

邻水 - 大竹地区飞仙关组储层特征及主控因素

魏 彤, 周小兆, 陈则怡

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年6月2日; 录用日期: 2026年8月14日; 发布日期: 2026年8月25日

摘 要

邻水 - 大竹地区飞仙关组储层岩性组合复杂、孔缝洞配置关系多变, 有效储层识别及主控因素认识仍需进一步细化。基于岩心观察、薄片鉴定、扫描电镜、物性测试、压汞分析及测井解释资料, 对研究区飞仙关组储层特征、综合分类及主控因素进行分析。结果表明: 飞仙关组储集岩主要包括鲕粒灰岩、生屑灰岩、砂屑灰岩、泥晶灰岩、粉晶 - 细晶白云岩、鲕粒白云岩、灰质白云岩和白云质灰岩, 其中鲕粒灰岩、颗粒白云岩和粉晶 - 细晶白云岩储集意义相对突出。储集空间以粒间溶孔、粒内溶孔、晶间孔、晶间溶孔、铸模孔、微裂缝和局部溶洞为主, 未完全充填裂缝可改善孔隙和溶洞连通性。储层整体表现为低孔、低渗特征, 储层段孔隙度主要集中于2%~6%, 渗透率总体偏低但离散性较强; 飞二段储层段数量、孔渗条件和储层段厚度均优于飞一段和飞三段, 为研究区主要有利储层段。压汞资料表明, 储层孔喉结构可划分为粗孔粗喉、中孔细喉、细孔微喉和微孔微喉四类; 依据孔渗物性、毛管压力、孔喉半径、束缚水饱和度、孔隙类型和岩石类型, 可将储集岩划分为I类好储层、II类较好储层、III类差储层和IV类非储层。综合分析认为, 高能颗粒滩和鲕滩沉积控制有利储集岩发育基础, 白云石化和溶蚀作用改善孔隙结构及孔喉连通性, 压实、胶结和多期充填作用降低储层有效性, 构造裂缝主要改善低孔低渗储层渗流能力。

关键词

飞仙关组, 碳酸盐岩储层, 储集空间, 孔喉结构, 储层分类, 主控因素

Reservoir Characteristics and Main Controlling Factors of the Feixianguan Formation in the Linshui-Dazhu Area

Tong Wei, Xiaozhao Zhou, Zeyi Chen

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

Received: June 2, 2026; accepted: August 14, 2026; published: August 25, 2026

Abstract

The Feixianguan Formation reservoirs in the Linshui-Dazhu area are characterized by complex

lithological assemblages and variable pore-fracture-vug configurations, and the identification of effective reservoirs and their main controlling factors still requires further refinement. Based on core observation, thin-section identification, scanning electron microscopy, petrophysical testing, mercury intrusion analysis and logging interpretation, this study investigates the reservoir characteristics, comprehensive classification and main controlling factors of the Feixianguan Formation in the study area. The results show that the reservoir rocks mainly include oolitic limestone, bioclastic limestone, sandy-grained limestone, micritic limestone, silty-fine crystalline dolomite, oolitic dolomite, lime-bearing dolomite and dolomitic limestone. Among them, oolitic limestone, grain dolomite and silty-fine crystalline dolomite have relatively favorable reservoir significance. Reservoir spaces are dominated by intergranular dissolved pores, intragranular dissolved pores, intercrystalline pores, intercrystalline dissolved pores, moldic pores, microfractures and local vugs. Unfilled or partially filled fractures can improve the connectivity among pores and vugs. The reservoirs generally show low porosity and low permeability. The porosity of reservoir intervals is mainly concentrated between 2% and 6%, and permeability is generally low but highly dispersed. The second member of the Feixianguan Formation has better reservoir abundance, porosity-permeability conditions and reservoir thickness than the first and third members, and therefore represents the main favorable reservoir interval in the study area. Mercury intrusion data indicate that the pore-throat structures can be divided into four types: coarse pores with coarse throats, medium pores with fine throats, fine pores with micro-throats, and micropores with micro-throats. According to porosity-permeability properties, capillary pressure, pore-throat radius, irreducible water saturation, pore types and rock types, the reservoir rocks can be classified into type I good reservoirs, type II relatively good reservoirs, type III poor reservoirs and type IV non-reservoirs. The comprehensive analysis suggests that high-energy grain shoals and oolitic shoals provide the depositional basis for favorable reservoir rocks, dolomitization and dissolution improve pore structures and pore-throat connectivity, compaction, cementation and multi-stage filling reduce reservoir effectiveness, and tectonic fractures mainly enhance the seepage capacity of low-porosity and low-permeability reservoirs.

Keywords

Feixianguan Formation, Carbonate Reservoir, Reservoir Space, Pore-Throat Structure, Reservoir Classification, Main Controlling Factors

Copyright © 2026 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

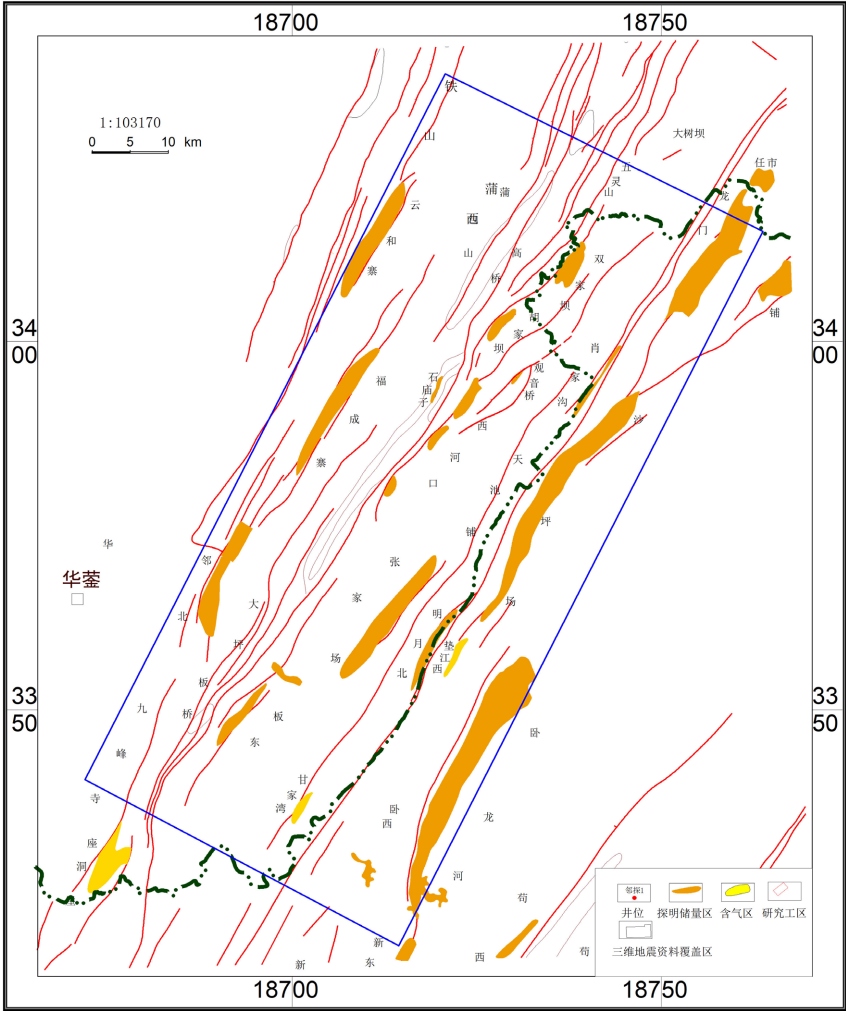
1. 引言

近年来,随着四川盆地东部深层海相碳酸盐岩油气勘探认识不断深化,下三叠统飞仙关组在川东北及川东地区展现出较好的储层发育条件和勘探潜力。龙岗、五百梯、黄龙场、普光、元坝等区相继发现以台缘礁滩、颗粒滩及鲕滩储层为主体的天然气藏,表明飞仙关组在台地边缘及海槽周缘具备形成规模储层的地质基础[1]。前人研究认为,飞仙关组沉积时期受开江-梁平海槽演化、台地边缘迁移及相对海平面变化影响,颗粒滩、鲕滩和生屑滩等高能沉积单元较发育[2],储集岩类型以鲕粒灰岩、颗粒白云岩和粉晶-细晶白云岩为主,储层有效性与沉积相带、白云石化、溶蚀改造及裂缝发育关系密切[3]。现有研究多集中于普光、龙岗、元坝及开江-梁平海槽周缘典型气藏区,在沉积模式、储层类型、孔隙演化、白云石化机制和裂缝控储作用等方面形成了较系统认识[4],但邻水-大竹地区位于川东高陡构造带东缘,构造变形强烈,飞仙关组储层岩性组合、孔缝洞储集空间、孔喉结构、层段物性差异及主控因素之间的对应关系仍需进一步厘定。基于岩心观察、薄片鉴定、扫描电镜、物性测试、压汞分析及测井解释资料,开展邻水-大竹地区飞仙关组储层特征、

综合分类及主控因素研究，可为该区飞仙关组有利储层评价和目标优选提供地质依据。

2. 区域地质概况

邻水 - 大竹地区位于四川盆地东部高陡构造带，平面上处于四川盆地东缘与大巴山前缘构造转换部位，邻近开江 - 梁平海槽南侧。区内构造线总体呈北东 - 南西向展布，断裂、褶皱及含气构造多沿区域主构造方向呈条带状延伸，断裂体系在北部及中东部相对发育(图 1)。多期构造改造使研究区形成现今褶皱断裂格局，断裂和构造高部位为后期裂缝发育、流体运移及储层改造提供了重要地质背景。飞仙关组沉积时期，研究区受开江 - 梁平海槽演化、台地边缘迁移及相对海平面变化共同影响，整体经历由孤立台地向镶边台地演化的沉积过程。飞一段至飞四段总体表现为海退背景下台地沉积范围扩大，颗粒滩、鲕滩及局部生屑滩等高能沉积单元为飞仙关组储集岩发育提供了物质基础[5]。不同层段沉积能量、相带位置和后期改造强度存在差异，导致储集岩类型、储集空间组合及物性条件具有明显非均质性。飞仙关组作为研究区重要目标层位，其储层发育与构造背景、滩体沉积分布及成岩改造过程密切相关[6]，为后文储层特征及主控因素分析提供区域地质基础。



注：据西南油气田资料修改。

Figure 1. Structural location and fault distribution of the Linshui-Dazhu area
图 1. 邻水 - 大竹地区构造位置及断裂展布图

3. 飞仙关组储层特征

3.1. 储集岩特征

岩心、薄片、扫描电镜、测井解释及物性资料表明,邻水-大竹地区飞仙关组储集岩主要由灰岩类、白云岩类及灰岩-白云岩过渡岩性组成[7]。灰岩类以鲕粒灰岩、生屑灰岩、砂屑灰岩、泥晶灰岩和粉晶灰岩为主;白云岩类以鲕粒白云岩、含生屑颗粒白云岩、粉晶白云岩、细粉晶白云岩和粉晶-细晶白云岩为主;过渡岩性主要包括灰质白云岩和白云质灰岩。不同岩性在颗粒组构、白云石化程度、溶蚀改造强度和裂缝充填状态方面差异明显,其中鲕粒灰岩、颗粒白云岩和粉晶-细晶白云岩储集基础相对较好,泥晶灰岩和致密粉晶灰岩基质较致密,储集性能主要依赖裂缝和局部溶蚀改造。

3.1.1. 灰岩类

1) 鲕粒灰岩

鲕粒灰岩为飞仙关组灰岩类储层中较重要的岩石类型,主要发育于高能颗粒滩和鲕滩沉积环境[8]。薄片资料显示,鲕粒多呈圆形至椭圆形,粒径一般为 200~550 μm ,鲕粒含量约 50%~75%,以同心鲕为主,局部见空心鲕、薄皮鲕和残余鲕粒结构。颗粒间多见栉壳状方解石和粒状方解石等胶结物,胶结物含量约 15%~30%,局部呈不完全充填。亮晶残余鲕粒灰岩中铸模孔、粒间孔及粒间溶孔较发育,面孔率可达 8%,说明颗粒支撑结构保存和后期溶蚀改造共同控制鲕粒灰岩储集空间发育(图 2(a))。

2) 生屑灰岩和砂屑灰岩

生屑灰岩和砂屑灰岩为飞仙关组颗粒灰岩中较常见类型,颗粒组分主要包括生物碎屑、砂屑、砾屑及少量鲕粒,岩石组构复杂,分选性和磨圆度变化较大。含砾屑生屑粉晶云岩中可见直立微裂缝、粒内溶孔及粒间溶孔,孔隙与裂缝具有一定组合关系(图 2(b))。含鲕粒生屑砂砾屑灰岩中溶蚀孔隙和压溶缝较发育,颗粒边界及颗粒接触部位受压溶和选择性溶蚀改造明显(图 2(c))。该类岩石储集空间以粒间溶孔、粒内溶孔、溶蚀孔隙和微裂缝为主,储层有效性受颗粒组构、溶蚀强度、压溶缝发育程度及充填作用共同控制。

3) 泥晶灰岩、粉晶灰岩及白云质灰岩

泥晶灰岩和粉晶灰岩基质以泥晶方解石和粉晶方解石为主,颗粒含量较低,原生孔隙保存条件较差,整体储集能力弱于鲕粒灰岩和颗粒灰岩。岩心资料显示,泥晶灰岩中可见溶洞、微裂缝及缝合线,局部裂缝被方解石脉充填,表明压溶作用、裂缝作用和局部溶蚀改造可在致密基质中形成次生储集空间(图 2(d))。粉晶灰岩中发育溶孔、水平裂缝和低角度裂缝,部分孔隙及裂缝受方解石充填影响,孔缝有效性差异明显(图 2(e))。泥粉晶白云质灰岩中可见多期微裂缝,裂缝多被方解石和泥质不完全充填,反映灰岩-白云岩过渡岩性中裂缝改造和充填作用较为明显(图 2(f))。总体来看,该类岩石储层有效性主要取决于溶蚀孔隙规模、裂缝开启程度、白云石化强度及后期充填程度。

3.1.2. 白云岩类及过渡岩性

1) 晶粒白云岩

晶粒白云岩为飞仙关组白云岩类储层中较重要的岩石类型,主要包括粉晶白云岩、细粉晶白云岩及粉晶-细晶白云岩[9]。该类岩石白云石晶体以粉晶至细晶为主,晶间孔、晶间溶孔和溶洞较常见[10]。斑马状粉晶云岩中溶洞较发育,局部被方解石充填,说明溶蚀作用可扩大晶粒白云岩储集空间,而后期胶结充填会降低孔洞有效性(图 3(a))。针孔状细粉晶云岩中溶蚀孔隙较发育,并见小型溶洞,反映粉晶-细晶白云岩具备形成次生储集空间的有利条件(图 3(b))。粉晶白云岩中溶洞局部被方解石充填,进一步表明晶粒白云岩储集性能受溶蚀强度和充填程度共同控制(图 3(c))。

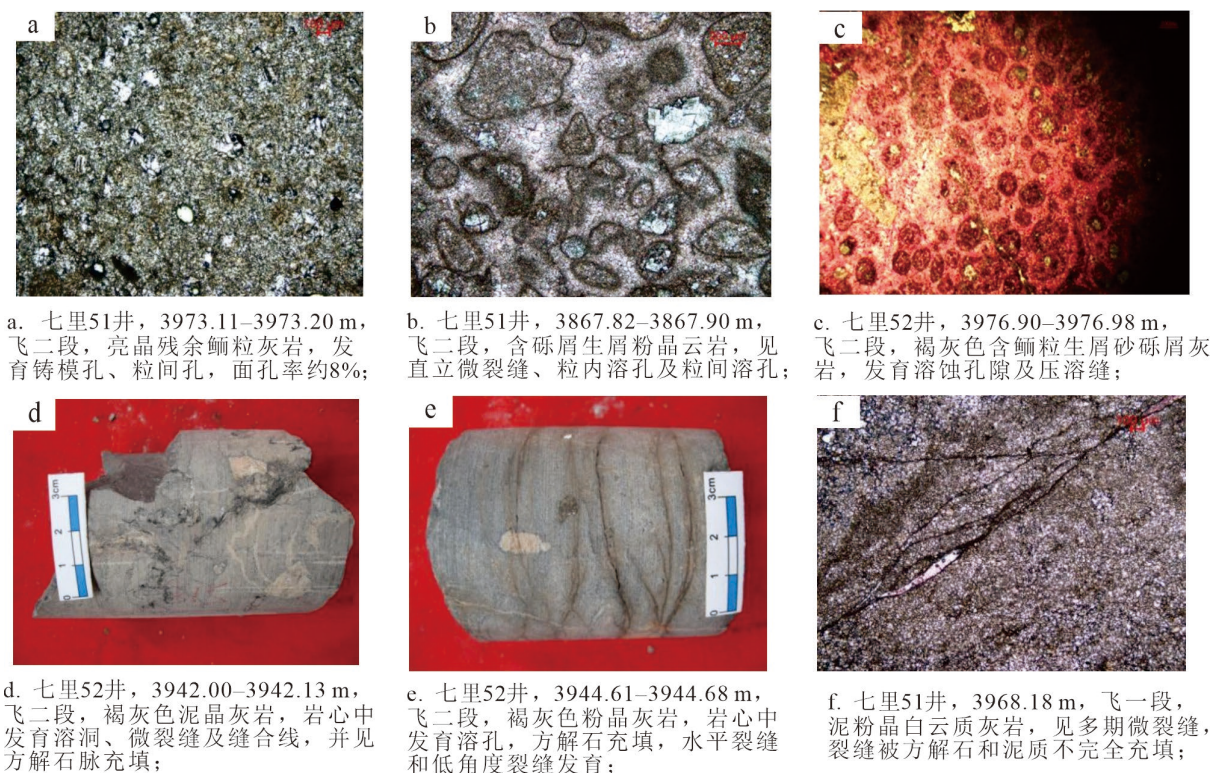


Figure 2. Core and thin-section characteristics of typical limestone reservoirs in the Feixianguan Formation

图 2. 飞仙关组典型灰岩储层岩心与薄片特征

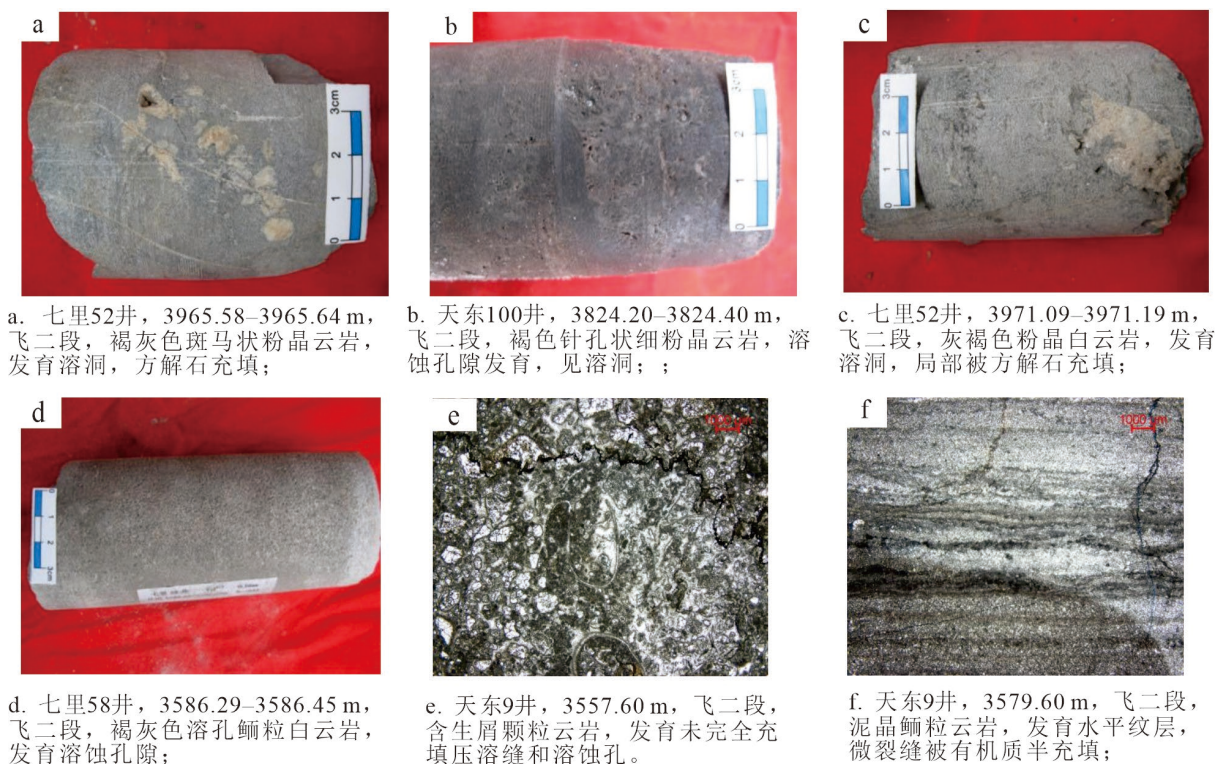


Figure 3. Core and thin-section characteristics of typical dolomite and transitional reservoirs in the Feixianguan Formation

图 3. 飞仙关组典型白云岩及过渡岩性储层岩心与薄片特征

2) 颗粒白云岩

颗粒白云岩主要包括鲕粒白云岩和含生屑颗粒白云岩, 岩石中常保留不同程度残余颗粒结构。溶孔鲕粒白云岩中溶蚀孔隙较发育, 孔隙多沿鲕粒内部、鲕粒边缘及颗粒间部位形成, 表明选择性溶蚀是改善颗粒白云岩储集空间的重要过程(图 3(d))。含生屑颗粒云岩中发育未完全充填的压溶缝和溶蚀孔, 孔隙与裂缝之间具有一定连通关系, 说明颗粒白云岩储集性能不仅受溶蚀孔隙控制, 也受压溶缝和微裂缝开启程度影响(图 3(e))。与多数致密灰岩相比, 颗粒白云岩孔隙类型较多, 孔缝组合关系更复杂, 是飞仙关组相对有利的白云岩储集岩类。

3) 灰质白云岩和白云质灰岩

灰质白云岩和白云质灰岩为飞仙关组常见过渡岩性, 方解石与白云石分布不均, 局部保留残余鲕粒或颗粒结构。泥晶鲕粒云岩中水平纹层较清晰, 微裂缝被有机质半充填, 表明裂缝发育和充填作用对孔缝有效性具有明显影响(图 3(f))。该类岩石储集性能非均质性较强, 白云石化程度较高部位易形成晶间孔和晶间溶孔, 溶蚀作用较强部位可形成粒间溶孔、粒内溶孔和局部溶蚀缝; 方解石、有机质或泥质充填增强时, 孔隙连通性和裂缝有效性降低。总体而言, 灰质白云岩和白云质灰岩储集性能主要受白云石化程度、颗粒组构保存状况、溶蚀改造强度及后期充填作用控制。

3.2. 孔缝洞储集空间类型

飞仙关组储集空间主要由孔隙、裂缝和溶洞组成, 其中孔隙是主要储集空间, 裂缝对渗流能力改善作用明显, 溶洞多呈局部发育[11]。不同储集空间常与颗粒组构、白云石化、溶蚀作用和裂缝改造相伴生, 形成孔隙型、孔隙-裂缝型、裂缝-孔隙型、裂缝型、裂缝-溶洞型和溶洞型等组合类型。总体来看, 裂缝-孔隙型和孔隙-裂缝型储层较具储集意义, 储层有效性主要取决于次生溶蚀孔隙规模、裂缝开启程度及孔缝洞连通关系。

3.2.1. 孔隙

孔隙类型主要包括残余粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔、晶间孔和晶间溶孔。其中, 残余粒间孔、粒间溶孔和粒内溶孔多与鲕粒灰岩、颗粒灰岩和颗粒白云岩有关, 晶间孔和晶间溶孔主要见于粉晶-细晶白云岩及灰岩-白云岩过渡岩性。亮晶残余鲕粒灰岩中铸模孔、粒间孔和粒间溶孔共同发育, 表明原始颗粒组构保存和后期选择性溶蚀有利于有效孔隙形成(图 4(a))。溶孔鲕粒云岩中粒间孔和针孔状粒间溶孔沿鲕粒边缘及颗粒间分布, 进一步说明颗粒白云岩中溶蚀改造对孔隙增容具有重要作用(图 4(b))。

粒内溶孔多发育于鲕粒及生物颗粒内部, 连通性通常弱于粒间溶孔, 但在裂缝或粒间溶孔沟通条件下可参与形成复合储集空间。粉晶鲕粒灰岩中鲕粒内部发生白云石化, 并发育未完全被白云石和方解石充填的溶蚀孔隙, 说明颗粒内部组构、白云石化和溶蚀作用共同影响粒内孔隙保存(图 4(c))。亮晶鲕粒云质灰岩中可见溶蚀缝及沥青充填, 并伴随白云石化选择性交代, 反映溶蚀作用可改善局部储集空间, 但有机质或矿物充填会降低孔缝有效性(图 4(d))。整体而言, 飞仙关组有效孔隙以次生溶蚀孔隙为主, 孔隙保存和连通程度受胶结充填强度明显制约。

3.2.2. 裂缝

裂缝主要包括构造缝、压溶缝、溶蚀缝和微裂缝。裂缝对孔隙度贡献有限, 但在低孔低渗碳酸盐岩储层中能够沟通粒间溶孔、粒内溶孔、晶间溶孔及局部溶洞, 是改善渗流能力的重要储集空间[12]。亮晶鲕粒云质灰岩中发育溶蚀缝, 缝内充填沥青, 并伴随白云石化选择性交代和粒内鞍状白云石交代, 说明裂缝既可作为流体活动通道, 也可能被后期有机质或矿物充填而失效(图 5(a))。泥晶白云石中构造缝宽窄变化明显, 溶蚀缝与压溶缝伴生, 裂缝被白云石、方解石和沥青充填, 反映多期裂缝改造和充填作用共同影响孔缝连通程度(图 5(b))。

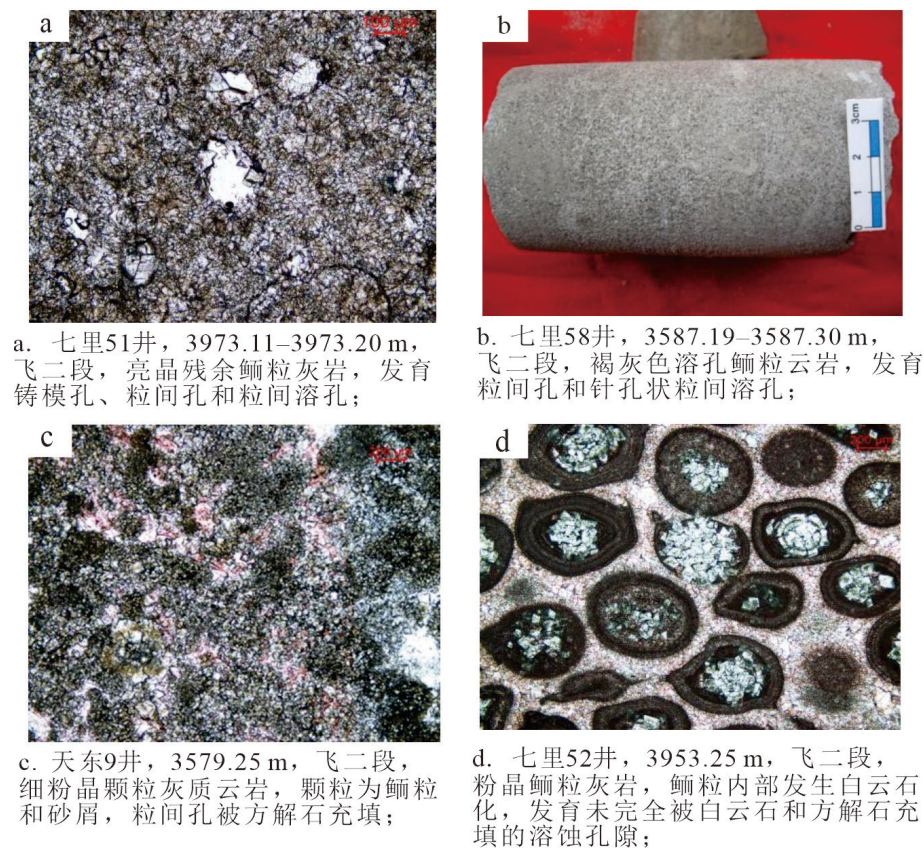


Figure 4. Core and thin-section characteristics of pore types in the Feixianguan Formation reservoirs
图 4. 飞仙关组储层孔隙类型岩心与薄片特征

Table 1. Statistical characteristics of fractures in cored intervals of the Feixianguan Formation
表 1. 飞仙关组取心段裂缝发育特征统计表

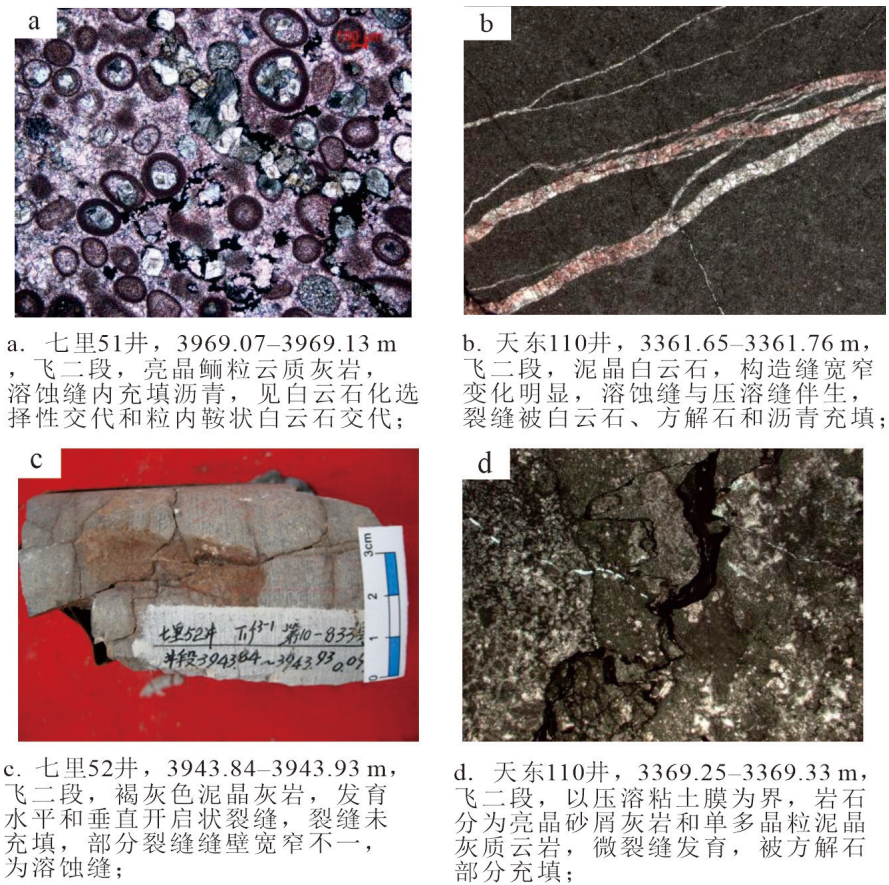
序号	统计项目	裂缝密度(条/m)	有效裂缝密度(条/m)
1	最小值	0.50	0.06
2	最大值	47.56	36.00
3	平均值	20.83	9.78
4	中值	17.80	6.11

取心段裂缝统计表明, 飞仙关组裂缝密度为 0.50~47.56 条/m, 平均 20.83 条/m; 有效裂缝密度为 0.06~36.00 条/m, 平均 9.78 条/m (表 1)。裂缝密度与有效裂缝密度差异明显, 说明裂缝数量不能直接代表储层有效性, 裂缝开启程度、延伸规模和充填状态更能控制渗流能力。泥晶灰岩中水平和垂直开启状裂缝未充填, 部分裂缝缝壁宽窄不一, 具溶蚀缝特征, 可作为有效渗流通道(图 5(c))。亮晶砂屑灰岩与泥晶灰质云岩接触部位发育微裂缝, 部分裂缝被方解石充填, 表明胶结充填会削弱裂缝连通性(图 5(d))。

3.2.3. 溶洞

溶洞为局部发育的次生储集空间, 多由早期溶孔进一步扩大形成[13], 常见于粉晶白云岩、细粉晶白云岩、鲕粒白云岩及局部泥晶灰岩中。前述岩心和薄片资料显示, 斑马状粉晶云岩、针孔状细粉晶云岩和粉晶白云岩中可见溶洞或小型溶蚀孔洞, 局部被方解石充填, 说明溶蚀作用可扩大白云岩储集空间,

但后期充填会降低孔洞有效性(图 3(a), 图 3(b), 图 3(c))。泥晶灰岩中溶洞常与微裂缝、缝合线共同出现, 表明致密灰岩在压溶、裂缝和溶蚀作用影响下亦可形成局部次生储集空间(图 2(d))。



a. 七里51井, 3969.07–3969.13 m, 飞二段, 亮晶鲕粒云质灰岩, 溶蚀缝内充填沥青, 见白云石化选择性交代和粒内鞍状白云石交代;
b. 天东110井, 3361.65–3361.76 m, 飞二段, 泥晶白云石, 构造缝宽窄变化明显, 溶蚀缝与压溶缝伴生, 裂缝被白云石、方解石和沥青充填;
c. 七里52井, 3943.84–3943.93 m, 飞二段, 褐灰色泥晶灰岩, 发育水平和垂直开启状裂缝, 裂缝未充填, 部分裂缝缝壁宽窄不一, 为溶蚀缝;
d. 天东110井, 3369.25–3369.33 m, 飞二段, 以压溶粘土膜为界, 岩石分为亮晶砂屑灰岩和单多晶粒泥晶灰质云岩, 微裂缝发育, 被方解石部分充填;

Figure 5. Core and thin-section characteristics of fractures in the Feixianguan Formation reservoirs
图 5. 飞仙关组储层裂缝岩心与薄片特征

Table 2. Statistics of mud loss intervals in the Feixianguan Formation of the study area
表 2. 研究区飞仙关组部分井段井漏特征统计表

序号	井号	层位	井漏段数	累计漏失厚度(m)	漏失速度范围(m ³ /h)
1	七里 17	T ₁ f ^s -T ₁ f ^d	1	8.80	0.8~12
2	凉东 10	T ₁ f ^s -T ₁ f ^d	4	114.00	1.6~44
3	凉东 9	T ₁ f ^s -T ₁ f ^d	1	2.00	0.0~3.3
4	卧 70	T ₁ f ^s -T ₁ f ^d	1	11.00	0.66~0.69
5	成 16	T ₁ f ^s -T ₁ f ^d	2	10.00	0.0~2.6
6	成 18	T ₁ f ^s -T ₁ f ^d	1	10.00	0.4~9.6
7	成 20	T ₁ f ^s -T ₁ f ^d	1	285.00	0.0~0.1
8	成 24	T ₁ f ^s -T ₁ f ^d	1	9.00	3.7~11.4
9	成 22	T ₁ f ^s -T ₁ f ^d	1	3.00	0.32~18.75
10	大天 15	T ₁ f ^s -T ₁ f ^d	2	15.40	0~100.8
11	张 22	T ₁ f ^s -T ₁ f ^d	2	1.93	7.1~17.68

钻井漏失资料可作为裂缝或孔洞型通道发育的间接证据。多个飞仙关组井段出现不同程度井漏,漏失速度变化范围较大,局部漏失速度较高(表 2)。该现象说明研究区局部层段可能存在较强流体通道,但井漏成因并不唯一,可能与开启裂缝、溶洞、裂缝-孔洞组合或高渗透层共同有关,不能简单等同于单一溶洞型储层。总体而言,溶洞在飞仙关组中不构成主体储集空间,但未完全充填溶洞若与粒间溶孔、晶间溶孔或裂缝连通,可形成孔-缝-洞复合储集空间,并改善局部渗流能力。

3.3. 孔渗物性与层段差异

研究区飞仙关组孔渗物性分析以 20 口井 4313 个岩心段塞样孔隙度和渗透率测试数据为基础,并结合测井解释储层段物性成果,对储层物性分布及层段差异进行评价。岩心段塞样测试结果表明,飞仙关组储层段孔隙度以 2%~6% 为主,占 93.67%,大于 12% 的样品比例较低,说明有效储层基质孔隙发育程度总体有限(图 6(a))。渗透率分布较孔隙度更为离散,小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占 52.51%,大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占 34.10%,表明飞仙关组储层虽总体为低孔低渗储层,但局部层段可因裂缝、溶洞或孔缝组合发育而形成相对较高渗流能力[14] (图 6(b))。

测井解释结果与岩心段塞样测试结果具有较好一致性。测井解释储层段孔隙度仍以 2%~6% 为主,占 72.23%,进一步表明低孔储层构成飞仙关组有效储层主体(图 6(c))。测井解释储层段渗透率主要集中于 $0.01 \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,占 81.81%,其中 $0.01 \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.1 \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 分别占 45.45% 和 36.36%,说明储层渗流能力总体偏弱,但不同层段之间存在明显差异(图 6(d))。岩心实测与测井解释共同表明,飞仙关组储层不能简单归为单一基质孔隙型储层,其有效性还受裂缝开启程度、溶蚀孔洞发育及孔缝洞连通关系影响。

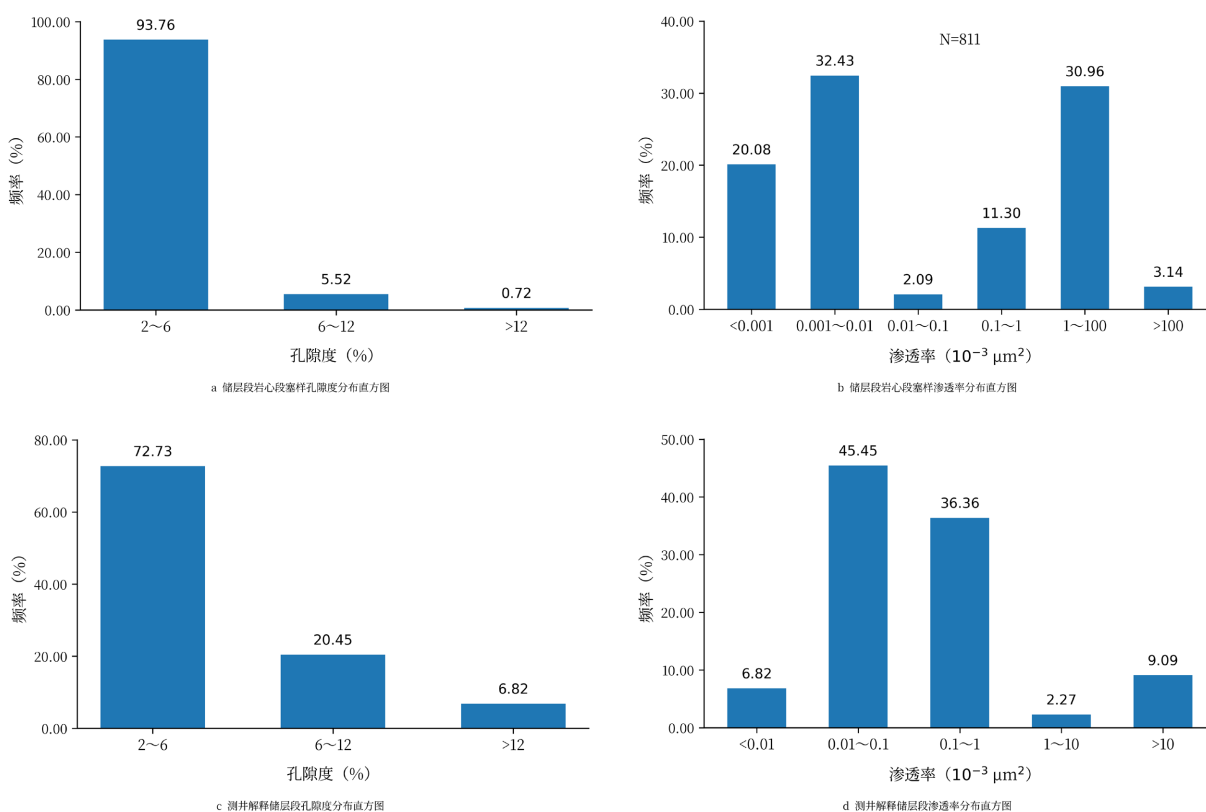


Figure 6. Porosity and permeability distribution characteristics of reservoir intervals in the Feixianguan Formation
图 6. 飞仙关组储层段孔隙度与渗透率分布特征

分层统计结果进一步揭示飞仙关组储层具有明显层段选择性。飞二段储层段数量占 68.55%，孔隙度为 2.1%~19.52%，平均 3.75%；渗透率为 $0.01\sim178.23\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，平均 $4.466\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ；储层段厚度为 0.13~33.13 m，平均 4.103 m，储层规模和孔渗条件均优于飞一段和飞三段(表 3)。飞一段和飞三段平均孔隙度分别为 2.85%和 2.73%，平均渗透率分别为 $0.077\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 和 $0.05\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，显示二者储集性能明显弱于飞二段。综合来看，飞二段为邻水 - 大竹地区飞仙关组最主要有利储层段，飞一段次之，飞三段储层物性相对较差。

Table 3. Statistical characteristics of reservoirs in different members of the Feixianguan Formation
表 3. 研究区飞仙关组各小层储层发育特征统计表

层位	储层段数量占比(%)	孔隙度(%)	渗透率($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	储层段厚度(m)
飞一段	23.18	2.0~4.0/2.85	0.009~0.98/0.077	0.3~11.5/2.976
飞二段	68.55	2.1~19.52/3.75	0.01~178.23/4.466	0.13~33.13/4.103
飞三段	10.06	2.1~4.2/2.73	0.003~0.28/0.05	0.8~11.9/4.078

3.4. 微观孔喉结构特征

压汞实验能够较好表征低孔低渗碳酸盐岩储层孔喉大小、分选性、毛管压力及流体可动性[15]。研究区飞仙关组压汞资料表明，不同样品孔喉规模、分选程度和连通能力差异明显，储层微观孔喉系统具有较强非均质性。依据孔喉分选系数、饱和度中值半径、饱和度中值压力及孔喉结构组合特征，飞仙关组孔喉结构可划分为粗孔粗喉、中孔细喉、细孔微喉和微孔微喉四类(图 7(a))。储层段样品主要表现为粗孔粗喉、中孔细喉和细孔微喉三类孔喉结构，微孔微喉型多对应非储层或极差储层(图 7(b))。

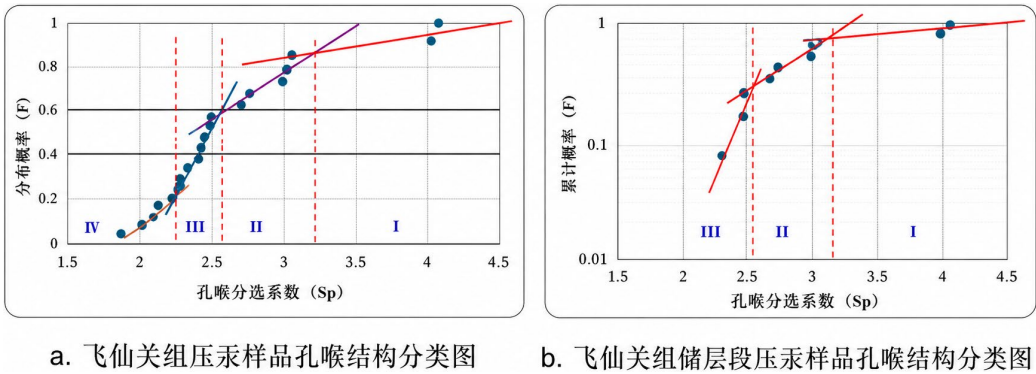


Figure 7. Pore-throat structure classification of mercury intrusion samples from the Feixianguan Formation
图 7. 飞仙关组压汞样品孔喉结构分类图

不同孔喉结构类型对应储层质量差异明显。粗孔粗喉型储层孔隙度为 9.8%~12.29%，平均 11.05%，渗透率为 3.467~8.124 mD，平均 5.795 mD，饱和度中值半径平均为 1.057 μm ，中值压力平均为 0.744 MPa，表现为孔喉半径较大、毛管压力较低和渗流能力较强。中孔细喉型储层孔隙度为 2.38%~4.62%，平均 3.14%，渗透率为 0.010~0.067 mD，平均 0.038 mD，饱和度中值半径平均为 0.068 μm ，中值压力平均为 11.535 MPa，说明该类储层仍具一定储集空间，但细喉道对流体运移形成明显限制(表 4)。细孔微喉型和微孔微喉型储层孔喉条件明显变差。细孔微喉型储层孔隙度为 2.02%~2.55%，平均 2.33%，渗透率为 0.0007~0.004 mD，平均 0.0028 mD，饱和度中值半径平均为 0.034 μm ，中值压力平均为 22.741 MPa；微孔微喉型储层孔隙度为 0.97%~1.96%，平均 1.54%，渗透率为 0.0002~0.0171 mD，平均 0.0036 mD，饱和度中值半径平均为 0.018 μm ，中值压力平均为 53.966 MPa。二者均表现为孔喉半径小、毛管阻力强和渗流能力弱，其

中微孔微喉型孔喉连通性最差，通常不具备有效储集能力。

Table 4. Microscopic pore-throat structure parameters of different reservoir types in the Feixianguan Formation
表 4. 飞仙关组不同类型储层微观结构参数统计表

类型	孔隙度(%)	渗透率(mD)	孔喉分选系数(Sp)	变异系数	峰态	饱和度中值半径(μm)	饱和度中值压力(MPa)
粗孔粗喉	9.8~12.29 /11.05	3.467~8.124 /5.795	4.017~4.072 /4.045	0.493~0.501 /0.497	0.665~0.688 /0.676	0.829~1.284 /1.057	0.584~0.904 /0.744
中孔细喉	2.38~4.62 /3.14	0.010~0.067 /0.038	2.699~3.059 /2.903	0.257~0.893 /0.413	0.459~0.741 /0.616	0.050~0.090 /0.068	7.885~15.099 /11.535
细孔微喉	2.02~2.55 /2.33	0.0007~0.004 /0.0028	2.333~2.500 /2.439	0.212~0.232 /0.224	0.497~0.679 /0.587	0.029~0.040 /0.034	18.778~25.802 /22.741
微孔微喉	0.97~1.96 /1.54	0.0002~0.0171 /0.0036	1.875~2.451 /2.232	0.161~0.223 /0.199	0.494~0.585 /0.529	0.005~0.029 /0.018	25.802~153.45 /53.966

注：数值格式为“最小值~最大值/平均值”。

孔喉分选性进一步表明，飞仙关组储层有效性并不完全取决于孔隙度大小。粗孔粗喉型孔喉分选系数平均为 4.045，中孔细喉型平均为 2.903，细孔微喉型平均为 2.439，微孔微喉型平均为 2.232，整体随孔喉结构变差而降低。粗孔粗喉型和中孔细喉型具有相对较好的孔喉分选及连通条件，可形成较有效渗流通道；细孔微喉型和微孔微喉型受细小喉道和较高毛管压力限制，储层有效性明显降低，通常需依赖裂缝或溶蚀孔洞沟通才能改善局部渗流能力。总体来看，飞仙关组储层微观结构以中孔细喉和细孔微喉型为主，局部发育粗孔粗喉型储层，微孔微喉型多对应非储层或极差储层，储层质量受孔喉半径、孔喉分选性、连通关系及后期充填作用共同控制。

3.5. 储层综合分类评价

飞仙关组储层综合分类需同时考虑宏观物性、储集空间组合及微观孔喉结构[16]。依据孔隙度、渗透率、排驱压力、中值压力、最大孔喉半径 R_{c10} 、束缚水饱和度、孔喉特征、主要孔隙类型和主要岩石类型，研究区飞仙关组储集岩可划分为I类好储层、II类较好储层、III类差储层和IV类非储层(表 5)。其中，I类和II类储层主要对应粗孔粗喉与中孔细喉结构，粒间溶孔、晶间溶孔、溶洞和裂缝配置关系较好，孔喉连通性和流体可动性相对较强；III类和IV类储层主要对应细孔微喉与微孔微喉结构，毛管压力较高，储层有效性明显降低。

I类储层为飞仙关组相对优质储层，孔隙度大于 12%，渗透率大于 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，排驱压力小于 0.1 MPa，中值压力小于 1 MPa，束缚水饱和度小于 10%，主要发育粒间溶孔和溶洞，岩石类型以颗粒白云岩和细晶粒灰岩为主。II类储层孔隙度为 6%~12%，渗透率为 $0.1 \sim 3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，排驱压力为 0.1~1 MPa，中值压力为 1~16 MPa，束缚水饱和度为 10%~20%，主要发育粒间溶孔、晶间溶孔和裂缝，岩石类型以颗粒灰岩和细晶白云岩为主。两类储层共同构成研究区飞仙关组有利储层主体。

III类储层孔隙度为 2%~6%，渗透率为 $0.01 \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，排驱压力为 1~10 MPa，中值压力为 16~25.8 MPa，束缚水饱和度为 20%~30%，储集空间主要为铸模孔、粒间溶孔和裂缝，岩石类型以晶粒灰岩和细粉晶白云岩为主。该类储层虽具一定孔隙基础，但孔喉细小、连通性偏弱，储层有效性主要依赖裂缝或溶蚀孔隙沟通。IV类储层孔隙度小于 2%，渗透率小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，排驱压力大于 10 MPa，中值压力大于 25.8 MPa，束缚水饱和度大于 30%，主要储集空间为晶间孔及充填裂缝，岩石类型以泥晶灰岩和致密颗粒灰岩为主，整体不具备有效储集能力。

Table 5. Classification and evaluation criteria of reservoir rocks in the Feixianguan Formation of the study area
表 5. 研究区飞仙关组储集岩分类及评价简表

参数	I类(好储层)	II类(较好储层)	III类(差储层)	IV类(非储层)
孔隙度(%)	>12	6~12	2~6	<2
渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	>3	0.1~3	0.01~0.1	<0.01
排驱压力(MPa)	<0.1	0.1~1	1~10	>10
中值压力(MPa)	<1	1~16	16~25.8	>25.8
最大孔喉半径 Rc10 (μm)	>4	0.4~4	0.01~0.4	<0.1
束缚水饱和度(%)	<10	10~20	20~30	>30
孔喉特征	粗孔粗喉	中孔细喉	细孔微喉	微孔微喉
主要孔隙类型	粒间溶孔、溶洞	粒间溶孔、晶间溶孔、裂缝	铸模孔、粒间溶孔、裂缝	晶间孔及充填裂缝
主要岩石类型	颗粒白云岩、 细晶粒灰岩	颗粒灰岩、细晶白云岩	晶粒灰岩、 细粉晶白云岩	泥晶灰岩、致密颗粒灰岩

综合评价表明,飞仙关组有利储层主要受有利岩性、溶蚀孔隙、裂缝沟通和较好孔喉结构共同控制。颗粒白云岩、颗粒灰岩、细晶白云岩及细晶灰岩类中,粒间溶孔、晶间溶孔、溶洞和未完全充填裂缝配置较好时,可形成较有效储集和渗流系统;泥晶灰岩和致密颗粒灰岩则多受微孔微喉结构及裂缝充填限制,储集意义有限。结合层段物性统计,飞二段储层发育程度、孔渗条件和储层段厚度均优于飞一段和飞三段,应作为邻水-大竹地区飞仙关组储层综合评价重点层段。

4. 飞仙关组储层发育主控因素

4.1. 沉积相带对储集岩发育的控制

沉积相带主要通过控制颗粒组构、有利岩性组合和原始孔隙基础影响飞仙关组储层发育[17]。研究区飞仙关组沉积时期受开江-梁平海槽演化、台地边缘迁移及相对海平面变化影响,高能颗粒滩、鲕滩和局部生屑滩为鲕粒灰岩、颗粒灰岩、颗粒白云岩及鲕粒白云岩发育提供沉积基础。颗粒支撑结构有利于残余粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔及铸模孔发育,而相对低能环境形成的泥晶灰岩和致密粉晶灰岩基质较致密,原生孔隙保存条件差,储集性能更多依赖后期裂缝和局部溶蚀改造(图 2(a)~图 2(c); 图 4(a)~图 4(c))。层段物性差异进一步表明,飞二段储层发育程度、孔渗条件和储层段厚度优于飞一段和飞三段[18],反映该层段高能滩体及有利岩性组合更发育,是研究区飞仙关组储层评价重点(表 3)。反映飞二段高能滩体及有利岩性组合更发育。该层段颗粒组构、白云岩化改造和溶蚀作用叠加程度较高,是邻水-大竹地区飞仙关组储层评价重点。总体来看,沉积相带主要通过控制颗粒滩发育位置、储集岩岩性组合和原始孔隙基础,决定储层发育的先天条件。

4.2. 成岩改造对孔隙演化的控制

成岩改造控制飞仙关组储集空间的形成、保存和破坏。白云石化和溶蚀作用对储层具有建设性意义,压实、胶结及方解石、白云石、泥质、沥青等充填作用则会降低孔缝有效性[19]。晶粒白云岩中溶洞、晶间孔和晶间溶孔较常见,斑马状粉晶云岩、针孔状细粉晶云岩及粉晶白云岩均表现出较明显溶蚀改造特征,说明白云石化可增强岩石抗压实能力,并为后期溶蚀和孔隙保存提供有利基础(图 3(a)~图 3(c))。

溶蚀作用对颗粒灰岩和颗粒白云岩储集空间改善尤为明显。亮晶残余鲕粒灰岩中铸模孔、粒间孔和

粒间溶孔共同发育,溶孔鲕粒白云岩中粒间孔和针孔状粒间溶孔较发育,表明颗粒边缘、粒间胶结物及不稳定组分经选择性溶蚀后可形成有效孔隙系统(图 4(a)、图 4(b))。但成岩作用并非单向改善储层质量,部分鲕粒灰岩、灰质白云岩和白云质灰岩中孔隙、裂缝受方解石、白云石、有机质或泥质充填影响,孔隙连通性和裂缝有效性明显降低(图 3(f); 图 4(c)、图 4(d))。压汞资料显示,粗孔粗喉和中孔细喉型储层具有较好的孔喉半径和连通条件,细孔微喉和微孔微喉型储层毛管压力高、渗流能力弱(图 7; 表 4)。因此,成岩改造对储层的最终影响取决于白云石化、溶蚀增孔与压实胶结、矿物充填之间的相对强度[20]。

4.3. 构造裂缝对储层有效性的控制

构造裂缝是改善飞仙关组低孔低渗储层渗流能力的重要因素。研究区位于川东高陡构造带,断裂和含气构造总体呈北东-南西向展布,断裂体系在北部及中东部较为发育,为裂缝形成及后期流体活动提供了构造背景(图 1)。裂缝类型主要包括构造缝、压溶缝、溶蚀缝和微裂缝。未充填或半充填裂缝可沟通粒间溶孔、粒内溶孔、晶间溶孔和局部溶洞,形成孔隙-裂缝型或孔-缝-洞复合型储集空间;完全充填裂缝则对渗流能力贡献有限。

裂缝有效性主要受开启程度、延伸规模和充填状态控制。亮晶鲕粒云质灰岩中溶蚀缝内充填沥青,并伴随白云石化选择性交代,说明裂缝既可作为流体活动通道,也可能在后期被有机质或矿物充填而降低有效性(图 5(a))。泥晶白云石中构造缝、溶蚀缝和压溶缝伴生,裂缝被白云石、方解石和沥青充填,反映多期破裂、溶蚀和充填改造对孔缝连通关系具有重要影响(图 5(b))。泥晶灰岩中未充填开启裂缝可作为有效渗流通道,而被方解石部分充填的微裂缝连通性明显减弱(图 5(c)、图 5(d))。

裂缝统计和钻井漏失资料进一步支持裂缝对储层有效性的控制作用。飞仙关组裂缝密度为 0.50~47.56 条/m,平均 20.83 条/m;有效裂缝密度为 0.06~36.00 条/m,平均 9.78 条/m,二者差异表明裂缝数量不能直接代表储层有效性,裂缝开启程度和充填状态更为关键(表 1)。多个井段存在不同程度井漏,局部漏失速度较高,指示开启裂缝、溶洞或裂缝-孔洞组合可形成较强流体通道(表 2)。需要注意,井漏只能作为高渗通道发育的间接证据,不能简单等同于单一溶洞型储层。综合判断,构造裂缝并非飞仙关组储集空间形成的唯一因素,但对低孔低渗储层连通性改善和局部高渗层段形成具有关键作用。

5. 结论

邻水-大竹地区飞仙关组储集岩以灰岩类、白云岩类及灰岩-白云岩过渡岩性为主,鲕粒灰岩、颗粒白云岩和粉晶-细晶白云岩为相对有利储集岩类。储集空间主要包括粒间溶孔、粒内溶孔、晶间孔、晶间溶孔、铸模孔、裂缝和局部溶洞,未完全充填裂缝可沟通孤立孔隙和局部溶洞,方解石、白云石、泥质及沥青充填会降低孔缝有效性。物性和压汞资料表明,飞仙关组储层整体表现为低孔、低渗特征,储层段孔隙度主要集中于 2%~6%,孔喉结构以中孔细喉和细孔微喉型为主,局部发育粗孔粗喉型储层,微孔微喉型多对应非储层或极差储层。依据孔渗物性、毛管压力、孔喉半径、束缚水饱和度、孔喉特征、孔隙类型和岩石类型,飞仙关组储集岩可划分为 I 类好储层、II 类较好储层、III 类差储层和 IV 类非储层,其中 I 类和 II 类为有利储层类型。飞二段储层段数量、孔渗条件和储层段厚度均优于飞一段和飞三段,是研究区飞仙关组主要有利储层段。综合分析认为,高能颗粒滩和鲕滩沉积控制有利储集岩发育基础,白云石化和溶蚀作用改善孔隙规模及孔喉连通性,压实、胶结和多期充填作用削弱储层有效性,构造裂缝则主要改善低孔低渗储层渗流能力。后续储层评价应重点关注飞二段鲕粒灰岩、颗粒白云岩和粉晶-细晶白云岩发育层段,尤其是孔缝洞组合关系较好、充填程度较弱的层段。

参考文献

- [1] 马永生,牟传龙,郭彤楼,等. 四川盆地东北部飞仙关组层序地层与储层分布[J]. 矿物岩石, 2005, 25(4): 73-79.

- [2] 冯林杰, 蒋裕强, 刘菲, 等. 川东地区开江-梁平海槽南段飞仙关组鲕滩储层特征及主控因素[J]. 石油学报, 2021, 42(10): 1287-1298.
- [3] 文雯, 杨西燕, 向曼, 等. 四川盆地开江-梁平海槽东侧三叠系飞仙关组鲕滩储层特征及控制因素[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(2): 68-79.
- [4] Tan, X., Zhao, L., Luo, B., Jiang, X., Cao, J., Liu, H., *et al.* (2012) Comparison of Basic Features and Origins of Oolitic Shoal Reservoirs between Carbonate Platform Interior and Platform Margin Locations in the Lower Triassic Feixianguan Formation of the Sichuan Basin, Southwest China. *Petroleum Science*, **9**, 417-428. <https://doi.org/10.1007/s12182-012-0229-2>
- [5] 李阳, 王兴志, 蒲柏宇, 等. 四川盆地开江-梁平海槽东侧三叠系飞仙关组鲕滩沉积特征[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(2): 116-130.
- [6] 王一刚, 张静, 刘兴刚, 等. 四川盆地东北部下三叠统飞仙关组碳酸盐蒸发台地沉积相[J]. 古地理学报, 2005, 7(3): 357-371.
- [7] 黎荣, 胡忠贵, 胡明毅, 等. 川东七里峡-云安厂地区飞仙关组储层特征及主控因素研究[J]. 高校地质学报, 2015, 21(4): 642-652.
- [8] 宿亚仙. 普光地区飞仙关组颗粒滩储层发育分布规律及控制因素[J]. 断块油气田, 2023, 30(3): 396-404.
- [9] 郑荣才, 刘萍, 文华国. 川东北地区飞仙关组和长兴组白云岩成因与成岩-成藏系统[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2017, 44(1): 1-13.
- [10] Zhao, W., Luo, P., Chen, G., Cao, H. and Zhang, B. (2005) Origin and Reservoir Rock Characteristics of Dolostones in the Early Triassic Feixianguan Formation, NE Sichuan Basin, China: Significance for Future Gas Exploration. *Journal of Petroleum Geology*, **28**, 83-100. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2005.tb00072.x>
- [11] 罗冰, 谭秀成, 刘宏, 等. 蜀南地区飞仙关组鲕滩储层成因机制分析[J]. 沉积学报, 2009, 27(3): 404-409.
- [12] 姚迎涛, 曾联波, 张航, 等. 川东北黄龙场-七里北地区飞仙关组碳酸盐岩储层裂缝发育规律[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2643-2651.
- [13] 王一刚, 文应初, 洪海涛, 等. 四川盆地三叠系飞仙关组气藏储层成岩作用研究拾零[J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 831-839.
- [14] 蒋裕强, 邓虹兵, 易娟子, 等. 开江-梁平海槽西侧飞仙关组不同类型鲕滩储层特征及其控制因素研究[J]. 特种油气藏, 2020, 27(1): 17-24.
- [15] Ren, G.X., Qin, Q.R., Zhang, Q., *et al.* (2023) Study on Reservoir Characteristics, Pore-Throat Structure, and Origin of Tight Oolitic Reservoirs: A Case Study of Triassic Feixianguan Formation, NE Sichuan Basin, SW China. *Frontiers in Earth Science*, **10**, Article 1112190.
- [16] Gu, Y.F., Jiang, Y.Q., Lei, X.H., Chen, Z.Y., *et al.* (2021) The Major Controlling Factors and Different Oolitic Shoal Reservoir Characteristics of the Triassic Feixianguan Formation, Eastern Longgang Area, NE Sichuan Basin, SW China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, **95**, 895-908. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14672>
- [17] Qiao, Z., Janson, X., Shen, A., Zheng, J., Zeng, H. and Wang, X. (2016) Lithofacies, Architecture, and Reservoir Heterogeneity of Tidal-Dominated Platform Marginal Oolitic Shoal: An Analogue of Oolitic Reservoirs of Lower Triassic Feixianguan Formation, Sichuan Basin, SW China. *Marine and Petroleum Geology*, **76**, 290-309. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.05.030>
- [18] 张本健, 徐唱, 徐亮, 等. 四川盆地东北部三叠系飞三段沉积特征及油气地质意义[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(3): 154-163.
- [19] 潘立银, 刘占国, 李昌, 等. 四川盆地东部下三叠统飞仙关组白云岩化作用及其与储集层发育的关系[J]. 古地理学报, 2012, 14(2): 176-186.
- [20] Zhou, L., Wang, G.W., Zhang, Y., Qiao, Y.P., *et al.* (2023) Characteristics and Origin of Lower Triassic Feixianguan Formation Dolostones on the West Side of Kaijiang-Liangping Trough, Northeastern Sichuan Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, **147**, Article 105956. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105956>