



松辽盆地三肇凹陷青山口组页岩油地震甜点预测方法及应用

李昂, 张丽艳, 杨建国, 黄一鸣

中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

摘要: 松辽盆地三肇凹陷上白垩统青山口组一段泥页岩油气资源丰富。为了厘清该区页岩油甜点分布, 指导参数井部署, 在单井甜点关键参数测井评价的基础上, 利用三维地震数据, 井震结合开展甜点预测方法研究。首先利用测井资料、岩心实验分析数据交汇分析, 建立岩性、物性(孔隙度、渗透率)、含油性(饱和度)、有机地化参数(TOC、 S_1)、地层孔隙压力、地层可压性的测井评价模型; 然后通过宽频约束反演技术预测岩性, 应用叠前弹性参数反演预测物性、含油性和地层可压性, 利用约束迪克斯公式反演与模型约束波阻抗反演结合技术预测地层压力; 最终实现对地质甜点和工程甜点的“双甜点”预测, 建立一套适合于松辽盆地青山口组页岩油地震甜点识别技术流程。实践表明, 利用三维地震资料能有效预测页岩甜点区, 实钻结果与钻前预测基本吻合, 证明了本技术流程的有效性。

关键词: 松辽盆地; 三肇凹陷; 青山口组一段; 页岩油; 甜点预测

SEISMIC METHOD FOR SHALE OIL SWEET SPOT PREDICTION IN QINGSHANKOU FORMATION OF SANZHAO SAG, SONGLIAO BASIN

LI Ang, ZHANG Li-yan, YANG Jian-guo, HUANG Yi-ming
Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: The oil and gas resources are abundant in the shale of the first member of Qingshankou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin. To identify the distribution of shale oil sweet spots in the area and guide the deployment of parameter well, the paper studies the sweet spot prediction method based on the logging evaluation of key parameters of single well sweet spot, 3D seismic data and well-seismic combination. First, the cross plot analysis of logging data and core experimental analysis data is used to establish logging evaluation model of lithology, physical properties (porosity and permeability), oil-bearing property (saturation), organic geochemical parameters (TOC and S_1), formation pore pressure and compressibility; Then the broadband constrained inversion technology is applied to predict lithology, the prestack elastic parameter inversion to predict physical properties, oil-bearing property and compressibility, and combination of constrained Dix formula inversion and model constrained wave impedance inversion technology to predict formation pressure; Finally, a set of seismic sweet spot identification technology process suitable for the shale oil of Qingshankou Formation in Songliao Basin is established to realize the double sweet spots prediction of geological and engineering sweet spots. The practice shows that the 3D seismic data can effectively predict shale sweet spots, and the actual drilling results are basically consistent with pre-drilling prediction, which proves the effectiveness of technical process.

Key words: Songliao Basin; Sanzhao Sag; first member of Qingshankou Formation; shale oil; sweet spot prediction

收稿日期: 2021-03-09; 修回日期: 2021-03-30. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“松辽盆地北部页岩油战略调查”(DD20190114); “大庆齐家-古龙地区页岩油气战略调查与评价”(DD20179613).

作者简介: 李昂(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事页岩油调查与地震甜点预测方法研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号, E-mail://lihnsdbj@hotmail.com

0 引言

北美页岩油气开发的快速发展表明,位于盆内的烃源岩层系的页岩油资源量远大于源外常规石油资源量,从源外向源内转变是石油工业持续发展的必然选择,源内页岩油是未来油气储量、产量实现大规模增长的重大领域^[1-4]。松辽盆地上白垩统青山口组一段泥页岩是松辽盆地的主力烃源岩,其有机碳含量高,热演化程度适中,暗色泥岩厚度大,地层存在超压,页岩油资源潜力巨大^[5-7],成功开发这套资源对大庆油田可持续发展具有重要意义。页岩油储层的“甜点”包括地质甜点、工程甜点两方面。地质甜点要素主要包括岩性、物性(孔隙度、渗透率)、含油性(饱和度)、有机地化参数(有机碳含量、流动烃含量);工程甜点要素主要包括地层孔隙压力、地层可压性(脆性)^[8]。北美页岩油气已建立一整套成熟的页岩油气甜点地球物理识别技术系列,为页岩革命的成功提供了重要的技术保障。

近些年来,针对页岩油气甜点的横向预测需求,国内外众多学者利用地球物理技术开展了一系列甜点预测研究,取得一定成效。Sean等^[9]认为利用叠前地震反演和多属性融合分析能够有效识别页岩储层甜点分布;Davie等^[10]通过交汇分析,明确了储层弹性参数与TOC及脆性的关系,通过叠前反演进行了有机碳含量及脆性平面预测;Travella等^[11]采用神经网络技术建立敏感弹性参数和有机碳含量及脆性非线性映射关系,实现有机碳含量和脆性分布有效预测;刘伟等^[12]在四川盆地昭通区块,针对龙马溪组页岩气储层,利用地震叠后数据及分方位叠前数据对进行裂缝预测,采用叠前弹性参数反演技术实现了有机地化参数(有机碳含量)、脆性指数的平面预测;陈树民等^[13]利用定量叠前反演技术对甜点特征进行预测解释,能较好地刻画甜点的空间分布;周东红等^[14]提出利用两种高精度的层速度(约束迪克斯公式反演的层速度和基于高精度波阻抗反演的层速度)来进行地层孔隙压力的计算,有效提高了异常地层压力预测的精度和可靠性;韩向义等^[15]通过分析测井取心脆性矿物含量和岩石物理参数优选,确定了脆性的评价标准及地震评价参数,通过叠前弹性参数反演获得龙马溪组页岩储层的弹性参数体,按照评价标准和评价参数得到龙马溪组页岩脆性的空间分布特征。

综上所述,为实现页岩油甜点的有效预测,需要并

震结合以及叠前/叠后弹性参数反演才能达到较为理想的预测效果。本文以取心井为基础,建立泥质含量、地球化学参数评价、物性参数评价、含气性评价和可压裂性测井评价模型,实现页岩油储层的纵向评价;通过岩石地球物理方法分析甜点储层段地震响应特征及敏感属性,通过宽频约束反演技术预测岩性,应用叠前弹性参数反演预测物性、含油性和地层可压性,利用约束迪克斯公式反演与模型约束波阻抗反演结合技术预测地层压力,实现对地质甜点和工程甜点的“双甜点”预测,建立一套适合于松辽盆地青山口组页岩油甜点识别的技术流程。

1 研究区概况

三肇凹陷位于松辽盆地北部中央拗陷区东北部,为二级负向构造单元,是松辽盆地最重要的生油凹陷和富油凹陷之一^[16]。本次研究区选在三肇凹陷中部的徐家围子向斜一带,位于三肇凹陷的主体部位(图1),面积320 km²。三肇凹陷内已发现的地层主要由中生界和新生界组成,自下而上为白垩系火石岭组、沙河子组、营城组、登娄库组、泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组、明水组,古近系依安组和新近系、第四系的沉积地层^[16],其中青山口组是本次研究的目地层。依据岩性、电性特征以及古生物资料,青山口组垂向上可分为3段,自下而上分别为青一段(K_{2qn}¹)、青二段(K_{2qn}²)、青三段(K_{2qn}³)。青山口组岩性主要为一套黑色—灰黑色泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和砂岩,下部以泥岩为主,上部为泥岩夹砂岩、介形虫层。青一段主要发育暗色泥页岩和油页岩,是本段的重要特征之一,电阻率曲线为刺刀状尖峰高阻。青二、三段主要发育灰色粉砂岩、泥质粉砂岩和泥岩,电阻率曲线为小锯齿状低阻。青山口组沉积时期以深湖—半深湖相为主,局部发育介壳滩和浊积砂沉积微相。青一段是三肇凹陷的主力生烃层,有机碳含量高,热演化程度适中,暗色泥岩厚度大,是源储一体大面积连片分布的页岩油藏,页岩油资源潜力巨大。前人未在本区系统开展过页岩油储层地球物理甜点预测工作,没有相关资料可供参考,加之目的层岩心、测井、录井资料不完整,给开展甜点预测工作带来难题。为此,在已发现的齐家凹陷、古龙凹陷的松页岩油1井、松页岩油2井^[17]系统完整的资料基础上,充分结合三肇凹陷已有资料,

开展了页岩油储层地球物理甜点预测工作。

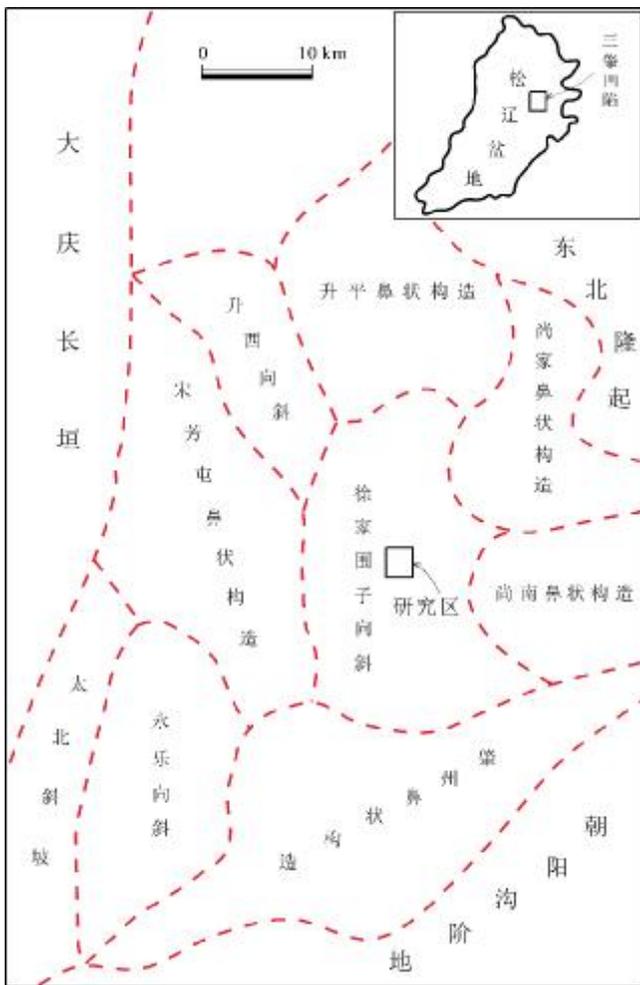


图1 三肇凹陷构造分区及研究区位置
(据文献[16]修改)

Fig. 1 Tectonic division of Sanzhao Sag and location of study area
(Modified from Reference [16])

2 页岩油储层参数测井评价

页岩油储层参数的测井评价主要包含5个方面:泥质含量计算;物性参数评价,包括孔隙度、渗透率计算;含油性参数(含油饱和度)评价;地球化学参数评价,包括有机含量(TOC)和流动烃含量(S_1)的计算;可压裂性评价,包括脆性评价和地层孔隙压力评价。

2.1 泥质含量计算

由于泥质颗粒细小,对放射性物质有较大的吸附能力,所以泥质(黏土)一般具有较高的放射性。沉积岩中天然放射性强弱随泥质含量的增加而增加,在不

含放射性矿物的情况下,泥质含量的多少就决定了沉积岩石的放射性强弱,这就为自然伽马测井计算地层泥质含量提供了物理基础。本研究采用相对值法计算岩石的泥质含量,将纯泥岩的伽马测井值作为最大值,纯砂岩的伽马测井值作为最小值,目的层岩石的伽马测井值与其比较,计算出该岩层泥质体积分量的相对值。具体公式如下:

$$\Delta GR = \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}} \quad (1)$$

$$V_{sh} = \frac{2^{GCUR \times \Delta GR} - 1}{2^{GCUR} - 1} \quad (2)$$

式中, ΔGR 为目的层的自然伽马相对值; GR 、 GR_{\min} 、 GR_{\max} 分别表示目的层、纯砂岩层、纯泥岩层的自然伽马数值; V_{sh} 为地层泥质体积含量; $GCUR$ 为希尔奇指数。

2.2 物性参数计算

2.2.1 孔隙度计算

利用页岩储层的岩石物理体积模型来计算孔隙度,一般有2种计算方式。第一种是利用中子、密度、声波时差三孔隙测度井曲线进行计算,由于中子、密度、声波时差测井曲线反映的是地层的总孔隙度,经过黏土和干酪根的校正,从而得到地层的有效孔隙度;第二种是采用交汇图分析的方式来进行孔隙度计算,一般有中子密度交汇和中子声波交汇两种方式,曲线交汇方式相较于仅靠一条孔隙度曲线拟合计算孔隙度,可以有效解决不稳定性问题,计算精度较高。由于三肇凹陷区目的层段青山口组普遍缺少密度、中子曲线,三孔隙度曲线中仅声波时差在目的层段相对完整,因此在本研究中主要采用声波时差来进行孔隙度计算。公式如下:

$$\text{Porosity} = \frac{DT - DTMA}{DTMF - DTMA} \quad (3)$$

$$\text{Porosity} = \frac{DT - DTMA}{DTMF - DTMA} - V_{sh} \times \frac{DTSH - DTMA}{DTMF - DTMA} \quad (4)$$

式中, Porosity 为目的层孔隙度; DT 、 $DTMA$ 、 $DTSH$ 、 $DTMF$ 分别表示地层、岩石骨架、黏土、孔隙流体的声波时差值; V_{sh} 为地层泥质体积含量。

2.2.2 渗透率计算

利用孔隙度和渗透率的相关性,应用松页岩油1井核磁数据计算有效孔隙度和渗透率数据,建立有效孔隙度与渗透率关系图(图2),其回归公式作为渗透率

的解释模型:

$$K=10^{-4.52+0.533\phi_{hie}} \quad (5)$$

其中, K 为空气渗透率(mD); ϕ_{hie} 为有效孔隙度(%).

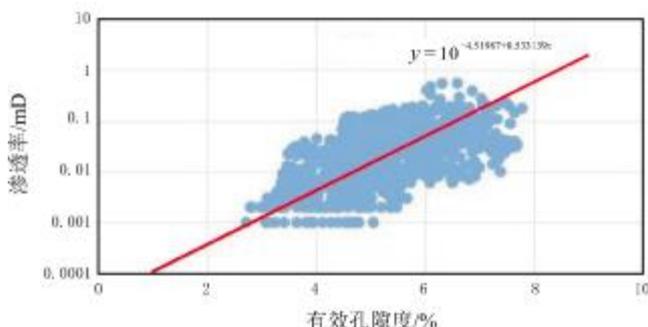


图2 松页油1井核磁数据计算有效孔隙度和渗透率交汇图

Fig. 2 Cross plot of effective porosity and permeability calculated from nuclear magnetic logging data of SYY1 well

2.3 含油饱和度计算

含油饱和度评价是计算页岩游离油量的前提,虽然一些其他测井方法也能提供储集层饱和度的有关信息,但在目前测井解释中使用最多的仍然是以电阻率为基础的饱和度评价模型。

由于斯伦贝谢公司的 Total-Shale 公式考虑了泥质及多种孔隙的影响,其在评价含水饱和度上优于阿尔奇公式,因此本区泥页岩含水饱和度采用 Total-Shale 公式计算:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{\phi^m \times S_w^n}{a \times R_w \times (1 - V_{sh})} + \frac{V_{sh} \times S_w}{R_w} \quad (6)$$

式中, S_w 为含水饱和度(%); R_w 、 R_{sh} 、 R_t 分别为地层水电阻率、泥质电阻率、地层真电阻率(Ωm); ϕ 为孔隙度(%); V_{sh} 为泥质含量(%); a 、 m 、 n 为岩电实验参数。

利用松页油1井青山口组实测的25块含油饱和度样品,结合深侧向电阻率、孔隙度和泥质含量曲线,通过多元非线性回归,确定了岩电实验参数的具体赋值。

2.4 地球化学参数评价

2.4.1 总有机碳计算

总有机碳(TOC)的计算一般利用测井曲线与实测TOC数据之间良好的回归关系来进行。Schmoker^[18]利用密度和自然伽马测井资料计算TOC, Passey等^[19]提出了利用声波曲线和地层电阻率计算的公式, Khoshnoodkia等^[20]提出利用电阻率、中子、密度和声波测井资料与模糊逻辑技术建立神经网络来计算TOC。这些方法在理论上适用于泥页岩的含油性评价,

为富有机质泥页岩含油性评价提供了新的思路。受限于本地区测井曲线资料不完整性,通过选取不同参数组合进行多元线性回归,分析模型计算精度,最终选取了声波时差和深侧向电阻率曲线建立有机碳含量计算数学模型,取得较好效果。公式如下:

$$TOC=0.25 \times LLD+0.02 \times DT-7.02 \quad (7)$$

其中 TOC 为有机碳含量(%), LLD 为深侧向电阻率(Ωm)。

通过计算有机碳含量与实测有机碳含量对比图(图3)看出,计算有机碳含量与实测有机碳含量分布在45°对角线附近,说明计算有机碳含量和实测有机碳含量是基本一致的,平均绝对误差为0.5%。

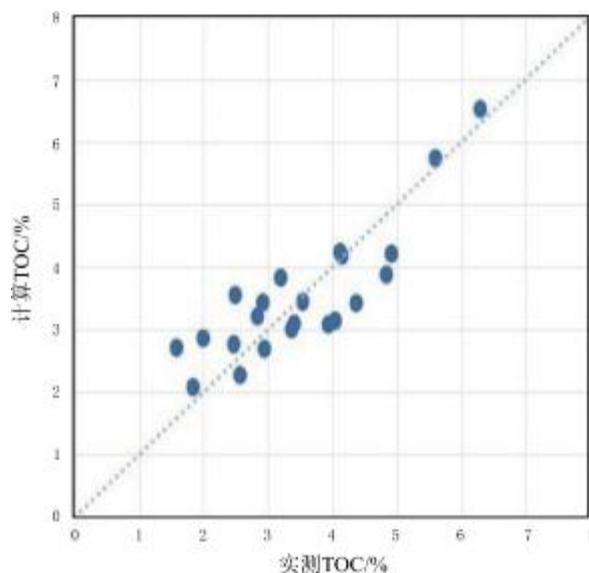


图3 计算有机碳含量与实测有机碳含量对比图

Fig. 3 Diagram of calculated TOC vs. measured TOC in SYY 1 well

2.4.2 游离烃计算

泥页岩中的石油一部分以游离状态赋存于微孔隙和裂缝中,少部分则吸附于有机质和岩石颗粒表面。由于吸附在有机质及岩石颗粒表面的油气基本是不可动的,在现今的开发技术条件下,还不能进行有效开发,因此以游离态存在的油气才是当前页岩油勘探中的主要研究对象。游离烃含量(S_1)是评价页岩油可动性的重要参数。通过研究区徐11井和肇17井青山口组样品实验分析数据,建立 S_1 与 TOC 交汇图,两者具有很好的线性相关关系(图4),相关系数0.88,可作为 S_1 计算模型:

$$S_1=1.05 \times TOC-0.6881 \quad (8)$$

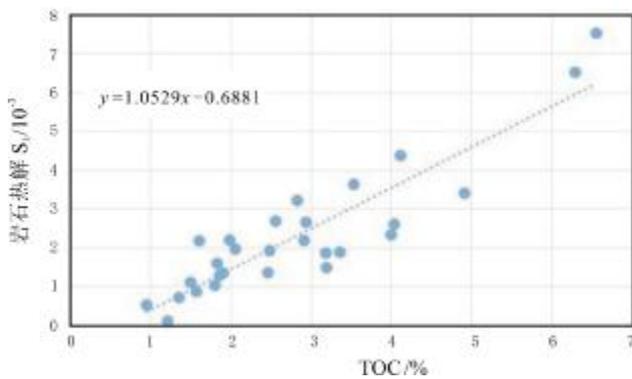
图4 岩石热解 S_1 与有机碳含量关系图

Fig. 4 Diagram of rock pyrolysis vs. TOC

2.5 脆性指数计算

页岩的脆性是页岩油气开发中最关键的评价参数之一,反映岩层在一定条件下被有效压开形成裂缝的能力.岩石的脆性可以由杨氏模量和泊松比描述,杨氏模量与泊松比的大小反映了地层在一定受力条件下弹性变形的难易程度.泊松比指示岩石的塑性,泊松比越小,岩石脆性越强.杨氏模量指示岩石的刚性,其值越大,岩石越不容易发生变形.杨氏模量越大,泊松比越小,脆性指数越大^[21].利用测井数据进行脆性指数计算一般采用弹性参数法,主要原理是利用杨氏模量和泊松比构建弹性参数,对杨氏模量和泊松比分别取权值,实现对页岩脆性指数的评价.

泊松比计算公式:

$$\sigma = \frac{e_{yy}}{e_{xx}} = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (9)$$

式中, σ 为泊松比; e_{yy} 为横向缩短; e_{xx} 为纵向伸长; λ 为拉梅系数; μ 为剪切模量.

杨氏模量计算公式:

$$E = \frac{\rho}{\Delta T_s^2} \left(\frac{3\Delta T_s^2 - 4\Delta T_c^2}{\Delta T_s^2 - \Delta T_c^2} \right) \quad (10)$$

式中, E 为杨氏模量; ρ 为地层体积密度; ΔT_s 为横波速度; ΔT_c 为纵波速度

脆性指数公式:

$$BI_m = 0.5 \left(\frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} + \frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}} \right) \quad (11)$$

其中, BI_m 为脆性指数; E 为杨氏模量, E_{\max} 、 E_{\min} 分别为杨氏模量最大值、最小值; σ 为泊松比, σ_{\max} 、 σ_{\min} 分别为泊松比的最大值、最小值.

2.6 地层孔隙压力计算

异常地层压力包括异常低地层压力和异常高地层

压力.异常高地层压力的研究对指导油田的勘探、开发和钻井工程都具有极其重要的意义.异常地层压力的预测有两类方法:一类是依赖正常压实趋势线的公式法,一类是不依赖正常压实趋势线的公式法.前者主要包括等效深度公式法、Eaton法和Stone法,后者则包括Fillippone法、刘震法和Martinez法等.

Fillippone法是W.R. Fillippone^[22]提出的一种不依赖于正常压实趋势线的地层孔隙压力计算方法,公式为:

$$P_f = \frac{V - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} P_{ov} \quad (12)$$

式中, P_f 为地层孔隙压力(MPa); V_{\min} 为岩石刚性接近于零时的地层速度,近似于孔隙流体速度(m/s); V_{\max} 为岩石孔隙度接近于零时的纵波速度,近似于基质速度(m/s); V_i 为第 i 层的层速度(m/s); P_{ov} 为上覆地层压力(MPa).

由于实际地层压力与纵波速度之间不能简单地用线性关系或对数关系来表示,马海^[23]进一步改进了Fillippone方法,其计算公式为:

$$P_f = \left(\frac{V_{\max} - V_i}{V_{\max} - V_{\min}} \right)^n P_{ov} \quad (13)$$

式中, n 为修正参数.本文采用了不依赖于正常压实趋势线的改进型Fillippone方法.

2.7 页岩油储层测井评价效果

从徐11井处理实例图(图5)可看出,模型计算TOC和岩石热解值与实验分析值基本符合.徐11井青山口组从上至下各层段各项参数计算平均值均逐渐增高,青-2层和青-3层显示最好,计算TOC值平均分别为4.0%和4.3%,岩石热解 S_1 值平均分别为 3.6×10^{-3} 和 3.9×10^{-3} ,含油饱和度平均分别为36.5%和40.8%.

3 页岩油甜点地震预测

综合利用多种地球物理方法和地球化学指标,开展岩性、物性、含油性、TOC、 S_1 、脆性、地层孔隙压力地震预测,建立一套针对陆相页岩油甜点的地震预测方法,并在实践中得到了验证.

3.1 岩性预测

本区青山口组主要发育3类岩性:砂岩、泥岩和油页岩.从岩性的敏感测井参数分析来看,砂岩具有低纵波时差、高电阻、低自然伽马的特征,泥岩具有中高纵波时差、低电阻、中高自然伽马特征,油页岩为高纵

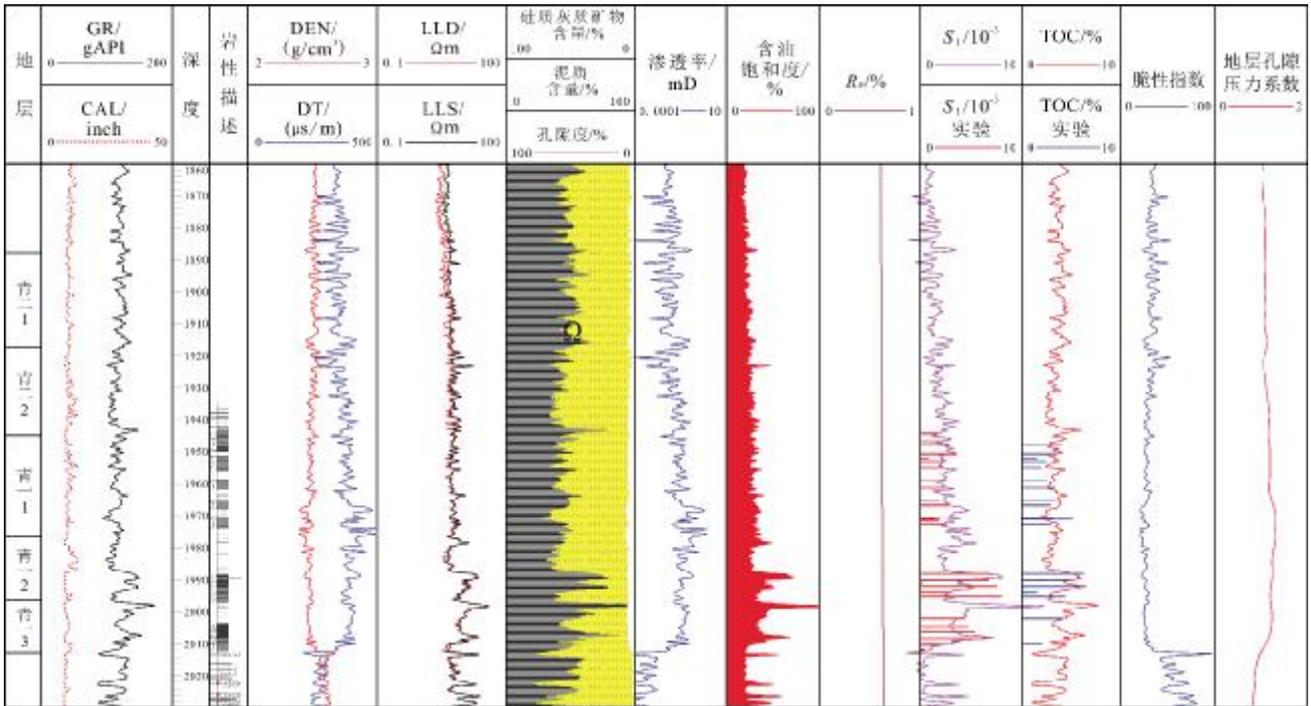


图5 徐11井测井处理成果图

Fig. 5 Logging data processing curves of X11 well

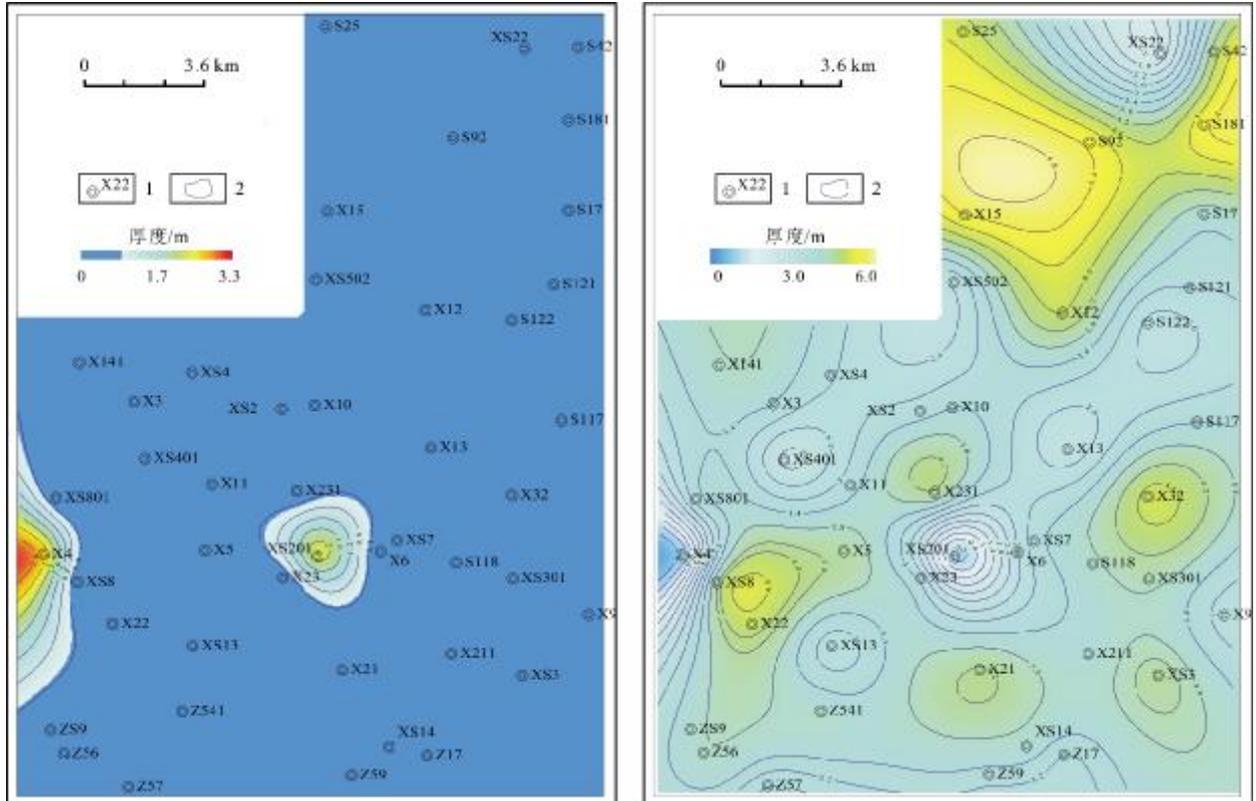


图6 研究区岩性预测图

Fig. 6 Prediction map of lithology in the study area

a—砂岩厚度预测图(sandstone thickness); b—油页岩厚度预测图(oil shale thickness); 1—井名(well name); 2—等值线(isoline)

波时差、高电阻、高自然伽马. 纵波时差是泥岩最为敏感的参数, 通过构建纵波阻抗参数反演可以很好地区分岩性, 小于阻抗值 $1.1107(\text{kg}/\text{cm}^3)\cdot(\text{m}/\text{s})$ 的为泥岩, 大于该值为砂岩.

在反演方法的使用上, 本研究主要采用宽带约束反演技术, 其主要原理是寻找一个最佳的地球物理模型, 使得该模型的响应与观测数据(地震道)的残差在最小二乘意义下达到最小, 是严格意义上的非线性反演. 在建立初始模型时考虑了多种沉积模式的约束, 使用分形插值方法建造地质模型, 完整保留储层构造、沉积和地层学特征在横向上的变化特征. 在降低地震反演中多解性的同时, 在很大程度上克服反演结果的模型化现象, 可有效提高储层预测精度.

图 6 是利用宽带约束反演技术预测出的砂岩(图 6a)和油页岩(图 6b)厚度平面图, 从中可以看出青一段泥岩和油页岩大面积分布, 仅在研究区中部徐深 201 井和西部徐 4 井区一带有砂岩厚度大于 1 m 的区域. 油页岩普遍发育, 北部徐 15—升 181 井区相对较厚, 厚度在 5 m 以上, 其他区域普遍在 3 m 以上.

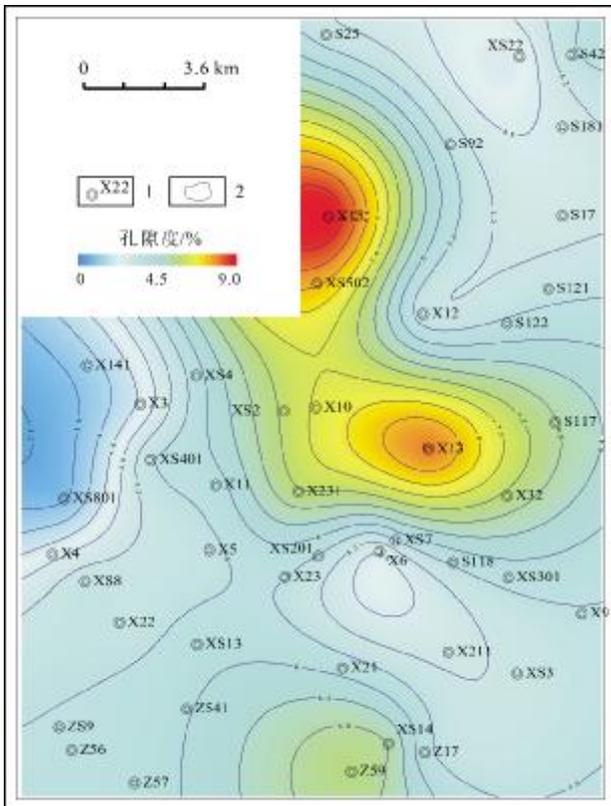


图 7 研究区孔隙度预测图

Fig. 7 Prediction map of porosity in the study area

1—井名(well name); 2—等值线(isoline)

3.2 物性参数(孔隙度、渗透率)预测

利用三维地震资料反演孔隙度的方法的基本原理是: 在精细层位标定的基础上, 利用地震、测井等资料, 采用基于马尔科夫链-蒙特卡罗算法(MCMC)的随机地震反演获得高分辨率波阻抗和岩性反演结果, 然后通过云变换方法建立波阻抗和孔隙度关系, 并结合地质统计学协模拟对储层的孔隙度进行预测^[24]. 渗透率则主要依据测井分析得出的孔隙度与渗透率的指数关系进行变换获得.

通过上述方法对研究区进行了物性参数反演, 获得了青一段孔隙度和渗透率的平面图(图 7、8). 从青一段孔隙度平面图上看, 孔隙度最大为 9.5%, 最小 3.6%, 平均 5.8%, 大于 6% 的高值区集中在徐 15—徐 13 井区一带. 从青一段渗透率平面图看, 渗透率最大为 0.67 mD, 最小 0.01 mD, 平均 0.10 mD, 高值区主要位于北部和中部.

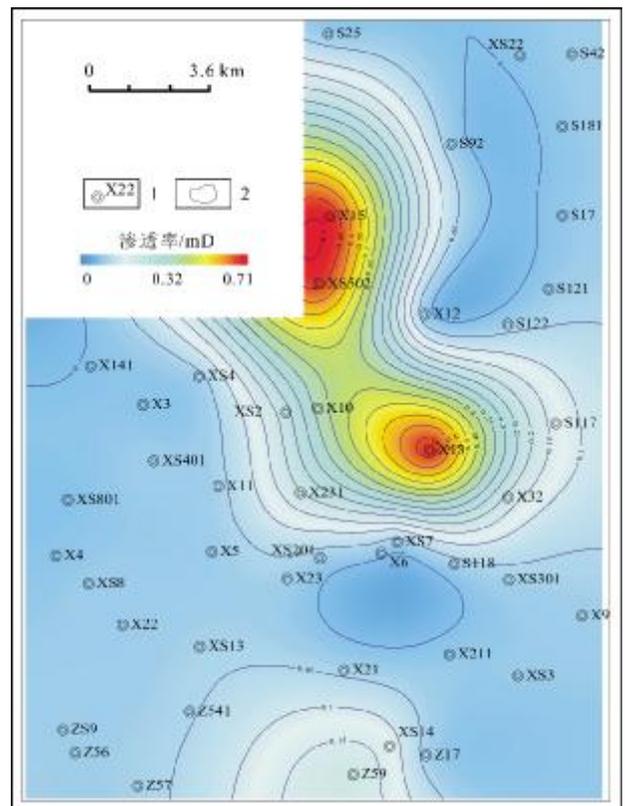


图 8 研究区渗透率预测图

Fig. 8 Prediction map of permeability in the study area

1—井名(well name); 2—等值线(isoline)

3.3 含油饱和度(孔隙度、渗透率)预测

含油饱和度是油藏工程的关键参数, 目前单独利用地震资料进行饱和度计算还鲜见报道, 但利用三维

地质建模技术进行含油饱和度建模是目前较为成熟的技术,其优势是纵向分辨率高、运算速度快,缺点是横向预测性局限,需要在密井网条件下才能达到预测效果.为实现页岩油储层的饱和度的有效预测,本研究采用了相控三维地质建模方法,利用地震反演获得的岩性、孔隙度、渗透率参数建立约束模型.在该模型约束下利用序贯指示随机建模方法进行含油饱和度建模,可有效提高饱和度预测精度.图 9 是利用三维地质模型数据体获得的饱和度平面分布图,从中可见青一段页岩油储层含油饱和度最大值为 48%,最小值 27%,平均值 36%,大于 40%的高值区集中在徐深 502—徐深 801 井区一带.

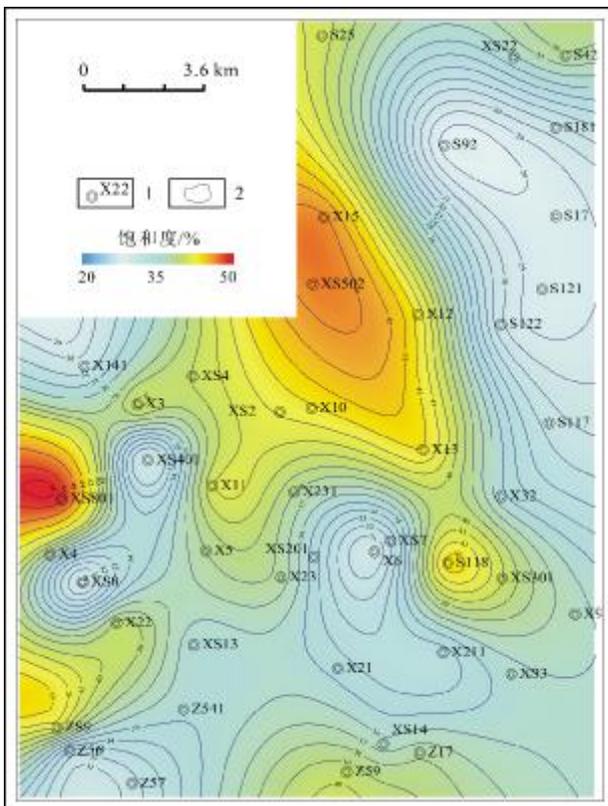


图 9 研究区饱和度预测图
Fig. 9 Prediction map of saturation in the study area
1—井名(well name); 2—等值线(isoline)

3.4 有机地化参数(TOC、 S_1)预测

有机碳含量和游离烃含量是评价页岩具有生烃能力的重要参数.通过岩石物理分析发现,TOC 高值区表现为低密度、低阻抗特征, S_1 高值区表现为低密度、低剪切模量特征.通过开展叠前反演获得叠后反演中不易得到的密度和剪切模量弹性参数,进而与纵波阻

抗进行交汇,获得 TOC 参数和 S_1 参数,达到预测有机地化参数的目的.

从青一段 TOC、 S_1 平面图上来看,TOC 最大值为 4.87%,最小值 2.84%,平均值 3.88%,高值区集中在徐 5—徐 15 井区的中部条带上(图 10); S_1 最大值为 4.44×10^{-3} ,最小值 2.30×10^{-3} ,平均值 3.38×10^{-3} ,高值区主要集中在徐 5—徐 15 井区的中部条带上(图 11).

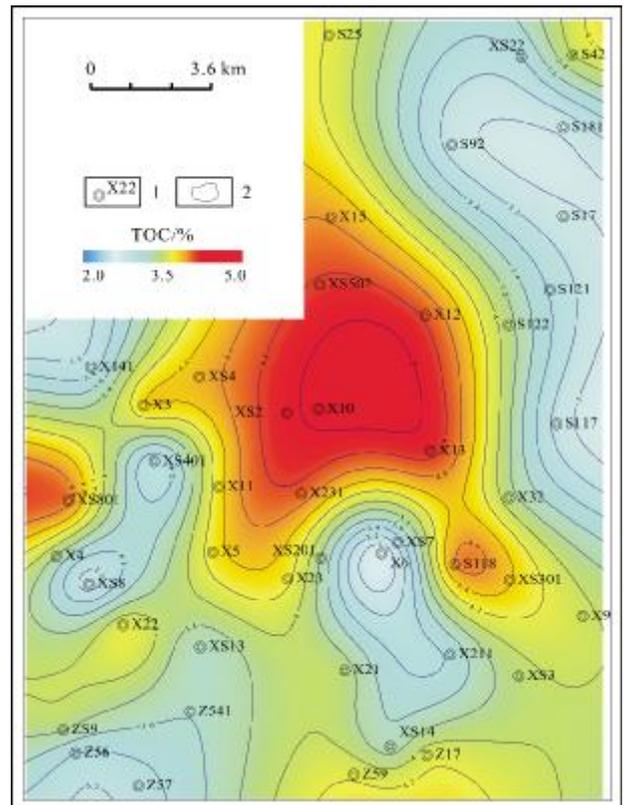


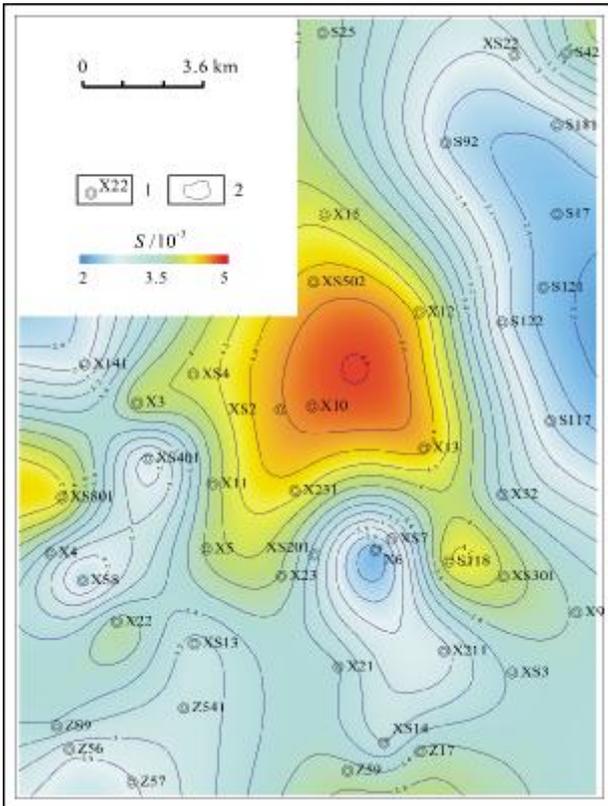
图 10 研究区 TOC 预测图
Fig. 10 Prediction map of TOC in the study area
1—井名(well name); 2—等值线(isoline)

3.5 脆性预测

利用测井资料进行地层可压性评价只能获取纵向上的脆性信息,而横向特征难以描述.利用叠前地震资料反演技术可以获得页岩油储层横向上的脆性展布规律.本研究在测井岩石物理分析的基础上,通过弹性参数组合进行脆性指数计算,利用叠前反演获得页岩储层的弹性参数体,得到脆性指数反演平面图(图 12).从中可以看出,青一段脆性指数最大为 24%,最小 32%,平均 27%,脆性指数适中,较有利工程改造.

3.6 地层孔隙压力预测

利用测井资料只能计算井点处孔隙压力情况,而

图 11 研究区 S_1 预测图Fig. 11 Prediction map of S_1 in the study area

1—井名(well name); 2—等值线(isoline)

对井孔之外的异常地层压力无法进行准确的预测. 相对而言, 以地震资料为主导的孔隙压力预测方法可以很好解决这个问题^[25]. 常规的基于地震资料的异常压力预测方法都是利用超压地层引起地层的“低速特征”, 而要想获得精确的层速度模型难度较大. 为提高层速度模型的反演精度, 充分融合高分辨率波阻抗反演获得的层速度与三维约束迪克斯公式反演得到背景层速度, 来提高层速度的获取精度, 有效提高异常地层压力预测的可靠性. 从预测结果(图 13)来看, 青一段地层压力异常整体呈中间高、四周低的特征, 地层压力系数 1.1~1.3, 为常压—弱超压地层.

4 页岩油有利区优选及应用效果

综合分析青一段沉积相带、有机碳含量、含油性、物性、脆性、地层压力系数等参数, 结果显示有机碳含量、流动烃及含油饱和度较高, 但是孔隙度、渗透率相对较低, 脆性矿物含量也较低. 然而, 通过岩心观察和数字岩心分析, 发现松页油 1、松页油 2 井青一段泥页

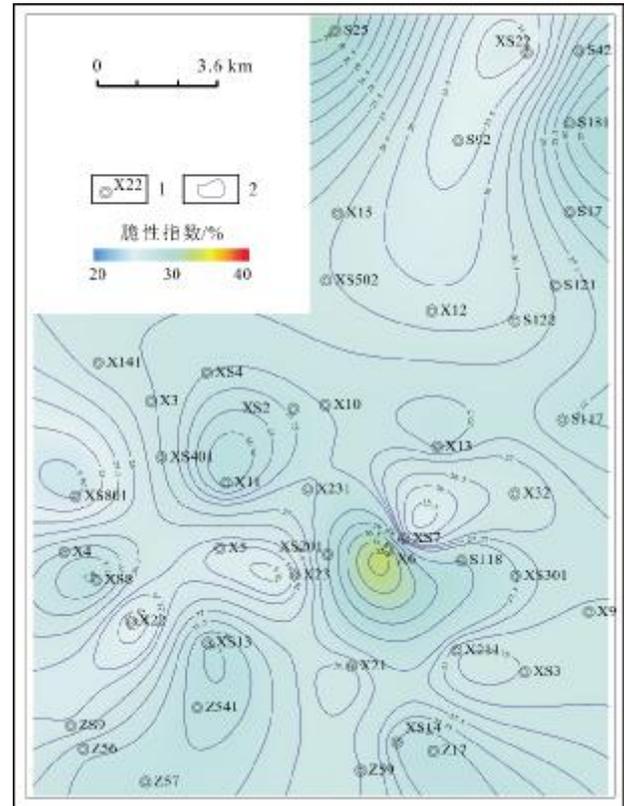


图 12 研究区脆性指数预测图

Fig. 12 Prediction map of brittleness index in the study area

1—井名(well name); 2—等值线(isoline)

岩水平层理层间微缝较发育. 研究认为水平层理层间微缝对页岩油的渗流和产出有利, 是两口井获得工业油流的重要因素. 三肇凹陷中部青一段富含有机质页岩厚度较大, 页理缝发育, 具有与松页油 1、2 井类似的储层条件. 三肇凹陷中部孔隙度与松页油 1、2 井青一段泥岩相当, 渗透率相对更好, 脆性小于松页油 2 井, 但大于松页油 1 井. 整体上看, 三肇凹陷中部与松页油 1、2 井青一段油层组页岩油发育条件相似, 有望获得工业油流突破. 因此, 确定了青一段有机碳含量大于 3.0%、流动烃大于 3.0×10^{-3} 、含油饱和度大于 40%、孔隙度大于 6%、渗透率大于 0.1 mD 为三肇凹陷中部页岩油评价参数条件. 依据上述优选条件在凹陷主体的中部徐 15—徐 12 一带优选了一个甜点目标区, 并部署了松页油 3 井井位目标(图 14).

从实钻结果来看, 松页油 3 井在目的层青一段钻遇地层厚度 93 m, 发育暗色泥岩 86 m, 油页岩 7 m; 有效孔隙度最大值 8.3%, 最小值 3.9%, 平均值 7.0%; 渗透率最大值 0.33 mD, 最小值 0.016 mD, 平均值 0.193 mD;

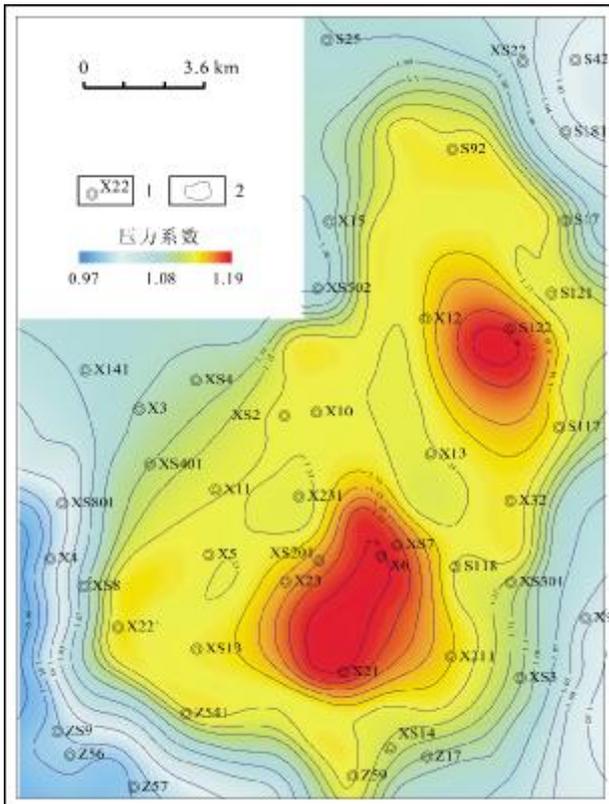


图 13 研究区地层孔隙压力预测图

Fig. 13 Prediction map of formation pore pressure in the study area
1—井名(well name); 2—等值线(isoline)

含油饱和度最大值 37.60%, 平均值 20.80%; 有机碳含量最大值 9.71×10^{-3} , 最小值 0.27×10^{-3} , 平均值 3.72×10^{-3} ; 流动烃含量最大值 9.01×10^{-3} , 最小值 0.60×10^{-3} , 平均值 4.90×10^{-3} ; 脆性指数实验分析测井计算最大值 34.89%, 最小值 11.26%, 平均值 21.39%; 实测压力恢复阶段最高静压 19.831 MPa, 外推地层压力 22.46 MPa, 计算地层压力系数为 1.13. 实钻与钻前预测基本吻合, 证明了本技术流程的有效性. 松页油 3 井经测试获得日产 3.46 m^3 的工业油流, 实现了三肇凹陷页岩油战略调查突破, 形成的页岩油地震甜点预测方法将对国内外其他同类页岩油储层的勘探开发具有一定的借鉴意义.

5 结论

1) 建立了泥页岩泥质含量、物性参数(孔隙度、渗透率)、含油性参数(含油饱和度)、地球化学参数(TOC、 S_1)、可压裂性、地层孔隙压力测井评价模型, 为测井数据处理提供了可靠依据.

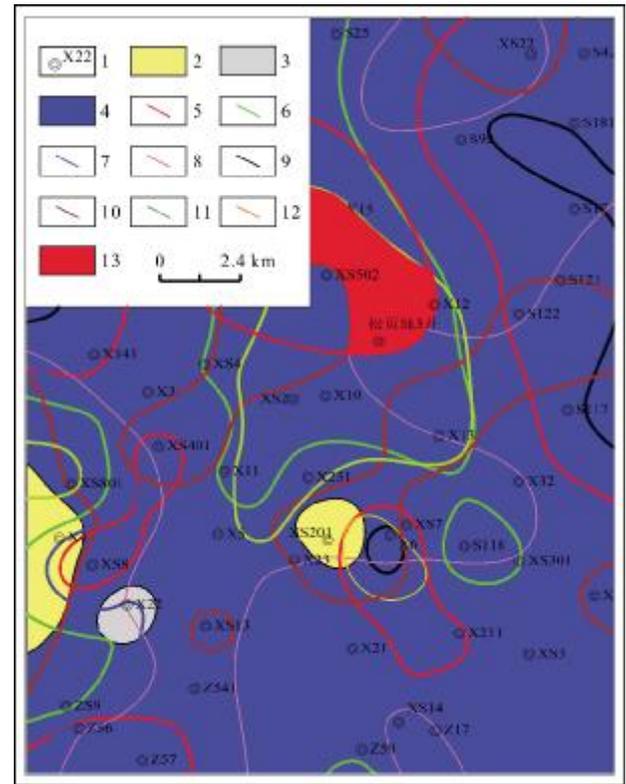


图 14 松页油 3 井综合部署图

Fig. 14 Comprehensive deployment map of SYY3 well
1—井名 (well name); 2—浊积砂体 (turbidite sand body); 3—介壳滩 (shell beach); 4—半深湖 (semi-deep lake); 5—S1; 6—饱和度 (saturation); 7—孔隙度 (porosity); 8—渗透率 (permeability); 9—TOC; 10—油页岩厚度 (oil shale thickness); 11—TI; 12—脆性 (brittleness); 13—有利区 (favorable area)

2) 基于岩石物理分析, 通过地震叠前/叠后弹性参数反演、三维地质建模技术, 实现了页岩油储层的“双甜点”预测, 预测出了三肇凹陷页岩油有利区, 部署了松页油 3 井.

3) 松页油 3 井实钻甜点参数与钻前预测基本吻合, 经测试获得日产 3.46 m^3 的工业油流, 证明了该技术流程的有效性, 为三肇凹陷实现页岩油战略调查突破提供了有力的技术支撑.

参考文献 (References):

[1] 杜金虎, 胡素云, 庞正炼, 等. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景 [J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 560-568.
Du J H, Hu S Y, Pang Z L, et al. The types, potentials and prospects of continental shale oil in China [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 560-568.
[2] 张抗. 从页岩气革命看中国资源勘探的战略方向 [J]. 地质与资源,

- 2013, 22(4): 259-263.
- Zhang K. Shale gas revolution: Impact to China's resources exploration strategy[J]. *Geology and Resources*, 2013, 22(4): 259-263.
- [3] 张欣, 刘吉余, 侯鹏飞. 中国页岩油的形成和分布理论综述[J]. *地质与资源*, 2019, 28(2): 165-170.
- Zhang X, Liu J Y, Hou P F. A review on the formation and distribution theories of the shale oil in China[J]. *Geology and Resources*, 2019, 28(2): 165-170.
- [4] 张林晔, 李钜源, 李政, 等. 北美页岩油气研究进展及对大陆相页岩油气勘探的思考[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(6): 700-711.
- Zhang L Y, Li J Y, Li Z, et al. Advances in shale oil/gas research in North America and considerations on exploration for continental shale oil/gas in China[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(6): 700-711.
- [5] 吴河勇, 林铁锋, 白云凤, 等. 松辽盆地北部泥(页)岩油勘探潜力分析[J]. *大庆石油地质与开发*, 2019, 38(5): 78-86.
- Wu H Y, Lin T F, Bai Y F, et al. Analyses of the mudstone (shale) oil exploration potential in North Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2019, 38(5): 78-86.
- [6] 王玉华, 梁江平, 张金友, 等. 松辽盆地古龙页岩油资源潜力及勘探方向[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(3): 20-34.
- Wang Y H, Liang J P, Zhang J Y, et al. Resource potential and exploration direction of Gulong shale oil in Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(3): 20-34.
- [7] 柳波, 石佳欣, 付晓飞, 等. 陆相泥页岩层系岩相特征与页岩油富集条件——以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段富有机质泥页岩为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 828-838.
- Liu B, Shi J X, Fu X F, et al. Petrological characteristics and shale oil enrichment of lacustrine fine-grained sedimentary system: A case study of organic-rich shale in first member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 828-838.
- [8] 贾曙光, 王军, 王玲玲, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油甜点地震预测方法[J]. *新疆石油地质*, 2020, 41(5): 535-541.
- Jia S G, Wang J, Wang L L, et al. Seismic prediction methods of shale oil sweet spots in Lucaogou Formation of Jimsar sag [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2020, 41(5): 535-541.
- [9] Sena A, Castillo G, Chesser K, et al. Seismic reservoir characterization in resource shale plays: Stress analysis and sweet spot discrimination [J]. *The Leading Edge*, 2011, 30(7): 758-764.
- [10] Davie M, Zhu Y P, Rehkopf O, et al. Characterization of shale gas reservoirs using seismic and well data at Horn River, Canada [C]// *Proceedings of the 82nd Annual International Meeting. Las Vegas, Nevada: SEG*, 2012.
- [11] Tavella J, Moirano J, Zambrano J C, et al. Integrated characterization of unconventional upper Jurassic reservoir in northern Mexico [C]. *Proceedings of the 75th EAGE Conference & Exhibition Incorporating SPE EUROPEC 2013. London, UK, 2013.*
- [12] 刘伟, 梁兴, 姚秋昌, 等. 四川盆地昭通区块龙马溪组页岩气“甜点”预测方法及应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(S2): 211-217, 223, 15.
- Liu W, Liang X, Yao Q C, et al. Shale-gas sweet spot identification in Longmaxi, Sichuan Basin [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(S2): 211-217, 223, 15.
- [13] 陈树民, 韩德华, 赵海波, 等. 松辽盆地古龙页岩油地震岩石物理特征及甜点预测技术[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(3): 107-116.
- Chen S M, Han D H, Zhao H B, et al. Seismic petrophysical characteristics and predicting technique of the sweet spots in Gulong shale oil reservoirs of Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(3): 107-116.
- [14] 周东红, 熊晓军. 一种高精度地层压力预测方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(2): 344-348.
- Zhou D H, Xiong X J. A method for high-precision prediction of formation pressure [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(2): 344-348.
- [15] 韩向义, 阎建国, 朱斗星, 等. 叠前弹性参数反演在龙马溪组页岩脆性预测中的应用[J]. *物探化探计算技术*, 2018, 40(3): 337-344.
- Han X Y, Yan J G, Zhu D X, et al. Application of pre-stack elastic parameter inversion in the prediction of Longmaxi formation shale's brittleness [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 40(3): 337-344.
- [16] 孙雨, 于利民, 闫百泉, 等. 松辽盆地三肇凹陷向斜区白垩系姚家组葡萄花油层油水分布特征及其主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(6): 1120-1131.
- Sun Y, Yu L M, Yan B Q, et al. Oil-water distribution and its major controlling factors of Putaohua reservoir of the Cretaceous Yaojia Formation in syncline area of Sanzhao Sag, Songliao Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(6): 1120-1131.
- [17] 杨建国, 李士超, 姚玉来, 等. 松辽盆地北部陆相页岩油调查取得重大突破[J]. *地质与资源*, 2020, 29(3): 300.
- Yang J G, Li S C, Yao Y L, et al. Significant breakthrough in the continental shale oil survey in northern Songliao Basin [J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(3): 300.
- [18] Schmoker J W. Determination of organic-matter content of Appalachian Devonian shales from gamma-ray logs [J]. *AAPG Bulletin*, 1981, 65(7): 1285-1298.
- [19] Passey Q R, Creaney S, Kulla J B, et al. 1990 A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs [J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(12): 1777-1794.

(下转第 305 页/Continued on Page 305)

- [21]柳波,吕延防,冉清昌,等. 松辽盆地北部青山口组页岩油形成地质条件及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2):280-285.
Liu B, Lü Y F, Ran Q C, et al. Geological conditions and exploration potential of shale oil in Qingshankou Formation, northern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 280-285.
- [22]李吉君,史颖琳,黄振凯,等. 松辽盆地北部陆相页岩孔隙特征及其对页岩油赋存的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(4): 27-34.
Li J J, Shi Y L, Huang Z K, et al. Pore characteristics of continental shale and its impact on storage of shale oil in northern Songliao Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(4) : 27-34.
- [23]黄文彪,邓守伟,卢双舫,等. 页岩有机非均质性评价及其在页岩油资源评价中的应用——以松辽盆地南部青一段为例[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5):704-711.
Huang W B, Deng S W, Lu S F, et al. Shale organic heterogeneity evaluation method and its application to shale oil resource evaluation — A case study from Qingshankou Formation, southern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5):704-711.
- [24]李士超,张金友,公繁浩,等. 松辽盆地北部青一段一、二段泥岩七性特征及页岩油有利区优选[J]. 地质论评, 2017, 63(S1): 71-72.
Li S C, Zhang J Y, Gong F H, et al. The seven properties characteristics of mudstone in the first and second member of Upper Cretaceous Qingshankou Formation and favorable area optimization of shale oil in the north of Songliao Basin[J]. Geological Review, 2017, 63(S1): 71-72.
- [25]秦梦华,王中鹏. 松辽盆地长岭坳陷上白垩统页岩油有利区优选及资源潜力[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(31):209-215.
Qin M H, Wang Z P. Optimization of the favorable area and analysis of the resource potential for the Upper Cretaceous shale oil in Changling Depression, Songliao Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(31):209-215.

(上接第 376 页/Continued from Page 376)

- [20]Khoshnoodkia M, Mohseni H, Rahmani O, et al. TOC determination of Gadvan Formation in South Pars gas field, using artificial intelligent systems and geochemical data[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 78(1): 119-130.
- [21]董宁,许杰,孙赞东,等. 泥页岩脆性地球物理预测技术[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(S1): 69-74.
Dong N, Xu J, Sun Z D, et al. Shale brittleness prediction by geophysical methods[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(S1): 69-74.
- [22]Fillippone W R. Estimation of formation parameters and the prediction of overpressures from seismic data[R]. SEG 0502, Dallas, Texas: SEG, 1982.
- [23]马海. Fillippone 地层压力预测方法的改进及应用[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(6): 56-61.
Ma H. Pore pressure prediction with seismic interval velocity by the modified Fillippone method [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(6): 56-61.
- [24]张磊夫,董大忠,孙莎莎,等. 三维地质建模在页岩气甜点定量表征中的应用——以扬子地区昭通页岩气示范区为例[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(9): 1332-1340.
Zhang L F, Dong D ZH, Sun S S, et al. Application of 3D geological modeling in quantitative characterization of shale gas sweet spots: Case study of Zhaotong national demonstration area of Yangtze region [J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(9): 1332-1340.
- [25]胡华锋,胡起,林正良. 页岩气储层地层压力预测方法及其在四川盆地的应用[J]. 石油物探, 2018, 57(3): 362-368.
Hu H F, Hu Q, Lin Z L. Pore pressure prediction for shale gas reservoirs and its application in the Sichuan Basin, China [J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2018, 57(3): 362-368.

(上接第 404 页/Continued from Page 404)

- Zhang J C, Lin L M, Li Y X, et al. Classification and evaluation of shale oil [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 9(5): 322-331.
- [18]宁方兴,王学军,郝雪峰,等. 济阳坳陷页岩油赋存状态和可动性分析[J]. 新疆石油天然气, 2015, 11(3):1-5.
Ning F X, Wang X J, Hao X F, et al. An analysis in occurrence state and mobility of shale oil in Jiyang Depression [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2015, 11(3): 1-5.
- [19]卢双舫,张敏. 油气地球化学[M]. 北京:石油工业出版社,2008: 19-20.
Lu S F, Zhang M. Petroleum geochemistry [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 19-20. (in Chinese)
- [20]肖飞,杨建国. 湖相泥页岩密闭冷冻测试与现场地化录井热解参数对比研究[C]. 福州:第十二届全国石油地质实验技术学术会议,2020.
Xiao F, Yang J G. Comparative study of the pyrolysis parameters between laboratory test of airtight freezing samples and geochemical mud logging in the well site [C]. Fuzhou: The 12th National Academic Conference of Petroleum Geology Experimental Technology, 2020. (in Chinese)
- [21]李延钧,张烈辉,冯媛媛,等. 页岩有机碳含量测井评价方法及其应用[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1):169-175.
Li Y J, Zhang L H, Feng Y Y, et al. Logging evaluation method and its application for measuring the total organic carbon content in shale gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(1): 169-175.
- [22]Dow W G. Kerogen studies and geological interpretations[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1977, 7: 79-99.