

文章编号:1009-9603(2022)03-0036-09

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202110029

基于扩展弹性阻抗反演的致密砂砾岩 储层定量预测技术 ——以玛湖凹陷达13井区为例

王林生¹,艾建华²,伍顺伟³,张景³,卢海胜³,朱越³

(1.中国石油新疆油田分公司,新疆克拉玛依 834000; 2.北京祺元石油科技有限公司,北京 100025;
3.中国石油新疆油田分公司 勘探开发研究院,新疆克拉玛依 834000)

摘要:准噶尔盆地玛湖凹陷扇三角洲沉积环境下的致密砂砾岩储层内部结构复杂、物性变化大、油藏空间展布复杂多变,需要定量地描述油藏空间展布、储层物性和含油性变化规律。但是,前期的研究证实,常规的地震属性分析和叠前/叠后反演方法不能有效地解决这一难题。为此,采用扩展弹性阻抗反演技术来进行致密砂砾岩储层定量预测是十分必要的。利用测井岩石物理分析技术,通过分析多井目的层段地质参数与扩展弹性阻抗随Chi投影角变化的相关性特征,确定最优的Chi投影角,应用已钻井数据,进行交会分析。采用AVO属性分析、叠前地震同步反演与随机反演相结合的方法,进行高分辨率的声阻抗反演和梯度阻抗反演。根据最优化的Chi投影角,估算待预测的储层参数所对应的扩展弹性阻抗属性体。将储层参数与扩展弹性阻抗属性体进行交会分析,按照神经网络岩相聚类分析结果,分类拟合关系表达式,计算储层参数,并进行误差校正。应用结果表明,基于扩展弹性阻抗反演技术,能够有效地定量描述储层的物性、含油性等关键地质参数,有助于提高致密油气藏勘探开发成功率,值得大量尝试和推广。

关键词:EEI反演;AVO反演;储层定量预测;孔隙度;含水饱和度;玛湖凹陷

中图分类号:TE22

文献标识码:A

Quantitative prediction technology for tight glutenite reservoirs based on EEI inversion: A case of Well Da13 Area in Mahu Sag

WANG Linsheng¹, AI Jianhua², WU Shunwei³, ZHANG Jing³, HU Haisheng³, ZHU Yue³

(1.Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang, 834000, China; 2.Beijing Qiyuan Petroleum Technology Co., Ltd., Beijing, 100025, China; 3.Exploration and Development Research Institute, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang, 834000, China)

Abstract: Under the fan-delta sedimentary environment of Mahu Sag in Junggar Basin, the tight glutenite reservoirs feature complex internal structure, variable physical properties, and complicated spatial distribution. Therefore, the quantitative description for the variation rules of the spatial distribution, physical properties and oil content of the reservoirs is required. However, former studies have proved that it is difficult to solve the problem efficiently by routine seismic attribute analysis and post-stack or pre-stack seismic inversion methods. Thus, the extended elastic impedance (EEI) inversion technology is adopted for the quantitative prediction of tight glutenite reservoirs. By using petrophysical analysis based on logging data, we analyzed the correlation of geological parameters and EEI of multi-well target intervals with variation of Chi projection angle. In this way, the optimal Chi projection angle was determined, and the data of drilled wells were applied to make cross-plots. We performed high-resolution acoustic impedance (AI) and gradient impedance (GI) inversion by the joint method of amplitude versus offset (AVO) attribute analysis, pre-stack simultaneous inversion and stochastic inversion. Then, given the optimal Chi projection angle, the EEI attributes corresponding to reservoir parameters to be predicted were

收稿日期:2021-10-22。

作者简介:王林生(1978—),男,云南师宗人,高级工程师,从事油田开发地质研究。E-mail:bkqwl@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“准噶尔盆地致密油开发示范工程”(2017ZX05070),中国石油重大科技专项“准噶尔南缘和玛湖等重点地区优快钻完井技术集成与试验”(2019F-33)。

estimated. Finally, we made cross-plots with the reservoir parameters and estimated EEI attributes, fitted relationship expressions according to classes from the neural network clustering of lithofacies, calculated reservoir parameters, and corrected errors. The practical applications indicate that the key geological parameters of reservoirs such as physical properties and oil/gas content can be quantitatively and effectively described by the EEI inversion. The technology is conducive to raising the success rate of the prospecting and development of tight oil and gas reservoirs, which is worthy of trials and wide application.

Key words: EEI inversion; AVO inversion; reservoir quantitative prediction; porosity; water saturation; Mahu Sag

准噶尔盆地玛湖凹陷扇三角洲沉积环境下的致密砂砾岩储层内部结构复杂、物性变化大、油藏空间展布复杂多变,需要定量地描述油藏空间展布、储层物性和含油性变化规律,以满足开发水平井部署的需要。但是,三维地震资料显示目的层内部反射结构复杂,主要为反S型反射结构,应用常规的地震属性分析、地质体雕刻、储层反演与预测方法,都不能有效地揭示储层发育特征与油气空间展布规律。因此,尝试采用扩展弹性阻抗反演技术,解决致密砂砾岩储层定量预测难题。通过测井岩石物理分析、AVO属性分析、叠前地震同步反演与随机反演相结合的方法,进行高分辨率的声阻抗反演和梯度阻抗反演,优化估算扩展弹性阻抗属性体,定量预测储层孔隙度和含水饱和度,从而揭示有利储层空间分布特征及油藏富集规律,为开发水平井部署提供依据。

1 区域地质概况

2012年以来,玛湖凹陷西斜坡三叠系百口泉组勘探获得突破,对玛湖凹陷斜坡区的整体研究表明,玛湖凹陷东斜坡具备相似的成藏条件。2012年部署风险探井盐北1井,该井在百口泉组见良好油气显示,在百口泉组百二段试油获得成功。之后相继钻探达9井、达10井、达11井,其中达11井在百口泉组试油获得成功,证实玛湖凹陷东斜坡三叠系百口泉组扇三角洲前缘相带发育,成藏条件良好,但油水关系较为复杂。2015年在玛湖凹陷东斜坡达巴松扇三角洲前缘相带部署达13井,在百口泉组百二段压裂后获得工业油流,从而发现了达13井区三叠系百口泉组油藏。2016—2018年,为尽快落实达13井区油气资源规模,加快资源转化,采用勘探评价一体化策略,整体部署探井和评价井17口,多口井相继获得油流,证实“扇控+断层”的成藏模式,前缘相带大面积整体含油,后续评价井按照“直井控面,侧钻水平井提产”的评价思路,整体部署,分步实施,有序推进。自2019年以来,采用地质工程

一体化技术,论证水平井+体积压裂开发方案的可行性,并逐步实施开发方案。

玛湖凹陷发现的大型致密砂砾岩油田,主要分布在二叠系—三叠系大型不整合面之上的超覆地层中,主要为冲积扇和扇三角洲沉积。达13井区目的层为下三叠统百口泉组,主要发育扇三角洲前缘沉积,岩性以砂砾岩为主,发育少量中砂岩和细砂岩。沉积物分选差、颗粒大小混杂堆积,储层物性差。由于油藏空间分布复杂、富集规律难以把握,导致部分评价井失利。

2 扩展弹性阻抗反演技术

2.1 理论基础

在一定假设条件下,入射角在临界角范围内,Zoeppritz方程可以简化为Aki-Richards公式:

$$R(\theta) = A + B \sin^2 \theta \quad (1)$$

当入射角为 0° 时,反射系数可以用声阻抗表达,其表达式为:

$$R(0) = A = \frac{AI_2 - AI_1}{AI_2 + AI_1} \quad (2)$$

CONNOLLY提出了弹性阻抗的概念^[1],认为当入射角不为 0° 时,反射系数可以用弹性阻抗表达,其表达式为:

$$R(\theta) = \frac{EI_{i+1} - EI_i}{EI_{i+1} + EI_i} \approx \frac{1}{2} \times \frac{\Delta EI}{EI} \approx \frac{1}{2} \Delta \ln EI \quad (3)$$

将(3)式和(1)式联立,可以得到弹性阻抗的表达式:

$$EI(\theta) = V_p^{(1 + \sin^2 \theta)} V_s^{(-8K \sin^2 \theta)} \rho^{(1 - 4K \sin^2 \theta)} \quad (4)$$

其中:

$$K = \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 \quad (5)$$

WHITCOMBE对弹性阻抗进行了归一化处理,避免了随着入射角增加而弹性阻抗剧烈变化的问题^[2],使用扩展弹性阻抗代替弹性阻抗,其表达式为:

$$EEI(\theta) = V_{p0}\rho_0 \left[\left(\frac{V_p}{V_{p0}} \right)^{1 + \sin^2\theta} \left(\frac{V_s}{V_{s0}} \right)^{-8K\sin^2\theta} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1 - 4K\sin^2\theta} \right] \quad (6)$$

如果采用(2)式中声阻抗类似的方程式,(1)式中的梯度可以用梯度阻抗表达,其表达式为:

$$B = \frac{GI_2 - GI_1}{GI_2 + GI_1} \quad (7)$$

WHITCOMBE将扩展弹性阻抗在声阻抗-梯度阻抗空间中旋转,可以得到一系列扩展弹性阻抗,其表达式为:

$$EEI(\alpha) = A\cos\alpha + G\sin\alpha \quad (8)$$

其中:

$$\tan\alpha = \sin^2\theta \quad (9)$$

通过Chi投影角旋转,得到不同的扩展弹性阻抗,可以当作声阻抗和梯度阻抗的线性组合。WHITCOMBE指出,通过调整Chi投影角,扩展弹性阻抗可以很好地拟合拉梅常数、体积模量、泥质含量、孔隙度等岩石物理参数。基于这一特征,可以利用扩展弹性阻抗来预测岩性、物性和流体等^[3]。

2.2 基于扩展弹性阻抗反演的储层定量预测流程

基于扩展弹性阻抗反演的储层定量预测流程如图1所示,主要包括:①岩石物理分析。估算弹性参数,绘制扩展弹性阻抗曲线,进行曲线交会分析和Chi投影角扫描,确定与储层参数相关性很高的Chi投影角。②声阻抗反演。基于提取的地震子波,利用绘制的扩展弹性阻抗曲线,通过声阻抗同步反演与随机反演相结合,获得分辨率较高的纵波声阻抗、横波声阻抗和密度属性体^[4-5]。③梯度阻抗反演。首先通过AVO属性分析技术,提取截距和梯度属性体;再生成入射角度为90°的扩展弹性阻抗属性体;最后通过同步反演与随机反演相结合,获得分辨率较高的梯度阻抗反演属性体^[6]。④扩展弹

性阻抗反演。根据待预测的储层参数的Chi投影角扫描分析结果,计算扩展弹性阻抗数据体。⑤储层定量预测。利用声阻抗反演产生的纵波声阻抗、横波声阻抗和密度属性体,进行神经网络聚类分析,判别岩性;将储层参数与扩展弹性阻抗数据体进行交会分析,按照不同的岩性,分别拟合关系表达式;最后计算储层参数,并进行误差校正。

3 实例应用

3.1 岩石物理分析

岩石物理分析主要包含两方面内容:一方面,进行多井Chi投影角扫描分析,获得与待预测的储层参数相关性最佳的Chi投影角;另一方面,估算并绘制弹性参数曲线(包括纵波声阻抗、横波声阻抗、纵横波速度比和泊松比等)和扩展弹性阻抗曲线(包括纵波声阻抗、梯度阻抗和扩展弹性阻抗)^[7-8]。

在进行有效孔隙度预测Chi投影角扫描时,分析了井段选取范围对Chi投影角扫描精度的影响。当选择小层段(包含砂岩和泥岩)时,所有井中最高相关系数绝对值所对应的Chi投影角为15.10°~30.10°,分布范围较大,Chi投影角优选为20.00°,相关系数平均值为-0.79(表1)。当只选择小层内砂岩段时,所有井中最高相关系数绝对值所对应的Chi投影角度为13.00°~18.10°,分布更加集中,有利于更加准确地定量预测有效孔隙度,Chi投影角优选为15.80°,相关系数平均值为-0.87(表1)。通过对比可以发现,当只选取小层内砂岩段作为研究对象时,Chi投影角扫描效果更好;当选取整个小层段作为研究对象时,Chi投影角扫描效果较差,可能与泥岩的有效孔隙度往往被处理为0或较小的常数有关,导致泥岩的有效孔隙度与扩展弹性阻抗没有相关性。因此,选择砂岩段进行有效孔隙度与扩展弹性阻抗的Chi投影角扫描分析。

采用同样的方法,尝试预测含水饱和度,进行含水饱和度与扩展弹性阻抗的Chi投影角扫描,然后进行交会分析,但效果不理想。究其原因,应该是在含水饱和度测井处理时采用了截断处理,将大于1的部分截断为1,相关性变差。同时,如何选择分析层段,也是一大难题。基于这些原因,采用一种变通的方法,先定量预测地层真电阻率,进行小层段内的地层真电阻率与扩展弹性阻抗的Chi投影角扫描分析,优选Chi投影角为23.10°,相关系数平均值为-0.83(表1),再拟合含水饱和度与地层真电

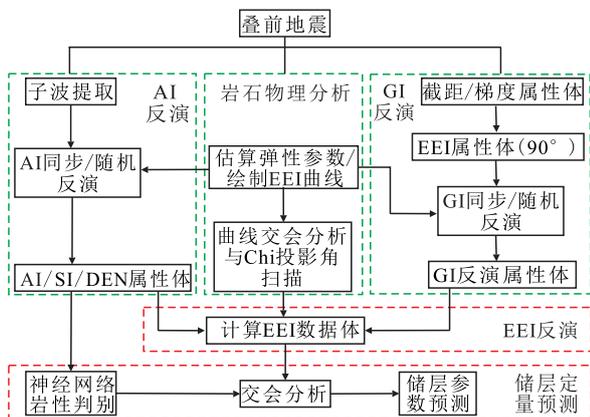


图1 EEI反演与储层定量预测流程

Fig.1 EEI inversion and reservoir prediction workflow

阻率关系,定量预测含水饱和度。

表1 Chi投影角扫描方式对比

Table1 Comparison of scan methods for Chi projection angle

井号	有效孔隙度 预测的小层段		有效孔隙度 预测的砂岩段		R_i 预测 的小层段	
	Chi投影 角/(°)	相关 系数	Chi投影 角/(°)	相关 系数	Chi投影 角/(°)	相关 系数
达001	30.10	-0.68	17.20	-0.91	24.50	-0.79
达002	15.10	-0.74	15.20	-0.97	20.00	-0.78
达003	20.10	-0.79	16.40	-0.81	19.10	-0.73
达005	20.00	-0.71	16.10	-0.86	20.10	-0.83
达006	15.20	-0.89	14.10	-0.91	21.10	-0.80
达12	15.10	-0.83	15.20	-0.95	19.10	-0.88
达13	15.20	-0.88	17.20	-0.88	19.20	-0.90
达131	15.10	-0.88	15.20	-0.99	18.10	-0.86
达132	25.10	-0.75	18.10	-0.70	25.30	-0.84
达136	25.10	-0.59	14.10	-0.80	24.10	-0.84
达137	15.10	-0.87	15.20	-0.87	23.30	-0.87
达14	30.10	-0.83	16.10	-0.63	25.10	-0.85
达15	20.00	-0.78	15.00	-0.97	20.10	-0.88
达17	15.10	-0.85	13.00	-0.92	18.10	-0.76
玛中5	20.00	-0.76	15.20	-0.84	21.10	-0.89
平均	19.76	-0.79	15.55	-0.87	21.22	-0.83

应用优选的Chi投影角15.80°和23.10°,分别估算每口井的有效孔隙度和地层真电阻率所对应的扩展弹性阻抗。从达15井的扩展弹性阻抗估算结果(图2)可以看到,有效孔隙度与声阻抗相关性较差,而有效孔隙度、地层真电阻率与对应的扩展弹性阻抗都呈负相关,且相关性很好。

在进行交会分析时,过滤其他岩性,只拟合其中一种岩性,相关性更好。分析达002井小层段内有效孔隙度与扩展弹性阻抗交会分析图(图3a)可以发现,由于在Chi投影角扫描时受泥岩相关性差的影响,多井的Chi投影角分布范围较大,导致样点分布比较分散;当只拟合有利砂砾岩储层时,相关系数为-0.74;当只拟合致密砂砾岩储层时,相关系数为-0.65;泥岩数据点不属于本文关注的方面,故未加研究。分析达13井砂岩段内有效孔隙度与扩展弹性阻抗交会分析图(图3b)可以发现,当只拟合有利砂砾岩储层时,相关系数为-0.98;当只拟合致密砂砾岩储层时,相关系数为-0.89。分析认为,在进行有效孔隙度与扩展弹性阻抗的Chi投影角扫描和交会分析时,选取砂岩段作为研究对象,效果更好。分析达13井地层真电阻率与扩展弹性阻抗交会分析图(图3c)可以发现,当只拟合有利砂砾岩储层时,相关系数为-0.87;当只拟合致密砂砾岩储层时,相关系数为-0.92;拟合相关性较好,有助于含水饱和度的间接预测。

通过多井有效孔隙度与扩展弹性阻抗、地层真电阻率与扩展弹性阻抗的Chi投影角相关性及其交会分析,可以发现,每口井的相关性特征略有差异,优选最优角度,有助于提高拟合精度。另外,由于不同的岩性具有不同的地质参数分布特征,如果按照岩性分别拟合关系表达式,应该能够显著地提高拟合精度。

3.2 声阻抗反演

从叠前地震同步反演结果来看,反演声阻抗与测井纵波声阻抗曲线吻合得较好(图4a)。在目的层内部,扇三角洲前缘的内部结构比较清晰,反映

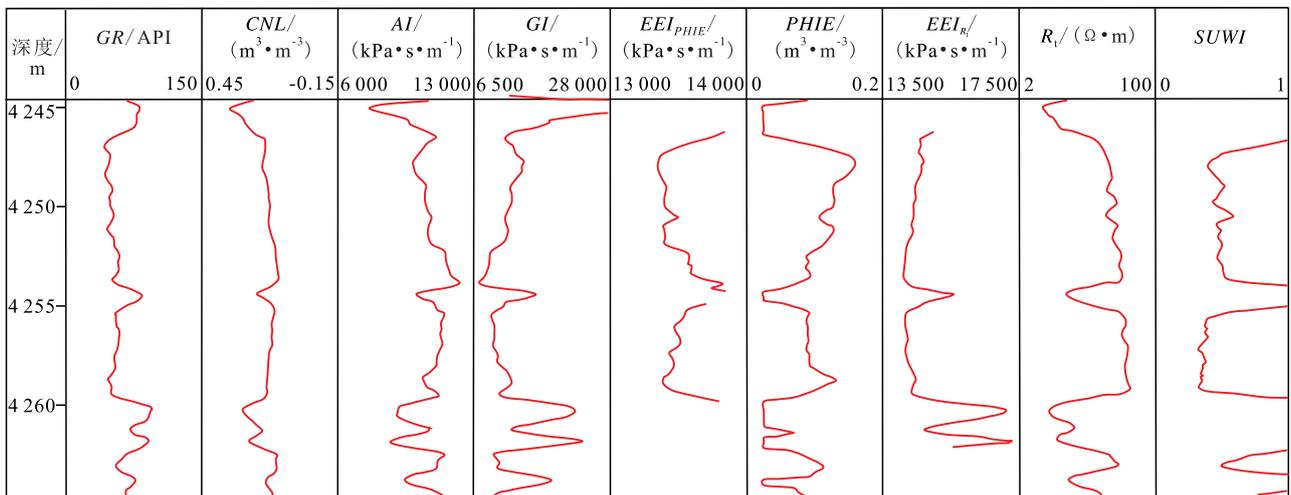


图2 达15井扩展弹性阻抗估算结果

Fig.2 EEI estimation results of Well Da15

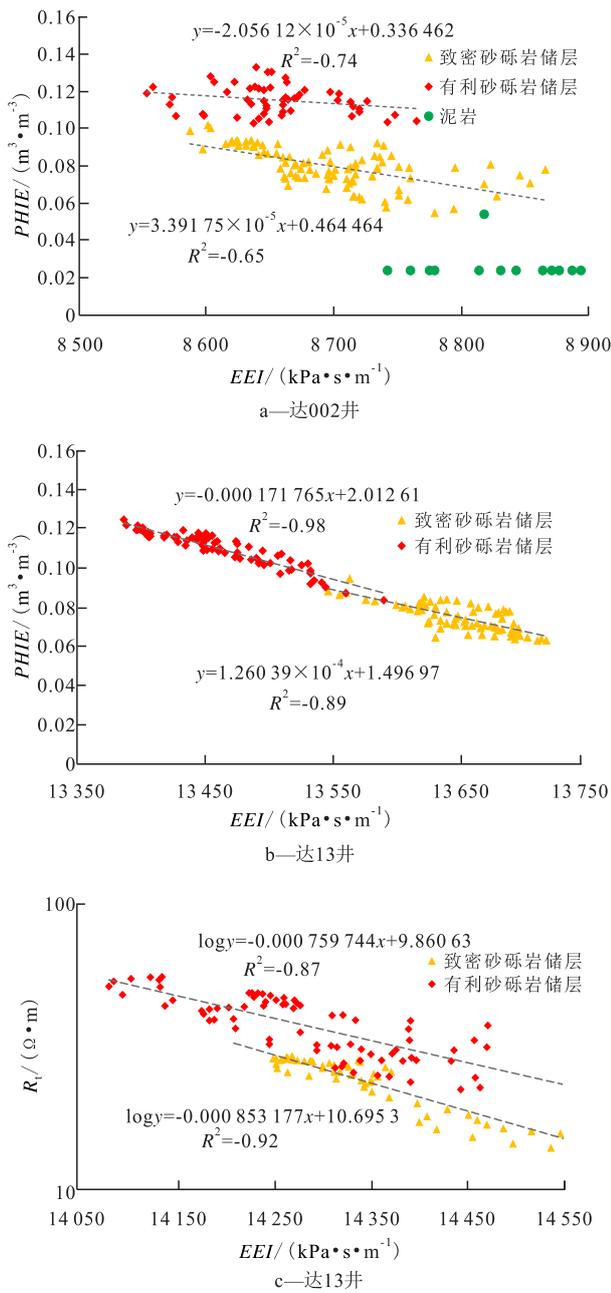


图3 地质参数与EEI交会拟合结果

Fig.3 Cross-plot fitting of geological parameters and EEI

了扇三角洲沉积环境的内部结构特征。为了提高反演结果的纵向分辨率,可以采用随机反演方法,将测井曲线采样到三维模型,作为随机建模的硬数据,将同步反演得到的纵波声阻抗、横波声阻抗和密度属性体作为随机反演的趋势模型,建立随机反演初始模型。在随机反演过程中,修改初始模型,使合成地震道与实际地震道尽可能匹配。当满足精度要求之后,终止迭代。随机反演纵波声阻抗与同步反演趋势相同(图4b),但随机反演结果分辨率更高,能够反映储层变化的更多细节^[9-10]。

3.3 梯度阻抗反演

根据 AVO 反演理论,在各向同性介质假设条件

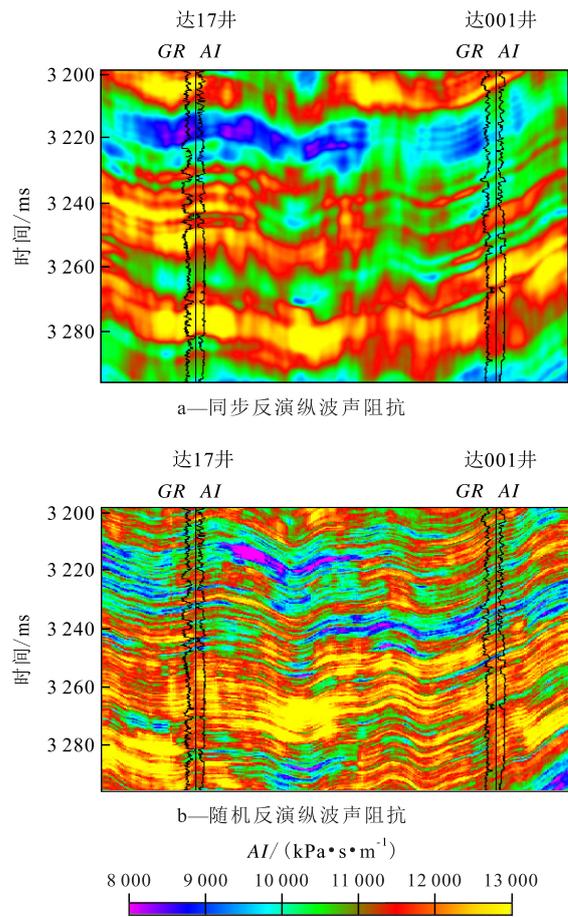


图4 声阻抗反演纵波声阻抗连井剖面

Fig.4 Joint well section of P-wave AI by AI inversion

下,入射波和反射波的能量关系满足 Zeoppritz 方程,当地震波传播入射角为 0° ~ 30°时,纵波反射系数方程可以简化为(1)式^[11]。采用 Shuey 二项式方法,利用远、中、近部分角度叠加数据体,提取截距和梯度属性体^[12-13],然后产生梯度阻抗属性体。利用梯度阻抗属性体和曲线,提取确定性子波。与声阻抗反演类似,获得纵向分辨率更高的随机反演梯度阻抗^[14-15](图5)。

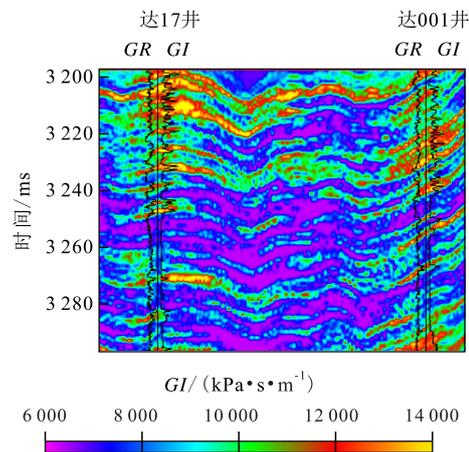


图5 随机反演梯度阻抗连井剖面

Fig.5 Joint well section of GI by GI inversion

3.4 扩展弹性阻抗反演

3.4.1 声阻抗与梯度阻抗建模

对声阻抗和梯度阻抗进行时-深转换,然后采样到三维模型中,同时,将声阻抗和梯度阻抗曲线也采样到三维模型中,采用第二属性约束属性建模方法,建立声阻抗和梯度阻抗模型。这种模型具有与岩石物理分析估算曲线近似的垂向分辨率和相同的数量级,便于直接利用扩展弹性阻抗 Chi 投影角扫描分析结果,进行扩展弹性阻抗三维模型计算。

3.4.2 扩展弹性阻抗属性体生成

利用声阻抗和梯度阻抗模型,以及岩石物理分析获得的 Chi 投影角,按照(8)式,分别计算与有效孔隙度和地层真电阻率预测相关的扩展弹性阻抗(图6),即:

$$EEI_{PHE} = AI \cos 15.80^\circ + GI \sin 15.80^\circ \quad (10)$$

$$EEI_{R_i} = AI \cos 23.10^\circ + GI \sin 23.10^\circ \quad (11)$$

3.5 储层定量预测

利用叠前地震声阻抗反演获得的纵波声阻抗、横波声阻抗和密度数据体,进行神经网络聚类分析,基于结果约束建立相模型。然后,将扩展弹性阻抗模型作为 X 轴,将有效孔隙度或地层真电阻率作为 Y 轴,同时将相模型作为 Z 值显示为样点颜色,进行交会分析。采用一维过滤器,保留当前待拟合

的相,然后选取数据集中的区域,进行拟合分析。有利砂砾岩储层的有效孔隙度与扩展弹性阻抗的关系式为:

$$PHIE = \frac{-1.01324 \times EEI_{PHE}}{10000} + 1.47564 \quad (12)$$

有利砂砾岩储层的地层真电阻率与扩展弹性阻抗的关系式为:

$$R_i = 10^{\frac{-7.7415 \times EEI_{R_i}}{1000} + 12.6747} \quad (13)$$

致密砂砾岩储层的有效孔隙度与扩展弹性阻抗的关系式为:

$$PHIE = \frac{-9.08845 \times EEI_{PHE}}{100000} + 1.31821 \quad (14)$$

致密砂砾岩储层的地层真电阻率与扩展弹性阻抗的关系式为:

$$R_i = 10^{\frac{-7.74152 \times EEI_{R_i}}{10000} + 14.0887} \quad (15)$$

有利砂砾岩储层的含水饱和度与地层真电阻率的关系式为:

$$SUWI = -1.03732 \lg R_i + 2.05703 \quad (16)$$

致密砂砾岩储层的含水饱和度与地层真电阻率的关系式为:

$$SUWI = -1.26993 \lg R_i + 2.53731 \quad (17)$$

按照常规的有效孔隙度与声阻抗交会方法,相

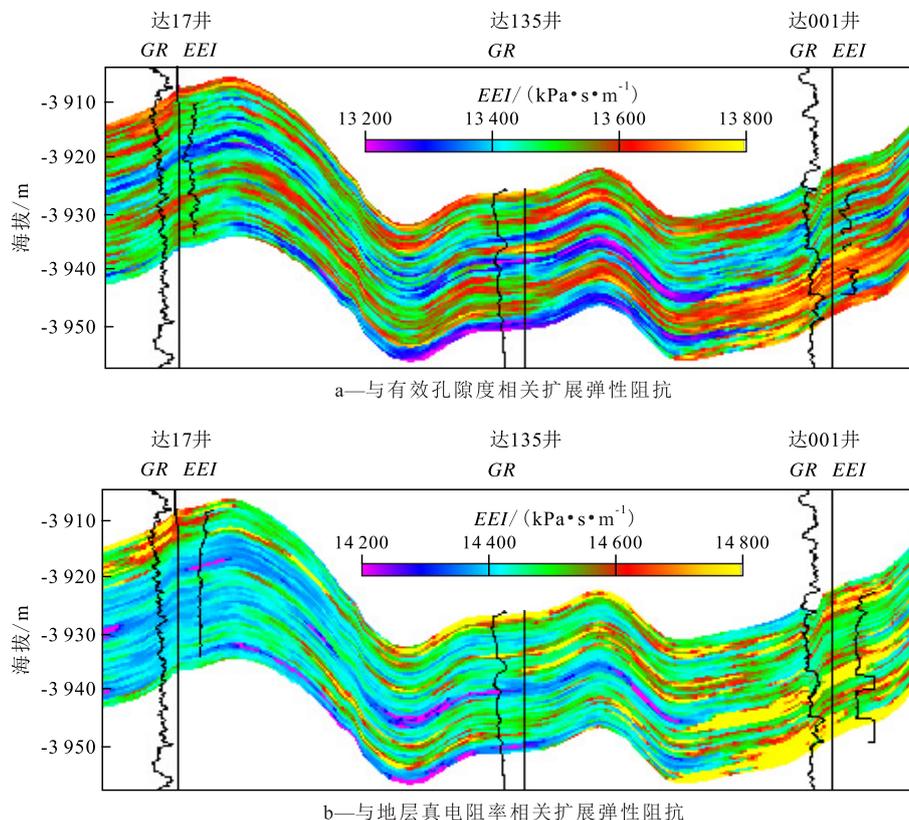


图6 EEI连井剖面

Fig.6 Joint well section of EEI

关系数的绝对值一般为0.4~0.6,通过常规反演的弹性参数,无法准确指示油气^[16]。基于测井岩石物理分析和扩展弹性阻抗反演技术,应用有效孔隙度与扩展弹性阻抗、地层真电阻率与扩展弹性阻抗交会拟合方法(图7a,7b),有利砂砾岩储层的相关系数分别为-0.85和-0.93,致密砂砾岩储层的相关系数分别为-0.86和-0.87。在含水饱和度与地层真电阻率交会拟合中,有利砂砾岩储层的相关系数为-0.94,致密砂砾岩储层的相关系数为-0.91(图7c),拟合精度比常规的方法显著提高。随着拟合精度的提高,储层定量预测的精度也自然提高。

按照(12)~(17)式,分别计算有利砂砾岩储层

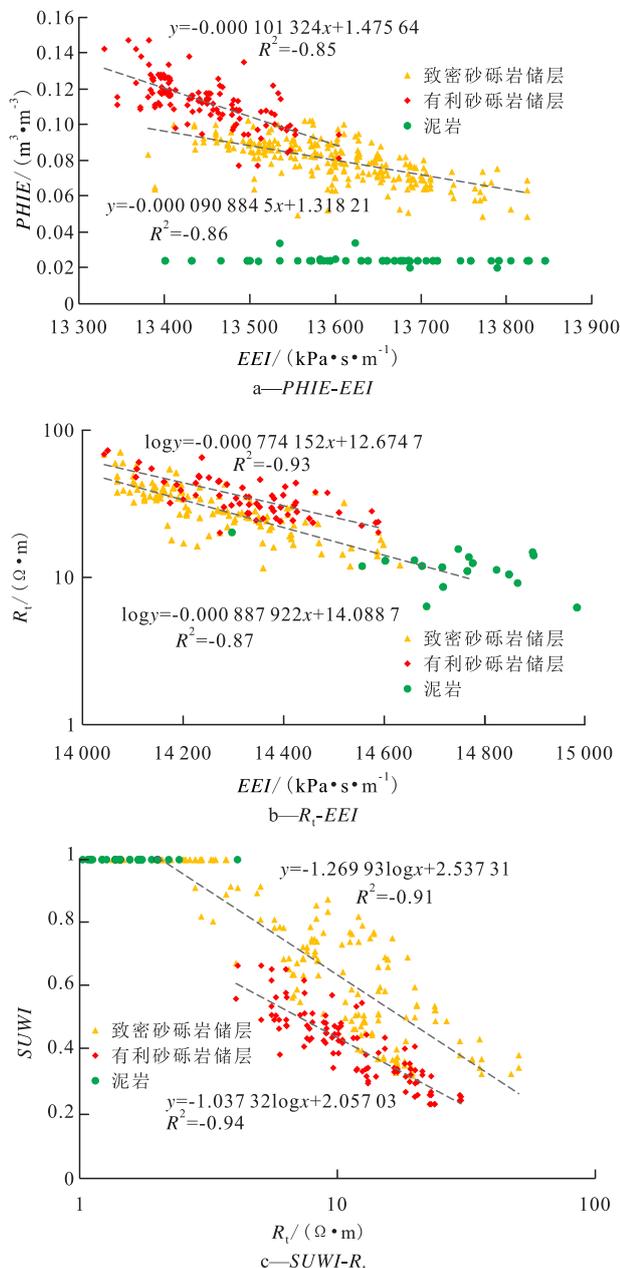


图7 三维属性模型交会分析

Fig.7 Cross plots of three-dimensional(3D) attribute model

和致密砂砾岩储层的有效孔隙度、地层真电阻率以及含水饱和度,泥岩段赋值为常数。利用测井曲线作为硬数据,采用相控建模和第二属性(扩展弹性阻抗反演得到的有效孔隙度、地层真电阻率和含水饱和度)约束方法,建立有效孔隙度、地层真电阻率和含水饱和度模型。从连井剖面可以看到,达17井和达001井吻合得很好(图8)。2021年9月初刚完成达135井试油,在所有研究分析过程中都没有使用该井数据的情况下,模型与实测的测井曲线吻合较好(图8a)。达135井的地层真电阻率曲线与含水饱和度模型具有较好的负相关性,含水饱和度模型的可靠性得到很好的验证(图8b)。这说明,基于扩展弹性阻抗反演的储层定量预测是成功的^[17-18]。

从地质模型中提取目的层的油层厚度和储层平均有效孔隙度,生成平面图(图9)。从平均有效孔隙度和油层厚度平面图看,达135井的预测结果与钻井和试油结果吻合,同时,也从砂砾岩地层中识别出了有利储层,反映了有利储层的厚度、物性、含油性的平面变化特征,结合三维地质模型,揭示了储层物性和含油性在三维空间的变化规律。

4 结论

在玛湖凹陷达13井区三叠系百口泉组复杂的扇三角洲致密砂砾岩储层中,应用扩展弹性阻抗反演技术,定量地预测了储层的有效孔隙度和含油性的空间展布以及油层厚度的横向变化特征,预测结果已经被刚完成试油的新井所证实,这将为以后制定开发水平井部署方案提供有力的依据。利用扩展弹性阻抗反演技术,能够有效地定量描述储层的物性、含油性等关键地质参数,有助于提高致密油气藏勘探开发成功率,值得大量尝试和推广应用。

符号解释

- A——截距,无量纲;
- AI——声阻抗,kPa·s/m;
- AI₁——物性界面之上的声阻抗,kPa·s/m;
- AI₂——物性界面之下的声阻抗,kPa·s/m;
- B——梯度,无量纲;
- CNL——中子孔隙度,m³/m³;
- EI——弹性阻抗,kPa·s/m;
- EI_i——第*i*个物性界面之上的弹性阻抗,kPa·s/m;
- EI_{i+1}——第*i*个物性界面之下的弹性阻抗,kPa·s/m;
- EEI——扩展弹性阻抗,kPa·s/m;
- EEI_{PHIE}——与有效孔隙度预测相关的扩展弹性阻抗,

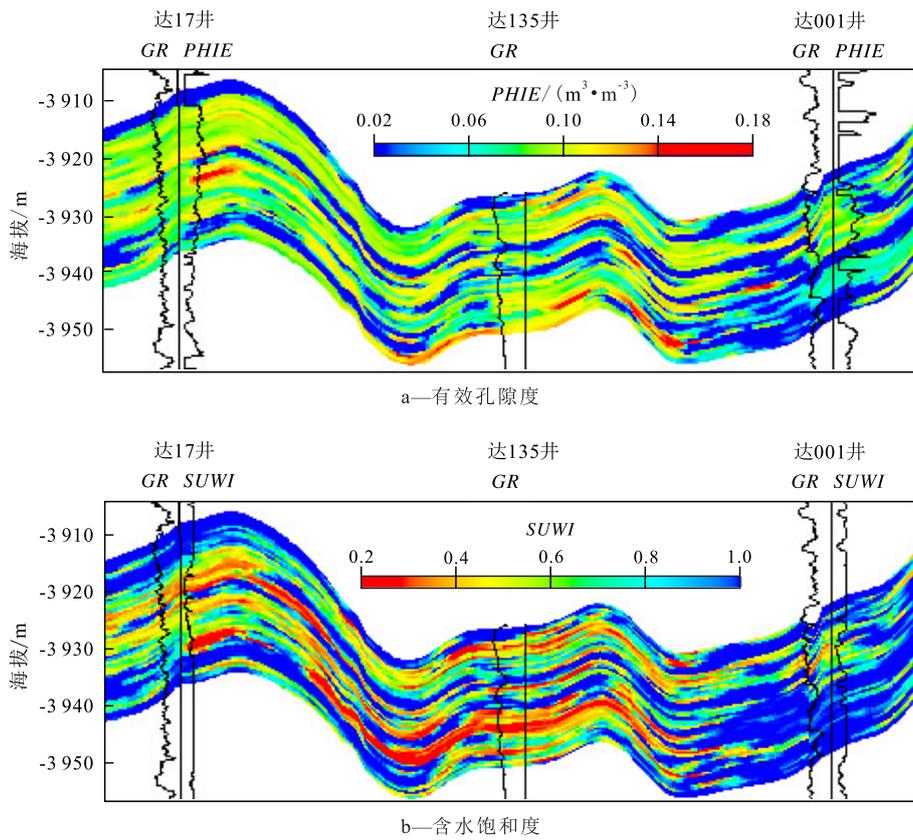


图8 达13井区储层定量预测连井剖面

Fig.8 Joint well section by quantitative reservoir prediction in Well Da13 Area

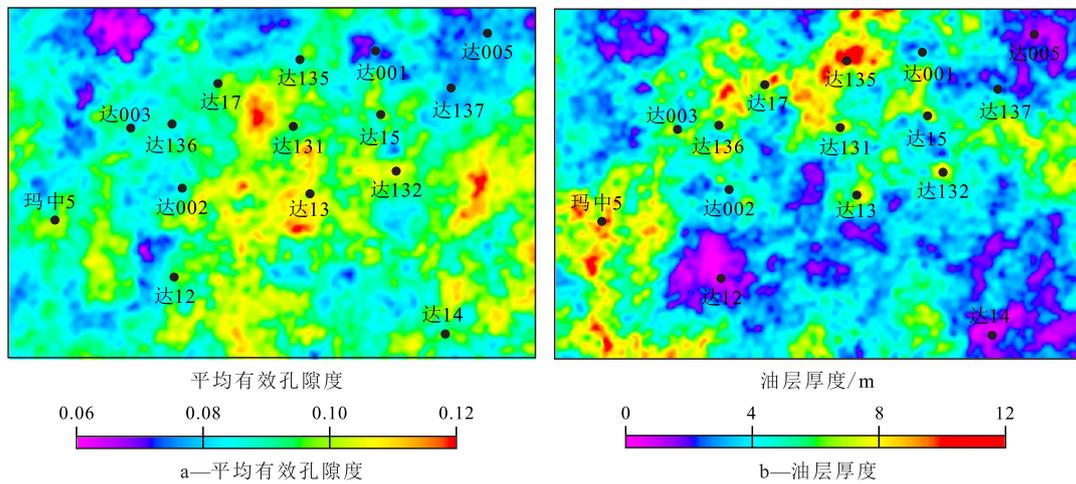


图9 达13井区储层定量预测平面图

Fig.9 Quantitative prediction of reservoir in Well Da13 Area

kPa·s/m;

EEI_{R_t} ——与地层真电阻率预测相关的扩展弹性阻抗,

kPa·s/m;

GI ——梯度阻抗,kPa·s/m;

GI_1 ——物性界面之上的梯度阻抗,kPa·s/m;

GI_2 ——物性界面之下的梯度阻抗,kPa·s/m;

GR ——自然伽马,API;

K ——常数;

$PHIE$ ——有效孔隙度, m^3/m^3 ;

R ——反射系数,无量纲;

R_t ——地层真电阻率, $\Omega \cdot m$;

$SUWI$ ——含水饱和度,无量纲;

V_p ——纵波速度, m/s;

V_{p0} ——平均纵波速度, m/s;

V_s ——横波速度, m/s;

V_{s0} ——平均横波速度, m/s;

α ——Chi投影角, ($^{\circ}$), 取值为 $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$;

θ ——入射角, ($^{\circ}$), 取值为 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$;

ρ ——岩石密度, g/cm^3 ;

ρ_0 ——平均岩石密度, g/cm^3 。

参考文献

- [1] CONNOLLY P. Elastic impedance [J]. *The Leading Edge*, 1999, 18(4): 438-452.
- [2] WHITCOMBE D N. Elastic impedance normalization [J]. *Geophysics*, 2002, 67(1): 60-62.
- [3] WHITCOMBE D N, CONNOLLY P A, REAGAN R L, et al. Extended elastic impedance for fluid and lithology prediction [J]. *Geophysics*, 2002, 67(1): 63-67.
- [4] 刘玉珍. 纵横波联合反演在储层预测中的应用——以沾化凹陷罗家地区沙一段生物灰岩为例 [J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(3): 45-47, 51.
LIU Yuzhen. Application of compressional and shear wave joint-inversion in prediction of reservoir—an example of biological limestone in E_1 of the Shahejie formation in Luoia area of Zhanhua sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(3): 45-47, 51.
- [5] 陈晓东, 施泽进, 郑旦珠. 叠前弹性波阻抗反演在JZ25-1油田变质岩储层预测中的应用 [J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(4): 69-73.
CHEN Xiaodong, SHI Zejin, ZHENG Danzhu. Application of pre-stack elastic impedance inversion to metamorphic reservoir prediction in JZ25-1 oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(4): 69-73.
- [6] 骆帅兵, 张莉, 赵裕辉, 等. 基于扩展弹性阻抗岩石物理分析技术在北康盆地含油气性检测中的应用 [J]. *物探化探计算技术*, 2021, 43(3): 331-339.
LUO Shuaibing, ZHANG Li, ZHAO Yuhui, et al. Application of extended elastic impedance based petrophysical analysis technique in oil-gas bearing detection in Beikang basin [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 43(3): 331-339.
- [7] WIDYASANDY D, SUSILO A, MU'IN F. Characterization of reservoir sandstones using log analysis technique extended elastic impedance in field X [J]. *Journal Neutrino*, 2018, 10(1): 1-9.
- [8] JIANG R, LIU C L, ZHANG J, et al. Quantitative reservoir characterization of tight sandstone using extended elastic impedance [J]. *Natural Resources Research*, 2021, 30(1): 395-409.
- [9] 王玉梅. 叠前地震反演精度影响因素 [J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(1): 55-58.
WANG Yumei. Study of influential factors on pre-stack seismic inversion accuracy [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(1): 55-58.
- [10] 宋明水, 茆书巍, 林会喜, 等. 断陷湖盆湖底扇砂岩体沉积特征及主控因素分析——以东营凹陷民丰地区沙三段中亚段为例 [J]. *油气地质与采收率*, 2021, 28(3): 1-13.
SONG Mingshui, MAO Shuwei, LIN Huixi, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of sublacustrine fan sand bodies in faulted basin: A case study of Middle E_3 in Minfeng area, Dongying Sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(3): 1-13.
- [11] SHUEY R T. A simplification of the Zoeppritz equations [J]. *Geophysics*, 1985, 50(4): 609-614.
- [12] 肖为, 史文英, 方中于, 等. EEI反演技术在南海A区开发气田中的应用 [J]. *物探化探计算技术*, 2013, 35(5): 589-597.
XIAO Wei, SHI Wenying, FANG Zhongyu, et al. Application of the EEI inversion technology in the gas field exploration in the area-A of south China sea [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2013, 35(5): 589-597.
- [13] 李桂梅. 叠前地震反演预测民丰地区沙四段盐下砂砾岩体含油气性 [J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(2): 52-54.
LI Guimei. Application of pre-stack seismic inversion to predicting hydrocarbon for conglomerate body in Minfeng area [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(2): 52-54.
- [14] 时磊, 刘俊州, 董宁, 等. 扩展弹性阻抗反演技术在致密砂岩薄储层含气性预测中的应用 [J]. *物探与化探*, 2015, 39(2): 346-351.
SHI Lei, LIU Junzhou, DONG Ning, et al. Extended elastic impedance inversion technology and its application to the tight and thin sandstone reservoir [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(2): 346-351.
- [15] HUSSEIN M, EI-ATA A A, EI-BEHIRY M A. Contribution of the CDP gathers and pre-stack seismic inversion in the prospect evaluation: A case study of El Mansoura Field, Nile Delta, Egypt [J]. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, 12(3): 368-386.
- [16] 张秉铭, 裴忠林, 张广智, 等. 基于EEI反演的储层油气识别研究 [J]. *CT理论与应用研究*, 2017, 26(3): 299-307.
ZHANG Bingming, PEI Zhonglin, ZHANG Guangzhi, et al. Hydrocarbon detection of sand reservoir based on EEI inversion [J]. *Computerized Tomography Theory and Applications*, 2017, 26(3): 299-307.
- [17] CHATTERJEE R, SINGHA D K, OJHA M, et al. Porosity estimation from pre-stack seismic data in gas-hydrate bearing sediments, Krishna-Godavari basin, India [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 33(6): 562-572.
- [18] 周单, 朱童, 胡华锋, 等. 一种基于叠前反演的孔隙度预测方法 [J]. *物探化探计算技术*, 2015, 37(4): 472-477.
ZHOU Shan, ZHU Tong, HU Huaifeng, et al. A porosity prediction method based on pre-stack inversion [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 37(4): 472-477.

编辑 单体珍