The High-Quality Permeability Reservoir Prediction of the Second Members of Xujiahe Exploration in Depression of Western Sichuan

Yan Wei, Shu Liu, Huake Li

Exploration Production Research Institute, Southwest Petroleum Branch, Chengdu Email: <u>weiyan8006@163.com</u>

Received: Oct. 18th, 2014; revised: Nov. 20th, 2014; accepted: Nov. 29th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u>

CC O Open Access

Abstract

The gas reservoir of the upper triassic Xujiahe formation in Western Sichuan buries deep and sand bodies are super tight, so the high-quality permeability reservoir prediction is the focus of the gas reservoir exploration. Relatively high-quality reservoirs are closely related with sedimentary facies and sequence stratigraphic analysis is the key technology to describe sedimentary system. By analyzing the typical seismic reflection structure in seismic section, this paper establishes sequence stratigraphic framework of the second members of Xujiahe, divides the sedimentary system, and predicts favorable sedimentary facies belt. Sedimentary facies distribution is described by using attribute parameter. Combined with regional tectonic evolution and stress field analysis, the paper predicts fracture network effectively. Effective fracture network superimposed relatively high-quality reservoir is predictable for favorable area in the development of the high-quality permeability reservoir. The results show that: In the region of western Sichuan, the NS fault network, superimposed mouth bar, or stacked fluvial sand body can become the second members of Xujiahe group of the high-quality permeability reservoir effectively. The predicted results are consistent with the existing drilling.

Keywords

Western Sichuan Depression, Sequence Stratigraphic Framework, The Second Members of Xujiahe Formation, Permeability Reservoir, River Mouth Bar, Stress Analysis

川西坳陷须家河组二段优质储渗体预测

魏艳,刘殊,李华科

西南油气分公司勘探开发研究院,成都 Email: <u>weiyan8006@163.com</u>

收稿日期: 2014年10月18日; 修回日期: 2014年11月20日; 录用日期: 2014年11月29日

摘要

川西上三叠系须家河组气藏埋深大,砂体超致密,优质储渗体预测是须家河组二段气藏勘探重点。相对 优质储层与沉积相密切相关,层序地层格架分析是描述沉积体系的关键技术。本文通过分析地震剖面上 典型地震反射结构,建立须家河组二段层序地层格架,划分沉积体系,预测有利沉积相带;用属性参数 描述沉积相平面分布;结合区域构造演化、应力场分析技术,预测有效裂缝网络。有效裂缝叠加相对优 质储层,可预测为优质储渗体发育有利区。研究结果表明:川西地区南北向断层网络、叠加河口坝,或 者叠置河流相砂体,能够成为须家河组二段有效的优质储渗体。且预测结果与现有钻井吻合。

关键词

川西坳陷,层序地层格架,须家河组二段,储渗体,河口坝,应力场分析

1. 引言

上三叠统须家河组(T3x)致密砂岩气藏是川西凹陷的主力气藏之一[1], XC 气田、DY 气田取得勘探 突破。其资源量为 7795.5 × 10⁸ m³, 而资源探明率仅为 0.45% [2], 近期又有两口钻井在须家河组二段获 得工业气流,显示剩余勘探潜力巨大。

经过多年的研究,针对须家河气藏的勘探和开发已形成了技术系列[3],取得较大进展。然而,川西 须家河组气藏也有很不利的成藏条件,即"四超二复杂":超深、超致密、超晚期构造、超高压;气水 关系复杂、储层非均质性复杂,使得气藏的开发异常艰难。到目前为止,钻井成功率约 40%左右,失利 的钻井依然较多,高产的工业气井较少,经济效益偏低。相关专题对须 2 段气藏的富集规律做了全面的 总结[1]:"源(生烃中心附近)、相(储层沉积相)、位(古今构造位置)"3 元控藏,裂缝是高产的主要因素。 孔隙度相对较高,且匹配发育裂缝网络的砂体,称之为储渗体。钻井数据统计证实:裂缝只是提高渗透 率,对总体孔隙度的贡献并不大;孔隙度相对较高的砂体仍然是气藏形成的基础,但没有裂缝改造不能 形成有效储层[1]。寻找优质储渗体,即寻找裂缝叠加、且孔隙度较高的砂体,是须家河气藏开发的关键 技术。为此,建立层序地层格架描述沉积体系,采用属性参数描述沉积相,依据裂缝-岩相关系的力学 机理预测裂缝发育带,结合构造演化分析裂缝性质,以此描述、预测储渗体发育区。预测结果与现有钻 井较为吻合。

须家河组气藏主要分布在须家河组二段(T3x2)(以下简称须2段)。

2. 气藏地质概况

四川盆地须家河组气藏经过多年研究,对气藏的基本特征认识程度较高[1]:

区域构造: 位于扬子地块西部, 盆地北部以勉略缝合带为界与秦岭造山带为邻, 西以龙门山为界与 松潘-甘孜高原相接。川西坳陷为龙门山推覆带的前陆盆地(如图 1)。

区域构造演化:晚三叠世以来,北面受秦岭造山带,西受青藏高原东缘构造带围限,加上扬子地块 自身的推挤作用,形成多个原型盆地的叠置。经历印支一燕山一喜马拉雅多期构造运动作用,形成现今 川西地区"一隆两凹"的隆凹格局(如图 1)。前陆盆地的中部为一大型、近 EW 向的长轴构造带——即 XC 构造带,其上发育多个局部高点;北部为近东西向的梓潼凹陷,南部为川西坳陷。安县运动使须家河 组分为上下两个层序,须上盆和须下盆,由此分为2个亚段。

沉积演化:川西坳陷主要受到西缘龙山门推覆构造带、北缘大巴山-米仓山推覆构造带这两个构造 带的影响,造成多期次的挤压推覆以及盆地的沉降,物源也主要来自这两个造山带。垂向上周期性出现 盆缘的砾岩积扇相,盆内的黑色页岩、泥灰岩形成最大湖侵层;横向上,有不同的沉积体系配置和沉降 中心的迁移。

须 2 段气藏烃源岩:马鞍塘组是须家河组油气藏重要的供烃层系,须 2 段内部的页岩也是重要的烃 源岩。

须 2 段储层特征:属低孔低渗和特低孔特低渗储层。岩性为长石石英砂岩、岩屑石英砂岩、岩屑长 石砂岩及岩屑砂岩;平均孔隙度为 5.75%,最小 0.05%,储层平均渗透率为 0.34×10⁻³ μm²,最小 0.00013× 10⁻³ μm²。但局部发育有高孔渗储层段,孔隙度最大达 21.09%,渗透率最高可达 187.86×10⁻³ μm²以上(有 裂缝发育)。样品中,孔隙度大于 12%仅占 2.68%;渗透率大于 1×10⁻³ μm²仅占 4.09%。生产中,取孔隙 度 2.6%、渗透率 0.03×10⁻³ μm² 作为须 2 段有效储层物性下限值。

3. 须 2 段储渗体控制因素分析

裂缝是高产井的关键,而相对高孔隙度砂体是气藏形成的基础。寻找新的裂缝网络、且孔隙度相对 较高的相对优质储层——即储渗体"甜点",是下一步须家河组气藏勘探开发的关键。

3.1. 优质储层与沉积相的关系

优质储层的岩相与沉积相有明显的关系(如图 2)。据 40 口井沉积微相与储层物性的关系统计,储层物性较好,砂体孔隙度较高的有利沉积相有:三角洲平原水上分支河道、三角洲前缘水下分流河道、河口坝。这 3 个相带相带水动力能量高,岩石成分成熟度和结构成熟度较高,粒度较粗(一般在中砂以上),分选较好,杂基含量较少。其砂岩平均孔隙度一般在 4%以上,其中河流相砂体孔隙度可达 6%左右,河口坝境界 5%。平均渗透率 0.05 × 10⁻³ μm²。这三个沉积相带的砂体是须家河组最主要的储集体。

对相对优质储层与沉积相的关系,相关专题有过深入的研究[4] [5],预测结果应用于实际生产,在向 斜内部署的 DY1 井,钻遇孔隙性砂体,获得 1.2 × 10⁴ m³/d 的低产气流,取得良好的效果,表明孔隙性 砂体的预测是正确的。只是由于裂缝尚欠发育,DY1 井没有获得高产工业气流。

3.2. 裂缝控制因素分析

裂缝与岩性、岩相,地层厚度有明显关系[6]-[8]:

1) 裂缝密度与岩性、岩相的关系:相同的矿物成分,其粒度越小的岩石,断层-裂缝密度越大;脆性矿物含量高的岩石,其裂缝发育密度大。

2) 裂缝密度与层厚的关系:裂缝密度与地层的单层厚度成反比。即:地层厚度越小,裂缝密度越大。 在相同的岩石参数和负载条件下,薄层岩石要比厚层岩石更容易产生密集的裂缝;

通过沉积相预测裂缝发育的有利相带,这在勘探地区尤其重要。



Figure 1. Nowadays, the structural map of T3x2 in the study area and the drilling location (red arrows represent regional stress direction, green arrows represent the stress reverse direction) 图 1. 研究区须 2 段现今构造图及部分钻井位置(红色箭头代表区域应力方向,绿色箭头代表应力扭转方向)



Figure 2. Schematic diagram of the relationship between sedimentary facies and reservoir property 图 2. 沉积相与储层物性关系示意图

3.3. 储渗体发育有利相带分析

如上所述,孔隙度相对较高的砂体的沉积相为三角洲平原水上分支河道、三角洲前缘水下分流河道、 河口坝(如图 2)。而裂缝发育的有利砂体沉积相为地层较薄、颗粒相对较细的砂岩。而有效储渗体必须是 孔隙度相对较高、且叠加裂缝网络的砂岩。能够将两个因素的叠合的沉积相,必然是厚度相对较小、薄互 层、颗粒相对较细,但孔隙度也相对较高的沉积相砂岩,这就是河口坝沉积相、以及薄互层的叠置河道。

大量的高产工业气井都分布在前缘的河口坝和叠置河道上(如图 3)[4] [5]。如 X851 井-202 井这个储 渗体,其上有 4 口生产井,目前产量已经超过 4 亿立方天然气。

相对而言,厚大质纯的河道砂,通常难以形成有效储渗体。尽管河道相砂岩孔隙度相对较高,但由于厚度较大,裂缝发育程度相对较差。如图 3 所示,厚大的箱形河道砂岩,其上只有 X5 井获得工业气



Figure 3. Contrast maps between shall facies and fractures—porosity of the high-quality permeability reservoir of T3x2 图 3. 须 2 段岩相与裂缝 - 孔隙性储渗体关系对比图

流,且这口井已停产,总产量只有 0.5×10⁴ m³/d 立方天然气,表明裂缝沟通的范围并不大。

叠置河道,如果有部分泥岩夹层,也能获得较好产量。叠置河道上其上有 3 口井,目前有 L150 井在 生产(X2 井是河口坝、河道相混和生产)。

综上所述,孔隙度较高、且裂缝相对发育,以河口坝最好;其次为分流河道。河流相厚大砂体实际 上是不利的沉积相带。

因此,在须2段气藏富集区的预测中,沉积相、沉积体系的预测描述具有最为关键的作用。

4. 层序地层格架建立与有利相带预测

通过建立层序地层格架描述沉积体系,采用属性参数描述沉积相分布[5] [6],以此预测孔隙度较好的 相对优质储层。

4.1. 须2段层序地层格架

龙门山造山带崛起,在推覆带前方形成一个前陆盆地[9],安县运动形成了须上盆和须下盆[10],呈 不对称环带状向北西收敛特点[4] [5]。川西坳陷的物源方向较多,有北部大巴山推覆带、南部康滇古隆起、 东部川中古隆起。其中须2段的物源主要来自川中古隆起、南侧的康滇古隆起,北段的物源相对较少。 为此,结合测井相识别的沉积相(如图3),建立层序地层格架(如图4),以描述沉积体系。图4是主要物 源方向的层序地层格架剖面,为由南向北——即LD至XC,物源来自康滇古隆起方向的格架剖面,分上 下两个亚段。剖面特征为:

上亚段:可识别坡折带——即厚度突变带,其坡折带上方以河流现为主,地震相通常为短轴反射;坡 折带下方以前缘相的叠置河道为主,为砂岩-页岩互层(砂岩的测井相为箱形),地震相表现为相对连续的 反射;下亚段:厚度变化为渐变型,特征较为明显的顶积层反射,这是河口坝典型的地震相特征(测井相

川西坳陷须家河组二段优质储渗体预测



图 4. 须 2 段层序地层格架特征剖面(位置见图 1)

为漏斗形),以河口坝为界,其上方以河流相为主,下方则为前缘相,河口坝是前缘相的一个亚相。

4.2. 有利沉积相带预测

依据上述层序地层格架,提取两个亚段顶面的沿层振幅,用像素成像描述沉积相带的平面分布(图 5、图 6)。沉积相与地震相特产有较好的对应关系:条带地震相通常为河流相,而河口坝为马蹄形、或者舌状,而席状砂、叠置河道的面积通常较大。结合钻井资料,地震相能够较好描述沉积相。

1) 上亚段

据层序地层格架剖面,描述上亚段沿层振幅表征的沉积相(如图 5)。坡折带上方以河流相为主,其下 方则以前缘相为主。坡折带上方基本上是以条带状地震相。向北进入坡折带后,地震相为大片连续的强 反射。特别注意到的是,这些大量连续的强反射,仍然可识别其边界,表明为叠置河道相。

揭穿上亚段的钻井较多, DY1, LS1 都钻遇了厚大的河道砂体, 孔隙度较好但产量较低, 裂缝欠发育。其地震相为条带状的河道相。较特别的是 HL1 井, 这口井在初始测试时有 20×10⁴ m/d 的产量, 砂体厚大、孔隙度较高, 为河道砂岩(测井曲线箱形), 裂缝也较发育。其对应的地震相为条带状地震相, 为典型河流相砂岩。但两次压裂后, 测试后期产量严重衰竭, 没有获得工业气流。这 3 口钻井都表明这样一个规律:水上河道质纯而厚大, 但在现有技术条件下, 很难采用现有工艺压裂, 即使裂缝一定程度上发育, 如 HL1 井。

相对而言,薄互层的叠置河道,压裂要容易很多。CH100 是须家河气藏的发现井,储渗体发育在互 层状放入叠置河道上(如图 3)。继 CH100 井成功之后,部署了多口钻井,落在河流相砂体上的钻井,如 CQ171 等,没有获得产能。落在叠置河道的砂岩 - 泥页岩夹层中的钻井,如 CH127、L150 等钻井,获得 了工业产能。

依据上述论证,上亚段的有利沉积相带是坡折带以北的地区,以叠置河道为主;坡折带以南的地区,

Figure 5. The map of seismic facies-sedimentary facies in sub segment of T3 × 2 图 5. 须 2 段上亚段地震相 - 沉积相图

Figure 6. The map of seismic facies-sedimentary facies in under segment of T3x2 图 6. 须 2 段下亚段地震相 - 沉积相图

以水上分流河道为主,不是有利的储渗体发育区。

2) 下亚段

下亚段是目前的主力产层,地震相特征更加清晰(如图 6),有典型的河口坝、河道特征。如图 6 所示, 依据层序地层格架剖面(如图 4),河口坝是前缘相与三角洲平原的过渡相带,在三角洲平原相上,清晰的 展示了两条河流;在前缘相的河口坝优势相上,清晰展示有 3 个马蹄形的朵叶体。现有的高产工业井基 本上都分布在 XC 马蹄形朵叶体上。XC 朵叶体呈马蹄形有深入的研究,其中 X2、X3 等钻井就是依据地 震相结合多波多分量参数部署的[5],取得较好效果。LJ 朵叶体、FG 朵叶体,目前还没有钻井落在上面, 是有利的勘探区,值得重视。

5. 有效裂缝发育带预测

从现有钻井的生产状况分析(如图 5、图 6),河口坝朵叶体,以及发育在朵叶体上的南北向小断层, 是构成有效储渗体的两个必要的条件。

然而,不是所有裂缝都是有效的,只有南北向断层附近的裂缝才是有效裂缝。大量钻井证实,高角 度缝的发育程度,以及高、低角度缝的有效配置是须家河组气藏获中 - 高产的关键。如 GM2、3、4 井, 虽然低角度缝发育,但高角度裂缝不发育,故裂缝有效性差,未获得好的油气成果。而 XC 地区高产钻 井,基本上都分布在近南北向断层附近(如图 6),这些钻井都钻遇了高角度裂缝。

南北向断层附近的伴生裂缝为高角度缝,如图1所示,其形成机理为:

1) 龙门山推覆带是一个北东-西南走向的推覆带,在喜山期大幅隆升定型[1][9]。YZH 构造主要是 喜山期产物;龙泉山断褶带是龙门山推覆带在盆地内形成的一个反冲断褶带,其形成时间和 YZH 构造同 一动力和期次。

2) XC 构造带是一条近东西向的背斜构造,在印支期末形成雏形,燕山期继承性发展[1];

3) 龙门山推覆带(中段为是 YZH 构造)和龙泉山断褶带形成一个三角形(如图 1),在龙门山向盆地推 覆过程中,应力向盆地传递(图中红色箭头),必然使得在龙泉山断褶带两侧形成反时针的旋转(图中绿箭 头所示);其次,YZH 构造与 XC 构造末端相接,推挤 XC 构造的西端,也使得 XC 构造发生左旋。由此 在 XC 构造主体上形成了走滑断层(如图 6),在走滑断层两侧形成高角度裂缝发育带。高角度裂缝与 XC 朵叶体河口坝叠加,形成了优质的储渗体。由此,高产钻井基本上分布在马蹄形的 XC 朵叶体上(如 X2 井、201 井)、或者附近(如 X856)。

综合上述断层演化分析结果,下亚段的 LJ、FG 朵叶体是两个值得下一步重点关注的目标。

6. 结束语

1) 孔隙度相对较高的优质储层主要为三角洲平原和三角洲前缘砂体; 薄互层岩石要比厚层岩石更容 易产生密集的裂缝。两个因素能够叠加的岩相以河口坝、叠置河道最佳;

2) 层序地层格架是描述须 2 段沉积体系的有效手段;结合属性参数可有效描述沉积相分布。通过地 震相特征,可预测描述河口坝、叠置河道分布。结合断层分析,可预测有效储渗体分布。

3) 南北向断层伴生裂缝多为高角度裂缝。南北向断层多为走滑断层,是由于龙门山推覆带和龙泉山 断褶带之间有一个斜交角度造成,其次和 YZH 构造推挤 XC 构造西端也有关。

4) 河口坝、叠置河道,叠加南北向走滑断层可形成优质储渗体。须家河上亚段坡折带以北连片的叠置河道,下亚段的LJ、FG河口坝朵叶体,是有利的勘探目标。

致 谢

论文在刘殊教授指导完成,特此感谢。

参考文献 (References)

- [1] 杨克明,朱宏权,叶军等 (2012) 川西致密砂岩气藏地质特征. 科学出版社,北京,181-390
- [2] 杨克明 (2006) 川西坳陷须家河组天然气成藏模式探讨. 石油与天然气地质, 6, 786-793.
- [3] 杨克明, 唐建明, 甘其刚等 (2012) 川西致密砂岩气藏预测技术. 科学出版社, 北京, 1-400.
- [4] 苏锦义,刘殊 (2008) 川西坳陷须家河组二段气藏地震相特征研究. 石油物探, 2, 167-171.
- [5] 张虹, 刘殊 (2010) 再论川西坳陷须家河组二段气藏地震相特征. 石油物探, 3, 268-274.
- [6] McQuillan, H. (1973) Small-scale fracture density in Asmari formation of Southwest Iran and its relation to bed thickness and structural setting. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 57, 2367-2385.
- [7] Bai, T.X. and Pollard, D.D. (2000) Fracture spacing in layered rocks: a new explanation based on the stress transition. *Journal of Structural Geology*, **22**, 43-57.
- [8] 孟庆峰,侯贵廷,潘文庆,琚岩,张庆莲,李乐,舒武林 (2011) 岩层厚度对碳酸盐岩构造裂缝面密度和分形分 布的影响. 高校地质学报,3,462-468.
- [9] 罗志立 (1994) 龙门山造山带的崛起和四川盆地的形成与演化. 成都科技大学出版社, 成都, 131-317.
- [10] 王金琪 (1990) 安县构造运动. 石油与天然气地质, 3, 223-234.