

doi: 10.11720/wtyht.2018.1.19

凌云,杜向东,曹思远.FAVO 反演技术及其在深水砂岩储层中的应用[J].物探与化探,2018,42(1):161-165.http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1.19

Ling Y, Du X D, Cao S Y. FAVO inversion technique and its application to deep-water sandstone reservoir[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(1): 161-165. http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1.19

FAVO 反演技术及其在深水砂岩储层中的应用

凌云^{1,2}, 杜向东¹, 曹思远²

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 2. 中国石油大学 地球物理与信息工程学院, 北京 102249)

摘 要: 在 AVO 理论的基础上, 利用时频分析技术获得频率依赖的反射系数信息, 通过 FAVO (Frequency dependent AVO) 反演可以获得速度频散程度属性。由于地震波速度频散主要由孔隙流体的相关性, 该属性可以作为识别因子实现储层流体检测。笔者推导了 FAVO 技术的反演公式, 并选择刚果地区深水砂岩储层作为目标, 通过一维数值模型和二维实际剖面, 进行了含气砂体刻画和含气性识别研究。反演结果与钻井吻合程度较好, 证明了该技术在深水砂岩储层流体识别中的有效性。

关键词: 频散介质; 储层预测; FAVO 反演; 无井; 深水砂岩储层

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2018)01-0161-05

0 引言

随着石油天然气勘探从陆地走向海洋, “深水”这个词也逐渐走入勘探工作者的视野, 全球深水油气勘探开发以及储量产量都在逐年显著增长, 深水油气成为未来最重要的发展方向, 具有广阔的前景。深水沉积砂岩是深水油气勘探开发的热点, 虽然在沉积机理上仍然存在争议, 但深水砂岩沉积体在地震资料上较好识别, 表现出明显的强震幅特征^[1]。但由于深水沉积机理的复杂性, 在少井尤其是无井地区, 很多地球物理储层技术应用效果较差, 对深水砂岩沉积体的内部刻画和烃类检测存在很大的难度, 所以寻找一种适用于无井地区的储层刻画和油气检测技术十分必要。

储层的孔隙介质特征已经为人们熟识, 储层因多孔结构及其填充的流体, 在地震波勘探中表现出不同的响应, 这些响应的差异一直是地震储层预测和流体识别的基础。近几年的研究证实: 在地震波传播经过储层时, 孔隙中流体的流动是造成地震波

衰减和频散的主要原因^[2-4]。Chapman 等^[5-9]基于不同尺度的喷射流动机制, 定义了一个简化的近似的等效频散模型, 用于描述地震频带地震波的频散和衰减特征。理论通过 Gassmann 方程, 计算不含流体时的低频极限, 而高频极限来自于为包含流体(气, 水)属性的等效介质。所以, 频散就定义为低频极限到高频极限的过渡, 并定义了时间尺度参数 τ 来控制频散出现的时间。填充不同孔隙流体的储层, 表现出差异性的频散程度, 可以作为指示因子进行烃类检测。该理论有效地描述了地震频带的强频散现象, 并对基于反射系数的 FAVO 反演技术研究提供了理论基础^[9]。国内许多学者对这项技术进行了深入的研究, 取得了一系列的成果^[10-17]。

文中, 我们使用 Chapman 提出的频散介质模型, 在叠前资料的基础上, 通过 FAVO 反演技术, 提取了刚果地区深水沉积砂岩储层的频散程度。通过一维模型建模验证了该技术在该地区的有效性, 并通过靶区二维剖面的反演结果对储层内部结构和含气性进行了预测, 预测结果与已知井吻合度较高, 说明该方法应用效果良好。

1 含油气孔隙介质的频率各向异性

含油气孔隙介质模型有很多的构建方式, Chapman 给出了一种由时间尺度参数 τ 控制的频散介质模型^[5-7]。使用岩石的基本物理参数来定义一个模型, 假定密度和速度为孔隙度 φ 的函数, 并可以在波传播过程中的特定条件下获得, 如在特征角频率为 ω_0 , 流体体积模量为 K_f^0 , 时间尺度参数为 τ_0 以及裂隙密度为 ε_0 时, P 波速度 v_p 和 S 波速度 v_s 可以定义为:

$$\begin{aligned} v_p &= v_p(\varphi | \omega = \omega_0, K_f = K_f^0, \varepsilon = \varepsilon_0, \tau = \tau_0), \\ v_s &= v_s(\varphi | \omega = \omega_0, K_f = K_f^0, \varepsilon = \varepsilon_0, \tau = \tau_0), \end{aligned} \quad (1)$$

因此弹性刚度张量可以定义为:

$$C_{ijkl} = C_{ijkl}^{\text{iso}}(\lambda, \mu) - C_{ijkl}^1(\lambda, \mu, \omega, \tau, \varphi, \varepsilon, K_f), \quad (2)$$

其中, 第 1 部分为各向同性条件下介质的弹性参数, 第 2 部分为孔隙和裂隙控制的弹性参数。使用 $\bar{\lambda}$ $\bar{\mu}$ 代表参考弹性常数, 其表达式为:

$$\begin{aligned} \bar{\lambda} &= \rho v_p^2(\varphi) - 2\rho v_s^2(\varphi), \\ \bar{\mu} &= \rho v_s^2(\varphi). \end{aligned} \quad (3)$$

所以, 参考的弹性参数 $C_{ijkl}(\Lambda, M)$ 表达式可以写为:

$$C_{ijkl}(\Lambda, M) = C_{ijkl}^{\text{iso}}(\bar{\lambda}, \bar{\mu}) + C^1(\bar{\lambda}, \bar{\mu}, \omega_0, \tau_0, \varphi, \varepsilon_0, K_f^0). \quad (4)$$

对于任意频率, 流体体积模量, 时间尺度, 弹性参数的最终表达式可以定义为:

$$C_{ijkl} = C_{ijkl}^{\text{iso}}(\Lambda, M) - C^1(\lambda, \mu, \omega, \tau, \varphi, \varepsilon, K_f), \quad (5)$$

这里, 时间尺度参数 τ 的定义为:

$$\tau = \frac{\eta c_v(1 + K_c)}{6k\zeta\sigma_c}; \quad (6)$$

ζ 为特征粒度; c_v 为裂隙体积,

$$c_v = \frac{4}{3}\pi a^3 r; \quad (7)$$

$$\sigma_c = \frac{\pi\mu r}{2(1 - \nu)}; \quad (8)$$

$$K_c = \frac{\pi}{2(1 - \nu)} \frac{\mu r}{K_f}. \quad (9)$$

a 为裂隙半径, K_c 为裂隙体积模量, r 为裂隙纵横比, ν 为泊松比, K_f 为流体体积模量。在实际建模中, 时间尺度参数 τ 可以通过岩心岩石物理实验测定获得^[18], 但相关参数较多, 测算难度很大, 很难得到一个最精准的参数。可以通过模拟数据与实际资料拟合, 测算一个误差最小的值作为时间尺度参数^[19]。

2 FAVO 反演技术

Zoeppritz 方程是 AVO 技术进行储层预测的基本理论, 但由于过于复杂难以直接利用, 我们使用 Smith 近似方程:

$$R(\theta) \approx A(\theta) \frac{\Delta v_p}{v_p} + B(\theta) \frac{\Delta v_s}{v_s}, \quad (10)$$

其中, R 为反射系数, θ 为入射角, Δv_p 和 Δv_s 分别代表纵波速度和横波速度的改变量, A 和 B 为与入射角相关的参数, 其表达式如下:

$$A(\theta) = \frac{5}{8} - \frac{1}{2} \frac{v_s^2}{v_p^2} \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \tan^2 \theta, \quad (11)$$

$$B(\theta) = -4 \frac{v_s^2}{v_p^2} \sin^2 \theta. \quad (12)$$

如果反射界面两侧存在速度频散特征, 我们可以假设其反射系数也是频率的函数, 则求取反射系数公式对频率 f 的导数 $R(\theta, f)$ 即得到 FAVO 近似公式^[7]:

$$R(\theta, f) \approx A(\theta) \frac{\Delta v_p}{v_p}(f) + B(\theta) \frac{\Delta v_s}{v_s}(f). \quad (13)$$

该公式在传统的 AVO 近似公式中引入了频率因素。

进一步将式中两项 $\frac{\Delta v_p}{v_p}(f_i)$ 和 $\frac{\Delta v_s}{v_s}(f_i)$ 在频率 f_0 处展开为泰勒级数:

$$\begin{aligned} R(\theta, f) &\approx A(\theta) \frac{\Delta v_p}{v_p}(f_0) + (f - f_0) A(\theta) I_a \\ &+ B(\theta) \frac{\Delta v_s}{v_s}(f_0) + (f - f_0) B(\theta) I_b, \end{aligned} \quad (14)$$

其中参数 I_a 和 I_b 为频散程度, 定义为 f_0 处阻抗的导数, 其表达式为:

$$I_a = \frac{d}{df} \left(\frac{\Delta v_p}{v_p} \right), \quad I_b = \frac{d}{df} \left(\frac{\Delta v_s}{v_s} \right). \quad (15)$$

经过分频处理, 谱均衡, 以上公式可简化为:

$$R = E \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix},$$

其中:

$$E = \begin{bmatrix} (f_1 - f_0) A(t, 1) & (f_1 - f_0) B(t, 1) \\ \vdots & \vdots \\ (f_m - f_0) A(t, 1) & (f_m - f_0) B(t, 1) \\ \vdots & \vdots \\ (f_1 - f_0) A(t, n) & (f_1 - f_0) B(t, n) \\ \vdots & \vdots \\ (f_m - f_0) A(t, n) & (f_m - f_0) B(t, n) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

最后,通过最小二乘反演可以得到 I_a 和 I_b :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = (\mathbf{E}^T \mathbf{E})^{-1} \mathbf{E}^T \mathbf{R}。$$

(17)

3 在刚果深水砂岩储层中的应用

刚果地区靶区位于非洲西海岸,是典型的第三系浊积砂岩储层^[20],为了验证该技术的可靠性,我们选择了刚果地区的深水砂岩储层进行含气性预测。首先进行目标区的模型试验。使用目标储层的岩心数据建立了 3 个岩石物理模型,分别是围岩、含气砂岩和含水砂岩,其中围岩建立的是弹性模型,含气砂岩和含水砂岩建立的是频散介质模型;经过测试,选定 τ 的取值为 5×10^{-5} ,其他参数见表 1。

表 1 储层模型参数				
	纵波速度	横波速度	密度	孔隙度
	m/s	m/s	kg/m ³	%
围岩	2200	1000	2150	
含气砂岩	1200	700	2080	30
含水砂岩	1500	850	2120	30

根据前文中给出的 Chapman 频散介质模型的建模公式,计算得到的刚果地区第三系浊积砂岩的纵波相速度随频率变化曲线如图 1 所示,其中红色实线为含气砂岩,黑色虚线为含水砂岩。从图中可以看出,含水砂岩的纵波速度要高于含气砂岩,但含气砂岩纵波速度的频散程度要远大于含水砂岩,从频散介质建模结果上看,FAVO 反演技术在刚果地区深水砂岩储层具有应用的基础。

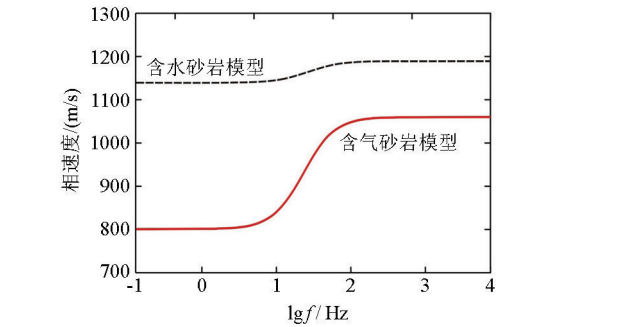
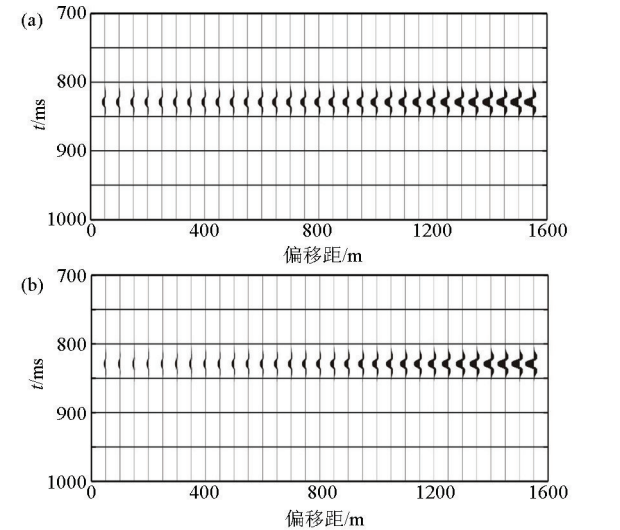


图 1 纵波相速度随频率变化曲线

在建立的岩石物理模型基础上,构建了两个简单的一维双层模型来验证 FAVO 反演技术,两个模型的上层介质均为围岩,下层介质分别为上文中建立的含气砂岩和含水砂岩模型。使用主频为 40 Hz 的 Ricker 子波与反射系数卷积,分别获得了两个模型的叠前道集记录,如图 2 所示,其中最大偏移距为 1 500 m,道间距为 50 m,采样间隔为 1 ms。对得到的

两个模型的正演记录进行 FAVO 反演,得到的纵波频散程度曲线如图 3 所示,其中红色实线为含气砂岩模型,黑色虚线为含水砂岩模型。在反演结果中,含气砂岩模型的纵波频散程度明确大于含水砂岩,与我们建立的频散介质模型保持一致。通过频散介质建模、正演模拟和 FAVO 反演的整个流程,可以有效地验证纵波频散程度作为含气检测因子的可行性,验证了 FAVO 反演在刚果深水砂岩储层的有效性。



a—含气砂岩模型;b—含水砂岩模型

图 2 频散模型正演模拟数据

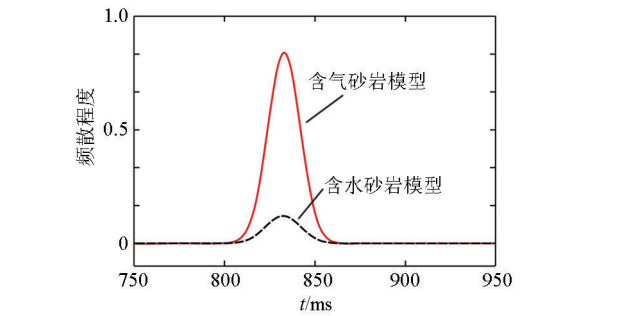


图 3 纵波频散程度曲线

在经过模型试验验证后,选择了一段刚果深水砂岩的典型剖面进行 FAVO 反演技术应用,如图 4 所示。刚果地区第三系深水浊积砂岩储层,具有沉积体外部特征明显、内部结构复杂的特点,由于深水钻井成本较高,测井资料较少,如果能在少井或无井条件下,较精准地预测沉积体内部砂岩展布及其含气性,具有极大的意义。该靶区已有钻井 W-1,图中插入测井曲线为含水饱和度曲线,钻遇含气砂岩两套,第一套 Gas1 厚度为 5 m,含水饱和度为 0.23;第二套 Gas2 厚度为 6.6 m,含水饱和度为 0.06。文中在进行 FAVO 反演时,未使用任何测井数据,w-1 井

仅作为方法验证使用。

通过对靶区叠前资料进行分析,截取 $5^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 角度道集作为数据体,根据数据体频谱特征,选择 20~70 Hz 作为反演频率范围,主频为 40 Hz。选择合适区域作为参考层,对数据体进行分频,进行谱均衡消除子波效应,最后反演得到的 FAVO 反演剖面如图

5 所示,红色箭头代表砂岩 Gas1,黄色箭头代表 Gas2,箭头分别指向砂岩的顶底。反演结果较好地指示了两套含气砂岩的顶底,与钻井结果吻合度较高。FAVO 技术在无井的条件下有效地预测了刚果地区深水含气砂岩并较好地刻画砂岩层在沉积体内部的横向展布。

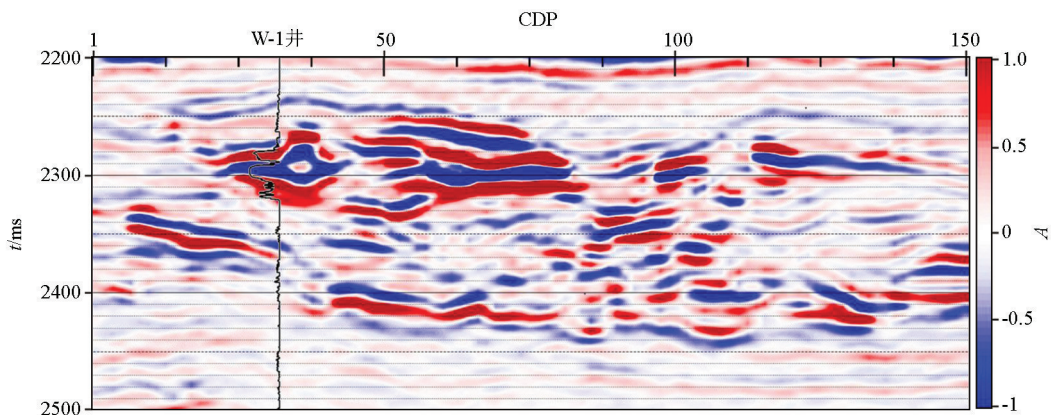
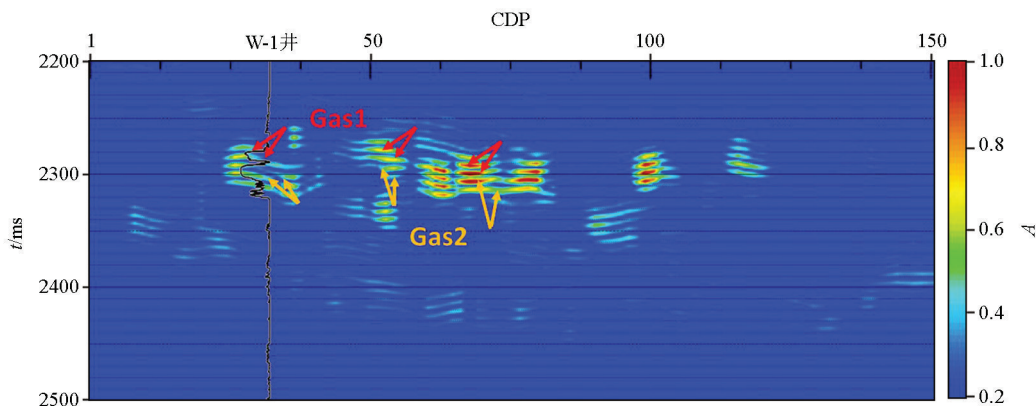


图 4 刚果地区某储层叠后剖面及 W-1 井含水饱和度测井曲线



箭头分别指向砂岩层顶底,红色代表含气砂岩层 Gas1,黄色代表含气砂岩层 Gas2

图 5 纵波速度频散程度剖面

4 结论与认识

文中阐述了 FAVO 反演的技术流程,通过正建模模拟和实际资料反演计算,对该技术进行了深入的研究,并获得以下结论:

1) 速度频散程度作为一种新的流体识别因子,在储层含气砂岩体刻画、含气性识别上具有较好的效果,是对传统储层预测技术的有效补充。

2) 对刚果地区深水储层进行了应用研究,成功预测了两套含气砂岩,并刻画了两套砂岩在沉积体中的横向展布。刚果地区储层代表非洲西海岸中典型的第三系浊积砂岩储层,文中使用该靶区进行 FAVO 反演技术研究,是该技术继续应用于西非深水砂岩储层的有力支持和保证。

3) FAVO 反演技术不依赖于测井资料,可以在无井的条件下实现反演,获得精度较高的反演结果,在海洋深水地震勘探中具有一定的推广价值。

参考文献:

- [1] 张金淼,韩文明,范洪耀,等.西非深水地震勘探关键技术研究及应用实践[J].中国海上油气,2013,25(6):43-47.
- [2] White J E.Computed seismic speeds and attenuation in rocks with partial gas saturation[J].Geophysics,1975,40(2):224-232.
- [3] Johnson D L.Theory of frequency dependent acoustics in patchy-saturated porous media[J].The Journal of the Acoustical Society of America,2001,110(2):682-694.
- [4] Pride S R,Berryman J G,Harris J M.Seismic attenuation due to wave-induced flow[J].Journal of Geophysical Research,2004,109(B1):B01201.
- [5] Chapman M,Zatsepin S V,Crampin S.Derivation of a microstructural poroelastic model[J].Geophysical Journal International,

2002, 151(2):427-451.

[6] Chapman M. Frequency-dependent anisotropy due to meso-scale fractures in the presence of equant porosity[J]. Geophysical Prospecting, 2003, 51(1):369-379.

[7] Chapman M, Maultzsch S, Liu E R, et al. The effect of fluid saturation in an anisotropic multi-scale equant porosity model[J]. Journal of Applied Geophysics, 2003, 54(3-4):191-202.

[8] 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.

[9] Wilson A. Theory and methods of frequency-dependent AVO inversion[D]. England: University of Edinburgh, 2010.

[10] 陈小宏, 田立新, 黄饶. 地震分频 AVO 方法研究现状与展望[J]. 海相油气地质, 2009, 14(4):60-66.

[11] 刘凤, 栾锡武. 基于叠前分频的 AVO 分析在天然气水合物勘探中的应用[C]//中国地球物理 2010——中国地球物理学会第二十六届年会、中国地震学会第十三次学术大会论文集. 北京: 中国地震学会, 2010:859-863.

[12] 轩义华, 秦成岗, 汪瑞良, 等. 分频 AVO 技术在珠江口盆地番禺天然气区含气性分析中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1):79-84.

[13] 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.

[14] 刘凤. 基于叠前分频的 AVO 分析在天然气水合物识别中的应用[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2011.

[15] 宁媛丽. 频散介质基于反演谱分解的 AVO 方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.

[16] 程冰洁, 徐天吉, 李曙光. 频变 AVO 含气性识别技术研究与应用[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2):608-613.

[17] 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.

[18] Tillotson P, Chapman M, Best A I, et al. Observations of fluid-dependent shear-wave splitting in synthetic porous rocks with aligned penny-shaped fractures[J]. Geophysical Prospecting, 2011, 59(1):111-119.

[19] Maultzsch S, Chapman M, Liu E R, et al. Modelling frequency-dependent seismic anisotropy in fluid-saturated rock with aligned fractures: implication of fracture size estimation from anisotropic measurements[J]. Geophysical Prospecting, 2003, 51(5):381-392.

[20] 刘琼, 陶维祥, 于水, 等. 西非下刚果—刚果扇盆地圈闭类型和分布特征[J]. 地质科技情报, 2013, 32(3):107-112, 117.

FAVO inversion technique and its application to deep-water sandstone reservoir

LING Yun^{1,2}, DU Xiang-Dong¹, CAO Si-Yuan²

(1. CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China; 2. College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The frequency dependent reflection coefficient can be obtained by time frequency analysis, based on the AVO theory. Using FAVO (Frequency dependent AVO) inversion technique, the authors obtained the property of velocity dispersion degree. Because of the correlation between the velocity dispersion and pore fluid, the property can be used in fluid detection in the reservoir as an identification factor. In this paper, the authors derived the inversion formula and chose the deep-water sandstone reservoir as the research target. The research on gas sand-body characterization and gas content identification was based on 1D numerical model and 2D real section. The inversion results are well coincident with the drilling results, which shows the effectiveness of the technique in fluid identification of deep-water sandstone reservoirs.

Key words: dispersion media; reservoir prediction; FAVO inversion; well-free; deepwater sandstone reservoir

(本文编辑:叶佩)