

doi: 10.11720/wtyht.2023.1512

李栋,朱博华. 基于上覆地层频率约束的匹配追踪强反射层分离方法[J]. 物探与化探, 2023, 47(5): 1261-1272. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1512>

Li D, Zhu B H. Matching pursuit algorithm-based strong seismic reflection separation method under the constraints of seismic wave frequency of overlying strata[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(5): 1261-1272. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1512>

基于上覆地层频率约束的匹配追踪强反射层分离方法

李栋¹, 朱博华²

(1. 江苏联合职业技术学院 南京工程分院, 江苏 南京 211135; 2. 中国石化石油物探技术研究院有限公司, 江苏 南京 211103)

摘要: 基于匹配追踪强反射分离方法在实际应用中取得了较好的效果, 但关键参数的选择仍存在一些问题, 相关研究较少。本文针对匹配追踪强反射分离方法中频率参数的优选问题, 开展了详细的研究工作, 并形成技术流程。首先, 从地震波传播和衰减的角度, 分析了地震波频率的空间变化特征, 提出频率约束匹配追踪算法的思路; 然后, 设计相应的地质模型, 开展频率优选测试研究, 采用上覆地层频率约束匹配追踪算法进行强反射分离, 测试结果验证了方法的准确性和有效性; 最后, 针对塔里木盆地碳酸盐岩缝洞型储层, 开展上覆地层频率约束匹配追踪强反射分离技术的应用。应用成果表明, 基于上覆地层频率约束的匹配强反射分离技术能更合理、有效地分离强反射同相轴, 下伏小尺度缝洞体特征更加明显, 应用效果显著。研究促进了匹配追踪强反射分离技术的进一步优化, 提高了资料的适应能力和实际应用效果, 为后续进一步推广应用奠定了更好的基础。

关键词: 匹配追踪; 参数优化; 频率约束; 强反射分离; 模型测试; 小尺度缝洞体

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2023)05-1261-12

0 引言

针对匹配追踪强反射分离技术的研究与应用, 目前, 大部分仍集中在技术的应用环节, 实际应用效果的评价分析讨论较多, 但是关键环节的解剖讨论的较少。强反射分离方法的实现方式包括多子波分解与重构技术、波形分解技术、匹配追踪强反射分离技术等。针对多子波分解与重构技术, 张军华等^[1]、秦雪菲等^[2]在强反射分离、弱反射储层预测等方面取得了较好效果。马灵伟等^[3]、谢春临等^[4]基于波形分解技术有效地分离了强反射层, 突出了被强反射同相轴所掩盖的储层弱反射信息, 也取得了明显效果。针对匹配追踪强反射分离方法的讨论也比较多, 取得了明显的进展。为消除煤层强反射

影响, Wang^[5]开展多道匹配追踪算法研究, 实现强反射有效分离, 突出目标层弱反射特征, 应用效果明显; 李海山等^[6]开展匹配追踪算法研究, 有效分离了煤层强反射, 继而利用叠前反演方法对目标储层含气性特征进行了检测; 韩站一等^[7]利用字典学习快速匹配追踪算法, 通过叠后、叠前两个方面进行煤层强反射衰减处理, 压制了强反射信息, 提高了煤层周围储层的描述精度。上述研究主要偏重于应用效果的评价, 对匹配追踪强反射分离过程中的关键参数选取的讨论较少, 影响了该技术在实际资料中应用效果的提升。

在匹配追踪算法的参数选取探索研究方面, 朱博华等^[8]剖析了匹配追踪算法的关键环节, 对子波频率、分离系数两个参数进行了细致研究, 初步讨论了参数优选的准确性和必要性, 提高了强反射分离

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2023-08-08

基金项目: 中国石化科技攻关项目(P17021-6); 江苏高校哲学社会科学项目(2020SJA0651); 江苏省教育科学规划重点课题(B/2022/02/29)

第一作者: 李栋(1984-), 男, 副教授, 高级工程师, 2007年毕业于中国石油大学(华东)勘查技术与工程专业, 2013年毕业于中国石油大学(华东)地质资源与地质工程专业, 获博士学位, 现主要从事地球物理勘探技术研究工作。Email: lidong_dearl@163.com

通讯作者: 朱博华(1987-), 男, 高级工程师, 2010年毕业于中国石油大学(华东)勘查技术与工程专业, 2013年毕业于中国石油大学(华东)地球探测与信息技术学院, 获硕士学位, 现主要从事地震解释研究工作。Email: zhubohua1987@163.com

的精度,取得较好应用效果;印兴耀等^[9]、许璐等^[10]详细讨论了局部频率约束下的匹配追踪强反射分离方法,阐述了局部频率的含义和计算方法,提高了强反射分离的精度,提升了实际资料的应用效果;Zhu等^[11]、吴笑荷^[12]重点讨论了强反射分离方法中分离系数的优选方法,提出利用实钻井正演方法确定分离系数,提高了参数选取的可靠性,强反射分离效果明显提升。不同的地质模式条件下会形成不同的强反射类型,其地震反射特征也存在一定的差异性。刘杰等^[13]根据不同强反射类型开展地震反射特征及差异研究,指导匹配追踪参数优选工作,提高强反射层的分离精度;张生强等^[14]、Zhu等^[15]在匹配追踪算法的相位表征方面进行了细致研究,基于不同储层类型开展相位特征分析,进一步指导算法参数的优选,取得较好效果。

上述研究成果在匹配追踪算法的关键参数(频率、相位、分离系数)均有较为细致的研究,取得了较好的研究进展。考虑到地震波传播过程中频率空变特征,笔者认为频率参数的选择具有进一步优化的空间。通常情况下,常规方法通过目的层强反射层的三瞬属性计算频率^[8-10](或局部优化频率),用此频率作为匹配追踪算法的输入进行强反射分离。该频率参数不只代表强反射层的信息,还代表强反射层和局部储层发育的综合特征。地震波在空间传播过程中,因地质体特征差异,频率会出现空间变化特征。在到达稳定的强阻抗界面之前,频率有可能出现较强的横向不一致性,叠加强阻抗界面附近地质体特征引起的频率特征变化,这种特征变得更加复杂。可见,单纯用强反射层附近计算频率作为表征强反射层的频率这种做法存在较大的误差。如何得到只表征强反射层的频率特征(即地震波到达强阻抗界面之前的频率特征)显得尤为关键。

基于总结前人的研究成果和存在的问题,本文提出基于上覆地层频率约束的匹配追踪强反射分离新方法,将强反射层上覆地层的频率参数特征作为初始输入开展匹配追踪强反射层分离,形成了相应的技术流程。通过地震波传播理论分析,阐述上覆地层频率约束匹配追踪的内涵及重要意义。基于模型测试研究,验证了方法的可靠性和准确性。实际资料应用表明,本文提出的改进方法能更为准确地估算出强反射层的真实频率及其平面特征,能更好地恢复真实的强反射同相轴特征,分离效果更为可靠和保真,从而提高强反射分离精度和储层预测可靠性,具有明显的技术优势,为后续弱反射储层识别奠定基础。

1 地震波传播特征

地震波在地下介质中传播时,会造成地震信号能量的衰减、主频的降低、相位的畸变。地震波在地下空间发生了特征变化,造成这种变化的原因包括,地层介质岩石物理参数特征、地层厚度、地层组合、储层含油气性及多种影响因素叠加等,对研究目标的精细研究带来较大困难。

图1为地震波传播的示意。假设介质是横向均匀、纵向均匀变化的,a、b和c分别是不同地质体,地层界面A和B是横向稳定的。在 t_1 时间,地震波激发,此时地震子波 w 是横向稳定的,具有较好的波形一致性。在地震波往下传播过程中,在不同的空间位置,出现地质体a和b,地震波会出现一定程度的变化,包括振幅、频率、相位等。到达地层A时,在理论上,地震子波 w 出现明显的横向非一致性。此时,地层A对应的地震反射同相轴会出现明显的横向变化,由模型可知,地层A是横向均质的,

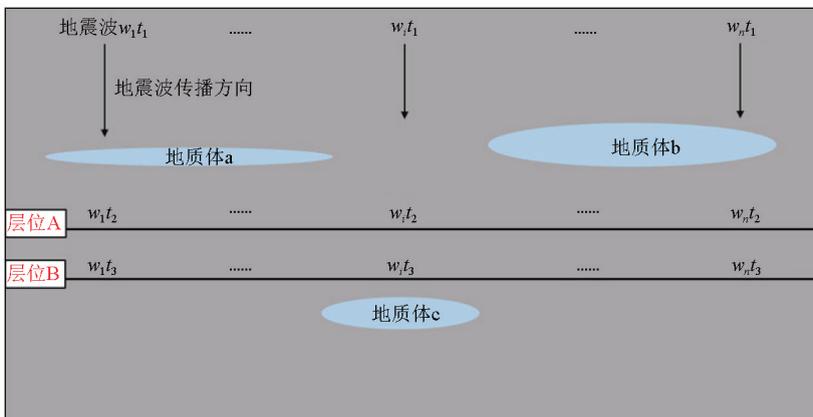


图 1 地震波传播示意模型

Fig. 1 Schematic model of seismic wave propagation

那么地震剖面上所展现的变化来自于地震波空间的变化和地层 A 的叠加,而不只是地层 A 的特征(物性、厚度、含油气性等)。

地震波再往下传播至目的层 B。此时,地震波已经存在了一定的横向非一致性,对于地层 B 而言,反射同相轴的变化来源于两个方面:①地震波到达地层 B 之前的空间变化特征(近似于地层 A);②地层 B 或者地层 B 附近地质异常(如地质体 c)引起的变化。这两者叠加形成地层 B 的综合响应。

在基于匹配追踪算法的强反射分离技术中,我们试图准确识别地层 B 的反射特征,从而得到下部地质体 c 的地震响应特征。常规方法是直接研究地层 B 反射同相轴的瞬时特征,但这种特征是两个面(子波空变特征和地层 B 本身特征)的耦合,很难准确地区分开。本文通过研究地层 B 上覆层 A 的地震波特征,首先对子波空变部分进行有效预测,将子波特征作为约束条件进行更有效地强反射分离,从而更加准确地预测地层 B 的反射特征,具有更明确的含义,最终突出地质体 c 反射,达到提高储层预测精度的目的。

2 强反射分离原理

2.1 基本原理

匹配追踪算法是一种有效的信号稀疏分解方法^[16],算法的基本表达式为

$$f = \langle f, g_{\gamma_0} \rangle g_{\gamma_0} + R^1 f, \quad (1)$$

式中: f 代表希尔伯特空间里的任意信号; $\langle f, g_{\gamma_0} \rangle$ 为原始信号 f 与第 1 次迭代时所选基函数的内积; $R^1 f$ 为第 1 次迭代后所产生的残差。

信号通过 m 次迭代后,信号的最终表达式为

$$f = \sum_{n=0}^{m-1} \langle R^n f, g_{\gamma_n} \rangle g_{\gamma_n} + R^m f, \quad (2)$$

式中: $R^n f$ 是第 n 次迭代时的信号; g_{γ_n} 为第 n 次迭代时选择的基函数; $R^m f$ 为最后的残差项。 m 次迭代把信号分解成 m 个基函数的组合和第 m 次迭代后的剩余残差。在每次迭代过程中,都是首先找出与原始信号最相关的原子,再进行下一步分解。重复进行,直到剩余残差值满足设定阈值或者迭代次数达到设定的极大值。子波 g_{γ_n} 可由 $\gamma_n = \{u_n, f_n, \varphi_n, k_n\}$ 来刻画, u_n 、 f_n 、 φ_n 和 k_n 称为子波控制参数,分别表示所求子波 g_{γ_n} 的中心时间、主频、相位和尺度因子。

2.2 子波控制参数求取

匹配追踪方法的关键步骤是子波控制参数的准

确求取,本文利用三步法求取子波控制参数^[5]。以 Morlet 小波作为基本原子,通过子波中心延迟时间、主频、相位和尺度因子来表征匹配子波,子波控制参数为 $\gamma = \{u, f, \varphi, k\}$ 。

Morlet 小波时间域表达式为

$$wt = \exp\left[-\ln 2 \frac{f_m^2 (t-u)^2}{k}\right] \exp\{i[2\pi f_m (t-u) + \varphi]\}, \quad (3)$$

式中: f_m 是子波主频; u 为中心延迟时间; φ 为相位; k 为尺度因子。下面是子波控制参数的具体求取方法。

第一步,利用复数地震道分析技术计算三瞬属性,把瞬时振幅最大包络处的时间作为初始中心延迟时间 u_n ,把该时间点处的瞬时频率 f_n 和瞬时相位 φ_n 作为匹配子波的主频和相位初始值,得到初步估算的 3 个参数 u_n 、 f_n 和 φ_n 。对于 Morlet 子波,还应求取尺度因子 k ,尺度因子通过

$$g_{\gamma_n}(t) = \operatorname{argmax}_{g_{\gamma_n} \in D} \frac{|\langle R^{(n)} f, g_{\gamma_n} \rangle|}{\|g_{\gamma_n}\|} \quad (4)$$

计算得到。 $D = \{g_{\gamma_n}(t)\}_{\gamma_n \in \Gamma}$ 指小波冗余字典,是过完备原子库。 $\langle f, g \rangle$ 代表 f 和 g 的内积, $\|g_{\gamma_n}\| = \sqrt{\langle g_{\gamma_n}, g_{\gamma_n} \rangle}$ 是对子波 g_{γ_n} 进行归一化。利用初始确定的 3 个参数 u_n 、 f_n 和 φ_n ,使用式(4)对参数 k 进行遍历搜索,求出最优值。

第二步,求取最优化参数以确定匹配子波 g_{γ_n} 。再次利用式(4)在搜索字典中最优化这 4 个参数。依据第一步确定的初始值,给一定的扰动量,得到搜索范围 $[u_n - \Delta u, u_n + \Delta u]$ 、 $[f_n - \Delta f, f_n + \Delta f]$ 、 $[\varphi_n - \Delta \varphi, \varphi_n + \Delta \varphi]$ 、 $[k_n - \Delta k, k_n + \Delta k]$, Δu 是时间间隔, Δf 是频率间隔, $\Delta \varphi$ 是相位间隔, Δk 是尺度参数间隔。最终得到最优化后的匹配子波 g_{γ_n} 。

第三步,估计振幅参数 a_n ,利用式(5)获得子波振幅

$$a_n = \frac{|\langle R^{(n)} f, g_{\gamma_n} \rangle|}{\|g_{\gamma_n}\|^2} \quad (5)$$

通过以上 3 步,可以得到表征强反射同相轴匹配子波 wt_{strong} ,表示为

$$wt_{\text{strong}} = a_n \times g_{\gamma_n} \quad (6)$$

2.3 强反射分离

在确定强反射同相轴匹配子波 wt_{strong} 的基础上,将其从原始地震数据 S_{original} 中减去,得到强反射分离后的地震记录 S_{new} ,以突出弱反射特征,表示为

$$S_{\text{new}} = S_{\text{original}} - wt_{\text{strong}} \quad (7)$$

在匹配子波较为准确的条件下,分离后得到的

数据能更好地恢复真正储层弱反射信息,并依据新数据开展后续储层的精细预测工作,有助于提高预测的精度。本文研究重点是探讨匹配子波中频率参数的优选问题。

3 模型测试

3.1 模型 1

模型 1 模拟上覆层频率恒定的情况。设定模型(图 2)观测系统为长度 800 m,炮间距 10 m,检波点间距 10 m。模型一共有 4 套地层,从上到下反射界面分别为 A、B 和 C,速度、密度参数递增,反射系数都为正值,其中反射界面 B 是一套强反射界面。在反射界面 B 下部位置,模拟发育一定规模储集体,最大厚度分别为 20 m 和 30 m,其阻抗大于围岩阻抗,相比于反射界面 B,储集体反射相对较弱,具体储层参数如图 2 所示。

采用 35 Hz Morlet 小波进行自激自收正演,子波如图 3a 所示。理论上横向主频均为 35 Hz,频率值如图 3b 所示。最终正演剖面如图 4 所示。

图 4a 为发育强反射层的正演记录,可见三套反射同相轴为波峰反射。同相轴 B 在储集体发育部位出现明显的波形变化特征,但由于同相轴 B 是一套强反射,储集体为弱反射,所以储集体弱反射特征被强反射掩盖,特征识别较为困难。在建模时,将强

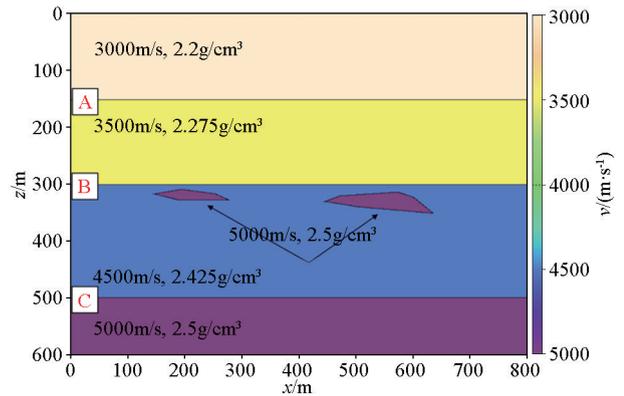


图 2 地质模型 1

Fig. 2 Geological model 1

反射界面 B 去除,再进行正演模拟得到的剖面如图 4b 所示,在这种情况下,储集体特征明显增强,即理想的强反射分离的效果(储层弱反射特征)。

现在利用匹配追踪强反射分离方法在叠后剖面对强反射同相轴 B 进行识别和去除。常规方法是计算的强反射同相轴的瞬时频率作为频率初始输入进行匹配追踪,得到强反射同相轴匹配子波,进而进行强反射分离得到常规结果。如图 5a 所示为强反射同相轴 B 的瞬时频率,可见频率有明显的横向变化,这种变化来自于强反射界面 B 和储集体特征的叠合,而不只是强反射界面 B 的频率特征。强反射分离剖面如图 5b 所示,可见由于频率参数的影响,整套强反射同相轴 B(包括单独反射界面 B 和储

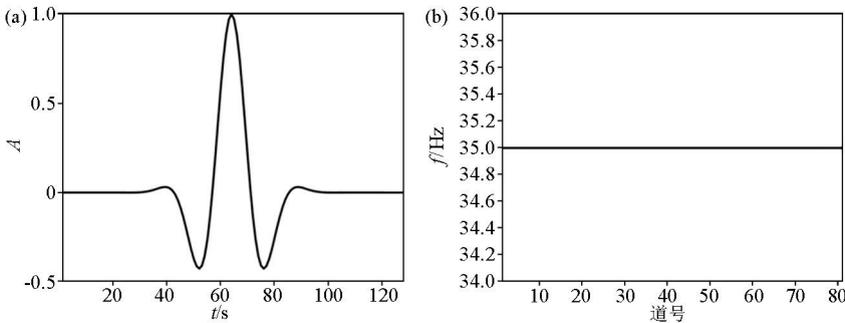


图 3 正演用 Morlet 小波 (a) 及其主频值 (b)

Fig. 3 Morlet wavelet (a) and main frequency value (b) for seismic forward modelling

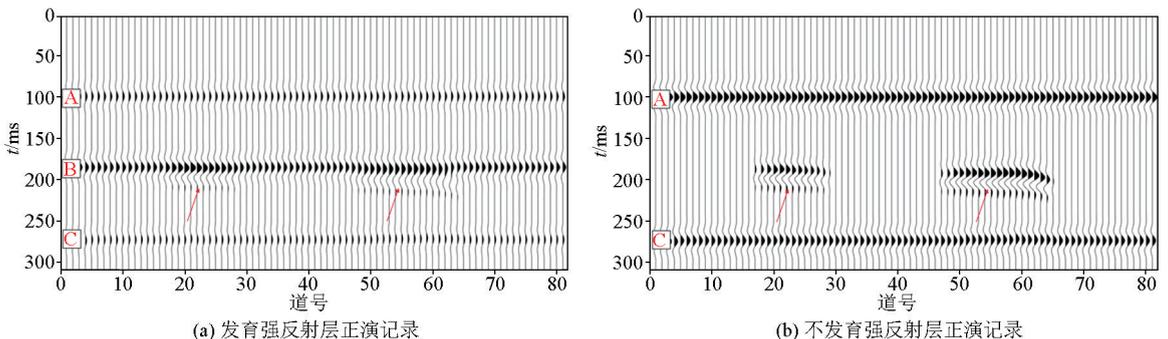


图 4 正演模拟剖面

Fig. 4 Profile by seismic forward modelling

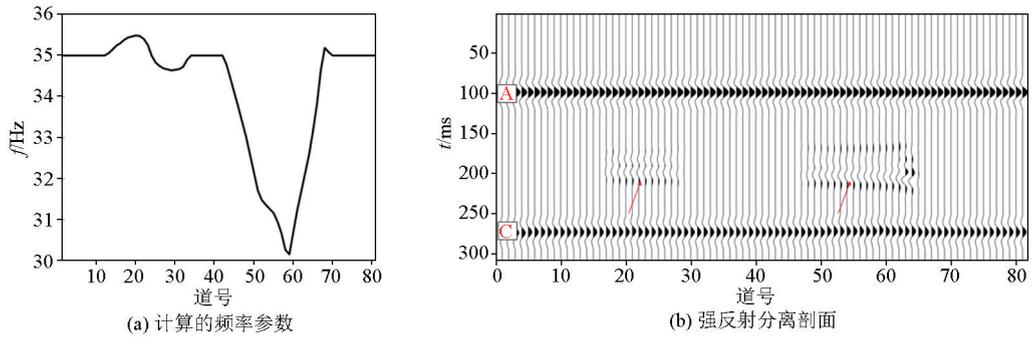


图 5 常规强反射分离结果

Fig. 5 Result by conventional strong seismic reflection separation method

集体响应特征)被完整的分离,处理剖面残留下一些较弱的储集体响应特征,但是与理论结果(图 4b)相差甚远,未达到高精度的强反射识别和分离的目的,储层弱反射特征未能很好地被恢复出来。

为了避免储集体对于频率计算的干扰,我们不直接对强反射同相轴 B 进行计算,转而对同相轴 B 上覆同相轴 A 进行计算。由上述地震波传播理论可知,地震波到达反射界面 B 之前的频率才是强反

射同相轴 B(即不受反射界面 B 下部储集体影响)的真实频率特征。同相轴 A 的瞬时频率如图 6a 所示,横向上均为 35 Hz。利用此频率作为约束,开展匹配追踪强反射层识别和分离,得到的结果如图 6b 所示,强反射分离结果与理论储集体弱反射特征具有很高的匹配性。分别提取第 20 道(储集体 a)和第 60 道(储集体 b)地震波形进行对比,从图 7 可以发现,在储集体位置,常规结果(黑色实线)与理论

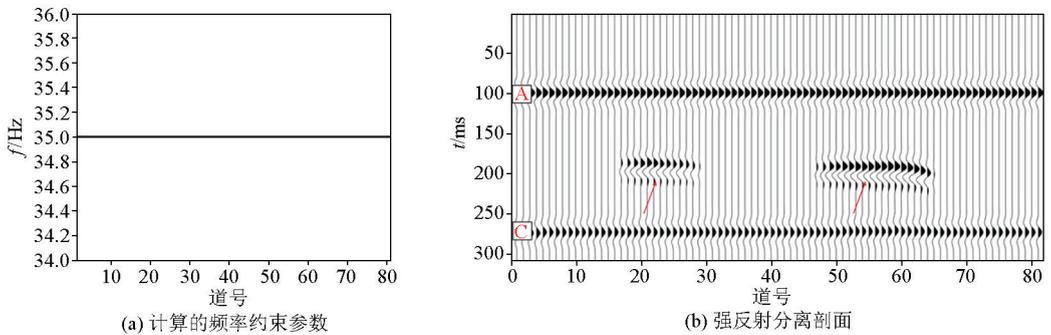


图 6 频率约束强反射分离结果

Fig. 6 Result by frequency constraint strong seismic

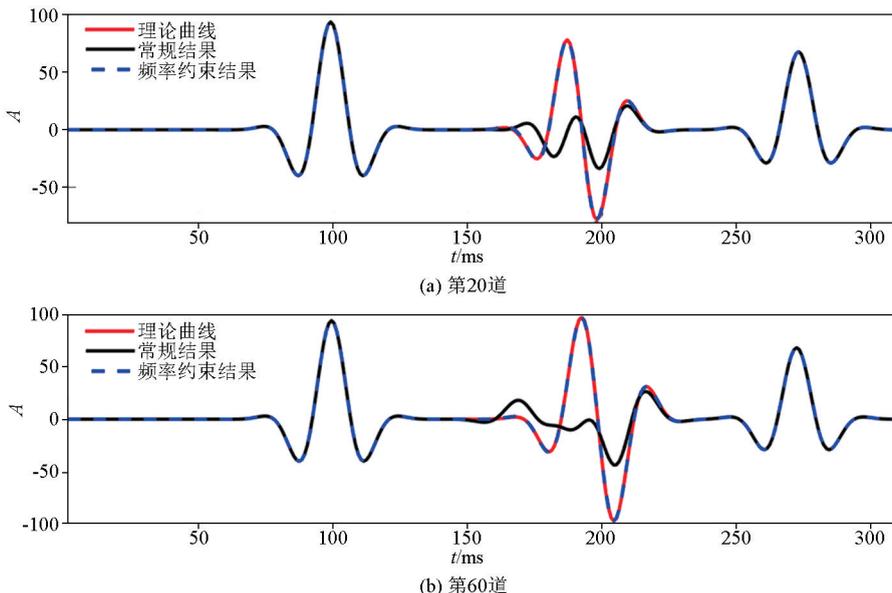


图 7 储集体位置反射波形对比

Fig. 7 Reflection waveform comparison of reservoir

弱反射波形(红色实线)有明显的差异,分离效果较差,不能有效表征储集体反射特征。频率约束分离结果(蓝色虚线)与理论弱反射波形(红色实线)具有更好的相似度,可以有效表征储集体反射特征,验证了方法的适应性和有效性。

3.2 模型 2

为了模拟储集体发育位置的差异性,将模型 1 中的不规则异常体发育位置改变至反射界面 B 的上方,其中地质体的参数进行了修改,以满足反射界面 B 为强反射界面、地质体响应为相对较弱反射的假设条件,具体储层参数如图 8 所示。

采用图 3 所示的 35 Hz Morlet 小波进行自激自收正演,最终剖面如图 9 所示。图 9a 为发育强反射层的正演记录,图 9b 为只有储集体弱反射的正演记录,即理想的强反射分离结果(储层弱反射特征)。

和模型 1 处理过程一样,利用常规的匹配追踪强反射分离方法对强反射同相轴 B 进行识别和去除,效果如图 10 所示。图 10a 为强反射同相轴 B 的

瞬时频率,可见频率有明显的横向变化,这种变化来自于强反射界面 B 和储集体特征的叠合,而不只是强反射界面 B 的频率特征。强反射分离剖面如图 10b 所示,由于频率参数的影响,整体分离效果与理论结果(图 9b)差距较大,效果欠佳,储层弱反射特征未能很好地被恢复出来。

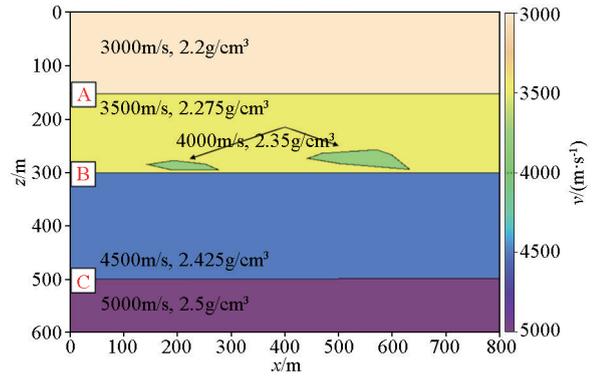
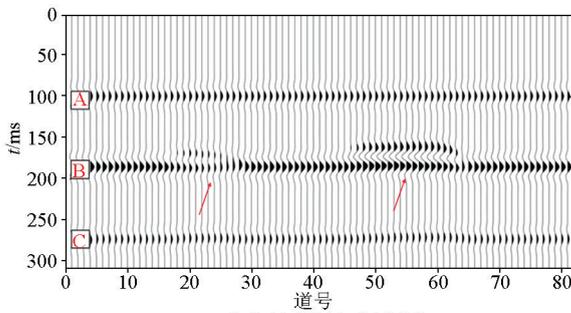
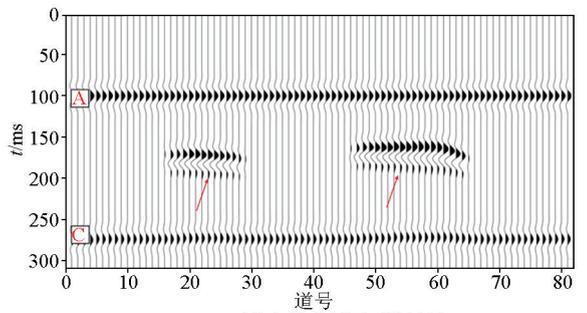


图 8 地质模型 2

Fig. 8 Geological model 2



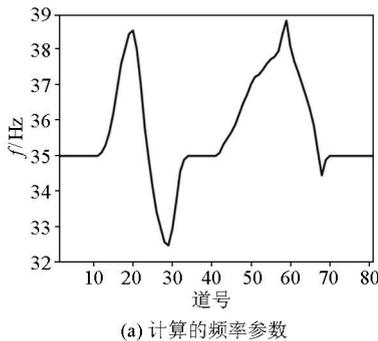
(a) 发育强反射层正演记录



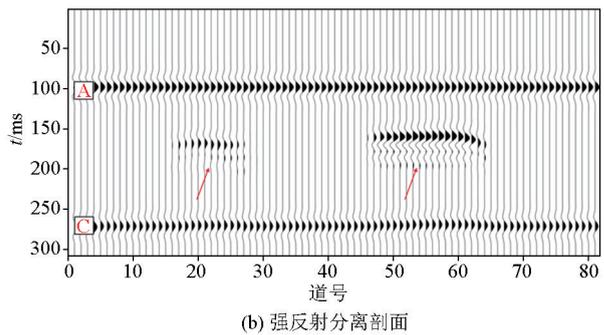
(b) 不发育强反射层正演记录

图 9 正演模拟剖面

Fig. 9 Profile by seismic forward modelling



(a) 计算的频率参数



(b) 强反射分离剖面

图 10 常规强反射分离结果

Fig. 10 Result by conventional strong seismic reflection separation method

研究采用基于上覆层频率约束的方法进行强反射分离。计算了上覆同相轴 A 的瞬时频率,如图 11a 所示,横向上均为 35 Hz。利用此频率作为约束,开展匹配追踪强反射层识别和分离,得到的结果如图 11b 所示,可见强反射分离结果与理论储集体弱反射特征具有更高的匹配性。分别提取第 20 道

(储集体 a) 和第 60 道(储集体 b)地震波形进行对比,如图 12 所示,可以发现在储集体位置,常规结果(黑色实线)与理论弱反射波形(红色实线)有明显的差异,分离效果差;而频率约束分离结果(蓝色虚线)与理论弱反射波形(红色实线)具有更高的相似度,有效表征了储集体反射特征。此外也可以看到,

由于储集体分布位置的影响,强反射与弱反射叠加关系改变,会影响到最终的强反射分离效果,所以模型 2 的强反射分离效果稍逊于模型 1 的强反射分离效果,但整体上仍优于常规的强反射分离效果。

3.3 模型 3

模型 1 和模型 2 中频率是固定的,模型 3 模拟上覆层频率变化的情况进行分析。地质模型还是图 2 所示。采用 Morlet 小波进行自激自收正演,横向

频率值如图 13a 所示,不再是恒定的频率值,最终正演剖面如图 13b 所示。

利用常规方法,计算强反射同相轴 B 的瞬时频率,如图 14a 所示,然后进行匹配追踪强反射分离,整套强反射同相轴 B(包括单独反射界面 B 和储集体响应特征)被全部分离,处理剖面不能很好地表征储集体反射特征,如图 14b 所示。

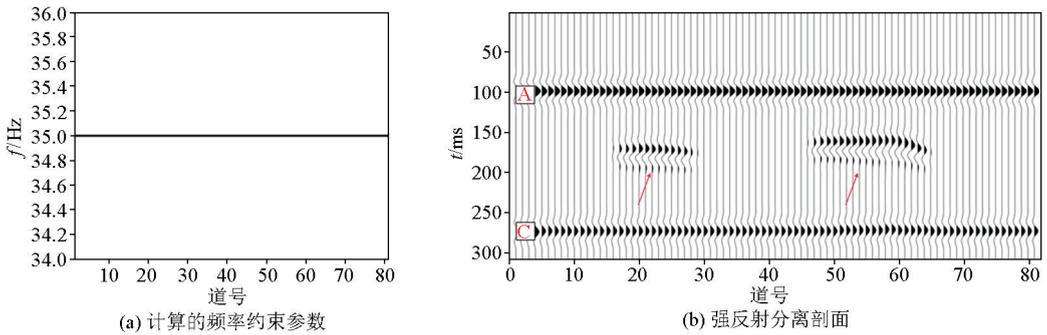


图 11 频率约束强反射分离结果

Fig. 11 Result by frequency constraint strong

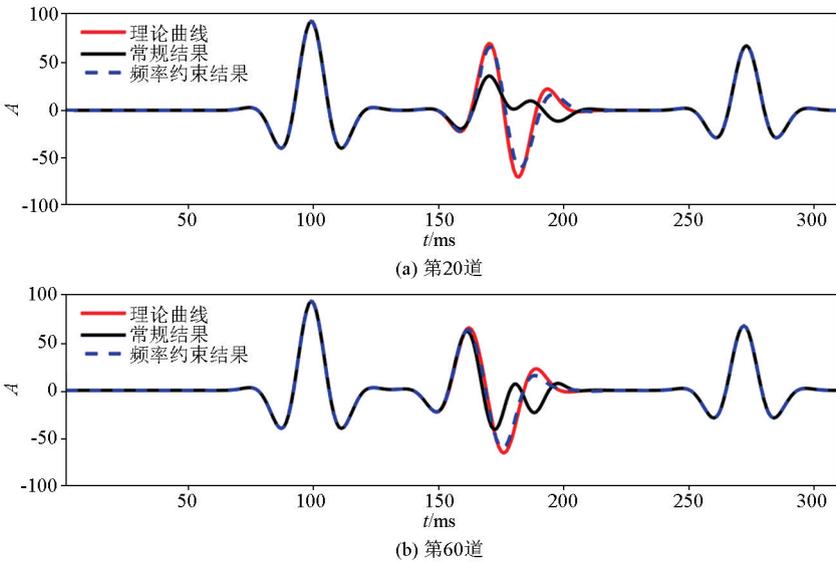


图 12 储集体位置反射波形对比

Fig. 12 Reflection waveform comparison of reservoir

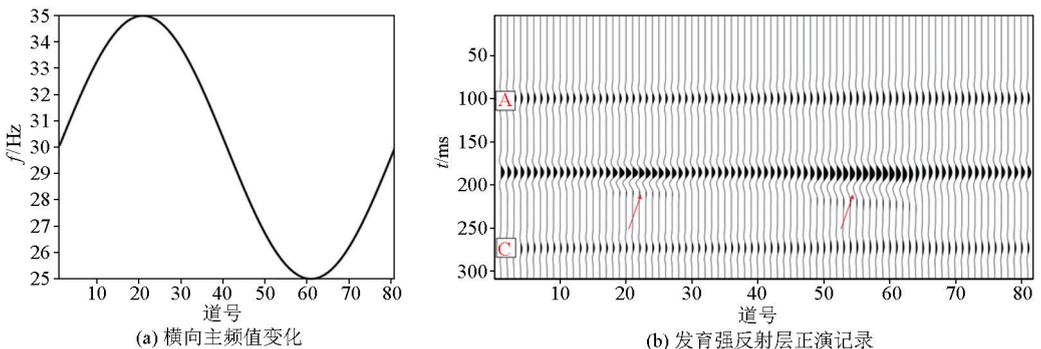


图 13 横向主频变化正演模拟

Fig. 13 Forward simulation of lateral dominant frequency variation

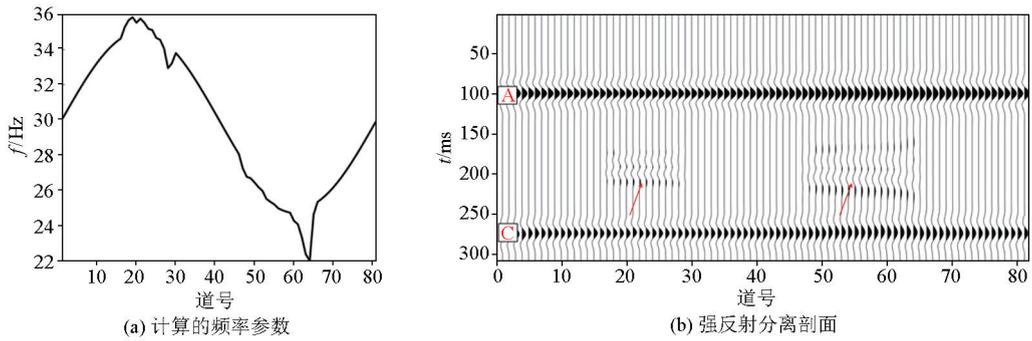


图 14 常规强反射分离结果

Fig. 14 Result by conventional strong seismic reflection separation method

同模型 1 和模型 2, 先对同相轴 A 进行瞬时频率计算, 横向上特征与正演频率特征较吻合, 与设定的频率很接近, 如图 15a 所示。利用此频率作为约束开展匹配追踪强反射层识别和分离, 得到的结果如图 15b 所示, 可见强反射分离结果与理论储集体

弱反射特征具有很高的匹配性。分别提取第 20 道 (储集体 a) 和第 60 道 (储集体 b) 地震波形进行对比 (图 16), 基于上覆层频率约束的强反射分离结果具有更好的效果, 与理论波形的吻合度更高。

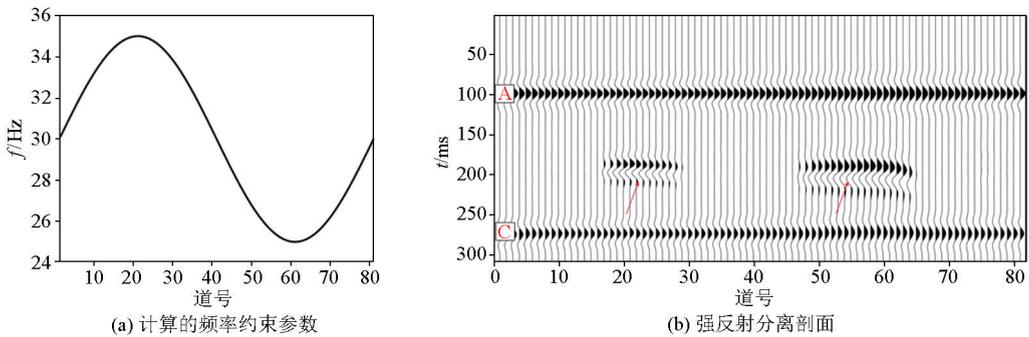
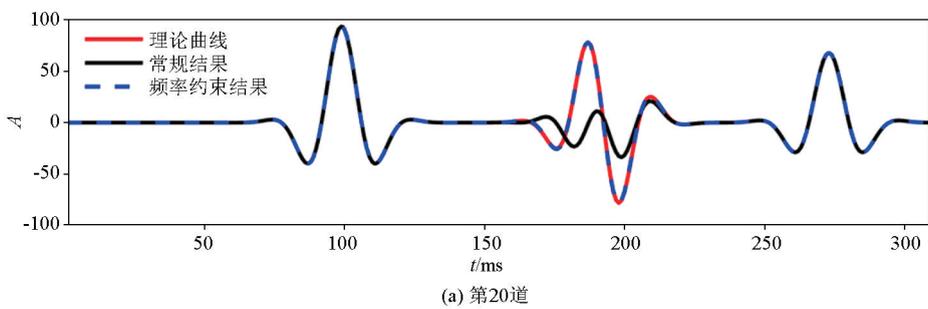
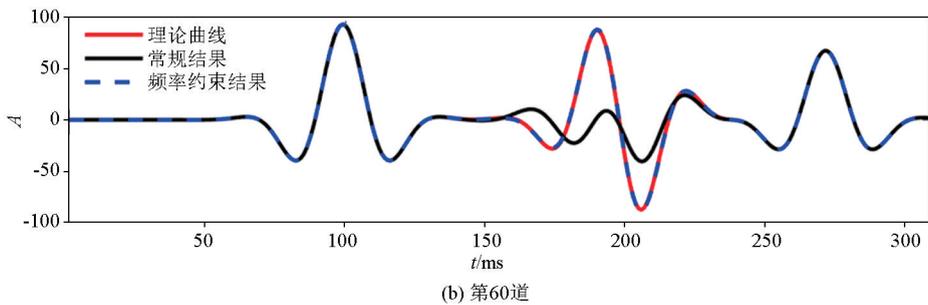


图 15 频率约束强反射分离结果

Fig. 15 Result by frequency constraint strong seismic reflection separation method



(a) 第20道



(b) 第60道

图 16 储集体位置反射波形对比

Fig. 16 Reflection waveform comparison of reservoir

由上述模型研究可知,常规方法针对强反射同相轴的频率计算存在较大误差,导致后续强反射分离效果不佳。通过分析上覆层频率特征作为频率输入,可以更好地表征真实频率特征,提高强反射同相轴的特征和分离效果,突出了储层弱反射特征,模型测试效果明显。

4 实际资料应用

塔里木盆地的奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层具有横向非均质性强,储集体规模差异大的特点,应用小尺度缝洞体识别较为困难(图 17)。受上覆地层影响, T_7^4 为强反射特征,下部缝洞储层反射特征容易被干扰。采用强反射分离方法,可以有效分离 T_7^4 强反射界面,突出储层反射信息,在实际应用中发挥了

较大作用。

本文针对匹配频率参数优选问题在研究区开展了测试应用。图 18a 为 T_7^4 往下 40 ms 均方根振幅,图 18b 为 T_7^4 相干属性(时窗往上 28 ms、往下 28 ms)。由图可见,研究区发育 NE 向断裂,北部发育古河道特征。缝洞体在振幅属性上表现为强振幅反射,同时,由于 T_7^4 强反射层的影响,平面属性整体反射能量强,且受断裂影响,也屏蔽了一些振幅较弱的缝洞体响应特征,影响了缝洞体的精细预测。

开展匹配追踪强反射分离方法的研究,最终优化了频率的选取。首先计算 T_7^4 强反射同相轴的匹配频率(图 19a),从图中可以看到, T_7^4 强反射同相轴的匹配频率与 T_7^4 界面发育特征有很强的相关性,断裂特征、缝洞体发育特征严重影响了真实匹配频率的计算,降低了后续匹配追踪强反射分离的精度。

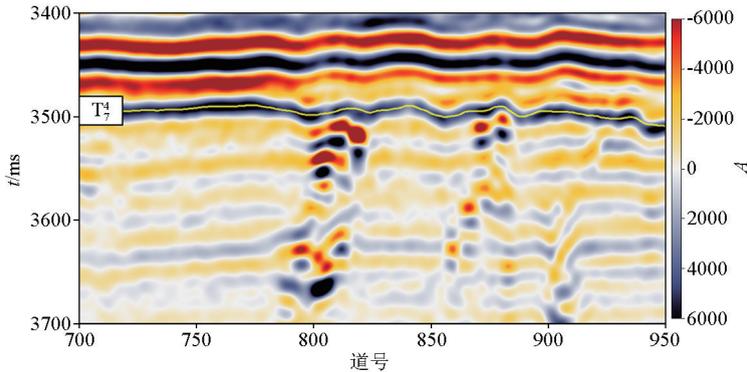


图 17 塔里木盆地奥陶系缝洞型储层剖面

Fig. 17 Seismic profile of Ordovician fracture-cavity reservoir in Tarim Basin

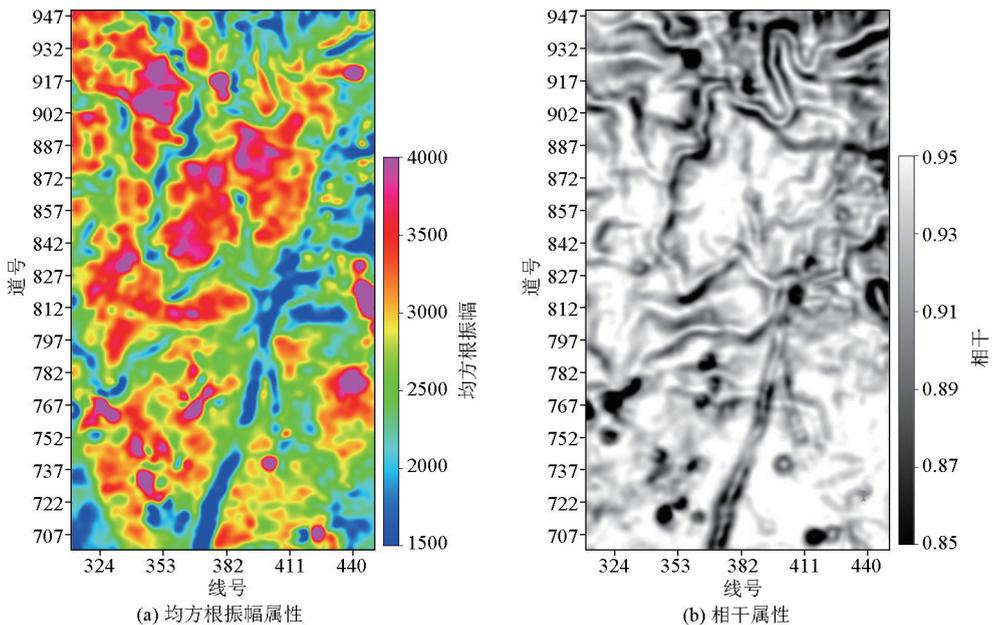


图 18 研究区平面属性提取

Fig. 18 Plane attribute extraction of the study area

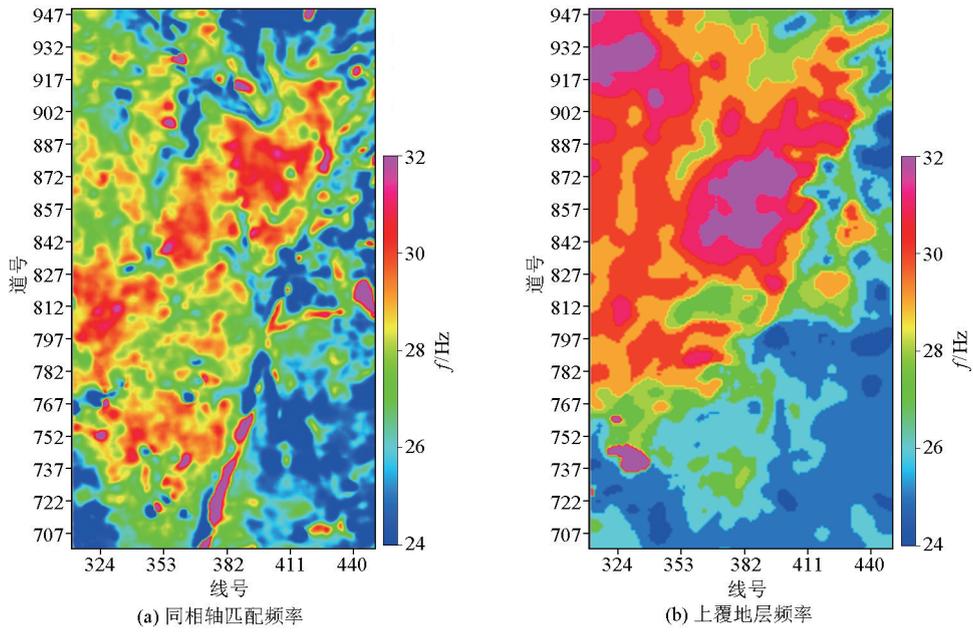


图 19 目的层频率属性

Fig. 19 Frequency attribute map of target layer

基于上述理论和模型研究,提取 T_7^4 往上 200 ms 范围内地震资料的频率特征,用于表征地震波到达 T_7^4 反射界面之前的空间频率特征,如图 19b 所示。可以看到,真实的频率特征比较平滑,较好地消除了 T_7^4 附近断裂、缝洞体带来的影响,结果更加接近真实的空间频率特征,从而更好地表征 T_7^4 强反射同相轴本身的频率特征。将此频率作为约束开展匹配追踪强反射分离,以改善分离结果。

ms)进行了对比(图 20),从对比结果可以看出,常规方法(图 20a)将 T_7^4 强反射层进行了分离,强反射影响明显减弱,但是同时对储层反射信号也造成了一定的损害,对弱反射特征而言尤为明显。本文改进方法(图 20b)更加准确地分离了 T_7^4 强反射同相轴,更好地保留了缝洞体弱反射特征,北部河道特征(黑色箭头所示)更加明显,平面预测效果明显好于常规方法,应用效果有明显提升。

通过改进前后结果的均方根振幅(T_7^4 往下 40

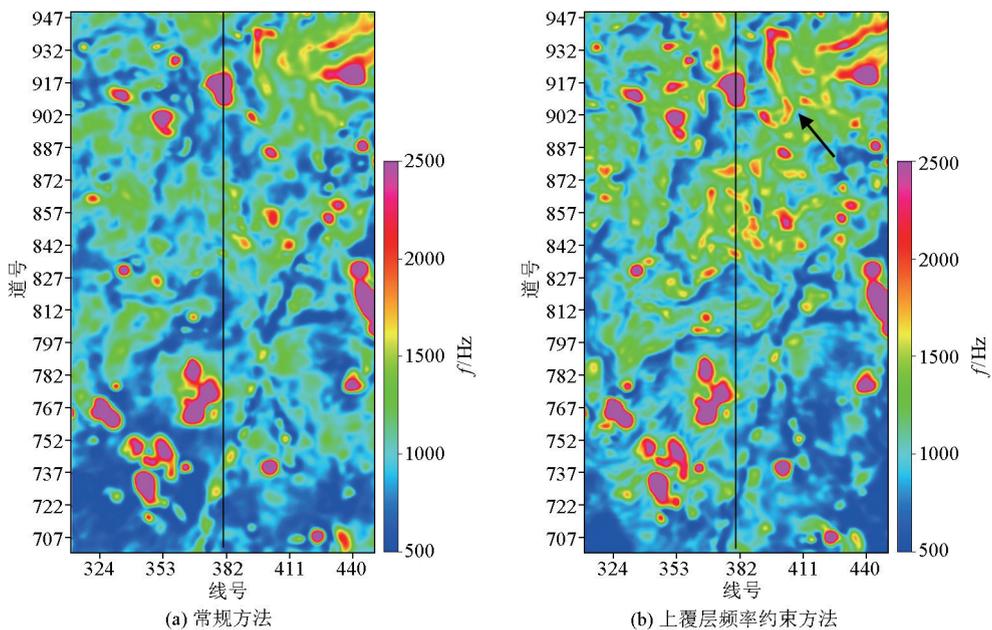


图 20 强反射分离振幅属性对比

Fig. 20 Amplitude attribute comparison of different strong reflection separation method

通过剖面(图 20 黑线)对比发现(图 21),基于上覆层频率约束的强反射分离能更好地分离 T_7^4 强反射,在小尺度缝洞体特征的保持方面明显好于常

规方法(黑色箭头所示),储层特征得到明显增强,验证了方法的可靠性和有效性,为小尺度缝洞体开发奠定了较好的储层预测基础。

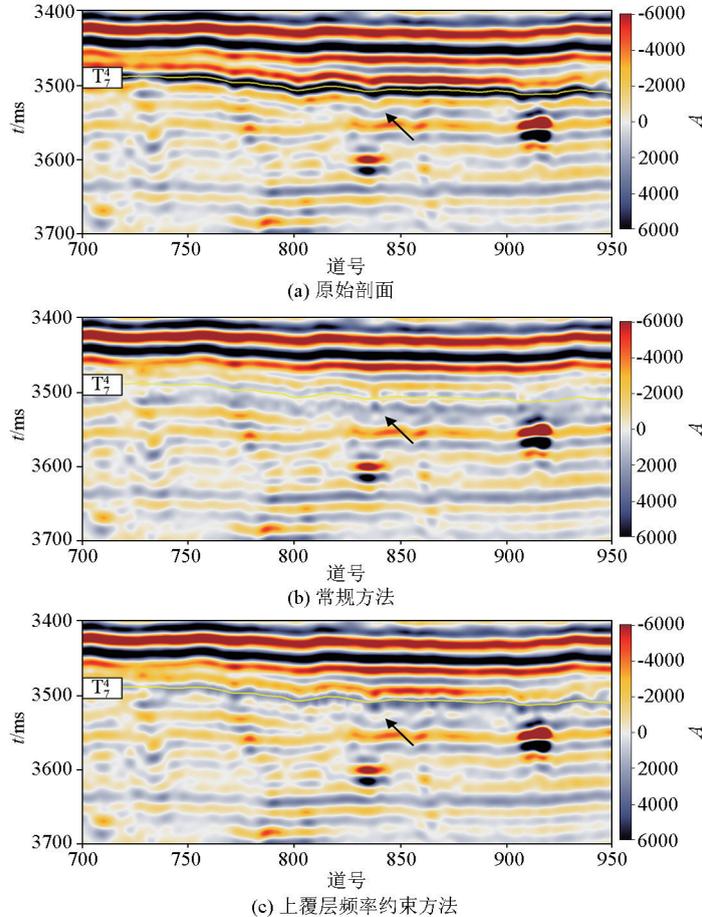


图 21 强反射分离剖面对比

Fig. 21 Seismic profile comparison of different strong reflection separation method

5 结论

本文针对匹配追踪强反射分离技术中频率优选问题,提出上覆层频率约束的方法进行强反射分离,改进方法能更加准确地分离强反射,突出弱反射特征,取得明显的应用效果。研究得出以下 3 点认识:

1) 匹配追踪强反射分离方法是解决强反射屏蔽储层的一种有效方法,在实际资料分析中得到了有效应用;

2) 模型测试表明,基于上覆层频率约束的匹配追踪强反射分离方法能更加准确地识别强反射同相轴特征,识别精度高,更有利于突出弱反射特征;

3) 塔里木盆地奥陶系缝洞型储层的实例研究表明,本文改进方法较常规方法具有明显优势,强反射分离更可靠、有效和准确,缝洞体弱反射特征更加明显,能助力储层精细预测和目标优选。

参考文献 (References):

- [1] 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.
Zhang J H, Liu Z, Liu B Y, et al. Analysis and identification of reservoir characteristics of weak reflectors under strong shielding layer [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(1): 23-26.
- [2] 秦雪霏,李巍. 大牛地气田煤系地层去煤影响储层预测技术[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2011,44(3):1048-1054
Qin X F, Li W. Research of identification and trimming of coal-bed interference in Daniudi gasfield [J]. Journal of Jilin University: Earth science edition. 2011, 44 (3): 1048-1054.
- [3] 马灵伟,杨勤勇,顾汉明,等. 基于随机缝洞介质理论模拟塔中北坡储层的地震响应[J]. 石油地球物理勘探,2016,51(6):1119-1127.
Ma L W, Yang Q Y, Gu H M, et al. Simulation of reservoir seismic response in the northern slope of the middle Tarim Basin with random fracture-cavern media model [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(6): 1119-1127.
- [4] 谢春临,黄伟,关晓巍,等. 波形分解技术在强反射背景下薄砂层识别中的应用[J]. 石油地球物理勘探,2017,52(3):516-520.
Xie C L, Huang W, Guan X W, et al. Thin sand identification un-

- der strong reflection with volume-based waveform decomposition [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2017, 52(3): 516–520.
- [5] Wang Y H. Multichannel matching pursuit for seismic trace decomposition [J]. *Geophysics*, 2010, 75(4): 61–66.
- [6] 李海山, 杨午阳, 田军, 等. 匹配追踪煤层强反射层分离方法 [J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(5): 866–870.
Li H S, Yang W Y, Tian J, et al. Coal seam strong reflection separation with matching pursuit [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(5): 866–870.
- [7] 韩站一, 宋炜, 李继光, 等. 利用字典学习快速匹配追踪压制煤层强反射 [J]. *石油地球物理勘探*, 2022, 57(5): 1156–1163.
Han Z Y, Song W, Li J G, et al. Strong coal-seam reflection suppression by fast matching pursuit based on dictionary learning [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2022, 57(5): 1156–1163.
- [8] 朱博华, 向雪梅, 张卫华. 匹配追踪强反射层分离方法及应用 [J]. *石油物探*, 2016, 55(2): 280–287.
Zhu B H, Xiang X M, Zhang W H. Strong reflection horizons separation based on matching pursuit algorithm and its application [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2016, 55(2): 280–287.
- [9] 印兴耀, 许璐, 宗兆云, 等. 基于局部频率约束的动态快速匹配追踪方法 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2018, 42(6): 59–66.
Yin X Y, Xu L, Zong Z Y, et al. Dynamic and fast matching pursuit method based on local frequency constraints [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2018, 42(6): 59–66.
- [10] 许璐, 吴笑荷, 张明振, 等. 基于局部频率约束的匹配追踪强反射识别与分离方法 [J]. *石油地球物理勘探*, 2019, 54(3): 587–593.
Xu L, Wu X H, Zhang M Z, et al. Strong reflection identification and separation based on the local-frequency-constrained dynamic matching pursuit [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2019, 54(3): 587–593.
- [11] Zhu B H, Wang M, Wei S M, et al. An improved algorithm for strong seismic reflection separation of thin coal seam [C]//81st EAGE Conference and Exhibition, 2019.
- [12] 吴笑荷. 强反射背景下不整合圈闭储层描述方法——以济阳坳陷长堤地区中生界为例 [J]. *中国石油勘探*, 2018, 23(4): 123–130.
Wu X H. Description technology for unconformity trap reservoirs with strong seismic reflections: A case of the Mesozoic unconformity reservoir in Changdi area, Jiyang depression [J]. *China Petroleum Exploration*, 2018, 23(4): 123–130.
- [13] 刘杰, 张忠涛, 刘道理, 等. 强反射背景下沉积体边界检测及流体识别方法 [J]. *石油物探*, 2016, 55(1): 142–149.
Liu J, Zhang Z T, Liu D L, et al. Sediment boundary identification and fluid detection for the seismic data with strong background reflections [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2016, 55(1): 142–149.
- [14] 张生强, 张志军, 李尧, 等. 基于地震相位分解的自适应强反射分离方法 [J]. *石油地球物理勘探*, 2021, 56(6): 1236–1243.
Zhang S Q, Zhang Z J, Li Y, et al. Adaptive strong reflection separation method based on seismic phase decomposition [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2021, 56(6): 1236–1243.
- [15] Zhu B H, Xiang X M, Gao H Q, et al. Application of strong seismic reflection separation based on matching pursuit algorithm in Tarim basin, China [C]//SEG Technical Program, Expanded Abstract, 2019.
- [16] Mallat S G, Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3377–3415.

Matching pursuit algorithm-based strong seismic reflection separation method under the constraints of seismic wave frequency of overlying strata

LI Dong¹, ZHU Bo-Hua²

(1. Nanjing Engineering Branch, Jiangsu Union Technical Institute, Nanjing 211135, China; 2. Sinopec Geophysical Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: The strong seismic reflection separation method based on the matching pursuit algorithm has yielded encouraging results in practical applications. However, this method faces some challenges in the selection of key parameters and has been scarcely investigated. This study thoroughly investigated the optimization of frequency parameters in the method thereof and established a technical process. First, this study analyzed the spatial variations in the frequency of seismic waves from the perspective of seismic wave propagation and attenuation and proposed a matching pursuit algorithm under the constraints of frequency. Then, this study designed corresponding geological models, conducted frequency optimization tests, and separated the strong seismic reflections using the matching pursuit algorithm under the constraints of the seismic wave frequency of the overlying strata. The test results verify the accuracy and effectiveness of the strong reflection separation method. Finally, the strong reflection separation method was applied to the fracture-vug carbonate reservoirs in the Tarim Basin. The great application effects indicate that the separation method can separate strong reflection events more reasonably and effectively, making the characteristics of underlying small-sized fractures and vugs more significant. This study further optimizes the strong reflection separation method based on matching pursuit and improves the adaptability and application performance of seismic data, thus laying a better foundation for further promotion and application of this method.

Key words: matching pursuit; parameter optimization; frequency constraint; strong reflection separation; model test; small-sized fracture and vug

(本文编辑:叶佩)