

四川盆地川西坳陷新场须家河组二段气藏甜点模式及形成机理

刘君龙¹, 胡宗全¹, 刘忠群¹, 金武军¹, 肖开华¹, 毕有益², 李吉通¹

(1. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 中国石化 西南油气分公司, 四川 成都 610081)

摘要:致密砂岩气藏甜点评价是储量有效动用的关键。基于四川盆地川西坳陷新场须家河组二段气藏精细解剖, 阐明了气藏甜点地质特征, 建立了气藏甜点模式和识别标准, 明确了甜点空间分布特征, 探讨了致密气藏甜点形成机理。结果表明: ①有效储层划分为两种类型, 分别为平缝发育的中-粗粒砂岩和块状层理的中粒砂岩, 且有效裂缝为倾角大于 30°的构造缝; ②气藏甜点可以划分 3 种类型, 分别为断缝型、层理缝型和孔隙型甜点, 断缝型甜点高角度裂缝较发育, 主要分布在 SN 向断裂所控制的断缝体内, 层理缝及孔隙型甜点高角度缝不发育, 主要分布在断缝体之外的优质储层内; ③构造位置较高的有利含气区是新场须二段气藏甜点发育的基础, 晚期断裂影响的断缝体决定了断缝型甜点的形成, 在断缝体之间, 优质储层品质是层理缝及孔隙型甜点形成的主要控制因素。明确气藏甜点模式, 阐明甜点形成机理, 一方面可以深化致密气藏甜点理论认识, 另一方面也可以为甜点分布预测和可动储量评价提供有力支撑。

关键词:甜点模式; 评价标准; 断缝体; 优质储层; 致密砂岩气藏; 须家河组; 四川盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Gas pool sweet spot models and their forming mechanism in the Xu 2 Member in Xinchang area, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

Liu Junlong¹, Hu Zongquan¹, Liu Zhongqun¹, Jin Wujun¹, Xiao Kaihua¹, Bi Youyi², Li Jitong¹

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. Southwest Oil & Gas Branch Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: Sweet spot evaluation of the tight sandstone reservoirs is of great importance to effectively developing reserves. The elaborate description of the gas pools in the 2nd member of Xujiahe Formation (Xu 2 Member/T₃x²), serves to establish the sweet spot model and formulate the criteria for identification, and clarify the geological distribution of the sweet spots. Furthermore, the forming mechanism of the sweet spots in tight sandstone gas pools is discussed. The results show that: (1) the effective reservoirs can be grouped into two categories, namely the medium-to-coarse-grained sandstone with flat fractures (with a dip angle less than or equal to 10°), and the massive medium-to-coarse-grained sandstone; the effective fractures are structural fractures with a dip angle greater than 30°. (2) The sweet spots can be classified into three categories, namely the fault-, bedding fissure-, and pore-dominated categories. The first one is characterized by high dip angle fractures, mainly developed in the fault-fracture body dominated by SN-oriented faults; the last two are characterized by less developed high dip angle fractures, mainly distributed in high-quality formations outside of the fault-fracture body. (3) Gas-bearing zones of relatively high tectonic position serve as the basis factor for the sweet spot development in T₃x², the fault-fracture body affected by later faulting is a major factor controlling sweet spot growth, and the quality of favorable formations controls the formation of the other two categories. In all, it is of great significance to building the sweet spot models and identifying its forming mechanism for the gas pools, which could deepen our understanding on the sweet spot-related theories of tight sandstone gas pools, and is of strong support to the

收稿日期: 2020-10-19; 修订日期: 2021-06-23。

第一作者简介: 刘君龙(1988—), 男, 博士、高级工程师, 沉积学、石油地质学。E-mail: junlong2007@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05002-006); 中国石化科技部项目(P18089-4)。

片^[13,28],自下而上可以划分为10个砂层组(图1c),其中 $Tx^{2(2)}$ 和 $Tx^{2(4)}$ 砂组砂体厚度最大,也是研究区的主要产层。研究区三维地震资料满区覆盖,钻遇/钻揭须二段的井位44口,分析测试资料齐全。

2 气藏甜点地质特征

新场须二段气藏整体为“相控”背景下的构造岩性气藏。前期研究发现,构造位置、优质储层和有效裂缝是气井产能的主要控制因素^[9,13,27]。本文重点围绕气藏地质甜点的有效基质储层、有效裂缝和含气性等3个关键指标开展研究,分析其基本特征,明确地质评价标准。

2.1 有效基质储层

新场须二段储层整体致密,平均基质孔隙度为3.89%,平均基质渗透率为 $0.06 \times 10^{-3} \mu m^2$,在整体致密背景下,发育相对优质储层。优质储层的发育主要受控于沉积相影响,其次为成岩作用。一般地,发育在分流河道中和粒度较粗的储层,沉积物分选较好,原生粒间孔发育程度高,储层物性较好,局部基孔隙度可以达到8.00%,如X10井和XC12井的 $Tx^{2(4)}$ 砂组。

新场须二段有效基质储层可以分为平缝发育的A型和平缝不发育的B型(图2a),基于岩心分析化验分析,A型储层渗透率大于 $0.3 \times 10^{-3} \mu m^2$,B型储层渗透率小于 $0.3 \times 10^{-3} \mu m^2$ 。A型储层主要发育在须二中亚段,粒度以中-粗粒为主(图2b—e),平行层理、泥砾和煤线等沉积构造的发育,增加了储层渗透性;B

型储层主要发育在须二上亚段,粒度以中-细粒为主(图2f—i),以块状为主,几乎不发育层理。

2.2 有效裂缝

新场须二段裂缝可以划分立缝(倾角 $\geq 80^\circ$)、高角度缝(倾角 $60^\circ \sim 80^\circ$)、斜缝(倾角 $30^\circ \sim 60^\circ$)、低角度缝(倾角 $10^\circ \sim 30^\circ$)和平缝(倾角 $\leq 10^\circ$)5种类型,其中以低角度缝和斜缝为主,约占75%。为了明确对产能贡献最大的有效裂缝类型,本文开展了不同类型裂缝参数(如长度、密度和开度等)与产能(如无阻流量和累计产气量等)之间相关分析,结果表明:①产能与裂缝密度和产状之间相关性最好,裂缝越发育,角度越高,气井初期产能越高,累计产气量越大(图3a—c);②倾角大于 30° 的构造缝越发育,裂缝密度越大,气井初期产能越高。综上,倾角大于 30° 的构造缝(图3d—f)是须二段的有效裂缝类型。

2.3 含气性

新场须二段气藏储层致密、裂缝系统复杂,导致气水空间规律不清。前期研究认为,新场须二段气藏整体为一个相控背景下的构造岩性气藏(图4)。在平面上,天然气的分布主体受构造影响。一般构造高的位置,含气性好,如X2井、X851井和X601井等,均位于南北向断裂所控制的断垒高点;在构造较低的位置,含气风险较大,如XC7井、CX560井和XC12井等。在纵向上,须二下亚段含水程度最高,须二中亚段为气水同出,须二上亚段几乎不含水。此外,气井在生产过程中,受复杂地质特征影响,地层水也会发生不同方向的水窜。在地

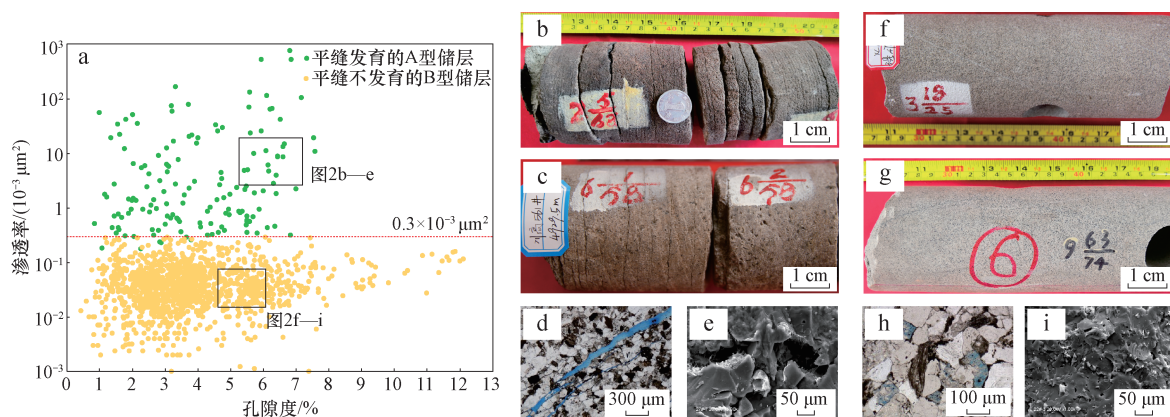


图2 川西坳陷新场须二段储层物性特征及典型岩心照片

Fig. 2 Physical properties and typical core images of the T_3x^2 in Xinchang area, Western Sichuan Depression

a. 孔-渗关系交会图; b. 千层饼/平行层理粗砂岩, XC7井, 埋深5 186.03 m, $Tx^{2(6)}$, 岩心; c. 千层饼/平行层理中砂岩, CG561井, 埋深4 929.50 m, $Tx^{2(4)}$, 岩心; d. 发育微裂缝, X856井, 埋深4 722.45 m, $Tx^{2(2)}$, SEM; e. 粒间孔, 孔内充填伊利石及绿泥石, X10井, 埋深4 883.38 m, $Tx^{2(4)}$, SEM; f. 块状层理中砂岩, XC12井, 埋深4 767.30 m, $Tx^{2(4)}$, 岩心; g. 块状层理中砂岩, CH127井, 埋深4 642.60 m, $Tx^{2(2)}$, 岩心; h. 岩屑孔、杂基孔, XC12井, 埋深4 820.10 m, $Tx^{2(4)}$, SEM; i. 石英颗粒内溶孔, CX560井, 埋深4 807.01 m, $Tx^{2(2)}$, SEM

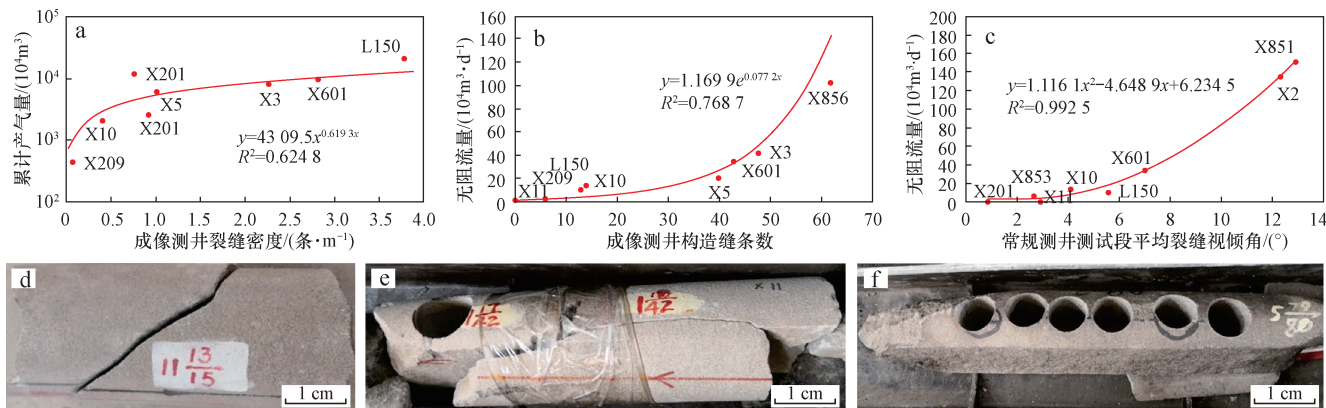


图3 川西坳陷新场须二段有效裂缝类型及典型岩心照片

Fig. 3 Effective fractures of diverse types and typical core images of the T_3x^2 in Xinchang area, Western Sichuan Depression

a. 成像测井裂缝密度与累计产气量交会图; b. 成像测井构造缝(立缝、高角度缝和斜缝)条数与无阻流量交会图; c. 常规测井测试段平均裂缝视倾角与无阻流量交会图; d. 斜缝, X12井, 埋深4 827.5 m, $T_{x^{2(4)}}$, 岩心; e. 高角度缝, L150井, 埋深4 730.4 m, $T_{x^{2(2)}}$, 岩心; f. 立缝, CH127井, 埋深4 577.6 m, $T_{x^{2(1)}}$, 岩心

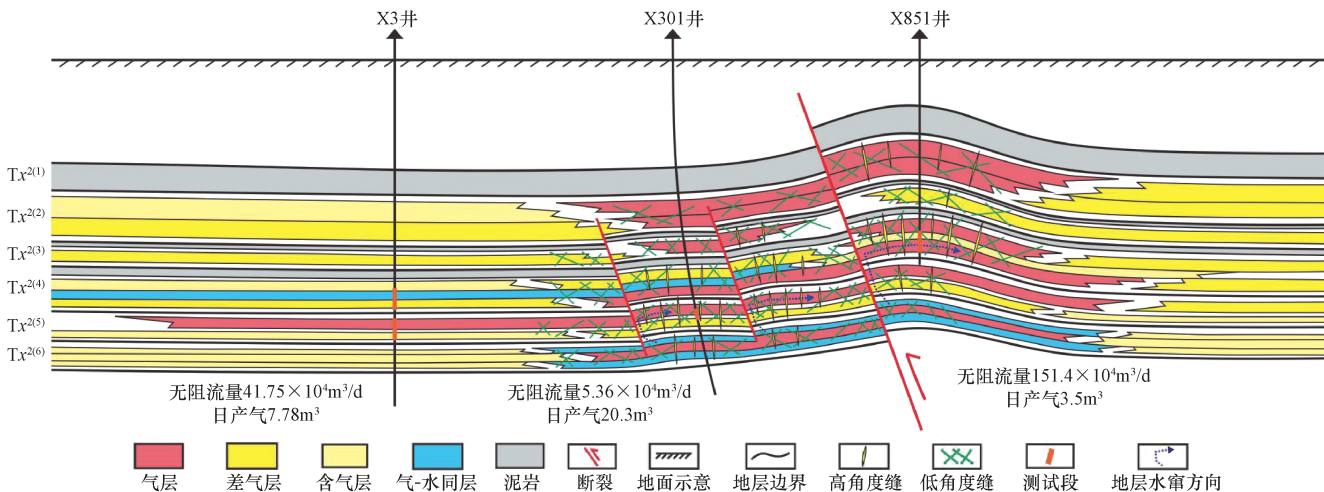


图4 川西坳陷新场须二段过 X3—X301—X851 井气藏剖面

Fig. 4 Gas pool section across Wells X3, X301 to X851 in the T_3x^2 in Xinchang area, Western Sichuan Depression

层水流动过程中,断层起到了一定输导作用,如 X301 井,在生产过程中,须二下亚段的地层水沿着断层上侵,再通过须二中亚段发育的平行层理缝侧向侵入, X851 井同理,均发生一定程度地层水窜。

3 气藏甜点模式及评价标准

综合考虑优质储层、有效裂缝及含气性等参数,结合产能动态及工程特征,建立了新场须二段气藏 3 种类型甜点模式(图 5)。

1) 断缝型甜点

断缝型甜点主要指受 SN 向控产断裂控制的甜点类型,一般沿着断裂附近分布。这种类型甜点是现有技术条件下,不需要工程改造,可自然建产的

一种甜点类型。根据前期研究,这种类型的甜点可以进一步分为断缝型甜点 A 型和断缝型甜点 B 型两种小类。

断缝型甜点 A 型(图 5a₁)岩石相主要以千层饼、平行层理中-粗砂岩相为主,平均孔隙度大于 3.0%,平均渗透率大于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;在平缝较为发育的基础上,高角度叠加形成网状缝。这种类型的甜点是气井高产的主要类型,如 X2 井、X851 井和 X856 井等。

X2 井为典型的断缝型甜点 A 型(图 6a),其构造位置为断垒,构造高点,有利岩石相厚度 14.9 m(未钻穿),平均孔隙度 4.8%,平均渗透率 $0.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,与微断裂距离 263 m,中砂岩厚度 32.3 m,占总砂体 62%,平均石英含量 69%,52 m 内 14 套粒度变化层,有效裂

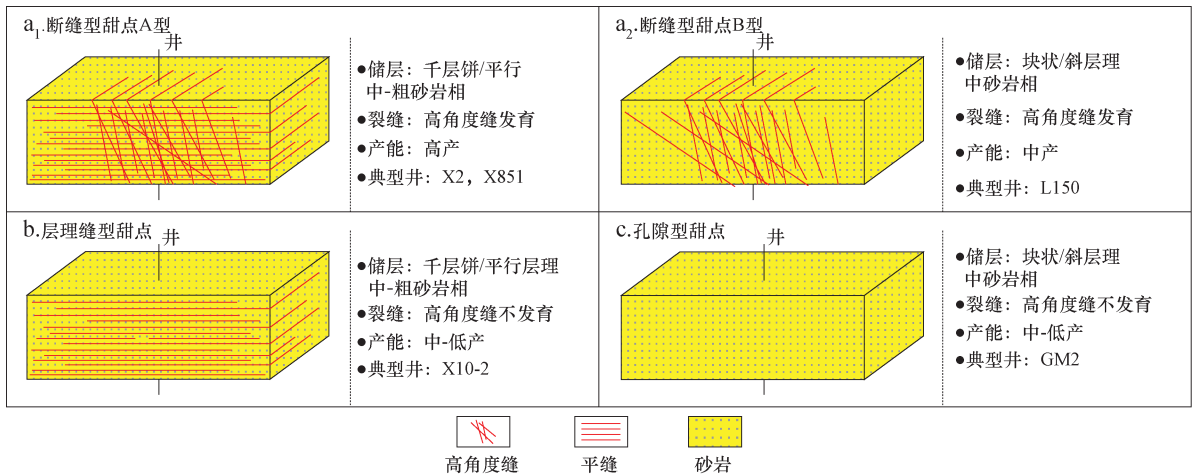


图 5 川西坳陷新场须二段气藏甜点模式

Fig. 5 Gas pool sweet spot models of the T_3x^2 in Xinchang area, Western Sichuan Depression

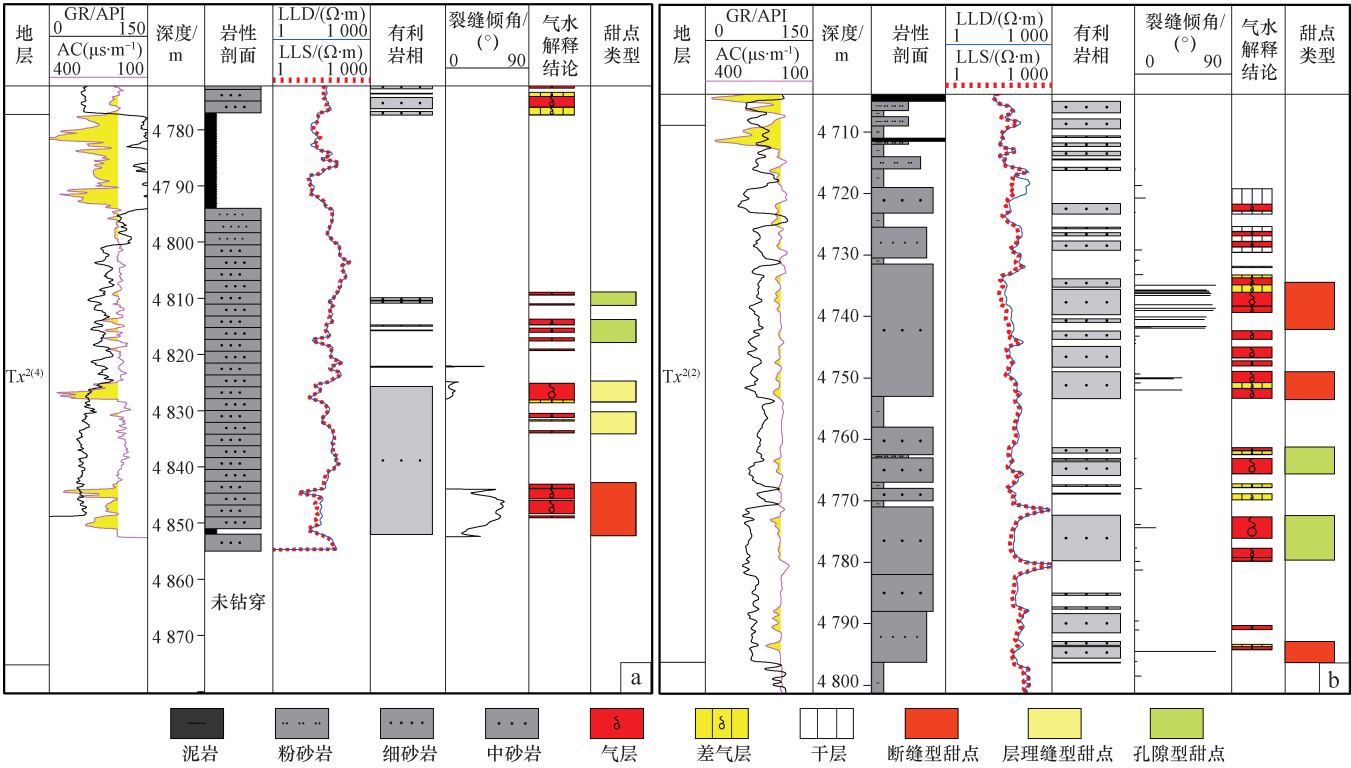


图 6 川西坳陷新场须二段气藏甜点单井地层综合柱状图

Fig. 6 Stratigraphic column showing the single well s of the T_3x^2 in Xinchang area, Western Sichuan Depression

a. X2 井; b. L150 井

缝(倾角 $>30^{\circ}$)孔隙度0.2%,渗透率 $507.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,气层厚度12.0 m(未钻穿),气层孔隙度5.1%,含气饱和度52.9%。

断缝型甜点 B 型(图 5a₂)岩石相主要以块状层理和斜层理中砂岩相为主,平均孔隙度大于3.0%,平均渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;平缝基本不发育,主要以高角度裂缝为主,纵向延伸的高角度裂缝沟通了有利基质储层,这种类型甜点是中产和稳产井的主要类型,如

L150 井和 X601 井等。

L150 井为典型的断缝型甜点 B 型(图 6b),其构造位置为断垒,微幅构造高点,有利岩石相厚度15.2 m,平均孔隙度3.9%,平均渗透率 $0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,与微断裂距离190 m,中砂岩厚度10.6 m,占总砂体40%,平均石英含量65%,30 m 内8套粒度变化层,有效缝(倾角 $>30^{\circ}$)13条,占52%,气层厚度24.5 m,气层孔隙度4.2%,含气饱和度59.5%。

2) 层理缝型甜点

层理缝型甜点以发育千层饼和平行层理中-粗砂岩为主要特征,基质储层物性好,平缝密集发育,极大增加了储层渗透性(图 5b)。这种类型甜点由于高角度缝不发育,还不能自然建产,需要开展一定新工艺改造后(高能气体压裂)才可获产,如 X10-2 井和 CG561 井等。层理缝型甜点岩石相主要以千层饼、平行层理中-粗砂岩相为主,平均孔隙度大于 3.0%,平均渗透率大于 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;平缝发育程度高,而高角度缝发育程度较低;储层孔隙结构好,中值半径为 0.02 ~ 0.04 μm 。

3) 孔隙型甜点

孔隙型甜点以发育块状层理和斜层理中砂岩为主要特征,基质储层物性好,构造缝及层理缝均不发育(图 5c)。这种类型甜点在现有技术条件下不能自然建产,需要开展一定新工艺改造后(适度规模加砂压裂),才能建产,如 GM2 井等。孔隙型甜点岩石相主要以块状层理和斜层理中砂岩相为主,其内部根据孔隙度 3%、4%和 5%又可以进一步划分 3 种类型,平均渗透率大于 $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;储层孔隙结构中等,中值半径一般小于 0.02 μm 。

综合上述,建立了新场须二段气藏甜点综合评价表(表 1)。

4 气藏甜点识别及分布

在气藏甜点评价标准基础上,基于“砂中找储、储中找甜”的思路,本文建立了不同甜点类型的测井识别标准及方法(图 7),明确了甜点空间分布特征。

4.1 气藏甜点识别

通过对不同类型甜点测井电性特征分析发现,气藏甜点整体物性好,具有中低伽马、中高声波的特征。基于此认识,本文建立了“筛泥、去干、选甜、避水”的甜点识别方法。

1) 筛泥——选砂体

在地层砂泥岩组合中,将砂体(细砂及以上)优选出来(图 7a)。研究发现,伽马对本区岩性反映比较敏感,利用伽马测井值和声波时差的交会,选取伽马测井值小于 100 API,去掉细粒沉积部分,优选出砂岩。

2) 去干——选储层

将砂岩中物性好的储层筛选出来(图 7b)。通过声波时差和电阻率交会发现,非储层主要位于声波时差小于 187 $\mu\text{s}/\text{m}$ 的区域,基于此,优选出物性较好的优质储层。

3) 选甜——找裂缝

裂缝是新场须二段高产气井主要控制因素,明确裂缝发育是甜点评价的关键。甜点是储层、裂缝和含气性的综合表征。因此,为了更好地从储层中优选出较为有利的裂缝型甜点,本文构建了裂缝指示因子(公式 1)和含气指示因子(公式 2)。

$$FF = 100AC \cdot RD^2 / (GR^2 \cdot RT^2) \quad (1)$$

$$FGAS = (AC - AC_{\text{base}}) - 5(CNL - CNL_{\text{base}}) \quad (2)$$

式中:FF 为裂缝指示因子,无量纲;AC 为声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$;RD 为深侧向电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$;GR 为伽马测井值, API;RT 为浅侧向电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$;FGAS 为含气指示因子,无量纲;AC_{base} 为声波时差基线值, $\mu\text{s}/\text{m}$;CNL 为中

表 1 川西坳陷新场须二段气藏甜点综合评价

Table 1 Gas pool sweet spot evaluation of the T₃x² in Xinchang area, Western Sichuan Depression

甜点类型	储集空间	有利岩相类型	物性		孔隙结构		含气饱和度/%	储层类型	典型井
			渗透率/ (10 ⁻³ μm ²)	孔隙度/%	中值半径/μm	描述			
断缝型 甜点	构造缝+层理缝+基质孔隙	千层饼/平行层理中-粗砂岩	≥100.00	≥3	≥0.06	好	≥58	裂缝-孔隙型	X2
	构造缝+基质孔隙	块状/斜层理中砂岩	10.00~100.00	≥3	0.04~0.06	好	≥58	裂缝-孔隙型	L150
层理缝型 甜点	层理缝+基质孔隙	千层饼/平行层理中-粗砂岩	10.00~100.00	≥3	0.04~0.06	好	≥58	裂缝-孔隙型	X5
	层理缝+基质孔隙	千层饼/平行层理中-粗砂岩	0.30~10.00	≥3	0.02~0.04	好	≥58	裂缝-孔隙型	X10-2
孔隙型 甜点	基质孔隙	块状/斜层理中砂岩	0.03~0.30	≥5	<0.02	中	≥58	孔隙型	GM2
				4~5					
				3~4					

子测井值,%; CNL_{base} 为中子测井基线值, %。

通过多参数拟合, 本文明确了新场须二段裂缝关键敏感测井参数(图7c), 结果发现 AC , GR 和 RD/RT 等参数对裂缝发育比较敏感, 构建了裂缝指示因子 FF 。在含气性方面, 本文基于 AC 和 CNL 两条测井曲线, 做了归一化后, 拟合了含气指示因子参数, 可以有效评价气藏流体类型。

通过对 FF 和 $FGAS$ 参数的交会, 当 FF 大于 0.05 时, 可以在优质储层中优选出裂缝发育的断缝型甜点, 但是未能将水层分开。

4) 避水——选甜点

为了去除含水较多的水层, 本文把电阻率参数引入图版, 构建了流体指示因子(公式3)。

$$FSS = [(AC - AC_{base}) - 5(CNL - CNL_{base})] RD^2 \quad (3)$$

式中: FSS 为流体指示因子, 无量纲。

在研究区须二段, 水层的发育会表现为明显的低 RD 特征。在含气指示因子基础上, 增加了 RD 参数, 构建了流体指示因子, 可以有效区分气水层。

根据 FSS 与 FF 参数的交会图版(图7d), 可以利用 FSS 小于 18 去除水层, 通过 L1 线, 将断缝型甜点和裂缝型水层等进一步区分开, 进而对不同类型甜点进行测井识别。

4.2 气藏甜点分布

基于甜点测井评价结果, 本项目开展了新场须二段重点砂层组甜点平面分布特征研究, 明确了甜点分布范围, 以 $Tx^{2(2)}$ 和 $Tx^{2(4)}$ 砂组为例。

对断缝型甜点进行了评价(图8), 结果表明: ① $Tx^{2(2)}$ 砂组沉积期, 主要发育 3 个断缝型甜点厚度高值区, 分

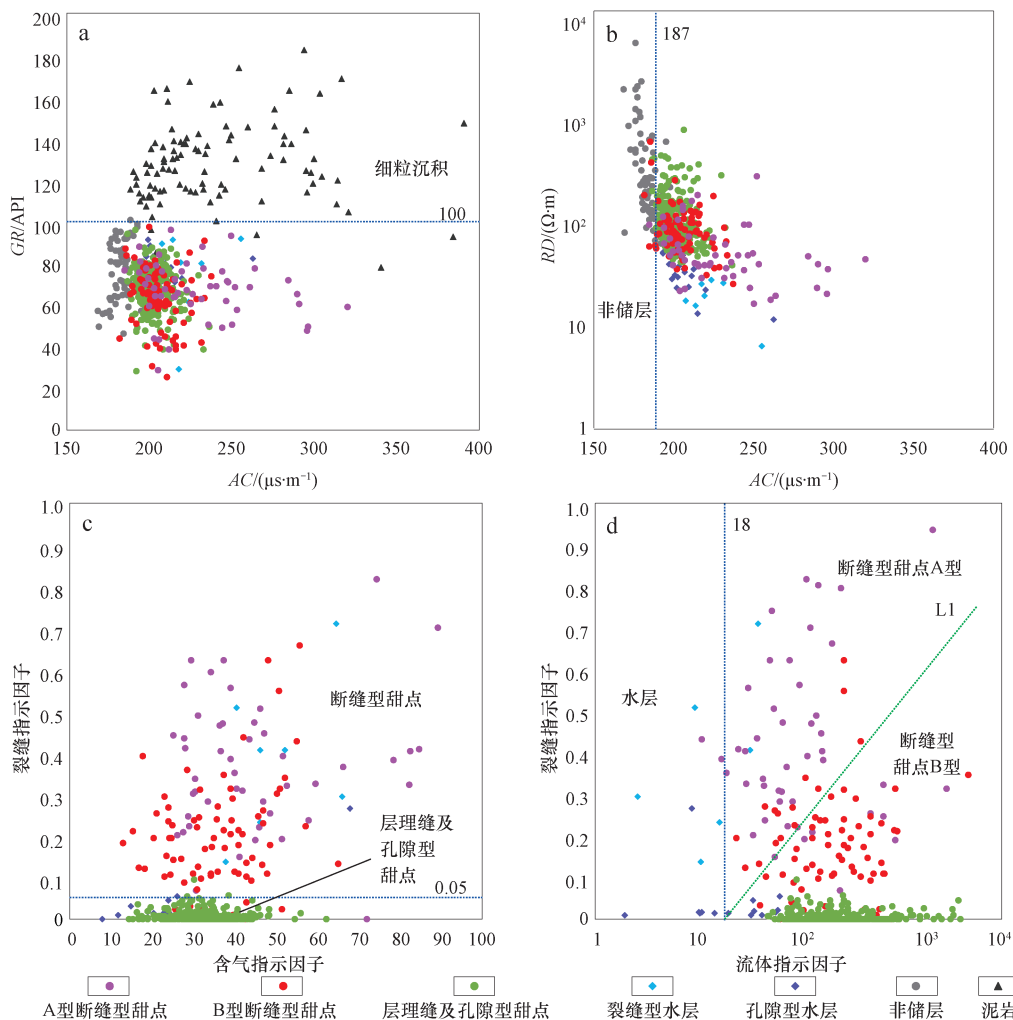


图7 川西坳陷新场须二段不同类型气藏甜点测井识别图版

Fig. 7 Log identification of different sweet spots of the T_3x^2 in Xinchang area, Western Sichuan Depression

a. AC 与 GR 交会图, b. AC 与 RD 交会图, c. 含气指示因子与裂缝指示因子交会图, d. 流体指示因子与裂缝指示因子交会图

L1. 区分断缝型甜点 A 型和 B 型回归线

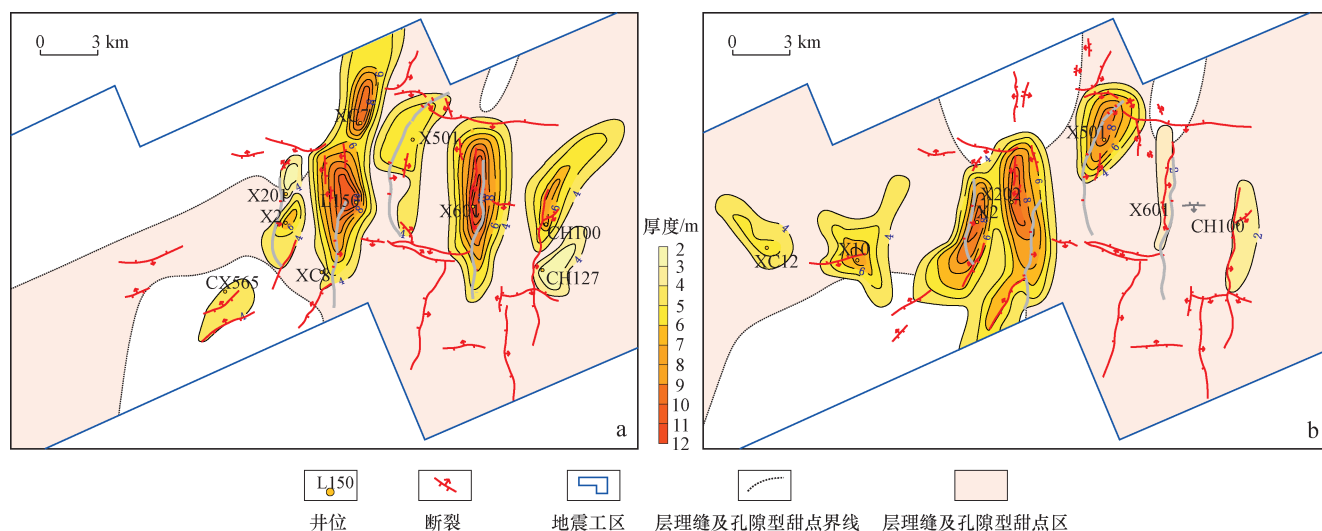


图8 川西坳陷新场须二段重点砂组气藏甜点等厚图

Fig. 8 Isopach showing the sweet spots of typical sandstone bodies in the T_3x^2 in Xinchang area, Western Sichuan Depressiona. $Tx^{2(2)}$ 砂组; b. $Tx^{2(4)}$ 砂组

别为 L150 - XC7 井区、X601 井区和 CH100 井区,其次为 X2 井区、X501 井区和 CX565 井区; $Tx^{2(4)}$ 砂组沉积期,主要发育 3 个断缝型甜点厚度高值区,分别为 X2 井区、X202 井区和 X501 井区,其次为 X10 井区和 XC12 井区;② 断缝型甜点整体分布主要受构造裂缝作用影响,其次为沉积作用,主要分布在在南北向主干断裂附近,呈条带状展布,部分地区甜点在非断裂区呈 NE 和 NW 向展布;③ 甜点评价的高值区也与该砂组有效井产能吻合,如 L150 井,初期无阻流量 $10.060 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、累计产气量 $25\,096 \times 10^4 \text{ m}^3$, X601 井初期无阻流量 $34.150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、累计产气量 $15\,668 \times 10^4 \text{ m}^3$, X2 井初期无阻流量 $131.562 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、累计产气量 $96\,710 \times 10^4 \text{ m}^3$,产能数据统计截至 2021 年 3 月。对层理缝及孔隙型甜点进行了评价,结果表明:① 层理缝及孔隙型甜点展布整体受控于沉积相及砂体展布;② 在 $Tx^{2(2)}$ 砂组,新场东部甜点范围整体大于新场主体区,在 $Tx^{2(4)}$ 砂组,新场主体区甜点范围较大、其次为新场东部。

5 甜点形成机理探讨

新场须二段气藏整体是一个“相控”背景下的构造-岩性气藏,高角度缝控制气井高产,基质储层品质是气井稳产的主要因素^[9,27]。在这种背景下,气藏甜点主要受控于优质储层、有效裂缝和含气性等 3 个关键地质要素,他们决定了气藏甜点空间分布规律。

1) 晚期形成的断裂及构造位置控制断缝型甜点分布。

新场须二段断裂以 SN 和 EW 向为主,前期研究证

实,SN 向断裂为晚期(燕山期)形成的断裂,是研究区主要的控产断裂^[29-30]。SN 向断裂附近是构造缝发育区,断裂的上盘比下盘高角度缝发育程度高,此外,在断裂的上盘,越靠近断裂,高角度缝发育程度越高。断缝型甜点主要位于构造高部位含气有利区内,一般受控于 SN 向晚期断裂及派生的高角度缝。纵向的高角度缝可以有效沟通储层内相对孤立的孔隙,提高气藏泄流体积,是断缝型甜点储量有效动用的关键。有效裂缝控制了气井的初期产能,同时气井的稳产能力也会受有效裂缝的发育程度影响。新场须二段气藏最有利的甜点类型是受缝控和相控综合影响的,如 X2 井,气井的累计产气量受有效裂缝和相对优质储层的共同控制。

2) 构造位置及优质基质储层品质决定层理缝及孔隙型甜点展布。

除了受断缝体控制内部区域的断缝型甜点,位于断缝体之间、构造位置较高和基质储层品质较好的甜点类型主要为层理缝及孔隙型气藏甜点。基质储层品质主要包括储层粒度和岩石成分等多种因素,研究发现,粒度越粗、石英和长石含量越高,储层残余粒间孔越大,且发生溶蚀作用的概率也越大,因此储层物性越好。此外,层理缝的发育,也会对储层物性有一定影响,平缝较发育的 A 型储层物性、连通性整体优于平缝不发育的 B 类储层。新场须二段气藏 70% 的储量主要分布在Ⅲ类甜点,需要新工艺突破后可动用。

综上,本文建立了新场须二段气藏甜点地质模式(图 9)。断缝体内部主要控制了断缝型甜点分布,断缝体之间区域是层理缝及孔隙型甜点的有利发育区。

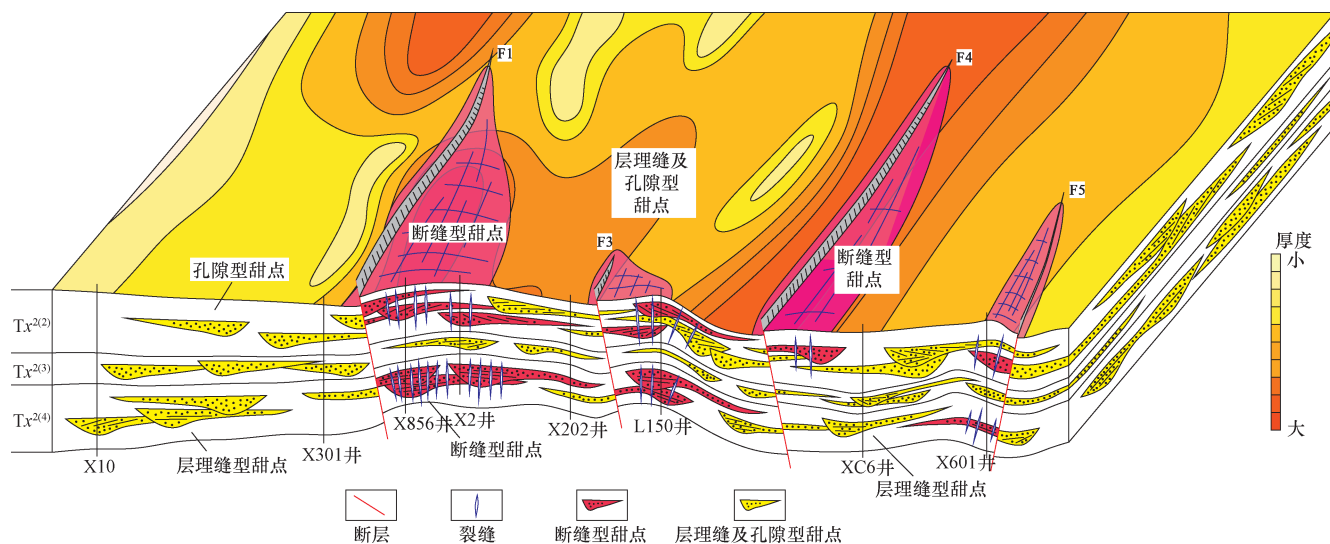


图9 川西坳陷新场须二段气藏甜点地质模式

Fig. 9 Geological model showing the gas pool sweet spots of the T_3x^2 in Xinchang area, Western Sichuan Depression

F1—F5. 研究区内5条南北向主干断裂

6 结论

1) 气藏甜点主要受控于优质储层、有效裂缝和含气性3个关键地质参数,在构造较高的含气区内,优质储层、有效裂缝较发育的叠合区是气藏甜点有利区。

2) 新场须二段气藏可以划分3种类型,其中断缝型甜点高角度裂缝发育,层理缝及孔隙型甜点高角度裂缝不发育,断缝型甜点是现在工艺下可以有效动用的甜点类型,层理缝及孔隙型甜点为基质型,是需要新工艺突破后可以动用的甜点类型。

3) 构造位置较高的有利含气区是新场须二段气藏甜点发育的基础,其中受晚期断裂影响的断缝有利区内决定了断缝型甜点分布,在断缝体之间,优质储层品质控制了层理缝及孔隙型甜点展布。

致谢:感谢中国石化西南油气分公司为本论文提供数据支持,感谢中国石化石油勘探开发研究院四川中心须家河组团队为本论文提供技术思路和指导,感谢审稿专家对本论文提出的宝贵修改意见。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,杨智,何东博,等. 常规-非常规天然气理论、技术及前景[J]. 石油勘探与开发,2018,45(4):575-587.
Zou Caineng, Yang Zhi, He Dongbo, et al. Theory, technology and prospects of conventional and unconventional natural gas [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 575-587.
- [2] 蔡勋育,邱桂强,孙冬胜,等. 中国中西部大型盆地致密砂岩油气“甜点”类型与特征[J]. 石油与天然气地质,2020,41(4):1-12.

- Cai Xunyu, Qiu Guiqiang, Sun Dongsheng, et al. Types and characteristics of tight sandstone spots in large basins of central-western China [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 1-12.
- [3] 戴金星,倪云燕,吴小奇. 中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J]. 石油勘探与开发,2012,39(3):257-264.
Dai Jinxing, Ni Yunyan, Wu Xiaoqi. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 257-264.
- [4] 贾承造,邹才能,李建忠,等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报,2012,33(3):343-350.
Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 343-350.
- [5] 陈晓智,陈桂华,李祺鑫,等. 致密砂岩气储量不确定性计算方法及意义[J]. 断块油气田,2019,26(1):17-20,41.
Chen Xiaozhi, Chen Guihua, Li Qixin, et al. Uncertainty reserves calculation for tight sandstone gas and its significance [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(1): 17-20, 41.
- [6] Miall A. Fluvial depositional systems [M]. Switzerland: Springer, 2014.
- [7] Catuneanu O. Principles of sequence stratigraphy [M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- [8] 杨克明,朱宏权. 川西叠覆型致密砂岩气区地质特征[J]. 石油实验地质,2013,35(1):1-8.
Yang Keming, Zhu Hongquan. Geological characteristics of superposed tight sandstone gas-bearing areas in western Sichuan [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(1): 1-8.
- [9] 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(S1):17-22.
Zhang Shihua, Tian Jun, Ye Sujuan, et al. Gas reservoir formation process of the second member of the Xujiahe Formation in the Xinchang tectonic zone, western Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(S1): 17-22.

- [10] 刘君龙,孙冬胜,纪友亮,等. 川西晚侏罗世前陆盆地浅水三角洲砂体分布特征与叠置模式[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1164–1178.
- Liu Junlong, Sun Dongsheng, Ji Youliang, et al. Distribution characteristics and its superimposed patterns of the late Jurassic shallow water deltaic sandbody in the Western Sichuan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1164–1178.
- [11] 王双龙,程奇,房娜,等. 锦州南油田古近系辫状河三角洲前缘沉积特征及砂体叠置模式[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(6): 20–27.
- Wang Shanglong, Cheng Qi, Fang Na, et al. Sedimentary characteristics and sand body superimposition model of Paleogene braided river delta front in Jinzhou south oilfield [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2020, 34(6): 20–27.
- [12] 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.
- [13] 刘君龙,纪友亮,杨克明,等. 川西须家河组前陆盆地构造层序及沉积充填响应特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(6): 11–23.
- Liu Junlong, Ji Youliang, Yang Keming, et al. Tectono-stratigraphy and sedimentary infill characteristics of Xujiahe Formation in western Sichuan foreland basin [J]. Journal of China University of Petroleum, 2015, 39(6): 11–23.
- [14] 杜宗飞,高红灿,郑荣才. 渝南关坝地区上三叠统须家河组沉积特征[J]. 石油地质与工程, 2019, 33(3): 1–4.
- Du Zongfei, Gao Hongcan, Zeng Rongcai. Sedimentary characteristics of upper Triassic Xujiahe Formation in Guanba area of southern Chongqing [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2019, 33(3): 1–4.
- [15] 田军,张世华,叶素娟,等. 川西坳陷新场构造带须二段气藏类型划分及成藏主控因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2017, 44(6): 659–667.
- Tian Jun, Zhang Shihua, Ye Sujuan, et al. Classification of gas accumulation types and main controlling factors of gas accumulation of the Xu-2 Member in Xinchang structural zone, western Sichuan Depression, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2017, 44(6): 659–667.
- [16] 王玮,沈忠民,裴森奇,等. 致密砂岩气藏油气轻烃特征及其地质意义: 以四川盆地西北部须家河组气藏为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(6): 818–827.
- Wang Wei, Shen Zhongmin, Pei Senqi, et al. Light hydrocarbon characteristics of petroleum in a tight sandstone gas reservoir and its geological significance: A case study of the Upper Triassic Xujiahe Formation gas reservoir in the northwestern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(6): 818–827.
- [17] 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.
- [18] 魏新善,胡爱平,赵会涛,等. 致密砂岩气地质认识新进展[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(1): 11–20.
- Wei Xinshan, Hu Aiping, Zhao Huitao, et al. New geological understanding of tight sandstone gas [J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(1): 11–20.
- [19] 车国琼,王立恩,汪轰静,等. 断层对致密砂岩气藏甜点区的控制作用——以四川盆地中部蓬莱地区须二段气藏为例[J]. 天然气工业, 2019, 39(9): 22–32.
- Che Guoqiong, Wang Lien, Wang Hongjing, et al. Control action of faults on the sweet spots of tight sandstone gas reservoir: A case study of the second Member of Xujiahe gas reservoir in the Penglai area, Central Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(9): 22–32.
- [20] 付菊,操延辉,叶素娟,等. 次生致密砂岩气藏甜点综合评价——以四川盆地中江气田侏罗系气藏为例[J]. 天然气工业, 2019, 39(S1): 23–29.
- Fu Ju, Cao Yanhui, Ye Sujuan, et al. Comprehensive evaluation of secondary tight sandstone gas reservoirs, a case study from the Zhongjiang gas field Jurassic reservoirs of the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(S1): 23–29.
- [21] 赵龙梅,文桂华,李星涛,等. 鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块山西组2³亚段致密砂岩气储层“甜点区”评价[J]. 天然气工业, 2018, 38(S1): 5–10.
- Zhao Longmei, Wen Guihua, Li Xingtao, et al. Tight sandstone reservoirs sweet spots evaluation of the 2nd-3rd member of the Shanxi Formation in the Daning-Jixian area of the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(S1): 5–10.
- [22] 王莹,张克银,甘其刚,等. 四川盆地西部新场地区上三叠统须家河组二段构造裂缝的分布规律[J]. 地质学刊, 2015, 39(4): 543–551.
- Wang Ying, Zhang Keyin, Gan Qigang, et al. Distribution rules of structural fractures in the second member of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Xinchang area, western Sichuan Basin [J]. Journal of Geology, 2015, 39(4): 543–551.
- [23] 赵仲祥,董春梅,林承焰,等. 西湖凹陷深层低渗—致密气藏“甜点”类型划分及成因探讨[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(4): 778–790.
- Zhao Zhongxiang, Dong Chunmei, Lin Chengyan, et al. Classification and origin of “sweet spots” in deep low permeability tight gas reservoirs, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4): 778–790.
- [24] 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.
- [25] 李嵘,张娣,朱丽霞. 四川盆地川西坳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 Xujia-

- he tight sandstones, western Sichuan, China [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2011, 33(3): 274–281.
- [26] 曾焱, 黎华继, 周文雅, 等. 川西坳陷东坡中江气田沙溪庙组复杂“窄”河道致密砂岩气藏高产富集规律[J]. *天然气勘探与开发*, 2017, 40(4): 1–8.
- Zeng Yan, Li Huaji, Zhou Wenya, et al. High-yield enrichment laws of Shaximiao Formation tight sandstone gas reservoir of complex “narrow” channel in Zhongjiang gas field, in the eastern slope of West Sichuan Depression [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2017, 40(4): 1–8.
- [27] 叶素娟, 朱宏权, 李嵘, 等. 天然气运移有机–无机地球化学示踪指标——以四川盆地川西坳陷侏罗系气藏为例[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(4): 549–560.
- Ye Sujuan, Zhu Hongquan, Li Rong, et al. Tracing natural gas migration by integrating organic and inorganic geochemical data: A case study of the Jurassic gas fields in western Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(4): 549–560.
- [28] 马立元, 周总瑛. 川西坳陷中段上三叠统须家河组天然气资源潜力分析[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(5): 730–737.
- Ma Liyuan, Zhou Zongying. Analysis of natural gas Tertiary Xujiahe Formation in the resource potentiality for Upper Middle Part of West Sichuan Depression [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(5): 730–737.
- [29] 李蒙, 商晓飞, 赵华伟, 等. 基于 likelihood 地震属性的致密气藏断裂预测——以四川盆地川西坳陷新场地区须二段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(6): 1299–1309.
- Li Meng, Shang Xiaofei, Zhao Huawei, et al. Prediction of fractures in tight gas reservoirs based on likelihood attribute—A case study of the 2nd member of Xujiahe Formation in Xinchang area, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(6): 1299–1309.
- [30] 吕文雅, 苗凤彬, 张本键, 等. 四川盆地剑阁地区须家河组致密砾岩储层裂缝特征及对天然气产能的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 484–491, 557.
- Lv Wenya, Miao Fengbin, Zhang Benjian, et al. Fracture characteristics and their influence on natural gas production: A case study of the tight conglomerate reservoir in the Upper Triassic Xujiahe Formation in Jian’ge area, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 484–491, 557.

(编辑 梁 慧)

(上接第 840 页)

- [15] 刘焕, 彭军, 李丽娟, 等. 川西坳陷中段上三叠统须家河组砂岩特征及物源分析[J]. *中国地质*, 2012, 39(5): 1271–1279.
- Liu Huan, Peng Jun, Li Lijuan, et al. Characteristics and provenance analysis of the Upper Triassic Xujiahe Formation sandstone in the middle part of west Sichuan Depression [J]. *Geology in China*, 2012, 39(5): 1271–1279.
- [16] Chunming X, Jean-Michel G, Dahua Z, et al. The fluvial and lacustrine sedimentary systems and stratigraphic correlation in the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(11): 2023–2041.
- [17] 吉利明, 吴远东, 贺聪, 等. 富有机质泥页岩高压生烃模拟与孔隙演化特征[J]. *石油学报*, 2016, 37(2): 172–181.
- Ji Liming, Wu Yuandong, He Cong, et al. High-pressure hydrocarbon-generation simulation and pore evolution characteristics of organic-rich mudstone and shale [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(2): 172–181.
- [18] Morad S. Carbonate cementation in sandstones: distribution patterns and geochemical evolution [J]. *Special Publication Number 26 of the International Association of Sedimentologists*, 1998, 26: 1–26.
- [19] 曾澹辉, 朱志强, 吴琼, 等. 烃源岩的有机酸生成及其影响因素的模拟实验研究[J]. *沉积学报*, 2007, 25(6): 847–851.
- Zeng Jianhui, Zhu Zhiqiang, Wu Qiong et al. Experimental study on the generation of organic acids from source rocks and its effect factors [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 25(6): 847–851.
- [20] 曾联波, 吕鹏, 屈雪峰, 等. 致密低渗透储层多尺度裂缝及其形成地质条件[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 449–454.
- Zeng Lianbo, Lyu Peng, Qu Xuefeng, et al. Multi-scale fractures in tight sandstone reservoirs with low permeability and geological conditions of their development [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 449–454.
- [21] 刘春燕. 致密碎屑岩储层“甜点”形成及保持机理——以鄂尔多斯盆地西南部镇泾地区延长组长 8 油层组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(6): 873–879.
- Liu Chunyan. Formation and preservation mechanism of sweet spot in tight clastic reservoirs – A case study of Chang 8 oil layer of Yan-chang Formation in Zhenjing area, southwest Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(6): 873–879.
- [22] 杜宗飞, 高红灿, 郑荣才. 渝南关坝地区上三叠统须家河组沉积特征[J]. *石油地质与工程*, 2019, 33(3): 1–4.
- Du Zongfei, Gao Hongcan, Zheng Rongcai. Sedimentary characteristics of upper Triassic Xujiahe formation in Guanba area of southern Chongqing [J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2019, 33(3): 1–4.
- [23] 杨威, 谢武仁, 俞凌杰, 等. 四川盆地上三叠统须家河组致密砂岩溶蚀实验及地质意义[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(4): 655–663.
- Yang Wei, Xie Wuren, Yu Lingjie, Wei Guoqi, et al. Dissolution experiments and geological implications of tight sandstones in the Xujiahe Formation of Upper Triassic, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(4): 655–663.

(编辑 卢雪梅)