

页岩储层天然裂缝发育主控因素研究

蒲俊伟¹, 蒋琳², 罗彤彤³, 田怡¹, 王涵⁴, 冯佳阳⁴

¹重庆页岩气勘探开发有限责任公司, 重庆

²东方物探中油奥博科技有限公司, 四川 成都

³川庆钻探工程有限公司地质勘探开发研究院, 四川 成都

⁴重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年3月31日; 录用日期: 2025年5月13日; 发布日期: 2025年5月26日

摘要

天然裂缝作为页岩储层的重要储集以及渗流通道, 文章以四川盆地南部渝西地区五峰组-龙马溪组页岩为例, 基于岩心观察与成像测井等手段, 开展天然裂缝类型、分布特征以及主控因素的研究。研究结果表明本地区五峰-龙马溪组天然裂缝密度自下至上呈现逐渐减小的特征, 天然裂缝类型主要包括层理缝、高导缝、高阻缝。其中层理缝最为发育。裂缝倾角的最大范围主要集中于 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 。裂缝发育受断裂发育带控制明显, 南部较北部裂缝发育程度明显偏高, 天然裂缝发育主控因素分析表明, 渝西地区天然裂缝发育程度主要受构造作用与沉积作用控制, 距离断裂越近, 天然裂缝发育密度越大; 脆性矿物含量越高, 天然裂缝密度越大, 黏土矿物含量越高, 天然裂缝密度越小。文章研究结果可以为深入了解海相页岩储层天然裂缝主控因素提供有力支撑。

关键词

页岩储层, 天然裂缝, 主控因素, 龙马溪组

Study on Main Controlling Factors of Natural Fracture Development in Shale Reservoir

Junwei Pu¹, Lin Jiang², Tongtong Luo³, Yi Tian¹, Han Wang⁴, Jiayang Feng⁴

¹Chongqing Shale Gas Exploration and Development Co. Ltd., Chongqing

²BGP Optical Science and Technology (Chengdu) Ltd., Chengdu Sichuan

³Geological Exploration and Development Research Institute of Chuanqing Drilling Engineering Co. Ltd., Chengdu Sichuan

⁴School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Mar. 31st, 2025; accepted: May 13th, 2025; published: May 26th, 2025

Abstract

Natural fractures are important reservoirs and seepage channels of shale reservoirs. In this paper, taking the shale of Wufeng Formation and Longmaxi Formation in West Chongqing area of southern Sichuan Basin as an example, the types, distribution characteristics and main controlling factors of natural fractures are studied based on core observation and imaging logging methods. The results show that the density of natural fractures in Wufeng-Longmaxi Formation decreases gradually from bottom to top, and the types of natural fractures mainly include bedding fractures, high conductivity fractures and high resistance fractures. Among them, the bedding seam is the most developed. The maximum range of fracture inclination is mainly concentrated in $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$. The fracture development is obviously controlled by the fault development zone, and the fracture development degree in the south is obviously higher than that in the north. The analysis of the main controlling factors of natural fracture development shows that the natural fracture development degree in the west Chongqing area is mainly controlled by tectonic and sedimentary processes. The higher the brittle mineral content, the higher the natural fracture density, the higher the clay mineral content, the smaller the natural fracture density. The results of this study can provide favorable support for further understanding of the main controlling factors of natural fractures in Marine shale reservoirs.

Keywords

Shale Reservoir, Natural Fractures, Controlling Factors, 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

在北美页岩气革命取得重大突破之后,我国页岩气勘探在借鉴其成功经验后也进入了快速发展阶段,页岩气是我国清洁能源发展最重要的接替领域。目前四川盆地南部中浅层页岩气已实现勘探开发突破并建成页岩气商业开发区,页岩气勘探开发工作正向川南地区中部泸州、渝西等深层页岩气区推进,四川盆地南部渝西地区五峰组-龙马溪组富有机质泥页岩较为发育[1]-[3],页岩储层资源丰富且具有良好的开发潜力。五峰组-龙马溪组埋藏普遍较深,断层和裂缝系统复杂多样,发育差异明显,这对页岩气的富集和保存条件具有重要的影响,天然裂缝的存在不仅可以作为页岩气富集过程中的重要载体,同时对后续水力压裂的开展均起着重要的作用[4]-[6]。

目前已有众多学者对天然裂缝的发育特征和主控因素开展了相应的研究[7]-[10],例如通过岩心观察与成像测井对天然裂缝的类型进行划分,或者通过岩心观察统计天然裂缝发育的程度,但由于资料获取的限制,对于天然裂缝发育的主控因素认识尚存在不足。四川盆地南缘渝西地区作为上扬子地台关键构造单元,发育完整的五峰组-龙马溪组海相页岩层系。该套地层具有“三高”特征:高有机质丰度(TOC 2.5%~6.8%)、高热演化程度(R_o 2.3%~3.5%)、高脆性矿物含量(40%~65%),为页岩气生成和储集提供了理想的地质载体,然而深层地质条件的复杂性显著增加,具体表现为:构造埋深差异导致地应力场呈现垂向分异,导致本地区的天然裂缝主控因素尚不明确,因此本文以四川盆地渝西地区五峰组-龙马溪组为例,通过岩心观察与成像测井对天然裂缝发育特征进行定量统计,并结合沉积与构造作用分析结果,系统分析本地区天然裂缝的主控因素。

2. 地质背景

四川盆地经历了多期构造运动,属于叠合类型盆地,该盆地的构造分区以及构造分带现象较为明显,可以分为川中低缓褶皱区、川西低陡褶皱区、川南低陡褶皱带和川东高陡褶皱区,渝西区块处于川南低陡褶皱带的东北部区域,渝西区块在构造上呈现出由北向南发育雁行排列的梳状背斜构造,整体表现为“堑垒相间”的构造特征,发育高陡背斜和狭窄向斜。

渝西区块断层呈北东走向,其中大规模3条,中等规模断层9条,大规模断层主要位于西山构造的西部位置以及沥鼻峡构造-西温泉构造的两侧位置处,中等规模断层主要处于西山构造的东部位置以及西温泉构造的西部位置处。五峰组上覆于临湘组泥质灰岩,主要岩性为介壳页岩、含钙页岩及钙质页岩;龙马溪组上覆于五峰组,主要发育钙质页岩、含粉砂页岩、粉砂质页岩,自下而上粉砂质含量逐渐增多。页岩气储层在地应力的作用下,在储层内形成多种类型的天然裂缝,这些天然裂缝也属于页岩气资源的重要储集空间(图1)。

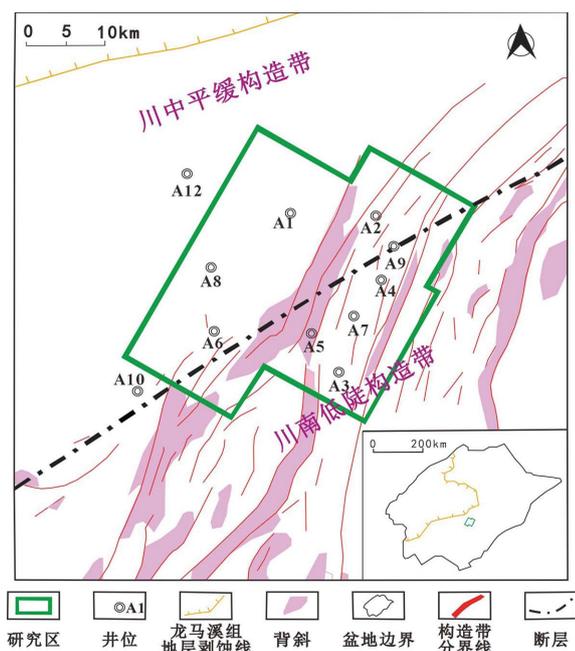


Figure 1. Geological map of the study area
图 1. 研究区域的地质图

3. 天然裂缝发育特征

3.1. 天然裂缝类型

五峰组-龙马溪组天然裂缝类型多样,岩心观察结果显示,本地区天然裂缝主要可以分为层理缝与构造缝两种类型,其中构造缝主要为高角度型裂缝,且裂缝面较为平整,延伸长度较大,裂缝长度一般在0.5~1.5 m左右,缝宽较小,多在1~1.5 m左右,裂缝内部常见方解石和黄铁矿充填(图2)。

3.2. 天然裂缝发育特征

龙马溪组自下至上可以分为1亚段与2亚段,其中1亚段内部自下至上进一步细分为1~4小层,岩心观察显示,研究区五峰组-龙马溪组天然裂缝垂向发育规律存在差异,整体上龙马溪组一亚段1小层



Figure 2. Types of natural fractures at core scale. (a) High-angle seam (b) High-angle joints, filled with calcite; (c) High-angle joint, filled with calcite; (d) Bedding joint, filled with calcite; (e) Bedding joints, filled with pyrite and calcite; (f) Develop multi-stage fractures, filled with calcite; (g) Develop multi-stage fractures, filled with calcite

图 2. 岩心尺度天然裂缝类型。(a) 高角度缝; (b) 高角度缝, 方解石充填; (c) 高角度缝, 方解石充填; (d) 层理缝, 方解石充填; (e) 层理缝, 黄铁矿与方解石充填; (f) 发育多期裂缝, 方解石充填; (g) 发育多期裂缝, 方解石充填

天然裂缝发育程度弱于五峰组, 其中龙马溪组 1 亚段 1 小层天然裂缝数量为 78 条, 密度为 2.75 条/m, 五峰组天然裂缝数量为 196 条, 密度为 3.9 条/m, 平面上各井天然裂缝发育程度非均质较强, Z5 井五峰组天然裂缝发育密度可达到 12 条/m, Z3 井五峰组天然裂缝发育密度仅为 2.1 条/m (图 3, 图 4)。

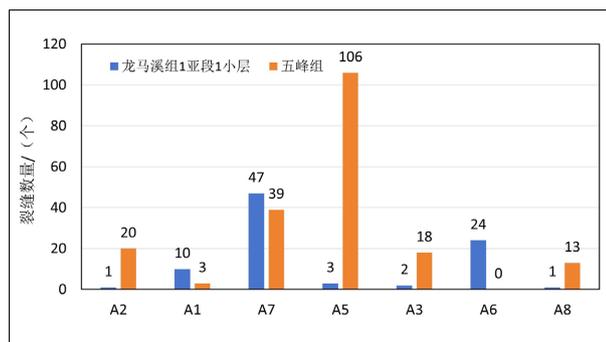


Figure 3. Shows the histogram of the number of natural fractures observed in the cores of each well

图 3. 各井岩心观察天然裂缝条数直方图

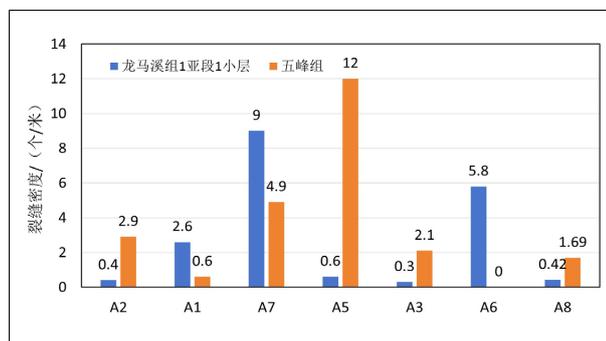


Figure 4. Shows the histogram of natural fracture density observed in the cores of each well

图 4. 各井岩心观察天然裂缝密度直方图

成像测井技术是一种用于获取井壁图像的测井技术,相较于岩心宏观裂缝描述和统计,成像测井的优势在于能直观显示裂缝的走向及倾向方位,精确计算裂缝倾角的大小。根据成像测井对本地区天然裂缝参数特征进行统计,成像测井结果表明,研究区普遍发育层理缝与构造缝,其中构造缝可以进一步细分为高导缝与高阻缝(图5),不同类型的天然裂缝在成像测井上具有不同的显示特征,层理缝张开度一般较小,在图像上显示为低角度暗色或亮色正弦线条特征,高导缝在成像测井图上呈黑色高电导异常,特征主要表现为类似正弦曲线的暗色,高阻缝由于被硅质、钙质、云质等高阻物质填充,在图像上呈高角度亮色正弦线。

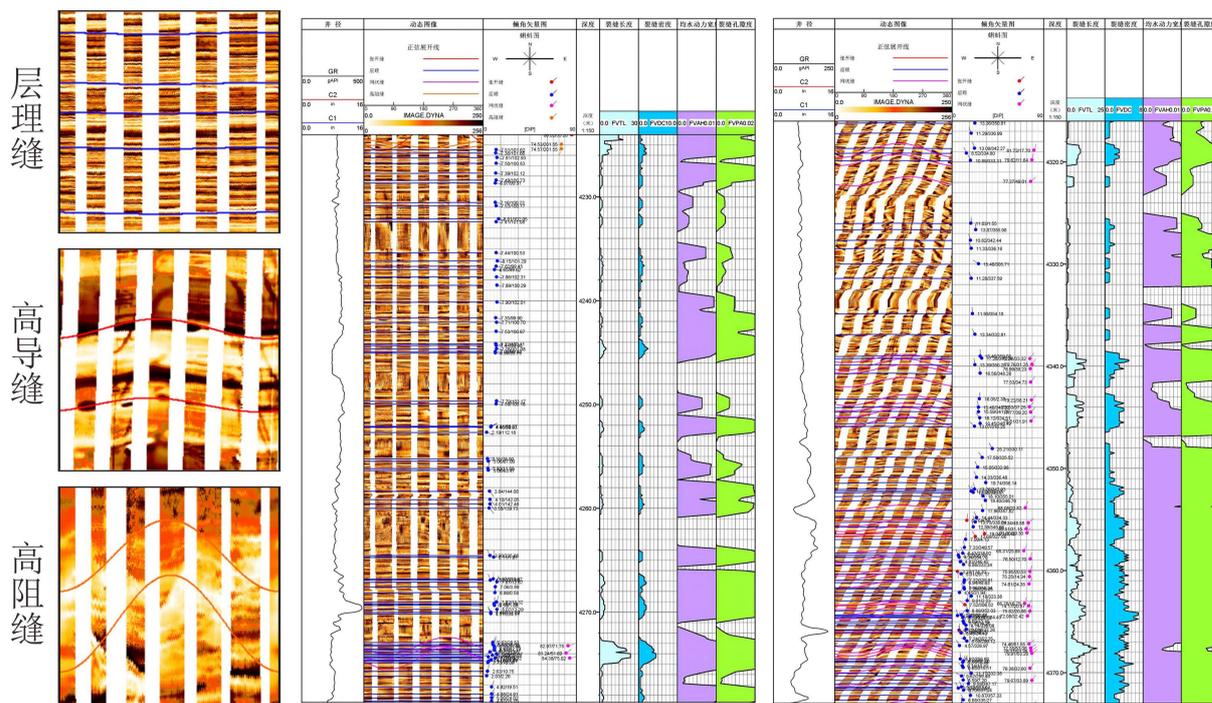


Figure 5. Natural fracture imaging logging identification
图 5. 天然裂缝成像测井识别

基于成像测井的天然裂缝识别结果,对研究区五峰组-龙马溪组天然裂缝的类型与发育特征进行统计,统计结果表明,由五峰组向龙马溪组自下至上天然裂缝密度逐渐减小,其中五峰组成像测井识别天然裂缝密度平均为 2.31 条/m,龙一段 2 亚段天然裂缝密度平均为 1.12 条/m,在五峰组内部,天然裂缝密度自下至上呈现逐渐增大的特征,其中五峰组上部天然裂缝密度平均为 2.51 条/m,而龙一段 1 亚段内部,自下至上天然裂缝密度逐渐减小,其中 1 小层天然裂缝密度平均为 2.24 条/m,主体开发层段中,五峰组上部裂缝最为发育。研究区普遍发育层理缝与构造缝,其中层理缝最为发育,占比约 88%,在裂缝倾角方面,研究区由于以层理缝为主,因此裂缝倾角范围主要集中在 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$,占比约 52%,而裂缝倾角大于 40° 的占比不足 5% (图 6)。

4. 天然裂缝发育控制因素分析

针对研究范围内不同位置的七口井的岩心观察与成像测井所识别的天然裂缝发育特征进行统计分析,开展天然裂缝发育的主控因素分析。

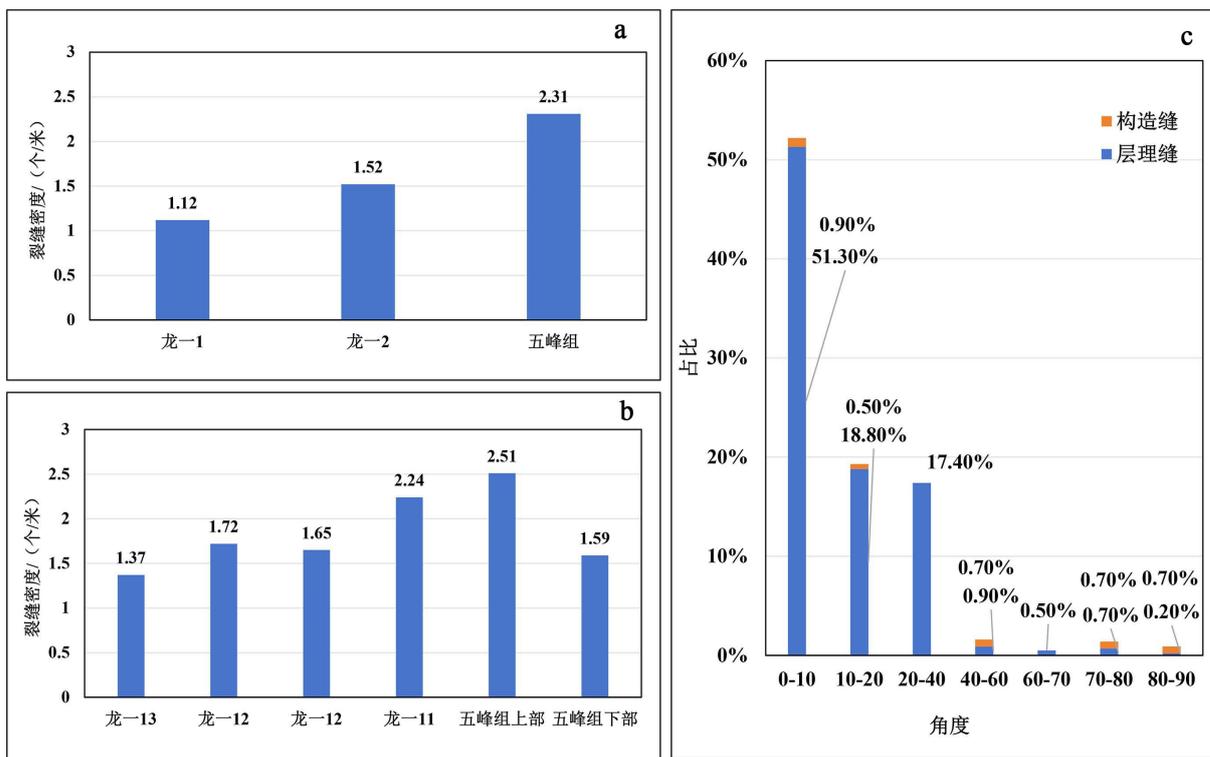


Figure 6. Development characteristics of natural fractures in imaging logging. (a) Histogram of fracture density in the Longyi sub-segment-Wufeng Group; (b) Histogram of natural fracture density in each small layer of the Long-1 subsection and the Wufeng Group; (c) Histogram of natural fracture angles

图 6. 成像测井天然裂缝发育特征。(a) 龙一亚段 - 五峰组裂缝密度直方图; (b) 龙一 1 亚段各小层与五峰组天然裂缝密度直方图; (c) 天然裂缝角度直方图

4.1. 构造作用对天然裂缝的影响

构造作用是影响天然裂缝的重要因素，本地区受多期构造运动叠加改造的影响，断裂发育位置一定程度上控制着天然裂缝的发育情况，结合各井岩成像测井天然裂缝统计结果与距离断裂带的距离进行相关性分析，结果表明天然裂缝发育程度与距离断层距离呈现良好的对数相关关系，距离断裂越近，天然裂缝发育密度越大(图 7)，因此断层的发育部位一定程度上决定了天然裂缝的发育规模。

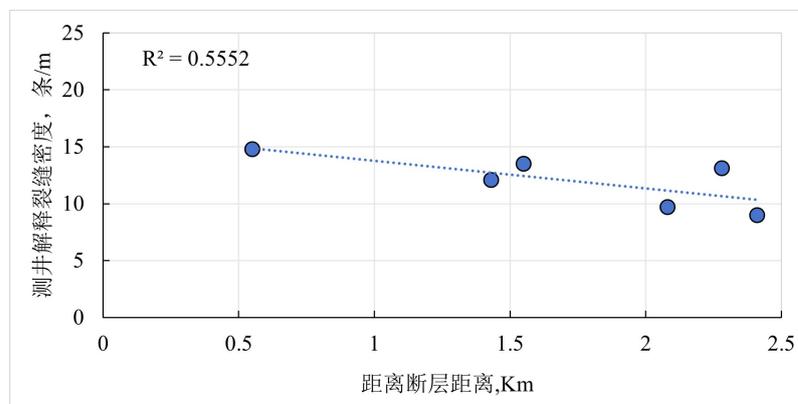


Figure 7. Correlation graph of natural fracture density and distance from faults

图 7. 天然裂缝密度与距断层距离相关性图

4.2. 沉积作用对天然裂缝的影响

沉积作用影响着岩石的成分和结构，而不同的岩石结构会影响天然裂缝的形成，岩相是反映沉积环境岩性的重要特征，不同岩相在储层性质与天然气储集运移能力等方面存在较大差异，可以体现泥页岩中不同沉积结构特征、矿物组分和有机质含量[7][8]。本次针对五峰组-龙马溪组页岩气储层岩相的划分以页岩的矿物组分以及 TOC 的含量大小为主要依据。通过 TOC 含量分析及 X 射线衍射全岩矿物检测对样品岩相从 2 个维度进行划分(表 1)：通过有机碳含量 TOC 将页岩划分为中高有机质类($\text{TOC} \geq 3.0\%$)、中有机质类($2.0\% \leq \text{TOC} < 3.0\%$)、贫有机质类($\text{TOC} < 2.0\%$)；通过矿物组分含量将页岩分为硅质页岩(黏土矿物含量小于 50%，硅质矿物含量大于 50%)、混合质页岩(黏土矿物含量小于 50%，硅质矿物含量小于 50%)与粘土质页岩(黏土矿物含量大于 50%，硅质矿物含量小于 50%)。

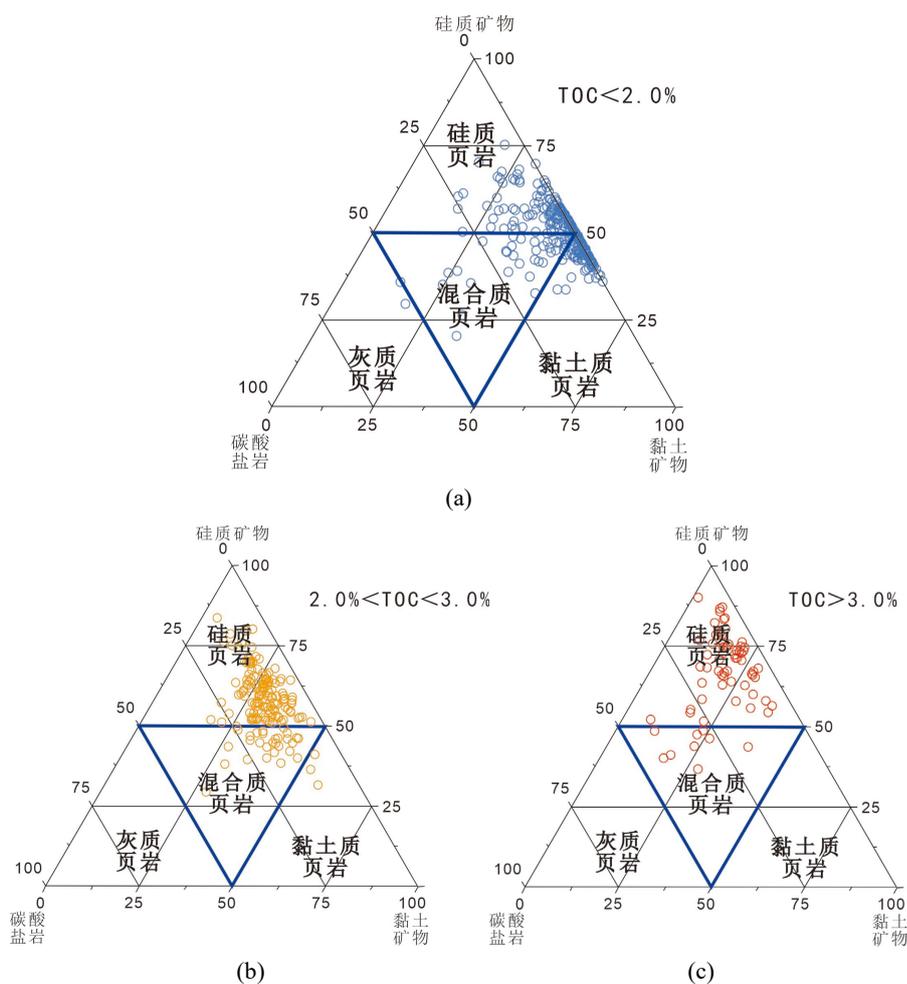


Figure 8. Shows the lithofacies division map of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale in the Sichuan Basin

图 8. 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩岩相划分图版

根据有机质含量与硅质、粘土、碳酸盐岩矿物的组合关系，可将研究区五峰组-龙马溪组主要岩相类型划分为以下 6 种：高含量硅质矿物与不同 TOC 含量组合的富有机质、中有机质、贫有机质硅质页岩，高含量粘土矿物与低含量 TOC 组合的贫有机质粘土质页岩，硅质、粘土、碳酸盐岩矿物与中低含量 TOC

混合的中有机质、贫有机质混合质页岩(图 8)。

根据岩心统计的天然裂缝发育条数与矿物组分之间的相关性分析发现,本地区五峰-龙马溪组裂缝的发育程度与脆性矿物指数含量呈一定的正相关关系(图 9(a)),脆性矿物含量越高,天然裂缝密度越大,与黏土矿物含量呈负相关的关系表明,黏土矿物含量越高,天然裂缝密度越小。在岩相类型上,在岩相类型中硅质页岩由于其脆性矿物含量较高,往往天然裂缝密度较大,因此天然裂缝密度较大的部位主要集中在中有机质与富有机质硅质页岩岩相类型中。

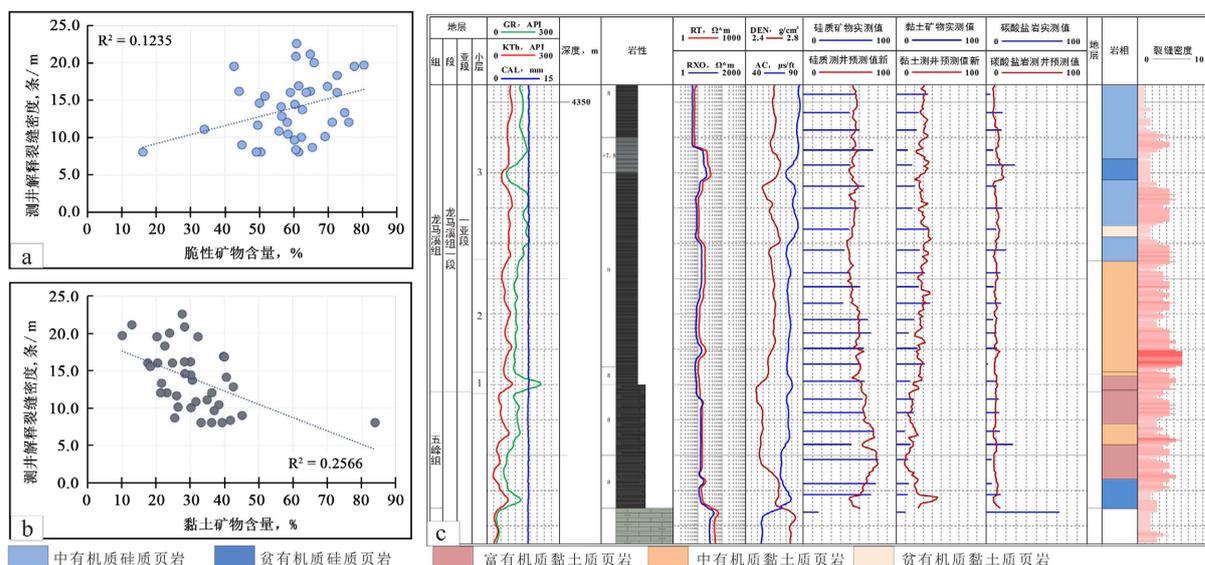


Figure 9. The influence of sedimentation on natural fractures. (a) The correlation between brittle mineral content and natural fracture density; (b) Correlation between clay mineral content and natural fracture density; (c) Comprehensive bar chart of Well A1

图 9. 沉积作用对天然裂缝的影响。(a) 脆性矿物含量与天然裂缝密度的相关性; (b) 黏土矿物含量与天然裂缝密度的相关性; (c) A1 井综合柱状图

5. 结论

1) 渝西地区五峰组-龙马溪组天然裂缝类型主要包括层理缝、高导缝、高阻缝。其中层理缝最为发育。裂缝倾角的最大范围主要集中于 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 。

2) 渝西地区天然裂缝发育程度主要受构造作用与沉积作用控制,距离断裂越近,天然裂缝发育密度越大,脆性矿物含量越高,天然裂缝密度越大,黏土矿物含量越高,天然裂缝密度越小。

参考文献

- [1] 李冠霖, 郭英海, 赵迪斐. 渝西地区龙马溪组下部页岩储层发育特征及其影响因素——以重庆綦江观音桥剖面为例[J]. 非常规油气, 2022, 9(2): 15-25.
- [2] 刘勇, 刘永昶, 赵圣贤, 等. 泸州-渝西地区志留系龙马溪组沉积期古地貌特征及控储作用[J]. 岩性油气藏, 2025, 37(2): 49-59.
- [3] 刘文平, 李帅智, 刘成林, 等. 四川盆地渝西地区北部龙一亚段页岩气储层孔隙结构特征及影响因素[J]. 中国科技论文, 2025, 20(1): 1-14.
- [4] 杨学锋, 夏自强, 赵圣贤, 等. 深层页岩气水平井天然裂缝发育特征及其对精细开发的启示——以川南泸州区块五峰组-龙马溪组为例[J]. 石油实验地质, 2024, 46(4): 735-747.
- [5] 郝越翔, 刘俊杰, 吴磊, 等. 威远地区龙马溪组天然裂缝特征、分布规律及形成期次[J]. 天然气技术与经济, 2024,

- 18(1): 23-31.
- [6] 曹庆舜. 滇东北永善-大关地区龙马溪组页岩裂缝发育特征及其控藏作用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2023.
- [7] 邓翔. 西昌盆地五峰组-龙马溪组页岩气富集主控因素及有利勘探区[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2023.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 聂舟, 马诗杰, 伍秋姿, 等. 长宁地区海相页岩天然裂缝发育特征及其对含气性的影响[J]. 断块油气田, 2022, 29(5): 591-597.