

引用格式:杨艳,刘志敏,王日成,等.页岩油裂缝预测与应用:以苏北盆地高邮凹陷花庄地区阜宁组二段为例[J].油气藏评价与开发,2026,16(4):800-806.

YANG Yan, LIU Zhimin, WANG Richeng, et al. Prediction and application of shale oil fractures: A case study of second member of Funing Formation in Huazhuang area, Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2026, 16(4): 800-806.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024353

页岩油裂缝预测与应用

——以苏北盆地高邮凹陷花庄地区阜宁组二段为例

杨艳¹, 刘志敏¹, 王日成¹, 姜传芳¹, 吴雪刚¹, 周建军², 孙雅雄¹

(1. 中国石化江苏油田分公司勘探开发研究院, 江苏 扬州 225009; 2. 北京软岛科技有限公司, 北京 100083)

摘要: 苏北盆地高邮凹陷花庄地区阜宁组二段(以下简称阜二段)厚层页岩被断层切割成若干断块,形成了断裂发育、断块狭窄的复杂断块型页岩油藏。花庄有利区阜二段页岩平均埋深3 800 m,传统地震技术难以识别断距不大于30 m的微断层及定量刻画裂缝发育区。针对上述挑战,创新融合蚂蚁体追踪、最大似然属性分析、弥散裂缝预测及离散裂缝网络(DFN)建模技术,构建了多尺度断层分级描述与裂缝定量预测方法。研究基于断距与延伸距离对断层进行分级,针对断距不大于30 m的微断层,通过正演模拟与多属性(相干体、曲率体、最大似然体、蚂蚁体)联合分析,明确阜二段微断层识别关键标志,认为蚂蚁体对微断层识别效果最优,但需结合区域断裂特征约束以降低地层倾角与低信噪比导致的多解性。针对天然裂缝预测,采用断裂增强滤波与各向异性扩散滤波预处理提升地震数据质量,利用DFN建模刻画裂缝产状与空间分布,为压裂设计与微地震异常分析提供三维地质模型。研究表明:多技术融合的断层分级与裂缝定量预测方法可有效支撑差异化井型部署;微断层动态识别与轨迹优化是保障“甜点”高钻遇率的关键;天然裂缝模型为压裂参数动态调整提供科学依据。研究成果指导花庄地区多井型页岩油井位部署,通过地质-工程一体化优化井轨迹与压裂方案,实现复杂断块区“甜点”钻遇率大于95%,单井估算最终可采储量(EUR)突破 3×10^4 t,断块型页岩油井勘探效果显著提升。

关键词: 高邮凹陷;阜二段;复杂断块型;页岩油;微断层;断裂预测

中图分类号:TE132

文献标识码:A

Prediction and application of shale oil fractures: A case study of second member of Funing Formation in Huazhuang area, Gaoyou Sag, Subei Basin

YANG Yan¹, LIU Zhimin¹, WANG Richeng¹, JIANG Chuanfang¹, WU Xuegang¹, ZHOU Jianjun², SUN Yaxiong¹

(1. Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Jiangsu Oilfield Company, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;
2. Beijing Softland Times Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: The thick shale layers of the second member of the Funing Formation (hereafter referred to as E_1f^2) in the Huazhuang area of the Gaoyou Sag, Subei Basin, are dissected by faults into multiple narrow fault blocks, forming a complex fault-block shale oil reservoir characterized by intensive fault development and narrow fault blocks. The shale of E_1f^2 in the favorable Huazhuang area has an average burial depth of 3 800 m, where conventional seismic techniques fail to identify micro-faults with throws less than 30 m or quantitatively characterize fracture-developed zones. To address these challenges, this study innovatively integrated ant tracking, maximum likelihood attribute analysis, dispersion-based fracture prediction, and discrete fracture network (DFN) modeling to establish a multi-scale fault classification and quantitative fracture prediction method. Faults were classified based on fault throw and lateral extent. For micro-faults (throw ≤ 30 m), forward modeling combined with multi-attribute joint analysis (coherence, curvature, maximum likelihood, and ant tracking) identified key seismic indicators for micro-fault recognition in E_1f^2 . Ant tracking was found to provide the best performance for micro-fault detection, but it required constraints from regional fault characteristics to reduce uncertainties caused by steep formation dips and low signal-to-noise ratios. For natural fracture prediction, fracture-enhancing filtering and anisotropic diffusion filtering were applied

收稿日期:2025-04-25。

第一作者简介:杨艳(1981—),女,本科,高级工程师,从事油气勘探研究。地址:江苏省扬州市维扬路188号江苏油田勘探开发研究院,邮政编码:225009。E-mail: yangyan.jsyt@sinopec.com

通信作者简介:孙雅雄(1993—),男,博士,副研究员,从事非常规油气地质理论与评价研究。地址:江苏省扬州市维扬路188号江苏油田勘探开发研究院,邮政编码:225009。E-mail: sunyaxiong2015@163.com

基金项目:国家科技重大专项“渤海湾超级盆地油气富集规律与新领域勘探技术”(2024ZD1400100);中国石化科技开发部项目“东部断陷盆地页岩储层差异演化机制及建模”(P24207);中国石化江苏油田分公司科研课题“苏北盆地阜二段烃源岩生排烃特征与页岩油目标优选”(JS24038)。

to preprocess seismic data and improve data quality. DFN modeling was then used to characterize fracture occurrence and spatial distribution, providing a three-dimensional geological model for fracturing design and microseismic anomaly analysis. The results showed that the integrated fault classification and quantitative fracture prediction method effectively supported differentiated well-type deployment. Dynamic micro-fault identification and trajectory optimization were critical to ensuring a high “sweet spot” drilling encounter rate, exceeding 95%. Natural fracture models provided a scientific basis for the dynamic adjustment of fracturing parameters. Guided by these findings, multi-well-type shale oil well deployment in the Huazhuang area is optimized through geology-engineering integration of well trajectories and fracturing schemes, achieving a “sweet spot” drilling encounter rate greater than 95% in complex fault blocks, with single-well estimated ultimate recovery (EUR) exceeding 3×10^4 t, and significantly improving the exploration performance of fault-block shale oil wells.

Keywords: Gaoyou Sag; second member of Funing Formation; complex fault-block type; shale oil; micro-faults; fracture prediction

国际上页岩油开发聚焦连续型油藏,以“长水平井+大规模压裂”为核心技术,而中国东部陆相断陷盆地页岩油藏断层发育,不同级别断层、微断层和天然裂缝发育情况直接影响页岩油井位部署、水平井高效钻井和压裂缝网改造效果^[1-3]。目前广泛采用蚂蚁体追踪、地震属性分析及地质力学模拟对断块型页岩油中宏观断裂体系开展预测,对微断层及天然裂缝的精刻画仍是瓶颈,制约了复杂断块区开发进程^[4-5]。针对苏北盆地高邮凹陷复杂断块型页岩油藏^[6],创新融合蚂蚁体、最大似然体、弥散裂缝预测及离散裂缝网络(DFN)建模技术,构建裂缝综合预测方法,显著提升断距30 m及以下微断层的识别精度,并量化天然裂缝发育区的裂缝密度与方向性^[7],在三维地质建模基础上地质工程协同优化,为水平井小靶窗高效钻进及压裂风险防范提供有效支撑^[8-10]。

高邮凹陷北斜坡花庄地区是苏北盆地阜宁组二段(以下简称阜二段)页岩油勘探主力区^[11]。该区历经吴堡、真武、三垛、盐城4次构造运动,形成复杂断裂系统,其中吴堡和三垛运动对沉积格局影响显著。根据不整合面特征,地层垂向划分为下、中、上3个构造层。阜二段位于下构造层,受边界大断层控制,发育近东西向和北东向断层,形成断裂发育、断距差异、断块狭窄的断块型页岩油藏^[1,12-13]。

随着页岩油井的钻探实施,断层、微断层发育对页岩油水平井部署到钻井、压裂施工的影响逐渐显现^[14-15]。页岩油水平井开发“甜点”靶窗逐步精细化,聚焦至10~20 m小靶窗,微断层导致水平井轨迹频繁调整,靶窗钻遇率低。天然裂缝发育差异影响压裂缝网扩展,易造成井间窜扰,降低单井和井组的产能^[16-17]。

苏北盆地断裂发育,目的层埋深平均深度3 800 m,传统地震预测技术受分辨率限制难以识别微断层,更难以刻画裂缝发育区^[18-20]。需通过分级描述断层和定量预测裂缝,优化井位部署与压裂设计^[21-22]。研究中重点针对微小断层创新融合了蚂蚁体追踪、最大似然属性分析、弥散裂缝预测、DFN建模等多种手段,建立了复杂断

块区多尺度断层分级描述技术,系统分析花庄地区微断层及天然裂缝的分布规律,指导了花庄地区阜二段14口页岩油水平井的部署实施,保障了复杂断块页岩油水平井“甜点”钻遇率大于95%,实现了聚焦最优“甜点”层的千米水平井单井估算最终可采储量(EUR)超过 3×10^4 t,研究结果为断块型页岩油立体开发提供了更精准的地质依据。

1 断裂分级与微断层识别

苏北盆地高邮凹陷花庄地区阜二段为深湖相沉积,厚度280~350 m,根据层序单元、岩性、电性特征纵向上划分为I—V亚段。受吴堡期近东西向和北东向断层控制,花庄地区阜二段被切割为多个断块,依据断距和延伸距离对区域内的断层进行了精细分级(表1)。

表1 苏北盆地高邮凹陷北斜坡断层分级
Table 1 Fault classification of northern slope in Gaoyou Sag, Subei Basin

断层级别	断层断距/m	延伸距离/km	有利区内数量/条	密度/(条/km)
一、二级断层	>300	>10	1	
三级断层	>100~300	>5~10	14	0.6~0.8
四级断层	>50~100	>2~5	36	0.9~1.1
五级断层	>30~50	>1~2	>200	2.0~4.5
微断层	≤30	≤1	>200	2.0~4.5

阜二段断距大于50 m的四级以上断层在地震剖面上反射波组错断明显,三级断层延伸>5~10 km,四、五级断层延伸>1~5 km。而断距不大于30 m的微断层表现为同相轴微弱扭动,连续性差,同时受底部阜宁组一段(以下简称阜一段)砂体发育情况,识别难度大。

2 微断层识别与描述

2.1 基于正演模拟与相干体、曲率体的微断层识别

针对断距不大于30 m的微断层,采用正演模拟结合

地震属性分析(相干体、曲率体、最大似然体、蚂蚁体)进行识别^[23-24]。正演结果显示,微断层在地震反射上表现为同相轴微弱扭动,而阜一段砂体变化易形成“蚯蚓状”反射。阜二段内部识别微断层时应以Ⅲ亚段、Ⅳ亚段反射特征变化为判断依据,强连续性反射时内部波组可识别微断层。

利用花庄地区多套叠后时间域、深度域地震数据,以Ⅲ、Ⅳ亚段为目标层段提取相干体、曲率体、最大似然体、蚂蚁体等属性数据体开展阜二段微断层识别描述。

三维相干体属性切片揭示花庄地区断裂中,四级及以上断层断点清晰,主控断层走向与相干体异常吻合度高^[25]。而地震剖面上波组扭动型小断层在相干体上也有一定响应,但受分辨率限制横向延展性识别不足,同时火成岩发育区等资料品质差的区域发育密集次级断裂。因此,继续融合曲率体等多属性技术,从而提升断层及特殊地质体发育区的解释精度。

Ⅳ亚段最大正曲率切片四级以上断层的边缘检测能力较相干体显著增强,但受曲率算法敏感性限制,对断距不大于50 m的五级断层和微小断层存在平面响应特征模糊现象。现有曲率与相干属性技术在花庄地区主要适用于断距大于50 m的断层识别。

2.2 基于最大似然体与蚂蚁追踪的微断层精细刻画

针对花庄地区小尺度断裂系统精细刻画需求,采用最大似然体、蚂蚁体追踪等高空间分辨率与多属性融合的优势,有效增强微断层几何形态表征精度和弱信号的连续性追踪能力。

最大似然体技术基于地震道相似性属性,通过增强

相邻样点间的非连续性特征差异实现断裂强化成像,其概率值域与断裂发育程度呈正相关。相较于传统相干体与曲率属性,该技术在多尺度断裂的深—浅断点空间匹配性及断面几何形态表征方面展现出显著优势。从花庄地区HY1井区的最大似然体切片和过井剖面上显示,五级断层在最大似然体切片中呈现高概率连续响应(图1a),平面组合样式与剖面断点位置具有良好对应关系(图1b),但受算法对弱信号敏感性制约,裂缝发育区仍存在成像模糊现象。

蚂蚁追踪是新一代地震属性体处理技术,其核心原理是通过模拟蚁群智能搜索机制,在三维地震不连续性特征空间内实现断层轨迹的自适应追踪,具备多尺度断层分级解释能力,既能系统刻画大型断裂体系,又能通过概率引导的路径优化算法,在复杂噪声背景下有效识别断距小于20 m的弱信号断层。

通过设置蚂蚁追踪的边界、追踪偏差、步长、允许非法步数量、终止条件等追踪敏感度参数,在花庄地区中识别的微断裂信息较相干体、曲率体属性更丰富,剖面上(图2)断距5~30 m的微断层刻画清晰,与实钻吻合度高。

将相干体、多尺度曲率体、最大似然与蚂蚁追踪技术的适用性进行对比分析表明(表2):相干体与多尺度曲率体属性在区域断裂结构快速识别中具有显著优势;蚂蚁体对断距10~30 m微断层识别综合性能最优,尤其适用于水平井轨迹优化与压裂风险预警。但研究同时发现:当地层倾角较大、信噪比较低时,蚂蚁体参数敏感性显著增强,预测结果多解性大,需要结合相干体等区域断裂特征进行质控,从而更精准地支撑水平井设计与实施。

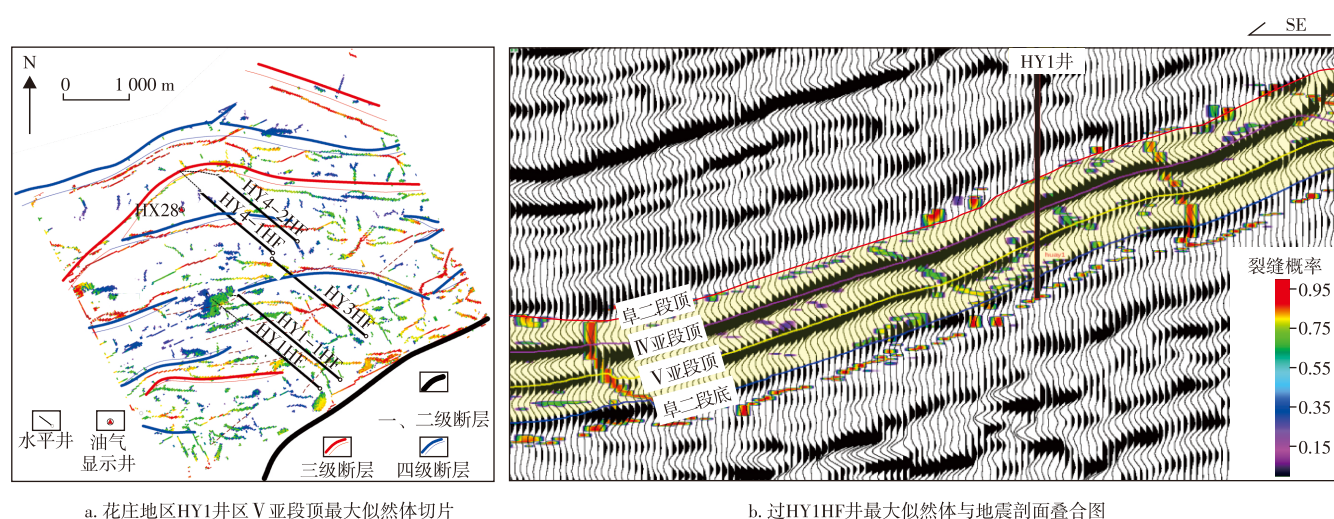


图1 苏北盆地高邮凹陷花庄地区HY1井区V亚段顶最大似然体平面切片与过井剖面

Fig. 1 Maximum likelihood attribute planar slice at top of sub-member V and well profile through well HY1, Huazhuang area, Gaoyou Sag, Subei Basin

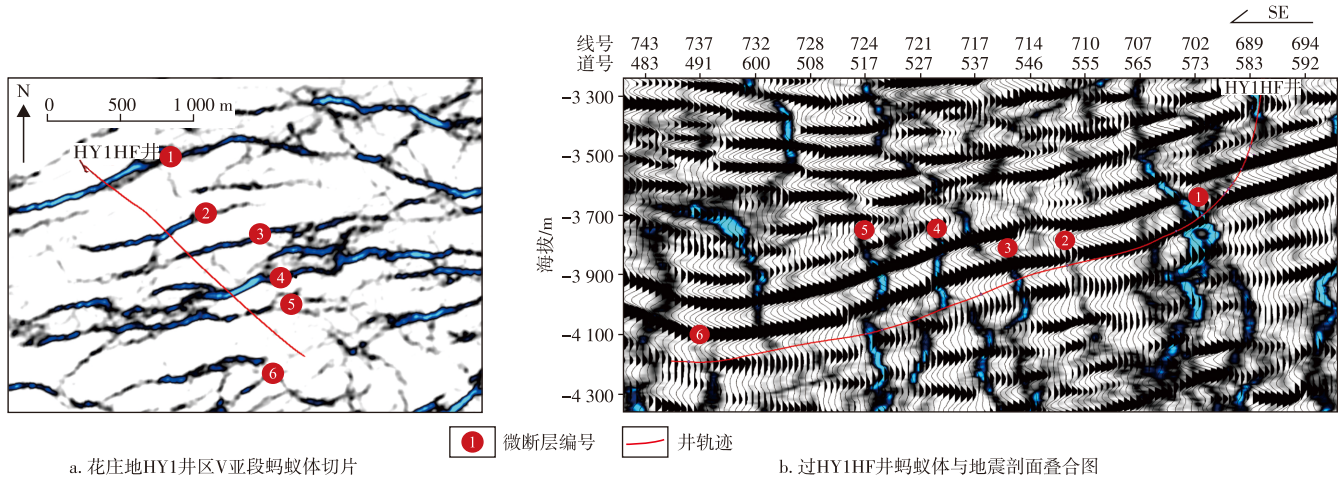


图2 苏北盆地高邮凹陷花庄地区过HY1HF井钻后蚂蚁体与地震剖面叠合图

Fig. 2 Overlay map of post-drilling ant tracking and seismic profile in well HY1HF, Huazhuang area, Gaoyou Sag, Subei Basin

表2 断层描述技术适用性对比				
Table 2 Comparison of applicability of fault description techniques				
类别	原理	优势	缺陷	适用性分析
相干体属性	利用相邻地震道的相似性描述地层和岩性的横向非均匀性	参数少、速度快	沿层切片解释痕迹较重	适用于大范围断裂快速分析
多尺度曲率体属性	曲线或曲面上任意一点的弯曲程度。地震资料中最大正曲率和最小正曲率对地质构造形变敏感	运算简单、速度快	参数多、输出成果多、适用于断层预测,结果受主观选择影响较大	适用于大范围断裂快速分析
最大似然体	基于相似属性,将相邻样点间相似性的对比关系放大,突出断裂成像	断层自动追踪,减少解释影响,运算速度快	断裂连续性较差,应用范围仅限于断层,大尺度裂缝刻画效果较差	小断层
蚂蚁体	凸出断裂线状构造特征的断裂结算	三维空间立体刻画小范围内速度快,受解释结果影响小	追踪参数多,不同参数对结果影响大,小尺度参数结果杂乱,无法表征裂缝发育方向及密度	微小断层及大尺度裂缝刻画

3 大尺度天然裂缝预测

针对页岩油对天然裂缝发育区的预测需求,尝试开展了以裂缝预处理为基础的弥散裂缝预测和DFN离散裂缝建模技术,以满足裂缝定量描述的工程“甜点”预测目标。

3.1 弥散裂缝预测

对花庄地区叠后地震资料开展断裂增强滤波处理和各向异性扩散滤波2项针对性的预处理,凸显地震数据的裂缝特征。预处理后整体剖面的信噪比得到提高,断块内层位反射更连续,断层断点更干脆,断裂特征更加清晰。基于原始数据提取的相干属性具有能量不均匀,连续性较差,延展规律性不强,部分区域呈杂乱状特征,且与地震呈现断点位置匹配不好(图3a)。而预处理后的相干属性显示阜二段裂缝异常特征清楚,和地震剖面匹配较好(图3b)。

在花庄地区预处理资料基础上,通过按照线方向和道方向的双方向曲率属性计算,对双方向曲率属性体的

网格化处理,基于曲率属性体开展裂缝自动追踪,对追踪的裂缝数据根据裂缝的拓扑结构、裂缝长度、方位和倾角等信息开展裂缝分组和裂缝清洗,并进行模型化,最终得到包括裂缝方向属性和裂缝密度属性的弥散裂缝网络模型^[26]。

弥散裂缝预测结果中,裂缝颜色表示裂缝密度,密度越大,颜色偏向暖色调(红色),玫瑰花图表征面元内裂缝方位分布。花庄地区裂缝走向有较强的规律性和连续性,在凹陷区、稳定断块区域裂缝主要方向明确,沿层的玫瑰画图结果和地质认识较为一致。

H2C井附近裂缝密度和玫瑰花图(图4)精细分析表明:H2C井附近短小细线为该点的裂缝方向,附近主应力方向呈现北东—南西向的特征。预测的弥散裂缝形态与区域地质结构吻合,与实际钻井揭示的裂缝发育程度相吻合。

3.2 DFN离散裂缝建模

研究中还结合成测井资料,开展了DFN离散裂缝建模技术研究。DFN离散裂缝模型是利用确定的裂缝信息明确定义和模拟每条裂缝的产状信息、几何形状

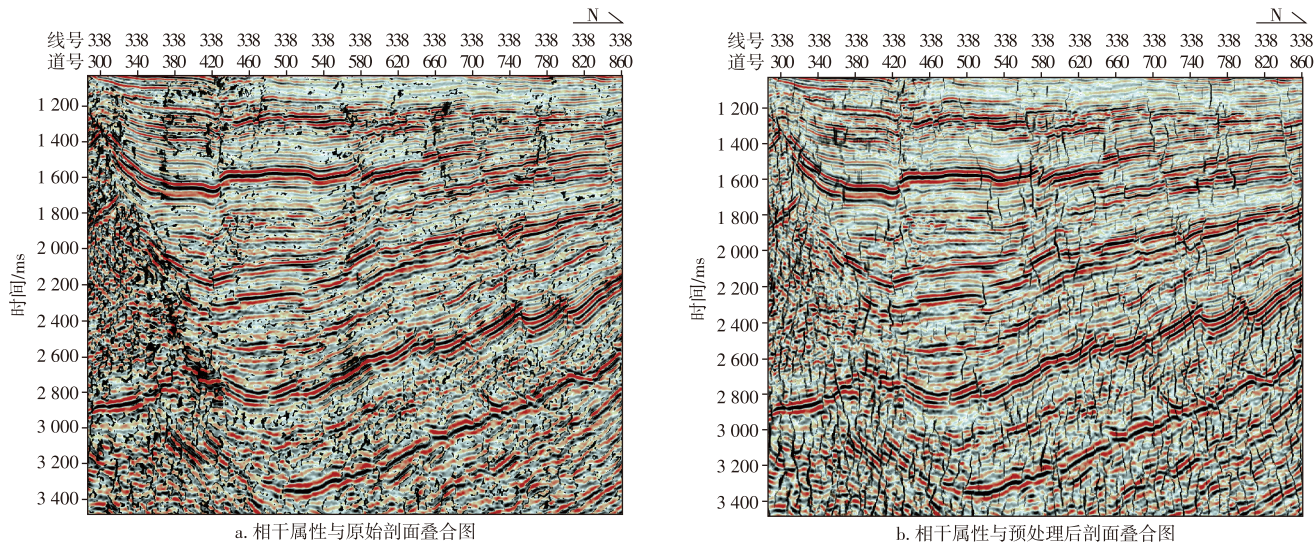


图3 苏北盆地高邮凹陷花庄地区相干属性与原始剖面 and 预处理后剖面叠合图

Fig. 3 Overlay maps of coherence attribute with original profile and pre-processed profile in Huazhuang area, Gaoyou Sag, Subei Basin

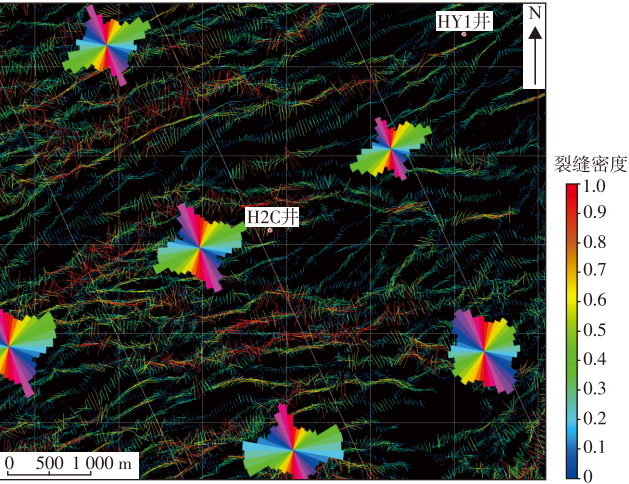


图4 苏北盆地高邮凹陷花庄地区H2C井区弥散裂缝玫瑰花图

Fig. 4 Rose diagram of dispersion-based fractures in well H2C, Huazhuang area, Gaoyou Sag, Subei Basin

和空间分布特征,即把确定的裂缝数据体定义为离散体。提取叠后深度域地震数据的构造、振幅、曲率等多种地震属性。计算选择属性的相关度,去除相关度高的属性;提取沿井轨迹地震属性,与井上裂缝密度曲线对比,优选敏感属性。为了充分反映裂缝密度分布的可能性,选取多个计算结果,基于神经网络开展天然裂缝密度预测。HY1HF井、H2C井与周围裂缝均相对发育,与井上解释结果一致。

基于裂缝密度模型,以随机播种的形式对裂缝的位置、产状、纵向切深、开度等进行模拟,生成赋有裂缝各项参数的裂缝片,使裂缝的特征在三维空间中呈现出来。DFN离散裂缝建模技术构建的裂缝模型更为直观指示了复杂断块区天然裂缝的发育情况,对压裂微地震监测中的异常事件和井组串扰现象从裂缝发育角度给予有效分

析。随着苏北盆地页岩油井的部署实施,天然裂缝模型为页岩油水平井部署与实施、压裂设计与监测、井组生产动态分析等多个领域提供了有效支撑。

4 结论

- 1)多技术融合的断层分级与裂缝定量预测方法可有效支撑差异化井型部署。针对高邮凹陷阜二段页岩油“断裂发育、断块类型多样”的地质特征,形成蚂蚁体追踪、最大似然体、弥散裂缝预测和DFN离散裂缝建模多技术融合的微断裂和大尺度天然裂缝分级预测与描述方法,构建了区域裂缝预测模型,不仅指导了复杂断块区页岩油小靶窗水平井、跨断层多“甜点”水平井、直斜井等差异化井型部署模式,还为断块型页岩油勘探开发井位部署提供借鉴。
- 2)微断层精细识别与轨迹优化是保障“甜点”高钻遇率的关键。借助精细的区域构造模型,地质-工程一体化做好微断层钻前识别、导向中预警和钻中轨迹优化,不断提升水平井优质“甜点”钻遇率,推动水平井优快钻进。目前花庄地区针对阜二段已部署页岩油水平井11口,在断裂复杂、靶窗逐步聚焦20 m以内、水平井平均埋深3 800 m的情况下精准导向,平均靶窗钻遇率高达97%,尤其跨断层入靶水平井断点符合率高,入靶纵向误差小于5 m,断裂复杂区页岩油水平井钻井速度不断提升,钻井周期不断缩短。
- 3)天然裂缝模型为压裂参数动态调整提供了科学依据。基于天然裂缝模型,结合裂缝发育情况开展压前分析与压中监测,为压裂参数动态调整提供了科学依据,并指导方案优化与施工中的实时调整。对复杂断裂发育区

不同尺度天然裂缝形成了差异化压裂改造对策,核心压裂参数及改造效果显著改善(加砂强度从3.6 t/m提升至5 t/m,平均单段有效改造体积提升10%~15%),复杂断裂区压裂改造效果稳步提高。

参考文献

- [1] 朱相羽,段宏亮,孙雅雄.苏北盆地高邮凹陷古近系陆相页岩油勘探突破及意义[J].石油学报,2023,44(8):1206-1221.
ZHU Xiangyu, DUAN Hongliang, SUN Yaxiong. Breakthrough and significance of Paleogene continental shale oil exploration in Gaoyou sag, Subei Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8): 1206-1221.
- [2] 方志雄,肖秋生,张殿伟,等.苏北盆地陆相“断块型”页岩油地质特征及勘探实践[J].石油与天然气地质,2023,44(6):1468-1478.
FANG Zhixiong, XIAO Qiusheng, ZHANG Dianwei, et al. Geological characteristics and exploration of continental fault-block shale oil reservoirs in the Subei Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1468-1478.
- [3] 姚军,王萌,樊冬艳,等.考虑层理缝岩性差异的页岩油藏压裂水平井动态分析方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2024,48(5):91-102.
YAO Jun, WANG Meng, FAN Dongyan, et al. Dynamic analysis of fractured horizontal wells in shale reservoirs considering lithological differences of bedding fractures[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2024, 48(5): 91-102.
- [4] 李军亮,刘惠民,王勇,等.济阳陆相断陷盆地页岩油研究进展[J].油气地质与采收率,2024,31(4):60-72.
LI Junliang, LIU Huimin, WANG Yong, et al. Research progress of shale oil in Jiyang continental faulted basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(4): 60-72.
- [5] 刘喜武,王心宇,刘宇巍,等.中国陆相页岩油地震勘探技术现状及发展方向[J].石油学报,2023,44(12):2270-2285.
LIU Xiwu, WANG Xinyu, LIU Yuwei, et al. Current status and development direction of seismic prospecting technology for continental shale oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2270-2285.
- [6] 蔡潇,高玉巧,何希鹏,等.陆相页岩层系纹层组合特征及烃类富集机制:以苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段为例[J].石油勘探与开发,2025,52(6):1315-1327.
CAI Xiao, GAO Yuqiao, HE Xipeng, et al. Lamina combination characteristics and hydrocarbon enrichment mechanism of continental shale formations: A case study of the second member of the Paleogene Funing Formation in the Qintong Sag, Subei Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(6): 1315-1327.
- [7] 王晓飞,陈鸣,曾诚翔,等.基于CRITIC权重法的页岩油储层裂缝识别方法研究:以北部湾盆地涠西南凹陷流沙港组为例[J].重庆科技大学学报(自然科学版),2025,27(3):12-25.
WANG Xiaofei, CHEN Ming, ZENG Chengxiang, et al. Research on the identification method of fractures in shale oil reservoirs based on the CRITIC weighting method: A case study of the Liushagang Formation in the Weixinan Depression, Beibu Gulf Basin[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 27(3): 12-25.
- [8] 杨志强,徐晨,杨梅辰,等.苏北盆地阜二段页岩油岩相测井识别技术及应用[J].非常规油气,2025,12(3):33-44.
YANG Zhiqiang, XU Chen, YANG Meichen, et al. Recognition technology and application of shale oil lithofacies logging in the second member of Funing Formation in Subei Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2025, 12(3): 33-44.
- [9] 李书瑜,范立新,夏连军,等.苏北盆地高邮凹陷深层戴南组一段三亚段油气富集特征[J].油气藏评价与开发,2025,15(3):455-462.
LI Shuyu, FAN Lixin, XIA Lianjun, et al. Oil and gas accumulation characteristics of the third submember of the first member of Dainan Formation in deep layers of Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(3): 455-462.
- [10] 段宏亮,谌廷姍,孙敬,等.苏北盆地页岩油基质与裂缝流动能力实验研究[J].油气藏评价与开发,2024,14(3):333-342.
DUAN Hongliang, SHEN Tingshan, SUN Jing, et al. Experimental study of oil matrix and fracture flow capacity of shale oil in Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(3): 333-342.
- [11] 刘世丽,段宏亮,章亚,等.苏北盆地阜二段陆相页岩油气勘探潜力分析[J].海洋石油,2014,34(3):27-33.
LIU Shili, DUAN Hongliang, ZHANG Ya, et al. Analysis of oil and gas exploration potential in F₂ member continental shale of Subei Basin[J]. Offshore Oil, 2014, 34(3): 27-33.
- [12] 严泽宇,梁兵,孙雅雄,等.苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段深层页岩储层地应力方向及主控因素[J].石油实验地质,2024,46(6):1187-1197.
YAN Zeyu, LIANG Bing, SUN Yaxiong, et al. In-situ stress orientation and main controlling factors of deep shale reservoirs in the second member of Paleogene Funing Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(6): 1187-1197.
- [13] 张琬璐,荆晓明.海安凹陷曲塘次凹阜二段页岩油形成条件研究[J].非常规油气,2024,11(6):34-43.
ZHANG Wanlu, JING Xiaoming. A study on formation conditions of shale oil in Second Member of Funing Formation in Qutang Sub-sag, Haian Sag[J]. Unconventional Oil & Gas, 2024, 11(6): 34-43.
- [14] 孙雅雄,朱相羽,邱旭明,等.苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段页岩裂缝特征分析[J].油气藏评价与开发,2024,14(3):414-424.
SUN Yaxiong, ZHU Xiangyu, QIU Xuming, et al. Characteristics of shale fractures in the second member of Funing Formation in Gaoyou Sag of Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(3): 414-424.
- [15] 何延龙,黄海,唐梅荣,等.体积压裂缝端压差对页岩储层排驱效果的影响机制[J].中国石油大学学报(自然科学版),2024,48(6):114-122.
HE Yanlong, HUANG Hai, TANG Meirong, et al. Influence mechanisms of pressure difference in fracture ends on dynamic imbibition and displacement in shale reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2024, 48(6): 114-122.
- [16] 周进峰,杨艳,仇永峰,等.地质导向技术在HY1HF井随钻中的应用[J].复杂油气藏,2022,15(3):1-6.
ZHOU Jinfeng, YANG Yan, QIU Yongfeng, et al. Application of geo-

- steering technology in HY1HF horizontal well while drilling[J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2022, 15(3): 1–6.
- [17] 王海方. 苏北盆地古近系页岩油储层有效裂缝识别[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(3): 21–27.
- WANG Haifang. Recognition of effective fractures within the oil shale in the fourth member of Funing formation in northern Jiangsu basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2016, 38(3): 21–27.
- [18] 慕小水, 苑晓荣, 贾贻芳, 等. 东濮凹陷泥岩裂缝油气藏形成条件及分布特点[J]. 断块油气田, 2003, 10(1): 12–14.
- MU Xiaoshui, YUAN Xiaorong, JIA Yifang, et al. The formation conditions and the distribution characteristics of the oil pools in the fractures of the shales in Dongpu depression[J]. *Fault-block Oil & Gas Field*, 2003, 10(1): 12–14.
- [19] 苏晓捷. 辽河断陷盆地泥岩裂缝油气藏研究[J]. 特种油气藏, 2003, 10(5): 29–31.
- SU Xiaojie. Study on fractured shale reservoirs in Liaohe basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2003, 10(5): 29–31.
- [20] 丁文龙, 张博闻, 李泰明. 古龙凹陷泥岩非构造裂缝的形成[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 50–54.
- DING Wenlong, ZHANG Bowen, LI Taiming. Formation of non-tectonic fractures in mudstones in gulong depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2003, 24(1): 50–54.
- [21] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 249–256.
- LU Shuangfang, HUANG Wenbiao, CHEN Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(2): 249–256.
- [22] 陈菊, 吴公益, 张耀祖. 苏北陆相页岩油微观尺度流动模拟研究[J]. 非常规油气, 2025, 12(6): 45–54.
- CHEN Ju, WU Gongyi, ZHANG Yaozu. Microscale flow simulation study of continental shale oil in Subei Basin[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2025, 12(6): 45–54.
- [23] 王锦. 基于微观孔隙-裂缝配置关系的页岩油储层评价及启示[J]. 石油地质与工程, 2025, 39(3): 48–60.
- WANG Jin. Evaluation of shale oil reservoirs based on microscopic pore-fracture configuration relationships and implications for revelation[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2025, 39(3): 48–60.
- [24] 王延光, 杜启振. 泥岩裂缝性储层地震勘探方法初探[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 494–501.
- WANG Yanguang, DU Qizhen. Study of seismic methods in detecting shale-fracture reservoirs[J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(2): 494–501.
- [25] 卢志强, 王力, 杨瑞召, 等. 基于相干的精细断裂刻画技术在顺北地区的应用[J]. 天然气勘探与开发, 2018, 41(3): 20–25.
- LU Zhiqiang, WANG Li, YANG Ruizhao, et al. Coherence-based fine characterization technology for fractures and its application to Shunbei area[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2018, 41(3): 20–25.
- [26] 李文博, 文晓涛, 李福强, 等. 基于玫瑰图的裂缝方位曲率分析[J]. 断块油气田, 2015, 22(1): 7–10.
- LI Wenbo, WEN Xiaotao, LI Fuqiang, et al. Fracture azimuth curvature analysis based on rose diagram[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2015, 22(1): 7–10.

(编辑 黄颖)