

川东北元坝地区须三段钙屑砂岩储层特征及控气因素

肖开华,李宏涛,贾爽

(中国石化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三段已获千亿方预测储量,具有良好的勘探开发潜力,但其储层特征及控气因素不明确。利用岩心、薄片、物性等分析测试资料,采用井震结合的方法,对该区须三段气藏及主要目的砂岩组的储层特征及控气因素进行了研究。研究认为,须三段以辫状河三角洲平原-三角洲前缘亚相沉积为主,钙屑砂岩具有碳酸盐岩岩屑含量高、石英含量低的特点,测井上显示低伽马、高电阻的特征。(含砾)钙屑砂岩储层总体上为特低孔-特低渗储层,储集空间类型多样,以溶蚀孔及其中的自生矿物晶间孔为主,(微)裂缝为辅;溶蚀孔隙主要分布于钙屑颗粒间,连通性好,是优质储层的最重要的储集空间。三角洲平原-前缘亚相的高能分流河道含砾钙屑砂岩、钙屑砂岩、砂砾岩有利岩相是天然气富集和高产的先决条件。沿层间发育的平缝和低角度缝及沿裂缝发育的溶蚀孔隙是天然气富集和高产的决定性因素,构造和断裂是天然气的富集和高产的重要条件。

关键词:控气因素;沉积微相;储层特征;须家河组;元坝地区;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics of calcarenaceous sandstone reservoirs and gas accumulation control factors of the 3rd Member of Xujiahe Formation in Yuanba area, Northeast Sichuan Basin

Xiao Kaihua, Li Hongtao, Jia Shuang

(Petroroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: The 3rd Member of Xujiahe Formation (T_3x^3) has great petroleum exploration potential and its predicted gas resource volume is a hundred billion cubic meters in Yuanba area, Northeast Sichuan Basin. However, the characteristics and gas accumulation control factors are not clear. Based on cores, thin sections and physical properties, the characteristics and gas accumulation control factors of T_3x^3 were studied through correlation between well and seismic data. The results indicate that the dominant sedimentary facies are braided river delta plain and delta front. The calcarenaceous sandstones are characterized by high carbonate debris content and low quartz content, and low natural gamma value and high resistance. The calcarenaceous sandstones are of low porosity and extra-low permeability. The reservoirs have a variety of pore types, which are dominated by dissolution pores and authigenic mineral intercrystal pores, followed by micro-fractures. The dissolution pores mainly occur in between calcarenaceous grains and have good connectivity. They are the main pore spaces of high-quality reservoirs. The prior factors of gas accumulation and high production are the existence of conglomeratic calcarenaceous sandstones, calcarenaceous sandstones and glutenites in distributary channels of delta plain and delta front. The horizontal and low-angle interlayer fractures and the dissolution pores along the fractures are the determinant factors for the gas accumulation. In addition, structures and faults are also important factors.

Key words: control factor of gas accumulation, sedimentary microfacies, reservoir characteristics, Xujiahe Formation, Yuanba area, Sichuan Basin

前人普遍认为四川盆地须家河组二、四、六段为三角洲沉积,以砂岩为主,是有利储层发育层段,而须一、三、五段为滨浅湖相沉积,岩性以泥岩为主,局部夹黑色炭质页岩、薄煤层,砂体及储层均欠发育,是有利烃源层和盖层发育层段^[1-10]。但近年来,勘探开发实践和研究认为:元坝地区西北部距离物源区相对较近,须三段也发育有一定规模的辫状河三

角洲相钙屑砂砾岩体。区内元陆7井、元陆12井等多口井相继在须三段(含砾)钙屑砂岩中获高产工业气流,近而发现元坝须三段气藏,展示了较好的开发前景。然而,由于该区须三段砂体较薄、相变快,结构致密、非均质性强,裂缝发育复杂,因此,认识该气藏钙屑砂岩储层特征,明确天然气富集主控因素,是该区须三段气藏有效开发的关键。

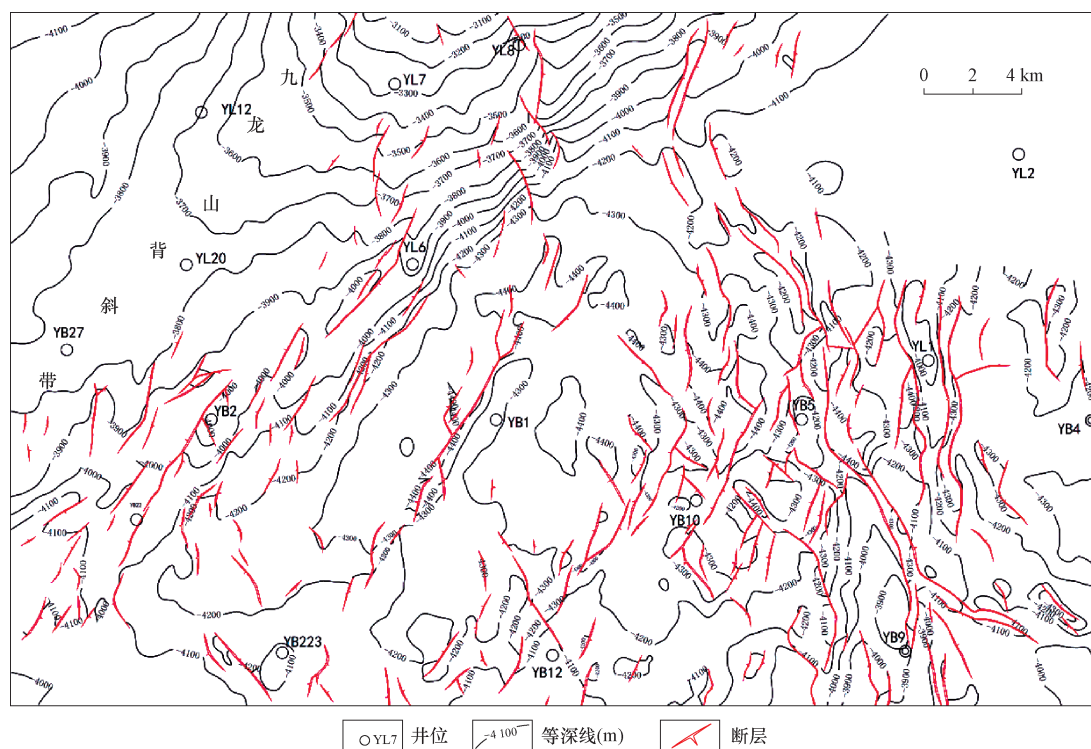


图1 元坝地区须三段顶面构造

Fig. 1 Top structural map of the 3rd Member of Xujiahe Formation in Yuanba area

1 研究区概况

元坝地区位于龙门山北段前缘,为龙门山、米苍山和大巴山所限的低缓构造区,总体显示为一大型低缓负向构造,西北部是构造最高部位,为九龙山背斜构造带向西南延伸的构造倾末端;南部为川中隆起向北倾斜伸入气藏区的宽缓斜坡;东北部是凹陷(或大型复向斜)西端,是气藏区最低部位,除了西北部为九龙山背斜倾没端,表现为近北东向外,其余地区低幅度构造(或称局部高点)走向主要是北西向,在元坝区西北部地层产状较陡,其余地区较平缓,相对而言,构造断裂在中东部更加发育(图1)。

随着中三叠世末期闭塞海结束,海水逐渐退出上扬子地台,从此四川盆地大规模海侵基本结束,取而代之是大型内陆湖盆开始出现,由雷口坡组海相沉积转为须家河组早期海陆交互相到后期内陆湖相沉积。晚三叠世须三段沉积时期,四川盆地主要以三角洲平原-三角洲前缘-滨浅湖相沉积环境为主,发育了一套厚度较稳定的砂泥互层。

为准确研究元坝地区须三段钙屑砂岩储层沉积和展布特征,根据测井曲线的组合特征,采用旋回对比的方法,精确确定砂层组的界限,进一步通过井震结合,建立地层对比标准井,在地震剖面上逐步外推,建立层序地层格架。对元坝地区元坝6井、元陆7井等60多口井的须三段及其砂组进行了划分对比,并将对比结

果在地震上进行了标定,与地震剖面吻合性很好。总体上,须三段以辫状河三角洲平原-三角洲前缘亚相沉积为主,主要位于三级层序湖进体系域中,至上而下划分为 $T_3x^{3(1)}$ 、 $T_3x^{3(2)}$ 、 $T_3x^{3(3)}$ 、 $T_3x^{3(4)}$ 和 $T_3x^{3(5)}$ 5个砂层组。地层对比结果表明,沿物源方向地层厚度变化较大,厚度介于100~300 m,接近物源方向的西北部各砂组厚度较厚,远离物源方向的中东部较薄,垂直物源方向,地层相对稳定^[11-13]。

2 钙屑砂岩储层特征

2.1 岩石学特征

通过岩心观察及薄片镜下鉴定发现,元坝地区西北部须三段岩石类型多,可以分为砾岩、砂砾岩、含砾钙屑砂岩、钙屑砂岩和常规岩屑砂岩等,其中,中-粗粒钙屑砂岩、含砾钙屑砂岩的储集物性明显要好于其他岩性,显示岩性对储层发育的重要控制作用。钙屑砂岩是指砂岩中的岩屑成份主要为碳酸盐岩岩屑(此碳酸盐岩岩屑为盆外陆源沉积物),其含量大于50%^[14-15],由于碳酸盐类矿物含量高,所经历的成岩后生变化和孔隙演化与铝硅酸盐类矿物含量高的砂岩不同,故有其特殊性。元坝地区西北部须三段钙屑砂岩的碎屑成分中岩屑成分以碳酸盐岩岩屑为主,含量为70.0%~91.0%,平均为75.8%,石英含量较低,为10.0%~27.0%,平均为22.6%,长石含量为0.5%~2.0%,平均为1.6%;即总体上具有碳酸盐岩岩屑含量

高、石英含量低的特点。测试获得高产的元陆 7 井、元陆 12 井 $T_3x^{3(3)}$ 砂组等河道砂体的碳酸盐岩岩屑含量普遍很高 ($>75\%$), 其相应的石英含量都很低, 大部分不到 10% 。而测试获低产及未获工业气流的非高能河道砂体, 其碳酸盐岩岩屑含量普遍较低, 均低于 50% ; 酸压测试获低产的元陆 10 井 $T_3x^{3(5)}$ 砂组则为一套常规岩屑细砂岩, 其碳酸盐岩岩屑的含量仅有 30% 。

2.2 岩性及电性特征

针对须三段岩性复杂的特点, 根据岩石成分和粒度, 将须三段岩性划分为砾岩、砂砾岩、含砾钙屑砂岩、钙屑砂岩和常规岩屑砂岩及泥质岩 6 类, 应用岩心 - 测井刻度法, 建立了岩性识别模型和识别标准 (表 1)。

根据上述标准, 对元坝地区所有 60 多口井须三段的岩性进行了识别, 富钙屑高能河道砂砾岩体 (砾岩、砂砾岩、含砾钙屑砂岩、钙屑砂岩) 主要分布于元坝地区的西北部须三段 $T_3x^{3(1)}$, $T_3x^{3(2)}$ 和 $T_3x^{3(3)}$ 砂组中, 沿河道方向自西北向东南方向岩石粒度逐渐变小, 砾石成分主要为灰岩砾石。中、高产气井也主要分布西北部 $T_3x^{3(1)}$, $T_3x^{3(2)}$ 和 $T_3x^{3(3)}$ 砂组的三角洲平原 - 前缘亚相过渡带的高能河道中, 产气层段的岩性主要为含砾钙屑砂岩和中 - 粗粒钙屑砂岩, 其电性特征为: 自然伽马低值 (一般 <50 API), 曲线呈光滑或微齿化箱型; 电阻率曲线相对围岩呈高值 ($300 \sim 1\,000\ \Omega \cdot m$), 非高能河道自然伽马值相对较高, 电阻率相对较低。如元陆 7 井、元陆 12 井在 $T_3x^{3(3)}$ 砂组测试均获得高产, 其测试段单层砂体厚度均为 10 m 左右, 自然伽马曲线均呈光滑箱型或微齿化箱型, 反映砂体内部结构均匀; 岩性单一, 砂体顶、底均与泥岩呈突变接触, 反映物源充足、强而稳定的水动力特征, 为辫状河三角洲前缘亚相高能河道微相。而元陆 8 井 $T_3x^{3(2)}$ 砂组测试获低产工业气流, 其测试层段自然伽马曲线为钟形 - 漏斗形, 反映为分流河道过渡到河口坝沉积微相。

表 1 元坝地区须三段岩性识别标准

Table 1 Lithological interpretation standard of the 3rd Member of Xujiahe Formation in Yuanba area

岩性	GR/API	RT/($\Omega \cdot m$)	AC/($\mu s \cdot ft^{-1}$)	典型井
砾岩	<40	$>10\,000$	<45	元陆 702 井、元陆 11 井
砂砾岩	<40	$3\,000 \sim 10\,000$	$45 \sim 55$	元陆 6 井
含砾钙屑砂岩	<40	$1\,000 \sim 3\,000$	$45 \sim 55$	元坝 6 井
钙屑砂岩	<55	$300 \sim 1\,000$	$55 \sim 60$	元坝 6 井
常规岩屑砂岩	>55	<300	$58 \sim 63$	元坝 6 井
泥岩	>65	<60	>60	

2.3 物性特征

由于须三段钙屑砂岩储层与含煤的烃源岩交互发育, 有利于在相对刚性的砂岩地层中形成裂缝, 也有利于烃源岩的排烃与运移; 烃源岩充注时有机酸的大量生成, 加之高能河道砂体沉积厚度大、碳酸盐岩岩屑含量高, 更有利于溶蚀作用的发生, 发育粒间溶孔。

元坝地区元坝 6 井、元坝 271 井等 8 口井须三段 128 块岩心实测孔隙度分布范围介于 $0.37\% \sim 4.51\%$, 平均值为 1.94% , 渗透率介于 $0.000\,5 \times 10^{-3} \sim 533.59 \times 10^{-3}\ \mu m^2$, 平均值为 $5.65 \times 10^{-3}\ \mu m^2$, 部分样品的渗透率值受到测试样品裂缝发育的影响而呈现高值, 从渗透率的分布图上看, 多数样品的渗透率低于 $0.1 \times 10^{-3}\ \mu m^2$, 表明本区总体上为特低孔 - 特低渗储层。利用岩心物性实测结果对测井解释孔隙度进行标定, 从而对全井段储层进行精细解释, 解释结果显示, 测井解释 60 口井 591 个储层段加权平均孔隙度为 2.74% , 加权平均渗透率为 $0.37 \times 10^{-3}\ \mu m^2$ (图 2)。

不同岩性储层孔隙度、渗透率的统计结果表明, 岩心实测 (含砾) 钙屑砂岩与砂砾岩孔隙度相对较高, 分别达到 2.24% 和 1.97% , 与测井解释孔隙度均显示结果基本一致, (含砾) 钙屑砂岩与砂砾岩孔隙度相对较高 (图 3)。实测样品及测井解释的孔隙度 - 渗透率相关分析显示 (图 4), 孔渗相关性较好, 表明基质的储集空间以孔隙型为主。

2.4 孔隙结构特征

详细的岩石学观察表明, 元坝地区须三段钙屑砂岩储集空间类型多样, 但以溶蚀孔及其中的自生矿物晶间孔为主 (图 5), (微) 裂缝为辅, 见少量的孤立溶洞。溶蚀孔隙主要分布于钙屑颗粒粒间, 孔径多数介于 $0.03 \sim 1.0\text{ mm}$, 连通性好, 为本区优质储层的最重要的储集空间。此外, 部分粒间溶孔可被自生高岭石充填, 从而形成自生高岭石晶间孔, 亦为本区重要的储集空间类型。部分钙屑颗粒原岩为细晶白云岩, 晶粒白云石粒间亦可构成白云石晶间微孔隙。另外, 在岩心及薄片观察时, 部分岩心可见微裂缝发育, 可起到沟通孔隙的重要作用, 少量岩心也可见孤立的溶洞出现, 溶洞直径通常小于 1 mm , 孤立、零星分布。

利用压汞资料分析表明, 须三段储集岩样品排驱压力较低, 通常小于 10 MPa , 分选较好, 最大进汞饱和度主要介于 $40\% \sim 70\%$, 毛管压力曲线显示出细歪度, 呈向右略凸的缓坡状, 反映孔喉连通程度、储集性能较差, 孔隙结构类型为微孔 - 微喉型。

综合以上分析结果来看, 须三段储层样品的孔隙度多介于 $1\% \sim 3\%$, 孔隙以小孔 - 微孔为主, 孔喉以细微喉为主, 连通程度较差^[16]。

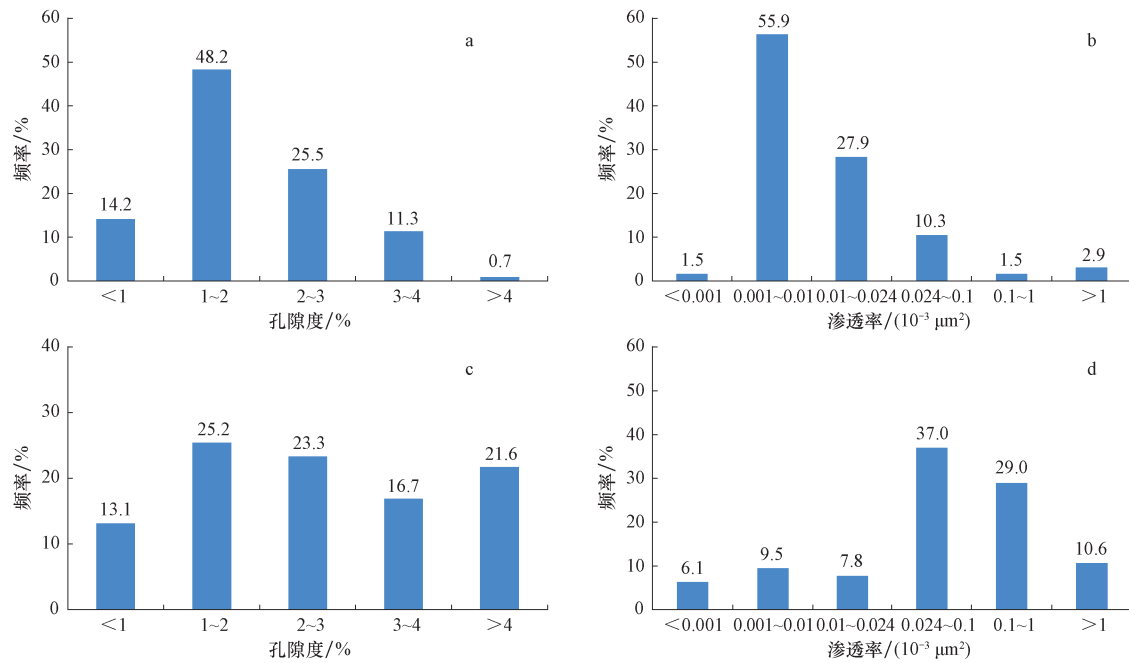


图 2 元坝地区须三段岩心实测和测井解释孔隙度、渗透率直方图
Fig. 2 Histogram of porosity and permeability from core sample measurement and log interpretation
of the 3rd Member of Xujiahe Formation in Yuanba area
a, b. 岩心实测孔隙度、渗透率; c, d. 测井解释孔隙度、渗透率

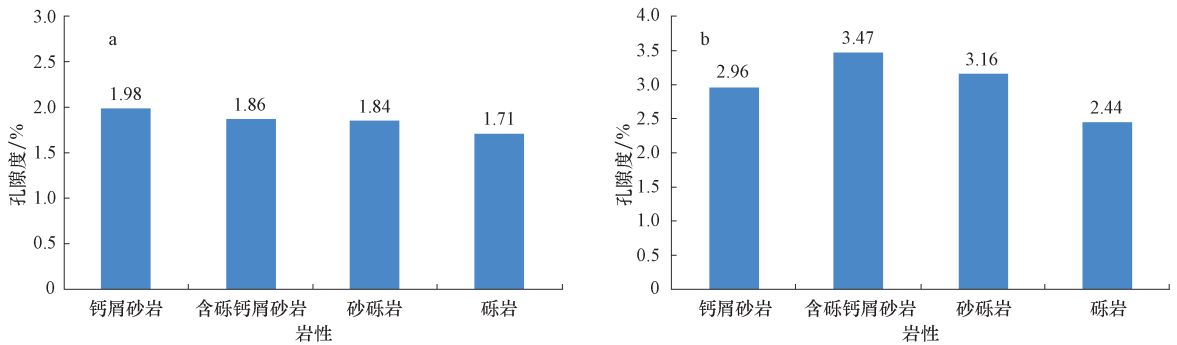


图 3 元坝地区须三段岩性实测岩心(a)和测井解释(b)孔隙度平均值分布
Fig. 3 Average porosity distribution from core sample measurement(a) and log
interpretation(b) of the 3rd Member of Xujiahe Formation in Yuanba area

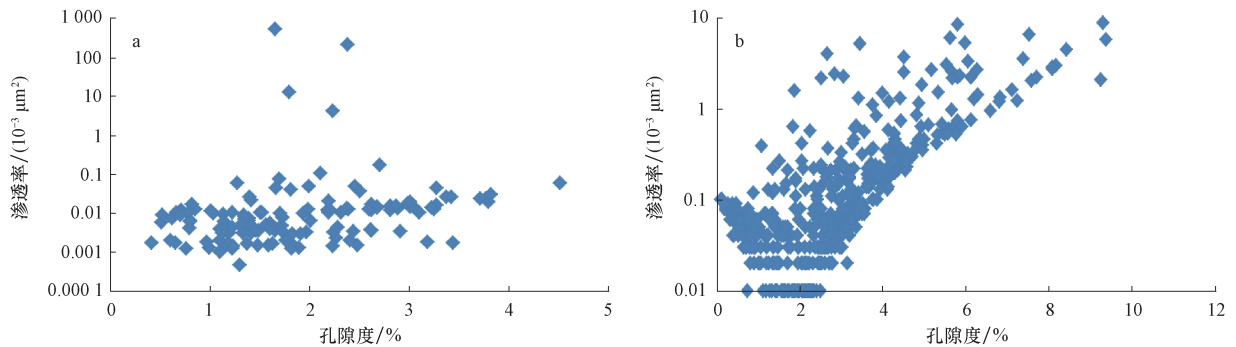


图 4 元坝地区须三段实测样品(a)与测井解释(b)孔隙度 - 渗透率相关图
Fig. 4 Correlation of the measured porosity and permeability of core samples(a) with
those from log interpretation(b) of the 3rd Member of Xujiahe Formation in Yuanba area

2.5 钙屑砂岩储层分布特征

通过典型井的合成记录标定,元坝须三段储层砂

体的地震响应特征是中 - 高波阻抗、强波峰、强波谷反射。根据储层砂岩为高阻抗、泥岩为低阻抗的特征,确定岩性的波阻抗门槛值为 $12\,500\text{ kg/km}^3 \cdot \text{m/s}$,进一

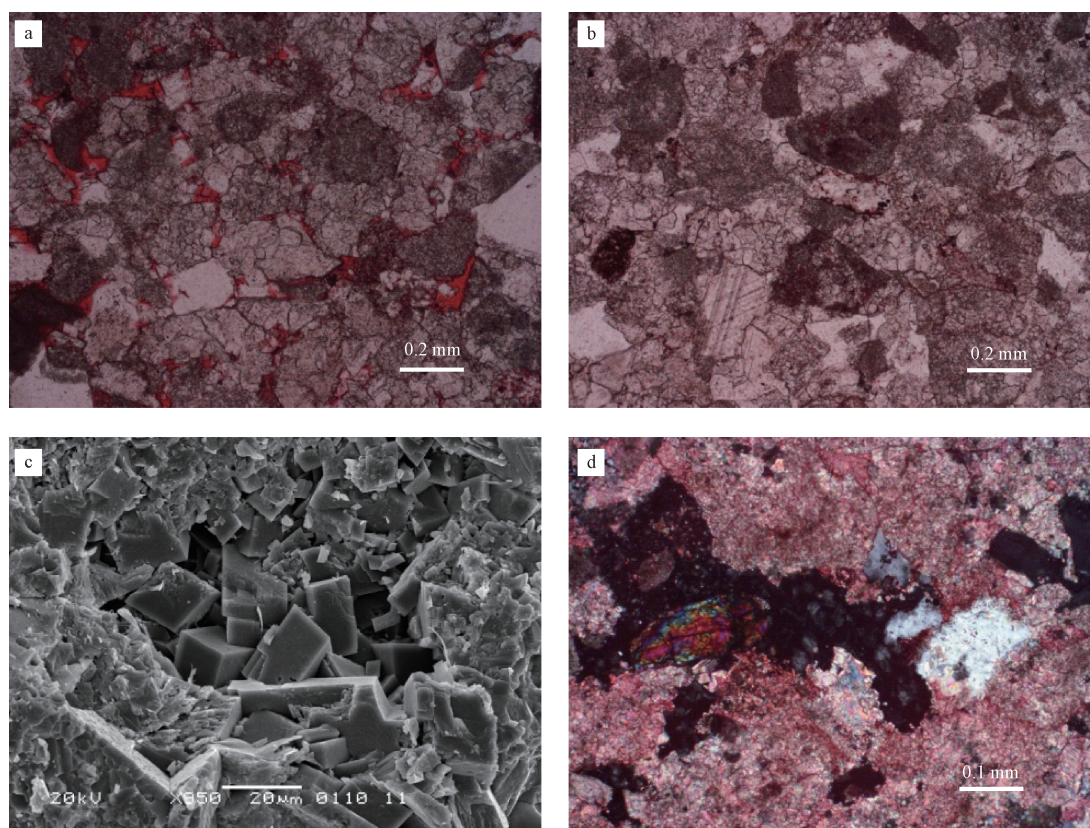


图5 元坝地区须三段储层储集空间类型

Fig. 5 Reservoir space types of the 3rd Member of Xujiahe Formation in Yuanba area

- a. 粒间溶孔发育,元坝2井,4 380 m,10 × 10(-),红色铸体;b. 微孔呈侵染状分布,元2井,4 372 m,10 × 10(-),红色铸体;
c. 碎屑颗粒中,晶间孔隙发育,元陆20井,4 139.92 m,扫描电镜;d. 溶孔中的高岭石,元陆7井,3 462 ~ 3 463 m,20 × 10(+),普通薄片

步将波阻抗数据体转化为代表砂泥岩的数据体,在各目的层时窗范围内,把数据体累加起来再乘以采样率得到砂岩的时间厚度,乘以目的层段的平均速度,得到深度域的砂体厚度,在沉积相带约束下,用钻井统计的砂体厚度对预测砂体厚度图进行校正,得到砂体厚度图,而有效储层则为高阻抗中相对低阻抗特征。以 $T_3x^{3(3)}$ 砂组第2小层为例,在研究区北部和西部主要发育3条主河道,此外还有一些零星分布的规模较小的河道。钙屑砂岩主要沿主河道分布,平面上变化厚度较大,河道中心厚度较厚,三角洲平原-三角洲前缘过渡带的中上游钙屑砂岩较下游相对发育(图6)。

3 控气因素

须家河组沉积时期,四川盆地构造活动以垂直升降为主,频繁的湖侵与湖退交替式沉积形成了元坝地区西北部须三段内部大面积烃源岩与大面积砂岩的互层,具备了“源储共生,大面积紧密接触,近源高效聚集”的先天优越条件。而频繁升降所形成的多个沉积界面,与后期的构造活动形成的微断裂、裂缝共同构成运聚网络,为天然气大面积成藏提供了良好的运移通道,

故其成藏条件十分优越^[17-18]。元坝地区60多口井的钻探表明,区内须三段气藏虽具有“大面积分布、整体含气”的岩性气藏特征,但单井产能却存在巨大差异,究其主要原因是沉积相带、岩性、裂缝和溶蚀孔隙发育程度等因素差异所致。

3.1 沉积相带和有利岩相是天然气富集和高产的先决条件

测试和试采表明,元坝地区须三段高产气井主要分布在 $T_3x^{3(3)}$ 砂组的元陆7井主河道和元陆12井主河道、 $T_3x^{3(1)}$ 砂组的元陆10井-元陆20井主河道和 $T_3x^{3(2)}$ 砂组的元坝221井河道中。其中, $T_3x^{3(3)}$ 砂组的元陆12井主河道以砂质砾岩、含砾钙屑砂岩和中粗粒钙屑砂岩为主,主河道面积大;元陆7井主河道主要发育中粗粒钙屑砂岩; $T_3x^{3(1)}$ 砂组的元陆10井主河道以砂砾岩和中粗粒钙屑砂岩为主; $T_3x^{3(2)}$ 砂组的元坝221井主河道岩性较粗,以砾岩和砂砾岩为主。因此,元坝地区须三段砂体含气性受控于沉积相带和有利岩相的展布,三角洲平原-前缘亚相的高能分流河道是最有利的沉积相带,含砾钙屑砂岩、钙屑砂岩、砂砾岩是有利的储集岩相。

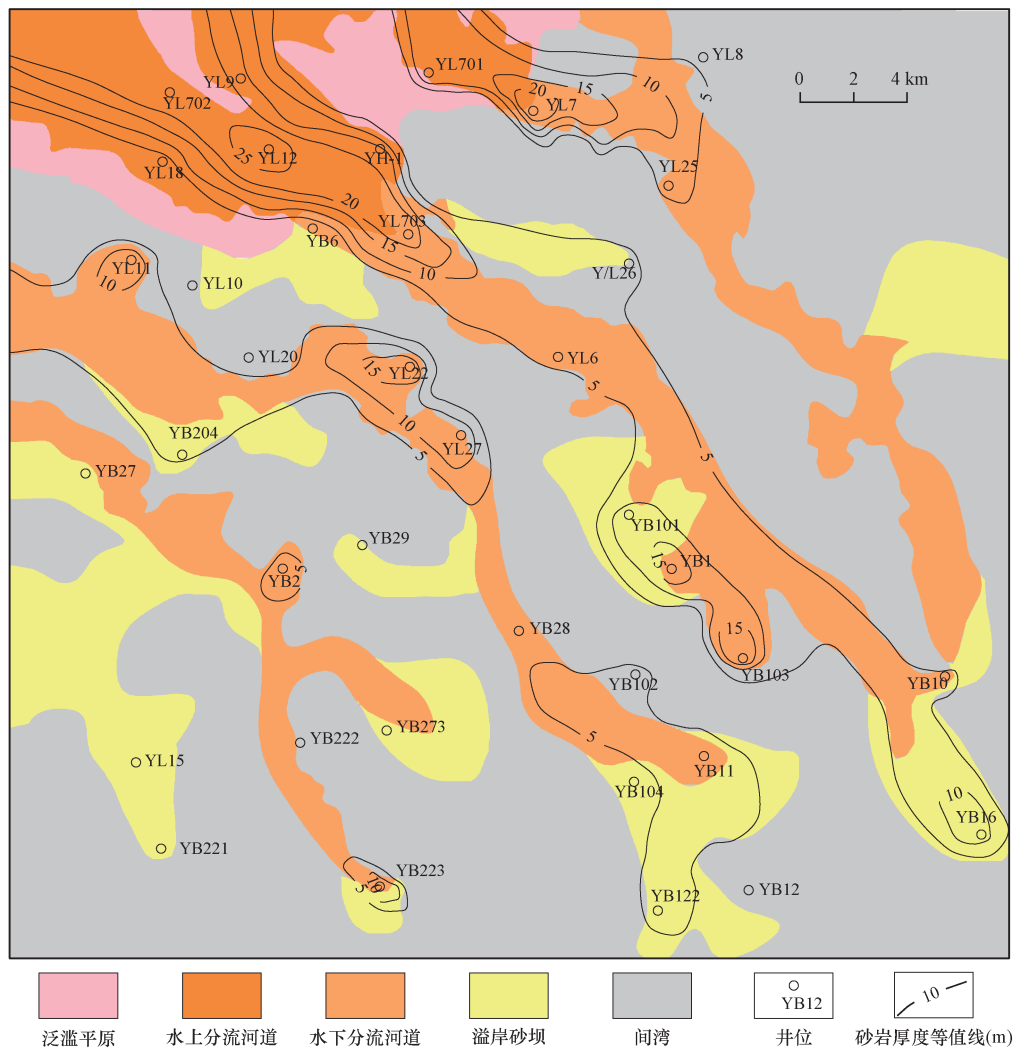


图6 元坝地区须三段3砂组第2小层钙屑砂岩厚度图

Fig. 6 Isopach map of calcarenaceous sandstone in the second layer of the 3rd Member of Xujiache Formation in Yuanba area

3.2 裂缝和沿裂缝发育的溶蚀孔隙是天然气富集和高产的决定性因素

根据裂缝产状,将元坝地区须三段裂缝分为垂直缝($>85^\circ$)、高角度缝($45^\circ \sim 85^\circ$)、低角度缝($5^\circ \sim 45^\circ$)、平缝($<5^\circ$)4类,对须三段14口井29回次192.14 m岩心668条裂缝进行了统计分析,结果表明须三段以平缝和低角度缝为主。测井解释也表明平缝和低角度裂缝是须三段主要裂缝类型。低角度缝的成因主要是受区域构造运动的影响,在区域应力场的作用下,在褶皱形成过程中沿岩石沉积界面的层间滑动所造成,故其分布较广,延伸较远,但缝宽较小。岩心观察和测井解释表明元坝地区须三段砂体中沿层间发育的平缝和低角度缝开启程度往往较高,平缝和低角度缝在声波曲线上表现为较明显的跳尖,且沿这种平缝和低角度缝常发育溶蚀孔隙,测试结果表明平缝和低角度缝及沿裂缝发育的溶蚀孔隙发育段往往测试产量较高,如元陆12井、元陆7井 $T_3x^{3(3)}$ 砂组测试产量分别达到 $86.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $120.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

3.3 构造和断裂是天然气富集和高产的重要条件

钻探结果表明,元坝地区须三段相同物源、同一主河道的储层,厚度和物性一般相近,位于构造高部位的砂体含气性往往较好,由构造高部位向构造低部位过渡,砂体的含气性变差。除此之外断裂发育对天然气的富集也具有较明显的控制作用,主要是由于断裂所形成的垂直缝和高角度伴生缝对在断裂带及地层形变带(微构造、微断裂、褶皱、挠曲带)中的低角度缝和平缝及孔隙起到了很好的沟通作用,从而形成了天然气聚集的网络体系。如 $T_3x^{3(3)}$ 砂组顶裂缝评价表明裂缝主要发育在元坝地区西北部九龙山褶皱带的东南翼部,这个裂缝发育带与构造高部位叠合部位是 $T_3x^{3(3)}$ 砂组的有利区^[19]。

4 结论

1) 元坝地区须三段富钙屑河道砂体具有低伽马、高电阻,碳酸盐岩岩屑含量高、石英含量低的特点。

(含砾)钙屑砂岩储层总体上为特低孔-特低渗储层,储集空间类型多样,以溶蚀孔及其中的自生矿物晶间孔为主,(微)裂缝为辅;溶蚀孔隙主要分布于钙屑颗粒间,连通性好,是优质储层的最重要的储集空间。

2) 元坝地区须三段砂体含气性受控于沉积相带和有利岩相的展布,三角洲平原-前缘过渡带的高能分流河道是最有利的沉积相带,含砾钙屑砂岩、钙屑砂岩、砂砾岩是最有利的储集岩相。沿层间发育的平缝和低角度缝及沿裂缝发育的溶蚀孔隙是天然气富集和高产的决定性因素。构造和断裂是天然气的富集和高产的重要条件。

参 考 文 献

- [1] 郑荣才,戴朝成,朱如凯,等.四川类前陆盆地须家河组层序-岩相古地理特征[J].地质论评,2009,55(4):484-495.
Zheng Rongcai, Dai Zhaocheng, Zhu Rukai, et al. Sequence based lithofacies and paleogeographic characteristics of Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Geology Review, 2009, 55(4):484-495.
- [2] 朱如凯,赵霞,刘柳红,等.四川盆地须家河组沉积体系与有利储集层分布[J].石油勘探与开发,2009,36(1):46-55.
Zhu Rukai, Zhao Xia, Liu Lihong, et al. Depositional system and favorable reservoir distribution of Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1):46-55.
- [3] 徐兆辉,汪泽成,胡素云,等.四川盆地上三叠统须家河组沉积时期古气候[J].古地理学报,2010,12(4):415-424.
Xu Zhaohui, Wang Zecheng, Hu Suyun, et al. Paleoclimate during depositional period of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(4):415-424.
- [4] 曹烈,王信,黎青.川中资阳地区须家河组含油气系统及勘探前景分析[J].天然气勘探与开发,2012,35(4):1-5.
Cao Lie, Wang Xin, Li Qing. Petroleum system and exploration prospect of Xujiahe Formation in Ziyang area, central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2012, 35(4):1-5.
- [5] 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,2011,38(4):46-51.
Li Kuo, Zeng Tao, Pan Lei. Reservoir characteristics of Xujiahe Formation in northeastern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 38(4):46-51.
- [6] 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.
- [7] 罗文军,彭军,曾小英,等.川西丰谷地区须四段钙屑砂岩优质储层形成机理[J].石油实验地质,2012,34(4):412-416,421.
Luo Wenjun, Peng Jun, Zeng Xiaoying, et al. Formation mechanism of high-quality reservoir of calcarenaceous sandstone in fourth member of Xujiahe Formation, Fenggu area, Western Sichuan Depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(4):412-416,421.
- [8] 盘昌林,刘树根,马永生,等.川东北地区须家河组天然气成藏主控因素分析[J].断块油气田,2011,18(4):418-423.
Pan Changlin, Liu Shugen, Ma Yongsheng, et al. Analysis on main controlling factors of gas accumulation in Xujiahe Formation of northeast Sichuan Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(4):418-423.
- [9] 周彦,黎平,谭秀成,等.川东北须家河组砂岩储层成岩特征研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2011,33(6):20-24.
Zhou Yan, Li Ping, Tan Xiucheng, et al. Diagenetic characteristic of the sandstone reservoirs of Xujiahe Formation in northeastern Sichuan[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2011, 33(6):20-24.
- [10] 钱治家,钟克修.川东北地区须家河组沉积相与储层特征[J].天然气工业,2009,29(6):9-13.
Qian Zhijia, Zhong Kexiu. Sedimentary facies and reservoir features of the Xujiahe Formation in northeastern Sichuan basin[J]. Nature Gas Industry, 2009, 29(6):9-13.
- [11] 马如辉.YB地区须家河组须三段钙屑砂岩气藏成藏主控因素-以X7井为例[J].天然气工业,2012,32(8):56-62.
Ma Ruhui. Gas accumulation control factors of the calcarenaceous sandstone of Xujiahe Formation in YB area-take Well X7 as an example[J]. Nature Gas Industry, 2012, 32(8):56-62.
- [12] 沈敏,秦华.元坝须家河组须三段沉积厚度的控制因素[J].天然气技术与经济,2012,5(4):3-6.
Shen Min, Qin Hua. The control factors of sedimentary thickness of Xujiahe Formation in Yuanba area[J]. Natural Gas Technology, 2012, 5(4):3-6.
- [13] 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.
- [14] 曾小英,张小青,钟玉梅,等.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,2007,55(6):896-901.
Zeng Xiaoying, Zhang Xiaoqing, Zhong Yumei, et al. 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, 55(6):896-901.
- [15] Riler T R, Crame J A, Thomson M R A, et al. Late Jurassic macrofossil assemblage from Jason Peninsula, Graham Land: evidence for a significant northward extension of the Latady Formation[J]. Antarctic Science, 1997, 9(4):434-442.
- [16] 祝海华,钟大康,张亚雄,等.川南地区三叠系须家河组致密砂岩孔隙类型及物性控制因素[J].石油与天然气地质,2014,35(1):65-76.
Zhu Haihua, Zhong Dakang, Zhang Yaxiong, et al. Pore types and controlling factors on porosity and permeability of Upper Triassic Xujiahe tight sandstone reservoir in Southern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1):65-76.
- [17] 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 high-energy channel sandstone and its exploration significance: a case from Xujiahe Formation in Yuanba area[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(6):657-661.
- [18] 陈涛涛,贾爱林,何东博,等.川中地区须家河组致密砂岩气藏气水分布形成机理[J].石油与天然气地质,2014,35(2):218-223.
Chen Taotao, Jia Ailin, He Dongbo, et al. Mechanisms of gas-water distribution in tight sandstone gas reservoirs of Xujiahe Formation, central Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2):218-223.
- [19] 白斌,邹才能,朱如凯,等.四川盆地九龙山构造须二段致密砂岩储层裂缝特征、形成时期与主控因素[J].石油与天然气地质,2012,33(4):526-535.
Bai Bin, Zou Caineng, Zhu Rukai, et al. Characteristics, timing and controlling factors of structural fractures in tight sandstones of the 2nd member of Xujiahe Formation in Jiulong Mountain structure, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4):526-535.

(编辑 张亚雄)