

川东北元坝地区须家河组三段钙屑砂岩 孔隙类型及地质意义

唐自成¹,钟大康¹,王 威²,石文斌²,杜红权²,孙海涛¹,王 爱¹,周志恒¹,贾晓兰¹

[1. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249; 2. 中国石化勘探南方分公司,成都 四川 610041]

摘要:钙屑砂岩在成因上属于陆源碎屑岩中的一类砂岩,其成分的特殊性决定了埋藏过程中成岩作用、储集空间以及油气产能上的特殊性。结合岩心、普通岩石薄片、铸体薄片、阴极发光、扫描电镜、X衍射数据、压汞数据和物性数据等资料,对川东北元坝西须家河组三段钙屑砂岩的孔隙类型、孔隙定量演化和孔隙有效性等方面进行了系统性分析。结果表明,钙屑砂岩原生孔隙很少,次生孔隙类型主要包括3类:晶间微孔隙、溶蚀型孔隙与裂缝型孔隙。各类孔隙的成因存在差异,晶间微孔主要与钙屑、钙质胶结物的重结晶作用有关,还有一些钙屑晶间微孔来源于母岩的白云岩化。裂缝的成因有两个,贴粒缝是由于钙屑与胶结物重结晶不同步,构造裂缝是由于须三段沉积时期强烈构造运动形成的;研究区钙屑砂岩溶孔发育有限,不能整体改善储层质量,仅形成局部“甜点”;晶间微孔普遍发育,是钙屑砂岩孔隙的主要贡献者,且大部分微孔都是有效孔隙,加上微裂缝的沟通,是天然气的主要储集空间。高钙屑高钙质胶结物含量的地区(如高能的分流河道),由于强烈重结晶提供大量晶间微孔,加上裂缝的沟通,成为须三段的优质储层区,可作为勘探开发的重点。

关键词:孔隙类型;孔隙定量演化;孔隙有效性;晶间微孔隙;钙屑砂岩;须家河组三段;元坝地区;四川盆地东北部

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Pore types and geological significance of calcarenaceous sandstones in the 3rd member of Xujiache Formation in Yuanba area, Northeastern Sichuan Basin

Tang Zicheng¹, Zhong Dakang¹, Wang Wei², Shi Wenbin², Du Hongquan², Sun Haitao¹, Wang Ai¹, Zhou Zhiheng¹, Jia Xiaolan¹

[1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. SINOPEC Exploration Company, Chengdu, Sichuan 610041, China]

Abstract: Calcarenaceous sandstone is a type of sandstone in terrigenous clastic rocks in terms of genesis. The diagenesis in the burial process, reservoir space and hydrocarbon production capacity of calcarenaceous sandstones are determined to be quite special due to its uncommon compositions. Given the observation of the core, common thin sections, casting thin sections, cathode luminescent thin sections, scanning electron photomicrograph, as well as X-ray diffraction data, mercury intrusion data, and physical properties, we made a systematic study on the pore types, as well as quantitative evolution and validity of pores in the calcarenaceous sandstones of the 3rd member of Xujiache Formation (T_3x_3) in western Yuanba area, Northeastern Sichuan Basin. The results show that there are fewer primary pores in these sandstones, and the secondary pores are mainly categorized into three types: intercrystalline micropores, dissolved pores and fractured pores. They are different in terms of genetic mechanism – the formation of intercrystalline micropores are mainly related to the recrystallization of calcareous debris and cements, and some intercrystalline micropores of calcareous debris are a result of the dolomitization of host rocks; while there are two causes for fractures: the intergranular fractures were developed out of unsynchronized recrystallization of calcareous debris and cements, and the structural fractures were formed due to the intense tectonic movements during the deposition of the T_3x_3 . In addition, the dissolved pores were less developed and just formed partial “sweet spots”, unable to improve the reservoir quality as a whole; while the well-developed intercrystal-

收稿日期:2018-06-12;修订日期:2019-05-30。

第一作者简介:唐自成(1993—),男,硕士研究生,岩石学与储层地质学。E-mail:chengzitang112207@163.com。

通讯作者:钟大康(1961—),男,教授,博士生导师,岩石学与储层地质学。E-mail:zhongdakang@263.net。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05002004-011)。

line pores, most of which are effective, serve as major contributors to the reservoir space of gases in calcarenaceous sandstones, combined with the communication provided by microfractures. Areas with high contents of calcareous debris and calcareous cements (such as high-energy distributary channels) are the high-quality reservoir zones in the T_3x_3 , and could be the key areas for exploration and development, since strong recrystallization functions to produce a large number of intercrystalline micropores and the connection provided by fractures is also effective.

Key words: type of pores, quantitative evolution of pore, validity of pore, intercrystalline micropore, calcarenaceous sandstone, the 3rd member of Xujiahe Formation, Yuanba area, Northeastern Sichuan Basin

川东北元坝地区在须家河组三段沉积时期湖平面整体上升,岩性以泥岩为主^[1-2],但在元坝西部由于距离龙门山较近,构造活动强烈,出现了龙门山碳酸盐岩区充足供源,发育一套辫状河三角洲相的钙屑砂岩,具砂泥互层特征,生储盖组合良好^[3-4]。钙屑砂岩是一种特殊的岩类,具有3个典型特征:①成分上钙屑含量极高,平均在50%以上,部分区域可达90%左右^[5];②钙屑砂岩在中国只分布在四川盆地的川西凹陷和川东北地区^[6-8],而本次的研究区处在川东北;③钙屑砂岩物性极低,孔隙度平均仅有2%,溶蚀发育较弱。近年来随着勘探开发的深入,在川东北元坝须三段钙屑砂岩中取得了重大突破,区内多口井在测试中获得中-高产工业气流,元陆7井日产气 $120.83 \times 10^4 \text{ m}^3$,元陆12井日产气 $77.17 \times 10^4 \text{ m}^3$,且油压稳定,具有良好的勘探开发前景。

钙屑砂岩在成因上属于陆源碎屑岩中的一类砂岩,但在成岩过程和储集物性上却与碳酸盐岩很相似,其成分的特殊性决定了埋藏过程中成岩作用的特殊性、储集空间的特殊性以及油气产能上的特殊性。前人对研究区钙屑砂岩的沉积相^[9-11]、层序^[12-13]和构造^[14-16]等方面进行了较为深入的研究,但对于储层特征的探讨相对较少,仅概括性地罗列了成岩作用类型和物性分布特征等内容,缺乏完整的成岩序列与定量的孔隙演化^[17-18],且孔隙发育类型尚未系统总结,孔隙类型研究还存在问题,对于这种钙屑砂岩的特殊性总结不够。一些学者认为钙屑砂岩孔隙类型主要为溶蚀孔与裂缝,将钙屑砂岩高产的原因归于溶蚀对储层的改造,定义为裂缝-溶孔类储层^[19-21]。但笔者通过深入分析发现,研究区除了存在溶蚀孔隙和裂缝之外,还普遍发育重结晶形成的晶间微孔,且溶蚀作用较弱,溶蚀孔隙发育局限,很难对储层进行全面改造,因此,有必要对钙屑砂岩储层孔隙发育类型及成因重新进行分析。本文利用普通岩石薄片、铸体薄片、阴极发光、扫描电镜、X-衍射数据、压汞数据及物性数据等资料,对研究区钙屑砂岩的孔隙类型及特殊性进行了系统性研究,剖析了成岩序列与孔隙定量演化特征,为下一步的勘探开发提供了指导。

1 区域地质概况

元坝地区位于四川盆地川北低缓带北缘,西临龙门山断褶带,北接米仓-大巴断褶带,东为川东高陡断褶带(图1a)^[20]。自晚印支运动以来,在松潘-甘孜、秦岭造山带与四川盆地之间,发育了北东向的龙门山和北西向的米仓山-大巴山两个推覆构造带,形成了龙门山、米仓山和大巴山所限的低缓构造区^[22-23]。

研究区中新世地层发育完整,底部三叠系的飞仙关组、嘉陵江组和雷口坡组为海相地层,其上发育上三叠统须家河组至侏罗系的陆相地层(图1b),且富含丰富的油气资源,为中国研究陆相地层的理想地区^[24-25]。晚三叠世须三段沉积时期湖平面上升,发生大规模湖侵,研究区主要发育辫状河三角洲-湖泊沉积体系(图1c),高能的三角洲平原水上分流河道和前缘水下分流河道在元坝西北部连片分布^[21]。须三段物源主要来自龙门山北段三叠系(飞仙关组、嘉陵江组和雷口坡组)碳酸盐岩发育区^[3],因此岩石类型属于较为特殊的钙屑砂岩,并在整体湖侵的背景下呈现典型的砂泥互层特征,具有良好的生-储-盖组合。

通过对元坝西23口取心井300多块岩石薄片的观察,共统计了442个薄片样品鉴定数据(表1)。

分析发现,须三段主要为岩屑砂岩,而岩屑中又以碳酸盐岩岩屑为主,平均含量达到66.93%,具有高钙屑高钙质胶结物低杂基的特点(图2a,b)。砂岩粒径分布范围较广,从粉砂到砾均存在,以中砂和细砂为主,含量分别为32.88%和44.22%(图3)。颗粒以点-线接触为主(图2c),分选中等-好,磨圆度次棱-次圆,颗粒支撑结构,胶结类型多为孔隙式,也存在基底式(图2d),这反映了胶结的时间比较早,原生孔隙由于早期的胶结大量损失^[26]。

2 孔隙类型及意义

通过334块铸体薄片、210块扫描电镜的观察,发现钙屑砂岩孔隙类型包括原生孔隙和次生孔隙两大

表 1 元坝地区须三段岩石成分统计

Table 1 Statistics of rock composition in T₃x₃, Yuanba area

项目	石英含量/ %	长石含量/ %	岩屑含量/%			杂基含量/ %	胶结物含量/%		
			岩浆岩	变质岩	碳酸盐岩		钙质	硅质	高岭石
样品个数	387	37	43	147	442	95	432	65	22
最小值	3.74	0.08	0.11	0.17	28.24	0.05	1.39	0.14	0.03
最大值	69.62	8.68	2.76	4.68	98.74	9.46	30.87	4.22	1.21
平均值	29.71	0.71	0.18	2.47	66.93	2.18	12.29	1.21	0.08

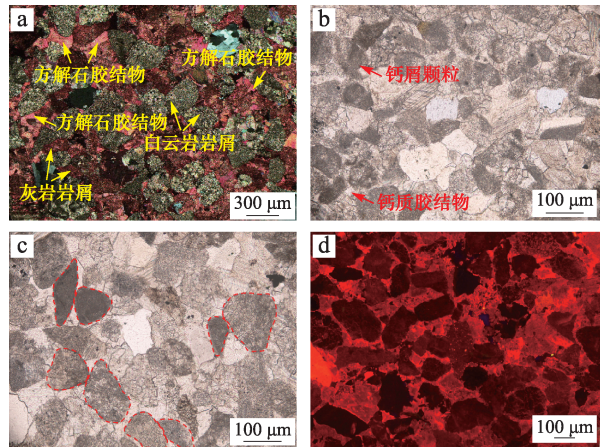


图 2 元坝地区须三段钙屑砂岩压实与胶结镜下特征
Fig. 2 Microscopic characteristics of compaction and cementation of calcarenaceous sandstones in T₃x₃, Yuanba area
a. 强烈胶结,元坝 271 井,埋深 4 113.00 m,单偏光;b. 高钙屑高钙质胶结物,元陆 22 井,埋深 4 154.71 m,单偏光;c. 颗粒点-线接触,元陆 22 井,埋深 4 161.78 m,单偏光;d. 基底式胶结,元坝 271 井,埋深 4 095.66 m,阴极发光;

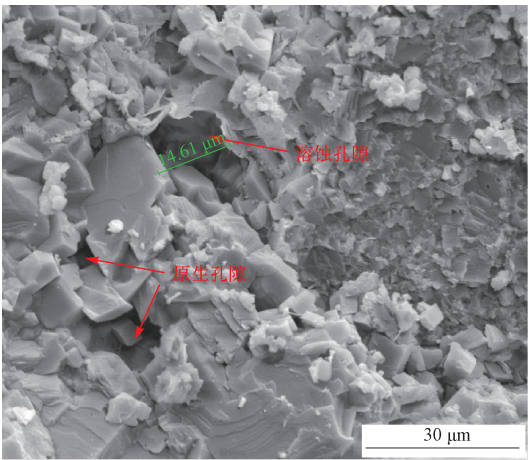


图 4 元坝地区元陆 15 井须三段钙屑砂岩原生孔隙与溶蚀孔隙镜下特征(埋深 4 275.46 m)
Fig. 4 Microscopic characteristics of primary pores and dissolved pores of calcarenaceous sandstones from Well Yuanlu 15 in T₃x₃, Yuanba area (burial depth: 4 275.46 m)

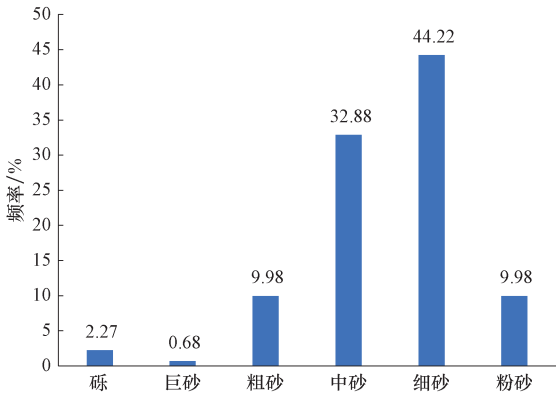


图 3 元坝地区须三段钙屑砂岩粒度分布直方图
Fig. 3 A histogram of calcarenaceous sandstone granularity in T₃x₃, Yuanba area

次生孔隙是钙屑砂岩的重要孔隙类型,对次生孔隙进行归纳总结,发现主要存在 3 种,即晶间微孔隙、裂缝型孔隙与溶蚀型孔隙,且以晶间微孔、裂缝型孔隙为主(表 2)。

2.1 晶间微孔隙

晶间微孔是钙屑砂岩中的一种主要孔隙类型,对于微孔隙的定义,不同的学者利用不同的研究手段提出了不同的标准^[27-30]。由于普通的薄片厚度为 0.03 mm,当孔隙直径小于薄片厚度时,在偏光显微镜下就很难观察孔隙的结构形态,因此,根据现有的技术手段和资料,结合前人研究成果,将直径小于 0.03 mm 的孔隙定义为微孔隙。晶间微孔在钙屑砂岩中普遍存在,除了粒度较细的粉砂岩,其余的薄片均发现有,占比达到了 93.71%,主要包括了两类:钙屑粒内晶间微孔和胶结物晶间微孔。钙屑晶间微孔直径与胶结物晶间微孔相比偏小,钙屑晶间微孔直径较大的约 6 μm(图 5a),而胶结物晶间微孔可达 12 μm(图 5b),形状都较为规则。小的微孔直径处于纳米级,约 10 ~ 600 nm,以晶间缝的形式出现。

钙屑砂岩晶间微孔的成因存在两个:一个仅针对钙屑内部的晶间微孔,钙屑母岩多为白云岩,发生白云岩化后存在大量晶间微孔^[31-32],之后经过搬运沉积形成钙屑砂岩,微孔依然存在;另一个成因是重结晶作用,

表 2 元坝地区须三段钙屑砂岩孔隙类型及占比统计

Table 2 Statistics of pore types and proportion of calcarenaceous sandstones of T_3x^3 , Yuanba area

孔隙类型	晶间微孔隙		裂缝型孔隙		溶蚀型孔隙	
	钙屑粒内晶间微孔	胶结物晶间微孔	贴粒缝型	构造裂缝型	颗粒溶蚀型	胶结物溶蚀型
样品个数及占比	313(93.71%)		30(8.98%)	74(22.16%)	13(3.89%)	21(6.29%)

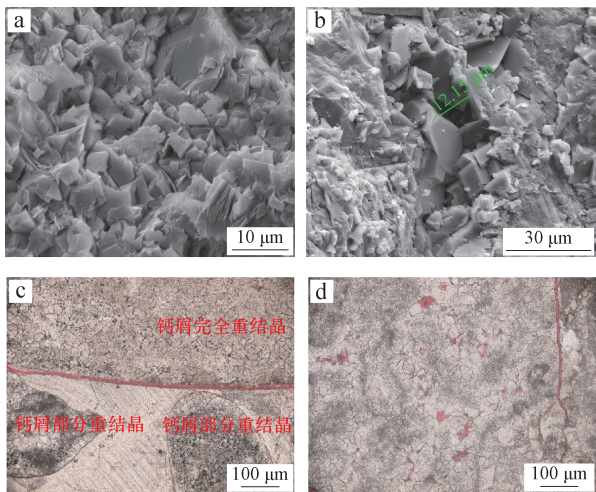


图 5 元坝地区须三段钙屑砂岩晶间微孔和重结晶镜下特征

Fig.5 Microscopic characteristics of intercrystalline micropores and recrystallization in calcarenaceous sandstones of T_3x^3 , Yuanba area

a. 钙屑晶间微孔,元陆 18 井,埋深 4 564.80 m,扫描电镜;b. 胶结物晶间微孔,元陆 15 井,埋深 4 280.10 m,扫描电镜;c. 钙屑重结晶,元陆 18 井,埋深 4 526.49 m,单偏光;d. 钙质胶结物重结晶,元陆 6 井,埋深 4 182.98 m,单偏光

钙屑砂岩的重结晶作用主要包括两个部分,即钙屑颗粒的重结晶与钙质胶结物的重结晶(图 5c,d),且以钙质胶结物重结晶为主。钙屑颗粒是来源于龙门山北段三叠系(飞仙关组、嘉陵江组和雷口坡组)的泥晶白云岩,钙质胶结物是通过化学沉淀形成的泥晶方解石,原始粒度都比较细,在成岩过程中发生重结晶,颗粒明显变大且具有晶型,颗粒之间形成大量晶间微孔^[33-34]。钙屑重结晶存在两种情况,一种是整个钙屑都完全重结晶,多出现在粒度较粗的钙屑中,砾级(>2 mm)和巨砂级(1~2 mm)钙屑常见;另一种情况是钙屑内部仅部分重结晶,这类情况多出现在粒度相对较细的钙屑中,粗砂级(0.5~1 mm)和中砂级(0.25~0.5)钙屑常见,部分细砂也可见到;对于粉砂级的钙屑,重结晶不明显。

2.2 溶蚀型孔隙

溶蚀型孔隙是钙屑砂岩的一种次要孔隙,占比仅有 10.18%,主要包括钙屑溶蚀孔和胶结物溶蚀孔两种,孔隙直径也不均一,大的可达 0.1 mm,小的属于微孔范围,约 15 μm。须三段是富含水生和陆生植物的煤系地层,进入中成岩阶段之后,有机质开始成熟而产

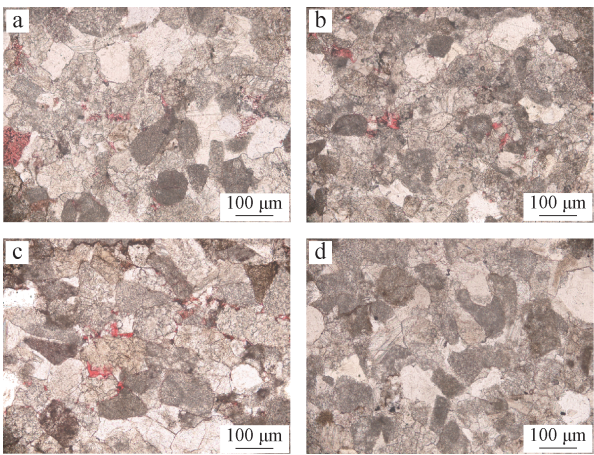


图 6 元坝地区须三段钙屑砂岩溶蚀孔隙镜下特征

Fig.6 Microscopic characteristics of dissolved pores in calcarenaceous sandstones of T_3x^3 , Yuanba area

a. 钙屑与钙质胶结物溶蚀,元陆 20 井,埋深 4 140.74 m,单偏光;b. 钙屑与钙质胶结物溶蚀,元陆 18 井,埋深 4 564.41 m,单偏光;c. 溶蚀孔隙,元陆 15 井,埋深 4 275.33 m,单偏光;d. 溶蚀孔隙不发育,元陆 15 井,埋深 4 279.42 m,单偏光

生有机酸,有机酸进入储层对钙屑及钙质胶结物进行溶蚀^[35],产生溶孔改善储层质量,因此,前人认为溶孔是钙屑砂岩孔隙的主要贡献者。

然而通过研究发现,溶蚀孔隙的发育是有限的,难以整体改善储层质量,只能形成局部的“甜点”。首先,在整体上须三段的钙屑砂岩溶蚀现象少见。在 334 块铸体薄片,仅有 34 块薄片发现了溶蚀现象,占比 10.2%,绝大多数的薄片均未见到溶蚀现象。其次,溶蚀程度比较低。对存在溶蚀现象的薄片进行观察发现,溶蚀仅出现于少量的钙屑和胶结物中,并不是普遍存在,且大多数钙屑颗粒溶蚀不完全,胶结物溶蚀呈零星状分布(图 6a,b)。最后,在剖面上溶蚀孔隙发育厚度是有限的,并不是整个砂体都存在溶蚀孔隙,多发育在砂体的顶底(图 6c,d)。元陆 15 井存在一个约 30 m 的叠合砂体(埋深 4 270~4 300 m),取心约 7 m(埋深 4 275~4 282 m),但溶蚀孔隙仅出现在砂体顶部,且厚度仅约 1 m(埋深 4 275~4 276 m)。

2.3 裂缝型孔隙

裂缝型孔隙是钙屑砂岩另一类主要的孔隙,占比达到了 31.14%,主要包括了两类:贴粒缝和构造裂缝。贴粒缝是一种沿着较粗颗粒(砾、巨砂)边缘的裂

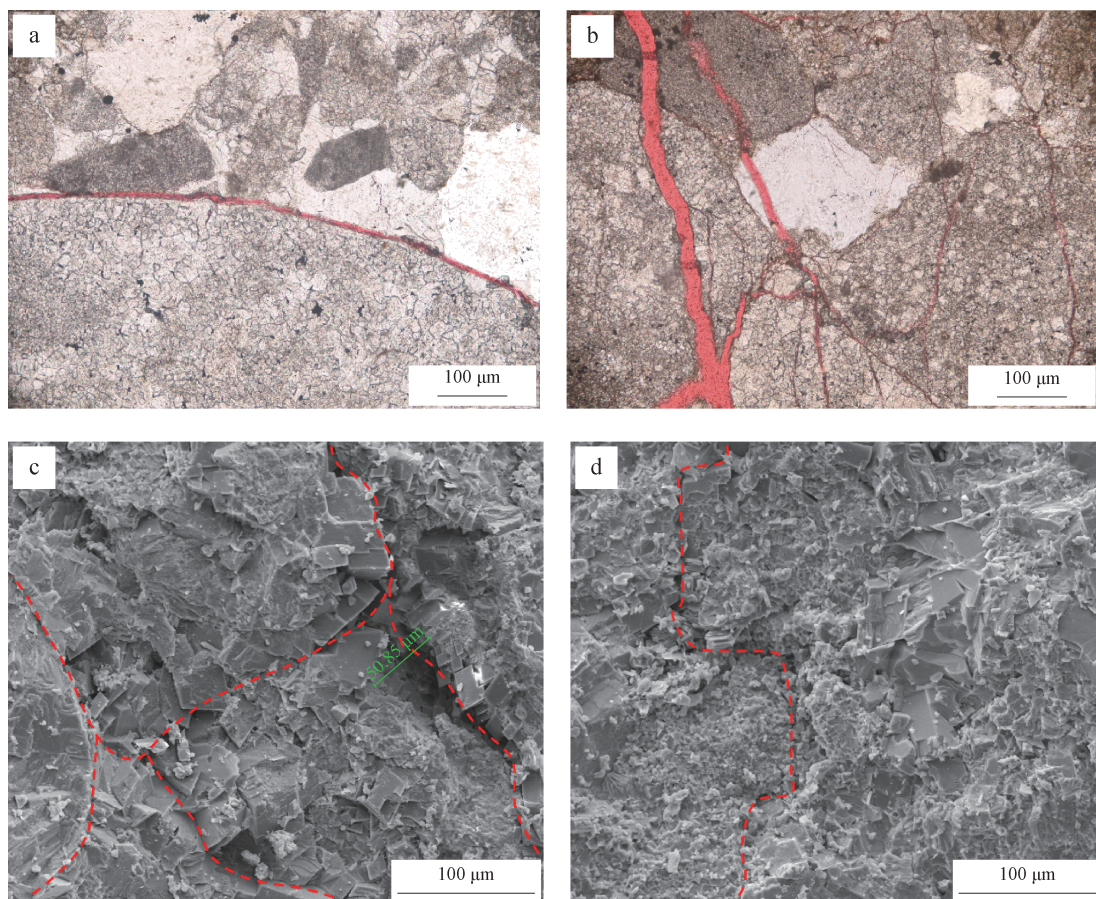


图7 元坝地区须三段钙屑砂岩裂缝镜下特征

Fig. 7 Microscopic characteristics of fractures in calcarenaceous sandstone of T_3x^3 , Yuanba area

a. 贴粒缝,元陆12井,埋深4 315.55 m,单偏光;b. 构造缝,元陆15井埋深,4 282.43 m,单偏光 c. 微裂缝沟通晶间微孔,元陆15井,埋深4 275.60 m,扫描电镜;d. 微裂缝沟通晶间微孔,元陆18井,埋深4 524.34 m,扫描电镜

缝,缝宽较小,平均约0.04 mm(图7a)。这种裂缝的形成与重结晶有关,钙屑颗粒与胶结物成分的来源不同,导致两者的性质有差别,当钙屑的重结晶与胶结物的重结晶不同步时,钙屑与胶结物体积的变化也不同,就会在颗粒边缘形成这种贴粒缝^[36-38]。构造裂缝在钙屑砂岩中比较常见,占比达到了22.16%,缝宽不均一,大的可达0.56 mm(图7b),小的仅能在扫描电镜下才能看见,属于微裂缝(图7c,d)。由于钙屑颗粒和钙质胶结物硬度较大且脆,在须三段强烈构造运动的背景下,就会产生大规模的构造裂缝,因此钙屑含量越高,钙质胶结越强烈的地区,裂缝就越发育^[39]。裂缝对于孔隙度的影响不大,但是却能够对孔隙进行沟通(图7c,d),微裂缝对晶间微孔进行了很好的连通,这对改善致密的钙屑砂岩储层质量起到了非常重要的作用。

3 孔隙演化定量分析

在孔隙类型研究的基础之上,对钙屑砂岩孔隙的

演化进行定量分析。砂岩孔隙的演化与成岩作用、构造作用等因素息息相关,综合运用普通岩石薄片、铸体薄片、阴极发光等资料,结合前人研究成果,分析发现研究区钙屑砂岩的成岩序列主要为早期强烈钙质胶结、中弱压实,中期弱溶蚀、强烈重结晶。

根据 Beard 和 Wely 提出的砂岩原始孔隙度计算公式^[40]:

$$\Phi_0 = 20.91 + 22.90/S_0 \quad (1)$$

式中: Φ_0 为砂体原始孔隙度,%; S_0 为特拉斯科分选系数。

借鉴前人的研究方法^[41],计算得到了元坝西须三段钙屑砂岩的原始孔隙度,平均值为32.22%(共81个薄片样品)。运用点估法,每块薄片估点300个,统计获得溶蚀面孔率、裂缝面孔率等,为了将面孔率转换成孔隙度,从样品中挑选出面孔率及对应的实测孔隙度,共21个数据组,运用公式: $T = \Phi_1/\Phi_2$ (T 为转换系数, Φ_1 为实测孔隙度, Φ_2 为总面孔率)^[42-44],计算得出研究区钙屑砂岩面孔率与孔隙

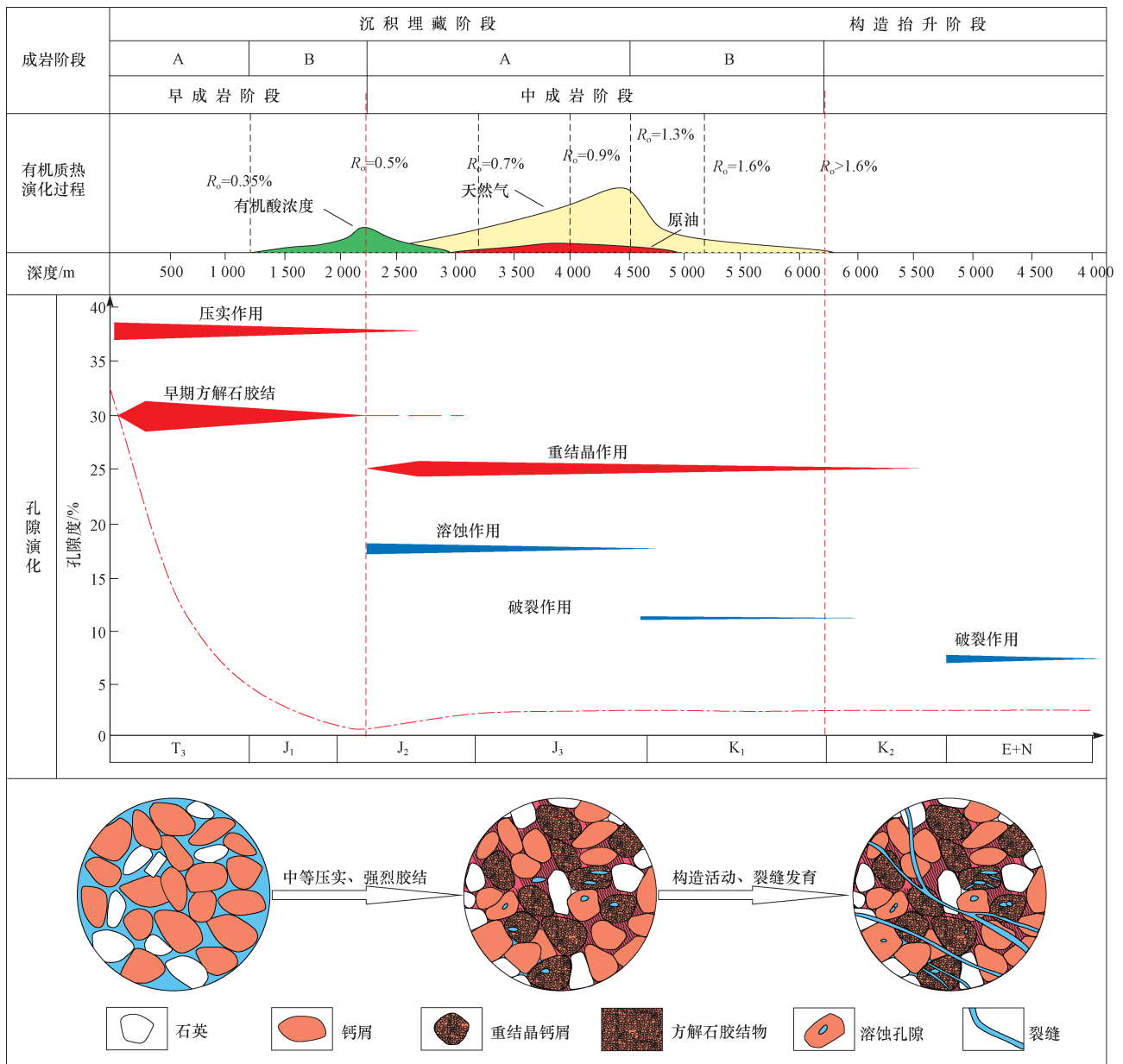


图 8 元坝地区须三段钙屑砂岩成岩序列与孔隙演化

Fig. 8 A graph showing the evolution of diagenetic sequence and pores in calcarenaceous sandstones of T_3x^3 , Yuanba area

表 3 元坝地区须三段钙屑砂岩各孔隙类型与总孔隙占比统计

Table 3 Statistics of the proportions of every pore type to the total pores in calcarenaceous sandstones of T_3x^3 , Yuanba area

孔隙类型	原生孔隙	晶间微孔隙	裂缝型孔隙	溶蚀型孔隙
平均孔隙度/%	0.04	1.35	0.24	0.32
占比/%	2.60	69.23	12.31	16.41

度的转换系数 $T=1.27$ 。结合总面孔率、溶蚀面孔率、裂缝面孔率、胶结物体积,计算视压实率 = (原始孔隙度 - 原生面孔率 $\times 1.27$ - 胶结物体积)/原始孔隙度,其中原生面孔率 = 总面孔率 - 溶蚀面孔率 - 裂缝面孔率,最终得到平均视压实率约为 52.74%,计算出压实减孔 16.99% (原始孔隙度 $\times$ 平均视压实率),同时胶

结减孔等于胶结物含量,孔隙定量演化具体过程如下(图 8)。

须三段钙屑砂岩的原始孔隙度平均为 32.22%,在早成岩阶段,由于强烈的钙质胶结减少了 15.19% 的孔隙度,此时钙屑砂岩孔隙度变为 17.03%,再经过压实作用减少了 16.99%,原生孔隙几乎损失殆尽。中成岩阶段,发生有机酸的溶蚀,溶蚀增孔平均为 0.32%;之后发生重结晶作用产生晶间微孔,然后构造作用产生裂缝增孔 0.24%,达到现今的孔隙度均值 1.95%,可以计算出晶间微孔约为 1.35%,最终得到钙屑砂岩各类孔隙类型与总孔隙的占比(表 3)。也再次证明了溶蚀孔隙发育有限,占比仅有 16.41%;晶间

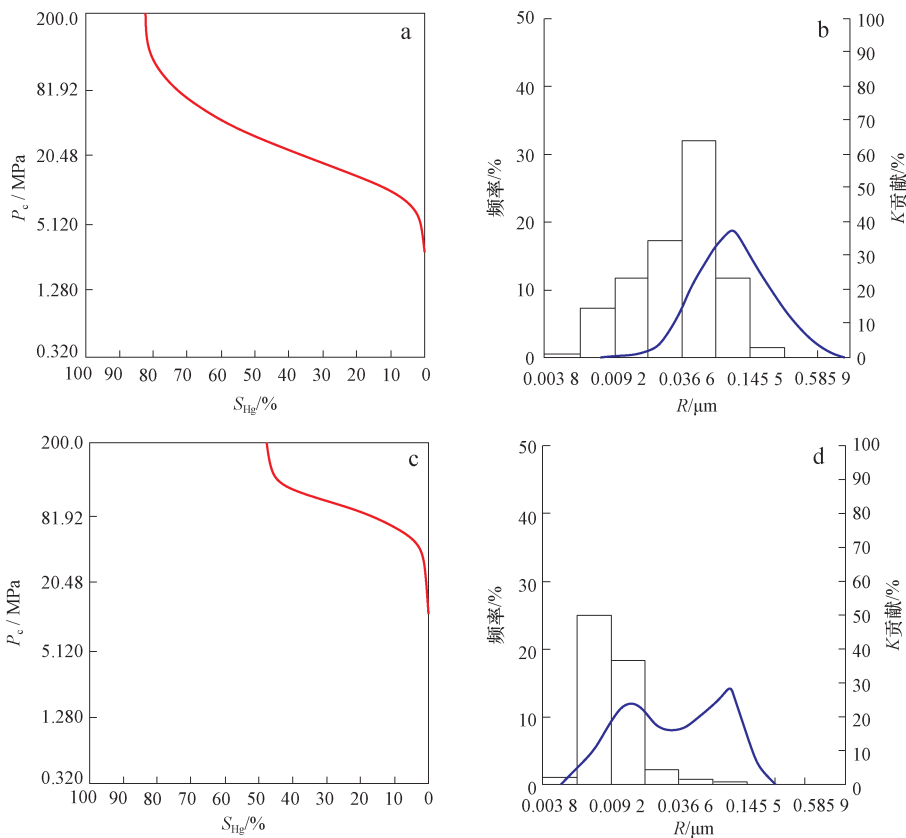


图9 元坝地区须三段钙屑砂岩压汞曲线及孔径分布直方图
Fig. 9 A histogram showing the mercury porosimetry curves of and pore distribution in calcarenaceous sandstones of T_3x^3 , Yuanba area
a,b. 元坝6井,埋深4 294.69 m;c,d. 元陆11井,埋深4 349.95 m

微孔是钙屑砂岩现今孔隙度的最大贡献者,占比达到69.23%。

4 晶间微孔的有效性

晶间微孔在钙屑砂岩中普遍发育,其有效性需要进一步探究。根据研究区9口井的压汞资料分析,选取典型井的压汞曲线,总结了钙屑砂岩的孔隙结构特征(图9)。排驱压力一般在10~20 MPa,最大进汞量在45%~80%,分选较好,明显细歪度,但几乎所有样品退汞量为零,表明喉道非常细,孔喉连通性较差^[43-44]。而从孔隙分布直方图可以看出,孔隙直径虽然多小于1 μm,属于微孔,但大部分微孔对渗透率存在贡献,说明这些微孔是连通的,而天然气是以分子的形式赋存于孔隙中,天然气分子(甲烷、乙烷、丙烷)的直径平均仅有0.4 nm,因此这些微孔是可作为天然气储集空间的有效孔隙。

通过前面分析可知,钙屑含量越高,钙质胶结越强烈的地区,如高能的分流河道,裂缝就越发育。同时,

大量的钙屑和胶结物在重结晶之后又形成了大量的晶间微孔,在微裂缝的沟通下,储层质量较好。因此,高钙屑高钙质胶结物含量的分流河道是须三段的优质储层区。

5 钙屑砂岩的特殊性及相互关系

钙屑砂岩在成因上属于陆源碎屑岩中的一类砂岩,其成分的特殊性决定了埋藏过程中成岩作用的特殊性、储集空间的特殊性以及油气产能上的特殊性。

首先在成分上主要是龙门山二叠系-三叠系提供了大量的碳酸盐岩岩屑,钙屑含量极高,平均在50%以上,部分区域可达90%左右。其次,钙屑砂岩特殊的埋藏成岩过程造成了典型的“弱压实、强胶结、弱溶蚀、强重结晶”成岩特殊性。当碳酸盐岩岩屑沉积下来时,与孔隙水作用,使孔隙水中富含 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} ,在埋藏过程中,随着埋藏深度的增加,温度也逐渐升高,碳酸钙很快发生沉淀,形成了强烈的早期碳酸盐胶结,导致大量原生孔隙度损失,仅在部分地区残留少量原

生孔隙。这种早期碳酸盐胶结不但抑制了压实作用,导致整个须三段钙屑砂岩压实作用都相对较弱,而且在埋藏过程中,孔隙水由于没有运移通道不能自由流动,随着埋深的进一步增加,温度压力增大,须三段的烃源岩成熟,虽然产生了大量有机酸,但对岩石仅产生微弱的溶蚀,形成少量的溶孔。随着埋深的进一步增大,温度压力增加,原来的泥晶碳酸盐藻屑和砂屑发生重结晶作用,形成大量晶间微孔。成岩的特殊性还导致了钙屑砂岩物性的特殊性,强烈的早期钙质胶结导致钙屑砂岩原生孔隙几乎不发育,孔隙多为晶间微孔,平均孔隙度不到2%,物性较差。此外,由于钙屑砂岩的主要颗粒和胶结物均为碳酸盐矿物,因此都具有碳酸盐岩矿物的脆性特征,在构造运动中容易产生一定量的裂缝,而裂缝能够沟通大量的微孔,使得钙屑砂岩储层产量较好。

6 结论

1) 钙屑砂岩次生孔隙类型主要包括晶间微孔隙、裂缝型孔隙及溶蚀型孔隙。晶间微孔的成因是钙屑与钙质胶结物的重结晶作用;裂缝的成因有两个,贴粒缝是由于钙屑与胶结物重结晶不同步,构造裂缝是由于须三段沉积时期强烈构造运动形成的;溶孔是由于有机酸对钙屑砂岩的溶蚀。

2) 研究区钙屑砂岩溶孔发育有限,仅形成局部“甜点”;晶间微孔普遍发育,是孔隙的主要贡献者,且大部分微孔都是有效孔隙,加上微裂缝的沟通,晶间微孔是天然气的主要储集空间。

3) 高钙屑高钙质胶结物含量的地区(如高能分流通河道),强烈重结晶提供大量晶间微孔,加上裂缝的沟通,成为须三段的优质储层区,可作为勘探开发的重点。

4) 钙屑砂岩在成因上属于陆源碎屑岩中的一类,其高钙屑含量的成分特殊性形成了典型“弱压实、强胶结、弱溶蚀、强重结晶”的成岩特殊性;成岩的特殊性也导致了钙屑砂岩物性的特殊性,孔隙多为晶间微孔,平均孔隙度不到2%,物性较差。但由于钙屑砂岩的颗粒与胶结物均具有碳酸盐矿物的脆性特征,在构造运动中产生一定量的裂缝,沟通了大量的微孔,使得钙屑砂岩储层产量较好。

参 考 文 献

- [1] 张峰. 川东北地区上三叠统须家河组层序岩相古地理研究[D]. 成都:成都理工大学,2011.
Zhang Feng. Study on Sequence-Lithofacies paleogeography of the

- Xujiahe Formation of Upper Triassic in northeast of Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [2] 李宏涛, 史云清, 肖开华, 等. 元坝气田须三段气藏层序沉积与储层特征[J]. 天然气工业, 2016, 36(9): 20-34.
Li Hongtao, Shi Yunqing, Xiao Kaihua, et al. Sequence, sedimentary and reservoir characteristics of Xu 3 gas reservoir in the Yuanba Gas-field, NE Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(9): 20-34.
- [3] 淡永. 川东北须家河组物源分析与沉积体系研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
Dan Yong. Analyses of the provenance and the depositional systems of Xujiahe Formation in northeast of Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [4] 沈均均, 陈波, 凡睿, 等. 川东北元坝地区上三叠统须家河组沉积特征研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(19): 46-53.
Shen Junjun, Chen Bo, Fan Rui, et al. Sedimentary character of Upper Triassic series Xujiahe Formation in Yuanba area of northeastern Sichuan [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(19): 46-53.
- [5] 修昊. 剑阁-元坝地区须三段致密砂岩储层特征研究[D]. 新疆: 新疆大学, 2015.
Xiu Hao. Characteristics of T_3x_3 tight gas reservoir, Jiange-Yuanba area [D]. Xinjiang: Xinjiang University, 2015.
- [6] 曾小英, 张小青, 钟玉梅. 川西坳陷中段须家河组四段钙屑砂岩气层的成因[J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 896-902.
Zeng Xiaoying, Zhang Xiaoqing, Zhong Yumei. Origin of calcarenaceous sandstone gas formation of the 4th member of Xujiahe Formation in the middle part of western Sichuan depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6): 896-902.
- [7] 林煜. 川西丰谷构造须家河组四段钙屑砂岩优质储层控制因素[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(4): 691-699.
Lin Yu. Controlling factors for T_3x_4 calcarenaceous sandstone in Fenggu structure, western Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(4): 691-699.
- [8] 郑荣才, 魏钦廉, 高红灿, 等. 川西坳陷中段须家河组四段钙屑砂岩储层特征及有利区块预测[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2007, 34(5): 489-496.
Zheng Rongcai, Wei Qinlian, Gao Hongcan, et al. Prediction of the favorable blocks and the calcarenaceous sandstone reservoir characteristics of Upper Triassic in middle section of the west Sichuan depression [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2007, 34(5): 489-496.
- [9] 盘昌林. 四川盆地元坝地区上三叠统须家河组天然气成藏条件研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
Pan Changlin. Reservoir formation condition of the Xujiahe Formation of the Upper Triassic in Yuanba area Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [10] 曾韬. 川东北元坝地区须三段沉积相及沉积演化[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014(4): 468-475.
Zeng Tao. Sedimentary facies and depositional evolution of Member 3 of Upper Triassic Xujiahe Formation in Yuanba area of northeast Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014(4): 468-475.

- [11] 黎静容,李毓,程洪亮,等.元坝地区须三段沉积特征[J].西安石油大学学报(自然科学版),2013,28(5):43-50.
Li Jingrong, Li Yu, Cheng Hongliang, et al. Sedimentary characteristics of the third member of Xujiahe Formation in Yuanba area[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2013, 28(5): 43-50.
- [12] 郝景宇.川东北地区须家河组沉积与层序特征精细研究[D].武汉:长江大学,2012.
Hao Jingyu. Subtle sediment and sequence character in northeastern Sichuan Basin[D]. Wuhan: Yangtze University, 2012.
- [13] 秦华,肖伟.川东北元坝地区须家河组凝缩层的归属及成因[J].天然气技术与经济,2010,04(3):11-13.
Qin Hua, Xiao Wei. Timing and origin of condensed section of Xujiahe Formation in Yuanba area, northeastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Technology, 2010, 04(3): 11-13.
- [14] 王杰,秦建中,刘文汇,等.川东北元坝地区中生代构造与动态热演化史——磷灰石、锆石(U-Th)/He定年分析[J].石油实验地质,2012,34(1):19-24.
Wang Jie, Qin Jianzhong, Liu Wenhui, et al. Mesozoic tectonics and dynamic thermal history in Yuanba area of northeastern Sichuan Basin: application of (U-Th)/He dating of apatite and zircon[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(1): 19-24.
- [15] 黄进腊,张哨楠,刘成川,等.川东北元坝地区须家河组断层预测及发育特征[J].天然气技术与经济,2013(3):3-6.
Huang Jinla, Zhang Shaonan, Liu Chengchuan, et al. Fault prediction and development in Xujiahe Formation, Yuanba area, northeastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2013(3): 3-6.
- [16] 张冲,谢润成,周文,等.川东北元坝地区须三段致密储集层裂缝特征[J].新疆石油地质,2014,35(4):395-398.
Zhang Chong, Xie Runcheng, Zhouwen, et al. Fractures characteristics in tight reservoir of the 3rd Member of Xujiahe Formation in Yuanba area in northeastern Sichuan Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(4): 395-398.
- [17] 李昌峰.川东北元坝地区须三气藏致密储层特征及分布规律研究[D].成都:成都理工大学,2015.
Li Changfeng. Research on the tight gas reservoir characteristics and distribution regularities of Member 3 of Xujiahe Formation in the northeastern Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [18] 何曼如,孙廷彬,王玲,等.川东北元坝地区须三段储集层形成机制[J].断块油气田,2016,23(1):6-10.
He Manru, Sun Tingbin, Wang Lin, et al. Formation mechanism of 3rd Member of Xujiahe Formation reservoir in Yuanba area of northeast Sichuan Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(1): 6-10.
- [19] 肖开华,李宏涛,贾爽.川东北元坝地区须三段钙屑砂岩储层特征及控气因素[J].石油与天然气地质,2014,35(5):654-660.
Xiao Kaihua, Li Hongtao, Jia Shuang. Characteristics of calcarenaceous sandstone reservoirs and gas accumulation control factors of the 3rd Member of Xujiahe Formation in Yuanba area, northeast Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 654-660.
- [20] 杜红权,王威,周霞,等.川东北元坝地区须三段钙屑砂岩储层特征及控制因素[J].石油与天然气地质,2016,37(4):565-571.
Du Hongquan, Wang Wei, Zhou Xia, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of calcareous coarse elastic rocks of the third Member of Xujiahe Formation in Yuanba area, northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 565-571.
- [21] 王威.高能河道砂体特征及勘探意义——以元坝地区须三段为例[J].石油实验地质,2013,35(6):657-661.
Wang Wei. Characteristics of highenergy channel sandstone and its exploration significance: A case from Xujiahe Formation in Yuanba area[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(6): 657-661.
- [22] 胡宜奎.川东北元坝地区东部须家河组储层特征研究[D].成都:成都理工大学,2014.
Hu Yikui. The research of reservoir characteristic of east Yuanba in northeast Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [23] 陈彦庆.川东北地区上三叠统须家河组储层特征研究[D].成都:成都理工大学,2011.
Chen Yanqing. The research of reservoir characteristics of Upper Triassic Xujiahe Formation in the northeast area of Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [24] 李阔,曾韬,潘磊.川东北地区须家河组储层特征研究[J].岩性油气藏,2012,24(1):46-51.
Li Kuo, Zeng Tao, Pan Lei. Reservoir characteristics of Xujiahe Formation in northeastern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(1): 46-51.
- [25] 袁桃.四川盆地元坝地区西部须家河组储层特征与控制因素[D].成都:成都理工大学,2014.
Yuan Tao. The reservoir characteristics and main controlling factors of the Xujiahe Formation in the west of Yuanba area of Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [26] Rittenhouse G. Pore-space reduction by solution and cementation[J]. Aapg Bulletin, 1971(1): 80-91.
- [27] 刘春,张荣虎,张惠良,等.致密砂岩储层微孔隙成因类型及地质意义——以库车前陆冲断带超深层储层为例[J].石油学报,2017,38(2):150-159.
Liu Chun, Zhang Ronghu, Zhang Huiliang, et al. Genetic types and geological significance of micro pores in tight sandstone reservoirs: A case study of the ultra deep reservoir in the Kuqa foreland thrust belt, NW China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(2): 150-159.
- [28] 应凤祥,杨式升,张敏,等.激光扫描共聚焦显微镜研究储层孔隙结构[J].沉积学报,2002,20(1):75-79.
Ying Fengxiang, Yang Shisheng, Zhang Min, et al. Application of laser scanning confocal microscope to the measurement of pore texture in reservoirs[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(1): 75-79.
- [29] 邹才能,朱如凯,白斌,等.中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J].岩石学报,2011,27(6):1857-1864.
Zhou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1857-1864.
- [30] Pittman E D. Microporosity in carbonate rocks[J]. Aapg Bulletin, 1971: 98-105.

- [31] 包洪平,杨帆,蔡郑红,等.鄂尔多斯盆地奥陶系白云岩成因及白云岩储层发育特征[J].天然气工业,2017,37(1):32-45.
BaoHongping,Yang Fan,Cai Zhenghong,et al. Origin and reservoir characteristics of Ordovician dolostones in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry,2017,37(1):32-45.
- [32] 郑剑锋,沈安江,陈永权,等.塔里木盆地古生界白云岩储集空间特征及储层分类探讨[J].天然气地球科学,2015,26(7):1256-1267.
Zheng Jianfeng,Shen Anjiang,Chen Yongquan,et al. Reservoir space and reservoir classification of Lower Paleozoic dolomite in the Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience,2015,26(7):1256-1267.
- [33] 朱涛.剑阁—元坝地区须三段致密砂岩储层评价[D].成都:成都理工大学,2015.
Zhu Tao. Comprehensive evaluation of the third segment of Xujiahe reservoir in Jiange-Yuanba area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2015.
- [34] Beard D C,Weyl P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand[J]. Aapg Bulletin,1973,57(2):349-369.
- [35] Surdam R C,Boese S W,Crossey L J. The chemistry of secondary porosity[J]. Aapg Bulletin,1984,37(2):183-200.
- [36] 陈广,刘远汀,程博文.冲积扇储层中的砾缘缝——一种特殊储集空间的类型[J].四川地质学报,2017,37(2):179-181.
ChenGuang,Liu Yuanting,Cheng Bowen. Grain boundary fracture in alluvial fan reservoir: A special reservoir space[J]. Acta Geologica Sichuan,2017,37(2):179-181.
- [37] 李跃纲,巩磊,曾联波,等.四川盆地九龙山构造致密砾岩储层裂缝特征及其贡献[J].天然气工业,2012,32(1):22-26.
Li Yuegang,Gong Lei,Zeng Lianbo,et al. Characteristics of fractures and their contribution to the deliverability of tight conglomerate reservoirs in the Jiulongshan structure, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry,2012,32(1):22-26.
- [38] 曾联波,李跃纲,王正国,等.川西南部须二段低渗透砂岩储层裂缝类型及其形成序列[J].地球科学,2007,32(2):194-200.
Zeng Lianbo,Li Yuegang,Wang Zhengguo,et al. Type and sequence of fractures in the second member of Xujiahe Formation at the south of western Sichuan depression[J]. Earth Science,2007,32(2):194-200.
- [39] 王威,岳全玲.四川盆地北部须家河组致密砂岩储层成因机制[J].天然气勘探与开发,2012,35(1):13-17.
Wang Wei,Yue Quanling. Genetic mechanisms for tight sandstone reservoir of Xujiahe Formation, northern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development,2012,35(1):13-17.
- [40] 张莉,邹华耀,郝芳,等.川东北元坝地区须家河组储层特征与超致密成因探讨[J].地质学报,2017,91(9):2105-2118.
Zhang Li,Zou Huayao,Hao Fang,et al. Characteristics and densification causes and of highly-tight sandstone of the Xujiahe Formation (T_3x^2) in the Yuanba area, northeastern Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica,2017,91(9):2105-2118.
- [41] 钟大康,祝海华,孙海涛,等.鄂尔多斯盆地陇东地区延长组砂岩成岩作用及孔隙演化[J].地学前缘,2013,20(2):61-68.
Zhong Dakang,Zhu Haihua,Sun Haitao,et al. Diagenesis and porosity evolution of sandstones in Longdong area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers,2013,20(2):61-68.
- [42] 胡浩,路遥,唐群英,等.川东北地区须家河组储层成岩作用对孔隙演化影响的定量研究[J].岩性油气藏,2014,26(4):103-109.
Hu Hao,Lu Yao,Tang Qunying,et al. Quantitative research on the effect of diagenesis on porosity evolution of Xujiahe Formation in northeastern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs,2014,26(4):103-109.
- [43] 冯旭,刘洛夫,李朝玮,等.碎屑岩孔隙演化定量计算方法的改进和应用[J].石油与天然气地质,2017(6):1198-1207.
Feng Xu,Liu Luofu,Li Chaowei,et al. Improvement and application of quantitative calculation of porosity evolution of elastic rock[J]. Oil & Gas Geology,2017(6):1198-1207.
- [44] 王艳忠,操应长,慈克来,等.碎屑岩储层地质历史时期孔隙度演化恢复方法——以济阳坳陷东营凹陷沙河街组四段上亚段为例[J].石油学报,2013,34(6):1100-1111.
Wang Yanzhong,Cao Yingchang,Xi Kelai,et al. A recovery method for porosity evolution of clastic reservoirs with geological time: a case study from the upper submember of Es₄ in the Dongying depression, Jiyang subbasin[J]. Acta Petrolei Sinica,2013,34(6):1100-1111.

(编辑 张玉银)