

## 陆相页岩油甜点地球物理表征研究进展

刘喜武<sup>1,2,3,4</sup>, 刘宇巍<sup>1,2,3,4</sup>, 刘志远<sup>1,2,3,4</sup>, 宋亮<sup>5</sup>, 刘炯<sup>1,2,3,4</sup>, 霍志周<sup>1,2,3,4</sup>,  
张金强<sup>1,2,3,4</sup>, 钱恪然<sup>1,2,3,4</sup>, 张颖燕<sup>6</sup>

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083; 2. 国家能源页岩油研发中心, 北京 100083;  
3. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 100083; 4. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083;  
5. 中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营 257015; 6. 中国石化  
江汉油田分公司物探研究院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**针对中国东部陆相页岩油甜点地球物理预测技术适应性不足等问题,从基础研究入手,构建陆相页岩油层岩石物理模型,分析地球物理响应特征;开展地质-测井-地球物理融合分析,认为富有机质纹层状岩相+裂缝为富集主控因素;在岩相、TOC、物性、含油性、脆性、压力、地应力等地震预测方法研究的基础上,攻关纹层状岩相、裂缝及地应力地球物理预测技术。基于岩石物理模型与各向异性叠前反演,形成层理缝密度预测方法,将层理缝密度地震属性作为沉积约束参数,实现纹层状岩相有效预测;基于正交各向异性介质 AVAZ 属性,提高裂缝表征精度;基于岩石三模量实现地应力大小预测,基于层间速度变化率预测地应力方向。通过研究,厘清了陆相页岩油甜点要素,明确了甜点要素指标体系以及岩石物理、地球物理响应特征,完善与建立了相应的甜点地球物理表征方法,在济阳坳陷预测了页岩油有利目标区。

**关键词:**岩相;裂缝;地应力;岩石物理;地球物理表征;陆相页岩油甜点;济阳坳陷

**中图分类号:**TE132.1 **文献标识码:**A

## Progresses in geophysical characterization of continental shale oil sweet spots

Liu Xiwu<sup>1,2,3,4</sup>, Liu Yuwei<sup>1,2,3,4</sup>, Liu Zhiyuan<sup>1,2,3,4</sup>, Song Liang<sup>5</sup>, Liu Jiong<sup>1,2,3,4</sup>, Huo Zhizhou<sup>1,2,3,4</sup>,  
Zhang Jinqiang<sup>1,2,3,4</sup>, Qian Keran<sup>1,2,3,4</sup>, Zhang Yingyan<sup>6</sup>

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China; 2. State Energy Center for Shale Oil Research and Development, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Shale Oil and Gas Exploration & Production, SINOPEC, Beijing 100083, China; 4. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 5. Geophysical Prospecting Research Institute, Shengli Oilfield Branch Company Ltd., SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China; 6. Geophysical Prospecting Research Institute, Jiangnan Oilfield Branch Company Ltd., SINOPEC, Wuhan, Hubei 430033, China)

**Abstract:** There are still many challenges on geophysical characterization of continental shale oil sweet spot in Eastern China in terms of technique applicability. Petrophysical models for continental shale oil layers are established to analyze geophysical responses based on the study on the fundamentals of continental shale oil. It's believed that the controlling factors for shale oil accumulation are organic-rich laminated lithofacies and fractures, following the integrated investigation of geology, well logging and geophysics. Besides, based on the existing methods for seismic prediction including lithofacies, TOC, rock physical property, oil bearing properties, brittleness, pore pressure and in-situ stress, new geophysical prediction methods are built for laminated lithofacies, fracture and in-situ stress. Based on petrophysical models and anisotropy pre-stack inversion, new methods are developed to predict the density of bedding-parallel fractures in shale, which is in turn regarded as a constraint for sedimentary analysis, so as to effectively predict the distribution of the laminated lithofacies. Orthorhombic anisotropy AVAZ algorithm is given to improve the seismic characterization of fractures; while the prediction of in-situ stress is achieved based on Young's modulus, bulk modulus, and modulus of rigidity, and the direction of in-situ stress can be computed from interval velocity variation. The study clarifies the main controlling factors for conti-

收稿日期:2018-12-20;修订日期:2019-02-28。

第一作者简介:刘喜武(1970—),男,研究员,地球探测与信息技术。E-mail:liuxw\_syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(U1663207);国家科技重大专项(2017ZX05049-002);中石化项目(P170-2)。

mental shale oil sweet spots, establishes an index system for sweet spots, reveals the characteristics of petrophysical and geophysical responses of sweet spots, and optimizes the geophysical characterization method for sweet spots. These methods are successfully used to identify the favorable target areas for continental shale oil exploration in Jiyang Depression.

**Key words:** lithofacies, fracture, in-situ stress, petrophysics, geophysical characterization, continental shale oil sweet spot, Jiyang Depression

目前,中国东部陆相页岩油形成演化与赋存机理、储集性能与流动机制、富集机理与分布规律等尚未完全搞清,还没有形成商业化开发和生产规模。甜点地球物理识别与预测的主要问题是甜点要素不清,地球物理响应特征不明确,常规地球物理预测方法不适用。前期地质研究表明:中国东部陆相页岩油富集要素主要包括:富有机质纹层状岩相是页岩油富集的基础<sup>[1]</sup>;压力是页岩油富集产出的重要因素<sup>[2-3]</sup>;可流动性是页岩油富集产出的前提;(微)裂缝是页岩油富集产出的关键。无论是储集性评价还是富集高产评价,富有机质纹层状+裂缝都是主控要素。在甜点富集要素研究的基础上,通过岩石物理正反演<sup>[4-6]</sup>,初步厘清等效地球物理模型响应特征,基于复杂各向异性岩石物理模型,建立VTI介质P波各向异性水平层理密度预测方法,利用水平层理密度属性,沉积参数约束地震属性,实现纹层状优质页岩岩相有效表征;建立正交各向异性(OA)介质AVAZ属性的反演及裂缝预测方法,提高了页岩垂直裂缝预测精度<sup>[7-9]</sup>。以基于岩石三模量(杨氏模量、体积模量、剪切模量)的地应力表征为核心,考虑岩性、深度、流体等影响,进行叠前反演,实现地应力大小三维定量地震预测;基于层间速度变化率AVO地震响应判识模式,利用方位AVO梯度大小与速度变化率的关系,判断地应力方向,精度明显提高。利用地质、地震及测井等综合研究成果,对页岩发育区带进行分类,明确油气富集区带<sup>[10]</sup>,以地质定量评价为基础,以测井定量评价为约束,通过对地震预测的岩相、裂缝、脆性、地应力等参数多次融合回归构建甜点地震表征因子,进行甜点的平面综合评价,形成综合评价方法,济阳坳陷取得良好应用效果。

## 1 陆相页岩油甜点各向异性岩石物理特征

### 1.1 济阳坳陷各向异性岩石物理建模

充分考虑济阳坳陷陆相页岩复杂微观结构:一级效应考虑固体基质,二级效应考虑孔隙裂缝系统,三级效应考虑流体充填;以及相应的宏观地球物理响应,包括:粘土矿物定向排列、水平层理和水平缝等引起的沉

积各向异性,高角度构造缝引起的方位各向异性,流体挤压喷流效应引起的地震波频散与衰减等,构建的页岩各向异性岩石物理模型<sup>[4]</sup>(图1)。主要步骤包括:①应用Hanshin-Shtrikman(HS)或Voigt-Reuss-Hill(VRH)岩石物理边界理论,计算由石英、方解石、白云石、干酪根等组成的固体基质的各向同性弹性模量;②Backus理论中引入粘土矿物压实指数,计算各向同性分布矿物与定向排列粘土组成固体基质的VTI各向异性弹性模量;③在VTI固体基质中,应用Chapman理论加入多尺度孔隙空间,包括微观孔隙、微裂缝以及水平层理缝等,同时考虑流体的类型、流动性、频散及衰减等因素;④在VTI背景下应用Schoenberg及Hudson理论,加入垂直裂缝引起的正交各向异性。

### 1.2 陆相页岩油地球物理响应特征

基于岩石物理模型和地震岩石物理计算,研究不同甜点要素变化引起的地震响应的特征<sup>[5-6]</sup>,例如,随TOC(总有机碳含量)含量增加,储层小和中等角度的反射系数相应减小,而大角度的反射系数增加;随TOC含量增加,反射系数减小的幅度也随之减少。在实钻井的纵横波速度和密度基础上,利用叠前各向异性正演模拟技术<sup>[11-15]</sup>探讨泥页岩储层在岩相、裂缝发育程度和所含流体变化下的各向异性特征,不同构造部位、

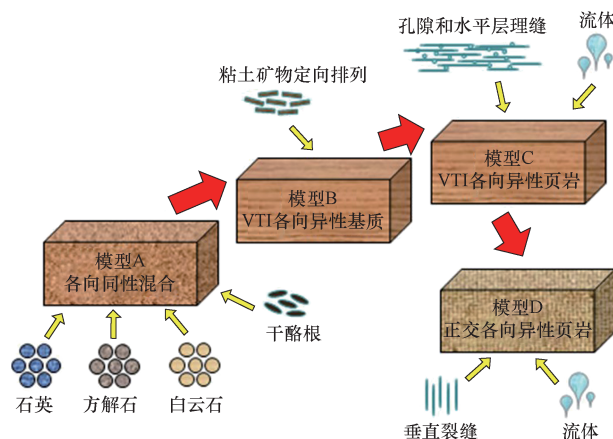


图1 济阳坳陷陆相页岩油层各向异性岩石物理模型示意图<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram showing the anisotropic petrophysical model for continental shale oil reservoirs in Jiyang Depression<sup>[4]</sup>

不同岩相的实钻井正演分析表明:纹层状、层状泥页岩的各向异性特征明显,块状泥页岩的各向异性特征较弱,缓坡带、洼陷带各向异性特征强,斜坡带各向异性特征弱,泥页岩所含流体不同,各向异性特征有微弱的变化,但不同构造带差别较大,在缓坡构造带,含油的各向异性最大,含水次之,含气最小。

## 2 基于各向异性的陆相页岩油甜点预测技术

### 2.1 水平层理缝密度地震预测技术

水平层理缝密度是指在上述岩石物理模型中定义的水平方向发育的裂缝强度,即单位体积岩石中水平层理缝所占的体积,一般可用各向异性参数表示。地震预测方法包括以下步骤<sup>[16-17]</sup>:①构建页岩油气层水平层理缝密度各向异性岩石物理模型;②基于所述岩石物理模型,根据测井曲线进行岩石物理反演,获得水平层理缝密度的数值以及各向异性参数的数值;③对所述水平层理缝密度与所述各向异性参数进行统计交会分析,获得所述水平层理缝密度与所述各向异性参数之间的关系,以建立预测模型;④利用反演的页岩油气层 VTI 介质底界面 AVO 属性估算上覆页岩油气层纵波各向异性参数的数值;⑤利用所述预测模型将步骤④中估算的纵波各向异性强度转换为水平层理缝密度得到水平层理缝地震预测结果(图2)。

### 2.2 基于水平层理密度属性的纹层状优质页岩岩相精细描述方法

综合运用地震数据与钻井资料信息,以水平层理缝密度等地震属性表征沉积参数为基础,通过敏感沉积参数的神经网络融合来表征岩相。在提取三十余种地震属性基础上,特别是引入水平层理缝密度地震预测属性,通过井-震相关分析,优选敏感属性,建立更为精确的 TOC、碳酸盐矿物含量、石英与长石含量、孔隙度等4种沉积参数的定量关系,实现岩相地震预测。这种实现策略避免直接利用地震属性预测岩相的多解性,增加了沉积参数的约束项,融合了更多的地震、地质信息,预测结果与实钻井吻合较好,比常规的波形分类地震相预测更加精细准确(图3)。

### 2.3 基于正交各向异性介质 AVAZ 属性的垂直裂缝表征方法

Bacharch 2009 年<sup>[18]</sup>在 Psencik 和 Martins(2001)<sup>[19]</sup>的研究基础之上,将 HTI 介质反射系数近似公式拓展

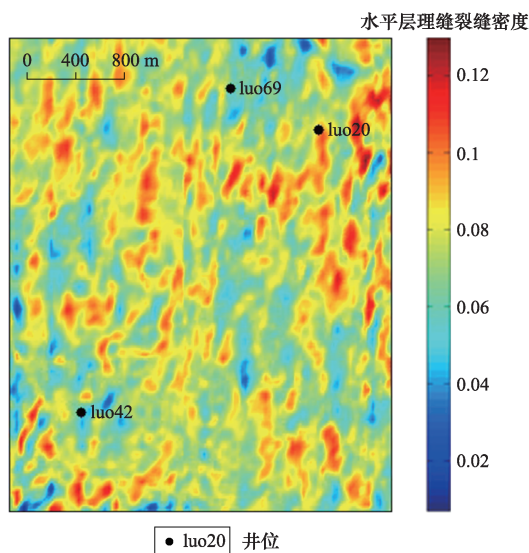


图2 济阳坳陷罗家地区沙河街组三段下亚段水平层理缝裂缝密度

Fig. 2 Density of horizontal bedding-parallel fractures of the Es<sup>3L</sup> in Luo family area, Jiyang Depression

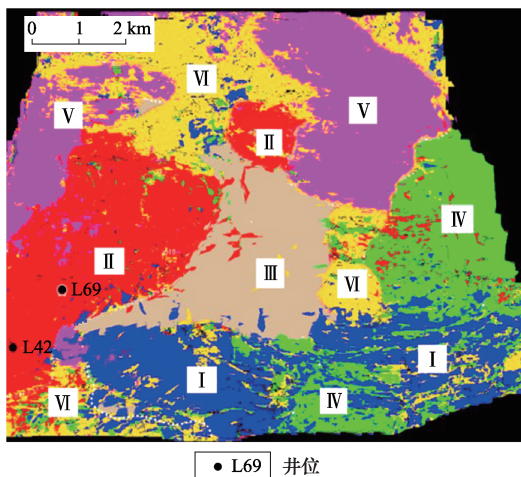


图3 济阳坳陷罗家地区13s层组岩相分布预测

Fig. 3 Distribution prediction of the lithofacies for layer group 13s in Luo family area, Jiyang Depression

- I. 块状泥质灰岩相; II. 纹层状灰质泥岩相; III. 纹层状泥质灰岩相;  
IV. 层状泥页岩夹砂岩条带相; V. 层状泥页岩夹碳酸盐岩条带相;  
VI. 砂岩相

到 OA 介质,推导得到反射系数近似公式<sup>[20-22]</sup>如下:

$$R_{pp}(\varphi) = A_{ani} + B_{ani} \sin^2 \varphi + C_{ani} \sin^4 \varphi \quad (1)$$

式中: $R_{pp}(\varphi)$ 为反射系数; $A_{ani}$ ,  $B_{ani}$ ,  $C_{ani}$ 分别为与拉梅参数有关的截距项、梯度和曲率项,无量纲; $\varphi$ 为入射角, ( $^\circ$ )。  $A_{ani}$ 可以表征裂缝的发育程度,  $A_{ani}$ 值越大裂缝越发育;  $B_{ani}$ 可以用于表征垂直裂缝的发育程度。拟合得到这两个属性,可以预测裂缝发育。正交各向异性预测表明济阳坳陷义东地区沙河街组三段底部各向异性发育区主要集中义东断裂带附近,在义东、义南断层



交汇处的义东 301-义古 24 井区域裂缝最为发育,各向异性  $A_{\text{ani}}$  最强(图 4)。

## 2.4 基于三模量的泥页岩地应力大小表征方法

目前地应力大小预测,以有限元数值模拟为基础,以界面预测为主,预测精度较低<sup>[23]</sup>。研究过程中以基于各向异性介质的岩石三模量(杨氏模量、体积模量、剪切模量)的泥页岩地应力表征为核心,考虑岩性、深度、流体等影响,在叠前道集优化、叠前弹性反演方法研究<sup>[24-26]</sup>的基础上,实现地应力的三维定量地震预测。以岩石物理的弹性参数为基础,通过多元线性回归,建立基于三弹性参数的应力计算公式,并进行多因素校正<sup>[27]</sup>;叠前反演先得到工区的杨氏模量、体积模量、剪切模量三弹性参数体,再利用拟合校正公式计算得到最大主应力体、最小主应力体。如图 5 所示,预测应力值与实测应力值相对误差控制在 10%,取得较好的应用效果。

## 2.5 基于层间速度变化率的地应力方向预测

以往的地应力方向预测,主要是以构造曲率为基础,受构造约束性大,对经过多期构造变动的地层,预测精度低,误差大<sup>[23]</sup>。基于层间速度变化率的地应力方向地震预测,主要是利用地应力方位各向异性导致的横波速度差异与叠前方位属性之间的关系来进行应力方位的地震预测<sup>[23]</sup>。研发基础:最大主应力方位横波速度大,最小主应力方位横波速度小,利用方位 AVO 梯度的大小,判断地应力方向范围。根据各向异性理论,最大主应力方向上波速传播速度最大,幅度最大,AVO 梯度与截距值越小。应用表明渤南洼陷 12 下-13 上最大水平主应力方向预测取得较好效果(图 6)。

# 3 陆相页岩油甜点综合评价与有利区预测

## 3.1 页岩油甜点要素地质综合评价

甜点要素综合评价需要综合考虑多种地质因素,构建油气富集(甜点)指数指标体系。通过与多种地质因素的定性、定量分析,建立基于多因素非线性的页岩油藏客观定量表征公式,主要包括:单维地质因素与油气富集指数的定量分析和多维地质因素下的非线性表征公式,见(2)式。

$$S = f_1(e, d, c) + f_2(v, h) + f_3(p) + \varepsilon \quad (2)$$

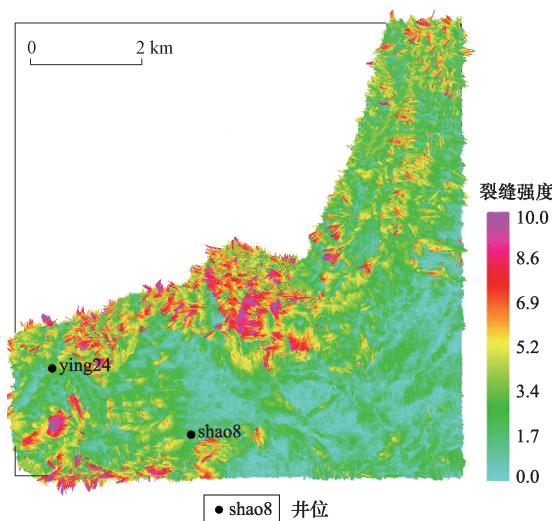


图 4 济阳坳陷义东工区 AVAZ 裂缝强度

Fig. 4 Fracture intensity predicted by AVAZ in Yidong work area, Jiyang Depression

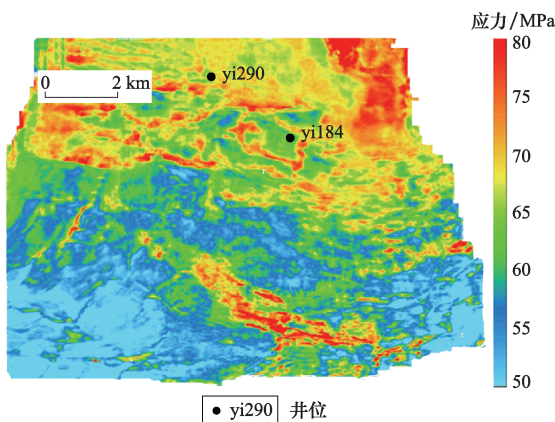


图 5 渤南地区沙河街组三段下亚段 12x-13s 层组最大水平主应力大小分布

Fig. 5 Distribution of maximum horizontal principal stress of the layer group 12x-13s in the Es<sup>3L</sup>, Bonan area

式中: $S$  为单井的油气富集指数; $f_1(e, d, c)$  为构造因素造成的油气富集指数变化函数; $f_2(v, h)$  为岩性因素造成的油气富集指数变化函数; $f_3(p)$  为压力因素造成的油气富集指数变化函数; $\varepsilon$  为常数。其中, $e$  为断层拉张量, $d$  为距离断层远近, $c$  为地层曲率, $v$  为脆性矿物含量, $h$  为单层厚度, $p$  为地层压力系数。为确定非线性回归中的各项待定参数,应用最小二乘法,将单井中已知甜点参数  $S'_i$  与计算的  $S_i$  的离差平方和  $\sum_{i=1}^n (S_i - S'_i)^2$  达到最小作为数据拟合的最终目标。此时,各项待定参数的取值即为最优参数值。

根据济阳坳陷页岩油出油井分析数据,泥页岩甜点非线性表征公式计算的因子  $S$  与多口井的日产油量进行交会分析,发现两者呈近似的指数关系(图 7)。





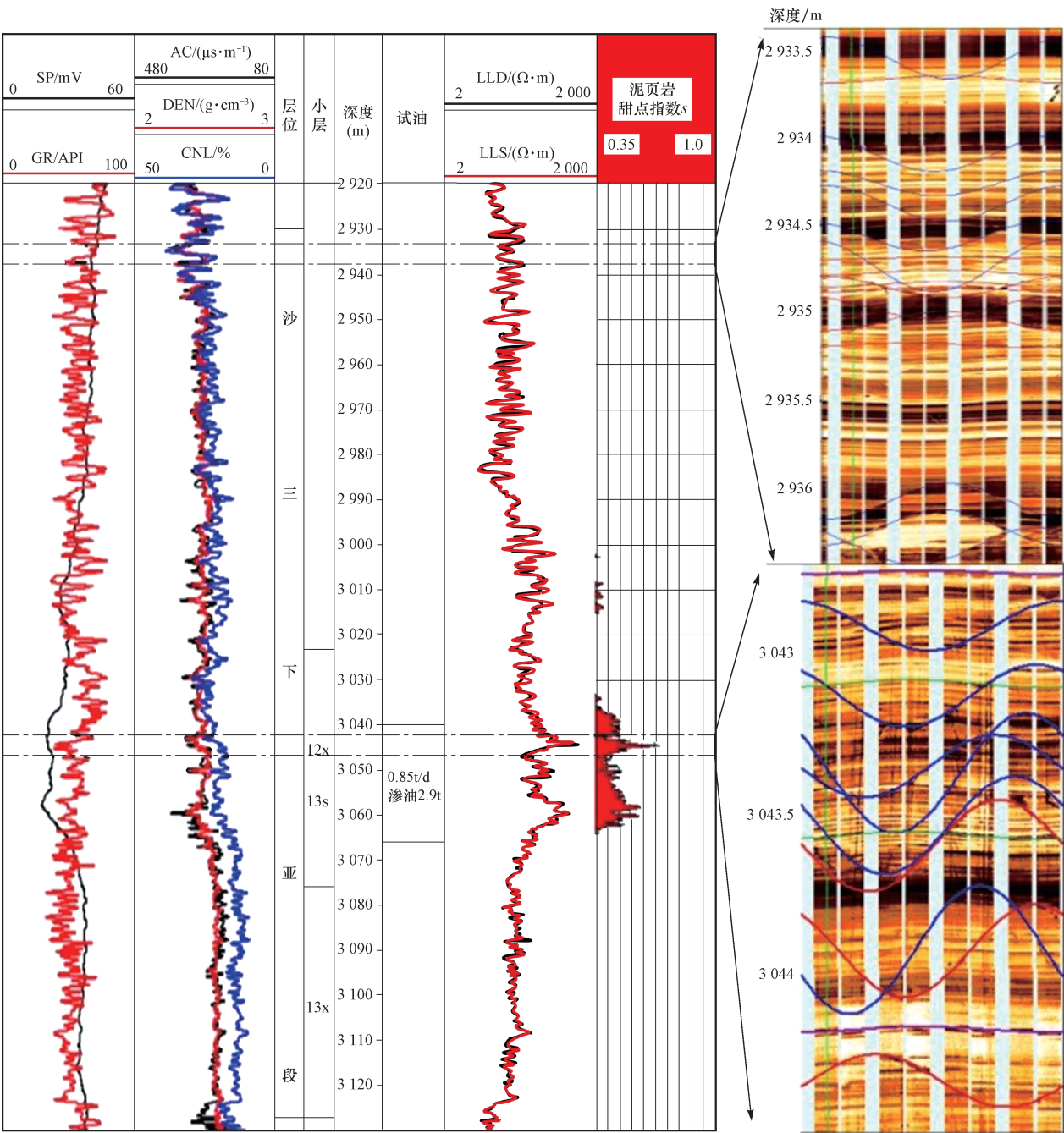


图 8 济阳坳陷罗家地区罗 69 井泥页岩甜点测井定量识别

Fig. 8 The quantitative logging identification of shale sweet spots in Well Luo69, LuoJia area, Jiyang Depression

在完成岩相、TOC、裂缝指数、脆性指数、延展性和地应力差等参数叠前叠后属性预测基础上,采用上述建立的叠前叠后属性融合公式,对罗家地区进行甜点地震综合表征与评价,与页岩油出油井情况吻合较好(图 9,红色为出油井)。

3.4 页岩油甜点综合评价技术应用

济阳坳陷页岩油甜点综合评价分为四级:一级要素定层段,二级要素选区带,三级要素找甜点,四级要素选目标。时频特征反映泥页岩的沉积环境变化和层

序等变化,可以作为控制泥页岩空间发育的一级要素;构造埋深反映泥页岩的压力、温度的变化和成熟度特征,是泥页岩平面分布的重要控制因素,作为二级控制要素;泥页岩的众多要素,如裂缝、异常高压、TOC、脆性、优势岩相等控制着泥页岩富集、产能差异等情况,决定了泥页岩油藏的生产方式,是三级控制要素;泥页岩的岩石物理特征,如延展性、各向异性等决定压裂时网状缝的发育和形成,是控制泥页岩油气产能的四级要素。沙河街组三段 12x-13s 层组甜点要素关系最明显的特点是地层脆性矿物含量整体偏低和 TOC 普

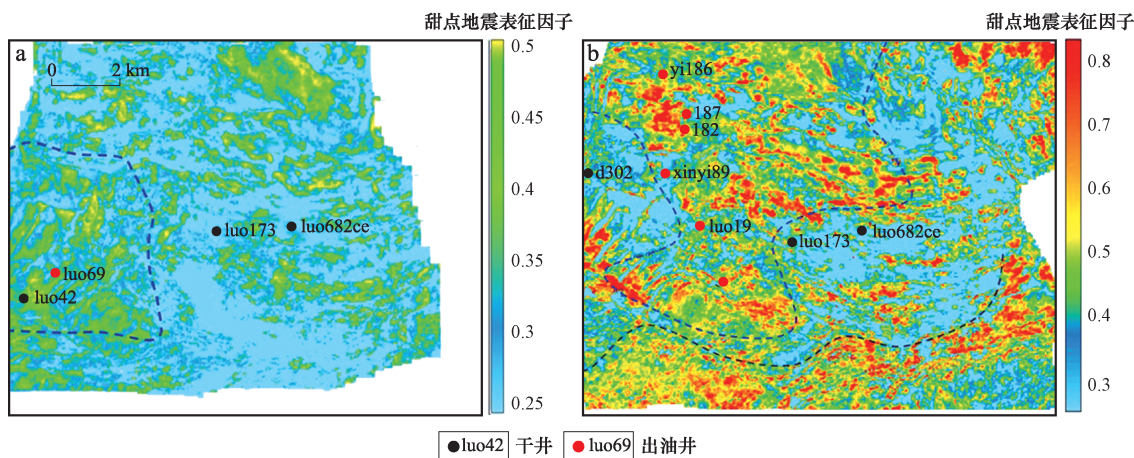


图9 济阳拗陷罗家地区沙河街组三段下亚段12x-13s(a)和13x(b)层组页岩油甜点地震综合表征

Fig. 9 Comprehensive seismic characterization of shale sweet spots in layer groups 12x-13s(a) and 13x(b) in the  $E_s^{3L}$ , in LuoJia area, Jiyang Depression

遍较高。这说明该层组烃源岩生烃能力较好,甜点分布受脆性矿物含量影响小,受裂缝发育程度影响大。图10是济阳拗陷渤南洼陷沙三下亚段12x-13s层组综合评价成果图。评价指标以纹层状泥质灰岩和层状泥页岩、TOC大于2.0%、压力系数大于1.4、裂缝发育区带为I类,即图中粉色区块。

## 4 结论

1) 基于富有机质纹层状岩相和裂缝是中国东部陆相页岩油富集主控因素的认识,考虑页岩复杂微观结构

和宏观地球物理响应特征,提出陆相页岩油层正交各向异性地球物理等效模型,为甜点表征方法研究奠定基础。

2) 基于岩石物理模型和VTI介质叠前反演实现一种水平层理缝地震预测方法,并将其作为一种地震属性,通过沉积参数约束,提出富有机质纹层岩相识别方法,可以提高识别精度。

3) 推导建立一种新的正交各向异性AVAZ反演裂缝预测方法,能够有效提高陡倾角和缓倾角裂缝预测的精度。

4) 岩石模量直接反演预测地应力大小,层间速度变化率预测地应力(方向),为地震资料直接预测地应力分布探索一条新的途径。

## 参考文献

- [1] 宁方兴. 济阳拗陷页岩油富集主控因素[J]. 石油学报, 2015, 36(8): 905-914.  
Ning Fangxing. The main control factors of shale oil enrichment in Jiyang depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(8): 905-914.
- [2] 陈美玲, 潘仁芳, 潘进. 黄河口地区中深层超压成因机制及分布规律研究[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(7): 8-11.  
Chen Meiling, Pan Renfang, Pan jin. On overpressure generation mechanisms and distribution rules at mid-depth formation in Huanghekou region[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(7): 8-11.
- [3] 陈美玲, 潘仁芳, 张超谟, 等. 济阳拗陷沙河街组页岩与美国Bakken组页岩储层“甜点”特征对比[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(4): 438-446.  
Chen Meiling, Pan Renfang, Zhang Chaomo, et al. Comparison of “sweet spot” characteristics of shale oil reservoir rocks between Shahejie formation in China and Bakken formation in North America [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43(4): 438-446.
- [4] 郭志琦, 邓新辉, 刘才, 等. 岩石物理和地震表征各向异性页岩储层裂缝[C]//

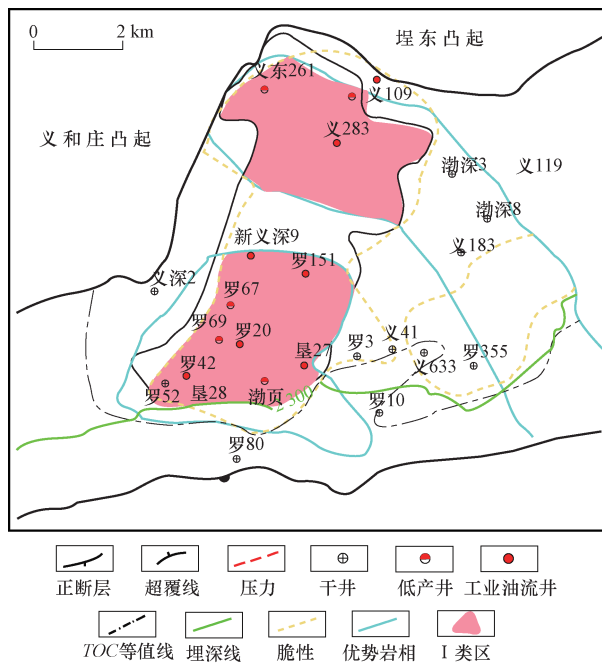


图10 渤南洼陷沙河街组三段下亚段12x-13s层组综合评价

Fig. 10 Comprehensive evaluation of the layer group 12x-13s in the  $E_s^{3L}$ , Bonan sag



- CGS/SEG International Geophysical Conference, Qingdao; Society of Exploration Geophysicists, 2017; 17–20.
- [5] 刘喜武, 刘宇巍, 霍志周, 等. 页岩油气层地震岩石物理计算方法研究[J]. 石油物探, 2016, 55(1): 10–17.  
Liu Xiwu, Liu Yuwei, Huo Zhizhou, et al. Study on seismic rock physics computational method for shale reservoir[J]. Geophysical Prospecting, 2016, 55(1): 10–17.
- [6] 霍志周, 刘喜武, 刘宇巍, 等. 基于计算岩石物理方法的页岩储层弹性参数提取[J]. 地球物理学报, 2018, 61(7): 3019–3027.  
Huo Zhizhou, Liu Xiwu, Liu Yuwei, et al. Determining elastic parameters of shale reservoirs based on computational rock physics methods[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(7): 3019–3027.
- [7] Liu Yuwei, Dong Ning, Mike F, et al. Estimating the fracture density of small-scale vertical fractures when large-scale vertical fractures are present[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2015, 12, (3): 311–320.
- [8] Liu Yuwei, Dong Ning, Liu Xiwu, et al. Inversion of fracture properties based on frequency dependent seismic AVAZ attributes[C]//SEG Annual Meeting. New Orleans, Louisiana; Society of Exploration Geophysicists, 2015; 1–5.
- [9] Liu Yuwei. Fracture prediction approach for oil-bearing reservoir based on AVAZ attributes in orthorhombic medium[J]. Petroleum Science, 2018, 15(3): 510–520.
- [10] 潘仁芳, 陈美玲, 张超谟, 等. 济阳拗陷渤南洼陷古近系页岩油“甜点”地震预测及影响因素分析[J]. 地学前缘, 2018, 25(4): 142–154.  
Pan Renfang, Chen Meiling, Zhang Chaomo, et al. Seismic prediction of Paleogene shale oil “sweet spot” and its influencing factor analysis in the Bonan sub-sag of Jiyang depression[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(4): 142–154.
- [11] Lu Neng, Liu Cai, Guo Zhiqi, et al. The study on anisotropic attenuation of PP-wave AVAZ due to fluid-saturated fractures for layered media[C]//CGS/SEG International Geophysical Conference, Qingdao; Society of Exploration Geophysicists, 2017; 381–384.
- [12] Pang Shuo, Liu Cai, Guo Zhiqi et al. Fracture characterization for shale reservoirs using P-wave azimuthal seismic inversion[C]//CGS/SEG International Geophysical Conference. Qingdao; Society of Exploration Geophysicists, 2017; 653–656.
- [13] Liu Jiong, Eduardo K, Liu Xiwu. Using pseudo-spectral method on curved grids for SH-wave modeling of irregular free-surface[J]. Journal of Applied Geophysics, 2017, 140(3): 42–51.
- [14] Liu Jiong, Liu Xiwu. A pseudospectral scheme for SH-wave modeling of irregular free surface[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts. Dallas, Texas; Society of Exploration Geophysicists, 2016; 4039–4043.
- [15] Liu Jiong, Liu Xiwu, Liu Zhenfeng, et al. SH-wave modeling on curved grids for irregular surface by pseudo-spectral method[C]//SPG/SEG International Geophysical Conference. Beijing; Petroleum Geophysical Exploration Editorial Department, 2016; 242–245.
- [16] 刘喜武, 刘宇巍, 刘炯, 等. 一种页岩水平层理缝密度地震预测方法; 北京, CN108459346A[P]. 2018–08–28.  
Liu Xiwu, Liu Yuwei, Liu Jiong, et al. A new scheme for prediction of shale reservoir bedding seam density; Beijing, CN108459346A[P]. 2018–08–28.
- [17] 刘喜武, 刘宇巍, 刘志远, 等. 页岩层系天然裂缝地震预测技术研究[J]. 石油物探, 2018, 57(4): 611–617.  
Liu Xiwu, Liu Yuwei, Liu Zhiyuan, et al. Seismic prediction of natural fractures in series of shale reservoirs[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(4): 611–617.
- [18] Ran B, Mita S, Antoun S, et al. Reconstruction of the layer anisotropic elastic parameter and high-resolution fracture characterization from P-wave data; a case study using seismic inversion and Bayesian rock physics parameter estimation[J]. Geophysical Prospecting, 2009, 57: 253–262.
- [19] Psencik I, Martins J L. Properties of weak contrast PP reflection/transmission coefficients for weakly anisotropic elastic media[J]. Studia Geophysica et Geodaetica, 2001, 45: 176–199.
- [20] Tang Yufei, Liu Yuwei, Liu Xiwu, Yang Guodong. Prediction of application scope of vertical fracture strike based on scattered wave fracture orientation function[J]. Global Geology, 2015, 18(1): 49–53.
- [21] 刘喜武, 董宁, 刘宇巍. 裂缝性孔隙介质频变 AVAZ 反演方法研究进展[J]. 石油物探, 2015, 54(2): 210–217.  
Liu Xiwu, Dong Ning, Liu Yuwei. Progress on frequency dependent AVAZ inversion for characterization of fractured porous media[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(2): 210–217.
- [22] 刘宇巍, 董宁, 吴晓明, 等. 频变 AVAZ 响应特征分析及裂缝性质反演方法研究[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(2): 732–740.  
Liu Yuwei, Dong Ning, Wu Xiaoming, et al. Analysis of frequency-dependent AVAZ response attributes and research of fracture properties inversion method[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2016, 31(2): 732–740.
- [23] 刘建伟, 张云银, 曾联波, 等. 非常规油藏地应力和应力甜点地球物理预测—渤南地区沙三下亚段页岩油藏勘探实例[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(4): 792–800.  
Liu Jianwei, Zhang Yunyin, Zeng Lianbo, et al. Geophysical prediction of stress and stress desserts in unconventional reservoir; an example in Bonan area[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(4): 792–800.
- [24] 宋建国, 刘盛悦. 基于逆时偏移的井间地震角道集提取方法[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 707–714.  
Song Jianguo, Liu Shengyue. ADCIGs method of cross-well seismic data based on RTM[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2018, 33(2): 707–714.
- [25] 宋建国, 郭毓, 冉然. 基于比值均方根的杨氏模量反演方法[J]. 地球物理学报, 2018, 61(4): 1508–1518.  
Song Jianguo, Guo Yu, Ran Ran. Pre-stack inversion method of Young’s modulus based on the root mean square ratio[J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 2018, 61(4): 1508–1518.
- [26] Zhang Yuanyin, Jin Zhijun, Chen Yequan, et al. Pre-stack density inversion based on integrated norm regularization in shale reservoir[C]//SEG International Exposition and Annual Meeting. Texas; Society of Exploration Geophysicists, 2017; 1–5.
- [27] 陆益祥, 潘仁芳, 唐廉宇, 等. 沾化凹陷罗家地区沙三下亚段页岩储层的岩石力学与脆性评价研究[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(6): 69–77.  
Lu Yixiang, Pan Renfang, Tang Lianyu, et al. Rock mechanics and brittleness of shale reservoirs in the lower Sha 3 member of Luoia area, Zhanghua sag[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(6): 69–77.