

四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组三段和五段“甜点”储层特征及分布

叶素娟,杨映涛,张玲

(中国石化西南油气分公司勘探开发研究院,四川成都610041)

摘要:四川盆地川西坳陷须家河组三段和五段烃源岩厚度大、有机质丰度高,同时发育规模较大的三角洲分流河道和席状砂沉积,具有较好的源内成藏潜力。根据储层岩石学、微观孔隙结构和物性特征等方面的综合分析,结合录井与测井解释成果,系统研究了川西坳陷须三段和须五段“甜点”储层的特征、成因机制和分布规律。研究表明,川西坳陷须三段和须五段以三角洲前缘-滨浅湖细粒碎屑岩沉积为主,主要发育薄层砂岩型储层,但在成都凹陷南部地区须三段发育单层及累计厚度均较大的三角洲分流河道厚层砂岩型储层。薄层砂岩型储层岩石类型多样,沉积物粒度细,碳酸盐矿物和粘土含量较高,强烈的压实和胶结作用导致储层异常致密;“甜点”储层的形成主要受生烃作用、溶蚀作用和破裂作用控制,主要由富含有机质的泥页岩和中-细砂岩(高石英、低碳酸盐岩岩屑)组合形成。厚层砂岩型储层的储集空间类型以溶蚀孔隙和裂缝占主导,“甜点”储层形成主要受岩石粒度和易溶、脆性矿物组分含量以及溶蚀作用强度的控制,其中溶蚀作用是关键因素。龙门山中段和新场构造带以南地区须五段具有烃源岩品质较好、石英(长石、粘土矿物)含量较高、碳酸盐矿物含量较低的特点,有利于薄层砂岩型“甜点”储层的发育;成都凹陷南部须三段厚层砂岩型“甜点”储层主要分布在与泥页岩相邻(纵/侧向)的高石英(长石)中-粗砂岩中。

关键词:陆相烃源岩;成因机制;“甜点”储层;须家河组;川西坳陷;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and distribution of “sweet spot” reservoirs in the third and fifth members of Upper Triassic Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

Ye Sujuan, Yang Yingtao, Zhang Ling

(Exploration and Production Research Institute, SINOPEC Southwest Oil & Gas Company, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The third and fifth members of Xujiahe Formation in Western Sichuan Depression are characterized by thick source rocks with high TOC and medium- to large-scale delta distributary channel and sheet sandstones of huge in-source accumulation potential. A systematic study was carried out on the characteristics, formation mechanism and distribution of “sweet spot” reservoirs in the two members based on an integration of petrography, pore structure, and petrophysical property analyses with well logging interpretations. The results show that fine-grained thin sandstone interbeds against a delta front to shore-shallow lacustrine environment dominate the two members, with the third member in southern Chengdu Sag containing some single- or multiple-layered thick sandstone against delta distributary channels. The thin sandstone reservoirs are characterized by diverse rock types, fine grain size, and high contents of clay matrix and carbonate minerals, and rather tight due to intensive compaction and carbonate cementation. “Sweet spot” reservoirs in the thin sandstones are mainly the results of hydrocarbon generation, dissolution and fracturing processes. Assemblages of organic-rich shale and fine- to medium-grained sandstone with high content of quartz (feldspar) and small amount of carbonate debris (cement) are considered potential sweet spots. The thick sandstone reservoirs are dominated by secondary pores and fractures. Sweet spots are mostly controlled by granularity, the content of feldspar (quartz) and other soluble (brittle) minerals as well as dissolution intensity, of which the latter is the key factor. The fifth member in the south of Longmenshan front structural

收稿日期:2020-10-18;修订日期:2021-07-07。

第一作者简介:叶素娟(1969—),女,博士、研究员,储层地质与油气成藏。E-mail:sujuan_ye@hotmail.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05002-004)。

belt and Xinchang structural belt is most likely to contain thin sandstone sweet spots because of its high-quality source rocks, high content of quartz (feldspar and clay), and low content of carbonate minerals. While the third member in southern Chengdu Sag is ideal for the thick sandstone sweet spots to develop in quartz (feldspar)-rich medium- to coarse-grained sandstones adjacent to shales vertically and laterally.

Key words: continental source rock, formation mechanism, “sweet spot” reservoir, Xujiache Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

作为四川盆地主要的陆相烃源岩层系,须家河组三段和五段(须三段,须五段)烃源岩厚度大、有机质丰度高,发育规模较大的三角洲分流河道、河口坝和席状砂沉积,可形成大规模岩性或构造-岩性气藏,具有较好的源内成藏潜力^[1-4]。其中,川西坳陷的新场、大邑和崇州地区天然气三级地质储量超 $3\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。勘探实践表明,具有良好物性的“甜点”储层对致密油气藏的形成和分布具有直接的控制作用,是有利的勘探目标^[5]。因此,研究川西坳陷须三段和须五段源内气藏“甜点”储层特征及形成机制,明确“甜点”储层的分布规律,对指导精细勘探和开发具有十分重要的意义。

前人针对川西坳陷须家河组储层开展了较多的研究工作^[6-12]。但是,前期研究主要集中在须二段和须四段,针对须三段和须五段储层的研究也主要基于单一岩性(砂岩或泥岩),以储层特征和相对优质储层发育主控因素为主。从砂/泥岩空间组合关系的角度,针对不同类型储层开展“甜点”储层特征、形成机制和分布规律的研究仍是空白。本文基于储层岩石学特征、微观孔隙结构特征和物性特征等综合分析,结合录井、测井解释成果,针对川西坳陷须三段和须五段的薄砂厚泥或薄砂薄泥互层型(以下简称薄层砂岩型)和厚大砂岩型(以下简称厚层砂岩型)两种储层分别开展储层特征纵、横向差异性分析,探讨影响储层发育的主要地质因素,明确储层致密和“甜点”储层形成的主要机制,并对“甜点”储层的纵、横向分布进行了预测,为川西坳陷须三段和须五段源内气藏的进一步勘探评价提供储层依据。

1 区域地质概况

川西坳陷位于四川盆地西部,西邻龙门山冲断带,北东与昆仑-秦岭东西向构造带相接,南抵峨眉、乐山,东连川中隆起,大致呈北东向延伸,总体呈“三隆两凹一坡”的构造格局,即龙门山前构造带、新场构造带、知新场构造带、成都凹陷、梓潼凹陷和中江斜坡(图1)。

川西坳陷自晚三叠世以来,一直处于四川盆地陆相地层沉积中心,沉积了巨厚的上三叠统-白垩系。其中,上三叠统须家河组现今最大厚度超过 $3\,000 \text{ m}$,主要

由砂岩、砾岩、泥页岩夹煤层组成。烃源岩主要分布在须一段、须三段和须五段,储集层主要分布在须二段和须四段以及侏罗系(图1)。须三段和须五段的沉积、沉降中心位于彭州附近,厚度分别可达 900 m 和 700 m 以上^[1]。

2 沉积特征

龙门山前缘须家河组的总体沉积构造背景为大陆岛弧,物源主要来自西南康滇古陆以及西北龙门山和松潘甘孜褶皱带^[14-15]。其中,康滇古陆和龙门山中段是硅质碎屑的主要来源,而龙门山北段则提供了大量的碳酸盐岩物质来源^[16]。

须三段沉积时期,四川盆地的沉积、沉降和生烃中心均位于川西坳陷龙门山前缘中段的彭州、鸭子河地区,全盆地以受海水改造的湖泊沉积为主^[1-3]。川西坳陷须三段沉积相带的展布主要受西南和西北物源控制,砂岩含量呈现“南高北低”的特征。其中,彭州—广汉—中江一线以南的大邑、崇州、洛带等地区的物源主要来自康滇古陆,发育三角洲平原-前缘厚大砂岩沉积(单砂体厚度主要为 $10 \sim 30 \text{ m}$)、横向连续性较好,中-细砂岩含量普遍大于 60% (图2a);以北地区物源则主要来自龙门山北段,以三角洲前缘-前三角洲-浅湖薄砂、厚泥或薄砂、薄泥互层沉积为主(单砂体厚度普遍小于 5 m),中-细砂岩含量相对较低,多为 $20\% \sim 30\%$ 。

川西坳陷须五段沉积环境总体与坳陷中北部须三段相似,主要发育细粒滨浅湖沉积^[1-3],物源供给主要来自龙门山北段和中段,砂岩含量具有“西高东低、北高南低”的特点,三角洲前缘沉积沿龙门山呈裙带状分布,坳陷主体以三角洲前缘远端-前三角洲-滨浅湖薄砂、厚泥或薄砂、薄泥互层沉积为主(单砂体厚度普遍小于 5 m),单砂体厚度薄、横向连续性差(图2b)。

总体上,川西坳陷须三段和须五段以滨浅湖细粒碎屑岩沉积为主,发育薄层砂岩型储层,同时在彭州—广汉—中江一线以南的大邑、崇州和洛带等地区的须三段发育单层及累计厚度均较大的三角洲分流河道厚层砂岩型储层。

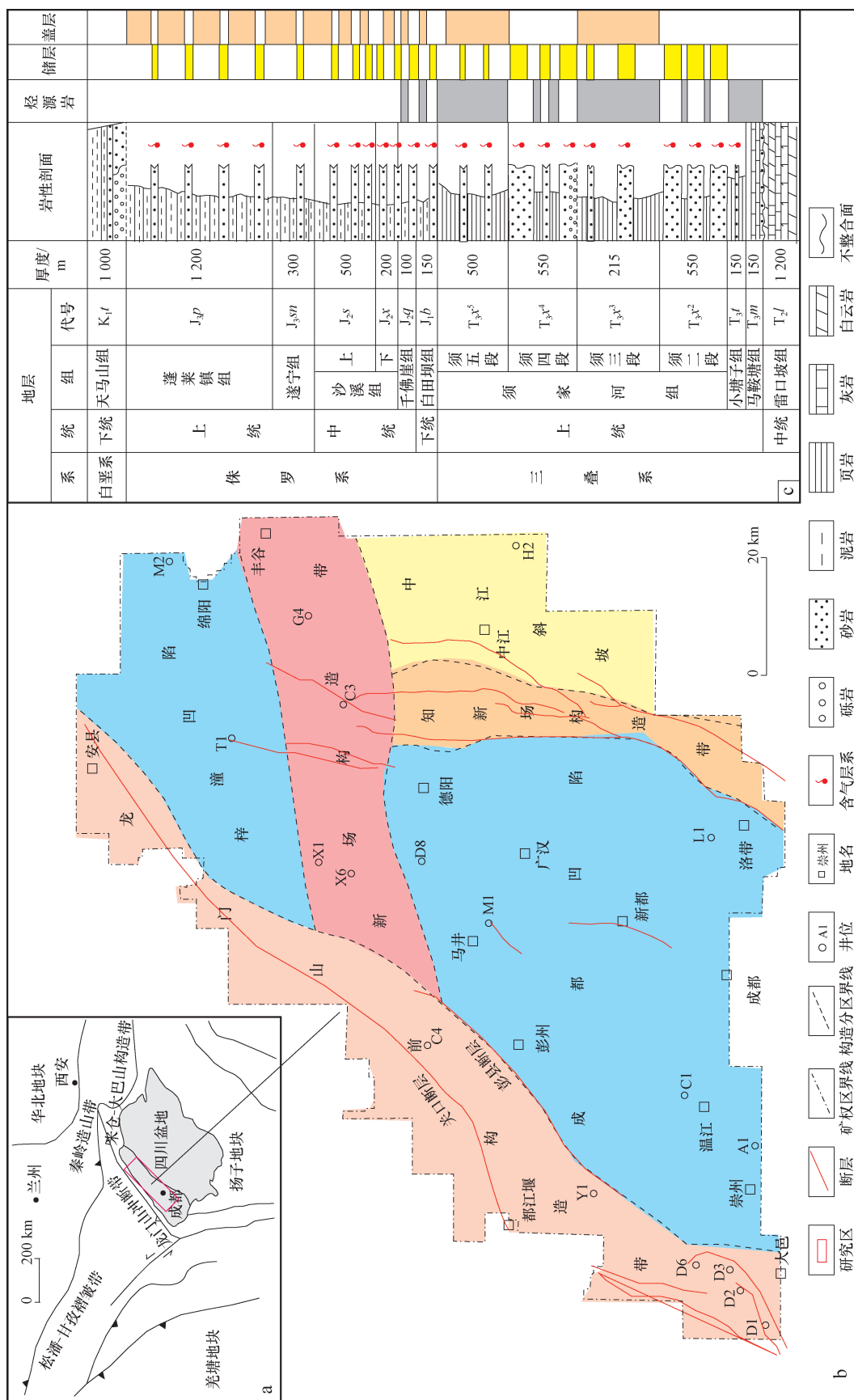


图1 川西坳陷构造单元划分 (a, b) 及上三叠统-白垩系地层综合柱状图 (c) (据文献 [1,13] 修改)

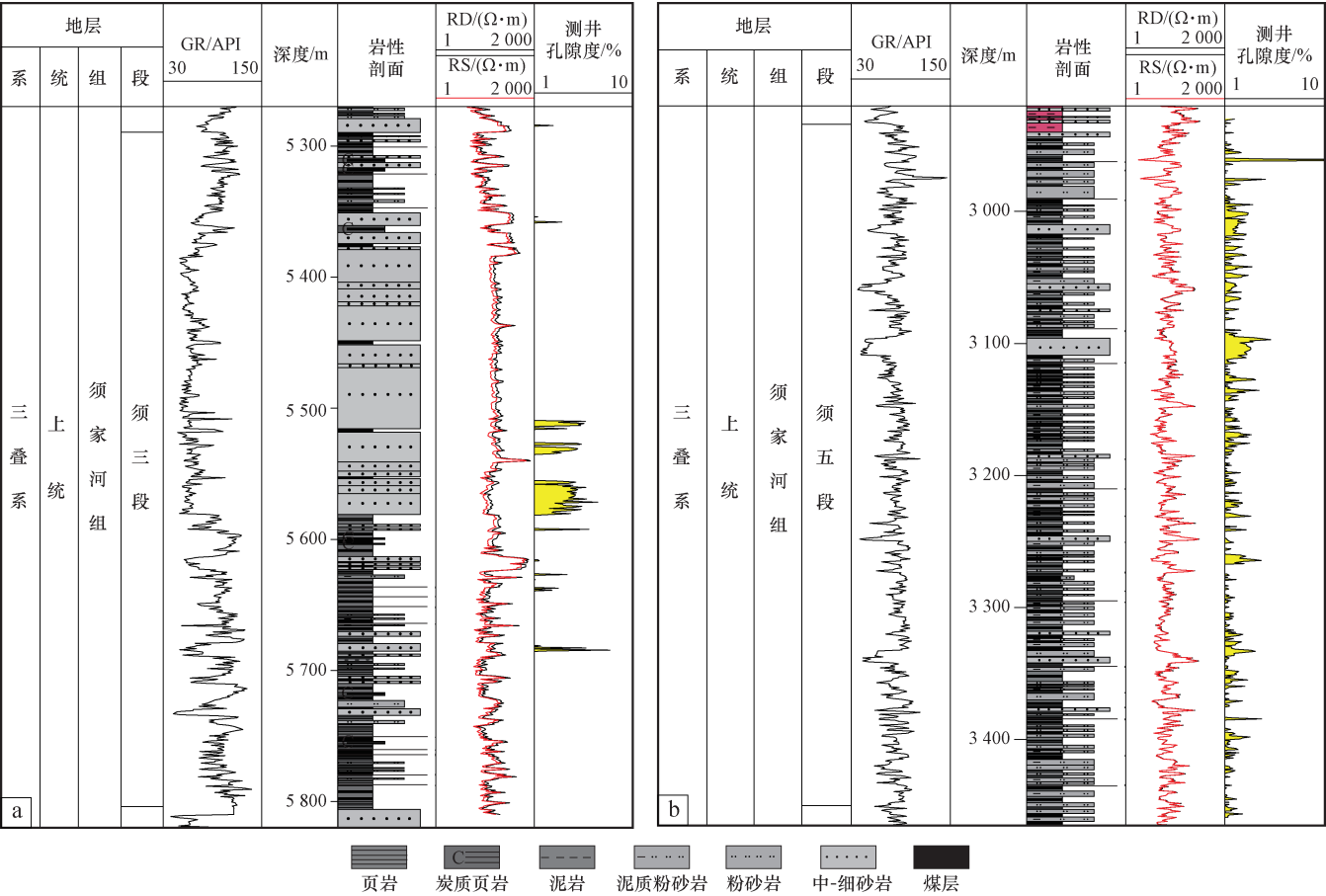


图 2 川西坳陷 D6 井须三段(a)和 X1 井须五段(b)地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column showing the lithology and logging porosity of the third member in well D6 (a) and fifth member in well X1 (b) of Xujiache Formation, Western Sichuan Depression

3 储层特征

3.1 岩石学特征

1) 薄层砂岩型

薄层砂岩型储层主要分布在川西坳陷彭州—广汉—中江一线以北的须三段和川西坳陷主体部位的须五段。储层岩性包括中—细砂岩、粉砂岩和泥页岩三大类(图 2b,图 3a,b),局部夹煤层(线)。其中,中细砂岩以岩屑砂岩和岩屑石英砂岩为主,富岩屑和贫长石是该类砂岩的主要特征,岩屑类型以沉积岩(碳酸盐岩)岩屑为主(表 1;图 3a,图 4b)。与须五段相比,须三段具有相对较高的石英和较低的岩屑含量(表 1;图 4b)。平面上,新场构造带、成都凹陷及中江斜坡地区砂岩中碎屑石英含量相对较高,坳陷北部及龙门山前构造带邻近物源,岩屑含量普遍超过 55%。同时,砂岩中岩屑类型也明显不同。根据全岩 X 射线衍射分

析数据,坳陷北部大部分地区的物源主要来自龙门山北段,岩屑以碳酸盐岩岩屑为主,碳酸盐矿物含量普遍超过 30%,梓潼地区平均可达 40%以上(表 1;图 5)。须五段在龙门山前构造带彭州以南地区的石英和长石含量明显较高,在新场构造带南翼以及成都凹陷具有较高的粘土矿物含量,碳酸盐矿物含量相对较低(图 5),且砂岩中石英和长石总量高于碎屑石英和长石的含量,表明岩屑中包含较多长英质矿物。

砂岩中的填隙物主要包括方解石、白云石和粘土矿物,局部可见菱铁矿和重晶石(图 3a,c,d)。粘土矿物以片状、丝状伊利石和伊/蒙混层为主,并见少量高岭石和绿泥石(图 3d;表 1)。泥页岩中页理发育,富含大量炭化有机质,呈黑色条带状分布,沿层面可见植物化石碎片。须五段全岩 X 射线衍射分析表明,随着岩石粒度的变小(中、细砂岩—粉砂岩—泥页岩),粘土矿物含量逐渐增大(16.0%—32.9%—50.0%),碳酸盐矿物含量逐渐降低(32.4%—12.7%—6.9%)(表 1;图 6)。

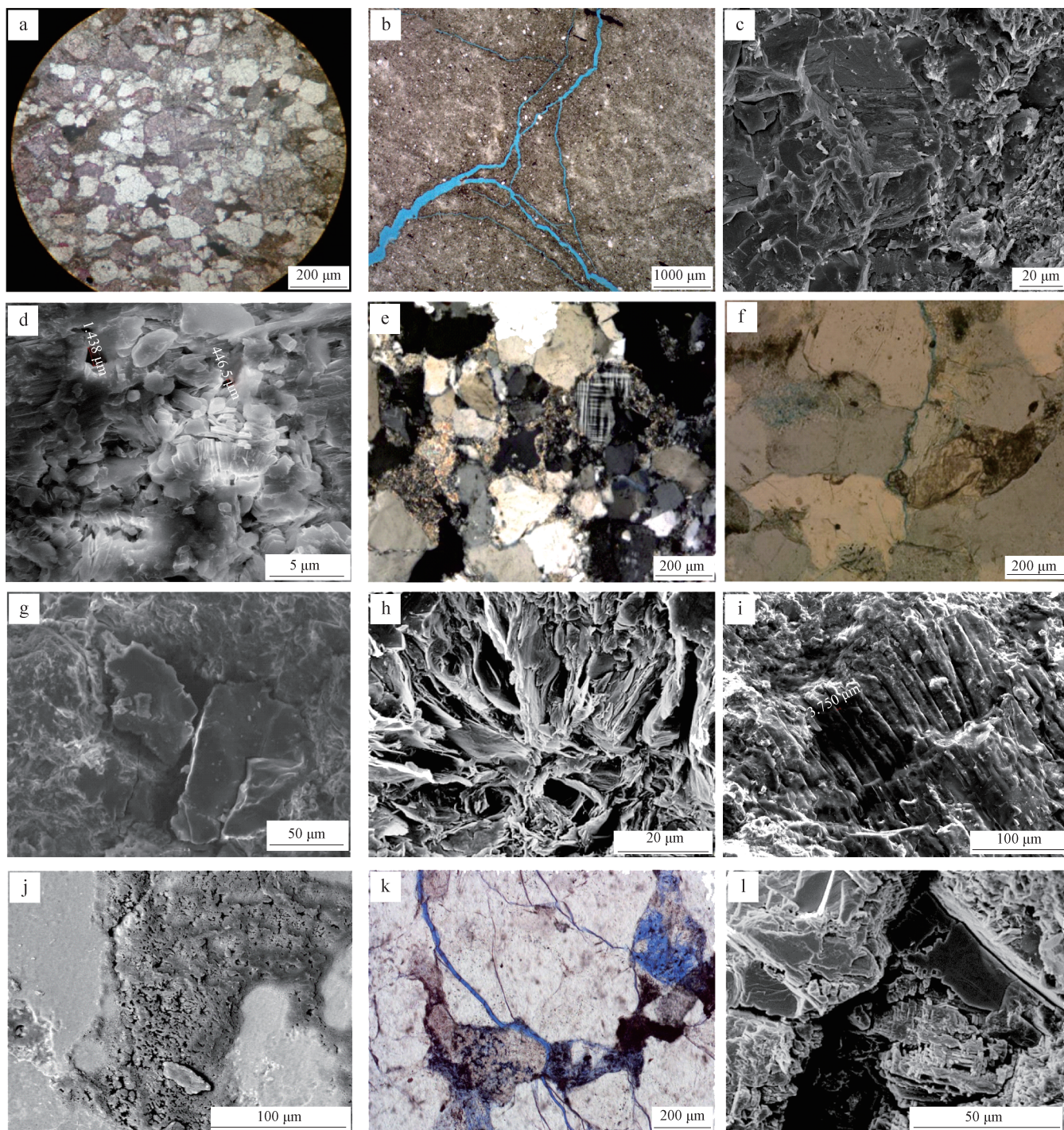


图3 川西坳陷须三段和须五段储层岩石学特征及储集空间类型

Fig.3 Images showing petrographic features and pore space of the third and fifth members of Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression
 a. 细粒岩屑砂岩,由石英、方解石、白云石和泥质杂基组成,埋深3 040.6 m,X5井, T_3x^5 ,(-);
 b. 泥岩,网状缝,埋深3 041.6 m,X5井, T_3x^5 ,(-);
 c. 粒间充填方解石,埋深3 048.8 m,X5井, T_3x^5 ;d. 粒间充填高岭石,发育高岭石晶间孔,莲花剖面, T_3x^5 ;e. 中粒长石岩屑砂岩,埋深4 641.4 m,D1井, T_3x^3 ,(+);f. 中粒岩屑石英砂岩,发育粒缘缝及相关溶孔,埋深5 530.9 m,D6井, T_3x^3 ,(-);
 g. 粒间充填自生石英,埋深4 594.1 m,D2井, T_3x^3 ;h. 粒间充填伊利石,发育晶间孔隙,埋深4 634.9 m,D1井, T_3x^3 ;i. 钾长石解理缝,见溶蚀,埋深3 068 m,X6井, T_3x^5 ;
 j. 网状有机质孔,埋深3 052.8 m,X5井, T_3x^5 ;k. 沿微裂隙发育长石溶孔,埋深4 764.73 m,C1井, T_3x^3 ,(-);l. 长石溶蚀形成粒间、粒内溶孔,埋深4 634.9 m,D1井, T_3x^3

表 1 川西坳陷须三段和须五段岩石组分

Table 1 Summary of rock compositions in the third and fifth members of Xujiache Formation, Western Sichuan Depression

地层	岩石类型	岩性	样品数/ 个	碎屑组分含量/%						自生矿物含量/%		
				石英	长石	岩屑				方解石	白云石	硅质
						总量	沉积	变质	火山			
T ₃ x ³	厚层砂岩	中－粗砂岩	769	8.0～90.0 (70.1)	0～26.0 (9.4)	0～90.0 (20.5)	0～73.0 (8.5)	1.0～30.0 (9.0)	0～40.0 (3.1)	0～45.0 (3.3)	0～20.0 (0.4)	0～5.0 (1.4)
	薄层砂岩	中－细砂岩	624	8.0～100.0 (71.1)	0～15.0 (2.0)	0～90.0 (26.9)	0～86.0 (19.9)	0～25.0 (6.4)	0～35.0 (0.7)	0～39.0 (5.9)	0～38.0 (4.2)	0～5.0 (0.4)
		粉砂岩	98	—	—	—	—	—	—	—	0～47.0 (7.6)	0～36.0 (6.6)
T ₃ x ⁵	薄层砂岩	中－细砂岩	536	3.0～93.0 (48.6)	0～20.0 (1.4)	7.0～97.0 (50.0)	3.0～96.0 (35.8)	0～50.0 (12.8)	0～20.0 (1.3)	0～40.0 (6.6)	0～20.0 (0.7)	0～4.0 (0.1)
		粉砂岩	143	—	—	—	—	—	—	0～32.0 (7.1)	0～15.0 (1.1)	—

地层	岩石类型	岩性	样品数/ 个	岩石组分含量/%									
				石英	长石	方解石	白云石	粘土矿物					伊/蒙混层
								总量	伊利石	高岭石	绿泥石		
T ₃ x ³	厚层砂岩	中－粗砂岩	131	45.7～84.9 (65.4)	5.2～35.9 (18.2)	0～31.8 (2.3)	0～10.1 (2.5)	3.1～26.6 (11.9)	0.7～15.4 (6.0)	0	1.4～8.1 (3.3)	1.1～8.2 (2.6)	
	薄层砂岩	中－细砂岩	48	32.5～87.6 (63.0)	0～11.2 (4.0)	0～46.2 (10.7)	0～28.3 (8.7)	1.2～28.0 (11.5)	3.3～20.5 (5.8)	0.8～7.1 (2.5)	0.5～5.9 (1.6)	0.8～6.3 (1.6)	
T ₃ x ⁵	薄层砂岩	中－细砂岩	73	7.1～83.6 (42.4)	0～17.0 (3.1)	0～73.9 (20.2)	0～36.7 (12.2)	2.5～22.9 (16.0)	0.7～13.4 (5.5)	0～8.4 (2.9)	0.5～5.9 (2.3)	0～13.0 (5.6)	
		粉砂岩	91	21.0～63.9 (43.4)	0～20.0 (5.8)	0～24.2 (7.3)	0～22.0 (5.4)	23.0～42.9 (32.9)	3.4～22.8 (11.1)	1.7～8.5 (4.0)	2.1～7.5 (3.7)	4.4～25.5 (14.3)	
		泥页岩	35	22.5～49.0 (36.7)	0～12.0 (4.2)	0～10.9 (3.7)	0～15.4 (3.2)	43.0～65.6 (50.0)	0～21.1 (13.7)	0～9.2 (4.6)	0～10.5 (5.3)	0～32.5 (23.0)	

注:数据格式为最小值~最大值(平均值)。

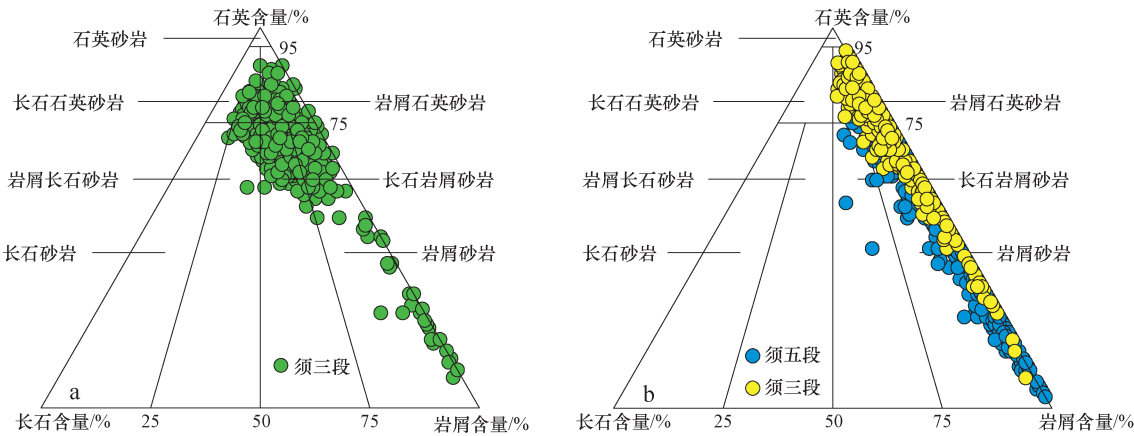


图 4 川西坳陷须三段和须五段厚层砂岩型储层(a)和薄层砂岩型储层(b)砂岩岩石类型

Fig.4 Detrital compositions of thick (a) and thin (b) sandstone reservoirs in the third and fifth members of Xujiache Formation, Western Sichuan Depression

2) 厚层砂岩型

主要分布在川西坳陷彭州-广汉-中江一线以南

大邑、崇州和洛带等地区的须三段中亚段,以中粗粒长石岩屑砂岩、岩屑石英砂岩和岩屑砂岩为主,砂岩中长

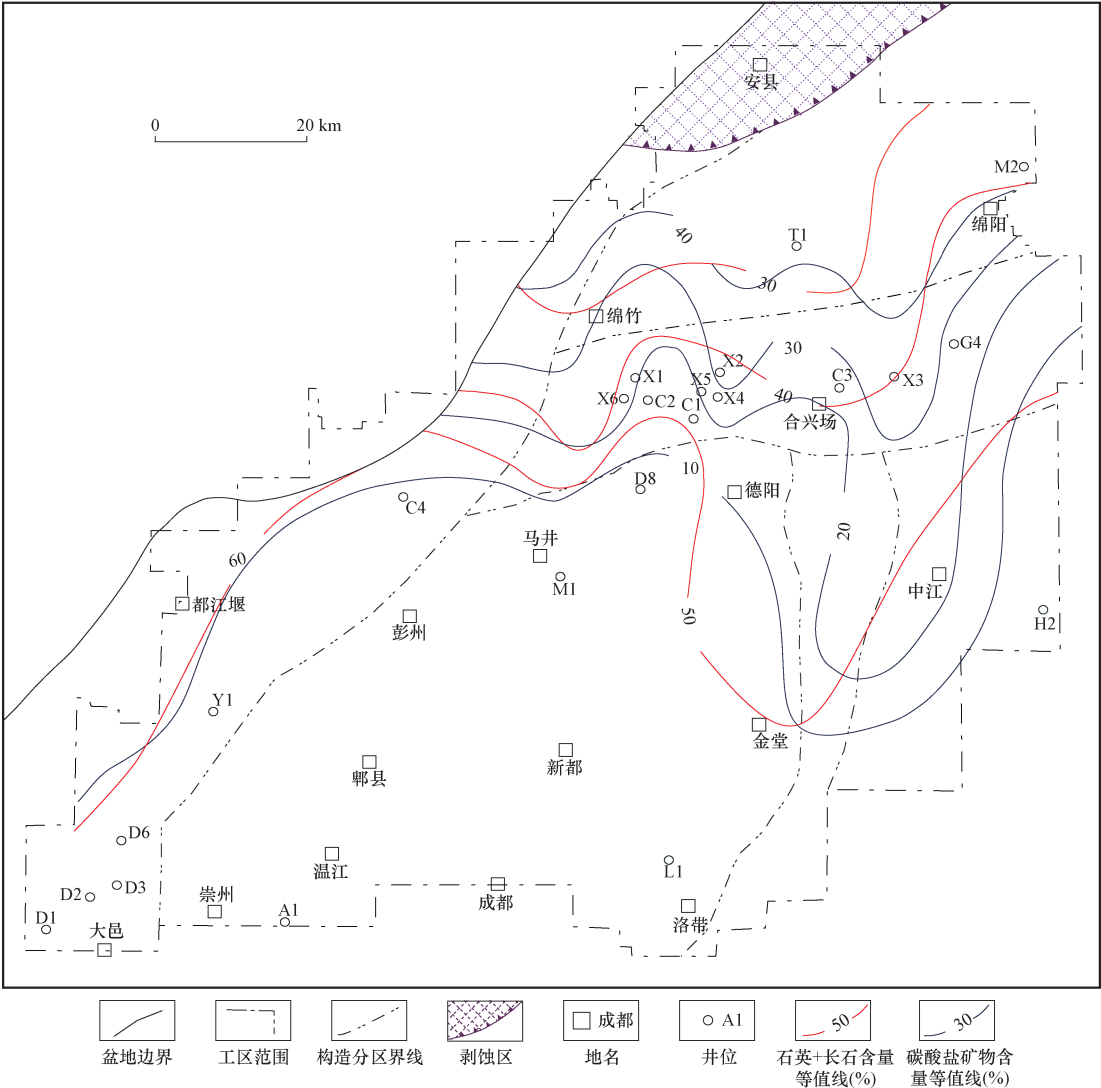


图 5 川西坳陷须五段石英和长石总量及碳酸盐矿物含量

Fig. 5 Contour maps of quartz and feldspar content and carbonate content in the fifth members of Xujiache Formation, Western Sichuan Depression

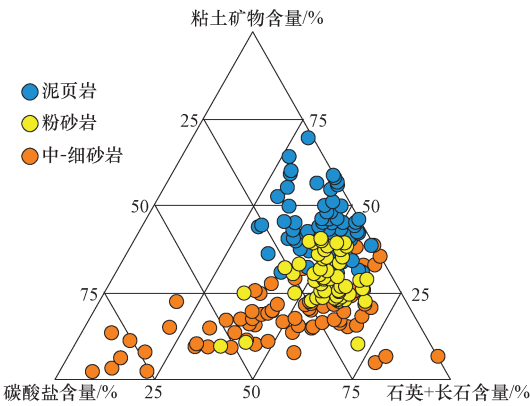


图 6 川西坳陷须三段和须五段薄层砂岩型储层矿物组成

Fig. 6 Triangle diagram of mineral composition of thin sandstone reservoirs in the third and fifth members of Xujiache Formation, Western Sichuan Depression

石含量相对较高,碎屑长石平均含量 9.4%,长石平均总量 14.8%(表 1;图 2a,图 3e,f,图 4a)。

填隙物主要包括碳酸盐矿物、自生硅质和粘土矿物(图 3h)。碳酸盐胶结物以方解石为主,并见少量白云石,含量明显低于薄层砂岩型储层(表 1)。自生硅质包括石英次生加大和粒间充填自生石英,含量较低但分布普遍(表 1;图 3g)。粘土矿物以毛发状、丝状伊利石和伊/蒙混层为主,并见部分绿泥石,基本不含高岭石(表 1,图 3h)。砂岩以中和粗粒结构为主,颗粒磨圆中等-较差,分选中等-较好。颗粒间主要为线-凹凸接触,其次为线接触,压实程度高。

3.2 物性特征

根据川西坳陷薄层砂岩型储层的物性统计可以看

出,总体上砂岩的物性与泥页岩近似,平均孔隙度均小于2%,平均渗透率均小于 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,同时泥页岩中储渗性较好的储层相对发育。孔隙度和渗透率具有一定的正相关关系(图7a),总体属于特低孔和特低渗致密-超致密储层,局部可见因微裂隙或页理发育而形成的高渗储层。

厚层砂岩型储层物性优于薄层砂岩型,孔隙度普遍小于6%,主要分布在2%~4%,平均3.2%;渗透率主要介于 $(0.05 \sim 0.2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度和渗透率具有一定的正相关关系(图7b),总体上属于特低孔和特低渗裂缝-孔隙型致密砂岩储层,局部可见微裂隙发育的高渗储层。

3.3 储集空间类型

1) 薄层砂岩型

根据岩心和铸体薄片及扫描电镜观察,该类储层中细砂岩、粉砂岩整体致密,孔隙不发育,仅局部发育纳米级-微米级次生孔隙、粘土矿物晶间孔和微裂隙(图3d,i)。强烈的压实和胶结作用导致砂岩中残余粒间孔不发育,以长石、岩屑以及早期碳酸盐胶结物溶蚀而形成的粒间(内)溶孔为主,粒间常被伊利石和高岭石等粘土矿物充填,发育纳米级晶间微孔。裂缝类型包括构造缝、解理缝和有机质收缩缝等(图3b)。

氩离子抛光和高分辨率场发射扫描电镜联合观察分析表明,泥页岩中储集空间类型主要包括有机质孔、粘土矿物晶间微孔、溶蚀孔和微裂隙等(图3j)。其中,有机质孔是泥页岩的主要孔隙类型,主要分布在有机质中;少数为原生成因,大部分为次生成因;形成于有机质的生烃演化过程,分布在有机质间及内部,呈蜂

窝状、线状或串珠状;一般为纳米级。粘土矿物晶间孔隙主要分布于粘土矿物(主要为伊利石)间,纳米级别为主。溶蚀孔隙包括长石、石英以及碳酸盐矿物溶蚀形成的孔隙,纳米-微米级,多孤立分布,连通性较差。裂缝包括构造缝和成岩缝,构造缝多与地层垂直或斜交,成岩缝多顺层发育,缝宽以微米级为主,沿缝可见溶蚀。

2) 厚层砂岩型

根据岩心、铸体薄片以及扫描电镜观察,砂岩孔隙类型主要为粒内(间)溶孔、粘土矿物晶间微孔、微裂隙等,其中以粒内溶孔和裂缝占主导(图3f,k,l)。

该类砂岩沉积后经历了快速的沉降过程,强烈的压实作用导致原生孔隙迅速减少,残余粒间孔较为少见,孤立分布,孔径较小。粒内(间)溶孔主要为长石、岩屑以及早期碳酸盐胶结物溶蚀而成,其形成普遍与裂缝相关(图3f,k),孔隙中常被伊利石等粘土矿物充填,发育晶间微孔。裂缝类型包括层间缝、粒内缝、粒缘缝、解理缝等,与构造挤压、差异压实作用以及异常高压相关,分布较普遍,常见裂缝溶蚀扩大现象。

4 成岩作用特征

须三段和须五段储层经历的成岩作用主要包括压实压溶作用、碳酸盐矿物和自生硅质等的胶结作用、溶蚀作用和破裂作用。

川西坳陷须三段和须五段储层历史最大埋深达4 000~6 000 m,普遍经历了强烈的压实压溶作用,主要表现为泥页岩、千枚岩和云母等的弯曲变形与假杂基化,颗粒间呈线-凹凸接触,局部见缝合线接触。其中,须三段和须五段薄层砂岩型储层以及须三段厚层

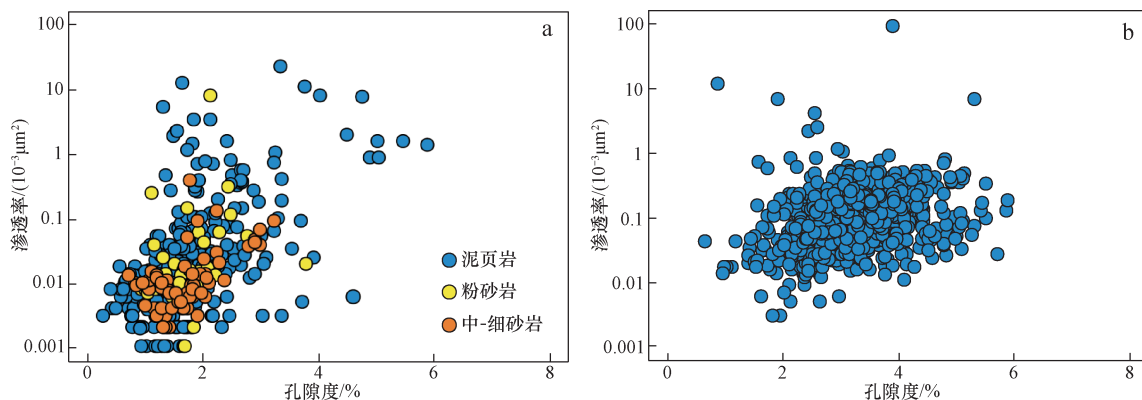


图7 川西坳陷须三段和须五段薄层砂岩型(a)和厚层砂岩型(b)储层孔-渗关系

Fig. 7 Scatter plots showing positive correlations between porosity and permeability for samples from thin (a) and thick (b) sandstone reservoirs in the third and fifth members of Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression

砂岩型储层平均视压实率分别为 80%, 73% 和 81%。总体上, 压实作用表现出南强北弱、前渊带强、冲断带和隆起带弱的特征。

胶结作用包括碳酸盐矿物、粘土矿物和自生硅质的充填作用。其中, 碳酸盐矿物的胶结作用最为普遍。薄层砂岩型储层中碳酸盐胶结物含量(平均 8.9%)明显高于厚层砂岩型储层(平均 3.7%)。统计表明, 须三段和须五段薄层砂岩型储层以及须三段厚层砂岩型储层平均视胶结率分别为 67%, 84% 和 63%, 须五段薄层砂岩型储层胶结作用的强度较大。平面上, 胶结作用总体表现出北强南弱、东强西弱的特征。

溶蚀作用主要表现为骨架颗粒和少量早期碳酸盐胶结物的溶蚀。薄层砂岩型储层总体长石含量较低, 溶蚀孔隙不发育, 仅在局部长石含量相对较高的地区或井段可形成较多次生孔隙。厚层砂岩型储层的溶蚀现象较为普遍, 溶蚀作用的强度总体较弱且不均衡, 局部可见中等程度的溶蚀作用。

破裂作用主要发生在构造形变强烈的地区, 同时砂泥岩互层段也是裂缝发育的有利层段。

5 “甜点”储层的特征及分布

5.1 薄层砂岩型

薄层砂岩型储层主要发育于三角洲远端到滨浅湖沉积环境, 水动力条件总体较弱, 沉积物粒度细, 碳酸盐岩岩屑含量和粘土矿物含量较高, 经历了强烈的压实和胶结作用, 颗粒间基本被泥质和碳酸盐胶结物充填, 原生孔隙普遍不发育。对储层孔隙起主要贡献的是粘土矿物晶间微孔和有机质孔, 同时可见有机酸对

长石以及碳酸盐矿物颗粒溶蚀形成的粒内(间)溶孔。生烃作用、溶蚀作用和破裂作用是储层发育的重要因素, 富含有机质的泥页岩与高石英(长石)和低钙质岩屑(胶结物)的中细砂岩组合可形成基质物性较好且裂缝较发育的“甜点”储层。

1) 富含有机质的泥页岩中发育纳米级有机质微孔隙和粘土矿物晶间微孔隙, 储集性相对较好。

岩石物性通常与粘土矿物含量呈一定负相关, 相对高能水动力条件下的沉积物粒度较粗、杂基含量低, 初始物性好。但是, 川西坳陷须三段和须五段的薄层砂岩型储层孔隙度与粘土矿物含量呈现较好的正相关关系(图 8a), 孔隙度大于 2% 的岩石中粘土矿物含量普遍大于 20%, 表明粘土矿物晶间孔和有机质孔对储集空间具有较大贡献。泥页岩通常具有较高粘土矿物含量, 碳酸盐矿物含量普遍较低(表 1; 图 6)。根据富含有机质泥页岩高温高压模拟实验, 随着温度和压力的升高, 泥页岩中纳米级有机质孔隙不断增加, 且增加高峰与气态和液态烃产率高峰一致^[17]。泥页岩中有机质丰度越高, 有机质孔和生烃增压形成的裂缝越发育, 有机质生烃演化过程中生成的有机酸也越多, 且泥页岩中页理通常较发育, 为酸性流体的运移提供了通道, 有利于溶蚀作用的发生, 储层物性相对较好(图 9)。

2) 高石英(长石)和低钙质岩屑(胶结物)的中细砂岩发育纳米-微米级次生孔隙和粘土矿物晶间微孔隙, 储集性相对较好。

薄层砂岩型储层中的砂岩以岩屑砂岩为主, 石英和长石含量普遍较低, 岩屑, 特别是碳酸盐岩屑含量较高(表 1; 图 4b, 图 6), 砂岩电阻率较高(图 2b), 但在龙门山中段和新场构造带以南地区可见较多变质岩和火山岩岩屑。砂岩孔隙度与碳酸盐矿物含量之间呈现

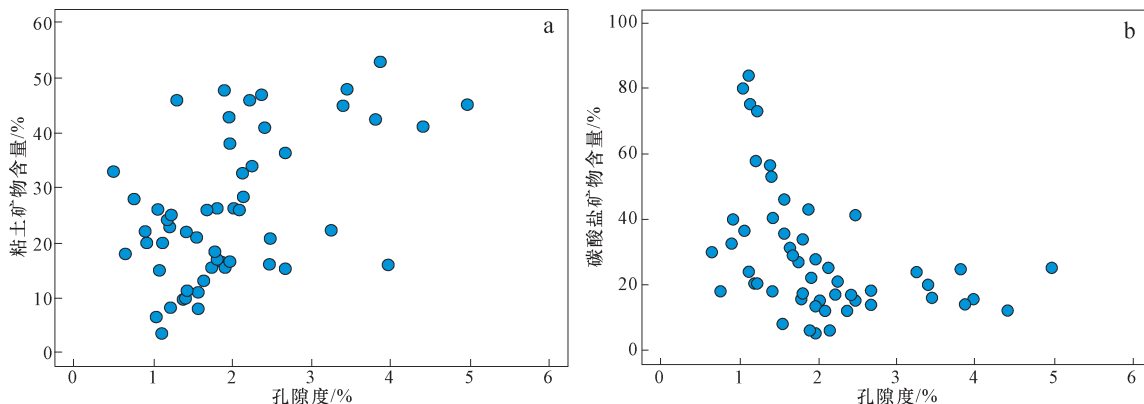


图 8 川西坳陷须三段和须五段薄层砂岩型储层孔隙度与粘土矿物(a)和碳酸盐矿物(b)含量关系

Fig. 8 Porosity vs. clay contents (a) and porosity vs. carbonate content (b) for samples from thin sandstone reservoirs in the third and fifth members of Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression

(粘土矿物和碳酸盐矿物含量数据来自 X 射线衍射分析)

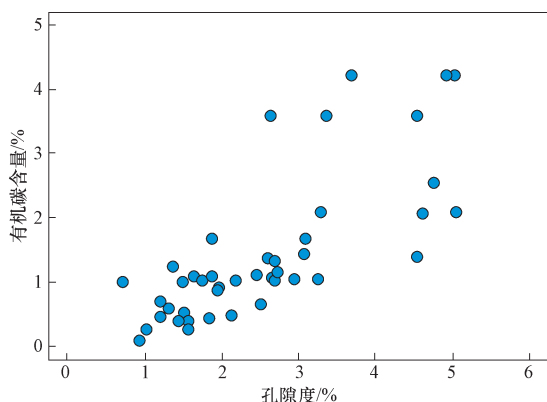


图9 川西坳陷须三段和须五段薄层砂岩型
储层中泥页岩孔隙度与有机碳含量关系

Fig. 9 Scatter plot showing a positive correlation between
porosity and TOC for shale samples from thin sandstone
reservoirs in the third and fifth members of Xujiache
Formation, Western Sichuan Depression

明显负相关关系,孔隙度大于2%的岩石中碳酸盐矿物含量一般均低于30%(图8b),碳酸盐胶结物含量一般低于10%,碳酸盐矿物的胶结作用是储层致密的重要原因。

根据砂岩中自生方解石碳-氧同位素分析,碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -3.51% ~ -0.10% ,氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -15.45% ~ -13.59% ,形成温度为 $90\sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。埋藏阶段形成的碳酸盐胶结物通常来自碳酸盐岩岩屑和早期碳酸盐胶结物的溶解和再沉淀^[18]。平面上,成都凹陷、山前带的碳酸盐胶结物含量较低,与这两个地区较低的碳酸盐岩岩屑含量具有较好的一致性。结合胶结物的同位素特征,认为其来源与碳酸盐岩岩屑的溶解和再沉淀有关。不同温度下地层水-烃源岩相互作用模拟实验表明,在 $60\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度条件下,碳酸盐矿物的溶解和沉淀主要受有机酸控制^[19]。高含碳酸盐岩岩屑的砂岩与富含有机质的泥页岩共存是砂岩发生强烈碳酸盐胶结作用的主要原因。泥页岩中有机质热解形成的酸性流体造成碳酸盐岩岩屑溶解,成岩流体中Ca和Fe等离子浓度和pH值增大,过饱和的Ca和Fe离子导致碳酸盐胶结物在储渗性较差的封闭体系中容易沉淀。梓潼凹陷须五段具有较高的碳酸盐岩岩屑含量,但碳酸盐胶结物含量相对孝泉-新场地区略低,可能与该区须五段泥页岩不发育和来自泥页岩的有机酸性流体较少有关。此外,粉砂岩中碳酸盐矿物总量仅是中-细砂岩的50%左右,但其中碳酸盐胶结物含量与中-细砂岩相似甚至略高(表1;图6),可能是因为粉砂岩初始物性较中细砂岩差且与泥页岩距离更近,有机酸对碳酸盐岩岩屑的溶解强度更大,成岩体系封

闭性更强,碳酸盐胶结物更易沉淀。

砂岩孔隙度与石英和长石含量具有一定的正相关关系,孔隙度大于2%的砂岩中石英含量普遍大于40%,长石含量普遍大于4%。

3) 砂岩、泥岩组合有利于裂缝的形成。

薄层砂岩型储层孔隙类型多为连通性较差、孤立分布的有机质孔、粘土矿物晶间孔和长石、石英和碳酸盐矿物溶蚀孔,裂缝对“甜点”储层的形成至关重要。裂缝通常发育在能干性较强的岩层(如砂岩)中,同时其形成又受岩石力学性质差异、岩石力学边界厚度和构造应力的控制^[20]。研究发现,分布于三角洲前缘水下分流河道、河口坝、席状砂和湖相滩坝的砂/泥页岩互层组合,特别是相对富砂(砂岩含量约40%)薄泥薄砂互层组合,有利于裂缝的发育。

总体上,龙门山中段和新场构造带以南地区须五段具有烃源岩品质较好、石英(长石和粘土矿物)含量较高和碳酸盐矿物含量较低的特点,是薄层砂岩型“甜点”储层的主要分布区。同时,其它地区局部井段也可见碳酸盐矿物含量较低的“甜点”储层发育,如X1井的3098~3108m井段(图2b)。

5.2 厚层砂岩型

须三段厚层砂岩型“甜点”储层主要为次生溶蚀型,溶蚀作用发育是储层形成的关键因素。“甜点”储层形成主要受岩石粒度、长石等易溶组分含量以及溶蚀作用强度的控制。

1) 沉积水动力条件较强,储层初始物性好。

三角洲平原分流河道、三角洲前缘水下分流河道和河口坝等水动力较强的砂岩,粒度较粗,分选较好,杂基含量较低,初始物性好,填隙物含量低(表2),储层相对发育。

2) 长石、岩屑等易溶组分含量较高,有利于溶蚀孔隙的形成。

该类储层的成因机制是溶蚀作用较强,而导致溶蚀作用较强的一个关键因素是可溶矿物含量较高。研究发现,物性较好的砂岩(孔隙度>3%)中长石含量普遍大于10%。

3) 中强压实、中弱胶结、中强溶蚀和中强破裂成岩相为有利的成岩相类型。

早期快速压实是储层致密化的最主要因素,压实作用导致的孔隙度损失可达81%。一般而言,埋深较浅、粒度较粗、杂基含量较少、刚性矿物含量较高、颗粒分选较好且沉淀量适中的早期碳酸盐胶结的砂岩压实程度相对较弱(视压实率<75%)。

表 2 川西坳陷须三段厚层砂岩储层粒度与常规物性和填隙物含量的关系

Table 2 Relationships between grain size,porosity,permeability and interstitial materials in the third members of Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression

岩石类型	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	碳酸盐胶结物含量/%	自生硅质含量/%	泥质含量/%
粗粒砂岩	3.2	0.15	4.4	1.8	0.6
中粒砂岩	3.2	0.11	3.4	1.4	0.6
细粒砂岩	2.9	0.08	7.8	0.7	1.1
粉砂岩	—	—	14.7	0.05	13.0

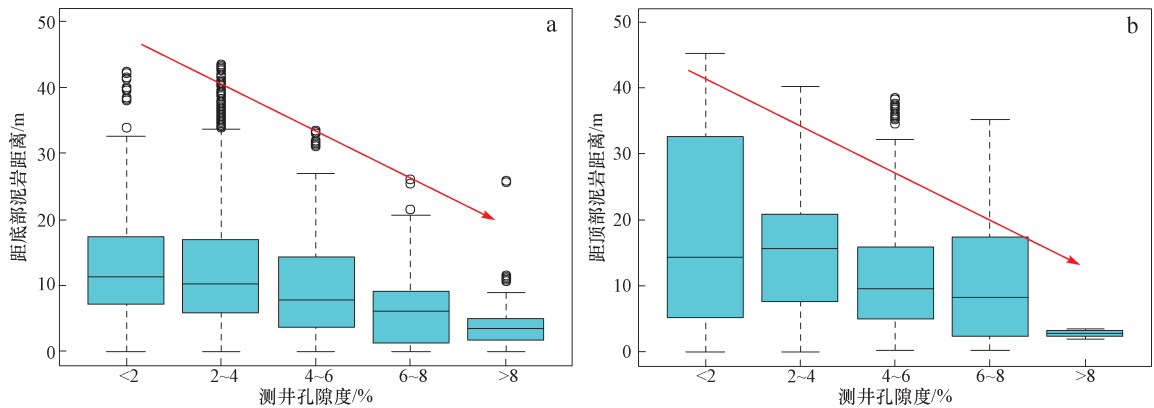


图 10 川西坳陷须三段厚层砂岩型储层测井孔隙度与储层距底(a)、顶(b)泥岩距离的关系

Fig. 10 Relationships between porosity and the distances from reservoir to the bottom(a) or top(b) of shales for thick sandstone reservoirs in the third members of Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression

碳酸盐矿物和自生硅质等强烈胶结作用是储层致密的重要原因。当碳酸盐胶结物含量超过 10%、自生硅质超过 4%时,孔隙度一般小于 3%。烃源岩层系总体表现出酸性的沉积和成岩环境。碳酸盐胶结物的含量总体较低,但当砂岩粒度较细,碳酸盐岩岩屑含量较高时,仍能形成钙质致密层(碳酸盐胶结物含量 > 20%)(表 1)。

溶蚀作用是最重要的建设性成岩作用。砂岩中的长石、不稳定岩屑和粒间碳酸盐胶结物的溶蚀是次生孔隙形成的主要途径。由于储层遭受强烈的压实作用,致密化时间早,酸性流体流动性差,溶蚀作用的强度总体较弱且不均衡。

破裂作用形成的裂缝一方面可以为砂岩提供良好的酸性流体运移通道,有利于溶蚀作用的进行,另一方面可以极大地改善低孔致密储层的渗流能力。砂/泥岩岩性界面附近容易产生差异压实造成的错位和破裂,从而有利于成岩缝的形成。

根据 11 口钻井的 3 600 余个测井孔隙度和砂岩距顶、底部泥岩距离的关系可以看出,随着距顶、底部泥岩距离的减少,储层物性逐渐变好(图 10),即“甜点”储层主要分布在与泥页岩相邻(侧向/纵向)的高含石英、长石中-粗砂岩中,如 D6 井须三中亚段厚层砂岩中储层主要分布在邻近下亚段泥页岩的中-粗粒

岩屑石英砂岩中(图 2a,图 3f)。“甜点”储层一般分布在原生孔隙保存较好、裂缝与溶蚀作用较强的叠合部位^[21-23]。川西坳陷须三段厚层砂岩储层早期经历了快速的沉降过程,强烈的压实和胶结作用导致储层致密并在砂体内部形成钙质隔夹层,酸性流体流动性差,溶蚀作用影响范围较有限。高含易溶和脆性矿物的中粗粒砂岩与泥页岩相邻,一方面砂/泥岩岩性界面附近有利于裂缝的形成,可以为酸性流体的运移提供通道,另一方面泥页岩中有机质热解形成的有机酸可以沿裂缝进入邻近致密砂岩,就近形成溶蚀孔隙。

6 结论

1) 四川盆地川西坳陷须三段和须五段以三角洲前缘-滨浅湖细粒碎屑岩沉积为主,主要发育薄层砂岩型储层,同时在成都凹陷以南部分地区的须三段发育单层和累计厚度均较大的三角洲分流河道厚层砂岩型储层。

2) 薄层砂岩型储层岩石类型多样,沉积物粒度细、碳酸盐矿物和粘土含量较高,强烈的压实和胶结作用导致储层异常致密,“甜点”储层的形成主要受生烃作用、溶蚀作用和破裂作用控制,基质物性较好、裂缝较发育的储层主要为富含有机质的泥页岩与高石英

(长石)和低碳酸盐岩岩屑(胶结物)的中-细砂岩组合。龙门山中段和新场构造带以南地区须五段的烃源岩品质较好,石英(长石和粘土矿物)含量较高,碳酸盐矿物含量较低,有利于薄层砂岩型“甜点”储层的发育。

3) 须三段厚层砂岩型储层的储集空间类型以溶蚀孔隙和裂缝为主,溶蚀作用是形成“甜点”储层的关键因素,储层形成主要受岩石粒度和长石、石英等易溶、脆性组分含量以及溶蚀作用强度的控制。“甜点”储层主要分布在与泥页岩相邻(纵/侧向)的高石英(长石)中-粗砂岩中。

参 考 文 献

- [1] 谢刚平,朱宏权,叶素娟,等.四川盆地叠覆型致密砂岩气区地质特征与评价方法[M].北京:科学出版社,2018:1-129.
Xie Gangping, Zhu Hongquan, Ye Sujuan, et al. Geological characteristics and evaluation method of tight sand gas reservoirs in superimposed tight sandstone gas-bearing area, Sichuan Basin[M]. Beijing: Science Press, 2018: 1-129.
- [2] 赵正望,谢继容,李楠,等.四川盆地须家河组一、三、五段天然气勘探潜力分析[J].天然气工业,2013,33(6):23-28.
Zhao Zhengwang, Xie Jirong, Li Nan, et al. Gas exploration potential of the 1st, 3rd and 5th members of Xujiahe Fm reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(6): 23-28.
- [3] 赵文智,卞从胜,徐春春,等.四川盆地须家河组须一、三和五段天然气源内成藏潜力与有利区评价[J].石油勘探与开发,2011,38(4):385-393.
Zhao Wenzhi, Bian Congsheng, Xu Chunchun, et al. Assessment on gas accumulation potential and favorable plays within the Xu-1, 3 and 5 Members of Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(4): 385-393.
- [4] 陈汉军,胡佑华,刘殊.川西坳陷须家河组三段沉积特征及勘探潜力[J].天然气工业,2010,30(7):13-16.
Chen Hanjun, Hu Youhua, Liu Shu. Sedimentary features and exploration potentials of the third member of the Xujiahe Formation in West Sichuan Depression[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(7): 13-16.
- [5] 朱筱敏,潘荣,朱世发,等.致密储层研究进展和热点问题分析[J].地学前缘,2018,25(2):141-146.
Zhu Xiaomin, Pan Rong, Zhu Shifa, et al. Research progress and core issues in tight reservoir exploration[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(2): 141-146.
- [6] 叶素娟,李嵘,杨克明,等.川西坳陷叠覆型致密砂岩气区储层特征及定量预测评价[J].石油学报,2015,36(12):1484-1494.
Ye Sujuan, Li Rong, Yang Keming, et al. Characteristics and quantitative prediction of tight sand gas reservoirs in superimposed tight sandstone gas-bearing area, western Sichuan depression[J]. Acta Petroli Sinica, 2015, 36(12): 1484-1494.
- [7] 李嵘,吕正祥,叶素娟.川西坳陷须家河组致密砂岩成岩作用特征及其对储层的影响[J].成都理工大学学报:自然科学版, 2011, 38(2): 147-155.
- Li Rong, Lv Zhengxiang, Ye Sujuan. Impact of diagenesis on reservoir-quality evolution in the Upper Triassic Xujiahe tight sandstones, west Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2011, 38(2): 147-155.
- [8] 林小兵,刘丽萍,田景春,等.川西坳陷中部须家河组五段致密砂岩储层特征及主控因素[J].石油与天然气地质,2014,35(2):224-230.
Lin Xiaobing, Liu Liping, Tian Jingchun, et al. Characteristics and controlling factors of tight sandstone reservoirs in the 5th member of Xujiahe Formation in the central of western Sichuan Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 224-230.
- [9] 孟万斌,吕正祥,刘家铎,等.川西坳陷孝泉-新场地区须家河组四段储层控制因素及预测地质模型[J].石油与天然气地质, 2013, 34(4): 483-490.
Meng Wanbin, Lv Zhengxiang, Liu Jiaduo, et al. Reservoir controlling factors and geological prediction models of the 4th member of the Xujiahe Formation in Xiaoquan-Xinchang area, the western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 483-490.
- [10] 罗文军,彭军,杜敬安,等.川西坳陷须家河组二段致密砂岩储层成岩作用与孔隙演化——以大邑地区为例[J].石油与天然气地质, 2012, 33(2): 287-295.
Luo Wenjun, Peng Jun, Du Jing'an, et al. Diagenesis and porosity evolution of tight sand reservoirs in the 2nd member of Xujiahe Formation, western Sichuan Depression; an example from Dayi region[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 287-295.
- [11] 陈冬霞,刘雨晨,庞雄奇,等.川西坳陷须五段陆相页岩层系储层特征及对含气性的控制作用[J].地学前缘,2016,23(1):174-184.
Chen Dongxia, Liu Yuchen, Pang Xiongqi, et al. Reservoir characteristics and its control on gas-bearing properties of the 5th Member of the Triassic Xujiahe Formation continental shale in the Sichuan Basin of China[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 174-184.
- [12] 史洪亮,杨克明,王同.川西坳陷须五段致密砂岩与泥页岩储层特征及控制因素[J].岩性油气藏,2017,29(4):38-46.
Shi Hongliang, Yang Keming, Wang Tong. Characteristics and controlling factors of tight sandstone and shale reservoirs of the 5th member of Xujiahe Formation in the western Sichuan Depression[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(4): 38-46.
- [13] 杨克明,朱宏权,叶军,等.川西致密砂岩气藏地质特征[M].北京:科学出版社,2012:1-146.
Yang Keming, Zhu Hongquan, Ye Jun, et al. Geological characteristics of tight sandstone gas reservoirs in west Sichuan Basin[M]. Beijing: Science Press, 2012: 1-146.
- [14] 陈斌,李勇,王伟明,等.晚三叠世龙门山前陆盆地须家河组物源及构造背景分析[J].地质学报,2016,90(5):857-872.
Chen Bin, Li Yong, Wang Weiming, et al. The provenance and tectonic setting of late Triassic Xujiahe Formation in the Longmenshan Foreland Basin, SW China[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(5): 857-872.

- he tight sandstones, western Sichuan, China [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2011, 33(3): 274–281.
- [26] 曾焱, 黎华继, 周文雅, 等. 川西坳陷东坡中江气田沙溪庙组复杂“窄”河道致密砂岩气藏高产富集规律[J]. *天然气勘探与开发*, 2017, 40(4): 1–8.
- Zeng Yan, Li Huaji, Zhou Wenya, et al. High-yield enrichment laws of Shaximiao Formation tight sandstone gas reservoir of complex "narrow" channel in Zhongjiang gas field, in the eastern slope of West Sichuan Depression [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2017, 40(4): 1–8.
- [27] 叶素娟, 朱宏权, 李嵘, 等. 天然气运移有机–无机地球化学示踪指标——以四川盆地川西坳陷侏罗系气藏为例[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(4): 549–560.
- Ye Sujuan, Zhu Hongquan, Li Rong, et al. Tracing natural gas migration by integrating organic and inorganic geochemical data: A case study of the Jurassic gas fields in western Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(4): 549–560.
- [28] 马立元, 周总瑛. 川西坳陷中段上三叠统须家河组天然气资源潜力分析[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(5): 730–737.
- Ma Liyuan, Zhou Zongying. Analysis of natural gas Tertiary Xujiahe Formation in the resource potentiality for Upper Middle Part of West Sichuan Depression [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(5): 730–737.
- [29] 李蒙, 商晓飞, 赵华伟, 等. 基于 likelihood 地震属性的致密气藏断裂预测——以四川盆地川西坳陷新场地区须二段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(6): 1299–1309.
- Li Meng, Shang Xiaofei, Zhao Huawei, et al. Prediction of fractures in tight gas reservoirs based on likelihood attribute—A case study of the 2nd member of Xujiahe Formation in Xinchang area, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(6): 1299–1309.
- [30] 吕文雅, 苗凤彬, 张本键, 等. 四川盆地剑阁地区须家河组致密砾岩储层裂缝特征及对天然气产能的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 484–491, 557.
- Lv Wenya, Miao Fengbin, Zhang Benjian, et al. Fracture characteristics and their influence on natural gas production: A case study of the tight conglomerate reservoir in the Upper Triassic Xujiahe Formation in Jian'ge area, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 484–491, 557.

(编辑 梁 慧)

(上接第 840 页)

- [15] 刘焕, 彭军, 李丽娟, 等. 川西坳陷中段上三叠统须家河组砂岩特征及物源分析[J]. *中国地质*, 2012, 39(5): 1271–1279.
- Liu Huan, Peng Jun, Li Lijuan, et al. Characteristics and provenance analysis of the Upper Triassic Xujiahe Formation sandstone in the middle part of west Sichuan Depression [J]. *Geology in China*, 2012, 39(5): 1271–1279.
- [16] Chunming X, Jean-Michel G, Dahua Z, et al. The fluvial and lacustrine sedimentary systems and stratigraphic correlation in the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(11): 2023–2041.
- [17] 吉利明, 吴远东, 贺聪, 等. 富有机质泥页岩高压生烃模拟与孔隙演化特征[J]. *石油学报*, 2016, 37(2): 172–181.
- Ji Liming, Wu Yuandong, He Cong, et al. High-pressure hydrocarbon-generation simulation and pore evolution characteristics of organic-rich mudstone and shale [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(2): 172–181.
- [18] Morad S. Carbonate cementation in sandstones: distribution patterns and geochemical evolution [J]. *Special Publication Number 26 of the International Association of Sedimentologists*, 1998, 26: 1–26.
- [19] 曾澹辉, 朱志强, 吴琼, 等. 烃源岩的有机酸生成及其影响因素的模拟实验研究[J]. *沉积学报*, 2007, 25(6): 847–851.
- Zeng Jianhui, Zhu Zhiqiang, Wu Qiong et al. Experimental study on the generation of organic acids from source rocks and its effect factors [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 25(6): 847–851.
- [20] 曾联波, 吕鹏, 屈雪峰, 等. 致密低渗透储层多尺度裂缝及其形成地质条件[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 449–454.
- Zeng Lianbo, Lyu Peng, Qu Xuefeng, et al. Multi-scale fractures in tight sandstone reservoirs with low permeability and geological conditions of their development [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 449–454.
- [21] 刘春燕. 致密碎屑岩储层“甜点”形成及保持机理——以鄂尔多斯盆地西南部镇泾地区延长组长 8 油层组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(6): 873–879.
- Liu Chunyan. Formation and preservation mechanism of sweet spot in tight clastic reservoirs – A case study of Chang 8 oil layer of Yan-chang Formation in Zhenjing area, southwest Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(6): 873–879.
- [22] 杜宗飞, 高红灿, 郑荣才. 渝南关坝地区上三叠统须家河组沉积特征[J]. *石油地质与工程*, 2019, 33(3): 1–4.
- Du Zongfei, Gao Hongcan, Zheng Rongcai. Sedimentary characteristics of upper Triassic Xujiahe formation in Guanba area of southern Chongqing [J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2019, 33(3): 1–4.
- [23] 杨威, 谢武仁, 俞凌杰, 等. 四川盆地上三叠统须家河组致密砂岩溶蚀实验及地质意义[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(4): 655–663.
- Yang Wei, Xie Wuren, Yu Lingjie, Wei Guoqi, et al. Dissolution experiments and geological implications of tight sandstones in the Xujiahe Formation of Upper Triassic, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(4): 655–663.

(编辑 卢雪梅)