

川东南地区龙一段页岩天然裂缝基本特征及其对页岩气高产富集的影响研究

李海悦^{*#}, 倪瑞涛

成都理工大学能源学院(页岩气现代产业学院), 四川 成都

收稿日期: 2024年12月29日; 录用日期: 2025年2月26日; 发布日期: 2025年3月5日

摘要

为了提升我国页岩气产量与开采效率, 深入探讨影响页岩气富集与保存的因素尤为关键, 其中天然裂缝的发育程度起着关键作用。本研究结合测井、地震解释、岩心分析、薄片及扫描电镜等多种技术手段, 基于川东南地区龙马溪组龙一段的实验数据和现场资料, 系统分析了该区域页岩的天然裂缝特征、主控因素及其分布规律。同时, 探讨了裂缝发育对页岩气富集的影响及多尺度裂缝系统对储层压裂改造效果的作用。研究表明, 区域内的天然裂缝主要分为沉积裂缝、构造裂缝和异常压力裂缝, 其中构造裂缝占主导地位。构造变形强度决定裂缝的发育密度, 变形强度越大、曲率越大、断层越近, 裂缝发育越密集。大尺度断裂显著影响页岩气逸散, 二级断层会导致产量下降, 而适度规模的大尺度断裂有助于提升产量。中小尺度裂缝的发育程度和产状对页岩气的富集与保存具有重要影响, 裂缝的有效性直接关系到页岩气的自封闭性和保存能力。研究为川东南地区页岩气高效开发提供了理论依据和技术支持。

关键词

川东南地区, 天然裂缝, 页岩气富集, 断层

Study on the Basic Characteristics of Natural Fractures in the Long 1 Formation Shale in Southeastern Sichuan and Its Influence on the High Yield Shale Gas Enrichment

Haiyue Li^{*#}, Ruitao Ni

College of Energy (College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: Dec. 29th, 2024; accepted: Feb. 26th, 2025; published: Mar. 5th, 2025

^{*}第一作者。

[#]通讯作者。

文章引用: 李海悦, 倪瑞涛. 川东南地区龙一段页岩天然裂缝基本特征及其对页岩气高产富集的影响研究[J]. 自然科学, 2025, 13(2): 187-203. DOI: 10.12677/ojns.2025.132020

Abstract

Enhancing China's shale gas production and extraction efficiency necessitates a thorough investigation of factors affecting shale gas enrichment and preservation, with the development of natural fractures playing a pivotal role. This study employs well logging, seismic interpretation, core analysis, thin sections, and scanning electron microscopy data from the Long 1 Member of the Longmaxi Formation in southeastern Sichuan. It comprehensively analyzes the characteristics, controlling factors, and distribution patterns of natural fractures in the shale. Additionally, the research examines the impact of fracture development on shale gas enrichment and the effectiveness of multi-scale fracture systems in reservoir hydraulic fracturing. The findings indicate that natural fractures in the region are categorized into depositional fractures, tectonic fractures, and overpressure fractures, with tectonic fractures being predominant. The intensity of tectonic deformation critically influences fracture density; stronger deformation, greater curvature, and proximity to faults result in higher fracture density. Large-scale faults significantly affect shale gas leakage, particularly secondary faults, which can decrease gas production. Conversely, moderately sized large-scale faults may enhance production. The influence of medium and small-scale fractures is more complex, as their development and orientations are crucial for shale gas enrichment and preservation. The effectiveness of these fractures directly impacts the self-sealing and preservation capabilities of shale gas. This study provides essential theoretical and technical insights for the efficient development and resource evaluation of shale gas in southeastern Sichuan.

Keywords

Southeast Sichuan, Natural Fractures, Shale Gas Enrichment, Fault

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

页岩气是存在于富含有机质暗色页岩中的非常规天然气资源, 尽管其孔隙度和渗透率极低, 但具备巨大的资源潜力[1]。天然裂缝是影响页岩气富集和保存的关键因素, 其发育特征、成因类型、产状和规模均会影响到储层的储存与流动性能。当前对页岩气储层天然裂缝的研究虽取得一定进展[2], 但仍面临识别与定量表征等方面的挑战, 尤其在构造活动频繁的海相页岩中更为复杂[3]。川南地区是中国页岩气资源最丰富、开发潜力最大的区域之一[4]。川东南地区龙马溪组龙一段因多期构造改造而裂缝发育模式多样, 裂缝分布与特征差异显著。本文通过测井、地震、岩心、薄片及扫描电镜等多源数据, 分析该区天然裂缝的形成机制及空间展布规律, 并探讨其对页岩气富集与高产的影响, 为区域页岩气的高效开发与富集评价提供参考。

2. 研究区概况

本研究区位于四川盆地的川东南地区, 包括永川和丁山两个勘探区域。四川盆地位于扬子准地台内, 经历多期构造运动, 形成复杂的多方向、多期次断裂与褶皱结构[5]。研究区位于川东高陡构造带和川南中低缓构造带之间, 受华蓥山和龙泉山断裂带的控制, 构造演化复杂, 形成多个构造单元[6] [7]。

永川地区位于川渝交界, 主要构造为新店子背斜, 岩层倾角较大, 断裂发育且岩层形态复杂。目标

层段为志留系龙马溪组下部海相页岩龙一段, 主要为黑色页岩, 沉积环境为深水陆架相, 地层厚度稳定。(如图 1)。丁山地区位于泸州 - 赤水构造叠加带的东端。地形起伏较大, 海拔介于 263 米至 1645 米。构造特征为基底逆冲构造体系和盖层滑脱构造体系的交替发育, 受江南古陆隆起和黔中古陆隆起的影响, 形成 NE 向和 NW 向复杂结构叠加[8]。勘探层系同为龙马溪组下龙一段, 岩性类似永川, 富含有机质, 具有较高的含气潜力。

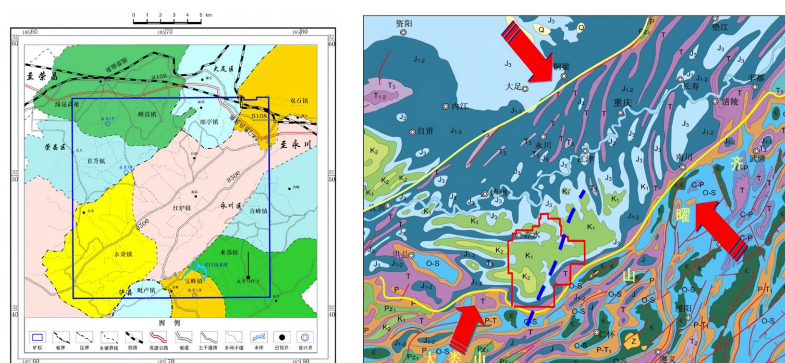


Figure 1. Geographic location map of Yongchuan block and structural belt with structural stress analysis in southeastern Sichuan

图 1. 永川区块地理位置图及川东南构造带和构造应力分析图

整体而言, 川东南复杂的构造背景为页岩气勘探提供了有利的地质条件(如图 1)。特别是龙一段页岩层的厚度和有机质含量有利于高产富集。此外, 复杂的构造与沉积环境促进了天然裂缝的发育, 这些裂缝在页岩气的储集、流动及储层改造过程中发挥关键作用。

3. 天然裂缝特征研究

3.1. 天然裂缝基本类型

3.1.1. 露头裂缝类型

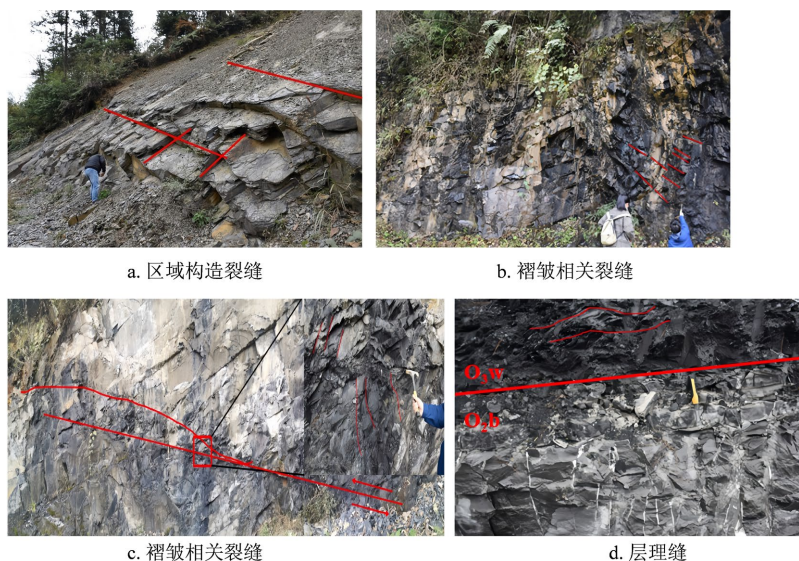


Figure 2. Types of fractures in the outcrops of the study area

图 2. 研究区野外露头裂缝类型

永川和丁山研究区位于构造变形复杂区域, 野外剖面清晰揭示了裂缝的类型、规模、产状及其成因[9][10]。主要裂缝类型包括区域构造裂缝、褶皱裂缝、断层裂缝和层理裂缝。区域构造裂缝由水平挤压和剪切作用形成, 倾角较大且延伸较长, 部分裂缝充填方解石或石英。褶皱裂缝多出现在拐弯处, 呈“X”形共轭, 规模不一。断层裂缝主要分布于大型断裂附近, 开度较小, 与断层规模相关。层理裂缝沿页岩层理面破裂, 开度较大, 充填矿物较少[11](如图2)。

3.1.2. 岩心裂缝类型

岩心观测显示, 研究区裂缝以构造裂缝为主, 主要包括高角度剪切缝、张剪性裂缝和低角度滑脱缝。高角度剪切裂缝平直且延伸远, 开度较小, 常充填方解石或未充填。张剪性裂缝呈雁列式排布, 末端可见菱形对接。低角度滑脱裂缝具有光滑镜面, 并展现擦痕和阶步特征(如图3)。层理缝发育较少, 主要为水平缝, 充填物以方解石和黄铁矿为主。部分岩心中还观察到热液溶蚀缝, 充填有萤石和石英(如图4)。

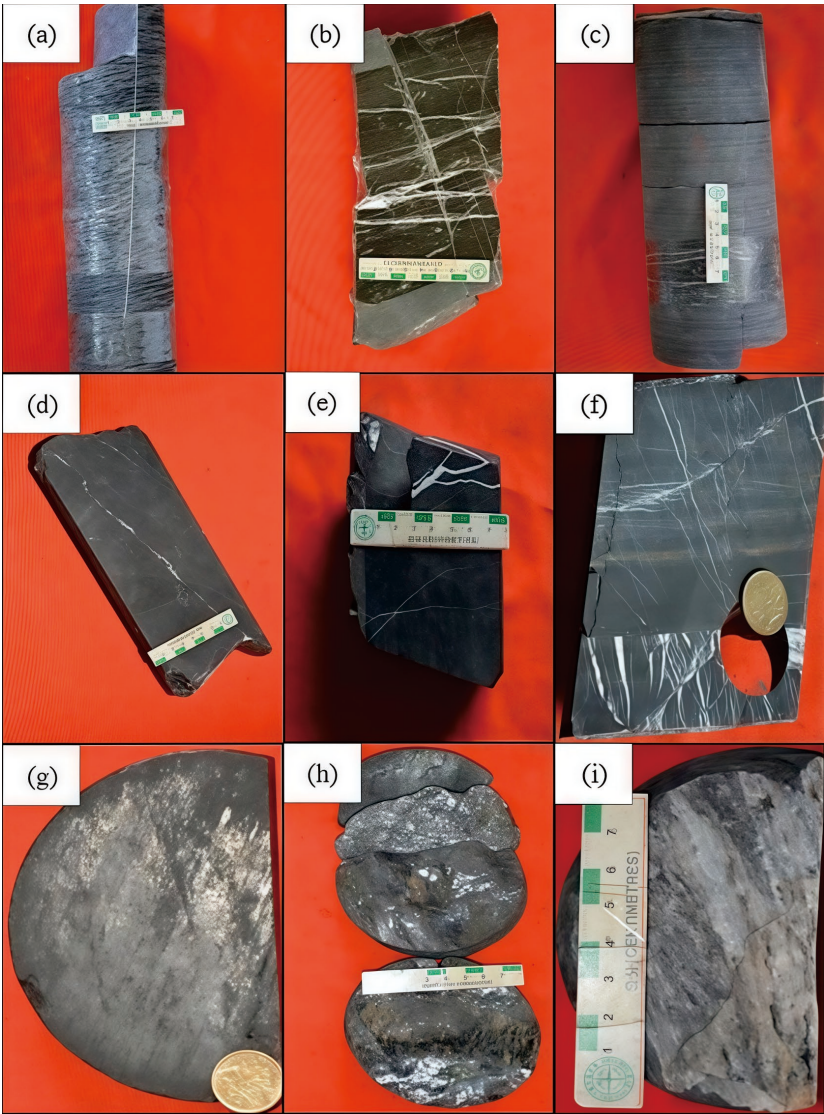


Figure 3. Characteristics of structural fracture development in shale cores of Long 1
图3. 龙一段页岩岩心构造裂缝发育特征

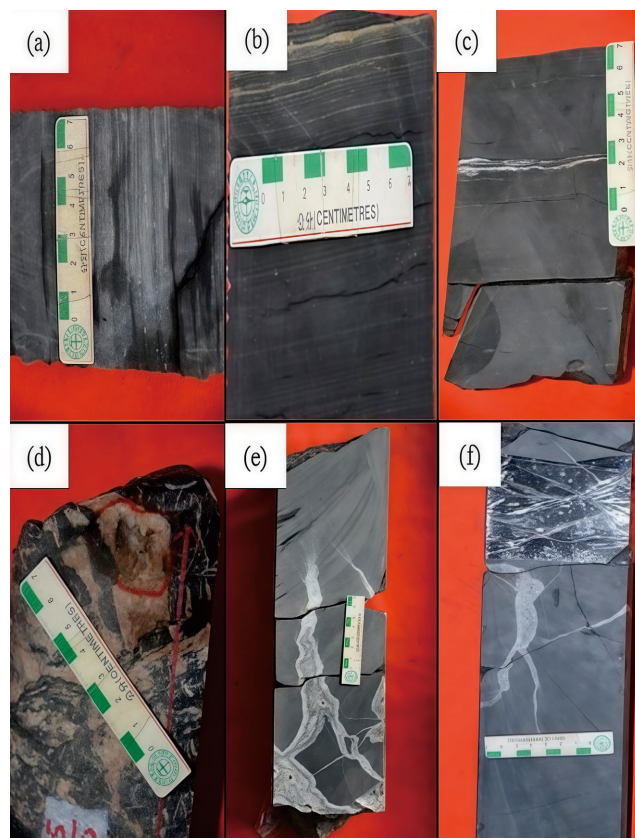


Figure 4. Characteristics of non-structural fracture development in shale cores of Long 1
图 4. 龙一段页岩岩心非构造裂缝发育特征

3.1.3. 微观裂缝类型

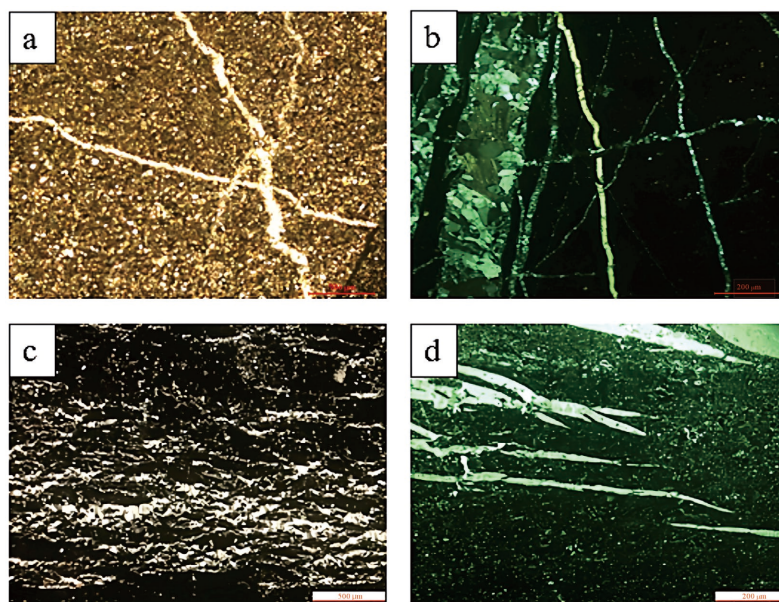


Figure 5. Microfracture types in the study area
图 5. 研究区微观裂缝类型

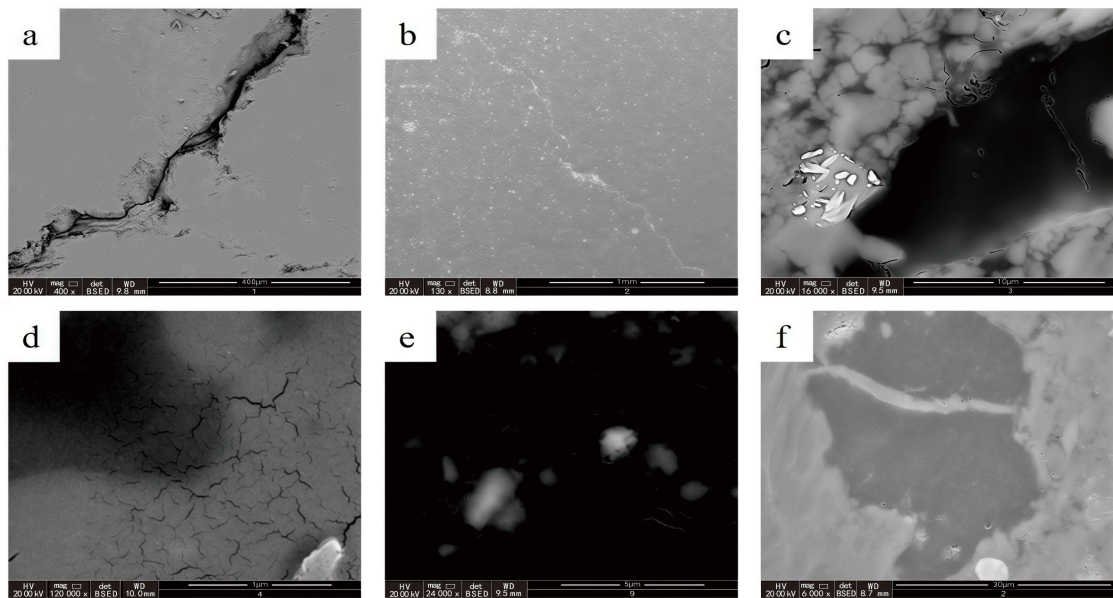


Figure 6. Filling condition of microfractures in the Longmaxi Formation shale of the study area
图 6. 研究区龙马溪组页岩微裂缝充填情况

研究区页岩储层中除宏观裂缝外, 还存在微观裂缝, 这些裂缝显著影响渗透性和气体赋存状态。薄片观察显示, 构造裂缝多与层理面高角度相交, 裂缝内充填方解石、石英、少量黄铁矿及有机质或沥青, 表明由生烃超压形成的异常应力缝。未充填裂缝为游离气体提供理想通道, 充填裂缝则可在压裂过程中重新开启, 促进宏观裂缝的发展。扫描电镜分析表明, 微裂缝体系复杂, 既增强页岩渗透性, 又促进裂缝网络的连通性, 对水力压裂及人造裂缝的形成具有重要作用(如图 5、图 6) [12]。

3.2. 天然裂缝发育特征

3.2.1. 天然裂缝产状

根据碳酸盐岩裂缝类型划分标准, 研究区裂缝产状分为垂直裂缝($75^{\circ}\sim 90^{\circ}$)、高角度斜交裂缝($45^{\circ}\sim 75^{\circ}$)、低角度斜交裂缝($15^{\circ}\sim 45^{\circ}$)和水平裂缝($< 15^{\circ}$)。对永川地区 6 口井的 1181 条裂缝产状统计显示, 天然裂缝以水平裂缝为主(45%), 其次为垂直裂缝(26%), 高角度和低角度裂缝较少(见图 7)。裂缝倾角从背斜区向平缓向斜区逐渐减小, 在龙马溪组中, 裂缝倾角由龙一段向龙上段转变为斜交缝(如图 8)。成像测井数据进一步显示, 水平裂缝占 62%, 龙上段主要为低角度裂缝。

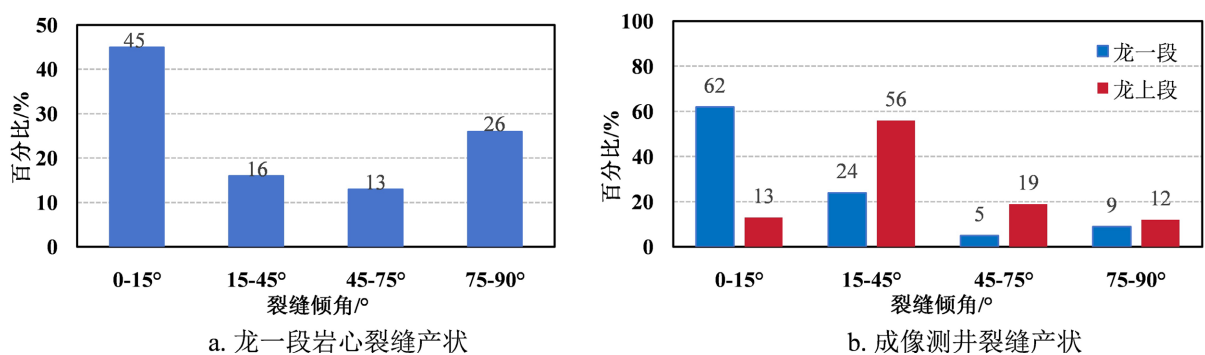


Figure 7. Statistical results of fracture orientation in the Yongchuan area
图 7. 永川地区裂缝产状统计结果

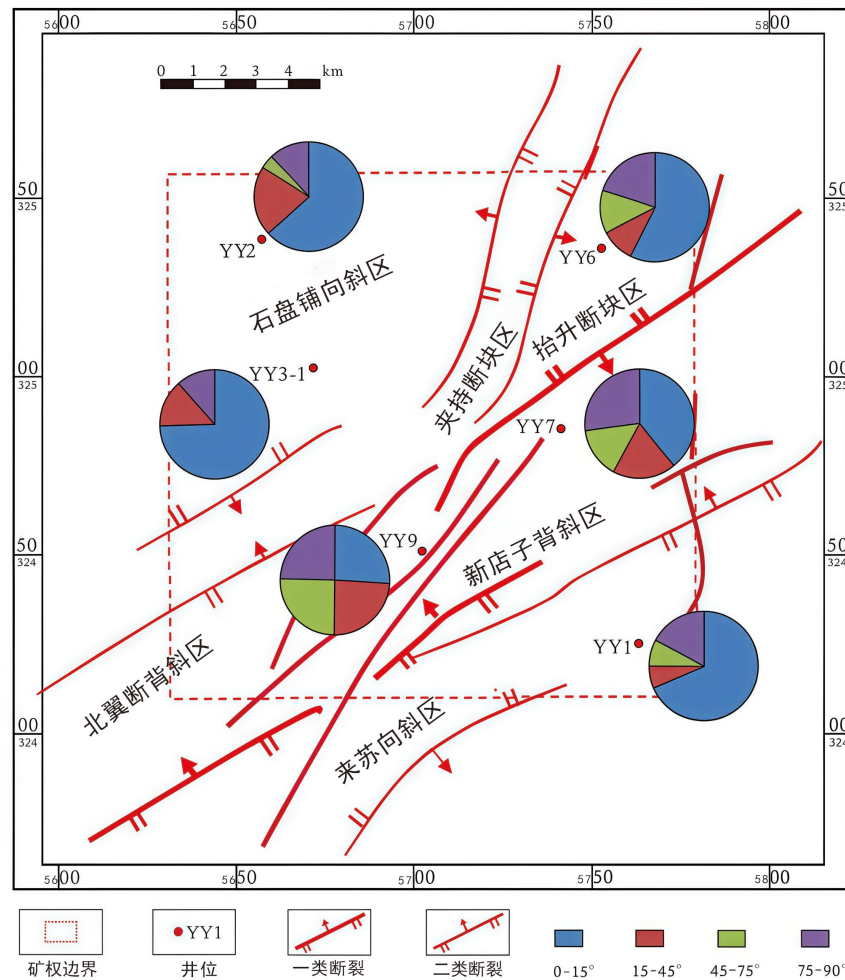


Figure 8. Fracture orientation proportion distribution map of the longyi member in the Yongchuan area
图 8. 永川地区龙一段产状占比分布图

3.2.2. 天然裂缝组系

天然裂缝组系指同期形成且性质、产状一致的裂缝群。丁山地区裂缝组系在不同区域呈现显著差异：东区以高角度 EW 和 NEE 剪切裂缝为主，裂缝有效性较低；中区多组系裂缝发育，主要为高角度剪切缝和压扭缝，裂缝有效性较好；西区主要为低角度和斜交裂缝，层理缝较多，裂缝有效性较低；中二区(近 NW、NE 及 NNE 多组系)裂缝发育最显著，垂直缝与斜交缝的有效性较高(如表 1)。

Table 1. Comprehensive analysis of fracture characteristics in each development area of Dingshan
表 1. 丁山各开发区裂缝特征综合分析表

分区号	裂缝组系	裂缝倾角特征	裂缝有效性	裂缝规模	裂缝力学性质
东一区	近 EW、NEE 向组系	高角度与低角度裂缝	有效性一般	较发育	剪切缝为主，见有一定的层理缝
东二区	近 EW、NEE 向组系	高角度裂缝	有效性一般	一般发育	剪切缝为主
中一区	近 EW、NW 向组系	高角度与斜交缝	有效性一般	较发育	剪切缝和压扭缝为主
中二区	近 NW、NE 及 NNE 多组系	垂直缝与斜交缝	有效性较好	发育	剪切缝、张性缝及压扭缝发育

续表

中三区	近 EW、NE 向组系	垂直缝与低角度	有效性好	发育	剪切缝为主
西一区	近 EW、NW、NE 向组系	低角度和斜交缝	有效性差	一般发育	层理缝与层面滑移缝为主
西二区	近 EW、NE 向组系	高角度和斜交缝	有效性较好	较发育	层理缝与层面虚脱缝为主

3.2.3. 天然裂缝发育规模

永川地区 6 口井的小层裂缝数量统计显示, 12 及 31 小层裂缝最为发育, 分别为 249 条和 174 条, 裂缝密度最高的为 12 小层、13 小层、31 小层, 分别为 26.16 条/m、15.3 条/m 和 13.85 条/m, 各小层裂缝发育密度不均(如图 9)。纵向上, 裂缝密度由深至浅逐渐降低, 褶皱变形和断块发育区密度较高(如图 10、图 11)。永川地区龙马溪组岩心裂缝长度主要集中在 5~10 cm, 宽度大多小于 2 mm, 其中 0~0.5 mm 裂缝占 60.9%。微观裂缝长度小于 2000 μm , 张开度低于 50 μm 。野外裂缝长度多小于 2 m, 间距普遍小于 1 m (如图 12)。

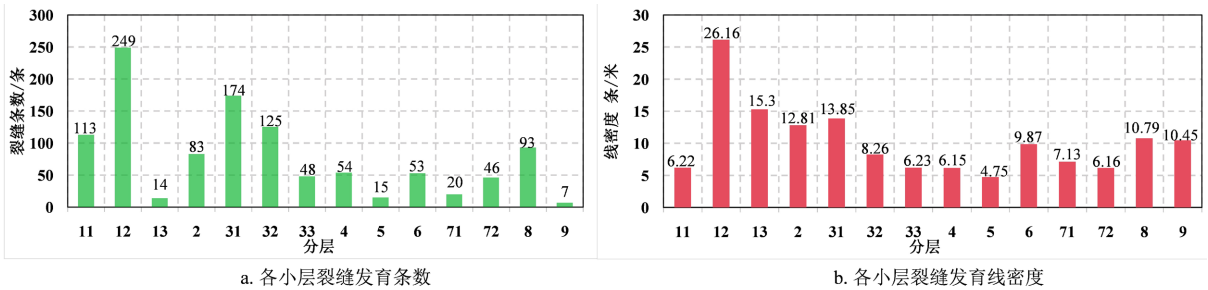


Figure 9. Fracture development patterns of each sub-layer in the Yongchuan area
图 9. 永川地区各小层裂缝发育规律

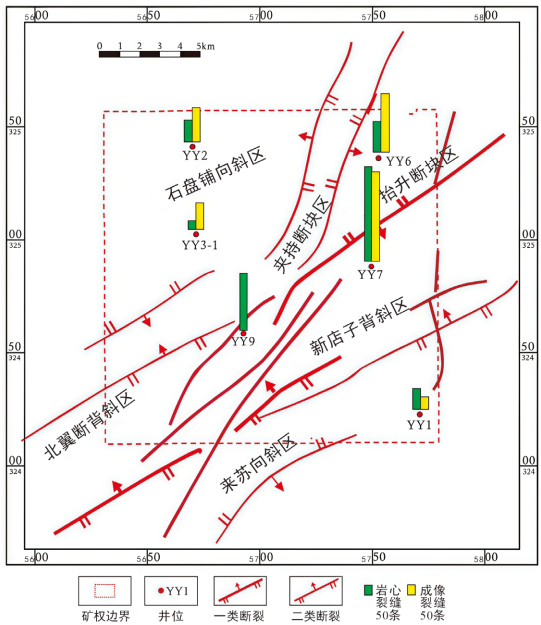


Figure 10. Fracture density development distribution map of the longyi member in the Yongchuan area
图 10. 永川地区龙一段裂缝密度发育分布图

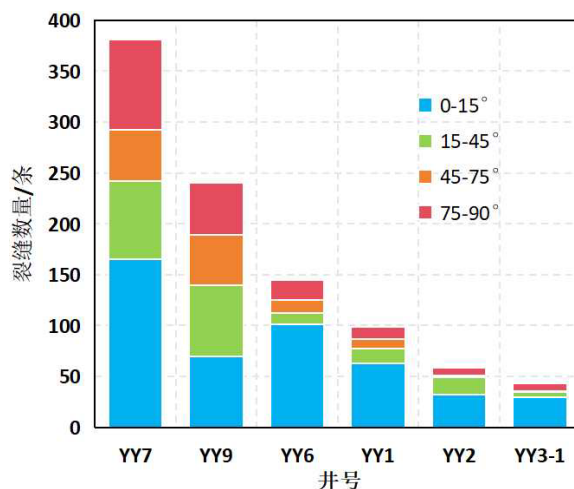
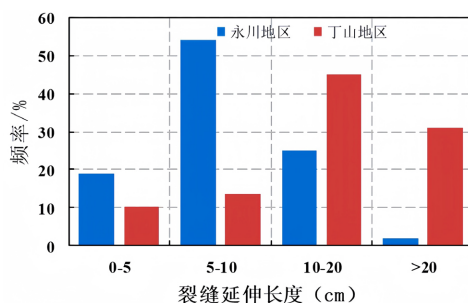
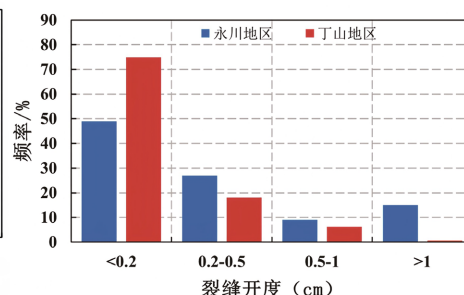


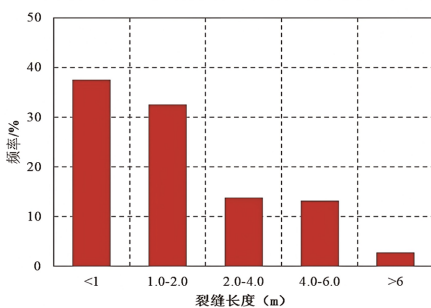
Figure 11. Histogram of fracture number distribution in core samples from key wells in the Yongchuan area
图 11. 永川地区关键井岩心裂缝数量分布直方图



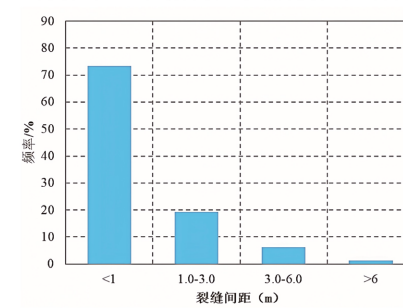
a. 永川和丁山地区各井岩心裂缝延伸长度统计直方图



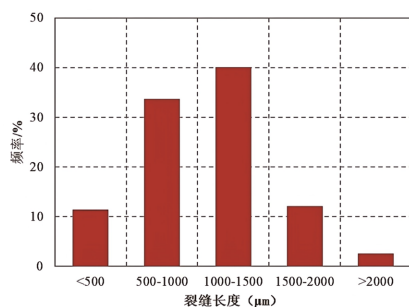
b. 永川和丁山地区各井岩心裂缝开度统计直方图



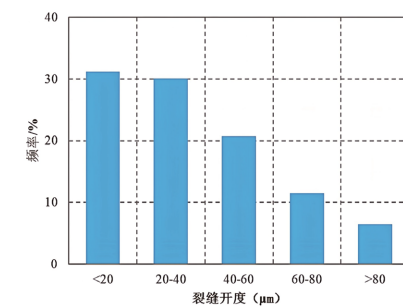
c. 龙马溪组野外露头裂缝长度统计直方图



d. 龙马溪组野外露头裂缝间距统计直方图



e. 薄片观察页岩裂缝长度分布直方图



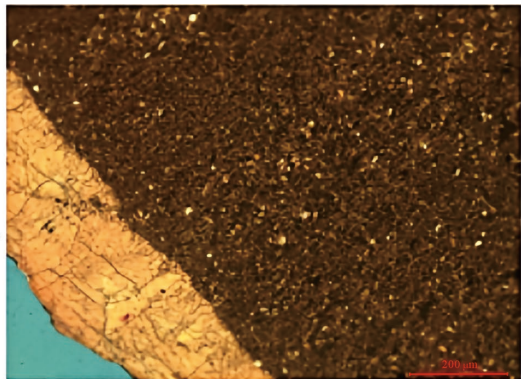
f. 薄片观察页岩裂缝开度分布直方图

Figure 12. Quantitative analysis of shale fracture development in the Yongchuan area

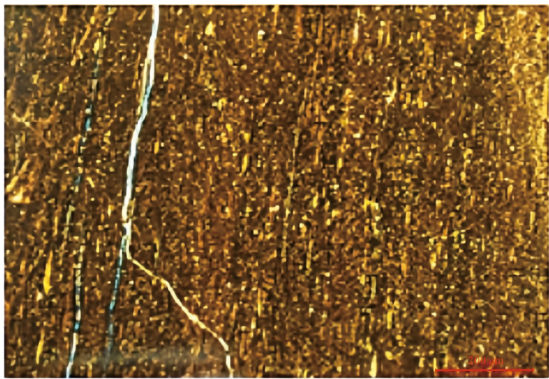
图 12. 永川地区页岩裂缝发育定量分析图

3.2.4. 天然裂缝有效性

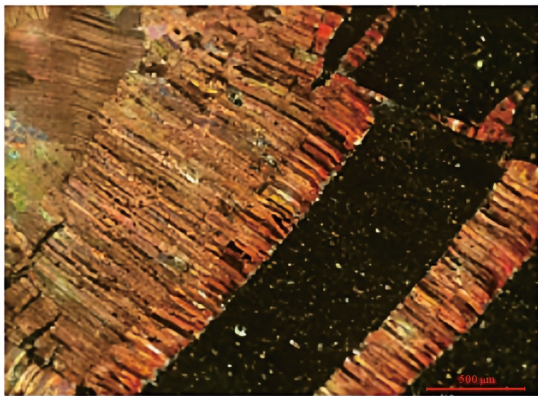
研究区裂缝按充填程度分为未充填、半充填和全充填三类。永川地区裂缝主要为全充填和半充填, 占 93.31%, 未充填裂缝仅占 6.69%。充填矿物以方解石(66.72%)、黄铁矿(17.85%)、石英及泥质为主(如图 13)。裂缝有效性分析显示, 水平裂缝和低角度裂缝中未充填裂缝比例较高, 且有效性较好。相比之下, 丁山地区裂缝以全充填和半充填为主, 占 90.3%, 未充填裂缝占 9.7%, 充填矿物主要为方解石和黄铁矿, 裂缝有效性较低, 但水平裂缝和低角度裂缝的有效性优于永川地区(如图 14、图 15)。



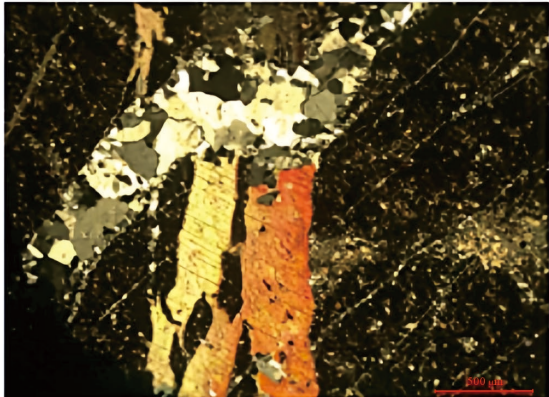
永页1井, 3822.46m, 方解石充填的剪切缝。



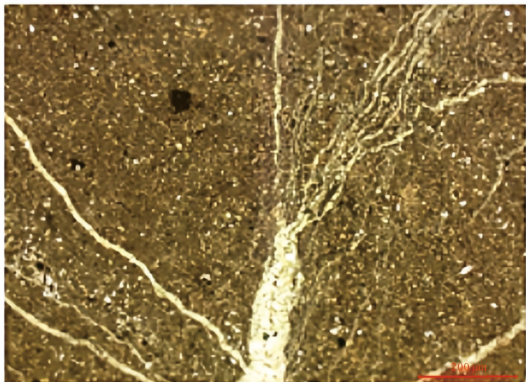
永页2井, 2734m, 未充填的层理缝。



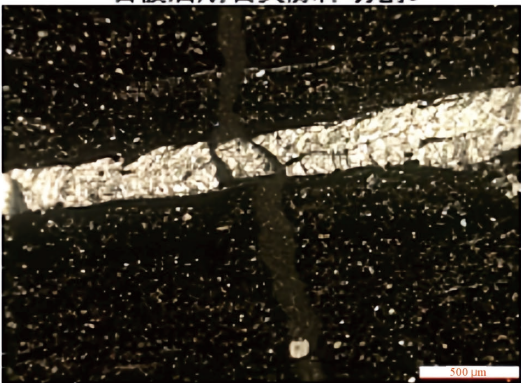
永页9井, 2932.2m, 石英和方解石差异充填的纤维状脉体。



永页6井, 3882.2m, 早期充填的方解石被后期石英脉体切割。



永页7井, 3058.35m, 石英充填的热液脉



永页6井, 3876.28m, 方解石泥质充填裂缝

Figure 13. Photographs of fracture fillings in the study area
图 13. 研究区内裂缝充填物照片

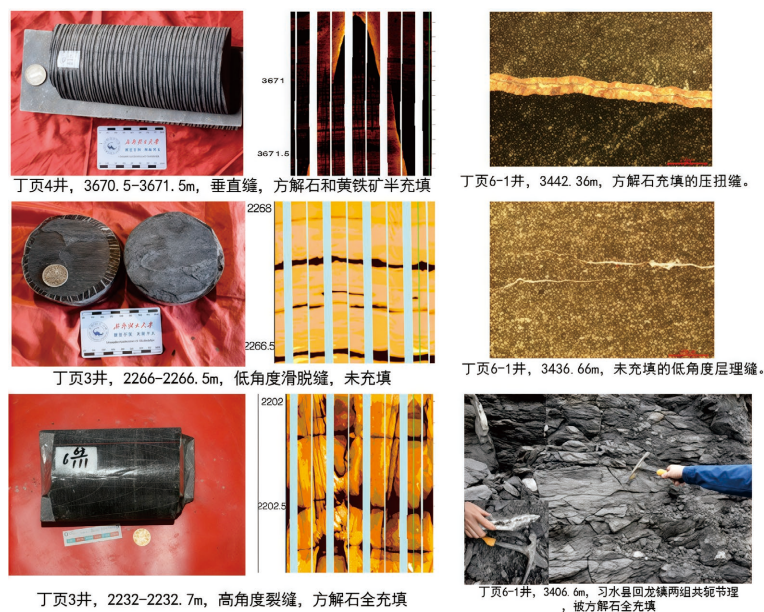


Figure 14. Photographs of fracture fillings in the longyi member shale of the Dingshan area
图 14. 丁山地区龙一段页岩裂缝充填物照片

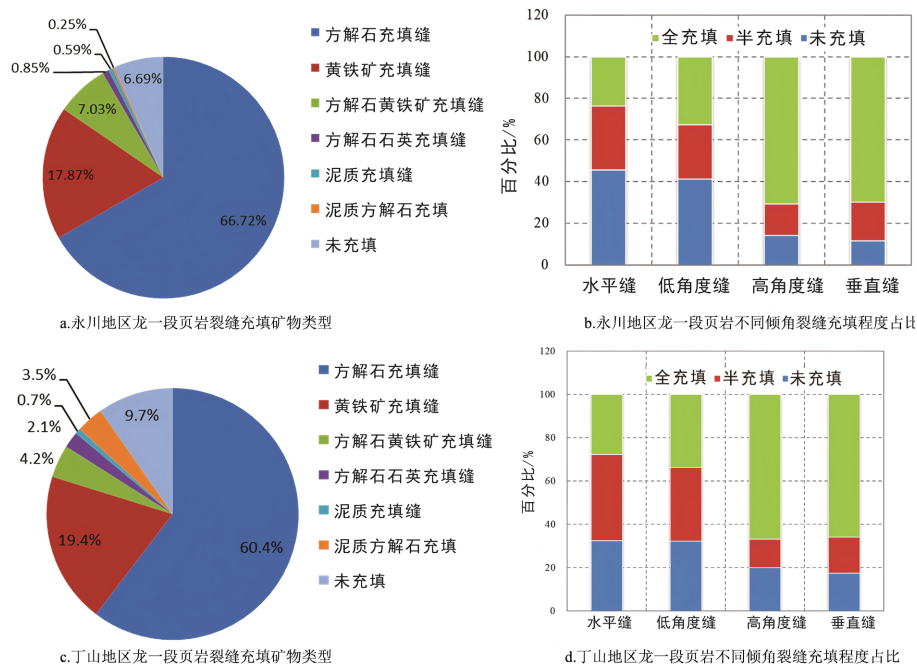


Figure 15. Proportional distribution of fracture filling mineral types and filling degrees in the longyi member of the Yongchuan and Dingshan areas
图 15. 永川地区与丁山地区龙一段裂缝充填矿物类型与充填程度占比图

3.3. 天然裂缝主控因素与分布特征

3.3.1. 天然裂缝的主控因素

天然裂缝的发育主要受构造变形强度、矿物成分和有机质含量等因素影响。研究表明, 构造变形越强、曲率越大, 且脆性硅质矿物含量越高, 裂缝的发育密度和明显性越高。在超压状态下, 生烃裂缝发

育良好且有效性较高[13][14]。

多期构造运动导致研究区内复杂的断层和裂缝体系, 构造应力场是裂缝生成的主要驱动因素。裂缝密度与构造部位密切相关, 距离断层和褶皱中心较近的区域裂缝密度和发育程度更高[15][16]。岩心和成像测井数据显示, 永川地区背斜区和断凹区裂缝发育最为密集(如图 16)。

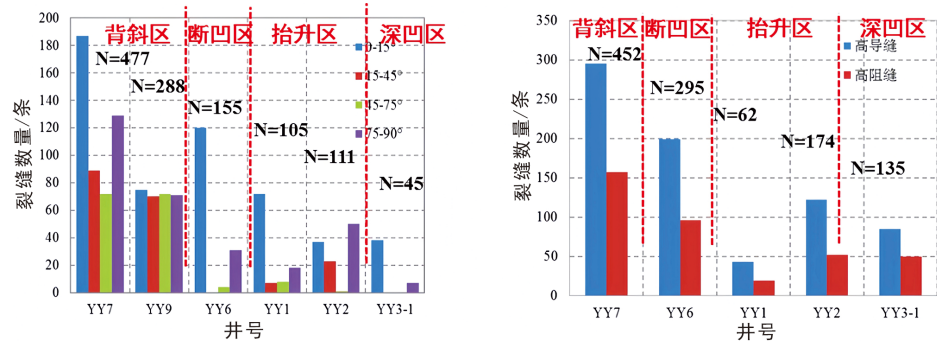


Figure 16. Statistical distribution map of fracture observations from core and imaging logs in the longyi member of the Yongchuan area

图 16. 永川地区龙一段岩心及成像测井裂缝观察统计分布图

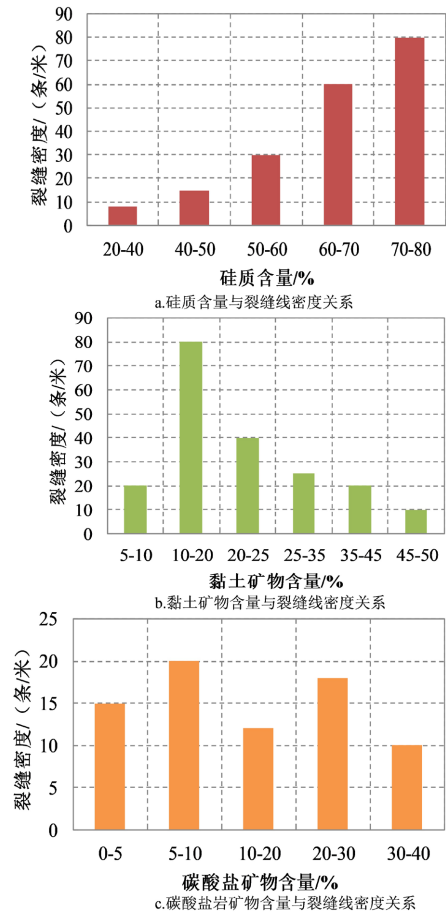


Figure 17. Relationship between the contents of different minerals and fracture line density

图 17. 不同矿物成分含量与裂缝线密度关系图

页岩中的矿物成分显著影响裂缝的发育。硅质矿物(如石英)含量越高, 岩石脆性增强, 裂缝发育程度越高; 反之, 黏土矿物含量较高的岩石脆性较低, 裂缝发育受抑制。研究表明, 硅质含量与裂缝密度正相关, 而当黏土矿物含量超过 20% 时, 裂缝发育开始减弱(如图 17)。

层理缝通常与层间滑脱作用相关, 易发育于背斜底部或断层伴生的层间虚脱部位。研究发现, 永川地区的永页 6、7、9 井在这些区域层理缝发育较为明显, 而平缓区的层理缝较少。页岩中的黏土矿物组分受古环境及成岩作用影响显著, 控制着成岩裂缝和异常压力缝的发育。研究区存在生烃超压缝, 其发育与地层压力和 TOC 含量密切相关。随着地层压力的升高, 有机质丰度增加, 生烃超压裂缝的发育程度和有效性也显著提高。

3.3.2. 天然裂缝的分布特征

页岩中的黏土矿物受古环境和成岩作用显著影响, 控制成岩裂缝和异常压力裂缝的发育。研究区存在生烃超压裂缝, 其发育与地层压力和 TOC 含量密切相关。随着地层压力和有机质含量的增加, 生烃超压裂缝的发育程度和有效性显著提高(如图 18)。

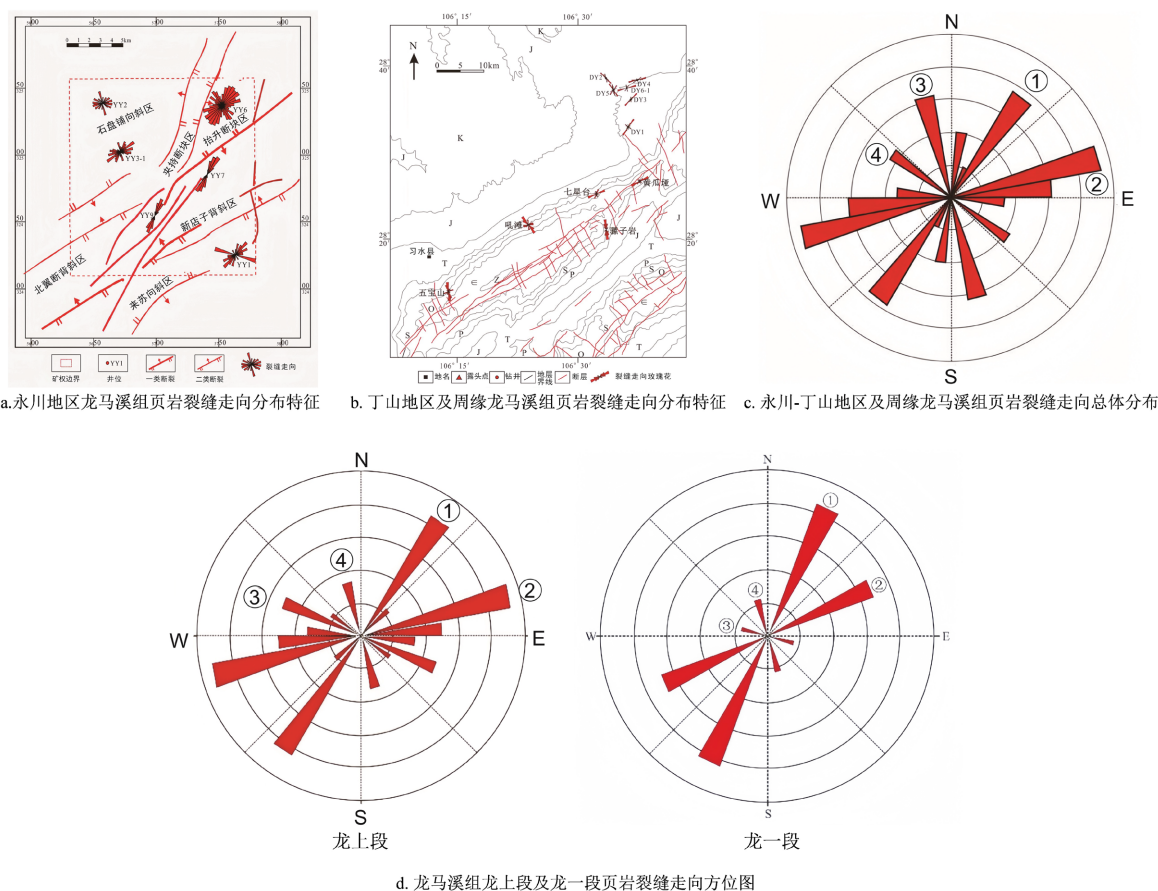


Figure 18. Strike distribution map of shale fractures in the Longmaxi formation of the Yongchuan-Dingshan area
图 18. 永川 - 丁山地区及周缘龙马溪组页岩裂缝走向分布图

4. 天然裂缝发育特征对页岩气富集的影响研究

天然裂缝对页岩气的富集和保存有重要作用[17]。裂缝发育程度直接影响气体产量, 适度裂缝有助于增加游离气体体积并促进吸附态气体的解吸。然而, 过度发育的裂缝可能导致天然气逸散, 降低有效储

存。因此, 裂缝的规模和类型在页岩气开发中至关重要。

4.1. 大尺度断裂对页岩气逸散的影响

川东南地区龙马溪组经历了 4 次裂缝形成期, 主要由燕山期及喜山早期和晚期的多次大规模构造运动引起[18]。这些大尺度断裂, 尤其是一级和二级断层, 直接影响页岩气逸散[19]。通过对川南地区龙马溪组地层顶底板发育断层特征要素(如表 2)的分析也可以看出, 通常规模越大的断裂形成对页岩含气性的影响范围越大。研究发现, 大尺度断裂(一级和二级断层)加速气体逸散, 而三级断层影响较小。此外, 断层的走向和规模对气体逸散影响显著, EW 向和 NE 向断层的影响大于 NS 向断层。

Table 2. Characteristics of fault features in the top and bottom plates of Longmaxi Formation in southern Sichuan
表 2. 川南地区龙马溪组地层顶底板发育断层特征要素表

断层类型	分布	断层规模	影响范围	发育时期
通天断层	盆缘	规模大	5 km 以上	燕山早期形成, 后期持续活动, 规模较大, 多穿层, 对页岩含气性影响较大。
穿层断层	盆缘与赤水地区	长度 > 10 km	1.4 km	
		长度 3~10 km	0.4 km	
层内断层	内大部分地区	长度 < 3 km	0.7 km	燕山中晚期形成, 喜山晚期部分断层活化, 多属于层内调节变形断层, 很少穿过三叠系膏盐岩层。
		长度 > 10 km	0.7 km	
		长度 3~10 km	0.5 km	
		长度 < 3 km	0.2 km	

4.2. 中小尺度裂缝对页岩气富集和保存的影响

中小尺度天然裂缝在页岩气富集中起关键作用。适量的中低角度顺层剪切缝和层理缝有助于页岩气积累, 但随着裂缝角度增大, 特别是高角度穿层裂缝增多, 含气性受到不利影响[20]。裂缝的开启状态受最大水平主应力影响进而会对页岩含气性产生影响, 有效裂缝的组系与现今最大水平主应力的夹角越小, 对页岩含气性影响程度越强, 同时有效裂缝的发育也与应力方向密切相关。在丁山和永川地区, 裂缝与应力的夹角显著影响页岩气含量和气体储集。当裂缝的自封闭性被破坏时, 页岩气的保存能力下降, 裂缝通道导致气体逸散。分析不同类型的裂缝通道(如张性断裂、穿层裂缝)及页岩的外部沟通方式(如地表剥蚀)表明, 裂缝的发育不仅影响气体的保存, 还决定了开采效率。适度的裂缝发育有助于提高页岩气的储量和生产潜力, 而裂缝过大或自封闭性被破坏则可能导致气体流失, 降低储层的经济效益。

5. 多尺度断缝系统特征对页岩储层压裂改造效果的影响

5.1. 大尺度断裂对页岩储层压裂改造的影响

研究区的大尺度断层主要为各级断层, 频繁的构造活动使背斜和向斜多被二级断层分割, 断层倾角陡峭, 导致近断层区域页岩气储集性差。断层不仅限制压裂液的传播, 还可能导致压裂缝与断层贯通, 影响压裂效果。因此, 压裂施工应避免在断层附近进行, 优选远离大型断层的区域, 深向斜和深背斜核部为理想位置。

在评估大尺度断裂时, 应结合压裂试验数据, 分析断裂贯通的失败案例。通过对比远离断层与靠近断层井段在泵压、砂量和产能上的差异, 量化断裂对压裂的影响。建议在水平段避开主要断裂走向, 与次级断层保持≥1.5~2 公里的安全距离; 必要时采用堵漏、限流等工艺, 防止压裂缝与断层连通导致失败。

同时, 在断裂区采用优化井网布局和精准压裂策略, 识别断层窗口, 调整井轨迹和射孔参数, 使用黏弹性降滤失材料(VDA), 提高断裂附近压裂段的稳定性和成功率。

5.2. 中小尺度裂缝系统对页岩储层压裂改造效果的影响

中小尺度裂缝系统在页岩储层的水力压裂改造中起关键作用, 主要体现在裂缝的发育程度和有效性上。适度发育的天然裂缝可提升储层渗透性, 并在压裂过程中与人工裂缝交织, 形成有效的裂缝网络[21]。然而, 裂缝过度发育会导致压裂液的滤失和砂堵, 影响压裂效果。

5.2.1. 天然裂缝发育程度影响

页岩储层的低孔低渗特征使天然裂缝的发育成为改善储层物性和水力压裂效果的关键。适度发育的裂缝能提升渗透性, 促进缝网形成, 提高页岩气产量和可采性。然而, 裂缝过度发育会导致压裂液大量滤失和砂堵, 限制裂缝扩展, 降低压裂效果(如图 19)。研究表明, 裂缝的密度和复杂度对压裂效果有显著影响, 较高的裂缝密度和适中的复杂度有助于优化压裂效果, 而过高的复杂度则产生负面影响。

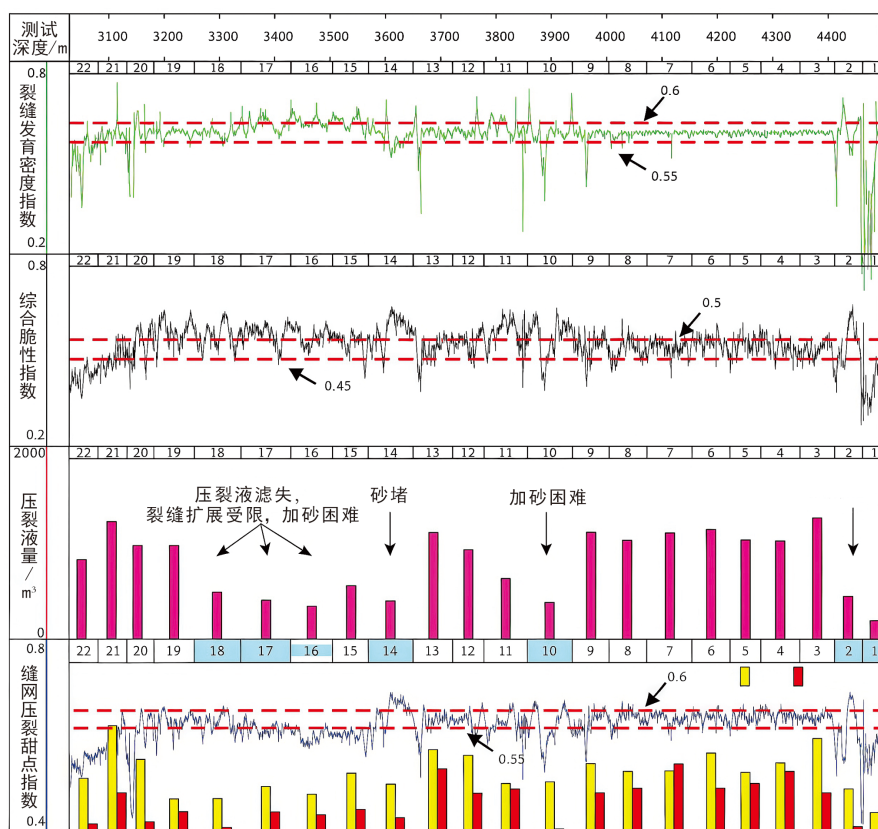


Figure 19. Impact of fracture development degree in YY7HF hydraulic fracturing on stimulation and productivity
图 19. YY7HF 水力压裂各段裂缝发育程度对缝网改造及产能影响

结合实际压裂施工数据, 进一步量化“天然裂缝发育程度 - 压裂液滤失 - 砂堵现象”的内在关联。例如, YY7HF 井段在裂缝密度大于一定阈值后, 压裂液滤失量增大 25%, 加砂峰值压力提升 20%, 并最终导致有效压裂段缩短 30%。根据天然裂缝发育程度不同, 提出“分区域分类压裂方案”: 对于裂缝相对稀疏区域可适当提高排量并使用黏土稳定剂、纤维支撑剂等; 对于裂缝发育较强区域, 则应降低排量、提前封堵潜在漏失通道, 并加强携砂体系黏度, 以缓解高滤失和砂堵风险。

5.2.2. 天然裂缝有效性影响

裂缝的有效性是影响水力裂缝扩展的关键因素。方解石充填的裂缝降低岩石抗张强度, 促进裂缝延伸。模拟实验表明, 当水力裂缝与天然裂缝夹角约 55° 时, 裂缝能有效延伸并转向, 形成良好的裂缝网络, 进而影响页岩气的储集与开采。在评价天然裂缝有效性时, 应考虑充填矿物种类(如方解石、石英、黄铁矿)及充填程度, 并通过 XRD 和 CT 扫描评估其力学效应。针对水力裂缝与天然裂缝夹角在 $50^\circ\sim 60^\circ$ 时易形成复杂缝网, 优化射孔策略包括微调射孔方位以增加裂缝相交概率, 并采用“小簇距 + 多簇暂堵”工艺激活更多有效裂缝。大尺度断裂可能导致压裂液滤失和裂缝贯通, 因此在压裂施工时应避开大型断裂区域, 优选远离断层的深向斜和深背斜核部; 中小尺度裂缝适度发育能显著提升压裂效果, 合理控制裂缝密度和有效性有助于裂缝网的形成, 提升页岩气产量和可采性。优化策略建议包括选择远离大尺度断裂的施工区段、调整中小尺度裂缝高度发育区的压裂参数、加强实时监控与暂堵工艺应用, 以及采用“优化井网布局 + 精准压裂”策略, 通过细化多尺度裂缝系统与压裂效果的关系, 结合具体压裂案例和数据, 制定针对性优化措施, 以最大化压裂改造体积与产能, 实现更佳的开发效果。

6. 结论

(1) 研究区龙马溪组页岩中主要发育高角度剪切缝、张剪性裂缝、低角度滑脱缝、热液溶蚀缝及层理缝。永川、丁山研究区的微观薄片观察发现多条与层理面高角度相交的微裂缝, 与野外露头剖面和岩心中高角度裂缝发育的现象相一致, 表明微观局部应力场与区域构造应力场相符。

(2) 裂缝的发育受构造应力场、岩石矿物组分、有机碳含量和地层压力等因素控制。永川地区龙一段页岩裂缝主要为水平缝, 占比 45%, 其次为垂直裂缝, 占比 26%。低角度及高角度裂缝发育较弱。纵向上, 裂缝发育密度由深至浅逐渐降低, 主要集中在中下段(20~40 条/m), 向上裂缝发育强度变弱, 密度减小至 5~10 条/m。平面上, 褶皱变形和断块发育区裂缝较多, 靠近盆缘的区域裂缝密度较高。总体来看, 永川 - 丁山地区及周缘露头龙马溪组页岩裂缝的走向以 NE 和 NEE 为主, 其次为 NNW 和 NWW。

(3) 适度的裂缝有助于页岩气的富集和保存, 改善储层物性并促进气体解吸从而有利于页岩气的富集与开采。然而, 规模过大的断裂或裂缝则可能使得储层的自封闭性受到破坏, 导致天然气的逸散。

(4) 多尺度断缝系统对储层压裂改造效果有显著影响。大尺度断裂主要影响储层的渗透性, 而中小尺度裂缝系统通过天然裂缝的发育和有效性改善储层的物性。裂缝发育的适度性直接影响水力压裂过程中缝网的形成, 天然裂缝与人工裂缝交织有助于提升储层改造效果。

致 谢

感谢导师、同学和朋友的支持与帮助, 向所有关心和帮助我的人致以诚挚的谢意。

参考文献

- [1] Feng, Z., Hao, F., Tian, J., Zhou, S., Dong, D. and Huang, S. (2022) Shale Gas Geochemistry in the Sichuan Basin, China. *Earth-Science Reviews*, **232**, Article ID: 104141. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104141>
- [2] 李雨桐, 杨西燕, 范存辉. 富有机质页岩天然裂缝表征研究进展[J]. 石油地质与工程, 2023, 37(1): 32-38.
- [3] 孙玥. 四川盆地龙马溪组页岩气富集的控制因素及评价[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- [4] 马新华, 谢军. 川南地区页岩气勘探开发进展及发展前景[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 161-169.
- [5] 郭卫星, 唐建明, 欧阳嘉穗, 等. 四川盆地南部构造变形特征及其与页岩气保存条件的关系[J]. 天然气工业, 2021, 41(5): 11-19.
- [6] 杨剑, 王桥, 刘伟, 等. 基于宽频大地电磁法的页岩气探测实践——以川西南沐川地区须家河组为例[J]. 沉积与特提斯地质, 2022(3): 1-12.
- [7] 周政. 长宁地区五峰组-龙马溪组页岩气富集特征研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2020: 11.

- [8] 何顺, 秦启荣, 范存辉, 等. 川东南丁山地区页岩气保存条件分析[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(2): 24-31.
- [9] 吴建发, 赵圣贤, 范存辉, 等. 川南长宁地区龙马溪组富有机质页岩裂缝发育特征及其与含气性的关系[J]. 石油学报, 2021, 42(4): 428-446.
- [10] 马军. 页岩裂缝成因及其对含气性影响——以渝东南地区阳春沟构造带五峰-龙马溪组为例[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(3): 126-134.
- [11] Shi, X., Wu, W., Shi, Y., Jiang, Z., Zeng, L., Ma, S., *et al.* (2022) Influence of Multi-Period Tectonic Movement and Faults on Shale Gas Enrichment in Luzhou Area of Sichuan Basin, China. *Energies*, **15**, Article No. 6846. <https://doi.org/10.3390/en15186846>
- [12] 钟城. 川东南丁山地区龙马溪组页岩裂缝特征及其与含气性关系[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2019: 27-28.
- [13] 王濡岳, 胡宗全, 周彤, 等. 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组页岩裂缝发育特征及其控储意义[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1295-1306.
- [14] 谢佳彤, 付小平, 秦启荣, 等. 丁山地区页岩储层裂缝分布预测及页岩气保存条件评价[J]. 特种油气藏, 2022, 29(1): 1-9.
- [15] Xie, J., Qin, Q. and Fan, C. (2019) Quantitative Prediction of Fracture Distribution of the Longmaxi Formation in the Dingshan Area, China Using FEM Numerical Simulation. *Acta Geologica Sinica—English Edition*, **93**, 1662-1672. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13815>
- [16] Fan, C., Zhong, C., Zhang, Y., Qin, Q. and He, S. (2019) Geological Factors Controlling the Accumulation and High Yield of Marine-Facies Shale Gas: Case Study of the Wufeng-Longmaxi Formation in the Dingshan Area of Southeast Sichuan, China. *Acta Geologica Sinica—English Edition*, **93**, 536-560. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13857>
- [17] 唐鑫. 川南地区龙马溪组页岩气成藏的构造控制[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2018: 121-122.
- [18] 聂海宽, 李沛, 党伟, 等. 四川盆地及周缘奥陶系-志留系深层页岩气富集特征与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(4): 648-659.
- [19] Wang, E., Guo, T., Liu, B., Li, M., Xiong, L., Dong, X., *et al.* (2022) Lithofacies and Pore Features of Marine-Continental Transitional Shale and Gas Enrichment Conditions of Favorable Lithofacies: A Case Study of Permian Longtan Formation in the Lintanchang Area, Southeast of Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, **49**, 1310-1322. [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(23\)60351-9](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(23)60351-9)
- [20] 徐笑丰. 四川盆地东南缘龙马溪组页岩气区域保存条件及评价[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2021.
- [21] 陆亚秋, 梁榜, 王超, 等. 四川盆地涪陵页岩气田江东区块下古生界深层页岩气勘探开发实践与启示[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1): 241-250.