

富有机质页岩微裂缝地震响应特征

——以长宁示范区宁201井为例

高博乐^{1,2}, 潘仁芳^{1,2}, 金吉能^{1,2}, 张 鉴³, 赵圣贤³, 鄢 杰³

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100; 2. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 3. 中国石油 西南油气田分公司, 四川 成都 610000)

摘要:为明确四川盆地长宁示范区龙马溪组-五峰组所发育的构造微裂缝密度和走向对富有机质页岩地震响应特征的影响,基于长宁示范区宁201井富有机质页岩钻井岩心资料建立地质模型,利用各向异性HTI介质计算地层反射系数,开展地震AVAZ正演模拟,结合研究区地震勘探资料对比验证,分析该井富有机质页岩微裂缝地震响应特征。研究表明:①富有机质页岩微裂缝的地震识别受到地震资料的入射角、方位角以及主频控制。地震资料入射角控制不同微裂缝密度对振幅造成的差异性,方位角控制微裂缝走向的识别能力,主频保证振幅不会受到地震波调谐效应的影响;②随着地震波传播方向与裂缝面法向的夹角增大,振幅值逐渐降低,在夹角为90°时达到最低。平行于微裂缝走向的方位角振幅不受微裂缝密度变化的影响,垂直于裂缝面方位角振幅随着微裂缝密度增大而增大。从富有机质页岩微裂缝识别的角度来看,研究结果可以为长宁示范区后期富有机质页岩微裂缝地震解释工作提供依据。

关键词:地震响应特征;各向异性;微裂缝;富有机质页岩;龙马溪组;长宁示范区;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristic analysis of seismic response of micro-fractures in organic-rich shale: A case study of Well Ning201 in the Changning demonstration zone

Gao Bole^{1,2}, Pan Renfang^{1,2}, Jin Jineng^{1,2}, Zhang Jian³, Zhao Shengxian³, Yan Jie³

[1. Key Laboratory of Oil and Gas Resources and Exploration Technology (Yangtze University), Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 3. Southwest Oil & Gas Field Branch Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610000, China]

Abstract: In order to make it clear how the density and strike of structural micro-fractures affect the seismic response features of organic-rich shale in Longmaxi-Wufeng Formations distributed in Changning demonstration zone, Sichuan Basin, we carried out the AVAZ forward modelling based on the geologic model built by the coring data obtained from the drilling of organic-rich shale in Well Ning201 and the reflection coefficients calculated by HTI anisotropy media. Meanwhile, the seismic response characteristics of the micro-fractures in organic-rich shales from the well were analyzed combined with the contrast and verification of seismic exploration data in the research area. The results show that: on the one hand, the seismic identification of micro-fractures in organic-rich shale is controlled by incident angle, azimuth and dominant frequency of the seismic data. The incident angles determine the amplitude difference caused by micro-fracture densities, the azimuth affects the identification of micro-fracture strikes, while the dominant frequency ensures that the tuning effect of seismic waves makes no difference to amplitude. On the other hand, the amplitude decreases as the included angle between propagation direction of the seismic wave and the normal direction of the fracture surface increases, and reaches the minimum when the included angle is 90°. The amplitude of azimuth parallel to the micro-fracture strike shall not be affected by the variation of micro-fracture density, while the amplitude of azimuth perpendicular to the fracture surface increases with the increase of micro-fracture density. Overall, the research results may serve as a basis for seismic interpretation later of micro-fractures in the organic-rich shale of Changning demonstration area.

收稿日期:2018-12-12;修订日期:2020-01-25。

第一作者简介:高博乐(1989—),男,博士研究生,矿产普查与勘探、地球物理储层表征。E-mail:gaobole@foxmail.com。

通讯作者简介:潘仁芳(1962—),男,教授、博士生导师,地球物理储层表征。E-mail:rfpan@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05063002-006);国家自然科学基金青年基金项目(41804120)。

Key words: seismic response characteristics, anisotropy, micro-fracture, organic-rich shale, Longmaxi Formation, Changning demonstration zone, Sichuan Basin

富有机质页岩中发育的微裂缝不仅在天然气储集过程中有助于游离气聚集和吸附气解吸^[1],也是天然气运移和渗流的重要通道。在页岩气开发的储集改造过程中,构造微裂缝会对起裂压力产生影响^[2],形成人造裂缝网格,增大储集体裂缝体积,提高单井产量和最终采收率^[3]。四川盆地志留系龙马溪组-奥陶系五峰组页岩气资源丰富,但不同区块单井产量差异较大,主要是因为“甜点区”微裂缝的发育情况对人工造缝效果影响甚大。目前长宁示范区龙马溪组-五峰组页岩微裂缝研究主要集中在微裂缝微裂缝扩展规律^[4]、微裂缝应力敏感性^[5]和微裂缝发育规律^[6]等方面,但对不同微裂缝密度以及微裂缝的走向所引起的地震响应特征变化尚无系统认识。

在小尺度地质体的刻画方面,Rutherford(1989),Castagna(1994)和 Avseth(2001)等知名学者最早开始利用振幅随偏移距变化(AVO)的特性对岩性和孔隙流体类型进行了有效预测^[7-10]。但随着页岩气勘探开发的深入,曾经总结的小尺度地质体的 AVO 特征无

法满足微裂缝识别需求,因此利用微裂缝自身的方向性所造成振幅随方位角变化(AVAZ)的特征来刻画微裂缝密度和走向成为页岩气勘探开发的重点。

本文以四川盆地长宁示范区宁201井龙马溪组-五峰组富有机质页岩为例,构建单井地质模型,利用HTI等效介质理论和地震建模手段,建立多频多方位入射角叠前地震道集模型。这些地震模型主要用于:①了解在页岩气勘探、开发和生产中不同频率地震数据对微裂缝识别的能力;②利用不同入射角和不同方位角的地震数据组合来解释富有机质页岩中微裂缝发育情况并改善地震解释工作;③为长宁地区未来进行 AVAZ 反演预测微裂缝发育情况提供理论支撑。

1 地质背景及地层模型设置

1.1 区域地质背景

长宁示范区位于四川盆地西缘(图1),地处四川盆地与蜀南低陡褶皱带两个区域的结合部位,整体表

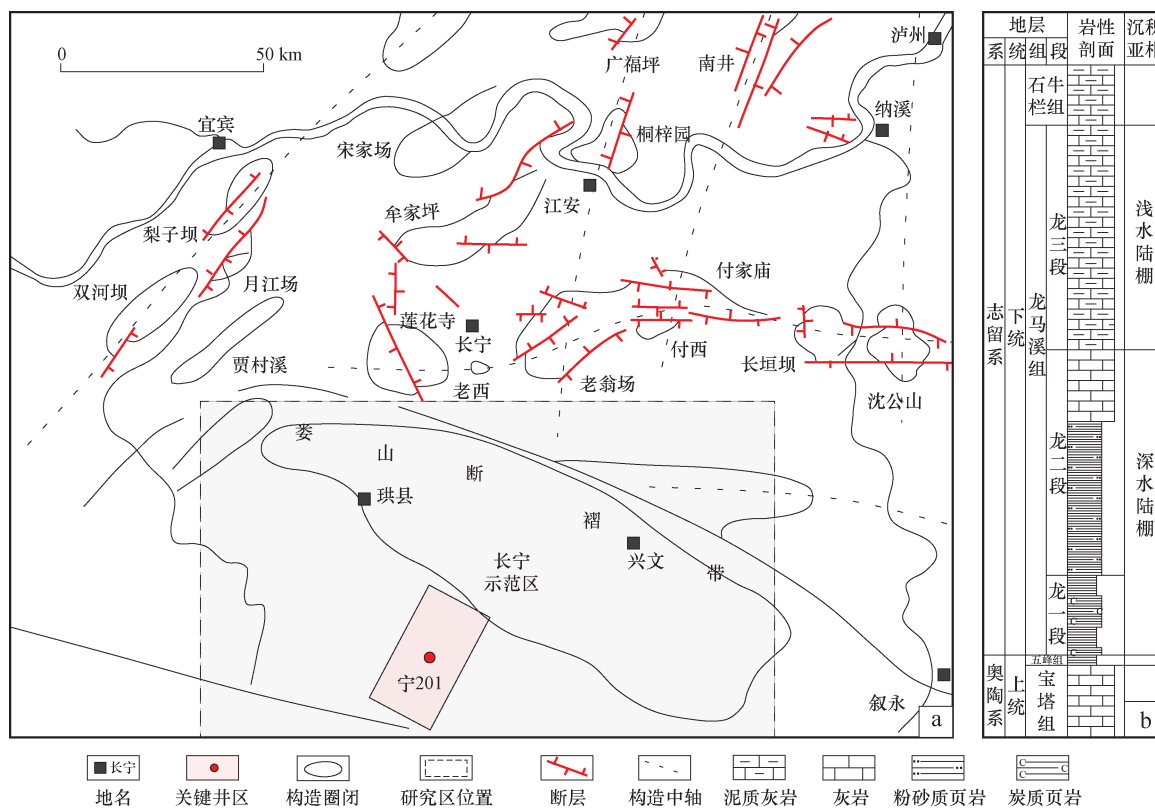


图1 四川盆地宁201井区地质概况

Fig. 1 Geology of the Well Ning201 area in Sichuan Basin

a. 宁201井工区位置示意图; b. 宁201井地层综合柱状图

现出纵横错落的构造格局。研究目标井宁 201 井位于珙县以东,兴文县西南侧,井点周缘构造样式相对简单,受构造影响较小,地层分布连贯且厚度及埋深变化较小(图 2)。

龙马溪组页岩为浅海相碎屑岩,龙马溪组上覆地层为石牛栏组深灰色、灰绿色泥灰岩,龙马溪组上部为灰色、深灰色灰岩夹深褐色泥质灰岩,中部为黑灰色粉砂质页岩、深褐色泥晶灰岩,下部为深灰色、黑灰色、灰黑色、黑色页岩;上奥陶统五峰组为黑色页岩,底部为宝塔组灰岩(图 1)。

1.2 矿物特征及岩相分类

宁 201 井龙马溪组富有机质页岩各小层段内岩心矿物含量纵向变化较大。其中龙一段一亚段 2 小层为黑色页岩,石英+长石矿物含量较高,粘土矿物与碳酸盐岩矿物含量相当;1 小层为黑色页岩,石英+长石矿物含量较高,粘土矿物含量与碳酸盐岩矿物相当;五峰组为黑色页岩,石英+长石矿物与粘土矿物含量相当,碳酸盐岩矿物略低。

三角图分析结果显示岩性可细分为 9 类(图 3),

分别为硅质页岩、钙质页岩、粘土质页岩、硅质岩、粘土岩、灰岩(白云岩)、钙质硅质混合页岩、粘土质硅质混合页岩、粘土质钙质混合页岩。据王超等^[11]岩相类型划分方案,2 小层为硅质页岩,1 小层为硅质钙质页岩和硅质页岩,五峰组为硅质页岩和混合页岩,具体矿物含量及岩相分类总结于表 1。

1.3 储层微裂缝特征

微裂缝成因的控制因素复杂,主要受内因和外因两方面控制,外因主要包括构造应力、沉积成岩作用以及生烃增压,内因包括有岩相和矿物组成等^[12]。汪虎等^[13]从内因和外因两方面将微裂缝总结为构造缝、有机质演化异常压力缝、成岩收缩缝、贴粒缝和层间页理缝。

富有机质页岩在地层中受力可分为上覆岩层压力、侧向最大应力和侧向最小应力,其中上覆岩层压力是最大主应力,侧向最小应力是最小主应力。按岩石力学特征来说,构造缝一般垂直于最小主应力,因此富有机质页岩的构造缝通常应与岩层呈垂直状态^[14],在宁 201 井所获得的各段岩心中(13~28 cm)也常见垂直于地层的微裂缝发育(表 1)。

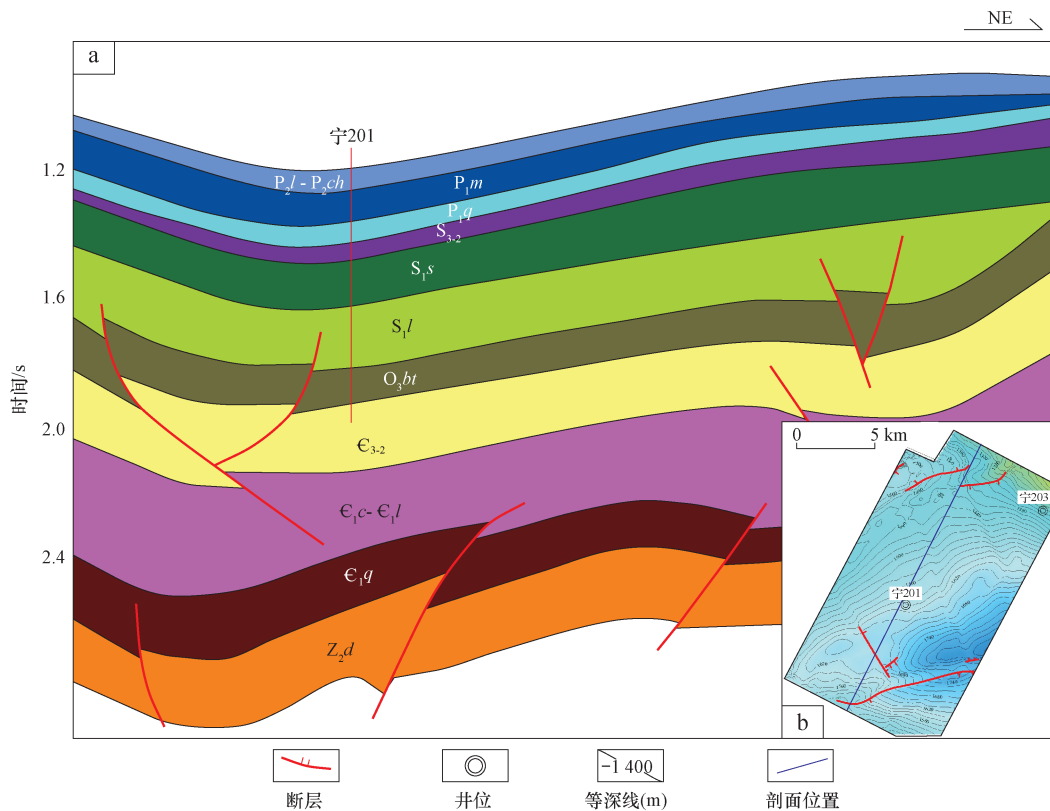


图 2 四川盆地宁 201 井区构造特征

Fig. 2 Structural characteristics of Well Ning201 in Sichuan Basin

a. 过宁 201 井构造剖面; b. 宁 201 井区构造平面图

P_2l-P_2ch . 龙潭组-梁山组; P_1m . 茅口组; P_1q . 栖霞组; S_{3-2} . 上-中志留统; S_1s . 石牛栏组; S_1l . 龙马溪组; O_3bt . 宝塔组; E_{3-2} . 上-中寒武统; $E_{1c}-E_{1l}$. 沧浪铺组-龙王庙组; E_{1q} . 筇竹寺组; Z_2d . 灯影组

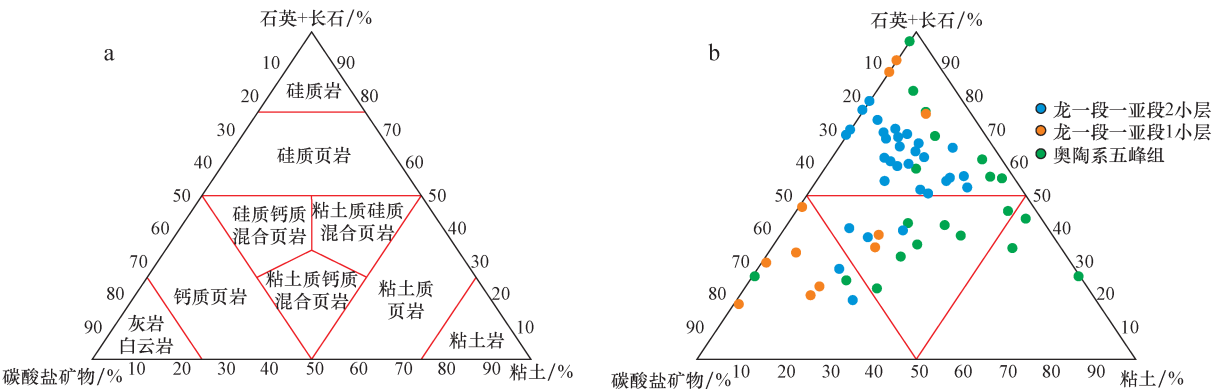


图 3 四川盆地宁 201 井龙马溪组富有机质页岩岩心矿物分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of minerals in the organic-rich shale core from Well Ning201 in the Longmaxi Formation, Sichuan Basin
a. 岩相解释图版; b. 富有机质页岩段岩心矿物分布三角图

表 1 四川盆地宁 201 井龙马溪组地质参数

Table 1 Geological parameters of Well Ning201 in the Longmaxi Formation, Sichuan Basin

层号	岩性	矿物含量/%			岩相	构造缝参数		
		石英 + 长石	粘土矿物	碳酸盐矿物		数量	长度/mm	宽度/mm
2 小层	黑灰色页岩	50 ~ 80	40 ~ 60	20 ~ 50	硅质页岩	2	100 ~ 120	0.1 ~ 0.2
1 小层	黑色页岩	20 ~ 90	20 ~ 50	10 ~ 80	硅质钙质页岩、硅质页岩	1	260	0.2
五峰组	黑色页岩	50 ~ 90	40 ~ 70	40 ~ 60	硅质页岩、混合页岩	1	80	0.2

在页岩气储层压裂改造中主要针对与层间页理缝相垂直的构造缝进行压力改造,使其与天然裂缝形成裂缝网格^[15],因此可以认为那些构造缝的发育情况是地震预测研究的重点。

1.4 地层模型设置

在构建模型时需要提供地层分层方案作为模型的框架基础。鉴于页岩地层岩相平面分布均匀而纵向差

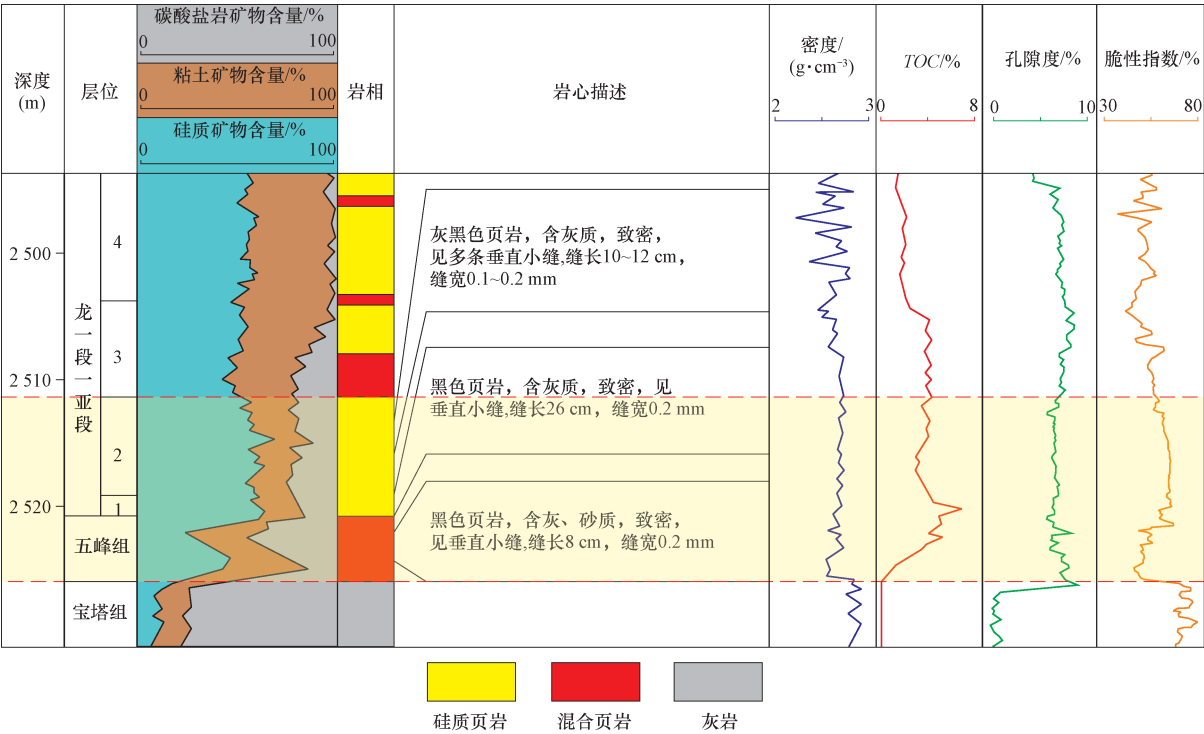


图 4 四川盆地宁 201 井龙马溪组富有机质页岩段地层综合柱状图

Fig. 4 A composite stratigraphic column of organic-rich shale from Well Ning201 in the Longmaxi Formation, Sichuan Basin

表2 四川盆地宁201井地震模型地球物理参数

Table 2 Geophysical parameters of seismic model obtained from Well Ning201, Sichuan Basin

层位	岩性	厚度/m	纵波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	横波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
3 小层	粉砂质页岩	20	3 823.9	2 389.7	2.55
2+1 小层 及五峰组	黑色页岩	14	4 275.4	2 628.7	2.47
宝塔组	灰岩	50	6 009.9	3 325.9	2.59

异较大的特殊性。如图4所示,在对宁201井实际分层方案设计中,将宁201井富有机质页岩上下约40 m的地层分成3个小段:①顶部,贫有机质硅质页岩和钙质页岩互层(即龙一段—亚段3小层);②目的层,富有机质硅质页岩、混合页岩(即2小层至五峰组);③底部,宝塔组灰色灰岩。具体模型参数设置见表2。

2 各向异性 HTI 介质反射系数

对于横向各项同性介质,一般采用 TI 介质(transverse isotropy)对各向异性进行描述。如图5a所示,当均匀层状裂缝发育时,可以认为是 VTI 介质(transverse isotropy with a vertical axis of symmetry);而与 VTI 相对的,含有垂直裂缝的均匀层状介质被称为 HTI 介质(transverse isotropy with a horizontal axis of symmetry),如图5b所示;当裂缝具有一定倾角或非水平排列时,可称为 TTI 介质(transverse isotropy with a tilt axis of symmetry),如图5c所示。

考虑到宁201井周缘富有机质页岩中的构造微裂缝倾角常见近垂直于地层,因此可将其看做是一种含有垂直裂缝的均匀层状介质,即 HTI 介质。

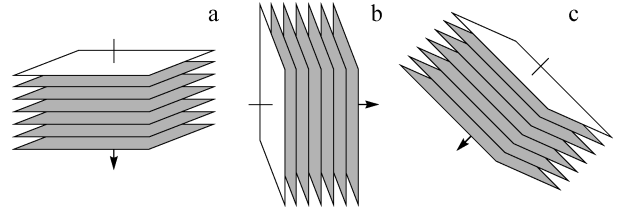


图5 TI 介质模型示意图

Fig. 5 Schematic programs showing the TI media models

a. VTI; b. HTI; c. TTI

2.1 Thomsen 各向异性参数及弹性参数计算

Thomsen 为了方便理论研究与实际应用给出了3个各向异性系数,即 ε , γ 和 δ , 他们是弹性系数的组合^[16-17]。其中, ε 约等于纵波水平速度与垂直速度的相对差别,其大小反映了各向异性的强弱; γ 表示横波各向异性^[18]; δ 指示纵波相速度曲线在对称轴方向曲率的大小^[16,19]。

Bakulin(2000)等根据 Hudson 理论,讨论了 HTI 介质 Thomsen 参数与裂缝密度 e 的关系^[20],认为当裂缝仅含气时:

$$\varepsilon^H \approx -\frac{8}{3}e \quad (1)$$

$$\gamma^H \approx -\frac{8e}{3(3-2g)} \quad (2)$$

$$\delta^H \approx -\frac{8}{3}e \left[1 + \frac{g(1-2g)}{(3-2g)(1-g)} \right] \quad (3)$$

式中: ε^H , γ^H , δ^H 分别为 HTI 介质下的 Thomsen 参数; g 为横、纵波速度比; e 为裂缝密度,无量纲。

其中微裂缝密度 e 的计算公式可写为:

$$e = Na^3/V \quad (4)$$

式中: N 为平均半径为 a 的裂缝在单位体积 V 中的数量。

通过上述认识,对 N201 井富有机质页岩微裂缝发育层段的微裂缝密度及 Thomsen 参数进行了计算,具体计算结果见表3。

表3 四川盆地宁201井 AVAZ 模型 Thomsen 参数

Table 3 Thomsen parameters of AVAZ model obtained from Well Ning201, Sichuan Basin

模型类型	地层类型	微裂缝密度	$\alpha/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\beta/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	ε^H	γ^H	δ^H
高微裂缝密度	盖层	—	3 823.9	2 389.7	2.55	—	—	—
	储层	0.013	4 275.4	2 628.7	2.47	-0.035	-0.020	-0.028
中微裂缝密度	盖层	—	3 823.9	2 389.7	2.55	—	—	—
	储层	0.006	4 275.4	2 628.7	2.47	-0.017	-0.010	-0.014
低微裂缝密度	盖层	—	3 823.9	2 389.7	2.55	—	—	—
	储层	0.004	4 275.4	2 628.7	2.47	-0.011	-0.010	-0.009

注: α 为介质纵波速度; β 为介质 SH 波速度; ρ 为介质密度。

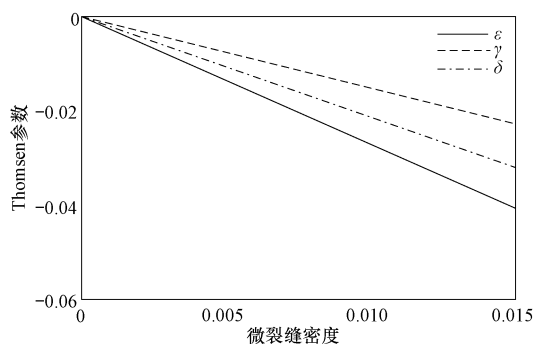


图6 四川盆地宁201井 HTI 介质 Thomsen 参数与微裂缝密度关系

Fig. 6 The relationship between Thomsen parameters and micro-fracture density in HTI media from Well Ning201, Sichuan Basin

图6为富有机质页岩不同裂缝密度时 Thomsen 各向异性参数的变化规律,当裂缝密度增大时,各向异性参数逐渐降低。

2.2 Rüger 公式反射系数计算

Rüger(1997)在各向同性 HTI 介质 P-P 波反射系数近似公式的基础上,给出了弱各向异性 HTI 介质 P-P 波反射系数近似公式^[21]:

$$R_p^{sym}(\theta, \varphi) = \frac{1}{2} \frac{\Delta Z}{Z} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta \alpha}{\alpha} - \left(\frac{2\beta}{\alpha} \right)^2 \frac{\Delta G}{G} + \left[\Delta \delta^V + 2 \left(\frac{2\beta}{\alpha} \right)^2 \Delta \gamma \right] \cos^2 \varphi \right\} \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \Delta \varepsilon^V \cos^4 \varphi + \Delta \delta^V \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \right) \sin^2 \theta \tan^2 \theta \quad (5)$$

式中: R_p^{sym} 为地层界面反射系数; θ 为入射角, ($^\circ$); φ 为方位角, ($^\circ$); α 为 HTI 介质各向同性面纵波速度, m/s; β 为 HTI 介质各项同性面 SH 波速度, m/s; Z 为纵波阻抗; G 为剪切模量, GPa; $\bar{\alpha}$ 和 $\bar{\beta}$ 代表上、下层参

数均值, m/s; Δ 为上、下两层参数差。

根据 Rüger 公式,利用 N201 井实测物性参数对富有机质页岩地层进行不同入射角和不同方位角情况的弱各向异性反射系数求取并分别求取了不同微裂缝密度下的弱各向异性反射系数(图7)。

图7中方位角为 90° 和 270° 时为微裂缝走向,富有机质页岩整体呈正反射特征,在入射角相同时,富有机质页岩反射系数随微裂缝密度增大而增加,且沿着微裂缝对称轴方向相对称(即方位角 0° 与 180°)。在入射角增大时,富有机质页岩在 0° 和 180° 扇形范围内对称的方位角中反射系数随入射角增大而增大,而 90° 和 270° 扇形范围内对称的方位角反射系数随入射角增大而降低。因此根据其含有的 AVAZ 特征,在研究中可以对微裂缝走向进行分析,同时可见反射系数能够在一定程度上指示微裂缝密度的变化,但是考虑到富有机质页岩厚度较薄,易受到子波频率的影响,因此还需要从地震振幅方面进行进一步的分析。

3 地震建模

3.1 正演模型建立

不同的主频模型可以代表不同勘探阶段的地震资料^[22],其中 15 Hz 主频模型代表勘探早期二维地震勘探阶段的地震资料,25 ~ 35 Hz 主频模型代表勘探中期常规三维地震资料,45 Hz 主频模型代表当油气田进入开发阶段后高分辨率三维地震资料。

考虑到页岩地层非均质性和地层发育特征纵向差异较大而横向差异较小,因此在构建地层模型时,忽略地层横向展布而直接建立 AVAZ 道集,为满足主题研究富有机质页岩在不同微裂缝密度下地震响应特征变

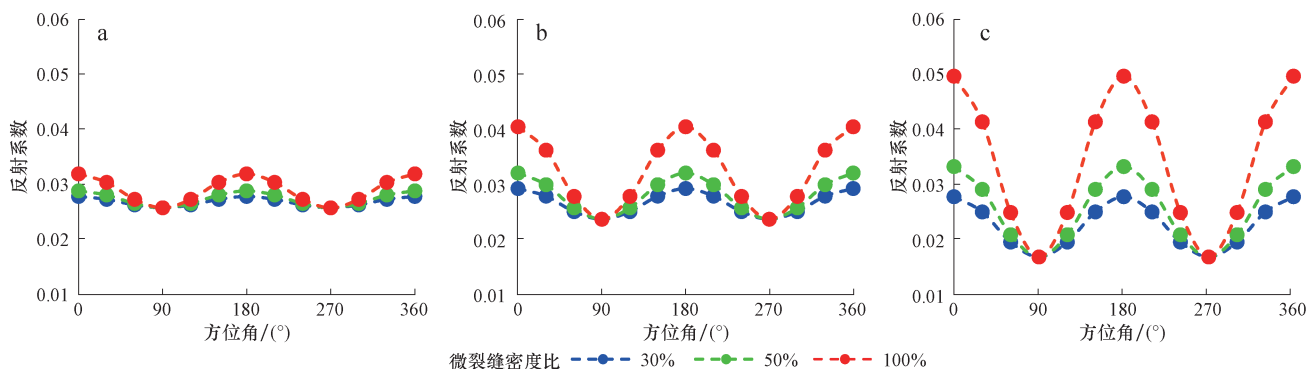


图7 四川盆地宁201井 AVAZ 模型反射系数变化趋势

Fig. 7 The variation trend of reflectance coefficients of AVAZ models obtained from Well Ning201, Sichuan Basin

a. 15° 入射角;b. 25° 入射角;c. 35° 入射角

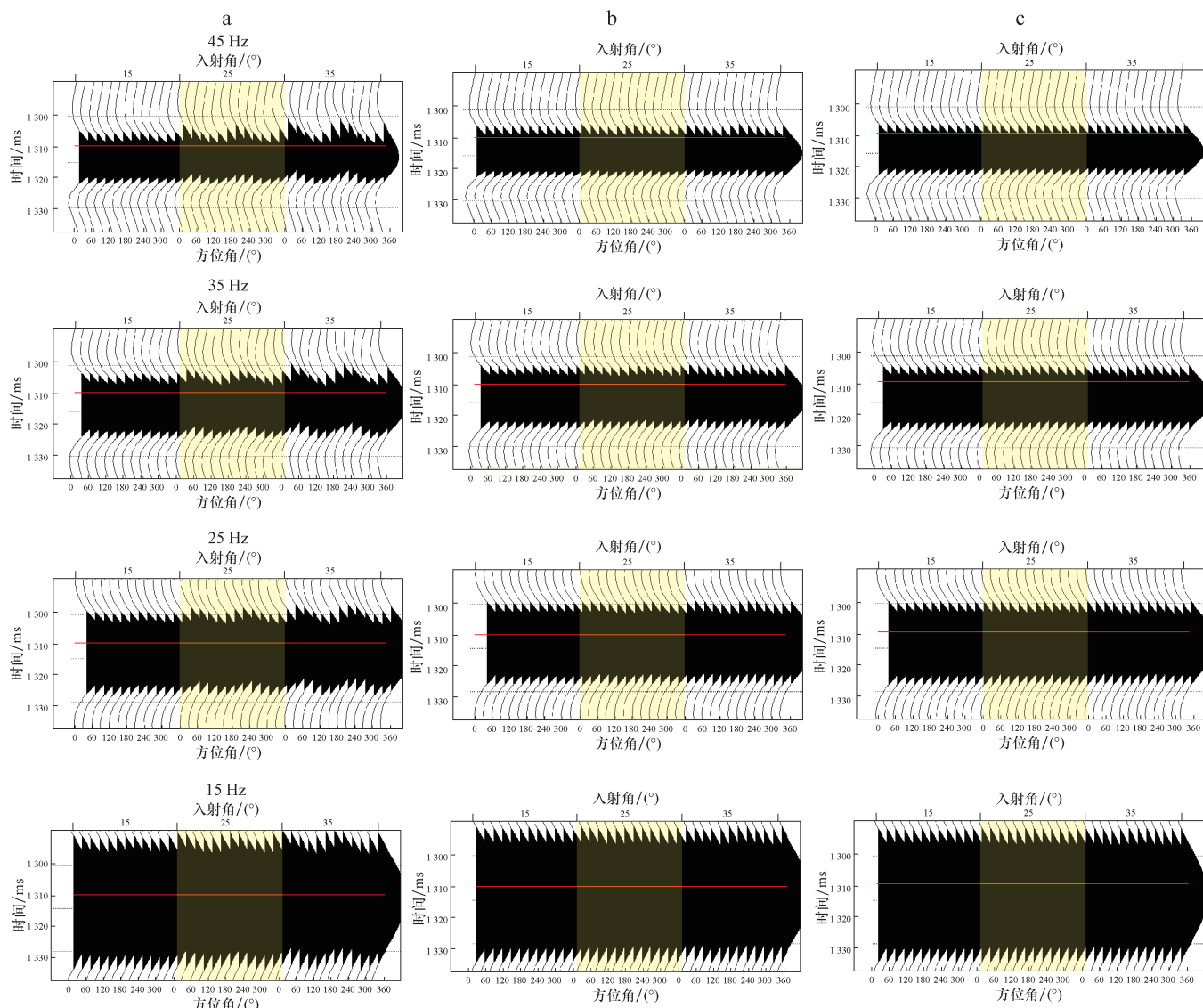


图8 四川盆地宁201井多频 AVAZ 正演模型

Fig. 8 The AVAZ forward modeling of multi-frequency obtained from Well Ning201, Sichuan Basin

a. 低微裂缝密度; b. 中微裂缝密度; c. 高微裂缝密度

化的需要,分别建立原始地层微裂缝密度模型,原始地层1/2微裂缝密度模型,原始地层1/3微裂缝密度模型共计4组分别为45 Hz主频、35 Hz主频、25 Hz主频和15 Hz主频的雷克子波 AVAZ 地震道集模型(图8),各模型均使用前文所述反射系数进行褶积计算并成图。

3.2 模型有效性

目前长宁地区已进入勘探晚期-开发早期阶段^[23],地震勘探资料为常规三维地震勘探阶段所获取,地震资料主频为25~30 Hz,目的层入射角为0°~21°,无方位角信息。

为检验反射系数计算的可靠性,应用反射系数同时制作了25 Hz主频的入射角道集和全入射角叠加模

型用以验证模型有效性。对比宁201井实测地震资料可见,在入射角道集中,实测道集上部为灰质页岩高速层与低速层转换产生的波谷响应,随着入射角的增大波谷响应逐渐降低,地层底部为低速层与宝塔组灰岩高速层转换的强波峰显示,道集振幅整体增强(图9a),入射角道集各反射界面呈现出与实测入射角道集相同的趋势(图9b);叠加剖面显示整个龙一段一亚段至五峰组整体地震响应表现为“宽波谷-强波峰”的特征(图9a),模型叠加剖面与实测剖面在各反射界面表现出同样特征(图9b)。

入射角道集与叠加剖面对比可见,地震模型与实测地震数据吻合程度较高,说明地震模型的构建思路和模拟效果符合实际地震勘探的特征,可以应用于微裂缝密度地震响应特征分析研究。

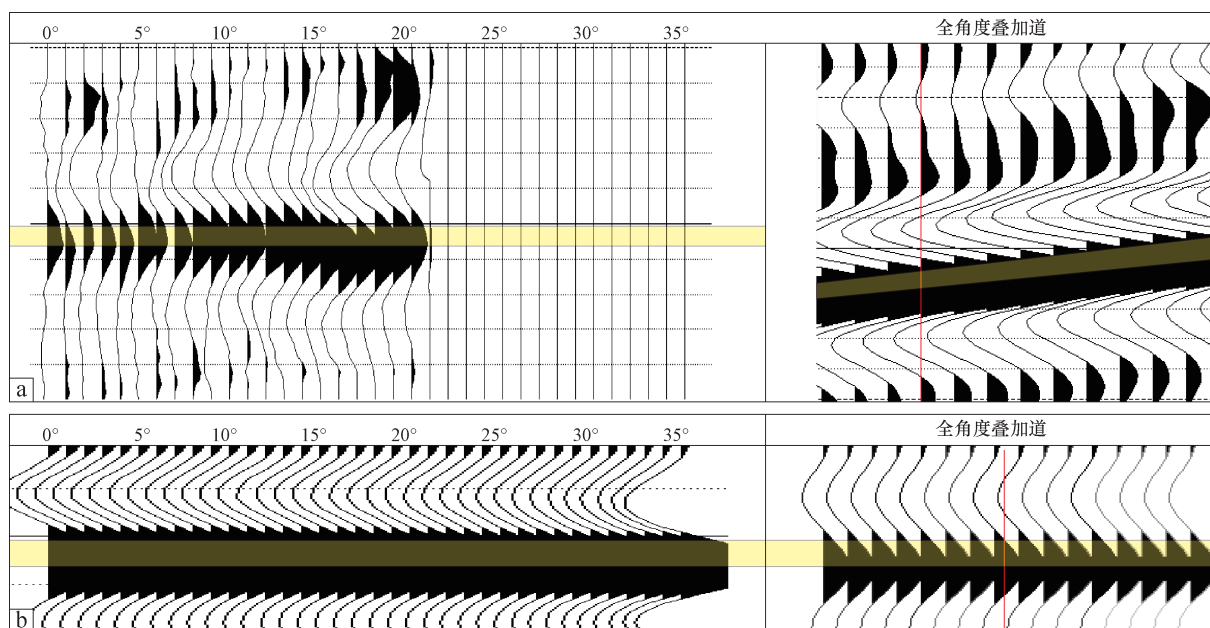


图 9 四川盆地宁 201 井实测地震道(a)与正演模型(b)对比

Fig. 9 Comparisons between seismic trace(a) and forward modeling(b) obtained from Well Ning201, Sichuan Basin

4 模型参数

4.1 不同入射角振幅变化特征

地震资料主频在合适范围时(35 ~ 45 Hz),当入射角增大时振幅强度随入射角逐渐增强。同时不同微裂缝密度之间振幅强度变化差异较为明显,但如图 10 可见,虽然随着微裂缝密度的增加振幅强度逐渐呈现出一定增强的趋势,但是这种趋势并不具有方向性,因此可以认为传统的 AVO 方法并无法对微裂缝走向进行分析。

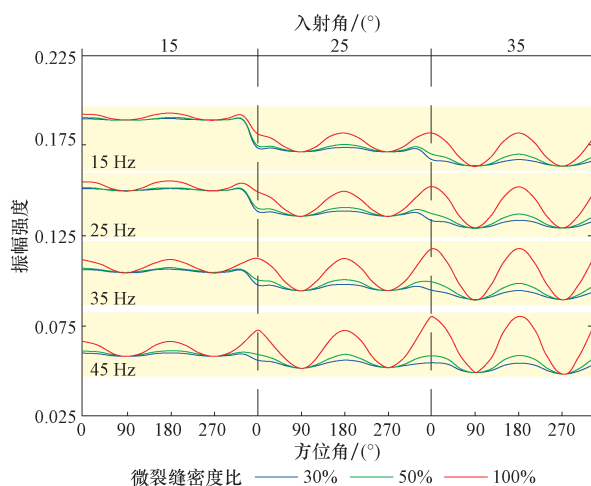


图 10 四川盆地宁 201 井 AVAZ 道集振幅属性分析

Fig. 10 The amplitude attribute analysis of AVAZ gather obtained from Well Ning201, Sichuan Basin

4.2 不同方位角振幅变化特征

在适当的主频范围和入射角范围内(35 ~ 45 Hz, 入射角大于 20°), AVAZ 道集在微裂缝不同方位角的振幅变化表现出极大的差异性。如图 10 所见,当地震波传播方向垂直于裂缝面法线时(即方位角为 90°和 270°),振幅基本不受微裂缝发育的影响。当地震波传播方向与裂缝面法线方向的夹角减小时(即 90° ~ 180°和 270° ~ 360°时),振幅逐渐变大,且变化幅度随着微裂缝密度增大而增大,相对称地,当夹角增大时(即 0° ~ 90°和 180° ~ 270°时)振幅变化规律与其恰好相反。当方位角垂直于微裂缝面时(即 0°和 180°),振幅随微裂缝密度增大的幅度达到最大。当方位角垂直于微裂缝面时(即 0°和 180°),振幅达到最高。当微裂缝密度增大时,振幅在微裂缝面法线方向的方位角上呈高度分离的趋势,随着微裂缝密度的增加而快速增大,而在垂直微裂缝走向时,振幅基本不受微裂缝密度的影响。

4.3 不同主频振幅变化特征

地震资料主频对地震数据对地震数据识别能力具有直接影响(图 8,图 10),当主频增加时地震振幅强度逐渐增加,并使振幅对微裂缝密度的变化敏感程度逐渐增强。同时,受调谐效应的影响,低频地震资料在小入射角(<20°)时会出现振幅异常增大。

5 结论

1) 富有机质页岩微裂缝的地震识别受到地震资

料的入射角、方位角以及主频控制。地震资料入射角控制不同微裂缝密度对振幅造成的差异性,方位角控制微裂缝走向的识别能力,主频保证振幅不会受到地震波调谐效应的影响。

2) 随着地震波传播方向与裂缝面法向的夹角增大,振幅值逐渐降低,在夹角为 90° 时达到最低。垂直于微裂缝走向的方位角振幅不受微裂缝密度的影响,垂直于裂缝面的方位角振幅随着微裂缝密度增大而增大。

参 考 文 献

- [1] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921–1938.
- [2] Gale J F W, Reed R M, Holder J, et al. Natural fractures in the Barnett shale and their importance for hydraulic fracture treatments[J]. AAPG Bulletin, 91(4): 603–622.
- [3] 苏建政, 李凤霞, 周彤. 页岩储层超临界二氧化碳压裂裂缝形态研究[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 616–625.
Su Jianzheng, Li Fengxia, Zhou Tong. Hydraulic fracture propagation behaviour and geometry under supercritical CO_2 fracturing in shale reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 616–625.
- [4] 林永学, 高书阳, 曾义金. 基于层析成像技术的页岩微裂缝扩展规律研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017(11).
Lin Yongxue, Gao Shuyang, Zeng Yijin. Study of shale micro-fracture propagation based on tomographic technique [J]. Scientia sinica physica, Mechanica & Astronomica, 2017(11).
- [5] 曹耐, 董平川, 雷刚, 等. 不同填充模式裂缝型致密储层应力敏感性定量研究[J]. 断块油气田, 2018, 25(6): 747–751.
Cao Nai, Dong Pingchuan, Lei Gang, et al. Quantitative study of stress sensitivity for fractured tight reservoir with different filled patterns [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(6): 747–751.
- [6] 汪吉林, 朱炎铭, 宫云鹏, 等. 重庆南川地区龙马溪组页岩微裂缝发育影响因素及程度预测[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(8): 1579–1586.
Wang Jilin, Zhu Yanming, Gong Yunpeng, et al. Influential factors and forecast of microcrack development degree of Longmaxi formation shales in Nanchuan region, Chongqing [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(8): 1579–1586.
- [7] Rutherford S R, Williams R H. Amplitude-versus-offset variations in gas sands[J]. Geophysics, 1989, 54(6): 680–688.
- [8] Castagna J P, Smith S W. Comparison of AVO indicators: A modeling study[J]. Geophysics, 1994, 59(12): 1849–1855.
- [9] Castagna J P, Swan H W, Foster D J. Framework for AVO gradient and intercept interpretation [J]. Geophysics, 1998, 63(3): 948–956.
- [10] Avseth P, Mavko G, Dvorkin J, et al. Rock physics and seismic properties of sands and shales as a function of burial depth[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2001, 20(1): 1780.
- [11] 王超, 张柏桥, 舒志国, 等. 四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组海相页岩岩相类型及储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3).
Wang Chao, Zhang Boqiao, Shu Zhiguo, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of marine shales of the Wufeng Formation-Longmaxi formation in Fuling area, the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3).
- [12] Ding W L, Li C, Li C Y, et al. Fracture development in shale and its relationship to gas accumulation[J]. Geoscience Frontiers (English), 2012, 3(1): 97–105.
- [13] 汪虎, 何治亮, 张永贵, 等. 四川盆地海相页岩储层微裂缝类型及其对储层物性影响[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(1): 41–49.
Wang Hu, He Zhiliang, Zhang Yonggui, et al. Microfracture types of marine shale reservoir of Sichuan Basin and its influence on reservoir property [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 41–49.
- [14] Anderson T L. Fracture Mechanics: Fundamentals and applications [M]. CRC Press, 2017, 244–245.
- [15] 蒋廷学, 贾长贵, 王海涛, 等. 页岩气网络压裂设计方法研究[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 36–40.
Jiang Tingxue, Jia Changgui, Wang Haitao, et al. Study on network fracturing design method in shale gas [J]. Petroleum Drilling Techniques. 2011, 39(3): 36–40.
- [16] Thomsen L. Weak elastic anisotropy[J]. Geophysics, 1986, 51(10): 1954–1966.
- [17] Thomsen L. Elastic anisotropy due to aligned cracks in porous rock [J]. Geophysical Prospecting, 1995, 43(6): 805–829.
- [18] 李东会, 董守华, 赵小翠, 等. 气煤孔隙度与Thomsen各向异性参数高阶交错网格数值模拟[J]. 物探与化探, 2011, 35(6): 855–859.
Liu Donghui, Dong Shouhua, Zhao Xiaocui, et al. Numerical simulation with staggered grid high-order difference method for porosity and Thomsen anisotropic coefficients of gas coal [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2011, 35(6): 855–859.
- [19] Tsvankin I. P-wave signatures and notation for transversely isotropic media; an overview[J]. Geophysics, 1996, 61(2): 467–483.
- [20] Bakulin A, Grechka V, Tsvankin I. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data—Part I: HTI model due to a single fracture set [J]. Geophysics, 2000, 65(6): 1788–1802.
- [21] Rüger A. P-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry [J]. Geophysics, 1997, 62(3): p713–722.
- [22] Vidalie J F, Durrieu J, Mine J, et al. Environmental impact assessment for deepwater exploration and development [C]//WPC. 2002.
- [23] 谢军. 长宁——威远国家级页岩气示范区建设实践与成效[J]. 天然气工业, 2018(2).
Xie Jun. Practices and achievements of the Changning-Weiyuan shale gas national demonstration project construction [J]. Natural Gas Industry, 2018(2).

(编辑 张玉银)