



移动阅读

黄彦庆, 肖开华, 王爱, 等, 2023. 川东北元坝西部须家河组二段优质储层展布特征研究[J]. 沉积与特提斯地质, 43(3): 489–500. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.12007](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.12007)

HUANG Y Q, XIAO K H, WANG A, et al., 2023. Distribution of high-quality reservoir of the second member of Xujiahe Formation in western Yuanba area, northeastern Sichuan Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(3): 489–500. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.12007](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.12007)

## 川东北元坝西部须家河组二段优质储层展布特征研究

黄彦庆, 肖开华, 王爱, 林恬, 王濡岳

(中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:** 川东北元坝地区须家河组二段致密砂岩气资源潜力巨大, 但储量探明率低、测试效果差异大, 主要原因之一是致密砂岩储层非均质性、优质储层分布规律不清。本文充分利用测录井、岩心及相关分析化验等资料, 在分砂组刻画沉积微相展布的基础上, 开展了须二段沉积演化过程、储层特征及其分布研究。结果表明: (1) 元坝西部须二段经历了辫状河三角洲-滨浅湖-辫状河三角洲演化过程, 沉积控制了砂体规模、粒度和矿物成分的空间变化; (2) 须二段砂岩类型多样, 整体致密, 为低孔、低渗储层; 储层物性与砂岩粒度、长石、石英和方解石胶结物含量等因素密切相关, 这些因素主要受沉积和后期成岩作用控制; (3) 须二段发育块状中粒长石岩屑砂岩和交错层理中粒石英砂岩两类有利岩石相, 前者自西北向东南逐渐减薄、呈条带状展布, 后者呈不连续土豆状, 主体分布于西南部地区。

**关键词:** 岩石相; 沉积微相; 须家河组; 储层发育主控因素; 元坝西部; 四川盆地东北部; 致密砂岩气  
**中图分类号:** TE122; **文献标识码:** A

### Distribution of high-quality reservoir of the second member of Xujiahe Formation in western Yuanba area, northeastern Sichuan Basin

HUANG Yanqing, XIAO Kaihua, WANG Ai, LIN Tian, WANG Ruyue

(SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The potential for tight sandstone gas resources in the second member of the Xujiahe Formation in the Yuanba area of northeast Sichuan is enormous, but the proven reserves are low and the testing results vary widely, mainly due to strong heterogeneity of the tight sandstone reservoirs and unclear distribution pattern of high-quality reservoirs. This research makes full use of well logging, core samples, and related analysis and testing data to characterize the sedimentary microfacies distribution in the Second Member of the Xujiahe Formation based on sedimentary facies division, and carries out investigations into the sedimentary evolution process, reservoir characteristics, and distribution of the reservoirs. The results show that: (1) The second member of Xujiahe Formation in the west of Yuanba area has undergone an evolutionary process from braided delta to shallow lacustrine to braided delta, with sedimentation controlling the spatial variation in sand body size, grain size, and mineral composition; (2) The second member of Xujiahe Formation contains diverse types of sandstone, which are tight in the overall, and are low-porosity and low-permeability reservoirs. The physical properties of reservoirs are closely related to factors such as sandstone grain size, feldspar, quartz, and calcite cement content, which are mainly controlled by sedimentation and later diagenesis; (3) There are two favorable

收稿日期: 2021-09-22; 改回日期: 2022-11-14; 责任编辑: 郭秀梅

作者简介: 黄彦庆(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 油气藏评价。E-mail: [huangyq.syky@sinopec.com](mailto:huangyq.syky@sinopec.com)

资助项目: 中国石油化工股份有限公司科技开发部项目“川东北须家河组储层评价与甜点预测技术”(P19012-2)、  
“须家河组气藏储量评价及开发目标优选”(P18089-4)联合资助

lithofacies in the second member of the Xujiahe Formation: massive medium-grain feldspathic lithic sandstone and cross-bedded medium-grain quartz sandstone. The former gradually thins from the northwest to the southeast and spreads in strips, while the latter is discontinuous and potato-shaped, primarily distributed in the southwestern region.

**Key words:** lithofacies; sedimentary microfacies; Xujiahe Formation; main controlling factors of reservoir development; western Yuanba area; northeastern Sichuan Basin; tight sandstone gas

### 0 引言

随着人类对绿色清洁能源,特别是天然气需求的日益增强,致密砂岩气在天然气储产量增长和能源供应方面发挥着越来越重要的作用(张春等, 2013)。川东北元坝地区上三叠统须家河组二段致密砂岩气三级地质储量规模巨大,生产测试结果表明,无阻产量为  $0 \sim 22.06 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,测试效果差异大,主要因为储层非均质性强,优质储层分布规律不清(邹才能等, 2012; 罗龙等, 2017)。因此,明确优质储层的类型及其分布是元坝地区须二气藏有效开发的关键因素之一。

前人对元坝西部须二段沉积相和储层开展过研究,提出须二段为辫状河三角洲和滨浅湖沉积,发育水下分流河道和滩坝等微相(淡永, 2011; 夏杰等, 2014; 陈波等, 2012; 郝靖宇等, 2015);储层物性

受沉积条件和成岩作用共同控制,水下分流河道物性较好,溶蚀作用是形成优质储层主要的控制作用(贾爽等, 2014; 程立雪等, 2016; 张莉等, 2017; 王爱等, 2021)。早期研究以亚段为单元编制沉积相图,纵向上沉积微相的变化不清楚,沉积对砂岩成分和储层物性的控制作用、优质储层分布等方面研究较少。

本次充分利用测录井、岩心、分析化验和地震资料,分砂组刻画须二段沉积微相展布,明确了沉积演化过程,砂体规模,粒度和矿物成分的空间变化规律,进而研究了优质储层发育主控因素。在此基础上,通过基于岩石相的储层评价,明确了须二段有利岩石相类型,建立其测井识别标准,结合沉积-储层的研究成果,准确刻画了须二段优质储层的展布,为研究区须二段致密砂岩气的有效开发提供了依据,也为致密砂岩的优质储层分布研究提供

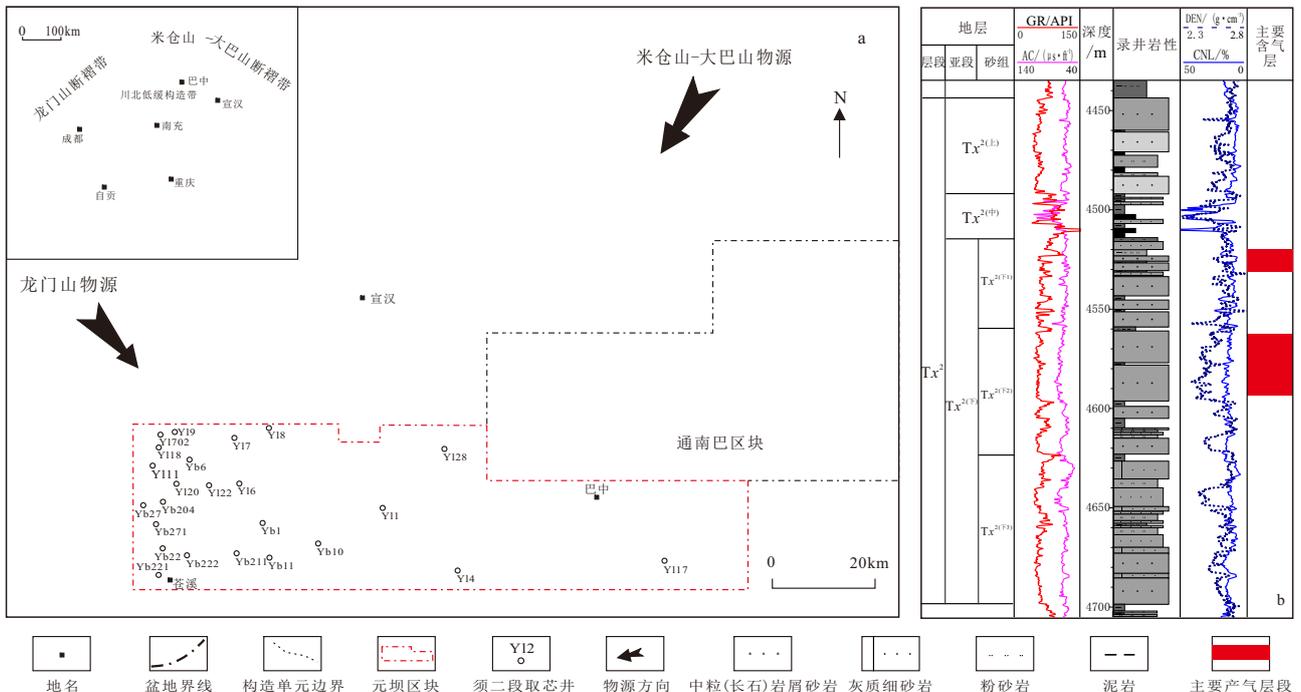


图1 川东北元坝地区须二段沉积期物源及综合柱状图(据淡永, 2011; 略改)

Fig. 1 Provenance and comprehensive histogram of the second member of Xujiahe Formation in Yuanba area, northeastern Sichuan Basin (modified from Dan, 2011)

了新的思路。

## 1 区域地质概况

元坝区块位于四川盆地东北部的川北低缓构造带,处于西北侧龙门山、北侧米仓山和东北侧大巴山推覆褶皱带交合处(图 1a)。西部主体为燕山晚期形成的 NE-SW 向九龙山背斜西南侧翼,喜山期受东北侧大巴山逆冲推覆作用小,构造变形程度弱(郭旭升等, 2020; 汪正江等, 2021; 何志勇等, 2014; 王一帆等, 2020)。

元坝西部须二段呈楔状体分布,自西北向东南减薄。须二段分为上、中、下三个亚段,须二下亚段自上而下细分为  $Tx^{2(F1)}$ 、 $Tx^{2(F2)}$  和  $Tx^{2(F3)}$  3 个砂组(图 1b)。须二上、下亚段以厚层砂岩为主,局部夹薄层泥岩,须二中亚段为一套稳定的、厚度 20m 左右的泥岩,局部夹薄层石英砂岩,俗称“腰带子泥岩”,为区域标志层。元坝区块须二段的沉积作用受多物源控制,西部沉积物来源于西北方向的古龙门山,母岩以碳酸盐岩、硅质岩为主,中东部来源于东北方向的古米仓山—大巴山,母岩以浅变质岩、硅质岩为主(淡永, 2011; 夏杰等, 2014; 图 1a),母岩的差异造成了元坝西部(Yb10 井以西的地区)和中东部碎屑岩矿物成分和成岩作用的差异。

## 2 沉积微相精细刻画

### 2.1 沉积微相类型

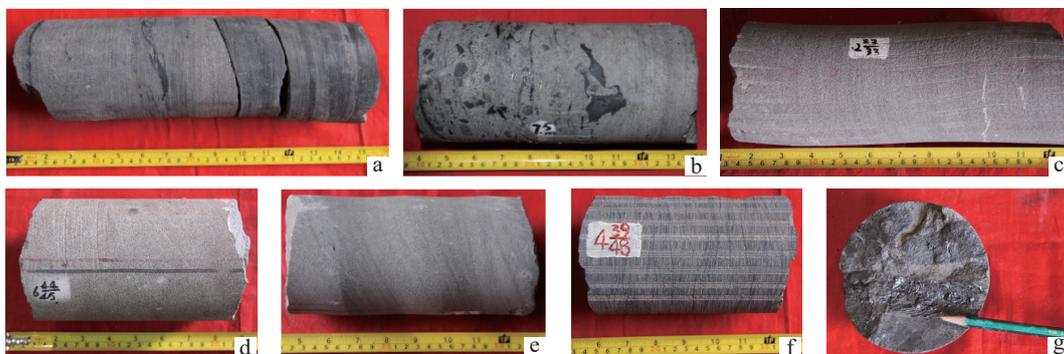
元坝西部须二段岩心以灰色为主,反映了水下还原沉积环境。砂岩中观察到冲刷面及一定方向排列的底砾岩(泥砾),沉积构造多样,砂岩中发育

块状层理、交错层理和平行层理,粉砂岩中多见沙纹层理,泥岩含植物碎屑化石(图 2)。结合录井资料,须二上、下亚段发育辫状河三角洲沉积,中亚段为湖泊沉积,进一步划分为三角洲前缘、前三角洲和滨浅湖 3 类亚相;其中三角洲前缘主要由多期叠置的水下分流河道微相组成,局部为规模较小的分流间湾和席状砂等,滨浅湖亚相以滨浅湖泥微相为主,部分地区发育滩坝。

元坝西部须二段 6 类沉积微相的岩性和测井曲线特征如表 1 所示。水下分流河道以厚层中粒(长石)岩屑砂岩为主,少量中粒岩屑石英砂岩,部分河道顶部发育细砂岩;测井曲线表现为中等幅度、微齿化箱形、钟形或上钟下箱复合形特征。席状砂以细粒岩屑砂岩和粉砂岩为主,呈低频背景上的低—中幅小漏斗形。分流间湾位于水下分流河道之上,以泥岩为主,夹薄粉砂岩和煤层,表现为高频齿化、低幅特征。前三角洲泥的岩性较纯,曲线为微齿化、低幅平直。滨浅湖滩坝微相岩性为细、中粒石英砂岩,呈高幅箱形或漏斗形,GR 极低值(较水下分流河道低),CNL、DEN 低值,AC 中—高值,易识别。滨浅湖泥微相位于滩坝附近,主要为有机质含量较高的炭质泥岩,夹薄层粉、细粒石英砂岩,曲线特征与分流间湾相似。

### 2.2 沉积微相展布

依据岩屑录井和砂岩解释结论,从西北向东南,元坝西部须二段砂岩厚度和砂地比呈减小趋势(表 2)。另外,据  $Tx^{2(F2)}$  砂组岩心分析化验数据,自西北至东南,稳定矿物石英的含量逐渐增加,长石含量逐渐减少(表 2)。进一步证实物源来自西



a. 河道底部的冲刷面, YB6, 4479.45 m; b. 河道底部定向排列泥砾, YB271, 4286.5 m; c. 平行层理, YB204, 4634.6 m; d. 块状构造, YB271, 4296.33 m; e. 交错层理, YB271, 4271.6 m; f. 粉砂岩中沙纹层理, YB6, 4441.72 m; g. 泥岩中植物化石, YL6, 4477.75 m。

图 2 川东北元坝西部须二段常见沉积构造类型及植物化石

Fig. 2 Sedimentary structures and fossils of the second member of Xujiahe Formation in western Yuanba area

表 1 川东北元坝西部须二段各类沉积微相的岩性和测井曲线特征

Table 1 Lithology and log characteristics of sedimentary microfacies of the second member of Xujiahe Formation in western Yuanba area

| 沉积微相   | 岩性特征                                     | 测井曲线特征                                | 典型曲线 |
|--------|--|---------------------------------------|------|
| 水下分流河道 | 厚层砂岩，以中粒（长石）岩屑砂岩为主，少量中粒岩屑石英砂岩和细粒（长石）岩屑砂岩 | 中幅微齿化钟形、箱形或上钟下箱复合形，顶底突变接触或底突变接触       |      |
| 席状砂    | 薄层砂岩，以细粒岩屑砂岩和粉砂岩为主                       | 低-中幅，曲线形态多为低频背景上的小漏斗形                 |      |
| 分流间湾   | 炭质泥岩为主，夹粉砂岩和煤层                           | 高频齿化、低幅，位于水下分流河道之上                    |      |
| 前三角洲泥  | 岩性较纯，以泥岩为主                               | 微齿化、低幅平直，GR、DEN高值，AC低值                |      |
| 滨浅湖滩坝  | 细、中粒石英砂岩                                 | 高幅箱形或漏斗形，GR低值，较分流河道低；CNL、DEN低值，AC中-高值 |      |
| 滨浅湖泥   | 稳定分布的炭质泥岩，夹薄层粉、细粒石英砂岩                    | 高频齿化、低幅，位于滨浅湖滩坝上下                     |      |

中粒(长石)岩屑砂岩

细砂岩

粉砂岩

泥质粉砂岩

粉砂质泥岩

炭质泥岩

泥岩

中粒石英砂岩

细粒石英砂岩

煤层

表 2 川东北元坝西部  $Tx^{2(下2)}$  砂组不同地区砂体发育特征统计表

Table 2 Statistical table of mineral composition of the second member of Xujiahe Formation in different areas of western Yuanba area

| 元坝西部 | 平均厚度/m |       | 砂地比/% | 水下分流河道砂岩碎屑矿物含量/% |      |       |
|------|--------|-------|-------|------------------|------|-------|
|      | 地层     | 砂岩    |       | 石英               | 长石   | 岩屑    |
| 西北部  | 64.65  | 53.28 | 82.27 | 46.8             | 15.8 | 29    |
| 东南部  | 55.01  | 37.16 | 67.56 | 54.8             | 6.5  | 28.23 |

注：地层厚度和砂地比数据依据西北部21口井，东南部32口井；矿物成分据西北部262个样品，东南部98个样品。

北、水下分流河道呈 NW-SE 向展布。

依据单井沉积微相，结合地震属性和砂地比，刻画了元坝西部须二段各砂组的沉积微相展布。须二下亚段  $Tx^{2(下2)}$  和  $Tx^{2(下3)}$  砂组沉积微相展布相似，表现为广泛分布的辫状河三角洲前缘水下分流河道，分流间湾欠发育(图 3a)，与该时期物源供应

充足，地势平缓条件下水下分流河道频繁迁移有关。 $Tx^{2(下1)}$  砂组仍以三角洲前缘亚相为主，但水下分流河道规模变小，主要分布于靠近物源的西北部，东南则以滨浅湖滩坝微相为主(图 3b)，这些滩坝主要沉积于三角洲前缘的两侧，沿湖岸呈线状分布，多是由于湖流对三角洲的改造使碎屑物质沿岸再

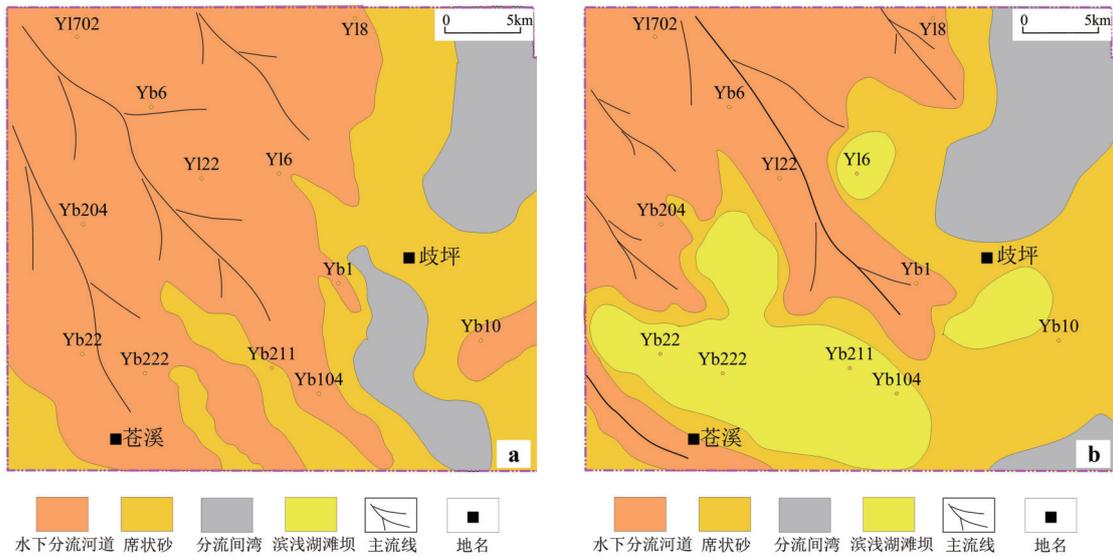


图3 川东北元坝西部须二段重点砂组沉积微相展布图(a-T<sub>2</sub><sup>(下2)</sup>, b-T<sub>2</sub><sup>(下1)</sup>)

Fig. 3 Distribution map of sedimentary microfacies of the key sand formations of the second member of Xujiahe Formation in western Yuanba area

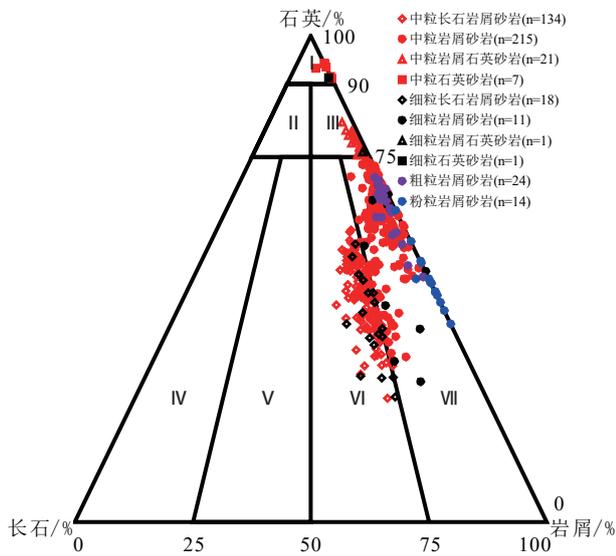
分配形成的(朱筱敏, 2008)。至须二中亚段,元坝西部基本为滨浅湖泥沉积。须二上亚段表现为短轴三角洲沉积,即元坝西北部为广泛分布的水下分流河道,往东南,河道迅速消失,演变为滨浅湖泥沉积。

### 3 储层发育主控因素

根据岩心铸体薄片,元坝西部须二段以中粒岩屑砂岩和中粒长石岩屑砂岩为主,少量粗粒岩屑砂岩、中粒岩屑石英砂岩、细粒长石岩屑砂岩、细粒岩屑砂岩,以及中、细粒石英砂岩和细粒岩屑石英砂岩(图4)。

须二段8口井442块岩心的孔隙度为0.79%~10.53%,平均值4.59%;渗透率为 $0.0021 \times 10^{-3} \sim 26.0086 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均值 $0.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,为低孔、低渗储层。须二段孔隙类型多样,中粒岩屑砂岩发育浅变质岩岩屑和火山岩岩屑中的铝硅酸盐矿物溶蚀形成的岩屑粒内溶孔、及少量粒间溶孔(图5a),而中粒长石岩屑砂岩除了发育上述2类孔隙,(钾)长石粒内溶孔和晶间孔也多见(图5b),故此类型砂岩平均孔隙度最大,达6.62%,平均渗透率为 $0.17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。中粒石英砂岩粒间孔较发育,其平均孔隙度较大,为5.79%。虽然元坝西部处于弱构造变形区,裂缝欠发育,但由于石英性脆,较其他类型砂岩,其中发育微裂缝(图5c),故中粒石英砂岩渗透率高,平均值达 $8.57 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。而其他砂岩的孔隙度多小于有效储层的下限标准(下限为5%,据中石油勘探南方分公司,2011),渗透率更低,非有效储层。

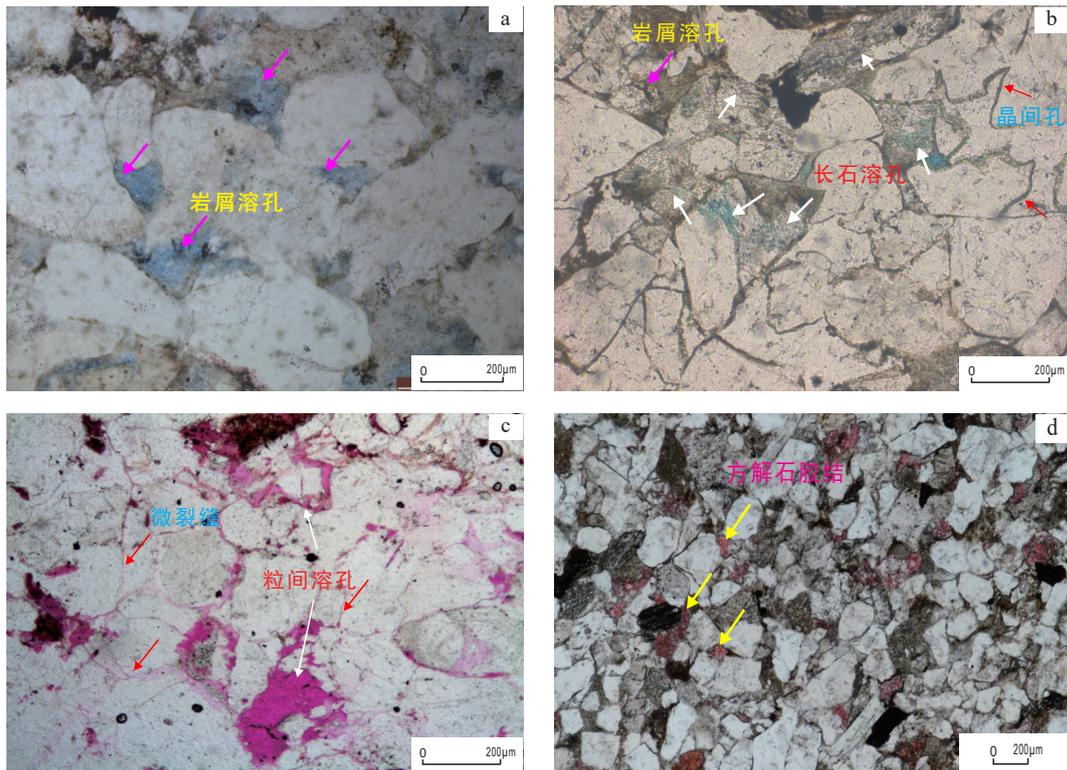
依据须二气藏生产测试结果,中粒石英砂岩段产量高,60%井达到工业气流,与其微裂缝发育、渗透性好有关。部分中粒长石岩屑砂岩段测试效



I—石英砂岩; II—长石石英砂岩; III—岩屑石英砂岩; IV—长石砂岩; V—岩屑长石砂岩; VI—长石岩屑砂岩; VII—岩屑砂岩。

图4 川东北元坝西部须二段砂岩分类三角图(样品共计446个)

Fig. 4 Lithology classification of the second member of Xujiahe Formation in western Yuanba area



a. 中粒岩屑砂岩, Yb271 井, 4338.36 m; b. 中粒长石岩屑砂岩, Y16 井, 4477.24 m; c. 中粒石英砂岩, Yb22 井, 4430 m (岩屑); d. 细粒岩屑砂岩, Y16 井, 4498.75 m。

图 5 元坝西部须二段不同类型砂岩孔隙类型与胶结作用

Fig. 5 Diagenesis characteristics and pore types of the second member of Xujiahe Formation in western Yuanba area

果较好,多数井达低产工业气流。总体而言,元坝西部须二段发育中粒石英砂岩和中粒长石岩屑砂岩 2 类优质储层,其形成受沉积作用和成岩改造两方面因素控制。

### 3.1 沉积微相是优质储层发育的基础

#### 3.1.1 沉积微相控制砂体规模和岩石类型

元坝西部须二段沉积期水体经历了由浅变深、再变浅的过程,纵向上表现为辫状河三角洲—湖泊—辫状河三角洲的演化过程,造成了不稳定矿物含量纵向上规律变化,从须二下亚段  $Tx^{2(F-3+2)}$  砂组至须二中亚段长石含量逐渐减少,石英含量逐渐增加,下部长石岩屑砂岩较发育,上部以岩屑砂岩和岩屑石英砂岩为主,部分井区  $Tx^{2(F-1)}$  砂组顶部发育一套石英砂岩。

平面上,从西北向东南,随着与古龙门山物源距离的增大,砂体厚度减小,矿物成分成熟度逐渐增加(表 2),须二下亚段西北部以中粒长石岩屑砂岩为主,东南部则为中、细粒岩屑砂岩。

#### 3.1.2 致密砂岩储层物性与粒度和矿物成分关系密切

对于相同成分的砂岩,粒度越粗,物性越好

(图 6a)。这是因为中、粗粒砂岩原生孔隙较发育,酸性流体易进入储层中形成次生溶蚀孔隙。故水下分流河道和滩坝 2 类微相砂岩物性优于席状砂,纵向上中、粗粒砂岩多发育于单期水下分流河道的中下部,平面上西北部中、粗粒砂岩较东南发育,故上述部位易于形成优质储层。

中粒砂岩中表现出长石含量越高,孔隙度越高的特征(图 6b)。因为中粒岩屑砂岩孔隙类型主要为岩屑粒内溶孔和粒间溶孔(图 5a),而长石岩屑砂岩不仅发育上述两类溶孔,还发育长石、尤其是钾长石粒内溶孔,另外,此类孔隙形成时溶蚀产物也参与绿泥石膜的形成,发育大量绿泥石晶间微孔(图 5b),故长石岩屑砂岩孔隙度较高。据恒速压汞测试资料,中粒长石岩屑砂岩和中粒岩屑砂岩的孔隙半径分别为  $120\sim 140\ \mu\text{m}$  和  $120\ \mu\text{m}$ ,喉道半径分别为  $0.31\sim 0.41\ \mu\text{m}$  和  $0.23\sim 0.31\ \mu\text{m}$ ,也反映了长石岩屑砂岩的孔隙和喉道均优于岩屑砂岩。长石岩屑砂岩的分布主要受沉积控制。纵向上,从  $Tx^{2(F-2)}$  砂组至  $Tx^{2(F-1)}$  砂组,长石含量逐渐减少;平面上,从西北至东南,长石含量逐渐减少,故研究

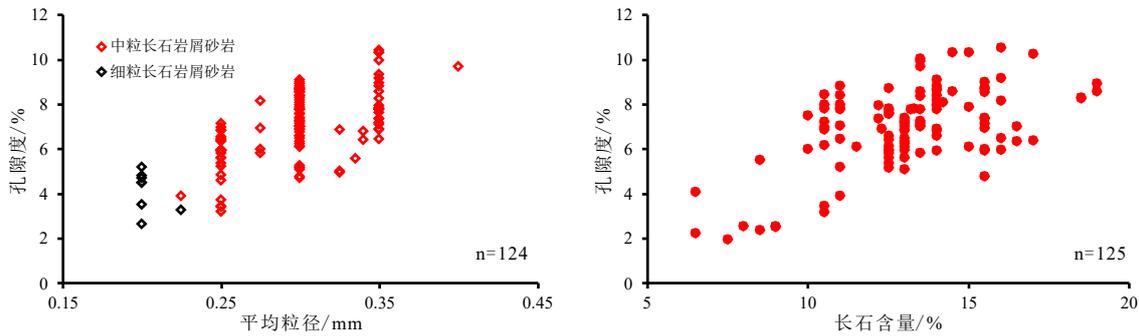


图6 川东北元坝西部须家河组二段岩心分析孔隙度与粒径(左)和长石含量(右)交会图

Fig. 6 Correlation between porosity and grain size (left)/feldspar content (right) of the second member of Xujiahe Formation in western Yuanba area

区西北部须二下亚段中下部优质储层更为发育。

### 3.2 成岩作用是优质储层形成的关键

通过元坝西部须二段储层成岩作用与孔隙演化特征研究,碎屑颗粒粒度较粗、或者石英类刚性碎屑含量较高时,具有一定的抗压性能,保持一定的原生孔隙,为后期溶蚀流体提供通道,故中、粗

粒岩屑砂岩、中粒长石岩屑砂岩,尤其是中粒石英砂岩受压实作用影响较小,残余粒间孔较发育,也为后期溶蚀作用奠定基础。

中成岩作用 A 期是溶蚀孔隙形成的主要阶段,长石和易溶岩屑含量越多,溶蚀增孔程度越高,中、粗粒岩屑砂岩中发育岩屑粒内溶孔(图 5a),而长

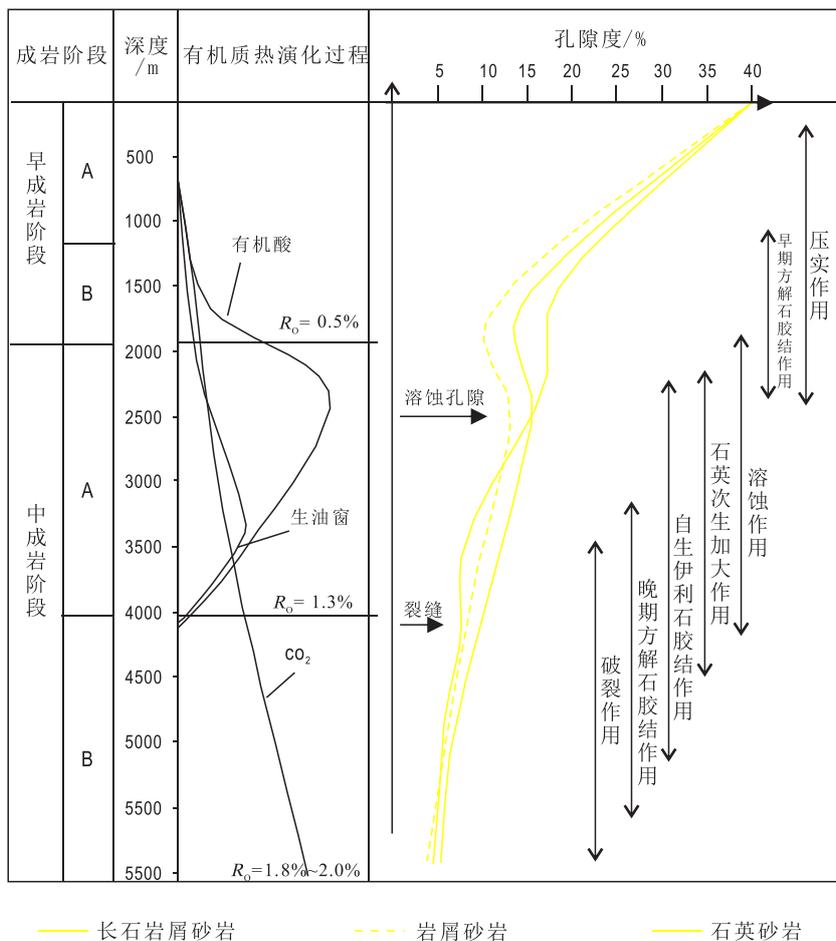


图7 川东北元坝西部须家河组二段不同岩性孔隙演化曲线(据李军等,略修改)

Fig. 7 Pore evolution of different lithologies of the second member of Xujiahe Formation in western Yuanba area (modified from LI Jun, et al. 2016)

石岩屑砂岩中除了岩屑溶孔,长石粒内溶孔和晶间孔同时形成(图 5b),不同类型砂岩的孔隙度差异增大。

更深的埋藏阶段,压实作用已不重要(李军等, 2016),碳酸盐胶结作用使孔隙度进一步降低(图 5d),碳酸盐胶结多发育于细砂岩或者含泥砾的中粒砂岩中及其附近,而中粒长石岩屑砂岩和石英砂岩受影响小,两类砂岩孔隙保存良好。虽然晚喜山期大巴山推覆作用产生的挤压应力对元坝西部须家河组影响小,但由于石英砂岩脆性大,其中发育微裂缝(图 5c),虽然此类裂缝宽度仅 20~30  $\mu\text{m}$ ,但有效地改善储层渗透能力(图 7),这是中粒石英砂岩优质储层形成的关键。

#### 4 基于岩石相的优质储层刻画

须二段厚层致密砂岩中仅部分层段为优质储层,有必要细分岩石单元(MIALL A D, 1985);岩石相指具有相同的沉积构造和岩性,能反映特定水动力条件的基本沉积单元。岩石相与储集物性关系密切。虽然致密砂岩经历了复杂的成岩作用,但成岩作用是在沉积作用形成的岩石结构和矿物成分基础上进行的,在一定区域和一定层段内具有普遍影响的共性(MUÑOZ A et al., 1992; 张昌民和尹大举, 1996; 裘亦楠, 1990; 隆辉等, 2018)。本次利用岩石相开展优质储层评价。

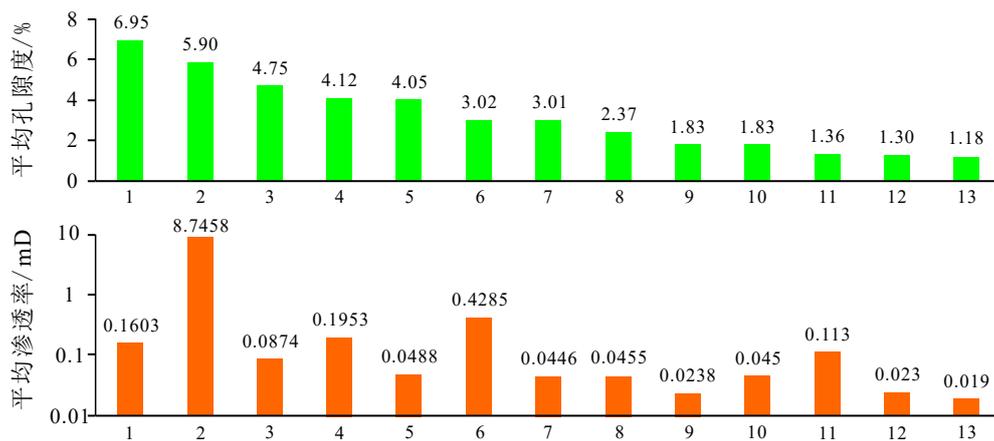
#### 4.1 有利岩石相类型

依据储层发育主控因素,考虑沉积构造、粒度、矿物成分和方解石胶结物等属性,划分了须二段 8 口井取心段的岩石相,共 13 类,包含块状中粒长石岩屑砂岩、交错层理中粒石英砂岩、含泥砾中粒长石岩屑砂岩、斜层理细粒长石岩屑砂岩、含炭屑粗粒岩屑砂岩、块状中粒岩屑砂岩、块状中粒岩屑石英砂岩、灰质中粒长石岩屑砂岩、灰质中粒岩屑砂岩、灰质细粒岩屑砂岩、沙纹层理粉砂岩、斜层理细粒石英砂岩和块状泥岩。通过不同岩石相物性的研究(图 8),须二段发育块状中粒长石岩屑砂岩和交错层理中粒石英砂岩 2 类有利岩石相,这与 2 类岩石相的孔隙类型多样、中粒石英砂岩发育微裂缝密切相关(图 5b, 图 5c)。

#### 4.2 有利岩石相测井评价

不同岩石相测井曲线特征分析表明(图 9a 和 b), GR、RD、CNL 和 DEN 等曲线能够较好地识别 2 类有利岩石相。交错层理中粒石英砂岩表现为极低 GR、低 CNL 和高 RD,易于识别。而中粒长石岩屑砂岩,可通过 3 个步骤(表 3)准确地识别:①剔除泥岩、粉砂岩、细、粗砂岩;②剔除钙质胶结砂岩和中粒岩屑石英砂岩;③剔除中粒岩屑砂岩。

应用上述标准,对元坝西部 53 口井 2 类有利岩石相进行了解释。统计生产测试井测试段有利岩石相累计厚度与测试产量的相关性,结果显示,



1—块状中粒长石岩屑砂岩 (n=102); 2—交错层理中粒石英砂岩 (n=3); 3—斜层理细粒长石岩屑砂岩 (n=10); 4—(含炭屑)粗粒岩屑砂岩 (n=15); 5—块状中粒岩屑砂岩 (n=113); 6—含泥砾中粒长石岩屑砂岩 (n=7); 7—灰质中粒长石岩屑砂岩 (n=15); 8—块状中粒岩屑石英砂岩 (n=34); 9—灰质中粒岩屑砂岩 (n=32); 10—灰质细粒岩屑砂岩 (n=6); 11—沙纹层理粉砂岩 (n=7); 12—细粒石英砂岩 (n=2); 13—块状泥岩 (n=4)。

图 8 川东北元坝西部须二段不同岩石相平均物性直方图

Fig. 8 Average porosity and average permeability of different lithofacies of the second member of Xujiahe Formation in western Yuanba area

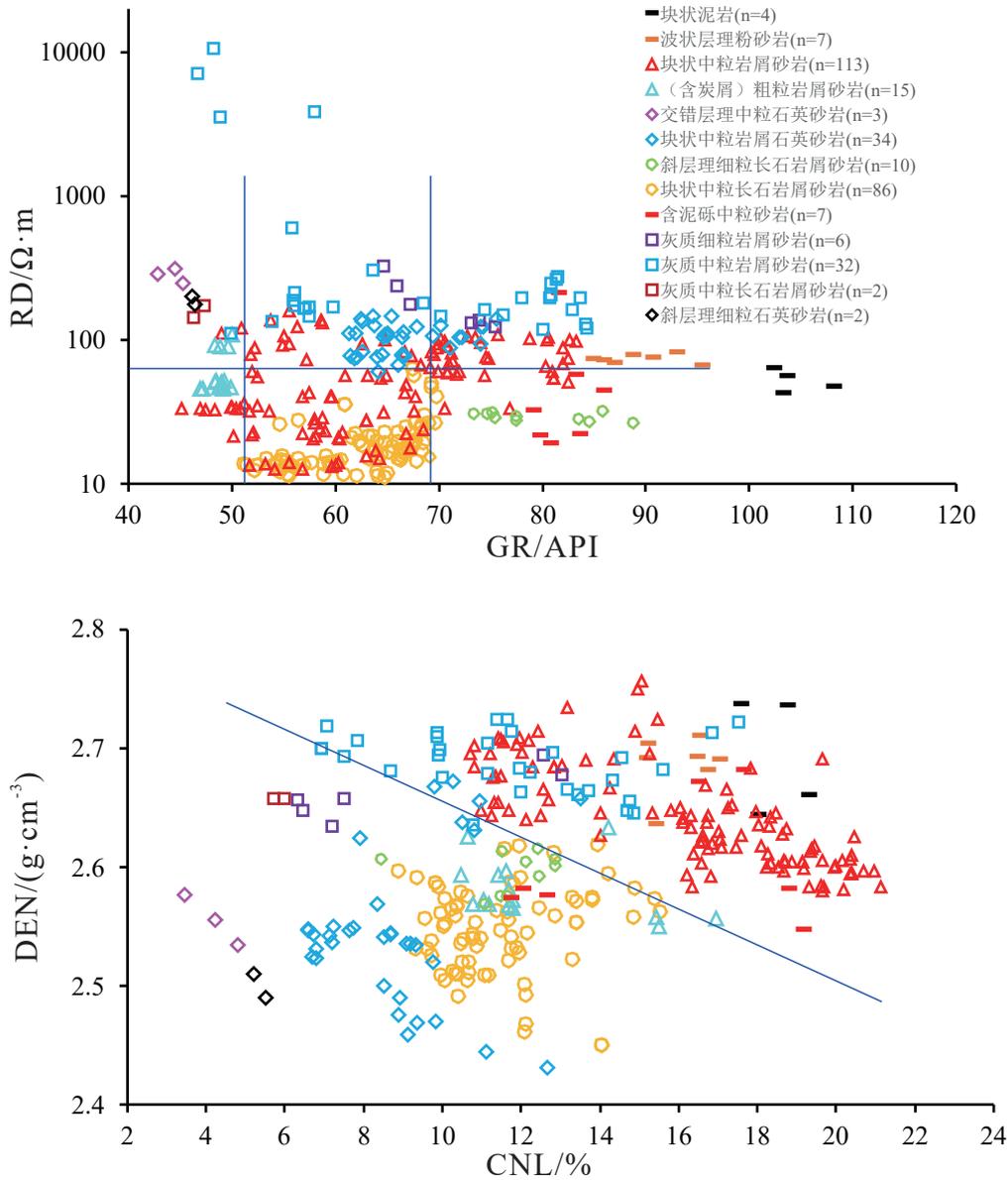


图9 川东北元坝西部须二段不同岩石相敏感测井曲线交会图

Fig. 9 Log characteristics of different lithofacies of the second member of Xujiahe Formation in western Yuanba area

表3 川东北元坝西部须二段有利岩石相测井识别标准

Table 3 Log characteristic of high-quality lithofacies of the second member of Xujiahe Formation in western Yuanba area

| 有利岩石相    | 测井解释标准 ( GR/API, RD/Ω·m, CNL/%, DEN/ ( g·cm <sup>-3</sup> ) ) |
|----------|---|
| 中粒长石岩屑砂岩 | 51 ≤ GR < 68 && RD < 56 && DEN < DEN1                         |
| 中粒石英砂岩   | GR < 45 && CNL < 4.8 && DEN > 2.52                            |

注：表中 DEN1 = -0.0187 × CNL + 2.86065

2类优质储层的累厚与测试产量具有较好正相关关系(图10)。由于中粒石英砂岩中发育微裂缝,此类储层渗透率高,故厚度相同时其产能较中粒长石岩屑砂岩高。所以基于岩石相的储层预测方法可为

须家河组致密砂岩气的井位部署和有效开发提供重要的依据。

### 4.3 优质储层展布

结合优质储层发育主控因素与沉积微相展布,

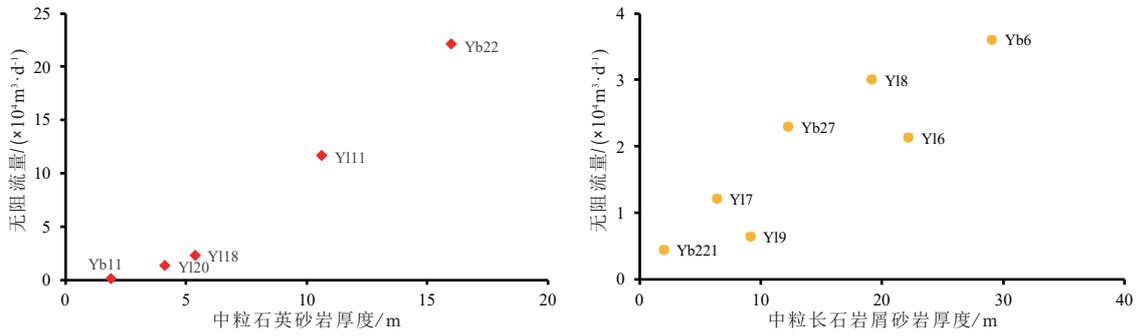


图 10 川东北元坝西部须二段测试井射孔段有利岩石相厚度与测试产量交汇图

Fig. 10 Correlation between high-quality lithofacies thickness of the perforation section and production of the second member of Xujiahe Formation in western Yuanba area

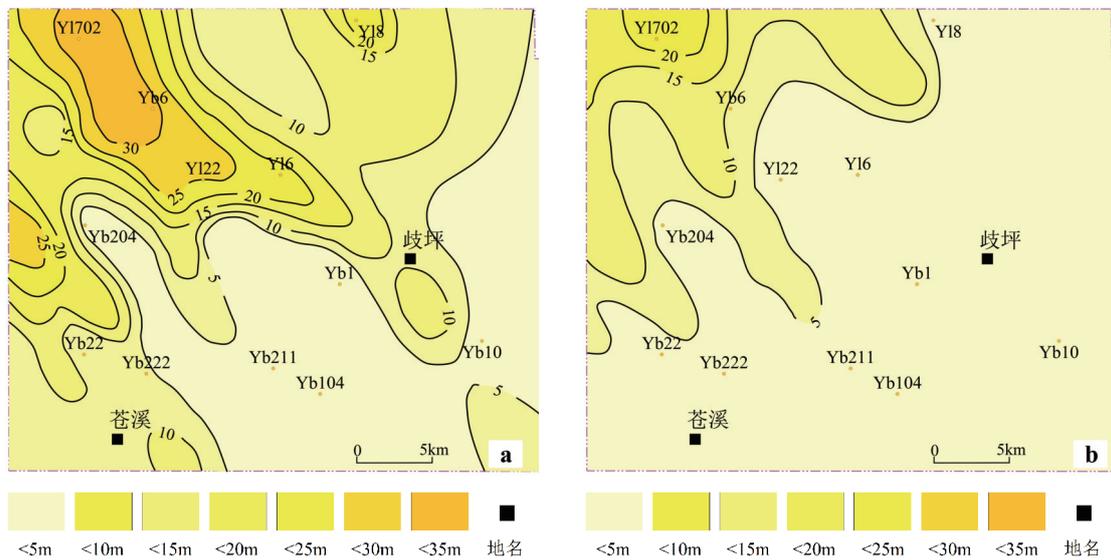


图 11 川东北元坝西部须二段重点砂组中粒长石岩屑砂岩厚度图 (a -  $Tx^{2(F2)}$ , b -  $Tx^{2(F1)}$  砂组)

Fig. 11 Thickness of medium-grained feldspar lithic sandstone in the key sand group of the second member of Xujiahe Formation in western Yuanba area

依据单井有利岩石相解释结果,编制了须二段各砂组有利岩石相厚度图。须二下亚段中粒长石岩屑砂岩呈条带状分布,从西北向东南减薄,主要受水下分流河道控制,位于水体能量最强部位。 $Tx^{2(F2)}$ 砂组分布较广泛,其中过 Y1702-Yb6-Y16 井区最发育,厚度最大(图 11a)。 $Tx^{2(F2)}$ 砂组 Yb6 井生产测试效果较好,而 Yb222 井测试效果差,与两口井所在位置优质储层厚度较一致。 $Tx^{2(F1)}$ 砂组主要分布于西北角,向东南延伸短,Y1702-Y112-Y120 井区较发育(图 11b)。 $Tx^{2(F1)}$ 砂组中粒石英砂岩呈土豆状分布,局部连片,其中 Yb22 井厚度最大,该井石英砂岩段测试产量达  $22 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (图 12),下一步可选择优质储层发育区部署井位。

### 5 结论

(1)元坝西部须二段发育辫状河三角洲和湖泊 2 类沉积相。须二下亚段沉积早期主要发育广泛分布的、多期叠置的三角洲前缘水下分流河道微相,晚期局部发育滨浅湖滩坝。须二中亚段以滨浅湖泥岩沉积为主,须二上亚段表现为短轴水下分流河道沉积。

(2)须二段岩石类型多样,其中中粒石英砂岩和中粒长石岩屑砂岩为优质储层,中粒石英砂岩发育粒间孔和微裂缝,储渗条件均较好,中粒长石岩屑砂岩发育岩屑粒内溶孔、长石粒内溶孔和粒间孔,储集条件好。

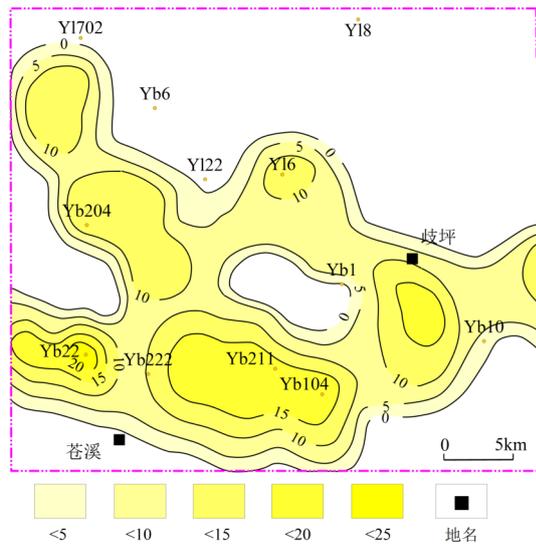


图 12 川东北元坝西部  $Tx^{2(下1)}$  砂组石英砂岩厚度图  
**Fig. 12 Thickness of quartz sandstone in the second member of Xujiache Formation in western Yuanba area**

(3) 优质储层的形成受沉积和成岩作用控制。沉积微相控制了砂体规模和岩石类型的变化, 自西北向东南, 砂体减薄, 长石岩屑砂岩含量减少。从须二下亚段至须二中亚段, 长石岩屑砂岩含量减少, 石英砂岩含量增加。石英砂岩和中、粗粒砂岩受压实作用影响较小, 长石岩屑砂岩溶蚀作用较发育, 叠加了晚期差异化的碳酸盐胶结作用和石英砂岩中微裂缝的形成等因素, 促成了上述 2 类优质储层的形成。

(4) 须二段发育 13 类岩石相, 其中交错层理中粒石英砂岩和块状中粒长石岩屑砂岩物性较好, GR 和 RD 等曲线能够较好地识别 2 类有利岩石相。中粒长石岩屑砂岩呈条带状展布, 自西北向东南减薄; 中粒石英砂岩呈土豆状分布, 主体分布于西南部。

**致谢:** 两位审稿专家对本文内容的完整性、证据的充分性和思路的条理性给予了重要启发, 编辑部老师对本文写作的规范给予了诸多帮助, 在此表示衷心感谢!

## References

Chen B, Shen J J, Hao J Y, et al, 2012. Characteristics of quartz sandstones and its reservoir significance of Xujiache Formation in Yuanba area, northwestern Sichuan Basin[J]. *ACTA SEDIMENTOLOGICA SINICA*, 30 (1) : 92 - 100 (in Chinese with

English abstract).

Cheng L X, Wang W, Yue Q L, et al, 2016. Differences of quartz sandstone reservoir characteristics for the Member 2 of Xujiache Formation in northeast Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 43 (2) : 207 - 215 (in Chinese with English abstract).

Dan Y, 2011. Analyses of the provenance and the depositional systems of Xujiache Formation in northeast of Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 39-42.

Guo X S, Hu D F, Huang R C, et al, 2020. Deep and ultra-deep natural gas exploration in the Sichuan Basin: Progress and prospect[J]. *Natural Gas Industry*, 40 (5) : 1 - 14 (in Chinese with English abstract).

Hao J Y, Du H Q, Wu C X, 2015. Quartzose-bar sandstone reservoir of Xujiache 2 Member in Yuanba area, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 38 (1) : 1 - 4 (in Chinese with English abstract).

He Z Y, Liu H T, Xiao W, 2014. Fracture characteristics and main controlling factors of Xujiache Formation reservoir in YB area, northeastern Sichuan Basin[J]. *Fault-block Oil & Gas Field*, 21 (1) : 32 - 35 (in Chinese with English abstract).

Jia S, Li H T, Xiao K H, 2014. Reservoir characteristics and main controlling factors of high quality reservoir in the lower 2th Member of Xujiache Formation in Yuanba area[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 38 (5) : 15 - 22 (in Chinese with English abstract).

Li J, Hu D F, Zou H Y, et al, 2016. Coupling relationship between reservoir diagenesis and gas accumulation in Xujiache Formation of Yuanba- Tongnanba area, Sichuan Basin, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 27 (7) : 1164 - 1178 (in Chinese with English abstract).

Long H, Deng F Y, Liao X L, et al, 2018. Reservoir characteristics and diagenesis of the Jialingjiang Formation in the Huaguoshan region, southern Sichuan Basin[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 38 (3) : 41 - 50 (in Chinese with English abstract).

Luo L, Gao X Z, Meng W B, et al, 2017. The formation mechanism of the relatively high- quality reservoir in tight sandstones with deep burial: a case study of Xujiache Formation in Xinchang structural belt of western Sichuan Depression[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38 (06) : 930 - 944 (in Chinese with English abstract).

MIALL A D, 1985. Architecture-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits[J]. *Earth-Science Reviews*, 22 (4) : 261 - 308.

MUÑOZ A, RAMOS A, SÁNCHEZ-MOYA A, et al, 1992. Evolving fluvial architecture during a marine transgression: Upper Buntsandstein Triassic, central Spain[J]. *Sedimentary Geology*, 75 (3-4) : 257 - 281.

Qiu Y N, 1990. A proposed flow- diagram for reservoir sedimentological study[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 31 (1) : 85 - 90 (in Chinese with English abstract).

Wang Z J, Wang Z C, Yu Q, et al, 2021. Reconfirmation of Neoproterozoic intra- cratonic rift in northeast Sichuan Basin and its significance of deep oil and gas[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan*

- Geology*, 41 (3) : 361 – 375 (in Chinese with English abstract).
- Wang A, Zhong D K, Liu Z Q, et al, 2021. Characteristics of deep tight sandstone reservoirs and their controlling factors of physical properties: A case study of the Xu-2 Member in the western Yuanba area of the northeastern Sichuan Basin, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2020.124.
- Wang Y F, Xu S L, Zhang B, et al, 2020. Sedimentary microfacies in the Lower Shaximiao Formation in the Xichong-Zitong region, western Sichuan depression[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40 (1) : 35 – 44 (in Chinese with English abstract).
- Xia J, Zhong Y J, Lin L B, et al, 2014. Sand- bodies filling characteristics and distribution rule of member 2 Xujiage Formation in Yuanba area northeastern Sichuan Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 14 (14) : 161 – 166 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C M, Yin T J, 1996. Structural analysis of sedimentary structures in liuli fan delta, Henan province[M]. Xi 'an: Northwestern University Press.
- Zhang C, Jiang Y Q, Wang L E, et al, 2013. Analysis of reservoir differences of Member 2 of the Xujiage Formation in northeast Sichuan Basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum University ( Science& Technology Edition)*, 35 (2) : 29 – 36 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L, Zou H Y, Hao F, et al, 2017. Characteristics and densification causes and of highly-Tight sandstone of the Xujiage Formation ( $T_3x_2$ ) in the Yuanba area, northeastern Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91 (9) : 2015 – 2118.
- Sinopec Exploration South Branch, 2011. Report of new gas controlled reservoirs in the lower sub-member of Xu2 gas Reservoir in Yuanba 2~ Yuanba 22 well area of Yuanba Gas Field [R].
- Zhu X M, 2008. Sedimentary petrology[M], Beijing: Petroleum Industry Press, 282-286.
- Zou C N, Zhu R K, Wu S T, et al, 2012. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. *ACTA PETROLEI SINICA*, 33 (2) : 173 – 187 (in Chinese with English abstract).
- 淡永, 2011. 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, 39-42.
- 郭旭升, 胡东风, 黄仁春, 等, 2020. 四川盆地深层-超深层天然气勘探进展与展望[J]. *天然气工业*, 40 (5) : 1 – 14.
- 郝靖宇, 杜红权, 吴采西, 2015. 四川盆地元坝地区须二段石英滩坝特征及其发育的控制因素[J]. *天然气勘探与开发*, 38 (1) : 1 – 4.
- 何志勇, 刘海涛, 肖伟, 2014. 川东北 YB 地区须家河组裂缝特征及主控因素[J]. *断块油气田*, 21 (1) : 32 – 35.
- 贾爽, 李宏涛, 肖开华, 2014. 元坝地区须二段下亚段储层特征及优质储层主控因素[J]. *东北石油大学学报*, 38 (5) : 15 – 22.
- 李军, 胡东风, 邹华耀, 等, 2016. 四川盆地元坝-通南巴地区须家河组致密砂岩储层成岩-成藏耦合关系[J]. *天然气地球科学*, 27 (7) : 1164 – 1178.
- 隆辉, 邓飞涌, 廖小丽, 等, 2018. 四川盆地南部花果山地区嘉陵江组储层特征与成岩作用[J]. *沉积与特提斯地质*, 38 (3) : 41 – 50.
- 罗龙, 高先志, 孟万斌, 等, 2017. 深埋藏致密砂岩中相对优质储层形成机理—以川西坳陷新场构造带须家河组为例[J]. *地球学报*, 38 (06) : 930 – 944.
- 裘亦楠, 1990. 储层沉积学研究工作流程[J]. *石油勘探与开发*, 31 (1) : 85 – 90.
- 汪正江, 汪泽成, 余谦, 等, 2021. 川东北新元古代克拉通裂陷的厘定及其深层油气意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 41 (3) : 361 – 375.
- 王爱, 钟大康, 刘忠群, 等, 2021. 深层致密砂岩储层特征及物性控制因素—以川东北元坝西地区须二下亚段为例[J]. *沉积学报*, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2020.124.
- 王一帆, 徐胜林, 张兵, 等, 2020. 川西坳陷西充-梓潼地区下沙溪庙组沉积微相特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 40 (1) : 35 – 44.
- 夏杰, 钟怡江, 林良彪, 等, 2014. 川东北元坝地区上三叠统须家河组二段砂体充填特征及展布规律[J]. *科学技术与工程*, 14 (14) : 161 – 166.
- 张昌民, 尹太举, 1996. 河南栗园扇三角洲沉积建筑结构分析[M]. 西安: 西北大学出版社.
- 张春, 蒋裕强, 王立恩, 等, 2013. 川东北地区须家河组二段储层差异性分析[J]. *西南石油大学学报 (自然科学版)*, 35 (2) : 29 – 36.
- 张莉, 邹华耀, 郝芳, 等, 2017. 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*, 91 (9) : 2105 – 2118.
- 中石化勘探南方分公司, 2011. 元坝气田元坝 2~元坝 22 井区须二下亚段气藏新增天然气控制储层报告[R].
- 朱筱敏, 2008. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 282-286.
- 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等, 2012. 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*, 33 (2) : 173 – 187.

## 附中文参考文献

- 陈波, 沈均均, 郝景宇, 等, 2012. 川东北元坝地区须家河组石英砂岩沉积与储层特征[J]. *沉积学报*, 30 (1) : 92 – 100.
- 程立雪, 王威, 岳全玲, 等, 2016. 川东北地区须二段石英砂岩储层特征差异性[J]. *成都理工大学学报 (自然科学版)*, 43 (2) : 207 – 215.