

川东北地区须家河组“断缝体”气藏有利 勘探目标和预测技术

王 威¹, 凡 睿², 黎承银¹, 屈大鹏¹, 张腊梅¹, 苏克露¹

(1. 中国石化 勘探分公司 物探研究院, 四川 成都 610041;

2. 中国石化 勘探分公司, 四川 成都 610041)

摘要:上三叠统须家河组致密砂岩是川东北地区天然气勘探的重点领域之一,整体具有“埋藏深度大、储层致密,非均质性强,商业动用难度大”的特点。川东北地区须家河组发育“断缝体”气藏,通南巴构造带的通江-马路背地区是“断缝体”气藏勘探最有利区带,优势岩相和裂缝发育区是有效储层发育的有利勘探目标。利用动态构造识别技术、非线性岩性与物性反演预测技术以及综合裂缝预测技术等关键方法,有效地解决了烃源断层识别、相对优质储层预测以及裂缝预测等问题,实现储层“甜点”综合预测。这些技术在川东北“断缝体”气藏勘探中应用效果显著,储层厚度预测误差从16%降低到8%,裂缝预测吻合率从60%提高到85%;依据“断缝体”评价思路部署实施的4口井均取得了较好的效果,钻井成功率100%,提交天然气控制储量 $367.91 \times 10^8 \text{ m}^3$,落实了千亿方资源规模阵地,基本实现了川东北地区通江-马路背区块的高效勘探。

关键词:烃源断层;断缝体;储层预测;致密砂岩;须家河组;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Exploration and prediction of promising fault – fracture reservoirs in the Xujiahe Formation, northeastern Sichuan Basin

Wang Wei¹, Fan Rui², Li Chengyin¹, Qu Dapeng¹, Zhang Lamei¹, Su Kelu¹

(1. Exploration Institute of SINOPEC Exploration Company, Chengdu, Sichuan 610041, China;

2. SINOPEC Exploration Company, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Tight sandstone in the Upper Triassic Xujiahe Formation, northeastern Sichuan Basin, has been one of the exploration targets for natural gas in the area. However, the stone, as a whole, is rather tight, deeply buried and highly heterogeneous, making commercial development of gas from it quite a challenge. The formation contains many fault-fracture gas reservoirs in the Tongjiang-Malubei area of the Tongnanba structural belt, where certain lithological facies in well-fractured zones may be used as clues to the whereabouts of the reservoirs. By recognition of source rock-rooted faults based on dynamic structure restoration, nonlinear inversion and prediction of lithology and physical properties, and multi-scale fusion as well as five-dimensional pre-stack fracture prediction in OVT domain, we effectively addressed the recognition of source rock-rooted faults, the prediction of relatively high-quality reservoirs and fractures as well as "sweet spots"-several issues easily encountered in dealing with this type of reservoir. These techniques were applied well to the predication of fault-fracture reservoirs in the northeast Sichuan Basin with prediction error of reservoir thickness being reduced from 16% to 8% and predication accuracy of fractures being increased from 60% to 85%. Four wells were so successfully drilled according to the predication results that controlled reserves of $367.91 \times 10^8 \text{ m}^3$ were booked with a possible gas resource base of 100 billion cubic meters readily on the way.

Key words: source rock-rooted fault, reservoir prediction, tight sandstone, Xujiahe Formation, fault-fracture body, Sichuan Basin

收稿日期:2021-03-02;修订日期:2021-06-21。

第一作者简介:王威(1980—),男,博士,高级工程师,石油地质。E-mail: wangw. knf@ sinopec. com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05002-004);中国石化科技部项目(P19012-3)。

近年来,致密砂岩气的产量在天然气总产量中所占的比例越来越大,已成为今后10~20年接替常规油气资源的重要来源,具有良好的勘探开发前景^[1-2]。美国已在23个盆地中发现了超过900个致密砂岩气田,中国是继美国之后实现致密砂岩气较大规模商业开发的国家之一。中国未来每年新增探明天然气储量中,致密砂岩气将占40%以上^[1-3]。川东北地区须家河组气藏属于典型深层致密砂岩气藏(地史最大埋深超过6 000 m,孔隙度小于10%,渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),具有“储层埋藏深度大、基质物性差、非均质性强,单井自然产能较低”等不利条件,但也具备“资源规模大、大面积含气、局部富集高产”等优势。目前须家河组致密砂岩勘探存在的关键问题是如何寻找到天然气高产富集的“甜点”区,实现须家河组商业勘探开发^[1-2]。近年来,随着地质认识的深入、勘探技术的进步以及勘探实践的推进,在川东北地区须家河组发现了一种新的致密砂岩气藏类型——“断缝体”气藏。“断缝体”是指储层以裂缝网络为主、基质孔隙为辅,二者相辅相成、构成裂缝-孔隙“储渗体”,天然气在“断缝体”内富集,形成“断缝体”气藏^[4]。该类气藏主要分布在通南巴构造带,其不仅可以形成天然气规模聚集,还可以实现单井高产稳产,进而实现气藏商业勘探开发。笔者以川东北地区须家河组近年来的勘探实践为基础,探讨“断缝体”气藏评价关键技术和“甜点”地球物理预测技术,希望对类似领域的勘探部署起到推动作用。

1 地质背景

川东北地区位于四川盆地川北坳陷,处于苍溪-巴中低缓构造带以北的盆内到盆缘过渡带(图1)。印支早幕构造挤压运动导致四川盆地由海相盆地逐渐转变为陆相盆地,四川盆地周缘造山带快速隆升,向盆内注入大量物源,使得川东北地区沉积了上三叠统须家河组至侏罗系巨厚的陆相地层^[1]。研究区在构造位置上处于大巴山、米仓山和九龙山构造带所夹持部位,中晚燕山期以来,受龙门山、米仓山以及大巴山构造带多期次、多方向逆冲推覆的影响,使得川东北地区须家河组变形程度较强,深大断裂和褶皱成排成带发育^[2-3]。

近年来,四川盆地须家河组勘探开发取得快速发展,发现了川中与川西两个大气区,探明了广安、合川、安岳以及新场等多个千亿方级大气田。与此同时,中国石化集团在川东北探区的二叠系和三叠系海相礁滩领域勘探取得重大突破。按照“展开海相,兼探陆相”的思路开展陆相领域的勘探工作,虽然取得一定的发现,但由于须家河组埋深大,岩石致密,勘探没有取得实质性突破^[4-5]。通过开展深层致密砂岩气藏富集规律和“甜点”地球物理预测技术攻关及典型高产稳产井和典型气藏的精细解剖,发现川东北地区须家河组砂岩在深埋致密、非均质性强的背景下发育“断缝体”优质储集体。这类储集体受断裂及伴生褶皱联合

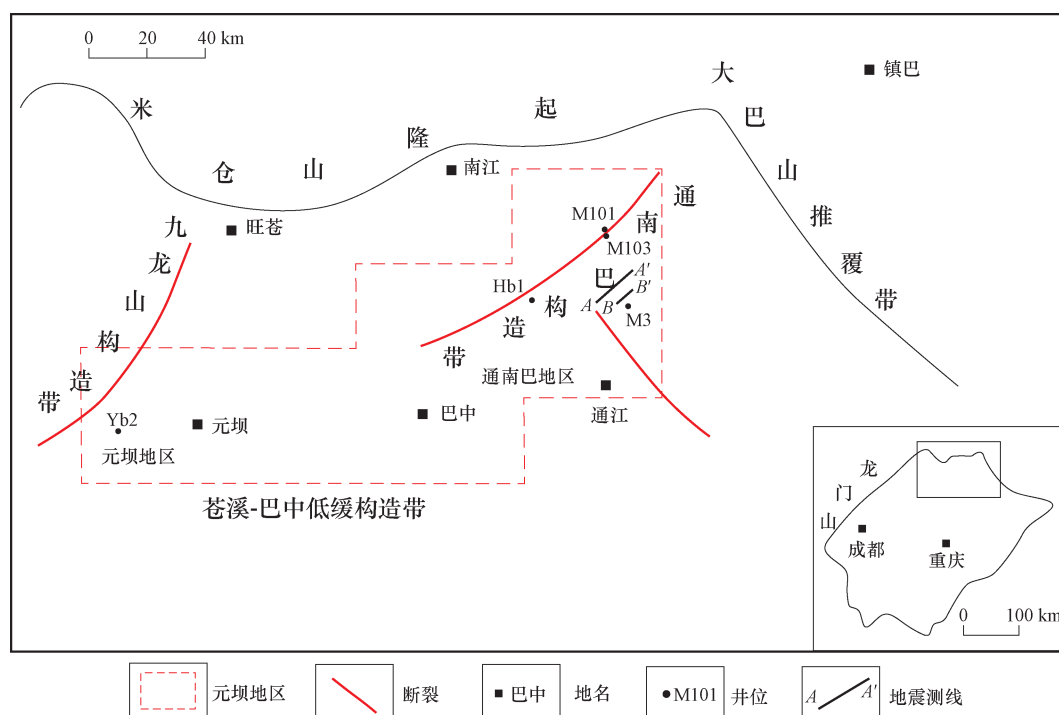


图1 四川盆地北部通南巴气田构造位置

Fig. 1 Structural location of the Tongnanba gas field, northern Sichuan Basin

控制,发育在断裂(带)附近,是由断层、褶皱伴生裂缝叠合基质孔形成的不沿层状分布的规模网状缝孔储渗体^[4-6](简称断缝体),其储集空间由裂缝网络叠加基质孔隙为主。加之因川东北地区构造变形程度较强,使得须家河组除了自身烃源岩供烃外,亦有深层二叠系海相优质烃源岩供烃^[6-7]。海陆相烃源岩生成的天然气运移至“断缝体”成藏富集,形成“断缝体”气藏。“断缝体”优质储层发育和海相、陆相烃源岩“双源供烃”是川东北地区须家河组“断缝体”气藏富集高产的关键因素。因此,如何准确预测“断缝体”优质储层分布,精确落实沟通二叠系海相优质烃源岩的烃源断层展布,落实天然气高产富集的“甜点”区,是实现高效勘探开发的关键。

2 “断缝体”气藏评价

川东北地区受龙门山、米仓山以及大巴山等3大造山带影响,受到多期次、多方向的构造改造作用,构造特征复杂,不同区域构造特征差异较大。中生代以来,四川盆地经历了燕山期和喜马拉雅期两个关键演化阶段。构造改造作用改变了成藏结构和作用过程,对油气富集有着关键影响。川东北地区不同位置受到的构造挤压作用强度差异及构造改造变形方式差异使得不同位置断裂发育程度不一致,导致了不同位置成藏结构存在差异。川东北地区从西向东构造变形强度逐步增强,断层规模、数量逐渐变大,断层切割层位逐渐变多。元坝地区陆相弱变形区地层相对平缓,仅在陆相地层内部发育层间小断层。通南巴地区海相、陆相叠加强变形区深大断裂发育,部分断层向下切穿嘉陵江组膏岩层,断开吴家坪组,向上断至白垩系,少量断层断至地表^[8]。

就“断缝体”气藏而言,其油气系统的标志性特征主要体现在优质烃源岩、输导体系和优质储集体分布3个方面。首先,川东北地区须家河组烃源岩发育最有利的地区是元坝地区,其他地区相对较差,不具备形成大型气田的资源基础。通南巴构造带海相二叠系烃源岩条件优越,由于受到米仓山和大巴山的联合构造挤压作用,通南巴构造带构造变形强,深大烃源断裂发育,优质海相烃源岩生成的天然气通过深大断裂运移至陆相地层聚集成藏,弥补了陆相烃源岩的相对不足,明确了通南巴构造带是“断缝体”气藏勘探的最有利区带。其次,根据深大烃源断裂的发育区域,有利的保存条件,确定了“断缝体”气藏勘探的最有利地区为通江-马路背地区。最后,通过对沉积相、岩相和储层评价,优选具有储集优势的岩性岩相,优选最有利的勘探目标。

2.1 “断缝体”气藏勘探的最有利区带

川东北地区须家河组烃源岩有机质丰度较高,暗色泥岩样品有机碳含量(TOC)为0.50%~5.00%,平均值达到2.51%,符合很好的烃源岩标准;但是四川盆地须家河组沉积中心和生烃中心位于川西拗陷^[9],受沉积期古地形的控制,川东北地区须家河组泥质烃源岩厚度相对较薄,其生气强度为 $(8 \sim 22) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ^[1],元坝地区的烃源岩条件最好,往东烃源岩条件变差。按照戴金星院士在1996年提出的烃源岩生烃强度大于 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 是形成大中型气田的主控因素之一^[10],研究区须家河组仅仅依靠自身烃源岩很难形成大规模油气聚集。可喜的是,通南巴地区上二叠统吴家坪组优质烃源岩广泛分布,研究区生气强度为 $(40 \sim 70) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ (图2),生烃潜力巨大。但是吴家坪组烃源岩层与须家河组储层之间存在雷口坡组、嘉陵江组、飞仙关组以及长兴组等碳酸盐岩和膏盐岩等众多隔层^[11-13],如何实现两者有效沟通是关键。通南巴地区位于米仓山和大巴山的构造叠合区,构造挤压作用强,变形强度大,部分断层向下切穿嘉陵江组膏盐岩,断至海相二叠系吴家坪组,向上断至陆相地层,实现源储有效沟通。总体来看,通南巴地区具有海相与陆相两套烃源岩“双源供烃”的资源优势,为须家河组天然气富集高产奠定了坚实的物质基础,这种特征决定了川东北通南巴构造带是“断缝体”气藏勘探的有利区带。

2.2 烃源断裂是“断缝体”气藏成藏的关键

前文述及,上二叠统吴家坪组烃源岩在川东北地区须家河组气藏富集高产中扮演了重要角色,贯穿海相二叠系的深大烃源断裂有效沟通了吴家坪组优质烃源岩与陆相储集体^[14-16]。通过对构造特征的再梳理和地震资料的再解释,攻关烃源断裂识别技术,落实通南巴构造带南翼和母家梁断裂带以北是烃源断裂最为发育地区。靠近烃源断层的高产井——M3井在须家河组岩心中可见高温热液矿物(图3),进一步证实了由于研究区沟通下伏二叠系海相烃源岩的深大烃源断层的存在,使得深部热液沿断层运移至须家河组,异常高温为下部海相油型气的充注^[17-18]。

通南巴构造带下侏罗统自流井组、中侏罗统千佛崖组及上、下沙溪庙组等4套泥页岩平面上相对连续,构成了良好的区域盖层和直接盖层,累计厚度达近千米,整体保存条件较好,但母家梁断裂带以及黑池梁等地区部分深大断裂向上断至近地表,保存条件被破坏,评价通南巴构造带通江-马路背地区是烃源断裂发育、保存条件好的有利地区^[19](图4)。

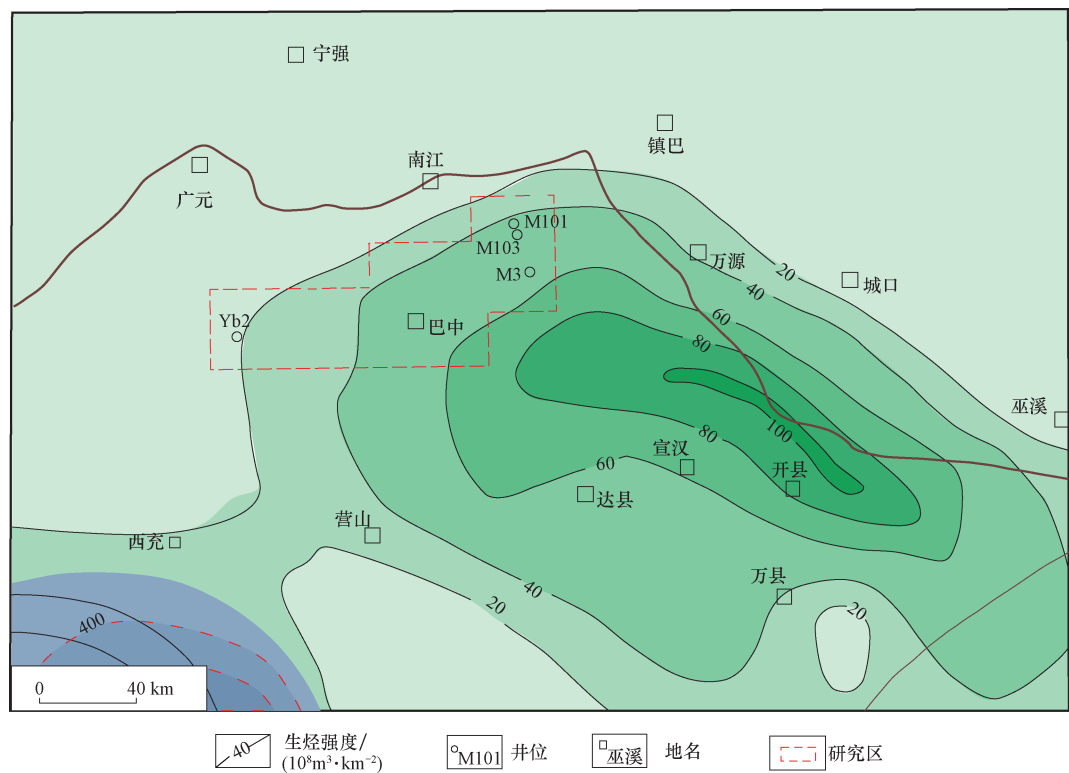


图 2 川东北地区吴家坪组烃源岩生气强度

Fig. 2 The source rock generation intensity map of the Wujiaping Formation, northeastern Sichuan Basin

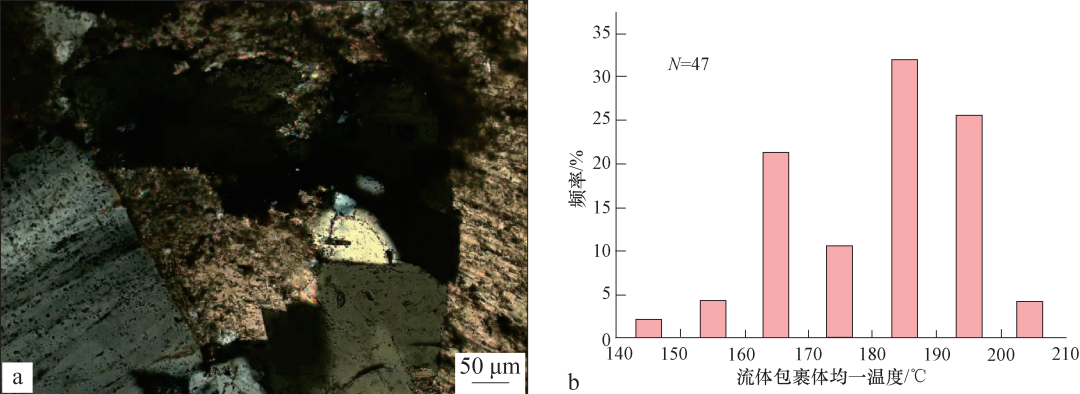


图 3 川东北地区须家河组高温热液特征

Fig. 3 High-temperature hydrothermal characteristics of the Xujiahe Formation, northeastern Sichuan Basin

a. M3 井,埋深 4 902.3 m,须四段,鞍状白云石;b 鞍状白云石包裹体均一温度分布

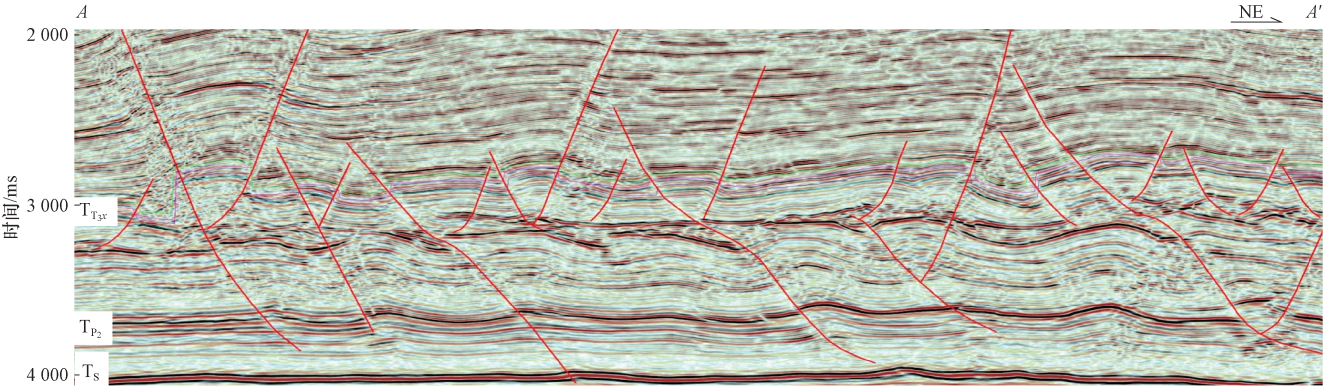


图 4 川东北通江地区构造地震解释剖面(剖面位置见图 1A—A')

Fig. 4 Seismic-structural interpretation profile of the Tongjiang area, northeastern Suchuan Basin(see Fig. 1 for section A - A')

2.3 “断缝体”气藏有利勘探目标

通江-马路背地区须家河组纵向上发育须二段、须三段和须四段3套有利储集体,主要为辫状河三角洲-湖泊沉积。勘探实践表明,中-粗粒砂岩岩相次生溶蚀孔隙发育,裂缝发育,是最有利的岩相类型。辫状河三角洲前缘水下分流河道砂岩基质孔隙发育,物性相对较好,裂缝发育,水下分流河道是研究区最有利沉积微相。岩心实测物性显示,通江-马路背地区须家河组砂岩孔隙度平均仅为2.2%,渗透率平均仅为 $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为典型致密砂岩储层。但是在整体致密背景下仍发育孔隙度大于4%,渗透率较高的相对优质储层,勘探实践也得到了证实。M101 须家河组二段常规测试日产天然

气 $60.11 \times 10^4 \text{ m}^3$,至今累产天然气超 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$; M103 井须二段常规测试日产气 $13.11 \times 10^4 \text{ m}^3$,至今累产天然气也超过 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$,两口井累产气近 $6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。从岩心、薄片和电镜下可以观察到大量原生粒间孔与次生溶蚀孔隙发育,构成了良好的储集空间。岩心和成像测井资料显示,须家河组规模网状裂缝发育,扫描电镜下也可以观察到刚性碎屑颗粒破裂缝的密集发育,微裂缝极其发育,构造裂缝和微裂缝等多尺度裂缝沟通了大量基质孔隙,耦合叠加构成了规模网状缝孔体系^[20](图5)。大面积分布的致密砂岩,受断裂及褶皱联合控制,发育断层、褶皱伴生缝与基质孔隙耦合叠加,形成“断缝体”优质储层,规模网状裂缝提高了孔渗连通性,是“断缝体”优质储层形成的关键。

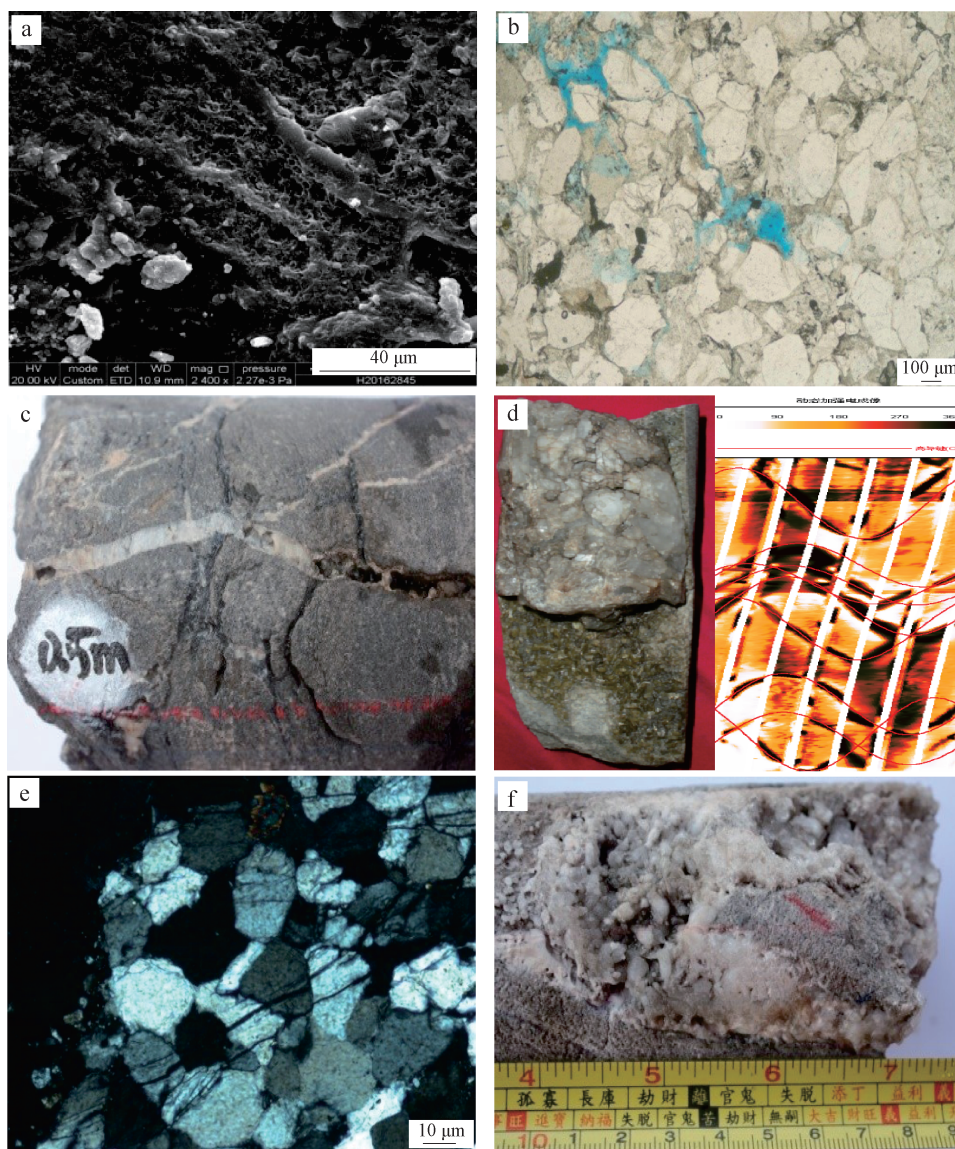


图5 川东北通江-马路背地区须家河组储集空间类型

Fig. 5 Reservoir space types in the Xujiache Formation, Tongjiang-Malubei area, northeastern Sichuan Basin

- a. M3 井,埋深4 904 m,基质微孔隙;b. M3 井,埋深4 905.3 m,微裂缝;c. M3 井,埋深4 902.4~4 902.7 m,网状裂缝;d. M103 井,埋深2 912.90~2 913.15 m,裂缝;e. M101 井,埋深3 233 m,微裂缝;f. M4 井,埋深4 315.2~4 315.6 m,裂缝

沉积相研究表明,须二段沉积时期,通江-马路背地区整体为辫状河三角洲前缘沉积,水下分流河道砂岩大面积连片分布。须三段为辫状河三角洲前缘-滨浅湖沉积,辫状河三角洲前缘主要发育在 M3 井以东地区。须四段沉积时期,马路背地区为辫状河三角洲平原沉积,主要发育砾岩相,通江地区为辫状河三角洲前缘沉积,发育中-粗粒砂岩岩相。通过对沉积微相、岩相、储层的精细刻画与评价,明确了各层系有利勘探目标。

3 断缝体“甜点”预测技术

川东北地区须家河组发育多类型孔隙与多尺度裂缝耦合叠加形成的“断缝体”优质储层。强烈的构造改造作用下形成的烃源断层沟通了深层二叠系海相优质烃源和须家河组“断缝体”优质储层,深层海相天然气沿着断裂向上运移,与须家河组烃源岩生成的天然气一起在须家河组“断缝体”中成藏富集,称之为“断缝体”甜点。

“断缝体”甜点预测包括烃源断层识别评价、相对优质储层预测和裂缝综合预测 3 个方面。攻关形成了 3 项创新性技术:①形成了基于动态构造恢复的烃源断层识别评价技术,落实烃源断层分布;②形成了非线性岩性及物性反演预测技术,落实了相对优质储层展布;③形成了叠前叠后裂缝综合预测技术,明确了规模裂缝发育带。

3.1 地震资料解释性处理

地震资料的质量,如信噪比、连续性以及成像精度等,直接影响相干、方差和曲率等地震属性的质量。为

了获取更加精确的地震属性体,往往会先对原始地震数据进行解释性优化处理,消除随机噪音、去除各类处理假象、还原振幅/相位偏差,提高地震资料信噪比、连续性及成像精度。

通江-马路背地区受米仓大巴和龙门山等多期构造应力挤压,造成该区断裂极其发育,导致三维地震资料信噪比较低、连续性较差、断裂成像精度降低(图 6a),为了更好地开展后续断缝体预测及描述,对原始地震数据进行了必要的解释性优化处理:①基于倾角导向滤波的去噪处理^[21-22](图 6b),显著提高了资料的信噪比及连续性,保留微断层的振幅变化特征;②基于断裂增强的聚焦成像处理^[23-24](图 6c),提高断裂成像精度,为后续断裂缝预测提供高质量地震数据。

3.2 基于动态构造恢复的烃源断层识别评价技术

通南巴地区海相和陆相地层受膏盐岩发育及多期构造变形的影响,断裂纵横交错,纵向展布不一,烃源断层识别难度大,常规平衡剖面对复杂断裂恢复耗时长,且不能基于地震剖面直接进行恢复。基于平衡剖面恢复的原理,岩石在变形前后体积一致、层长一致、位移一致和缩短量一致的“4 个原则”,根据斜剪切地层形变原理开展断裂恢复。在恢复的基础上,构建演化时序,揭示纵横向断层和褶皱的演化时序。

选取以构造运动方向大体一致的地震剖面,即选取垂直区域构造走向的地震剖面。利用钻井开展速度拟合分析,建立平均速度模型,开展速度验算,统一到线性表达(即 $V = V_0 + Kt$),把时间域剖面转换到深度域。根据层位标定的结果,按照构造解释原则,选取主要目的层开展层位和断层解释,构建合理的构造模

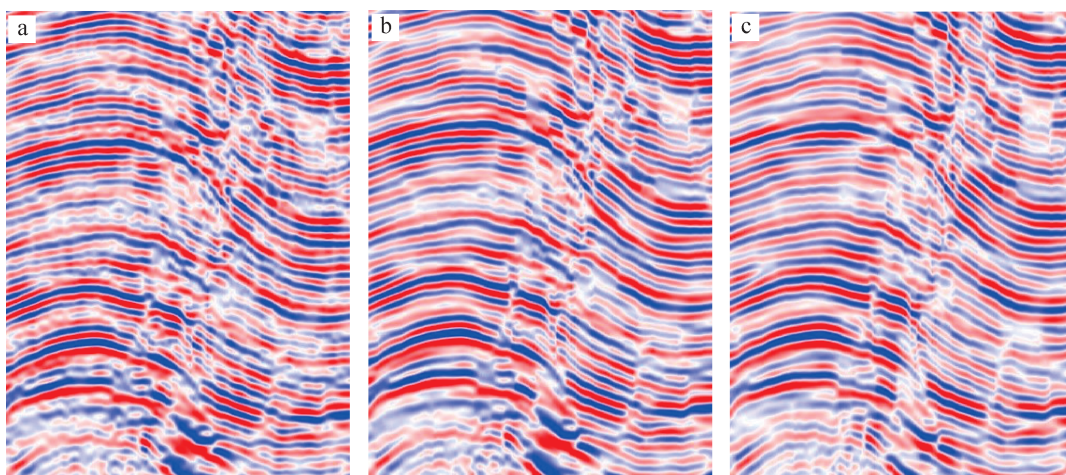


图 6 川东北通江-马路背地区须家河组原始地震资料与倾角导向滤波、断裂聚焦成像剖面对比

Fig. 6 Sectional comparison view of raw seismic data and dip guide filter as well as fracture focused imaging, Xujiahe Formation,

Tongjiang-Malubei area, northeastern Sichuan Basin

a. 原始地震资料 b. 倾角导向滤波 c. 断裂聚焦成像

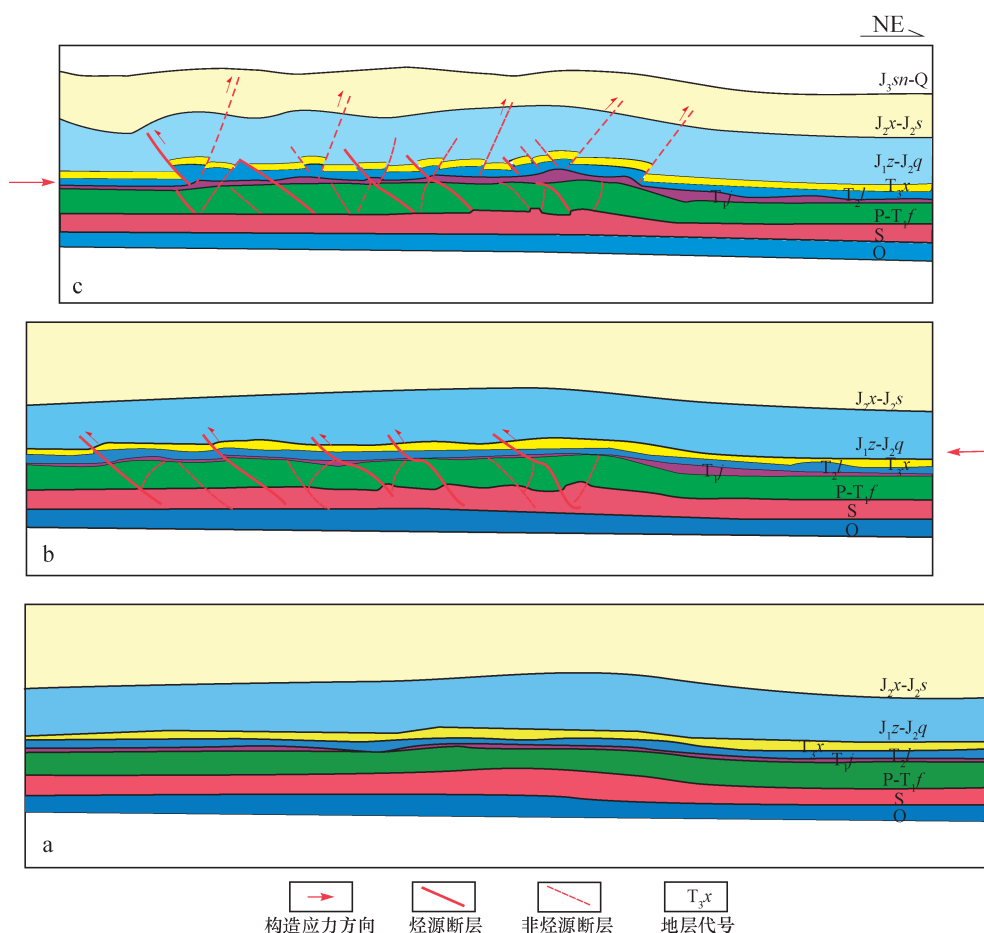


图7 川东北地区烃源断层构造演化剖面示意图

Fig.7 Evolution profile of the source rock-rooted faults, northeastern Sichuan Basin

a. 燕山早期; b. 燕山中、晚期; c. 喜马拉雅期

型。在构造分析的基础上,选择合理的钉线,利用“4个原则”对每条断层进行恢复。在恢复的基础上,构建演化时序,揭示纵横向断层和褶皱的演化时序。通过开展动态恢复的烃源断层识别(图7),燕山中晚期,研究区受大巴山挤压作用,形成以志留系为滑脱底界,地层由北东向南西缩短变形,发育北东倾向,向上贯穿二叠系—三叠系的烃源断层。喜马拉雅期,以嘉四段—嘉五段膏盐岩为滑脱面,受构造挤压影响及刚性地层阻挡回弹,陆相变形程度更强,主要发育南西倾向、纵向贯穿侏罗系的大断裂,受地层由南西向北东缩短的影响,早期的烃源断层发生局部错断和复杂化,通过该技术可以消除膏岩滑脱层影响,有效识别出烃源断层的分布(图8)。

须家河组天然气富集高产与烃源断层分布具有明显的对应关系, M101 须二段常规测试日产气量为 $60.11 \times 10^4 \text{ m}^3$, M103 井须二段常规测试日产气量为 $13.11 \times 10^4 \text{ m}^3$, M3 井须四段常规射孔测试日产气量为 $10.11 \times 10^4 \text{ m}^3$, 这3口高产井均发育通源断层, 而 M2 井、M201 井和 M1 井等井由于缺乏通源断层, 须家河组测试均只获得低产气流。

3.3 非线性岩性及物性反演预测技术

川东北地区须家河组在致密背景下依然发育孔隙度大于4%, 渗透率较高的相对优质储层。由于储层埋藏深度大, 基质物性较差, 加之地震分辨能力不足以及地震识别能力减弱等不利因素制约, 普遍致密背景下的相对优质储层识别预测难度极大。通过开展技术方法攻关, 研究不同地层厚度下的振幅与频率之间的关系(AVF), 将非线性的 AVF 作为独立信息引入反演, 合理利用地震的低、中、高频带信息, 减少薄层反演的不确定性, 以适应沉积变化快、基质物性差的致密砂岩储层。该方法基于非线性关系建立起测井目标曲线(GR, Por 等)与地震波形间的非线性映射, 反演得到复杂岩性及基质物性数据^[25]。反演结果整体上能够识别刻画须家河组储层与非储层, 预测储层厚度符合率超过90%(图9)。

3.4 裂缝综合预测技术

1) 多尺度融合裂缝预测技术

由于断裂系统内断裂规模及尺度不同, 如断裂核

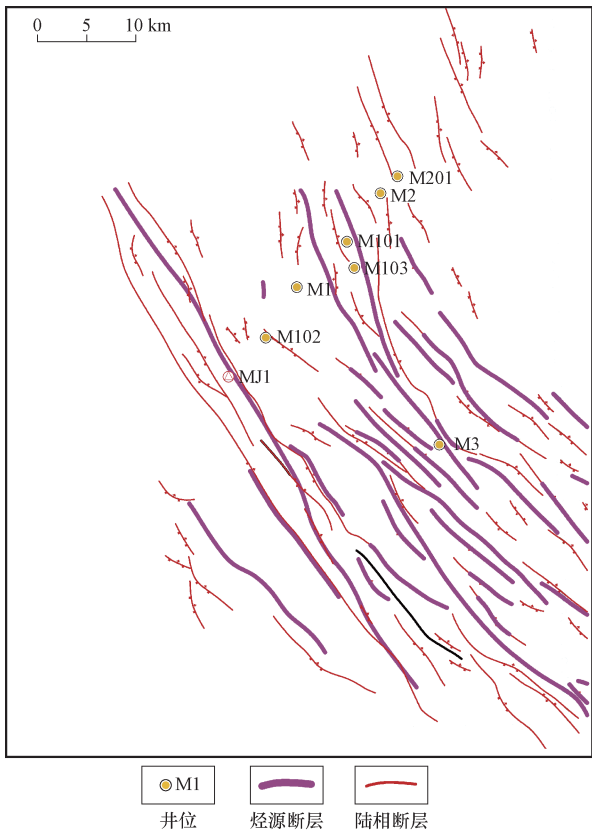


图8 川东北地区烃源断层平面分布

Fig.8 Plane distribution of source rock-rooted faults, northeastern Sichuan Basin

心处规模最大,而断裂带边缘规模及尺度相对小一些。从地震属性表征上分析,大尺度相干属性能够反映规模较大的断裂,突出了断裂核心处的响应,中尺度方差属性、小尺度曲率属性结果可以反映较小规模的断裂及微断裂,突出断裂带边缘的响应。借鉴常规频带思路,将反映不同尺度断裂、微断裂及裂缝的地震几何属性进行颜色融合,选用表征小尺度裂缝的曲率属性为红色(R),表征中尺度微断裂的方差属性为绿色(G),

表征大尺度断裂的相干属性为蓝色(B)。通过利用颜色混合技术,可以采用大、中、小不同尺度的信息来综合反映断裂系统的全貌,融合后的信息较单一尺度结果要更加丰富,断裂系统的边界及内幕信息得到突出和加强,较好的实现了断裂及裂缝精细预测与描述^[26]。

2) OVT 域叠前裂缝预测技术

当地层中裂缝发育时,特别是高角度裂缝发育时,地震波表现出明显的各向异性特征,即不同方位入射的地震波在振幅、频率、相位与衰减等方面具有差异,叠前裂缝预测技术正是基于地震波的这一各向异性特征。由于常规 CMP 道集在开展叠前裂缝预测时,为了满足各个方位覆盖均匀,往往对裂缝更为敏感的远偏数据进行切除,严重影响裂缝预测的精度,而 OVT 域地震道集,不但可以消除道集能量差异,保持真实的 AVO 特征,而且各个方位道集覆盖次数相对均匀,保留较多的裂缝敏感数据,提高了叠前裂缝预测的精度^[27-31]。预测结果与实钻井成像资料匹配性较高(图10),M3 井须家河组成像资料显示北北西向裂缝发育,预测裂缝方向近北北西向;M5 井须家河组成像资料显示北西及北东向裂缝发育,预测裂缝多为北西向,少量北东向裂缝。

综合烃源断层识别、优质储层预测与规模有效裂缝预测结果来圈定断缝体“甜点”发育区,落实高产富集带,在川东北地区探井部署的应用中见到较好的效果。如 M5 井须三段常规射孔测试获 $16.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流,须四段常规射孔测试获 $21.17 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流,实现了“断缝体”气藏多层系立体勘探。“十三五”期间,根据断缝体“甜点”预测结果在川东北地区通江-马路背地区勘探部署取得了积极成效,落实了千亿方资源规模,基本实现了川东北地区通江-马路背区块的高效勘探。

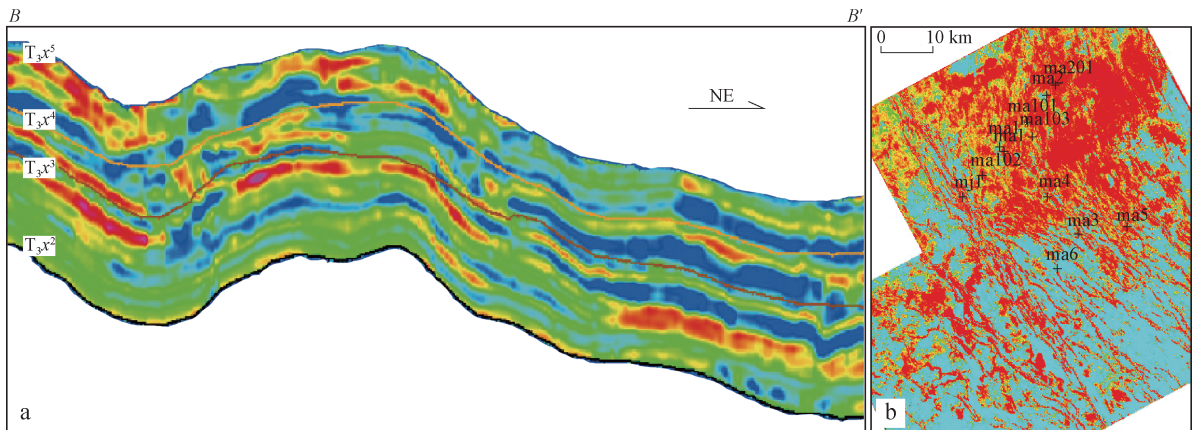


图9 川东北地区须家河组非线性分频反演储层预测

Fig.9 Nonlinear frequency division inversion profile of reservoir prediction,Xujiahe Formation, northeastern Sichuan Basin

a. 孔隙度反演剖面;b 伽马反演平面

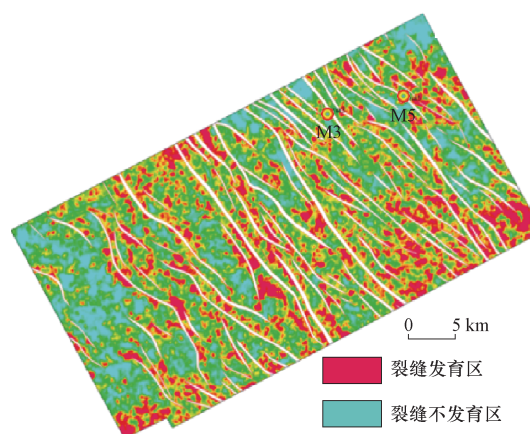


图10 川东北地区须家河组叠前裂缝预测

Fig. 10 Pre-stack fracture prediction of the Xujiahe Formation, northeastern Sichuan Basin

4 结论

1) 烃源岩、烃源断裂和“断缝体”优质储层是须家河组“断缝体”气藏3个关键成藏要素。川东北地区通南巴构造带构造变形强,深大烃源断裂发育,烃源条件优越,“断缝体”优质储层发育,是“断缝体”气藏勘探的最有利区带。

2) 基于动态构造恢复烃源断层识别技术,非线性岩性及物性反演预测技术,多尺度融合及OVT域三维叠前裂缝预测等综合预测技术,能有效解决“断缝体”气藏输导体系、优质储层、有效裂缝预测等关键问题,从而实现“甜点”的精细预测,为须家河组“断缝体”气藏的高效勘探提供技术支撑。

3) 经过多年的勘探实践,形成的川东北地区须家河组致密砂岩“断缝体”气藏评价、断缝体“甜点”预测等勘探技术,促进了“断缝体”气藏勘探获得突破。通南巴地区须家河组“断缝体”气藏多口井常规测试获得高产工业气流,实现了“断缝体”气藏高效勘探开发。目前已提交探明储量 $192 \times 10^8 \text{ m}^3$,控制储量 $368 \times 10^8 \text{ m}^3$,落实了千亿方资源阵地。

参考文献

- [1] 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 & Development, 2013, 40(2): 139–149.
- [2] 王威. 川东北地区须家河组天然气高效成藏模式探讨[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(3): 27–34.
Wang Wei. High efficient reservoir accumulation models of natural gas of Xujiahe Formation in northeastern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(3): 27–34.
- [3] 周路, 李飞, 何登发, 等. 四川盆地北部地区三叠系构造及其演化

特征分析[J]. 地质科学, 2013, 48(1): 71–92.

Zhou Lu, Li Fei, He Dengfa, et al. Structure and evolution characteristics analysis of Triassic in northern Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2013, 48(1): 71–92.

- [4] 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): 684–695.
Cai Xunyu, Qiu Guiqiang, Sun Dongsheng, et al. Types and characteristics of tight sandstone sweet spots in large basins of central-western China[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 684–695.
- [5] 刘忠群, 徐士林, 刘君龙, 等. 四川盆地川西坳陷深层致密砂岩气藏富集规律[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 31–40.
Liu Zhongqun, Xu Shilin, Liu Junlong, et al. Enrichment laws of deep tight sandstone gas reservoirs in the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 31–40.
- [6] 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 Xujiahe 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.
- [7] 王威. 四川元坝地区须二段致密砂岩储层孔隙演化与天然气成藏[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2012, 39(2): 151–157.
Wang Wei. Pore evolution and gas accumulation in tight sandstone reservoir of Member 2 of Xujiahe Formation in Yuanba area of Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology edition), 2012, 39(2): 151–157.
- [8] 姜复东, 苏培东, 秦启荣. 通南巴地区主要构造成因模式探讨[J]. 断块油气田, 2008, 15(3): 14–17.
Jiang Fudong, Su Peidong, Qin Qirong. Discussion of main tectogenetic models in Tongnanba Area[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2008, 15(3): 14–17.
- [9] 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 & Development, 2010, 37(2): 146–157.
- [10] 戴金星, 宋岩, 张厚福. 中国大中型气田形成的主要控制因素[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(6): 481–487.
Dai Jinxing, Song Yan, Zhang Houfu. Main controlling factors for the formation of large and medium-sized gas fields in China[J]. Science China Earth Science, 1996, 26(6): 481–487.
- [11] 李军, 郭彤楼, 邹华耀, 等. 四川盆地北部上三叠统须家河组煤系烃源岩生烃史[J]. 天然气工业, 2012, 32(3): 25–28.
Li Jun, Guo Tonglou, Zou Huayao, et al. Hydrocarbon generation history of coalmeasure source rocks in the upper Triassic Xujiahe Formation of the northern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(3): 25–28.
- [12] 屈红军, 蒲仁海, 陈硕, 等. 相-势耦合控制鄂尔多斯盆地中生界石油聚集[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 752–762, 874.
Qu Hongjun, Pu Renhai, Chen Shuo, et al. Controls of facies-potential coupling on oil accumulation in the Mesozoic Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4): 752–762, 874.
- [13] 刘昭茜, 罗开平, 唐永, 等. 四川盆地元坝-通南巴地区关键构造期构造特征及陆相致密砂岩天然气成藏响应[J]. 地球科学,

- 2019,44(3):756-772.
- Liu Zhaoqian, Luo Kaiping, Tang Yong, et al. Critical tectonic periods and the response of gas accumulation in non-marine tight sandstone reservoir in Yuanba-Tongnanba area, Sichuan Basin [J]. Earth Science, 2019, 44(3): 756-772.
- [14] 邹才能, 陶士振, 朱如凯. “连续型”气藏及其大气区形成机制与分布—以四川盆地上三叠统须家河组煤系大气区为例[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(3): 307-319.
- Zou Caineng, Tao Shizhen, Zhu Ruka, et al. Formation and distribution of “continuous” gas reservoirs and their giant gas province: A case from the Upper Triassic Xujiahe Formation giant gas province, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration & Development, 2009, 36(3): 307-319.
- [15] 王威, 黄曼宁. 元坝地区须家河组致密砂岩气藏富集主控因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(3): 266-273.
- Wang Wei, Huang Manning. Main controlling factors of tight sandstone gas reservoir of Upper Triassic Xujiahe Formation in Yuanba area, Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43(3): 266-273.
- [16] 杜红权, 王威, 时志强, 等. 四川盆地东北部马路背地区上三叠统须家河组天然气地球化学特征及气源[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(1): 34-40.
- Du Hongquan, Wang Wei, Shi Zhiqiang, et al. Geochemical characteristics and source of natural gas of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Malubei area, northeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 34-40.
- [17] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地天然气特征及气源[J]. 地质学前沿, 2006, 13(2): 234-248.
- Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. The characteristics of natural gas in Sichuan basin and its sources [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(2): 234-248.
- [18] 吴小奇, 黄土鹏, 廖凤蓉, 等. 四川盆地须家河组及侏罗系煤成气碳同位素特征[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(4): 418-427.
- Wu Xiaoqi, Huang Shipeng, Liao Fengrong, et al. Carbon isotopic compositions of coal-formed gas in the Xujiahe Formation and Jurassic in western Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration & Development, 2011, 38(4): 418-427.
- [19] 李岩峰. 四川盆地东北部中-新生代造山与前陆变形构造叠合关系研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2005.
- Li Yanfeng. Mesozoic-Cenozoic Superimposed Orogeny and Foreland Deformation in the Northeastern Sichuan Basin [D]. Chengdu: Journal of Chengdu University of Technology, 2005.
- [20] 徐樟有, 宋丽, 吴欣松. 川中地区上三叠统须家河组典型气藏解剖与天然气成藏主控因素分析[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(2): 7-11.
- Xu Zhangyou, Song Li, Wu Xinsong, et al. Typical gas reservoirs and main controlling factors of reservoir-forming of Upper Triassic Xujiahe Formation in central Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(2): 7-11.
- [21] 徐德奎, 王玉英, 郑江峰, 等. 倾角导向的相干加强技术在改善复杂断块地震资料中的应用[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(3): 1224-1228.
- Xu Dekui, Wang Yuying, Zheng Jiangfeng, et al. Dip steering coherent-enhancing filtering and its application on seismic data of complex fault-block [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(3): 1224-1228.
- [22] 段友祥, 曹婧, 孙歧峰. 自适应倾角导向技术在断层识别中的应用[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(4): 101-107.
- Duan Youxiang, Cao Jing, Sun Qifeng. Application of auto-adaptive dip-steering technique to fault recognition [J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(4): 101-107.
- [23] 李光明, 冯磊. 基于图像信息的地震断层增强方法及其应用[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(5): 2138-2142.
- Li Guangming, Feng Lei. Image processing the enhancement of the seismic fault of method and its application. [J] Progress in Geophysics, 2012, (5): 2138-2143.
- [24] 杨培杰, 穆星, 张景涛. 方向性边界保持断层增强技术[J]. 地球物理学报, 2010, 53(12): 2992-2997.
- Yang Peijie, Mu Xing, Zhang Jingchao. Orientational edge preserving fault enhance [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(12): 2992-2997.
- [25] 刘保国. 提高大牛地气田三维地震储层预测精度的思考[J]. 石油物探, 2008, 47(1): 95-102.
- Liu Baoguo. Considerations for improving accuracy of reservoir prediction from 3-D seismic data in Daniudi gas field [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008, 47(1): 95-102.
- [26] 甘其刚, 高志平. 宽方位AVA裂缝检测技术应用研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(5): 42-44.
- Gan Qigang, Gao Zhiping. Application of AVA fracture detection technique [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(5): 42-43.
- [27] 高帅, 曾联波, 马世忠, 等. 致密砂岩储层不同方向构造裂缝定量预测[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(3): 427-434.
- Gao Shuai, Zeng Lianbo, Ma Shizhong, et al. Quantitative prediction of fractures with different directions in tight sandstone reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(3): 427-434.
- [28] 李四海, 马新仿, 张士诚, 等. CO₂-水-岩作用对致密砂岩性质与裂缝扩展的影响[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(3): 312-318.
- Li Sihai, Ma Xinfang, Zhang Shicheng, et al. Experimental investigation on the influence of CO₂-brine-rock interaction on tight sandstone properties and fracture propagation [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(3): 312-318.
- [29] 印兴耀, 刘志国, 李春鹏, 等. 裂缝型储层预测的稳定方位AVO梯度无约束反演方法研究[J]. 石油物探, 2014, 53(6): 683-691.
- Yin Xingyao, Liu Zhiguo, Li Chunpeng, et al. Fracture formation prediction with a steady azimuth AVO gradient unconstrained inversion method [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53(6): 683-691.
- [30] Shaoqun Dong, Lianbo Zeng, Wenya Lyu, et al. Fracture identification and evaluation using conventional logs in tight sandstones: A case study in the Ordos Basin, China [J]. Energy Geoscience, 2020, 1(3-4): 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.6.3>.
- [31] 叶亮, 李宪文, 马新星, 等. 不同脆性致密砂岩裂缝扩展规律实验[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(5): 575-581.
- Ye Liang, Li Xianwen, Ma Xinxing, et al. Experiments on hydraulic fracture propagation in tight sandstones with different brittleness [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(5): 575-581.