

鄂南长7段致密油地震流体识别技术应用实践

刘振峰^{1,2,3}, 张金强^{1,2,3}, 韩磊^{1,2,3}, 张广智⁴, 武丽^{1,2,3}, 刘春燕³

[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. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580]

摘要:鄂南探区致密油储层地震流体识别存在两方面的困难:一是储层致密,岩石物理特征不清晰,缺少对含油性敏感的岩石物理参数;二是地震资料品质较差,不能很好地满足弹性参数反演的需要。为了克服这两方面的问题,在岩石物理建模、地震资料处理及反演中提出了相应的方法流程和解决办法。针对鄂南致密油储层岩矿组分复杂等特点,提出了致密油储层复杂孔隙结构各向异性岩石物理模型的构建方法,在岩石物理建模基础上通过岩石物理分析,查明拉梅系数/剪切模量对含油性较为敏感。针对鄂南低信噪比资料的客观情况,提出了多尺度综合静校正处理、振幅一致性处理、角道集处理、弹性参数同时反演等关键环节的解决办法,获取了较为可靠的弹性参数反演结果。结合岩石物理分析得到的敏感参数及弹性参数反演结果,对鄂南某探区长7段储层含油性进行了预测,预测结果与实钻井情况对应关系较好。实践应用表明,相关方法流程及针对性的解决办法切实可行,一定程度上解决了鄂南低信噪比地区致密油储层地震流体识别技术难题,取得了较好的应用效果。

关键词:地震反演;岩石物理;流体识别;致密油;延长组;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE311

文献标识码:A

Geophysical fluid recognition for tight oil in Chang 7 Member, south Ordos Basin

Liu Zhenfeng^{1,2,3}, Zhang Jinqiang^{1,2,3}, Han Lei^{1,2,3}, Zhang Guangzhi⁴, Wu Li^{1,2,3}, Liu Chunyan³

[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. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 4. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China]

Abstract: Fluid recognition in the south Ordos Basin using seismic data encounters two challenges: one is the tight reservoir, the physical properties of which are not clear, and thus the rock physical parameters that are sensitive to oil-bearing are unknown; the other is that the quality of seismic data is relatively poor, which can hardly satisfy the need of elastic parameter inversion. Hence, this study proposed methods and procedures that can overcome these challenges in rock physical modeling, seismic data processing and inversion. Regarding the complex mineralogy compositions of tight oil reservoirs in the South Ordos Basin, we proposed a way of constructing an anisotropic rock physical model. And on the basis of modeling and rock physical analysis, we identified that the ratio of Lamé's coefficient and shear modulus are sensitive to oil-bearing in strata. Given the low signal-to-noise ratio in the south Ordos Basin, we introduced some solutions for certain key parts of data processing, including multi-scale static correction, amplitude consistency correction, angle gather correction, and simultaneous inversion of elastic parameters, and got reliable results for elastic parameter inversion. In combining the sensitivity parameters and results of elastic parameter inversion after rock physical analysis, we predicted the oil-bearing property of Chang 7 Member of certain exploration area in the south Ordos Basin, and the prediction matched well with the actual drilling results. The associated methods and region-specific solutions are efficient in practical application, and thus to certain extent, the technical difficulties in seismic fluid recognition for tight oil reservoirs in the South Ordos Basin with low signal-to-noise ratio are solved.

Key words: seismic inversion, rock physics, fluid recognition, tight oil, Yanchang Formation, Ordos Basin

收稿日期:2017-02-24; 修订日期:2018-05-10。

第一作者简介:刘振峰(1974—),男,高级工程师,石油物探。E-mail:liuzf.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05002-005-004);中国石化科技部项目(P15087, P17020-4)。

地震流体识别是利用地震资料对储层含流体特征进行识别与描述^[1]。地震流体识别技术大致经历了“亮点”和“平点”现象烃类识别^[2]、振幅随偏移距变化流体识别^[3-5]、地震反演流体识别^[6-8]3个阶段。地震流体预测技术的基础是地震岩石物理理论。借助于岩石物理理论,可以对储层孔隙中流体类型、流体性质、充填状况可能引起的岩石物理参数变化进行正、反演研究,进而对岩石物理参数变化造成的地震响应特征进行分析,对地下储层流体类型及分布状况进行预测。

地震流体识别技术在实践应用中取得了一定成效,但也受到了各种各样的挑战。挑战大致可以分为两类:一是复杂油气藏所含流体的岩石物理特征难以清晰描述,从而使得识别方法及相应参数遴选难以有效进行;二是微观尺度的地震岩石物理正反演虽然获得了确定明晰的认识,但低品质的地震资料却难以应用相关岩石物理结论去反演地下流体状况。鄂南致密油地震流体识别同时遇到了这两类挑战——致密复杂的储层孔隙结构和流体行为^[9-13],以及低品质的黄土塬地震资料^[14]。在近年的技术攻关过程中,笔者围绕以上难点,在鄂南致密油地震流体识别方面进行了尝试性的工作,取得了一定的技术应用成效。

1 致密油储层岩石物理分析

1.1 岩石物理建模

鄂南致密油储层岩矿组分多样、不稳定矿物组分含量较高,同时岩石结构成熟度较低,低孔、低渗且孔隙类型复杂,而且裂隙的分布导致微观各向异性特征突出,孔隙及流体分布的非均质性较强。这些特征与常规储层存在较大的差异,常用的砂泥岩岩石物理模型构建方法难以适用。这就需要充分考虑致密油储层特征来构建致密碎屑岩储层复杂孔隙结构各向异性岩石物理模型,分析、探讨低孔隙度条件下流体性质对岩石弹性性质的影响,为地震流体预测提供依据。致密各向异性碎屑岩岩石物理模型的构建步骤如下。

第一步:利用 Voigt - Reuss - Hill 平均公式计算 N 种矿物的混合平均弹性模量 M_{VRH} (GPa)

$$M_{VRH} = \frac{M_V + M_R}{2} \quad (1)$$

式中: $M_V = \sum_{i=1}^N f_i M_i$, $\frac{1}{M_R} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{M_i}$, M_{VRH} , M_V 和 M_R 可

以是任何模量,如体积模量、剪切模量, GPa; f_i 是第 i 个组分的体积百分分量, %, M_i 是第 i 个组分的弹性模量, GPa。

第二步:利用微分等效介质模型计算各向同性干岩石骨架体积模量 K^* (GPa) 与剪切模量 μ^* (GPa), 使用的微分方程组如下:

$$(1-x) \frac{d}{dx} [K^*(x)] = (K_2 - K^*) P^{(*)} x \quad (2)$$

$$(1-x) \frac{d}{dx} [\mu^*(x)] = (\mu_2 - \mu^*) Q^{(*)} x \quad (3)$$

方程组的初始条件是 $K^*(0) = K_1$, $\mu^*(0) = \mu_1$ 。其中, K_1 和 μ_1 分别是主相的体积模量 (GPa) 和剪切模量 (GPa); K_2 和 μ_2 分别是逐步加入的包含物的体积模量 (GPa) 和剪切模量 (GPa); x 是包含物的含量 (以小数表示), P 和 Q 是包含物的几何因数 (无量纲)^[15]; P 和 Q 的上标指此几何因数是针对具有等效模量 K^* 与剪切模量 μ^* 的背景介质中的包含物。

第三步:利用 Schoenberg 模型计算含裂缝岩石的裂缝岩石物理参数 (法向弱度 Δ_N (无量纲), 垂直裂缝面上裂缝对地震波的影响; 切向弱度 Δ_T (无量纲), 平行裂缝面上裂缝对地震波的影响)。

当裂缝面较为平直而且填隙物的弹性模量较小时, Schoenberg 模型与 Hudson 模型等价。基于这一认识, 裂缝岩石物理参数 (法向弱度 Δ_N , 切向弱度 Δ_T) 与裂缝密度及填隙物存在如下关系:

$$\Delta_N = \frac{4e}{3g(1-g) \left[1 + \frac{1}{\pi(1-g)} \left(\frac{K' + 4/3\mu'}{\mu\alpha} \right) \right]} \quad (4)$$

$$\Delta_T = \frac{16e}{3(3-2g) \left[1 + \frac{1}{\pi(3-2g)} \left(\frac{\mu'}{\mu\alpha} \right) \right]} \quad (5)$$

式中: e 为裂缝密度 (无量纲); K' 和 μ' 分别是裂缝充填物的体积模量 (GPa) 和剪切模量 (GPa); α 为裂缝高宽比 (无量纲); $g = \mu / (\lambda + 2\mu)$; λ 和 μ 为不含裂缝岩石的拉梅系数, GPa。在向干岩石添加裂缝时, 先假设 $K' = 0$, $\mu' = 0$, 然后利用各向异性岩石的流体替换方程实现饱和岩石弹性参数和裂缝岩石物理参数的求取。

第四步:利用 Wood 公式求解混合流体 (含 N 种组分) 的模量和密度。Wood 公式如下:

$$\frac{1}{K_R} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{K_i} \quad (6)$$

$$\rho = \sum_{i=1}^N f_i \rho_i \quad (7)$$

式中: K_R 是混合物的 Reuss 平均体积模量, GPa; ρ 是平均密度, g/cm^3 ; f_i 、 K_i 、 ρ_i 分别是各组分的体积百分含量(%)、体积模量(GPa)和密度(g/cm^3)。

第五步: 利用各向异性岩石流体替换方程, 计算饱和和裂缝型岩石的刚度系数矩阵。Gassmann 各向异性孔隙岩石流体替换公式的线性弹性系数矩阵表示如下:

$$c_{ijkl}^{\text{sat}} = c_{ijkl}^{\text{dry}} + \frac{(K_0 \delta_{ij} - c_{ijaa}^{\text{dry}}/3)(K_0 \delta_{kl} - c_{bbkl}^{\text{dry}}/3)}{(K_0/K_{\text{fl}})\Phi(K_0 - K_{\text{fl}}) + (K_0 - c_{ccdd}^{\text{dry}}/9)} \quad (8)$$

式中: c_{ijkl}^{dry} 是干岩石的有效弹性刚度系数, GPa; c_{ijkl}^{sat} 是饱

和流体岩石的有效弹性刚度系数, GPa; K_0 是矿物的体积模量, GPa; K_{fl} 是流体的体积模量, GPa; Φ 为孔隙度, %; c_{ijaa}^{dry} 代表刚度矩阵中下标后两项相同的干岩石的有效弹性刚度系数, GPa; c_{bbkl}^{dry} 代表刚度矩阵中下标前两项相同的干岩石的有效弹性刚度系数, GPa; c_{ccdd}^{dry} 代表刚度矩阵中对角线上的干岩石的有效弹性刚度系数, GPa。其中

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (9)$$

由裂缝岩石的刚度矩阵出发, 可选取与裂缝岩石物理参数有关的流体替换方程:

$$C_{11}^{\text{sat}} = (\lambda + 2\mu)(1 - \Delta_N) + \frac{(K_0 - K_{\text{iso}}^{\text{dry}} + \Delta_N K_{\text{iso}}^{\text{dry}})^2}{(K_0/K_{\text{fl}})\Phi(K_0 - K_{\text{fl}}) + K_0 - K_{\text{iso}}^{\text{dry}}[1 - \Delta_N K_{\text{iso}}^{\text{dry}}/(\lambda + 2\mu)]} \quad (10)$$

$$C_{33}^{\text{sat}} = (\lambda + 2\mu) \left[1 - \frac{\lambda^2 \Delta_N}{(\lambda + 2\mu)^2} \right] + \frac{[K_0 - K_{\text{iso}}^{\text{dry}} + \Delta_N K_{\text{iso}}^{\text{dry}}/(\lambda + 2\mu)]^2}{(K_0/K_{\text{fl}})\Phi(K_0 - K_{\text{fl}}) + K_0 - K_{\text{iso}}^{\text{dry}}[1 - \Delta_N K_{\text{iso}}^{\text{dry}}/(\lambda + 2\mu)]} \quad (11)$$

$$C_{44}^{\text{sat}} = \mu \quad (12)$$

$$C_{55}^{\text{sat}} = \mu(1 - \Delta_T) \quad (13)$$

式中: C_{11}^{sat} 、 C_{33}^{sat} 、 C_{44}^{sat} 、 C_{55}^{sat} 为饱和和流体裂缝岩石的刚度系数, GPa; $K_{\text{iso}}^{\text{dry}}$ 为各向同性干岩石的体积模量, GPa; 其他参数含义同上式。

第六步: 计算饱和和裂缝型岩石的纵横波速度。根据 Thomsen 关于各向异性参数的定义^[16], 可以计算饱和和裂缝型岩石的纵波速度 V_P (m/s) 与横波速度 V_S (m/s), 如

下式所示:

$$V_P = \sqrt{\frac{C_{33}^{\text{sat}}}{\rho}} \quad (14)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{C_{55}^{\text{sat}}}{\rho}} \quad (15)$$

由该流程计算的纵、横波速度与常用的 Xu-White 模型计算结果的对比情况如图 1 所示。

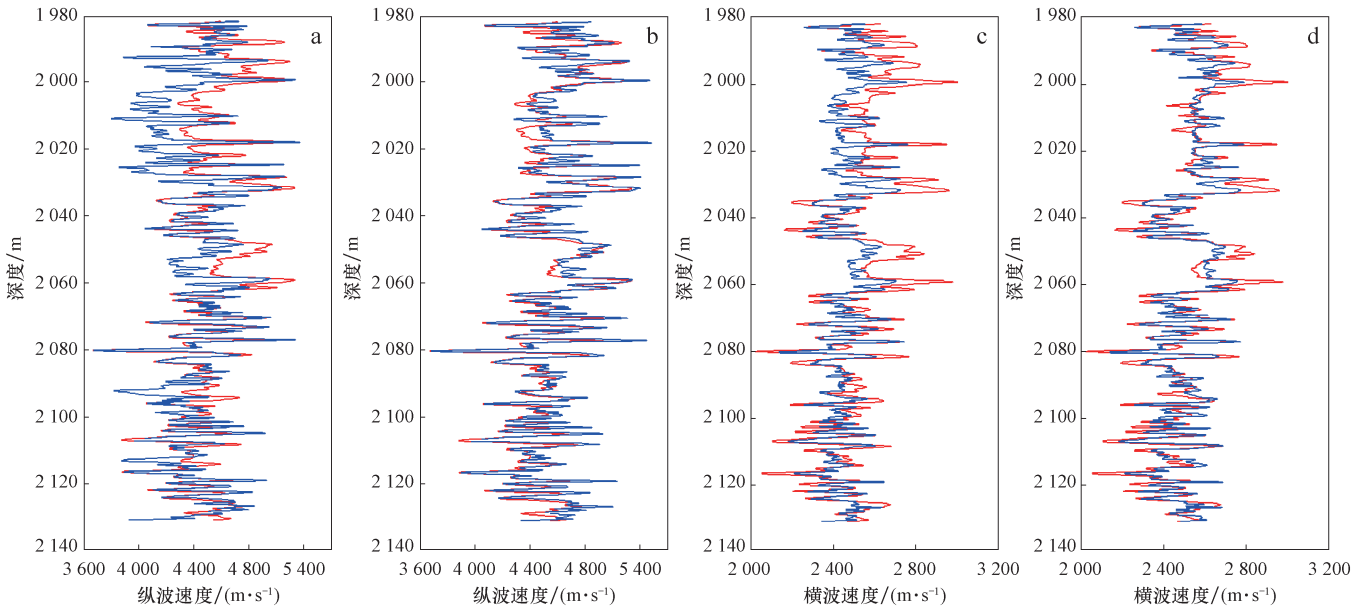


图1 鄂南长7段不同建模方法纵、横波计算效果对比(红色为实测曲线,蓝色为计算曲线)

Fig. 1 Comparison of P and S-wave velocities for different modeling results of Chang 7 Member, south Ordos Basin (red curves for measured value and blue curves for computed value)

a. Xu-White 模型计算的纵波速度; b. 本文方法计算的纵波速度; c. Xu-White 模型计算的横波速度; d. 本文方法计算的横波速度

1.2 含油性敏感弹性参数分析

通过岩石物理建模可以计算出系列弹性参数,结合钻井测试情况进行大量的交会分析,甄选对含油性较为敏感的弹性参数或弹性参数组合。图2是鄂南某致密油区长7段目的层段的横波阻抗(SI)-纵波阻抗(PI)交会图、拉梅系数 $\times$ 密度($\lambda\rho$)-横波阻抗(SI)交会图、剪切模量 $\times$ 密度($\mu\rho$)-拉梅系数 $\times$ 密度($\lambda\rho$)交会图、拉梅系数/剪切模量(λ/μ)-拉梅系数 $\times$ 密度($\lambda\rho$)交会图。图2中色标为含油饱和度。从图2可以看出,拉梅系数/剪切模量(λ/μ)对含油性识别较为敏感,油层与非油层在交会图上分布区域的区分度较高。

2 地震资料特殊处理及流体识别

2.1 常规处理的关键环节

鄂南致密油探区地表多为黄土塬地貌,沟、梁交错,表层结构变化大,静校正问题较为突出。研究中采用了层析静校正和反射波剩余静校正相衔接的多尺度综合静校正处理方法。通过层析静校正解决地形起伏剧烈、地表结构复杂带来的静校正问题(包括长波长和部分短波长);通过中长波长剩余静校正对近、远偏移距的叠加数据进行互相关分析来判断是否有中长波长静校正问题并解决之;通过反射波剩余静校正进行多轮次循环迭代,进一步解决短波长

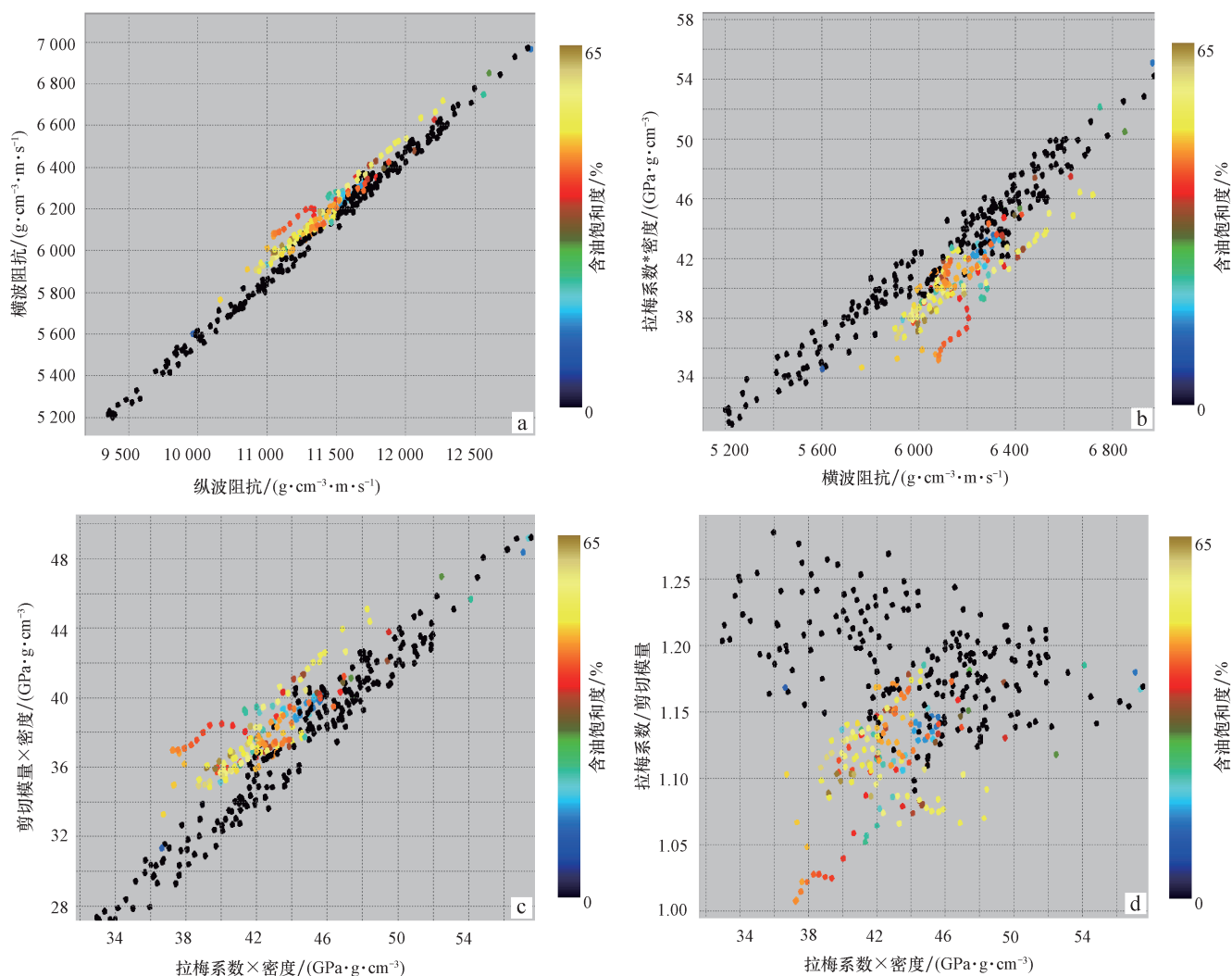


图2 鄂南某致密油区长7段主要岩石物理参数交会分析

Fig. 2 Cross plot of main rock physical parameters in Chang 7 Member of a tight oil region, south Ordos Basin

a. 横波阻抗-纵波阻抗交会图; b. 拉梅系数 $\times$ 密度-横波阻抗交会图; c. 剪切模量 $\times$ 密度-拉梅系数 $\times$ 密度交会图; d. 拉梅系数/剪切模量-拉梅系数 $\times$ 密度交会图

剩余静校正问题;通过非地表一致性静校正解决非地表一致性引起的剩余时差,减少叠加过程中地震波高频成分的损失。在静校正处理过程中,对层析静校正方法和处理参数组合进行全流程监控,确保静校正问题得以解决。

地震波传播过程中自身的球面扩散现象、黄土塬表层的吸收、散射效应以及强烈的结构差异性,会造成原始地震记录炮与炮之间、道与道之间能量、频率和相位的不一致。这就要求在处理过程中消除由于黄土塬激发接收条件造成的能量、频率、相位以及子波的畸变,使地震信号尽可能地反映地下储层及流体的变化特征。在研究中,主要通过球面扩散补偿、地表一致性振幅补偿、地表一致性反褶积来实现一致性处理。

2.2 特殊处理中的去噪、拉平

开展叠前地震反演流体识别之前,需要将共反射点道集(CRP道集)转换为角道集,大致流程如下:共反射点道集(CRP)能量处理—超道集处理—拉东变换去噪—Trim校正—角道集。其中的拉东变换又叫做 τ - p 变换(τ 为截距时间,也就是时距曲线在时间轴上的截距; p 为射线参数,即时距曲线的瞬时斜率),由于在 τ - p 域有效波和多次波、干扰波的映射点容易区分开来,易于做切除处理,因此该方法常用于压制多次波。在鄂南致密油探区,由于长7段目的层之上延安组煤层的存在,地震数据中多次波较为发育,在研究中使用拉东变换对多次波进行了切除。流程中的Trim校正主要用来修正未拉平CRP道集,其操作规则是选择一个模型道,将CRP道集上的各道都和其对应点的模型道做相关,修正其在一定时窗内的时差,从而对齐不同偏移距目标层位的时间。通过移动多个时窗,在每个时窗内循环操作,在CRP道集上拉平一层或多个目的层。

2.3 叠前反演与流体识别

通过对鄂南致密储层的岩石物理分析可以看出,长7段油层与非油层的纵波阻抗大部分是重叠的(图2a),利用不同的弹性参数交会分析,油层与非油层的区分度有明显提高(图2d)。这预示着通过叠前反演技术得到相关弹性参数后可以将油层与非油层进行区分,从而达到利用叠前地震信息进行流体识别的目的。

目前狭义的叠前地震反演大致分为两类,一类是以弹性阻抗数据体作为输出的弹性反演,一类是以纵横波速度及密度作为输出的弹性参数同时反演。弹性

阻抗反演具有计算方便,计算量小的特点,但是弹性阻抗是依赖于地震射线入射角度的一个计算属性,而不是地下介质的物理属性。不同地区、不同岩性组合条件下,最佳区分储层与围岩的弹性阻抗对应的地震射线角度也不同,最佳弹性阻抗的选择需要慎重、仔细的分析。随着计算能力的提高,弹性参数同时反演逐渐得到广泛应用。该类反演方法可以同时反演纵横波速度及密度参数,在此基础上进一步得到其他弹性参数。在弹性参数同时反演基础上可以选择对储层及流体有最佳区分度的弹性参数或弹性参数组合来进行储层表征和流体识别。鄂南致密油地震流体识别采用了弹性参数同时反演方法。

弹性参数同时反演过程以不同角度叠加数据体及对应的子波为输入,利用测井数据及岩石物理建模结果建立纵横波阻抗的初始模型,利用简化的地震反射系数公式与角度子波褶积得到不同入射角度的地震记录,根据正演与观测数据的残差修改初始模型,达到正演与观测数据的最佳匹配。反演过程中有两个关键环节:一是根据叠前资料情况,合理地进行分角度叠加;二是进行精细的井震标定,提取部分角度叠加数据体对应的子波。图3为鄂南某工区不同角度叠加数据体的对比,近、中、远角度叠加数据体剖面形态大体一致,目的层具有较好的信噪比。图4是远中近3个角度子波的对比,从图4可以看出3个角度子波除幅度有差异外,子波形态非常接近。

通过精细地做好反演过程中的两个关键环节,可以得到较好的反演结果。图5为反演得到的过井纵波阻抗剖面、横波阻抗剖面、纵横波速比剖面以及拉梅系数/剪切模量(λ/μ)剖面,从剖面看各主要弹性参数反演结果与井上相应弹性参数较为一致。在得到诸多弹性参数数据体的基础上,根据岩石物理分析得到的认识,拉梅系数/剪切模量(λ/μ)低值异常与含油性关系较为密切。依此认识,提取长7段 λ/μ 的平面分布图(图6)。从图6可以看到,反演弹性参数 λ/μ 的平面分布状况与已钻井有较高的吻合度,含油性较好的钻井基本分布在 λ/μ 的相对低值区域,而水井多分布在相对高值区。说明利用弹性参数同时反演技术在鄂南致密油探区进行地震流体识别具有较好的实用价值。同时,结合岩石物理分析(图2d)也可以看到,由于含油饱和度同 λ/μ 并非严格的正比相关,因此含油性最好的钻井并未出现在 λ/μ 平面图上的最低值区域。这也需要在后续研究中引入更多的弹性参数,通过统计岩石物理的手段进一步改善预测效果。

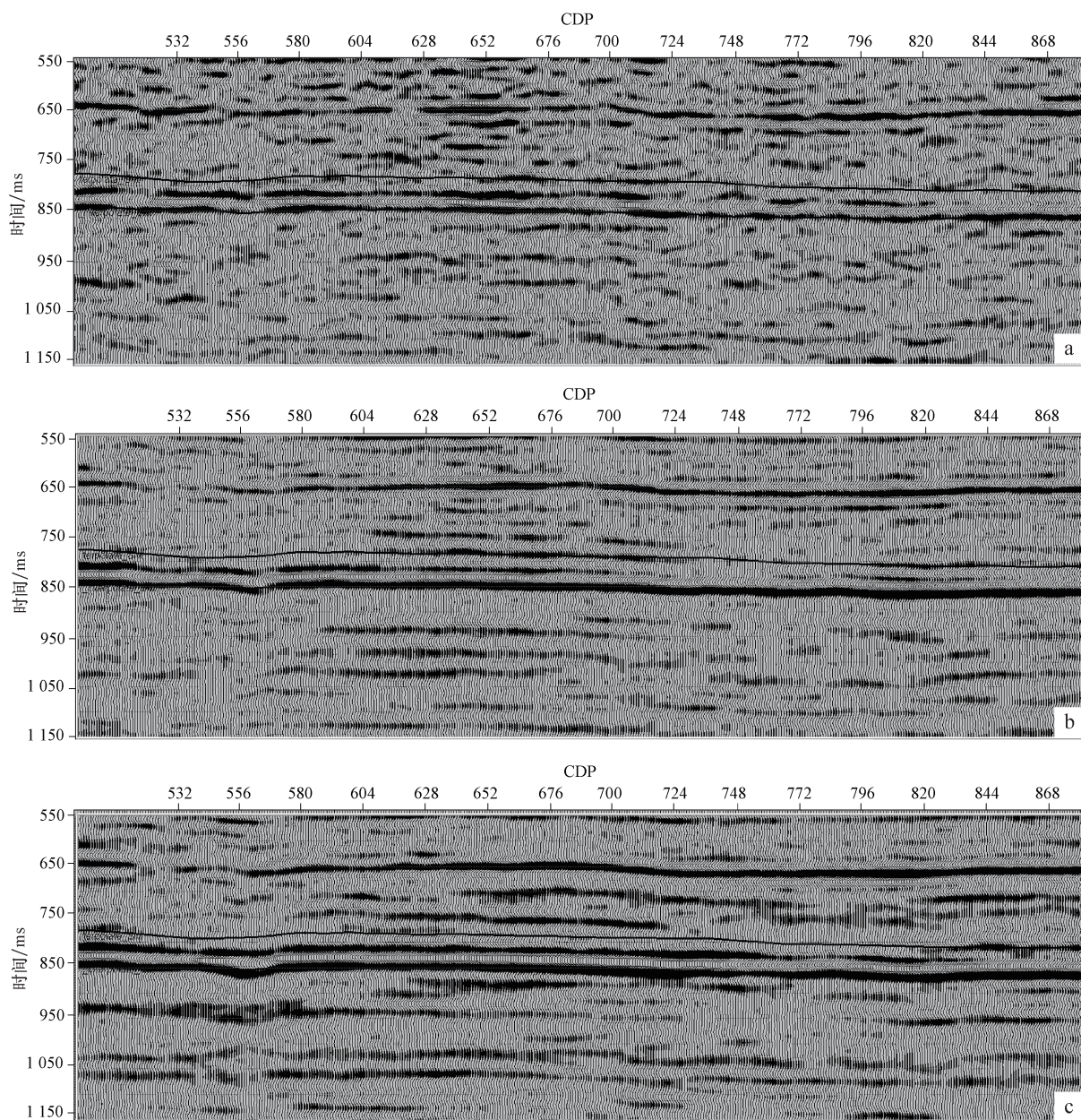


图3 鄂南某致密油区长7段不同角度叠加数据对比

Fig. 3 Comparison of different pre-stack angle-gathers of the Chang 7 Member in a tight oil region, south Ordos Basin

a. 近角度叠加数据体(入射角角度 $4^{\circ} \sim 12^{\circ}$); b. 中角度叠加数据体(入射角角度 $13^{\circ} \sim 23^{\circ}$); c. 远角度叠加数据体(入射角角度 $21^{\circ} \sim 33^{\circ}$)

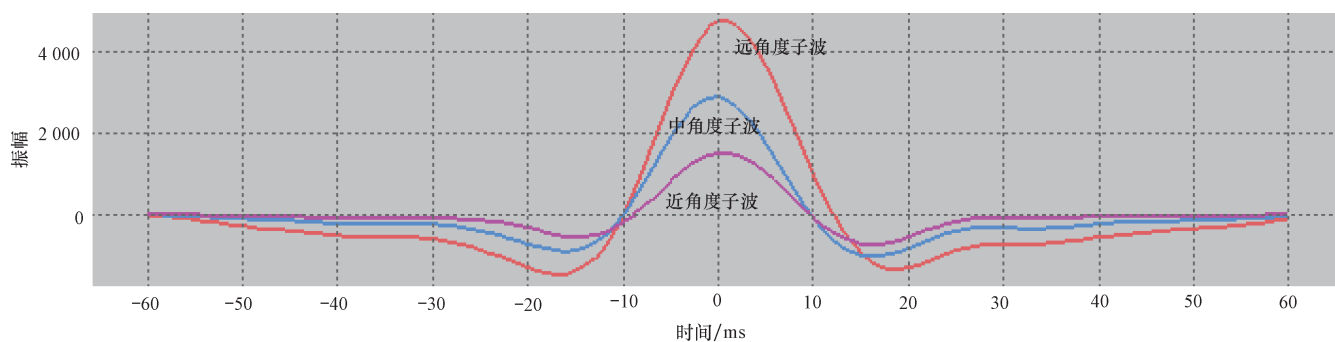


图4 鄂南某致密油区长7段近角度、中角度、远角度地震子波

Fig. 4 Seismic wavelets of short, middle, and far angle gathers, from the Chang 7 Member in a tight oil region, south Ordos Basin

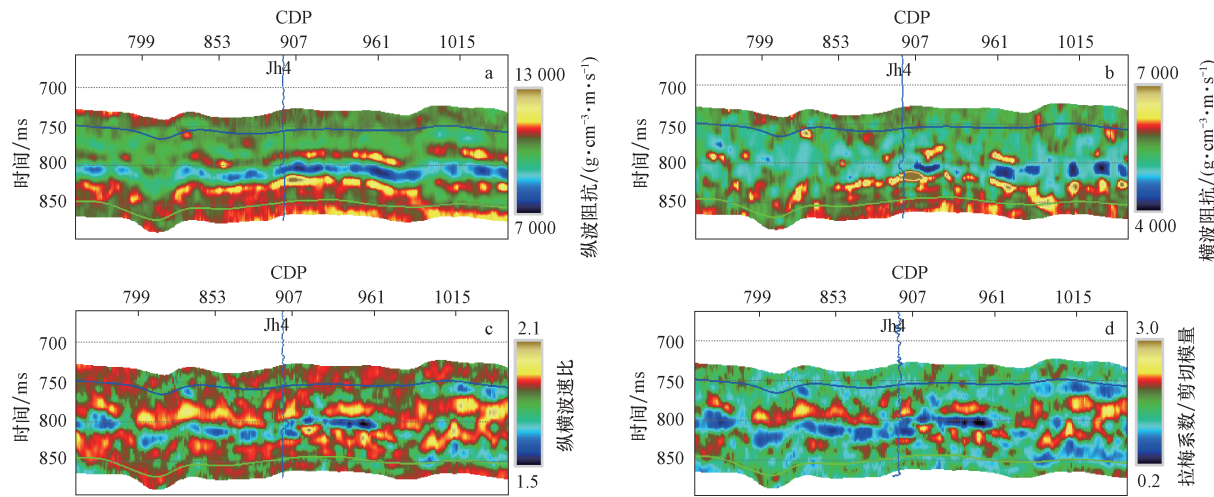


图 5 鄂南某致密油区长 7 段叠前弹性参数反演得到的主要弹性参数剖面
Fig. 5 Main elastic parameter sections from pre-stack elastic parameter inversion, Chang 7 Member in a tight oil region, south Ordos Basin
a. 纵波阻抗; b. 横波阻抗; c. 纵横波速比; d. 拉梅系数/剪切模量

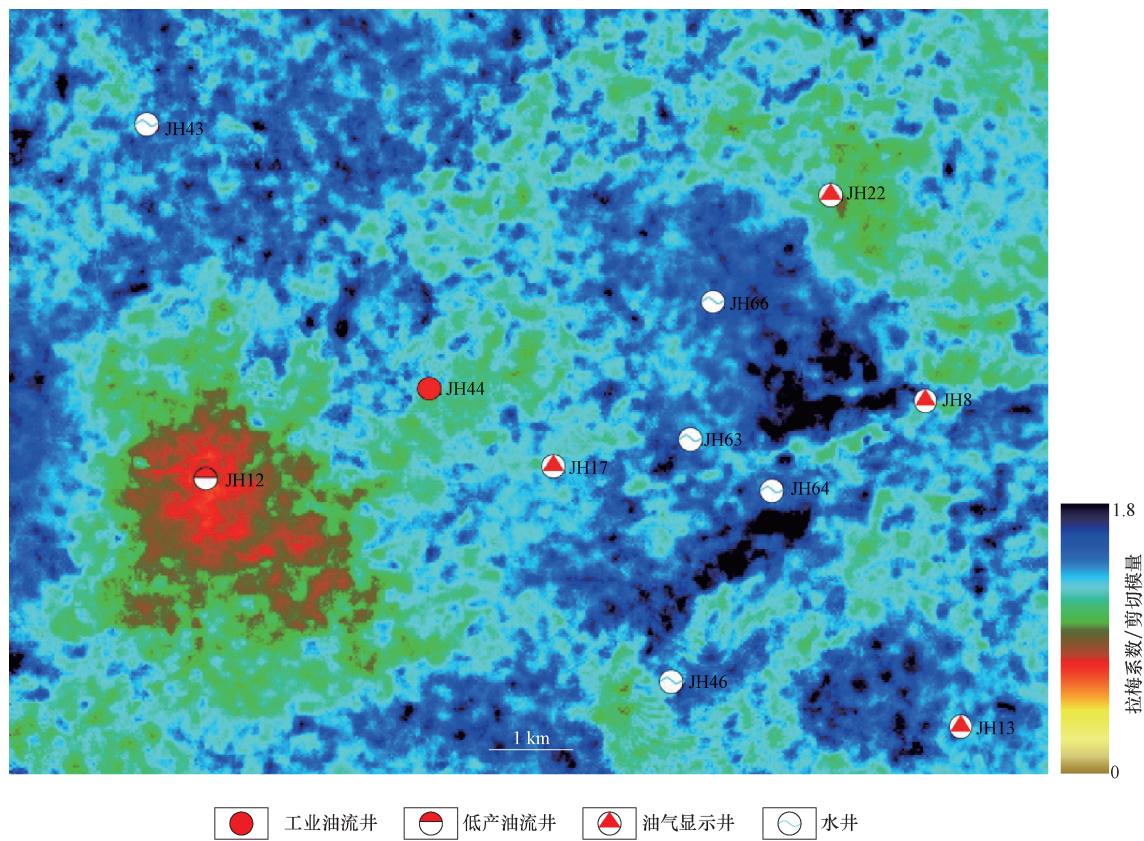


图 6 鄂南某致密油区长 7 段拉梅系数(λ)/剪切模量(μ)属性分布
Fig. 6 Distribution of Lamé coefficient (λ)/shear modulus(μ) properties of the Chang 7 Member in a tight oil region, south Ordos Basin

3 结论

1) 鄂南致密油储层岩矿组分多样、不稳定矿物组

分含量较高,孔隙结构复杂,各向异性特征突出,流体分布非均质性较强,常规碎屑岩岩石物理建模方法难以适用。本文针对鄂南致密油储层特征提出的岩石物理建模方法适用性较强,依据建模结果所进行的分析

表明,拉梅系数/剪切模量对含油性较为敏感。

2) 常规处理过程中的多尺度综合静校正、振幅一致性处理,叠前反演之前的去噪、拉平,叠前反演过程中的分角度叠加、分角度子波提取及井震标定对叠前地震反演流体识别技术有效与否至关重要。实践证明,在解决好这些关键环节的基础上,地震流体识别技术能够在鄂南地震工区致密油预测方面发挥重要作用。

参 考 文 献

- [1] 印兴耀,宗兆云,吴国忱. 岩石物理驱动下地震流体识别研究[J]. 中国科学:地球科学,2015,45(1):8-21.
Yin Xingyao, Zong Zhaoyun, Wu Guochen. Research on seismic fluid identification driven by rock physics [J]. Science China: Earth Science, 2015, 45(1): 8-21
- [2] Backus M M, Chen R. Flat spot exploration[J]. Geophysical Prospecting, 1975, 23(3): 533-577.
- [3] Ostrander W J. Plane wave reflection coefficients for gas sands at non-normal angles of incidence[J]. Geophysics, 1984, 49(10): 1637-1648.
- [4] Rutherford S R, Williams R H. Amplitude-versus-offset variations in gas sands[J]. Geophysics, 1989, 54(6): 680-688.
- [5] Castagna J P, Swan H W, Foster D J. Framework for AVO gradient and intercept interpretation [J]. Geophysics, 1998, 63(3): 948-956.
- [6] Yin X Y, Yang P J, Zhang G Z. A novel prestack AVO inversion and its application [C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2008, 27: 2041-2045.
- [7] 宗兆云,印兴耀,吴国忱. 基于叠前地震纵横波模量直接反演的流体检测方法[J]. 地球物理学报, 2012, 55(1): 284-292.
Zong Zhaoyun, Yin Xingyao, Wu Guochen. Fluid identification method based on compressional and shear modulus direct inversion [J]. Chinese Journal of Geophys, 2012, 55(1): 284-292.
- [8] Yuan S Y, Wang S X. Spectral sparse Bayesian learning reflectivity inversion[J]. Geophysical Prospecting, 2013, 61(4): 735-746.
- [9] 田景春,刘伟伟,王峰,等. 鄂尔多斯盆地高桥地区上古生界致密砂岩储层非均质性特征[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 183-189.
- Tian Jingchun, Liu Weiwei, Wang Feng, et al. Heterogeneity of the Paleozoic tight sandstone reservoirs in Gaoqiao Area of Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 183-189.
- [10] 王峰,陈蓉,田景春,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长4+5油层组致密砂岩储层成岩作用及成岩相[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 199-206.
Wang Feng, Chen Rong, Tian Jingchun, et al. Diagenesis and diagenetic facies of the Chang 4+5 tight sandstone reservoirs in Longdong area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 199-206.
- [11] 任晓霞,李爱芬,王永政,等. 致密砂岩储层孔隙结构及其对渗流的影响——以鄂尔多斯盆地马岭油田长8储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5): 774-779.
Ren Xiaoxia, Li Aifen, Wang Yongzheng. Pore structure of tight sand reservoir and its influence on percolation—Taking the Chang 8 reservoir in Maling oilfield in Ordos Basin as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 774-779.
- [12] 周翔,何生,陈召佑,等. 鄂尔多斯盆地代家坪地区延长组8段低孔渗砂岩成岩作用及成岩相. [J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 155-164.
Zhou Xiang, He Sheng, Chen Zhaoyou, et al. Diagenesis and diagenetic facies of low porosity and permeability sandstone in Member 8 of the Yanchang Formation in Daijiaping area, Ordos Basin. [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 155-164.
- [13] 耳闯,赵靖舟,姚涇利,等. 鄂尔多斯盆地延长组长7油层组页岩-致密砂岩储层孔缝特征[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 341-353.
Er Chuang, Zhao Jingzhou, Yao Jingli, et al. Characterization of pores and fracture networks in organic-rich shale and tight sandstone of the Chang-7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 341-353.
- [14] 刘振峰. 致密砂岩油气藏地震地质研究关键技术[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(1): 182-190.
Liu Zhenfeng. Key techniques of integrated seismic reservoir characterization for tight oil & gas sands [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(1): 182-190.
- [15] Berryman J G. Single-scattering approximations for coefficients in Biot's equations of poroelasticity [J]. Acoustical Society of America Journal, 1992, 91(2): 551-571.
- [16] Thomsen L. Weak elastic anisotropy [J]. Geophysics, 1986, 51(10): 1954-1966.

(编辑 张亚雄)