石油与天然气地质
第47卷　第4期　OIL & GAS GEOLOGY　2026年8月

文章编号:0253－9985(2026)04－1078－16　doi:10.11743/ogg20260402

川东北元坝地区三叠系飞仙关组二段碳酸盐岩颗粒滩储层孔隙类型及其发育控制因素

熊　亮[1],梁中红[2],汪旭东[2],王　颖[3],郭超杰[4],张　琴[3]

[1. 中国石化 西南油气分公司,四川 成都 610041;2. 中国石化 西南油气分公司 采气二厂,四川 阆中 637400;3. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249;4. 中国石油化工集团公司 胜利石油管理局有限公司,山东 东营 257002]

摘要:四川盆地东北部元坝地区三叠系飞仙关组二段(飞二段)发育多期碳酸盐岩颗粒滩储层,储层非均质性强,孔隙类型及发育控制因素不明,严重制约了储层评价与甜点预测。应用岩心、薄片、物性参数、成像测井以及压汞测试分析等资料,开展飞二段颗粒滩储层孔隙类型及主控因素研究,以期为飞二段有利储层预测提供科学依据。研究结果表明:①飞二段发育3期碳酸盐岩颗粒滩储层,包括鲕粒灰岩、豆粒灰岩以及砂屑灰岩等,部分储层发育白云石化作用形成的残余颗粒白云岩。②储层主要表现出低-中孔、低渗特征,可划分为裂缝型、孔隙型和裂缝-孔隙型3类。孔隙以颗粒内溶孔和铸模孔为主,粒间孔与晶间孔次之;裂缝则发育高角度构造裂缝和缝合线成岩缝。③孔隙发育主要受沉积条件、成岩作用和构造作用的共同控制。在不同沉积条件下发育的沉积微相和储层岩石类型决定了原生孔隙与胶结物的发育特征,并间接影响次生孔隙的发育程度;不同成岩阶段的环境差异控制了成岩作用的类型,进而制约了孔隙的类型与发育规模。其中,同生期-准同生期溶蚀作用、埋藏溶蚀作用和白云石化作用是飞二段孔隙发育的关键成岩作用类型;构造作用引起裂缝及其附近溶孔、溶洞的发育,大大提高了储层的孔、渗性能。④溶孔-裂缝型白云石化颗粒滩储层是飞二段最有利的储层类型,这得益于裂缝、溶孔和晶间孔的有效组合,使其孔、渗性能得到了显著改善。

关键词:孔隙类型;储层物性;碳酸盐岩颗粒滩储层;飞仙关组二段;元坝地区;川东北

中图分类号:TE122.2　　**文献标识码**:A

Pore types of granular shoal carbonate reservoirs in the 2nd member of the Triassic Feixianguan Formation, Yuanba area, northeastern Sichuan Basin and controlling factors for their development

XIONG Liang[1], LIANG Zhonghong[2], WANG Xudong[2], WANG Ying[3], GUO Chaojie[4], ZHANG Qin[3]

[1. *Southwest Oil & Gas Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*; 2. *No. 2 Gas Production Plant, Southwest Oil & Gas Company, SINOPEC, Langzhong, Sichuan* 637400, *China*; 3. *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing* 102249, *China*; 4. *Shengli Petroleum Administrative Bureau Co., Ltd., SINOPEC, Dongying, Shandong* 257002, *China*]

Abstract: The 2nd member of the Feixianguan Formation (also referred to as the Fei 2 Member, T_1f^2) in the Yuanba area, northeastern Sichuan Basin develops multi-stage granular shoal carbonate reservoirs characterized by strong heterogeneity. However, their pore types and controlling factors for development remain poorly understood, significantly restricting reservoir evaluation and sweet-spot prediction. In this study, by integrating core and thin-section observations, physical property parameters, formation micro-imager (FMI) logs, and high-pressure mercury injection (HPMI) analysis results, we investigate the pore types of granular shoal carbonate reservoirs in the Fei 2 Member and determine their major controlling factors for development, aiming to provide a scientific basis for predicting favorable reservoirs in this member. The research results indicate that three-stage granular shoal carbonate reservoirs occur in the Fei 2 Member, including oolitic limestones, pisolitic limestones, and calcarenites, as well as residual doloarenites derived from localized dolomitization. These reservoirs are characterized by low to moderate porosity and low

收稿日期:2025-08-08;**修回日期**:2026-01-26。

第一作者简介:熊亮(1975—),男,研究员,油气勘探开发及生产管理。**E-mail**:xiongliang.xnyq@sinopec.com。

基金项目:新型油气勘探开发国家科技重大专项(2025ZD1400400);中国石油化工股份有限公司西南油气分公司项目(HX20240604)。

permeability and can be classified into fractured, vuggy, and fractured-vuggy types. The pore system in the reservoirs is dominated by intragranular dissolution pores and moldic pores, followed by intergranular and intercrystalline pores. Fractures are mainly of high-angle and stylolite-related types. The pore development is jointly controlled by sedimentary conditions, diagenesis, and tectonism. Both sedimentary microfacies and reservoir lithologies resulting from different sedimentary settings determine the characteristics of primary pores and cements, while indirectly governing the extent of secondary pore development. Environmental variations at diverse diagenetic stages control the types of diagenesis, thereby constraining the pore development in terms of type and scale. Among various diagenesis types, syngenetic-penecontemporaneous dissolution, burial dissolution, and dolomitization are critical to pore development in the member. Tectonic activity resulted in the formation of fractures, as well as adjacent dissolution pores and vugs, thus significantly enhancing reservoir porosity and permeability. Dolomitized granular shoal reservoirs of the dissolution pore-fracture type are identified as the most favorable reservoir type in the member, as their porosity and permeability are substantially enhanced by the effective combination of fractures, dissolution pores, and intercrystalline pores.

Key words: pore type, reservoir physical property, granular shoal carbonate reservoir, the 2nd member of Feixianguan Formation, Yuanba area, northeastern Sichuan Basin

引用格式:熊亮,梁中红,汪旭东,等.川东北元坝地区三叠系飞仙关组二段碳酸盐岩颗粒滩储层孔隙类型及其发育控制因素[J].石油与天然气地质,2026,47(4):1078-1093. DOI:10.11743/ogg20260402.

XIONG Liang, LIANG Zhonghong, WANG Xudong, et al. Pore types of granular shoal carbonate reservoirs in the 2nd member of the Triassic Feixianguan Formation, Yuanba area, northeastern Sichuan Basin and controlling factors for their development[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(4):1078-1093. DOI:10.11743/ogg20260402.

四川盆地东北部环开江-梁平海槽台缘带下三叠统飞仙关组(T_1f)发育了多套碳酸盐岩颗粒滩相储层。自20世纪90年代该层系获得工业气流以来,已相继发现渡口河、罗家寨、滚子坪及普光等大-中型气藏。近年来,海槽西侧的九龙山地区亦取得勘探突破,进一步揭示了下三叠统飞仙关组颗粒滩相气藏巨大的资源潜力[1-14]。与之相邻的元坝地区勘探同样活跃,2007年,河坝1井在飞仙关组三段(飞三段,T_1f^3)和下三叠统嘉陵江组二段(嘉二段,T_1j^2)获得重大突破并投入试采;此后部署的元坝1井等多口探井,均在长兴组与飞(飞仙关组)二段见到良好油气显示[15-18]。其中,长兴组礁滩相储层一直是关注的焦点,相关学者普遍认为其储集性能远优于飞仙关组储层[19-21]。前人对开江-梁平海槽东侧的飞仙关组颗粒滩相储层进行了大量研究,涉及层序地层、沉积相、成岩作用、储层特征和成藏条件等诸多方面[5,9,22-33],而针对海槽西侧飞二段的颗粒滩相储层研究则相对比较匮乏。近年来,元坝27井和元坝204井飞仙关组鲕粒滩相储层获得了工业气流,这一发现推动了元坝地区飞仙关组颗粒滩相储层研究的深入[19,34]。元坝地区飞二段发育多期颗粒滩,而颗粒滩相储层的沉积成因复杂,储层厚度横向变化大,且不同类型的颗粒滩相储层在岩石学特征、物性特征和孔隙类型方面存在显著差异,表现出极强的非均质性,且不同类型孔隙和有利储层发育的控制因素不明,有利储层预测难度大,制约了元坝地区飞仙关组的有效勘探和开发[35]。本文利用岩心、薄片、物性参数、压汞测试和成像测井等资料,对元坝地区飞二段颗粒滩相储层开展岩石学特征、物性特征和孔隙类型及结构特征的研究,探讨不同类型孔隙和有利储层发育的主控因素,以期为元坝地区飞仙关组下一步的勘探和开发部署提供科学依据。

1　研究区概况

元坝地区位于四川盆地东北部的开江-梁平海槽西侧(图1),构造上处于川东高陡构造带,处于川北坳陷与川中平缓构造带的交汇地带[36-37]。这一特殊的构造位置使该区成为盆地内应力与构造形变的调节区,其西北、东北和南部分别与九龙山构造带、通南巴构造带和川中低缓构造带相接。元坝地区飞仙关组的碳酸盐岩颗粒滩相沉积明显受开江-梁平海槽演化的控制。开江-梁平海槽形成于晚二叠世—早三叠世初期的被动陆缘拉张背景,表现为一个北西宽、南东窄的狭长三角状断陷海槽。元坝地区二叠纪—三叠纪的沉积环境受海槽的形成与关闭、米仓山-大巴山隆起以及峨眉山玄武岩喷发等重大构造-岩浆事件的协同影响[40]。东吴运动使得开江-梁平演变为陆棚环境,在元坝、龙岗和普光等地区广泛发育长兴组生物礁,近年

来均取得了油气突破。元坝地区长兴组沉积时期古地貌差异明显，在断裂坡折带容易形成镶边台地沉积，飞仙关组沉积早期继承了长兴组差异性古地貌格局，整体地势具有西高、东低的特征，自西向东分别发育了开阔台地相、台地边缘生物礁滩相、台地边缘斜坡相及陆棚相等沉积，飞一段-飞二段沉积时期属于沉积填平补齐阶段，斜坡-陆棚区发生了台地化，飞三段沉积时期总体表现为局限台地相，到飞四段沉积时期水体越来越浅，演化为局限台地-台地蒸发相。随着海槽不断消亡和台地增生，飞仙关组颗粒滩在纵、横向上具有向海槽不断迁移的特征[6,27,40-43]。

前人对川东北海槽西侧、剑阁—九龙山及元坝等地区飞仙关组开展了层序地层学研究，建立了比较统一的等时层序地层格架[16,24,33,44-45]。本研究依据成熟的划分方案，将飞仙关组自下而上划分为飞一段—飞四段（T_1f^1—T_1f^4）[46]。飞二段底界与飞一段的区分，主要依据是否出现泥晶灰岩，对应的测井曲线表现为自然伽马值先升后降、电阻率整体偏低（图 2）；飞二段顶界则以鲕粒灰岩的结束和上覆飞三段底部暗紫色泥质灰岩的出现为标志。根据地层叠置样式、小波变换和频谱分析[47-52]，将飞仙关组划分为 2 个三级层序和 5 个四级层序，飞二段由 1 个完整的四级旋回和 2 个半旋回构成（图 2）。飞二段主要发育了 3 期颗粒滩，不同期次的颗粒滩在纵向上向上数量增多、在横向上向盆地进积[6,23,38-39,42,51-56]。综合研究区野外剖面、岩性及测井响应特征，确定飞二段为典型的碳酸盐台地沉积，其内部广泛发育鲕粒滩相[42,57]，并可进一步划分为开阔台地、台地边缘、斜坡以及盆地边缘亚相（图 2，图 3）。

2　颗粒滩储层类型及其特征

飞二段沉积时期继承了飞一段的海退过程，并持续发生海退，是颗粒滩形成的关键阶段[42,58]。飞二段的岩性组合与厚度表现出明显的相控差异。台地-台地边缘相地层厚度为 100 ~ 200 m，自下而上依次发育灰色灰岩夹泥质灰岩与鲕粒、豆粒及砂屑灰岩，顶部以鲕粒和豆粒灰岩为主。斜坡-陆棚相地层厚度显著增大，岩性垂向演化清晰，底部为灰色灰岩、泥质灰岩夹砂屑灰岩，向上则过渡为以鲕粒灰岩和豆粒灰岩为主[7,43,52,59-61]。飞二段鲕粒灰岩与砂屑灰岩、微晶灰岩在垂向上频繁互层，构成典型的浅海碳酸盐岩韵律（图 2）。

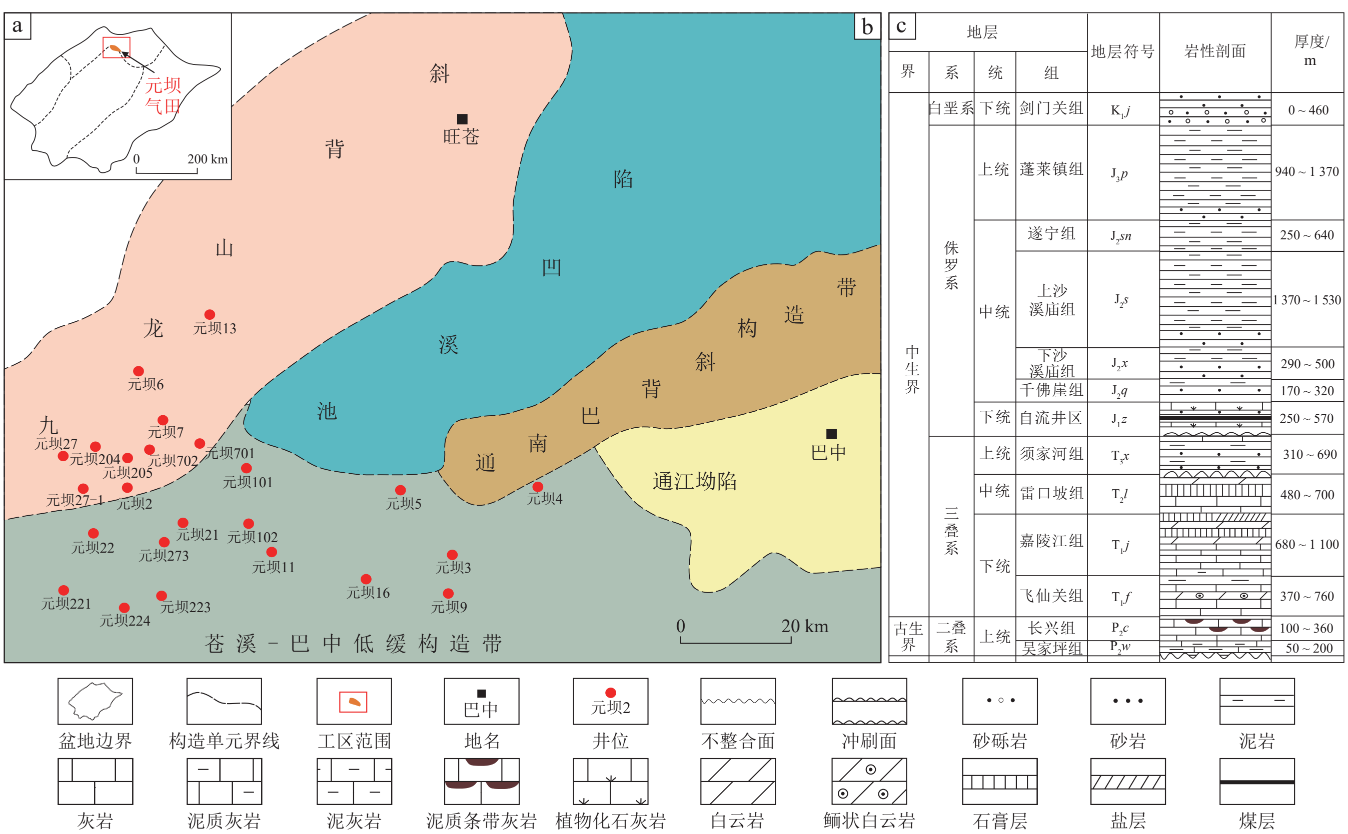

图 1　川东北元坝地区构造位置（a）、构造单元划分（b）及地层柱状图（c）[42-43]

Fig. 1　Regional location (a), structural unit division (b), and stratigraphic characteristics (c) of the Yuanba area, northeastern Sichuan Basin[42-43]

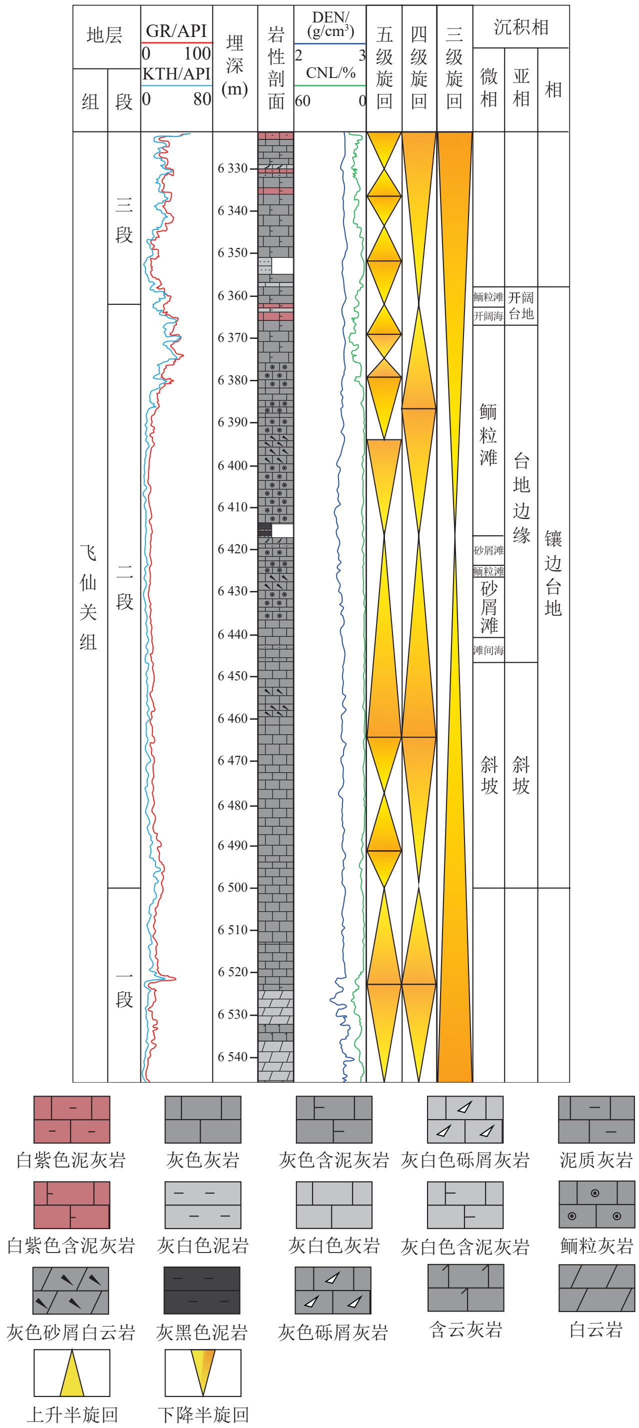

图 2　川东北元坝 204 井飞仙关组层序地层划分和飞二段沉积相综合柱状图

Fig. 2　Composite column showing the sequence stratigraphic division of Feixianguan Formation and the sedimentary facies of the Fei 2 Member (T_1f^2) in well YB204, northeastern Sichuan Basin

元坝地区开阔台地内的台内滩和台地边缘的台缘滩主要发育以鲕粒灰岩、豆粒灰岩及砂屑灰岩为主的颗粒滩相储层。台内滩鲕粒灰岩通常形成于水体较浅、水动力较强的环境,主要分布在五级层序旋回顶部[8,31]。鲕粒灰岩以亮晶胶结为特征(图 4),单层厚度多小于 4 m,横向延伸连续性较差,指示高能间歇性台地边缘沉积环境。与之共生的砂屑灰岩单层更薄,厚度通常小于 2 m,主要出现在五级层序的中上部,其与微晶灰岩的互层反映了水动力周期性减弱的低能间歇性沉积环境。台缘鲕粒滩沉积厚度较大,纵、横向分布连续性较强,主要发育在五级层序旋回中上部[57,62],单层厚度多大于 10 m,分布稳定,普遍发育交错层理,指示强水动力环境;岩性以厚层块状亮晶鲕粒灰岩为主,常伴生豆粒灰岩,鲕粒间多呈晶粒状方解石胶结,以正常鲕和表皮鲕为主,部分鲕粒因内部全部溶蚀可形成负鲕结构(图 4)。鲕粒粒径较为均一,主要集中在 0.5 ~ 2.0 mm,其中直径大于 2 mm 的颗粒通常被称为豆粒或巨鲕(图 4i)。研究区飞二段优质储层的形成主要受控于高能沉积与特定成岩路径的耦合作用。微观岩石学特征显示,储层以发育同心纹层清晰的鲕粒为主,其含量约达 70%。鲕粒经历了 2 期胶结作用,揭示了成岩流体的演化过程:早期形成的等厚环边纤维状方解石有效保存了原始孔隙格架;而晚期充填的晶粒状方解石则显著降低了残余粒间孔的储集性能(图 4b,h,i)。建设性成岩作用表现为早期的选择性溶蚀在鲕粒内形成铸模孔和粒内溶孔(图 4a,d,j,k)。孔隙中广泛分布的沥青(图 4a,c)表明存在早期烃类充注事件。此外,同期沉积的豆粒灰岩以亮晶胶结为主,部分可见弱白云石化作用,并经历了相似的溶蚀-充填过程,其溶洞被斑状方解石部分充填(图 4i)。

研究区广泛分布的砂屑灰岩形成于高能鲕粒滩沉积序列中的相对低能间歇期,其岩石学特征完整记录了多阶段的成岩演化史。砂屑灰岩均匀分布在这五级层序中,其次棱角状-次圆状的砂屑颗粒、局部发育的藻屑以及亮晶与泥晶混合的基质胶结(图 5a—d),共同指示了相对较弱的水动力条件。成岩作用对其储集性能具有决定性影响:①普遍发生的重结晶使部分颗粒呈现残余结构(图 5a,c);②不同期次的胶结作用(早期纤维状方解石环边与后期粉晶方解石大规模充填)显著降低了原生孔隙度(图 5c);③有限的后期溶蚀虽形成部分粒内溶孔,但孔隙多被沥青半充填或全充填(图 5c)。这一完整的“胶结—溶蚀—烃类充注”成岩演化路径,决定了砂屑灰岩在研究区仅构成次要储集单元。

飞二段部分砂屑灰岩发生了白云石化作用,如元坝 21 井与元坝 9 井飞二段砂屑灰岩多已发生白云石化作用,形成残余砂屑白云岩(图 6)。白云石晶体之间广泛发育的晶间孔或溶蚀孔成为有利储集空间(图 6b,d)。

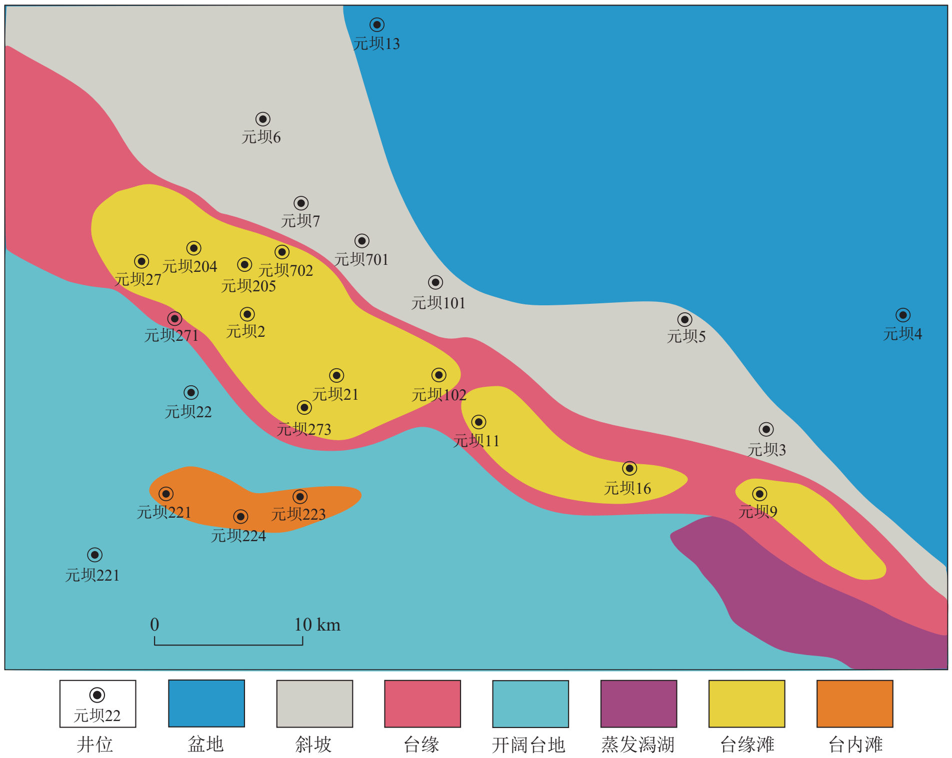

图3 川东北元坝地区飞二段沉积中期沉积相平面分布

Fig. 3 Map showing the distribution of mid-term sedimentary facies in the T_1f^2, Yuanba area, northeastern Sichuan Basin

3 颗粒滩储层物性特征

对飞二段不同样品的物性统计(图7)及对应的直方图(图8)分析显示,孔隙度主要分布于2.01%~16.27%,平均值为4.25%。孔隙度频率呈双峰式分布,孔隙度主峰位于2.00%~4.00%(占样品的58.0%),次峰为4.00%~6.00%(占样品的29.3%),两者合计占比超过87.0%,孔隙度大于6.00%的样品仅占12.7%,整体属于低-中孔储层。渗透率介于(0.002~1 340.284)×10^{-3} μm^2,平均值仅为0.110×10^{-3} μm^2,分布极不均匀。约70.0%的样品渗透率低于0.100×10^{-3} μm^2,其中以渗透率为(0.010~0.100)×10^{-3} μm^{2}的样品占比最高(42.5%),而渗透率高于10.000×10^{-3} μm^{2}的样品仅占3.3%(图8)。

进一步对比3期鲕粒滩的物性可见显著阶段性差异:第二期滩体物性最佳,平均孔隙度与平均渗透率分别为4.05%和0.186×10^{-3} μm^2;第一期与第三期物性相对较差,平均孔隙度分别为3.08%和3.18%,平均渗透率分别为0.098×10^{-3} μm^{2}和0.137×10^{-3} μm^2。

储集空间和渗流通道的配置关系是储层类型划分的根本依据。在碳酸盐岩储层中,裂缝空间分布复杂且不均,其与基质孔隙的有机结合,形成了特有的双重孔隙结构系统[63-65]。本研究基于孔-渗关系(图9)与铸体薄片观察结果,将飞二段储层划分为孔隙型、裂缝型及裂缝-孔隙型3类,其孔-渗耦合关系差异显著。其中,裂缝-孔隙型储层是区内最重要的储集类型,以次生孔隙为主要储集空间(平均孔隙度为4.31%),微裂缝则显著提升了孔隙连通性,形成了孔-渗协同增长的典型特征,如元坝204井因裂缝发育,其渗透率最高可达1 340.284×10^{-3} μm^2;孔隙型储层兼具原生与次生孔隙,但因缺乏有效裂缝系统,渗流能力有限,多表现为高孔、低渗特征;裂缝型储层则以裂缝网络主导储层渗流,呈现低孔、中-高渗特征,孔隙度与渗透率之间的相关性微弱。

4 颗粒滩储层孔隙类型与结构特征

4.1 孔隙类型及其特征

元坝地区飞二段颗粒滩储层的储集空间类型主要为孔隙和裂缝。孔隙以粒内溶孔与铸模孔为主,粒间孔较少见;在残余砂屑白云岩中发育晶间孔(图3)。裂缝以构造裂缝和成岩缝为主(图3a,图9,图10)。

粒内溶孔多发育于飞二段鲕粒灰岩中(图3),在砂屑灰岩和豆粒灰岩中则较为少见。在鲕粒灰岩发育的

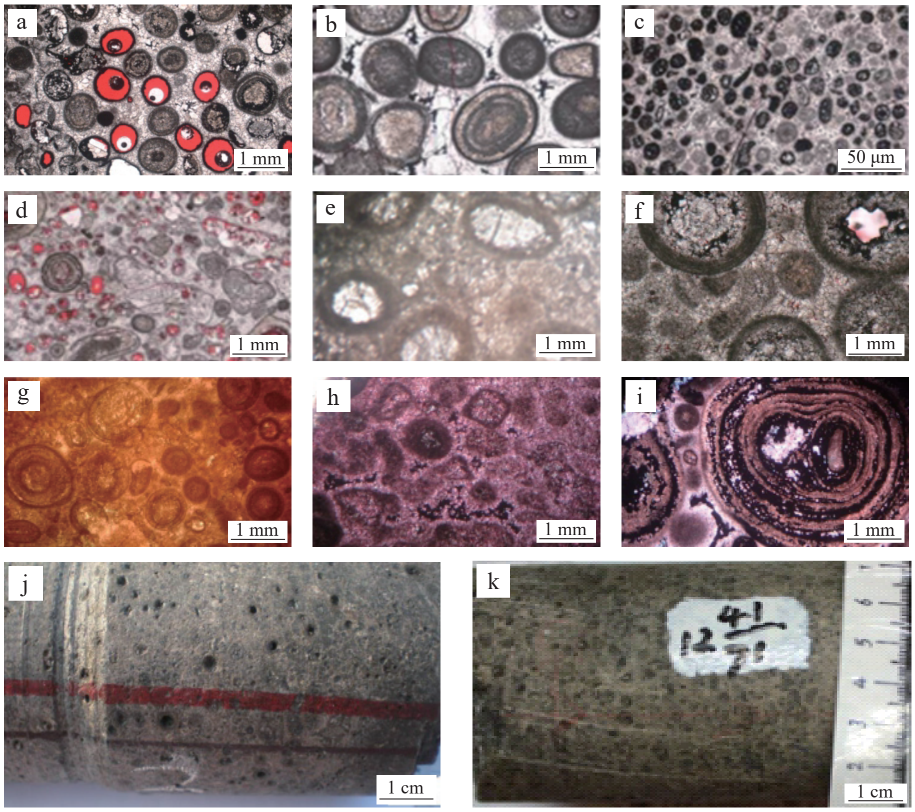

图 4　川东北元坝地区飞二段鲕粒灰岩和豆粒灰岩特征镜下照片

Fig. 4　Images showing the characteristics of oolitic and pisolitic limestones in the T_1f^2, Yuanba area, northeastern Sichuan Basina.

a. YB27 井,埋深 6 125. 81 m,亮晶鲕粒灰岩,铸体薄片,单偏光(-);b. YB21 井,埋深 6 660. 28 m,亮晶鲕粒灰岩,铸体薄片,单偏光(-);c. YB27 井,埋深 6 126. 67 m,鲕粒灰岩,铸体薄片,单偏光(-);d. YB27 井,埋深 6 131. 97 m,溶孔鲕粒灰岩,铸体薄片,单偏光(-);e. YB9 井,埋深 6 645. 00 m,泥晶鲕粒灰岩,铸体薄片,单偏光(-);f. YB22 井,埋深 6 408. 49 m,亮晶鲕粒灰岩,孔隙内壁残留少量有机质,铸体薄片,单偏光(-);g. YB22 井,埋深 6 444. 00 m,亮晶鲕粒灰岩,普通薄片(染色),单偏光(-);h. YB101 井,埋深 6 795. 00 m,鲕粒砂屑灰岩,普通薄片(染色),单偏光(-);i. YB204 井,埋深 6 416. 05 m,含豆粒鲕粒灰岩,普通薄片(染色),单偏光(-);j. YB27 井,埋深 6 127. 92 ~ 61 28. 10 m,溶孔鲕粒灰岩,岩心照片;k. YB204 井,埋深 6 422. 11 ~ 6 422. 24 m,溶孔鲕粒灰岩,岩心照片

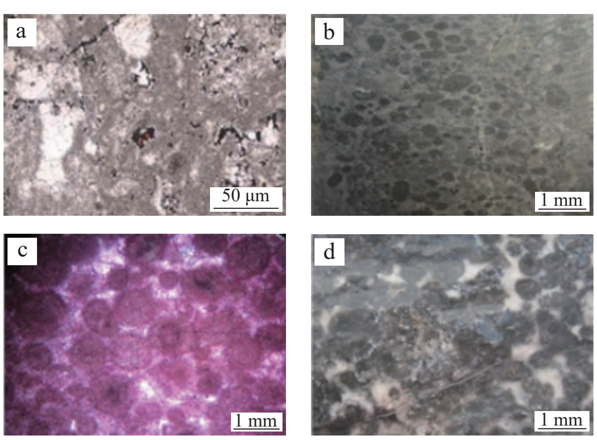

图 5　川东北元坝地区飞二段砂屑灰岩特征镜下照片

Fig. 5　Thin-section photomicrographs of calcarenites from the T_1f^2, Yuanba area, northeastern Sichuan Basin

a. YB271 井,埋深 6 208. 12 m,藻砂屑灰岩,普通薄片,单偏光(-);b. YB101 井,埋深 6 797. 70 m,亮晶砂屑灰岩,普通薄片,单偏光 (-);c. YB101 井,埋深 6 793. 80 m,亮晶鲕粒砂屑灰岩,普通薄片(染色),单偏光(-);d. YB101 井,埋深 6 797. 70 m,亮晶含鲕砂屑灰岩,普通薄片,单偏光 (-)

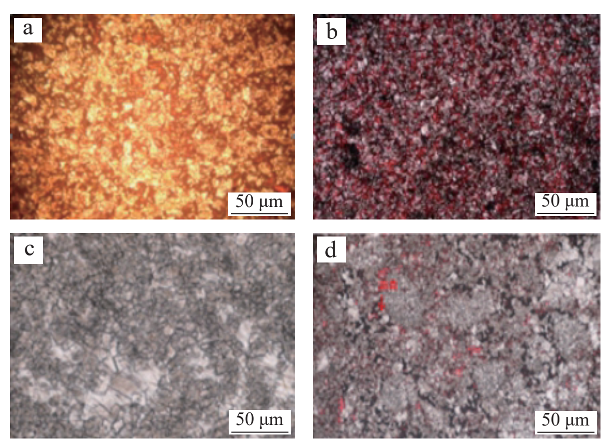

图 6　川东北元坝地区飞二段残余砂屑白云岩特征镜下照片

Fig. 6　Thin-section photomicrographs of residual doloarenites from the T_1f^2, Yuanba area, northeastern Sichuan Basin

a. YB21 井,埋深 6 656. 20 m,残余砂屑灰质白云岩,普通薄片(染色),单偏光 (-);b. YB21 井,埋深 6 657. 09 m,残余砂屑灰质白云岩,普通薄片,正交光 (-);c. YB9 井,埋深 6 681. 77 m,残余砂屑含灰质白云岩,普通薄片,单偏光 (-);d. YB9 井,埋深 6 679. 26 m,溶孔残余砂屑粉晶白云岩,铸体薄片,单偏光 (-)

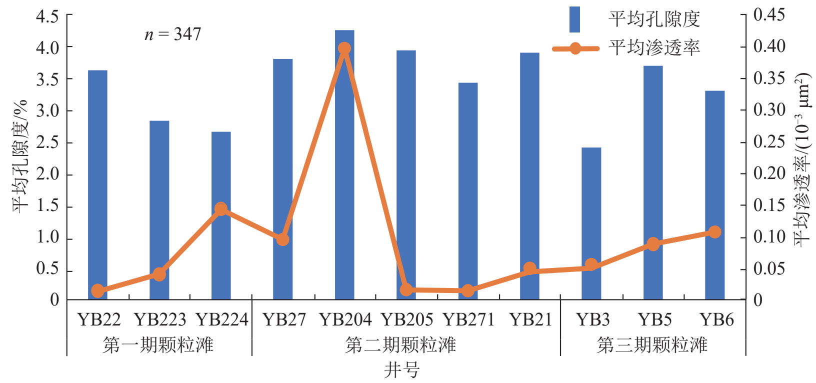

图7　川东北元坝地区飞二段储层物性统计柱状图

Fig. 7　Bar chart showing the reservoir physical properties of the T_1f^2, Yuanba area, northeastern Sichuan Basin

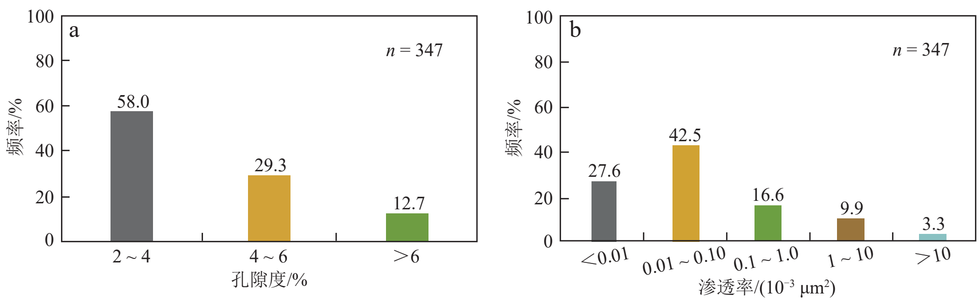

图8　川东北元坝地区飞二段储层孔隙度(a)与渗透率(b)频率分布直方图

Fig. 8　Frequency distribution histograms of porosity (a) and permeability (b) in the T_1f^2, Yuanba area, northeastern Sichuan Basin

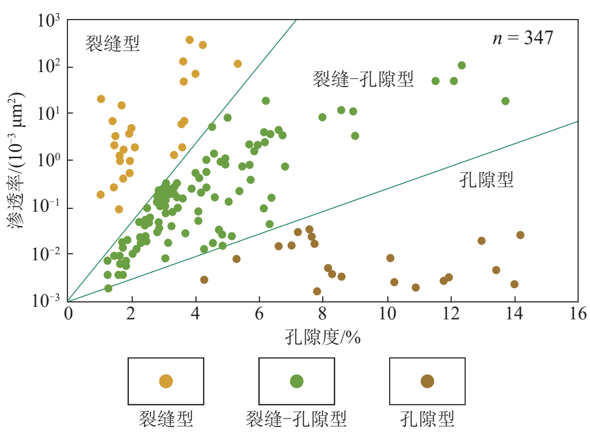

图9　川东北元坝地区飞二段储层孔隙度与渗透率的关系

Fig. 9　Porosity-permeability cross plot of the T_1f^2, Yuanba area, northeastern Sichuan Basin

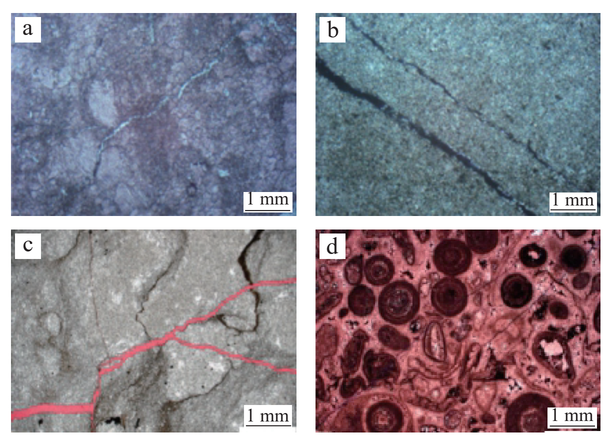

图10　川东北元坝地区飞二段裂缝类型及其特征镜下照片

Fig. 10　Images showing the fracture types and characteristics in the T_1f^2, Yuanba area, northeastern Sichuan Basin

a. YB4井,埋深6 673. 00 m,云质残余砂屑灰岩,铸体薄片,单偏光(-);
b. YB4井,埋深7 148. 00～7 150. 00 mm,泥晶灰岩,普通薄片,单偏光(-);
c. YB3井,埋深6 703. 38 m,微晶灰岩,铸体薄片,单偏光(-);
d. YB204井,埋深6 411. 08 m,亮晶鲕粒灰岩,普通薄片(染色),单偏光(-)

岩心表面,常可见密集分布的粒内溶孔,多由鲕粒的选择性溶蚀作用形成。根据成因,研究区鲕粒灰岩的储集空间可分为3类:①选择性溶孔,主要为鲕粒内溶孔,由早期不稳定矿物(如文石)溶解形成;若鲕粒完全溶蚀仅保留外壳,则形成鲕模孔(图3c,m),此类孔隙早期多被沥青充填,晚期则多被矿物部分充填,呈半月状。②埋藏溶孔,以粒间溶孔为主(图3f),由后期深埋环境下胶结物发生溶蚀形成,属于非选择性溶蚀。③残余原生孔,即粒间孔,本身不发育且形态不规则。另外,沥青的分布是关键的成岩时间标志:充填于早期鲕模孔中的沥青表明该部分孔隙形成于油气充注之前,属于有效孔隙。晶间孔主要发育于残余砂屑白云岩中。白云石化

作用后,白云石以粉晶结构为主,晶间孔均匀发育。部分白云石晶体发生溶蚀可形成晶粒溶孔(图6d),局部被沥青充填或半充填,面孔率一般介于3%~10%。

飞二段颗粒滩中发育的裂缝主要包括构造裂缝和成岩缝(图3a,图4a,图10)。裂缝系统对储层渗流具有关键控制作用。元坝地区飞仙关组发育3期构造裂缝[23-26,42,66],主要分布在靠近九龙山背斜一侧,以高角度裂缝为主,可分为2期:早期裂缝多被方解石、白云石和石英充填而呈闭合状;晚期裂缝缝壁洁净、未见矿物充填,缝宽介于0.02~0.50 mm(图10),是当前有效的渗流通道。此外,由压溶作用形成的缝合线在颗粒滩中主要沿颗粒边缘分布,且在这些缝合线上常见沥青浸染(图11),指示其曾是埋藏期溶蚀流体与烃类运移的优势通道,构成一类易被忽视却至关重要的储集空间。此套"构造-成岩"双成因裂缝系统控制了储层的非均质性,并形成了复杂的渗流通道。基于薄片鉴定、扫描电镜及成像测井资料分析,可将飞二段裂缝分为高角度高导缝(倾角>45°)、低角度高导缝(倾角≤45°)、微裂缝、诱导缝和缝合线,未见低导缝。其中,高角度高导缝数量多于低角度高导缝;微裂缝在元坝9井中较为发育,诱导缝则在元坝223井中较为发育。

4.2　孔隙结构特征

元坝地区飞二段储层的储集性能主要受孔隙-喉道系统制约。压汞资料显示,储层孔隙结构具有较强的非均质性,主要参数如下:①排驱压力(p_{c10})介于0.086 2~44.871 6 MPa,算术平均值为6.998 9 MPa,

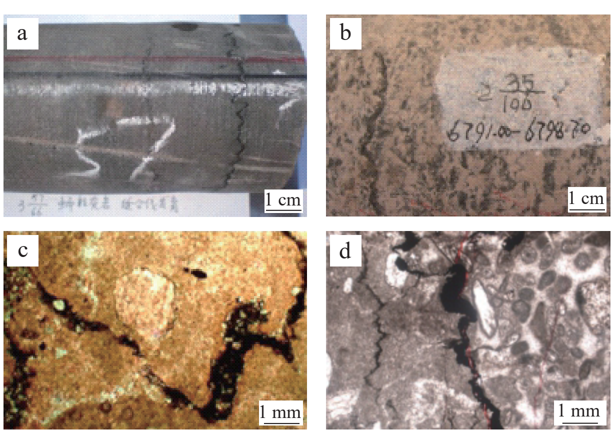

图11　川东北元坝地区飞二段缝合线类型及其特征照片

Fig. 11　Images showing the stylolite types and characteristics in the T_1f^2, Yuanba area, northeastern Sichuan Basin

a. YB27井,埋深6 126.51~6 126.57 m,泥晶灰岩,岩心照片;b. 砂屑灰岩,YB101井,埋深6 794.80~6 794.87 m,岩心照片;c. YB27井,埋深6 115.50 m,泥晶灰岩,普通薄片镜下照片,正交光(-);d. YB27井,埋深6 133.80 m,砂屑灰岩,高角度缝合线,铸体薄片镜下照片,单偏光(-)

几何平均值为3.370 8 MPa,几何平均值显著低于算术平均值,表明储层喉道连通性呈正偏态分布;②中值压力(p_{c50})变化范围为0.192 7~180.085 8 MPa,算术平均值为29.548 0 MPa,几何平均值为19.384 0 MPa,较大的数值跨度进一步印证了孔隙结构的非均质性;③孔隙中值喉道半径(R_{c50})最小值仅为0.004 2 μm,最大值可达3.891 2 μm,算术平均值为0.109 6 μm,几何平均值为0.040 6 μm,几何平均值远小于算术平均值,表明储层喉道以微喉道为主,且分布离散性强;④中值喉道半径大于0.075 0 μm的样品占比介于0.131 2%~87.995 7%,算术平均值为30.504 1%,几何平均值为17.898 8%,较大的波动范围表明不同样品有效连通喉道的发育程度差异显著。总体而言,飞二段储层的储集空间以小孔和微孔(孔径<2 μm)为主,喉道则以细喉为主,粗-中喉样品合计仅占3.480 0%,孔-喉组合多呈"中孔-细喉"特征。与之相应,较高的排驱压力与中值压力直接反映出孔隙结构整体较差,流体渗流所需克服的阻力较大。

5　颗粒滩储层孔隙发育控制因素

元坝地区飞二段不同颗粒滩储层在孔、渗性能上存在显著差异,主要受沉积条件、成岩作用和构造作用的共同控制[52,59-64,67-68]。结合研究区实际资料分析,这对储层发育的控制作用可概括如下:①沉积条件决定了颗粒滩储层的岩石类型及特征,直接控制原生孔隙和胶结物的发育,进而间接影响次生孔隙的发育程度;②不同成岩阶段的成岩环境差异控制成岩作用的类型与强度,间接决定孔隙的类型及演化;③构造作用则控制裂缝的发育程度,并进一步促进附近溶孔-溶洞的形成,改善储层渗流能力。

5.1　沉积条件控制储层岩石类型及孔隙发育

沉积相带和储层岩石类型是储层发育的基础。沉积条件不仅决定了颗粒滩的岩石组分与结构,直接制约原生孔隙与胶结物的发育,还通过影响早期成岩环境间接控制次生孔隙的发育程度。

元坝地区飞二段颗粒滩储层主要形成于台内滩和台缘滩两种沉积环境[9,23,30,69]。不同环境中形成的颗粒滩储层在岩石类型、物性特征及孔隙类型方面均存在明显不同,表现出显著的相控分异特征。根据岩心物性数据统计,飞二段储层孔隙度主体分布在2.00%~26.80%。其中,台缘滩储层平均孔隙度为3.84%,明显优于台内滩储层的2.95%,表明台缘带储层物性显

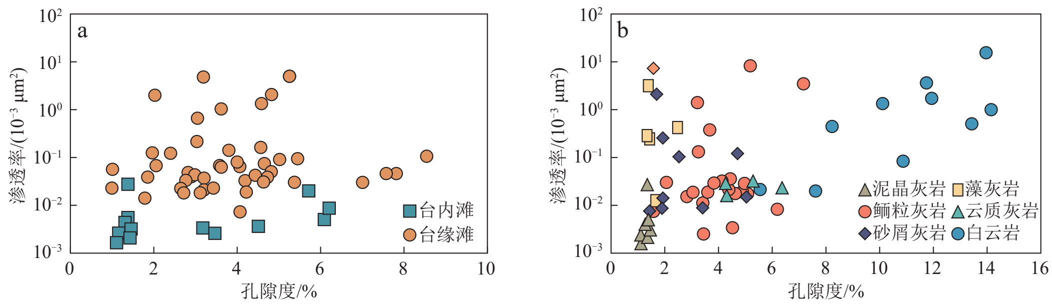

图12　川东北元坝地区飞二段不同相带(a)及不同岩性(b)储层孔-渗相关性

Fig. 12　Correlation between porosity and permeability for different facies zones (a) and different lithologies (b) in the T_1f^2 reservoirs, Yuanba area, northeastern Sichuan Basin

著优于台内滩。此外,同一滩体内部不同部位的储集条件亦存在明显差异,储层质量自滩核向滩缘过渡带及滩缘依次变差。岩性对物性的控制作用同样显著。根据不同岩性的孔-渗散点图(图12)可知,颗粒白云岩的物性最好,其次为鲕粒灰岩、砂屑灰岩和豆粒灰岩。颗粒白云岩之所以表现出最优的储集性能,应与其经历了白云石化作用和埋藏溶蚀作用的双重改造密切相关。

受海平面变化旋回控制,元坝地区飞仙关组台地边缘与台内鲕粒滩主要发育于各级层序旋回的顶部。该时期水体整体变浅、水动力能量较强,颗粒滩储层粒度较粗,颗粒间悬浮的泥晶被淘洗干净,原生孔隙较发育,为后期次生孔隙的形成奠定了基础。台缘滩与台内滩多发育于古地貌高地[70],这为同生-准同生期大气淡水的淋滤与溶蚀作用提供了有利条件,是早期孔隙发育的关键控制因素。此外,台缘滩邻近海槽生油区,有机质成熟过程中排放的有机酸先进入临近的台缘滩储层,溶解颗粒及早期亮晶胶结物,形成大量溶蚀次生孔隙。因此,台缘滩的储集性能普遍优于台内滩。碳酸盐岩储层的演化普遍遵循“马太效应”,即早期具备良好原生孔隙的储层,在后续成岩改造中往往占据优势,更易于形成规模大、连通性好且分布稳定的优质储集空间[71-72]。颗粒滩单个滩体的厚度和分布面积同样控制着原生孔的发育与保存,进而影响早期胶结物的发育程度及压实作用强度。单个滩体规模越大,次生粒间孔的发育与保存机率也就越高。

5.2　成岩环境差异控制孔隙类型及发育程度

元坝地区飞二段颗粒滩储层经历了同生-准同生、早成岩、中成岩和晚成岩等多个阶段的成岩改造。不同埋藏阶段的成岩环境差异显著,导致成岩作用类型各异,进而控制了孔隙的类型与发育程度(图13)。其中,同生-准同生期溶蚀作用、埋藏溶蚀作用及白云石化作用有利于孔隙发育,而压实作用、胶结作用和充填作用则显著降低了孔隙度。

元坝地区飞二段颗粒滩中发育的溶蚀孔隙以粒内溶孔和铸模孔为主(图3),具有明显的选择性溶蚀特征。部分孔隙呈新月状(或半月状),为同生期渗流带大气淡水淋滤与选择性溶蚀的典型标志[73];与之相对应,这些孔隙充填物呈现昏暗-不发光的阴极发光特征,指示低离子浓度、低氧化性的大气水成岩环境[42,74-77]。上述特征共同限定了该期建设性成岩作用的发生时期与流体性质。部分粒内溶孔在垂向上被不同结构的胶结物或泥粉晶充填,并发育典型的示顶底构造,表明其形成后经历了渗流成岩环境。发育粒内溶孔的颗粒滩储层,压实弱、颗粒多呈漂浮或点接触,集中分布于高频层序的中、上部。这些特征共同指示其形成时间较早,与高频海平面下降引起的同生期大气淡水淋滤溶蚀作用密切相关,属于典型的层序控储型孔隙[73]。与之相对,少量粒间溶孔可能源于埋藏阶段酸性流体的二次溶蚀,该期流体沿早期孔隙网络运移,对储层进行叠加改造。综上所述,研究区孔隙系统呈现“同生期层序控制型溶蚀奠定基础,埋藏期流体改造型溶蚀叠加优化”的阶段性建设模式。

白云石化作用是控制飞二段优质储层发育的关键成岩作用类型。研究区白云岩与灰岩的储集性能差异显著(图12),白云岩物性优势明显,约60%的样品孔隙度超过2%,而灰岩储集物性普遍较差。单井数据显示,储层厚度与鲕粒白云岩厚度呈显著正相关,但与鲕粒灰岩厚度无明显关联,表明白云岩构成了飞二段有利储层的物质基础[3,78]。综合来看,白云石化与非白云石化颗粒滩储层的物性差异,主要取决于埋藏酸性流体侵入后的运移模式。在白云石化颗粒滩中,晶间孔和晶粒溶孔发育,流体易于发生侧向输运,进而形成更大规模的成岩改造储层(图13);而残余粒间孔发育

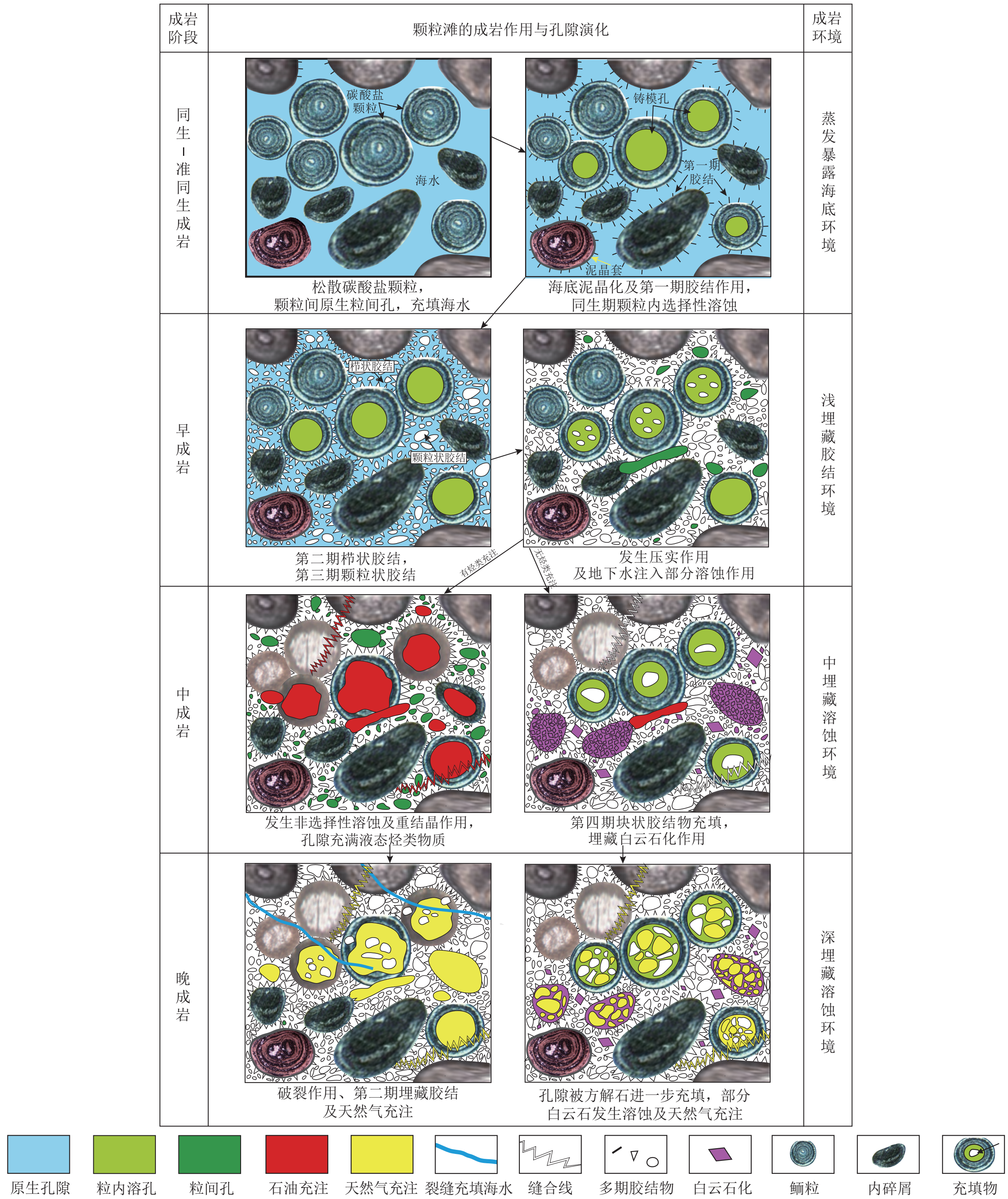

图 13　川东北元坝地区飞二段颗粒滩储层成岩及演化模式示意图

Fig. 13　Diagram showing the diagenesis and evolution model for granular shoal reservoirs in the T_1f^2, Yuanba area, northeastern Sichuan Basin

的鲕粒灰岩储层,因孔隙孤立、缺乏有效侧向运移通道,流体活动主要局限于断裂-裂缝系统附近,其对储层的影响相对有限。此外,深埋藏条件下白云石的溶解速率明显高于方解石,这也是白云石化颗粒滩孔隙更发育的另一重要原因。

5.3　构造作用促进裂缝及溶蚀孔隙发育

构造作用对储层孔隙发育的影响主要体现在裂缝的形成与演化方面。受燕山期和喜马拉雅期陆内构造及新生代晚期青藏高原东缘冲断隆升的共同影响,研究

区发育了龙门山北段冲断带、米仓山南缘冲断带以及九龙山背斜。元坝气田西北部(如YB27井和YB204井)飞仙关组储层物性显著优于东部,部分原因在于其处于构造高部位,有位置优势[79-80]。研究区裂缝系统受九龙山背斜控制,其多期活动清晰记录了构造—成岩—烃类充注的耦合过程[81-85]。如前所述,飞二段共识别出3期裂缝:①第一期形成于早成岩阶段,充填沥青污染的方解石,被后期裂缝切穿;②第二期形成于中成岩A期,即液态烃阶段,部分充填沥青,切割第一期但被第三期切割;③第三期形成于晚成岩阶段(气态烃充注),基本无充填,切割前两期。其中,第二期与第三期裂缝对储层具有建设性贡献,尤以未充填的第三期裂缝贡献最大[25]。这些裂缝不仅是重要的渗流通道,更是孔隙水与有机酸运移的优势路径,有效促进了裂缝周边的溶蚀扩孔作用,从而在改善储层渗透性的同时,局部提升了孔隙度。

6 结论

1)元坝地区飞二段发育3期颗粒滩,包括台内滩和台缘滩,颗粒滩储层主要为鲕粒灰岩和砂屑灰岩,部分砂屑灰岩发生白云石化而成残余砂屑白云岩。飞二段储层主要以低孔-中孔、低渗为主,第二期鲕粒滩的物性及孔隙结构特征最优。按孔、渗空间配置关系,可将颗粒滩储层划分为孔隙型、裂缝型和裂缝-孔隙型3类,其中裂缝-孔隙型储层最为有利。

2)飞二段颗粒滩储层储集空间类型包括孔隙和裂缝2类。孔隙以鲕粒内溶孔和铸模孔为主,少见粒间孔,在残余砂屑白云岩中发育晶间孔和晶粒溶孔。裂缝发育3期,以构造裂缝和成岩缝为主,其中构造裂缝主要分布在靠九龙山背斜一侧,以高角度裂缝为主;成岩缝以缝合线为主,多围绕颗粒边缘分布。研究区孔隙结构以中孔-细喉和小孔-细喉为主,整体孔隙结构与孔、渗条件较差。

3)受沉积条件、成岩作用与构造作用的共同控制,飞二段不同颗粒滩储层的孔、渗特性差异显著。沉积条件所决定的沉积相带与岩石类型,控制了原生孔隙和胶结物的发育,进而间接影响次生孔隙的形成,其中颗粒云岩物性最优。同生-准同生期淋滤与溶蚀作用、埋藏溶蚀作用以及白云石化作用是飞二段颗粒滩储层孔隙发育的关键成岩过程。构造作用则通过裂缝发育及其附近溶孔、溶洞的形成,显著改善了储层的渗透性能。综合分析表明,溶孔-裂缝型白云石化颗粒滩储层是研究区最有利的储层类型。

参 考 文 献

[1] 蔡勋育,马永生,李国雄,等.普光气田下三叠统飞仙关组储层特征[J].石油天然气学报,2005,27(1):43-45.
CAI Xunyu, MA Yongsheng, LI Guoxiong, et al. Characteristics of the Lower Triassic Feixianguan Formation reservoir in the Puguang Gas Field[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(1): 43-45.

[2] 戴荔果,郑荣才,李爽,等.川东-渝北地区飞仙关组层序-岩相古地理特征[J].中国地质,2009,36(1):110-119.
DAI Liguo, ZHENG Rongcai, LI Shuang, et al. Sequence-based lithofacies and paleogeography of Lower Triassic Feixianguan Formation in eastern Sichuan and northern Zhongqing area[J]. Geology in China, 2009, 36(1): 110-119.

[3] 穆曙光,周茂,华永川.川东北地区下三叠统飞仙关组白云岩成因类型[J].天然气工业,1994,14(3):23-27,98-99.
MU Shuguang, ZHOU Mao, HUA Yongchuan. Dolomite genetic types in Feixianguan Formation of Lower Triassic series in northeast area of Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 1994, 14(3): 23-27, 98-99.

[4] 魏国齐,杨威,万怡平,等.扬子地块西北缘二叠系-中三叠统层序地层与沉积相展布[J].岩石学报,2011,27(3):741-748.
WEI Guoqi, YANG Wei, WAN Yiping, et al. Stratigraphic sequence and sedimentary facies distribution of the Permian Middle Triassic in the northwestern margin of the Yangtze Block[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(3): 741-748.

[5] 王罗兴,谢芳,李油.川东北飞仙关组鲕滩气藏地震响应特征及勘探展望[J].天然气工业,2000,20(5):26-28.
WANG Luoxing, XIE Fang, LI You. Seismic response characteristics and exploration prospects of the oolitic beach gas reservoirs in Feixianguan Formation in northeast Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(5): 26-28.

[6] 王兴志,张帆,马青,等.四川盆地东部晚二叠世—早三叠世飞仙关期礁、滩特征与海平面变化[J].沉积学报,2002,20(2):249-254.
WANG Xingzhi, ZHANG Fan, MA Qing, et al. The characteristics of reef and bank and the fluctuation of sea-level in Feixianguan period of Late Permian-Early Triassic, east Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(2): 249-254.

[7] 王一刚,刘划一,文应初,等.川东北飞仙关组鲕滩储层分布规律、勘探方法与远景预测[J].天然气工业,2002,22(增刊1):14-19.
WANG Yigang, LIU Huayi, WEN Yingchu, et al. Distribution law, exploration method and prospectiveness prediction of the oolitic beach reservoirs in Feixianguan Formation in northeast Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(S1): 14-19.

[8] 郑荣才,罗平,文其兵,等.川东北地区飞仙关组层序—岩相古地理特征和鲕滩预测[J].沉积学报,2009,27(1):1-8.
ZHENG Rongcai, LUO Ping, WEN Qibing, et al. Characteristics of sequence-based lithofacies and paleogeography, and prediction

of oolitic shoal of the Feixianguan Formation in the northeastern Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(1): 1-8.

[9] 张学丰,赫云兰,马永生,等.川东北飞仙关组沉积控储机理研究[J].地学前缘,2011,18(4):224-235.
ZHANG Xuefeng, HE Yunlan, MA Yongsheng, et al. Controls of sedimentation on reservoir formation in Lower Triassic Feixianguan Formation, northeastern Sichuan Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 224-235.

[10] 魏国齐,杨威,刘满仓,等.鄂西-城口地区"海槽"西侧长兴组-飞仙关组台缘礁滩特征与展布[J].石油与天然气地质,2021,42(3):661-672
WEI Guoqi, YANG Wei, LIU Mancang, et al. Characteristics and distribution of platform-margin reef-shoal reservoirs in Changxing-Feixianguan Formations to the west of ocean trough, E'xi-Chengkou area[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 661-672.

[11] BENVENUTI M, BERTINI A, CONTI C, et al. Integrated analyses of litho- and biofacies in a Pliocene cyclothemic, alluvial to shallow marine succession (Tuscany, Italy)[J]. Geobios, 2007, 40(2): 143-158.

[12] DIAZ M R, EBERLI G P, BLACKWELDER P, et al. Microbially mediated organomineralization in the formation of ooids [J]. Geology, 2017, 45(9): 771-774.

[13] DUGUID S M A, KYSER T K, JAMES N P, et al. Microbes and ooids [J]. Journal of Sedimentary Research, 2010, 80 (3): 236-251.

[14] PACTON M, ARIZTEGUI D, WACEY D, et al. Going nano: A new step toward understanding the processes governing freshwater ooid formation[J]. Geology, 2012, 40(6): 547-550.

[15] 黄福喜,杨涛,闫伟鹏,等.四川盆地龙岗与元坝地区礁滩成藏对比分析[J].中国石油勘探,2014,19(3):12-20.
HUANG Fuxi, YANG Tao, YAN Weipeng, et al. Comparison and analysis of reef-bank gas reservoirs in Longgang and Yuanba areas in Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(3): 12-20.

[16] 胡欣,裴森奇,张本健,等.四川盆地剑阁—九龙山地区下三叠统飞仙关组地层层序演化[J].天然气勘探与开发,2017,40(3):8-15.
HU Xin, PEI Senqi, ZHANG Benjian, et al. Stratigraphic sequence evolution of Lower Triassic Feixianguan Formation in Jiange-Jiulongshan area, the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2017, 40(3): 8-15.

[17] 龙胜祥,游瑜春,刘国萍,等.元坝气田长兴组超深层缓坡型礁滩相储层精细刻画[J].石油与天然气地质,2015,36(6):994-1000.
LONG Shengxiang, YOU Yuchun, LIU Guoping, et al. Fine characterization of ultra-deep reef-shoal reservoirs of ramp-type in Changxing Formation in Yuanba Gas Field, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 994-1000.

[18] 李宏涛,肖开华,龙胜祥,等.四川盆地元坝地区长兴组生物礁储层形成控制因素与发育模式[J].石油与天然气地质,2016,37(5):744-755.
LI Hongtao, XIAO Kaihua, LONG Shengxiang, et al. Controlling factors and development models of biohermal reservoirs of the Changxing Formation in Yuanba area, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 744-755.

[19] 程锦翔,谭钦银,郭彤楼,等.川东北元坝地区长兴组-飞仙关组碳酸盐台地边缘沉积特征及演化[J].沉积与特提斯地质,2010,30(4):29-37.
CHENG Jinxiang, TAN Qinyin, GUO Tonglou, et al. Sedimentary characteristics and evolution of the carbonate platform-margins in the Changxing Formation-Feixianguan Formation in Yuanba, northeastern Sichuan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2010, 30(4): 29-37.

[20] 范小军.川东北元坝地区长兴组与飞仙关组天然气成藏差异性成因[J].天然气工业,2012,32(6):15-20.
FAN Xiaojun. Causes of differences of natural gas pooling between the Changxing Formation and the Feixianguan Formation in Yuanba, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(6): 15-20.

[21] 詹仲伦,詹鑫,殷樱子.川东北飞仙关-长兴组气藏成藏条件及其富集规律[J].石油实验地质,2014,36(2):165-170,175.
ZHAN Zhonglun, ZHAN Xin, YIN Yingzi. Reservoir condition and enrichment regulation in Changxing-Feixianguan formations, northeastern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(2): 165-170, 175.

[22] 杨莹莹,李国蓉,邓勇.川东北开江-梁平陆棚两侧飞仙关组储层特征[J].石油与天然气地质,2012,33(5):736-742.
YANG Yingying, LI Guorong, DENG Yong. Reservoir characteristics of the Feixianguan Formation in Kaijiang-Liangping continental shelf flanks, northeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 736-742.

[23] 马永生,蔡勋育,赵培荣.元坝气田长兴组—飞仙关组礁滩相储层特征和形成机理[J].石油学报,2014,35(6):1001-1011.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. Characteristics and formation mechanisms of reef-shoal carbonate reservoirs of Changxing-Feixianguan formations, Yuanba gas field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(6): 1001-1011.

[24] 段金宝,彭劲.四川盆地东北部元坝地区下三叠统飞仙关组层序-沉积相特征[J].海相油气地质,2014,19(2):47-53.
DUAN Jinbao, PENG Jin. Lower Triassic Feixianguan stratigraphical sequences and sedimentary facies characteristics in Yuanba area in the northeast of Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2014, 19(2): 47-53.

[25] 郭彤楼.川东北元坝地区长兴组—飞仙关组台地边缘层序地层及其对储层的控制[J].石油学报,2011,32(3):387-394.
GUO Tonglou. Sequence strata of the platform edge in the Changxing and Feixianguan formations in the Yuanba area, northeastern Sichuan Basin and their control on reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 387-394.

[26] 李文茂.川东北元坝地区飞仙关组层序地层与储层特征研究[D].成都:成都理工大学,2010.
LI Wenmao. The fine study of the sequence stratigraphy and the

reservoir of the Feixianguan Formation in the Yuanba Gasfield in the northeast of the Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.

[27] 罗静, 胡红, 夏青松, 等. 开江—梁平海槽南段飞仙关组二段沉积相特征研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2013, 15(2): 22-26.
LUO Jing, HU Hong, XIA Qingsong, et al. Research on the sedimentary characteristics of the member 2 of Feixianguan Formation in the southern of Kaijiang-Liangping trough [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 15(2): 22-26.

[28] 李国军, 郑荣才, 唐玉林, 等. 川东北地区飞仙关组层序-岩相古地理特征[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(4): 64-70.
LI Guojun, ZHENG Rongcai, TANG Yulin, et al. Sequence-based lithofacies and paleogeography of Lower Triassic Feixianguan Formation in northeastern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(4): 64-70.

[29] 倪新锋, 陈洪德, 田景春, 等. 川东北地区长兴组-飞仙关组沉积格局及成藏控制意义[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(4): 458-465.
NI Xinfeng, CHEN Hongde, TIAN Jingchun, et al. Sedimentary framework of Changxing-Feixianguan Formations and its control on reservoiring in northeastern Sichuan basin [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(4): 458-465.

[30] 王洪江. 川东北元坝地区二叠系长兴组礁滩相储层研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
WANG Hongjiang. Research on the reef-shoal reservoir of Permian Changxing formation in the Yuanba area, northeastern Sichuan Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.

[31] 杨宇宁. 川东北元坝地区飞仙关组层序地层及成岩作用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
YANG Yuning. The study of the sequence stratigraphy and diagenesis of the Fei Xianguan Formation in Yuanba area of the northeastern Sichuan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.

[32] LONG Shengxiang, HUANG Renchun, LI Hongtao, et al. Formation mechanism of the Changxing Formation gas reservoir in the Yuanba Gas Field, Sichuan Basin, China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2011, 85(1): 233-242.

[33] 黄仁春, 邢凤存, 范小军, 等. 四川盆地元坝地区长兴组—飞仙关组高精度层序地层格架的建立及礁滩储集层预测[J]. 古地理学报, 2019, 21(2): 369-378.
HUANG Renchun, XING Fengcun, FAN Xiaojun, et al. Establishment of high-precision sequence stratigraphic framework of the Changxing-Feixianguan Formations and prediction of reef-shoal reservoirs in Yuanba area, Sichuan Basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2019, 21(2): 369-378.

[34] 刘雁婷, 傅恒, 陈骥, 等. 川东北元坝地区三叠系飞仙关组鲕粒滩暴露标志的识别与地质意义[J]. 海相油气地质, 2014, 19(1): 27-34.
LIU Yanting, FU Heng, CHEN Ji, et al. Exposure indications of Triassic Feixianguan oolitic beach reservoir in Yuanba area, northeast Sichuan Basin: Recognition and geological implication [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2014, 19(1): 27-34.

[35] 周进高, 徐哲航, 黄世伟, 等. 碳酸盐岩沉积储层研究前沿与未来发展方向[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 929-953.
ZHOU Jingao, XU Zhehang, HUANG Shiwei, et al. Frontiers and trends in the research on carbonate sedimentology and reservoir geology [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45 (4): 929-953.

[36] 苗正硕. 四川盆地震旦系构造演化及关键期古构造恢复[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021.
MIAO Zhengshuo. Tectonic evolution of Sinian in the Sichuan Basin and reconstruction of paleo-structures in critical periods [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2021: .

[37] 冯晓明. 元坝长兴组礁相储层分布规律研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
FENG Xiaoming. Research on distribution law for Changxing Formation reef facies reservoirs in Yuanba [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.

[38] 蒋裕强, 何沅翰, 邢凤存, 等. 下三叠统鲕粒灰岩中微生物矿化组构特征及意义——以川东北地区飞仙关组为例[J]. 沉积学报, 2019, 37(2): 268-277.
JIANG Yuqiang, HE Yuanhan, XING Fengcun, et al. Characteristics and significance of microbial mineralization fabric in oolitic limestone: A case from Lower Triassic Feixianguan Formation, northeastern Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(2): 268-277.

[39] 魏国齐, 陈更生, 杨威, 等. 川北下三叠统飞仙关组“槽台”沉积体系及演化[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 254-260.
WEI Guoqi, CHEN Gengsheng, YANG Wei, et al. Sedimentary system of platformal trough of Feixianguan Formation of Lower Triassic in northern Sichuan Basin and its evolution [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(2): 254-260.

[40] 段金宝, 黄仁春, 程胜辉, 等. 川东北元坝地区长兴期-飞仙关期碳酸盐岩台地沉积体系及演化[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, 35(6): 663-668.
DUAN Jinbao, HUANG Renchun, CHENG Shenghui, et al. Depositional system and the evolution of carbonate rock platform of Changxing-Feixianguan period in Yuanba area of Northeast Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008, 35(6): 663-668.

[41] 段金宝, 彭劲. 四川盆地东北部元坝地区长兴组层序-沉积相特征[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(7): 32-36.
DUAN Jinbao, PENG Jin. Sequence-sedimentary characteristics of Changxing Formation in Yuanba area of northeast of Sichuan Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36 (7): 32-36.

[42] 彭秋. 元坝地区飞仙关组二段鲕粒滩沉积特征及储层形成控制因素[D]. 成都: 成都理工大学, 2022.
PENG Qiu. Sedimentary characteristics of oolitic shoals and controlling factors for reservoir in the second member of

Feixianguan Formation in Yuanba area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2022.

[43] 张思玉. 川东北地区长兴组含气性主控因素分析及有利区预测[D]. 北京：中国石油大学(北京)，2023.
ZHANG Siyu. Analysis of main controlling factors of petroliferous property and favorable area prediction of Changxing Formation in the northeastern Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.

[44] 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.
LI Yang, WANG Xingzhi, PU Baiyu, et al. Sedimentary characteristics of oolitic beach of Triassic Feixianguan Formation in eastern Kaijiang-Liangping trough, Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(2): 116-130.

[45] 汪洪强，焦养泉，孙佳宁，等. 川东北元坝2井区飞仙关组鲕粒滩内部构成特征[J]. 科学技术与工程，2019，19(6)：86-96.
WANG Hongqiang, JIAO Yangquan, SUN Jianing, et al. Internal architecture of oolitic shoal of the Feixianguan Formation for Yuanba 2 Well Block, northeast Sichuan[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(6): 86-96.

[46] 张风顺，谭谦，施泽进，等. 早三叠世鲕粒和巨鲕差异成因及其古环境意义——以川北元坝地区为例[J]. 沉积学报，2025，43(3)：1072-1090.
ZHANG Fengshun, TAN Qian, SHI Zejin, et al. Differential genesis and paleoenvironmental significance of early Triassic ooids and giant ooids: A case study from the Yuanba area in northern Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2025, 43(3): 1072-1090.

[47] 任金锋，廖远涛，孙鸣，等. 基于小波变换的高精度层序地层定量划分研究及其应用[J]. 地球物理学进展，2013，28(5)：2651-2658.
REN Jinfeng, LIAO Yuantao, SUN Ming, et al. A method for quantitative division of sequence stratigraphy with high-resolution based on wavelet transform and its application[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(5): 2651-2658.

[48] 孙春燕，胡明毅，胡忠贵. 川东北达川—万县地区下三叠统飞仙关组层序地层研究[J]. 岩性油气藏，2017，29(4)：30-37.
SUN Chunyan, HU Mingyi, HU Zhonggui. Characteristics of sequence stratigraphy of the Lower Triassic Feixianguan Formation in Dachuan-Wanxian area, northeastern Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(4): 30-37.

[49] 朱剑兵，纪友亮，赵培坤，等. 小波变换在层序地层单元自动划分中的应用[J]. 石油勘探与开发，2005，32(1)：84-86.
ZHU Jianbing, JI Youliang, ZHAO Peikun, et al. Application of wavelet transform in auto-identify units of stratigraphy sequence [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1): 84-86.

[50] AHMADI A, SAEMI M, SHAHNAZI A, et al. Geomechanical methods for pore pressure prediction in complex geological structures: A case study of a field in southwest of Iran [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2024, 17(10): 283.

[51] CATUNEANU O, ABREU V, BHATTACHARYA J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy[J]. Earth-Science Reviews, 2009, 92(1/2): 1-33.

[52] 王正和，郭彤楼，谭钦银，等. 四川盆地东北部长兴组-飞仙关组各沉积相带储层特征[J]. 石油与天然气地质，2011，32(1)：56-63.
WANG Zhenghe, GUO Tonglou, TAN Qinyin, et al. Reservoir characteristics of different sedimentary facies in the Changxing and Feixianguan Formations, northeast of the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 56-63.

[53] 牟传龙，马永生，谭钦银，等. 四川通江—南江—巴中地区长兴组—飞仙关组沉积模式[J]. 地质学报，2007，81(6)：820-826.
MOU Chuanlong, MA Yongsheng, TAN Qinyin, et al. Sedimentary model of the Changxing—Feixianguan formations in the Tongjiang—Nanjiang—Bazhong area, Sichuan [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(6): 820-826.

[54] 刁志龙，蒋裕强. 川东北飞仙关组鲕粒滩储层成因及评价[J]. 中国石油和化工标准与质量，2019，39(23)：11-12.
DIAO Zhilong, JIANG Yuqiang. Genesis and evaluation of oolitic shoal reservoirs in the Feixianguan Formation, northeastern Sichuan [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2019, 39(23): 11-12.

[55] 苏立萍，罗平，胡社荣，等. 川东北罗家寨气田下三叠统飞仙关组鲕粒滩成岩作用[J]. 古地理学报，2004，6(2)：182-190.
SU Liping, LUO Ping, HU Sherong, et al. Diagenesis of oolitic bank of the Feixianguan Formation of Lower Triassic in Luojiazhai Gas Field, northeastern Sichuan Province [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2004, 6(2): 182-190.

[56] 赵文智，沈安江，胡素云，等. 中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J]. 石油勘探与开发，2012，39(1)：1-12.
ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, HU Suyun, et al. Geological conditions and distributional features of large-scale carbonate reservoirs onshore China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 1-12.

[57] 赵文光，蔡忠贤，邹华耀，等. 川东北元坝地区三叠系飞仙关组碳酸盐岩台地演化影响因素分析[J]. 石油地球物理勘探，2010，45(3)：410-413.
ZHAO Wenguang, CAI Zhongxian, ZOU Huayao, et al. Influence factor analysis for evolution of Feixianguan Formation carbonate platform in Yuanba area, northeast Sichuan Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(3): 410-413.

[58] 周瑞琦，傅恒，徐国盛，等. 川东北元坝地区飞仙关组碳酸盐岩的岩石类型及成岩作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版)，2014，41(6)：733-742.
ZHOU Ruiqi, FU Heng, XU Guosheng, et al. Diagenesis and types of Feixianguan Formation carbonate rock in Yuanba block of northeast Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(6): 733-742.

[59] 王兴志，张帆，蒋志斌，等. 四川盆地东北部飞仙关组储层研究[J]. 地学前缘，2008，15(1)：117-122.
WANG Xingzhi，ZHANG Fan，JIANG Zhibin，et al. A study of Feixianguan reservoir in northeast Sichuan Basin [J]. Earth Science Frontiers，2008，15(1)：117-122.

[60] 谢芳，李志荣，肖富森，等. 四川盆地东北部飞仙关组鲕滩储层地震预测技术[J]. 天然气工业，2004，24(1)：34-36.
XIE Fang，LI Zhirong，XIAO Fusen，et al. Prediction technique for the oolitic beach reservoir of Feixianguan Formation in the northeast of Sichuan Basin by using seismic data[J]. Natural Gas Industry，2004，24(1)：34-36.

[61] 姚城. 川东北地区飞仙关组层序、沉积相与储层分布规律研究[D]. 成都：成都理工大学，2013.
YAO Cheng. The study on the sequence、the sedimentary facies and the distribution law of reservoir of Feixianguan Formation in the northeast of the Sichuan Basin [D]. Chengdu：Chengdu University of Technology，2013.

[62] 周绍鹏. 川东北元坝地区飞仙关组台缘沉积结构及鲕粒滩时空响应[D]. 成都：成都理工大学，2017.
ZHOU Shaopeng. The sedimentary structure and spatial temporal response of the Feixianguan Formation in Yuanba area，northeastern Sichuan Basin[D]. Chengdu：Chengdu University of Technology，2017.

[63] 丁文龙，李云涛，韩俊，等. 碳酸盐岩储层高精度构造应力场模拟与裂缝多参数分布预测方法及其应用[J]. 石油与天然气地质，2024，45(3)：827-851.
DING Wenlong，LI Yuntao，HA Jun，et al. Frontiers and trends in the research on carbonate sedimentology and reservoir geology [J]. Oil & Gas Geology，2024，45(3)：827-851.

[64] 刘敬寿，田博涵，张滨鑫，塔里木盆地超深缝洞型碳酸盐岩储层地质力学孪生建模技术及其应用[J]. 石油与天然气地质，2026，47(1)：270-286.
LIU Jingshou，TIAN Bohan，ZHANG Binxin，et al. Geomechanical twin modeling for ultradeep fractured-vuggy carbonate reservoirs and its application in the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology，2026，47(1)：270-286.

[65] 张艳. 塔河油田碳酸盐岩裂缝型储层测井评价方法研究[D]. 青岛：中国石油大学(华东)，2017.
ZHANG Yan. Research on well logging evaluation of fractured carbonate reservoir in Tahe Oilfield [D]. Qingdao：China University of Petroleum (East China)，2017.

[66] 赵向原，游瑜春，胡向阳，等. 基于成因机理及主控因素约束的多尺度裂缝"分级-分期-分组"建模方法——以四川盆地元坝地区上二叠统长兴组生物礁相碳酸盐岩储层为例[J]. 石油与天然气地质，2023，44(1)：213-225.
ZHAO Xiangyuan，YOU Yuchun，HU Xiangyang，et al. Classified-staged-grouped 3D modeling of multi-scale fractures constrained by genetic mechanisms and main controlling factors：A case study on biohermal carbonate reservoir of the Upper Permian Changxing Fm. in Yuanba area，Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology，2023，44(1)：213-225.

[67] 彭光明，刘言，李国蓉，等. 元坝气田长兴组气藏生物礁相储集层发育特征[J]. 新疆石油地质，2014，35(5)：511-516.
PENG Guangming，LIU Yan，LI Guorong，et al. Development characteristics of reef reservoir in Changxing gas pool，Yuanba Gas Field，northeastern Sichuan Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology，2014，35(5)：511-516.

[68] 刘忠宝，胡宗全，刘光祥，等. 四川盆地东北部下侏罗统自流井组陆相页岩储层孔隙特征及形成控制因素[J]. 石油与天然气地质，2021，42(1)：136-145.
LIU Zhongbao，HU Zongquan，LIU Guangxiang，et al. Pore characteristics and controlling factors of continental shale reservoirs in the Lower Jurassic Ziliujing Formation，northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology，2021，42(1)：136-145.

[69] 张延充，彭才，杨雨，等. 四川盆地飞仙关组高能鲕滩储层地震层序识别[J]. 天然气工业，2010，30(3)：8-11.
ZHANG Yanchong，PENG Cai，YANG Yu，et al. Identification of seismic sequences of high-energy oolitic beach reservoirs in the Feixianguan Formation in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry，2010，30(3)：8-11.

[70] 武恒志，吴亚军，柯光明. 川东北元坝地区长兴组生物礁发育模式与储层预测[J]. 石油与天然气地质，2017，38(4)：645-657.
WU Hengzhi，WU Yajun，KE Guangming. Bioherm development model and reservoir prediction of Changxing Formation in Yuanba area，northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology，2017，38(4)：645-657.

[71] 万晶，孙玉朋. 颗粒滩相碳酸盐岩储层发育演化的主控因素[J]. 断块油气田，2009，16(4)：60-62.
WAN Jing，SUN Yupeng. Analysis of main controlling factors of formation evolution in grain-beach carbonate reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field，2021，16(4)：60-62.

[72] 杨柳，董广涛，姜晓宇，等. 裂缝-基质型刻蚀芯片的渗吸-驱替机理微流控实验[J]. 石油与天然气地质，2025，46(5)：1682-1699.
YANG Liu，DONG Guangtao，JIANG Xiaoyu，et al. Microfluidic experimental study on imbibition-displacement mechanism of tight oil reservoirs using fracture-matrix etched chips [J]. Oil & Gas Geology，2025，46(5)：1682-1699.

[73] 腾飞. 城口—鄂西地区飞仙关组沉积体系研究[D]. 荆州：长江大学，2017.
TENG Fei. Research on depositional system of Feixianguan Formation in Chengkou-E'xi area [D]. Jingzhou：Yangtze University，2017.

[74] 张建勇，周进高，潘立银，等. 川东北地区孤立台地飞仙关组优质储层形成主控因素——大气淡水淋滤及渗透回流白云石化[J]. 天然气地球科学，2013，24(1)：9-18.
ZHANG Jianyong，ZHOU Jingao，PAN Liyin，et al. The main origins of high quality reservoir in Feixianguan Formation in northeast Sichuan Basin：Atmospheric water eluviation and seepage-reflux dolomitization[J]. Natural Gas Geoscience，2013，24(1)：9-18.

[75] HAO Fang，ZHANG Xuefeng，WANG Cunwu，et al. The fate of CO_2 derived from thermochemical sulfate reduction (TSR) and

effect of TSR on carbonate porosity and permeability, Sichuan Basin, China[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 141: 154-177.

[76] LEI Ting, YIN Xingyao, ZONG Zhaoyun. Pore pressure prediction in orthotropic medium based on rock physics modeling of shale gas[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 74: 103091.

[77] 郭彤楼. 川东北地区飞仙关组鲕滩储层成岩作用——以宣汉-达县及元坝区块为例[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 620-631.
GUO Tonglou. Diagenesis of the Feixianguan oolitic shoal reservoirs in the northeastern Sichuan Basin-examples from Xuanhan-Daxian and Yuanba areas [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 620-631.

[78] 袁倩. 川东北地区黄龙场构造飞仙关组储层特征及有利区优选[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
YUAN Qian. Reservoir characteristics and favorable zone optimization of the Feixianguan Formation in Huanglongchang structure, northeastern Sichuan [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.

[79] 李平平, 魏广鲁, 徐祖新, 等. 四川盆地元坝气田长兴组古原油的运移方向与聚集特征[J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 277-288.
LI Pingping, WEI Guanglu, XU Zuxin, et al. Migration direction and accumulation characteristics of paleo-oil in the Changxing Formation in Yuanba Gas Field, Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(6): 277-288.

[80] 何治亮, 赵向原, 张文彪, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层精细地质建模技术进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 16-33.
HE Zhiliang, ZHAO Xiangyuan, ZHANG Wenbiao, et al. Progress and direction of geological modeling for deep and ultra-deep carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 16-33.

[81] 王兆鹏, 邢凤存, 古强, 等. 川西北开江—梁平海槽与蓬溪—武胜台凹交汇区长兴组—飞仙关组沉积相展布与演化[J/OL]. 沉积学报: 1-21[2026-02-26]. https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.099.
WANG Zhaopeng, XING Fengcun, GU Qiang, et al. Distribution and evolution of sedimentary facies in the Changxing Formation-Feixianguan Formation at the intersection of Kaijiang-Liangping Trough and Pengxi-Wusheng Platform Trough, northwestern Sichuan [J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica: 1-21 [2026-02-26]. https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.099.

[82] 时志强, 彭深远, 王美玲, 等. 假泥裂: 上扬子地区下三叠统飞仙关组灰岩薄层中的网纹沉积构造[J]. 沉积学报, 2024, 42(4): 1200-1211.
SHI Zhiqiang, PENG Shenyuan, WANG Meiling, et al. Pseudo-desiccation crack: special network structure from the thin-bedded limestones of the Lower Triassic Feixianguan Formation in Upper Yangtze region[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(4): 1200-1211.

[83] 韩宇, 张云峰, 张亚, 等. 鲕粒的不均匀白云石化及其成因——以重庆云阳上坝剖面飞仙关组为例[J]. 天然气勘探与开发, 2023, 46(1): 19-31.
HAN Yu, ZHANG Yunfeng, ZHANG Ya, et al. Non-uniform dolomitization of oolites and its genesis: A case study of Feixianguan Formation in Shangba section, Yunyang, Chongqing[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2023, 46(1): 19-31.

[84] 叶子旭, 袁海锋, 杨鹏, 等. 川东大竹—开江地区下三叠统飞仙关组二段储层白云石化成因与孔隙演化——来自岩石结构、原位主微量元素以及锶同位素的证据[J]. 地质学报, 2023, 97(1): 150-167.
YE Zixu, YUAN Haifeng, YANG Peng, et al. Dolomitization and pore evolution of the Second Member of the Feixianguan Formation of Lower Triassic in Dazhu-Kaijiang, eastern Sichuan Basin-Evidence from rock structure, in-situ LA-ICP-MS major and trace elements and Sr isotope analysis [J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(1): 150-167.

[85] 李红佼. 川东北地区下三叠统飞仙关组层序格架下滩体迁移规律[D]. 成都: 西南石油大学, 2022.
LI Hongjiao. Migration pattern of shoal bodies within the sequence framework of the Lower Triassic Feixianguan Formation, northeastern Sichuan area [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2022.

(编辑　张　晟)