

文章编号: 0253-2697(2024)07-1078-14 DOI:10.7623/syxb202407004

从储层、烃源岩到输导体勘探

——以四川盆地须家河组致密砂岩气为例

郭彤楼¹ 熊亮¹ 杨映涛² 叶素娟²

(1. 中国石油化工股份有限公司西南油气分公司 四川成都 610041; 2. 中国石油化工股份有限公司西南油气分公司勘探开发研究院 四川成都 610041)

摘要:四川盆地须家河组资源潜力大,长期以来由于储层致密,断缝体高产难稳产,储量规模有限,致密砂岩层产量低,有储量无效益。为了解决“高产、稳产、规模”3个制约效益勘探的关键问题,融合以储层为勘探对象的常规天然气、以烃源岩为勘探对象的页岩气的勘探思路,形成了致密砂岩气输导体勘探新思路,建立了“双源供烃、断缝砂岩输导、复合成藏”的成藏模式,明确了“构造-输导体时空叠合控富、晚期有效裂缝控产、烃源岩-低渗透基质储层-输导体复合控稳”的富集高产规律。以致密砂岩气输导体成藏模式及富集高产规律为指导,在川西坳陷部署实施的15口井均获高产,破解了四川盆地须家河组长期以来存在的“有资源无储量、有储量低产量、有产量无气田”的难题,落实了川西坳陷合兴场地区千亿立方米级探明储量阵地,实现了川西坳陷须家河组致密砂岩气藏高效勘探开发,对四川盆地乃至同类型沉积盆地致密砂岩气藏效益勘探开发都具有重要指导意义。

关键词:成藏模式;富集高产规律;致密砂岩气输导体;三叠系须家河组;川西坳陷;四川盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

From reservoir, source to carrier beds exploration: a case study of tight sandstone gas in Xujiahe Formation, Sichuan Basin

Guo Tonglou¹ Xiong Liang¹ Yang Yingtao² Ye Sujuan²

(1. Sinopec Southwest Oil & Gas Company, Sichuan Chengdu 610041, China; 2. Exploration & Production Research Institute, Sinopec Southwest Oil & Gas Company, Sichuan Chengdu 610041, China)

Abstract: There is enormous resources potential in the Xujiahe Formation of Sichuan Basin. Owing to the tight reservoir, the fault-fracture bodies have high and unstable hydrocarbon production, as well as limited reserves scale; the tight sandstone reservoirs have low production, and cannot achieve benefits and efficiency, although with large reserves. In order to solve the key problems that limit efficient exploration, i. e., high production, stable production and reserves scale, the new prospecting idea for tight sandstone gas carrier beds has been formed by integrating the exploration ideas for conventional natural gas in reservoirs and shale gas from source rocks. Specifically, the paper establishes the accumulation model of “dual source hydrocarbon supply, transportation by fault-fracture bodies, composite hydrocarbon accumulation” for tight sandstone gas, and also clarifies the hydrocarbon enrichment and high production laws of “spatiotemporal superposition of structure-transportation for controlling reservoir enrichment, effective fracture controlling production in later period, composite combination of source rocks, low-permeability matrix reservoirs and carrier beds for controlling stable production”. Guided by the accumulation models for tight sandstone gas carrier beds, as well as the hydrocarbon enrichment and high production laws of tight sandstone gas, 15 wells deployed in the Hexingchang area of western Sichuan depression achieved high yield, thus solving the problem of “rich resources without reserves, large reserves with low production, high production without gas fields” in Xujiahe Formation, Sichuan Basin. Additionally, the field with the proven reserves of 100 billion cubic meters was built in Hexingchang area, western Sichuan depression. On this basis, the efficient exploration and development of ultra-low permeability tight sandstone gas reservoirs in the Xujiahe Formation of western Sichuan depression has been achieved. These achievements have important guidance significance for the efficient exploration and development of tight sandstone gas reservoirs in Sichuan Basin and similar sedimentary basins.

Key words: accumulation models; enrichment and high production regularities; tight sandstone gas carrier bed; Triassic Xujiahe Formation; western Sichuan depression; Sichuan Basin

引用:郭彤楼,熊亮,杨映涛,叶素娟.从储层、烃源岩到输导体勘探——以四川盆地须家河组致密砂岩气为例[J].石油学报,2024,45(7):1078-1091.

Cite:GUO Tonglou,XIONG Liang,YANG Yingtao,YE Sujuan.From reservoir,source to carrier beds exploration;a case study of tight sandstone gas in Xujiahe Formation,Sichuan Basin[J].Acta Petrolei Sinica,2024,45(7):1078-1091.

基金项目:中国石油化工股份有限公司科技攻关项目“西南探区天然气富集规律与目标评价”(P20059-3)资助。

第一作者及通信作者:郭彤楼,男,1965年10月生,2004年获同济大学博士学位,现为中国石油化工股份有限公司西南油气分公司正高级工程师,长期从事油气地质研究和勘探工作。Email:tlguo@163.com

1 问题的提出

须家河组致密砂岩气资源丰富^[1-3],是四川盆地油气勘探开发的主要层系之一^[4-5]。根据“十三五”(2016—2020年)油气资源评价结果,四川盆地须家河组致密砂岩气资源量为 $6.79 \times 10^{12} \text{ m}^3$,勘探前景广阔。众多学者围绕四川盆地须家河组成藏富集规律开展了大量研究。杨克明^[6]和李忠平等^[7]认为早期古构造叠合晚期裂缝系统是天然气富集区。李伟等^[8]基于四川盆地须家河组勘探实践,认为储集体、构造和裂缝是天然气成藏的主控因素。赵正望等^[9]则提出构造-优质储层和储渗体两类富集高产模式,认为裂缝和优质储层是高产的主要控制因素。郭彤楼^[10-11]基

于川东北马路背地区须家河组勘探实践,提出了“断缝体”的概念,认为“通源断裂、优质储层”是高产富集的关键因素。在这些地质认识的指导下,围绕断缝体/储渗体和优质储层两类勘探目标,四川盆地须家河组取得了一批勘探成果^[12-16],但一直未能实现规模商业开发。

1.1 地质背景

川西坳陷位于四川盆地西部,呈 NE 走向,总面积为 $3.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,具有“三隆两凹一斜坡”的构造格局^[17],可划分为龙门山前构造带、新场构造带、龙泉山构造带、成都凹陷、梓潼凹陷和中江斜坡 6 个次级构造单元^[18],目前须家河组致密砂岩气勘探开发主要集中在新场构造带须家河组二段(须二段)(图 1)。

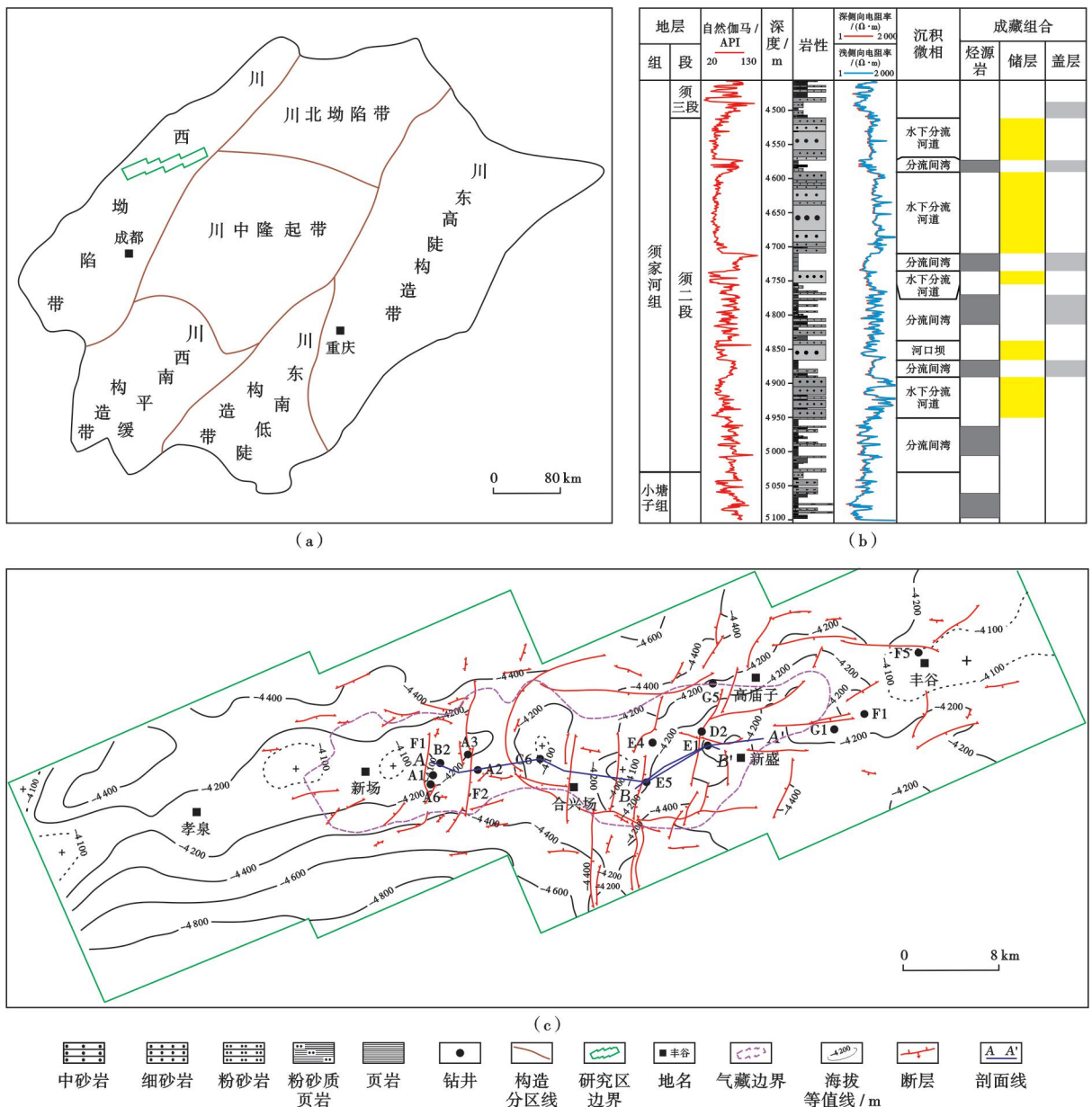


图 1 研究区位置、地层综合柱状图及须二段顶部构造

Fig. 1 Location, comprehensive stratigraphic column and top boundary structural of Member 2 of Xujiahe Formation of study area

新场构造带属于川西坳陷中部近EW向长轴背斜,经历了印支期、燕山期、喜马拉雅期等多期构造运动^[19-20]。须二段厚度为500~740 m,以辫状河三角洲前缘沉积体系为主^[21],岩性组合以灰色、灰白色中砂岩、细砂岩夹薄层灰黑色页岩、灰色泥质粉砂岩为主,发育少量煤线。纵向上多套三角洲前缘水下分流河道砂体与须二段内部烃源岩、小塘子组烃源岩构成多套生-储-盖组合,成藏组合优越,已探明新场、合兴场2个致密砂岩气田^[22-23]。

1.2 存在的关键问题

四川盆地须家河组已发现多个规模储量大气田,以断缝体和裂缝欠发育的基质储层为目标,总体的开发效果较差,主要表现在断缝体易高产难稳产,而裂缝欠发育的基质储层低产低效益,从而导致储量动用难度大。

1.2.1 高产难稳产

以断缝体为主要勘探目标,初期产量高,但产量递减快,易高产难稳产。如川西坳陷新场构造带F1断层附近A6井断缝体气藏(图1),2007年在须二段测试无阻流量高达百万立方米/天,投产后产量迅速降低,到2009年产气量仅约为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。川中隆起带的安岳气田须二段断缝体气藏年递减率也高达29.88%^[24],难以稳产。

1.2.2 低产低效益

由于断缝体分布范围受断层控制,储量规模有限,而裂缝欠发育的基质储层虽然储量规模大,但单井产量低,难以效益开发。如川西坳陷新场构造带的C6井(图1),其远离断裂发育区,储层裂缝欠发育,测试产量约为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,投产日产气量万余立方米已稳产6年,但单井产量低,经济效益差。

断缝体易高产难稳产、裂缝欠发育的基质储层低产低效益,导致长期以来勘探对象不明确,严重制约了四川盆地须家河组致密砂岩气藏勘探开发进程。

1.2.3 储量难动用

截至2020年,四川盆地须家河组已累计提交天然气探明储量超 $9\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$,探明了新场、安岳、广安、合川4个千亿立方米级大气田,但天然气产量仅为 $8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,探明储量动用率也仅为25.5%,陷入了“有资源无储量、有储量低产量、有产量无气田”的局面,长期未能实现规模商业开发。

针对上述问题,从2021年以来,通过转变勘探思路,将常规气与页岩气理论技术有机融合,创新提出了“断层-裂缝-高渗透基质储层”三位一体的致密砂岩气输导体勘探概念^[25]。针对高产、稳产和规模3个关键勘探问题,建立了须家河组“双源供烃、断缝砂输导、复

合成藏”致密砂岩气输导体成藏模式,明确了须家河组致密砂岩气输导体富集高产规律。以致密砂岩气输导体成藏模式及富集高产规律为指导,取得了显著的勘探开发效果,落实了川西坳陷合兴场千亿立方米探明储量阵地,实现了川西坳陷须家河组致密砂岩气藏高效勘探开发,这对于四川盆地乃至同类型沉积盆地致密砂岩气藏效益勘探开发具有重要指导意义。

2 输导体成藏关键要素

2.1 双源持续供烃是气藏富集的基础

2.1.1 烃源岩全周期持续供烃

前期气源对比研究表明^[26-27],新场构造带须二段天然气主要来自下伏小塘子组和须二段内部烃源岩。川西坳陷小塘子组烃源岩有机质类型以I、II型为主,有机碳含量均值为1.34%;须二段烃源岩有机质类型以III型干酪根为主,有机碳含量均值为2.08%,有机质丰度较高。小塘子组和须二段烃源岩镜质体反射率(R_o)均值分别为2.2%和1.9%,处于高成熟—过成熟阶段。川西坳陷小塘子组烃源岩广泛分布,厚度为90~210 m,须二段厚度为70~160 m,烃源岩厚度大,生烃潜力好。

根据川西坳陷须家河组低成熟度烃源岩样品封闭体系生烃模拟实验结果,结合川西坳陷新场构造带埋藏-热演化史,明确了烃源岩不同地史时期生烃演化过程和生烃潜力(图2、图3)。

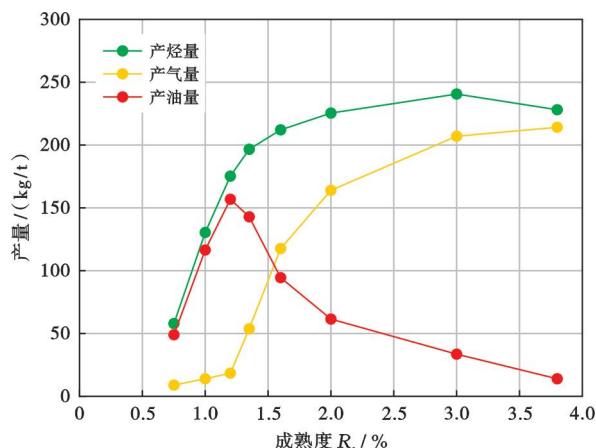


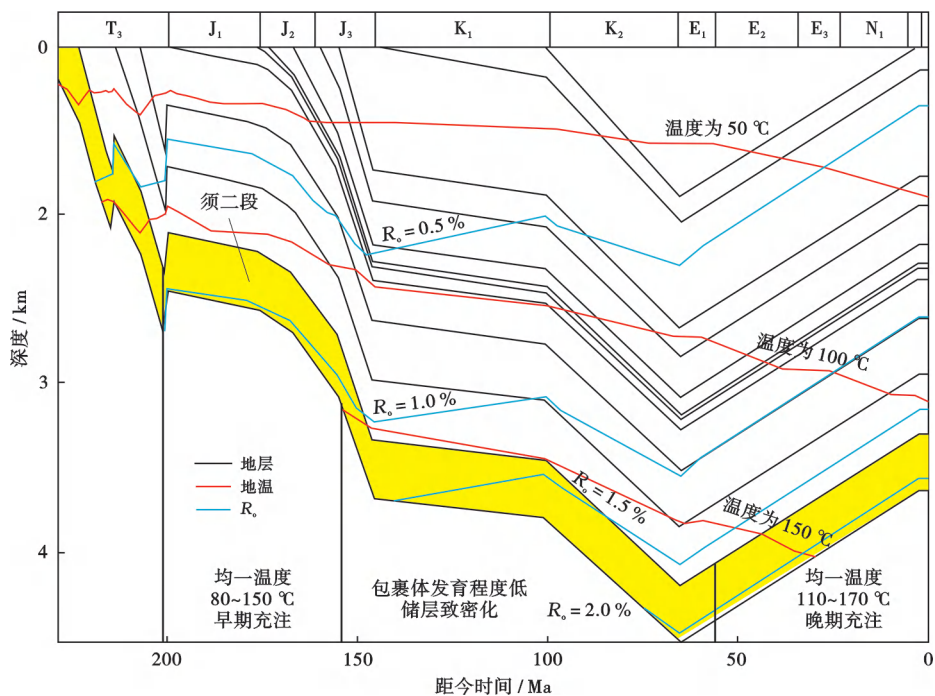
图2 川西坳陷须家河组泥页岩生烃演化模式

Fig. 2 Hydrocarbon generation and evolution model of shale rocks in Xujiahe Formation of the western Sichuan depression

印支运动末期,烃源岩处于未成熟阶段($R_o < 0.5\%$),该阶段基本无烃类产物。燕山运动早—中期,烃源岩处于低成熟—成熟阶段(R_o 值为 $0.5\% \sim 1.0\%$),该阶段演化产物以原油和低熟天然气为主(图2),且原油和低熟天然气排出效率较低(约为20%),多数原油以滞留烃的形式赋存在烃源岩层系内;燕山运动晚期,烃

源岩处于成熟—高成熟阶段(R_o 值为 1.0%~2.0%),干酪根在温度达到 80℃后开始大量降解生气,而原油大量裂解的温度条件为 160℃,因此该阶段烃类产物以干酪根降解气为主,部分为赋存在烃源岩层系内的原油裂解形成的原油裂解气^[28]。喜马拉雅运动期,烃源岩处于过成熟阶段($R_o > 2.0%$),该阶段除大量生成干酪根降解气外,烃源岩层系内的滞留原油也大量裂解形成原油裂解气,生烃量远高于燕山运动早—中期。虽然喜马拉雅运动导致地层抬升、温度降低,但抬升早期烃源岩仍具备生烃能力^[29],原油裂解也可在高温条件下持续进行,仍然能够生成一定数量的天然气。此外,须家河组煤系地层的吸附力较以

I型和II型干酪根为主的湖相泥页岩强,因此烃源岩层系内赋存有大量吸附气。随着地层持续抬升剥蚀,受温度压力条件变化影响,小塘子组和须二段烃源岩层系内赋存的干酪根裂解气和原油裂解气发生解吸膨胀脱溶,大量天然气沿输导体系充注成藏,这与现今须二段产出的天然气类型为煤型气、油型气及混合成因气的情况相吻合(图4)。四川盆地五峰组—龙马溪组富有机质泥页岩为 30~120 m、有机碳含量均值为 1.90%、 R_o 均值为 2.26%^[30],已提交天然气探明储量近 $3 \times 10^{12} \text{ m}^3$,产气量为 $240 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。证实了烃源岩层系内仍滞留有大量的成熟度天然气^[31-32]。



注: T₃—晚三叠世; J₁—早侏罗世; J₂—中侏罗世; J₃—晚侏罗世; K₁—早白垩世; K₂—晚白垩世; E₁—古新世; E₂—始新世; E₃—渐新世; N₁—中新世。

图3 川西坳陷新场构造带须家河组埋藏史-热演化史(据文献[25]修改)

Fig. 3 Burial-thermal evolution history of Xujiache Formation in the Xinchang structural belt of the western Sichuan depression

综上所述,川西坳陷须二段、小塘子组烃源岩自燕山运动早—中期起,始终处于生/排烃时期,具备全周期持续供烃的能力,为气藏形成奠定了充足的物质基础。

2.1.2 低渗透基质储层的有效供烃

目前大多数学者认为,受压实作用和胶结作用影响,须二段砂岩储层在晚侏罗世早期已进入致密化状态^[33-35]。根据前述烃源岩的生烃演化过程可知,燕山运动早—中期,烃源岩进入低成熟阶段,此时须二段储层尚未致密化,原油和低成熟度天然气可沿输导体系大面积网状运移进入储层,形成须二段基质储层整体低丰度含气的地质背景,这一观点已被众多学者证

实^[36-38]。而须二段砂岩储层在整体致密的背景下,局部发育高渗透基质储层,其渗透率集中分布在 0.1~1.0 mD^[25]。根据 E4 井须二段保压取心含气量测定结果可知,在平均渗透率仅为 0.06 mD 的低渗透基质储层内平均含气饱和度可达 53%,天然气 C₁/C₂ 均值为 14.3,说明低渗透基质储层内依然赋存大量早期的低成熟度天然气。由断层-裂缝-高渗透基质储层组成的输导体紧邻整体含气的低渗透基质储层,随着输导体气藏开采程度的逐渐增高,气藏压力逐渐降低,含气低渗透基质储层中的天然气必然在压力驱动下为输导体气藏持续供给大量低成熟度天然气。

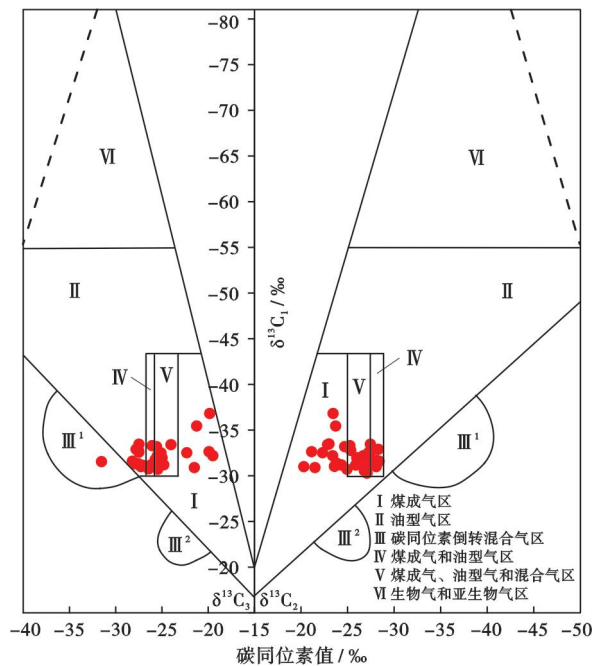


图4 川西坳陷新场构造带须二段天然气类型

Fig. 4 The natural gas types of Member 2 of Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of the western Sichuan depression

前人研究表明,随着天然气成熟度不断升高,天然气组分的 C_1/C_2 比值和 C_2/C_3 比值均呈逐渐升高的趋势^[39],甲烷的碳同位素值($\delta^{13}C_1$)则呈逐渐偏重的趋势^[17],说明天然气组分和碳同位素的变化均可反映天然气成熟度。新场构造带低渗透基质储层区 F1 井须二段天然气的 $\delta^{13}C_1$ 为 -32.64% ,显著低于近断层 A1 井的 $\delta^{13}C_1$ (-30.3%) (表 1),说明裂缝欠发育区的低渗透基质储层赋存的天然气甲烷同位素总体偏负。而新场构造带 A1 井和 A6 井紧邻 F1 断层(图 1),须二段裂缝发育程度较高,属于同一输导体气藏,且两口井分别于 1999 年和 2007 年在须二段测试获高产。根据天然气碳同位素特征,A6 井天然气成熟度低于 A1 井,证实了随着输导体气藏的开采,含有早期低成熟度天然气的低渗透基质储层具有向输导体气藏持续供气的作用。新场构造带 E1 井距离断层仅 400 m,须二段裂缝发育,该井于 2014 年测试获高产,属于典型的输导体气藏。近年来该井天然气成熟度与测试初期相比呈明显降低的趋势,同样证实了整体含低成熟度天然气的低渗透基质储层对输导体气藏具有良好的气源供给作用(表 1)。

2.2 断-缝-砂复合输导是天然气高效运聚的前提

川西坳陷须二段油气输导体体系由断层、裂缝和砂岩基质储层 3 部分组成,复合输导体体系不仅可作为天然气运移的有利通道,也为须二段天然气富集提供了规模储集空间。

表 1 典型钻井不同时期甲烷、乙烷同位素

Table 1 Isotopes of methane and ethane at different periods of typical wells

钻井	时间	$\delta^{13}C_1 / \%$	$\delta^{13}C_2 / \%$
A1	1999 年	-30.30	-27.06
		-30.30	-27.10
A6	2007 年	-31.16	-27.51
		-30.76	-27.00
	2014 年	-31.40	-23.80
	2022 年	-33.20	-24.70
E1	2023 年	-33.30	-25.30
		-33.49	-23.01
F1	2019 年	-32.64	-21.14

2.2.1 断-缝-砂复合输导体系是天然气运移的有利通道

须家河组沉积之后,在印支期、燕山期、喜马拉雅期多期构造运动作用下^[40],形成了一系列不同走向、不同级别的断层。如川西坳陷新场构造带发育 EW 向、NE 向和 NS 向 3 种不同走向的断层,平面上 EW 向断层普遍发育,NS 向断层主要分布在新场构造带中部地区(图 1)。断层以四级和五级断层为主,向下断至雷口坡组/小塘子组,向上断至须家河组三段。通过砂箱建立断层地质模型,模型参数见图 5,预留进/出气口并完成砂体填充,利用红色染色液将模型砂体饱含水,结合可调控压力氮气气泵,利用高清摄像机观察含气饱和度变化。二维砂箱模拟实验结果表明,断层是天然气运移的高速通道,随着充注程度不断加强,天然气优先顺断层充注到断层附近的高渗透砂岩中,证明相对高渗透砂岩能起到输导作用(图 5)。此外,新场构造带须二段裂缝充填物的流体包裹体均一温度(图 6)与埋藏史-热演化史分析表明,断层存在多期流体活动,表明燕山期至喜马拉雅期断层持续活动,具备持续输导供烃的能力。

前人研究表明,川西坳陷须二段主要发育低角度缝、斜交缝和高角度缝 3 种类型的裂缝^[20],岩心裂缝的开度一般为 0.1~2.0 mm。显微镜下薄片观察发现裂缝多呈定向分布,与构造应力作用相关^[41]。须二段的裂缝形成与断层密切相关,与早期印支期 EW 向断层相关的派生裂缝多被方解石、石英等次生矿物充填,而与晚期 NS 向断层相关的派生裂缝走向多呈 EW 向,与现今新场构造带最大水平主应力方向一致,多呈半充填、未充填状态,是油气运移的高速通道。显微镜下观察可见含烃包裹体呈带状、线状分布在碎屑颗粒裂缝中,部分裂缝内充填液态烃裂解形成的沥青,均表明裂缝是油气运移的高速通道(图 7)。

川西坳陷须二段砂岩在晚侏罗世之前尚未致密化,具备烃类大面积充注的条件,低成熟度油气沿断层高效纵向运移,大面积充注进入横向连片、纵向叠置的砂岩储层,现今须二段整体含气这一特征也体现了早

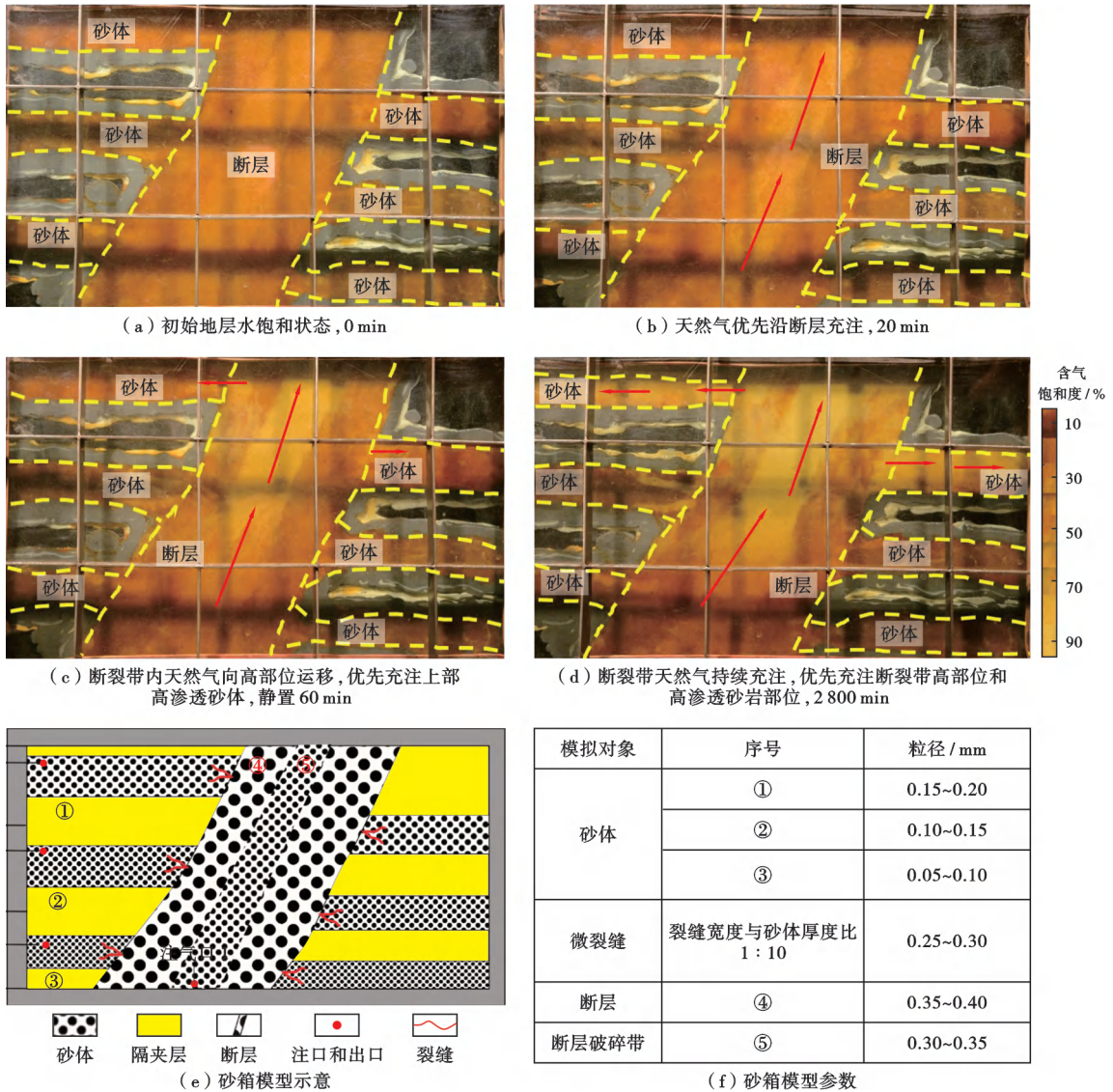


图 5 断层-裂缝-高渗透基质储层模型天然气充注二维砂箱物理模拟实验

Fig. 5 Physical simulation experiment of natural gas filling in two-dimensional sandbox of faults-fracture-high permeability matrix reservoir

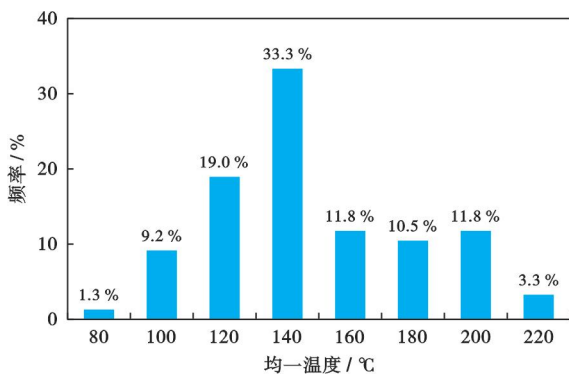


图 6 川西坳陷新场构造带须二段裂缝充填物包裹体均一温度直方图

Fig. 6 Homogeneous temperature histogram of fracture filling inclusions in Member 2 of Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of the western Sichuan depression

期断层输导的高效性,低渗透基质储层内平均含气饱和度可达 53%,蕴含的天然气储量规模巨大。燕山运动中一晚期受持续深埋作用影响,储层整体致密化形成低渗透致密储层。至喜马拉雅期,部分致密储层受构造改造形成高渗透基质储层,并与断层-裂缝构成输导体,是晚期高成熟度天然气运移的高速通道。根据 E4 井保压取心样品实测含气饱和度结果,高渗透基质储层含气饱和度高达 70%,推测断层、裂缝内含气丰度更高,且其中赋存的天然气 C_1/C_2 显著高于低渗透基质储层(图 8),说明输导体是晚期高成熟度天然气的高效运移通道。

2.2.2 断-缝-砂复合输导体系为天然气聚集提供模空间

传统地质理论认为,输导体系仅能作为天然气运

移的通道,但当天然气在源储压差作用下沿输导体系向上运移时,如果运移动力小于阻力,天然气受自封闭作用滞留于输导体系内^[42],就会形成输导体气藏。燕山运动早期,须二段砂岩储层与断层、裂缝组成的输导体系为原油和低成熟度天然气提供了规模储集空间,

奠定了须二段整体含低成熟度天然气的特征。喜马拉雅运动期,受构造应力改善影响,部分致密砂岩储层的物性得到改善,形成高渗透基质储层,并与晚期断层、裂缝组成复合输导体系,为晚期高成熟度天然气的运移提供高速通道。

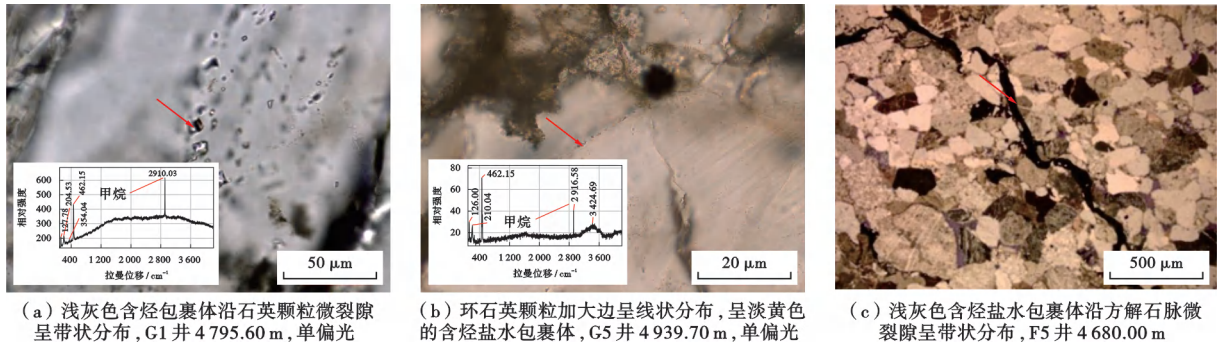


图7 川西坳陷新场构造带须二段含烃包裹体典型照片

Fig. 7 Typical photos of hydrocarbon inclusions of Member 2 of Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of the western Sichuan depression

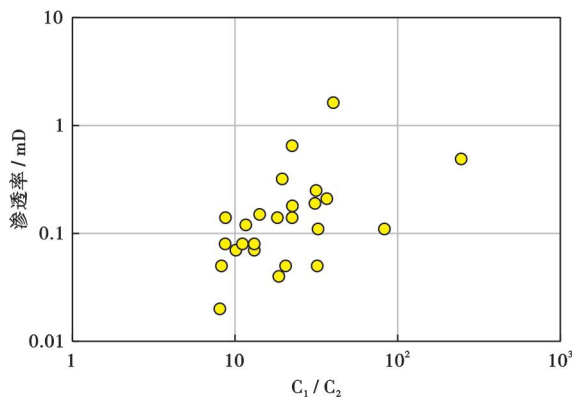


图8 川西坳陷新场构造带须二段天然气 C₁/C₂ 比值与储层渗透率关系

Fig. 8 Correlation between natural gas C₁/C₂ and reservoir permeability of Member 2 of Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of the western Sichuan depression

前人研究表明,断层由断层滑动面、滑动破碎带和诱导裂缝带3部分构成,断层滑动面两侧400 m范围内均是裂缝发育带^[43],因此新场构造带须二段断层及派生裂缝的有限展布空间为距离断层滑动面400 m的范围内。野外剖面实测也表明,断层面附近派生大量的裂缝(图9)。须二段钻井过程中频繁的钻井液漏失和厘米级的次生矿物发育也证实了地层内发育宽大裂缝(表2),显示其具有规模性的储集空间^[44]。而E4井距离断层900 m,虽然宏观裂缝发育程度较低,微裂缝发育的高渗透基质储层内赋存的大量高成熟度天然气的平均含气饱和度高达70%,表明在断层及派生裂缝展布范围外,也发育规模的高渗透基质储层。断层、



图9 野外断层破碎带典型照片

Fig. 9 Typical photos of field fault fracture zones

裂缝和高渗透基质储层组成的输导体可为晚期高成熟度天然气的运聚提供高效运移通道和规模储集空间。

2.3 源-输-储时空耦合决定了天然气多期复合成藏

根据天然气常规组分特征可知,川西坳陷新场构造带须二段现今产出天然气以高成熟度煤型气和混合成因气为主。而根据烃源岩生烃模拟结果可知,燕山运动

早期烃源岩演化产物以原油和低成熟度天然气为主,生烃量有限,说明须二段主成藏期并非是燕山运动早期。随着燕山运动晚期高成熟度天然气逐渐生成,此时储层已整体致密化,缺乏油气大量充注富集的储集条件。

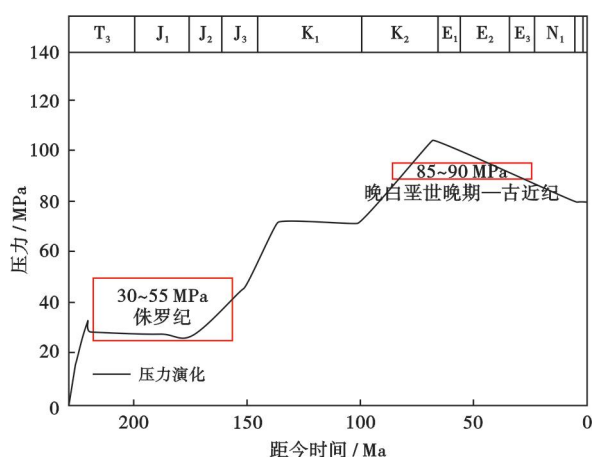
根据须二段包裹体捕获压力恢复结果可以看出,须二段含烃包裹体的捕获压力主要分布在两个区间,

分别是 34.2~53.2 MPa 和 86.3~89.3 MPa,结合须二段流体压力演化史(图 10)可以看出,须二段含烃包裹体主要形成于 2 个时期:侏罗纪和晚白垩世晚期—古近纪,晚白垩世晚期—古近纪的高成熟度天然气充注是须二段成藏富集的主要时期。综合分析认为,须二段主成藏期为喜马拉雅运动期。

表 2 川西坳陷新场构造带须二段典型钻井录井显示情况

Table 2 Typical drilling and logging display of Member 2 of Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of the western Sichuan depression

井号	天然气测试结果		录井显示	
	产量/(10 ⁴ m ³ /d)		次生矿物	钻井液漏失量/m ³
A1	38.00		见自形一半自形晶石英,部分呈晶簇状,小者为 0.5 mm×0.5 mm,大者为 4 mm×5 mm	51
A6	60.79		见 139 颗无色透明自形晶石英,大者为 4 mm×4 mm,小者为 1 mm×1 mm	2.1
B2	39.33		见 18 颗它形一半自形晶石英,大小为 (1 mm×1 mm)~(2 mm×3 mm)	477



注: T₃—晚三叠世; J₁—早侏罗世; J₂—中侏罗世; J₃—晚侏罗世; K₁—早白垩世; K₂—晚白垩世; E₁—古新世; E₂—始新世; E₃—渐新世; N₁—中新世。

图 10 川西坳陷新场构造带须二段古流体压力演化曲线

Fig. 10 Evolution curve of ancient fluid pressure of Member 2 of Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of the western Sichuan depression

根据构造、烃源岩和储层演化过程,结合源-输导-储层的时空配置关系,明确了川西坳陷须二段具有“油气多期充注、早期砂岩整体成藏、晚期输导体富集”的动态成藏过程。

(1) 燕山运动早—中期

该时期主要生成低成熟度油气,砂岩储层物性整体较好,原油和低成熟度天然气沿断层高效纵向运移,进入横向连片、纵向叠置的砂岩储层内,形成大面积低丰度油气藏,燕山期古隆起含气丰度相对较高。保压取心实测含气饱和度显示,赋存早期低成熟度天然气的低渗透基质储层平均含气饱和度为 53% [图 11(a)]。考虑到须二段广泛发育规模低渗透基质储层,其蕴含

的资源量依然十分可观。

(2) 燕山运动晚期

该时期须二段埋藏深度已达到最大,砂岩储层已整体致密化,且裂缝总体欠发育。浮力及源储压力差难以克服毛细管阻力,早期充注的低成熟度油气呈封存状态。而此时生成的高成熟度天然气仅沿断层附近发生小规模天然气充注,成藏规模有限 [图 11(b)]。

(3) 喜马拉雅运动期至今

受喜马拉雅期构造运动影响,须二段抬升,断裂系统发育,剥蚀卸载形成大量裂缝,部分低渗透致密储层改善形成高渗透基质储层。烃源岩中滞留的成熟度较高的干酪根裂解气和原油裂解气膨胀、脱吸和脱溶,并与高盐水和酸性流体一起运移,在断裂破碎带内发生快速分异或减压脱溶^[45],形成的高成熟度天然气沿着断层、裂缝及高渗透基质储层组成的输导体进行纵/横向运移,大量高成熟度天然气优先充注输导体高部位,形成现今赋存高成熟度天然气的输导体气藏 [图 11(c)],同时驱动早期充注的低成熟度天然气向远端的低渗透致密砂岩运移,导致输导体外围低渗透基质储层也具有相对较高的含气丰度。

3 富集高产规律

3.1 构造-输导体时空叠合控制天然气富集

根据前述成藏过程分析可知,断层-裂缝-砂岩储层构成的输导体始终是油气运聚的有利部位。燕山运动早—中期原油和低成熟度天然气沿断层高效运移进入常规砂岩储层形成大面积油气藏,须二段整体含气的这一特点也证实大面积整体成藏的过程。燕山运动早—中期构造高部位富集程度较高(图 12)。至喜马

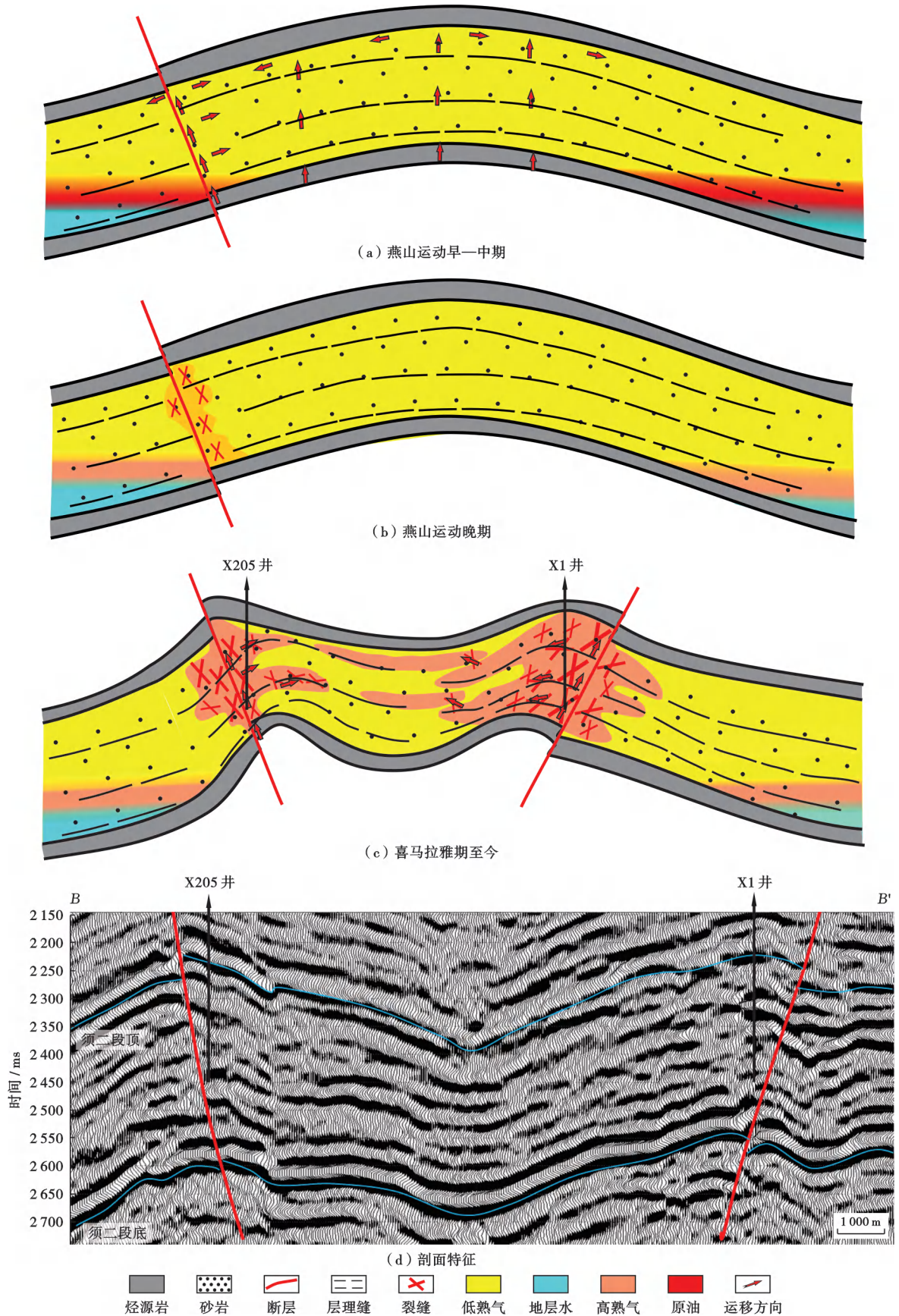


图 11 川西坳陷新场构造带须二段输导体动态成藏模式及地震剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 11 Dynamic accumulation model of carrier bed and seismic sections of Member 2 of Xujiache Formation in Xinchang structural belt of the western Sichuan depression

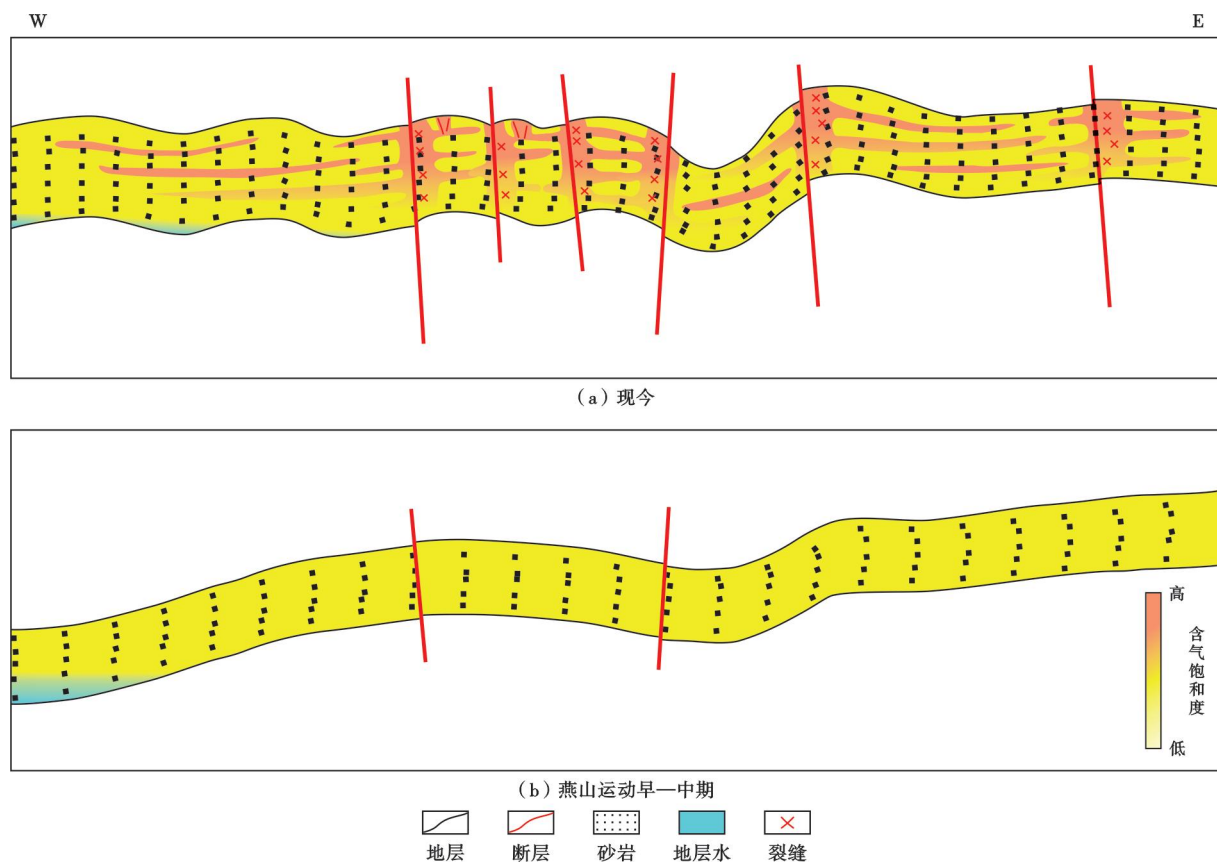


图 12 川西坳陷新场构造带须二段成藏演化剖面

Fig. 12 Evolution profile of Member 2 of Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of the western Sichuan depression

拉雅期,断层-裂缝-高渗透基质储层组成的输导体是晚期高成熟度天然气运移的高速通道和储集的有效空间。砂箱模拟实验也证实天然气在输导体高部位更为富集,即古今构造高部位、输导体中上部均是天然气富集有利构造位置,二者的时空叠合控制了天然气的富集。

3.2 晚期有效裂缝控制天然气高产

生烃模拟实验表明,须家河组烃源岩自燕山运动晚期进入生/排烃高峰期,高成熟度天然气大量生成。受须二段砂岩储层已整体致密化影响,高成熟度天然气规模充注主要发生于晚期断层、裂缝大量形成的喜马拉雅期。前述裂缝特征表明,与喜马拉雅运动晚期NS向断层有关的派生裂缝以中、高角度裂缝为主,且多呈半充填、未充填状态^[46],裂缝有效性好,这些有效裂缝不仅可将纵/横向相互孤立的高渗透基质储集砂体连通形成规模更大的输导体,为天然气聚集提供规模储集空间,也为高成熟度天然气运移和渗流提供高速通道。单井有效裂缝发育层段气测录井的 C_1/C_2 比值显著变高,也证实了晚期有效裂缝是高成熟度天然气运移的高效通道(图 13)。根据测试段内有效裂缝密度与无阻流量交会图可知(图 14),二者呈较明显的线性正相关关系,表明有效裂缝越发育,

气井产能越高。因此,晚期有效裂缝的发育程度控制单井产能。

3.3 烃源岩-低渗透基质储层-输导体复合控制天然气稳产

由动态成藏过程可知,输导体气藏具有多期充注成藏富集的特点,这构成了气井稳产的重要物质基础。而由烃源岩演化过程的全周期持续供烃特征可知,其现今依然具备供烃能力。如新场构造带 F2 断层附近的输导体气藏,2020 年至今,采出天然气的 C_1/C_2 比值由 118.66 逐渐升高至 131.75,证明烃源岩层系内高成熟度天然气对输导体气藏的持续补充(表 3)。除此之外,与输导体紧邻的低渗透基质储层的平均含气饱和度为 53%,其内赋存的大量低成熟度天然气也可对输导体气藏进行气源补充,使其具备稳产能力。如 E1 井自 2014 年投产以来,天然气成熟度与测试初期相比呈明显降低趋势,但该井产气量稳定约在 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$,已累积产气量超 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$,其试井压力恢复也表现为裂缝和基质储层的双重响应特征(图 15)。

因此,输导体在纵向上沟通多套烃源岩,在横向上沟通大面积低渗透基质储层,烃源岩层系内的高成熟度天然气和低渗透基质储层内低成熟度天然气均可对输导体进行供气,保障了气井的稳产。

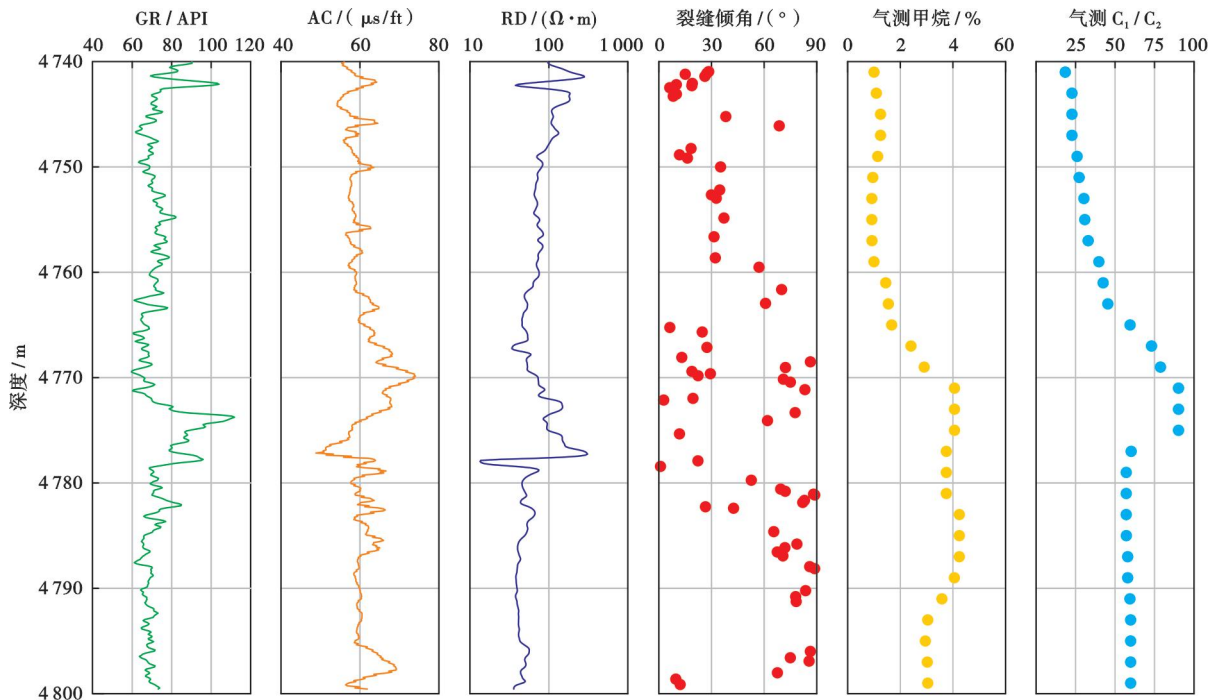


图 13 D2 井须二段裂缝、储层与气测甲烷、气测 C₁/C₂ 关系

Fig. 13 Relationship between fractures, reservoirs, methane and C₁/C₂ of gas logging of Member 2 of Xujiahe Formation for Well D2

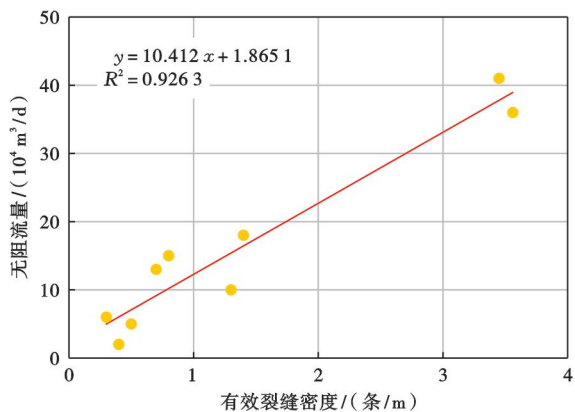


图 14 有效裂缝密度与测试无阻流量关系

Fig. 14 Relationship between effective crack density and test open flow rate

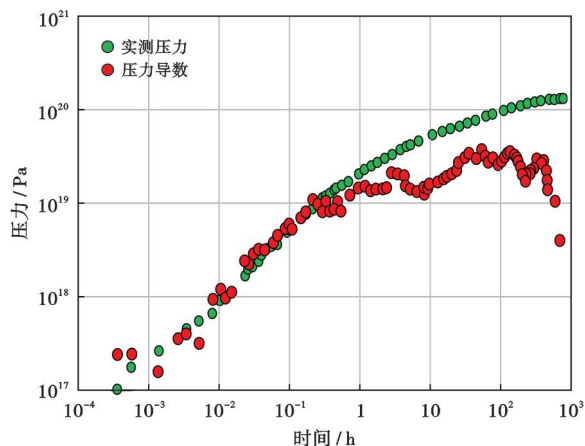


图 15 E1 井须二段压力恢复双对数曲线

Fig. 15 Double logarithmic curve of pressure recovery in Member 2 of Xujiahe Formation for Well E1

表 3 F2 输导体气藏不同时期 C₁/C₂ 比值与 C₂/C₃ 比值统计

Table 3 Statistics of C₁/C₂ and C₂/C₃ at different periods of

F2 carrier bed gas reservoir

年份	CH ₄ /%	C ₂ H ₆ /%	C ₃ H ₈ /%	C ₁ /C ₂	C ₂ /C ₃
2020 年	97.51	0.83	0.07	117.48	11.86
	97.58	0.82	0.07	119.00	11.71
	97.52	0.81	0.07	122.00	11.30
2022 年	97.41	0.81	0.07	120.26	11.57
	98.31	0.74	0.07	132.85	10.57
	95.37	0.73	0.07	130.64	10.43

4 结 论

(1) 四川盆地须家河组致密砂岩气输导体具有“双源供烃、断缝砂输导、复合成藏”的成藏特征,即小塘子组、须二段烃源岩高成熟度天然气与低渗透致密砂岩低成熟度天然气的双源供烃;持续活动的断层、晚期形成的裂缝以及高渗透基质储集层是油气高速运移的通道;油气多期充注、早—晚期多期成藏,致密砂岩整体含气,输导体富集。输导体既是油气运移的通道,

也是油气储集的主要场所。

(2) 构造、烃源岩、输导体及低渗透致密储层在时间和空间上的叠合,控制了四川盆地须家河组致密砂岩气输导体的富集高产,即构造-输导体时空叠合控富、晚期有效裂缝控产、烃源岩-低渗透致密储层-输导体复合控稳,解决了致密砂岩层产量低、效益差,断缝体高产、难稳产、勘探规模小的问题。

(3) 须家河组致密砂岩气输导体成藏模式及富集高产规律破解了须家河组“有资源无储量、有储量低产量、有产量无气田”的难题,实现了川西坳陷须家河组致密砂岩气藏高效勘探开发,丰富了四川盆地致密砂岩气的地质认识和勘探思路,对国内外同类型沉积盆地致密砂岩气的勘探开发具有重要的借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 郑和荣,刘忠群,徐士林,等.四川盆地中国石化探区须家河组致密砂岩气勘探开发进展与攻关方向[J].石油与天然气地质,2021,42(4):765-783.
ZHENG Herong, LIU Zhongqun, XU Shilin, et al. Progress and key research directions of tight gas exploration and development in Xujiahe Formation, Sinopec exploration areas, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 765-783.
- [2] 刘忠群.四川盆地须家河组深层致密砂岩气藏难动用储量开发技术新进展[J/OL].石油与天然气地质,2022,43(5). [2023-09-01]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=LeTZRn7a1NLQC_SwSQ6Jg7epVjaWBjT3XSBVjz5Ealyb9tLadHrz_zNiYMOUfyCtCZ_RlqilUr-in1yn9NsY1qTCWSDZaU6kQjPsnq59ThidMHVkkA01H8AbjljZ&-uniplatform=NZKPT&-language=gb.
LIU Zhongqun. New progress in development technology for difficult to produce reserves in deep tight sandstone gas reservoirs of the Xujiahe Formation in the Sichuan Basin[J/OL]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5). [2023-09-01]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=LeTZRn7a1NLQC_SwSQ6Jg7epVjaWBjT3XSBVjz5Ealyb9tLadHrz_zNiYMOUfyCtCZ_RlqilUr-in1yn9NsY1qTCWSDZaU6kQjPsnq59ThidMHVkkA01H8AbjljZ&-uniplatform=NZKPT&-language=gb.
- [3] 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.
YANG Keming, ZHU Hongquan, YE Jun, et al. Geological characteristics of tight sandstone gas reservoirs in West Sichuan Basin[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [4] 卞从胜,王红军,汪泽成,等.四川盆地致密砂岩气藏勘探现状与资源潜力评价[J].中国工程科学,2012,14(7):74-80.
BIAN Congsheng, WANG Hongjun, WANG Zecheng, et al. Exploration status and potential evaluation of tight gas in Sichuan Basin[J]. Strategic Study of CAE, 2012, 14(7): 74-80.
- [5] 郑志红,李登华,白森舒,等.四川盆地天然气资源潜力[J].中国石油勘探,2017,22(3):12-20.
ZHENG Zhihong, LI Denghua, BAI Senshu, et al. Resource potentials of natural gas in Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(3): 12-20.
- [6] 杨克明.川西坳陷须家河组天然气成藏模式探讨[J].石油与天然气地质,2006,27(6):786-793.
YANG Keming. Gas reservoiring mode in Xujiahe Formation of western Sichuan depression[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 786-793.
- [7] 李忠平,黎华继,冉旭,等.致密碎屑岩气藏成藏机理深化研究及开发应用——以新场气田须二段气藏为例[J].天然气工业,2013,33(4):48-51.
LI Zhongping, LI Huajie, RAN Xu, et al. A deep investigation into tight elastic gas pooling mechanism and its application; a case study of the 2nd Member of the Xujiahe Formation gas reservoirs in the Xinchang Gas Field, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(4): 48-51.
- [8] 李伟,邹才能,杨金利,等.四川盆地上三叠统须家河组气藏类型与富集高产主控因素[J].沉积学报,2010,28(5):1037-1045.
LI Wei, ZOU Caineng, YANG Jinli, et al. Types and controlling factors of accumulation and high productivity in the Upper Triassic Xujiahe Formation gas reservoirs, Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(5): 1037-1045.
- [9] 赵正望,唐大海,王小娟,等.致密砂岩气藏天然气富集高产主控因素探讨——以四川盆地须家河组为例[J].天然气地球科学,2019,30(7):963-972.
ZHAO Zhengwang, TANG Dahai, WANG Xiaojuan, et al. Discussion on main controlling factors of natural gas enrichment and high yield in tight sandstone gas reservoirs; case study of Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(7): 963-972.
- [10] 郭彤楼.川东北地区陆相两类砾岩岩石与储层特征[J].地质科学,2012,47(3):776-787.
GUO Tonglou. Characteristics of rock and reservoir of two kinds of continental facies conglomerates in northeast Sichuan Basin [J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 2012, 47(3): 776-787.
- [11] 郭彤楼.四川盆地北部陆相大气田形成与高产主控因素[J].石油勘探与开发,2013,40(2):139-149.
GUO Tonglou. Key controls on accumulation and high production of large non-marine gas fields in northern Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 139-149.
- [12] 唐大海,谭秀成,王小娟,等.四川盆地须家河组致密气藏成藏要素及有利区带评价[J].特种油气藏,2020,27(3):40-46.
TANG Dahai, TAN Xiucheng, WANG Xiaojuan, et al. Tight gas accumulation elements and favorable zone evaluation of Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(3): 40-46.
- [13] 段永明,张岩,刘成川,等.川西致密砂岩气藏开发实践与认识[J].天然气地球科学,2016,27(7):1352-1359.
DUAN Yongming, ZHANG Yan, LIU Chengchuan, et al. Practice and understanding of tight sand gas reservoir development in western Sichuan, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(7): 1352-1359.
- [14] 李王鹏,刘忠群,胡宗全,等.四川盆地川西坳陷新场须家河组二段致密砂岩储层裂缝发育特征及主控因素[J].石油与天然气地质,2021,42(4):884-897.
LI Wangpeng, LIU Zhongqun, HU Zongquan, et al. Characteristics of and main factors controlling the tight sandstone reservoir fractures in the 2nd Member of Xujiahe Formation in Xinchang area, western Sichuan depression, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 884-897.
- [15] 何曼如,陈飞,徐国盛,等.四川盆地须家河组致密砂岩天然气富集规律[J].成都理工大学学报(自然科学版),2014,41(6):743-751.
HE Manru, CHEN Fei, XU Guosheng, et al. Tight sandstone gas accumulation pattern in Upper Triassic Xujiahe Formation of Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(6): 743-751.

- [16] 王威,凡睿. 四川盆地北部须家河组“断缝体”气藏特征及勘探意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2019, 46(5): 541-548.
WANG Wei, FAN Rui. Characteristics of Xujiache Formation fault-fracture reservoirs in the northern Sichuan Basin and its exploration significance[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2019, 46(5): 541-548.
- [17] 左胜杰,王玉杞,陈冬霞,等. 川西拗陷叠覆型油气区天然气地球化学特征与成因机制[J]. 东北石油大学学报, 2023, 47(1): 1-14.
ZUO Shengjie, WANG Yuqi, CHEN Dongxia, et al. Geochemical characteristics and genesis mechanism of natural gas in overlapped oil and gas area of western Sichuan depression[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2023, 47(1): 1-14.
- [18] 叶素娟,杨映涛,张玲. 四川盆地川西拗陷上三叠统须家河组三段和五段“甜点”储层特征及分布[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 829-840.
YE Sujuan, YANG Yingtao, ZHANG Ling. Characteristics and distribution of “sweet spot” reservoirs in the third and fifth Members of Upper Triassic Xujiache Formation, western Sichuan depression, Sichuan[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 829-840.
- [19] 杨克明. 四川盆地“新场运动”特征及其地质意义[J]. 石油实验地质, 2014, 36(4): 391-397.
YANG Keming. Characteristics of Xinchang movement in Sichuan Basin and its geological significance[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(4): 391-397.
- [20] 李林涛,庞雄奇,熊亮,等. 运用剥蚀量恢复技术进行构造圈闭演化研究——以川西拗陷中段须家河组为例[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(3): 441-448.
LI Lintao, PANG Xiongqi, XIONG Liang, et al. Recovery of structural trap evolution by mean of denudation value: a case of Upper Triassic Xujiache Formation layer in middle section of West Sichuan depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(3): 441-448.
- [21] 商晓飞,李蒙,刘君龙,等. 基于源-汇系统的砂体分布预测与三维地质建模——以四川盆地川西拗陷新场构造带须二段为例[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 62-72.
SHANG Xiaofei, LI Meng, LIU Junlong, et al. Source-sink system based sand body distribution prediction and 3D geological modeling: a case study of the 2nd Member of Xujiache Formation in Xinchang structural belt of western Sichuan depression, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 62-72.
- [22] 刘君龙,胡宗全,刘忠群,等. 四川盆地川西拗陷新场须家河组二段气藏甜点模式及形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 852-862.
LIU Junlong, HU Zongquan, LIU Zhongqun, et al. Gas pool sweet spot models and their forming mechanism in the Xu 2 Member in Xinchang area, western Sichuan depression, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 852-862.
- [23] 李亚晶,陈天胜,邓美洲. 超致密碎屑岩气藏“甜点”预测——以新场-合兴场地区须二气藏为例[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(28): 12031-12039.
LI Yajing, CHEN Tiansheng, DENG Meizhou. “Sweet Spots” prediction for super tight clastic sandstone gas reservoirs: an example from the 2nd Member of Xujiache Formation gas reservoir in Xinchang-Hexingchang area[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(28): 12031-12039.
- [24] 罗炫,杨通水,杨曦. 致密凝析有水气藏断层特征及其对开发效果的影响——以安岳气田须二气藏为例[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(4): 477-482.
LUO Xuan, YANG Tongshui, YANG Xi. Fault characteristics of water-bearing tight condensate gas reservoirs and their effects on development effectiveness: a case study on the Xu 2 gas reservoir in Anyue gasfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(4): 477-482.
- [25] 郭彤楼,熊亮,叶素娟,等. 输导层(体)非常规天然气勘探理论与实践——四川盆地新类型页岩气与致密砂岩气突破的启示[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1): 24-37.
GUO Tonglou, XIONG Liang, YE Sujuan, et al. Theory and practice of unconventional gas exploration in carrier beds: insight from the breakthrough of new type of shale gas and tight gas in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(1): 24-37.
- [26] 刘海亮,刘四兵,周栋,等. 四川盆地西部致密砂岩气来源及运移地球化学示踪[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(8): 1127-1141.
LIU Hailiang, LIU Sibing, ZHOU Dong, et al. Geochemical indicators for tracing the source and migration of the tight sandstone gas in western Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(8): 1127-1141.
- [27] 白帆,吴小奇,曾华盛,等. 川西新场地区须二段天然气成因类型和来源[J]. 石油实验地质, 2015, 37(5): 633-640.
BAI Fan, WU Xiaoqi, ZENG Huasheng, et al. Genetic types and sources of natural gases reservoired in the second Member of the Xujiache Formation in the Xinchang area of the western Sichuan depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(5): 633-640.
- [28] 赵文智,王兆云,张水昌,等. 有机质“接力成气”模式的提出及其在勘探中的意义[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 1-7.
ZHAO Wenzhi, WANG Zhaoyun, ZHANG Shuichang, et al. Successive generation of natural gas from organic materials and its significance in future exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 1-7.
- [29] 胡国艺,李振铎,李志生,等. 降温热模拟实验中烃源岩成熟度和产气率的变化特征[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 253-257.
HU Guoyi, LI Zhenduo, LI Zhisheng, et al. Characteristics of maturity and gas generating yield of source rocks in thermal simulation experiment with lowering temperature[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(2): 253-257.
- [30] 熊亮,赵勇,魏力民,等. 威荣海相页岩气田页岩气富集机理及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2023, 44(8): 1365-1381.
XIONG Liang, ZHAO Yong, WEI Limin, et al. Enrichment mechanisms and key exploration and development technologies of shale gas in Weirong marine shale gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8): 1365-1381.
- [31] 聂海宽,李沛,党伟,等. 四川盆地及周缘奥陶系一志留系深层页岩气富集特征与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(4): 648-659.
NIE Haikuan, LI Pei, DANG Wei, et al. Enrichment characteristics and exploration directions of deep shale gas of Ordovician-Silurian in the Sichuan Basin and its surrounding areas, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(4): 648-659.
- [32] 孙焕泉,蔡勋育,胡德高,等. 页岩气立体开发理论与技术——以四川盆地涪陵页岩气田为例[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 573-584.
SUN Huanquan, CAI Xunyu, HU Degao, et al. Theory, technology and practice of shale gas three-dimensional development: a case study of Fuling shale gas field in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 573-584.
- [33] 李嵘,张娣,朱丽霞. 四川盆地川西拗陷须家河组砂岩致密化研

- 究[J]. 石油实验地质, 2011, 33(3): 274-281.
- LI Rong, ZHANG Di, ZHU Lixia. Densification of Upper Triassic Xujiahe tight sandstones, western Sichuan, China[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(3): 274-281.
- [34] 郭迎春, 庞雄奇, 陈冬霞, 等. 川西坳陷中段须二段致密砂岩储层致密化与相对优质储层发育机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(增刊 2): 21-32.
- GUO Yingchun, PANG Xiongqi, CHEN Dongxia, et al. Densification of tight gas sandstones and formation mechanism of relatively high-quality reservoir in the second Member of the Xujiahe Formation, western Sichuan depression[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2012, 42(S2): 21-32.
- [35] 肖艳, 彭军, 张纪智, 等. 川西前陆盆地中段须家河组二段储层储集空间特征及演化[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(3): 501-507.
- XIAO Yan, PENG Jun, ZHANG Jizhi, et al. Reservoir spaces of the second section of Xujiahe Formation and evolution in middle part of West Sichuan foreland basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(3): 501-507.
- [36] 张世华, 田军, 叶素娟, 等. 川西坳陷新场构造带须二段气藏成藏过程[J]. 天然气工业, 2019, 39(增刊 1): 17-22.
- ZHANG Shihua, TIAN Jun, YE Sujuan, et al. Reservoir formation process of Xu-2 gas reservoir in Xinchang structural belt of West Sichuan depression[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(S1): 17-22.
- [37] 张世华. 川西坳陷须二段断裂演化特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020, 47(4): 385-394.
- ZHANG Shihua. Fault evolution characteristics of the Member 2 of Xujiahe Formation in the western Sichuan depression, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2020, 47(4): 385-394.
- [38] 张豪, 蒋裕强, 周亚东, 等. 川中高石梯地区须二段气藏富气主控因素[J]. 四川地质学报, 2022, 42(2): 234-240.
- ZHANG Hao, JIANG Yuqiang, ZHOU Yadong, et al. Main controlling factors of gas accumulation in the second Member of the Xujiahe Formation in the Gaoshiti area, Central Sichuan[J]. Acta Geologica Sichuan, 2022, 42(2): 234-240.
- [39] 谢增业, 李志生, 魏国齐, 等. 腐泥型干酪根热降解成气潜力及裂解气判识的实验研究[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(6): 1057-1066.
- XIE Zengye, LI Zhisheng, WEI Guoqi, et al. Experimental research on the potential of sapropelic kerogen cracking gas and discrimination of oil cracking gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(6): 1057-1066.
- [40] 邓虎成, 周文, 周秋娟, 等. 新场气田须二段气藏天然裂缝有效性定量表征方法及应用[J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 1087-1097.
- DENG Hucheng, ZHOU Wen, ZHOU Qiumei, et al. Quantification characterization of the valid natural fractures in the 2nd Xu Member, Xinchang gas field[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(3): 1087-1097.
- [41] 白斌, 邹才能, 朱如凯, 等. 川西南部须二段致密砂岩储层构造裂缝特征及其形成期次[J]. 地质学报, 2012, 86(11): 1841-1846.
- BAI Bin, ZOU Caineng, ZHU Rukai, et al. Characteristics and formation stage-times of structural fractures in tight sandstone reservoir of the 2nd Member of Xujiahe Formation in southwestern Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(11): 1841-1846.
- [42] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 论非常规油气成藏机理: 油气自封闭作用与分子间作用力[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 437-452.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. The mechanism of unconventional hydrocarbon formation: hydrocarbon self-containment and intermolecular forces[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 437-452.
- [43] 刘振峰, 刘忠群, 郭元岭, 等. “断缝体”概念、地质模式及其在裂缝预测中的应用——以四川盆地川西坳陷新场地区须家河组二段致密砂岩气藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 973-980.
- LIU Zhenfeng, LIU Zhongqun, GUO Yuanling, et al. Concept and geological model of fault-fracture reservoir and their application in seismic fracture prediction: a case study on the Xu 2 Member tight sandstone gas pool in Xinchang area, western Sichuan depression in Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 973-980.
- [44] 姜自然, 陆正元, 刘斐, 等. 川西坳陷新场气田须家河组宽大裂缝及其油气地质意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2023, 50(1): 34-42.
- JIANG Ziran, LU Zhengyuan, LIU Fei, et al. Study of Xujiahe Formation macro-fractures in Xinchang gas field in western Sichuan depression and their oil & gas geological significance[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2023, 50(1): 34-42.
- [45] 赵文智, 王红军, 徐春春, 等. 川中地区须家河组天然气藏大范围成藏机理与富集条件[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 146-157.
- ZHAO Wenzhi, WANG Hongjun, XU Chunchun, et al. Reservoir-forming mechanism and enrichment conditions of the extensive Xujiahe Formation gas reservoirs, central Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 146-157.
- [46] 刘君龙, 刘忠群, 刘振峰, 等. 四川盆地新场构造带深层须二段致密砂岩断褶裂缝体特征和地质模式[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 530-540.
- LIU Junlong, LIU Zhongqun, LIU Zhenfeng, et al. Geological characteristics and models of fault-fold-fracture body in deep tight sandstone of the second Member of Upper Triassic Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 530-540.

(收稿日期 2023-10-18 改回日期 2024-02-19 编辑 王培玺)