

运用岩性因子预测四川盆地涪陵地区茅口组白云岩储层

刘玲,沃玉进,张涛,孙炜

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:川东南涪陵地区茅口组碳酸盐岩与上覆吴家坪组底部炭质泥岩存在较大波阻抗差,形成连续强反射界面 T_{p2} ,屏蔽了下伏白云岩储层的地震响应,茅口组白云岩与灰岩纵波阻抗叠置,叠后地震难以识别,原始CRP道集有效角度仅到 20° ,缺乏大角度信息,不利于叠前弹性参数求取。针对以上问题,在叠前道集优化处理基础上,采用多子波分解与重构技术对近、中角度的叠加数据进行了去强轴处理,再通过贝叶斯稀疏脉冲反演求取了两个叠加数据体的射线弹性阻抗体,最后利用近、中角度的射线弹性阻抗体通过坐标旋转技术构建了岩性因子,进行白云岩储层的有效识别。多子波分解与重构技术可有效压制炭质泥岩的强轴屏蔽,突显下伏白云岩储层的地震响应,提高储层预测精度,射线弹性阻抗体构建岩性因子规避了叠前道集大角度信息缺失、弹性参数难求取的问题。研究表明,涪陵地区茅口组三段白云岩储层主要呈团块状沿基底断裂分布,地震岩性因子预测的白云岩厚度与实钻井较吻合,该技术可有效解决白云岩储层难预测的问题,具有一定的推广运用价值。

关键词:叠前道集优化;多子波分解与重构;射线弹性阻抗;坐标旋转;岩性因子;白云岩;茅口组;涪陵地区

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Dolomite reservoir prediction with lithology factor in the Maokou Formation, Fuling area, Sichuan Basin

Liu Ling, Wo Yujin, Zhang Tao, Sun Wei

(Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Large P-wave impedance difference exists between the Maokou Fm. carbonates and overlying carbonaceous mudstones at the bottom of the Wujiaping Formation in Fuling area, southeastern Sichuan Basin, resulting in a continuous strong reflection interface (T_{p2}), which shields the seismic response of the underlying dolomite reservoirs. Due to the superimposition of the P-wave impedance between dolomite and limestone in the Maokou Formation, post-stack seismic prediction of the dolomite reservoir is difficult. In addition, the effective angle of the original CRP gather is only 20° , and the lacking of high-angle information is unfavorable for the calculation of pre-stack elastic parameters. On the basis of the CRP gather optimization, superimposed near- and medium-angle data were formed with the technology of multi-wavelet decomposition and reconstruction. Then, the ray elastic impedance of the two superimposed data volumes was obtained by Bayesian sparse pulse inversion. The lithology factor was built by coordination rotation to identify dolomite reservoirs via the ray elastic impedances of near- and medium-angle information. Multi-wavelet decomposition and reconstruction can effectively suppress the strong inference of the carbonaceous mudstone, and highlight the seismic responses of dolomites, thus improving the accuracy of reservoir prediction. The lithology factor obtained can be applied to avoid problems relating to the lack of high-angle CRP gather and the difficulty in elastic parameter calculation. In conclusion, the dolomite reservoirs in the Mao 3 member are distributed in blocks along basement-rooted faults, the thickness out of seismic prediction by lithology factor is in good agreement with actual drilling data, indicating that the technology could be applied to the effective prediction of dolomite reservoirs, and is of promotional value in practice.

Key words: CRP gather optimization, multi-wavelet decomposition and reconstruction, ray elastic impedance, coordinate rotation, lithology factor, dolomite, Maokou Formation, Fuling area

收稿日期:2019-08-09;修订日期:2019-10-19。

第一作者简介:刘玲(1984—),女,高级工程师,地震沉积、油气储层表征与评价。E-mail:liuling6203203@163.com。

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(U1663209);国家科技重大专项(2017ZX05005);中国科学院A类战略性先导项目(XDA14010201)。

中国石化近期在川东北及川东南二叠系等新层系及新领域取得油气重大突破,展现出其良好的勘探前景。川东南涪陵地区已钻勘探井14口,工业气流9口,其中钻达茅口组勘探井9口,工业气流4口(FS1, TL2, JS1 和 TL6),川东高陡褶皱带拔山寺向斜南部的TL6井解释气层6层23.1 m,其中二类气层2层3.1 m,三类气层4层20 m,在5 485.5~5 510.5 m井段进行射孔酸压测试,获 $11.08 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流,拓展了上组合油气勘探领域,勘探潜力巨大。但涪陵地区茅口组储层受热液白云岩化作用影响,非均质性强,储层较致密、厚度薄,地震响应特征不明显,同时茅口组上覆吴家坪组底部低速、低密度炭质泥岩沉积,与茅口组碳酸盐岩形成强烈的波阻抗差,在地震剖面上表现为连续、低频、强反射特征(T_{p2} 界面),掩盖了茅口组白云岩反射的有效信号,且茅口组内部白云岩与灰岩纵波阻抗差异小,叠后纵波阻抗不可进行岩性有效识别,需利用叠前资料寻找有效的岩性识别因子,但原始CRP道集近道能量弱、信噪比低、有效角度仅 20° ,大角度信息缺失,不利于叠前弹性参数求取,因此,剔除上覆吴家坪底部炭质泥岩的强轴屏蔽,突显白云岩储层的地震反射特征,寻找敏感参数有效预测白云岩储层分布规律,促进高效勘探开发是目前亟待解决的问题。

目前,对研究区茅口组白云岩储层的地震预测研究较少,王良军等为降低单参数识别误差,通过纵横波速度比(v_p/v_s)与纵波阻抗(AI)降维处理获得新参数来进行识别^[1],但 v_p/v_s 反演需要3个不同角度的叠加数据体,且要求叠前道集含有丰富的横波信息,但研究区窄道集的资料特点限制了叠前弹性参数 v_p/v_s 的求取。针对以上问题,本文在叠前道集优化处理基础上,根据资料特点叠加了近、中两个角度的分角度叠加数据体,并通过多子波分解与重构技术,对各个分角度叠加数据体的 T_{p2} 强轴进行了压制,提高了地震的纵横向分辨率,突显了茅口组白云岩储层的地震响应;通过贝叶斯稀疏脉冲反演求解了近、中两个不同角度叠加数据体的射线弹性阻抗,以此为基础,通过坐标旋转技术构建了岩性因子,有效识别了白云岩储层,避免了叠前CRP道集有效角度窄、叠前弹性参数求取困难的问题^[2]。地震预测结果与实钻井吻合度较高,该方法适用于本区白云岩储层的识别预测,具有一定的推广应用价值。

1 区域地质概况

川东南涪陵地区位于四川盆地川东高陡褶皱带万

县复向斜南部苟家场高陡构造及两侧向斜带,北西侧为云安厂-大天池高陡构造,南东向为高峰场-大池干井高陡构造,构造呈北东向展布。区域上茅口组为缓坡型碳酸盐岩沉积,沉积厚度在200~300 m,自下而上分为四段,沉积初期继承了栖霞组的海侵原貌,沉积了1套风暴眼球状灰岩或低能泥灰岩,沉积中后期海水逐渐减退,为碳酸盐岩内缓坡相沉积,生屑灰岩发育。涪陵地区为碳酸盐岩内缓坡相沉积,可进一步划分为台内浅滩及滩间海亚相(图1)。中二叠统茅口组沉积末期,受东吴运动抬升剥蚀影响,大部分地区缺失茅口组四段(茅四段),因此,本区茅口组自下而上细分为茅一段、茅二段及茅三段。茅一段主要为一套黑色泥质灰岩、含砂屑泥晶灰岩、含泥质的泥晶藻屑灰岩,普遍含泥质,发育眼球构造、硅质条带,为海侵较深水沉积环境,伽马曲线表现为向上变高的漏斗状特征;茅二段为灰色厚层块状泥晶灰岩、含生屑泥晶灰岩、豹斑灰岩等,主要为海退浅水沉积环境;茅三段是主力产气层,也是本次研究目的层,下部以灰-深灰色灰岩为主,夹薄层含泥灰岩,中部为块状深灰色白云岩与薄层硅质白云岩、硅质岩互层,上部为灰色灰岩,白云岩为主要储层,镜下总体晶形较好,以细晶为主,局部可见中晶、粗晶,晶间缝较发育,岩心上常见不规则状溶蚀扩大缝和溶洞充填白云岩,局部含燧石结核和团块。储集空间类型多样,包括溶蚀孔洞、裂缝、晶间(溶)孔、粒间(溶)孔,为裂缝-孔隙及裂缝-孔洞型,储层致密、物性差,经孔洞缝改造后物性明显变好,如TL6井茅口组白云岩基质孔隙度为 $0.3\% \sim 2.23\%$,渗透率小于 $0.62 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,但裂缝孔隙度为 $1.10\% \sim 4.34\%$,渗透率在 $1.08 \times 10^{-3} \sim 3.59 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

茅口组顶与上覆吴家坪组呈平行不整合接触,吴家坪组整体为低能沉积环境,底部为灰黑色-黑色炭质泥岩,测井上呈明显的高伽马、高声波时差和低密度特征,地震上为低频、连续、强振幅反射(图2)。炭质泥岩的强反射干涉和屏蔽作用使茅口组白云岩储层的地震响应特征不明显,储层预测面临巨大挑战。

2 数据和方法

2.1 数据品质

涪陵地区三维地震面积 $1\,144.5 \text{ km}^2$,叠后地震资料主频38 Hz,有效频宽为10~60 Hz,层速度为6 211 m/s。根据李庆忠的极限分辨率公式^[3],可识别的地层厚度为35 m,但研究区白云岩储层单层厚度一般小于5 m,

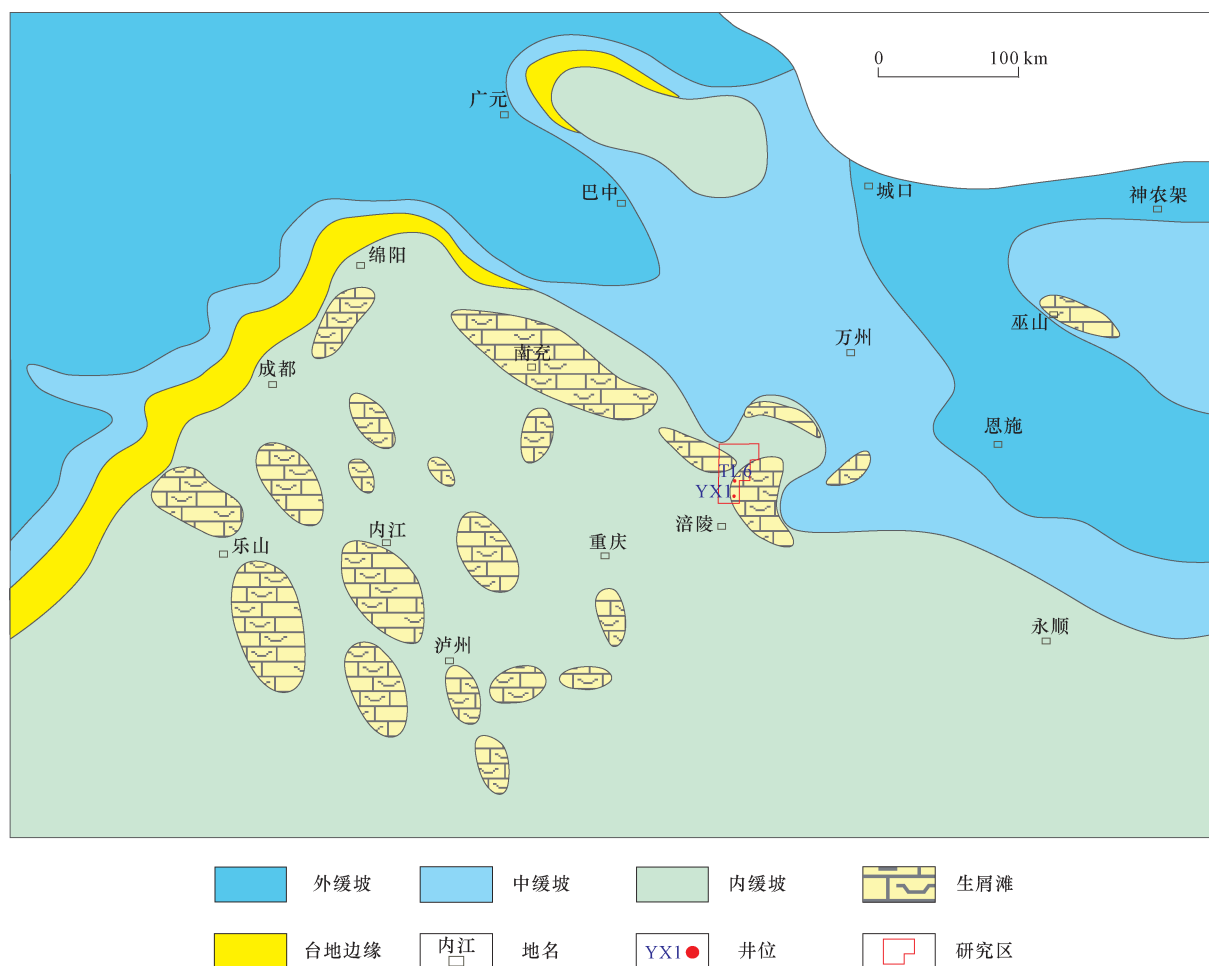


图 1 涪陵地区茅三段沉积相(据中石化江汉研究院修改)

Fig. 1 Sedimentary facies of the Mao 3 member in Fuling area (modified after the data of Jiangnan Research Institute, SINOPEC)

最大单层厚度 8.9 m, TL6 井茅三段钻遇的多套白云岩总厚 23.1 m, 也低于地震分辨率。白云岩储层的地震相外形及结构难以刻画, 且白云岩与灰岩纵波阻抗差异小, 岩石物理特征复杂, 因此本次主要使用叠前道集, 结合测井进行白云岩储层识别。

研究区原始 CRP 道集具有以下特点: ①信噪比低、多次波干扰严重; ②近道能量弱, 保真度差; ③道集角度窄, 最大有效角度仅 20° , 不可直接用于叠前弹性参数反演, 需进行叠前道集优化处理。研究区目前有 6 口钻井, 资料齐全的仅 TL6 和 YX1 两口井。

2.2 技术方法

涪陵地区茅口组白云岩储层预测主要有以下几个难点: ①吴家坪组底部低速、低密度炭质泥岩的低频强反射降低了地震纵、横向分辨率, 屏蔽了白云岩储层的地震反射特征, 严重干扰了储层预测, 有效压制强轴反射, 突出下伏白云岩的地震响应是精细储层预测的关键; ②白云岩及灰岩纵波阻抗叠置严重, 叠后地震难以

进行岩性区分, 叠前道集有效角度仅 20° , 大角度信息缺失, 不利于叠前弹性参数求取, 寻找岩性识别因子是储层有效预测的核心。

针对以上问题, 主要采取以下技术对策: ①在叠前道集优化处理基础上, 构建近、中两个分角度叠加数据体, 并通过多子波分解与重构技术去除 T_{p2} 强轴屏蔽, 突出白云岩地震反射; ②在强轴屏蔽处理基础上, 通过贝叶斯稀疏脉冲反演求取近、中角度叠加数据体的射线弹性阻抗, 并通过坐标旋转技术构建岩性因子, 进行白云岩储层的有效刻画, 以避免研究区 CRP 道集角度窄、叠前弹性参数不易求取的问题。

3 岩性因子预测白云岩储层

3.1 叠前优化处理提高道集信噪比及保真度

叠前时间偏移的常规化处理已日益普及, 使基于 CRP 道集的 AVO 分析和叠前弹性参数反演成为可

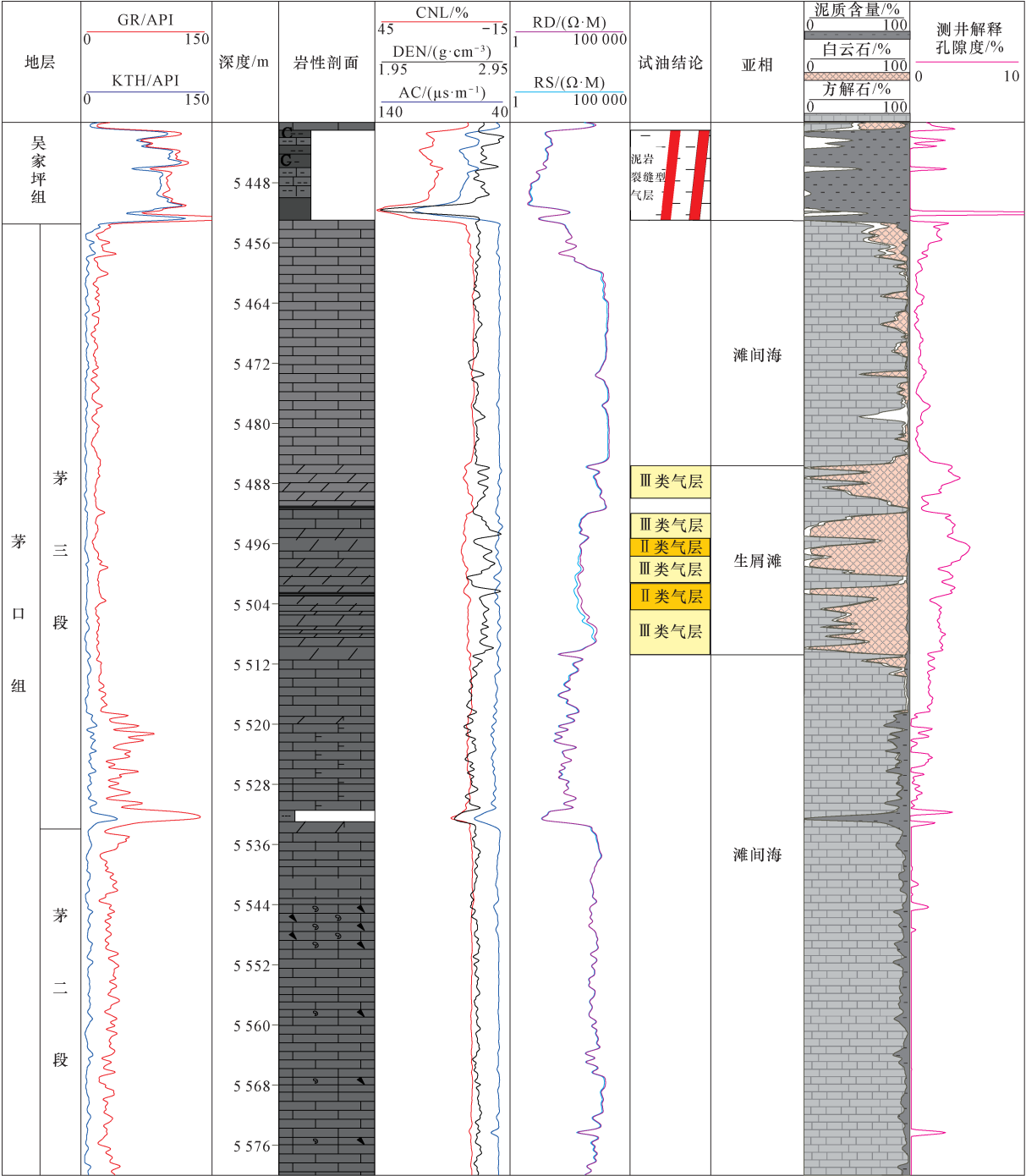


图2 涪陵地区 TL6 井地层综合柱状图

Fig.2 The composite stratigraphic column for Well TL6 in Fuling area

能^[3-5]。CRP 道集质量的高低决定着反演结果的可信度及效果,改善提高叠前资料品质是岩性解释和开发研究的关键。但研究区原始 CRP 道集品质差,不可直接用于叠前反演。为了提高道集资料品质,进行了针对性处理:①预测剔除去噪。针对叠前道集数据中的随机噪声,利用噪声剔除法衰减随机噪声、异常振幅及线性干扰等,改善道集信噪比,提高有效反射连续性;②剔除拟合振幅补偿。以 Zoeppritz 弹性波动学理论

为基础,按照抛物线形式的信号特点,对地震数据按一定的剔除百分比进行剔除-拟合,对目标道地震数据进行补偿校正,同时保留未处理道的有效信息,并引入加权误差函数,去除多次波,这种基于 AVO 特征的振幅补偿方法,严格遵循了振幅随炮检距变化的关系,具有较高的保真度。

通过一系列处理后,叠前道集的信噪比大幅度提高,近道能量弱的现象消失,资料品质得到极大改善,

与正演道集对比可见,相比于原始 CRP 道集,优化道集与正演道集的波组特征及 AVO 规律更类似,说明叠前道集优化处理是合理可靠的,可用于后期的叠前反演(图3)。

在叠前道集优化处理基础上,考虑叠前道集大角度信息缺失的特点,结合实际研究需要,确定了道集的叠加范围,并通过直线追踪法将偏移距道集转化入射角道集,最终得到两个分角度叠加数据体,分别为近角度($0^{\circ} \sim 12^{\circ}$)和中角度($8^{\circ} \sim 20^{\circ}$)。

3.2 多子波分解与重构去除炭质泥岩强轴屏蔽突出白云岩反射

根据测井资料,吴家坪底部沉积一套厚约 3 ~ 10 m 的泥岩、炭质泥岩,具“低密度、高声波时差”特征,速度、密度和波阻抗的平均值分别为 4 260 m/s, 2.69 g/cm³ 和 11 459 g/cm³ · m/s;茅口组顶部为灰岩,速度、密度和波阻抗的平均值分别为 6 377 m/s, 2.71 g/cm³ 和 17 281 g/cm³ · m/s,其与吴家坪底部炭质泥岩形成较强的波阻抗差,形成低频、连续、强振幅的 T_{p2} 反射界

面。受 T_{p2} 强轴屏蔽影响,茅口组碳酸盐岩尤其是生屑滩白云岩储层在地震剖面上无明显响应特征,仅利用常规地震难以预测白云岩储层,制约了下一步的勘探进程。有效压制 T_{p2} 强反射,削弱其对下伏白云岩储层反射的屏蔽作用,是精细储层预测的关键,本次采用多子波分解与重构技术去除强轴屏蔽。

3.2.1 多子波分解与重构原理

多子波分解与重构技术是基于地层不同岩性、物性及含流体性对应不同的地震反射频率特征而出现的^[6-8],由多子波变换^[9]发展而来,是把单道地震数据分解为一系列具有不同振幅、不同频率的子波,称之为原子,再根据研究区的地质特征及岩性组合关系,剔除影响储层反射特征的原子,再将剩余原子按能量级别或频率成分进行重构,达到剔除强干扰信号,增强弱有效信号的目的^[10]。如果该集合的所有原子都用于重构,重构的地震道与原始地震道基本相同。目前,多子波分解方法较多,包括短时傅里叶变换、小波变换、S 变换、Hilbert 变换和匹配追踪等^[11],本次采用的是匹

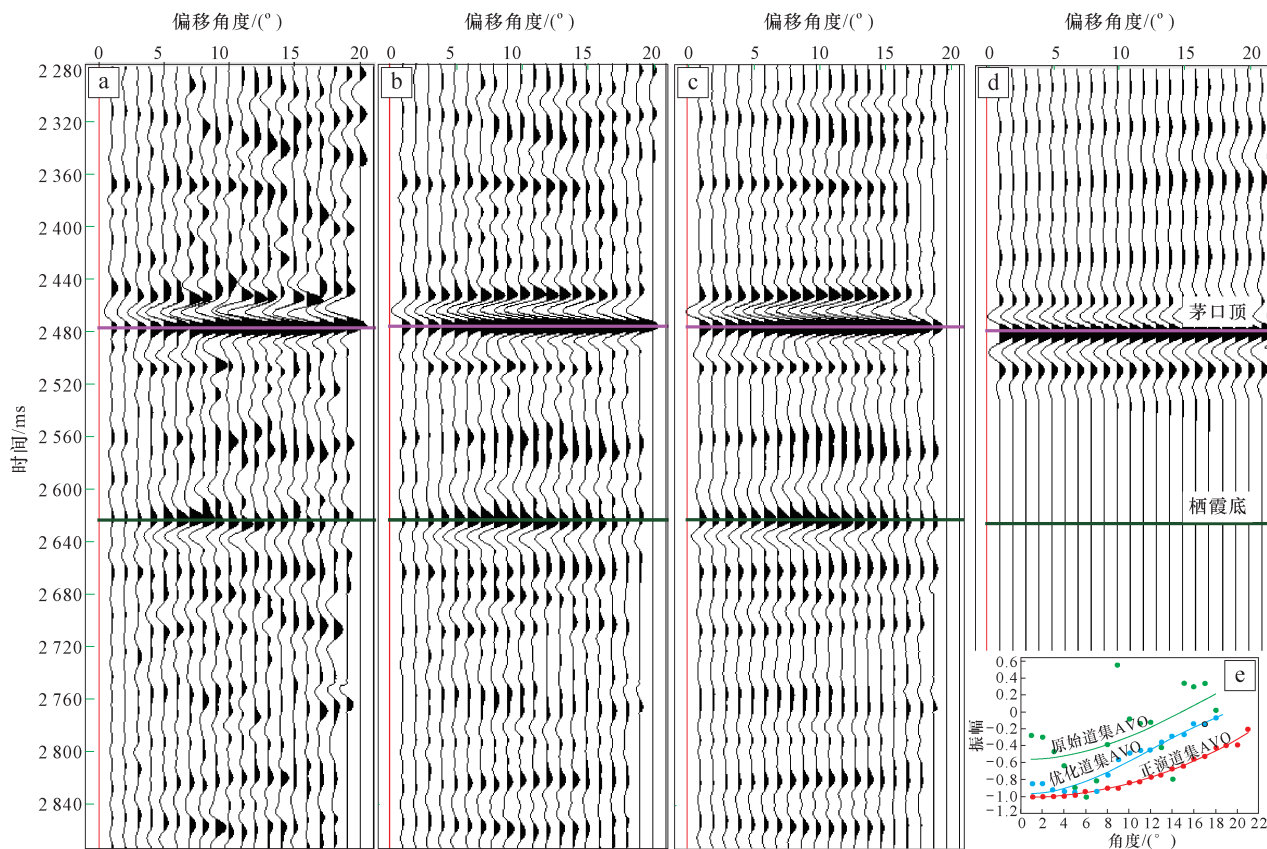


图3 涪陵地区 TL6 井叠前 CRP 道集优化

Fig. 3 The CRP gather optimization for Well TL6 in Fuling area

a. 原始道集; b. 预测剔除去噪; c. 剔除拟合振幅补偿; d. 正演道集; e. AVO 交汇图

(线号:1079;道号:1179)

配追踪,其核心思想是将信号表示为一系列与信号局部结构特征最佳匹配的时频原子的线性组合,它较其他算法具有较高的时频分辨率及局部自适应性,不受测不准原理的影响,具体算法如下。

1) 将地震记录表示成不同到时、不同频率、不同能量、不同相位的子波线性组合,稀疏表达式如下:

$$s(t) = \sum_{j=1}^m a_j w(t - t_j, f_j, \phi_j) + R_s^m(t) \quad (1)$$

式中: $s(t)$ 为带限地震信号,无量纲; w 为原子,无量纲; $R_s^m(t)$ 是匹配后的残余信号,无量纲; m 是迭代的原子个数,通过设置的阈值来判断迭代的终止条件,进而确定迭代的原子个数; t_j 为延迟时间,ms; f_j 为主频,Hz; a_j 为相关系数,无量纲; ϕ_j 为相位, ($^\circ$)。

2) 原子用 Ricker 子波来描述,并用三瞬约束的单参数扫描方式快速准确确定原子的延迟时间、主频、振幅及相位,表达式如下:

$$w_R(t, f_j) = (1 - 2\pi^2 f_j^2 t^2) \exp(-\pi^2 f_j^2 t^2) \quad (2)$$

式中: w_R 为用 Ricker 子波表示的原子,无量纲; t 为时间,ms。

3) 计算地震记录的瞬时频率,并根据瞬时频率给定一个搜索范围,建立原子库 $D = \{w_k, k = 1, 2, 2K\}$, 且满足 $\|w_k\| = 1$, 这些向量可以扩展成 N 维 Hilbert 空间。对于任意信号 $s(t)$, 从 D 中寻找与其最佳匹配的原子 w_{kr} , 满足如下匹配条件:

$$|\langle s, w_{kr} \rangle| = \sup_{k \in D} |\langle s, w_k \rangle| \quad (3)$$

式中: $\langle s, w_{kr} \rangle$ 是原始信号 s 与最佳匹配原子 w_{kr} 的内积,无量纲; w_k 表示第 k 个原子,无量纲。

4) 第一次迭代后,原始信号可表示成

$$s(t) = \langle s, w_{k0} \rangle w_{k0} + R_s^{(1)}(t) \quad (4)$$

式中: w_{k0} 为初始原子,无量纲; $\langle s, w_{k0} \rangle w_{k0}$ 是 s 在 w_{k0} 上的投影或分量,无量纲; $R_s^{(1)}(t)$ 为投影值和信号的差值,即第一次迭代的残余信号,无量纲。

逐次迭代逼近最优化,必然使得残差 $R_s(t)$ 的能量最小化,使投影 $\langle s, w_{k0} \rangle$ 极大化。经过 n 次迭代后,

$$R_s^n(t) = a_n w_n + R_s^{(n+1)}(t) \quad (5)$$

$$a_n = \frac{|\langle R_s^{(n)}, w_{kn} \rangle|}{\|w_{kn}\|^2} \quad (6)$$

式中: a_n 为迭代 n 次后的相关系数,无量纲; w_n 为迭代 n 次后的原子,无量纲; $R_s^{(n+1)}(t)$ 为迭代 n 次后的残余信号,无量纲。

信号被分解为

$$s(t) = \sum_{r=0}^{n-1} \langle R_s^{(r)}(t), w_{kr} \rangle + R_s^{(n)}(t) \quad (7)$$

式中: $\|w_{kr}\|^2 = 1$ 。

此方法通过地震记录瞬时属性计算约束扫描,快速准确定位原子,省略了庞大原子库的构造,提高了计算效率,同时在一个子波时窗范围内进行扫描,保证沿层分解的稳定性和连续性。

3.2.2 多子波分解与重构应用效果

模型正演可建立储层岩性的地震响应,为了明确吴家坪组底部碳质泥岩对茅口组白云岩的影响程度,进行了正演模拟研究。首先根据川东南涪陵地区茅口组及上覆吴家坪组实际的地层结构,参考钻井岩心测试数据,建立涪陵地区吴家坪底及茅三段的岩性组合模型(图4a);然后采用 Zeppritz 方程褶积模型,通过 30 Hz 零相位 Ricker 子波褶积得到模型正演地震剖面。正演结果表明,由于吴家坪底部炭质泥岩与茅口组碳酸盐岩波阻抗差较大,产生了强反射信号,导致茅口组白云岩储层的信号完全被屏蔽,淹没在波谷中(图4b,橘色线位置为茅三段顶)。

通过频谱分析及对储层上覆炭质泥岩地震反射特征正演模拟发现,炭质泥岩的地震响应与能量最强的原子存在较好的对应关系,因此,重构方式选择去除能量最强的原子,再将剩余原子按能量进行重构。当去掉最强原子 100% 能量时,灰岩与白云岩间的波峰出现,但泥岩与灰岩间的波峰消失,不符合实际地质模型;去掉最强原子 80% 及 90% 的能量时,泥岩与灰岩间的波峰反射特征保留,且白云岩储层顶部的波峰出现,但去除最强原子 80% 的能量时,泥岩与灰岩间的波峰强于灰岩与白云岩间的波峰,而去除最强原子 90% 的能量时,两个波峰的反射强度相近。根据反射系数公式可知,泥岩与灰岩间的反射系数为 0.2,而灰岩与白云岩间的反射系数仅为 0.07,即泥岩与灰岩间的波峰应强于灰岩与白云岩,因此,本次选择去掉最强原子 80% 的能量,再进行重构,以进行白云岩储层的识别(图4c—g)。

过 TL6 井的全叠加原始地震剖面上, T_{p2} 为一强波峰反射,屏蔽了茅三段白云岩的地震反射,灰岩及白云岩整体对应波谷反射,地震剖面无法表征白云岩的空间展布特征(图5a),在多子波分解与重构后的全叠加剖面上, T_{p2} 界面处的波峰变窄,反射强度减弱,波峰下的波谷中多了一断续的波峰反射,即白云岩顶面出现反射,被低频炭质泥岩屏蔽的有效信号得到恢复(图5b)。

为了验证多子波分解与重构技术在后续储层预测中的可靠性与准确性,对比了子波分解与重构前后均方根振幅的平面分布规律,并与实钻井进行对比。原

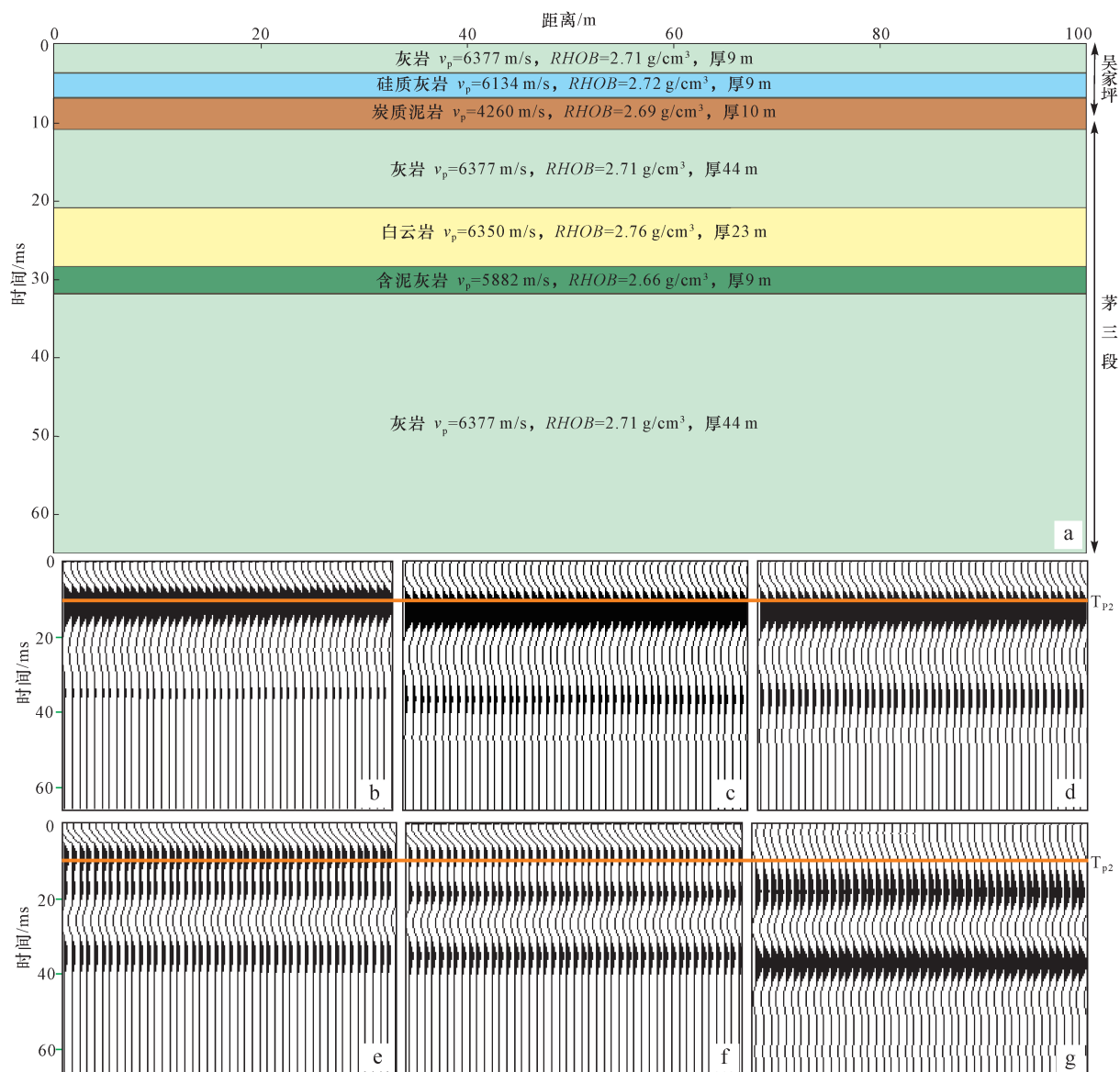


图4 涪陵地区茅口组多子波分解与重构正演模型

Fig. 4 The forward model of multi-wavelet decomposition and reconstruction of the Maokou Formation, Fuling area

a. 地质模型; b. 正演模型; c—g. 依次为剔除最强原子 60%, 70%, 80%, 90% 及 100% 的能量的地震模型

始地震均方根振幅属性上(图 6a), 中、强振幅主要沿北东—南西向两个条带大面积连片分布, 而涪陵地区茅口组白云岩储层的物质基础是生屑滩沉积, 区域沉积背景显示(图 1), 生屑滩主要沿岸线团块状分布, 因此, 原始地震均方根振幅属性与区域地质沉积特征不符, 这主要是因为受吴家坪组底炭质泥岩的强轴影响, 原始地震上茅三段提取的均方根振幅属性主要反映茅口组与吴家坪组的界面能量信息, 而不是岩性信息; 经多子波分解与重构后, 中、强振幅大面积连片现象消失, 主要呈团块状分布, 与生屑滩的沉积分布规律相吻合(图 6b)。由此可见, 多子波分解与重构能有效压制吴家坪组底部炭质泥岩的强轴屏蔽, 突显白云岩储层的地震反射, 有利于储层精细

预测, 因此, 先对近、中角度的叠加数据体进行多子波分解与重构, 在此基础上再进行射线弹性阻抗反演及岩性因子求取。

3.3 射线弹性阻抗构建岩性因子规避叠前道集窄角度缺陷

岩石物理是储层预测的基础, 对储层预测方法的遴选及技术参数的确定具有重要的指导意义^[12]。根据测井资料, 涪陵地区二叠系茅口组白云岩具“一低三高”的岩电特征, 具体表现为低自然伽马、高补偿中子、高密度和高横波速度, 白云岩密度高于灰岩, 但速度略低于灰岩, 导致白云岩与灰岩纵波阻抗重叠, 用纵波阻抗难以进行岩性识别(表 1)。

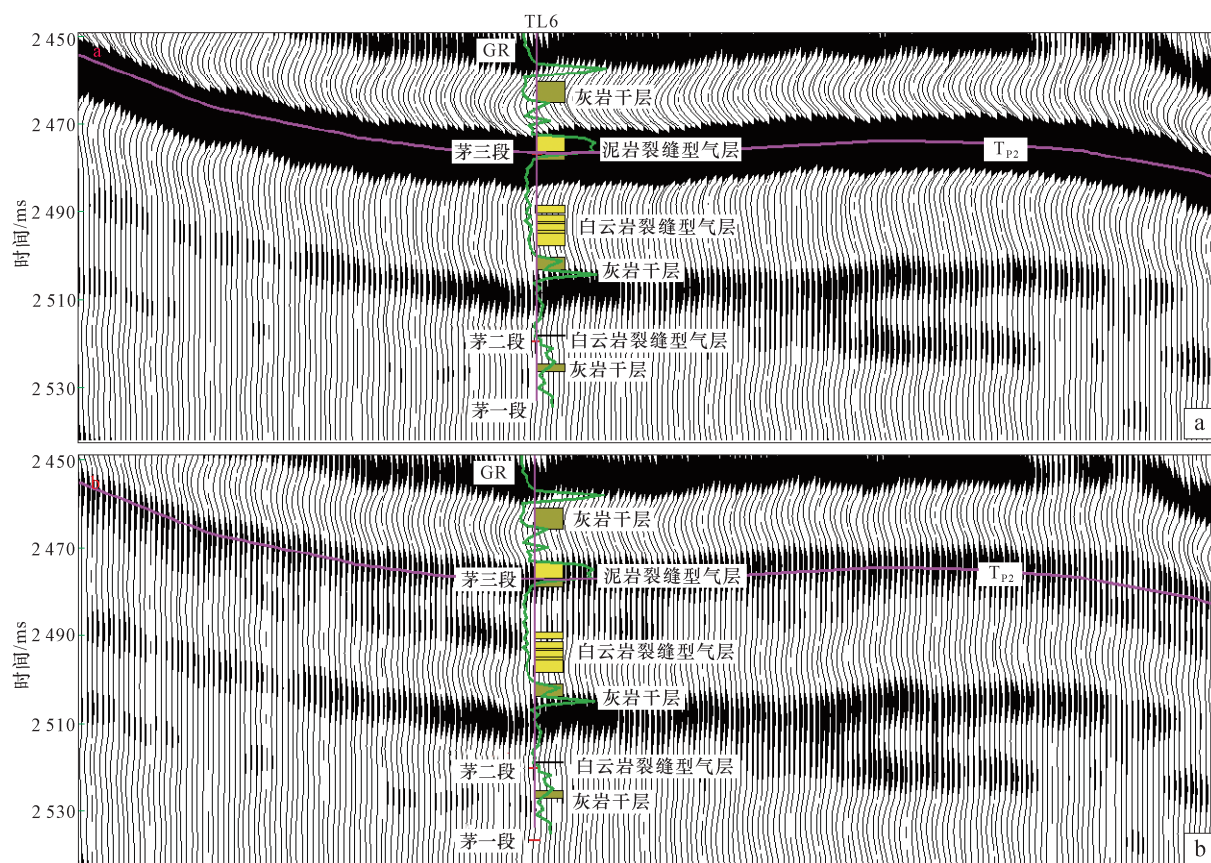


图 5 涪陵地区茅口组原始地震剖面(a)与多子波分解与重构剖面(b)

Fig. 5 Original seismic section (a) and multi-wavelet decomposition and reconstruction section (b) of the Maokou Formation in Fuling area

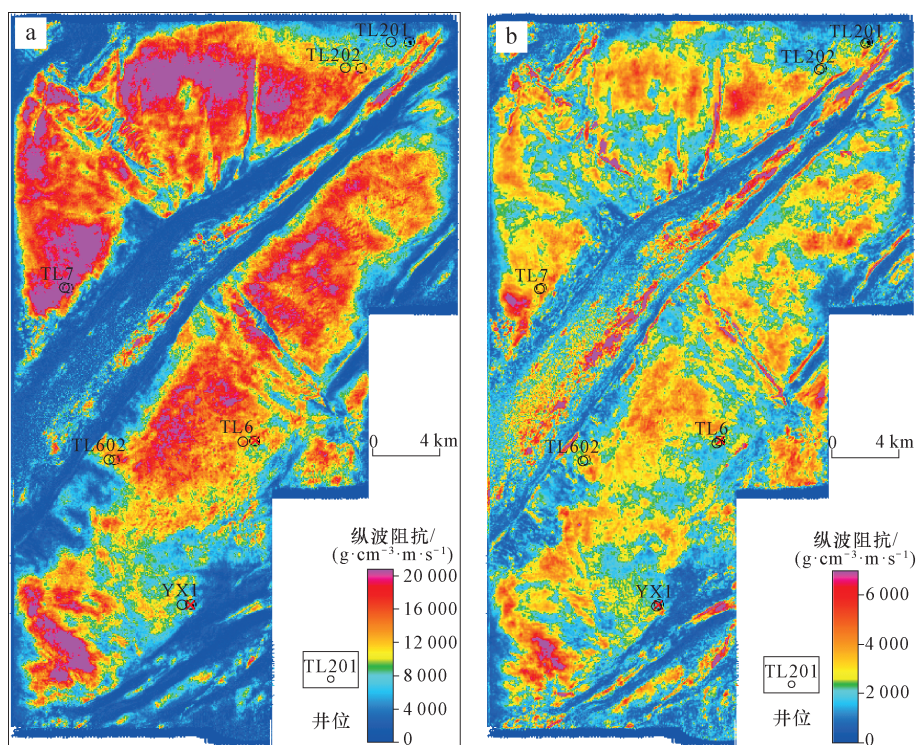


图 6 涪陵地区茅口组原始地震(a)与多子波分解重构(b)的均方根振幅属性图

Fig. 6 A diagram showing the root mean square amplitude attributes of the original seismic data (a) and after multi-wavelet decomposition and reconstruction (b) of the Maokou Formation in Fuling area

表 1 涪陵地区茅口组测井特征

Table 1 Logging characteristics of the Maokou Formation in Fuling area

岩性	自然伽马/API	补偿中子	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	纵波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	横波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	纵波阻抗/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
白云岩	18.05 ~ 19.49 (18.77)	0.022 ~ 0.024 (0.023)	2.718 ~ 2.761 (2.745)	5 968 ~ 6 424 (6 227)	3 225 ~ 3 395 (3 325)	16 222 ~ 17 323 (17 086)
灰岩	19.39 ~ 37.21 (29.78)	-0.004 ~ 0 (-0.000 8)	2.678 ~ 2.706 (2.699)	6 131 ~ 6 372 (6 277)	3 186 ~ 3 269 (3 240)	16 419 ~ 17 248 (16 938)
含泥灰岩	62.60 ~ 64.67 (63.64)	0.004 ~ 0.020 (0.012)	2.654 ~ 2.698 (2.676)	5 754 ~ 6 069 (5 912)	3 206 ~ 3 224 (3 215)	15 271 ~ 16 375 (15 823)

注:数据格式为最小值~最大值(平均值)。

多参数交汇分析表明,虽然单一参数不可有效区分灰岩及白云岩,但同时使用两个敏感参数则可进行岩性区分,其分界线近平行于各类岩性,如纵横波速度比与纵波阻抗的交汇图中,沿 45° 方向可有效地区分灰岩及白云岩。为了使不同岩性间的分界线更加清楚,按照泊松阻抗^[13]的研究思路,提出了岩性因子的概念,即在敏感弹性参数交汇图的基础上,根据不同岩性的分布特征寻找一条合适的趋势线,沿着这条趋势线通过坐标旋转技术按照一个合适的角度旋转,形成一个新的坐标系统,在新的坐标系统中,纵坐标仍为原来的参数,横坐标为两个敏感参数通过计算形成的岩性因子,其表达式为:岩性因子 = $A \times \text{参数} 1 + B \times \text{参数} 2 + C$ (A, B, C 为参数 1 和参数 2 拟合关系式的系数)。值得注意的是,为了使岩性因子的计算更为准确,最好选用量纲相同的两个参数进行计算。

孔隙度与密度、纵横波速度比(v_p/v_s)与纵波阻抗(AI)的交汇图均说明,将孔隙度与密度或 v_p/v_s 与 AI 按一定角度旋转降维处理后,生成的岩性因子都可较较好地进行岩性识别(图 7a,b)。但密度及 v_p/v_s 等弹性参数的求取至少需要 3 个不同角度的叠加数据体,而原始 CRP 道集最大有效角度仅到 20° ,缺乏大角度信息,不适于叠加 3 个不同角度的数据体,同时,密度及 v_p/v_s 的计算需要在不同叠加数据体弹性阻抗求取的基础上再经过非线性计算才可获得,多次反演过程易造成反演误差,而孔隙度的预测通常是通过与其它弹性参数的映射关系计算得来,很难直接从地震资料中计算^[14-17],同样存在多次反演误差。另外,这 3 个参数的值域范围较小,识别误差大,且 v_p/v_s 与纵波阻抗不属于同一个量纲,也不适用于岩性因子的计算。因此,本次研究不采用叠前弹性参数(如 v_p/v_s 、密度、孔隙度等)构建岩性因子,而是直接利用近、中两个不同角度的射线弹性阻抗体通过坐标旋转技术直接构建岩性识别因子。

虽然单一角度射线弹性阻抗不可区分白云岩,但

联合使用 2 个不同角度的射线弹性阻抗可进行岩性区分,分界线大致为 45° 方向(图 7c),因此可考虑利用 2 个不同角度的射线弹性阻抗体通过坐标旋转技术生成新的岩性因子以进行白云岩储层的有效识别。根据坐标旋转计算结果,岩性因子公式为:岩性因子 = $0.722\ 621 \times REI6 - 0.691\ 244 \times REI4 - 3\ 757.35$ (图 7d)。该方法具有以下优点:①采用的是刘力辉改进的射线弹性阻抗公式^[18],能充分保留 Ma ^[19] 射线弹性阻抗的优点,同时能克服其抗噪能力差的缺点;② 2 个不同角度的射线弹性阻抗体均属于同一量纲,且值域较大,识别误差小;③岩性因子求取只需利用 2 个不同角度射线弹性阻抗体通过简单数学运算即可求取岩性因子,无多次反演误差的弊端。

3.4 岩性因子有效识别白云岩储层

根据岩石物理分析,岩性因子是茅口组白云岩储层识别的敏感参数,但岩性因子的构建首先需要 2 个不同角度的射线弹性阻抗体,目前弹性阻抗反演方法较多,本次采用的是贝叶斯稀疏脉冲反演^[20],该方法用贝叶斯公式将地震褶积模型的似然函数与反射系数的柯西先验分布结合起来进行反演,简化稀疏脉冲反演的过程,且将井上波阻抗模型加入目标函数进行约束,补偿反演结果的低频和低频成分,与常规稀疏脉冲反演相比,这种方法预测精度高、收敛速度快、计算结果稳定。

根据岩石物理分析,白云岩虽与灰岩纵波阻抗有重叠,但整体为高阻抗特征,因此,射线弹性阻抗反演剖面上的高阻抗区大致表征白云岩发育,根据高阻抗分布特征,茅三段沉积时主要发育上部和下部两期白云岩,但实钻井显示,茅三段的白云岩主要发育于中上部,下部白云岩不发育,地震预测结果与钻井不吻合;同时,与钻井解释结论对比发现,白云岩气层段及含泥灰岩干层段都对应射线弹性阻抗剖面的高值区,射线弹性阻抗不可有效区分白云岩及灰岩(图 8a,b)。

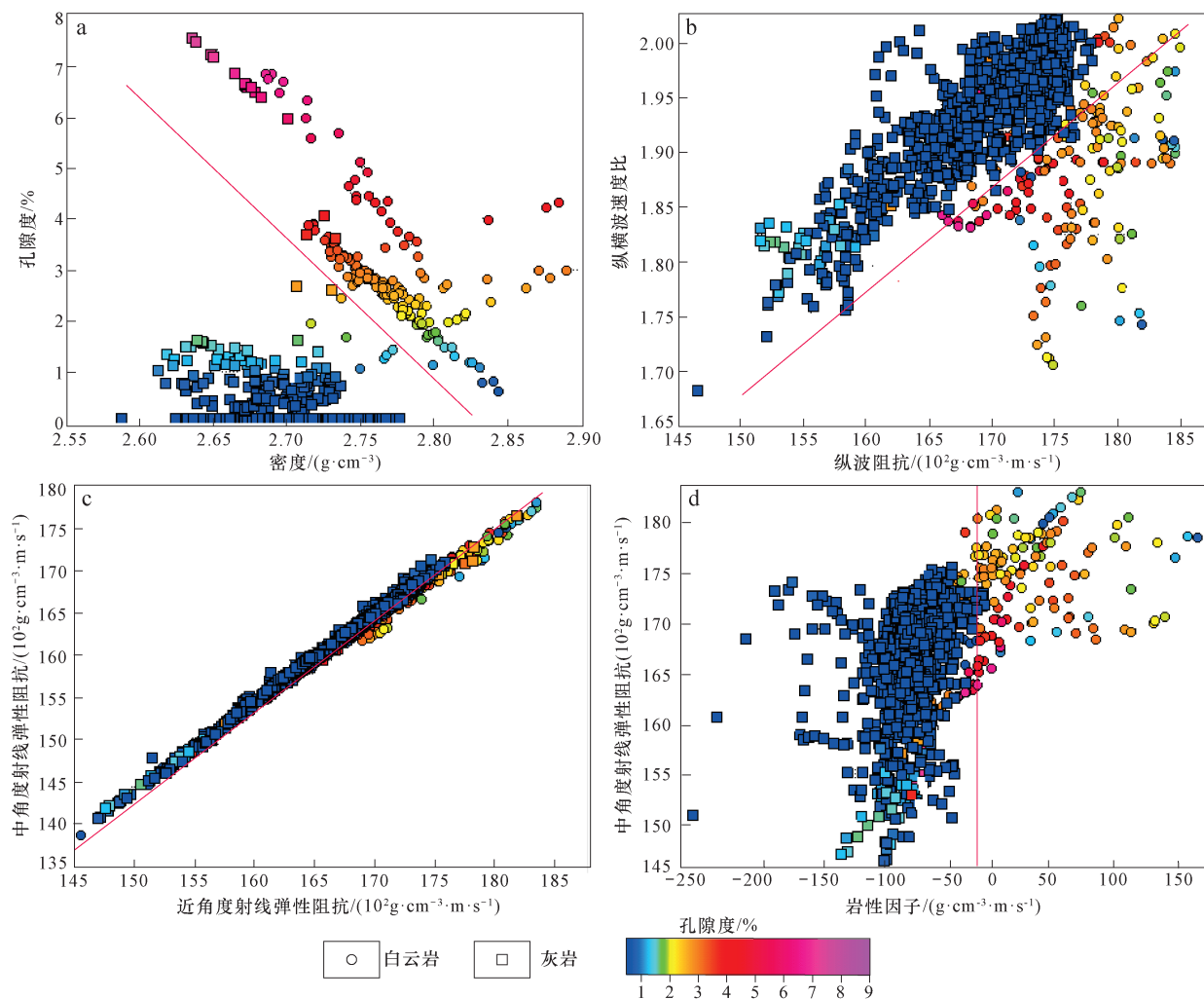


图7 涪陵地区茅口组岩石物理交汇分析

Fig. 7 The petrophysical analysis of the Maokou Formation in Fuling area

a. 孔隙度与密度交汇图; b. 纵、横波速度比与纵波阻抗交汇图; c. 近、中角度射线弹性阻抗交汇图; d. 中角度射线弹性阻抗与岩性因子交汇图

岩性因子大于0表征白云岩储层发育。岩性因子剖面显示,涪陵地区茅口组沉积时,白云岩主要发育于茅三段中上部,横向上,白云岩连续性较差,与TL6井的钻井结果对比也表明,岩性因子于0的区域,对应TL6井白云岩裂缝型气层段,而TL6井的含泥灰岩干层段,则对应岩性因子小于0的区域,表征白云岩储层不发育,说明地震岩性因子预测结果较准确,可用于研究区的精细储层预测(图9)。

为了进一步分析白云岩的平面分布规律,根据井震标定建立的等时地层格架,以茅三段为属性提取时间窗统计了岩性因子大于0的时间厚度,并根据测井统计,以6350 m/s为白云岩的速度计算了茅三段白云岩储层的厚度。茅三段沉积时,白云岩储层主要呈团块状沿基底断裂方向发育,大部分地区白云岩厚度大于10 m,部分地区白云岩厚度大于20 m,如TL6井,白云岩的平面分布具有较强的非均质性,这主要是因为涪

陵地区茅口组白云岩储层受生屑滩、岩溶斜坡和构造断裂3大因素的联合控制。生屑滩是储层形成的物质基础,茅口组沉积时期,生屑滩发育,浅埋藏时期,颗粒滩粗粒结构固结成岩后仍残余大量粒间孔,垂向上构成多个低能细粒结构的致密层和高能滩相高孔层多旋回叠置特点,白云岩储层主要发育于生屑滩地区,如TL6井钻遇的白云岩为生屑滩沉积;岩溶改造创造了最直接的孔洞条件,是白云岩储层形成的关键,茅口组沉积末期,受东吴运动的影响,地壳快速差异抬升,使上扬子地台整体抬升暴露,茅口组遭到不同程度的剥蚀,形成“茅口组顶”不整合面,古岩溶高地及斜坡带均是岩溶储层发育区,涪陵地区处于古岩溶发育区^[21-22],FMI成像测井显示,TL6井5485.45~5510.22 m内可见大量溶蚀孔洞,TL6井西北方向的TL7井白云岩储层段溶蚀孔洞也发育;此外,富镁流体使生屑滩白云石化,构造运动形成的断裂和裂缝为流体提供了通道,改

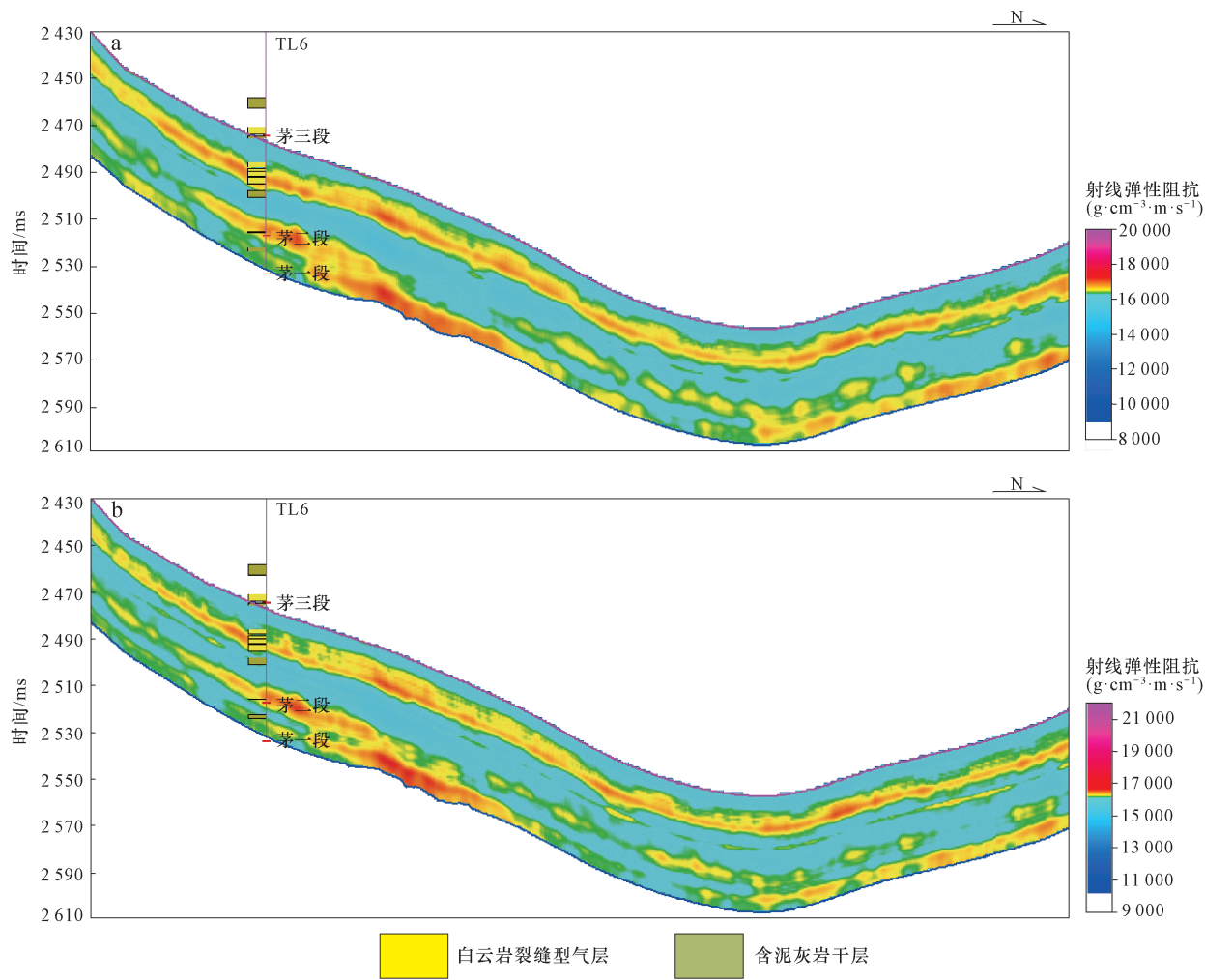


图 8 涪陵地区茅口组不同角度射线弹性阻抗体反演剖面

Fig. 8 Ray elastic impedance sections of various angles in the Maokou Formation in Fuling area
a. $0^\circ \sim 12^\circ$; b. $8^\circ \sim 20^\circ$

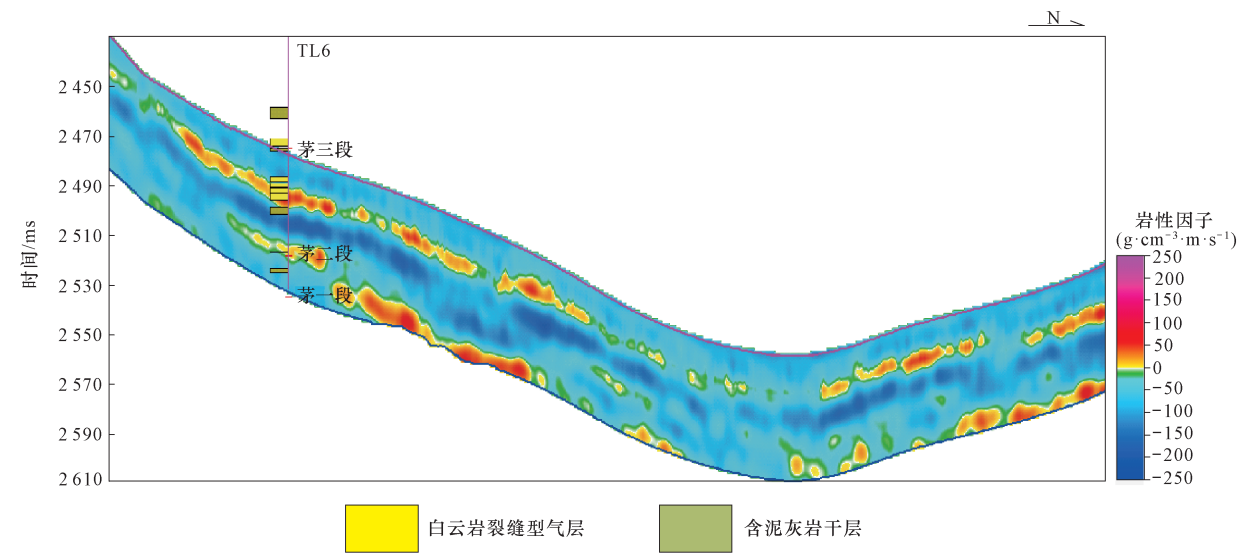


图 9 涪陵地区茅口组岩性因子剖面

Fig. 9 The lithology factor section of the Maokou Formation in Fuling area

善了储集性能,如TL6井5486~5511.5 m白云岩储层段裂缝发育,该井测试日产气 $11.08 \times 10^4 \text{ m}^3$,TL7井局部也见中-高角度裂缝。通过与实钻井对比发现,TL6井茅三段地震预测白云岩厚度18 m,钻井实际厚度21.3 m,误差为3.3 m;TL7为新钻井,未参与岩性因子反演过程,可作为验证井,该井地层预测白云岩厚度为15 m,实钻厚度11.2 m,误差为3.8 m;TL602为部署井,目前尚未钻井(图10)。通过实钻井对比可见,岩性因子预测结果是较准确和可靠的,可用于后期的勘探开发工作。

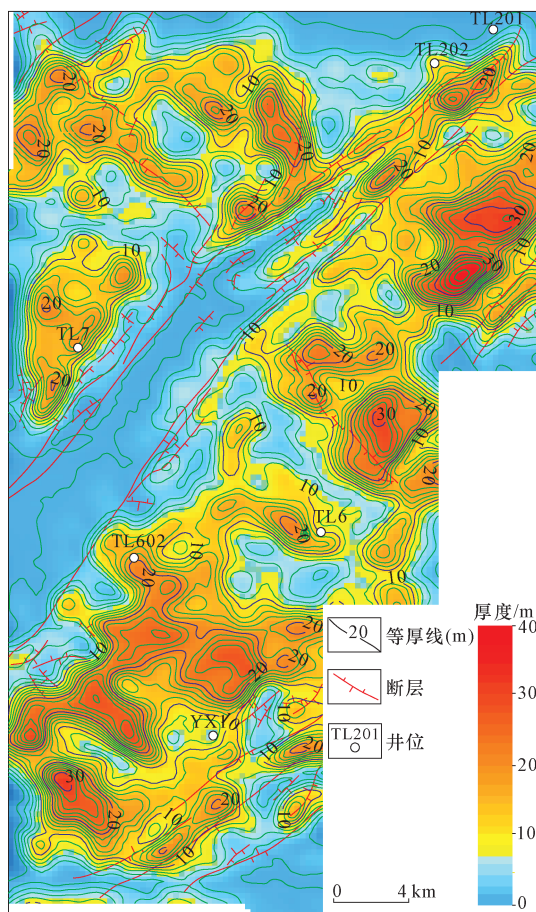


图10 涪陵地区茅三段白云岩储层厚度

Fig. 10 Isopach map of the Mao 3 reservoirs in Fuling area

4 结论

1) 川东南涪陵地区二叠系茅口组叠前道集信噪比低、近道能量弱、角度窄,预测剔除去噪法可提高信噪比,剔除拟合振幅补偿可补偿近道能量,提高振幅保真度,经叠前道集优化处理后,叠前道集的资料品质大幅度提高;

2) 二叠系上统吴家坪组底部炭质泥岩屏蔽了茅口

组白云岩的地震响应特征,采用多子波分解与重构技术去除了炭质泥岩的低频强轴屏蔽干扰,提高了地震的纵横向分辨率,突出了白云岩储层的地震反射特征,该技术为含有强反射干扰的复杂储层预测提供了新的研究思路和方法;

3) 茅口组白云岩与灰岩纵波阻抗叠置,常规波阻抗反演及地震属性难以预测,叠前道集有效角度窄,叠前弹性参数准确求取困难,以多子波分解与重构技术处理的近、中分角度叠加数据为基础,通过贝叶斯稀疏脉冲反演计算了两个不同角度叠加数据体的射线弹性阻抗体,并利用射线弹性阻抗通过坐标旋转技术构建了岩性因子,进行白云岩储层的有效识别,该技术避免了窄角度道集叠前弹性参数求取困难且单一参数难以有效识别白云岩储层的问题,地震预测结果与实钻结果吻合,预测方法准确和可靠,可用于类似区白云岩储层的预测,这对开辟川东南涪陵地区二叠系茅口组天然气勘探新局面具有重要的指导意义;

4) 地震岩性因子预测表明,川东南涪陵地区二叠系下统茅口组白云岩垂向上主要发育于茅三段中上段,平面分布具有较强的非均质性,主要呈团块状沿基底断裂分布,大部分地区白云岩厚度大于10 m,部分地区大于20 m。

参 考 文 献

- [1] 王良军,杨诚,王庆波,等. 四川盆地涪陵地区茅口组热液白云岩储层预测[J]. 物探化探计算技术,2018,40(3):298-305.
Wang Liangjun, Yang Cheng, Wang Qingbo, et al. Hydrothermal dolomite reservoir prediction for Maokou formation in Fuling area, Sichuan basin[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 40(3): 298-305.
- [2] 刘玲,沃玉进,孙炜,等. 龙门山前侏罗系沙溪庙组致密砂岩储层叠前地震预测[J]. 天然气地球科学,2019,30(7):1-9.
Liu Ling, WoYujin, Sun Wei, et al. Prestack seismic prediction of tight sandstones for Jurassic Shaximiao formation in front of Longmenshan[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(7): 1-9.
- [3] 李庆忠. 走向精确勘探的道路[M]. 北京石油工业出版社,1994, 6-24.
Li Qingzhong. Road to precise exploration[M]. Beijing Petroleum Industry Press, 1994, 6-24.
- [4] 鲜强,冯许魁,刘永雷,等. 塔中地区碳酸盐岩缝洞型储层叠前流体识别[J]. 石油与天然气地质,2019,40(1):196-204.
Xian Qiang, Feng Xukui, Liu Yonglei, et al. Prestack fluid identification for fractured vuggy carbonate reservoir in Tazhong area[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 196-204.
- [5] 裴江云. 复杂岩性目标黏弹性叠前深度域成像方法及其应用[J]. 大庆石油地质与开发,2019,38(4):124-130.
Pei Jiangyun. Imaging method of the viscoelastic prestack depth domain for complex lithologic targets and its application[J]. Petroleum

- Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(4): 124 – 130.
- [6] Geronimo J S, Hardin D P, Massopust P R. Fractal functions and wavelet expansions based on several scaling functions[J]. J. Approx. Theory, 1994, 78(3): 373 – 401.
- [7] Bear L K, Pavlis G L. Multi-channel estimation of time residuals from broadband seismic data using multi-wavelets[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1999, 89(3): 681 – 692.
- [8] Lebrun J, Vetterli M. Balanced multiwavelets theory and design[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(4): 1119 – 1125.
- [9] Jonathan M L, Jeffrey Park. Multiwavelet spectral and polarization analyses of seismic records[J]. Geophysical Journal International, 1995, 122(3): 1001 – 1021.
- [10] Ping An. Application of multi-wavelet seismic trace decomposition and reconstruction to seismic data interpretation and reservoir characterization. SEG Technical Program Expanded Abstract, 2006, 25: 973 – 977.
- [11] 徐天吉, 沈忠民, 文学康. 多子波分解与重构技术应用研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(6): 660 – 665.
Xu Tianji, Shen Zhongmin, Wen Xuekang. Research and application of multi-wavelet decomposition and reconstruction[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2010, 37(6): 660 – 665.
- [12] 于景维, 付欢, 张宗斌, 等. 准噶尔盆地阜东斜坡区头屯河组岩石物理相特征[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(1): 129 – 139.
Yu Jingwei, Fu Huan, Zhang Zongbin, et al. Petrophysical facies of Toutunhe Formation in Fudong slope area, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(1): 129 – 139.
- [13] Ricker. The form and laws of propagation of seismic wavelets[J]. Geophysics, 1953, 18(1): 10 – 40.
- [14] 王鸣川, 段太忠, 杜秀娟, 等. 沉积相耦合岩石物理类型的孔隙型碳酸盐岩油藏建模方法[J]. 石油实验地质, 2018, 40(2): 253 – 259.
Wang Mingchuan, Duan Taizhong, Du Xiujuan, et al. Geological modeling method based on sedimentary facies coupled rock type for porous carbonate reservoirs[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(2): 253 – 259.
- [15] 冷雪梅, 杜启振, 孟宪军. 基于纵横波弹性阻抗联合反演的储层流体检测方法[J]. 断块油气田, 2019, 26(03): 319 – 323, 363.
Leng Xuemei, Du Qizhen, Meng Xianjun. Reservoir fluid detection method based on joint PP-and PS-wave elastic impedance inversion[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(03): 319 – 323, 363.
- [16] Kahraman S, Yeken T. Determination of physical properties of carbonate rocks from P-wave velocity[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2008, 67(2): 277 – 281.
- [17] Liu Ling, Tang Dazhen, WoYujin, et al. Favorable area prediction of tight sandstone: A case study of the He8 formation in the Kangning area, Eastern Ordos Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 175: 430 – 443.
- [18] 刘力辉, 王绪本. 一种改进的射线弹性阻抗公式及弹性参数反演[J]. 石油物探, 2011, 50(4): 331 – 335.
Liu Lihui, Wang Xubei. One modified ray-path elastic parameter inversion[J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2011, 50(4): 331 – 335.
- [19] J. F. Ma, I. B. Morozov. Ray-path elastic impedance [EB/OL]. [2010-08-02]. http://www.cseg.ca/conventions/abstracts/2004/2004abstracts/082s0209-Jinfeng_M_Raypath_Elastic_Impedance.pdf.
- [20] Liu Ling, Liu Lihui, WoYujin, et al. Pre-stack elastic parameter inversion of ray parameter[J]. Journal of Applied Geophysics, 2019, 162: 13 – 21.
- [21] 陈宗清. 四川盆地中二叠统茅口组天然气勘探[J]. 中国石油勘探, 2007, 5(2): 1 – 11.
Chen Zongqing. Exploration for Natural gas in Middle Permian Maokou formation of Sichuan Basin[J]. Geological Exploration and Development, 2007, 5(2): 1 – 11.
- [22] 李大军, 陈辉, 陈洪德, 等. 四川盆地中二叠统茅口组储层形成与古构造演化关系[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 756 – 763.
Li Dajun, Chen Hui, Chen Hongde, et al. Relationship between reservoir development in the Middle Permian Maokou formation and paleo-structure evolution in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 756 – 763.
- [23] 徐祖新. 川东地区中二叠统茅口组天然气成因及气源[J]. 特种油气藏, 2019, 26(2): 16 – 22.
Xu Zuxin. Genesis and source of gas in middle permian maokou formation of eastern sichuan basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(2): 16 – 22.
- [24] 徐敏, 陆林超, 段杰, 等. 川中-川东地区下二叠统茅口组二段白云岩发育规律研究[J]. 石油地质与工程, 2018, 32(4): 23 – 27.
Xu Min, Lu Linchao, Duan Jie, et al. Dolomite development of lower Permian Maokou formation in middle and eastern Sichuan[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2018, 32(4): 23 – 27.

(编辑 张玉银)