

川西丰谷构造须家河组四段 钙屑砂岩优质储层控制因素

林煜^{1,2}, 吴胜和^{1,2}, 徐樟有^{1,2}, 倪玉强^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

(2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

摘要:钙屑砂岩在整个川西坳陷须家河组四段广泛发育,且普遍致密。采用铸体薄片、扫描电镜、物性分析和水岩实验等手段,对丰谷构造须四段钙屑砂岩的基本特征进行了分析,探讨了沉积环境、成岩作用和构造运动对该类型优质储层形成的控制作用。结果表明,研究区钙屑砂岩分选中等—好,成分成熟度低,主要的储集空间为粒间溶孔和残余粒间孔,属特低孔特低渗储层。沉积作用和成岩作用是钙屑砂岩优质储层形成的主控因素。其中,发育在相带、且碳酸盐岩岩屑含量高(>90%)是钙屑砂岩优质储层发育的先决条件;而埋藏成岩过程中有机酸的溶蚀、烃类的早期充注和早期方解石胶结物的少量生成是钙屑砂岩优质储层孔隙保存及次生溶孔形成的关键。

关键词:钙屑砂岩;特低孔特低渗储层;控制因素;沉积特征;成岩作用;构造运动;须四段

中图分类号:TE122.2

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2012)04-0691-09

引用格式:Lin Yu, Wu Shenghe, Xu Zhangyou, *et al.* Controlling factors for T_{3x4} calcarenaceous sandstone in Fenggu structure, western Sichuan basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(4): 691-699. [林煜, 吴胜和, 徐樟有, 等. 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.]

0 引言

川西坳陷丰谷构造的油气勘探始于20世纪50年代,前人^[1-4]针对该地区的油气生成、构造演化、沉积特征等开展了一系列的研究工作。研究成果和勘探实践表明,丰谷构造上三叠统须家河组发育良好的烃源岩和储盖组合,油气资源丰富,其中须四段作为优质储层的主要发育层段,天然气预测储量达 $313.08 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[5]。

钙屑砂岩是指碎屑中碳酸盐岩岩屑占50%以上的砂岩^[6]。该类砂岩在整个川西坳陷须家河组四段广泛发育,但普遍致密。2005年,在丰谷构造川丰563井须四段致密碎屑岩中首次发现了钙屑砂岩优质储层。这一发现改变了学者们关于钙屑砂岩为非储集岩的传统观点,拓宽了油气勘探的领域。截止目

前,国内学者^[6-7]针对钙屑砂岩储层特征和含气性预测做了探索性工作,但尚未对钙屑砂岩优质储层的形成机理开展系统性研究。为此,笔者以薄片观察、物性分析和水岩实验等作为研究手段,探讨了钙屑砂岩优质储层形成的控制因素,以期深化致密砂岩储层的地质理论和指导该类优质储层的油气勘探。

1 地质概况

四川盆地富含大量的天然气资源,四周被高大的山系所环绕,北为米仓山、大巴山,南为大凉山,西为龙门山、邛崃山,东为七曜山,盆地面积约为 $19 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。丰谷构造位于四川盆地西部坳陷中段孝泉—新场—合兴场—丰谷NEE向继承性隆起带的东端(图1),从深至浅均形成背斜圈闭,现今地表为一近NEE向的鼻状构造。钻井资料表明丰谷构造

收稿日期:2012-03-20;修回日期:2012-04-23.

基金项目:国家科技重大专项(编号:2011ZX05009-003);国家油气重大专项(编号:2011ZX05031-003)联合资助.

作者简介:林煜(1985-),男,陕西延长人,博士研究生,主要从事精细油藏描述及开发地质研究. E-mail:lin66yu@163.com.

地层齐全,地表为第四系覆盖,钻遇地层由上至下分别为白垩系剑门关组;侏罗系上统蓬莱镇组、遂宁组,中统沙溪庙组、千佛崖组,下统自流井组;上三叠统须家河组(须二段、须三段、须四段、须五段)^[5]。

须家河组为陆相含煤地层,其中须三段、须五段以泥页岩为主,发育大量优质烃源岩;须二段、须四段以砂岩为主,也发育部分烃源岩,这些烃源岩有机质丰度高、品质好,在演化过程中生成了丰富的油气

(表 1)。

须四段作为丰谷构造的主力产气层段,现今埋深 3 500~4 000m,经历了强烈的构造深埋作用和成岩作用。储层以砂岩为主,按碎屑组分的不同,砂岩可细分为钙屑砂岩(39.5%)、岩屑砂岩(29.9%)、长石岩屑砂岩(5.2%)和岩屑石英砂岩(25.4%)。其中钙屑砂岩虽整体致密,但其内部发育孔隙疏松段,即甜点。此类岩石是须四段最主要的储集岩。

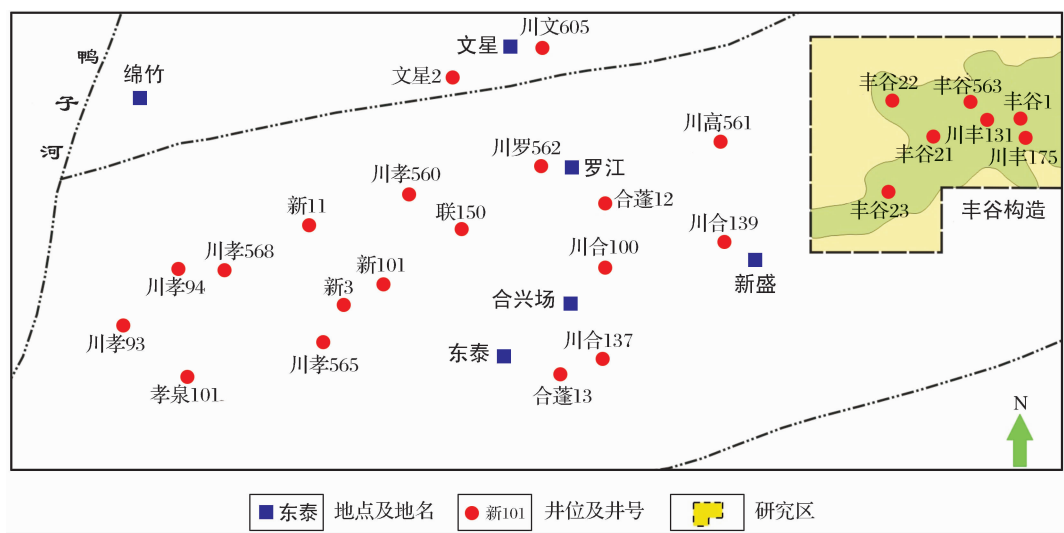


图 1 丰谷构造区域位置(据中国石化西南分公司资料,2006,修改)

表 1 川西丰谷构造须家河组地层岩性特征

| 地层 | | | 底界深度 | 视厚度 | 岩性简述 | | |
|------------------|------|-----|-------------------------------|-------------------|--------|--|----|
| 界 | 系 | 统 | 组 | 段 | | 代号 | /m |
| 中 三 叠 系 | 须家河组 | 须五段 | T ₃ x ₅ | 3 455.00 | 271.50 | 黑色泥页岩及煤层与灰色细砂岩、中砂岩呈略等厚互层 | |
| | | 须四段 | T ₃ x ₄ | 3 910.00 | 455.00 | 灰—灰白色细—中—粗粒砂岩与黑色泥页岩呈不等厚互层,底部为杂色砾岩层,与下伏地层呈假整合接触 | |
| | | 须三段 | T ₃ x ₃ | 4 379.00 | 469.00 | 黑色泥炭质页岩与灰色、局部褐灰色细—中粒砂岩、粉砂岩呈不等厚互层,夹煤层及煤线 | |
| | | 须二段 | T ₃ x ₂ | 4 500.00 (未钻穿) | 121.00 | 灰色,局部浅灰色细—中粒岩屑砂岩,中粒长石岩屑砂岩,夹黑色(炭质)页岩及泥砾岩 | |

2 储层基本特征

2.1 岩石学特征

丰谷构造须四段钙屑砂岩具有岩屑含量高,石英含量低,不含长石的特点。岩屑以碳酸盐岩岩屑(钙屑)占绝对优势,含量在 54%~99%之间,平均为 92.05%,还含少量变质岩岩屑和喷出岩岩屑,含量<2%。胶结物为中—细晶方解石、粉—细晶白云石、石英次生加大及自生石英、高岭石,呈孔隙式胶结[图 2(a)—图 2(d)]。岩石粒度以中、细粒为主,分选中等—好,成分成熟度很低。颗粒以点接触为

主,部分线接触。阴极发光下,白云岩岩屑发光复杂,发橙黄色、砖红色、浅棕色、蓝紫色等光;泥晶灰岩岩屑发暗棕色光和黄棕色光[图 2(e)]。

2.2 储集空间特征

须四段钙屑砂岩的储集空间类型以粒间溶孔和残余粒间孔为主,还发育少量的粒内溶孔、晶间微孔及裂缝。残余粒间孔多呈三角形、长条形,孔径为 0.03~0.2mm[图 2(f)];粒间溶孔由钙屑颗粒边缘和粒间方解石胶结物溶蚀形成[图 2(g)];粒内溶孔由酸性喷出岩岩屑部分溶蚀或完全溶蚀形成,溶孔内见黑色溶解残余[图 2(h)];晶间微孔孔径小于

0.01mm,主要为自生高岭石和自生白云石等晶体之间的微孔隙[图 2(i)—图 2(j)];裂缝主要由构造

应力或成岩作用形成,多切穿颗粒,延伸较远,缝宽为 0.05~1mm,少数可达 5mm[图 2(k)]^[8]。

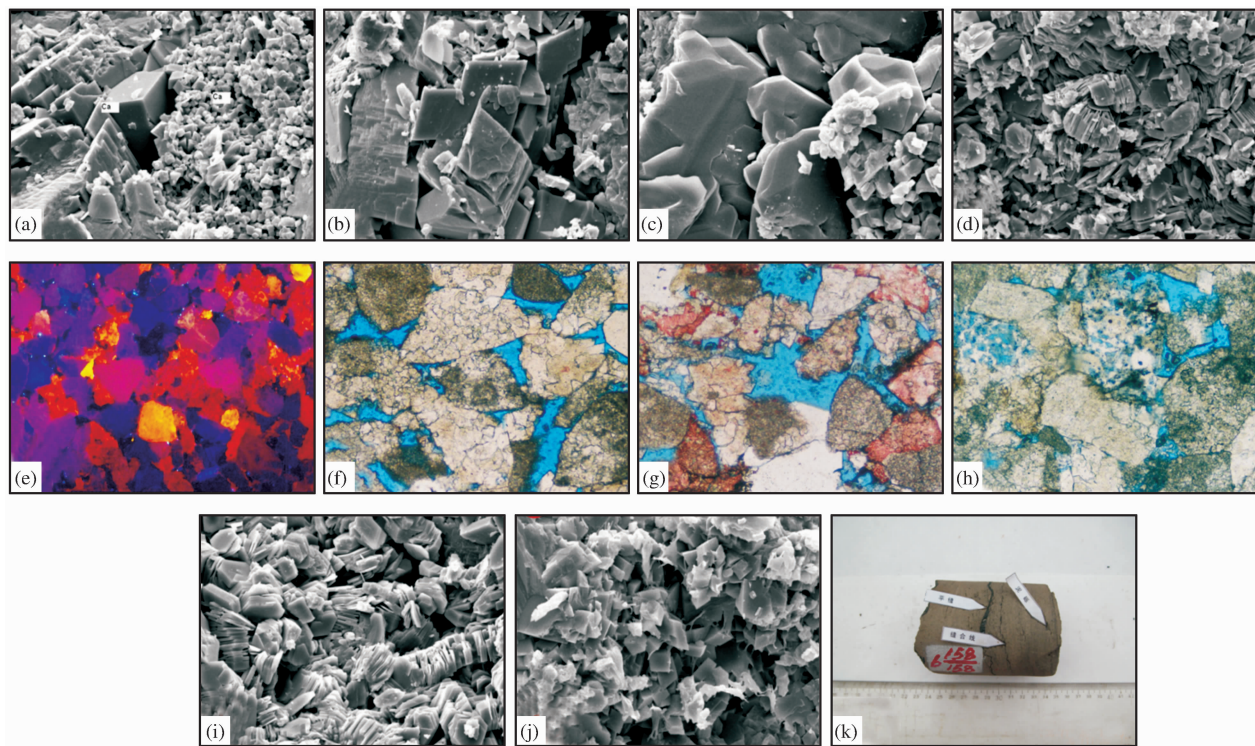


图 2 丰谷构造须四段钙屑砂岩典型成岩现象

(a)粒间方解石,丰谷 21 井,3 771.07m,中粒钙屑砂岩,扫描电镜;(b)粒间菱形铁白云晶体,丰谷 21 井,3 768.89m,含钙中粒钙屑砂岩,扫描电镜;(c)石英次生加大和自生石英晶体,丰谷 21 井,3 768.89m,中粒钙屑砂岩,扫描电镜;(d)粒间书页状高岭石集合体,丰谷 21 井,3 762.64m,含钙中粒钙屑砂岩,扫描电镜;(e)白云岩岩屑发橙黄色、砖红色、浅棕色、蓝紫色等光,泥晶灰岩岩屑发暗棕色光和黄棕色光,面孔率约 5%,丰谷 21 井,3 758.60m,中粒钙屑砂岩,阴极发光;(f)残余粒间孔,丰谷 21 井,3 766.30m,含钙中粒钙屑砂岩,单偏光,铸体薄片;(g)较大的粒间溶孔,丰谷 21 井,3 759.52m,中粒钙屑砂岩,单偏光,铸体薄片;(h)酸性喷出岩岩屑粒内溶孔,丰谷 21 井,3 760.22m,中粒钙屑砂岩,单偏光,铸体薄片;(i)高岭石晶间微孔,丰谷 21 井,3 766.30m,中粒钙屑砂岩,扫描电镜;(j)粒间白云石晶体间的微孔隙,丰谷 21 井,3 764.74m,含钙细粒钙屑砂岩,扫描电镜;(k)岩心裂缝,与层面呈平行分布,缝长为 70mm,缝宽为 0.2~4mm,缝线清晰连续,波状起伏,白色方解石、炭质全充填,丰谷 21 井,3 772.19m,细粒钙屑砂岩,岩心照片

2.3 物性特征

对 3 口取心井共计 252 块样品进行物性分析,结果表明须四段钙屑砂岩孔隙度为 0.69%~12.57%,平均为 5.06%;渗透率在(0.001~33.8) $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均为 $0.73 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 3)。按我国碎屑岩储层划分标准,属特低孔特低渗型储层。但在整体致密的背景下仍有部分钙屑砂岩孔渗相对较好,即优质储层。按照丰谷构造钙屑砂岩储层油气测试成果,将优质储层的孔隙度下限定为 8%,渗透率下限定为 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2.4 沉积相特征

前人^[9]研究认为丰谷构造须四段主要发育辫状河三角洲沉积,以水下分流河道广泛发育和砂质沉积作用非常活跃为主要特征。本文研究根据岩心描

述、薄片观察及砂体测井曲线形态分析等,结合区域沉积背景,在须四段识别出水下分流河道、分流河道间、河口坝、前缘席状砂、水下天然堤和辫状河前三角洲泥 6 种沉积微相。

2.5 成岩作用特征

研究区须四段埋藏深度在 3 500~4 000m 之间,钙屑砂岩储层经历了复杂而强烈的成岩变化。主要成岩作用类型有压实作用、压溶作用及各种自生矿物的胶结充填作用和溶解作用。压实作用和压溶作用使得钙屑砂岩储层物性急骤降低,由于压实作用和压溶作用损失孔隙度为 10%~35%,损失的原生孔隙占总孔隙的 20%~95%。胶结作用包括碳酸盐胶结(可分为早期胶结和晚期胶结)、硅质胶结和黏土矿物胶结。由于胶结作用损失孔隙度为 0

~30%，损失的原生孔隙占总孔隙的 0~80% (图 4)。强烈的压实作用和胶结作用决定了钙屑砂岩储层致密的特性。

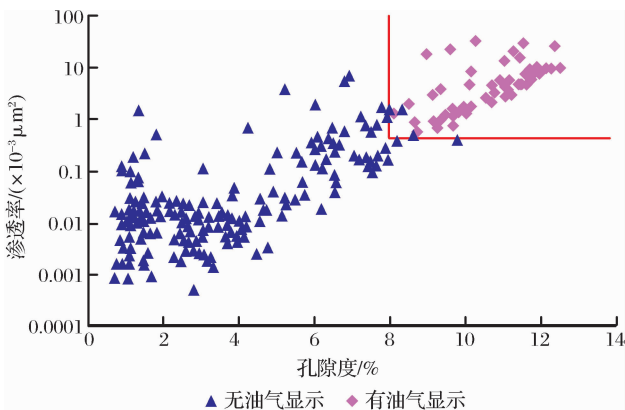


图 3 须四段钙屑砂岩孔隙度与渗透率关系

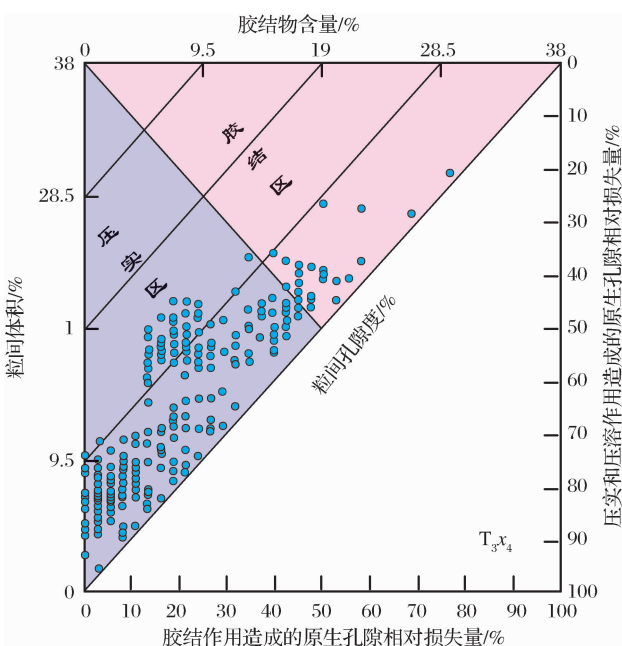


图 4 压实作用与胶结作用在孔隙度损失中的贡献

研究区钙屑砂岩的溶解组分主要有碎屑颗粒、胶结物和杂基。碎屑颗粒中灰岩岩屑和火山岩岩屑较易发生溶解,前者边缘溶蚀可形成粒间溶孔,后者常部分溶蚀或完全溶蚀形成粒内溶孔或铸模孔;石英、白云岩岩屑等碎屑颗粒则不易发生溶解。此外,粒间方解石胶结物溶解可形成粒间溶孔,粒间由火山灰蚀变而成的杂基溶解可形成杂基内溶孔。

通过对岩石的结构和构造、自生矿物的分布和形成顺序以及包裹体均一温度等参数的研究,认为丰谷构造须四段钙屑砂岩储层所经历的成岩阶段有同生成岩阶段、早成岩阶段 A 期 ($T_3x_5-J_1$, 埋深 < 2 000m, 古地温为常温至 65℃, $R_0 < 0.35\%$) 和早成

岩阶段 B 期 (J_2 , 埋深为 2 000~3 100m, 古地温为 65~85℃, $R_0 = 0.35\% \sim 0.50\%$)、中成岩阶段 A 期 (J_3-K_1 , 埋深为 3 100~6 000m, 古地温为 85~130℃, $R_0 = 0.5\% \sim 1.3\%$) 和中成岩阶段 B 期 (K_2-E , 最大埋深为 6 000m, 后抬升至 3 500~4 000m, 古地温为 130~150℃, $R_0 = 1.3\% \sim 2.00\%$)。

3 优质储层发育的控制因素

任何沉积储层的形成和发育均受控于沉积作用、成岩作用和构造改造作用^[10-12]。因此,笔者主要从这 3 个方面来探讨钙屑砂岩优质储层形成和发育的控制因素。

3.1 形成优质储层的沉积因素

3.1.1 砂体发育在高能相带

通过对研究区不同沉积微相钙屑砂岩物性数据的统计,发现不同沉积微相钙屑砂岩的储层物性差别较大,其中水下分流河道及河口坝砂体(二者属于高能砂体)储层物性最好,而席状砂和天然堤物性较差。原因主要有 3 点:

(1) 高能砂体沉积时水动力强,沉积物粒度粗,分选较好,黏土含量低,原始孔隙度大,并且原始孔隙度容易保存。

(2) 高能砂体厚度大,可以有效减少早期方解石胶结作用对厚砂体中部原生孔隙的破坏。在早成岩阶段,研究区地层孔隙水受煤系沉积环境控制,水介质偏酸性,胶结作用较弱,所形成的方解石胶结物不足以将整个厚砂体全部胶结致密,而是胶结厚砂体的顶、底部,这使得厚砂体中部的原生孔隙得以保存。相反,早期胶结作用对薄砂体原生孔隙的破坏则要大的多。

(3) 高能砂体中原生孔隙的较好保存为后期溶蚀作用的发生提供了通道和空间。为了验证该结论,笔者选择高能砂体和低能砂体岩心样品各一块(取自丰谷 21 井,分别为水下分流河道砂体和席状砂砂体,编号为 F1 和 F2),并将它们分别切割成 9 块直径为 2.5cm、厚为 0.5cm 的圆片,进行水岩模拟实验^[13-16]。模拟实验中使用乙酸代替有机酸,乙酸初始浓度定为 0.15mol/L, pH 值依次设为 6、5、4;实验温度定为 50℃、80℃、100℃,分别大致相当于早成岩 A 期、早成岩 B 期和中成岩 A 期的温度,即有机质未成熟、低成熟、成熟的温度条件。模拟实验的结果表明,在相同的温压条件下高能砂体比低能砂体更易溶蚀,更易产生次生孔隙,且产生的次生孔隙的主要类型为粒间溶孔(表 2)。

表 2 丰谷构造须四段钙屑砂岩水—岩溶蚀模拟实验前后孔隙度变化

| 样品 编号 | 取样深度 /m | 沉积 微相 | pH 值 | 温度 /℃ | 反应时间 /h | 岩石密度 /(g/cm ³) | 面孔率/% | | | 孔隙度/% | | |
|----------|------------|----------|------|----------|------------|-------------------------------|-------|------|-----|-------|-------|------|
| | | | | | | | 实验前 | 实验后 | 增加 | 实验前 | 实验后 | 增加 |
| F1-1 | 3 753.4 | 席状砂 | 4 | 50 | 360 | 2.7 | 2 | 3.5 | 1.5 | 2.9 | 4.78 | 1.88 |
| F1-2 | | | 5 | 50 | 360 | 2.7 | 2 | 3 | 1 | 2.9 | 4.15 | 1.25 |
| F1-3 | | | 6 | 50 | 360 | 2.7 | 2 | 2.5 | 0.5 | 2.9 | 3.53 | 0.63 |
| F1-4 | | | 4 | 80 | 360 | 2.7 | 2 | 3.6 | 1.6 | 2.9 | 4.9 | 2 |
| F1-5 | | | 5 | 80 | 360 | 2.7 | 2 | 3.1 | 1.1 | 2.9 | 4.28 | 1.38 |
| F1-6 | | | 6 | 80 | 360 | 2.7 | 2 | 2.6 | 0.6 | 2.9 | 3.65 | 0.75 |
| F1-7 | | | 4 | 100 | 360 | 2.7 | 2 | 3.7 | 1.7 | 2.9 | 5.03 | 2.13 |
| F1-8 | | | 5 | 100 | 360 | 2.7 | 2 | 3.2 | 1.2 | 2.9 | 4.4 | 1.5 |
| F1-9 | | | 6 | 100 | 360 | 2.7 | 2 | 2.7 | 0.7 | 2.9 | 3.78 | 0.88 |
| F2-1 | 3 766.3 | 水下分流河道 | 4 | 50 | 360 | 2.45 | 9 | 12.8 | 3.8 | 11.78 | 16.53 | 4.75 |
| F2-2 | | | 5 | 50 | 360 | 2.45 | 9 | 12.5 | 3.5 | 11.78 | 16.16 | 4.38 |
| F2-3 | | | 6 | 50 | 360 | 2.45 | 9 | 12 | 3 | 11.78 | 15.53 | 3.75 |
| F2-4 | | | 4 | 80 | 360 | 2.45 | 9 | 12.9 | 3.9 | 11.78 | 16.66 | 4.88 |
| F2-5 | | | 5 | 80 | 360 | 2.45 | 9 | 12.6 | 3.6 | 11.78 | 16.28 | 4.5 |
| F2-6 | | | 6 | 80 | 360 | 2.45 | 9 | 12.1 | 3.1 | 11.78 | 15.66 | 3.88 |
| F2-7 | | | 4 | 100 | 360 | 2.45 | 9 | 13 | 4 | 11.78 | 16.78 | 5 |
| F2-8 | | | 5 | 100 | 360 | 2.45 | 9 | 12.7 | 3.7 | 11.78 | 16.41 | 4.63 |
| F2-9 | | | 6 | 100 | 360 | 2.45 | 9 | 12.2 | 3.2 | 11.78 | 15.78 | 4 |

3.1.2 岩石组分中碳酸盐岩岩屑含量高

钙屑砂岩孔隙度与钙屑含量的统计关系表明(图 5),钙屑的含量对优质储层的形成至关重要。只有当钙屑含量大于 90%时,方可形成好储层。这主要是因为,碳酸盐岩岩屑属于易碎颗粒,石英颗粒属于刚性颗粒,当易碎颗粒混杂刚性颗粒时,更易发生破裂。所以只有当钙屑砂岩中碳酸盐岩岩屑含量很高,石英含量极低时,原生孔隙才会大量保存下来^[17]。此外,相比石英,碳酸盐岩岩屑,特别是灰岩岩屑,极易溶蚀,其相对含量越高,可供溶蚀的组分越多,次生孔隙越发育。

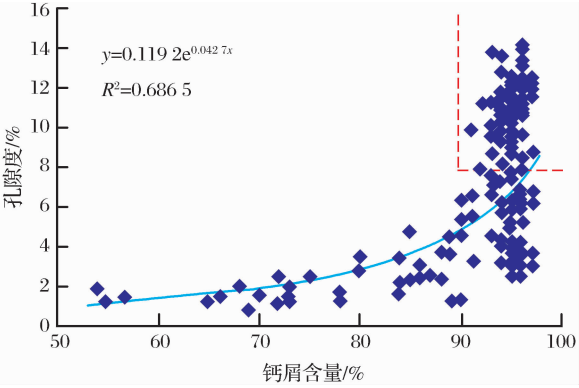


图 5 丰谷构造须四段钙屑砂岩孔隙度与钙屑含量关系

3.2 形成优质储层的成岩因素

储层在埋藏过程中,其原始物性不断地受到后

期成岩作用的改造。成岩作用对储层的孔隙类型、孔隙大小及孔喉结构等具有重要影响,并且是决定储层好坏的关键因素。

3.2.1 酸性地层水溶解矿物颗粒

研究区须四段埋藏深,压实作用和胶结作用强,原生孔隙损失大,溶蚀作用可以形成大量的次生孔隙,能有效地改善储层的储集性能^[18]。石油的热降解和由围岩矿物中高价元素组成的离子或化合物与有机质之间发生作用产生的有机酸是导致岩石组分溶解的重要溶剂^[15]。钙屑砂岩的成岩演化序列研究表明(图 6),在中成岩阶段 A 期(J₃—K₁),烃源岩进入成熟高峰期,生成大量有机酸,这些有机酸排出后进入钙屑砂岩,使碳酸盐岩岩屑、早期方解石胶结物和酸性喷出岩岩屑发生溶蚀—溶解作用而产生大量孔隙。溶蚀作用主要发育在水下分流河道、河口坝等砂体中,这些砂体中原始孔隙度的保存,有利于有机酸的流动。次生溶蚀孔隙的类型,主要为碳酸盐岩岩屑边缘和方解石胶结物溶蚀形成的粒间溶孔[图 2(i)],其次为喷出岩岩屑形成的粒内溶孔或铸模孔[图 2(j)],此外,还有极少量由火山灰蚀变而成的杂基被溶解,形成杂基内溶孔。

3.2.2 早期烃类充注粒间孔

钙屑砂岩的成岩演化序列研究表明(图 6),在早成岩 B 期,古地温为 65~85℃,镜质体反射率为

0.35%~0.50%，有机质开始半成熟，生成的少量烃类充注入钙屑砂岩原生粒间孔中(图7)。由于烃类的占位阻碍了水岩作用的进行，阻止了胶结物的大量生成。此外，在该时期钙屑砂岩开始进入快速压实阶段，烃类的占位在一定程度上缓解了压实作用对原生孔的破坏。

3.2.3 早期方解石胶结和后期溶蚀

研究区地层孔隙水偏酸性，钙屑砂岩在浅埋阶

段生成少量方解石胶结物。这部分胶结物不足以将优质储层中的原生孔隙全部破坏，而是优先将其顶底胶结致密。这有效增加了优质储层的抗压实能力，使其中部的原生孔隙得以保存。此外，少量早期方解石胶结物也在一定程度上为后期溶蚀作用提供了物质基础。烃源岩中有机质成熟时产生的有机酸和CO₂酸性流体作用于方解石胶结物可形成次生溶孔，改善储层物性。

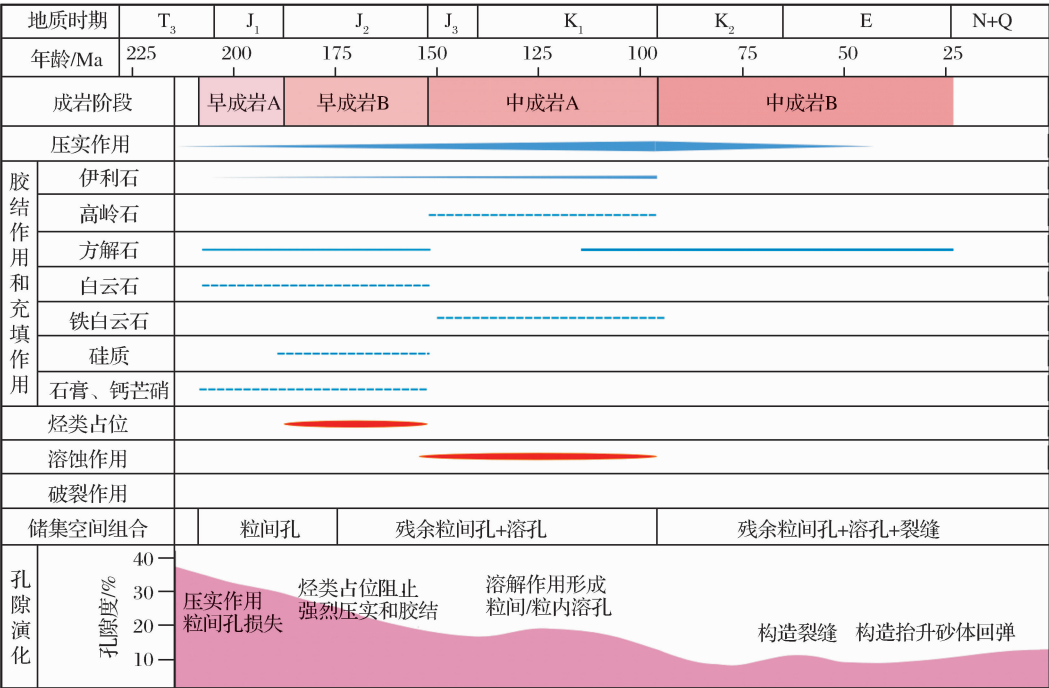


图6 丰谷构造须四段钙屑砂岩成岩演化序列

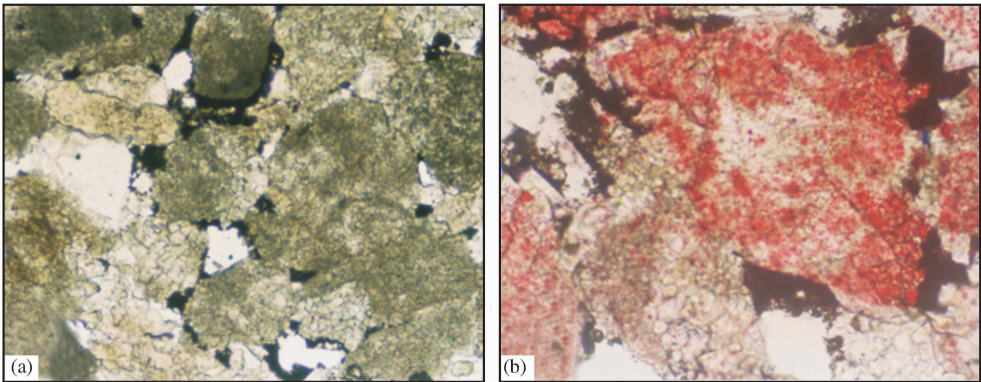


图7 钙屑砂岩原生粒间孔中充填沥青(丰谷21井,3 767m)

3.3 形成优质储层的构造因素

3.3.1 晚期构造抬升

研究区埋藏史的研究表明，须四段在晚白垩世开始抬升(图8)。地层的抬升一方面使钙屑砂岩在中成岩A期所形成的大量次生溶蚀孔隙得以保存，另一方面，地层的抬升也是地层压力的卸载过程，压

力的卸载使得钙屑砂岩出现回弹，孔隙度体积增大。前人^[19]对有关砂岩回弹的物理实验表明，地层抬升所引起的天然砂岩孔隙度体积增量可达1%。

3.3.2 构造裂缝

丰谷构造须四段钙屑砂岩中发育少量构造裂缝[图2(k)]。综合整个川西坳陷的构造演化分析，认

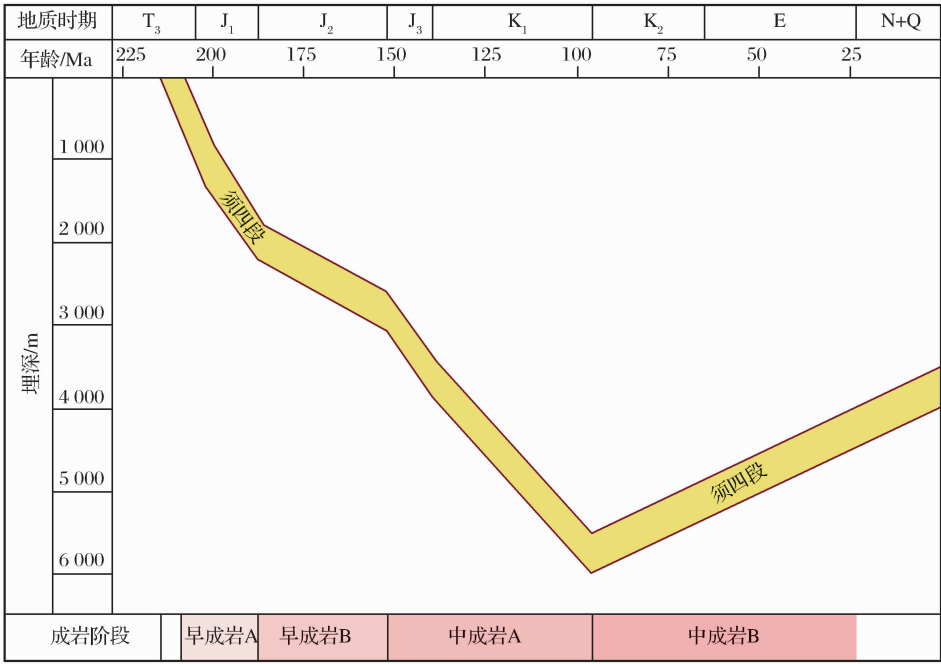


图 8 丰谷构造须四段钙屑砂岩埋藏史(据文献[8])

为研究区构造裂缝的发育主要有 2 期:一期是燕山期 NW—SE 向断裂作用形成的断层伴生裂缝;另一期是喜马拉雅期 NE—SW 向、NEE 向断裂作用形成的断层伴生裂缝。裂缝的发育把一些不连通的孤立孔隙联系起来,形成良好的渗流网络,提高了储层的渗流性。此外,燕山期是须四段钙屑砂岩气藏成藏的关键时期,该时期烃源岩处于生烃高峰期,产生大量油气,此时期形成的裂缝还可作为油气早期运移的有效通道。

4 优质储层的形成过程

通过对研究区钙屑砂岩储层基本特征和优质储层发育控制因素的分析,笔者认为,钙屑砂岩优质储层发育在碳酸盐岩岩屑含量大于 90% 的中粗粒高能砂体中,优质储层的形成过程如下所述。

(1)早成岩 A 期($T_3x_5-J_1$),由于地层孔隙水偏酸性,胶结作用弱。胶结物为粒间方解石,局部见石膏和钙芒硝等盐类矿物。砂岩呈弱固结—半固结,粒间孔减少,孔隙度约为 30%。

(2)早成岩 B 期(J_2),有机质半成熟,烃类充注粒间孔。烃类的存在一方面阻止了胶结物的大量生成(阻碍水岩作用),另一方面极大地减弱了快速压实阶段强压实作用的发生,至 J_2 沉积末期,孔隙度降至约为 20%。

(3)中成岩 A 期(J_3-K_1),随着埋深增加,压实作用进一步增强,地温进一步升高,烃源岩进入成熟

高峰期,大量有机酸生成,使碳酸盐岩岩屑颗粒边缘、粒间方解石胶结物以及酸性喷出岩岩屑发生溶解,形成粒间溶孔和粒内溶孔。这一期溶蚀作用的时间长、规模大,为主要的次生孔隙形成期。石英次生加大和自生石英、高岭石、含铁白云石充填部分次生孔隙。燕山早期构造运动形成少量构造裂缝,使储层渗流能力得以改善。

(4)中成岩 B 期(K_2-E),含铁方解石和铁白云石充填部分次生孔隙。燕山晚期构造运动和喜马拉雅期运动形成少量构造裂缝,储层渗流能力有所改善,最终形成钙屑砂岩优质储层。

5 结论

(1)研究区钙屑砂岩具有岩屑含量高、石英含量低、不含长石的特点。岩石粒度以中、细粒为主,分选中等—好,成分成熟度很低。岩石孔隙度平均为 5.06%,渗透率平均为 $0.73 \times 10^{-3} \mu m^2$,属特低孔特低渗型储层。主要的储集空间为粒间溶孔和残余粒间孔。

(2)研究区钙屑砂岩储层经历了复杂而强烈的成岩变化。主要成岩作用类型有压实作用、压溶作用及各种自生矿物的胶结充填作用和溶解作用。其中,压实作用和压溶作用使孔隙度损失 10%~35%,胶结作用使孔隙度损失 0~30%。强烈的压实作用和胶结作用决定了钙屑砂岩储层致密的特性。

(3)沉积作用和成岩作用是钙屑砂岩优质储层

形成的主控因素。其中,发育在高压相带、且碳酸盐岩岩屑含量高(>90%)是形成钙屑砂岩优质储层的先决条件。而埋藏成岩过程中有机酸的溶蚀、烃类的早期充注和早期方解石胶结物的少量生成是钙屑砂岩优质储层孔隙保存及次生溶孔形成的关键。

(4)构造作用在宏观上控制着形成钙屑砂岩优质储层的有利沉积环境和成岩过程。研究区晚白垩世的构造抬升使钙屑砂岩在中成岩 A 期形成的次生溶蚀孔隙得以有效保存。而燕山期和喜馬拉雅期产生的少量构造裂缝,则在一定程度上改善了钙屑砂岩优质储层的渗流能力。

参考文献(References):

- [1] Wu Ge, Li Huachang. Formation mechanism of gas reservoir in the upper Triassic Xujiahe Formation along the Xiaoquan-Fenggu sag belt, western Sichuan[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2002, 29(2):161-167. [吴铭, 李华昌. 川西坳陷孝泉—丰谷构造带须家河组气藏成藏机制研究[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2002, 29(2):161-167.]
- [2] Ye Tairan, Huang Yong, Wang Xin, *et al.* Prediction methods of oil and gas prediction about the compact sandstone of T₃x₂ middle of west Sichuan depression[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2003, 30(1):82-86. [叶泰然, 黄勇, 王信, 等. 川西坳陷中段丰谷构造须家河组二段致密砂岩储层油气预测方法研究[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2003, 30(1):82-86.]
- [3] Leng Jigao, Li Shubing, Yang Changqing. Determination of the time of gas accumulation in the Xujiahe Formation of Xiaoquan-Fenggu structural belt in the western Sichuan depression through fluid inclusion analysis[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(8):38-42. [冷济高, 李书兵, 杨长清. 利用流体包裹体确定川西坳陷孝泉—丰谷构造带须家河组天然气成藏期[J]. 天然气工业, 2011, 31(8):38-42.]
- [4] Leng Jigao, Yang Keming, Ye Jun, *et al.* Carbon isotope features of alkane gases of Xujiahe Formation in Xiaoquan-Fenggu structural belt and their gas-source correlation[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(6):16-21. [冷济高, 杨克明, 叶军, 等. 孝泉—丰谷构造带须家河组天然气烷烃碳同位素特征及气源对比[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(6):16-21.]
- [5] Ye Tairan, Gan Qigang, Chen Han, *et al.* Reservoir Prediction and Gas-Bearing Detection in Fenggu-Yuhuangguan Region [R]. Chengdu: Southwest Oil & Gas Company, Sinopec Group, 2005:1-24. [叶泰然, 甘其刚, 陈汉, 等. 丰谷—玉皇观地区储层预测及含气性检测研究[R]. 成都:中国石化西南分公司, 2005:1-24.]
- [6] Lin Xiaobing, Liu Liping, Wei Limin. Prediction of calcarenaceous sandstone gas-bearing reservoir in the 4th member, Xujiahe Formation in Fenggu area, west Sichuan basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(4):82-84. [林小兵, 刘莉萍, 魏力民. 川西丰谷地区须四段钙屑砂岩含气储层预测[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(4):82-84.]
- [7] Zhen 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]. Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2007, 34(5):489-495. [郑荣才, 魏钦廉, 高红灿, 等. 川西坳陷中段须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):489-495.]
- [8] Lin Yu, Xu Zhangyou, Ni Yuqiang, *et al.* Diagenetic reservoir facies and diagenetic evolutionary sequences of extra-low permeability reservoir in Xu4 Formation of Fenggu structure, western Sichuan depression[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2011, 35(2):1-8. [林煜, 徐樟有, 倪玉强, 等. 川西丰谷构造上三叠统须四段特低渗储层成岩储集相与成岩演化序列[J]. 大庆石油学院学报, 2011, 35(2):1-8.]
- [9] Lin Liangbiao. Sedimentary Facies and Paleogeographic Evolution of the Upper Triassic Xujiahe Formation in West Sichuan Foreland Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005:48-68. [林良彪. 川西前陆盆地上三叠统须家河组沉积相及岩相古地理演化[D]. 成都:成都理工大学, 2005:48-68.]
- [10] Zhang Xiaodong, Tan Xiucheng, Chen Jingshan. Reservoir and controlling factors of the secondary member of the Jialing River Formation in the hit and the south transition strip of Sichuan[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(3):338-342. [张晓东, 谭秀成, 陈景山. 川中—川南过渡带嘉二段储集性及储层控制因素研究[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(3):338-342.]
- [11] Ning Ning, Chen Mengjin, Liu Ruie, *et al.* Upper Paleozoic quartz-sandstone reservoir diagenesis and pore evolution, eastern Ordos basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(3):334-338. [宁宁, 陈孟晋, 刘锐娥, 等. 鄂尔多斯盆地东部上古生界石英砂岩储层成岩及孔隙演化[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(3):334-338.]
- [12] Zhang Zhihuan, Chang Xiangchun, Zeng Jianhui. Research on water rock interaction and its application on petroleum geology[J]. Geological Science and Technology Information, 1998, 17(3):69-74. [张枝焕, 常象春, 曾贇辉. 水—岩相互作用研究及其在石油地质中的应用[J]. 地质科技情报, 1998, 17(3):69-74.]
- [13] Lynch F E. Mineral/water interaction, fluid flow, and frio sandstone diagenesis: Evidence from the rocks[J]. AAPG Bulletin, 1996, 80:486-504.
- [14] Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S, *et al.* Organic-in-organic interaction and sandstone diagenesis [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73:1-23.
- [15] Shen Zhaoli, Wang Yanxin. Review and outlook of water-rock interaction studies[J]. Earth Science, 2002, 27(2):127-133. [沈照理, 王焰新. 水—岩相互作用研究的回顾与展望[J]. 地

球科学,2002,27(2):127-133.]

[16] Zeng Xiaoying,Zhang Xiaoqing,Zhong Yumei. Origin of calcarenaceous sandstone gas formation of the 4th member of Xujiache Formation in the middle part of western Sichuan depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2007,25(6):896-901. [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):896-901.]

[17] Wang Duoyun,Zheng Ximin,Li Fengjie,*et al.* Forming condition of high-quality reservoir and its relative problems in low porosity and permeability enrichment zone[J]. Natural Gas Geoscience,2003,14(2):87-91. [王多云,郑希民,李风杰,等. 低孔渗油气富集区优质储层形成条件及相关问题[J]. 天然气地球科学,2003,14(2):87-91.]

[18] Wang Jian,Jia Ailin,Wei Tiejun,*et al.* Controlling factors of low permeability sandstone reservoirs in Dengloulou Formation of Changling gas field[J]. Natural Gas Geoscience,2011,22(5):827-833. [王键,贾爱林,魏铁军,等. 长岭气田登娄库组低渗砂岩储层控制因素分析[J]. 天然气地球科学,2011,22(5):827-833.]

[19] Jiang Zhenxue,Pang Xiongqi,Jin Zhijun,*et al.* Relationship between pore variation of reservoir and rebounding of sandstone during uplift and its application to the Daqing oilfield [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences,2004,29(4):420-426. [姜振学,庞雄奇,金之钧,等. 地层抬升过程中的砂体回弹作用及其油气成藏效应[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2004,29(4):420-426.]

Controlling Factors for T₃x₄ Calcareneous Sandstone in
Fenggu Structure, Western Sichuan Basin

LIN Yu^{1,2},WU Sheng-he^{1,2},XU Zhang-you^{1,2},NI Yu-qiang^{1,2}

(1. College of Geoscience, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource & Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Upper Triassic Xujiache calcarenaceous sandstone is widespread and tight in the west Sichuan depression. The high-quality reservoir of calcarenaceous sandstone was firstly touched in the Fenggu structure in 2005. It is change the view that calcarenaceous sandstone can not form reservoir. So far, the controlling factors for the formation of high quality reservoir of calcarenaceous sandstone are unclear. In this paper, we use cast thin-sections, scanning electron microscope, physical analysis, and water-rock interaction to describe the basic characteristics of T₃x₄ calcarenaceous sandstone in the Fenggu structure. We discuss the potential reasons including sedimentary environment, diagenesis and tectonic movement to control the formation reasons of high-quality reservoir of calcarenaceous sandstone. The results show that the calcarenaceous sandstone is characterized by medium-well sort, low compositional maturity and medium-fine grained. The reservoir space bears dissolved pores between grains and residual intergranular pores, belonging to extra-low porosity and extra-low permeability reservoir. Sedimentary and diagenesis are major factors for the formation of high-quality reservoir of calcarenaceous sandstone. Among them, the favorable sedimentary facies zone and high calcarenaceous content are the preconditions to form high-quality reservoir. The dissolution of organic acids, filling of early hydrocarbons and cementation of early carbonates under the buried process are the keys to form high-quality reservoir.

Key words: Calcareneous sandstone; Extra-low porosity and extra-low permeability reservoir; Controlling factor; Sedimentary character; Diagenesis; Tectonic movement; 4th member Xujiache Formation