引用格式：张金发，冯永存，何兵，等，2026. 基于井震结合的三维裂缝复杂指数精细化表征[J]. 地质力学学报，32（1）：184−196. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025059

Citation: ZHANG J F，FENG Y C，HE B，et al.，2026. Refined characterization of the 3D fracture complexity index based on Well-Seismic Integration[J]. Journal of Geomechanics，32（1）：184−196. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025059

基于井震结合的三维裂缝复杂指数精细化表征

张金发[1,2,3]，冯永存[2,3,4]，何　兵[5]，马思佳[1,2,3]，魏静怡[1,2,3]，邓金根[1,2,3]

ZHANG Jinfa[1,2,3]，FENG Yongcun[2,3,4]，HE Bing[5]，MA Sijia[1,2,3]，WEI Jingyi[1,2,3]，DENG Jin'gen[1,2,3]

1. 中国石油大学（北京）石油工程学院，北京 102249；
2. 油气资源与工程全国重点实验室，北京 102249；
3. 中国石油大学（北京）海南研究院，海南 三亚 572000；
4. 中国石油大学（北京）安全与海洋工程学院，北京 102249；
5. 中国石油塔里木油田分公司监督中心，新疆 库尔勒 841000

1. *College of Petroleum Engineering*, *China University of Petroleum* (*Beijing*), *Beijing* 102249, *China*;
2. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering*, *Beijing* 102249, *China*;
3. *Hainan Institute*, *China University of Petroleum* (*Beijing*), *Sanya* 572000, *Hainan*, *China*;
4. *College of Safety and Ocean Engineering*, *China University of Petroleum* (*Beijing*), *Beijing* 102249, *China*;
5. *Supervision Center*, *PetroChina Tarim Oilfield Company*, *Korla* 841000, *Xinjiang*, *China*

Refined characterization of the 3D fracture complexity index based on Well-Seismic Integration

Abstract: ［**Objective**］The accurate characterization of formation fracture complexity is of great significance for evaluating lost circulation risks, hydraulic fracturing stimulation effectiveness, and various operational stages throughout the oil and gas drilling and production lifecycle. Addressing the limitation of the inability of existing fracture characteristic parameters to comprehensively represent fracture complexity, this study proposes a method for establishing a 3D fracture complexity index based on the concept of Well-Seismic Integration. Using an oilfield in the Bohai Sea, China, for a case study, this method refines the characterization of formation fracture complexity. ［**Methods**］Considering the influence of both fracture aperture and fracture intensity on fracture complexity, we establish a 1D fracture complexity index model. This model is based on expert decision-making and well-logging data; it uses a combined subjective and objective weighting approach that integrates the Analytic Hierarchy Process and the Entropy Weight Method. Furthermore, the fracture development degree attribute volume derived from seismic inversion is used as a constraint condition for Kriging interpolation to construct the 3D fracture complexity index attribute volume. ［**Results**］This method is used to derive the 1D fracture complexity index profiles of drilled wells. Comparing these profiles with borehole image logs shows that a higher fracture complexity index corresponds to a greater number of fractures or larger fracture apertures at the corresponding depth, confirming the feasibility of this method for characterizing fracture complexity. In the 3D fracture complexity index model, the attribute volume profile is extracted along the drilled well and compared with formation

基金项目：国家自然科学基金项目（52074312）；中国石油科技创新基金项目（2021DQ02-0505）；页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室开放基金项目（36650000-24-ZC0609-0006）；克拉玛依市重大科技专项项目（20232023zdzx0003）

This research was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52074312), the CNPC Science and Technology Innovation Foundation (Grant No. 2021DQ02-0505), the Open Fund Project of the National Key Laboratory for the Enrichment Mechanism and Efficient Development of Shale Oil and Gas (Grant No. 36650000-24-ZC0609-0006), and the Major Science and Technology Project of Karamay City (Grant No. 20232023zdzx0003).

第一作者：张金发（1996—），男，在读博士，主要从事油气田岩石力学与钻采工程研究工作。Email：2501054546@qq.com

通信作者：冯永存（1986—），男，博士，教授，主要从事石油工程岩石力学与地质力学研究工作。Email：yfeng@cup.edu.cn

收稿日期：2025−06−03；**修回日期**：2026−01−11；**录用日期**：2026−01−11；**网络出版日期**：2026−01−13；**责任编辑**：吴芳

Received：2025−06−03；Revised：2026−01−11；Accepted：2026−01−11；Available Online：2026−01−13；Handling Editor：WU Fang

lithology and dual laterolog profiles. The results indicate that a higher fracture complexity index corresponds to a greater difference in dual laterolog responses. Furthermore, the lithology of this well interval is identified as granitic basement gneiss, further validating the reliability of this method. [**Conclusions**] A fracture complexity index was constructed using a combined weighting approach that integrates the subjective Analytic Hierarchy Process and the objective Entropy Weight Method. This index not only reflects the extent of fracture distribution but also captures the internal structural heterogeneity of fractures. It addresses the issue of low prediction accuracy in existing lost circulation risk prediction methods, which rely solely on fracture intensity as the fracture-characterizing parameter. Moreover, it compensates for the limitations of current methods for evaluating hydraulic fracturing stimulation, which assess compressibility based on a single factor, such as fracture intensity or fracture aperture. [**Significance**] The research provides a theoretical foundation and engineering guidance for predicting lost circulation risk and assessing compressibility.

Keywords: fracture complexity index; fracture aperture; fracture intensity; Analytic Hierarchy Process; Entropy Weight Method; Well-Seismic Integration

摘　要：精准表征地层裂缝复杂程度对于评估井漏风险及压裂增产改造效果等油气钻采全生命周期各阶段作业状况具有重要意义。为解决现有裂缝特征参数无法全面表征裂缝复杂程度的问题，以中国渤海某油田为研究对象，综合考虑裂缝开度与裂缝密度对裂缝复杂程度的影响，采用层次分析法与熵权法主客观组合赋权方式，建立基于专家决策与测井资料的一维裂缝复杂指数模型，进一步利用地震反演获得的裂缝发育程度属性体作为克里金插值的约束条件，从而构建三维裂缝复杂指数属性体。利用融合裂缝开度与裂缝密度表征裂缝复杂程度的方法，求取已钻井一维裂缝复杂指数剖面，与成像测井图片对比，结果表明裂缝复杂指数越大，对应深度下的成像测井显示裂缝条数越多或裂缝开度越大，印证了该方法表征裂缝复杂程度的可行性；在三维裂缝复杂指数模型中提取已钻井所在属性体剖面，与地层岩性及双侧向电阻率剖面对比，结果表明裂缝复杂指数越大，其双侧向电阻率响应差异越大，同时该井段岩性对应为潜山花岗片麻岩裂缝发育段，进一步证实了该方法的可靠性。研究成果可为钻井工程漏失风险预测及可压性评估提供理论参考和工程指导。

关键词：裂缝复杂指数；裂缝开度；裂缝密度；层次分析法；熵权法；井震结合

中图分类号：P319; TE321　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)01−0184−13

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025059

0　引言

地层裂缝系统不仅是钻井液漏失的优势通道，更是油气运移的流动通道，精准表征地层裂缝特征参数对于井漏风险预测及压裂增产效果评估等油气钻采全生命周期各阶段作业状况具有重要意义（Shen et al., 2024; 王俊鹏等, 2024; 景涛涛, 2025; 覃建华等, 2025）。裂缝特征参数表征包括岩芯描述、测井解释、地震反演、构造应力场模拟及现场试验等方法（商晓飞等, 2021）。乔辉等（2024）通过岩芯描述和成像测井解释，获得了四川盆地五峰组–龙马溪组页岩储层中小尺度天然裂缝密度、开度及倾角等特征参数。姜晓宇等（2023）运用叠前全方位AVAZ反演裂缝及叠后蚂蚁追踪裂缝预测结果，在裂缝地震相的控制下建立了多尺度裂缝模型，进一步结合等效裂缝模型，实现了考虑裂缝渗流非均质性的裂缝渗透率表征。戴一凡和侯冰（2023）运用3D扫描技术，提出采用高斯曲率绝对值表征裂缝面粗糙度的方法，实现了酸蚀条件下导流能力的无损评价。李勇等（2024）采用网络拓扑结构模型表征天然裂缝连通性，明确了深层页岩储层裂缝连通性特征。韦世明等（2024）建立了三维倾斜裂缝扩展线弹性力学模型，采用有限元方法分析了裂缝倾斜角度与光纤应变和应变率的响应特征，为运用分布式光纤技术解释裂缝参数提供了理论依据。综上所述，已有研究通过多种手段获取裂缝各类特征参数，尽管这些参数均可从某一特定角度反映裂缝的分布与形态规律，但尚缺少一种能够全面表征裂缝复杂程度的综合性指标参数。

在钻井阶段，裂缝的存在可降低地层等效岩体力学强度，同时可作为钻井液侵入地层的漏失通道，从而改变地层流体孔隙压力，加剧井漏发生的风险（金军斌等, 2021）。预测潜在漏失风险，合理

设计防控对策，可有效规避井漏事件发生。Cai et al.(2022)基于层次分析法提出了一套联合岩石强度、裂缝参数及应力环境预测裂缝性地层漏失风险的方法，但仅将成像测井解释的裂缝密度用于表征影响井漏发生的裂缝特征参数，忽略了裂缝开度对井漏发生概率的潜在影响。在油气开采的压裂增产改造阶段，裂缝发育储层的破裂压力和抗拉强度远远低于完整地层，压裂改造产生的诱导缝与天然裂缝易沟通，可形成较大储层改造体积。评价储层可压性特征，指导施工参数设计，可有效提高增产改造效果。万有余等(2024a)基于等效权重法建立了一套考虑岩石脆性、裂隙密度及水平主应力差的页岩油综合可压性评价方法，该方法同样仅将裂缝发育程度作为可压性评价的裂缝特征参数，但裂缝开度与裂缝密度的协同作用对于地层复杂缝网的形成具有决定性影响(谭启贵等，2024)。因此，将裂缝密度或裂缝开度作为唯一裂缝特征参数，用于评估油气钻采作业状况，或者仅采用主观方式确定模型中的各项指标权重，均会致使钻井工程漏失风险预测精度不足及油气开采工程压裂改造效果评估准确性降低。

为此，文章以渤海辽中凹陷西斜坡为研究区、以中国渤海某油田为研究对象，根据双侧向电阻率测井和成像测井资料，运用主观层次分析法与客观熵权法组合赋权方式，建立一维裂缝复杂指数模型，该指数不仅可反映裂缝发育程度，还可反映裂缝内部结构差异。采用组合赋权法可减少层次分析法赋权的主观性，也会降低熵权法数据变化导致的权重波动，使模型的各项指标评价结果更加合理。进一步结合地震资料，运用产状控制蚂蚁体约束克里金空间插值，构建三维裂缝复杂指数属性体，从而实现裂缝复杂程度的三维可视化，以期指导钻井工程的漏失风险预测及开发工程的可压性评估。

1 区域地质工程概况

研究区地处辽西凸起与辽中凹陷的过渡带，区域构造格局呈现“三排山”式的特征，整体表现为西高东低的构造形态。目标油田主要位于“中排山”构造带，受北东向走滑断层控制，形成了典型的断背斜构造。该油田已完钻 9 口勘探直井，自上而下依次钻遇新生界新近系明化镇组及馆陶组、古近系东营组及沙河街组，中生界，新太古界；其主要目的层潜山太古界岩性为花岗岩，非目的层明化镇组至东营组二段下亚段(东二下)顶部岩性表现为砂泥岩不等厚互层，东二下至太古界顶部岩性主要表现为厚层泥岩。地层发育宏观裂缝、微观裂缝、破碎颗粒粒间孔及溶蚀孔隙等，属于孔隙–裂缝型地层。据不完全统计，目标油田 2 口勘探直井及邻近油田 20 口开发井发生漏失，目标油田和邻近油田漏失井数分别占各油田总井数的 22.22% 和 74.07%，钻井复杂情况分析揭示潜山储层裂缝发育是诱发已钻井漏失的主要原因。目标油田现阶段已设计多口采油井、注水井、潜力井及开发评价井，但该区域潜山储层裂缝时空分布具有较强复杂性和非均匀性，存在潜在钻井复杂风险。故充分融合现有地震、测井、钻井及录井等多源信息，认清区块裂缝复杂特征，对于规避漏失风险及提高后续增产改造效果至关重要。

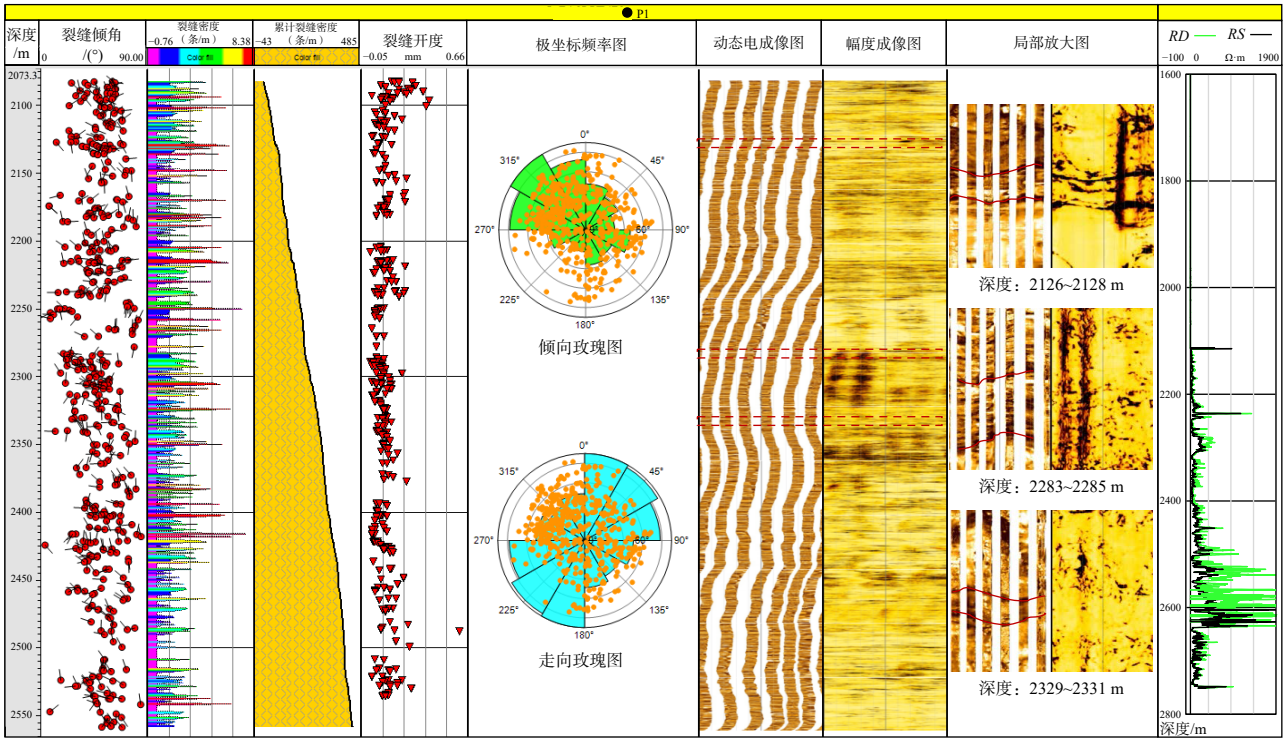
2 裂缝特征参数识别与表征

测井和地震是识别与表征裂缝特征参数的主要手段。基于单井测井资料解释裂缝存在纵向预测精度高的优点，可为后续建立一维裂缝复杂指数提供数据基础；基于目标油田地震资料反演裂缝具有横向控制范围大的优点，可为一维裂缝复杂指数进行空间插值提供约束条件，以提高三维裂缝复杂指数属性体的建模精度。为全面掌握研究区地层裂缝特征参数，将从成像测井、双侧向电阻率测井及地震资料进行裂缝参数的识别与表征。

2.1 测井资料解释

成像测井是一种高分辨率的连续井周图像技术，为裂缝特征参数的识别与表征提供更加直观和准确的手段(齐真真等，2025)。目标油田 P1 井在潜山太古界进行成像测井作业，通过成像测井解释成果(图 1)统计得出，裂缝呈现东北—西南走向，平均裂缝方位 206.98°，平均裂缝倾角 42.38°，平均裂缝密度 2.76 条/m，裂缝开度 0.01～0.6 mm，平均裂缝开度 0.11 mm，综合分析潜山储层微裂缝发育，具有双重介质特征(孔–缝型储层)。

尽管成像测井精度高，但其成本昂贵。在实际钻井过程中，通常仅有少部分井段开展成像测井作业，大部分井段只进行常规测井作业。双侧向电阻率与裂缝参数具有相关性(Saboorian-Jooybari et al.,



RD、*RS* 分别为深侧向电阻率、浅侧向电阻率

图 1　辽中凹陷西斜坡某油田 P1 井测井解释成果图

Fig. 1　Interpretation of logging for Well P1 in an oilfield at the western slope of the Liaozhong Sag

RD and *RS* denote the deep lateral resistivity and shallow lateral resistivity, respectively.

2015)，裂缝发育地带深浅侧向电阻率表现出明显差异。P1 井 1600～2750 m 井段的双侧向电阻率如图 1 所示，可看出该井 1600～2100 m 井段的深侧向电阻率与浅侧向电阻率基本无差异，原因在于该井段岩性以厚层泥岩为主，通常地层裂缝不发育(Zhuo et al., 2024)。而 2100～2750 m 井段进入太古界潜山花岗岩，深侧向电阻率与浅侧向电阻率波动剧烈，表现明显正幅差，即深侧向电阻率大于浅侧向电阻率，与之对应的成像测井解释段呈现裂缝发育特征。为此，基于双侧向电阻率、泥浆电阻率与裂缝开度的关系，利用目标油田成像测井解释的裂缝开度对同一深度下双侧向测井的响应关系进行刻度(李军等, 2008)，构建无成像测井井段下，依据双侧向测井资料定量评估裂缝特征参数的经验模型。为进一步验证模型的有效性，采用公式(1)求取一口井目的层裂缝开度，将其预测结果与成像测井解释后的真实裂缝开度对比，其相对误差在 17.37%，可满足工程计算精度要求。利用该模型可求取非目的层裂缝开度，进一步以 1 m 井段为窗口获取裂缝密度参数，该方法同时可有效弥补后续一维裂缝复杂指数进行空间插值在纵向上因非储层段数据不足导致插值效果差的缺陷。

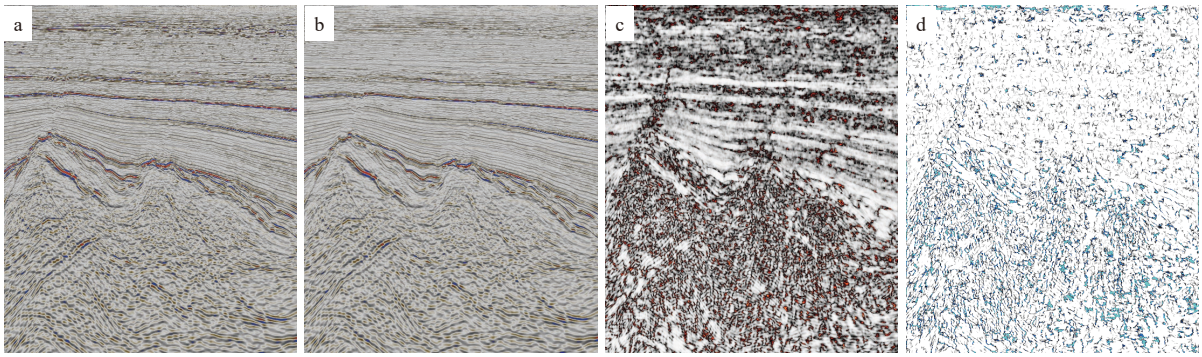
$$FA=\left(2.056+126.8\frac{1}{RS}-153.7\frac{1}{RD}\right)RM(R^2=0.9727) \tag{1}$$

式中：*FA* 为裂缝开度，mm；*RD*、*RS*、*RM* 分别为深侧向电阻率、浅侧向电阻率及泥浆电阻率，Ω·m；R^2 用于量化模型拟合优度。

2.2　地震资料反演

为进一步掌握目标油田横向裂缝发育程度，利用地震资料反演裂缝分布特征(Li et al., 2023; Wang and Bhattacharya, 2023; 吕丙南等, 2024)。首先，采用中值滤波算法对原始地震信号进行去噪处理，以提高断裂体系反演精度，与原始地震数据(图 2a)相比，经处理后的地震数据(图 2b)信噪比得到了明显提升，地震同相轴一致性也相应得到了增强；其次，采用混沌体算法进行不连续性检测，以强化断裂带边缘，经处理后的断裂体系刻画则更为清晰(图 2c)；最后，通过调整蚂蚁追踪算法基本参数生成初始蚂蚁体(表 1)，并进一步结合成像测井解释得到的裂缝倾角及方位角成果(裂缝倾角基本在 20°以上，方

位角呈西北—东南分布特征)，利用产状控制原则(过滤较小倾角及东北—西南方位)进行裂缝的识别与生成。相比传统蚂蚁追踪算法，产状控制蚂蚁追踪可有效过滤不符合研究区实际裂缝方位和低倾角等干扰信息，从而提高裂缝反演精度。产状控制蚂蚁体识别裂缝的最终结果见图 2d。通常裂缝发育程度受其内部岩相控制(Zhang et al., 2023)，进一步结合地层岩性验证地震反演裂缝分布结果，可看出目标油田上部裂缝分布较少，对应砂泥岩不等厚互层段；中部裂缝不发育，对应厚层泥岩段；下部裂缝发育，对应花岗片麻岩段。裂缝发育程度预测结果与所处地层岩性分布基本一致，证实了产状控制蚂蚁体识别裂缝发育程度的可靠性。



a—原始地震切片；b—经中值滤波算法进行去噪后的地震切片；c—经混沌体算法进行不连续性检测后的地震切片；d—经产状控制蚂蚁体算法识别后的裂缝分布

图 2 地震属性体切片(主测线 1054)

Fig. 2 Seismic attribute volume slices (Inline 1054)

(a) Original seismic slice; (b) Seismic slice after denoising by the median filtering algorithm; (c) Seismic slice after discontinuity detection by the chaotic volume algorithm; (d) Fracture distribution identified by the occurrence-controlled ant tracking volume algorithm

表 1 蚂蚁追踪算法基本参数

Table 1 Basic parameters of the ant tracking algorithm

参数	含义	特点	取值范围
初始边界范围	定义单只蚂蚁的有效搜索范围	数值降低可增强微小断裂捕捉能力，但会降低整体搜索效率	3～7
路径偏离容差	蚁群路径允许偏离的最大角度	容差增大可增强复杂弯曲断裂识别能力，但可能引入假阳性结果	0～3
搜索基本步长	蚂蚁搜索单次移动的基准距离	步长增加可扩大搜索范围，但可能导致部分细节特征丢失	2～6
允许非法步长	允许超越基准步长的最大范围	容限提高可增强连续断裂追踪能力，但会增加计算复杂度	1～2
必须合法步长	有效路径必须包含的合法步数	步长降低可增强断裂网络连通性，但可能降低构造解释精度	1～3
搜索终止阈值	蚂蚁搜索中非法步数占比上限	阈值提高可增强复杂构造搜索能力，但可能过度平滑构造边界	5～10

3 裂缝复杂指数评估模型

精准表征裂缝复杂程度对于油气钻采全生命周期各作业环节至关重要，若仅考虑裂缝密度或裂缝开度作为影响漏失或可压性评价的唯一裂缝特征参数，将低估或高估漏失风险等级及压裂增产改造效果。以钻井阶段预测漏失风险等级为例，裂缝为钻井液侵入地层提供漏失通道，通常裂缝密度越大，在其他地质-工程参数相同条件下，钻井液漏失量越大(Hu et al., 2025)，其潜在漏失风险越高。但地层裂缝时空分布具有较强复杂性和非均匀性，单一考虑裂缝密度预测漏失风险易产生偏差，在实际钻井过程中，钻井液的漏失风险还与裂缝开度密切相关(Albattat and Hoteit, 2021)。当裂缝密度大且裂缝开度很小(闭合裂缝)时，尽管裂缝在工程扰动条件下可突破井周应力场，从而产生的诱导缝与天然裂缝易沟通形成复杂裂缝网络，但在钻井过程中精准控制钻井液密度及波动压力带来的环空压耗，此时地层并非一定发生漏失复杂事件(Najjarpour et al.,

2022)，这表明若仅以裂缝密度预测漏失风险，将高估实际漏失风险等级。相反，当裂缝密度小且裂缝开度很大(张开裂缝)时，在钻井过程中漏失通道尺寸大，地层不存在破裂压力，此时满足井下正压差条件，钻井液便可自由流入漏失通道，即钻井液液柱压力大于地层压力则易发生漏失(Zhang et al., 2025)，这表明若仅以裂缝密度预测漏失风险，将低估实际漏失风险等级。上述两种情形共同揭示了仅以裂缝密度预测漏失风险等级明显不同。因此，有必要综合考虑裂缝开度和裂缝密度对裂缝复杂程度的影响，可采用主客观组合赋权方式建立裂缝复杂指数，该指数可同时反映裂缝发育程度和裂缝内部结构差异，具体流程如图 3 所示。

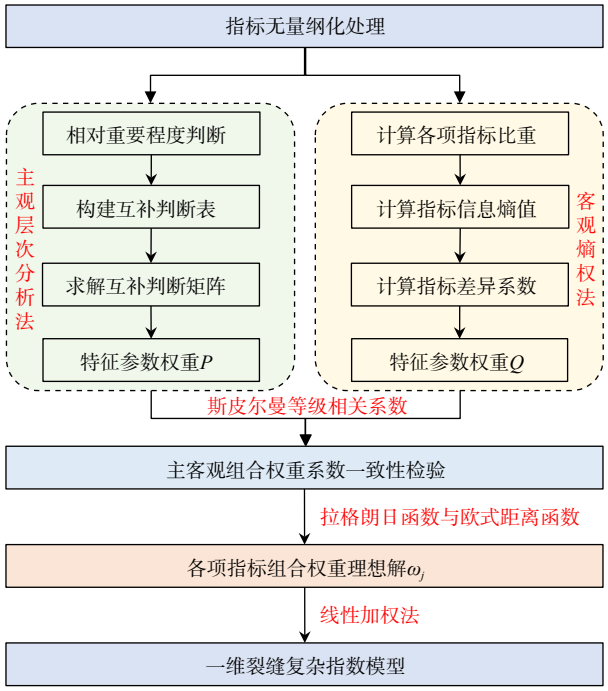


图 3　基于主客观组合赋权的裂缝复杂指数建立流程

Fig. 3　Workflow for establishing the fracture complexity index based on a combined subjective−objective weighting method

3.1　层次分析法主观赋权

层次分析法是一种将定性决策问题实现定量化处理的主观赋权方法(霍少伟等，2025)，核心思想是通过构建多层次条理化分析结构模型，利用定性指标模糊量化的方法计算因素的权重值，然后得到不同因素的影响程度及总目标的最终权重。该方法的优势是可以将复杂系统分解为若干子系统，并确定系统中各因素的相对重要性，具有较强的逻辑性和灵活性，其主要步骤如下(Xu et al., 2020; Hu et al., 2021)。

(1)构建判断矩阵：利用专家决策对各项指标进行重要性排序，对比同一层次上的两项指标重要程度，参考 1～9 数值标度法量化专家主观判断，定量表征每两项指标的相对重要性。基于此构建互补判断表，得到互补判断矩阵，矩阵中的每个元素表示某指标与另一指标的重要性比较结果。

(2)求解最大特征根及特征向量：利用和积法、方根法或最小二乘法计算判断矩阵的最大特征根及对应的特征向量(李家桢等，2024)，从而确定各指标的权重系数。此次研究采用和积法求解，主要包括将判断矩阵正规化、正规化后的矩阵按行求和、求和后的行向量归一化。

(3)判断矩阵一致性检验：为避免判断矩阵出现逻辑自相矛盾的情况，需要对其进行一致性检验。采用一致性比率作为一致性检验的评价准则，其值小于 0.1 时，认为判断矩阵通过一致性检验(万有余等，2024b)。满足一致性检验所对应的归一化特征向量即可作为各项指标权重值，否则需重新构建判断矩阵。对于此次研究指标数为 2 个，不存在判断逻辑的错误，无需进行一致性检验。

基于专家决策经验，参考数值标度法，令裂缝密度对于裂缝开度的重要性标度取值为 2，则裂缝开度对于裂缝密度的重要性标度取值为 1/2。基于此构建判断矩阵，采用和积法求解裂缝复杂指数的各项指标主观权重系数，其裂缝开度和裂缝密度的权重分别为 0.3333 和 0.6667。

3.2　熵权法客观赋权

熵权法是一种基于指标数据变异性大小的客观赋权方法(熊俊楠等，2019)，核心思想是挖掘指标原始数据的内在规律和信息量，得到不依赖于决策者经验的客观权重。若某个指标信息熵越小，表明该指标变异程度越大，提供信息量越多，在综合评价中所能起到的作用也越大，其权重系数也越大。因此，通过计算各项指标的熵值，可判断指标的离散程度，从而确定评价指标的客观权重，其主要步骤如下(Ju et al., 2021; 郝智娟等，2025)。

(1)将原始指标数据进行极值标准化处理，得到归一化样本。

(2)依次计算第 j 项指标在第 i 个样本中的特征比重、信息熵值及差异系数。

(3)计算差异系数在所有指标差异系数总和中所占的比例，即可获得第 j 项指标的权重系数。

统计测井资料解释得到的裂缝开度与裂缝密

度数据，采用熵权法依次计算裂缝开度与裂缝密度的指标比重、信息熵值及差异系数，获取两项指标的客观权重系数。从表 2 可看出裂缝密度的信息熵值相比裂缝开度小，表明裂缝密度这一指标变异程度相对较大，对于裂缝复杂指数评估所提供的信息量大，在综合评价中的重要性也相应变大，即裂缝密度的权重系数大于裂缝开度。

表 2 熵权法获取裂缝开度与裂缝密度的客观权重系数

Table 2 Objective weight coefficients of fracture aperture and fracture intensity obtained by the Entropy Weight Method

指标	裂缝开度	裂缝密度
信息熵值	0.9708	0.9657
差异系数	0.0292	0.0343
权重系数	0.4597	0.5403

3.3 主客观组合赋权

层次分析法可体现专家对各项指标的经验判断，熵权法可反映数据本身提供的信息量特征。为兼顾指标重要性判断并充分利用指标数据信息，将两者结合可有效减少层次分析法赋权的主观性，也会降低熵权法数据变化导致的权重波动，使裂缝开度与裂缝密度指标评价结果更加合理（付立家等，2024; Xu et al., 2024）。但进行主客观组合赋权前，需对两种方式进行一致性检验。斯皮尔曼等级相关系数（ρ）可用来反映客观赋权方法与主观赋权方法的相关程度，其系数在（0, 1]，说明客观与主观赋权方法具备一致性，可进行组合赋权。经两种方式获得的裂缝开度与裂缝密度主客观权重系数代入公式（2），解得 ρ=0.8823，其系数在（0, 1]，说明可进行组合赋权。

$$\rho = 1 - \frac{6}{n(n^2-1)} \sum_{j=1}^{n} (P_{\mathrm{A}j} - Q_{\mathrm{B}j})^2 \tag{2}$$

式中：ρ 为斯皮尔曼等级相关系数；$P_{\mathrm{A}j}$、$Q_{\mathrm{B}j}$ 分别为层次分析法、熵权法获得的主、客观权重系数；n 为指标个数；j 为各项指标，j =1, 2，…，n。

利用拉格朗日函数将主观权重与客观权重相结合，建立组合优化决策模型：

$$\begin{cases} \alpha P_{\mathrm{A}j} + \beta Q_{\mathrm{B}j} = W_j \\ \alpha + \beta = 1 \end{cases} \tag{3}$$

式中：W_j 为组合权重，α、β 分别为主、客观偏好程度系数。

引入欧氏距离函数 $D(P_{\mathrm{A}j}, Q_{\mathrm{B}j})$，保证主客观权重与相应偏好系数间的差异程度相一致：

$$\begin{cases} D(P_{\mathrm{A}j},\ Q_{\mathrm{B}j}) = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (P_{\mathrm{A}j} - Q_{\mathrm{B}j})^2} \\ D(P_{\mathrm{A}j},\ Q_{\mathrm{B}j})^2 = (\alpha - \beta)^2 \end{cases} \tag{4}$$

联立公式（3）和公式（4），即可得到裂缝开度与裂缝密度的理想权重解。熵权法、层次分析法及组合赋权法得到的各项指标权重系数相对大小均一致（表 3），但经组合赋权法获得的裂缝开度相较于仅采用层次分析法相差 15.57%，同时经组合赋权法获得的裂缝密度相较于仅采用层次分析法相差 7.78%，二者之间的差异主要在于组合赋权方式同时考虑了专家决策和实际测井数据对于裂缝复杂指数的主客观影响，而层次分析法仅依赖于专家经验确定的 2 个指标的主观权重系数。

表 3 组合赋权法获取裂缝开度与裂缝密度的最优权重系数

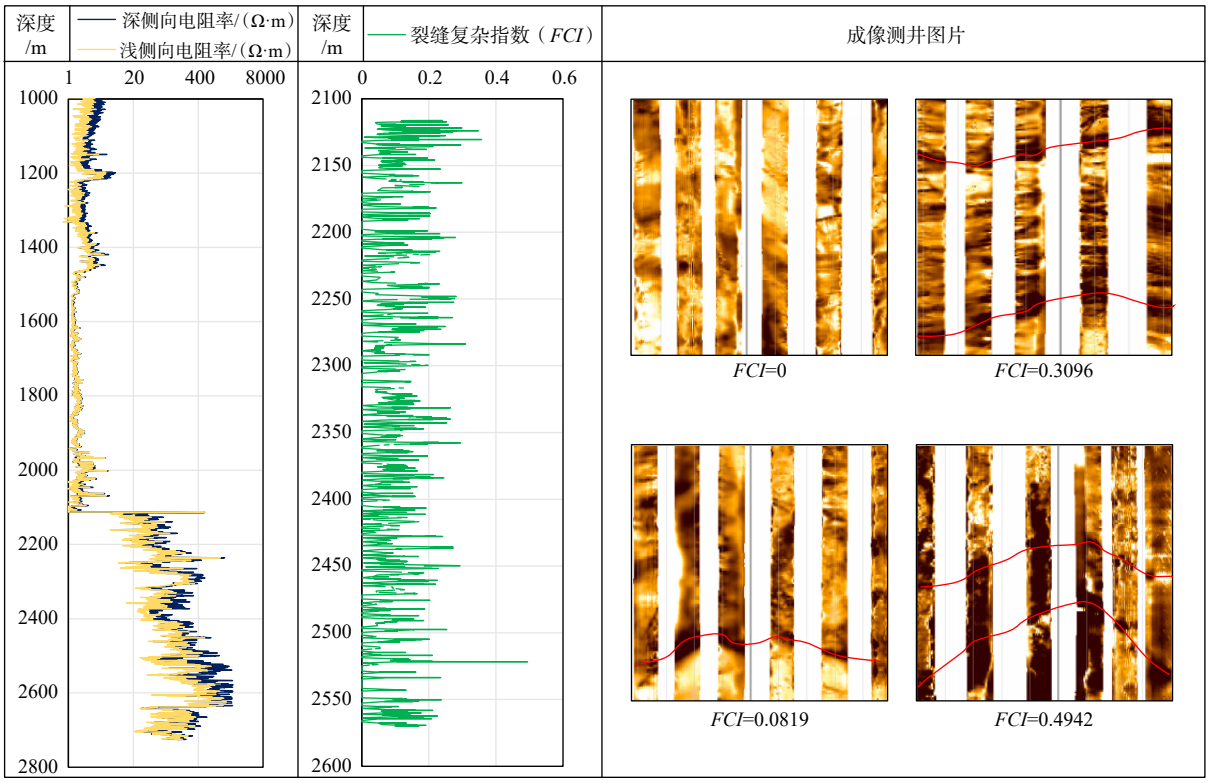
Table 3 Optimal weight coefficients of fracture aperture and fracture intensity obtained by combined weighting method

指标	权重系数		
	熵权法	层次分析法	组合赋权法
裂缝开度	0.4597	0.3333	0.3852
裂缝密度	0.5403	0.6667	0.6148

采用线性加权法，融合裂缝开度与裂缝密度两项指标，构建裂缝复杂指数（*FCI*; 公式 5），用于定量表征地层裂缝的复杂程度。利用公式（5）求取已钻井 P1 井一维裂缝复杂指数剖面，当裂缝复杂指数为 0 时，深侧向电阻率与浅侧向电阻率基本无差异，对应深度下的成像测井图片中不存在裂缝（图 4）；而裂缝复杂指数越大时，对应深度下的成像测井显示裂缝条数越多或裂缝开度越大，印证了该方法表征裂缝复杂程度的可行性。其中 *FCI*=0.3096 和 *FCI*=0.4942 时，两个深度下的裂缝密度相同，但后者的裂缝开度大于前者的裂缝开度，导致后者整体的裂缝复杂指数更高，进一步说明了漏失风险预测或可压性评估若仅考虑以裂缝密度作为唯一裂缝特征参数，可能会降低评估模型的预测精度。

$$FCI = 0.3852 \times FA_n + 0.6148 \times FI_n \tag{5}$$

式中：*FCI* 为裂缝复杂指数，0～1；FA_n 为归一化裂缝开度；FI_n 为归一化裂缝密度。2 个变量的数据来源可通过测井解释获取，并采用最小−最大归一化方式进行标准化处理（郝智娟等，2025）。



成像测井图片中红色线表示成像测井识别的裂缝

图 4　辽中凹陷西斜坡某油田 P1 井一维裂缝复杂指数剖面

Fig. 4　1D fracture complexity index profile of Well P1 in an oilfield at the western slope of the Liaozhong Sag

The red lines represent the fractures identified by imaging logging.

4　三维裂缝复杂指数表征

通过已钻井测井资料解释裂缝开度与裂缝密度数据后，才可利用上述方法进一步有效求取一维纵向裂缝复杂指数剖面，然而对于缺乏测井数据的未钻井，便无法定量评估裂缝复杂程度。为实现区域整体裂缝发育程度与裂缝内部结构差异的超前预测，采用空间插值方法可获取三维裂缝复杂指数属性体空间展布及连井剖面，以提前掌握目标油田的裂缝复杂程度。克里金插值作为一种基于空间统计学理论的无偏最优插值方法，通过分析数据点的空间自相关性，可有效估计空间连续变化变量的未知值，插值过程中同时考虑了井间的距离关系和井间的空间相关性，显著提升了插值结果的准确性和可靠性，已广泛用于三维地质力学建模中（Li et al., 2024; 郭天良等, 2025）。其主要流程如下：

设 $x_1, x_2, \cdots, x_r$ 为空间内的 r 个采样点，$Z(x_1)$，$Z(x_2)$，…，$Z(x_r)$ 为相应目标参数的实际值，区域化变量在 x 处的克里金估计值 $Z^*(x)$ 可采用公式（6）线性组合形式表示：

$$Z^*(x) = \sum_{\omega=1}^{r} \lambda_\omega Z(x_\omega) \tag{6}$$

$\lambda_\omega(\omega=1, 2, \cdots, r)$ 为第 ω 个采样点的插值权重系数，需满足无偏性和最优性 2 个条件，即：

$$\begin{cases} \sum_{\omega=1}^{r} \lambda_\omega = 1 \\ \delta^2 = E\left[(Z^*(x) - Z(x))^2\right] = \min \end{cases} \tag{7}$$

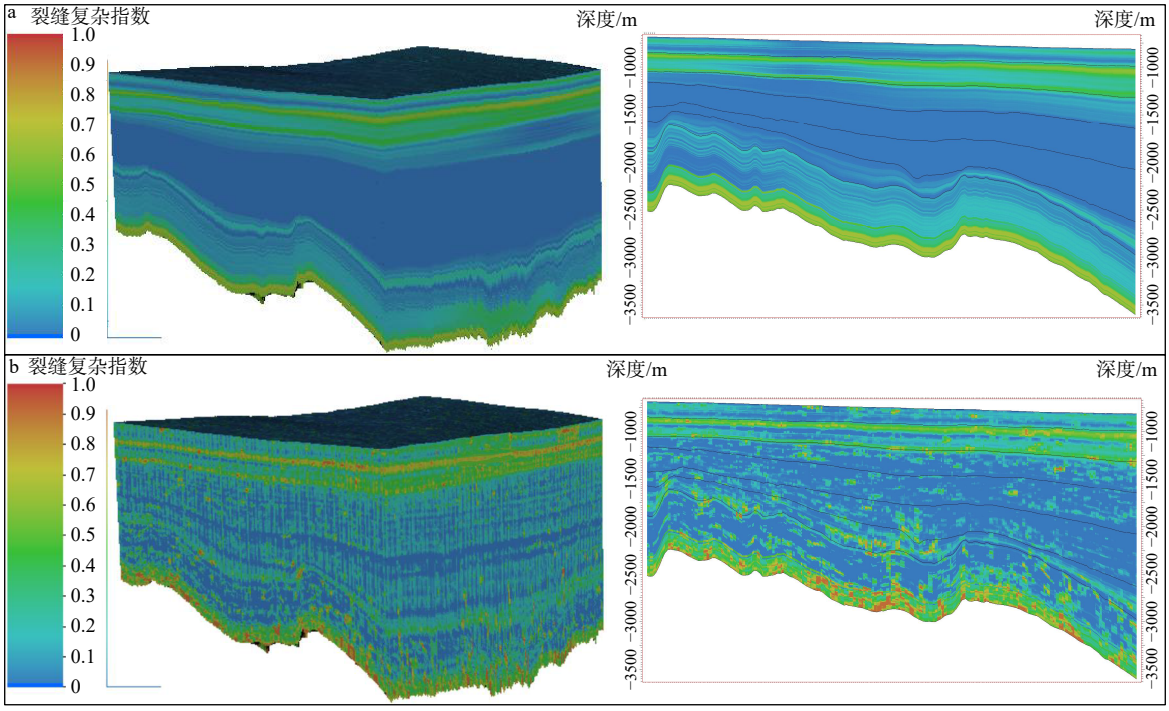
δ 为克里金估计值 $Z^*(x)$ 和实际值 $Z(x)$ 之间的标准差，应用拉格朗日乘数法求解条件极值，当满足本征假设时，可用衡量各个样本点空间相关程度的变差函数进一步表示克里金方程组，即：

$$\begin{cases} \sum_{\omega=1}^{r} \lambda_\omega = 1 \\ \sum_{v=1}^{r} \lambda_v \zeta(x_\omega, x_v) - \mu = \zeta(x_\omega, x) \end{cases} \tag{8}$$

式中：$\zeta(x_\omega, x_v)$ 为 2 个采样点 x_ω 和 x_v 的变差函数值，$v=1, 2, \cdots, r$；μ 为拉格朗日系数。通过公式（8）求解的权重系数带入公式（6）即可获得目标参数的

估计值。

基于克里金插值原理，将已钻井获取的一维裂缝复杂指数作为变量，应用变差函数模型提供的空间结构信息求解克里金方程组，计算出插值权重系数。然后进行加权线性估值，即可获得任意空间位置处的克里金估计值，从而构建研究区的三维裂缝复杂指数属性体模型。具体地，对于变差函数模型的确定，可结合地质连续性与非均质性、地下结构的方向性、井的分布密度与采样间距等因素，综合考虑空间变异特征。通过调整基台值、块金效应值及各向异性变程等参数，对球状变差函数模型进行拟合与优化（张小艳和谭勇，2010）。在此基础上，对每个层位分别进行空间插值，并以该层位中所有单井一维裂缝复杂指数剖面的最值作为插值约束条件。将目标油田 5 口已钻井的一维裂缝复杂指数直接进行克里金插值，获得三维裂缝复杂指数属性体空间展布及连井剖面（图 5a），可看出同一层段内的横向裂缝复杂指数基本无波动，然而地层裂缝分布非均质性较强，直接使用该方法并不能较好地反映出地层裂缝复杂程度。为此，基于井震结合理念，采用地震获取的三维产状控制蚂蚁体约束测井求取的一维裂缝复杂指数进行克里金空间插值，从而构建三维裂缝复杂指数属性体模型（图 5b）。由于蚂蚁体属性可刻画研究区三维空间内的裂缝发育程度，因此将其作为约束条件时便可较好地表征地层裂缝空间分布的复杂性和非均匀性。利用该模型可沿任意已钻井或设计井轨迹提取相应的裂缝复杂指数数据，以掌握待钻井井周的裂缝复杂程度，为指导油气钻采工程提供技术支撑。



a—未采用蚂蚁体约束的裂缝复杂指数；b—采用产状控制蚂蚁体约束的裂缝复杂指数

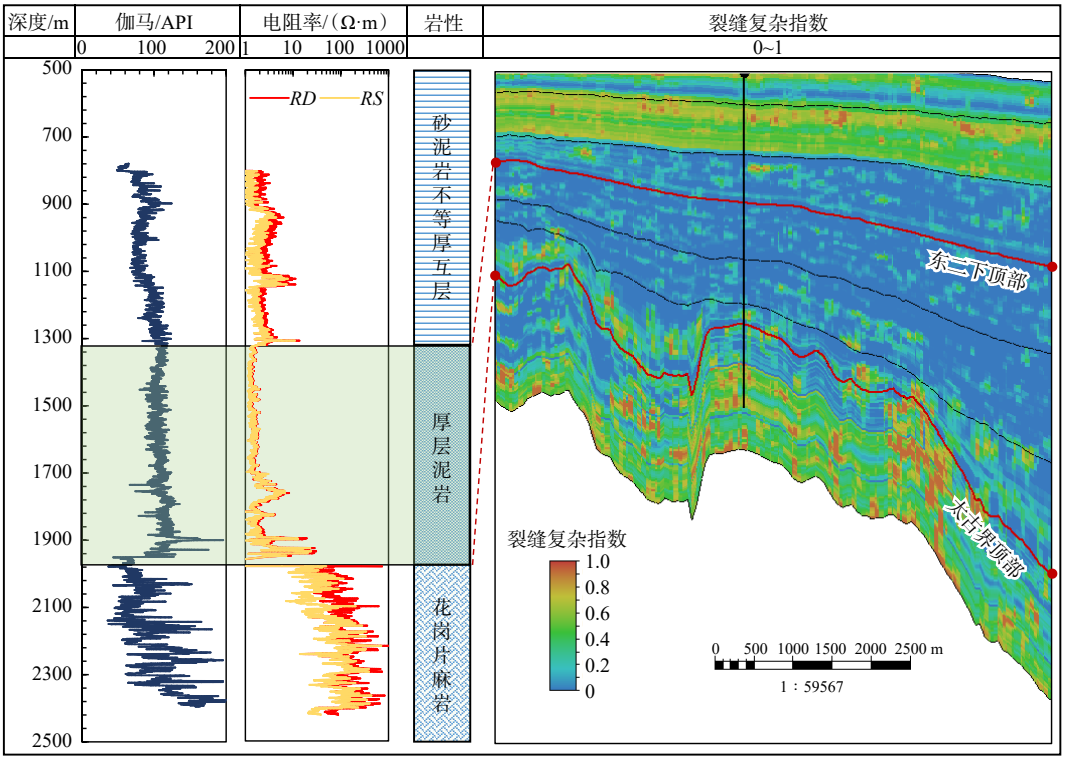
图 5 三维裂缝复杂指数属性体空间展布及连井剖面

Fig. 5 Spatial distribution of 3D fracture complexity index attribute volume and well-connecting profile

(a) Fracture complexity index without ant tracking volume constraint; (b) Fracture complexity index with ant tracking volume constraint

在三维裂缝复杂指数模型中提取目标油田 P5 井所在的属性体剖面（图 6），结合该井伽马测井、电阻率测井及岩性描述进行质量控制（Saboorian-Jooybari et al., 2015; Ye et al., 2020; Yang et al., 2023; Zhuo et al., 2024）。可看出：东二下的上部地层（778.9～1307.2 m）自然伽马有略微波动，双侧向电阻率有差异，同时该层段主要以砂泥岩不等厚互层为主，对应预测结果表明东二下的上部地层裂缝具有一定复杂程度；东二下到太古界顶部（1307.3～1978.7 m）自然伽马基本无波动，双侧向电阻率表现

无差异，同时该层段主要以厚层泥岩为主，对应预测结果表明该层段裂缝不发育；太古界潜山储层段（1978.8～2422.8 m）自然伽马有明显波动，双侧向电阻率表现明显正幅差，同时该层段主要以花岗片麻岩为主，对应预测结果表明太古界储层裂缝复杂程度高，验证了三维裂缝复杂指数模型的可靠性。因此，后续可结合现场案例，利用裂缝复杂指数表征新方法应用于漏失风险预测及可压性评估中，进一步证实该方法的现场实际应用情况。



RD、*RS* 分别为深侧向电阻率、浅侧向电阻率

图 6　辽中凹陷西斜坡某油田 P5 井裂缝复杂指数质量控制

Fig. 6　Quality control of the fracture complexity index for Well P5 in an oilfield at the western slope of the Liaozhong Sag

RD and *RS* denote the deep lateral resistivity and shallow lateral resistivity, respectively.

5　结论

（1）利用成像测井解释的裂缝开度对同一深度下双侧向测井的响应关系进行刻度，构建依据双侧向测井资料定量评估裂缝参数的经验模型，有效获得无成像测井井段的裂缝参数，可充分掌握单井纵向裂缝特征参数。

（2）采用中值滤波算法对原始地震信号进行去噪处理，其次采用混沌体算法进行不连续性检测以强化断裂带边缘，最终利用产状控制蚂蚁体有效识别地层裂缝，可充分掌握渤海油田辽中凹陷西斜坡横向裂缝发育程度。

（3）基于测井资料，考虑裂缝开度与裂缝密度对裂缝复杂程度的综合影响，采用主观层次分析法与客观熵权法组合赋权方式，构建一维裂缝复杂指数，可实现裂缝复杂程度的定量化表征。进一步结合地震资料，采用产状控制蚂蚁体属性约束克里金插值，获得三维裂缝复杂指数，可实现裂缝复杂程度的可视化展布。

（4）裂缝复杂指数不仅反映裂缝发育程度，还反映裂缝内部结构差异。将其应用于钻井工程漏失风险预测，可解决现有方法仅考虑裂缝密度作为唯一裂缝特征参数导致预测精度低的问题；将其应用于油气田开发工程压裂增产效果评估，可解决现有方法仅考虑裂缝密度或裂缝开度单一裂缝因素评价可压性不足的问题。

（5）一维裂缝复杂指数在断层发育位置进行空

间插值存在不确定性，此外，三维裂缝复杂指数模型的精度在一定程度上受已钻井数量的影响，因此将模型应用于断层发育剧烈区或井控数据稀疏区存在一定局限性。

作者贡献声明：张金发负责研究方法和论文写作；冯永存、邓金根负责论文构思和提出修改意见；何兵参与研究方法和修改；马思佳和魏静怡参与数据分析和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: ZHANG Jinfa designed the research methodology and drafted the manuscript; FENG Yongcun and DENG Jingen conceived the study and provided critical revisions; HE Bing participated in the research methodology and manuscript revision; MA Sijia and WEI Jingyi were involved in data analysis and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

ALBATTAT R, HOTEIT H, 2021. A semi-analytical approach to model drilling fluid leakage into fractured formation[J]. Rheologica Acta, 60(6-7): 353-370.

CAI W J, DENG J G, FENG Y C, et al., 2022. Developing a geomechanics-modeling based method for lost circulation risk assessment: a case study in Bohai Bay, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 210: 110045.

DAI Y F, HOU B, 2023. Correlation analysis between acid-etched fracture surface roughness and fracture conductivity in carbonate reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 30(4): 672-677. (in Chinese with English abstract)

FU L J, WEN L, WEI J, et al., 2024. Research on fire risk assessment methods of new energy vehicles under highway tunnel scenario[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 38(9): 164-173. (in Chinese with English abstract)

GUO T L, SONG Q G, GUO S W, et al., 2025. Application of CNN-GRU model in Kriging interpolation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 60(1): 185-192. (in Chinese with English abstract)

HAO Z J, WEN Q, SHI L N, et al., 2025. Spatio-temporal evolution characteristics and optimization pathways for integrated development of urban and rural areas in the Chinese section of the Silk Road Economic Belt[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 39(2): 117-130. (in Chinese with English abstract)

HU J, XU B, CHEN Z, et al., 2021. Hazard and risk assessment for hydraulic fracturing induced seismicity based on the Entropy-Fuzzy-AHP method in Southern Sichuan Basin, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 90: 103908.

HU J, MA S, GENG T, et al., 2025. Prediction and visualization of channel characteristics for lost circulation of drilling fluid in fractured formations[J]. Geofluids, 2025(1): 2482349.

HUO S W, FENG X Q, WU J, et al., 2025. Study on the coupling between the hanging- and foot-wall beds and the gas content of deep coal seams in the Linxing area, eastern margin of the Ordos Basin[J]. Journal of Geomechanics, 31(2): 235-247. (in Chinese with English abstract)

JIN J B, OU B, ZHANG D J, et al., 2021. Research status and prospect of borehole stability technology in deep fractured carbonate reservoirs[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 18(6): 47-54. (in Chinese with English abstract)

JIANG X Y, SONG T, GAN L D, et al., 2023. Multi-scale modeling of granite buried-hill fractured reservoir and its application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 58(2): 403-411. (in Chinese with English abstract)

JING T T, LI W H, DONG W, et al., 2025. Coupling relationship between the reservoir densification process and hydrocarbon charging process in the Ahe Formation in the Dibei Area of the Kuqa Depression[J]. Geoscience, 39(4): 1156-1168. (in Chinese with English abstract)

JU Y, WU G J, WANG Y L, et al., 2021. 3D Numerical model for hydraulic fracture propagation in tight ductile reservoirs, considering multiple influencing factors via the entropy weight method[J]. SPE Journal, 26(5): 2685-2702.

LI J, ZHANG C M, XIAO C W, et al. , 2008. Quantitative evaluation method of fracturing sandstone reservoir and its application in Kuqa Area, the Tarim Bsain[J]. Natural Gas Industry, 28(10): 25-27, 136. (in Chinese with English abstract)

LI J, LI J, MA F J, et al. , 2023. Hydraulic fracture propagation with complex natural fracture network in Lacustrine shale oil reservoirs[C]//SPE Caspian Technical Conference and Exhibition. Baku: SPE: SPE-217646-MS.

LI J D, YANG T H, LIU F Y, et al., 2024. Modeling spatial variability of mechanical parameters of layered rock masses and its application in slope optimization at the open-pit mine[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 181: 105859.

LI J Z, YANG B, ZENG Z L, et al., 2024. Metallogenic prediction of ion-adsorption type middle and heavy rare earth deposits in southern Jiangxi based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Geology and Exploration, 60(5): 919-931. (in Chinese with English abstract)

LV B N, CHEN X H, WU H J, et al., 2024. A fine seismic prediction method for complex carbonate fractured-vuggy reservoirs[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 63(2): 426-436. (in Chinese with English abstract)

LI Y, HE J H, DENG H C, et al., 2024. Analysis of connectivity characterization and mechanical effectiveness of natural fracture in deep shale reservoirs: A case study of the Wufeng-Longmaxi formations in the Dingshan-Dongxi area, southeastern margin of Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 35(2): 230-244. (in Chinese with English abstract)

NAJJARPOUR M, JALALIFAR H, NOROUZI-APOURVARI S, 2022. Fifty years of experience in rate of penetration management: managed pressure

drilling technology, mechanical specific energy concept, bit management approach and expert systems-A review[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 208: 109184.

QI Z Z, SHEN J S, DANG W B, et al., 2025. Log-based fault-fracture reservoir identification and porosity evaluation in Binchang area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 64(5): 979-992. (in Chinese with English abstract)

QIAO H, ZHANG Y G, NIE H K, et al., 2024. Characterization and 3D modeling of multiscale natural fractures in shale gas reservoir: a case study in the Pingqiao Structural Belt, Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 31(5): 89-102. (in Chinese with English abstract)

QIN J H, XIAN C G, ZHANG J, et al., 2025. Characteristics of hydraulic fracture network in the tight conglomerate reservoir based on a hydraulic fracturing test site[J]. Petroleum Exploration and Development, 52(1): 217-228. (in Chinese with English abstract)

SABOORIAN-JOOYBARI H, DEJAM M, CHEN Z, et al. , 2015. Fracture identification and comprehensive evaluation of the parameters by Dual Laterolog data[C]//SPE Middle East Unconventional Resources Conference and Exhibition. Muscat: SPE: SPE-172947-MS.

SHANG X F, LONG S X, DUAN T Z, 2021. Current situation and development trend of fracture characterization and modeling techniques in shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 32(2): 215-232. (in Chinese with English abstract)

SHEN Q H, LIU J, LI Z Y, et al., 2024. Experimental study on the effect of rock mechanical properties and fracture morphology features on lost circulation[J]. SPE Journal, 29(8): 3964-3981.

TAN Q G, KANG Y L, SONG F Q, et al., 2024. Numerical simulation on drilling fluid loss in fractured carbonate reservoirs based on generalized lattice Boltzmann model[J]. Journal of Changzhou University (Natural Science Edition), 36(4): 37-45. (in Chinese with English abstract)

WAN Y Y, WANG X Q, LEI F Y, et al., 2024a. Compressibility evaluation and application of E_3^2 shale oil in Yingxiongling Area, Qaidam Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 11(3): 120-129. (in Chinese with English abstract)

WAN Y Y, LIN H, GUO D L, et al., 2024b. Developing a large-scale fracturing management system using AHP method to improve the fracturing effect of unconventional reservoirs[J]. Oil Drilling & Production Technology, 46(4): 479-491. (in Chinese with English abstract)

WANG G C, BHATTACHARYA S, 2023. Natural fracture mapping and discrete fracture network modeling of Wolfcamp formation in hydraulic fracturing test site phase 1 area, Midland Basin: fractures from 3D seismic data, image log, and core[J]. Marine and Petroleum Geology, 157: 106474.

WANG J P, ZENG L B, XU Z P, et al., 2024. The impact of diagenetic fluids on the structural fracture filling and dissolution alteration of ultra-deep tight sandstone reservoirs: a case study of the Kelasu oil and gas field in the Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 31(3): 312-323. (in Chinese with English abstract)

WEI S M, HAO Y L, SUI W B, et al., 2024. Research on the characteristics of fiber optic signals for neighboring wells with hydraulic fracture propagation at different inclination angles[J]. Petroleum Science Bulletin, 9(5): 764-776. (in Chinese with English abstract)

XIONG J N, SUN M Y, SUN M, 2019. Risk assessment on mountain torrents and debris flows along long-distance pipelines based on the GIS and coupling-coordination principle[J]. Natural Gas Industry, 39(3): 116-124. (in Chinese with English abstract)

XU C Y, XIE Z C, KANG Y L, et al., 2020. A novel material evaluation method for lost circulation control and formation damage prevention in deep fractured tight reservoir[J]. Energy, 210: 118574.

XU F Q, SONG X Z, LI S, et al., 2024. A multi-objective optimization and multi-attribute decision-making analysis for technical-thermodynamic-economic evaluation considering the rock damage on production performance of hot dry rock geothermal resources[J]. Applied Thermal Engineering, 241: 122350.

YANG R Y, CONG R C, GONG Y J, et al., 2023. Micromechanical contrast of Ordos Basin sandstone-mudstone interbedded layered rocks[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 128(10): e2023JB027190.

YE T, NIU C M, WEI A J, 2020. Characteristics and genetic mechanism of large granitic buried-hill reservoir, a case study from PengLai oil field of Bohai Bay Basin, north China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 189: 106988.

ZHANG J F, FENG Y C, HE B, et al., 2025. Wellbore strengthening for addressing lost circulation in fractured formations: a comprehensive review[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 58(1): 1-32.

ZHANG X M, WANG R, SHI W Z, et al., 2023. Structure- and lithofacies-controlled natural fracture developments in shale: implications for shale gas accumulation in the Wufeng-Longmaxi Formations, Fuling Field, Sichuan Basin, China[J]. Geoenergy Science and Engineering, 223: 211572.

ZHANG X Y, TAN Y, 2010. The automatic fittifng and implementation of the spherical model of variogram[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 34(2): 253-257. (in Chinese with English abstract)

ZHUO Q G, ZHANG F Q, ZHANG B, et al., 2024. Tectonic fracture prediction for lacustrine carbonate oil reservoirs in Paleogene formations of the western Yingxiongling area, Qaidam Basin, NW China based on numerical simulation[J]. Carbonates and Evaporites, 39(2): 38.

附中文参考文献

戴一凡，侯冰，2023. 碳酸盐岩酸蚀裂缝面粗糙度与导流能力相关性分析[J]. 断块油气田，30(4)：672-677.

付立家，文龙，卫佳，等，2024. 公路隧道场景下的新能源汽车火灾风险评价方法研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学)，38(9)：164-173.

郭天良，宋强功，郭淑文，等，2025. CNN-GRU 模型在克里金插值中的应用[J]. 石油地球物理勘探，60(1)：185-192.

郝智娟，文琦，施琳娜，等，2025. 丝绸之路经济带中国段城乡融合发展的时空演变特征与优化路径[J]. 干旱区资源与环境，39(2)：117-130.

霍少伟，冯兴强，吴见，等，2025. 鄂东缘临兴地区深层煤层顶底板与含气性耦合关系研究[J]. 地质力学学报，31(2)：235-247.

姜晓宇，宋涛，甘利灯，等，2023. 花岗岩潜山裂缝型储层多尺度建模与应用[J]. 石油地球物理勘探，58(2)：403-411.

金军斌，欧彪，张杜杰，等，2021. 深部裂缝性碳酸盐岩储层井壁稳

定技术研究现状及展望[J]. 长江大学学报(自然科学版), 18(6): 47-54.

景涛涛, 李文浩, 董卫, 等, 2025. 库车坳陷迪北地区阿合组储层致密过程与油气充注耦合关系[J]. 现代地质, 39(4): 1156-1168.

李军, 张超谟, 肖承文, 等, 2008. 库车地区砂岩裂缝测井定量评价方法及应用[J]. 天然气工业, 28(10): 25-27, 136.

李家桢, 杨斌, 曾载淋, 等, 2024. 基于模糊层次分析法的赣南离子吸附型中重稀土成矿预测[J]. 地质与勘探, 60(5): 919-931.

李勇, 何建华, 邓虎成, 等, 2024. 深层页岩储层天然裂缝连通性表征及力学有效性分析: 以川东南盆缘丁山—东溪地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 天然气地球科学, 35(2): 230-244.

吕丙南, 陈学华, 吴昊杰, 等, 2024. 复杂碳酸盐岩缝洞型储层的地震精细预测方法[J]. 石油物探, 63(2): 426-436.

齐真真, 沈金松, 党文斌, 等, 2025. 彬长区块断缝体储层的测井识别与孔隙度评价[J]. 石油物探, 64(5): 979-992

覃建华, 鲜成钢, 张景, 等, 2025. 基于水力压裂现场实验室的致密砾岩人工缝网特征[J]. 石油勘探与开发, 52(1): 217-228.

乔辉, 张永贵, 聂海宽, 等, 2024. 页岩储层多尺度天然裂缝表征与三维地质建模: 以四川盆地平桥构造带五峰组-龙马溪组页岩为例[J]. 地学前缘, 31(5): 89-102.

商晓飞, 龙胜祥, 段太忠, 2021. 页岩气藏裂缝表征与建模技术应用现状及发展趋势[J]. 天然气地球科学, 32(2): 215-232.

谭启贵, 康毅力, 宋付权, 等, 2024. 基于格子 Boltzmann 模型的裂缝性储层钻井液漏失数值模拟[J]. 常州大学学报(自然科学版), 36(4): 37-45.

万有余, 王小琼, 雷丰宇, 等, 2024a. 柴达木盆地英雄岭 E_3^2 页岩油可压性评价及应用[J]. 非常规油气, 11(3): 120-129.

万有余, 林海, 郭得龙, 等, 2024b. 层次分析法制定大型压裂管理制度提升非常规储层压裂效果[J]. 石油钻采工艺, 46(4): 479-491.

王俊鹏, 曾联波, 徐振平, 等, 2024. 成岩流体对超深致密砂岩储层构造裂缝充填及溶蚀改造的影响: 以塔里木盆地克拉苏油气田为例[J]. 地学前缘, 31(3): 312-323.

韦世明, 郝亚龙, 隋微波, 等, 2024. 不同倾角水力裂缝扩展的邻井光纤监测信号特征研究[J]. 石油科学通报, 9(5): 764-776.

熊俊楠, 孙明远, 孙铭, 2019. 基于 GIS 及耦合协调原理的长输管道山洪泥石流风险性评价[J]. 天然气工业, 39(3): 116-124.

张小艳, 谭勇, 2010. 变差函数球状模型的自动拟合与实现[J]. 物探与化探, 34(2): 253-257.