



引文格式: 龚伟, 吕海涛, 林新, 等. 走滑断裂带三维地震特征增强处理与描述研究[J]. 西北地质, 2024, 57(2): 59-66. DOI: 10.12401/j.nwg.2023016

Citation: GONG Wei, LÜ Haitao, LIN Xin, et al. Research on 3D Seismic Feature Enhancement Processing and Description of Strike Slip Fault Zone[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(2): 59-66. DOI: 10.12401/j.nwg.2023016

走滑断裂带三维地震特征增强处理与描述研究

龚伟, 吕海涛, 林新*, 李弘艳, 张荣

(中国石化西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 走滑断裂带由于纵向断距小, 超深层地震信号弱, 常规叠前深度偏移地震资料难以满足超深层断裂带精细描述需求。为提高断裂带成像精度, 指导走滑断裂带解释描述和评价部署, 以顺北地区走滑断裂带发育区三维地震资料为例, 建立了一套以提高地震资料品质的保真保幅优化处理、频谱恢复提高分辨率处理、频谱分解处理、频率域多尺度断裂检测等技术为主的走滑断裂带地震特征增强处理与描述技术, 该技术组合有效拓宽了地震数据频带, 提高了地震数据分辨率, 使超深走滑断裂带成像精度更高, 为超深走滑断裂带的精细解释、描述评价、三维雕刻提供了高品质资料基础。结合顺北地区前人研究成果, 综合利用频谱恢复提高分辨率处理、频谱分解处理、频率域断裂检测数据, 不同尺度断裂带特征及断储关系预测效果更好, 为进一步评价断裂带和部署井位提供了技术支撑。

关键词: 超深走滑断裂带; 保真保幅优化处理; 频谱恢复提高分辨率处理; 频谱分解处理; 断裂带检测

中图分类号: P65

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)02-0059-08

Research on 3D Seismic Feature Enhancement Processing and Description of Strike Slip Fault Zone

GONG Wei, LÜ Haitao, LIN Xin*, LI Hongyan, ZHANG Rong

(Northwest Oilfield Branch Company, SINOPEC, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Due to the small longitudinal fault displacement and weak ultra-deep seismic signal of strike slip fault zone, the conventional pre-stack depth migration seismic data cannot meet the requirements of fine description of ultra-deep fault zone. In order to improve the imaging accuracy of the fault zone and guide the interpretation, description, evaluation and deployment of the strike slip fault zone, taking the three-dimensional seismic data of the development area of the strike slip fault zone in Shunbei area as an example, a set of seismic feature enhancement processing and description technology of the strike slip fault zone is established, which is mainly based on the fidelity and amplitude preserving optimization processing, spectrum restoration and resolution improvement processing, spectrum decomposition processing, and frequency domain multi-scale fault detection processing technology. This technology combination effectively widens the frequency band of seismic data, improves the resolution of seismic data, improves the imaging accuracy of ultra-deep strike slip fault zone, and pro-

收稿日期: 2022-07-05; 修回日期: 2022-10-17; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 中石化西北油田分公司项目“顺北4号断裂带规模储集体预测与井轨迹优化设计研究”(KJ202005)资助。

作者简介: 龚伟(1985-), 男, 副研究员, 主要从事油气资源勘查工作。E-mail: gongwei625@126.com。

* 通讯作者: 林新(1986-), 女, 副研究员, 主要从事油气资源勘查工作。E-mail: 342880968@qq.com。

vides a high-quality data foundation for the fine interpretation, description and evaluation, and three-dimensional carving of ultra-deep strike slip fault zone. Combined with the previous research results in Shunbei area, the comprehensive use of spectrum recovery to improve the resolution processing, spectrum decomposition processing, frequency domain fault detection data, the prediction effect of fault zone characteristics and fault reservoir relationship at different scales is better, which provides technical support for further evaluation of fault zones and deployment of well locations.

Keywords: ultra deep strike slip fault zone; fidelity and amplitude optimization; spectrum recovery improves resolution processing; spectrum decomposition processing; fault zone detection

塔里木盆地发育大量板内中小尺度走滑断裂带, 这些断裂带对奥陶系目的层碳酸盐岩储层发育、油气成藏和富集具有重要作用, 是勘探评价的重要地质要素。由于盆地内走滑断裂带埋藏深度大多在 7000 m 以上, 叠加复杂沙漠地表和地下多套火成岩覆盖等多重地震勘探影响因素, 走滑断裂带成像精度低, 难以满足预测描述和储层评价需求。

近年来, 塔里木盆地北部顺北地区勘探接连取得了多个重大油气发现, 勘探潜力巨大, 勘探对象为断控碳酸盐岩缝洞型储集体, 走滑断裂带是储集体发育的核心控制要素(鲁新便等, 2015; 焦方正, 2018; 漆立新, 2020; 李宗杰等, 2020), 那么, 走滑断裂带精细描述和评价是油气勘探开发需要解决的关键问题之一。从三维地震资料看, 7300 m 以深奥陶系目的层地震主频低, 不到 20 Hz, 有效频带窄, 信噪比低, 断裂带成像精度难以满足精细勘探评价需求。

笔者以顺北地区走滑断裂带三维地震资料为例, 从资料保真保幅优化处理、频谱恢复提高分辨率、频谱分解、频率域断裂检测等叠后技术为核心, 提高地震资料品质和走滑断裂带成像精度, 为超深走滑断裂带描述和目标井位优化设计提供了高精度资料基础。

1 频谱恢复地震特征增强处理成像技术

频谱恢复高清成像技术包括提高地震资料品质的道集优化处理技术、频谱恢复提高分辨率处理技术、频谱分解处理技术、频率域多尺度断裂检测技术(Qi J et al., 2013; Abbas et al., 2014)。

1.1 提高地震资料品质的道集优化处理技术

超深走滑断裂带精细刻画对地震资料精度要求非常高, 原始地震资料一些小的噪音对预测结果都有很大影响。为了精细刻画超深走滑断裂带, 主要通过双内核时变空变拉东滤波、倾角/方位角多道集优化

边缘保持构造滤波等保幅保真优化处理, 减少地震资料噪音, 提高地震资料信噪比。

双内核时变空变拉东滤波技术: 为了消除多次波以及在正常时差校正过程中产生的随机噪声, 保留 AVO 效应以及一次反射的剩余时差, 需要使用时变且保幅的滤波器。与传统拉东滤波器相比, 双内核时变空变拉东滤波在拉东变换过程中同时考虑不同深度(时间)的变换和不同偏移距(空间)的变化, 它具有两个优点, ①使用了两套内核, 能在振幅随炮检距变化过程中更好的捕捉 AVO 的变化。②双内核时变空变拉东滤波是滑动时窗的, 它允许滤波参数随时间变化, 在滤波中更有针对性。例如, 在对道集上部进行轻微滤波的同时, 可根据需要对道集底部进行强滤波, 另外, 可针对远、近偏移距地震道定义不同的滤波参数, 更有效的进行滤波。

边缘保持构造滤波处理技术, 边缘保持构造滤波方法主要用于改善地震数据道的信噪比。构造滤波通过空间滤波来抑制噪声, 通过使用复杂一致性的方法保护断层和边界, 增强地质界面的空间连续性。其结果是在不损失地质信息的前提下提高信噪比(图 1)。

对于断裂发育地区地震资料, 采用断层保持的构造滤波处理器, 通过使用相邻地震道信息减少叠加地震道中的噪声, 能在保持原地震道构造特征不变的情况下去掉噪声。该方法包含复杂的地震道混合过程, 需要避免跨断层时的平滑问题。边缘保持构造滤波能对每个同相轴的几何结构进行识别, 叠后地震资料、叠前地震道集均可以适用。

1.2 频谱恢复提高地震资料分辨率处理

每个物体都有自己的固有频率, 地下地层同样也有自己的固有频率, 称之为特征频率(奚先等, 2005; 张金伟等, 2022)。频谱恢复提高分辨率技术就是对常规地震资料进行分频处理, 获取包括薄层在内的所有地层频率信息, 再利用频谱恢复方法从已经拾取的

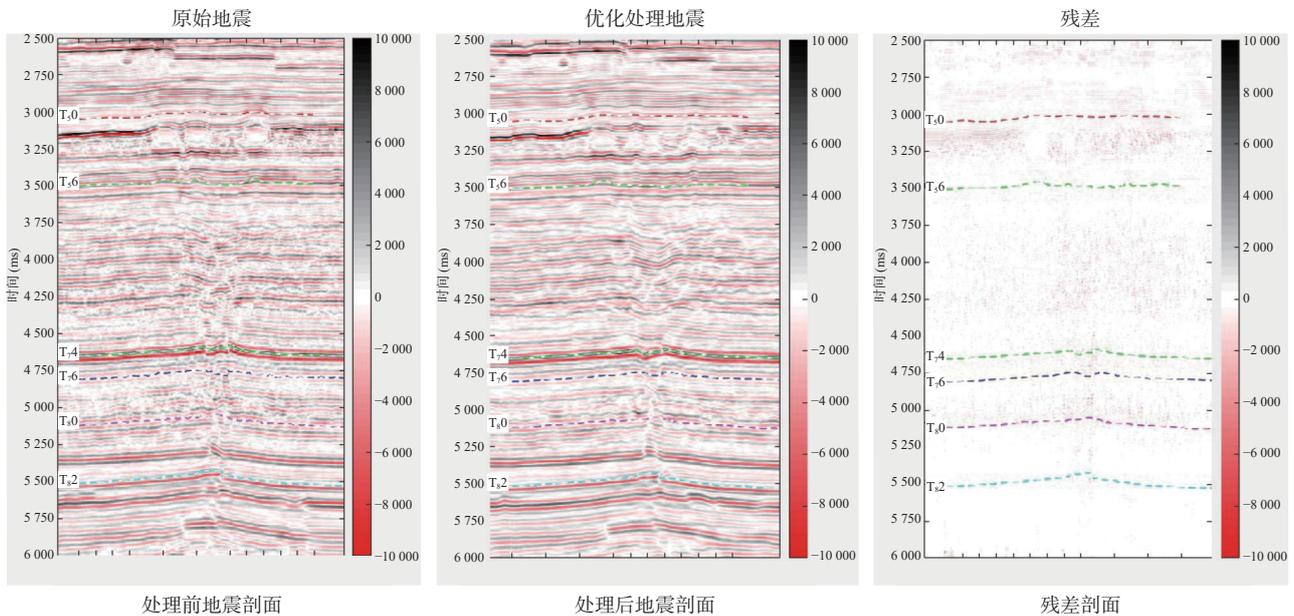


图1 边缘保持构造滤波处理前后及残差剖面

Fig. 1 Edge preserving structure before and after filtering and residual profile

薄层的中低频信息, 恢复高频信息, 从而实现提高分辨率的目的。通过频谱恢复方法提高分辨率的原理(图2)。黑色带点曲线是一套厚地层的反射率谱曲线, 蓝色曲线是一套薄地层的反射率谱曲线。厚地层的反射率谱曲线在常规地震资料频带范围内(图中2条红色虚线之间)为一完整周期函数曲线(图2), 所以容易识别。薄地层的反射率谱曲线在常规地震资料频带范围内(红色虚线之间)只有不到四分之一部分(图2), 无法识别。通过频谱恢复方法可以得到完整的薄地层反射率谱曲线, 从而能识别薄地层。这种通过频谱恢复方法得到薄地层完整反射率谱曲线就能达到提高分辨率的目的。

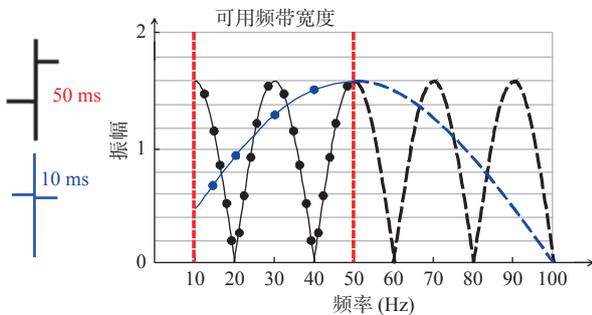


图2 频谱恢复提高分辨率处理原理图

Fig. 2 Schematic diagram of spectrum recovery

1.3 频谱分解处理技术

频谱分解处理技术包括约束最小二乘法(陈珂磷等, 2022)、粒子群匹配追踪法(蔡涵鹏等, 2013; 刘霞

等, 2015)、优化高斯频谱分解(刘汉卿等, 2015)3种算法, 在时间域和频率域同时具有较高分辨率。

笔者所用的频谱分解技术是通过约束最小二乘法(CLSSA)实现的。与其他方法相比, CLSSA法是一个同时拥有高时间和频率分辨率的频谱分解方法(图3)。使用该方法能够将测井阻抗数据与低、中、高地震资料频带之间的互均衡子波分离出来。互均衡化作为一个反演流程执行, 在与子波褶积时, 宽频输出结果与输入数据拟合(最小二乘意义)。这个流程使用随时、空变化的子波, 减少了超越传统时窗范围的频谱变化, 输出的频谱在时间和空间上具有较好的稳定性。从不同频谱分解方法对比来看, 最小二乘法频谱纵向分辨率高, 而且和地震道能量对应紧密, 频率域和时间域拖尾效应小(图3)。

1.4 频率域断裂检测技术

频率域断裂检测技术是在高分辨率频谱分解生成的一系列单频数据体基础上, 求得相应的振幅体和相位体, 对不同频率的振幅体和相位体进行边缘增强, 识别不同频率上波形、振幅和相位等多种优选的不连续性属性, 通过自适应主成分分析得到最终的断裂检测数据体。该技术是一种基于地震道频率分解技术及多种不连续属性对比分析技术的断层识别与检测技术, 它的最大优势是增加了频率域的多种不连续属性信息, 使地震反射中的不连续性得到更准确、清楚的反映和描述。频率域断裂检测技术能同时在平面

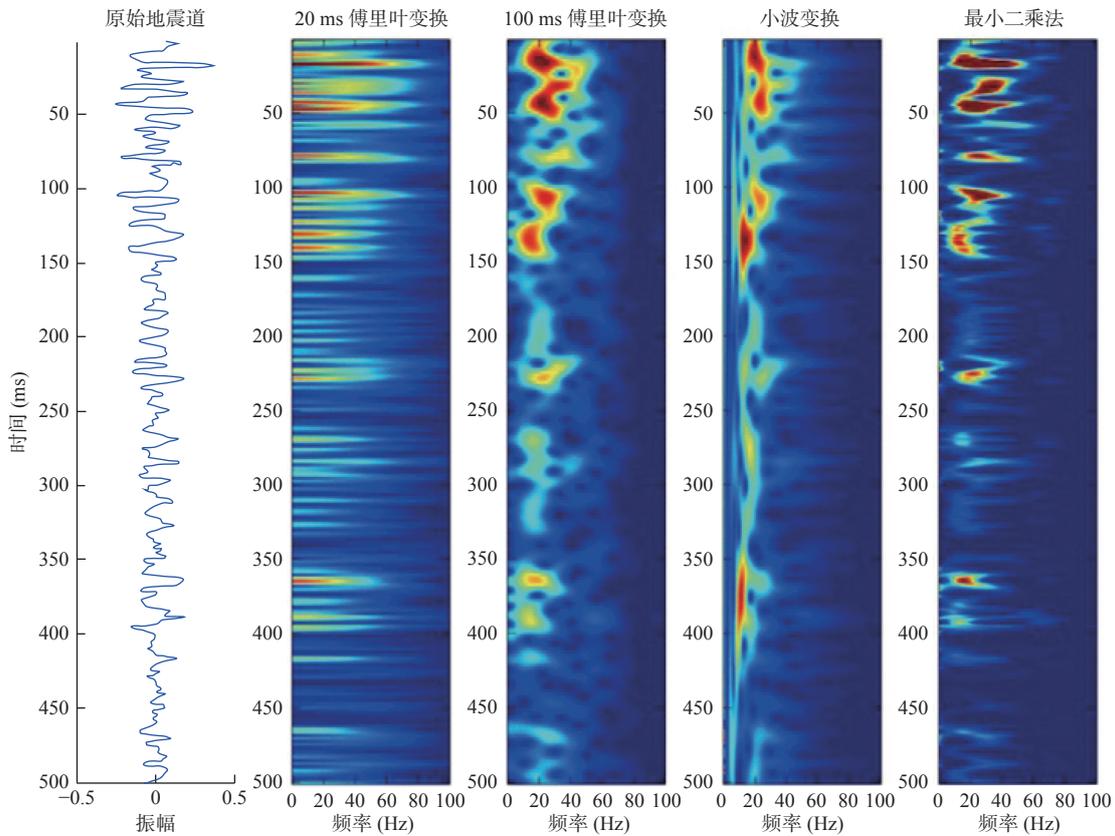


图3 实际地震道不同频谱分解结果对比图

Fig. 3 Comparison of different spectral and resolution improvement processing decomposition results of actual seismic channels

和剖面上展示多尺度断裂系统,比相干(席桂梅等, 2019)、曲率等传统断裂识别方法具有更高的分辨率和可靠性,断点辨识度更高,对高角度断层和小断层具有更强的识别能力(图4)。

2 超深走滑断裂带地震特征增强处理效果分析

2.1 频谱恢复高分辨率处理效果分析

通过边缘保持构造滤波压制噪音,在滤波的同时

保护断层和边界,既增强了地质界面的空间连续性,也在不损失地质构造信息的前提下大大提高了信噪比,为高分辨率处理提供优质基础数据。图1为过5号断裂带滤波优化处理前后剖面及残差,优化处理后,随机噪音和相干噪音得到了压制,地层反射结构和原始地震数据一致,断点、断面特征更清楚,地震资料品质得到了明显改善。

在保幅保真优化处理基础上,对顺北地区地震资料进行频谱恢复高分辨率处理。频谱恢复高分辨率处理前后的地震剖面效果对比图(图5),处理后的地

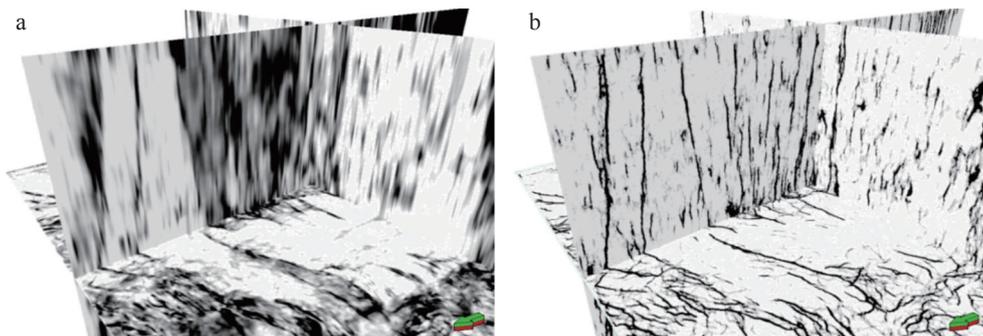
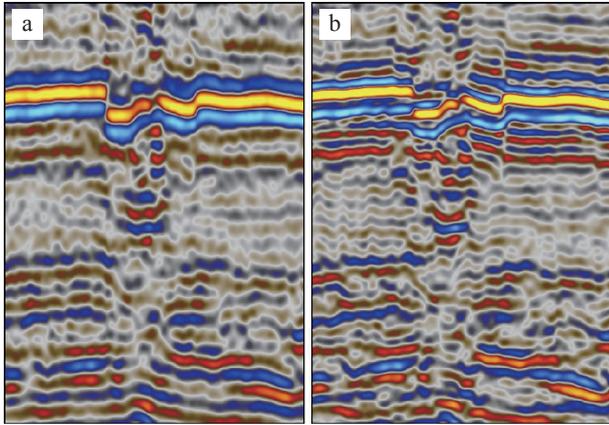


图4 相干体(a)与频率域断裂检测(b)效果对比图

Fig. 4 (a) Comparison diagram of coherent body and (b) frequency domain fracture detection effect

震剖面无论是信噪比还是横向、纵向分辨率, 都较原始地震剖面有较为明显的提高, 层间信息丰富, 目的



a. 原始地震; b. 高分辨率地震

图5 频谱恢复高分辨率处理前后剖面对比图

Fig. 5 Profile comparison before and after spectrum recovery high-resolution processing

层断裂特征更加明显, 为后期开展断裂检测及缝洞体精细刻画提供较好的资料基础。目的层段处理前后的频谱曲线图(图 6), 可以看出, 原始地震资料奥陶系目的层主频为 20 Hz, 频宽 5~40 Hz, 通过频谱恢复高分辨率处理后资料主频可达到约为 30 Hz, 有效频宽拓展到约为 5~50 Hz。

2.2 频谱分解处理效果分析

根据顺北地区地震资料属性提取的断裂特征, 采用最小二乘频谱分解法(CLSSA)技术对高分辨率地震数据进行频谱分解处理, 提取不同频率的单频数据体(5 Hz、10 Hz、15 Hz、20 Hz、30 Hz、40 Hz、50 Hz), 对比不同频率体断裂带检测效果。

提取 T_7^4 层位向下 0~50 ms 均方根振幅属性平面图(图 7a), 从图中可以看出, 5 号断裂带在平面上表现为线性延伸或带状展布的特征, 断裂带边界较易识别。同时, 对比不同频率数据体剖面, 发现不同频率数据体对断裂的识别效果有明显差别, 低频数据体对

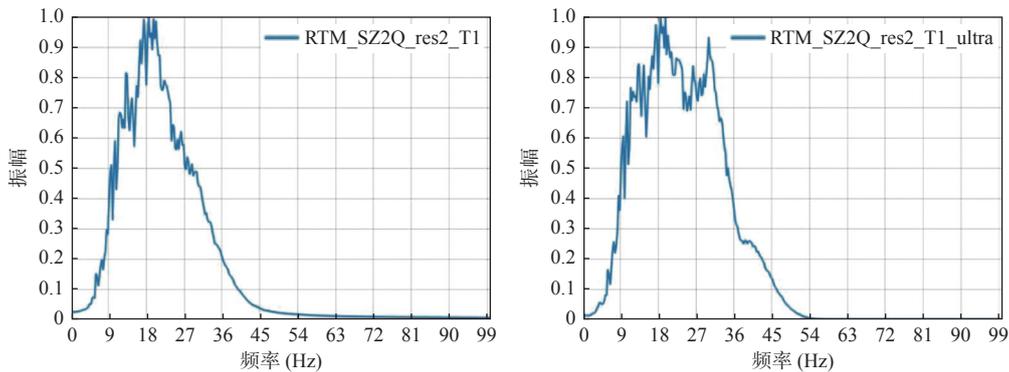


图6 频谱恢复高分辨率处理前后频谱曲线对比图

Fig. 6 Spectral curve comparison before and after spectrum recovery high-resolution processing

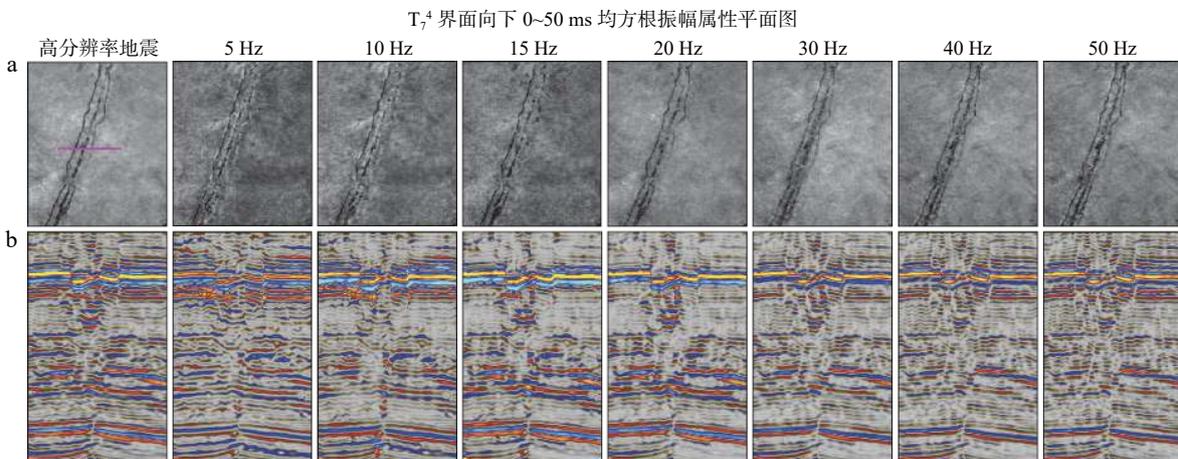


图7 T_7^4 地震反射波界面之下 50 ms 单频体均方根振幅属性平面(a)与剖面图(b)

Fig. 7 (a) Single frequency volume RMS amplitude attribute plane and (b) profile of 50 ms below T_7^4 Seismic reflection interface

大规模断裂识别效果较好,而对较小规模断裂识别效果不太明显,甚至无法识别。高频数据体较易识别主干断裂带内部断裂,对于全面刻画断裂带具有指导意义(图7b)。

3 走滑断裂带频率域检测与精细描述

3.1 频率域检测

以高分辨率处理数据体为基础,以频率域断裂检测技术为核心,对5号断裂带中段地震资料进行断裂检测。

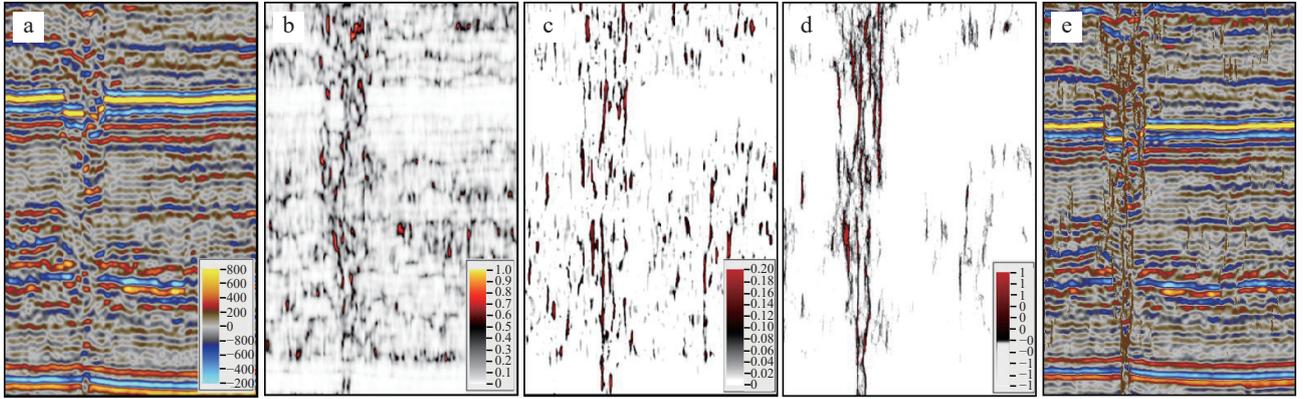
(1)首先分析高分辨率处理后地震资料频谱特征,以此为依据,应用复数域约束最小二乘法频谱分解技

术(CLSSA)进行频谱分解,分解频带5~60 Hz,步长5 Hz,得到单频振幅体和相位体。

(2)定义时窗、选择属性体,对每个单频振幅体、相位体分别提取相干、曲率、方差、混沌等不连续属性体。

(3)采用主成分分析方法对不连续属性体进行PCA融合,得到断裂检测不连续性属性数据体。

从不同方法断裂带检测效果来看(图8),常规相干体包含一些脚印和沿层线性干扰,断裂聚焦性也不强,断裂识别精度低;频率域断裂检测数据体在去除脚印和沿层线性干扰的同时增强了地震数据的非连续性,断裂纵向线性特征更清晰、连续性更好,识别精度更高。



a.高分辨率地震剖面; b.相干剖面; c.频率域多尺度断裂检测剖面; d.频率域多尺度断裂检测数据自动解释追踪剖面;
e.高分辨率地震与断裂自动解释结果叠合剖面

图8 频谱恢复高分辨率地震断裂检测效果图

Fig. 8 Spectrum recovery high-resolution seismic fracture detection effect map

从频率域断裂检测结果与地震剖面叠合图来看,频率域断裂检测数据体不仅能清晰地刻画走滑断裂带的样式和剖面组合形态,还能清晰地展示断裂带内部细节,为合理准确解释断裂带不同断面和综合评价提供了有效指导。

3.2 走滑断裂带精细描述

基于频谱恢复高分辨率地震资料,通过精细层位标定,层位追踪解释,利用多尺度频率域断裂检测的成果,结合频谱分解、断裂属性等对不同级别断裂进行识别和平面组合,最后完成精细构造成因。

构造解释过程中,充分运用三维可视化技术,通过调整颜色、增益、透明度等各种参数,从多方位、多角度,点、线、面、体进行控制,实时对三维数据体内部各类信息进行识别,对解释结果的合理性与可靠性进行检查质控。

主干断裂具有断距大、容易识别、剖面特征显著等特点。解释手段主要采用全三维可视化方法,借助5 Hz、10 Hz和15 Hz RGB融合体和频率域多尺度断裂检测地震数据体,大大提高了主干断裂解释精度和效率。

断裂带内部小断层,延伸长度普遍小于3 000 m,断距较小。高分辨率地震数据体目的层主频约30 Hz,地震波速度约为6 000 m/s, T_7^4 界面同相轴时间厚度约为10 ms,对应厚度约为15 m。对于断距小于15 m小断层,地震反射主要表现为同相轴微小扭曲、变形,但剖面上显示的同相轴扭曲变形特征也可能是地层变形,而非断裂。因此,需要在解释过程中借助频率域多尺度断裂检测处理地震数据体及断裂密度等地震属性,充分结合断点、断层组合类型和发育样式等,利用三维可视化等技术进行精细解释。

优选频率域多尺度断裂检测处理地震数据体、断裂密集度属性体以及高分辨率瞬时振幅属性体进行

RGB 融合(图 9), 主干断裂带边界清晰, 内部小断层可辨识, 不同级别断裂带之间的关系也更加明朗。

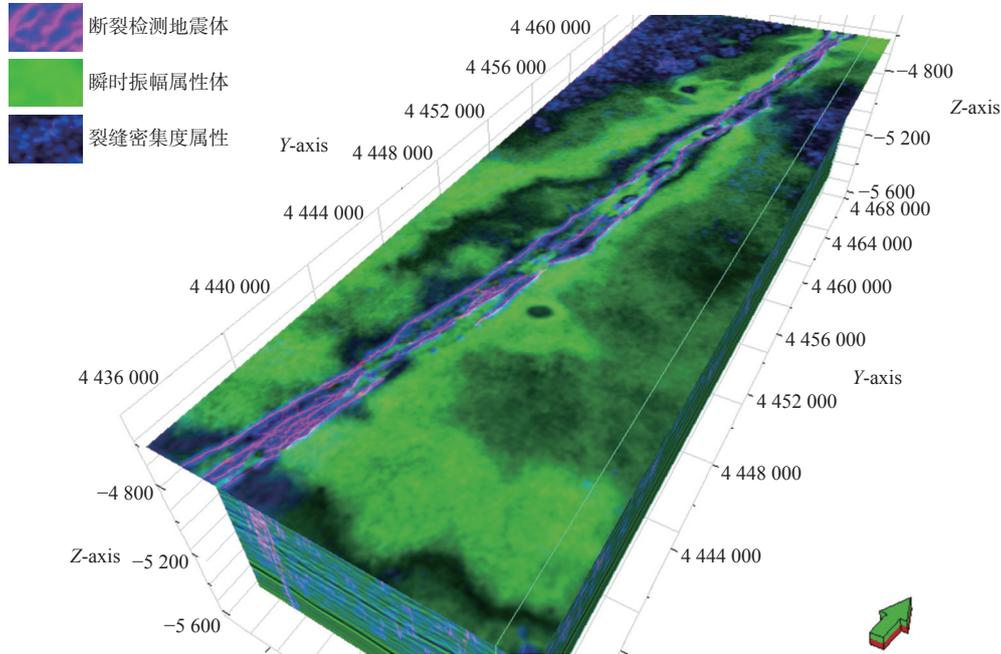


图9 走滑断裂带 RGB 融合显示图

Fig. 9 RGB fusion display of strike slip fault zone

4 结论

(1) 保幅保真优化处理可大大改善地震资料的品质, 频谱恢复提高分辨率处理可有效拓展地震资料频带宽度, 提高地震资料分辨率。

(2) 频谱分解处理提升了地震资料对不同尺度断裂识别能力, 低频资料对大尺度断裂刻画更清晰, 中高频资料对小断层具有较好的识别能力。

(3) 通过高、中、低频数据 RGB 融合可以为超深走滑断裂带解释描述提供可靠依据和指导。

(4) 频谱恢复提高分辨率处理、频谱分解处理、频率域多尺度断裂检测技术组合是提高超深走滑断裂带预测精度的有效手段。

参考文献(References):

- 蔡涵鹏, 贺振华, 高刚, 等. 基于混合优化算法的地震数据匹配追踪分解[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(2): 687-694.
- CAI Hanpeng, HE Zhenhua, GAO Gang, et al. Seismic data matching pursuit using hybrid optimization algorithm and its applica-

tion[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(2): 687-694.

陈珂磷, 井翠, 杨扬, 等. 频率域多尺度断裂检测技术在长宁页岩气勘探中的应用[J]. 断块油气田, 2022, 29(3): 289-294.

CHEN Kelin, JING Cui, YANG Yang, et al. Application of frequency domain multi-scale fault detection technique in shale gas exploration in Changning region[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(3): 289-294.

焦方正. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 207-216.

JIAO Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 207-216.

李宗杰, 杨子川, 李海英, 等. 顺北沙漠区超深断溶体油气藏三维地震勘探关键技术[J]. 石油物探, 2020, 25(2): 283-294.

LI Zongjie, YANG Zichuan, LI Haiying, et al. Three-dimensional seismic exploration method for ultra-deep fault-related dissolution reservoirs in the Shunbei desert area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 25(2): 283-294.

刘霞, 陈晨, 赵玉婷, 等. 基于粒子群快速优化 MP 算法的多子波分解与重构[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(6): 1855-1861.

LIU Xia, CHEN Chen, ZHAO Yuting, et al. Multi-Wavelet Decomposition and Reconstruction Based on Matching Pursuit Algorithm Fast Optimized by Particle Swarm[J]. Journal of Jilin

- University (Earth Science Edition), 2015, 45(6): 1855–1861.
- 刘汉卿, 张繁昌, 王纳申, 等. 井资料约束的地震资料高频恢复[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(5): 890–895.
- LIU Hanqing, ZHANG Fanchang, WANG Nashen, et al. Seismic high frequency information recovery constrained by well data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(5): 890–895.
- 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 347–355.
- LU Xinbian, HU Wenge, WANG Yan, et al. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 347–355.
- 漆立新. 塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(01): 102–111.
- QI Lixin. Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(01): 102–111.
- 席桂梅, 何书耕, 闵也, 等. 用相干体属性开展断层识别[J]. 西北地质, 2019, 52(1): 244–249.
- XI Guimei, HE Shugeng, MIN Ye, et al. Fault identification by the coherency attributes[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(1): 244–249.
- 奚先, 姚姚. 弹性随机介质模型的特征频率[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 681–687.
- XI Xian, YAO Yao. The characteristic frequency of the elastic random medium models[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(3): 681–687.
- 张金伟, 丁仁伟, 林年添, 等. 裂缝性多孔介质纵波频变特性研究[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(5): 1097–1104.
- ZHANG Jinwei, DING Renwei, LIN Niantian, et al. Frequency-dependent characteristics of P-wave in fractured porous media[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(5): 1097–1104.
- Abbas A , Nadeem M , Shafiq A . Detection of isotropic regions and enhancement of fault attributes in seismic volumes[C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2014: 1420–1423 .
- QI J , Castagna J . Application of a PCA fault-attribute and spectral decomposition in Barnett Shale fault detection [C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2013: 1421–1425.