

文章编号:0253-9985(2013)01-0077-08

川西坳陷合兴场-丰谷地区须家河组 致密砂岩气藏精细勘探

林小兵^{1,2}, 刘莉萍³, 田景春^{1,2}, 付菊³, 伍玲³, 杨映涛³

(1. 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 610059; 2. 成都理工大学 沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 3. 中国石化 西南油气分公司 勘探开发研究院, 四川 成都 610081)

摘要: 为了提高致密砂岩气藏的勘探成功率, 以川西坳陷合兴场-丰谷地区须家河组致密砂岩气藏为例, 建立了以地质综合研究为指导, 地震、地质紧密结合的精细勘探技术。合兴场-丰谷地区须家河组致密砂岩气藏精细勘探的核心, 是在砂组精细等时划分及对比的基础上, 以砂组为单位, 将生产动态资料与静态地质特征相结合进行典型气藏解剖, 明确气藏特征及成藏主控因素; 通过加强地震预测、钻井跟踪、测试选层及工程工艺过程中的地质综合研究, 完成油气富集区预测及井位部署, 且在钻井跟踪过程中即时修正认识, 提高钻探成功率。精细勘探的结果显示, 研究区气藏具水溶脱气特征, 为古构造-成岩圈闭气藏, 控制成藏的关键因素是古构造高部位, 其中须二段的 CH148-CH137-GM3 井区和 GM2-CG561 井区及须四段的 GM2-CG561-GM4 井区和 CF563-CF175 井区被预测为有利油气富集区。

关键词: 精细勘探; 须家河组; 致密砂岩气藏; 合兴场-丰谷地区; 川西坳陷

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Fine exploration of tight sandstone gas reservoirs in the Xujiahe Formation, Hexingchang-Fenggu area, the western Sichuan Basin

Lin Xiaobing^{1,2}, Liu Liping³, Tian Jingchun^{1,2}, Fu Ju³, Wu Ling³ and Yang Yingtao³

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Exploration and Development Institute, SINOPEC Southwest Petroleum Branch Company, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: A set of fine exploration technologies had been developed and applied to improve exploration success rate in the tight sandstone gas reservoirs in the Upper Triassic Xujiahe Formation in Hexingchang-Fenggu area, western Sichuan Basin. Guided by geological understandings and based on seismic data, the technologies are employed to study the tight sand gas reservoirs through fine division and correlation of sand groups as well as integration of dynamic performance with static geological features. The gas reservoir characteristics were described and the main controlling factors were identified. Sweet spot prediction and well emplacement were carried out through strengthening seismic prediction, drilling tracing, testing layer selection as well as comprehensive geological study during stimulation. The success rate of exploratory drilling has been greatly improved through real-time modification of drilling program during drilling operation. Fine exploration of the Hexingchang-Fenggu area reveals that the gas reservoir has the characteristics of water-soluble gas. It can be classified as paleo-structural-lithological trap, with paleo-structural high controlling gas accumulations. Four play fairways were identified: the wellblocks of CH148-CH137-GM3 and GM2-CG561 with the second member of Xujiahe Fm as the target, and the wellblocks of GM2-CG561-GM4 and CF563-CF175 with the fourth member of the Formation as the target.

收稿日期: 2012-06-15; 修订日期: 2012-12-31。

第一作者简介: 林小兵 (1980—), 男, 博士、讲师, 沉积学与储层地质学。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41002032)。

Key words: fine exploration, Xujiahe Formation, tight sand Stone gas reservoir, Hexingchang-Fenggu area, western Sichuan Basin

四川盆地川西地区致密砂岩气藏天然气资源量较为丰富,在上三叠统和侏罗系多个层系均见工业气流,表现出巨大的勘探潜力。针对该地区致密砂岩气藏的研究工作始于20世纪70年代,有学者认为在长期地史发展进程中,川西地区须家河组岩石的压实作用、选择性压溶作用,是导致砂岩粒间孔隙减少且分布不均的重要原因^[1]。另一方面,方解石的强烈胶结作用以及石英的次生加大作用是造成须家河组砂岩储层致密的关键因素^[2]。尽管如此,川西地区须家河组二段、四段在致密背景下仍然发育相对优质的储层,这主要与长石、火山碎屑、碳酸盐岩屑等溶解形成的次生孔隙有关^[3-6]。但作为重要的非常规油气资源,随着石油地质理论不断创新、地震勘探开发技术的广泛应用以及勘探开发一体化进程的加大,地震、地质、工程多学科联合攻关是致密砂岩气藏勘探开发的发展趋势^[7-10]。

实钻结果揭示了合兴场-丰谷地区须二、须四段气藏均存在气水关系复杂的问题,特别是物性好的储层反而出水严重,物性稍差层段却获工业气流,气藏特征、成藏主控因素等需进一步深化认识。本文以合兴场-丰谷地区须家河组致密砂岩气藏为例,以地质综合研究为指导,通过地震、地质紧密结合的精细勘探技术,为整个川西坳陷乃至其它地区致密砂岩气藏的勘探提供重要支撑。

1 砂体精细对比

合兴场-丰谷构造带位于孝泉-丰谷北东东向古今复合大型隆起带^[11]东段(图1),包括合兴场、高庙子和丰谷构造。上三叠统须家河组(T_3x)埋深3 500~5 150 m,储层具低-特低孔渗特征(孔隙度中值为4.12%,渗透率中值为 $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),地层异常高压(压力系数为1.47~2.15),气-水关系复杂,属超深致密砂岩气藏^[12]。该地区须家河组二段、四段主要发育辫状河三角洲沉积体系^[13],河道频繁迁移,多期河道叠置,巨厚(50~100 m)、连片的砂体普遍发育,泥岩夹层缺乏或较薄,地震反射界面不明显,难于连续追踪^[14],给砂组划分及对比带来极大困难。

充分应用基础地质资料,如须二段中储层微观孔隙结构特征(图2)、中亚段分布稳定的石英砂岩(石英含量大于95%,GR值极低小于40API,图3)、须四中亚段钙屑砂岩(碳酸盐岩屑含量大于50%)、须四下亚段砾岩等,作为砂体等时对比的标志层,搭建层序地层格架,完成新场-丰谷地区须二、须四段砂组的统一划分及精细砂体对比^[15]。由于须二段受古地形东高西低的影响,沉积中心位于西部^[16],东部地区可容纳空间小,河流仅为过路而无沉积,或有沉积但也会被另一期河流冲刷而保留不完全。因此,砂体发育特征表现为:新场地区砂组发育齐全,共分为10套砂组

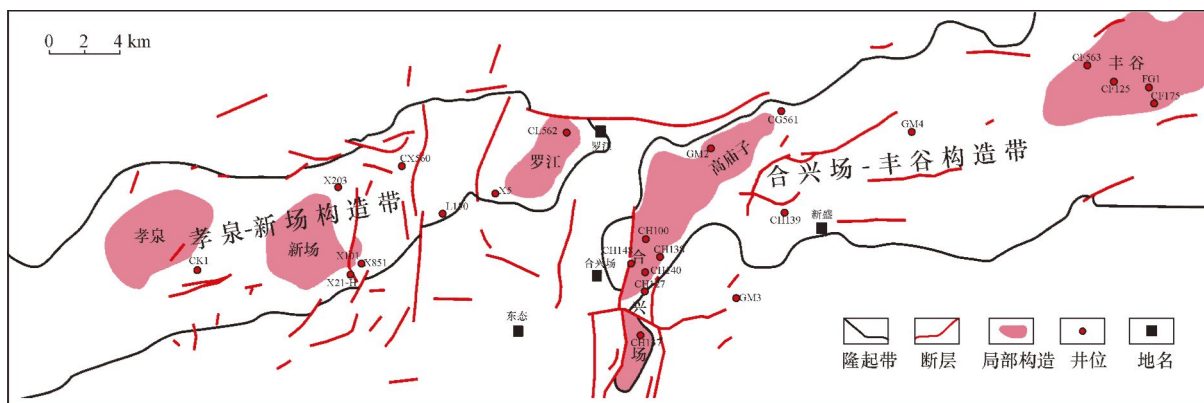


图1 孝泉-丰谷北东东向隆起带须家河组构造纲要图

Fig. 1 Structure outline map of the Xujiahe Formation in the NEE-trending uplift belt in Xiaquan-Fenggu area

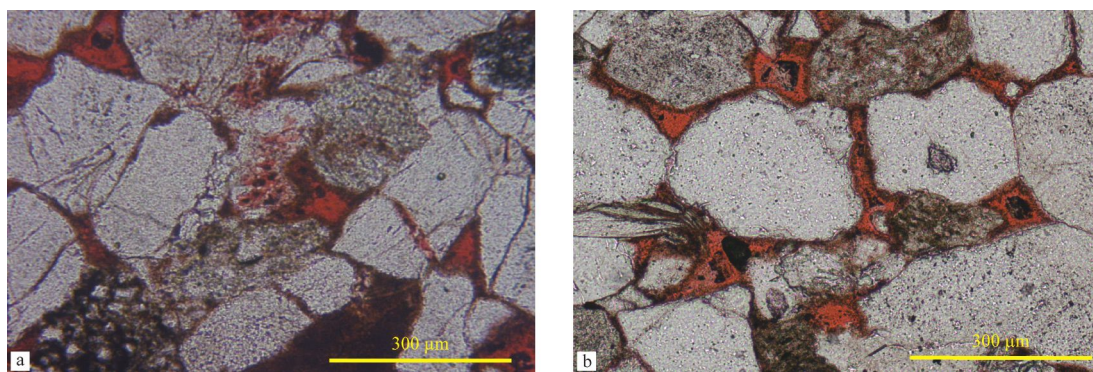


图2 合兴场- 丰谷地区 $T_3x_2^{5+6}$ 砂组相对优质储层微观孔隙结构特征(绿泥石衬边与残余粒间孔)

Fig. 2 Microscopic pore structure characteristics of relatively good reservoirs in $T_3x_2^{5+6}$ sand group of Hexingchang-Fenggu area (chlorite lining and residual intergranular pores)

a. CG561 井, 4 992.00 m; b. X203 井, 5 051.25 m

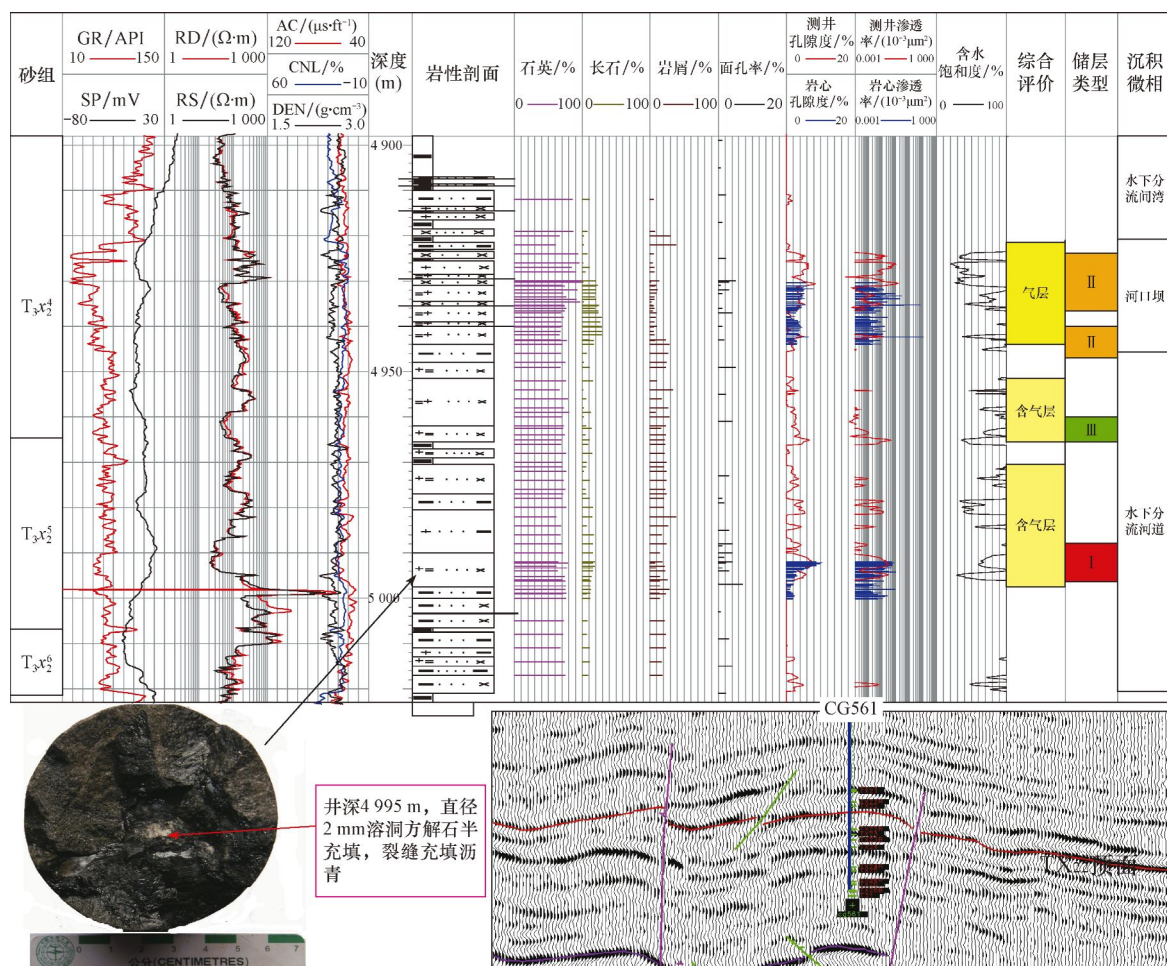


图3 合兴场- 丰谷地区 CG561 井构造、储层综合特征

Fig. 3 Characterization of structures and reservoirs in Well CG561 of Hexingchang-Fenggu area

($T_3x_2^1$ — $T_3x_2^{10}$), 自西向东砂体尖灭或厚度较小; 合兴场发育 9 套砂组($T_3x_2^1$ — $T_3x_2^9$); 高庙子地区发育 8 套砂组($T_3x_2^1$ — $T_3x_2^8$); 丰谷地区仅有 5 套砂组发育($T_3x_2^1$ — $T_3x_2^5$)。须四段地层发育稳定, 自

西向东略有减薄, 从下到上划分为 3 个亚段 10 个砂组。其中, 上亚段为 $T_3x_4^1$ — $T_3x_4^4$ 砂组, 中亚段为 $T_3x_4^5$ — $T_3x_4^8$ 砂组, 下亚段为 $T_3x_4^9$ — $T_3x_4^{10}$ 砂组, 中、上亚段地层厚度较下亚段大。

2 气藏特征及主控因素

合兴场-丰谷地区已发现气藏为须二段上亚段 $T_3x_2^{1+2}$ 、中亚段 $T_3x_2^{4+5}$ 、须四段中亚段 $T_3x_4^{6+7}$ 钙屑砂岩以及下亚段 $T_3x_4^{9+10}$ 气藏。不同砂组气藏特征及成藏主控因素具有共性与特性,通过对典型井的解剖,包括生产动态数据、历年天然气与地层水资料以及成藏地质条件的综合分析,进行精细研究。

2.1 水溶脱气特征

以 $T_3x_2^{1+2}$ 气藏 CH137 井为例(表1),在生产初期日产气 $12.29 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的情况下,日产水不到 1 m^3 ,水样矿化度极低,所产水应为气藏凝析水^[17];此后气产量下降、产水量上升期间,水样总矿化度变高,平均为 51.03 g/L ,产出水为气藏凝析水与地层水的混合;直至2003年产量持续下降,经过近一年时间关井复压,产量由 $0.43 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提升至 $13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。值得注意的是,重新开井的前20天产水量不到 $1 \text{ m}^3/\text{d}$,然而配产方案未加控制,之后产水量越来越大,气层水淹严重;2004—2010年初间歇性生产,水样总矿化度较高且较稳定,平均为 84.89 g/L ,此时所产水为须二段地层水。

可见,CH137井须二气藏含有底水或边水,生产复压和排水产气措施对恢复产量效果较好,说明地层水中含有水溶气,随着开采的进行,气藏压力降低,不断有天然气从地层水中脱出,对气源进

行补充,显示为水溶脱气特征^[18]。

同样对工区内所有钻井生产动态资料进行分析,表明研究区须家河组常规游离气藏与边水或底水中的水溶气并存,须二段钻井早期普遍产凝析水,且含凝析水时期越长证明气藏规模越大,以合兴场须二段气藏为代表。须四段钻井产水量大,但地层超高压,天然气更多溶于水,把气藏与溶有气体的底水或边水当作一个整体看待,须四气藏同样具有较高勘探价值。

2.2 古构造-成岩圈闭特征

以 $T_3x_2^{4+5}$ 气藏 CG561 井为例,该井产量连续5年保持稳定,日产气 $5 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4 \text{ m}^3$,日产水小于 1 m^3 ,油压、套压稳定在 35 MPa 左右。通过成藏地质条件分析(图3),该井最大的特点则是 $40 \sim 50 \text{ m}$ 的厚大致密砂岩中夹 $5 \sim 8 \text{ m}$ 孔隙度大于4%的相对优质储层发育(I类、II类储层),孔隙度最大达12%。岩心观察见直径 2 mm 的溶洞发育,且充填较多严重碳化的焦沥青^[19-20]。

合兴场-丰谷地区须二段气藏天然气同位素分析表明各井天然气同位素多呈现正碳同位素系列, $\delta^{13}\text{C}_1$ 介于 $-31.1\% \sim -31.97\%$,分布相对集中,但 $\delta^{13}\text{C}_2$ 介于 $-24.35\% \sim -28.06\%$,变化较大。CG561井还出现 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3$ 碳同位素倒转, $\delta^{13}\text{C}_2$ 值为 28.1% ,接近于油型气特征^[21-23]。由于CG561井产层段位于须二段中部,远离须三段烃源岩,烃源主要来自于须二段自生的煤系地层或下覆海陆过渡相地层,且 $\delta^{13}\text{C}_2$ 接近

表1 合兴场-丰谷地区 CH137 井历年地层水分析结果与生产情况

Table 1 Correlation of formation water analysis results with actual production data of Well CH137 in Hexingchang-Fenggu area

日期 (年-月)	pH 值	地层水离子含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)							总矿化度/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	水性质	平均日产量	
		主要阳离子				主要阴离子					气/ ($10^4 \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	水/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
		K^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-				
1992-12	5.4	$\text{K}^+ + \text{Na}^+ = 41.80$	-0.10	-0.1	17.92	-0.10	507.20	0.74	凝析水	12.29	0.97	
1993-05	6.0	$\text{K}^+ + \text{Na}^+ = 31.36$	222.92	2 020.34	52 357.70		499.58	0.87				
1994-12	5.5	894.18	29 869.58	186.06	1 909.64	58 666.67	<0.10	566.36				92.09
1995-03	5.5	746.80	3 965.60	227.40	1 908.75	47 750.00	<0.10	430.43	55.04	混合水	2.17	29.10
1997-05	6.1	327.00	9 612.00	155.00	1 288.00	20 603.92	4.77	152.54	32.21			
1998-04	5.5	390.00	10 350.00	200.00	1 710.00	24 156.32	1.73	161.52	36.98			
1999-01	5.5	350.00	9 500.00	260.00	1 920.00	26 287.76	<10.00	179.46	38.81			
2004-06	6.3	430.00	29 400.00	165.16	2 830.88	51 516.12	<10.00	0	84.36			
2006-03	6.0	410.00	30 660.00	162.64	2 926.20	51 612.75	14.82	211.12	86.02	地层水	0.95	9.93
2007-01	5.0	531.00	30 464.00	229.43	3 026.40	51 417.60	<10.00	211.12	85.88			
2010-01	6.3	665.24	26 495.85	224.12	1 991.66	51 176.77	5.74	415.38	83.30			

于油型气特征,因此碳同位素倒转可能为煤成气和油型气的混合导致,说明该井区早期可能发育古油藏,即处于成藏关键期古构造高部位^[24-25]。且须二段成藏关键期古构造恢复结果也表明,CG561井构造位置较高。优质储层的发育也应与液态烃的早期注入占据原生孔隙空间有关,抑制后期破坏性成岩作用的改造,使得优质储层发育^[26-29],形成古构造-成岩圈闭。

2.3 成藏主控因素

现今构造对须家河组气藏控制作用不明显。新场、合兴场、丰谷各个局部构造须二段、须四段不同钻井现今构造位置相差不多,但测试表明工业气层、含气水层、干层同时存在。

成藏关键期的古构造高部位是控制气藏早期成藏的关键。前已论及合兴场-丰谷地区须家河组致密砂岩气藏为古构造-成岩圈闭,生烃高峰期的古构造背景控制了油气的早期聚集^[30]。须二段成藏关键期古构造恢复结果显示,孝泉-新场-合兴场一线构造向北东方向抬高,其北东方向的高庙子-丰谷构造位于古构造高部位。尽管此时各个局部构造圈闭尚未形成,但从现今已获油气成果看,位于古构造高部位的高庙子-丰谷地区获稳定工业气流,且不产水;位于古构造相对较低部位的新场、合兴场地区,多数钻井无水产气时间较短,总体表现为气水同产。根据钻井厚度恢复的须四段成藏关键期古构造同样表明,钻井埋深与气产量呈明显负相关。

相对优质储层与多方向有效裂缝共同发育是天然气高产、稳产的有利因素。须家河组二、四段普遍发育厚层砂体,且砂体致密或超致密,然而致密背景下也有相对优质储层发育。除须四中亚段钙屑砂岩储层表现为孔隙型储层特征外,其余层段均为裂缝-孔隙型。但对于孔隙度大于5%的相对优质储层,随着孔隙度的增加渗透率升高幅度不大(图4),可见储层致密化程度高,孔隙连通性差,此时必须依靠裂缝对储层进行改造,将孤立的孔隙连通,才能保证天然气的稳定产出。

3 油气富集区预测

3.1 地质、地震结合预测油气富集区

依靠地震属性进行相对优质储层及其含气性

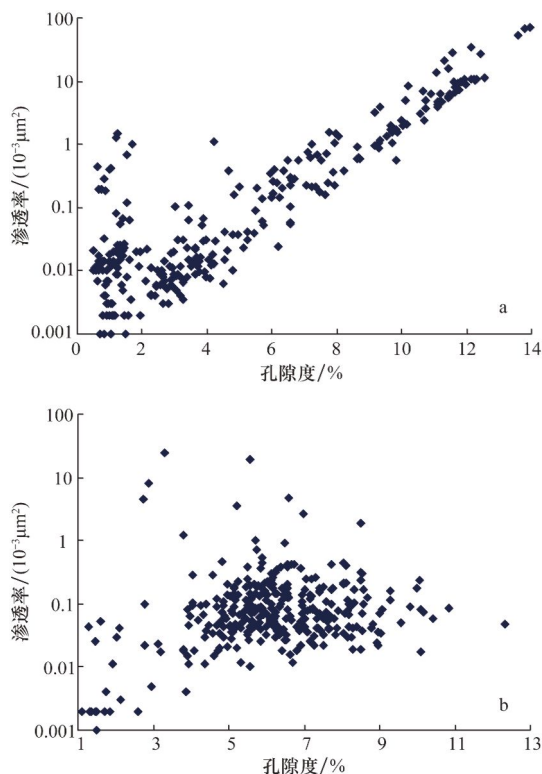


图4 合兴场-丰谷地区 $T_3x_4^7$ 砂组孔隙型储层 a) 与 $T_3x_4^9$ 砂组裂缝-孔隙型储层 b) 孔-渗关系

Fig. 4 Pore-permeability relationships of the porous reservoirs in $T_3x_4^7$ sand group (a) and the fractured-porous type reservoirs in $T_3x_4^9$ sand group (b) in Hexingchang-Fenggu area

和裂缝预测,多解性大,与实钻吻合程度不高,需加强地质研究对地震预测的指导作用,提高预测的可信度。主要体现在:①首先对典型砂组沉积微相的精细研究,明确砂体展布方向及范围,约束地震属性、反演预测的砂体厚度;②根据测井多参数分析建立相对优质储层预测模式,利用相控模式^[31]下的波阻抗反演进行有利储层预测;③利用岩心观察及成像测井资料,结合构造背景分析断裂系统成因,建立裂缝预测地质模型,用以指导利用地震属性对裂缝平面展布规律的预测。

根据不同气藏成藏主控因素制定相应目的层在平面上的综合评价标准。成藏主控因素之中排在第一位的应是油气早期聚集,即首先考虑成藏关键期的古构造背景。由于合兴场-丰谷地区均位于有利油气运移聚集带之上,因此接下来只需考虑影响油气富集和可采程度的相对优质储层及裂缝发育程度。将相对优质储层分布区定为综合评价的有利区,有利区内成藏关键期构造相对高部位的Ⅰ类和Ⅱ类裂缝发育区为富集区,厚度大

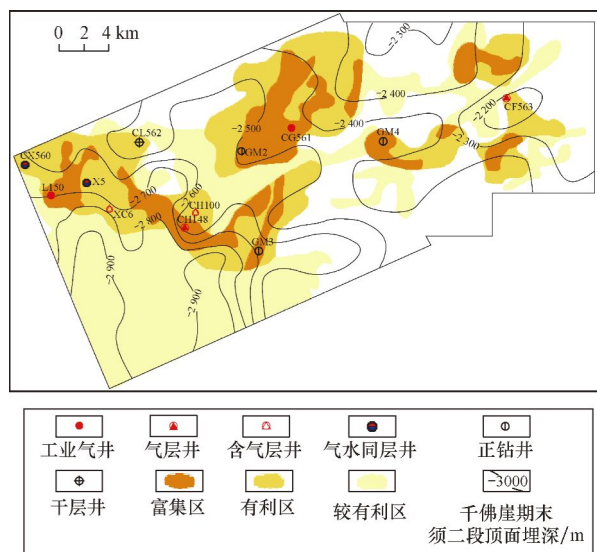


图5 合兴场-丰谷地区 $T_3x_2^4$ 砂组天然气富集区综合评价

Fig. 5 Comprehensive evaluation of gas play fairway in $T_3x_2^4$ sand group of in the Hexingchang-Fenggu area

于30 m的砂岩发育区内Ⅰ类和Ⅱ类裂缝发育区为较有利区,以此为标准编制主要目的层天然气富集区综合评价图(图5)。

纵向上优选相对优质储层发育,平面上展布较广,且已获工业产能的 $T_3x_2^1$, $T_3x_2^{4+5}$, $T_3x_4^{6+7}$ 和 $T_3x_4^{9+10}$ 作为评价目标。通过富集区综合评价认为,合兴场-丰谷地区须二段 CH148 - CH137 - GM3 井区、GM2 - CG561 井区及 GM4 井区为油气富集区;须四段 GM2 - CG561 - GM4 井区及 CF563 - CF175 井区为油气富集区。

3.2 地质、工程结合扩大油气成果

异常高压的致密砂岩储层改造难度大,特别是裂缝不发育区需要更高或更具针对性的储层改造工艺。如位于油气富集预测区的 CG561 井初期射孔测试,未获工业产能。经过地质与工程联合攻关,通过全井段细致的岩石薄片观察,在 4 987 ~ 4 996 m 发现溶蚀孔隙特别发育段,其孔隙度最大达 10.37%,录井、测井综合解释为含气层;采取射孔与试破、燃爆诱导压裂与酸化施工联作,降低储层破裂压力,为酸化施工创造条件。针对两层相对优质储层段进行合测,获天然气绝对无阻流量 $12.55 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。L150 井须二段初期替喷测试未获工业气流,而4年后通过细致的测试选层,将3段小于10 m的相对优质储层段进行合测,解除近

井地带污染,沟通泥浆漏失段裂缝,获天然气绝对无阻流量 $10.06 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

3.3 应用效果

依据上述研究成果,在高庙子地区部署的3口须家河组钻井验证了对孝泉-丰谷构造带须家河组砂体展布规律的认识。自西向东须二段中、上亚段砂体渐变趋势相反,上亚段逐渐增厚,中亚段则自西向东逐渐减薄,区域对比标志层 $T_3x_2^4$ 砂组顶部的石英砂岩分布稳定;须四段厚度及岩性组合特征与预测吻合。实钻揭示须二中亚段已知的两种类型相对优质储层发育段在高庙子地区仍然发育,GM2, GM3 和 GM4 井须二中亚段 30 ~ 80 m 厚大砂岩中发育 2 ~ 3 层 8 ~ 10 m 相对优质储层,储层特征及其它成藏地质条件与工业气井 CG561 井十分相似。通过钻井跟踪研究,在测试选层过程中充分应用录井、测井、薄片资料,明确、细化目的层段,采用多层合测的方式,GM4 井在须家河组四段获得工业天然气流。

4 结论

1) 精细勘探技术以地质综合研究为主导,通过地震、地质紧密结合完成油气富集区精细预测及井位部署,同时加强钻井跟踪、测试选层、工程工艺过程中的地质综合研究,有助于提高勘探成功率。最新钻井的应用效果分析说明精细勘探的技术对整个川西坳陷乃至其它地区致密砂岩气藏的勘探具有推广意义。

2) 合兴场-丰谷地区须家河组致密砂岩气藏的精细勘探结果显示,须家河组致密砂岩气藏具水溶脱气特征,为古构造-成岩圈闭,成藏关键期的古构造高部位是控制气藏早期成藏的关键因素,须二段 CH148 - CH137 - GM3 井区、GM2 - CG561 井区和 GM4 井区及须四段 GM2 - CG561 - GM4 井区及 CF563 - CF175 井区为有利油气富集区。

参考文献

- [1] 董贞环. 四川盆地西部须家河组致密砂岩成岩作用与孔隙演化模式[J]. 岩相古地理, 1994, 14(2): 33 - 41.
Dong Zhenhuan. Model for diagenesis and porosity evolution of the dense sandstone from the Xujiahe formation in western Si-

- chuan Basin [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1994, 14(2): 33-41.
- [2] 张哨楠. 四川盆地西部须家河组砂岩储层成岩作用及致密时间讨论[J]. 矿物岩石, 2009, 29(4): 33-38.
- Zhang Shaonan. Discussion on the diagenesis and timing of tight sandstone reservoir in Xujiahe Formation, western Sichuan Basin [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2009, 29(4): 33-38.
- [3] 吕正祥, 刘四兵. 川西须家河组超致密砂岩成岩作用与相对优质储层形成机制[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2373-2383.
- Ly Zhengxiang, Liu Sibing. Ultra-tight sandstone diagenesis and mechanism for the formation of relatively high-quality reservoir of Xujiahe Group in western Sichuan [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2373-2383.
- [4] 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, 26(6): 896-901.
- Zeng Xiaoying, Zang 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, 26(6): 896-901.
- [5] 曾小英, 张娟, 刘远洋, 等. 沉积期火山作用对川西坳陷须家河组优质储层的意义[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 50-60.
- Zeng Xiaoying, Zhang Juan, Liu Yuanyang, et al. Significance of syndepositional volcanism to high quality reservoirs in the Xujiahe Formation, the western Sichuan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 50-60.
- [6] 罗文军, 彭军, 杜敬安, 等. 川西坳陷须家河组二段致密砂岩储层成岩作用与孔隙演化——以大邑地区为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 287-295.
- Luo Wenjun, Peng Jun, Du Jing'an et al. Diagenesis and porosity evolution of tight sand reservoirs in the 2nd member of Xujiahe Formation, western Sichuan Depression: an example from Dayi region [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 287-295.
- [7] 谷江锐. 刘岩. 国外致密砂岩气藏储层研究现状和发展趋势[J]. 国外油田工程, 2009, 25(7): 1-5.
- Gu Jiangrui, Liu Yan. Research situation and development tendency of foreign tight sandstone gas reservoirs [J]. Foreign oil-field engineering, 2009, 25(7): 1-5.
- [8] 蔡希源. 深层致密砂岩气藏天然气富集规律与勘探关键技术——以四川盆地川西坳陷须家河组天然气勘探为例[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 707-714.
- Cai Xiyuan. Gas accumulation patterns and key exploration techniques of deep gas reservoirs in tight sandstone: an example from gas exploration in the Xujiahe Formation of the western Sichuan Depression, the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 707-714.
- [9] 朱如凯, 邹才能, 白斌, 等. 全球油气勘探研究进展及对沉积储层研究的需求[J]. 地球科学进展, 2011, 26(11): 1150-1161.
- Zhu Rukai, Zou Caineng, Bai Bin, et al. Progresses in the global petroleum exploration and its demand in reservoir research [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(11): 1150-1161.
- [10] 杨华, 刘新社, 孟培龙. 苏里格地区天然气勘探新进展[J]. 天然气工业, 2011, 31(2): 1-8.
- Yang Hua, Liu Xinshe, Meng Peilong. New development in natural gas exploration of the Sulige Gas Fields [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(2): 1-8.
- [11] 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui, et al. Formation and evolution of Sichuan Basin [M]. Beijing: Geology Publishing Press, 1996.
- [12] 董晓霞, 梅廉夫, 全永旺. 致密砂岩气藏的类型和勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(3): 351-355.
- Dong Xiaoxia, Mei Lianfu, Quan Yongwang. Types of tight sand gas accumulation and its exploration prospect [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(3): 351-355.
- [13] 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[J]. 地质论评, 2009, 55(4): 484-495.
- Zheng Rongcai, Dai Chaocheng, Zhu Rukai, et al. Sequence based lithofacies and paleogeographic characteristics of Upper Triassic Xujiahe formation in Sichuan Basin [J]. Geological Review, 2009, 55(4): 484-495.
- [14] 郑荣才, 叶泰然, 翟文亮, 等. 川西坳陷上三叠统须家河组砂体分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(3): 405-411.
- Zheng Rongcai, Ye Tairan, Zhai Wenliang, et al. Prediction of sandbody distribution in the Upper Triassic Xujiahe Formation, the West Sichuan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(3): 405-411.
- [15] 林小兵, 田景春, 刘莉萍, 等. 等时格架及地震反演双重约束的精细砂体对比研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(3): 417-423.
- Lin Xiaobing, Tian Jingchun, Liu Liping, et al. Research on fine sandbody correlation method under the double constraints of isochronous framework and seismic inversion [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(3): 417-423.
- [16] 郑荣才, 朱如凯, 翟文亮, 等. 川西类前陆盆地晚三叠世须家河期构造演化及层序充填样式[J]. 中国地质, 2008, 35(2): 246-255.
- Zheng Rongcai, Zhu Rukai, Zhai Wenliang, et al. Tectonic evolution and sequence filling patterns in western Sichuan foreland-like basin in the Upper Triassic Xujiahean Period [J]. Geology in China, 2008, 35(2): 246-254.
- [17] 赵永胜, 周文. 川西坳陷须二气藏凝析水地球化学特征及成因初探[J]. 天然气地球科学, 1995, 27(6): 30-33.
- Zhao Yongsheng, Zhou Wen. Condensate water chemical character and causes of Xu2 Member Gas Field, western Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 1995, 27(6): 30-33.

- [18] 李伟,秦胜飞. 四川盆地须家河组地层水微量元素与氢氧同位素特征[J]. 石油学报,2012,33(1):55-63.
Li Wei, Qin Shengfei. Characteristics of trace elements and hydrogen and oxygen isotopes in the formation water of the Xujiahe Formation, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1):55-63.
- [19] 罗小平,曹军,沈忠民. 川西坳陷中段上三叠统须家河组储层沥青地球化学特征及成因研究[J]. 矿物岩石,2009,29(1):93-98.
Luo Xiaoping, Cao Jun, Shen Zhongmin. Geochemical characteristics and genesis of reservoir bitumen of Xujiahe formation in the Upper Triassic of western Sichuan Depression [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2009, 29(1):93-98.
- [20] 胡守志,付晓文,王廷栋. 利用储集层沥青特征识别高演化地区的气层[J]. 新疆石油地质,2006,27(4):429-431.
Hu Shouzhi, Fu Xiaowen, Wang Tingdong. Gas - Bearing formation identification in high evolution area using reservoir bitumen characteristic [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(4):429-431.
- [21] 戴金星,秦胜飞,陶士振,等. 中国天然气工业发展趋势和天然气地质理论重要进展[J]. 天然气地球科学,2005,16(2):127-142.
Dai Jinxing, Qin Shengfei, Tao Shizhen, et al. Developing trends of natural gas industry and the significant progress on natural gas geological theories in China. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(2):127-142.
- [22] 王世谦. 四川盆地侏罗系-震旦系天然气的地球化学特征[J]. 天然气工业,1994,14(6):1-5.
Wang Shiqian. Geo - chemical characteristics of Jurassic-Sinian gas in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 1994, 14(6):1-5.
- [23] 张士亚,郜建军,蒋泰然. 利用甲、乙烷碳同位素判别天然气类型的一种新方法[M]. 北京:地质出版社,1998:48-58.
Zhang Shiya, Gao Jianjun, Jiang Tairan. A new method for gas type discrimination using methane and ethane carbon isotopic [M]. Beijing: Geology Publishing Press, 1998:48-58.
- [24] 安凤山,王信,叶军. 川西坳陷中段须家河组天然气勘探开发战略研讨[J]. 天然气工业,2005,25(5):1-5.
An Fengshan, Wang Xin, Ye Jun. Discussion on natural gas exploration and development strategies of Xujiahe Formation in the Middle section of west Sichuan Depression [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(5):1-5.
- [25] 曹烈,安凤山,王信. 川西坳陷须家河组气藏与古构造关系[J]. 石油与天然气地质,2005,26(2):224-229.
Cao Lie, An Fengshan, Wang Xin. Relationship between palaeo-structure and gas reservoirs in Xujiahe formation in western Sichuan depression [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(2):224-229.
- [26] 安凤山,王信,叶军. 对中坝须二段气藏圈闭分析的思考. 天然气工业,2003,23(4):8-1.
An Fengshan, Wang Xin, Ye Jun. An idea about the trap analysis of T₃x² gas reservoir in Zhongba Field [J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(4):8-1.
- [27] 蔡春芳,顾家裕. 塔中地区志留系烃类侵位对成岩作用的影响[J]. 沉积学报,2001,19(1):60-63.
Cai Chunfang, Gu Jiayu. Effect of hydrocarbon emplacement on diagenesis of Silurian sandstone of central Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(1):60-63.
- [28] 蔡进功,张枝焕,朱筱敏,等. 东营凹陷烃类充注与储集层化学成岩作用[J]. 石油勘探与开发,2003,30(3):79-83.
Cai Jingong, Zhang Zhihuan, Zhu Xiaomin et al. Hydrocarbon filling and chemical diagenesis evolution of the clastic reservoir of the Paleogene in Dongying Sag [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3):79-83.
- [29] 王怀广,魏新善,白海峰. 鄂尔多斯盆地榆林地区山西组2段高效储集层形成的地质条件[J]. 天然气地球科学,2005,16(3):319-323.
Wang Huaichang, Wei Xinshan, Bai Haifeng. Formed geologic condition of the Shan - 2 formation high efficient reservoir in Yulin Area of Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(3):319-323.
- [30] 唐立章,张贵生,张晓鹏,等. 川西须家河组致密砂岩成藏主控因素[J]. 天然气工业,2004,24(9):5-7.
Tang Lizhang, Zhang Guisheng, Zhang Xiaopeng, et al. Main control factors of forming the tight sandstone gas reservoirs in Xujiahe Formation in west Sichuan Depression [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(9):5-7.
- [31] 张恒,孙海龙. 相控模式下的储层预测方法与应用——以海坨北地区青山口组为例[J]. 油气地质与采收率,2010,17(2):60-63.
Zhang Heng, Sun Hailong. Application of techniques on reservoir prediction under facies constrain - case of Pukou formation of north Haituo region [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency. 2010, 17(2):60-63.

(编辑 董立)