

泸州北地区深层页岩储层多尺度 裂缝表征

张馨月^{1,2}, 王馨玥^{1,2}, 陈 岑^{1,2}, 李松泽^{1,2}, 张珈瑞^{1,2}, 贾 敏³, 胡 怡³, 成 群⁴

¹重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

²复杂油气田勘探开发重庆市重点实验室, 重庆

³中国石化江苏油田分公司, 江苏 扬州

⁴金凤实验室, 重庆

收稿日期: 2025年6月10日; 录用日期: 2025年7月11日; 发布日期: 2025年7月24日

摘 要

天然裂缝作为页岩储层的关键储集空间与渗流通道, 对油气运移、富集及开发方案具有决定性影响。四川盆地南部泸州北区块深层页岩储层受复杂地质作用影响, 呈现多成因机制与显著尺度差异的裂缝发育特征, 传统单一建模方法难以实现精准表征。本研究基于岩心分析、成像测井解释及三维地震数据, 建立了多尺度离散裂缝网络建模技术体系, 系统揭示了该区裂缝发育规律。主要成果包括: ① 研究区裂缝系统遵循幂律分布规律, 按规模可划分为大尺度与中小尺度两类; ② 成因机制研究表明, 中小尺度裂缝可划分为构造成因(占比近90%)与沉积成因两类, 其中构造成因裂缝可进一步细分为褶皱控制型与断裂控制型; ③ 创新性提出多属性体约束下随机-确定性耦合建模方法, 通过引入神经网络模型有效降低裂缝预测的不确定性; ④ 模型验证表明, 研究区以中小尺度裂缝为主导, 构造运动是裂缝发育的主控因素。

关键词

深层页岩气藏, 裂缝分级评价, 多尺度建模技术, 离散裂缝网络, 地震属性分析

Characterization of Multi-Scale Fractures in Deep Shale Reservoirs in North Area of Luzhou

Xinyue Zhang^{1,2}, Xinyue Wang^{1,2}, Cen Chen^{1,2}, Songze Li^{1,2}, Jiarui Zhang^{1,2}, Min Jia³, Yi Hu³,
Qun Cheng⁴

¹School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

²Chongqing Key Laboratory of Complex Oil and Gas Field Exploration and Development, Chongqing

文章引用: 张馨月, 王馨玥, 陈岑, 李松泽, 张珈瑞, 贾敏, 胡怡, 成群. 泸州北地区深层页岩储层多尺度裂缝表征[J]. 矿山工程, 2025, 13(4): 810-823. DOI: 10.12677/me.2025.134092

³Sinopec Jiangsu Oilfield Branch, Yangzhou Jiangsu⁴Jinfeng Laboratory, ChongqingReceived: Jun. 10th, 2025; accepted: Jul. 11th, 2025; published: Jul. 24th, 2025

Abstract

As the key reservoir space and seepage channel of shale reservoir, natural fractures have a decisive influence on oil and gas migration, enrichment and development plan. The deep shale reservoir in Luzhou North Block, southern Sichuan Basin, is affected by complex geological processes and presents the characteristics of fracture development with multiple genetic mechanisms and significant scale differences, which makes it difficult to be accurately characterized by the traditional single modeling method. Based on core analysis, imaging logging interpretation and 3D seismic data, a multi-scale discrete fracture network modeling system is established to systematically reveal the fracture development law in this area. The main results include: ① The fracture system in the study area follows the power law distribution law, and can be divided into large scale and small scale according to the scale; ② The study of genetic mechanism shows that the small and medium-scale fractures can be divided into two types: tectonic origin (accounting for nearly 90%) and sedimentary origin, and the tectonic origin fractures can be further subdivided into folding controlled type and fault controlled type. ③ An innovative random-deterministic coupling modeling method under multi-attribute body constraints is proposed to effectively reduce the uncertainty of crack prediction by introducing a neural network model; ④ Model verification shows that the study area is dominated by small and medium scale fractures, and tectonic movement is the main factor of fracture development.

Keywords

Deep Shale Gas Reservoir, Fracture Grading Evaluation, Multi-Scale Modeling Technology, Discrete Fracture Network, Seismic Attribute Analysis

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

深层页岩气作为油气勘探开发的重要领域,近年来在理论与技术层面取得显著进展。四川盆地泸州北地区(研究区)页岩气资源潜力突出,但其储层经历多期应力叠合改造,形成断裂系统、天然裂缝及局部微构造。研究表明,天然裂缝的受力状态直接影响水力压裂过程中缝网的复杂程度与扩展形态,进而决定页岩气产能。因此,精准表征天然裂缝的分布规律是提升开发效率的关键环节[1]。

离散裂缝网络(DFN)模型是表征裂缝储集空间的主流技术,其通过整合露头、测井及地震等多元数据,实现对裂缝系统的多维度评价[2]。薛艳梅[3]等基于裂缝成因与尺度分级,提出确定性与随机性结合的建模方法;赵春段[4]等则以蚂蚁体属性与成像测井数据为约束,通过随机模拟构建 DFN 模型。然而,现有多尺度模型对裂缝倾向、倾角等参数的刻画精度不足,与实际地质特征存在偏差[5]-[8]。为此,本研究综合岩心、地震及成像测井数据,依据裂缝主控因素分类分级,采用确定性与随机性融合的建模方法,构建研究区多尺度裂缝模型。

2. 地质概况

研究区位于四川盆地南部川南低陡褶皱带，受多期构造活动影响，发育北东-南西向帚状构造带，褶皱强度自北西向南东递减(图 1)。目的层为五峰组-龙马溪组深层页岩，储层具有低孔、低渗特征，裂缝发育程度对页岩气富集起关键控制作用[9]-[11]。区内裂缝分布受岩性、地应力及构造应力场共同影响[12]，因此明确多尺度裂缝的空间展布规律对开发实践至关重要。

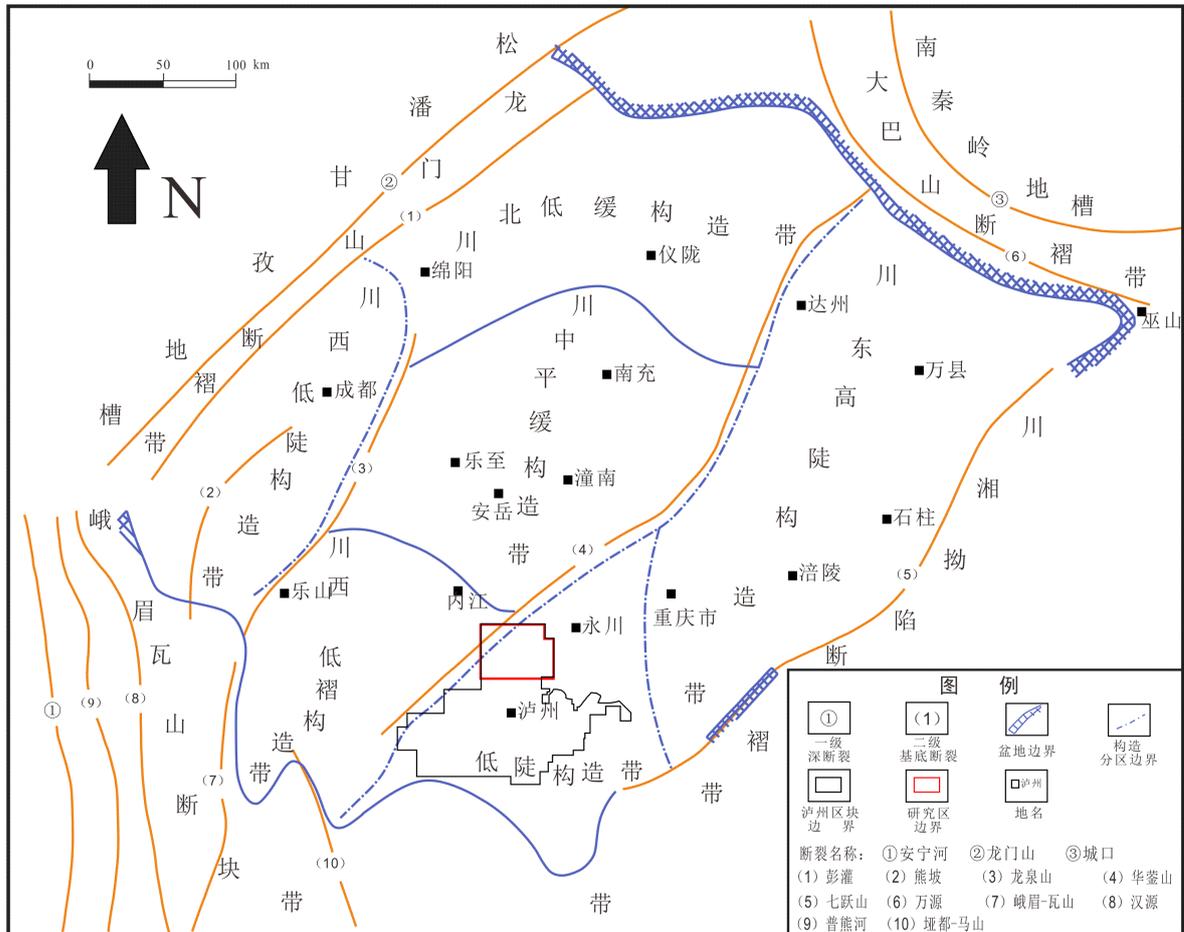


Figure 1. Structural map of northern Luzhou area
图 1. 泸州北地区构造位置图

3. 裂缝特征分析

四川盆地南部泸州北部区域以构造格架复杂及埋藏深度大为显著特征。该区目标页岩储层呈现低孔隙度、特低渗透率的物性特征。因此，区内断裂系统及裂缝网络对于页岩气赋存状态与富集规律具有关键控制作用。前人研究表明[13]，该区断裂及裂缝系统发育的主控因素为区域古构造应力场。晚侏罗世-早白垩世时期，受太平洋板块向欧亚大陆俯冲的区域动力学背景制约，研究区经历了燕山期强烈的陆内挤压造山作用。此阶段构成了区内最主要的构造变形期，奠定了现今主体裂缝系统的基本格架。其中，燕山运动第三幕的构造改造尤为强烈。基于区域构造解析及节理玫瑰花图(图 2)分析，确定该期构造活动的古构造主压应力方向约为 $NW135^\circ$ 。这一应力场特征的厘定，对于深入阐释研究区裂缝系统的形成机制具有重要指示意义。

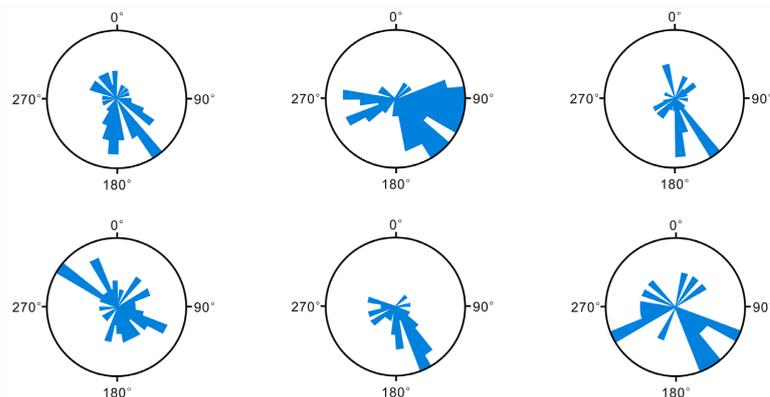


Figure 2. Rose diagram of joints in the study area
图 2. 研究区节理玫瑰花图

3.1. 裂缝发育类型

基于裂缝控制因素, 商晓飞[14]等将其归纳为区域构造应力、构造部位及沉积成岩作用三类。研究区裂缝系统的发育演化受多期构造应力场叠加作用控制, 可划分为三个主要构造活动期次。首先是印支期构造裂缝形成阶段, 该期裂缝系统主要受江南 - 雪峰隆起 NW 向推挤作用及龙门山造山带远程应力传递效应制约, 区域构造应力场以 NNW-SSE 向挤压为特征。在此背景下, 五峰组 - 龙马溪组页岩层系经历差异构造隆升, 形成共轭剪切裂缝系统。该系统主裂缝走向为 NNE 和 NW, 倾角普遍大于 75° 。其次是燕山晚期 - 喜山早期走滑改造阶段, 受江南 - 雪峰隆起 NW 向构造扩展与黔中隆起的联合构造作用影响, 区域构造应力场转变为 SEE-NWW 向挤压。此阶段主要表现为对早期裂缝的走滑改造, 早期形成的 NNE 向裂缝在右行走滑应力场作用下发生旋转变形, 部分被改造为 NEE 向张剪性裂缝。最后是喜山中 - 晚期差异隆升与活化阶段, 在川中隆起与江南 - 雪峰隆起的联合构造挤压作用下, 区域应力场表现为 NEE-SWW 向挤压。该期构造活动导致先存断裂系统发生逆向冲断活化改造, 并新生了 NNE-SSW 向及 SEE-NWW 向平面剪切缝。

而结合井筒分布与地质调研, 研究区裂缝可分为两类成因(图 3): ① 构造成因缝: 进一步划分为褶皱控制型与断裂控制型。褶皱核部及断层周缘裂缝发育密集(图 4); ② 沉积成因缝: 以低角度层理缝为主, 受页岩脆性及纹层控制, 延伸范围较小。

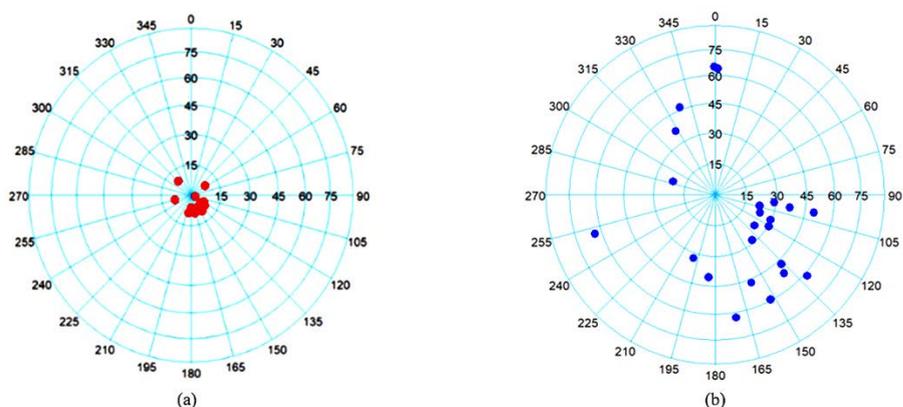


Figure 3. Distribution of different fractures within a single wellbore. (a) Bedding fractures; (b) Structural fractures

图 3. 不同裂缝在单一井筒上的分布情况。(a) 页理缝; (b) 构造缝

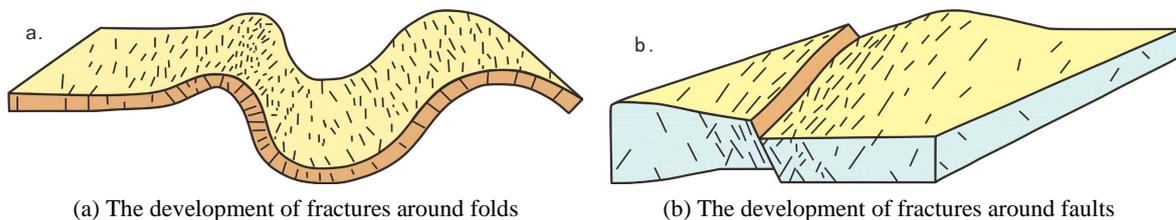


Figure 4. Fold and fault-related fracture development schematic diagram
图 4. 褶皱、断层周围裂缝发育示意图

通过成像测井数据，按倾角将裂缝划分为三组(图 5)：① 近水平缝(倾角 <math> < 15^\circ </math>)：以层理缝为主，规模小、分布零散；② 中低角度缝(> 60^\circ </math>)：为研究区裂缝发育的主体类型，集中分布于断层周缘与褶皱核部。

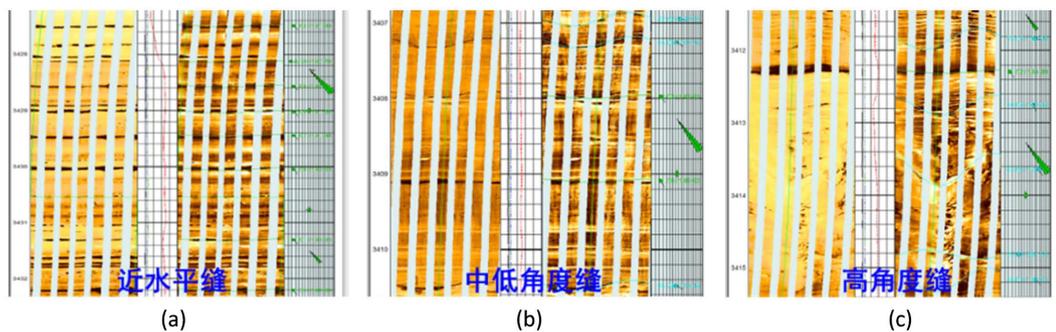


Figure 5. Imaging logs of different fracture types in Lu203H1-3D. (a) Near-horizontal fractures; (b) Low to medium-angle fractures; (c) High-angle fractures
图 5. Lu203H1-3D 不同类型裂缝成像测井图。(a) 近水平缝；(b) 中低角度缝；(c) 高角度缝

3.2. 裂缝参数特征

根据裂缝成因及倾角特征，研究区中小尺度裂缝可分为沉积成因与构造成因两种类型。构造成因裂缝以高角度缝为主体，进一步依据主控因素划分为断裂控制型与褶皱控制型两种亚类：

① 断裂控制型裂缝：以北东向展布为主，其倾角分布与区域断层走向高度吻合，主要集中发育于断层周缘地带。裂缝延伸规模介于 120~1322 米，发育强度表现出显著的与断层距离的依赖性，即随着与断层距离增大，裂缝发育强度呈系统性衰减趋势(图 6)。

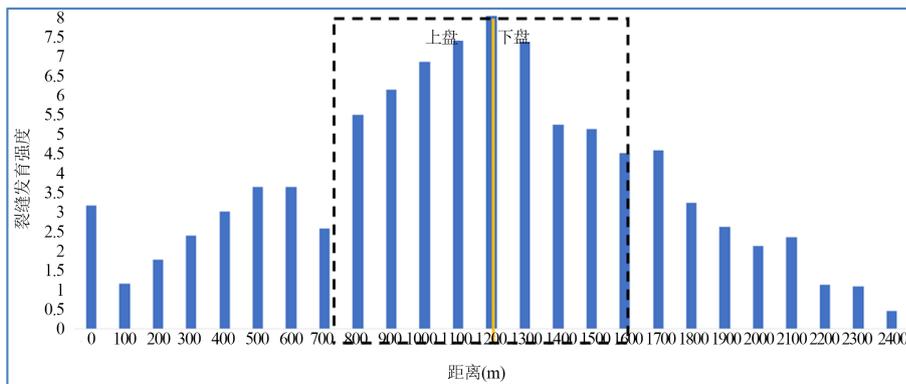


Figure 6. Histogram of fracture development intensity around faults
图 6. 断层周围裂缝发育强度直方图

② 褶皱控制型裂缝：以张性裂缝为主导，延伸长度分布范围为 89~1289 米。该类型裂缝在褶皱核部区域发育最为密集，向褶皱两翼方向逐渐减弱。定量分析表明，其发育强度与构造曲率值呈显著正相关关系，曲率高值区对应裂缝发育优势区(图 7)。

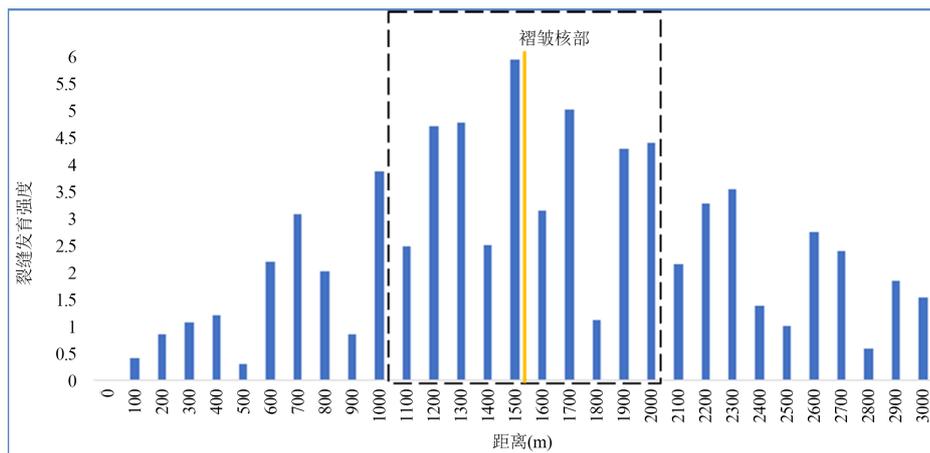


Figure 7. Histogram of fracture development intensity around folds
图 7. 褶皱周围裂缝发育强度直方图

其次，是沉积成因的裂缝，此类裂缝以层理缝为主体，通常表现为低角度特征。地质调查与岩心分析表明，其发育程度主要受控于页岩脆性矿物含量及纹层结构的空展布。受沉积成岩作用限制，此类裂缝延伸规模普遍较小，通常不超过百米量级，局部受岩性差异影响可形成短距离密集发育带。

4. 多尺度裂缝建模

4.1. 建模方法研究

地震资料因其较高的横向分辨率优势，在裂缝表征中发挥着重要作用，其中大尺度裂缝可通过蚂蚁体属性的强异常响应进行有效识别[14]。本研究针对大尺度裂缝系统，采用确定性建模方法，通过提取对裂缝敏感的蚂蚁体属性，构建了大尺度离散裂缝网络模型。

针对中小尺度裂缝的地震响应微弱、识别困难的技术挑战，本研究采取多学科数据融合策略：对于构造成因的中小尺度裂缝，综合利用岩心分析、成像测井解释成果，结合多维度地震属性体(方差体、曲率体等)，构建了基于神经网络的智能预测模型。该神经网络模型依托 Petrel 软件的数学算法框架，采用多层神经网络结构，通过机器学习训练建立了地震属性与裂缝发育强度的非线性映射关系。在此基础上，分别针对沉积和构造双重成因机制，应用随机建模方法构建了中小尺度离散裂缝网络模型。

4.2. 大尺度裂缝

本研究对大尺度裂缝的表征主要依托蚂蚁体属性的解析实现，通过图 8 展示了基于蚂蚁体的大尺度裂缝识别流程。鉴于原始蚂蚁体数据存在信息混杂的特点，研究采用分步优化策略：首先通过深度域数据体去噪和构造平滑处理优化数据质量，随后在区域裂缝发育模式的指导下，采用人机交互方式精确提取有效大尺度裂缝。

基于确定性建模结果的统计分析表明，研究区主要发育北东向与南西向两组高角度天然裂缝系统。其中北东向裂缝组共计 2351 条，倾角分布区间为 63° ~ 90° ；南西向裂缝组 570 条，倾角变化范围 0° ~ 87° 。两组裂缝空间分布呈现显著差异：北东向裂缝具有高密度聚集特征，而南西向裂缝则呈全域离散分布(图

9)。裂缝尺度分析显示，全区大裂缝延伸长度主要集中于 1600~4800 米区间(图 10)，展现了显著的多尺度发育特征。

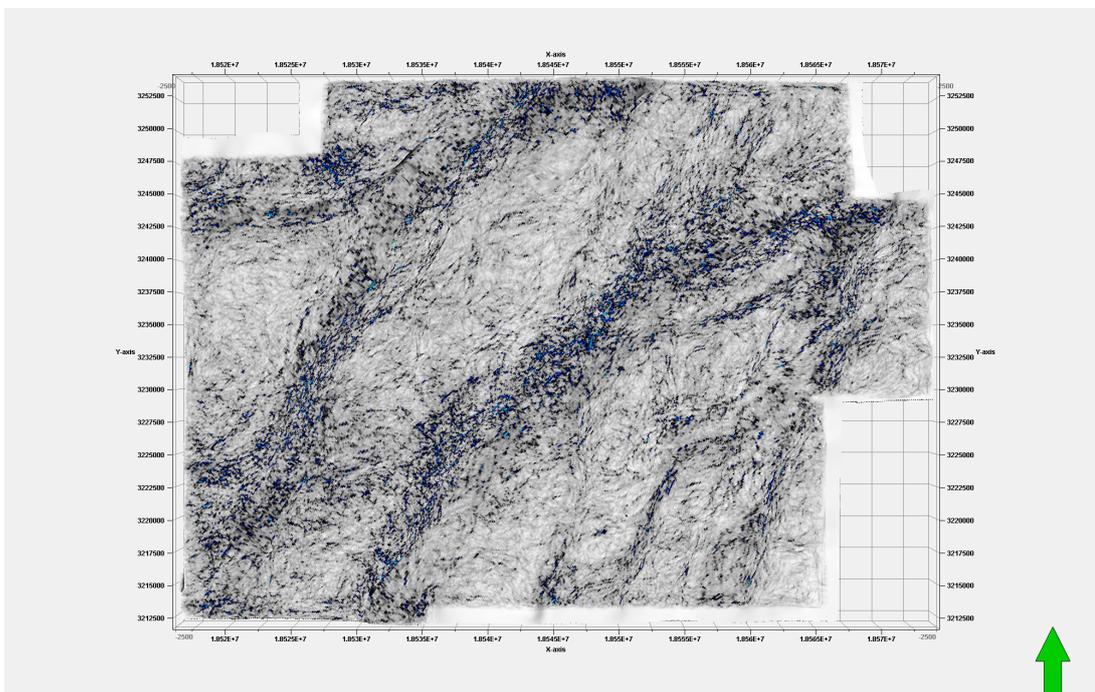


Figure 8. Study area ant-tracking attribute body
图 8. 研究区蚂蚁属性体

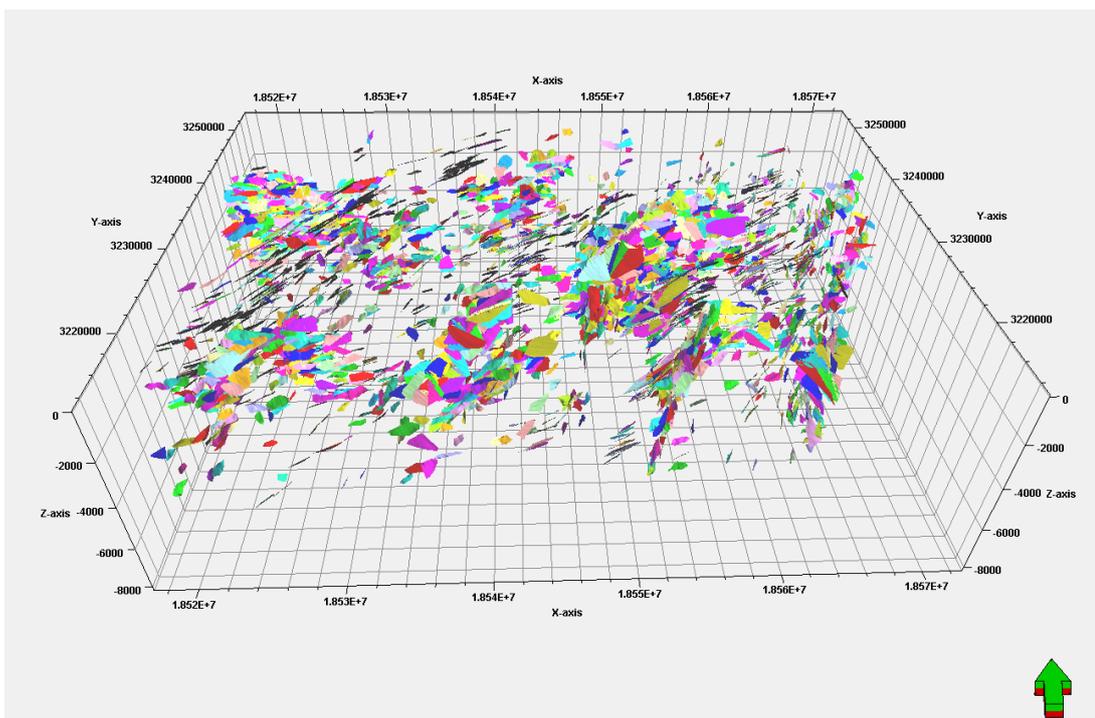


Figure 9. Large-scale discrete fracture network model
图 9. 大尺度离散裂缝网络模型

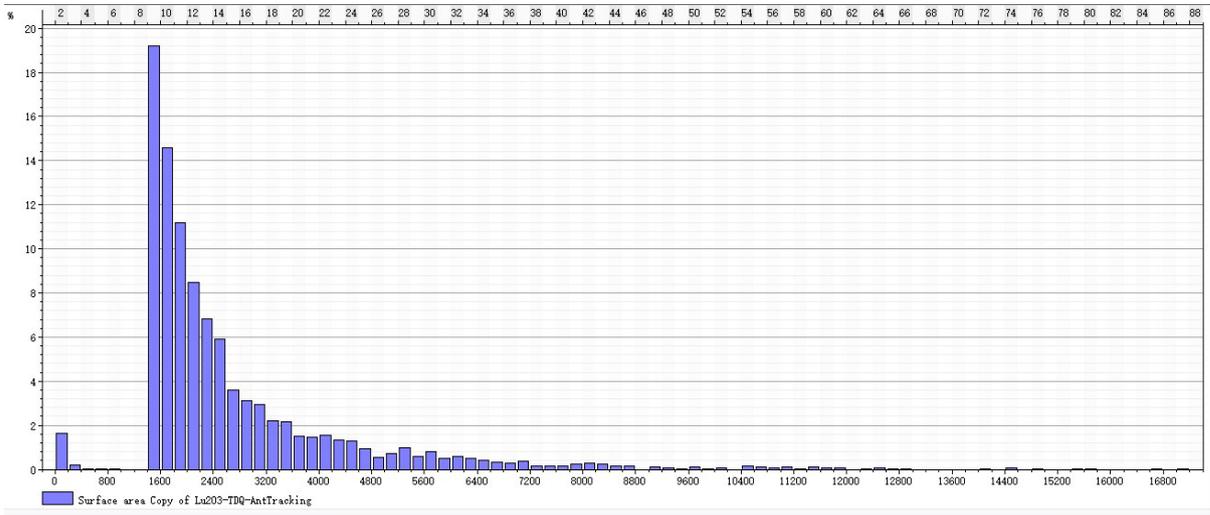


Figure 10. Large-scale fracture length histogram
图 10. 大尺度裂缝长度直方图

4.3. 中小尺度裂缝

4.3.1. 构造成因裂缝

① 褶皱控制型裂缝建模：基于地震属性(蚂蚁体、方差体、曲率体等)构建神经网络模型，通过权重计算筛选出与裂缝强度相关性高的敏感属性。研究表明，褶皱核部等高曲率区域裂缝发育强度显著，需通过曲挠度分析对研究区曲率场进行空间分级。再以单井裂缝强度数据为硬约束，结合多属性神经网络模型(图 11)，采用协同克里金算法建立三维裂缝强度模型(图 12)。该模型能有效表征中小尺度褶皱控制型裂缝的立体发育规律。

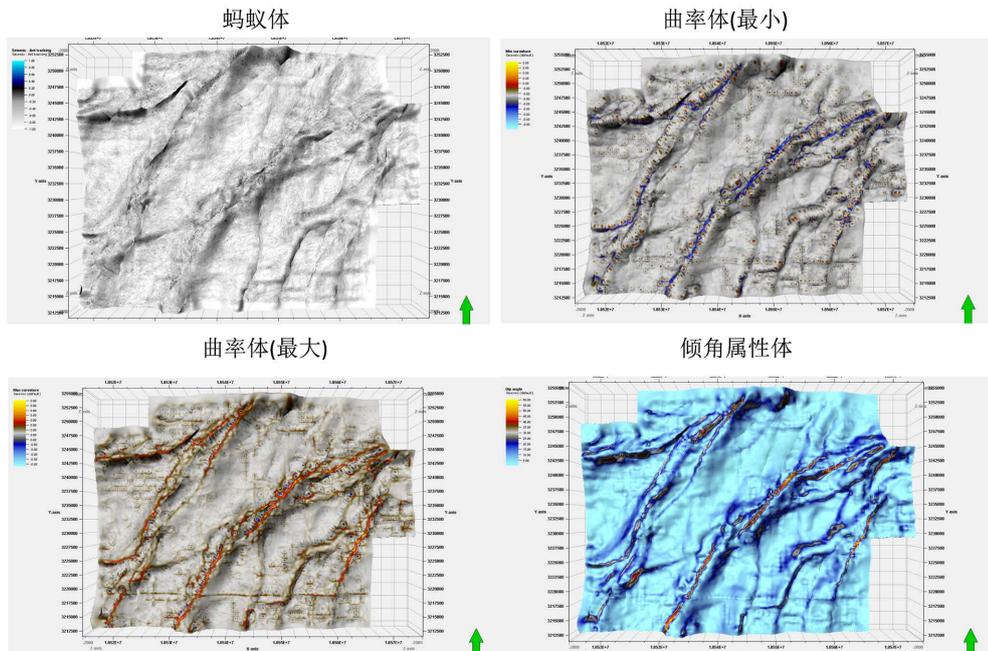


Figure 11. Seismic fracture prediction attribute volume
图 11. 地震裂缝预测属性体

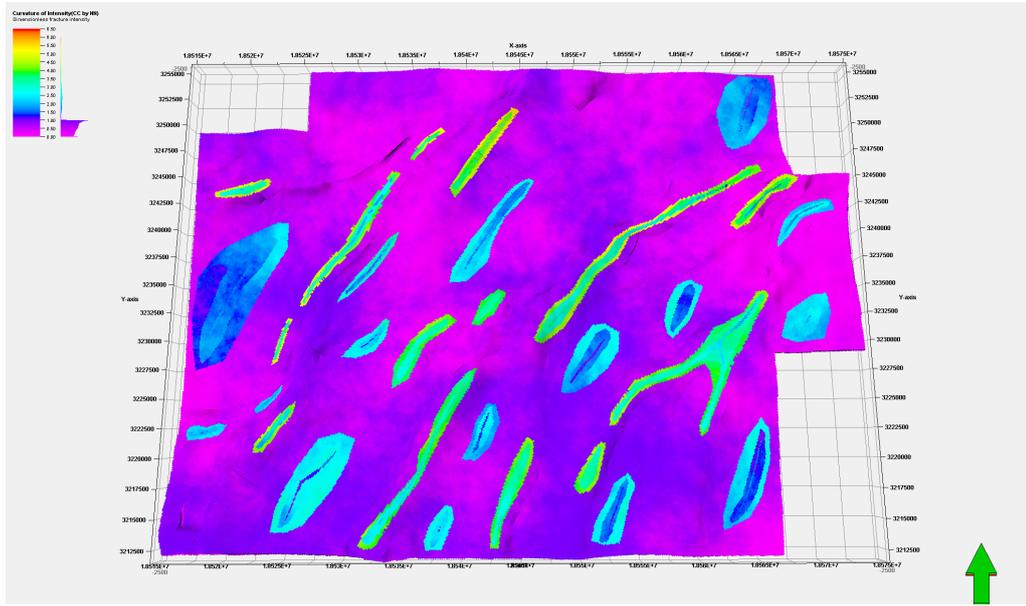


Figure 12. Fracture intensity model controlled by folding under multi-attribute constraints
图 12. 多属性约束下褶皱控制型裂缝强度模型

② 断裂控制型裂缝建模：建立断层距离 - 裂缝发育强度定量模型，裂缝发育强度的计算公式为：

$$\text{Intensity (fault)} = 128.7 * \text{Pow} (\text{Intensity (distance from faults)}, -0.632) \quad (1)$$

式中 Intensity (distance from faults)为经归一化处理的断层控制裂缝强度体，由单井裂缝数据离散建模获得。以多属性神经网络模型为约束(图 13)，应用协同克里金算法建立断裂控制型裂缝强度模型(图 14)，该模型可准确反映断裂系统对裂缝发育强度的控制作用。

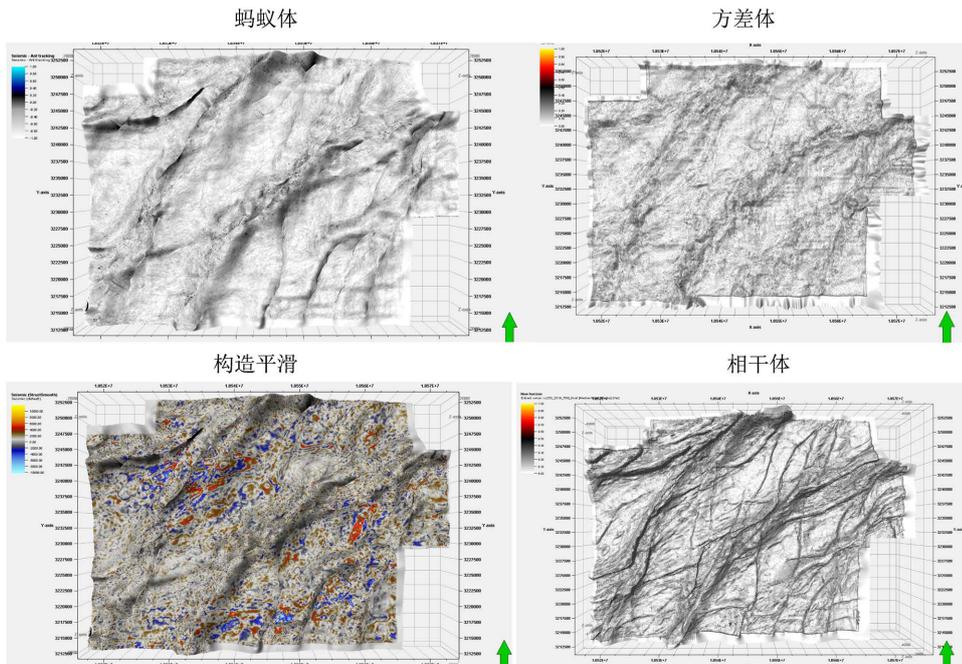


Figure 13. Seismic fracture prediction attribute volume
图 13. 地震裂缝预测属性体

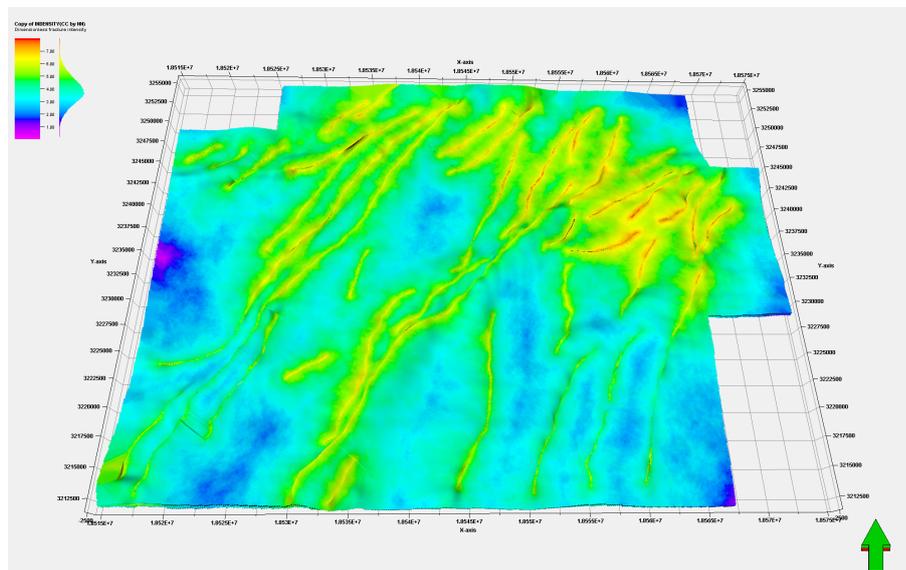


Figure 14. Fracture intensity model controlled by faulting under multi-attribute constraints
图 14. 多属性约束下断裂控制型裂缝强度模型

4.3.2. 沉积成因裂缝

研究区沉积成因裂缝以层理缝为主，是页岩沉积成岩过程中形成的原生裂缝系统。与连续分布的层理面相比，层理缝在发育数量、延伸规模及空间连续性上均显著弱化，且地表露头观测受风化改造影响难以真实反映地下埋藏条件下的裂缝发育特征。因此，需通过以下方法实现层理缝的精细表征：首先，基于岩心精细描述与成像测井解释成果，定量统计单井层理缝发育强度参数，据此构建裂缝强度累计曲线(图 15、图 16)。该曲线通过统计不同深度段裂缝密度的累计增长趋势，可直观反映垂向裂缝发育的分异规律，为推断三维空间中裂缝分布模式提供依据。随后，以单井裂缝强度累计曲线为基准，将离散化的裂缝强度参数加载至地质模型中，通过地质统计学插值算法进行井间预测，最终建立研究区层理缝发育强度三维模型(图 17)。该方法通过融合原位观测数据与空间插值技术，实现了埋藏条件下层理缝系统的定量化表征。

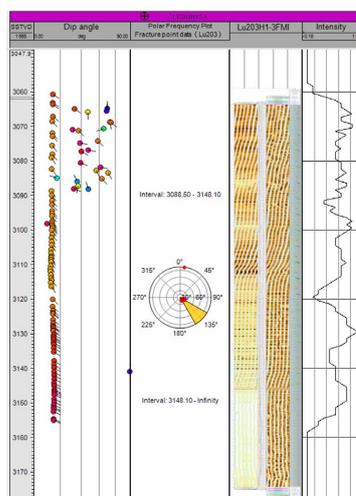


Figure 15. Cumulative fracture intensity curve of Lu203H1-3D
图 15. Lu203H57-3 裂缝累计强度曲线



(a) Lu221, 4086.20 m; (b) Lu221, 4079.17 m; (c) Zu203, 4108.85 m; (d) Lu211, 4928.69 m; (e) Lu207, 3434.11 m; (f) Lu203H57-3, 3752.28 m; (g) Lu211, 4926.04 m; (h) Lu206, 4043.21 m; (i) Zi216, 3984.75 m.

Figure 16. Characteristics of natural fracture development in the cores of the Wufeng-Longmaxi formations in the Luzhou area

图 16. 泸州地区五峰组 - 龙马溪组岩心天然裂缝发育特征

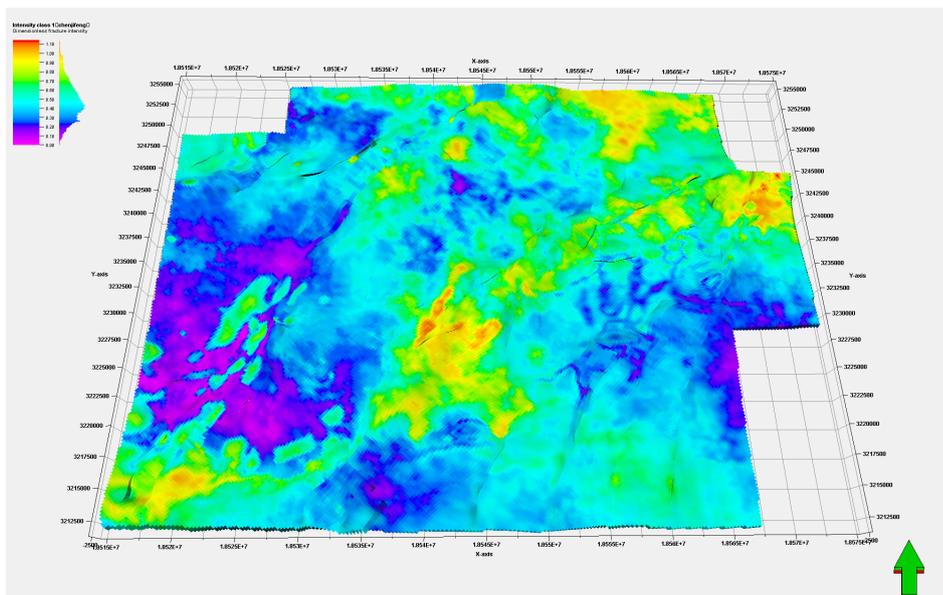


Figure 17. Development intensity of bedding plane fractures in the study area

图 17. 研究区层理缝发育强度体

4.4. 多尺度裂缝模型分析

本项研究通过综合建模方法构建了多尺度裂缝网络模型(图 18)。针对中小尺度裂缝系统,采用随机建模技术,以多属性约束的裂缝强度模型为输入数据,建立了三组中小尺度裂缝模型,并与确定性建模获得的大尺度裂缝模型进行整合。

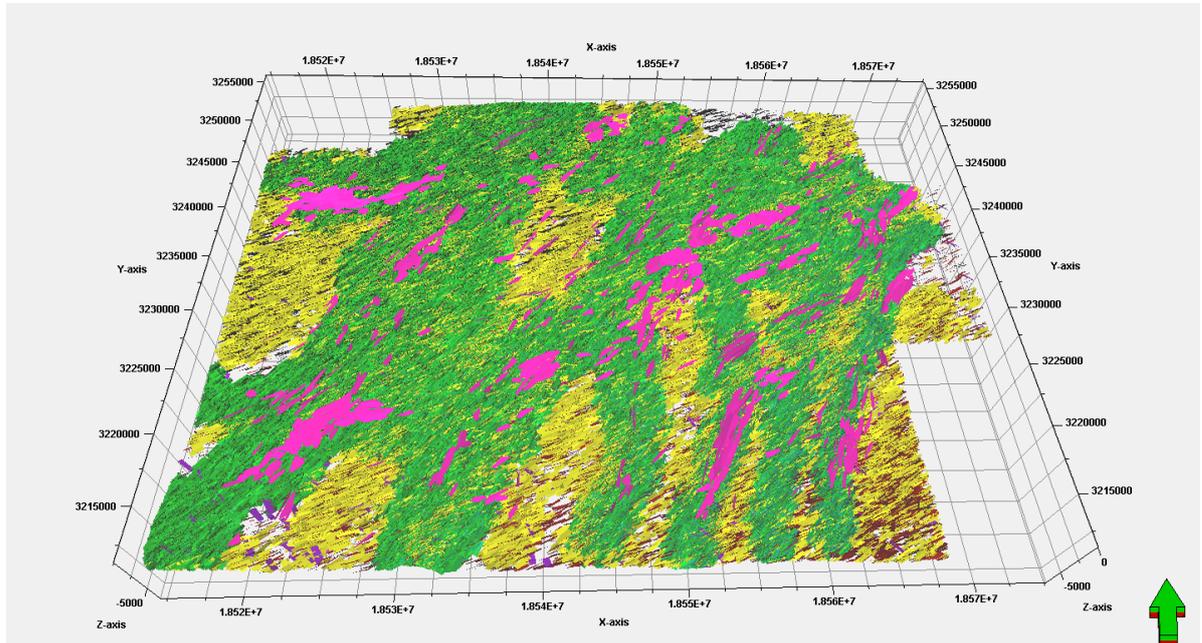


Figure 18. Diagram illustrating the distribution of discrete fracture network (DFN) models in the study area
图 18. 研究区 DFN 建模裂缝片分布示意图

根据成因机制研究,全区裂缝系统可划分为四类(图 19):大尺度裂缝、断裂控制型裂缝、褶皱控制型裂缝和非构造成因页理缝。

大尺度裂缝呈近北东-南西走向,在裂缝系统中占比最低(0.011%)。主体裂缝由断裂控制型(占比 41.32%)和褶皱控制型(47.33%)构成,二者合计占比达 88.65%,构成研究区主要裂缝体系。页理缝作为特殊类型,其形成与页岩脆性特征密切相关,在空间分布上呈现低倾角特征,走向方位无显著优势方向,与页岩层理存在成因关联(表 1)。

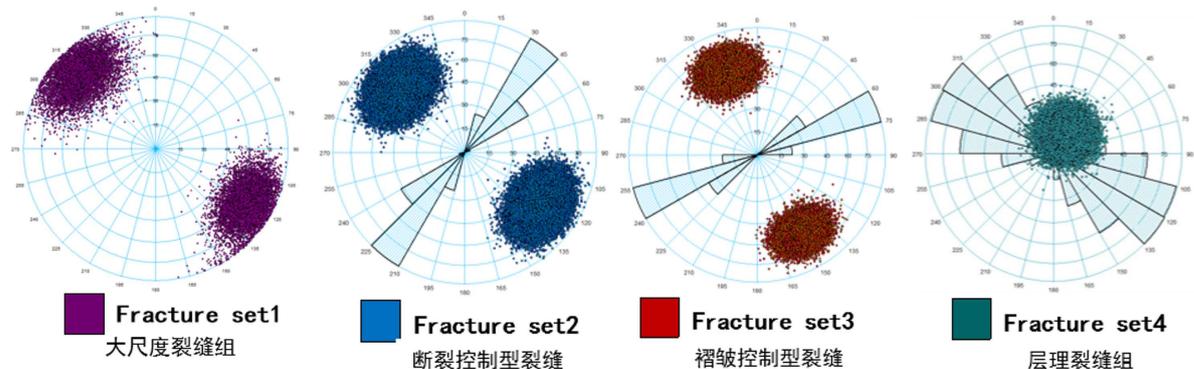


Figure 19. Rose diagrams of various fracture types
图 19. 各类型裂缝玫瑰花图

Table 1. Classification statistics of fracture sets**表 1.** 各组裂缝分类统计表

裂缝名称	裂缝组系	裂缝条数	所占比例	走向
大尺度裂缝组	1	2986	0.01%	近北东 - 南西向
断裂控制型裂缝组	2	182687	67.40%	北东 - 南西向
褶皱控制型裂缝组	3	56940	21.25%	北东 - 南西向
层理裂缝组	4	28280	11.24%	各个方位均有分布

5. 结论

研究区储层为深层页岩储层，具有显著的多尺度裂缝发育特征。根据裂缝成因机制和倾角特征可划分为 4 个优势组系，受成因机制差异和多尺度裂缝的幂律分布规律控制，储层内部裂缝发育呈现显著的非均质性。

建模结果显示：大尺度裂缝通过蚂蚁体属性识别技术结合确定性建模技术构建；中小尺度裂缝采用多源地震属性约束下的神经网络算法优化属性权重，建立三维裂缝强度模型后，通过随机建模方法形成研究区中小尺度裂缝三维离散网络模型。

定量统计表明，构造成因裂缝为研究区主要裂缝类型，共计 239,627 条，占总裂缝数的 88.46%；大尺度裂缝数量最少(2986 条，占比 0.01%)；层理缝共计 28,280 条，其特殊成因机制导致方位角呈现多向性分布特征，在全区范围呈多方位展布。

基金项目

重庆市教育委员会科学技术研究项目“基于谱蓝化有色反演技术的页岩气薄储层预测”资助(KJQN201801520)；重庆科技大学大学生科技创新训练计划项目“页岩储层中不同成因类型裂缝的多尺度定量预测”资助(cstc2020jcyj-msxmX0869)。

参考文献

- [1] 曾联波, 巩磊, 宿晓岑, 等. 深层-超深层致密储层天然裂缝分布特征及发育规律[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 1-14.
- [2] 郎晓玲, 郭召杰. 基于 DFN 离散裂缝网络模型的裂缝性储层建模方法[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2013, 49(6): 964-972.
- [3] 薛艳梅, 夏东领, 苏宗富, 等. 多信息融合分级裂缝建模[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(2): 57-63.
- [4] 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.
- [5] 计玉冰, 郭冰如, 梅珏, 等. 四川盆地南缘昭通示范区罗布向斜志留系龙马溪组页岩储层裂缝建模[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(3): 137-145.
- [6] 王适择, 李忠权, 郭明, 等. 川南长宁地区龙马溪组页岩裂缝发育特征[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(36): 10887-10892+10898.
- [7] Wang, P., Ma, C., Zhang, B., Gou, Q., Tan, W. and Cai, M. (2023) Development of an Improved Three-Dimensional Rough Discrete Fracture Network Model: Method and Application. *International Journal of Mining Science and Technology*, 33, 1469-1485. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2023.10.004>
- [8] 罗骞, 唐海发, 刘群明, 等. 多尺度裂缝建模方法及应用——以塔里木盆地克深 2 气田致密砂岩储层为例[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(6): 1000-1013.
- [9] 唐雁刚, 张荣虎, 魏红兴, 等. 致密砂岩储层多尺度裂缝渗透率定量表征及开发意义[J]. 特种油气藏, 2018, 25(5): 30-34.

-
- [10] 刘俊州, 韩磊, 时磊, 等. 致密砂岩储层多尺度裂缝地震预测技术——以川西 XC 地区为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 747-754.
- [11] 董少群, 吕文雅, 夏东领, 等. 致密砂岩储层多尺度裂缝三维地质建模方法[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 627-637.
- [12] 祖克威, 曾联波, 巩磊. 断层相关褶皱概念模型中的裂缝域[J]. 地质科学, 2013, 48(4): 1140-1147.
- [13] 马诗杰, 曾联波, 石学文, 等. 四川盆地泸州地区海相页岩天然裂缝特征及主控因素[J]. 地球科学, 2023(7): 2630-2642.
- [14] 商晓飞, 龙胜祥, 段太忠. 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, 2021, 32(2): 215-232.