

川东南地区龙马溪组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

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: 2025年9月8日; 录用日期: 2025年10月21日; 发布日期: 2025年10月31日

摘要

川东南地区五峰组-龙马溪组页岩为我国页岩气勘探与开发的重要目标层系, 其天然裂缝系统作为关键的储集-渗流结构, 在页岩气富集与保存中发挥了不可忽视的地质作用。本文系统整理并归纳了该区典型研究成果, 从裂缝类型、分布特征、形成机制出发, 探讨其对页岩气高产富集的控制机制。研究认为, 研究区裂缝类型复杂, 宏观裂缝以构造缝为主, 微裂缝以顺层页理缝最为优势; 裂缝的几何属性与空间展布具有显著的层位分异和构造分区性。裂缝发育受多因素耦合控制, 构造应力与脆性层理控制其形成位置与密度, 有机质含量和压力系统影响其演化与封闭性。进一步结合典型区块裂缝演化与富集条件, 识别出三类裂缝-页岩气富集模式: 适度裂缝-封闭压力维持型、过度裂缝-导通逸散型与微裂缝优势-改造潜力型。相关认识可为川东南及类似地区页岩气“富集-保存-开发”一体化研究提供有力支撑。

关键词

页岩气, 天然裂缝, 裂缝类型, 富集模式, 川东南地区, 五峰组-龙马溪组

Fundamental Characteristics of Natural Fractures in the First Member of the Longmaxi Formation Shale in Southeastern Sichuan Basin and Their Implications for High-Productivity Shale Gas Accumulation

Haiyue Li

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

文章引用: 李海悦. 川东南地区龙马溪组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(6): 1177-1192. DOI: 10.12677/ojns.2025.136123

Abstract

The Wufeng-Longmaxi Formation shales in the southeastern Sichuan Basin represent one of the key target intervals for shale gas exploration and development in China. As critical reservoir and seepage structures, natural fractures play a significant geological role in gas accumulation and preservation. This paper systematically reviews representative research results from the region, focusing on fracture types, spatial distribution, and genetic mechanisms to explore their control on shale gas enrichment. The study shows that the fracture system is complex, with macroscopic fractures dominated by tectonic fractures and microscopic fractures characterized mainly by bedding-parallel fractures. These fractures exhibit significant stratigraphic and structural heterogeneity in their geometry and spatial patterns. Fracture development is jointly controlled by multiple factors: tectonic stress and brittle lamination determine their occurrence and density, while organic content and overpressure influence their evolution and sealing capacity. Further analysis of fracture evolution and enrichment conditions in typical blocks identified three types of fracture-shale gas enrichment patterns: moderate fractures (maintaining confinement pressure), excessive fractures (conductivity and escape), and microfractures (dominant) (potential for stimulation). These insights provide strong support for integrated research on shale gas enrichment, preservation, and development in southeastern Sichuan and similar regions.

Keywords

Shale Gas, Natural Fractures, Fracture Types, Enrichment Model, Southeastern Sichuan Basin, Wufeng-Longmaxi Formation

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

深层页岩气作为我国非常规油气资源开发的重要方向，其高效开发仍面临储层评价复杂、富集机制尚不明确等关键挑战[1]。天然裂缝作为页岩储层中关键的非均质构造单元，在控制页岩气的赋存状态、渗流通道和保存能力方面具有重要影响[2] [3]。近年来，随着我国南方复杂构造区页岩气勘探的不断深入，裂缝系统的精细刻画与富集模式的识别已成为研究焦点[4]。

本文所研究的“龙马溪组一段”主要指川东南地区五峰组 - 龙马溪组中下部的富有机质页岩层段，是我国深层页岩气勘探的重要接替区，具备埋深大、有机质丰度高、脆性较强等有利的裂缝发育条件。已有研究从几何形态、空间分布与充填特征等方面对该区裂缝开展了系统探讨，明确了构造应力、有机质含量与脆性矿物对裂缝发育的主控作用[5] [6]。然而，研究区裂缝系统期次多样、发育强度不均、封闭性差异显著，不同构造单元裂缝结构特征及其产能响应存在明显差异[7]，对页岩气富集单元识别与压裂改造效果产生了重要制约。因此，系统识别裂缝类型，厘清其形成演化机制与主控因素，进一步揭示裂缝系统与页岩气富集之间的耦合关系，对于深化深层页岩气富集模式认知、优化有利区优选标准与开发策略具有重要的理论价值与工程意义。本文基于川东南多个典型构造单元(泸州、丁山、双龙 - 罗场)的裂缝系统的综合对比，系统总结了裂缝类型、分布规律与演化特征，并在此基础上提出了具有区域性意义

的“裂缝-页岩气富集模式”，相较既有多基于单一区块的研究，提升了模式识别的区域适用性。

2. 区域地质概况

川东南地区位于四川盆地东南缘(图 1)，构造上处于川东高陡褶皱带与川南中低缓构造带的过渡地带，构造格局受多期应力叠加影响，断裂系统发育，褶皱构造复杂[1][8]。研究区主要包括泸州、丁山与双龙-罗场等典型构造单元，其中泸州区块背斜发育、构造封闭性较好[9][10]，丁山与双龙-罗场地区构造形态变化较大，裂缝系统发育强烈[11]-[13]。

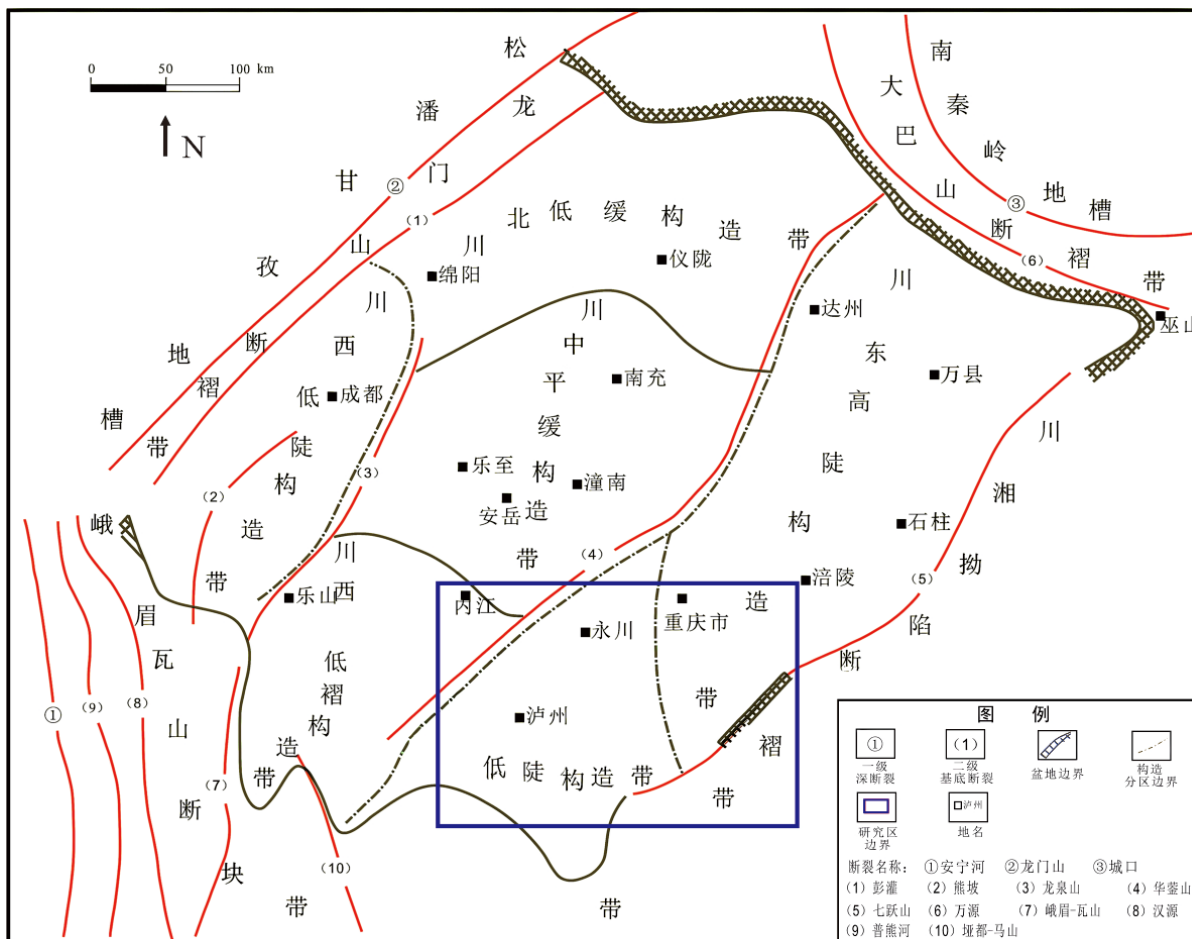


Figure 1. Geographical location map of southeast Sichuan (Revised from [14])

图 1. 川东南地理位置图(改绘自[14])

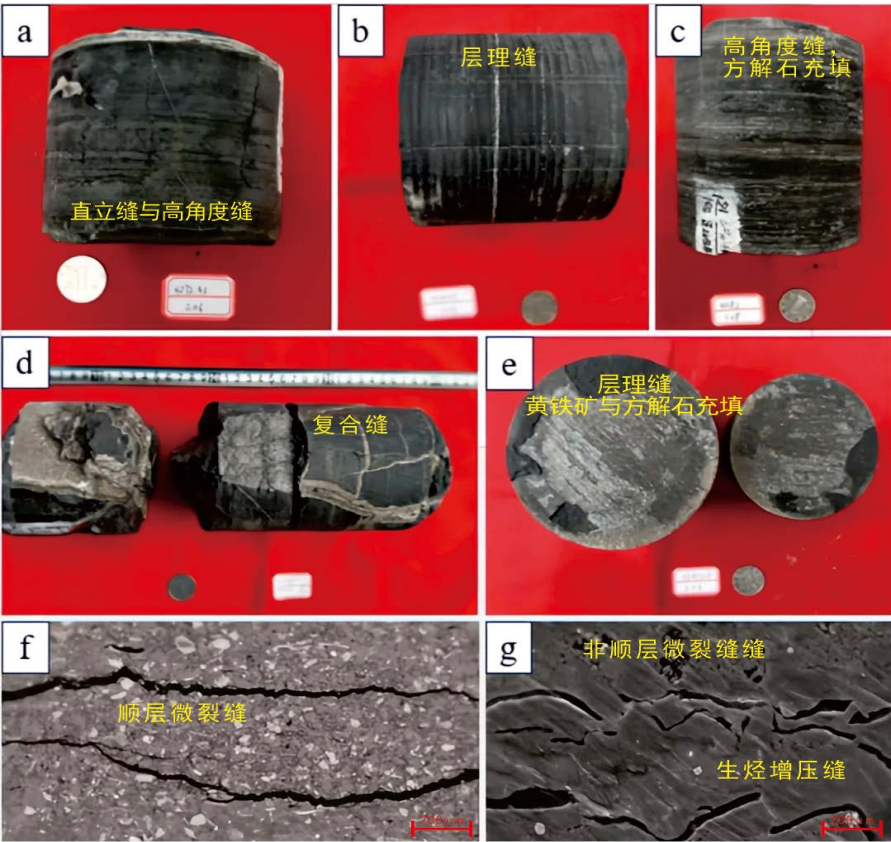
本区目标层段为上奥陶统五峰组与下志留统龙马溪组下段(龙一段)富有机质页岩，主要沉积于深水陆棚相或深棚-斜坡过渡相环境[15]。该组页岩厚度稳定，脆性较强，黑色有机质富集明显，具备良好的天然裂缝发育基础与含气潜力，是目前深层页岩气勘探开发的重要主力层系。

3. 天然裂缝类型及基本特征

3.1. 宏观裂缝类型及特征

宏观裂缝是指在岩心或露头上肉眼可识别和描述的天然裂缝，通常具有厘米级长度，是页岩气赋存的重要空间结构[5][16]。在川东南地区五峰组-龙马溪组页岩中，宏观裂缝类型复杂，主要包括构造裂

缝、成岩裂缝和异常高压裂缝三大类[6]，具体特征如下(图 2、表 1)。



注：图像据公开发表的相关研究[18]-[20]重绘整理(CC BY 4.0)，仅用于示意裂缝类型。

Figure 2. Macro and micro images of shale fractures
图 2. 宏观与微观页岩裂缝类型图

Table 1. Summary of macroscopic fracture types and their basic characteristics
表 1. 宏观裂缝类型及其基本特征总结表

裂缝类型	主要成因	亚类型	特征描述	常见填充物	分布特征
构造裂缝	构造应力作用	剪切缝	高角度、缝面平直、成组出现，穿透性强	方解石、黄铁矿	普遍发育，控制性强
		顺层滑脱缝	层面滑移形成，缝面平整、有划痕阶步，良好连通性	方解石条带	层面发育，局部富集
		张性缝	缝面粗糙、短小、不规则，易被充填	方解石	多为孤立，局部可见
		复合缝	张剪叠加，缝体复杂，张开度大，产状变化显著	方解石等	应力叠加区常见
成岩裂缝	成岩过程演化	层间页理缝	沿页理面发育，微裂缝为主，平整规整	方解石、黄铁矿	横向连通性好，局部富集
		溶蚀缝	缝体弯曲、不规则，零星分布	方解石	零散分布，较小规模
异常高压缝	生烃超压突破	无明显亚类	透镜状、边缘模糊、中央开度大，缝体不规则	沥青、石英、方解石	指示生排烃强度，局部可见

(1) 构造裂缝

构造裂缝是在构造应力作用下形成的裂缝类型，是目前研究区页岩储层中控制性最强的宏观裂缝类型，直接影响储层改造响应与天然气渗流路径[13] [17]，根据构造应力场与岩层关系，可进一步细分为：剪切缝一般呈高角度或直立产出，缝面平直、延伸距离大，常切穿整个岩心，岩心上常见其成组出现，缝面多被方解石、黄铁矿等矿物充填。顺层滑脱缝沿层面滑移产生，具有明显滑移痕迹[5]，缝面一般存在平整、光滑或划痕与阶步等特征，具备良好的侧向连通性，通常被方解石条带状脉体充填[4]。张性缝由拉张应力控制形成，缝面粗糙、形态不规则、延伸短、易充填[11]，多被方解石充填。复合缝是剪切缝在后期构造应力叠加下进一步张开、转向形成的组合裂缝，产状变化复杂，张开程度大，多见于应力叠加区[12]。

(2) 成岩裂缝

成岩裂缝主要形成于沉积 - 压实 - 胶结 - 成岩演化过程中，通常沿页理面或易溶组分发育，规模较小、开度有限，但横向连通性好[6]，主要类型包括：层间页理缝沿页理面顺层发育，缝面平整，多为微裂缝，常被方解石、黄铁矿等填充。溶蚀缝由成岩过程中溶蚀作用形成，缝体常呈湾曲状，充填物多为方解石，分布零散。

(3) 异常高压裂缝

异常高压缝是页岩生烃过程中产生的超压突破岩石抗张强度形成的裂缝，是生排烃强度高、压力封闭性强的重要指示[6]，常表现为透镜状、边缘模糊、开度中部宽、向两端急剧变窄的特征，缝体不规则，多为纤维状方解石、石英及沥青充填。

综上，川东南页岩储层中宏观裂缝类型复杂成因多样，主要以高角度剪切缝和顺层滑脱缝为主，局部发育层间页理缝、溶蚀缝及异常高压缝等。其组合特征在不同构造单元中存在明显差异，是页岩气储层渗流系统、裂缝改造能力与保存条件差异的关键成因。

3.2. 微裂缝类型与显微特征

微裂缝是指需借助高倍显微镜(如光学显微镜、扫描电子显微镜 SEM)才能识别的细微裂缝结构，在页岩气渗流系统中兼具“微通道”和“改造预裂”的双重功能。根据裂缝与层理面的空间关系(表 2)，川东南地区五峰组 - 龙马溪组页岩中的微裂缝可分为顺层微裂缝与非顺层微裂缝两大类[5]。

Table 2. Summary of microfracture types and their microscopic characteristics
表 2. 微裂缝类型及其显微特征总结表

裂缝类型	主要成因	发育部位	缝面特征	常见充填物	典型意义
顺层微裂缝	层理控制	泥质层与粉砂层界面、有机质边界	线状、凹凸状，可穿透层理	方解石、黄铁矿	延伸性好，是主要渗流通道
生烃增压缝	有机质生烃增压	有机质与围岩接触面	不规则、粗糙	沥青等	生排烃强度高的指示特征
成岩收缩缝	矿物脱水或压实收缩	黏土矿物片状晶体内部或边缘	簇状、线状，局部可连通	黄铁矿	成岩期裂缝网络的基础组成
溶蚀微裂缝	成岩溶蚀作用	碳酸盐矿物内部或边缘	不连续、少见连通	无或少量黄铁矿	局部增强储集空间

(1) 顺层微裂缝

顺层微裂缝以页理缝最为典型，主要沿泥质纹层与粉砂纹层的接触界面、条带状有机质与围岩边界

发育，多数呈线状或凹凸状展布，部分可局部切穿纹层进入相邻层理。

(2) 非顺层微裂缝

非顺层微裂缝主要包括生烃增压缝、成岩收缩缝和溶蚀缝三种类型[5]。其中，生烃增压缝多分布于有机质与围岩的接触界面，缝面形态不规则；成岩收缩缝多见于片状黏土矿物内部或边缘，呈簇状或线状展布，局部可见黄铁矿充填；溶蚀缝多形成于碳酸盐矿物内部或边界，呈不连续状分布，通常未见充填，仅少数含黄铁矿。

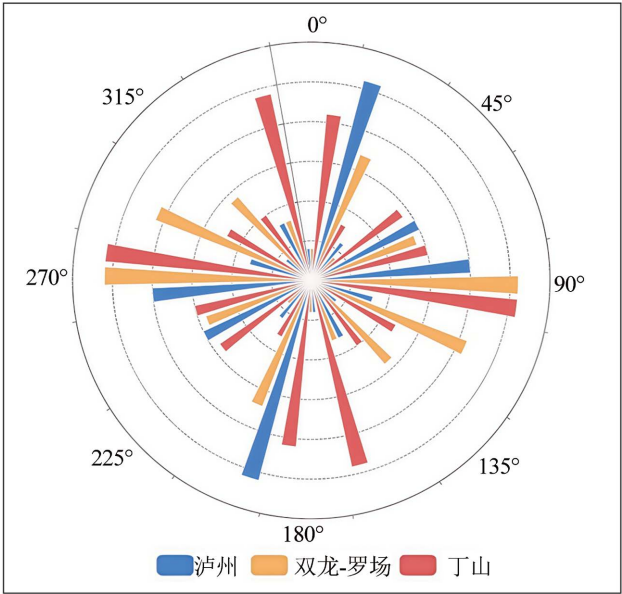
综上，研究区微裂缝系统总体发育良好，其中顺层页理微裂缝数量占优，沿层理面展布且延伸性强，是深层页岩气储层中重要的天然渗流通道；非顺层微裂缝虽数量较少，但在特定构造部位或有机质富集层段中可构成有效的天然渗流网络，对气体富集与储层改造具有重要意义。

3.3. 裂缝分布规律及填充特征

川东南地区五峰组-龙马溪组页岩裂缝在空间分布、几何参数及充填特征上呈现显著的层位分异与构造控制性。结合岩心、薄片和成像测井资料，可从产状、几何特征、分布规律及充填特征四方面进行系统归纳。

(1) 产状特征：裂缝优势走向具有明显构造分区差异

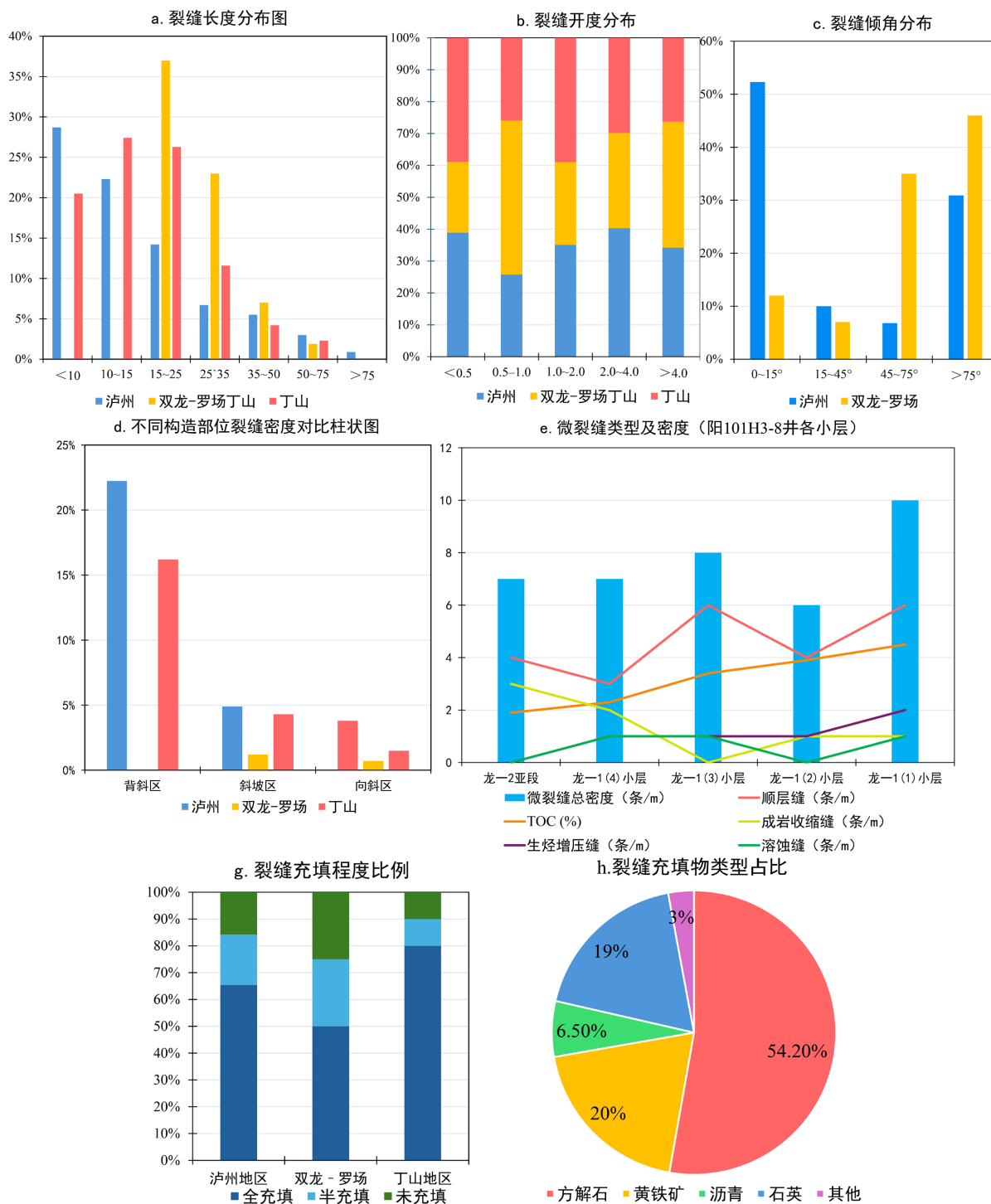
研究区裂缝走向总体表现为多组优势方位，且在不同构造单元间存在差异(图 3)。泸州地区的统计结果显示，优势走向包括 NWW ($275^{\circ} \pm 5^{\circ}$)、NW ($315^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $325^{\circ} \pm 5^{\circ}$)、NNE ($15^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $25^{\circ} \pm 5^{\circ}$)及 NEE ($65^{\circ} \pm 5^{\circ}$) [17]，其中 NWW 与 NNE 方向最为发育。双龙-罗场地区则以近 EW ($85^{\circ} \pm 10^{\circ}$)、NNE ($35^{\circ} \pm 5^{\circ}$)、NWW ($290^{\circ} \pm 10^{\circ}$)及 NNW ($325^{\circ} \pm 5^{\circ}$)为主[12]，其中近 EW 与 NNE 方向最为显著。丁山地区裂缝走向更为复杂，发育 NWW ($295^{\circ} \pm 5^{\circ}$)、近 SN ($5^{\circ} \pm 5^{\circ}$)、NNW ($345^{\circ} \pm 5^{\circ}$)、NEE ($80^{\circ} \pm 5^{\circ}$)、NE ($35^{\circ} \pm 5^{\circ}$)与 NW ($320^{\circ} \pm 5^{\circ}$)等方向，高角度剪切缝集中于 NWW ($300^{\circ} \pm 5^{\circ}$)、NE ($80^{\circ} \pm 5^{\circ}$)与 NNW ($345^{\circ} \pm 5^{\circ}$) [11]。整体来看，裂缝优势方位具有明显的构造分区特征。



注：裂缝走向数据整理自[6][11][12]，玫瑰图为优势方位示意归纳，未进行原始频数加权或跨文献标准化；样本与方法见附录。

Figure 3. Comparative diagram of dominant fracture orientations in typical structural blocks, southeastern Sichuan
图 3. 川东南典型区块裂缝优势方向对比图

(2) 几何特征：以短尺度、小开度、高倾角为主



注：数据整理自[5][6][12][16][17][21]，图件由作者绘制；为区块/井层段的统计汇总，未做跨文献加权或标准化处理；样本与方法见附录。

Figure 4. Statistical characteristics of fracture geometry, spatial distribution, and filling features in the first member of Longmaxi Formation shale

图 4. 川东南典型区块页岩裂缝几何、分布与充填特征对比图

五峰组-龙马溪组页岩裂缝普遍表现为“短尺度-小开度-高密度”组合特征。长度方面,泸州及双龙-罗场地区裂缝多为15~35 cm,比例超过60% [12];短裂缝($\leq$ 岩心周长25%)在多个层位的平均比例达79.8% [16]。开度方面,小于1 mm的裂缝占多数,其中0.5 mm以下的比例超过50% [6] [12]。高倾角裂缝分布具有构造分区差异,泸州地区以低角度($0^{\circ}\sim 15^{\circ}$)为主,占52.3%,直立缝($>75^{\circ}$)占30.9% [6];双龙-罗场地区则以高角度($45^{\circ}\sim 75^{\circ}$)为主,占35%,直立缝占46% [12]。

(3) 分布规律: 裂缝密度受构造位置与埋深双重控制

在平面分布上,裂缝密度总体表现为“背斜区 > 斜坡区 > 向斜区”,泸州地区背斜区平均密度达22.4条/m,显著高于斜坡区(4.9条/m)和向斜区(3.8条/m) [6];双龙-罗场地区裂缝密度集中在0.5~1.5条/m,反映构造挤压作用相对较弱 [12]。在垂向分布上,裂缝密度随埋深增加而升高,例如阳105井龙一¹⁽¹⁾小层(龙马溪组第一段第1小层)埋深约1200 m时密度仅0.77条/m,而泸206井同层位埋深约4040 m时密度达7.8条/m [5]。在微裂缝系统中,顺层缝最为发育,是主要天然渗流通道类型,如阳101H3-8井顺层缝密度达42条/片 [5],远高于成岩收缩缝和生烃增压缝。

(4) 充填特征: 以方解石为主, 充填程度高, 分区性显著

裂缝充填物以方解石为主,常伴黄铁矿、石英及少量沥青,呈单矿物或多矿物混合充填 [17]。方解石充填比例达54.2%,沥青占比约6.54% [6]。剪切缝多全充填,页理缝富含黄铁矿 [6];高角度缝充填充分,多封闭不导流,而滑脱缝与层间缝常半充填或未充填,具备一定渗流能力 [12]。龙马溪组全充填缝比例为65.4%~80%,半充填约15%~20%,未充填裂缝比例低于20% [12] [17] [21]。测井资料显示,全充填缝对应高阻亮纹、渗透性差;未充填缝对应低阻暗纹,反映良好的导流性能 [21]。

综上,研究区裂缝系统在空间分布、几何参数和充填特征上均表现出强烈的构造与层位分异性(图4)。构造高部位、深埋层段及脆性层段裂缝更发育;顺层微裂缝在微观渗流网络中占据主导;方解石主导的高充填裂缝封闭性强,而未充填或半充填裂缝在储层改造与渗流中具有重要作用。

4. 天然裂缝成因与发育规律

天然裂缝对页岩气的富集和保存有重要作用。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. 裂缝期次与形成演化

川东南地区五峰组-龙马溪组页岩裂缝总体经历了三期主要构造活动的叠加改造,不同区块在成缝期次、主应力方向、裂缝组合特征及充填温度等方面存在一定差异,反映出裂缝演化受区域应力场演变和多期构造运动的共同控制。以下分别结合泸州、丁山与双龙-罗场三个典型区块的研究成果进行归纳(图5,表3)。

(1) 泸州地区

赵圣贤等(2022)的研究表明,该区裂缝形成可分为三个构造期次:1) 印支期(约253.4~250.0 Ma),在NNW-SSE向挤压应力控制下,形成NWW与近NNE向平面剪切缝以及NEE向剖面剪切缝,充填物以方解石和黄铁矿为主,包裹体均一温度为130.4~150.6℃;2) 燕山晚期-喜马拉雅早期(约70.6~42.6 Ma),应力方向转为SEE-NWW向,主要发育NW与NEE向剪切缝及NNE向剖面缝,裂缝多被方解石全充填,包裹体温度升至194.8~210.0℃;3) 喜马拉雅中-晚期(约42.60 Ma),构造进入定型阶段,受NEE向应力影响,形成NNE与WE向平面缝及NW向剖面缝,以半充填或未充填为主,包裹体温度163.3~190.0℃。

(2) 丁山地区

范存辉等(2018)将该区构造裂缝划分为三期:1) 燕山中-晚期(约82.5~72.1 Ma),在SE-NW向挤压

应力下,发育 NWW 与 NNW 向“X 型”平面剪切缝、NE 向剖面剪切缝及少量 NE 向张性缝,主应力方向为 $135^{\circ} \pm 15^{\circ}$,最大有效主应力 97.06 MPa,包裹体温度 $295.6 \sim 325.2^{\circ}\text{C}$,裂缝高充填,方解石为主要充填物;2) 燕山末期-喜马拉雅中期(约 $72.1 \sim 31.2 \text{ Ma}$),NE 向挤压形成近 SN 与 NEE 向共轭缝及 NW 向剖面缝,主应力方向为 $45^{\circ} \pm 15^{\circ}$,最大有效主应力 90.71 MPa,包裹体温度 $189.1 \sim 232.4^{\circ}\text{C}$,充填物以方解石为主,伴有少量硅质和铁质矿物;3) 喜马拉雅晚期~现今(约 $31.2 \sim 0 \text{ Ma}$),在 NE 向应力作用下,形成少量褶皱及断层伴生缝,主应力为 76.55 MPa,充填程度较低,仅见少量方解石。

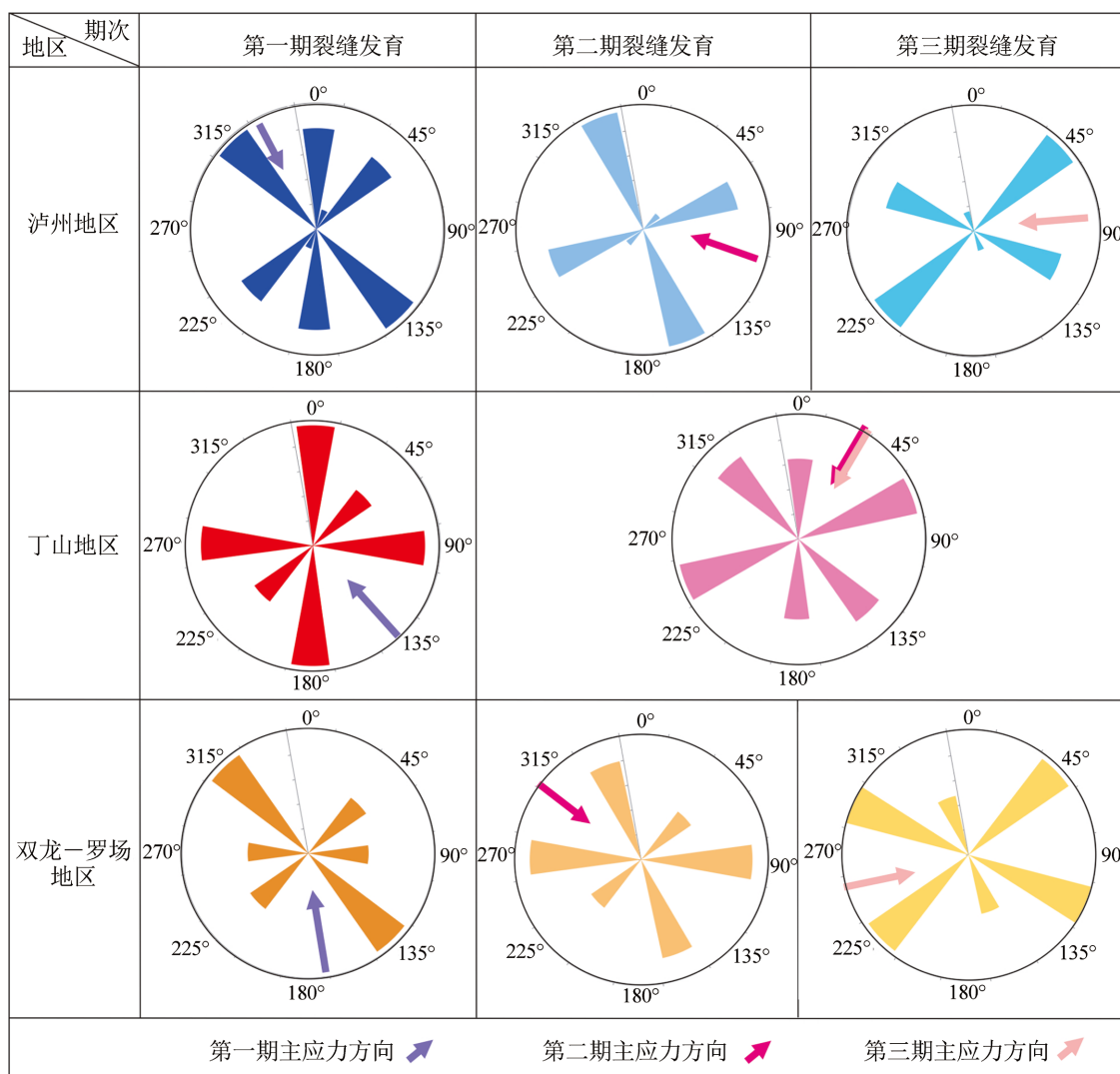


Figure 5. Schematic diagram of fracture development stages and principal stress evolution in typical blocks of southeastern Sichuan

图 5. 川东南典型区块裂缝期次及主应力演化示意图

(3) 双龙-罗场地区

陈丽清等(2022)指出,该区裂缝期次与喜马拉雅构造活动密切相关,可分为三期:1) 燕山中晚期-喜马拉雅早期(约 $78 \sim 56 \text{ Ma}$),在南北向挤压下,发育 NNW 与 NNE 向平面共轭剪切缝及近 EW 向剖面缝,裂缝充填良好,以方解石为主,包裹体温度 $165 \sim 198^{\circ}\text{C}$;2) 喜马拉雅中期(约 $56 \sim 29 \text{ Ma}$),NW-SE 向应力形成 NNW 与近 EW 向平面剪切缝及 NE 向剖面剪切缝,充填物为方解石伴少量黄铁矿,包裹体温

度 115~146℃；3) 喜马拉雅晚期~现今(约 29~0 Ma)，受近 W-E 向应力控制，主要发育 NWW 与 NNE 向共轭剪切缝，部分裂缝未充填或低充填，包裹体温度 74~105℃。

Table 3. Fracture stages and characteristics in typical blocks of southeastern Sichuan
表 3. 川东南地区典型区块裂缝期次及特征

典型 区块	构造阶段(期次)	地质时期 (Ma)	主应力方位	裂缝优势方位	主要充填矿物	包裹体温度 (℃)	裂缝特征概述
泸州 地区	第一期印支期	253.4~250.0	NNW-SSE	NWW、近 NS、NEE	方解石、黄铁 矿	130.4~150.6	充填充分，早期应 力型裂缝
	第二期燕山晚期 - 喜马拉雅早期	70.6~42.6	SE-NW	NW、NEE、 NNE	方解石	194.8~210	高充填，剪切缝为 主
	第三期喜马拉雅中 - 晚期	42.6~0	NEE	NNE、WE、 NW	少量方解石	163.3~190	半充填 - 未充填， 多改造早期裂缝
丁山 地区	第一期燕山中 - 晚 期	82.5~72.1	SE-NW	NWW、 NNW、NE	方解石	295.6~325.2	高角度剪切缝，充 填充分
	第二期燕山末期 - 喜马拉雅中期	72.1~31.2	NE	SN、NEE、 NW	方解石、硅 质、铁质	189.1~232.4	张剪混合型裂缝组 合
	第三期喜马拉雅晚 期 - 现今	31.2~0	NE	NW	少量方解石	—	充填较低，叠加改 造早期裂缝
双龙 - 罗 场地 区	第一期燕山中晚期 - 喜马拉雅早期	78~56	N-S	NNW、NNE、 近 EW	方解石	165~198	高充填，剪切缝为 主
	第二期喜马拉雅中 期	56~29	NW-SE	NNW、近 EW、NE	方解石、黄铁 矿	115~146	共轭缝与剖面缝组 合
	第三期喜马拉雅晚 期 - 现今	29~0	W-E	NWW、 NNE、NS	少量方解石	74~105	改造型裂缝，未充 填比例较高

注：数据综合整理自[11] [12] [17]等文献。

综合分析，川东南各区块裂缝系统普遍经历三期构造活动，主应力方向由印支期的 NNW-SSE 向逐渐转变为喜马拉雅期的近 EW-NE 向；裂缝组合特征也由早期高充填的“X 型”剪切缝逐渐演化为晚期低充填、改造型裂缝(相关统计见表 3)。这些构造演化特征为区域页岩裂缝系统的形成与改造奠定了结构基础，并为后续分析裂缝类型、分布规律及其对页岩气富集和保存的影响提供了关键的地质背景支撑。

4.2. 裂缝发育规律及影响因素

川东南地区五峰组 - 龙马溪组页岩裂缝系统的形成与发育受多种因素耦合控制，主要包括构造应力、岩性与层理、有机质含量、压力 - 埋深条件以及岩石力学性质等。各因素对裂缝发育的影响程度和作用机理存在差异，不同区块的响应特征亦具有一定差别。综合前人研究成果，归纳如下五方面主控因素(表 4)。

(1) 构造应力：裂缝形成的主控外因

构造应力为决定裂缝发育程度与分布特征的首要因素。裂缝发育指数(Ffz)，定义为裂缝总线密度、倾角类型数与充填类型数之积，可综合表征岩心尺度裂缝的总体发育水平。赵圣贤等(2025)指出，泸州地区背斜区 Ffz 均值达 1.46，显著高于斜坡区(0.33)与向斜区(0.18)，反映构造部位对裂缝发育的强控制作用。Ffz 与距曲率裂缝带的距离呈对数负相关，控制范围约 600 m ($R^2 > 0.6$)，表明褶皱核部张应力集中区

为裂缝富集的有利部位。谢佳彤(2023)在丁山 - 东溪区同样发现, 裂缝密度与距断层/褶皱轴的距离呈显著负相关, 进一步验证构造应力为裂缝发育的主导外因。

(2) 岩性与层理：裂缝展布的结构基础

岩性组合与层理类型决定裂缝的发育强度与空间展布。赵圣贤等(2025)认为, 当脆性矿物含量 > 55%、黄铁矿 < 5%、黏土 < 40%时, 裂缝总密度可达 16.5 条/m, 显示脆性组分对裂缝形成的显著促进效应。施振生等(2022)在阳 101H3-8 井识别出条带状粉砂型层理段裂缝最为密集(宏观 9 条/m, 微裂缝 10 条/片), 而均质块状页岩裂缝最少(宏观 1.5 条/m, 微裂缝 2.5 条/片)。层理面作为力学薄弱面, 在构造应力作用下优先破裂, 是顺层裂缝优先生长的关键界面。

(3) 有机质含量：微裂缝系统的重要驱动力

裂缝密度与总有机碳(TOC)含量呈正相关。在泸 206 井, TOC < 2%时裂缝密度不足 2 条/m, TOC 达 4%~5%时密度升至 5.1~7.8 条/m; 阳 101H3-8 井中, TOC ≥ 4%条件下微裂缝密度可达 10~18 条/片[5]。富有机质页岩在成岩过程中生成强烈的生烃增压, 可诱导顺层缝与生烃缝发育, 同时伴随的有机酸蚀解作用及围岩力学削弱进一步促进裂缝系统形成。

(4) 压力系数与埋深：裂缝保持与演化的动力来源

在其他条件相近情况下, 裂缝密度随压力系数与埋深增加而升高。阳 105 井中, 压力系数为 1.2 时裂缝密度仅 0.14 条/m; 泸 206 井压力系数达 2.2 时, 裂缝密度增至 4.8 条/m [5]。封闭高压体系内, 孔隙超压可突破围岩强度, 形成顺层缝与生烃缝等多期裂缝叠加结构, 不仅延长裂缝张开时间, 也有助于裂缝导流能力的持续保持。

(5) 岩石力学性质：裂缝稳定性的内在约束

裂缝形成与保持受岩石力学参数显著影响。赵圣贤等(2025)指出, 裂缝发育强烈段通常最大水平应力 < 115 MPa、最小水平应力 < 100 MPa。Ffz 与杨氏模量呈正相关($R^2 = 0.6$), 而与泊松比相关性较弱。在向斜等应力较弱区, 岩性力学性质主控作用更为显著, 杨氏模量越高, 裂缝张开后越易保持稳定。

Table 4. Main controlling factors and mechanisms of fracture development in southeastern Sichuan
表 4. 川东南地区裂缝发育的主要控制因素及作用机制

主控因素	核心判据	作用机理
构造应力	裂缝发育指数 Ffz (线密度 × 倾角类型数 × 充填类型数); 与距断层/曲率高值带距离呈显著负相关(控制范围约 600 m)	挤压或拉张应力集中促使裂缝萌生并决定密度基准, 构造高部位及张应力核部最易形成裂缝富集区
岩性与层理	脆性矿物含量 > 55%、黏土 < 40%、黄铁矿 < 5%; 条带状粉砂或强层理段明显优于均质块状段	层理作为力学薄弱面优先破裂, 高脆性降低抗压强度并增强裂缝张开与延伸能力
有机质含量(TOC)	TOC ≥ 4%时裂缝显著增多, <2%时裂缝稀少	生烃增压与有机酸蚀解共同诱导顺层缝和生烃缝形成并提高裂缝连通性
压力 - 埋深	压力系数升高、埋深加大均促使裂缝密度与开度增加; $P_c \geq 2.0$ 常见多期裂缝叠加	孔隙超压突破围岩强度, 延长裂缝张开时效并有助导流能力持续保持
岩石力学性质	裂缝发育段常处于最大水平应力 < 115 MPa、最小水平应力 < 100 MPa 的低应力环境, Ffz 与杨氏模量正相关($R^2 \approx 0.6$), 泊松比影响较弱	高刚度岩石在低应力区更易保持裂缝稳定与持久性

综上, 川东南地区裂缝系统的形成与演化由构造应力主导, 并受岩性、TOC、压力系数与岩石力学等因素耦合调控。在构造应力强烈、脆性矿物丰富且具备高压环境的区段, 更易形成具备稳定性与改造潜力的高密度裂缝网络, 为后续富集模式的识别与类型划分提供了关键基础。

5. 天然裂缝对页岩气高产富集的影响

5.1. 裂缝对储集空间与气体保存的作用

川东南地区五峰组-龙马溪组页岩裂缝系统不仅拓展了气体赋存空间，也深刻影响了页岩气的赋存状态与保存条件(图 6)。结合裂缝类型、几何特征、分布规律及演化机制的综合分析，裂缝在储集空间形成、气体封存与逸散过程中的双重作用可归纳如下。

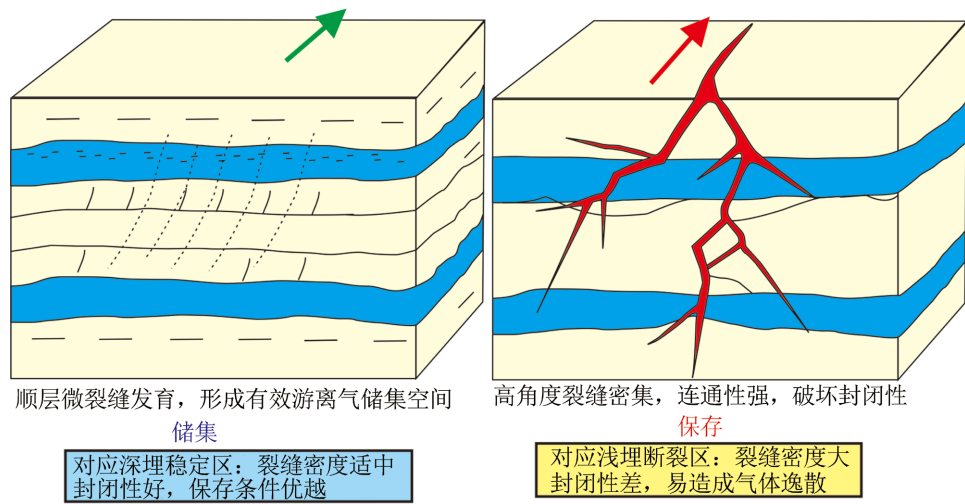


Figure 6. Schematic diagram of fracture development stages and principal stress evolution in typical blocks of southeastern Sichuan

图 6. 裂缝对页岩气储集与保存作用示意图

(1) 微裂缝系统拓展储集空间，增强游离气承载能力

已有研究表明[5]，深层页岩储层中以顺层微裂缝最为常见，通常沿有机质条带及脆性层理分布，其密度显著高于其他类型微裂缝。在有机质含量较高的层段，微裂缝更为密集且延伸性好，具备较强的气体赋存能力。这类裂缝多形成于成岩中-晚期，与生烃增压过程密切相关，是深层页岩游离气的主要储集空间。

(2) 顺层裂缝可在局部形成封闭系统，强化气体原地保存

顺层裂缝除提供储集空间外，还可在一定条件下与其他裂缝组合形成局部封闭体系，限制气体逸散。据前文分析，这类裂缝在构造高部位及脆性岩段中分布集中，部分与高角度裂缝共同构成立体网络，在具备一定导流能力的同时仍能保持封闭性。而在构造应力较强的区域，高角度裂缝连通上下层位的可能性较大，更易形成逸气通道，从而削弱保存效果。

(3) 裂缝分布与构造区位共同影响气体保存条件

据赵圣贤等(2025)的研究，深埋且构造相对稳定的部位以顺层裂缝为主，裂缝密度适中且封闭性好，压力系数较高，保存条件优越；而浅埋断裂发育区高角度裂缝密集、连通性强，系统封闭性差，易造成气体逸散[7]。第四章结果也显示，断裂控制带内裂缝多期叠加且压力明显降低，不利于页岩气保存。

综上，顺层微裂缝在储集空间拓展中发挥主导作用，高角度裂缝则对渗流与逸气过程具有重要影响。裂缝类型、组合特征与构造区位的耦合关系，是页岩气富集模式建立的基础。

5.2. 裂缝-页岩气富集模式总结

裂缝系统在控制页岩气赋存、封存与富集方面具有显著作用。结合第三、四章的研究及前人成果[2]

[7] [22], 可归纳出三类典型的裂缝 - 页岩气富集模式(图 7)。

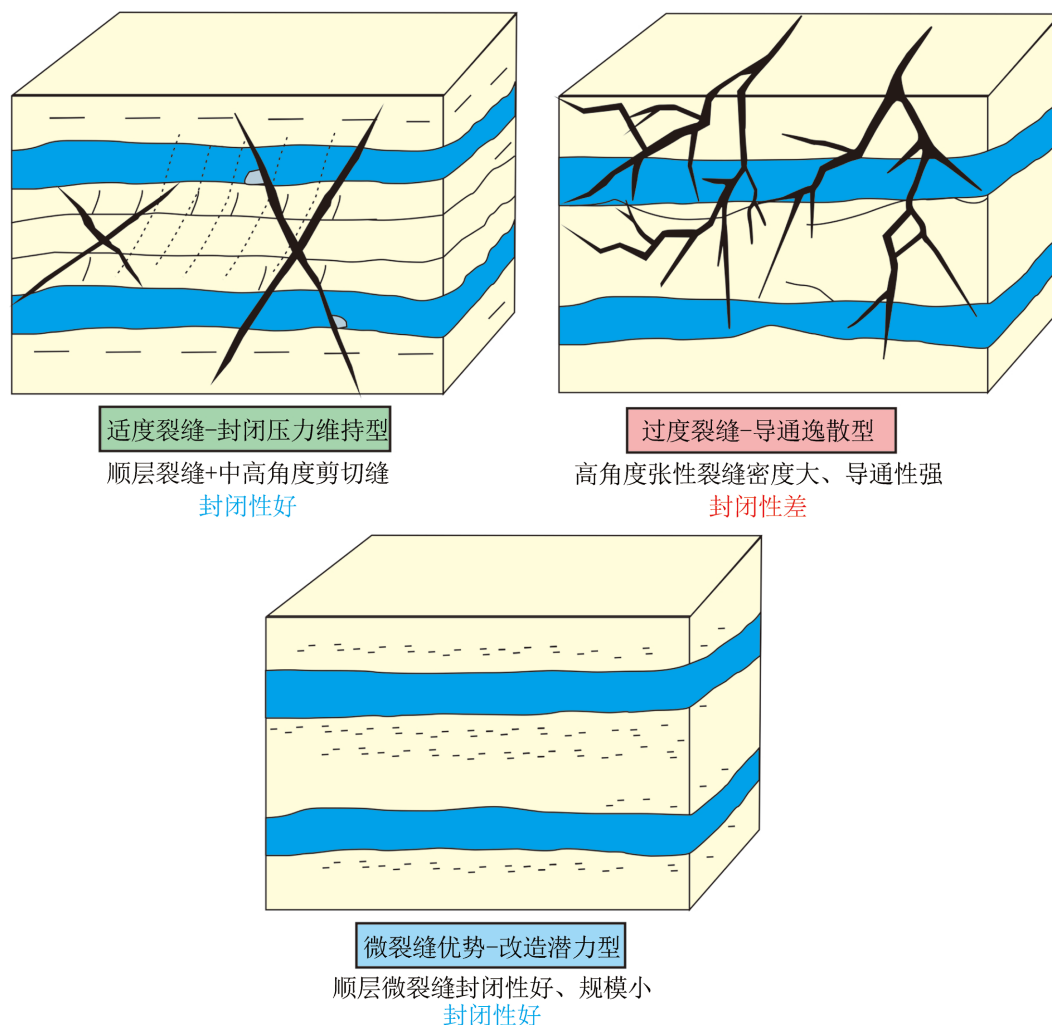


Figure 7. Schematic diagram of different fracture-shale gas enrichment patterns

图 7. 裂缝 - 页岩气富集模式示意图

(1) 适度裂缝 - 封闭压力维持型

多见于构造稳定、埋深较大的区域。裂缝系统以顺层裂缝与中 - 高角度剪切缝组合为主, 裂缝密度适中、封闭性好。充填物多为方解石, 部分裂缝与生烃增压阶段具有时序耦合特征(相关研究报道)。该模式有利于维持压力体系完整性, 封闭游离气, 形成高含气量、压力稳定的富集单元。

(2) 过度裂缝 - 导通逸散型

多见于构造应力强烈、临近断裂的浅埋区。裂缝以高角度剪切缝和张性缝为主, 密度大、连通性强, 常与断裂系统构成贯通网络。多数裂缝充填不足, 封闭性差, 易形成逸气通道, 导致压力衰减、含气量下降。有研究指出, 这类区段即使裂缝规模大, 测试产量也可能不高, 反映过度连通性对富集不利。

(3) 微裂缝优势 - 改造潜力型

多见于构造边部、斜坡或断裂阴影带。裂缝系统以顺层微裂缝与成岩收缩缝为主, 规模小、封闭性好, 未与大型断裂连通, 具备较好天然保存条件。尽管天然渗流能力有限, 但裂缝结构稳定, 适宜人工

压裂改造。已有研究表明,此类储层往往有机质含量较高、压力条件适中,具备较好的改造响应潜力。

综上,三类模式分别对应“结构与压力适度、保存能力强”,“裂缝过度发育、封闭性差”,“微裂缝为主、改造潜力大”的不同组合。其形成机制与多期构造-沉积-成岩作用密切相关,厘清分布规律与控制因素,可为有利区优选与分区开发提供参考。需要指出的是,本文提出的三类裂缝-页岩气富集模式为基于文献归纳与综合判断的结果,相关判别标准尚未形成定量体系,后续仍需结合岩心、测试、模拟等多源资料开展系统验证。同时需强调,本文归纳的三类裂缝-页岩气富集模式均建立在深层页岩储层背景下,与中浅层页岩裂缝特征相比,更突出超高压环境下的愈合充填效应和应力敏感性,这也使得深层页岩气的保存机制与改造方式具有更大的复杂性和挑战性。

6. 研究局限性与展望

本研究主要基于前人公开资料与典型井资料的系统整理与对比分析,所提出的裂缝-页岩气富集模式在一定程度上具有概括性和简化性。由于研究区深层裂缝系统存在明显的空间非均质性,目前的模型尚缺乏针对单井或单层系的高精度验证。未来研究可从以下几个方面展开:其一,结合更多井位的岩心、测井与压汞实验资料,对裂缝-储集空间-含气性之间的定量耦合关系进行系统刻画;其二,利用数值模拟与断裂力学模拟方法,验证不同构造背景下裂缝系统对压力保持和渗流能力的动态响应;其三,将深层裂缝特征与页岩气开发工程实践结合,探索“天然裂缝-压裂缝”复合体系的有效改造机制。通过这些工作,有望不断完善和检验本文提出的区域性富集模式,使其在理论和应用层面更具普适性和指导意义。

7. 结论

本文基于对川东南地区五峰组-龙马溪组页岩裂缝系统相关文献资料的系统整理,归纳了天然裂缝的类型、分布特征、发育机制及其对页岩气富集与保存的地质意义。主要结论如下:

(1) 已有研究表明,研究区裂缝系统类型多样、组合复杂,宏观裂缝以构造裂缝为主,成岩裂缝和异常高压裂缝次之;微裂缝则以顺层页理缝为优势类型。裂缝在几何参数、空间展布与充填状态上表现出明显的层位分异与构造分区性,是页岩储层的重要天然改造结构。

(2) 前人研究普遍认为,裂缝的发育受构造应力、岩性层理、有机质含量、压力-埋深条件与岩石力学性质等多重因素耦合控制。构造因素主导裂缝形成与分布,脆性-富有机质岩段有利于微裂缝集中发育,高压体系则增强裂缝持久性并推动裂缝多期演化。

(3) 天然裂缝系统在页岩气的赋存-保存-逸散过程中发挥双重作用:顺层微裂缝有利于拓展储集空间、承载游离气;而高角度裂缝则可能作为泄压通道,影响储层封闭性与保存能力。

(4) 基于文献归纳与多研究区对比分析,可识别出三类典型的裂缝-页岩气富集模式:适度裂缝-封闭压力维持型,常见于深埋稳定构造区;过度裂缝-导通逸散型,多发育于浅埋断裂带;微裂缝优势-改造潜力型,适用于后期压裂开发。该模式对深入理解裂缝作用机制、优选有利富集区块具有一定参考价值。

(5) 首次对川东南地区多个区块裂缝系统进行了系统的对比研究,并建立了三种具有区域适用性的“裂缝-页岩气富集模式”。该模式不仅深化了对深层页岩气富集机制的理解,也为今后川东南及类似构造区的有利区优选与开发部署提供了理论指导。

致 谢

感谢导师、亲人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] 金之钧, 胡宗全, 高波, 等. 川东南地区五峰组-龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 1-10.
- [2] 谢佳彤, 付小平, 秦启荣, 等. 川东南东溪地区龙马溪组裂缝分布预测及页岩气保存条件评价[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(6): 35-45.
- [3] 闫建平, 罗静超, 石学文, 等. 川南泸州地区奥陶系五峰组-志留系龙马溪组页岩裂缝发育模式及意义[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(6): 60-71.
- [4] 田鹤, 李跃纲, 曾联波, 等. 海相页岩顺层裂缝充填脉体生长模式及其地质意义——以四川盆地南部五峰组-龙马溪组页岩为例[J]. 地质学报, 2025, 99(4): 1369-1380.
- [5] 施振生, 赵圣贤, 赵群, 等. 川南地区下古生界五峰组-龙马溪组含气页岩岩心裂缝特征及其页岩气意义[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1087-1101.
- [6] 赵圣贤, 夏自强, 李海, 等. 页岩储层天然裂缝定量评价及发育主控因素——以泸州地区五峰组-龙马溪组深层页岩为例[J]. 沉积学报, 2025, 43(1): 212-225.
- [7] 倪楷, 王明筏, 李响. 四川盆地东南缘页岩气富集模式——以丁山地区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩为例[J]. 石油实验地质, 2021, 43(4): 580-588.
- [8] 黄为. 川东南丁山地区龙马溪组页岩气地质特征及有利目标优选[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2020.
- [9] 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, 48(7): 2630-2642.
- [10] 唐洪明, 刘贤, 陈洋, 等. 不同构造单元页岩孔隙结构差异及其油气地质意义——以四川盆地泸州地区深层页岩为例[J]. 天然气工业, 2024, 44(5): 16-28.
- [11] 范存辉, 李虎, 钟城, 等. 川东南丁山构造龙马溪组页岩构造裂缝期次及演化模式[J]. 石油学报, 2018, 39(4): 379-390.
- [12] 陈丽清, 伍秋姿, 范存辉, 等. 四川盆地南部双龙-罗场地区龙马溪组构造裂缝特征及形成期次[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(5): 789-798.
- [13] 谢佳彤. 丁山-东溪地区页岩裂缝发育特征及主控因素[J]. 断块油气田, 2023, 30(3): 389-395.
- [14] 张馨月, 王馨玥, 陈岑, 李松泽, 张珈瑞, 贾敏, 等. 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.
- [15] 钟城, 秦启荣, 胡东风, 周吉羚, 黄为. 川东南丁山地区五峰组-龙马溪组页岩气藏“六性”特征[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(2): 14-23+31.
- [16] 霍健, 王星皓, 罗超, 等. 川南地区龙马溪组页岩储层裂缝特征[J]. 工程地质学报, 2021, 29(1): 171-182.
- [17] 赵圣贤, 夏自强, 刘文平, 等. 四川盆地南部泸 203 井区五峰组-龙马溪组页岩裂缝特征及形成演化[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(5): 28-38.
- [18] 蒲俊伟, 蒋琳, 罗彤彤, 等. 页岩储层天然裂缝发育主控因素研究[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(5): 731-739.
- [19] Dong, J., Chen, L., Yang, Y., Tan, X., Zheng, J. and Jing, C. (2022) Development Characteristics and Distribution Patterns of Fractures in the Wufeng-Longmaxi Formation Shale in the Southwestern Sichuan Basin, China. *Lithosphere*, 2022, Article 2454227. <https://doi.org/10.2113/2022/2454227>
- [20] Zhao, C., Wu, D., Hu, F., Sun, M., Li, T. and Wang, H. (2023) Quantitative Characteristics of Micro Bedding Fractures in the Wufeng-Longmaxi Formation Based on High-Resolution Map Imaging Technology. *Processes*, 11, Article 1942. <https://doi.org/10.3390/pr11071942>
- [21] 佟恺林, 周安富, 罗强, 等. 四川盆地泸州中部地区龙马溪组构造裂缝期次及演化模式[J]. 东北石油大学学报, 2024, 48(5): 17-26+132.
- [22] 魏祥峰, 刘珠江, 王强, 等. 川东南丁山与焦石坝地区五峰组-龙马溪组页岩气富集条件差异分析与思考[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(8): 1041-1051.

附 录

本文图表所用信息均来自公开发表文献与典型井资料，见参考文献清单。为保持口径一致，裂缝密度、充填率、TOC、脆性矿物等指标统一换算为常见单位(条/m、%)。图 3 为优势走向的示意性归纳，按文献中“优势方位/主方位带”描述进行整理，未采用原始频数加权与跨文献标准化；图 4 汇总为区块/井层段层级的统计量，用于显示相对差异，未作跨文献加权或标准化处理。各文献的统计口径与采样尺度以原文为准，本研究不对单一数据源之外延推断。

样本说明：图 3 整合文献数 $k = 3$ ([6] [11] [12])；图 4 整合文献数 $k = 6$ ([5] [6] [12] [16] [17] [21])。