \frac{P^2}{\rho} \Delta\mu(f), \quad (4)$$

由于采集到的地震数据在频率域内是带限,所以可以用一定频带范围内的地震道数据来进行反

演。针对不同采样点,为求取纵波速度变化率 dV_p/df , 利用一阶泰勒级数在参考频率 f_0 处对式(4)进行级数展开,可以得到:

$$R_{pp}(P, f) \approx A(P) \frac{\Delta V_p}{V_p}(f_0) + (f - f_0) A(P) I_a + B(P) \Delta\mu(f_0) + (f - f_0) B(P) I_b, \quad (5)$$

式中, $A(P) = \frac{1}{8} + \frac{1}{2(1 - P^2 V_p^2)}$, $B(P) = -2 \frac{P^2}{\rho}$ 。 I_a 和 I_b 为纵波速度变化率、剪切模量变化率关于频率 f 的导数,即纵波速度变化率、剪切模量变化率随频率变化的快慢,将其定义为频变程度:

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

为求取 I_a 和 I_b , 对式(5)进行调整:

$$R_{pp}(P, f) - A(P) \frac{\Delta V_p}{V_p}(f_0) - B(P) \Delta\mu(f_0) \approx (f - f_0) A(P) I_a + (f - f_0) B(P) I_b,$$

即:

$$R_{pp}(P, f) - A(P) \frac{\Delta V_p}{V_p}(f_0) - B(P) \Delta\mu(f_0) \approx [(f - f_0) A(P) \quad (f - f_0) B(P)] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix}. \quad (7)$$

对于一个典型的有 n 个接收道的 AVO 道集,可以将 AVO 道集处理成射线域 AVP 道集,通过时频分析技术将 AVP 道集进行频谱分解得到不同频率 f 下的振幅谱 $R_{pp}(P_n, f)$ 。对式(7)表示的不同频率下的 AVP 道集,考虑 $m+1$ 个频率 f_1, f_2, \dots, f_m 的情况,并定义列向量 a 为:

$$a = \begin{bmatrix} R_{pp}(P_1, f_1) - A_1(P_1, f_1) \frac{\Delta V_p}{V_p}(f_0) - B_1(P_1, f_1) \Delta\mu(f_0) \\ \vdots \\ R_{pp}(P_1, f_m) - A_1(P_1, f_m) \frac{\Delta V_p}{V_p}(f_0) - B_1(P_1, f_m) \Delta\mu(f_0) \\ \vdots \\ R_{pp}(P_n, f_1) - A_n(P_n, f_1) \frac{\Delta V_p}{V_p}(f_0) - B_n(P_n, f_1) \Delta\mu(f_0) \\ \vdots \\ R_{pp}(P_n, f_m) - A_n(P_n, f_m) \frac{\Delta V_p}{V_p}(f_0) - B_n(P_n, f_m) \Delta\mu(f_0) \end{bmatrix} \quad (8)$$

定义 $m \times n$ 行, 2 列的矩阵 e 如下:

$$e = \begin{bmatrix} (f_1 - f_0)A_1(P_1, f_1) & (f_1 - f_0)B_1(P_1, f_1) \\ \vdots & \vdots \\ (f_m - f_0)A_1(P_1, f_m) & (f_m - f_0)B_1(P_1, f_m) \\ \vdots & \vdots \\ (f_1 - f_0)A_n(P_n, f_1) & (f_1 - f_0)B_n(P_n, f_1) \\ \vdots & \vdots \\ (f_m - f_0)A_n(P_n, f_m) & (f_m - f_0)B_n(P_n, f_m) \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(8)和式(9)代入式(7)可以得到关系式:

$$a = e \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} \quad (10)$$

对每一个采样点 t 处的 I_a 和 I_b , 可以通过最小二乘反演方法求得:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = (e^T e)^{-1} e^T a \quad (11)$$

将时频分析技术和 AVO 反演相结合, 可以实现一种新的描述地震波速度频散的属性。与常规 AVO 分析不同的是, 文中在射线参数域进行分析,

不但考虑了炮检距的变化情况, 同时还考虑了频率域的变化特征, 从而能够帮助解释人员更好地进行储层预测及含油气检测。

2 应用实例

2.1 研究区概况

研究区位于 Y 盆地中央底辟带北部, 目前, 该区在“十一五”期间在中深层黄流组一段发现了高温、高压、岩性圈闭条件下的高烃气藏, 潜力巨大, 证实了研究区中深层黄流组一段的高压气藏具有纵向聚集、高压封盖、大型海底扇砂岩储集、向底辟构造远端超覆尖灭侧封的岩性气藏新模式。钻探实践表明 DF 区中深层含气性非常复杂, 基于钻探资料和地球物理研究, 本区地震亮点与含气性有很好的对应关系。但气层、气水同层及含气水层在地震上呈现出相似的反射特征(图 1), 常规的吸收等烃类检测方法(图 2)已经难以预测该区的复杂情况, 亟待寻找一种新的技术以区分不同含气饱和度的气藏。

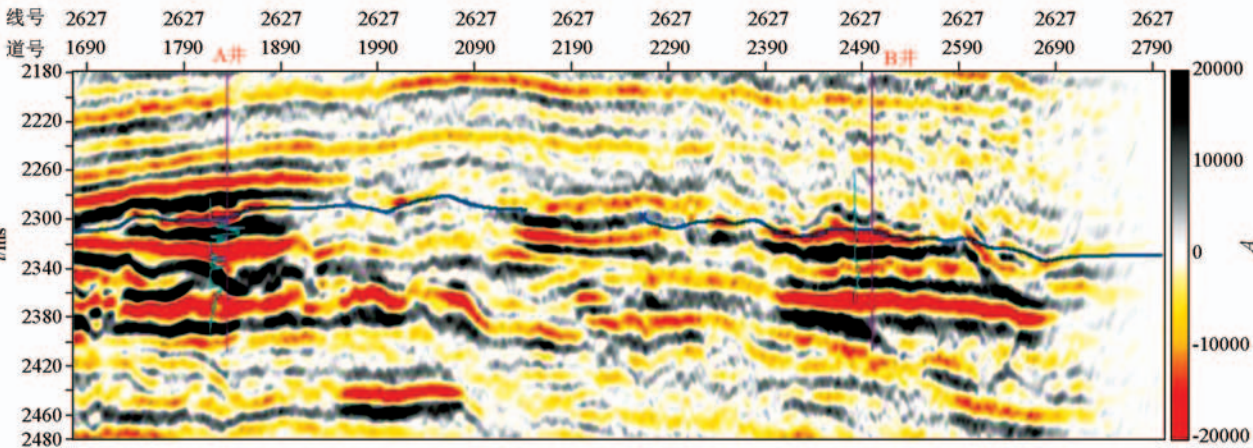


图 1 过 A、B 井地震剖面(井旁曲线为渗透率曲线)

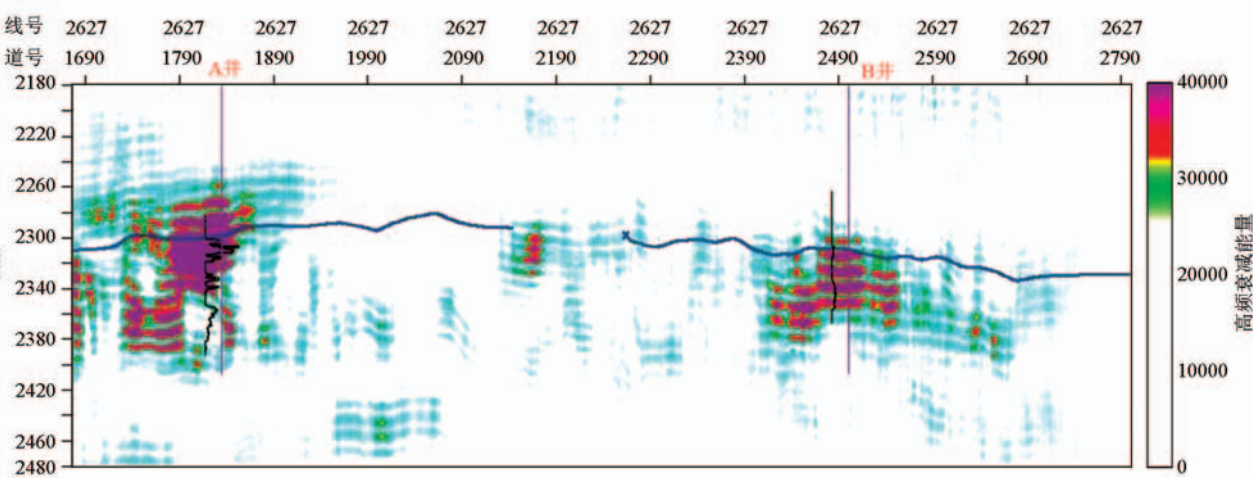


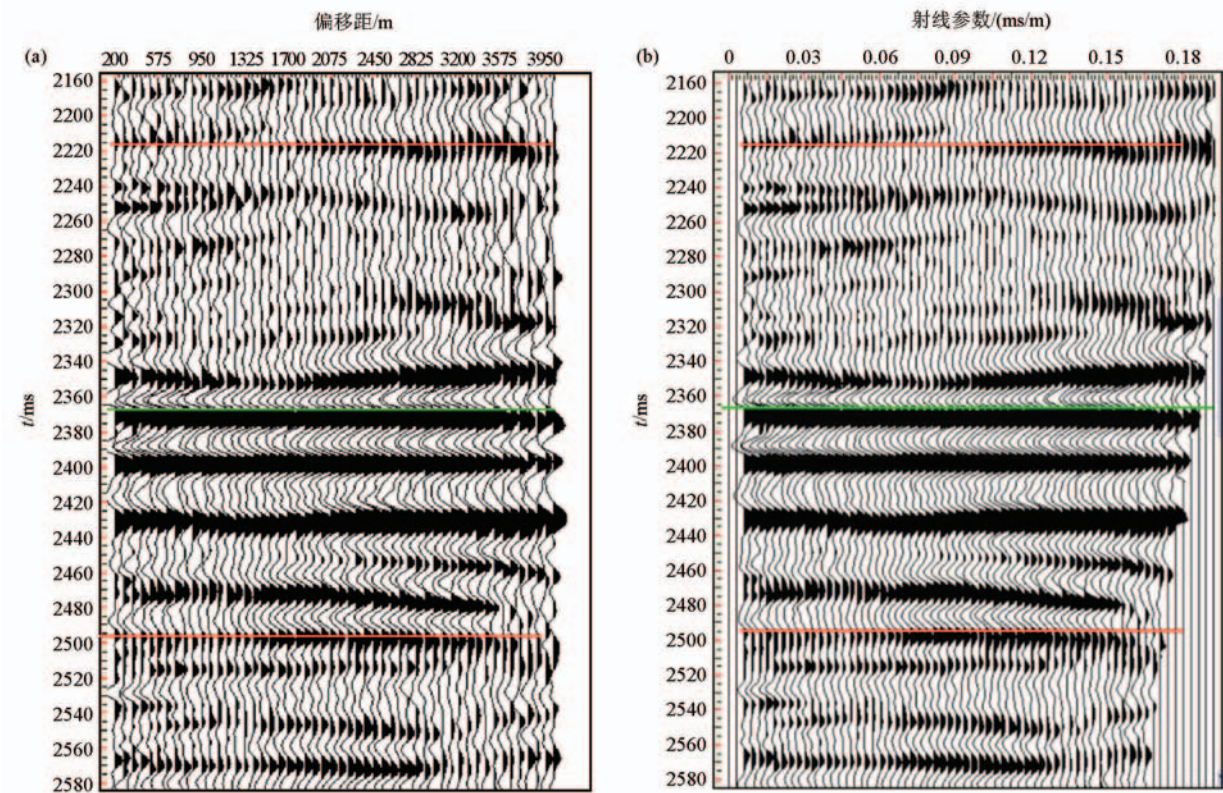
图 2 过 A、B 连井吸收剖面(井旁曲线为渗透率曲线)

图 1 为研究区一条过井剖面,测试结果表明 B 井为水层,A 井为高产气层,但二者在常规地震剖面上均表现为低频、强振幅的“亮点”特征,振幅信息在本区识别含气性存在多解性。从测井解释结果来看,A 井和 B 井均为高孔隙度(平均孔隙度 18%左右)特征,但渗透率 A 井(平均渗透率 45 mD)明显高于 B 井(平均渗透率 4 mD),渗透率是影响本区储层物性及含气性主要因素。因此,寻找和渗透率相关的流体的流动性特征可以用来预测本区含气

性,而速度频散和流体流动性相关,可以用于渗透性和含气性检测。

2.2 频散分析

本次研究采用速度频散来预测渗透率。首先抽取射线参数域道集。射线参数域道集的地震波是按照射线路径传播的,更能表征地下的反射特征,AVO 信息更为准确。图 3a 为原始道集资料,图 3b 为同一位置的射线域道集。不难看出射线参数域道集能保持原有资料的有效信息,而且信噪比有一定改善。



a—原始道集;b—射线参数域道集

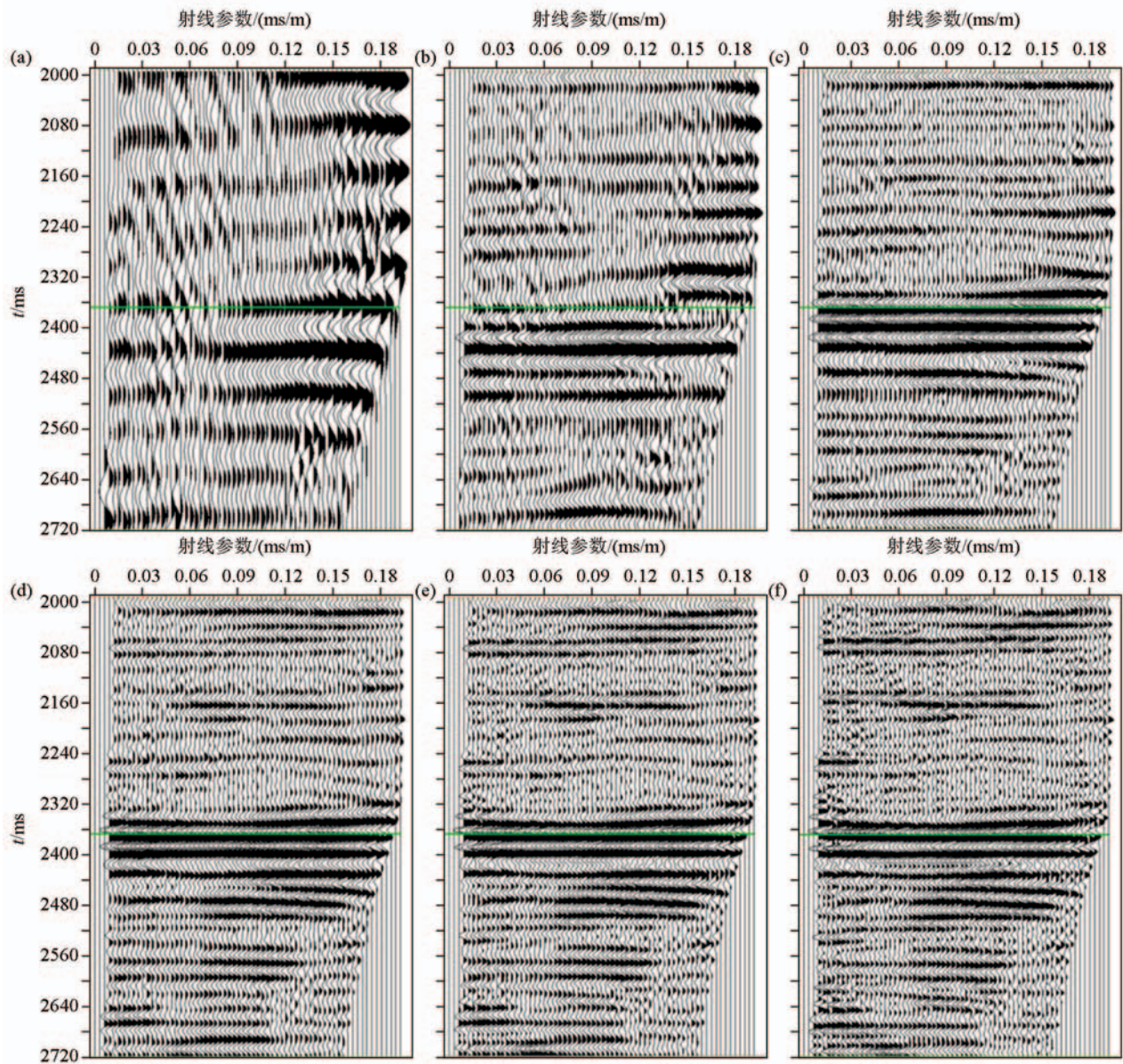
图 3 道集资料特征

将时频分析引入 AVO,考虑 AVO 反演中反射系数随频率的变化,对射线域道集分频,得到振幅随不同频率、不同射线参数情况下的关系,如图 4 所示。将频谱分析技术引入 AVO 反演公式,求取速度变化的频散程度。通过对比选择,发现 20~30 Hz 为变化较为敏感的频率区间,因此选择 20~30 Hz 求取频散程度来识别渗透率。

图 5 为利用频变 AVO 计算得到的频散属性剖面。有两口井标定情况可以看出,A 井 1 气组(蓝色层位下红色轴),测井解释为高渗透率砂体,试气结果为气层,表现为明显的频散异常;B 井 1 气组,测井解释为低渗透率特征,试气结果为水层,则表现为

弱的频散异常,频散计算结果与测井解释结果吻合,可以用来预测含气性。

图 6 为研究区 1 气组频散属性。图中红色色标代表高渗透率条件下的含气性特征,蓝色、白色代表低渗透率背景下的干层和水层特征。井震标定结果表明频散属性预测含气性与钻井揭示特征吻合。另外结合沉积微相图(图 7)不难看出,研究区含气性明显受沉积微相控制。海底扇浊积水道沉积为块状砂岩沉积特征,砂岩以细—中厚层砂岩块状为特征,岩性粒度大,泥质含量低,使得渗透率高达 50 mD^[22]。同时该套砂体分布范围广、厚度大(30~50 m)、控制气层富集,呈连片分布的气藏特征。



a—10 Hz 道集;b—20 Hz 道集;c—30 Hz 道集;d—40 Hz 道集;e—50 Hz 道集;f—60 Hz 道集

图 4 时频分析后频分射线道集

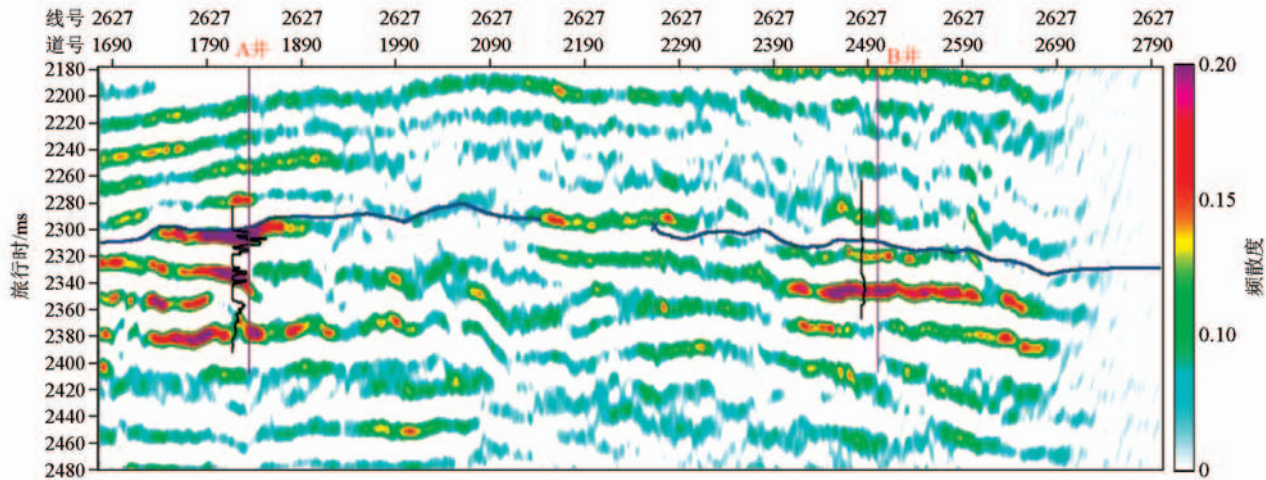


图 5 过 A、B 井频散属性剖面(井旁曲线为渗透率曲线)

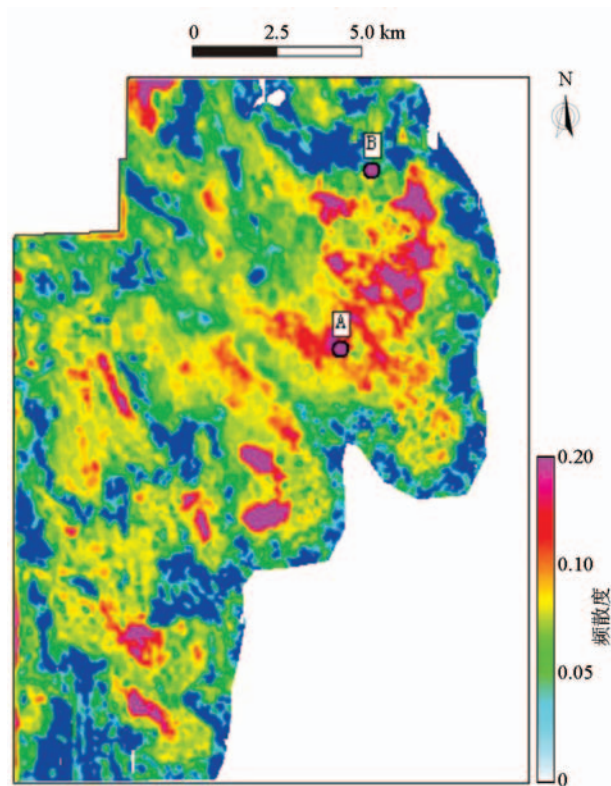


图 6 1 气组频散属性



图 7 1 气组沉积微相

3 结论与认识

射线域频变 AVO 含气性识别技术是在角度域频变 AVO 技术理论上发展的,初步的探索和实践证明:

1)从 Wang Y H 射线参数域的反射系数表达式可以获得射线域 AVO 近似表达式。

2)从射线参数域频变 AVO 近似表达式中,可以提取一种频变属性获得速度频散的估计。

3)高温高压区速度频散对储层渗透性和含气性比较敏感。

参考文献:

[1] 高建虎,雍学善,刘洪.叠后地震油气检测技术与应用[J].石油物探,2006,45(4):385-389.

[2] 吴树初,罗国安.AVO 分析和应用[J].石油物探,1992,31(1):8-17.

[3] 王栋.AVO 分析与流体识别[D].成都:成都理工大学,2009.

[4] 路慎强.叠前分频 AVO 分析方法在罗家地区的应用研究[J].石油物探,2013,52(2):151-156.

[5] 张世鑫,印兴耀,孔国英,等.基于岩石物理模型的最优化 AVO 三参数同步反演方法[J].中国海上油气,2010,22(5):300-304.

[6] 陈建江.AVO 三参数反演方法研究[D].东营:中国石油大学

(华东),2007.

[7] 李超,印兴耀,张广智,等.基于贝叶斯理论的孔隙流体模量叠前 AVO 反演[J].石油物探,2015,54(4):467-476.

[8] 黄花香,邓瑛,吴战培,等.吸收系数反演在川东碳酸盐岩储层预测中的应用[J].石油物探,2003,42(1):86-88.

[9] 张景业,贺振华,黄德济.地震波频率衰减梯度在油气预测中的应用[J].勘探地球物理进展,2010,33(3):207-211.

[10] Jones T D.Pore fluids and frequency-dependent wave propagation in rocks[J].Geophysics,1986,51(10):1939-1953.

[11] Gassman F.Elastic Waves through a packing of spheres[J].Geophysics,1951,16(4):673-685.

[12] Batzle M L,Han D H,Hofmann R.Fluid mobility and frequency-dependent seismic velocity-Direct measurements[J].Geophysics,2006,71(1):N1-N9.

[13] Chapman M,Liu E R,Li X Y.The influence of fluid-sensitive dispersion and attenuation on AVO analysis[J].Geophysical Journal International,2006,167(1):89-105.

[14] Wilson A,Chapman M,Li X Y.Frequency-dependent AVO inversion[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts,SEG,2009:341-345.

[15] 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.

[16] Chapman M,Wilson A,Li X Y.Estimating seismic dispersion from pre-stack data using frequency-dependent AVO inversion[C]//2010 SEG Annual Meeting, Denver, Colorado: SEG,2010:425-429.

[17] 印兴耀,李超,张世鑫.基于双相介质的地震流体识别[J].中国石油大学学报:自然科学版,2013,37(5):38-43.

[18] 胡玮,韩立国,尚帅.频散属性在致密薄储层识别中的应用[J].石油物探,2014,53(3):367 - 372.

[19] 印兴耀,张繁昌,孙成禹.叠前地震反演[M].东营:中国石油大学出版社,2010:46 - 56.

[20] Wang Y H.Approximations to the Zoeppritz equations and their use in AVO analysis[J].Geophysics,1999,64(6):1920 - 1927.

[21] 刘力辉.一种利用叠前地震频散分析预测储层渗透率的方法[P].中国专利,201310321695.9,2016-08-10.

[22] 谢玉洪,范彩伟.莺歌海盆地东方区黄流组储层成因新认识[J].中国海上油气,2010,22(6):355 - 359,386.

Investigation and case study of frequency-dependent AVO in ray domain for gas detection

ZHOU Jia-Xiong¹, XIE Yu-Hong¹, LIU Li-Hui², DING Yan², LI Jian-Hai²

(1.Zhanjiang Branch of CNOOC (China) Co. ,Ltd. ,Zhanjiang 524057,China;2.State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Development ,Chengdu University of Technology ,Chengdu 610059,China)

Abstract: As we know,mobility is one of the key parameters for predicting the gas-bearing properties of low-porosity gas reservoirs. However,how to predict the mobility is always a difficult geophysical problem.In porous viscoelastic medium,the existence of fluid leads to different degrees of seismic wave dispersion and attenuation,and many researches have shown that P-wave dispersion is related to the fluidity of the fluid which is the ratio of permeability to fluid viscosity.Thus,the fluidity can be used to assist the prediction of fluid viscosity and permeability.In this paper,based on Zoeppritz approximate equations expressed in ray-domain by Wang Yanghua,the frequency factor is introduced into AVO analysis,and frequency-dependent AVO expressions is deduced in ray domain.The authors also present a frequency-dependent attributes expression to measure the velocity dispersion and analyze the velocity dispersion characteristics with frequency variation,with the features of velocity dispersion varying with frequency,by using expressions of frequency-dependent attributes.Then,the authors combine the velocity dispersion and fluidity of the fluid.Finally,the authors apply the proposed method to oil and gas detection in lithologic gas reservoir which is characterized by high-temperature,high-pressure in DF district of Yinggehai basin. The application results show that the velocity dispersion can effectively predict the fluidity of fluid and the gas-containing property of the reservoir, and the effectiveness of this method is demonstrated.

Key words: frequency-dependent AVO in ray domain;frequency-dependent attributes expression;velocity dispersion;fluid mobility

(本文编辑:叶佩)