

基于匹配追踪算法的强反射分离技术在元坝地区茅三段储层预测中的应用

潘 蓓*, 邓智勇, 刘 勇, 陈会霞, 张志宇

中国石化勘探分公司, 四川 成都
Email: *124007067@qq.com

收稿日期: 2021年6月4日; 录用日期: 2021年7月16日; 发布日期: 2021年7月23日

摘 要

四川盆地茅口组储层普遍具有埋藏深、厚度薄的特点。受吴家坪底部泥岩与茅三段灰岩形成的强反射界面影响, 元坝地区茅三段滩相储层响应特征无法有效识别, 严重制约了对该区目的层段储层的刻画和认识。本文开展基于匹配追踪的强反射分离方法研究, 目的是弱化强阻抗界面的影响, 增强储层有效信号。结合单井质控及二维模型正演模拟, 确定了该方法的有效性和合理性。同时针对滩相储层受相带控制的特点, 在不同沉积相带加入不同强反射分离系数。通过对比去除强反射屏蔽层前后的剖面及平面属性, 表明强反射层分离后, 元坝地区茅三段滩体展布特征更加清晰。在此基础上识别的沉积微相细节丰富、边界清晰, 可为后续储层预测提供较可靠的定性参考。

关键词

匹配追踪, 强反射分离, 沉积微相, 储层预测

Reservoir Prediction of Mao 3 Member in Yuanba Area Using Strong Reflection Separation Technology Based on Matching Pursuit Algorithm

Bei Pan*, Zhiyong Deng, Yong Liu, Huixia Chen, Zhiyu Zhang

Sinopec Exploration Company, Chengdu Sichuan
Email: *124007067@qq.com

Received: Jun. 4th, 2021; accepted: Jul. 16th, 2021; published: Jul. 23rd, 2021

*通讯作者。

文章引用: 潘蓓, 邓智勇, 刘勇, 陈会霞, 张志宇. 基于匹配追踪算法的强反射分离技术在元坝地区茅三段储层预测中的应用[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(7): 956-964. DOI: 10.12677/ag.2021.117091

Abstract

The reservoir of Maokou Formation in the Sichuan Basin generally has the characteristics of deep burial and thin thickness. The strong reflection energy generated by the unconformity interface on the top of Maokou Formation shields the seismic response of the reservoir below, which leads to weak effective signal energy and severely restricts the description and understanding of the reservoirs in the target interval in this area. We carried out research on strong reflection separation method based on matching tracking, the purpose of which is to weaken the influence of the strong impedance interface and enhance the effective signal of the reservoir. Through single-well quality control and two-dimensional model forward modeling, the effectiveness and rationality of the method are confirmed. At the same time, in view of the characteristics of reef-shoal facies reservoirs controlled by facies belts, different strong reflection separation coefficients are added to different sedimentary facies belts. By comparing the profile and plane attributes before and after removing the strong reflective energy, it shows that after the strong reflection layer is separated, the distribution characteristics of the reef and shoal bodies of the third member of Maokou's section in Yuanba area are more clear and objective. The identification of sedimentary microfacies on this basis can provide a more reliable qualitative reference for subsequent reservoir prediction.

Keywords

Matching Pursuit, Strong Reflection Separation, Sedimentary Microfacies, Reservoir Prediction

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

在我国许多地区存在煤层、生物灰岩或油页岩等地层产生的强反射屏蔽层[1] [2], 此类地层下的薄储层预测难度较大。在地震资料解释中, 传统描述强屏蔽层之下薄储层的方法是开窗提取属性, 直接进行储层描述和预测。但由于强屏蔽层的覆盖作用, 传统方法的解释结果不能突出下伏弱反射信息, 储层预测效果受到较大影响, 因此这种强反射的有效剥离对后续解释的顺利进行至关重要。Lilly 等[3]提出基于频率域特征值分解的多子波分解与重构方法的强屏蔽处理方法。2013 年, 余刚等[4]将多子波分解重构技术应用到提高储层预测精度上来, 并对部分频率子波剥离煤层技术进行了分析。相较于传统的信号分解方法, 匹配追踪算法[5]由于它灵活的自适应性、稀疏性和简洁性, 更具优势[5] [6] [7]。王仰华(2007) [8]系统阐述了基于 morlet 子波的匹配追踪分解算法, 设计了快速高精度匹配追踪算法的三步流程, 并将该方法应用到煤层剥离上, 取得了预期的效果。在此基础上, 王仰华(2010) [9]结合地震波横向约束线性算子, 提出了多道匹配追踪的算法, 有效的克服了单道匹配追踪的分解非唯一性问题, 并将该方法成功地用于去除煤层强反射和含气层下方地层的低频探测。张军华[10]、李海山[11]及朱博华[12]基于匹配追踪去强屏蔽算法, 分别对不整合面下隐蔽油藏预测、煤层下含气层识别以及油页岩层下河道砂展布特征刻画进行了应用, 提高了储层预测的精度。目前, 针对深层-超深层系礁滩相储层类型的去强屏蔽处理研究较少。本文利用基于匹配追踪算法针对元坝地区茅三段顶进行强反射分离处理, 并利用处理后的地震数据进行礁滩相储层地震沉积微相识别, 有效提高了该区储层定性预测的精度和可靠性。

2. 基于 Morlet 子波族的匹配追踪原理与算法

匹配追踪算法是一个迭代过程，每次迭代都自适应地从地震信号中提出一个最佳匹配波原子 g_{γ_n} ，这里 n 是迭代次数。在第 N 此迭代后，地震信号 $f(t)$ 可以被表示成如下形式[13]：

$$f(t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n g_{\gamma_n}(t) + R^{(N)} f \quad (1)$$

其中， a_n 为第 n 此迭代提取的波原子 g_{γ_n} 的振幅系数， $R^{(N)} f$ 是第 $N - 1$ 次迭代后地震信号的残差，且 $R^{(0)} f = f$ 。本文选择 Morlet 子波进行原子库构建，Morlet 子波函数如下：

$$g_{\gamma_n}(t) = m_{\gamma_n}(t) = \exp\left[-\frac{\ln(2)}{\pi^2} \frac{\omega_m^2 (t-u)^2}{\sigma^2}\right] \exp[i(\omega_m(t-u)) + \phi] \quad (2)$$

其中 u 为时移时间， ω_m 为主频， ϕ 为相位， σ 为尺度因子。

具体计算步骤可分为以下三步[10]：

1) 利用复数道分析技术，可以估计出匹配波原子的三个参数 (u_n, ω_n, ϕ_n) ，并选择最大瞬时振幅处的时间位置作为 u_n ，该时间位置对应的瞬时频率为平均中心频率 ω_n ，瞬时相位作为相移 ϕ_n 。对于时间轴尺度因子 σ_n ，我们通过扫描搜索得到，其依据的评价标准满足公式：

$$g_{\gamma_n} = \arg \max_{g_{\gamma_n} \in D} \frac{\left| \langle R^{(n)} f, g_{\gamma_n} \rangle \right|}{\|g_{\gamma_n}\|} \quad (3)$$

其中， $D = \{g_{\gamma}(t)\}_{\gamma \in \Gamma}$ 是 Morlet 波原子族， Γ 为其结构参数空间，符号 $\langle \bullet \rangle$ 表示向量内积， $\|\bullet\|$ 表示向量长度。在这里需要强调的是时间尺度因子满足关系式 $\sigma = \frac{\omega_m \Delta t}{\pi}$ 。对于地震信号来说， σ_n 一般取 0.5~4 之间。特别地，当 $\sigma \rightarrow \infty$ ，波原子为正(余)弦函数；当 $\sigma \rightarrow 0$ ，波原子为一脉冲(δ 函数)。

2) 在第一步中估计出了波原子的结构参数 $\gamma_n = \{u_n, \omega_n, \phi_n, \sigma_n\}$ 后，需要在 Γ 的子空间中优化这些参数，即需要给定一个 γ_n 的领域 $[\gamma_n - \Delta\gamma_n, \gamma_n + \Delta\gamma_n]$ 。

3) 最后，需要估计波原子 g_{γ_n} 的振幅系数 a_n ，其依据是正交投影定理，即

$$a_n = \frac{\left| \langle R^{(n)} f, g_{\gamma_n} \rangle \right|}{\|g_{\gamma_n}\|^2} \quad (4)$$

显然，由(2) (4)式可以导出一个评价关系式：

$$\{a_n, \gamma_n\} = \arg \min_{a_n, \gamma_n \in \Gamma} \left\| R^{(n+1)} f(t) \right\|^2 \quad (5)$$

式(5)表示最终迭代的残差向量 $R^{N+1} f(t)$ 为弱小的噪声数据，不再进行匹配。

如图 1 所示，地震信号经过数次迭代后，可分解成不同频率、不同相位、不同形状的波原子，当残差达到设定的阈值后停止迭代。对比可知，重构的地震信号与原始信号在形态与结构上基本一致，仅在局部存在较小的误差。

根据这个特点，可选取某一时窗内所需的波原子进行重构，剔除干扰信号对应的波原子，以此弱化干扰信号的影响，达到增强有效信号的目的。

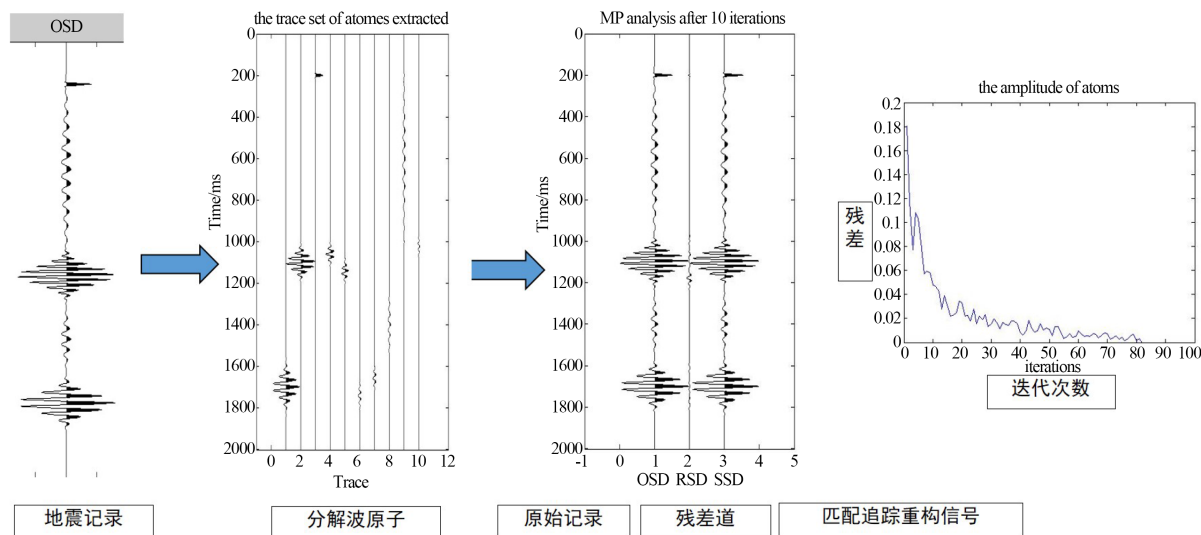


Figure 1. Demonstration of decomposition and reconstruction process of single-channel seismic data by matching pursuit
图 1. 单道地震数据匹配追踪分解与重构过程演示

3. 二维模型试算

如图 2 所示模型，其顶部灰色地层为一套泥岩，纵波阻抗为 $11.5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$ ；底部绿色地层为灰岩，纵波阻抗为 $17.5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$ ；黄色部分为储层，纵波阻抗为 $14.5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$ ；黑色地层为一套相对高速层，纵波阻抗为 $18 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$ 。正演主频为 25 Hz，采样间隔为 1 ms。当两套储层纵向间隔较小时，靠近泥岩层和高速层反射界面的储层响应消失，仅剩空白反射，储层响应特征和边界无法识别。利用匹配追踪算法识别强反射层波组后进行剔除，可以看到顶部储层响应特征得以突出，呈现亮点反射特征；同时储层尖灭点可以拾取，提高了储层识别能力并改善储层边界识别精度。

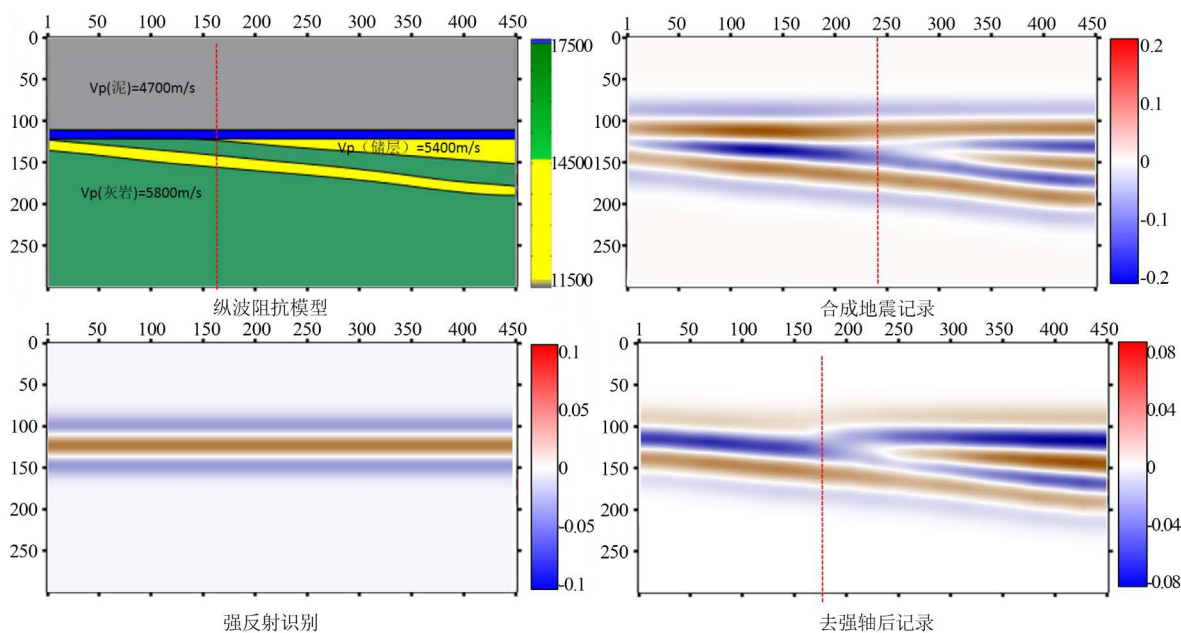


Figure 2. The two-dimensional model forwards modeling for the strong reflection removal
图 2. 二维模型正演去强反射效果图

4. 实际工区应用

4.1. 工区背景介绍

四川盆地茅口组沉积早期整体为缓坡相沉积，茅三段沉积时期，受峨眉地裂运动活动影响，伴随着强烈的拉张作用，受古地貌控制，梁平 - 开江陆棚雏形形成，元坝地区演变为镶边台地沉积[14] [15] [16]。新完钻井 A 井井深 7366 米，钻井过程中茅三段见良好油气显示，测试获得 105.94 万方高产工业气流。

如图 3 所示，茅三段早期，元坝地区发生相对沉降，以外缓坡泥岩沉积为主；在茅三段晚期，随着拉张作用进一步加强，元坝东拉张下沉形成明显破折，沉积模式由缓坡变为镶边台地，纵向上 A 井区加积作用形成厚层台地边缘生屑滩沉积[17] [18]。

元坝地区茅三段开阔台地表现为地层厚度厚，强峰强谷、平行 - 亚平行反射特征；台地边缘相为碳酸盐岩快速建造，地层厚度最大，向两侧厚度减小，呈中强变振幅丘状反射；陆棚 - 斜坡相地层厚度薄，强峰强谷、平行 - 楔状反射，岩性相变为泥灰岩、泥岩。

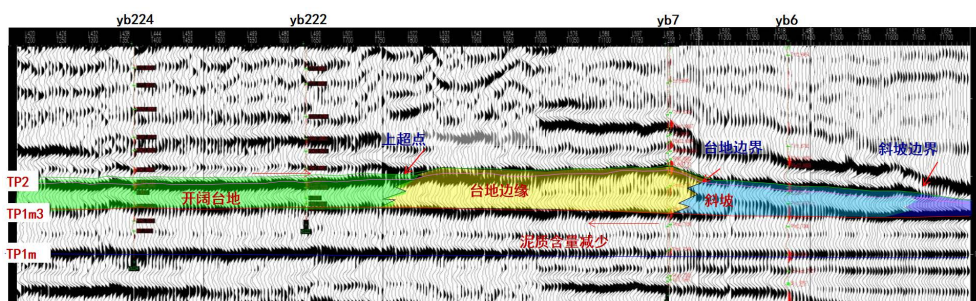


Figure 3. Cross multi-well seismic profile
图 3. 连井地震剖面图

A 井茅三段可分为 1、2 两个亚段，在 2 亚段顶部发育一套台缘浅滩储层，厚度为 23.7 m，表现为“低伽马、中低速”的特征。由离散合成记录可知，上覆吴二段底部泥岩和吴一段底部沉凝灰岩速度较低，与围岩阻抗差异较大，形成强反射界面，遮挡了下部茅三 2 亚段储层与围岩地震响应，导致储层地震响应特征无法有效识别(图 4)。

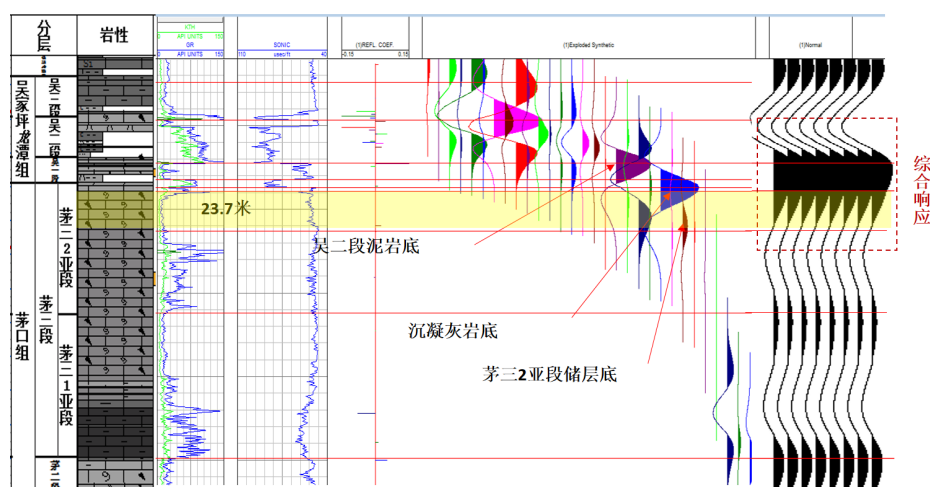


Figure 4. Discrete synthetic record of Well A
图 4. A 井离散合成记录

4.2. 针对滩相储层的应用

深层地震资料分辨率较低，信噪比低，且滩相储层分布受相带影响较大，直接去除强反射能量效果较差。结合实际工区情况，对方法进行了两点改进：首先将匹配追踪得到的波原子与原始地震记录进行褶积，然后根据单井分析结果将波原子能量乘以分离系数，如此可有效提高匹配追踪的抗噪性及强反射分离剖面与单井的吻合度，具体表达式如下所示：

$$S_{new} = S - \lambda \times m_i * S \tag{6}$$

其中 S_{new} 为处理后新的地震信号， S 为原始地震信号， λ 为分离系数， m_i 为最佳匹配波原子。

如图 5 所示，直接剥离匹配的强反射记录，抗噪性差、横向连续性较差；引入谱分解，将匹配得到的最佳波形原子与地震记录进行褶积运算，提高了匹配的强反射记录与地震记录的相关性，可有效改善强屏蔽处理后地震数据的横向连续性。

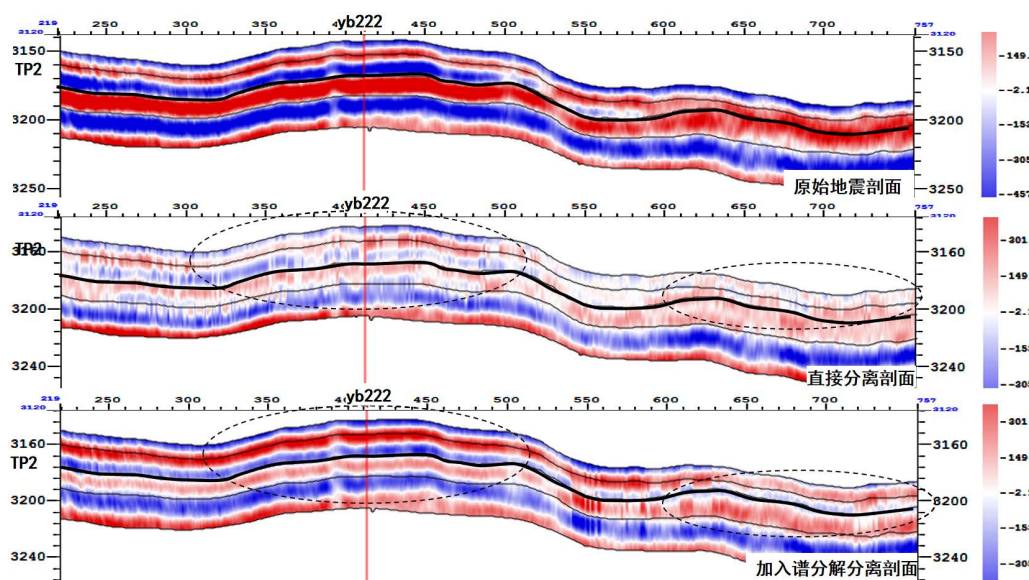
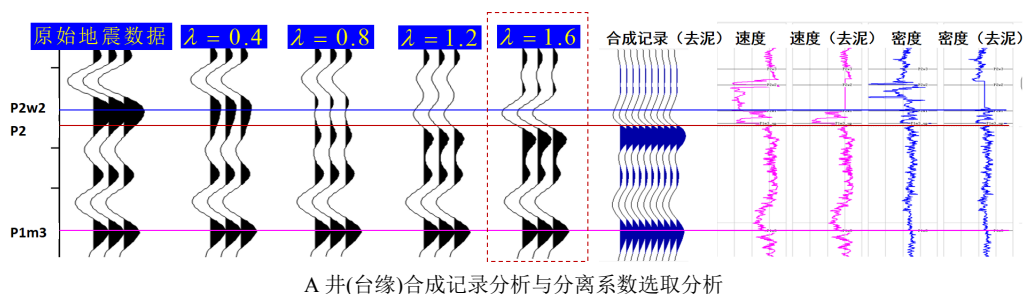


Figure 5. The effect of strong shielding removal before and after adding the spectrum decomposition idea
图 5. 加入谱分解思想前后强屏蔽处理效果图

如图 6 所示，分别对 A 井和 B 井泥岩段速度、密度曲线进行编辑，去除泥岩低速、低密层，并制作合成记录。对比可知，位于台地边缘的 A 井，去除泥岩后，储层与下伏致密灰岩之间的反射界面为中 - 强振幅反射；位于开阔台地的 B 井，去除泥岩后，储层与下伏致密灰岩之间的反射界面为弱振幅反射。根据参数测试，A 井选取分离系数 $\lambda = 1.6$ ，B 井选取分离系数 $\lambda = 1.2$ ，强反射分离后的波组与单井正演结果能最佳吻合。



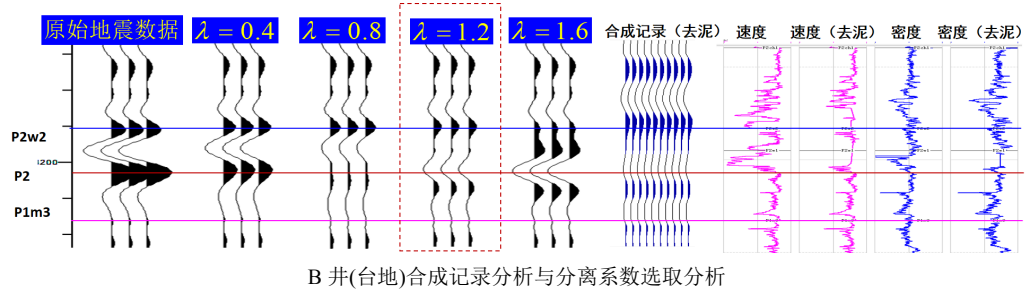


Figure 6. Single well quality control and parameter analysis
图 6. 单井质控和参数分析

根据已有的测井数据进行单井正演模拟确定去除强反射层影响后的地震波形特征；然后通过调整匹配追踪分离系数将强反射削弱至与正演模拟结果相匹配，从而确定分离系数大小；最后通过相带控制进行插值，获得分离系数 λ 的平面分布。由于该区斜坡 - 陆棚和台地边缘相带钻井较少，均只有一口，开阔台地内各井分离系数 λ 相近，故而直接根据相带赋予不同的 λ 值。加入分离系数约束后，在 A 井、C 井井点处强屏蔽处理剖面与实际井震标定吻合度更高。位于开阔台地相的 C 井在加入分离系数约束的强屏蔽处理后，其茅三段顶部为弱振幅反射，而位于台地边缘相的 A 井在处理后的茅三段顶部为中 - 强振幅反射，两口典型井的处理效果都与沉积相带的地震响应特征认识更加匹配(图 7)。

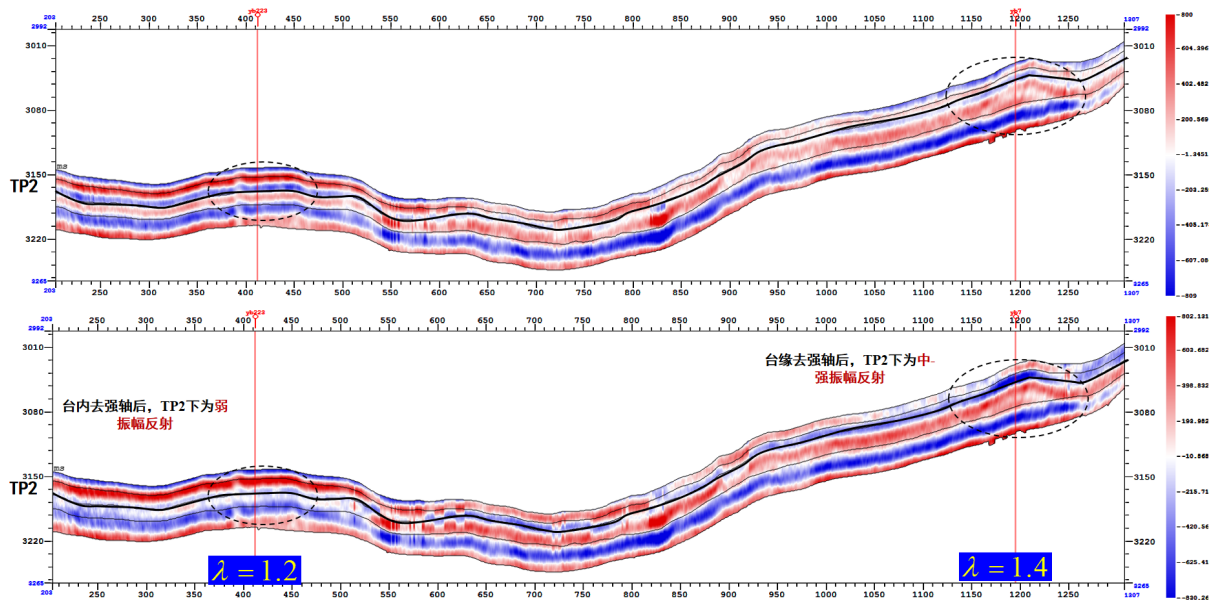


Figure 7. The effect of strong shielding removal before and after adding the separation factor
图 7. 加入分离系数前后强屏蔽处理效果图

4.3. 在沉积微相识别中的应用

结合地质认识和单井替换实验可知，元坝地区茅三段台地边缘相包含三个微相：① 台缘丘滩相，发育于台缘靠斜坡一侧，沉积时期水动力相对较强，以纵向加积为主，地层厚度较大，整体呈丘状，茅口组顶界表现为波峰或复合波峰反射。② 台缘浅滩相，发育于台缘靠台地一侧，水动力相对较弱，发育浅滩和滩间，地层厚度减薄，内部主要由单波峰和上强下弱复波地震反射构成。③ 滩间，发育在滩体之间，表现为茅三 2 亚内部出现强波峰反射(图 8 上)。

去除强反射能量后, 台缘丘滩相和台缘浅滩相均为靠近茅三段顶部的亮点反射特征, 其中台缘丘滩丘状外形明显, 台缘浅滩表现为微幅丘状-平行外形特征, 台缘丘滩波峰反射能量强于台缘浅滩。滩间为靠近茅三2亚中部的波峰反射, 下凹外形明显(图8下)。

对比去除强反射轴前后剖面可知, 台地边缘的三种微相在原始剖面上反射特征差异较小, 界限不清; 去除强反射层能量后, 三种微相界限清晰, 反射特征和外形特征差异明显, 分异性较好。

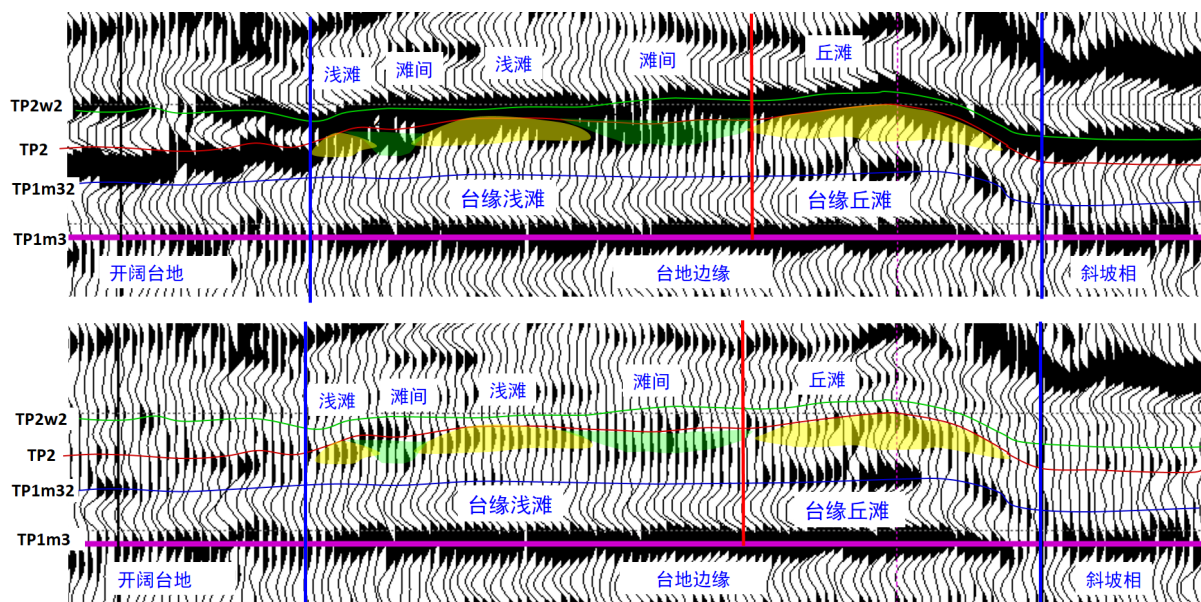


Figure 8. Comparison of seismic profiles before (upper) and after (lower) strong reflection removal

图8. 去强轴前(上)后(下)地震剖面对比

通过提取相同时窗的地震属性进行对比分析可见, 原始地震数据(图9左)在茅三2亚段振幅属性台地边缘与斜坡-陆棚相边界清晰, 但台地边缘与开阔台地的边界无法有效识别, 同时台地边缘相带内振幅属性的响应受上覆吴家坪泥岩/沉凝灰岩的强反射的影响, 内部能量差异小, 不能有效表现滩相储层的响应。去强轴后地震数据(图9右)相带边界清晰, 靠近斜坡一侧的丘滩与靠近台地一侧的浅滩沿台地边缘成排成带展布, 振幅能量差异明显, 滩间可能为滩体发育沟通的水道; 同时, 由振幅能量变化可推测, 该区滩体虽大面积分布, 但内部横向存在一定的非均质性, 整体上靠近台缘外侧的滩体储层可能更好。

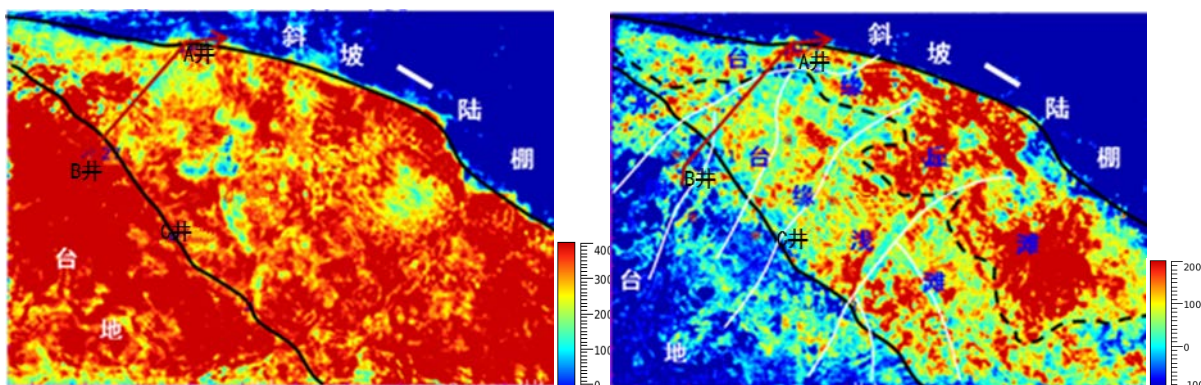


Figure 9. TP2-TP2 + 10 ms average amplitude attributes before (left) and after (right) removing the strong reflection

图9. 去强轴前(左)后(右) TP2-TP2 + 10 ms 平均振幅属性

5. 结论

基于匹配追踪算法的强反射分离方法可以恢复强反射层下薄储层真实地震响应特征。将匹配波原子与原始地震资料卷积后,可有效改善分离剖面的横向连续性;对于多个薄层反射能量相互干涉的情况,综合地质沉积相带确定分离系数大小,可使强反射分离后剖面地质意义更加明确。将其应用在元坝地区茅三段台缘滩相碳酸盐岩储层综合预测中,相比前期预测结果,沉积微相细节变化更丰富,相带边界展布更清晰,有效提升了该区地震微相识别精度。

基金项目

国家科技重大专项《四川盆地地下组合油气富集规律与勘探目标评价(2017ZX05005-003-006)》资助。

参考文献

- [1] 张军华, 王庆峰, 张晓辉, 等. 薄层和薄互层叠后地震解释关键技术综述[J]. 石油物探, 2017, 56(4): 459-471.
- [2] 安鹏, 张延庆, 于志龙, 等. 基于“匹配追踪”算法的 T2 强反射层影响去除技术应用[J]. 物探与化探, 2016, 40(5): 955-960.
- [3] Lilly, Y.J. and Park, J. (1995) Multiwavelet Spectral and Polarization Analysis of Seismic Records. *Geophysical Journal International*, **122**, 1001-1021. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb06852.x>
- [4] 余刚, 周小鹰, 王箭波. 多子波分解与重构法砂岩储层预测[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2013, 35(1): 19-27.
- [5] Castagna, J.P., Sun, S.J. and Siegfried, R.W. (2003) Instantaneous Spectral Analysis—Detection of Low-Frequency Shadows Associated with Hydrocarbons. *The Leading Edge*, **22**, 120-170. <https://doi.org/10.1190/1.1559038>
- [6] Liu, J., Wu, Y., Han, D. and Li, X. (2004) Time-Frequency Decomposition Based on Ricker Wavelet. *74th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, Denver, 10-15 October 2004, 1937-1940. <https://doi.org/10.1190/1.1851176>
- [7] Liu, J. and Marfurt, K. (2005) Matching Pursuit Decomposition Using Morlet Wavelets. *Expanded Abstracts of 75th SEG Annual International Meeting*, Houston, 6-11 January 2005, 786-789. <https://doi.org/10.1190/1.2148276>
- [8] Wang, Y. (2007) Seismic Time-Frequency Spectral Decomposition by Matching Pursuit. *Geophysics*, **72**, V13-V20. <https://doi.org/10.1190/1.2387109>
- [9] Wang, Y. (2010) Multichannel Matching Pursuit for Seismic Trace Decomposition. *Geophysics*, **75**, V61-V66. <https://doi.org/10.1190/1.3462015>
- [10] 张军华, 刘振, 刘炳杨, 等. 强屏蔽层下弱反射储层特征分析及识别方法[J]. 特种油气藏, 2012, 19(1): 23-26.
- [11] 李海山, 杨午阳, 田军, 等. 匹配追踪煤层强反射分离方法[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(5): 866-870.
- [12] 朱博华, 向雪梅, 张卫华. 匹配追踪强反射层分离及应用[J]. 石油物探, 2016, 55(2): 280-287.
- [13] Mallet, S. and Zhang, Z. (1993) Matching Pursuit with Time-Frequency Dictionaries. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **41**, 3397-3415. <https://doi.org/10.1109/78.258082>
- [14] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 347-354.
- [15] 郭旭升, 胡东风. 川东北礁滩天然气勘探新进展及关键技术[J]. 天然气工业, 2011, 31(10): 6-11.
- [16] 郭旭升, 胡东风, 黄仁春, 等. 四川盆地深层-超深层天然气勘探进展与展望[J]. 天然气工业, 2020, 40(5): 1-14.
- [17] 胡东风. 四川盆地元坝地区茅口组台缘浅滩天然气勘探的突破与启示[J]. 天然气工业, 2019, 39(3): 1-10.
- [18] 胡东风, 王良军, 黄仁春, 等. 四川盆地东部地区中二叠统茅口组白云岩储层特征及其主控因素[J]. 天然气工业, 2020, 39(6): 13-21.