

地震分频多属性融合技术在裂缝预测中的综合应用

——以川南页岩气区块宜A井区为例

陈珂磷¹, 陈 伟¹, 黄志发², 赵品恒²

¹西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都

²福瑞升(成都)科技有限公司, 四川 成都

收稿日期: 2025年9月25日; 录用日期: 2025年11月6日; 发布日期: 2025年10月14日

摘 要

天然裂缝(简称裂缝)是页岩气开发效果的关键影响因素, 建立可靠的多尺度裂缝模型对提高页岩储层钻遇率至关重要, 同时系统表征不同尺度和类型的裂缝有利于识别优质储层并优化开发效果。然而, 基于传统地震属性的裂缝预测方法仅能突出单一尺度的断裂, 且不同裂缝属性的数学独立性使得识别综合裂缝系统面临挑战。本文提出一套改进的全尺度裂缝系统评估方案, 其核心在于利用分频地震数据和多属性算法确定不同尺度裂缝的发育概率, 融合不同尺度裂缝与断裂, 形成可感知全尺度裂缝的综合裂缝系统。多尺度和多属性综合分析表征大尺度断层、小裂缝及裂缝破碎带的分布, 获得的全尺度裂缝系统, 有效提升了区域断裂和裂缝预测精度。研究区钻井N-02和N-03实钻资料验证了该方案对不同尺度裂缝发育方向预测的准确性与可靠性, 可为页岩气水平井开发部署提供理论指导。

关键词

裂缝预测, 多尺度裂缝, 地震分频, 多属性融合

Comprehensive Application of Seismic Frequency Division Multi-Attribute Fusion Technology in Fracture Prediction

—Taking Yi A Well Area of Shale Gas Block in South Sichuan as an Example

Kelin Chen¹, Wei Chen¹, Zhifa Huang², Pinheng Zhao²

文章引用: 陈珂磷, 陈伟, 黄志发, 赵品恒. 地震分频多属性融合技术在裂缝预测中的综合应用[J]. 自然科学, 2025, 13(6): 1277-1286. DOI: 10.12677/ojns.2025.136133

Abstract

Natural fractures (referred to as fractures) are the key factors affecting the development effect of shale gas. It is very important to establish a reliable multi-scale fracture model to improve the drilling rate of shale reservoirs, and at the same time, systematically characterizing fractures of different scales and types is conducive to identifying high-quality reservoirs and optimizing the development effect. However, the fracture prediction method based on traditional seismic attributes can only highlight single-scale fractures, and the mathematical independence of different fracture attributes makes it challenging to identify comprehensive fracture systems. In this paper, an improved full-scale fracture system evaluation scheme is proposed, the core of which is to determine the development probability of fractures of different scales by using frequency-divided seismic data and a multi-attribute algorithm, and to fuse fractures and fractures of different scales to form a comprehensive fracture system that can perceive full-scale fractures. Multi-scale and multi-attribute comprehensive analysis characterizes the distribution of large-scale faults, small fractures and fracture zones, and the obtained full-scale fracture system effectively improves the prediction accuracy of regional fractures and cracks. The actual drilling data from wells N-02 and N-03 in the study area verify the accuracy and reliability of the scheme in predicting the fracture development direction of different scales, which can provide theoretical guidance for the development and deployment of shale gas horizontal wells.

Keywords

Fracture Prediction, Multi-Scale Fracture Seismic, Frequency Division, Multi-Attribute Fusion

Copyright © 2025 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. 引言

多尺度裂缝网络的高精度识别在页岩气开发中具有双重战略价值：一方面通过预判储层结构非均质性，可显著降低井筒轨迹设计风险，规避复杂地质条件引发的工程事故[1]；另一方面基于裂缝空间展布特征，能够实现压裂动态优化，推动页岩气开发全流程向精准化、集约化方向演进[1] [2]。

四川盆地蕴藏着丰富的页岩气资源，川南地区在页岩气勘探领域已实现重大突破，显示出显著的开发潜力[3]。川南五峰组-龙马溪组页岩气目标储层普遍存在多期次构造应力叠加形成的复杂裂缝网络[4] [5]，不同尺度裂缝系统具有明显差异化，同时对页岩气开发造成影响不同。大尺度断层易造成井漏复杂等工程问题；中尺度断层/裂缝会导致井轨迹出箱体，造成无效进尺；小尺度裂缝，主要影响储层物性[6] [7]。

针对不同尺度的断层/裂缝预测方法有所区别。大尺度断裂(>100 m)采用相干体分析和曲率属性提取技术，结合边缘增强算法可快速定位断裂带，支撑井轨迹优化与保存条件评价，中尺度裂缝(10~100 m)依托蚂蚁体追踪技术，通过信息素动态更新机制增强裂缝网络连通性识别。如 2022 年刘厚彬利用蚂蚁体属

性对长宁地区页岩气段进行裂缝预测，小尺度裂缝(1~10 m)则基于最大似然反演与宽方位各向异性分析进行预测[8]。

上述传统地震属性的裂缝预测方法更多突出单一尺度的断裂特征。针对大尺度断裂(>100 m)的地震属性分析虽能刻画区域断裂格架，却难以揭示次级断裂与主断层的应力传递机制；中尺度裂缝(10~100 m)蚂蚁体追踪技术虽可识别断裂轮廓，但对微观伴生缝网的渗透率各向异性表征精度不足；而针对地震结构微小差异进行的小尺度裂缝(1~10 m)预测，因缺乏区域构造应力场约束，其三维离散裂缝网络(DFN)建模常出现与现场压裂监测数据偏差的矛盾现象。此外，传统裂缝预测方式主要是在地震数据全频段进行的，更多提取的是地震主频所反映的地质信息，而弱化地震资料其他频段的贡献，存在显著的多尺度解耦困境[8] [9]。

因此，本文提出一种基于地震分频数据的多属性融合技术，从“宏观-介观-微观”角度，跨尺度构建地质工程一体化的裂缝预测方法，为页岩气开发钻井工程的实施提供参考。利用该方法对川南长宁地区龙马溪组页岩气多尺度裂缝进行精细预测，为页岩气开发过程中降低钻进工程复杂及后续压裂提供参考。

2. 方法原理

2.1. 地震数据分频及构造导向滤波处理

地震数据分频技术是通过数学变换将时间域信号转换到频率域，利用不同频率成分揭示地层结构特征的核心方法[10]。其原理基于调谐效应：不同岩性组合，不同地震结构性差异在特定频率下产生振幅异常。本文分频方法主要采用小波变换(Morlet 小波等基函数)(图 1)，高频用短时窗捕捉细节，低频用宽时窗分析整体趋势，克服了傅里叶变换的局限性。分频数据为从宏观构造到微观裂缝的多尺度预测体系提供数据基础，为多尺度断裂精细描述提供了关键技术支撑[11]。

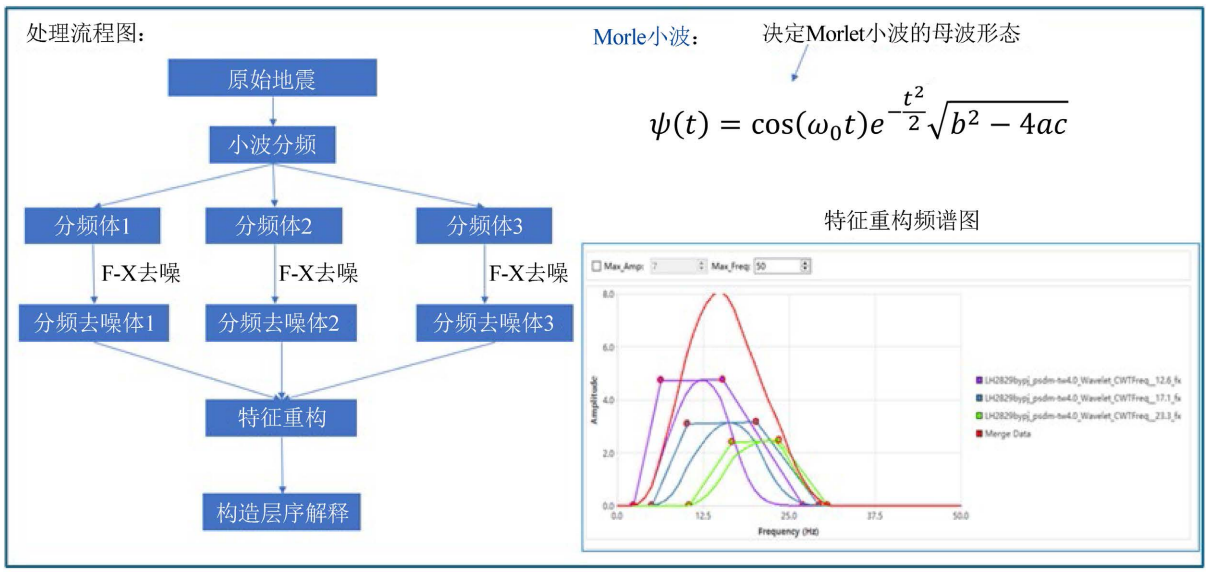


Figure 1. Principle of frequency division for seismic data based on wavelet transform

图 1. 基于小波变换原理地震数据分频原理

构造导向滤波通过各向异性扩散算法对叠后三维地震数据实施定向噪声压制，增强地震同相轴连续性并突出断裂不连续特征，为高精度断裂解释与预测提供基础数据。

2.2. 基于叠合分频数据体不同地震属性计算

2.2.1. 基于低频数据频率域断裂属性计算

复杂断裂系统的精准识别长期受限于传统断裂检测技术(如相干体、曲率属性)且易受地层尖灭等非断裂因素干扰,无法准确刻画断层断面,对断距<10 m 的微裂缝漏检较高。频率域断裂属性技术通过高精度 S 变换频谱分解(5~120 Hz 频段)实现多尺度信号解耦,分别对中高频和低频数据进行断裂分析,再经主成分分析与构造导向滤波融合生成三维断裂概率体,从而有效提高断层的可靠性。

低频段数据反映大尺度断裂(断距 > 50 m),相位体通过**相位极性反转**定位断裂边界,其公式可表示为:

$$\Delta\phi = \phi_{\text{断裂带}} - \phi_{\text{围岩}} = \pm\pi$$

相位差突变(超过阈值)标识断裂位置。

高频数据主要刻画断裂伴生断层和小型裂缝,振幅体通过**边缘增强算法**(如 Sobel 算子)提取断裂几何形态:

$$G = \sqrt{(S_x \otimes A)^2 + (S_y \otimes A)^2}$$

其中 S_x 、 S_y 为水平/垂直梯度算子, A 为振幅数据, G 为断裂边缘强度。

该技术已在深层油气勘探中取得突破性进展,该技术在塔里木顺北油田和川中断裂带刻画中的广泛运用将误差直接降低至 10 m 左右[12]。

2.2.2. 基于中频数据蚂蚁体属性分析

蚂蚁体属性技术通过仿生学机制模拟蚁群觅食的信息素浓度梯度反馈行为。基于中频数据,结合构造导向滤波与 Sobel 边缘检测算法强化断裂边界抗噪能力(信噪比提升 30%~50%),动态优化路径规则与信息素累积阈值,实现断裂系统的三维全自动追踪建模[13],得到反映小型断层的高分辨率属性体,为页岩气勘探提供高精度裂缝网络解决方案。

2.2.3. 基于高频数据最大似然属性提取

最大似然属性原理基于统计学参数估计思想,通过构建观测数据的似然函数并最大化其概率密度分布,推导出最优参数估计值(如裂缝发育概率、倾角等),获得断裂发育最可能的位置及概率,提高断裂/裂缝刻画精度[14]。最大似然属性的简化计算公式为:

$$K_1 = 1 - F^n$$

其中 K 值大小代表裂缝发育概率; F 表示地震数据体中邻近采样点之间的相似性(数值范围为 0~1), F 值越小,表示地震数据连续性越弱,发育断层或者裂缝概率越大;而 n 值的大小可以用来调节数据点差异值参数,具体参数须结合区域已知钻井测井数据裂缝发育密度。

2.2.4. 多尺度属性融合

考虑到不同地震属性因算法原理差异,对断层破碎带的敏感程度存在显著区别,部分属性侧重刻画断裂带几何形态,部分反映断裂系统与围岩的物性差异,另有属性揭示断裂带与其他地质体的空间配置关系。地震多属性融合技术通过协同应用多尺度属性,构建多维裂缝预测体系。

3. 川南长宁宜 A 井区龙马溪组页岩裂缝预测

3.1. 工区概况

宜 A 井区位于川西南低褶构造带天宫堂构造,构造断裂复杂,主体区内发育断距小于 100 m 的断层

20 余条，多数断层局限在寒武系和奥陶系内部，为加里东期形成的断层体系[15]。龙马溪组是本研究区页岩气主要层系，主要为一套深水 - 浅水陆棚相沉积。已钻井解释龙马溪组裂缝发育，主要发育构造缝，其次是成岩缝。受多期次构造叠加改造，裂缝非均质性强，分布范围及尺度规模，密集程度十分复杂[16]。

本文选取构造高部位(图 2，中心红框区域)开展多尺度断裂系统的特征分析，尤其是针对潜在注采区的小尺度构造裂缝进行精细研究。该地区中部部署实施多口水平井，其微型地震数据，实钻数据及成像测井裂缝发育统计结果可用于裂缝研究的验证参考。

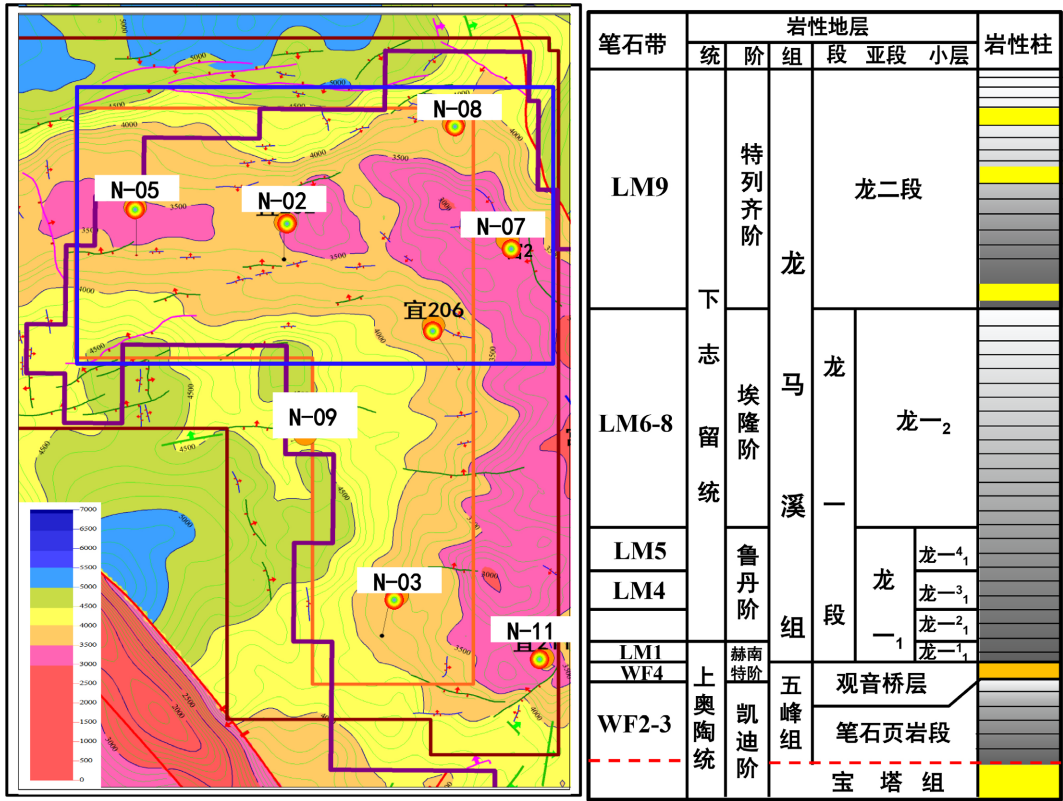


Figure 2. Structural map of Yi A well area (blue area represents seismic data coverage) and comprehensive stratigraphic columnar chart. (a) Basal structural map of the Longmaxi formation in the Yi A well area; (b) Comprehensive stratigraphic columnar chart of the Longmaxi formation in the Yi A well area

图 2. 宜 A 井区构造图(蓝色区域为地震数据区域)及地层综合柱状图(a) 宜 A 井区龙马溪组底构造图; (b) 宜 A 井区龙马溪组综合柱状图

3.2. 地震数据构造导向滤波处理及分频体生成

研究区龙马溪组埋深跨度大，导致地震资料信噪比低，品质欠佳，难以对断层精细解释及对裂缝预测。为了提高储层裂缝预测精度，对原始数据进行基于倾角导向的构造导向滤波技术进行优化处理，提升数据信噪比。与原始数据(图 3(a))相比，滤波处理后数据(图 3(b))同相轴断点呈现更清晰的切割特征，断裂处横向分辨率(蓝色圆圈标注区)与断层纵向延伸连续性(黄色箭头指示带)同步提升，对小型断层弱反射的识别能力显著增强，为后续三维属性提取提供了更可靠的数据基础(图 3)。

研究区目的层薄层，受地震分辨率制约，常规地震属性及波阻抗反演对微裂缝空间展布规律刻画精度不足。分频信号分解技术通过频率域信号分离可有效提取此类隐蔽地质响应特征。本文采用改进型 Morlet 小波变换对研究区块主测线开展分频处理(图 4)，实验表明：5~20 Hz 低频分量呈现波形展宽与相

位融合特征,有利于宏观断裂系统识别;20~40 Hz 中频数据体岩层界面反射同相轴密度显著增加,垂向连续性改善使断裂精细结构得以显现;40~60 Hz 高频成分对微裂缝敏感,可识别亚地震尺度裂缝网络。

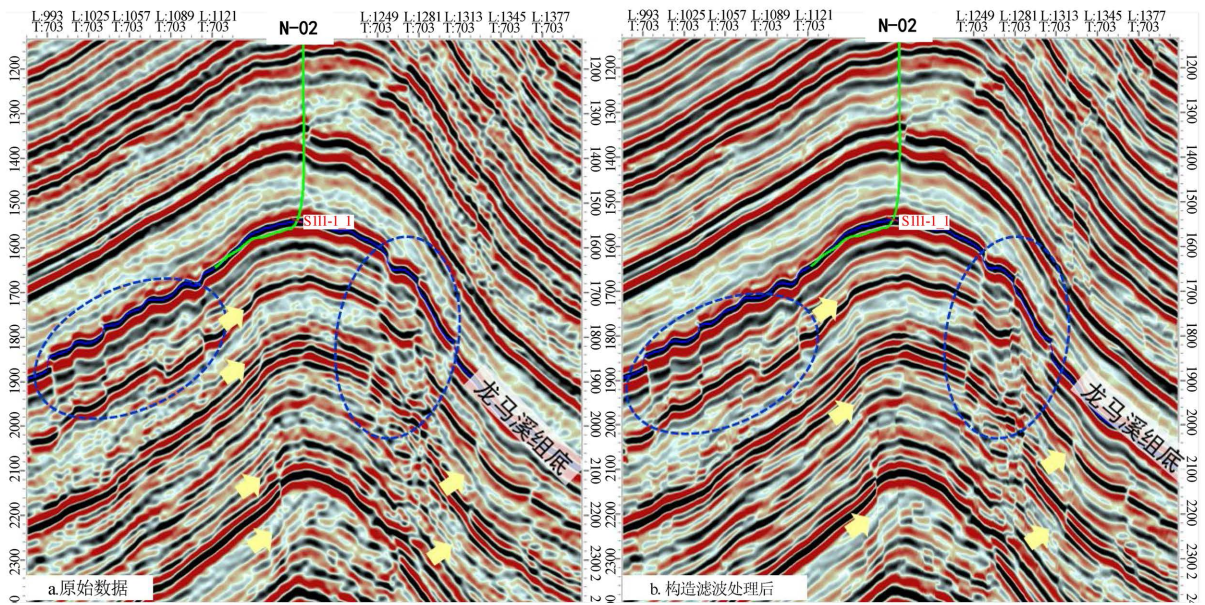


Figure 3. Comparison of original seismic data with structure-guided processed data
图 3. 构造导向滤波处理前后处理效果对比

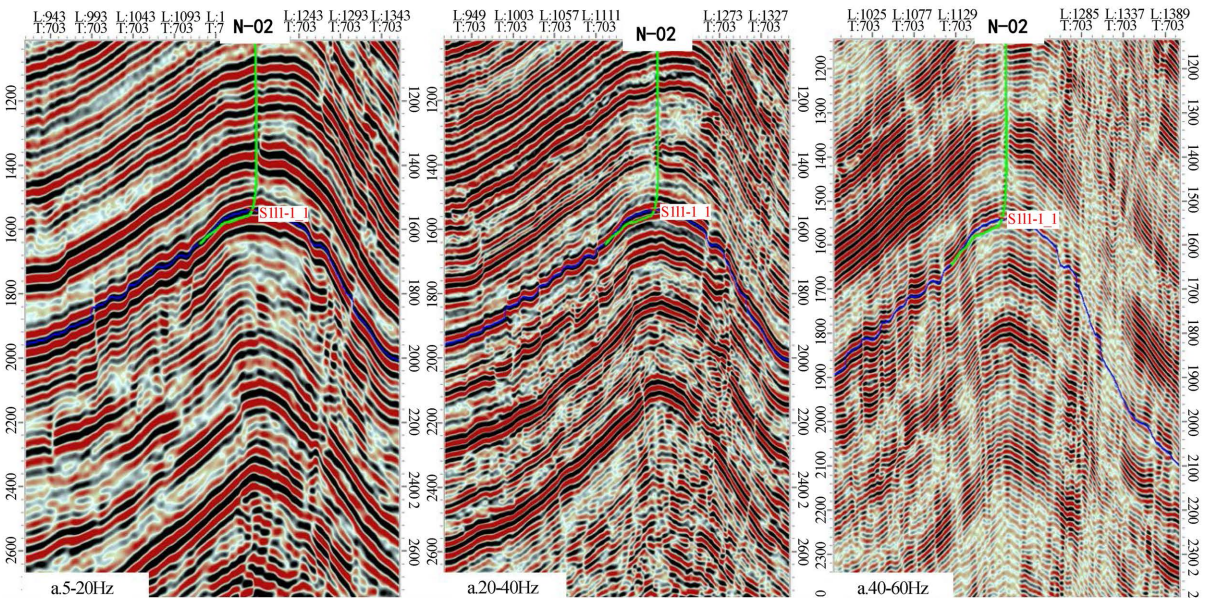


Figure 4. Comparison of seismic data in different frequency bands
图 4. 不同频带地震数据对比

3.3. 单一预测效果分析

(1) 频率域断裂属性对大尺度断裂刻画

频率域属性的核心优势源于多尺度频带分解技术,通过针对性提取与断裂相关的低频共振信号,在

保留宏观展布特征的同时增强微断裂边界成像锐度。基于低频数据体提取的频率域断裂属性，显著提升断层剖面响应与地质模型的吻合度，同时强化深部断裂成像连续性；在平面上，该属性不仅清晰反映主断裂走向(如北西 - 南东向断裂带)，还将次级断裂边界清晰度明显提升(图 5)。

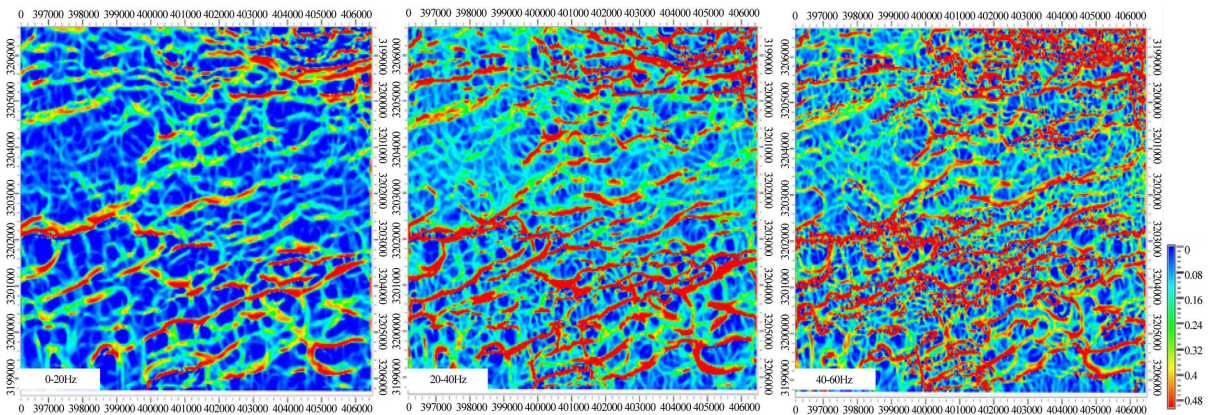


Figure 5. Comparison of frequency-dependent fracture volume attributes in multi-frequency band data
图 5. 目的层不同频段数据频率域断裂属性对比

(2) 蚂蚁体对中尺度断裂刻画

本次研究运用分频蚂蚁追踪技术，将分频后的单频数据体做相同参数蚂蚁追踪，得到分频蚂蚁体。以 N02 井为实例，图 6(a)、图 6(b)、和图 6(c)分别为常规蚂蚁追踪剖面、低频蚂蚁追踪剖面和中频蚂蚁追踪剖面。图 6(a)的常规蚂蚁追踪剖面更多地显示了大断层，且包含大量干扰噪声信息；图 6(b)的低频蚂蚁追踪剖面对断层刻画较为明显，但是对地质构造细节的刻画不够清晰，图 6(c)的中频蚂蚁追踪剖面对断层细节刻画较为明显。中频蚂蚁追踪对比全频段及低频相比，在清晰刻画更小尺度裂缝的同时，也展现了更明显的断裂系统。

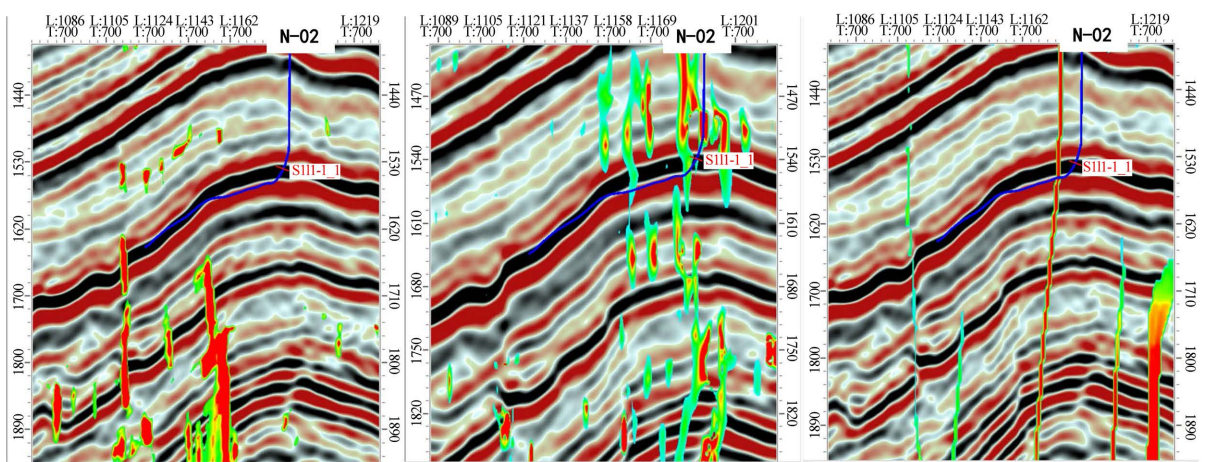


Figure 6. Comparison of fracture responses from ant tracking attributes across different frequency bands
图 6. 目的层不同频段数据蚂蚁体属性对比

(3) 最大似然对小尺度断裂预测

应用最大似然属性进行研究区内裂缝识别，最大似然属性对断裂刻画的成像效果更好，分支断裂走向、断裂带内部细节皆有比较明确的响应，成像更加聚焦，识别精度更高。从平面上看距离主断裂越近，

裂缝密度越高，反之越低，裂缝发育密度能为钻井工程实施和后续压裂提供指导。

3.4. 多属性融合

鉴于不同算法生成的地震属性对研究区断层的敏感度各异，描述破碎带特征的能力也各不相同。多属性融合通过挖掘属性间的非线性特征，在有效保留各属性独特信息的同时剔除冗余信息，从而提升破碎带识别的精度和抗噪能力。多属性融合效果分析(图 7)表明：低频断裂属性清晰刻画了研究区内大尺度主断裂的走向(与大断层方向一致)，而中频蚂蚁体属性则有效突显了低级别小断层的离散分布特征及断裂带内部的精细分支结构。最大似然属性进一步提供了更丰富的裂缝信息，既能精确定位裂缝发育区，也可识别出微裂缝等小尺度结构。最终将多尺度断裂/裂缝预测结果进行融合表征。多属性融合效果对大断层走向指示的一致性，也间接验证了该融合预测方法的可靠性。

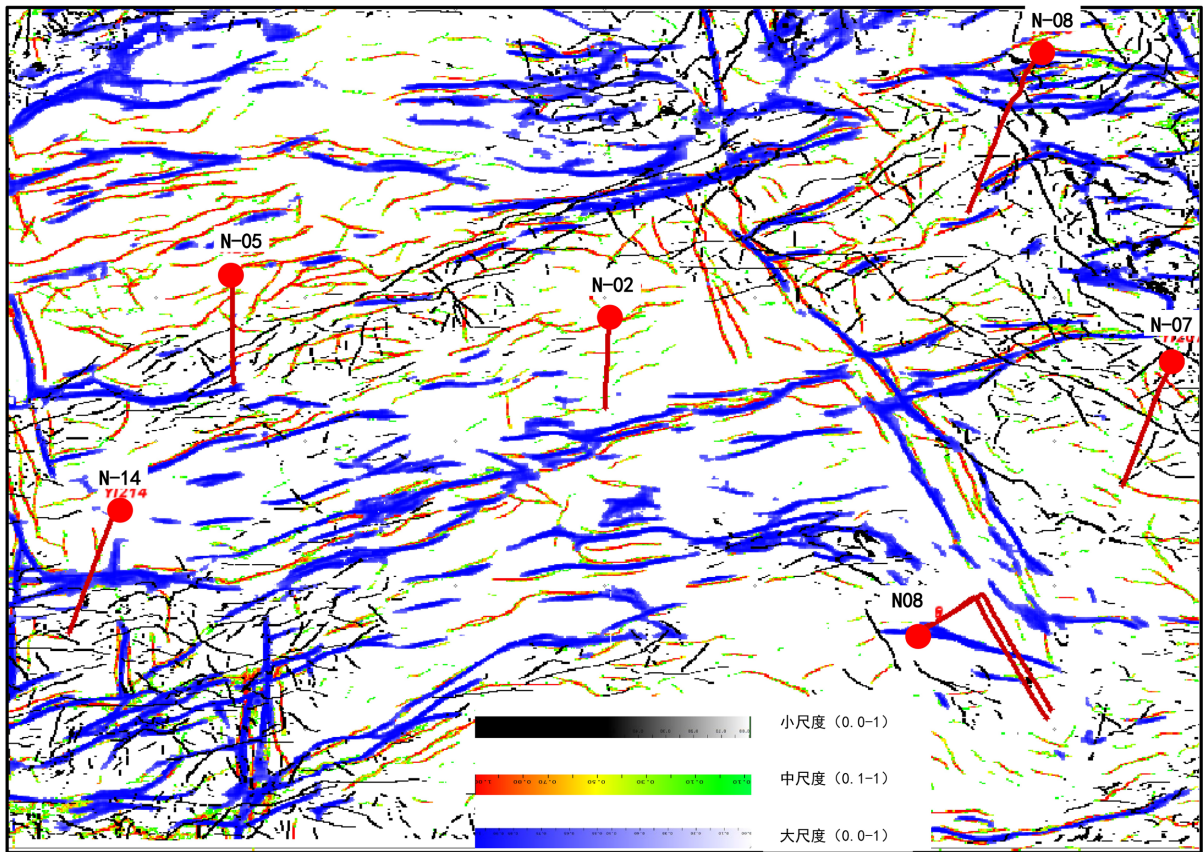


Figure 7. Integrated multi-scale fracture prediction planar map of the Longmaxi formation

图 7. 龙马溪组多尺度裂缝预测融合平面图

4. 裂缝预测效果验证

利用研究区已钻井 N07 和 N02 井对本文中的方法预测的裂缝预测结果进行验证。通过多尺度预测方法，预测 N-02 井工程复杂风险点 4 个，其中直井段 1 个，水平段 3 个(图 8)。实钻过程发生三处井漏，井漏点井段与风险点预测点井段吻合(表 1)。

N-07 井在目的层段钻遇不同尺度的裂缝较多，在钻井过程中总共发生 5 处漏失和一处卡钻(表 2)，主要发生在水平段，N-07 井漏失点与裂缝预测结果吻合，从而证实了该方法对页岩气裂缝预测的可靠性，

N-02 井和 N-07 井的裂缝预测结果显示如图 8 和图 9 所示。

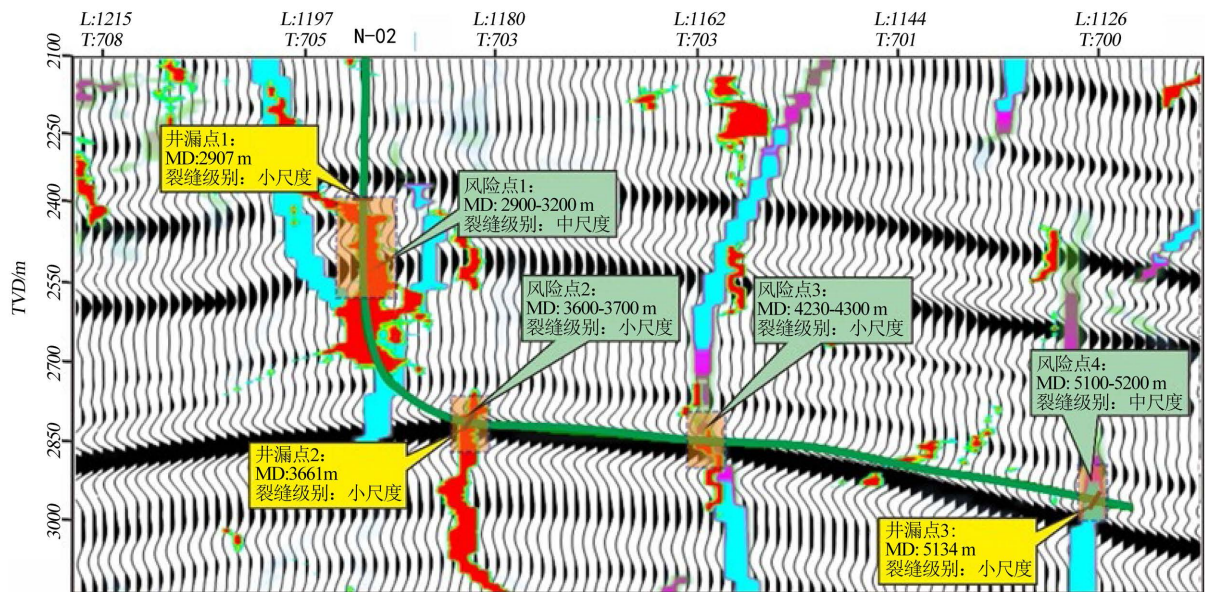


Figure 8. Multi-attribute fracture prediction seismic profile across well N-02

图 8. 过 N-02 井多属性裂缝预测地震剖面

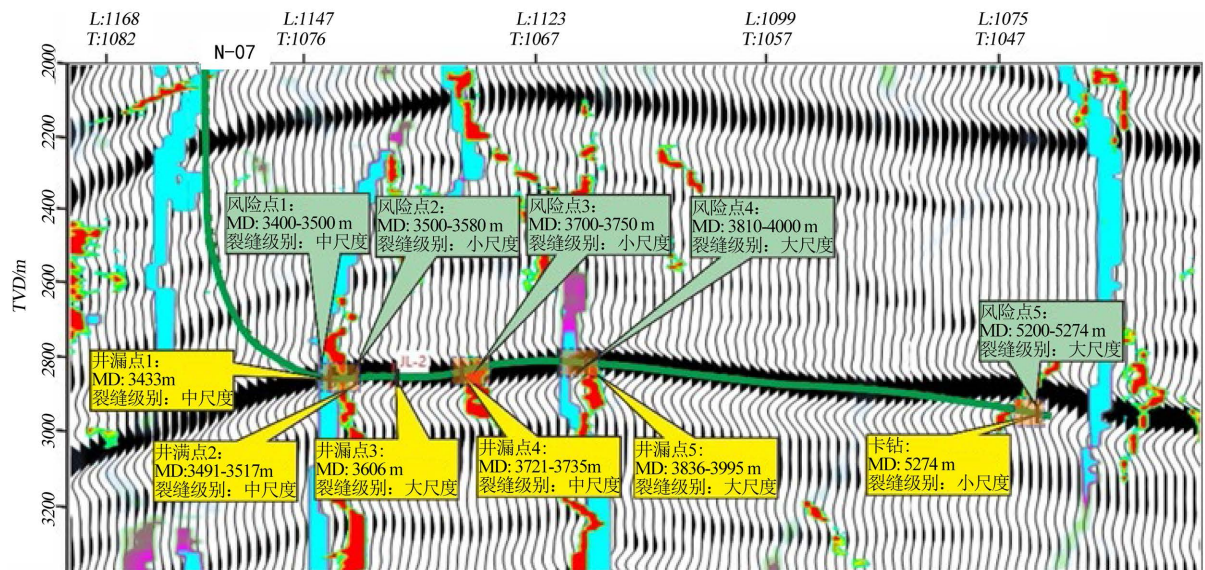


Figure 9. Multi-attribute fracture prediction seismic profile across well N-07

图 9. 过 N-07 井多属性裂缝预测地震剖面

5. 结论

本文提出一种基于地震分频数据的多属性融合技术，主要得出以下结论：

(1) 不同频率下不同属性实现了对不同尺度上断裂或裂缝发育概率的分级对应，多属性融合不仅有效揭示了区域主导方向的大中尺度断层，同时提高了大断层轴线两侧及交切破碎带广泛发育小型断层和裂缝带。

(2) 不同尺度裂缝模型的分级建立有助于准确预测断层对页岩气钻井工程复杂事件的影响, 同时在储层改造方案设计与优化环节支撑页岩气增产提效。

参考文献

- [1] 赵向原, 游瑜春, 胡向阳, 等. 基于成因机理及主控因素约束的多尺度裂缝“分级-分期-分组”建模方法——以四川盆地元坝地区上二叠统长兴组生物礁相碳酸盐岩储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 213-225.
- [2] 刘剑锋, 王鹏, 毛庆辉, 等. 基于不同尺度的储层裂缝建模方法对比[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(5): 2071-2079.
- [3] 马新华, 谢军. 川南地区页岩气勘探开发进展及发展前景简[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 161-169.
- [4] 覃作鹏, 刘树根, 邓宾, 等. 川东南构造带中新世代多期构造特征及演化[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(6): 703-711.
- [5] 梁霄, 徐剑良, 王滢, 等. 川南地区渐变型盆-山边界条件下龙马溪组页岩气(藏)富集主控因素: 构造-沉积分异与差异性演化[J]. 地质科学, 2021, 56(1): 60-81.
- [6] 赵春段, 张介辉, 蒋佩, 等. 页岩气地质工程一体化过程中的多尺度裂缝建模及其应用[J]. 石油物探, 2022, 61(4): 719-732.
- [7] 范宇, 王佳珺, 刘厚彬, 等. 泸州区块全井段地层力学性能及井壁稳定性[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(16): 6433-6439.
- [8] 梁志强. 不同尺度裂缝的叠后地震预测技术研究[J]. 石油物探, 2019, 58(5): 766-772.
- [9] 张延章, 尹寿鹏, 张巧玲, 等. 地震分频技术的地质内涵及其效果分析[J]. 石油勘探与开发, 2006(1): 64-66+71.
- [10] 余鹏, 李振春. 分频技术在储层预测中的应用[J]. 勘探地球物理学进展, 2006(6): 419-423+12.
- [11] 马朋善, 王继强, 刘来祥, 等. Morlet 小波分频处理在提高地震资料分辨率中的应用[J]. 石油物探, 2007(3): 283-287+15-16.
- [12] 林年添, 孙剑, 汤健健, 等. 分频技术在塔中地区地震储层边界刻画中的应用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2012, 31(4): 18-25.
- [13] 张瑞, 文晓涛, 李世凯, 等. 分频蚂蚁追踪在识别深层小断层中的应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 350-356.
- [14] Hale, D. (2012) Fault Surfaces and Fault Throws from 3D Seismic Images. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012*, Society of Exploration Geophysicists, 1-6. <https://doi.org/10.1190/segam2012-0734.1>
- [15] 王濡岳, 胡宗全, 周彤, 等. 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组页岩裂缝发育特征及其控储意义[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1295-1306.
- [16] 蒲泊伶, 董大忠, 王凤琴, 等. 川南地区龙马溪组沉积亚相精细划分及地质意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(3): 15-25.