

碳酸盐岩储层断裂分类分级预测—以塔里木盆地塔河油田为例

王震^{1,2}, 饶莹¹, 谢海洋³, 史冠中^{*3}

(1. 中国石油大学(北京) 地球物理学院, 北京昌平 102249; 2. 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011; 3. 中国地质大学(武汉) 资源学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 碳酸盐岩储层作为全球油气资源的重要载体, 其内部溶洞和断裂系统的发育特征直接影响油气的储集与运移能力。针对深层-超深层碳酸盐岩储层中多尺度断裂预测的难题, 本研究以塔里木盆地塔河油田奥陶系碳酸盐岩为例, 提出了一种基于地震波场特征分析的分类分级断裂预测技术。通过三维正演模拟揭示了规模缝洞体对常规断裂预测属性(如相干、最大似然)的干扰机制, 发现缝洞体边界的“串珠状”反射异常会导致断裂假连通和归位偏差。基于断裂的尺度与溶蚀特征差异, 将研究区断裂系统划分为大尺度破碎-溶蚀断裂(>20 m)、中尺度弱-未溶蚀断裂(10–20 m)和小尺度裂缝(<10 m), 并分别开发了针对性的预测方法: 针对大尺度断裂, 提出基于梯度结构张量薄化的断裂归位技术, 有效克服溶洞异常边界的干扰; 针对中尺度断裂, 结合 AFE 相干加强属性与 U-Net 深度学习算法, 显著提升了断裂纵向连续性; 针对小尺度裂缝, 利用 Likelihood 属性与构造导向滤波实现弱反射信号的精准提取。进一步通过深度前馈神经网络(DFNN)融合多尺度断裂属性及钻井漏失数据, 构建了井控多属性融合模型。应用结果表明, 该技术体系在塔河油田复杂缝洞区实现了断裂系统的全尺度刻画, 大尺度走滑断裂呈 NNE-NNW 向共轭分布, 中尺度断裂形成花状构造, 小尺度裂缝密集发育于断裂东侧主动盘。本研究为深层碳酸盐岩储层断裂预测提供了新的技术思路, 对同类油气藏的勘探开发具有重要参考价值。

关键词: 碳酸盐岩; 断裂分类; 结构张量; 地震正演; 塔河油田

中图分类号: P618

基金项目: 本论文获国家自然科学基金面上项目(No.42172182)和中石化西北油田分公司企业外协项目(No.KY2024-011)联合资助

第一作者简介: 王震(1985-), 男, 副研究员, 主要从事于碳酸盐岩油藏地球物理研究工作。

Fracture Classification-Grading Prediction Technology and Application in Carbonate Reservoirs: A Case Study from the Tahe Oilfield, Tarim Basin

Wang Zhen^{1,2}, Rao Yin¹, Xie Haiyang³, Shi Guanzhong³

(1.China University of Petroleum,Beijing 102249,China

2.Sinopec Northwest Company, Urumqi 830011,China

3.School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan,430074)

Abstract: Carbonate reservoirs are important carriers of global oil and gas resources. The development characteristics of their internal karst caves and fault systems directly affect the storage and migration capacity of oil and gas. In order to solve the problem of multi-scale fault prediction in deep and ultra-deep carbonate reservoirs, this study takes the Ordovician carbonate rocks in the Tahe Oilfield in the Tarim Basin as an example and proposes a classification and grading fault prediction technology based on seismic wave field characteristic analysis. The interference mechanism of large-scale fracture-cavity bodies on conventional fault prediction attributes (such as coherence and maximum likelihood) is revealed through three-dimensional forward simulation, and it is found that the "beaded" reflection anomaly at the boundary of the fracture-cavity body will lead to false connectivity of faults and relocation deviation. Based on the differences in the scale and dissolution characteristics of the faults, the fault system in the study area is divided into large-scale broken-dissolution faults (>20 m), medium-scale weak-undissolved faults (10 - 20 m) and small-scale fractures (<10 m), and targeted prediction methods are developed for each of them: for large-scale faults, a fracture retrieval technology based on gradient structural tensor thinning is proposed to effectively overcome the interference of abnormal boundaries of karst caves; for medium-scale faults, the longitudinal continuity of the faults is significantly improved by combining AFE coherent enhancement attributes with U-Net deep learning algorithm; for small-scale fractures, the Likelihood attribute and structural guidance filtering are used to accurately extract weak reflection signals. Further, a well control multi-attribute fusion model is constructed by fusing multi-scale fault attributes and drilling loss data through deep feedforward neural network (DFNN). The application results show that this technology system has achieved full-scale characterization of the fault system in the complex fracture-cave area of Tahe Oilfield. Large-scale strike-slip faults are distributed in a conjugate NNE-NNW direction, medium-scale faults form flower-like structures, and small-scale fractures are densely developed on the active disk (east side) of the fault. This study provides

a new technical approach for the prediction of deep carbonate reservoir faults and has important reference value for the exploration and development of similar oil and gas reservoirs.

Key words: Tahe Oilfield, Carbonate Rocks, Fractures, Structural Tensors, Fine Coherence, Classification, Classification, Connectivity.

0 引言

碳酸盐岩储层作为全球油气资源的重要载体，其内部溶洞和断裂系统的发育特征直接影响着油气的储集与运输能力(Lucia, 2007)。近年来，随着深层-超深层油气勘探的持续推进，针对溶洞断裂系统的定量表征与分级研究已成为碳酸盐岩储层地质学的研究热点(Zeng et al., 2020)。早期研究主要基于露头观测和岩心分析建立溶洞断裂的定性分类标准，将碳酸盐岩储层划分为粒间孔主导型、溶洞主导型和裂缝主导型，为后续定量研究奠定了基础。随着三维地震技术的进步，利用更高分辨率的三维地震数据识别地下溶洞和断裂的空间展布规律是精细描述碳酸油藏断裂的核心技术。目前常用的碳酸盐岩断裂预测技术有相干、蚂蚁体、方差及曲率，取得了较好的应用效果(Chopra and Marfurt, 2010; Xie et al., 2022; Zhang et al., 2021)。然而，这些断裂预测技术也存在以下弊端。例如，受到规模缝洞体的“串珠”状反射异常干扰，预测断裂的位置和数量存在较多误差；受地震资料同相轴影响，预测的断裂在纵向上连续性较差(Zeng et al., 2011)。

塔河工区位于塔里木盆地阿克库勒凸起西北翼斜坡区(图 1)，受多期构造运动(加里东期、海西期、印支-燕山期)叠加影响，形成了近东西向褶皱和 NEE 向走滑断裂系统(何治亮等, 2010; 刘军等, 2017; 李鹏飞等, 2017; 王震等, 2019)。大尺度断裂主要发育于奥陶系碳酸盐岩中，与古岩溶作用耦合形成缝洞体储集体，控制着油气富集。研究表明，加里东期多期次构造活动形成多个不整合面，而印支期 NE-SW 向挤压应力进一步塑造了断裂走向(韩鹏远等, 2024; 张长建等, 2024)。塔河油田奥陶系发育不同级次走滑断裂，同时由北往南溶蚀程度相差较大，这对断裂预测造成了极大的困难。目前塔河碳酸盐岩断裂预测技术方法主要有本征值相干、曲率、AFE(Amplitude-Fidelity-Enhanced)、最大似然、蚂蚁体与结构张量等方法(李鹏飞等 2017; 王震等, 2019)。近年来以卷积神经网络为代表的深度学习技术的普及应用，它在断层精确检测方面相较于传统的相干、曲率或边缘增强属性，尤其是对断层预测的纵向连续性方面，具有明显优势(刘江等, 2020; 陈俊安等, 2022; Wei et al., 2022)。

塔河油田当前不同尺度断裂识别存在诸多不足。针对小尺度断裂(<10m)的检测精

度不足，常规地震资料受限于分辨率（主频 30-40Hz），难以有效识别未溶蚀微裂缝及闭合缝。多尺度断裂分级体系与产能的定量关联尚未建立，现有分类标准（如大/中/小断裂）缺乏明确的渗流能力标定，影响开发方案优化。此外受奥陶系顶面强反射屏蔽效应影响，深层断裂检测成功率不足 60%。塔河油田地区的断层相关的地震波场复杂多样，其地震波场的传播特性、断层的分布与类型对预测断裂空间展布具有重要意义。通过综合地震波场特征、构造分析和波阻抗反演技术，可以更准确地识别和解释塔河油田的断裂特征。本文基于断裂的波场特征分析，结合塔河油田的开发资料，首先探讨基于正演模拟的断裂检测技术在碳酸盐岩缝洞体应用的局限性，然后针对不同尺度断裂，建立碳酸盐岩断裂分类分级预测技术并验证其适用性，最后分析在塔河工区识别的多尺度断裂分布特征。

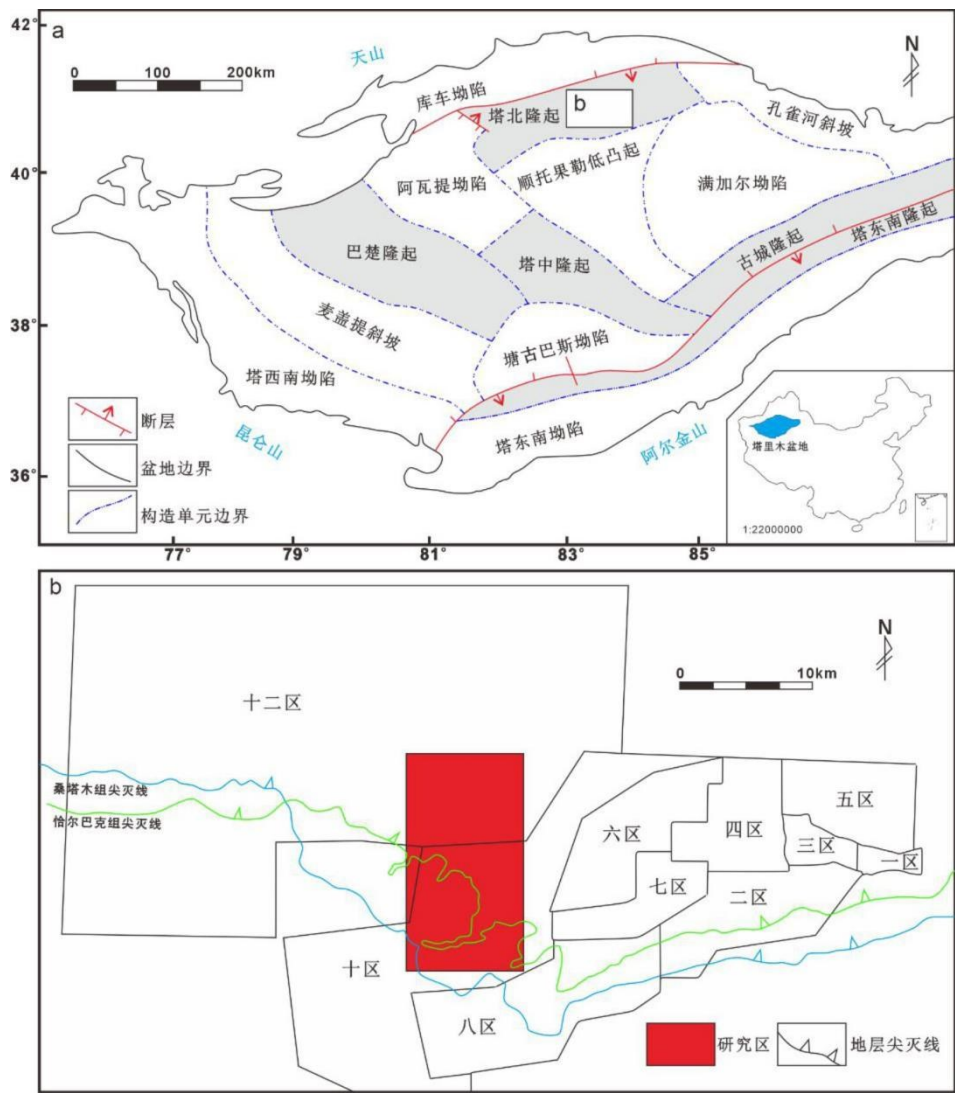


图 1 塔河油田区域位置图。a: 塔河油田位置；b: 工区分布图

Figure 1. Regional Location Map of Tahe Oilfield. a: Location of Tahe Oilfield; b: Distribution Map of the Study Area.

1 复杂缝洞区断裂预测正演模拟

1.1 规模缝洞体对断裂预测的干扰

为了研究常规断裂属性受到规模缝洞体的干扰,本研究设计了三维数值模型,进行模拟采集及深度偏移处理,最后提取最大似然属性及精细相干属性。利用塔河油田野外采集观测系统和采集参数进行波动方程正演模拟,具体为道间距 20 m,炮间距 160 m,最小偏移距 0 m,最大偏移距 2540 m,接收道数为 128。模型包含不同尺度不同深度的正方体溶洞,每组缝洞体的长宽高相等,模型中从右到左边三列的尺度分别为 20 m、40 m 与 60 m,从上到下三行为距离目的层顶面不同距离,分别为 20 m、40 m 及 60 m(图 2a)。模拟的具体参数有上覆地层速度 4800 m/s,目的层基岩速度 6000 m/s、密度 2760 kg/m³,溶洞充填速度 4000 m/s、密度 2760 kg/m³,目的层设置埋深 4000 m,雷克子波主频 30 Hz。

正演模型显示规模缝洞体对于断裂预测的影响主要为:规模缝洞体会在断裂外围形成假边界。利用精细相干算法相似的边缘检测属性,其异常位于成像后的缝洞能量异常边缘,由于地震异常的放大效应(马灵伟, 2014),因此其预测的边界基本无地质意义。在深度偏移成像后的能量体切片与模型叠合图中,可以明显看出能量异常显著大于缝洞模型(图 2b)。正演模型表明,当缝洞模型的宽度小于 80 m 时,地震宽度异常远大于地质异常;当模型宽度大于 80 m 后,地震异常与地质异常基本相当,但仍有一定程度的放大效应,至少放大了 20 m。正演地震数据计算的精细相干属性切片显示,相干的弱异常基本围绕强能量分布(图 2c)。规模缝洞体会在显示中表现断裂假连通。在缝洞体集中发育区,由于缝洞异常的放大效应,属性异常相互关联。例如,以最大似然及蚂蚁体等属性为代表的二次属性计算,容易造成假连通。最大似然属性显示预测的断裂可以看到具有假连通的异常(图 2d)。

规模缝洞体影响下预测的断裂通常不符合断裂溶蚀地质模式。断裂溶蚀模式为断裂规模扩大的过程,其核心断面一般位于断裂破碎带和溶蚀缝洞体叠加的中心位置,沿着断裂走向的为单轨而非双轨。因此,在规模缝洞体发育区,常规断裂预测属性主要反映为缝洞体的边界异常假象,即使是实际的断裂边界也会因放大效应归位不准。

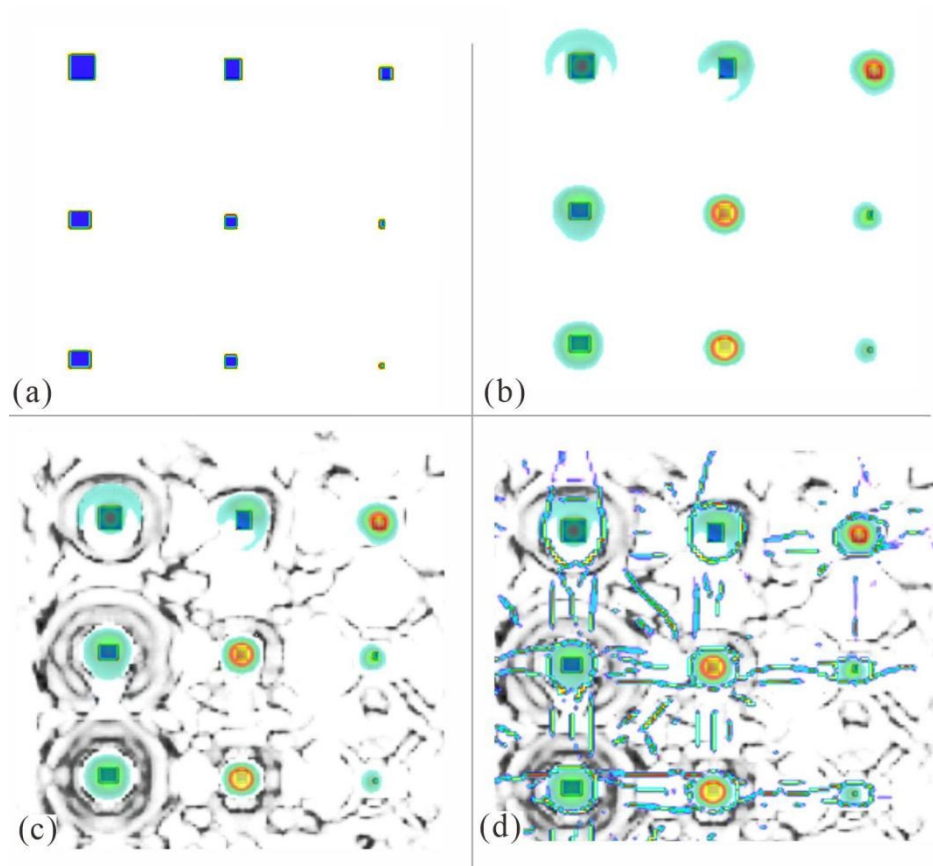


图 2 三维数值缝洞模型及能量、相干、似然属性平面图。(a)不同尺度缝洞体模型；(b)不同尺度缝洞体模型与能量叠合；(c)三维模型的相干属性；(d)三维模型相干、似然属性。

Figure 2. 3D numerical fracture-cavity model and planar maps of energy, coherence, and likelihood attributes. (a)Fracture-cavity models at different scales; (b)Overlay of fracture-cavity models at different scales with energy attributes; (c) Coherence attribute of the 3D model; (d) Coherence and likelihood attributes of the 3D model.

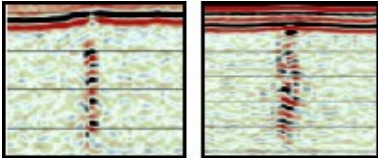
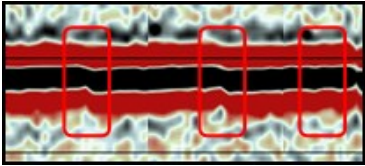
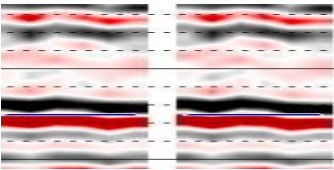
1.2 碳酸盐岩不同尺度断裂的波场特征

塔河碳酸盐岩断裂具有多种反射特征,根据断裂的类型、尺度大致可以分为三类(表 1)。通过建立不同类型的缝洞型储层地震地质模型,利用非均匀介质波动方程模拟大尺度破碎-溶蚀断裂,结果显示尺度大于 20 m 断裂,且具有一定宽度的破碎带或溶蚀孔洞发育,具有强串珠杂乱反射特征(马灵伟等, 2015)。因此,大尺度破碎-溶蚀断裂反射异常会造成断裂预测的假象。中尺度弱-未溶蚀断裂的宽度或断距小于 20m,且孔隙度小于 5%,反射特征以同相轴错断或扰动为主(马灵伟等, 2015; 张银涛等, 2025)。这类断裂

在地震剖面上表现为弱反射或弱振幅特征，地震同相轴的明显褶曲，这种褶曲特征可以作为识别断裂的重要依据。此外，地震波场中还可能表现出弱振幅反射特征，这与断裂带的弱反射特性一致(李海英等，2020；王志伟等，2023)。小尺度弱-未溶蚀断裂/裂缝一般断裂尺度小于 10 m，地震偏移叠加剖面上同相轴未有典型的错断特征，道集特征具有各向速度或者能量异性特征(薛娇，2022)。

表1 塔河油田碳酸盐岩断裂分类分级预测技术

Table 1 Classification and grading prediction technology of carbonate fractures in Tahe Oilfield

断裂类型	断距尺度	典型剖面	波场特征	预测技术
大尺度 破碎-溶蚀断裂	大于20 m	 宽度40m、100m	杂乱强反 射	张量薄化
中尺度弱-未溶 蚀断裂	10-20 m	 断距20m、15m、10m	同相轴错 断、扰动	AFE+机器 学习预测
小尺度弱-未溶 蚀断裂-裂缝	小于10 m		叠前各向 速度、能量 差异和高 灵敏度弱 信号增强	叠前各向异 性预测和 Likelihood 属性

2、碳酸盐岩断裂分类分级预测技术

针对塔河碳酸盐岩不同尺度断裂的地震信号特征差异大，预测精度存在的偏差问题，本文提出了一种分类分级预测方法。对大尺度破碎-溶蚀断裂，开发了张量薄化属性，区别于常规不连续检测技术，其能将检测的断裂面归位到强反射异常的中间位置；对中尺度弱-未溶蚀断裂，主要利用 AFE 属性与机器学习技术，既保留了断裂属性信息，又消除了内部地层地震信号多次波干扰造成断裂纵向不连续的影响。对小尺度弱-未溶蚀断裂/裂缝，采用 Likelihood 属性结合地震数据的构造导向滤波开展地震预测。在大尺度、中、小尺度的断裂预测基础上最后进行空间融合，提高断裂预测的准确性。

2.1 大尺度破碎-溶蚀断裂

基于倾角约束的张量薄化方法预测断裂，是根据断裂先断后溶的地质认识，针对地震“串珠”异常大于溶洞地质异常的物探特征，利用张量属性表征断裂异常空间，然后进行薄化处理，确定空间上最强部分线性轨迹。基于倾角约束的张量薄化断裂检测技术的具体过程为：

计算地震能量的梯度结构张量。梯度结构张量可以在不同的尺度上计算地震数据梯度变化，从而识别出不同尺度的缝洞结构。首先提取地震波场和地震能量三维数据体 $I(x, y, z)$ ，然后搭建梯度向量，刻画数据体在各个方向的变化率，公式为 $\nabla I = \left(\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y}, \frac{\partial I}{\partial z} \right)$

计算数据体在 x 、 y 、 z 方向上的偏导数。最后计算梯度结构张量，由梯度向量的外积构成 $\mathbf{J} = \nabla I \cdot (\nabla I)^T$ 。为了增强局部结构的稳定性，本研究对梯度结构张量进行平滑处理。平滑过程通过高斯滤波实现 $\mathbf{J}_{\text{smoothed}} = G_{\sigma} * \mathbf{J}$ ，公式中 G_{σ} 是高斯核， σ 是平滑尺度参数。然后对平滑后的梯度结构张量 $\mathbf{J}_{\text{smoothed}}$ 进行特征值分解，得到特征值 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 以及对应的特征向量 v_1 、 v_2 、 v_3 ；这里的特征值 λ_1 主要反映层状反射特征， λ_2 和 λ_3 主要反映缝洞体反射异常区域(张晟等，2022)。

在构建梯度结构张量基础上，开展张量第二特征值的薄化处理。在构造倾角、方位角的约束下进行薄化计算，对所有采样点进行扫描，对于每一个采样点 x ，计算所有沿着某一倾角、方位角构成的切面，计算所有结构梯度张量值的积分值 $c(x)$ ：

$$c(x) = \sum_{\phi_k \in \phi_s} \sum_{\theta_k \in \theta_s} \langle G(x) \rangle_{\phi_k, \theta_k} \quad \text{公式 (1)}$$

这里采样点走向 ϕ_s ，倾角 θ_s ；

同样计算每个采样点沿着构造层的走向和倾角，在一定的步长范围内统计所有的张量属性值，对每一个采样点只保留最大的张量属性值 $m(x)$ 。

$$m(x) = \max (\langle G(x) \rangle_{\phi_k, \theta_k}) \quad \text{公式 (2)}$$

则最终的张量 $h(x)$ 薄化公式为：

$$h(x) = \frac{m(x)}{\lambda_1} \quad \text{公式 (3)}$$

其中， N 代表了所有的倾角、方位角组合的总数。这些参数相当于记录了断裂最可能发育的位置及这个位置处的张量值，这个新的数据体就是张量薄化属性体，表征断裂发育位置。本研究将张量特征值最强部分的线性记录下来，从而实现具有较多强反射异常资料的碳酸盐岩断裂预测(图 3)。

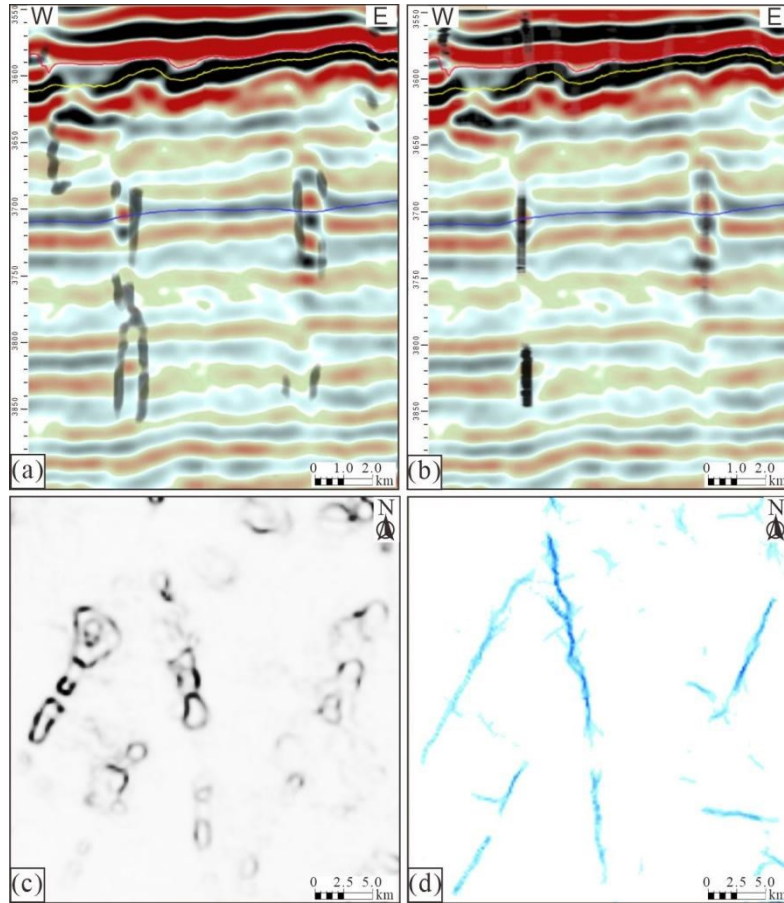


图 3 常规相干属性与张量薄化剖面及平面对比。(a)常规相干断裂检测与原始剖面叠合图；(b)张量薄化断裂检测与原始剖面叠合图；(c)常规相干断裂检测平面图；(d)张量薄化断裂检测平面图。

Figure 3. Comparison of conventional coherence attributes and tensor thinning profiles/planar maps. (a) Overlay of conventional coherence fracture detection and original profile; (b) Overlay of tensor thinning fracture detection and original profile; (c) Planar map of conventional coherence fracture detection; (d) Planar map of tensor thinning fracture detection.

2.2 中尺度弱-未溶蚀断裂

AFE 相干加强属性是在精细相干属性的基础上，通过线性滤波去除数据中的非构造

异常,同时保留由构造活动引起的属性异常,从而显著增强断层特征(邹雅铭等, 2023)。AFE 相干加强可以较好的表征中尺度断裂造成的同相轴扰动异常,具有横向表征精度高。

然而, AFE 相干加强受到同相轴的影响,纵向延续性差。本研究应用机器学习的方法完善纵向信号信息。近年来,机器学习断裂检测技术已逐步实现规模化应用。目前,主流的深度学习断裂检测方法主要采用基于 U-Net 架构的卷积神经网络(CNN)算法。该算法通过对图像特征数据或模型进行深度学习迭代训练,生成稳定且可靠的训练模型,最终输出可直接用于地质解释的成果数据体(陈俊安等, 2022; Ronneberger et al., 2015; Wu et al., 2019)。主要步骤包括样本准备,训练,数据验证等步骤,使用 Dice+BCE 联合损失函数和 Adam 优化器进行参数优化,并实施数据增强和早停机制防止过拟合。

本研究将三维地震数据视为图像分割问题,通过 U-Net 架构实现端到端的断层特征提取与分类。U-Net 由编码器(下采样)、解码器(上采样)和分类器组成(图 4):编码器通过多层卷积公式:

$$\text{Conv}(x) = \sigma(W * x + b), \text{MaxPool}(x) = \max_{i,j \in R}(x_{i,j}) \quad \text{公式 (4)}$$

进行多尺度特征提取,解码器利用转置卷积公式:

$$\text{TransposedConv}(x) = W^T * x + b \quad \text{公式 (5)}$$

从而实现空间分辨率恢复,最终由 Softmax 分类器输出断层概率图(吴正阳等, 2018; 杨晶等, 2022)。训练数据采用人工合成与真实数据结合的方式,通过正演模拟生成包含断层的合成地震数据,并引入随机噪声(如高斯噪声)和数据增广(旋转、翻转)以增强模型泛化能力。编码器利用连续的 3×3 的卷积核层,使用 ReLU 进行非线性激活,利用最大池化方法进行下采样,其将图像尺寸缩小两倍,图像通道数增加 2 倍。样本选取 $256 \times 256 \times 256$ 的地震数据以及一个相同维度的断层标签数据体,使用 80%的数据进行训练,20%的数据进行验证,利用 Adam 算法优化,迭代 100 次。训练后将预测结果与原始断层标签对比,验证模型。实验表明,该模型在 SEAM 标准数据集上取得了 98.7% 的像素准确率和 92.3% 的断层召回率,对小尺度断层($>\lambda/15$)具有优异的识别能力,单平方公里数据推理时间仅需 10 秒。基于 U-Net 的方法在断层连续性和抗噪性上显著优于传统相干体技术,计算效率显著提升(图 5)。

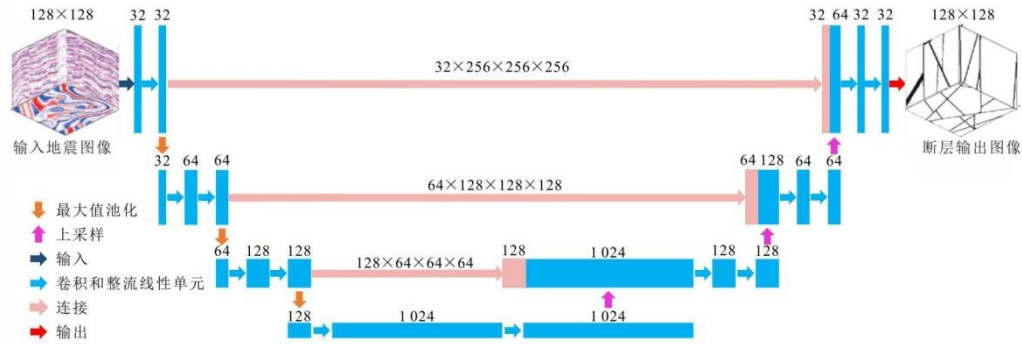


图 4 U-Net 卷积神经网络结构

Figure 4. Structure of the U-Net Convolutional Neural Network.

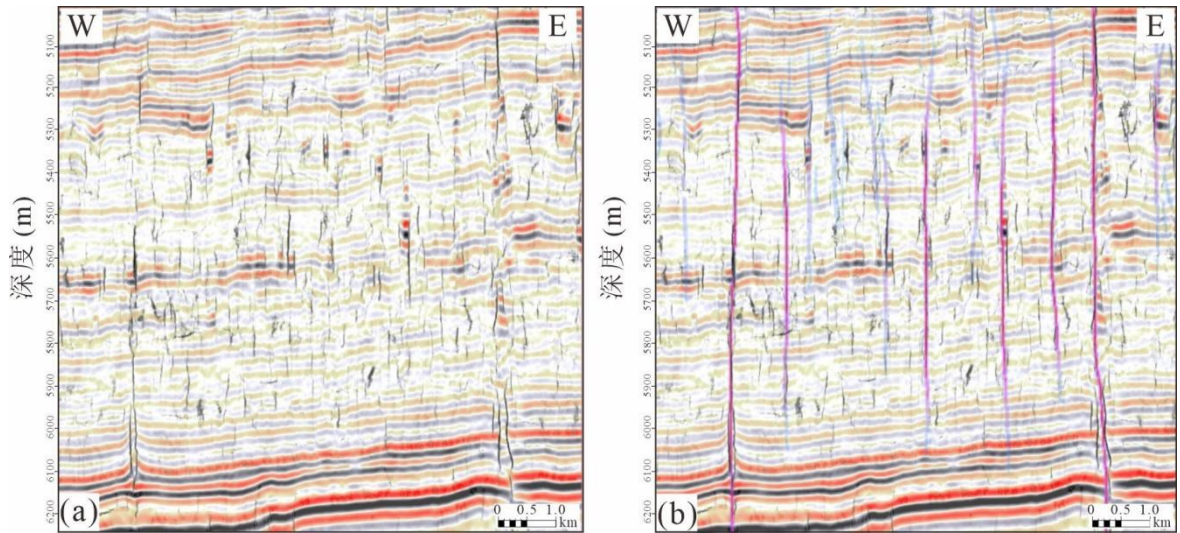


图 5 AFE 及机器学习的断裂检测效果剖面对比。(a)AFE 断裂检测剖面(黑色); (b)基于机器学习的断裂预测剖面(红色、蓝色)。

Figure 5. Comparison of fracture detection results between AFE and machine learning in cross-sections. (a) AFE fracture detection profile (black); (b) Machine learning-based fracture prediction profile (red, blue).

2.3 小尺度弱-未溶蚀断裂/裂缝

本研究基于 Likelihood 属性实现小尺度弱-未溶蚀断裂-裂缝的定量预测，为碳酸盐岩储层评价提供了关键依据。Likelihood 属性方法是建立在最大似然原理基础上的统计方法，也是概率论在地震统计学中的应用，其原理是将原始地震数据沿着每一组走向和倾角，计算各点最低的相似度及同相轴连续性。

基于 Likelihood 属性的地震预测过程包括地震数据的构造导向滤波、属性计算与多尺度分析等。首先对三维地震数据体进行构造导向滤波分析，以增强断裂-裂缝的连续性特征。滤波操作过程沿断裂倾向和走向进行，消除随机噪声干扰，凸显小尺度裂缝的弱反射信号(马德波等，2018；梁志强，2019)。

Likelihood 属性分析主要公式为：

$$L = 1 - S_{em}^8 \quad \text{公式(5)}$$

式中， S_{em} 代表地震同相轴相似性属性。当地层连续性好时， S_{em} 值较高，Likelihood 值降低，指示断裂发育可能性小；当裂缝或断裂带内地震波场不连续， S_{em} 降低，Likelihood 值显著增大(杨德彬等，2024；刘冰雷等，2025)。本研究通过扫描数据体，计算不同倾角与走向下的 Likelihood 属性，保留概率最高的断裂位置，形成细化断层概率体(Thinned Fault Likelihood, TFL)。然后将预测结果与钻、测井数据标定，优选出 TFL 属性阈值参数范围 0.1-0.28。Likelihood 属性与 AFE 属性叠加使用，不仅可以刻画裂缝边界，同时可以反映裂缝内部流体活动特征。图 6(a)为小尺度裂缝预测的 Likelihood 属性沿层切片，图中蓝色线条为构造解释的断层多边形结果。图 6(b)测井曲线的高值区域反映了其储层段的裂缝非常发育。地震剖面显示串珠溶洞边缘及附近发育小裂缝，这与地质认识大体一致，说明小尺度裂缝的预测结果准确可靠。Likelihood 属性沿层切片显示，小尺度裂缝主要沿主干断裂带呈簇状分布，次级断裂交汇处及构造隆起部位裂缝密度最高(图 6c)。

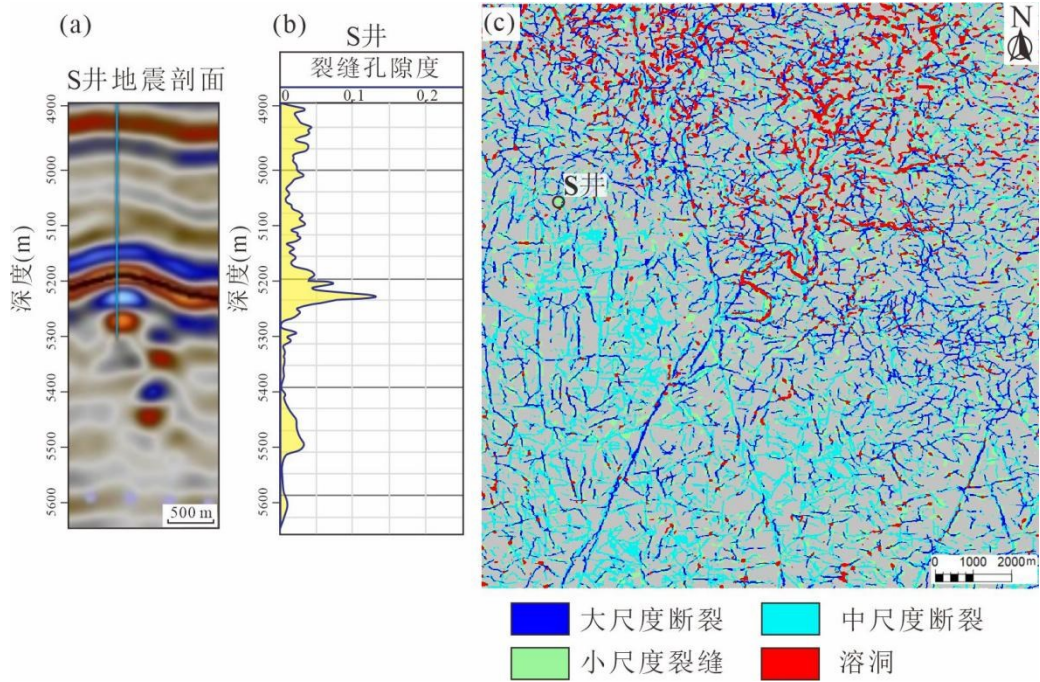


图 6 小尺度裂缝空间展布预测效果图

Figure 6. Prediction Results of Small-Scale Fracture Spatial Distribution

3. 测井约束下的不同类别断裂空间融合

利用上述分类分级断裂预测方法，对不同级别断裂的空间位置、规模、发育类型等特征进行了定量化表征。利用多类地震属性进行属性融合能够反映不同尺度的断裂信息、实现更加综合且精确的预测结果(李占东等, 2017; 薄昕等, 2022; 陈国飞等, 2023; 谢鹏飞等, 2023)。然而, 上述断裂预测过程中忽视了钻井信息, 容易造成井震数据吻合性差、断裂预测效果不全面、不精确。在碳酸盐岩缝洞型储层的钻井作业中, 钻井液放空漏失现象是常见的地质响应特征。这种现象通常指示钻遇了洞穴储集体或裂缝系统, 直观反映了地下真实的地质构造特征。从地质意义来看, 钻井液漏失现象往往与孔缝或裂缝型储层的发育程度密切相关, 其漏失量的大小可在一定程度上作为评估裂缝规模的重要参考指标。

针对这一问题, 本文引入深度前馈神经网络算法(deep feedforward neural network, DFNN), 融合多种断裂识别属性, 同时结合井上放空漏失等钻井信息, 使用了一种井控的多属性融合的断裂识别方法。深度前馈神经网络擅于模拟复杂非线性关系, 是一种较为典型的神经网络模型, 其核心结构由输入层、多个隐藏层和输出层组成。数据从输入层单向传递, 经过隐藏层的非线性激活函数(如 ReLU、Sigmoid 等)逐层变换特征, 最终在输出层生成预测结果。训练过程依赖反向传播算法和梯度下降优化, 通过最小化损失函数(如交叉熵)调整网络参数, 实现从输入到输出的映射学习(Benardos & Vosniakos, 2007; 姚辉等, 2023; 赵军等, 2024)。

首先根据地震属性数据和钻井信息构建样本库。钻井信息主要包括井液漏失量、成像测井等数据, 这些数据与方差属性、AFE 相干加强属性、张量属性、机器迁移属性融合, 构建样本库(图 7a-d)。数据钻井液漏失量可指示裂缝规模, 钻井液漏失量(如漏失速度、漏失量)与裂缝宽度、渗透率直接相关, 可作为裂缝规模的量化指标(王健等, 2023), 而成像测井数据(如 FMI、EMI)可识别断裂类型(如张性断裂、剪切断裂), 统计裂缝密度, 这些信息为模型提供了物理约束(袁峰等, 2021; 赵军等, 2024)。训练过程中, 测井数据作为监督信息, 通过反向传播修正权重, 最终使模型学习到属性与断裂特征间的复杂关联(e.g., Chen et al., 2023)。本研究在输入层添加地震属性值, 在输出

层形成对应断裂类型或发育强度的回归结果，然后反复调试隐藏层数量和节点数，选择最优模型。图 7(a)-(d)通过单属性和多属性融合剖面比较可以看出，深度前馈神经网络融合了方差属性、AFE 相干加强属性、张量属性、机器迁移属性和 15 口井的漏失数据，将漏失数据（包括漏失层位、漏失量、漏失压力等）量化为标准化特征向量，依据井轨迹空间位置建立地震属性与漏失数据的映射关系，将漏失特征与方差、AFE 相干等地震属性共同构成输入特征矩阵，训练出 3 层隐含层的网络模型，成功融和识别不同级别的断裂(图 7e)。在精度控制方面，通过井震标定，利用 15 口关键井的成像测井资料约束地震属性阈值，确保大尺度断裂平面定位误差小于 30m。在训练过程中引入注意力机制，对井漏失数据所在区域赋予更高权重，使中小断裂识别准确率提升 25%。通过深度神经网络的交叉验证，将多解性降低 30%。

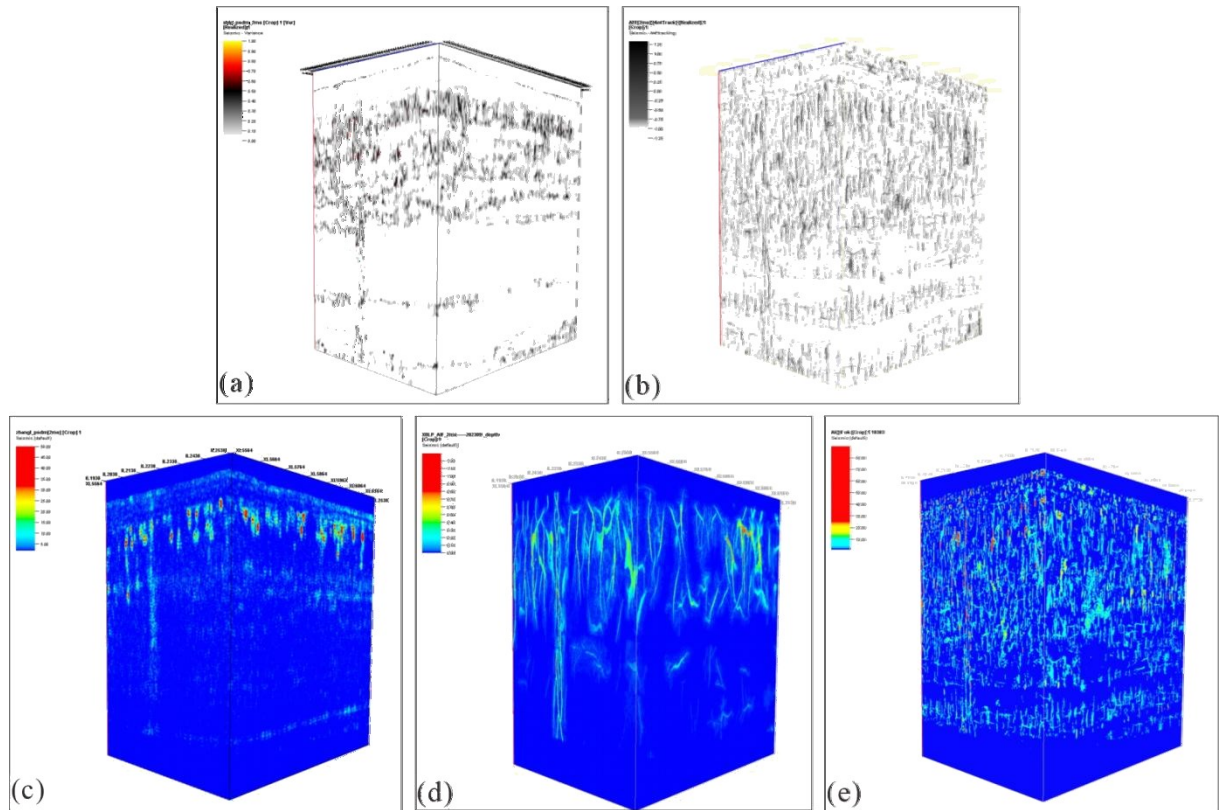


图 7 多属性融合数据体。(a)方差体；(b)AFE 相干加强属性体；(c)张量薄化体；(d) U-Net 架构下深度学习体；(e) 深度前馈神经网络多属性分类分级融合体。

Figure 7. Multi-attribute fusion data volume. (a) Variance volume; (b) AFE coherence-enhanced attribute volume; (c) Tensor thinning volume; (d) Deep learning volume under U-Net architecture; (e) Multi-attribute classification and hierarchical fusion volume using deep feedforward neural network.

4 分类分级预测技术在塔河地区应用

4.1 地震特征与识别效果

研究区位于塔里木盆地中部的塔河油田，区域内中、下奥陶统致密碳酸盐岩储层受走滑断裂带挤压、拉张等多期构造破裂运动，形成了不同尺度、不同性质的断裂，形成埋藏深度大、地质构造复杂的断裂-裂缝-溶洞型储层(马海陇等, 2024; 史今雄, 2020)。已有研究证实走滑断裂在加里东中期初具形态，于海西期显著活动，并于燕山至喜马拉雅期逐步定型(何治亮等, 2010)。走滑断裂及微小断裂、裂缝发育，断裂性质及平面组合关系复杂。断裂对油藏的控制作用明显，研究断裂发育特征及平面组合对解剖油藏成因具有重要意义(Li et al., 2019)。

工区地震时间剖面呈现明显的分层性，对应奥陶系一间房组、鹰山组碳酸盐岩，志留系碎屑岩以及石炭系砂岩等多套地层。经过合成记录标定， T_7^4 为一组常表现为强振幅、连续反射，定义为奥陶系一间房组顶界。 T_7^6 为一组较连续反射波，该组波标定为奥陶系鹰山组顶界的反射波。 T_7^8 为一组连续性好，能量较强的发射波，该波组标定为奥陶系蓬莱坝组。 T_8^0 反射能量减弱，连续性变差，表示震旦系底界(Zhang et al., 2016)。在地震剖面上常见呈垂向排列的短强“串珠状”反射，代表优质溶洞储层。不同级别断裂的反射特征，破碎带内波组动力学性质发生变化，表现为波组错段、波形凌乱。局部地区同相轴消失并伴有绕射波和各种散射。断裂带内地层中发育的不同大小的裂隙使地层连续性和地震反射波能量均受到影响，发射波频率降低。研究区断裂在性质、级次、构造样式以及平面组合等方面均存在差异性，区内钻井钻遇较大规模裂缝时候会出现放空、漏失现象，钻遇小裂缝时也出现小幅度的漏失。

本论文在上述分级分类预测技术的基础上，结合区域地质研究结果，对工区横向、纵向地震剖面进行了精细的地震预测。图 8a 是塔河油田碳酸盐岩油藏典型剖面，断裂反射特征差异较大，有典型的规模溶蚀溶洞形成的串珠状反射，同时主干断裂的同相轴破碎、错断清晰，次级断裂在目的层(T_7^4)的同相轴扰动明显。从分类分级断裂预测效果图(8b)与 AFE 属性精细相干(图 8c)对比，其在串珠异常中心位置(图 8 中 a1、a2 部位)，AFE 属性多为两边；分类分级断裂的纵向延续性更强，受到同相轴的影响小(b1、b2 位置)；同时也保留了 AFE 属性对于次级断裂引起的细小同相轴扰动(c 部位)。

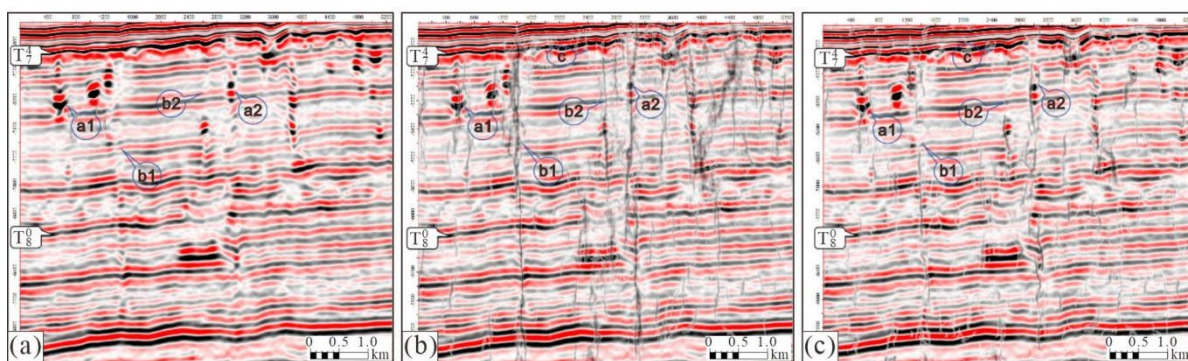


图 8 典型断裂深度偏移剖面及分类分级预测、精细相干与原始地震剖面叠合图。(a)典型断裂深度偏移剖面；(b)分类分级预测与原始地震剖面叠合图；(c)精细相干与原始地震剖面叠合图

Figure 8. Depth-migrated profiles of typical fractures with superimposed maps of classification/prediction, refined coherence, and original seismic sections. (a) Depth-migrated profile of typical fractures;(b) Superimposed map of classified/predicted fractures and original seismic profile;(c) Superimposed map of refined coherence attributes and original seismic profile.

图9展示一个典型工区的对比分析。该工区位于断裂与风化壳岩溶缝洞混合发育区，井控程度较高，井间具有普遍的动态连通性，蓝色表示具有注水连通性，黄色标志着具有注气连通性。分类分级技术在 B4-B5 及 B6-B7 井组连通性预测中更吻合生产连通特征。当增加注水量后，经过分类分级技术识别的强连通井组 3 个月内含水率显著上升。同时在 m1、m2 及 m3 井区，断裂的多解性降低，为后期的连通路程分析、储量动用和驱替提供了更好的资料基础。

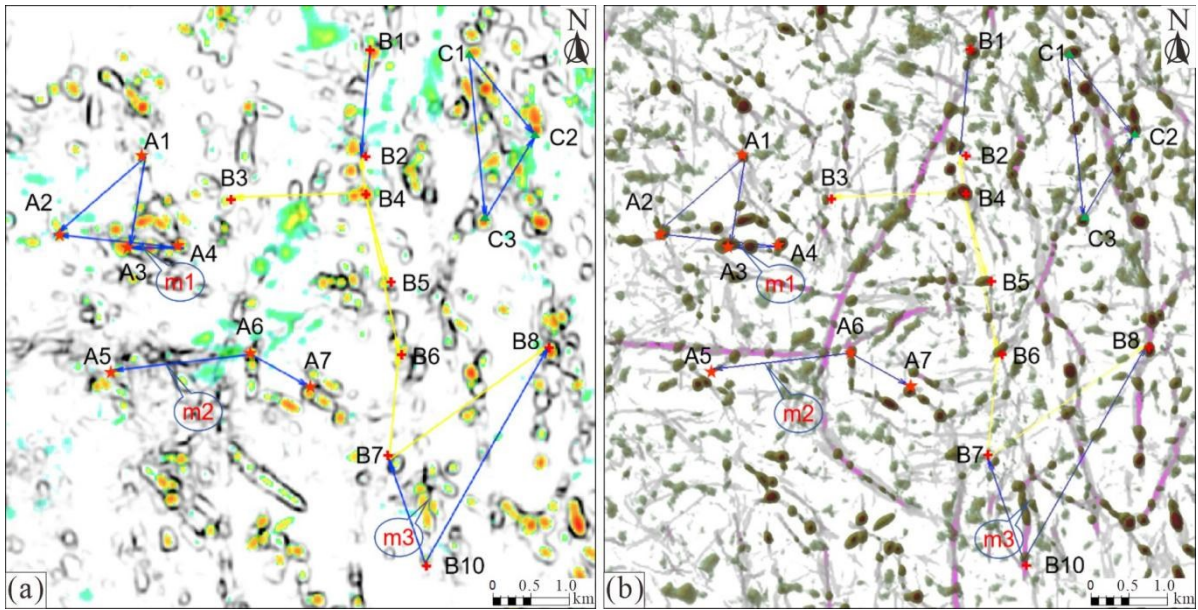


图 9 分类分级预测与精细相干效果平面对比。(a)精细相干(黑色)+能量(红黄绿); (b) 分类分级断裂(黑色)+能量(红、绿色)

Figure 9 Planar comparison of classification/grading prediction and refined coherence effects. (a) Refined coherence (black) + energy (red, yellow, green); (b) Classified/graded fractures (black) + energy (red, green).

4.2 不同级别断裂和裂隙特征

通过分级分类开展地震多属性识别与融合,清晰地揭示出了塔河地区深层碳酸盐岩地层内发育大量的走滑断裂,表现为多组 NNE 走向和 NNW 走向的近直立状的主干走滑断裂,以及部分与主干断裂以多组角度相交的次级走滑断裂。这些断裂贯穿 $T_5^6-T_8^0$ 的断层共 13 条,平均延伸距离大于 3 km。分布在 $T_7^6-T_8^0$ 、 $T_7^8-T_8^0$ 、 $T_5^6-T_7^6$ 、 $T_7^4-T_7^6$ 的断层分别为 7 条、16 条、5 条、8 条,平均延伸距离分别为 1.1 km、0.9 km、1.4 km 和 0.5 km。大尺度断裂规模大,延伸距离较长,断裂陡直,直插寒武系,切割部分震旦系,全部寒武系和奥陶系地层(图 10a-d)。中尺度断裂规模小而数量多,延伸距离短,多数为层间断裂以及从属花状构造发育的局部断裂,多在海西早期形成,剖面上断穿层位少,集中在一间房组和鹰山组地层,呈 NE 向、NNE 向、NW 向、NNW 向以及 EW 向。平面上识别出的中尺度断裂与主干走滑断裂呈 X 状共轭分布,在 $T_7^4-T_7^8$ 主要表现为由主干和次级断裂组成的花状构造(图 11)。 $T_5^6-T_7^4$ 主要表现为 NE、NNW 向的高角度正断层,平面上呈雁列式分布,且部分成对发育(图 10a, e)。 T_7^4 界面由于处于构造高部位,且后期遭受较强的岩溶作用破坏及改造,在工区走滑断裂带的控制下,小型断裂和裂隙较为

发育，这些断裂方向性较差，数量多。断层的规模有所减小，仅发育一些延伸距离短的次级断裂，主要为 NNW 向。在 T_7^4 界面断距较小，断距在 25-28m 左右。 T_7^6 界面岩溶破坏作用相对较少，主要以主干走滑断裂带控制下形成的断裂为主。主干走滑断裂多为左行左阶，局部少量左行右阶。在 T_7^6 界面张扭段与压扭段的规模增大，张扭段与压扭段断距普遍大于 25 m。 T_8^0 - T_7^8 界面主要为北北西向和北北东向 2 组不同走向的走滑断裂相交，相交角度在 30° - 40° 之间，表明与 S-N 方向的应力有关(图 10d, e)。 T_7^8 界面走滑断层的平移活动为主，张扭段与压扭段仅在局部区域发育。压扭段断距在 7-40 m 不等，张扭段断距在 12-38 m 范围内。

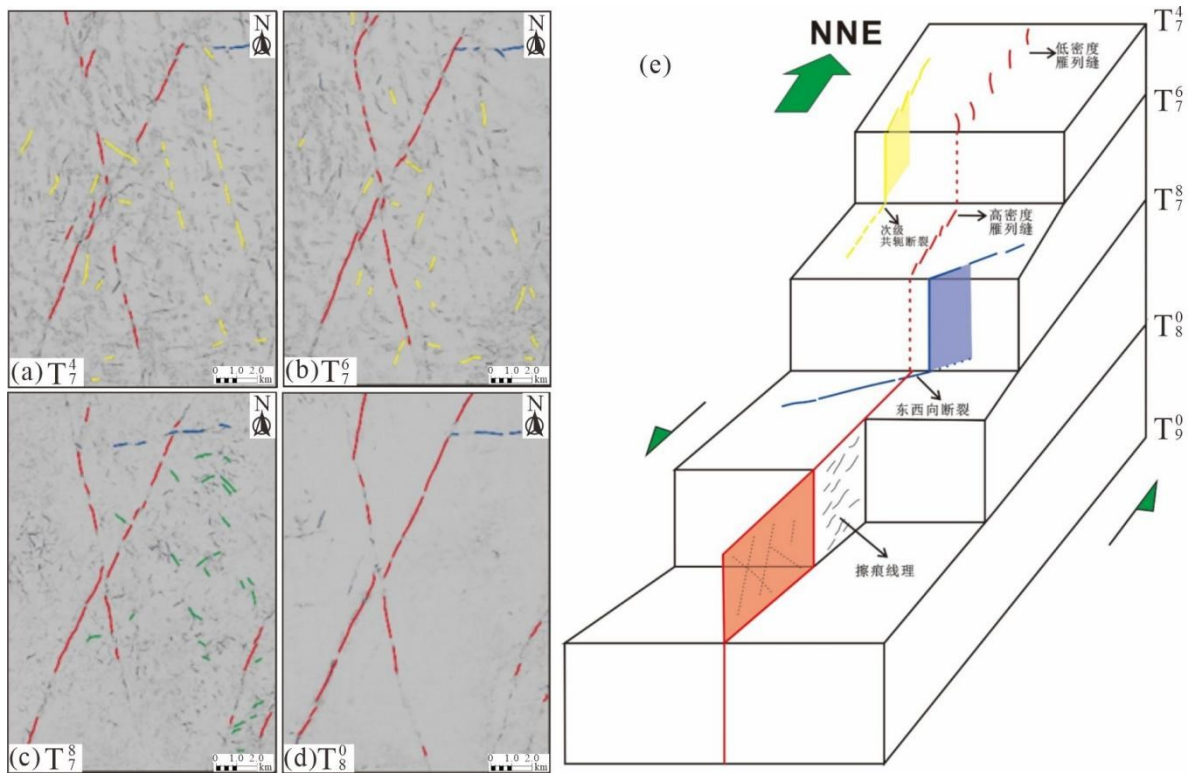


图 10 研究区不同层面大-中尺度断裂几何样式分布特征与断层发育空间模式图。a-d 红色线段代表大尺度断裂，黄、绿、蓝色分别代表不同层位中尺度断裂，灰色代表小尺度断裂

Figure 10 Distribution characteristics of large-to-medium-scale fracture geometric patterns and spatial development models of faults at different horizons in the study area. (a-d) Red lines represent large-scale fractures, while yellow, green, and blue lines denote medium-scale fractures at different horizons, and gray lines indicate small-scale fractures.

根据走滑断裂剖面特征，可以分为正花状、负花状和直立三种构造样式(图 11)。花状构造主要集中分布在奥陶系一间房组和鹰山组地层之中。直立状构造样式的规模比花状构造样式小，多分布于次级断裂或花状构造样式边缘。

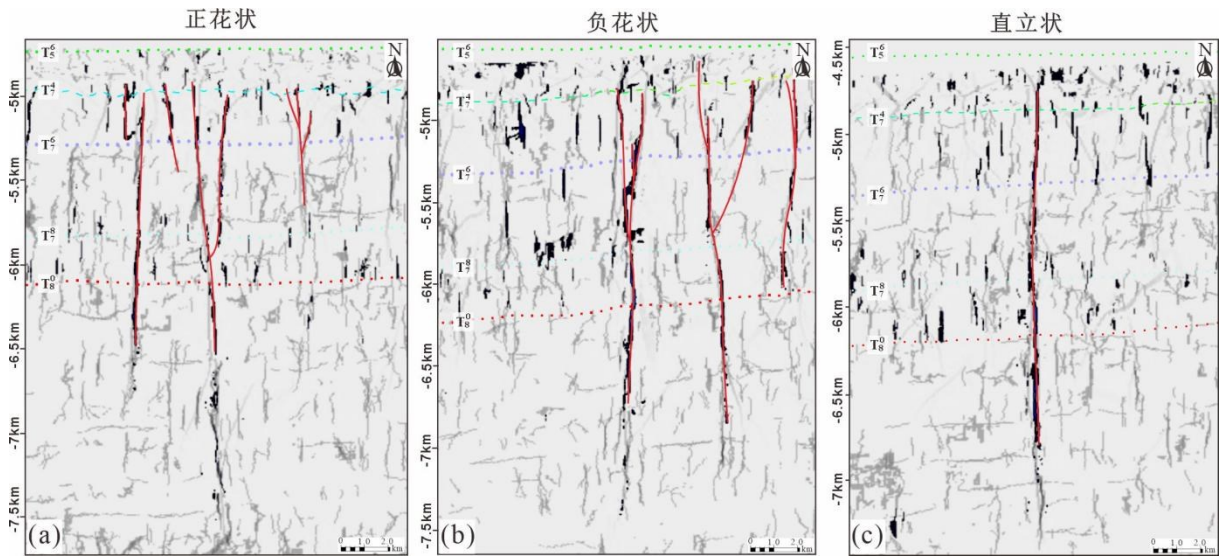


图 11 塔河地区大尺度、中尺度分级分类断裂识别代表性的走滑构造样式，暗色为识别出的大尺度断裂，浅灰色代表识别中的中尺度断裂。(a)正花状构造；(b)负花状构造；(c)直立状构造。

Figure 11. Representative strike-slip structural styles of large-scale and medium-scale classified fractures identified in the Tahe area. Dark lines represent identified large-scale fractures, while light gray lines denote medium-scale fractures under identification.(a) Positive flower structure; (b) Negative flower structure; (c) Vertical structure.

走滑断裂带内部裂缝密集发育，断裂附近裂缝的分布具有明显的规律性。构造不同部位裂缝的数量呈现明显的差异，裂缝整体上随远离断裂的距离增加而变化，在超过一定范围后裂缝数量出现波动减少趋势。裂缝走向以 NE-SW、NW-SE 和 NNE-SSW 向为主，倾向为 NNW、NE 和 SEE，倾角多为大于 70° 。近 NNE 向断裂附近的裂缝数量明显高于近 NNW 向断裂的裂缝数量(图 12)。

塔河地区不同尺度断裂与裂缝的识别结果呈现出显著的区带性分布特征：大、中尺度断裂主要集中分布于工区南部，与加里东期北倾逆冲断裂带的构造背景密切相关；而

中小尺度裂缝及缝洞体则在全区普遍发育，但受岩溶古地貌控制呈现“北密南疏”的分布格局(图 13a)。通常情况断裂两侧两盘活动性存在差异，将活动性强的一侧称为主动盘，相对静止的一侧称为被动盘。与被动盘相比，主动盘往往岩石破裂更彻底，具有更高的裂缝密度，且油气充注更丰富(黄诚等，2022；张子隆等，2023)。根据本工区走滑断裂的主、被动盘和裂缝发育的差异性可知，裂缝主要分布在东侧盘(图 13b-d)，暗示断裂东侧盘活动性强于西侧盘，是活动的主动盘。在主干走滑断裂带外围发育高角度裂隙，主要沿平行断面的方向发育。裂缝带在断裂上部闭合较好，断裂下部及边缘裂缝闭合较差。

塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层天然裂缝可分为构造裂缝、表生裂缝、成岩裂缝和复合成因裂缝(Yang et al., 2024)。本研究发现构造裂缝在工区占据主导地位，其中以剪切裂缝占比最高，垂直缝和高角度缝居多，缝宽较小。构造裂缝对油气富集的作用显著，主要扮演着重要储集空间和主要渗流通道的角色(赫俊民等，2019；韩鹏远等，2024)。在T₇⁴界面局部剥蚀区多发育复合成因裂缝，这些裂缝是先期成岩、表生作用下形成的裂缝，并在后期构造应力作用下沿先期已形成的应力薄弱面优先破裂，进一步扩展。

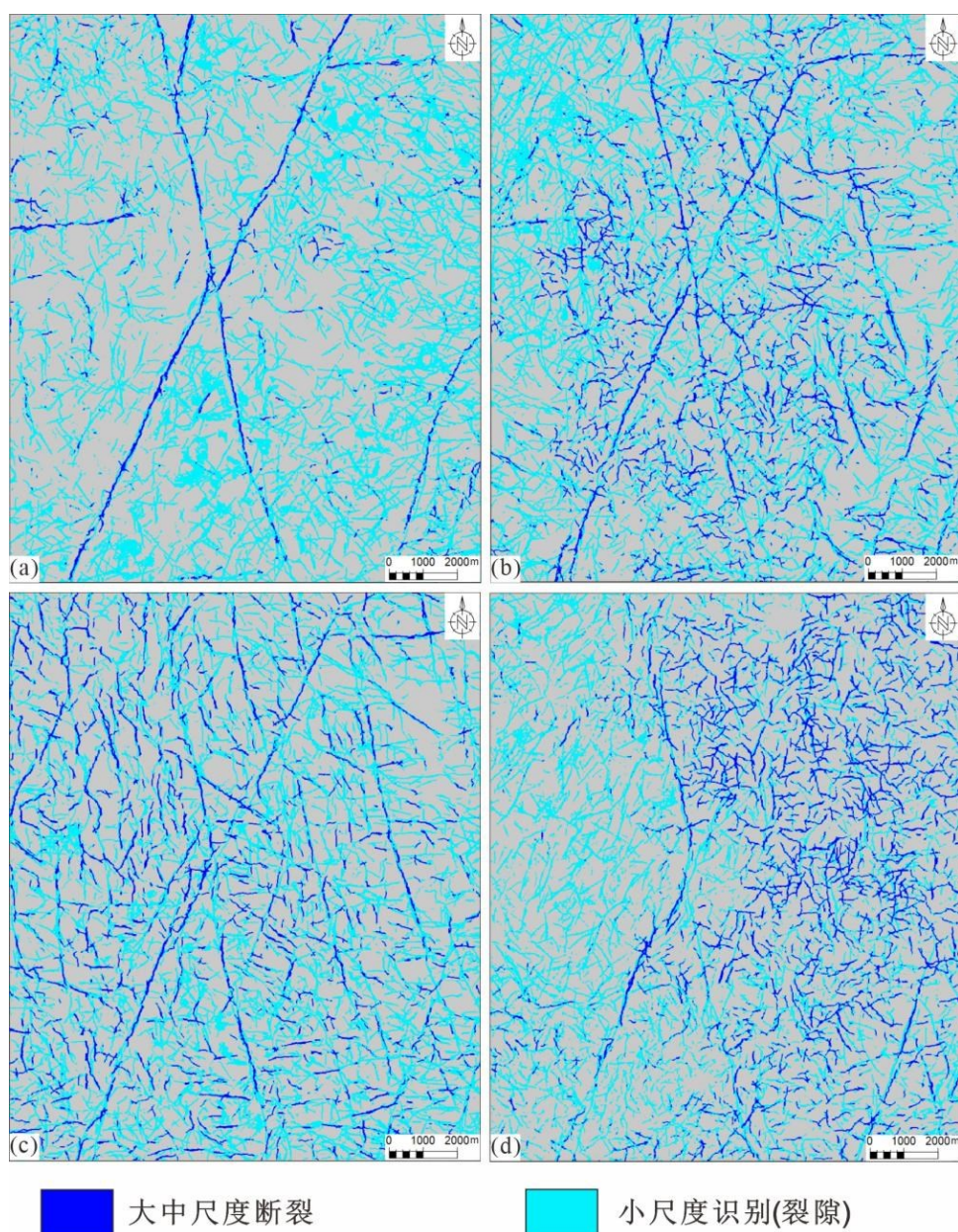


图 12 研究区分级分类地震属性融合识别断裂和裂隙不同平面分布特征。(a)T80 界面；(b)T78 界面；(c)T76 界面解释；(d) T74 界面。

Figure 12. Planar distribution characteristics of fractures and fissures identified through hierarchical classification and seismic attribute fusion in the study area.(a) T80 interface; (b) T78 interface;(c) T76 interface interpretation;(d) T74 interface.

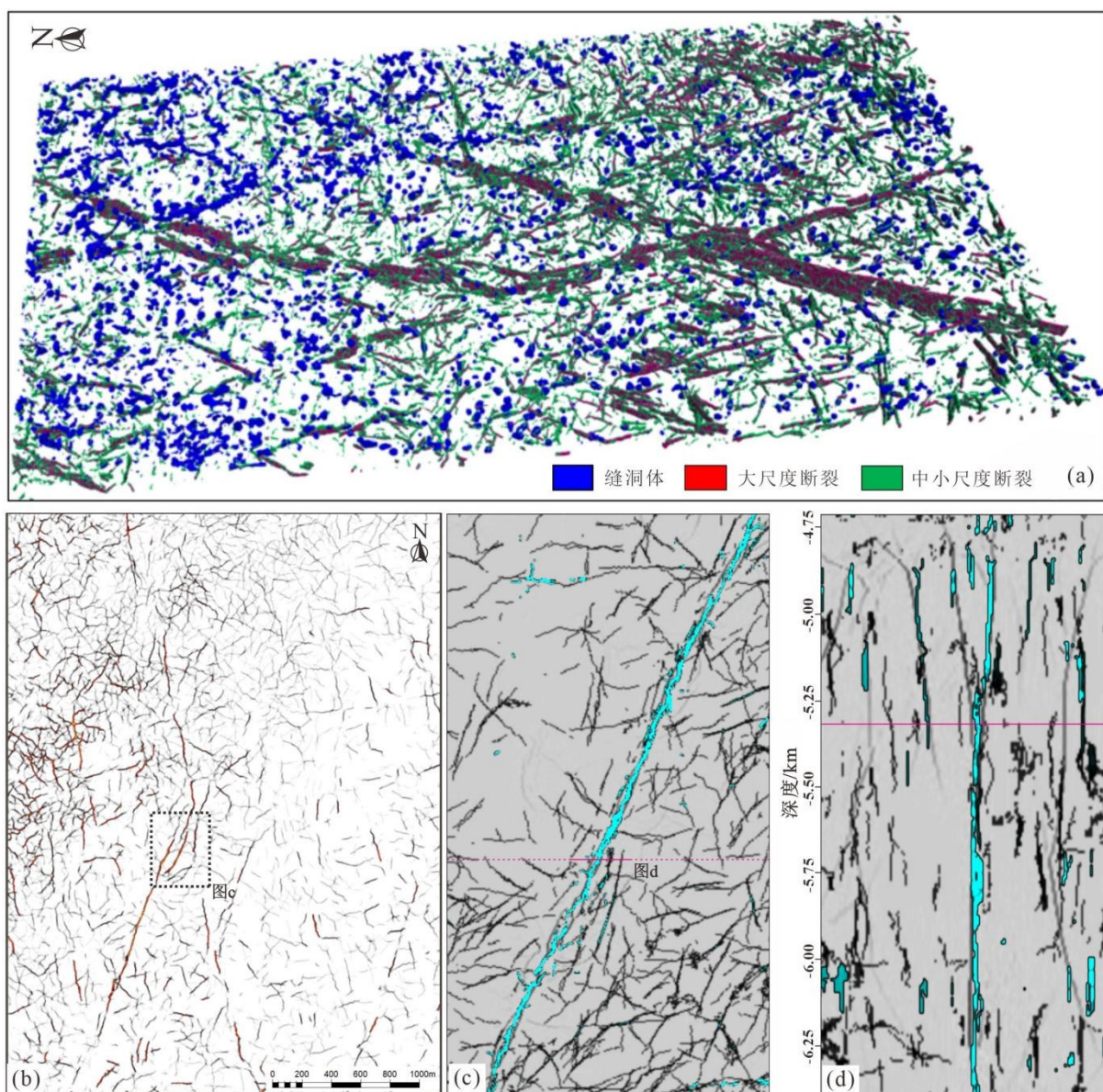


图 13 (a)不同尺度裂缝地震识别效果展示；(b)表示图(c)的位置；平面(c)和剖面(d)断裂东侧裂隙数量明显高于西侧。

Figure 13. (a) Demonstration of different scale fracture seismic identification results; (b) indicates the location of figure (c); Both the planar view (b) and cross-section (c) show that the fracture density on the eastern side is significantly higher than that on the western side.

5 讨论

5.1 分级分类地震识别技术评价

分级分类断裂识别与预测根据断裂大、中、小尺度延伸规模采用针对性的技术，充分利用相应敏感地震属性(相干、曲率、结构张量等)进行断裂识别(崔立杰等, 2012; 梁志强等, 2019; 唐世伟等, 2020)。一般大尺度断裂采用第三代相干技术、构造导向滤波等, 结合三维地震剖面清晰刻画主干断裂的几何形态(李飞跃等, 2023); 中尺度断裂一般采用曲率属性和蚂蚁体追踪技术, 识别地层弯曲特征及次级断裂网格(刘群等, 2013; 魏天罡等, 2024); 小尺度裂缝通常采用最大似然属性(likelihood)、叠后分频聚焦技术和纹理分析(Li et al., 2024)。

本研究利用断面增强、多尺度相干、地震能量的结构张量等多种属性方法可实现大尺度断裂—裂缝的边界刻画和内幕识别。地震能量的梯度结构张量通过特征值分解量化断裂的梯度能量分布, 其第二特征值(λ_2)及组合属性对断裂轮廓的敏感度极高。在塔河油田奥陶系碳酸盐岩区, GST 第二特征值的高值区与“串珠状+杂乱”强反射异常区高度吻合, 能有效圈定断裂溶蚀边界(图 9, 张晟等, 2022; Lv et al., 2024)。通过张量薄化对梯度向量场进行平滑处理, 结构张量能够有效压制噪声并保留重要的地质信息(崔正伟等, 2021)。本研究中地震能量的梯度结构张量薄化技术与 AFE 相干属性、likelihood 属性融合, 形成“外轮廓+内模”多尺度断裂裂缝刻画技术, 实现不同尺度断裂裂缝的三维立体雕刻, 适用于塔河地区深层复杂地质构造的环境开展缝洞体表征。

利用 AFE 相干加强属性和深度学习技术获得不同级别的中尺度裂缝发育体的预测结果。其中基于 U-Net 的 CNN 网络通过合成地震模型训练, 通过训练好的模型, 能够自动识别和追踪断层在不同层面的延伸, 从而确保断层预测的纵向连续性, 以减少人工操作的需求(卢志强等, 2018)。利用叠后 likelihood 属性可预测小尺度裂缝空间展布。最终借助深度前馈神经网络进行多属性体融合, 形成了一套针对不同级别裂缝的叠后地震预测技术。从工区 T74-T80 界面大尺度断裂的形态比较清晰, 平面展布特征符合区域基本构造规律。中小尺度断裂比较清楚, 微小断裂及裂缝沿着大尺度断裂带发育, 与实际钻井结果比较一致, 中小尺度断裂识别准确度提高 15%以上。

多种地震属性的融合在断裂识别中已有广泛应用。例如 RGB 分频混色技术可以直观展示多属性信息, 增强地质特征的可视化效果, 在塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层取得较好成效(王震等, 2011; 杨玉杰等, 2013)。然而, 多数地震属性融合技术具有明显的局限性和多解性, 例如, RGB 融合只能处理三种或四种属性, 无法处理高维数据, 通常 RGB 技术需要依赖主成分分析(PCA)降维, 对融合前属性需要进行优选(李婷婷等, 2015; Yang et al., 2024)。已有的多属性融合技术多数基于统计特征, 开展无监督机器学习

习，虽然能全面挖掘地震信息，但缺乏井控数据约束时，结果多解性强。

深度前馈神经网络通过端到端的学习机制，突破了传统线性融合的局限，在地质条件复杂、数据多源异构的条件下有效提高断裂预测精度(Ronneberger et al., 2015; Wu et al., 2019; 丰超等, 2023)。例如，准噶尔盆地页岩油断层密度预测中，三层 DFNN 以 5 种地震属性为输入，断层密度预测误差控制在 8%以内(Wu et al., 2019)。在煤矿导水裂隙带发育特征及其演化规律研究中，以漏失量为监督数据采用深度前馈神经网络方法融合多种地震属性，确定出采动覆岩结构破坏和导水裂隙带的三维空间范围、形态特征、垂向岩石破坏程度及导水裂隙带发育规律(袁峰等, 2019)。本研究中融合了大尺度张量薄化属性、中尺度 AFE 相干加强属性，小尺度 likelihood 属性，实现了断裂系统的全尺度刻画。利用深度前馈神经网络可以融入先验信息的优势，将测井“硬”数据作为地震数据解释的约束，预测结果与地下真实情况更吻合。塔河油田研究案例显示预测结果与测井解释吻合率提高 20%以上。

5.2 塔河地区多尺度断裂的地质意义

本研究通过分级分类的地震多属性融合技术，系统识别了不同尺度的断裂系统。研究区断裂系统可划分为大、中、小三个尺度。大尺度断裂延伸距离长(>3 km)，陡直切割寒武系-奥陶系地层，构成油气垂向运移的优势通道，并控制深层溶洞储层的发育(如“串珠状”反射)。中尺度断裂呈共轭 X 型或雁列式分布，形成花状构造，增强了储层的非均质性，并促进裂缝-溶洞系统的沟通。小尺度裂缝密集分布于断裂主动盘(东侧)，可能是油气高效渗流的关键路径(Zeng et al., 2021)。相较于前人研究，本工作首次将大、中、小尺度断裂进行分级融合，明确了不同尺度断裂的空间配置关系，详细刻画了主干走滑断裂与次级裂缝的共轭分布。同时利用多地震属性融合显著提高了中小尺度断裂的识别精度，井间检验连通性分析吻合率达 85%，减少了多解性。证实主动盘(东侧)裂缝更发育，且与注水/注气动态响应高度相关，为剩余油挖潜和开发方案优化提供了直接依据(Malozyomov et al., 2023)。针对大尺度断裂，预测结果与实际钻井揭露的断裂位置吻合，基于此优化部署的 7 口开发井初期平均单井日产油达 58 吨，较之前未应用分类分级预测技术的井组增产 16%。根据中尺度断裂预测结果，调整注采井网使水驱控制程度由 62%提升至 78%。利用小尺度裂缝识别成果融合深度学习与动态生产资料，指导完成的水平井钻遇有效裂缝段长度平均增加 2.3 倍，充分证明了其在复杂碳酸盐岩油藏高效开发中的技术先进性。

6 结论

本研究针对塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层多尺度断裂预测的难题，通过正演模拟、属性优化与机器学习融合，建立了分类分级的断裂预测技术体系。正演模拟表明，缝洞体地震反射异常宽度普遍大于实际地质体(放大效应达 20–80 m)，导致常规相干、蚂蚁体等属性在溶洞边界形成假断裂信号，且断裂连通性被高估。大尺度破碎-溶蚀断裂(>20 m)的“串珠状”强反射与中、小尺度断裂的弱反射特征差异显著，需采用差异化预测策略。大尺度断裂预测中，基于梯度结构张量薄化的方法通过特征值分解与倾角约束，将断裂面归位至溶洞异常中心，解决了传统属性“双轨”假象问题。中尺度断裂通过 AFE 相干属性与 U-Net 深度学习的结合，纵向连续性提升 40%以上，有效识别了同相轴错断与扰动。小尺度裂缝利用 likelihood 属性量化地震不连续性，结合构造导向滤波，预测结果与成像测井裂缝密度吻合度显著提升。

深度前馈神经网络(DFNN)以钻井漏失量、成像测井数据为约束，融合张量薄化、AFE、Likelihood 等多属性，显著降低了断裂预测的多解性。融合模型在塔河工区的应用显示，断裂主动盘(东侧)裂缝密度较被动盘高，表明东盘活动性强。研究区发育 NNE-NNW 向共轭走滑断裂系统，大尺度断裂延伸超 3 km，切穿了寒武系-奥陶系地层。中尺度断裂形成花状构造，控制局部缝洞单元分隔。小尺度裂缝沿主干断裂呈簇状分布，可以作为油气高效渗流的关键通道。研究建立的“多尺度断裂分级预测方法”可推广至类似复杂断控型油气藏，为断裂带油气富集规律研究、水平井轨迹设计和压裂改造策略制定提供理论支撑。

中文参考文献

- Benardos, P.G., Vosniakos, G.C., 2007. Optimizing feedforward artificial neural network architecture. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 20(3): 365-382.
- Chen, G., Qi H., Yu, J., Li W., Xian, C., Lu, M., Song, Y., Wu, J., 2023. Application of a multi-layer feedforward neural network to predict fracture density in shale oil, Junggar Basin, China. *Frontiers in Earth Science*, 11:1114389.
- Li, H. L., Pan, H., Gao, J. H., Gui, J. Y., 2024. Post-stack fracture prediction technique based on improved phase decomposition. *Journal of Geophysics and Engineering*, 21(5): 1499-1510.

- Li, Y. Q., Sun, Wei, H. H., Song, S. H., 2019. Architectural features of fault-controlled karst reservoirs in the Tahe oilfield. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 181, 106208.
- Lv B.N., Chen X.H., Qie C.C., Jiang W., 2024. Integrated characterization of deep karsted carbonates in the Tahe Oilfield, Tarim Basin. *Journal of Geophysics and Engineering*, 21:668-684.
- Malozyomov, B.V., Martyushev, N.V., Kukartsev, V.V., Tynchenko, V.S., Bukhtoyarov, V.V., Wu, X., Tyncheko, Y.A., Kukartsev, V. A., 2023. Overview of Methods for Enhanced Oil Recovery from Conventional and Unconventional Reservoirs. *Energies*, 16(13): 4907.
- Satinder, C., Kurt, J. M., 2010. Integration of coherence and volumetric curvature images. *The Leading Edge*, 29(9): 1092-1107.
- Wei, X. L., Zhang, C. X., Kim, S. W., Jing, K. L., Wang, Y. J., Xu, S., Xie, Z. Z., 2022. Seismic fault detection using convolutional neural networks with focal loss. *Computers & Geosciences*, 158:104968.
- Xie, Q. H., Zhao, C. D., Rui, Z. F., Guan, S. J., Zheng, W. T., Fan, H. C., 2022. An improved ant-tracking workflow based on divided-frequency data for fracture detection. *Journal of Geophysics and Engineering*, 19(5): 1149-1162.
- Wu, X., Liang, L., Shi, Y., et al., 2019. FaultSeg3D: using synthetic datasets to train an end-to-end convolutional neural network for 3D seismic fault segmentation. *Geophysics*, 84: 1-36.
- Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T. 2015. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. In: Navab, N., Hornegger, J., Wells, W., Frangi, A. (eds) *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2015*. MICCAI 2015.
- Yang, J., Lu, R. Q., et al., 2024. MultiURNNet for 3D seismic fault attributes fusion detection combined with PCA. *Journal of Applied Geophysics*, 221: 105296.
- Yang, D., Ma, H., Ren, W., et al., 2024. Fracture identification and characterization of Ordovician carbonate rock reservoir in block B of the Tahe oilfield. *Carbonates Evaporites*, 39:40-48.
- Zhang, Y. D., Munnecke, Axel., 2016. Ordovician stable carbon isotope stratigraphy in the Tarim Basin, NW China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 458: 154-175.
- Zhang, X. X., Yu, J. J., Li, N. Y., Wang, C., 2021. Multi-scale fracture prediction and characterization method of a fractured carbonate reservoir. *Journal of Petroleum*

- Exploration and Production, 11: 191-202.
- Zeng, L. B., Lyu, W. Y., Zhang, Y. Z., Liu, G. P., Dong, S. Q., 2021. The Effect of Multi-Scale Faults and Fractures on Oil Enrichment and Production in Tight Sandstone Reservoirs: A Case Study in the Southwestern Ordos Basin, China. *Frontiers in Earth Science*, 9:10-25.
- 薄昕, 徐旺林, 陈小宏, 2022. 基于局部熵的 LP-PCNN 多属性融合裂缝预测方法. *石油物探*, 61(5): 821-829.
- 陈国飞, 石颖, 杨会东, 2023. 基于优势低频带地震数据的属性融合断层识别方法. *地球物理学报*, 66(3): 1232-1243.
- 陈俊安, 陈海东, 龚伟, 2022. 深度学习与边缘增强相结合的断裂综合检测技术—顺北地区超深走滑断裂检测应用实例. *石油地球物理勘探*, 57(06):1304-1316,1256.
- 崔立杰, 何幼斌, 王锦喜, 王振卿, 胡再元. 基于层面的地震曲率属性在碳酸盐岩断裂预测中的应用—以塔里木盆地塔北某区块为例. *岩性油气藏*, 2012, 24(1): 92-96.
- 崔正伟, 程冰洁, 徐天吉, 牛双晨, 2021. 基于构造导向滤波与梯度结构张量相干属性的储层裂缝预测方法及应用. *石油地球物理勘探*, 56(3): 555-563
- 丰超, 潘建国, 李闯, 姚清洲, 刘军, 2023. 基于深度神经网络的断层高分辨率识别方法. *地球科学*, 48(8):3044-3052.
- 韩鹏远, 丁文龙, 杨德彬, 张娟, 马海陇, 王生晖, 2024. 塔里木盆地塔河油田 S80 走滑断裂发育特征及其对奥陶系储层的控制作用. *石油与天然气地质*, 45(3):770-786
- 何治亮, 彭守涛, 张涛, 2010. 塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素与复合联合成因机制. *石油与天然气地质*, 31(6): 743-752.
- 赫俊民, 王小垚, 孙建芳, 2019. 塔里木盆地塔河地区中-下奥陶统碳酸盐岩储层天然裂缝发育特征及主控因素. *石油与天然气地质*, 40(5): 1022-1030.
- 黄诚, 云露, 曹自成, 2022. 塔里木盆地顺北地区中-下奥陶统“断控”缝洞系统划分与形成机制. *石油与天然气地质*, 43(1): 54-68.
- 李飞跃, 王涛, 曾清波, 2023. 基于构造导向的高清似然属性在白云凹陷深层断裂预测中的应用. *石油物探*, 62(1): 163-172.
- 李海英, 刘军, 龚伟, 黄超, 任丽丹, 2020. 顺北地区走滑断裂与断溶体圈闭识别描述技术. *中国石油勘探*, 25(3): 107-120
- 李鹏飞, 崔德育, 田浩男, 2017. 塔里木盆地塔北地区 X 区块断溶体刻画方法与效果. *石*

- 油地球物理勘探, 52(S1):189-194+13.
- 李婷婷, 王钊, 马世忠, 王昭, 袁子龙, 2015. 地震属性融合方法综述.地球物理学进展, 30(1):378-385.
- 李占东, 张丽双, 李阳, 2017. 基于多次迭代属性融合技术的河道砂刻画—以大庆油田扶余油层 Z 区为例. 地球物理学进展, 32(3): 1161-1168.
- 梁志强, 2019. 不同尺度裂缝的叠后地震预测技术研究. 石油物探, 58(5): 766-772.
- 刘冰雷, 赵永刚, 张银涛, 周飞, 谢舟, 姚超, 丁留洋, 赵龙飞, 尹帅, 孙冲, 2025. 塔里木盆地阿满过渡带东部主干走滑断裂变形特征及断溶储集体发育. 地质科学, 60(2): 360-377.
- 刘军, 任丽丹, 李宗杰, 2017.塔里木盆地顺南地区深层碳酸盐岩断裂和裂缝地震识别与评价.石油与天然气地质, 38(04):703-710.
- 刘磊, 李伟, 杜玉山, 2024.基于 Stacking 集成学习的分频地震属性融合储层预测方法. 石油地球物理勘探, 59(01):12-22.
- 刘群, 李海英, 邓光校, 2013. 地震断裂检测技术在塔河油田南部碳酸盐岩储层及油藏预测中的应用. 石油与天然气地质, 34(2): 202-206.
- 卢志强, 王力, 杨瑞召, 2018. 基于相干的精细断裂刻画技术在顺北地区的应用. 天然气勘探与开发, 41(3): 20-25.
- 马德波, 赵一民, 张银涛, 2018. 最大似然属性在断裂识别中的应用-以塔里木盆地哈拉哈塘地区热瓦普区块奥陶系走滑断裂的识别为例. 天然气地质学, 29(6): 817-825.
- 马灵伟, 2014.塔中顺南地区缝洞型储层地震响应特征及识别模式研究.中国地质大学.
- 唐世伟, 张向君, 2020.基于优选区域的地震属性融合重构技术.物探化探计算技术, 42(5):603-608.
- 王健, 徐加放, 赵密福, 2023. 基于神经网络的钻井液漏失裂缝宽度预测研究. 煤田地质与勘探, 51(9): 81-88
- 王震, 邓光校, 2011.分频混色技术在塔河油田碳酸盐岩储层预测中的应用.中国地球物理, 639:82-89
- 王震, 文欢, 邓光校, 2019.塔河油田碳酸盐岩断溶体刻画技术研究与应用.石油物探, 58(01):149-154.
- 王志伟, 符力耘, 刘军, 2023. 塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩输导体系三维地震属性

- 多尺度表征及连通性分析. 地球物理学报, 66(1): 83-94
- 魏天罡, 张珩, 李福强, 王波, 2024. 多尺度曲率在渤海 K 油田断裂解释中的应用. CT 理论与应用研究, 33(6):773-780
- 吴正阳, 莫修文, 柳建华, 2018. 裂缝性储层分级评价中的卷积神经网络算法研究与应用. 石油物探, 57(5): 618-626.
- 谢鹏飞, 侯加根, 汪彦, 2023. 碳酸盐岩缝洞型储层多元信息融合建模方法在塔河油田十二区奥陶系油藏的应用. 中国石油大学学报(自然科学版), 47(3): 1-14.
- 薛娇, 蔡成国, 2022. 裂缝型储层叠前地震预测理论与方法. 中国地质大学出版社
- 杨德彬, 何新明, 张恒, 汪彦, 刘遥, 王明, 2024. 塔河油田主体区奥陶系表层岩溶带智能识别及缝洞发育规律. 石油学报, 45(2):374-389
- 杨晶, 丁仁伟, 林年添, 2022. 基于深度学习的地震断层智能识别研究进展. 地球物理学进展, 37(1): 298-311.
- 杨玉杰, 王希平, 杨春琴, 2013. RGB 分频混色技术在塔河油田的应用. 新疆地质, 31(S1):79-81.
- 姚辉, 尹慧超, 尹尚先, 2023. 底板突水危险性评价研究进展. 煤炭科学技术, 51(S2): 1-9.
- 袁峰, 申涛, 谢晓深, 马丽, 汶小岗, 2021. 基于深度学习的地震多属性融合技术在导水裂隙带探测中的应用. 煤炭学报, 46(10):3234-3244
- 张晟, 李亚林, 肖又军, 郑多明, 袁源, 冯磊, 2022. 利用梯度结构张量刻画碳酸盐岩缝洞体边界. 石油地球物理勘探, 57(4): 907-915.
- 张银涛, 常少英, 谢舟, 2025. 超深层“断滩体”概念、地质模式及地震表征技术方法——以塔里木油田为例. 断块油气田, 32(01): 108-117
- 张长建, 蒋林, 汪彦, 曾清勇, 马雪健, 2024. 塔河油田良里塔格组迷宫型岩溶洞穴系统发育特征. 新疆石油地质, 45(5):522-532
- 张子隆, 杨威, 王千军, 2023. 走滑断裂不同结构单元输导、运、聚特性及其差异控藏模式: 以准噶尔盆地乌尔禾沥青矿地区为例. 断块油气田, 30(3): 424-433.
- 赵军, 冉琦, 朱博华, 2024. 基于前馈神经网络井控多属性融合的断裂识别方法. 物探与化探, 48(4): 1045-1053.
- 邹雅铭, 刘道理, 黄媛, 2023. 叠后多属性在潜山断裂系统描述中的应用研究. 石油科学通

报, 8(06):725-737.