

# 川西坳陷孝泉 - 新场地区须四段致密砂岩储层特征及控制因素

韩智英<sup>1</sup>, 覃斌传<sup>2,3</sup>, 田钧名<sup>2,3</sup>, 曹勤明<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>中石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川 成都

<sup>2</sup>成都理工大学能源学院, 四川 成都

<sup>3</sup>成都理工大学, “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川 成都

Email: 642275688@qq.com, 971286917@qq.com, 417330439@qq.com, \*caoqinming@stu.cdut.edu.cn

收稿日期: 2021年4月2日; 录用日期: 2021年5月13日; 发布日期: 2021年5月20日

## 摘要

通过薄片鉴定、物性测试、扫描电镜、阴极发光等实验手段, 对川西坳陷孝泉 - 新场地区须四段致密砂岩储层特征及控制因素进行了分析。结果表明: 研究区须四段致密砂岩储层岩石类型以中粒及细粒的岩屑砂岩和岩屑石英砂岩为主, 颗粒分选较好, 磨圆度中等 - 较差, 储集空间以粒间溶孔、粒内溶孔及铸模孔为主。储层的发育主要受沉积微相、碎屑组分和溶蚀作用等因素控制。强水动力沉积环境内发育的砂岩是形成储层的基础, 高石英低岩屑的碎屑组成是形成储层的有利条件, 成岩后期长石及岩屑的强烈溶蚀是改善储层质量的关键。

## 关键词

川西坳陷, 须四段, 致密砂岩, 储层特征, 控制因素

# Reservoir Characteristics and Main Control Factors of Xu4 Member Tight Sandstone in Xiaoquan-Xinchang Area of Western Sichuan Depression

Zhiying Han<sup>1</sup>, Binchuan Qin<sup>2,3</sup>, Junming Tian<sup>2,3</sup>, Qinming Cao<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Exploration and Development Research Institute, Sinopec Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

\*通讯作者。

文章引用: 韩智英, 覃斌传, 田钧名, 曹勤明. 川西坳陷孝泉 - 新场地区须四段致密砂岩储层特征及控制因素[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(5): 624-634. DOI: 10.12677/ag.2021.115058

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Oil-Gas Reservoir Geology & Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan  
Email: 642275688@qq.com, 971286917@qq.com, 417330439@qq.com, \*caoqinming@stu.cdut.edu.cn

Received: Apr. 2<sup>nd</sup>, 2021; accepted: May 13<sup>th</sup>, 2021; published: May 20<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

By means of thin section identification, physical property test, scanning electron microscope and cathodoluminescence, the reservoir characteristics and controlling factors of tight sandstone of Xu4 Member in Xiaoquan-Xinchang area of Western Sichuan depression are analyzed. The results show that the rock types in tight sandstone reservoir of Xu4 Member in study area are mainly composed of medium and fine-grained lithic sandstone and lithic quartz sandstone, with good grain sorting and medium to poor roundness. The main reservoir space includes intergranular dissolved pore, intragranular dissolved pore and mold pore. The reservoir development is mainly controlled by sedimentary microfacies, clastic components and dissolution. Sandstone developed in strong hydrodynamic sedimentary environment is the basis of reservoir formation. Clastic composition of high quartz and low cuttings is the favorable condition for reservoir formation, and strong dissolution of feldspar and cuttings in late diagenetic stage is the key to improve reservoir quality.

## Keywords

Western Sichuan Depression, Xu4 Member, Tight Sandstone, Reservoir Characteristics, Control Factors

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

与常规碎屑岩储层相比,川西坳陷孝泉-新场地区须四段砂岩储层具有埋深大、超致密的特点[1] [2]。而川西坳陷须家河组发育品质较好的烃源岩,具备较大的资源潜力[3] [4] [5]。根据前人研究资料,研究区须四段纵向发育多套砂岩,具有较好的源储配置条件。前人对川西坳陷孝泉-新场地区须四段致密砂岩储层特征展开了初步的研究工作[6] [7] [8]。如钟玉梅指出溶蚀作用是须四段重要的建设性成岩作用[6]。林煜等[7]则提出了发生溶蚀作用所需要的满足的地质要素,如溶蚀物质、溶蚀流体、溶蚀通道等。徐康、章顺利等近年来提出了沉积环境在须四段储层发育过程中的基础作用[8]。前人对须四段致密砂岩储层的基本特征、控制因素等均取得了一定的认识,但对储层发育过程中各种成岩作用对储层的影响尚未进行深入研究。

近年来,我国在鄂尔多斯盆地、四川盆地等多个地区的致密砂岩储层内取得了油气勘探突破[9] [10]。致密砂岩储层逐渐成为研究热点,对致密砂岩储层发育的控制因素提出了许多新的认识[11]。路媛媛提出致密砂岩储层发育受沉积微相、岩石类型与成岩作用共同控制[12]。刘明洁等自然强调从“成岩体系”的角度分析成岩作用对储层质量的影响[13]。本文在前人研究的基础上,利用沉积相、薄片鉴定、阴极发光等资料对川西坳陷孝泉-新场地区须四段致密砂岩储层的岩性、储集性以及成岩作用等方面的特征进行

了分析,总结了须四段致密砂岩储层发育的控制因素,为川西坳陷须四段致密砂岩储层的综合评价提供一定的理论依据。

## 2. 区域地质概况

川西坳陷位于扬子板块西北部,处于几个地块的结合部位,西邻龙门山造山带,北东与昆仑-秦岭东西向构造带相接,整体呈 NE 向延伸,是构造活动十分活跃的地带[14][15]。川西坳陷的构造格局具有“三隆两凹一斜坡”的特点[16],构造单元主要有梓潼凹陷、成都凹陷、龙门山前构造带、新场构造带、知新场构造带和中江斜坡(图 1)。本次研究区——孝泉-新场地区即位于新场构造带内。研究区盆地基底为中三叠统海相灰岩,自晚三叠世后,川西地区沉积环境逐渐转变为陆相沉积。上三叠统须家河组自下而上依次充填了须二段、须三段、须四段和须五段陆相碎屑及煤系地层(图 2)[17]。其中,须三段和须五段是川西地区的主要烃源岩层。本次研究目的层——须四段是研究区的主要产气层。须四段沉积体系主要为冲积扇-辫状河三角洲-浅湖相沉积,发育较多的泥页岩,纵向上表现为较薄的砂岩与泥岩互层的特点,砂地比约为 1:1。

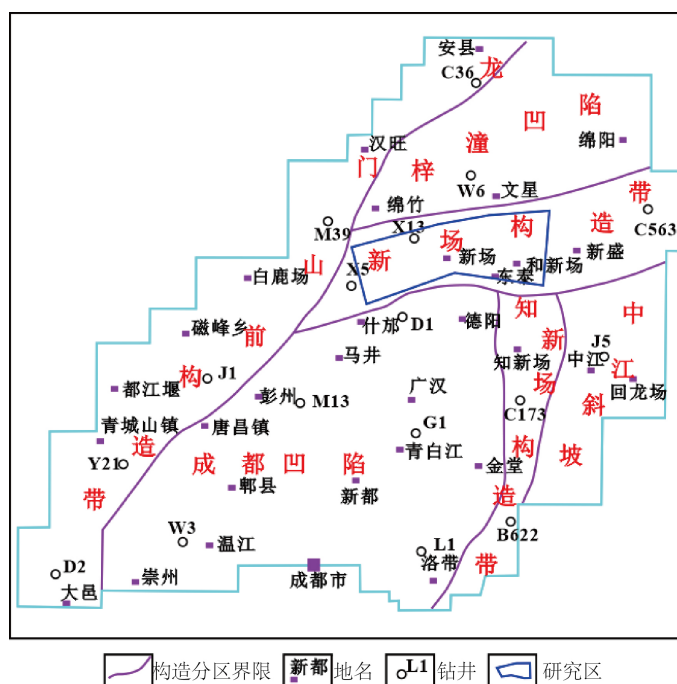


Figure 1. Tectonic divisions of Sichuan Basin and location of Xiaquan-Xinchang area (modified after literature [16])

图 1. 研川西坳陷构造单元划分及研究区构造位置图(据文献[16]修改)

## 3. 储层特征

### 3.1. 储集性特征

#### 3.1.1. 储集空间

根据铸体薄片鉴定以及扫描电镜分析可知,孝泉-新场地区须四段致密砂岩储层储集空间主要有残余粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔及粘土矿物晶间孔,另有少量裂缝。其中以次生的粒间、粒内溶孔和铸模孔为主。残余原生孔形态以三角形或条形为主(图 3(a)),多为早期粘土矿物衬边包裹或不完全

充填剩余的孔隙。次生孔隙是研究区须四段的主要孔隙类型，如长石颗粒边缘溶蚀形成粒间溶蚀扩大孔(图 3(b))，长石颗粒内部被完全或者部分溶蚀形成粒内溶孔或者铸模孔等(图 3(c)，图 3(d))，反映了溶蚀作用对储层质量的改善作用。此外，还发育少量的粘土矿物晶间孔(如高岭石晶间孔)和裂缝(图 3(e)，图 3(f))，但研究区晶间孔和裂缝的发育程度较低，对储层质量的影响有限。

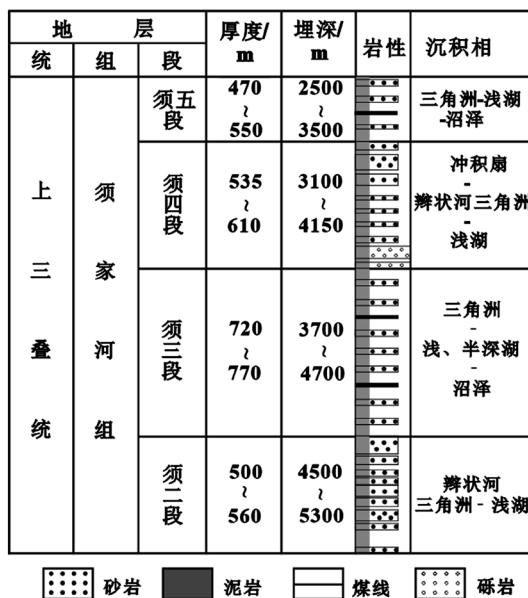
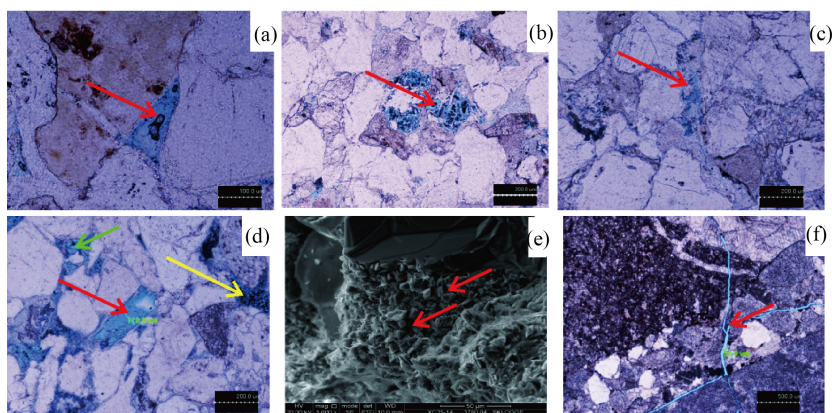


Figure 2. Stratigraphic histogram of Xujiache formation in Xiaoquan-Xinchang area

图 2. 孝泉 - 新场地区须家河组地层柱状图



(a) 残余粒间原生孔, X5 井, 3602.07 m,  $T_3x^4$ , 单偏光; (b) 长石颗粒边缘被溶蚀形成粒间溶蚀扩大孔, X202 井, 3839.99 m,  $T_3x^4$ , 单偏光; (c) 长石颗粒被部分溶蚀形成粒内溶孔, XC23 井, 4007.6 m,  $T_3x^4$ , 单偏光; (d) 长石颗粒被完全溶蚀形成铸模孔(红色箭头), 岩屑颗粒内长石成分被溶蚀, 石英颗粒残余(绿色箭头), X5 井, 3593.39 m,  $T_3x^4$ , 单偏光; (e) 粒间充填书页状高岭石晶体之间发育晶间孔, XC25 井, 3780.04 m,  $T_3x^4$ , 扫描电镜; (f) 颗粒受压实作用形成裂缝系统, XC22 井, 3787.98 m,  $T_3x^4$ , 单偏光。

Figure 3. Pore space type of Xu4 member in study area

图 3. 研究区须四段储集空间类型

### 3.1.2. 物性特征

根据孝泉 - 新场地区须四段 495 个物性测试数据统计可知，岩心孔隙度最小值为 0.01%，最大值为

21.1%，孔隙度主要分布在 4%~10%的区间内，平均值为 5.54%。岩心渗透率最小值为 0.001 mD，最大值为 23.92 mD，渗透率主要分布区间位于 0.01 mD~1 mD 范围内，平均值为 0.15 mD。须四段孔渗相关性较差，反映了次生孔隙为主的孔隙类型特征下较差的孔喉配置关系。部分低孔高渗点说明裂缝的存在(图 4)。

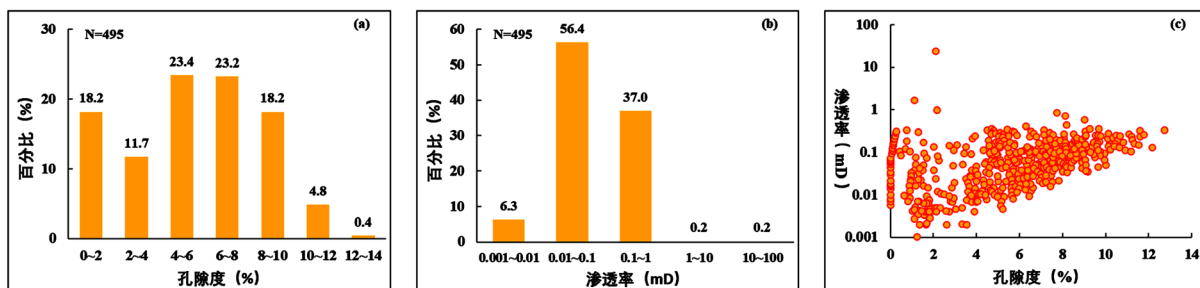


Figure 4. Porosity and permeability of Xu4 Member in study area: (a) Porosity distribution; (b) Permeability distribution; (c) The relationship between porosity and permeability

图 4. 研究区须四段孔渗特征图: (a) 孔隙度分布; (b) 渗透率分布; (c) 孔渗相关性

### 3.2. 岩石学特征

须四段岩石类型主要为岩屑砂岩和岩屑石英砂岩，此外发育少量的石英砂岩、长石岩屑砂岩等(图 5)，碎屑组分具有典型的“极其富岩屑贫长石”的特点。研究区须四段砂岩以中粒、细粒为主，少部分为粗粒和不等粒。分选绝大多数为好和中等，磨圆度以次棱、次棱 - 次圆为主，接触方式主要为线 - 凹凸接触。总体须四段砂岩表现为低成分成熟度和高结构成熟度的特征。

须四段填隙物主要为方解石、自生石英和粘土矿物等自生矿物，此外含有少量的泥质杂基和有机质泥杂基等。

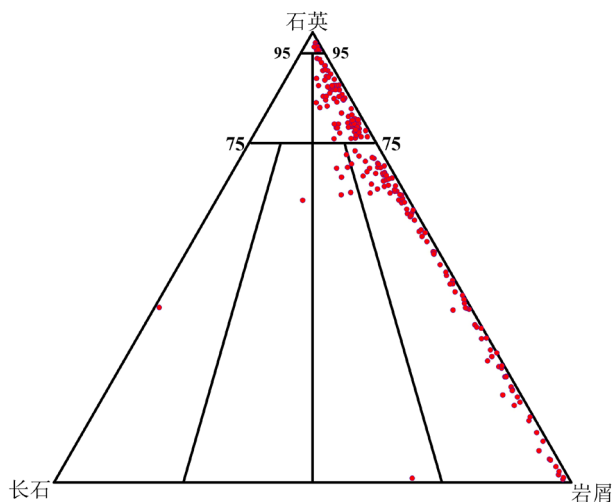


Figure 5. Triangle diagram of rock types of Xu4 Member in the study area

图 5. 研究区须四段岩石类型三端元图

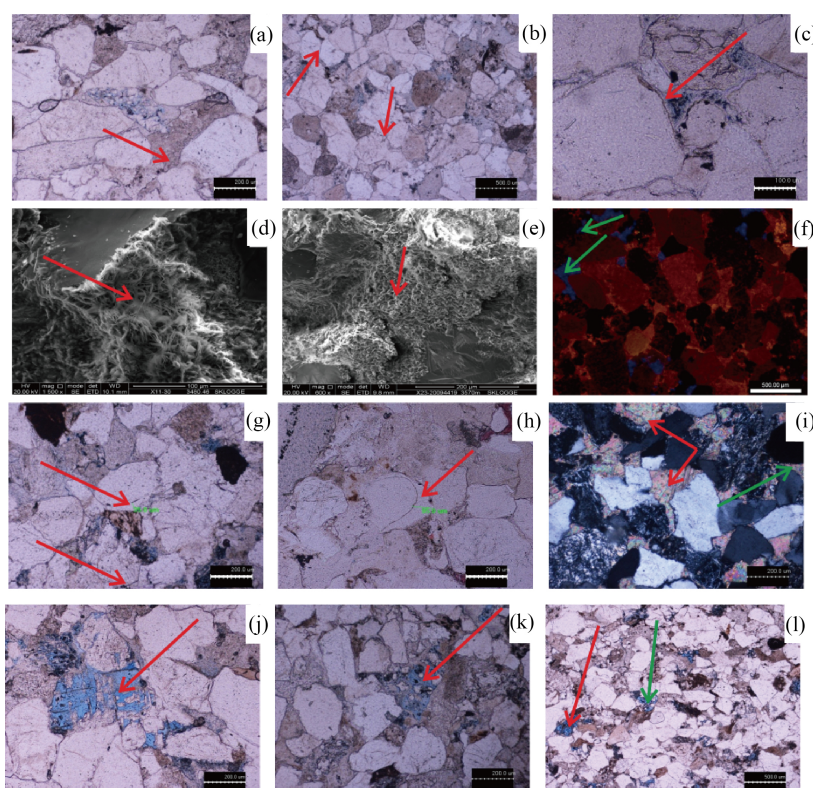
### 3.3. 成岩作用特征

砂岩沉积后的成岩作用对储层质量具有重要的影响，是储层改造的主要地质因素[18] [19] [20]。研究



区须四段成岩作用主要有压实作用、胶结作用、溶蚀作用和交代作用等。

须四段埋藏较深(3100 m~4150 m), 砂岩经历了较强的压实作用, 如部分塑性岩屑在构造应力作用下发生塑性变形, 形成假杂基(图 6(a)), 碎屑颗粒之间接触方式以线-凹凸接触为主, 也反映了较强的压实作用(图 6(b))。研究区自生胶结物类型众多, 主要有粘土矿物、石英和方解石等。其中, 伊利石主要以包裹和孔隙充填两种形式赋存于孔隙内(图 6(c), 图 6(d)), 对储层质量主要起破坏性作用。而高岭石多数充填于粒间孔隙内, 其晶体之间发育有少量的晶间孔隙(图 6(e), 图 6(f))。自生石英的赋存形式主要为石英加大边和孔隙充填石英。研究区须四段自生石英发育, 镜下可明显观察到自生石英与陆源石英颗粒之间的“尘线”(图 6(g), 图 6(h))。须四段自生方解石包括交代颗粒方解石和粒间充填方解石。前者以交代长石颗粒为主, 对孔隙的破坏较小, 后者主要充填于粒间孔隙内, 部分呈连晶胶结, 严重降低储层质量(图 6(i))。溶蚀作用是研究区主要的建设性成岩作用。通过镜下观察, 溶蚀矿物以长石颗粒和富含长石成分的岩屑为主, 部分视域下可观察到岩屑内长石成分被溶蚀后的石英颗粒残余(图 6(k), 图 6(l)), 粒内溶孔、铸模孔等次生孔隙多数为长石成分被溶蚀后所形成。



(a) 塑性岩屑受构造应力变形形成假杂基, X5 井, 3605.46 m, T3X4, 单偏光; (b) 颗粒之间接触方式以线-凹凸接触为主, X23 井, 4007.6 m, T3X4, 单偏光; (c) 垂直颗粒边缘生长的伊利石包裹, X5 井, 3604.62 m, T3X4, 单偏光; (d) 粒间孔隙内充填丝缕状伊利石, X11 井, 3480.46 m, T3X4, 扫描电镜; (e) 孔隙内充填自形程度较好的高岭石, XC23 井, 3570 m, T3X4, 扫描电镜; (f) 自生高岭石法靛蓝色光, X21 井, 3683.72 m, T3X4, 扫描电镜; (g) 石英自生加大边发育, XC22 井, 3417 m, T3X4, 单偏光; (h) 自生石英充填原生粒间孔隙内, XC25 井, 3775.25 m, T3X4, 单偏光; (i) 交代颗粒方解石(红色箭头)与粒间充填方解石(绿色箭头), X202 井, 3848.19 m, T3X4, 正交偏光; (j) 钾长石沿解理发生溶蚀, 形成粒内溶孔; X202 井, 3845.61 m, T3X4, 单偏光; (k) 岩屑中的长石颗粒被溶蚀, 石英颗粒残余, XC11 井, 3476.94 m, T3X4, 单偏光; (l) 岩石中溶蚀作用发育, 形成粒内溶孔和铸模孔, X202 井, 3848.19 m, T3X4, 单偏光。

**Figure 6.** The main diagenesis of Xu4 member in Xiaquan-Xinchang area

**图 6.** 孝泉-新场地区须四段主要成岩作用

## 4. 影响储层形成的因素

### 4.1. 沉积微相

沉积微相不仅控制储层的平面展布，而且决定了岩石组分、粒度、分选、结构以及填隙物的成分和含量，一方面控制了岩石原生孔隙的发育程度，另一方面又控制了成岩作用的类型与强度[21] [22] [23]。研究区须四段主要发育冲积扇 - 辫状河三角洲沉积，主要的沉积微相包括辫状主河道、河口坝、水下分流河道、分流间湾、远砂坝、水下天然堤以及滨浅湖滩坝等。根据实测物性样本与沉积相划分结果，河口坝、水下分流河道储集性最好，其次为辫状主河道，分流间湾最差，反映了强水动力沉积环境更有利于储层的发育(图 7)。

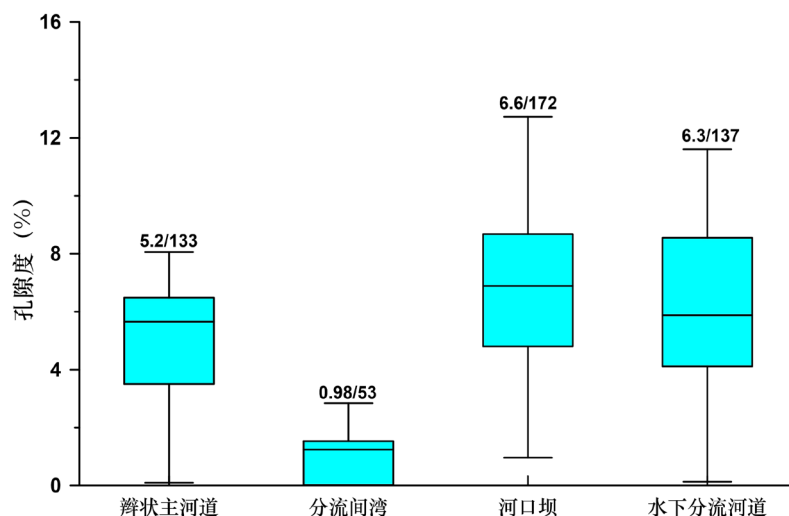


Figure 7. Boxplots porosity of different sedimentary microfacies

图 7. 不同沉积微相孔隙度箱线图

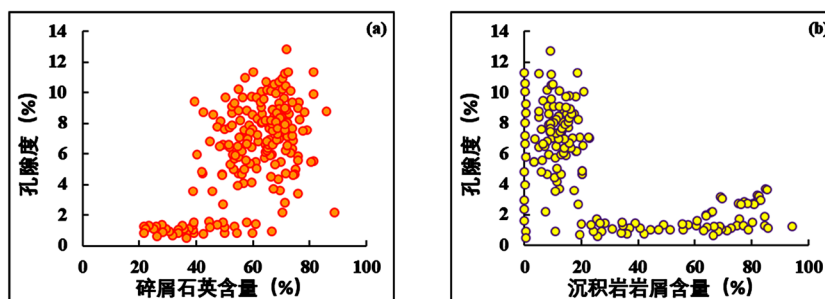
### 4.2. 碎屑组分

碎屑组分对储层的物性具有重要的影响。石英等刚性颗粒的含量与储层的抗压能力十分密切。刚性颗粒的含量越高，砂岩的抗压能力越强，更有利于孔隙的保存[24] [25] [26]。根据须四段铸体薄片鉴定结果，砂岩碎屑石英含量与孔隙度具有一定的正相关，证实了高石英颗粒含量对孔隙保存的积极作用(图 8(a))。而高含量的塑性沉积岩岩屑则具有明显较低的孔隙度。沉积岩岩屑含量大于 20% 的样品，其孔隙度基本处于小于 2% 的范围内(图 8(b))。镜下也可观察到塑性岩屑在构造应力作用下受到挤压变形，形成假杂基，堵塞喉道，降低储层质量(图 6(a)，图 6(b))。

### 4.3. 成岩作用

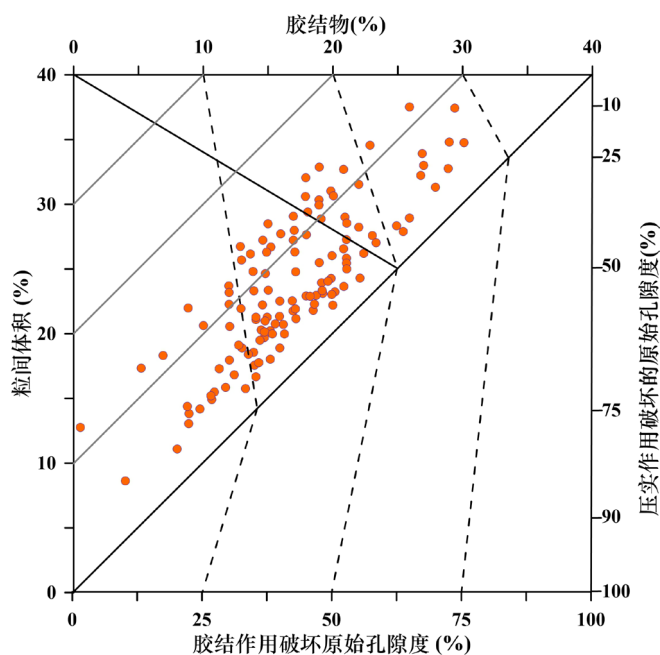
#### 4.3.1. 压实作用

压实作用在川西拗陷孝泉 - 新场地区须四段发育十分普遍，其强度受埋藏深度、碎屑组成等诸多因素控制，由于须四段砂岩埋藏深度处于 3100~4150 m 范围内，碎屑组分具有极富岩屑的特点，研究区须四段砂岩的压实程度普遍较强。其具体表现为：塑性沉积岩岩屑在构造应力作用下发生变形，形成假杂基；碎屑颗粒之间受到强烈挤压，颗粒间接触方式以线 - 凹凸接触为主。根据负胶结物孔隙度图分析[27] [28]，压实作用对粒间体积的破坏程度强于胶结作用(图 9)。



**Figure 8.** Cross-plot of porosity and different clastic component. (a) Clastic quartz; (b) Sedimentary rock fragments

**图 8.** 不同碎屑组分与孔隙度交汇图。(a) 碎屑石英；(b) 沉积岩岩屑



**Figure 9.** Effect of compaction and cementation on reservoir quality of Xu4 Member

**图 9.** 须四段储层压实、胶结作用减孔分析

#### 4.3.2. 胶结作用

胶结作用是影响储层发育的重要因素之一。研究区主要的胶结物为方解石、自生石英和粘土矿物。根据薄片鉴定资料分析，研究区方解石较为发育，除交代颗粒方解石对储层质量影响有限外，还发育充填粒间孔隙的方解石，此类方解石对储层孔隙破坏较大。根据图 10 可知，方解石含量与孔隙度具有一定的负相关(图 10(a))且孔隙度较好(>8%)的方解石的含量明显小于孔隙度较差的样点，这些特征反映了胶结方解石对储层的破坏作用。而自生石英和高岭石则对储层质量具有双重的影响。镜下可明显观察到高岭石和自生石英占据孔隙空间(图 6(e)~(h))，降低储层质量的现象。但高岭石和自生石英是钾长石溶蚀的产物[29]，其含量的高低一定程度上反映了溶蚀作用的强弱。孔隙度较好的样点具有含量相对较高的高岭石和自生石英(图 11)，侧面反映了溶蚀作用对储层的改善作用。

#### 4.3.3. 溶蚀作用

储层发育受众多因素影响，其中溶蚀作用是一种主要的建设性成岩作用[30]。强烈的溶蚀作用将会直



影响着次生孔隙的发育。前人研究表明,川西坳陷须家河组纵向上发育多套品质较好的烃源岩。烃源岩不断深埋过程所释放的酸性流体极易在势能差的作用下向上运移至须四段砂岩内[31],使长石、岩屑等易容组分发生溶蚀。镜下可观察到大量粒间溶蚀扩大孔、粒内溶孔以及铸模孔等次生孔隙(图 6(j)~(l)),反映了溶蚀作用对储层质量的改善作用。

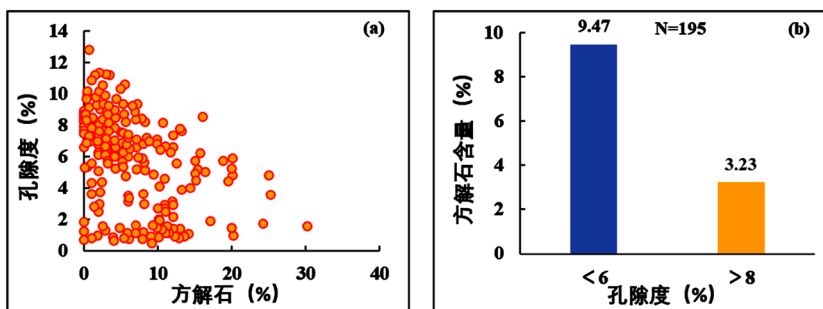


Figure 10. Effect of calcite on porosity of Xu4 Member. (a) Cross-plot of porosity and calcite component; (b) Histogram of calcite content in different porosity

图 10. 须四段方解石对孔隙度影响分析。(a) 方解石含量与孔隙度交汇图; (b) 不同孔隙度方解石含量直方图

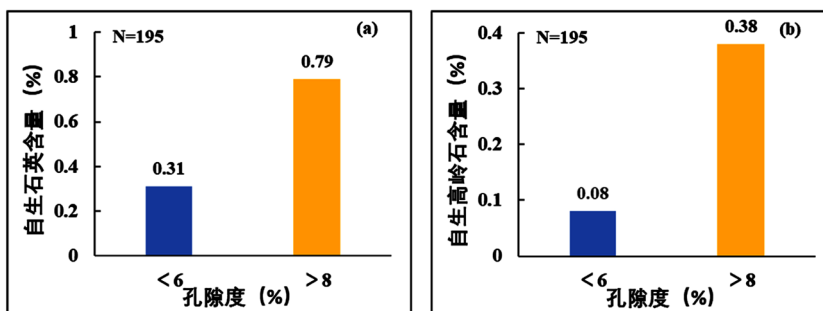


Figure 11. Histogram of authigenic minerals in different porosity of Xu4 Member. (a) Quartz; (b) Kaolinite

图 11. 须四段不同孔隙度自生矿物含量直方图。(a) 石英; (b) 高岭石

## 5. 结论

1) 孝泉 - 新场地区须四段储层孔隙度平均值为 5.54%, 渗透率平均值为 0.15 mD, 属于低孔 - 超低渗致密砂岩储层, 储集空间主要为粒间溶孔、粒内溶孔及铸模孔等次生孔隙。

2) 孝泉 - 新场地区须四段储层岩石类型以岩屑砂岩和石英岩屑砂岩为主, 颗粒分选较好, 磨圆度中等 - 较差, 具有“高结构成熟度而低成分成熟度”的特征。

3) 孝泉 - 新场地区须四段储层发育主要受沉积微相、碎屑组分和溶蚀作用的控制。发育于强水动力沉积环境内的砂岩是形成储层的基础; 高石英低岩屑的碎屑组分特征可有效抑制压实作用, 是储层形成的有利条件; 成岩后期长石及岩屑在酸性流体作用下的强烈溶蚀是改善储层质量的关键。

## 参考文献

- [1] 陈贤良, 纪友亮, 杨克明. 川西坳陷中段须四段储层定量成岩相特征[J]. 断块油气田, 2017, 24(1): 5-9.
- [2] 刘春富, 刘树根, 赵霞飞, 等. 川西坳陷丰谷构造上三叠统须家河组四段致密砂岩储层特征[J]. 四川地质学报, 2011, 31(2): 167-172.

- [3] 王鹏, 朱童, 徐邱康, 等. 川西坳陷中段雷口坡组烃源岩评价及气源分析[J]. 地质科技情报, 2019, 38(3): 180-187.
- [4] 吴小奇, 陈迎宾, 刘全有, 等. 川西坳陷新场气田须家河组五段烃源岩分子地球化学特征[J]. 地球科学, 2019, 44(3): 859-871.
- [5] 李强, 袁东山, 杨映涛, 等. 川西坳陷优质烃源岩测井定量预测及分布——以须家河组五段为例[J]. 天然气技术与经济, 2018, 12(2): 21-23, 58, 81-82.
- [6] 钟玉梅. 川西坳陷中段须家河组四段砂岩储集特征[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2008, 30(6): 218-220.
- [7] 林煜, 徐樟有, 吴胜和, 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): 9-12.
- [8] 徐康, 刘光祥, 胡文焯, 等. 川西地区须四段砂岩储层特征及主控因素分析[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(2): 42-49.
- [9] 王国亭, 孙建伟, 黄锦袖, 等. 神木气田低渗致密储层特征与水平井开发评价[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2019, 41(5): 1-9.
- [10] 王雪柯, 李伟, 张本建, 等. 四川盆地西北部上三叠统须三段储层超致密与气藏超压成因[J]. 天然气工业, 2019, 39(11): 25-35.
- [11] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.
- [12] 路媛媛. 临兴气田上古生界致密砂岩储层发育特征及主控因素[J]. 非常规油气, 2021, 8(1): 43-50.
- [13] 刘明洁, 季永承, 唐青松, 等. 成岩体系对致密砂岩储层质量的控制——以四川盆地中台山地区须二段为例[J/OL]. 沉积学报: 1-18. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2020.62>, 2021-05-18.
- [14] 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.
- [15] 高彩霞, 邵龙义, 李大华, 等. 四川盆地东部上三叠统须家河组层序——古地理特征[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1659-1667.
- [16] 章顺利, 宋修章, 吕正祥, 等. 川西新场构造须四段储层特征及主控因素[J]. 沉积与特提斯地质, 2016, 36(1): 98-103.
- [17] 刘四兵, 沈忠民, 吕正祥, 等. 川西新场气田上三叠统须二、须四段相对优质储层成因差异性分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(4): 993-1001.
- [18] 罗静兰, 李弛, 雷川, 等. 碎屑岩储集层成岩作用研究进展与热点问题讨论[J]. 古地理学报, 2020, 22(6): 1021-1040.
- [19] 王爱, 钟大康, 刘忠群, 等. 川东北元坝西地区须三段钙屑致密砂岩储层成岩作用与孔隙演化[J]. 现代地质, 2020, 34(6): 1193-1204.
- [20] 张帅, 王国芝, 黄盛, 等. 川西丰谷地区须四段砂岩储层成岩作用及孔隙演化[J]. 云南地质, 2021, 31(4): 508-511.
- [21] 于兴河, 李顺利, 杨志浩. 致密砂岩气储层的沉积-成岩成因机理探讨与热点问题[J]. 岩性油气藏, 2015, 21(7): 1-13.
- [22] 张琼, 徐文礼, 徐娟, 等. 渤海湾盆地富林洼陷古近系沙三段储层特征及油气主控因素[J/OL]. 中国地质: 1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200423.1121.004.html>, 2021-05-18.
- [23] 梁爽, 杜社宽. 准噶尔盆地中拐凸起侏罗系三工河组储层特征及控制因素[J]. 沉积学报, 2019, 37(6): 1269-1279.
- [24] 齐亚林, 赵彦德, 王克, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬与黄陵地区长 8 段储层主控因素研究[J]. 石油实验地质, 2015, 37(3): 334-340.
- [25] 潘荣, 朱筱敏, 王星星, 等. 深层有效碎屑岩储层形成机理研究进展[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(4): 73-80.
- [26] 张武, 徐国盛, 侯国伟, 等. 丽水凹陷西凹中部储层致密成因及优质储层主控因素[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2020, 17(3): 14-20.
- [27] Houseknecht, D.W. (1987) Hydrocarbons in an Overmature Basin. 2. Is There A Thermal Maturity Limit to Methane Production in Arkoma Basin, Oklahoma and Arkansas. *AAPG*, **71**, 633-642.
- [28] Ehrenberg, S.N. (1989) Assessing the Relative Importance of Compaction Processes and Cementation to Reduction of Porosity in Sandstones: Discussion; Compaction and Porosity Evolution of Pliocene Sandstones, Ventura Basin, California: Discussion. *AAPG Bulletin*, **77**, 1260-1286.

- [29] 杨友运, 刘喜强, 孙睿. 深埋砂岩储层长石溶孔率定量计算的新方法及应用——以鄂尔多斯盆地陇东地区长 8<sub>1</sub> 储层为例[J]. 石油实验地质, 2016, 38(3): 395-401.
- [30] 周志恒, 钟大康, 凡睿, 等. 致密砂岩中岩屑溶蚀及其伴生胶结对孔隙发育的影响——以川东北元坝西部须二下亚段为例[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(3): 592-603, 615.
- [31] 林小兵, 刘莉萍, 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.