

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2018.5.26

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

潘仁芳¹, 陈美玲¹, 张超谟², 潘进¹

1. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100

2. 长江大学 地球物理与石油资源学院, 湖北 武汉 430100

PAN Renfang¹, CHEN Meiling¹, ZHANG Chaomo², PAN Jin¹

1. College of Earth Sciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. College of Geophysics and Petroleum Resource, Yangtze University, Wuhan 430100, China

PAN Renfang, CHEN Meiling, ZHANG Chaomo, et al. Seismic prediction of Paleogene shale oil “sweet spots” and its influencing factor analysis in the Bonan sub-sag, Jiyang depression. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(4): 142-154

Abstract: Organic-rich terrestrial shales developed in the Paleogene Shahejie Formation in the Jiyang depression, Bohai Bay Basin, China. Seismic prediction of shale oil sweet spots and its influencing factor analysis shall promote studies on shale oil seismic response in the Jiyang depression. Based on seismic, drilling, logging and geochemistry data, we investigated the geophysical response characteristics of shale oil sweet spots using multi-attribute regression method, and performed the influencing factor analysis. The results revealed the parameters for shale oil geological and engineering sweet spots in the lower interval of the 3rd Shahejie Formation in the BNHC seismic area, Bonan sub-sag, Jiyang depression. Organic richness and shale porosity were in the ranges of 3%–6% and 5.0%–12.5%, respectively, with R_o value between 0.81% and 0.94%. Furthermore, widespread overpressure developed in the Shahejie Formation shale reservoir with pressure coefficient between 1.3 and 1.8. And shale brittle index was more than 40% in the Shahejie Formation. Factors affecting geophysical response characteristics of shale oil geological and engineering sweet spots included rock physics parameters, poststack seismic P-impedance and S-impedance inversion data volumes, GR response volume, amplitude, etc. These factors affect the prediction of “sweet spots” to varying degrees. Our comprehensive study results suggest that a “continuous sweet spots” seismic response mode was developed in the Shahejie Formation, and poststack acoustic inversion volume is considered to be the most important factor affecting seismic prediction of shale oil sweet spots in the Shahejie Formation.

Key words: Jiyang depression; shale oil; Shahejie Formation; seismic prediction of “sweet spots”; influencing factors

摘要:中国东部渤海湾盆地济阳拗陷古近系沙河街组发育一套富有机质页岩,页岩油“甜点”地震预测及影响因素分析将进一步推动有关济阳拗陷页岩油地震响应的研究。综合地震、钻井、测井、地球化学等资料,文章利用多属性线性回归方法研究了济阳拗陷渤南洼陷陆相页岩层系“甜点”地球物理响应特征并对其影响因素进行了分析。研究表明,渤南洼陷渤南洪城地震工区沙河街组沙三下亚段页岩油地质和工程“甜点”参数地震预测结果是有机质丰度 TOC 含量值为 3%~6%,有机质成熟度 R_o 为 0.81%~0.94%,页岩孔隙度为 5.0%~12.5%,地层压力为 33~58 MPa,压力系数为 1.3~1.8,脆性指数为大于 40%。沙河街组页岩油地质

收稿日期:2017-09-18;修回日期:2018-03-14

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”项目(2014CB239104);国家自然科学基金项目(41472123)

作者简介:潘仁芳(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事非常规油气资源评价和天然气地球物理方法研究。E-mail: pan@yangtzeu.edu.cn

和工程“甜点”地球物理响应特征主要受岩石物理参数、叠后波阻抗反演地震体、自然伽马 GR 地震体和振幅等因素的影响,且这些因素在不同程度上影响该区“甜点”参数的预测结果。综合研究显示济阳拗陷渤南洼陷沙河街组主要发育“连续型甜点”的页岩油地震响应模式,叠后波阻抗反演地震体是影响沙河街组页岩油“甜点”地震预测最为重要的因素。

关键词: 济阳拗陷;页岩油;沙河街组;“甜点”地震预测;影响因素

中图分类号: P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2018)04-0142-13

0 引言

中国东部(济阳拗陷)广泛发育新生界陆相富有机质页岩,其中沙河街组沙三下亚段是页岩油最具远景的页岩层系,被列为陆相页岩油地球物理研究和勘探实践的重点^[1-6]。页岩油是指低成熟烃源岩滞留在原地页岩地层中或存储在邻近碳酸盐岩夹层中,未经过长距离运移的石油聚集,页岩既是烃源岩、储层,也是盖层,以低孔隙度和低渗透率为典型特征,主要表现为连续型分布特征,是未来非常规油发展的重要领域^[7-17]。可见检测常规的天然气的储层方法不能应用于页岩油“甜点”地震预测研究中。问题的关键是,地球物理方法能够预测沙河街组非常规页岩油“甜点”地球物理响应特征吗?虽然页岩的类型可能存在差异,但在成熟度趋高的页岩孔隙中有机质存在使其在后期的压实过程中未被充分的压实,为用地震方法进行储层预测带来希望。

以井震结合方法为主体的储层表征技术是识别与评价页岩油气储层的核心^[18-24]。国内外许多学者通过页岩油层的岩石物理实验测试,研究页岩油层的地球物理响应特征^[25-27],基于知识表达分别构建对岩石骨架、有机质和压力参数的预测模型^[28-32],这些理论从根本上认识页岩油储层的地球物理响应机理。邹才能等^[12]提出了高产页岩油层应注重研究有机质丰度、有机质成熟度、页岩孔隙度、地层压力、压力系数和页岩脆性指数。沙河街组页岩烃源岩、储层、超压和脆性特征配置关系的研究是中国东部陆相页岩油勘探开发的客观要求,其目的是实现烃源岩品质、储层品质和工程品质的综合评价,以此为基础,确定沙河街组页岩油“甜点”地球物理响应特征,并综合考虑页岩油地质“甜点”与工程品质的地球物理响应机理,最终建立陆相页岩油“甜点”地球物理预测的有效方法和技术。

本文依据岩心观察、分析测试资料、测井资料和地震资料,以渤海湾盆地济阳拗陷为重点,采用多属

性综合预测技术评价页岩油“甜点”位置、潜力和完井质量,开展对济阳拗陷沙河街组页岩油“甜点”地球物理响应机理的研究。通过预测结果分析、讨论,明确了影响沙河街组页岩油“甜点”因素,以揭示陆相页岩油地震响应机理,指导页岩油水平井位置,进而指导沙河街组大规模页岩油的勘探开发,最终推动中国东部陆相页岩油“甜点”地球物理技术的发展,对明确中国页岩油未来开发利用前景与地位具有重要意义。

1 地质背景

渤海湾盆地是中国东部重要的含油气盆地,面积约为 29 000 km²,盆地是在我国东部环太平洋构造区域内岩石圈的拉伸变薄基础上形成的裂谷盆地,由一系列低凸起带隔开多个拗陷组成^[33-34]。渤海湾盆地济阳拗陷是胜利油田的非常规石油的勘探和开发区,截至 2013 年,济阳拗陷多口探井在泥页岩中见油气显示,且获工业油气流(图 1a)^[35-36]。济阳拗陷是华北克拉通盆地内部重要构造单元之一,构造演化主要经历了同生裂谷阶段(65.0~24.6 Ma)和裂谷后期阶段(24.6 Ma~至今),且沿着断裂发育一系列地堑和半地堑构造形态,大部分地堑是孤立的,或者与局部地堑相连接,这些地堑以显著的垂直断裂活动和快速沉积速率为典型特征^[37-42]。同生裂谷阶段自下而上的沉积充填地层为孔店组、沙河街组和东营组,为湖相沉积环境(图 1b);裂谷后期阶段沉积充填地层为馆陶组、明化镇组和平原组,为河流沉积环境(图 1b)^[43-44]。

渤南洼陷位于渤海湾盆地济阳拗陷沾化凹陷的中西部,与济阳拗陷具有极其相似的构造演化和沉积充填特征,是我国东部重要的页岩油聚集洼陷^[45-46]。渤南洼陷古近系沙四段与下伏孔店组为不整合接触,其中沙四段上亚段主要发育扇三角洲、浅湖-半深湖沉积,为湖盆充填。沙三段与下伏地层呈部分微角度不整合或者整合接触,沙三段下亚段以发育深湖泥岩、油页岩、油泥岩、扇

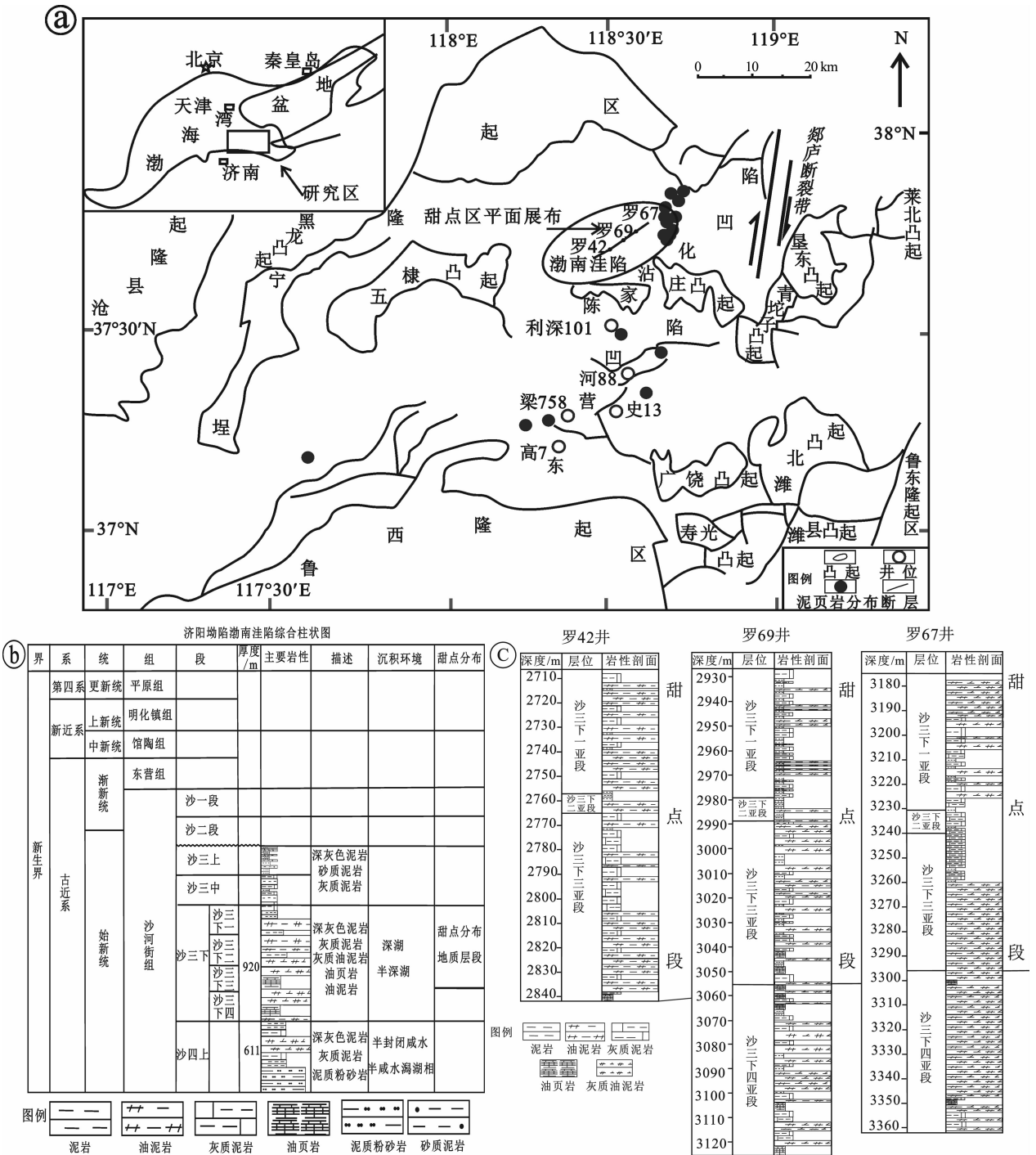


图1 研究区地质背景、地层发育及甜点分布特征

Fig.1 Geological setting, stratigraphic and sweet spots distribution characteristics of the study area

三角洲和湖底扇/浊积扇等深湖-半深湖沉积为典型特征^[43]。总体上,济阳坳陷沙河街组厚度向东北增大,砂质含量向东北呈增多。沙四段上亚段主要由粉砂岩、膏泥岩或碳酸盐岩组成,厚度为77~611 m(图1c);沙三段下亚段主要由泥岩、油泥岩、油页岩、灰质泥岩、灰质油泥岩组成,厚度为45~920 m(图1c)。

2 甜点预测理论和方法

研究区数据主要为渤海洪城地震工区沙河街组页岩油井,分别为罗69井、罗67井和罗42井。主要的测井曲线为自然伽马GR、密度和声波时差。同时也包括罗69井实测岩心TOC含量和镜质体

反射率 R_0 。这些页岩油井有不同的 TOC 含量,所有的数据基于 R_0 为 0.62%~0.94%的有机质成熟范围,属于富有机质页岩油窗。岩石物理特征是确定页岩储层参数的关键,如确定 TOC 含量和孔隙度,以及横波速度是纵波速度和 TOC 含量的函数等。应用 Passey 等^[47]提出的 $\Delta\lg R$ 法预测研究区沙河街组页岩 TOC 含量,罗 69 井沙河街组页岩预测的 TOC 含量和岩心测量的 TOC 含量吻合较好(图 2)。为了说明以井震结合方法为主体的储层表征技术应用于评价和识别沙河街组页岩油“甜点”地球物理响应机理,在此简单介绍所使用的理论。

2.1 有机质丰度

有机质丰度作为评价页岩油“甜点”重要的参数之一,不仅仅是因为它指示石油潜在产量,而且它具有唯一的速度、密度和电阻率特征,影响纵波速度、横波速度和密度等页岩岩石物理特征^[48]。目前,应用 Passey 等^[47]提出的 $\Delta\lg R$ 方法预测页岩有机质丰度是最普遍的和最行之有效的一种方法,该方法采用电阻率-声波曲线重叠法来进行,即在储集层或富含有机质的烃源岩段处,通过估算电阻率曲线和声波曲线两者之间的间距 $\Delta\lg R$,进而获得 TOC 含量值,来达到对有机质丰度预测的目的。具体公式关系如下:

$$\Delta\lg R = \frac{\lg R}{\lg R_{\text{baseline}}} + 0.02 \times (\Delta t - \Delta t_{\text{baseline}})$$

$$\text{TOC 含量} = (\Delta\lg R) \times 10^{(2.297 - 0.1688 \times \text{LOM})} \quad (1)$$

式中: $\Delta\lg R$ 为声波时差与电阻率测井曲线间距在对数电阻率坐标上的读数; R 为实测的电阻率值; Δt 为实测的声波时差; R_{baseline} 为非烃源岩对应 $\Delta t_{\text{baseline}}$ 值时的电阻率;LOM 为成熟度。值得说明的是,在应用 $\Delta\lg R$ 方法预测有机碳含量时,如果有有机质成熟度估算不准确,总有机碳值就会存在一定的误差。因此,在对单井有机质丰度预测的过程中,需要实测的有机碳含量和有机质成熟度值来为结果是否准确提供一种验证。罗 69 井沙河街组页岩底部实测的有机质成熟度值较高,因此在计算过程中,该井在 3 050 m 以深层段 LOM 取值为 10.5,3 050 m 以浅层段 LOM 取值 9.5。

2.2 有机质成熟度

有机质热演化能够明确烃源岩的空间变化特征,有利于研究页岩生烃和排烃窗,同时也是页岩微储层形成机理之一^[7,49-51]。有机质成熟度的预测方法主要是用测井和地震来预测成熟度值,Sharma

等^[52]对 Vaca Muerta 地层页岩的研究表明,自然伽马(GR)地震数据体能够有效识别烃源岩。国外预测有机质热演化主要采用 Schmoker^[53]提出的储层孔隙度与成熟度之间存在的幂函数关系:

$$\varphi = aM^b \text{ 即 } R_0 = a'\varphi^{b'} \quad (2)$$

式中: φ 为酸盐岩、砂岩或者泥页岩的孔隙度,%; M 为成熟度,可以是 TTI 或者镜质体反射率 R_0 ,%; a' 、 b' 值是根据已有井资料孔隙度和镜质体反射率值进行拟合来获取的。根据露头剖面样品分析化验得到的孔隙度和镜质体反射率值进行交汇分析,就可得到两者的拟合关系。由于不同盆地的埋藏史和热演化史是变化的,因此,将该方法应用到济阳坳陷时应根据研究区实际的页岩油井实测的孔隙度和有机质成熟度来拟合,再经过校正,从而得出 a' 、 b' 的值。罗 69 井沙河街组页岩实测的孔隙度与实测的 R_0 拟合结果显示该井区沙河街组 a' 为 0.626, b' 为 0.165。

2.3 页岩孔隙度

Sondergeld 等^[54]应用实验方法测定页岩孔隙度,不同压碎程度的页岩样品测得的结果可能存在差异,页岩孔隙度测量还应考虑孔隙压力和黏土矿物脱水的影响。Yenugu 和 Vernik^[55]基于地球物理测井预测富有机质页岩测井孔隙度,页岩测井孔隙度的预测也受骨架密度、流体密度和有机质丰度的影响。根据研究区罗 69 井沙河街组实测的页岩孔隙度分析,综合国外对页岩孔隙度的研究方法,研究区沙河街组页岩孔隙度主要表达式为

$$\varphi = 100 \times \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m - \rho_f} \quad (3)$$

式中: φ 为页岩孔隙度,%; ρ_m 为骨架密度, g/cm^3 ; ρ_b 为体积密度, g/cm^3 ; ρ_f 为流体密度, g/cm^3 。该方法如果仅仅采用系数 100,在页岩油井的计算过程可能会高估孔隙度,因此应该根据单井实测的数据加以详细研究,找出更适合不同地区不同盆地的系数。在计算过程中,研究区沙河街组采用 60 作为预测沙河街组页岩油孔隙度的系数。通过对比分析国外学者^[54]定义的体积密度为 $2.71 \text{ g}/\text{cm}^3$,流体密度为 $1.00 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。笔者根据所收集的资料,详细的分析罗 42 井、罗 69 井和罗 67 井沙河街组页岩油井实测的孔隙度值的统计分析,经过计算,研究区沙河街组体积密度值为 $2.67 \text{ g}/\text{cm}^3$,流体密度值为 $1.03 \text{ g}/\text{cm}^3$,计算结果和实际测得的孔隙度吻合较好,说明密度测井数据能够准确地预测沙河街组页岩孔隙度。

2.4 地层压力

超压对页岩油的富集、保存和初始产量都有重要影响,精确的页岩油地震地层压力预测不仅可以明确超压分布特征,而且能够明确页岩油初次运移路径,进而有利于设计适合的井身和实时更新钻井数据,预测页岩油资源潜力^[56-59]。Eaton^[59]方法是以声波测井资料为基础预测孔隙压力,该方法利用正常压实沉积物声波旅行时间和静水压力等参数的幂指数关系:

$$p_p = \sigma_v - (\sigma_v - p_h) \left(\frac{\Delta t_{\text{norm}}}{\Delta t} \right)^x \quad (4)$$

式中: p_p 为孔隙压力,MPa; σ_v 为垂直应力,MPa; p_h 为静水压力,MPa; Δt_{norm} 为研究深度正常压实趋势线的声波旅行时间; Δt 为实际泥岩中的声波旅行时间; x 为指数。Eaton 方法指数 x 幂随不同地区(地质沉积盆地)和边界井的变化而变化,在实测的预测中,Eaton 指数的选择最为关键,通常地,由于欠压实所形成的超压指数为 3.0,同一构造单元各井的 Eaton 指数变化不大。测井上预测的结果表明 Eaton 指数为 3.0 时比较适合济阳坳陷的实际情况,可以比较准确的用来计算和预测济阳坳陷沙河街组页岩地层压力。

2.5 页岩脆性指数

Sayers 等^[60]提出了高产页岩油层不仅需要考虑到页岩储层甜点区域,还需要考虑完井质量,页岩脆性是评价天然裂缝发育和水力压裂技术的重要参数之一。Rickman 等^[61]提出岩石脆性是泊松比和杨氏模量的函数,泊松比和杨氏模量是衡量页岩应力和裂缝的主要参数,有利于指导水平井的布置。Rickman 等^[61]和 Li 等^[62]提出页岩脆性指数公式为

$$B_E = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \times 100\%$$

$$B_\sigma = \frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}} \times 100\%$$

$$B_1 = \frac{B_E + B_\sigma}{2} \times 100\% \quad (5)$$

式中: E 为杨氏模量; B_E 为杨氏模量的脆性; E_{\max} 和 E_{\min} 分别为杨氏模量的最大值和最小值,MPa; σ 为泊松比; B_σ 为泊松比脆性; σ_{\max} 和 σ_{\min} 分别为泊松比最大值和最小值; B_1 为脆性指数。在实际工区研究过程中,该方法只根据岩石物理参数来预测和计算脆性指数,没考虑到脆性矿物含量(石英、方解石和黄铁矿)的影响。根据所获取的资料,通过计算,罗

42 井、罗 69 井和罗 67 井沙河街组页岩杨氏模量最大值分别为 30.50、41.19 和 50.52 GPa;杨氏模量的最小值分别为 11.44、12.18 和 13.39 GPa;罗 42 井、罗 69 井和罗 67 井沙河街组页岩泊松比最大值均为 0.48;泊松比最小值分别为 0.29、0.33 和 0.32。通过计算,测井和地震预测的结果吻合较好,说明经验公式的可靠性。

3 页岩油“甜点”地震预测

3.1 有机质丰度预测

本文根据研究区页岩油井测井资料分析,利用研究区声波时差与电阻率重合在储集层或富含有机质的烃源岩段处提取声波时差值和电阻率值,同时利用声波时差与电阻率重合在非烃源岩层提取 $\Delta t_{\text{baseline}}$ 值和 R_{baseline} 值,根据实测的 TOC 含量值与 $\Delta \lg R$ 交汇提取出 LOM 值,再根据公式(1)计算出研究区沙河街组页岩油井的 TOC 含量值,其中罗 69 井预测的 TOC 含量值和实验室获取的 TOC 含量值吻合较好,表明经验公式的可靠性(图 2)。根据井震结合方法同时应用多属性分析法从地震上预测研究区 TOC 含量值,测井和地震预测的 TOC 含量值吻合较好,验证了方法的合理性(图 3)。

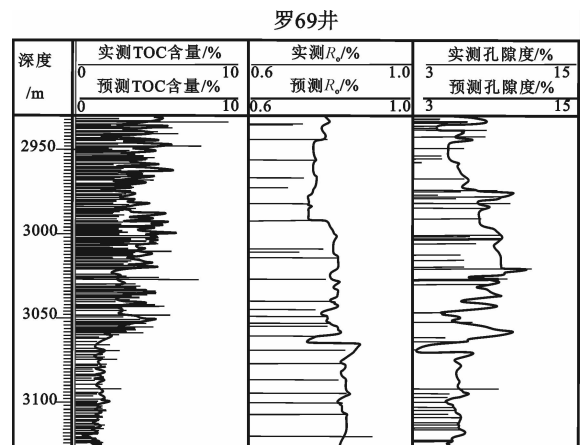


图2 罗 69 井沙河街组实测结果和预测结果对比
Fig.2 Comparison of actual and predicted “sweet spots” parameters for the Shahejie Formation shale from the Luo69 well

罗 42 井、罗 69 井和罗 67 井沙河街组页岩有机质丰度地球物理预测显示预测的 3 口沙河街组页岩 TOC 含量分别为 3.3%~6.3%、1.3%~4.6% 和 2.1%~4.6%,主要表现为大于 2%,烃源岩品质好,具有较好的连续性,井震吻合较好,具有很高的精度,充分证明了以井震结合为主体的储层表征方法

在渤海洪城地震工区页岩油应用中的可行性和有效性(图3)。图3所示为沙河街组页岩有机质丰度地震响应模型,明确了页岩油“甜点”(TOC含量>3%)从黄色变成蓝色区域的地震响应特征。罗42井沙河街组较罗69井和罗67井具有更高的有机碳含量地震响应特征(黄色到浅蓝色),是该井获得高产油的重要因素之一(图3)。

3.2 页岩有机质成熟度预测

本文根据研究区页岩油测井资料分析,利用研究区预测的孔隙度值计算有机质成熟度 R_o ,如公式(2)所示,测井预测的 R_o 值和实验室测得的 R_o 值吻合较好,说明经验公式的可靠性(图2)。再根据井震结合方法同时应用多属性分析法从地震上预测研究区 R_o 值,测井和地震预测的 R_o 吻合较好,

说明了预测结果的合理性(图4)。图4所示为罗42井、罗69井和罗67井沙河街组页岩有机质成熟度地震预测结果。显然,预测的研究区3口页岩油井沙河街组页岩 R_o 值集中在0.81%~0.94%,处于生油高峰阶段,预测结果相关性约为90%,井震吻合较好。从图4中的预测结果可以看出,沙河街组页岩油“甜点”(R_o 为0.81%~0.94%)主要为浅蓝色~蓝色区域的地球物理响应,主要表现为当 R_o 为0.81%~0.94%,单井产量增加。沙河街组页岩有机质热演化 R_o 值约为0.74%,油气开始大量生成,并发生排烃,地震响应特征表明3口井沙河街组页岩主要处在生烃和排烃阶段^[33]。因此认为研究区沙河街组页岩已经具备石油富集成藏的成熟度的地震响应条件。

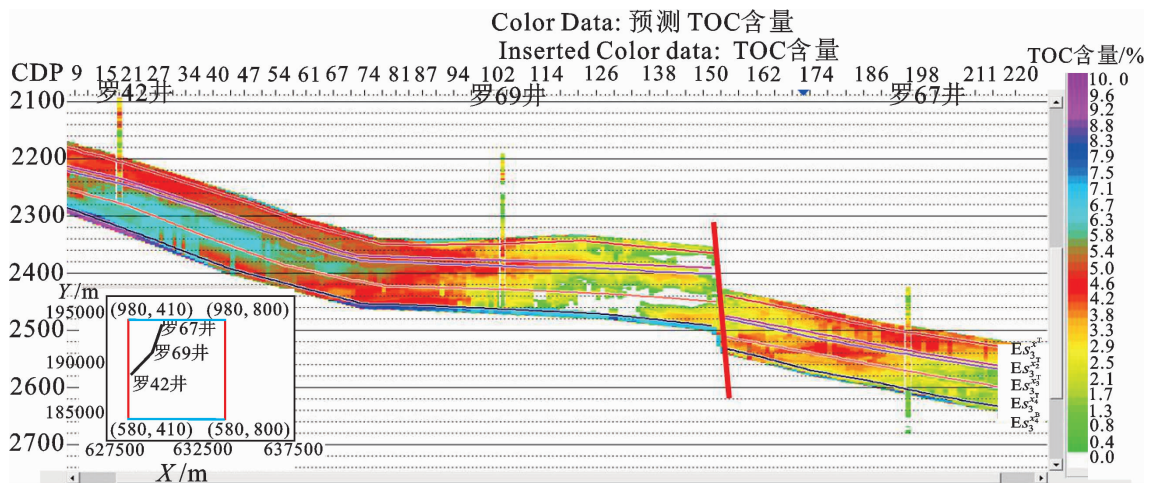


图3 沙河街组页岩有机质丰度地震预测图

Fig.3 Seismic prediction of organic content for the Shahejie Formation shale

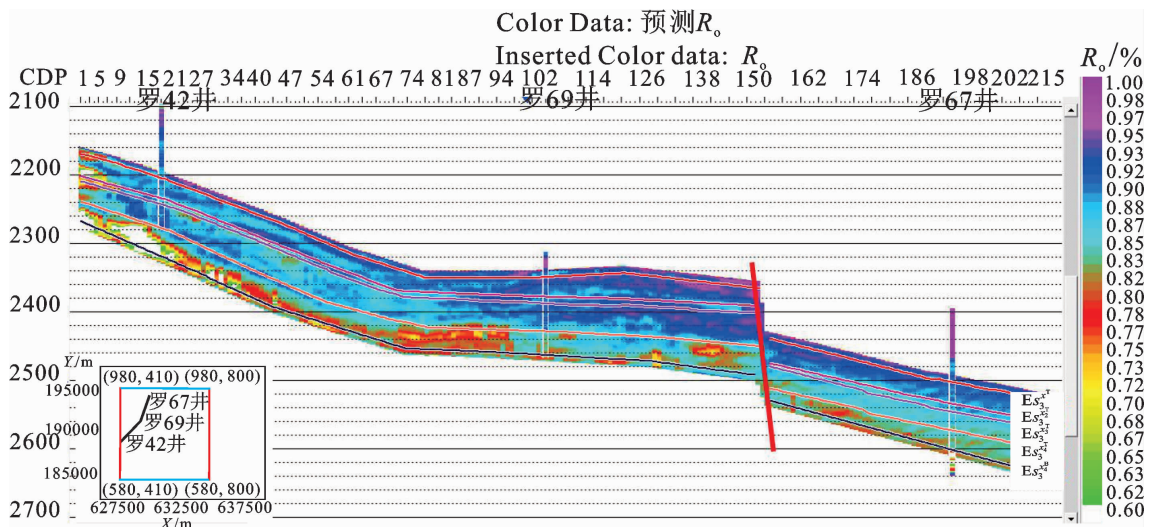


图4 沙河街组页岩有机质成熟度地震预测图

Fig.4 Seismic prediction of thermal maturation of organic matters for the Shahejie Formation shale

3.3 页岩孔隙度预测

本文根据研究区页岩油井测井资料分析,利用实测的密度测井再根据公式(3)计算出研究区沙河街组页岩油井的孔隙度值,测井预测的孔隙度值和实验室测得的孔隙度值吻合较好,说明经验公式的可靠性(图2)。根据井震结合方法同时应用多属性分析法从地震上预测研究区页岩孔隙度,测井和地震预测的页岩孔隙度吻合较好,说明了预测结果的合理性(图5)。从图5中的预测结果可以看出,罗42井、罗69井和罗67井沙河街组页岩孔隙度分别为10.0%~15.8%、5%~15%和5.0%~12.5%,可知沙河街组页岩以低孔隙度地震响应为典型特征,页岩油具有良好的储集空间,井震吻合较好,具有很高的精度。基于沙河街组页岩孔隙度地震响应模型的建立,明确了页岩油“甜点”(孔隙度为5.0%~12.5%)主要为红色到浅蓝色区域的地球物理响应

特征(图5),主要表现为当孔隙度为5.0%~12.5%时,单井产量较高。总体来看,随着埋藏深度的增加,沙河街组页岩孔隙度呈降低趋势的地震响应特征。

3.4 页岩孔隙压力和压力系数预测

超压是影响有机质成熟度的重要因素之一,精确的孔隙压力预测在非常规油气勘探中起着至关重要的作用^[40]。本文通过对研究区页岩油井测井资料的分析,根据公式(4)预测出研究区沙河街组页岩油井的孔隙压力值,根据井震结合方法同时应用多属性分析法从地震上预测研究区孔隙压力,测井和地震预测的孔隙压力吻合较好,说明预测结果的合理性(图6)。图6所示为罗42井、罗69井和罗67井沙河街组页岩孔隙压力地球物理预测结果,可以看出沙河街组页岩油层普遍发育超压,显然罗42井沙河街组较罗69井和罗67井沙河街组超压幅度小,沙河街组页岩油主要表现为连续型超压的地震响应特征。

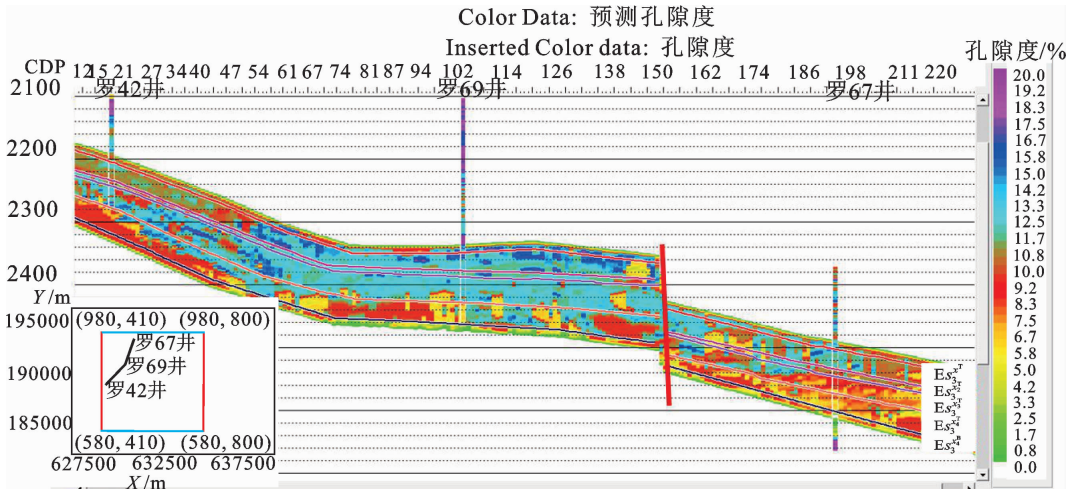


图5 沙河街组页岩孔隙度地震预测图
Fig.5 Porosity seismic prediction for the Shahejie Formation shale

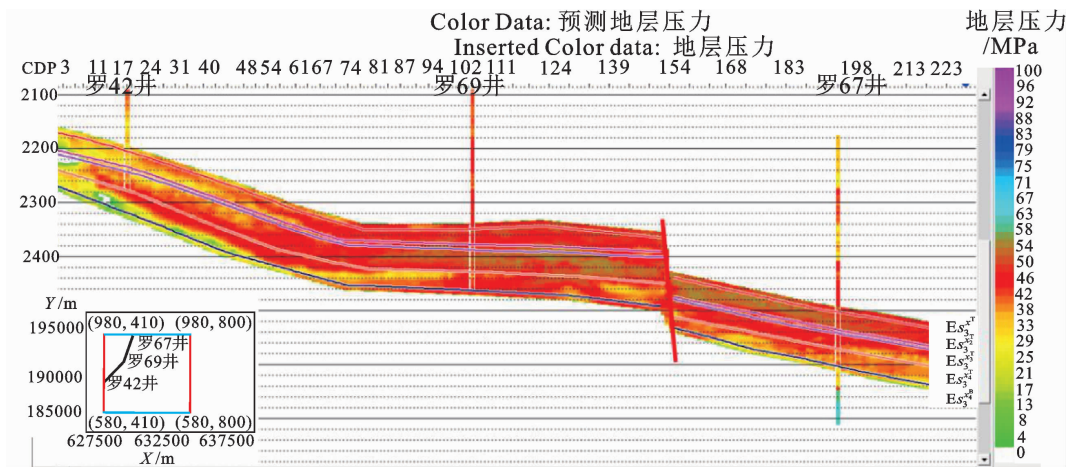


图6 沙三下亚段页岩地震地层压力预测
Fig.6 Calculated formation pressure from seismic data for the lower interval of the 3rd Shahejie Formation shale in the study area

罗 42 井、罗 69 井和罗 67 井沙河街组页岩地震地层压力系数分别为 1.30~1.60、1.40~1.82 和 1.10~1.60,基于沙河街组页岩压力系数地震响应特征,明确了页岩储层压力(压力系数为 1.30~1.80)主要是从红色到蓝色区域的地球物理响应机理(图 7),主要表现为当压力系数为 1.30~1.80 时,单井产量增加。说明异常高压影响沙河街组页岩油的成藏特征。

3.5 页岩脆性指数预测

笔者根据研究区岩石物理参数对沙河街组页岩的泊松比值和杨氏模量进行预测,结果表明沙河街页岩泊松比值为 0.29~0.33,杨氏模量值为 11.44~50.52 GPa,应用公式(5)计算出渤南洼陷渤南洪城工区沙三下亚段页岩油井的脆性指数值,再采用井

震结合表征技术对沙河街组页岩进行地震预测,地震预测结果与测井预测结果吻合较好,说明预测结果的合理性(图 8)。渤南洪城工区罗 42 井、罗 69 井和罗 67 井页岩地震预测结果显示该区页岩脆性指数值约为 38%~46%、38%~50%和 38%~43%,总体上,脆性指数值较高,易于页岩油的开采。基于渤南洼陷渤南洪城工区沙三下亚段页岩脆性指数地球物理响应特征的分析,进一步明确了页岩油层脆性指数大于 40%(浅黄色-红色区域)为甜点区,当该区页岩脆性指数为大于 40%时,单井获得最佳产量。这说明研究区页岩油层具有高脆性指数值,进而有利于水平井多阶段压裂技术的应用,基于页岩脆性指数方面为油田增产和开采提供地球物理依据。

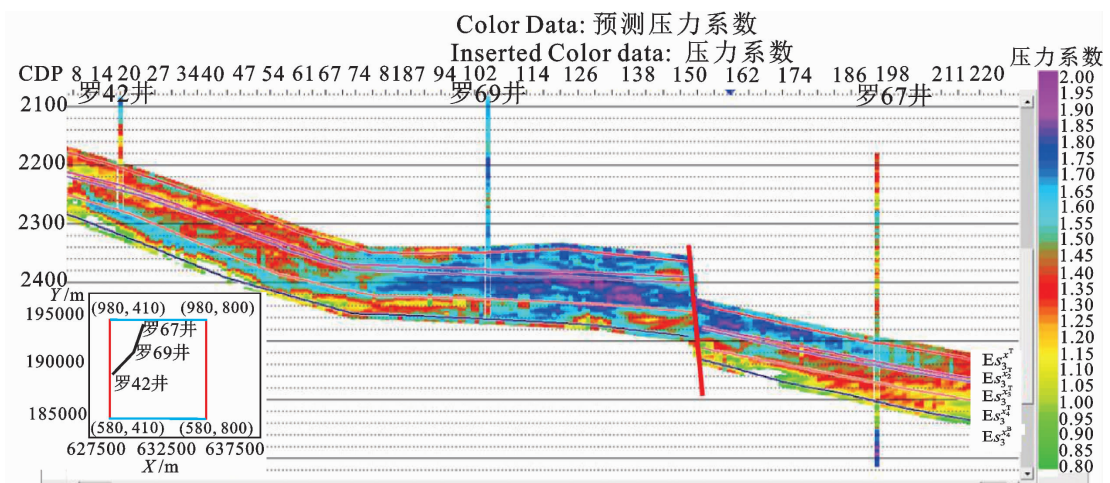


图 7 沙三下亚段页岩地震压力系数预测

Fig.7 Calculated pore pressure coefficients from seismic data for the lower interval of the 3rd Shahejie Formation shale

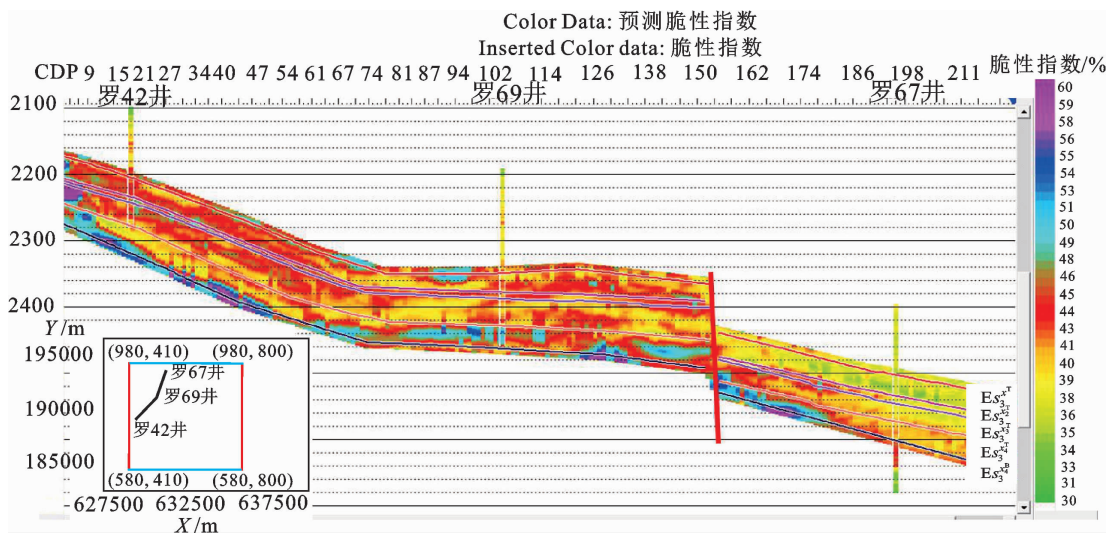


图 8 沙三下亚段页岩脆性指数地震预测

Fig.8 Calculated brittle index from seismic data for the lower interval of the 3rd Shahejie Formation shale

济阳拗陷渤南洼陷渤南洪城工区罗 69 井沙河街组页岩测井预测的 TOC 含量值、 R_v 值和孔隙度值与实验室测得的页岩 TOC 含量值、 R_v 值和孔隙度值吻合较好,罗 69 井沙河街组页岩测井和地震预测的 TOC 含量值、 R_v 值和孔隙度值吻合较好,表明经验公式的可靠性,能够有效地应用到济阳拗陷渤南洪城地震工区页岩油甜点地震预测中。根据经验公式与研究区实际情况结合,罗 42 井、罗 69 井和罗 67 井沙河街组页岩测井预测的 TOC 含量值、 R_v 值和孔隙度值与地震预测 TOC 含量值、 R_v 值和孔隙度值吻合较好,具有较高的精度。罗 42 井、罗 69 井和罗 67 井沙河街组页岩测井预测的孔隙压力、压力系数和脆性指数与地震预测的孔隙压力、压力系数和脆性指数值吻合较好,具有较高的精度,表明预测结果的合理性。由此可见,研究区沙河街组页岩油地质和工程“甜点”参数测井预测结果和实验室测得结果吻合较好,测井预测的“甜点”参数和地震预测的“甜点”参数结果一致性较好,这说明沙河街组页岩油“甜点”参数预测结果的合理性。

4 页岩油“甜点”影响因素分析

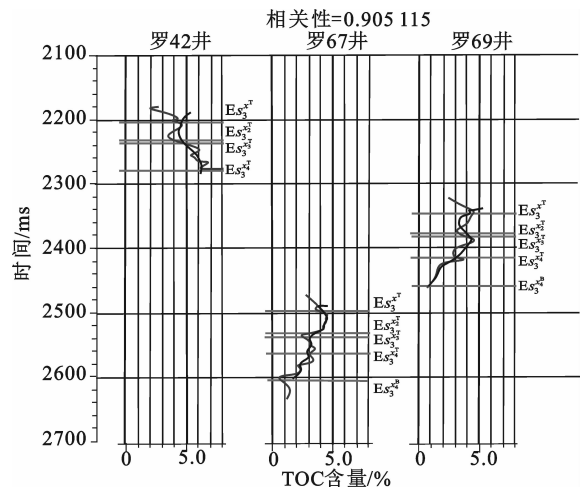
4.1 TOC 含量影响因素

研究区渤南洼陷渤南洪城地震工区罗 42 井、罗 69 井和罗 67 井沙河街组页岩有机质丰度地震响应特征主要受横波阻抗、低频、X 坐标和时间等因素的影响(表 1)。值得说明的是,这些影响因素并非为并列关系,因为这些属性在不同程度上影响着预测结果的精度,测井预测的 TOC 含量结果和地震预测的 TOC 含量结果相关性约为 0.905 1(图 9)。图 9 中显示井震模拟结果吻合较好,说明预测结果的合理性。多属性回归方法预测结果说明低频代表渤南洼陷渤南洪城工区沙河街组沙三下亚段页岩烃源岩层和裂缝,且有机质丰度的地震响应特征主要叠后反演的横波阻抗体的影响,因为利用叠后地震数据反演的横波阻抗体是识别沙河街组有机质丰度地震响应最为关键的地震体,进一步分析表明绝对振幅和主频率在一定程度上能够提高预测结果的稳定性和精度。

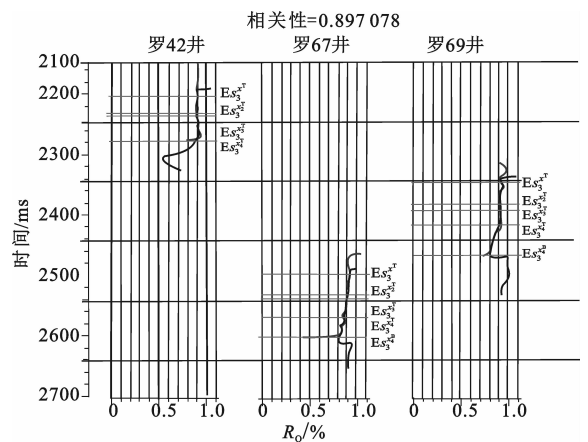
4.2 R_v 影响因素

渤南洪城地震工区沙三下亚段页岩 R_v 。地震响应特征主要受时间、预测的自然伽马(GR)体和视极

性地震数据的影响(表 1)。这些影响因素并非为并列关系,因为这些属性在不同程度上影响着预测结果的精度,实际的 R_v 曲线和地震模拟的 R_v 曲线相关性约为 0.897 0,说明预测结果的合理性(图 10)。对比页岩油层 TOC 含量和孔隙度的影响因素分析,应用叠后地震数据预测的自然伽马 GR 体对渤南洪城工区沙三下亚段页岩有机质成熟度的影响起主要作用,因为 GR 体在预测有机质成熟度中作为重要的地震属性能够准确识别研究区 R_v 的地震响应特征。值得说明的是,叠后纵波阻抗地震体是识别 GR 地震体的关键地震属性,因为利用叠后地震数据反演的纵波阻抗能够准确预测沙河街组页岩自然伽马 GR 的地球物理响应特征,对研究结果精度的提高起着促进作用。



图例 —— 原始曲线 —— 模拟曲线 —— 分析时窗
图 9 井震模拟的 TOC 含量曲线结果对比图
Fig.9 Correlation of experimental and simulated TOC curves from seismic data



图例 —— 原始曲线 —— 模拟曲线 —— 分析时窗
图 10 井震模拟的 R_v 曲线结果对比图
Fig.10 Correlation of experimental and simulated R_v curves from seismic data

4.3 页岩孔隙度影响因素

渤南洪城地震工区沙三下亚段页岩孔隙度地震响应特征主要受叠后横波阻抗体、时间、X 坐标和频率等因素的影响(表 1)。这些影响因素并非为并列关系,因为这些属性在不同程度上影响着预测结果的精度,测井预测结果和地震预测结果相关性约为 0.979 7,在研究过程中,页岩孔隙度参数的地震预测应用到神经网络方法,因为该方法有利于提高研究区孔隙度地震预测结果的准确度(图 11)。多属性分析研究表明横波阻抗是影响沙河街组页岩孔隙度地震预测结果最为主要的因素,因为利用叠后地震数据反演的横波阻抗体能够准确识别研究区页岩孔隙度的地球物理响应特征,首次证明了渤南洪城工区沙三下亚段页岩油层显著的非均质性。进一步研究表明,时间和频率与研究区页岩孔隙度地震预测结果的精度和准确度有关,这是因为时间和频率在不同程度上提高了预测结果的精度。

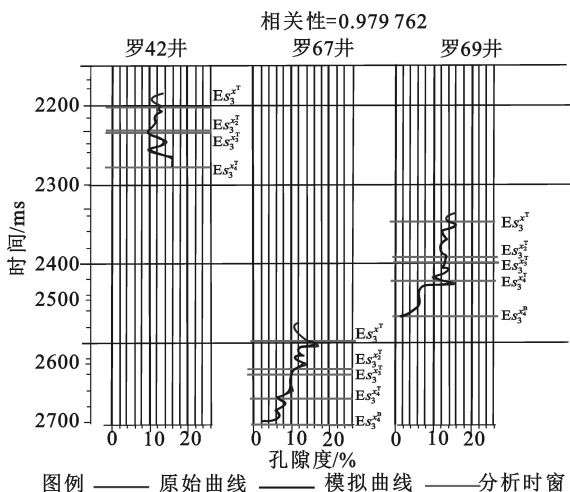
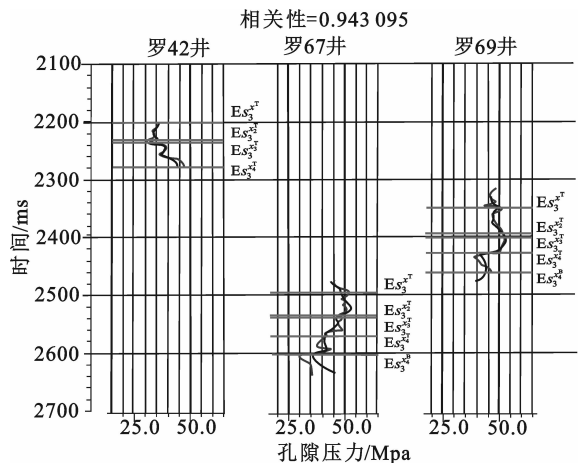


图 11 井震模拟的孔隙度曲线结果对比图
Fig.11 Correlation of experimental and simulated porosity curves from seismic data

4.4 页岩超压影响因素

渤南洪城地震工区沙三下亚段页岩地震地层压力主要受纵波阻抗、振幅包络、平均频率和主频率的影响(表 1),这些影响因素并非为并列关系,因为这些属性在不同程度上影响着预测结果的精度,测井预测结果和地震预测结果相关性为 0.943 0(图 12)。图 12 显示井震模拟结果吻合较好,说明了预测结果的合理性。渤南洪城地震工区沙三下亚段页岩地震压力系数的影响因素主要有纵波阻抗、振幅包络和时间等,这些影响因素并非为并列关系,因为这些属性在不同程度上影响着预测结果的精度,测井预测

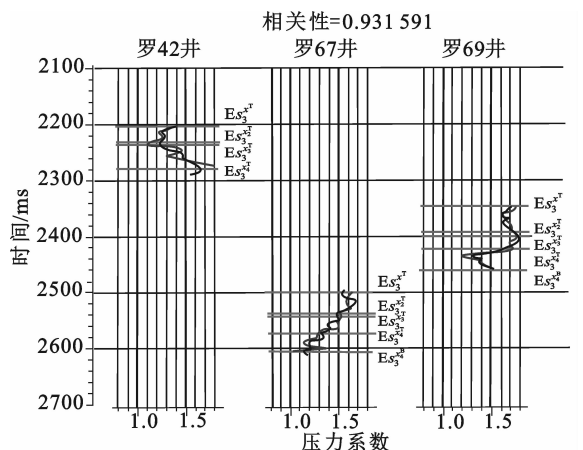
结果和地震预测结果相关性约为 0.931 5(图 13),说明预测结果的合理性。



图例 —— 原始曲线 —— 模拟曲线 —— 分析时窗

图 12 井震模拟的孔隙压力曲线结果对比图
Fig.12 Correlation of experimental and simulated pore pressure curves from seismic data

研究区渤南洪城地震工区沙三下亚段页岩地震地层压力和压力系数预测结果均与利用叠后地震数据反演的纵波阻抗体的有关,但影响程度具有差异性。该地震体在压力系数地震预测所起的作用较地层压力地震预测更为明显(表 1),主要表现为纵波阻抗值在不同程度上提高了页岩孔隙压力和压力系数等工程“甜点”参数的预测结果的准确度,且利用叠后地震数据反演的纵波阻抗体是沙河街组页岩储层超压发育的最为重要的地震影响因素。



图例 —— 原始曲线 —— 模拟曲线 —— 分析时窗

图 13 井震模拟的压力系数曲线结果对比图
Fig.13 Correlation of experimental and simulated pressure coefficients curves from seismic data

4.5 页岩脆性指数影响因素

多属性分析结果沙河街组页岩油地震脆性指数的地震数据主要受视极性、纵波阻抗和振幅包络等地

震数据的影响(表 1),这些影响因素并非为并列关系,因为这些属性在不同程度上影响着预测结果的精度,测井预测结果和地震预测结果相关性约为 0.920 7(图 14)。图 14 显示井震模拟结果吻合较好,说明了预测结果的合理性。利用叠后地震数据反演的纵波阻抗是影响沙河街组页岩油地震脆性指数的最为重要的因素,叠后纵波阻抗体能够准确识别沙河街组页岩脆性指数的地震响应,首次明确了影响沙河街组页岩脆性指数的地震因素。振幅包络进一步促进了沙河街组页岩油脆性体积地震预测精度的提高。

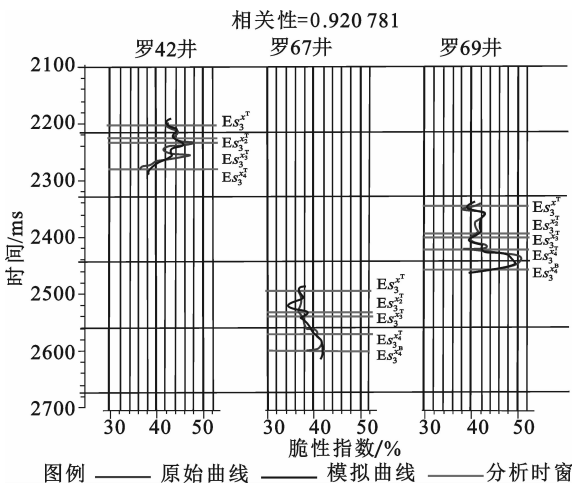


图 14 井震模拟的脆性指数曲线结果对比图
Fig.14 Correlation of experimental and simulated brittle index curves from seismic data

综上所述,济阳坳陷渤海湾页岩油地质和工程“甜点”评价的 5 个关键参数为 TOC 含量、 R_o 、孔隙度、孔隙流体压力和脆性指数,这些关键参数的地震预测对沙河街组页岩油大规模经济有效开发起着极其重要的作用。其中有机质丰度、有机质成熟度和页岩孔隙度的地震预测是沙河街组页岩油有关地质“甜点”评价的关键参数;地层压力和脆性指数的地震预测是渤海湾洪城工区沙三下亚段页岩油有关工程“甜点”评价的关键参数,对于研究区页岩油的勘探开发起着重要作用。

利用叠后地震数据反演的波阻抗是影响研究区页岩油“甜点”参数地震预测结果准确性的共同因素,是影响这 5 个关键参数最为重要的因素,对具体参数影响程度具有显著地区别。特别地,在进行研究区页岩 TOC 含量和孔隙度地球物理响应特征的预测研究中,叠后横波阻抗地震体起着最为重要作用;在有机质成熟度地震预测的研究中,叠后纵波阻抗地震体能够识别沙河街组 GR 地震响应,从而应

用 GR 地震体预测有机质成熟度(表 1)。在地层压力和脆性指数地震预测研究中,叠后纵波阻抗地震体能够直接识别沙河街组地层压力和脆性指数的地震响应特征(表 1)。由此可见,在整个渤海湾页岩油甜点地震预测的过程中,叠后波阻抗反演的地震体充当的重要的地震外部属性作用,贯穿着整个“甜点”地震预测的研究过程,起着中枢组作用。

表 1 渤海湾页岩油地质-工程“甜点”参数、地震响应特征及影响因素列表

Table 1 Summary of parameters, seismic response characteristics and affecting factors of shale oil geological and engineering “sweet spots” in the study area

地质-工程甜点参数	地震响应	影响因素
有机质丰度	叠后横波阻抗反演地震体, 低横波阻抗响应特征	横波阻抗、低频滤波、X 坐标、时间、瞬时相位、视极性、绝对振幅积分和主频率
有机质成熟度	叠后纵波阻抗反演地震体, 预测的自然伽马地震体	时间、预测的自然伽马、Y 坐标、低频滤波、X 坐标、高频滤波、视极性、振幅加权频率
孔隙度	叠后横波阻抗反演地震体, 低横波阻抗响应特征	横波阻抗、时间、X 坐标、低频滤波、绝对振幅积分、高频滤波、视极性和振幅包络
孔隙压力	叠后纵波阻抗反演地震体, 低纵波阻抗响应特征	X 坐标、纵波阻抗、Y 坐标、时间、振幅包络、低频滤波、平均频率和主频率
压力系数	叠后纵波阻抗反演地震体, 低纵波阻抗响应特征	纵波阻抗、X 坐标、时间、Y 坐标、振幅包络、低频滤波和高频滤波
脆性指数	叠后纵波阻抗反演地震体, 低纵波阻抗响应特征	视极性、振幅加权相位余弦、Y 坐标、高频滤波、X 坐标、纵波阻抗振幅包络和低频滤波

5 结论

(1) 济阳坳陷渤海湾洪城地震工区沙河街组页岩油甜点区主要表现为连续型聚集模式,分布面积大,连续聚集成藏,甜点区经济产量高,页岩油资源潜力较大,且以低有机质热演化 R_o 和超压的地球物理响应为典型特征。

(2) 济阳坳陷渤海湾洪城地震工区沙河街组沙三下亚段页岩油地质和工程“甜点”参数地震预测结果是有有机质丰度 TOC 含量值为 3%~6%,有机质成熟

度 R 。值为 0.81%~0.94%,页岩孔隙度值为 5.0%~12.5%,页岩孔隙压力表现为储层普遍发育超压,压力系数为 1.3~1.8,页岩脆性指数大于 40%。

(3) 济阳拗陷渤海洪城地震工区沙河街组页岩油“甜点”地震预测结果主要受岩石物理参数、叠后波阻抗反演的地震数据体、GR 地震数据体和振幅等地震数据的影响,这些因素在不同程度上影响着沙河街组页岩油的地震预测结果的精度。叠后波阻抗反演地震体是影响沙河街组页岩油地质和工程“甜点”参数地震预测最为重要的因素,且对具体参数影响程度具有明显的差异性,因为叠后波阻抗反演地震体能够在不同程度上识别沙河街组地质和工程“甜点”评价参数并提高预测结果的精度。

(4) 叠后波阻抗反演地震体不仅能够识别沙河街组页岩有机质丰度 TOC 含量和孔隙度的地震响应特征,也能够识别沙河街组页岩 GR 地震体,进一步分析表明 GR 地震体能够识别有机质成熟度 R 的地震响应,GR 地震体也能够一定程度上提高有机质成熟度 R 。预测结果的稳定性和精度。利用叠后地震数据反演的波阻抗体能够直接识别研究区页岩孔隙压力和脆性指数的地震数据体,提高了预测结果的精度和准确度。

参考文献

- [1] 张林晔,李钜源,李政,等. 北美页岩油气研究进展及对中国陆相页岩油气勘探的思考[J]. 地球科学进展, 2014, 29(6): 700-711.
- [2] 张林晔,李政,朱日房,等. 济阳拗陷古近系存在页岩气资源的可能性[J]. 天然气工业, 2008, 28(12): 26-29.
- [3] 张善文,张林晔,李政,等. 济阳拗陷古近系页岩油气形成条件[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(6): 1-5.
- [4] 王永诗,李政,巩建强,等. 济阳拗陷页岩油气评价方法: 以沾化凹陷罗家地区为例[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 83-91.
- [5] 王永诗,王伟庆,郝运轻. 济阳拗陷沾化凹陷罗家地区古近系沙河街组页岩储集特征分析[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 657-662.
- [6] 葛瑞全,刘铁龙. 济阳拗陷古近系页岩气开发前景分析[J]. 录井工程, 2013, 24(4): 11-14.
- [7] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [8] JARVIE D M. Shale resource systems for oil and gas (Part 2): shale-oil resource systems[J]. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 2012, 97: 89-119.
- [9] JARVIE D M. Components and processes affecting producibility and commerciality of shale resource systems[J]. Geologica Acta, 2014, 12(4): 307-325.
- [10] 贾承造,郑民,张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
- [11] 贾承造,邹才能,李建忠,等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 343-350.
- [12] 邹才能,杨智,崔景伟,等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26.
- [13] 邹才能,杨智,张国生,等. 常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 14-26.
- [14] 邹才能,朱如凯,白斌,等. 致密油与页岩油内涵“特征”潜力及挑战[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 3-17.
- [15] 童晓光,郭建宇,王兆明. 非常规油气地质理论与技术进展[J]. 地学前缘, 2014, 21(1): 9-20.
- [16] 康玉柱,周磊. 中国非常规油气的战略思考[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 1-7.
- [17] 聂海宽,张培先,边瑞康,等. 中国陆相页岩油富集特征[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 55-62.
- [18] VERNIK L, NUR A. Ultrasonic velocity and anisotropy of source rocks[J]. Geophysics, 1992, 57(5): 727-735.
- [19] VERNIK L. Hydrocarbon-generation-induced microcracking of source rocks[J]. Geophysics, 1994, 59(4): 555-563.
- [20] VERNIK L. Predicting lithology and transport properties from acoustic velocities based on petrophysical classification of siliciclastics[J]. Geophysics, 1994, 59(3): 420-427.
- [21] CARCIONE J M. A model for seismic velocity and attenuation in petroleum source rocks[J]. Geophysics, 2000, 65(4): 1080-1092.
- [22] CARCIONE J M. AVO effects of a hydrocarbon source-rock layer[J]. Geophysics, 2001, 66(2): 419-427.
- [23] 刘振武,撒利明,杨晓,等. 页岩气勘探开发对地球物理技术的需求[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(5): 810-818.
- [24] 赵万金,李海亮,杨午阳. 国内非常规油气地球物理勘探技术现状及进展[J]. 勘探技术, 2012, 36(4): 36-40.
- [25] 马中高,邓道静. 岩石物理性质研究技术[J]. 勘探地球物理进展, 2003, 26(5/6): 387-401.
- [26] 张晋言,孙建孟. 利用测井资料评价泥页岩油气“五性”指标[J]. 测井技术, 2012, 36(2): 146-153.
- [27] 张晋言. 页岩油测井评价方法及其应用[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(3): 1154-1162.
- [28] CARCIONE J M, HELLE H B, PHAM N H, et al. Pore pressure estimation in reservoir rocks from seismic reflection data[J]. Geophysics, 2003, 68(5): 1569-1579.
- [29] DUTTA N C. Geopressure prediction using seismic data: current status and the road ahead[J]. Geophysics, 2002, 67(6): 2012-2041.
- [30] SAYERS C M, JOHNSON G M, DENYER G. Predrill pore-pressure prediction using seismic data[J]. Geophysics, 2002, 67(4): 1286-1292.
- [31] STOVAS A, LANDR M. Fluid-pressure discrimination in

- anisotropic reservoir rocks: a sensitivity study[J]. *Geophysics*, 2005, 70(3): O1-O11.
- [32] 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.
- [33] 林畅松, 刘景彦, 张英志, 等. 构造活动盆地的层序地层与构造地层分析: 以中国中、新生代构造活动湖盆分析为例[J]. *地学前缘*, 2005, 12(4): 365-374.
- [34] 潘桂荣, 陆松年, 肖庆辉, 等. 中国大地构造阶段划分及演化[J]. *地学前缘*, 2016, 23(6): 1-23.
- [35] 宋国奇, 徐兴友, 李政, 等. 济阳坳陷古近系陆相页岩油产量的影响因素[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(3): 463-471.
- [36] 宁方兴. 济阳坳陷页岩油富集主控因素[J]. *石油学报*, 2015, 36(3): 465-471.
- [37] 侯贵廷, 钱祥麟, 宋新民. 渤海湾盆地形成机制研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1998, 34(4): 503-509.
- [38] 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2001, 37(6): 845-851.
- [39] 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 等. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J]. *地学前缘*, 2010, 17(4): 64-89.
- [40] 刘朝露, 夏斌. 济阳坳陷新生代构造演化特征与油气成藏组合模式[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(2): 210-214.
- [41] HAO F, ZHOU X H, ZHU Y M, et al. Mechanisms for oil depletion and enrichment on the Shijiutuo uplift, Bohai Bay Basin, China[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2009, 93(8): 1015-1037.
- [42] SU J B, ZHU W B, WEI J, et al. Fault growth and linkage: implications for tectonosedimentary evolution in the Chezhen Basin of Bohai Bay, eastern China[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2011, 95(1): 1-26.
- [43] 林畅松, 郑和荣, 任建业, 等. 渤海湾盆地东营、沾化凹陷早第三纪同沉积断裂作用对沉积充填的控制[J]. *中国科学: D辑*, 2003, 33(11): 1025-1036.
- [44] 苏宗富, 邓宏文, 陶宗普, 等. 济阳坳陷古近系区域层序地层格架地层特征对比[J]. *古地理学报*, 2006, 8(1): 89-102.
- [45] 邓美寅, 梁超. 渤海湾凹陷沙三下亚段泥页岩储集空间研究: 以罗69井为例[J]. *地学前缘*, 2012, 19(1): 173-181.
- [46] 张善文, 王永诗, 张林晔, 等. 济阳坳陷渤海湾泥页岩油气形成条件研究[J]. *中国工程科学*, 2012, 14(6): 49-55.
- [47] PASSEY Q R, CREANEY S, KULLA J B, et al. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1990, 74(12): 1777-1794.
- [48] SINGH P, HUSAIN R, RABIE A, et al. Understanding geophysical responses for identification of sweet spot for Oxfordian shale oil/gas plays in Kuwait[C]//Society of Exploration Geophysicists technical program expanded abstracts. Houston, Texas: Society of Exploration Geophysicists, 2013: 2269-2273.
- [49] MODICA, C L, LAPIERRE S G. Estimation of kerogen porosity in source rocks as a function of thermal transformation: example from the Mowry shale in the Powder River Basin of Wyoming[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2012, 96(1): 87-108.
- [50] 潘仁芳, 陈美玲, 张超谟, 等. 济阳坳陷古近系沙河街组页岩有机质热演化特征[J]. *地学前缘*, 2016, 23(4): 277-283.
- [51] 刘树根, 马文辛, LUBA J, 等. 四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩岩储层特征[J]. *岩石学报*, 2011, 27(8): 2239-2252.
- [52] SHARMA R K, CHOPRA S, VERNENGO L, et al. Reducing uncertainty in characterization of Vaca Muerta Formation shale with poststack seismic data[J]. *The Leading Edge*, 2015, 34(12): 1462-1467.
- [53] SCHMOKER J W. Empirical relation between carbonate porosity and thermal maturity: an approach to regional porosity prediction[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1984, 68(11): 1697-1703.
- [54] SONDERGELD C H, NEWSHAM K E, COMISKY J T, et al. Petrophysical considerations in evaluating and producing shale gas resources[C]//Society of Petroleum Engineers unconventional gas conference paper. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: Society of Petroleum Engineers, 2010: 1-34.
- [55] YENUGU M, VERNIK L. Constraining seismic rock-property logs in organic shale reservoirs[J]. *The Leading Edge*, 2015, 34(11): 1326-1331.
- [56] TINGAY M R P, HILLIS R R, SWARBRICK R E, et al. Origin of overpressure and pore-pressure prediction in the Baram province, Brunei[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2009, 93(1): 51-74.
- [57] GUO X W, HE S, LIU K Y, et al. Oil generation as the dominant overpressure mechanism in the Cenozoic Dongying depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2010, 94(12): 1859-1881.
- [58] WEBSTER M, CONNOR S O, PINDAR B, et al. Overpressures in the Taranaki Basin: Distribution, causes, and implications for exploration[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2011, 95(3): 339-370.
- [59] EATON B A. Graphical method predicts geopressures worldwide [J]. *World Oil*, 1976, 183(1): 51-56.
- [60] SAYERS C M, FOSTER D, YENUGU M. Introduction to this special section: resource plays II: geophysics[J]. *The Leading Edge*, 2015, 34(12): 1440-1441.
- [61] RICKMAN R, MULLEN M, PETRE E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett shale[C]//Society of Petroleum Engineers annual technical conference paper. Denver, Colorado, USA: Society of Petroleum Engineers, 2008: 1-11.
- [62] LI Z P, HUANG F Y, HE X W, et al. Shale-gas reservoir prediction study in Daanzhai, Eastern Sichuan Basin[J]. *The Leading Edge*, 2014, 33(5): 526-534.