

引用: 赵正望, 张航, 张晓丽, 等. 川东北地区上三叠统须家河组致密气成藏地质特征及成藏模式[J]. 中国石油勘探, 2023,28(3):121-131.

Zhao Zhengwang, Zhang Hang, Zhang Xiaoli, et al. Geological characteristics and gas accumulation pattern of tight gas reservoirs in the Upper Triassic Xujiahe Formation in northeastern Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023,28(3):121-131.

川东北地区上三叠统须家河组致密气成藏地质特征及成藏模式

赵正望¹ 张航² 张晓丽¹ 曾令平²

(1 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院; 2 中国石油西南油气田公司川东北气矿)

摘要: 一直以来, 四川盆地上三叠统须家河组致密气勘探主要集中在川西、川中和川北地区, 川东地区因处于川东隔档式褶皱构造带, 致密气勘探一直未引起重视, 勘探程度低。近年来, 川东北地区须家河组致密气勘探不断取得新突破, 测试的两口井均获高产工业气流, 展示出川东向斜区须家河组具有一定的勘探潜力。从烃源、储集与构造等地质条件入手, 分析川东北地区须家河组致密气成藏地质特征, 以期揭开川东地区致密气勘探新局面, 研究认为: (1) 川东北地区须家河组气藏烃源主要来自上三叠统须家河组 and 上二叠统吴家坪组, 生烃强度大, 具有“双源供烃”的特点, 具备致密气成藏的烃源基础; (2) 川东北地区须家河组基质孔隙欠发育, 优质储层主要表现为“缝砂体”, 须家河组五段(须五段)大面积分布的储集砂体与准连续分布的裂缝为形成规模性“缝砂体”创造了有利的地质条件, 储集条件优越; (3) 川东北地区须五段气藏具有“双源供烃、两期成藏、准连续性分布”的特点, 成藏条件优越。因此, 川东北地区须家河组具备形成大面积“准连续性”气藏的条件, 具有较大的勘探潜力, 对推动川东隔档式褶皱构造带向斜区致密气勘探具有重要意义。

关键词: 四川盆地; 川东北; 上三叠统; 须家河组; 致密气; 地质特征; 双源供烃; 准连续性气藏

中图分类号: TE112.1

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2023.03.010

Geological characteristics and gas accumulation pattern of tight gas reservoirs in the Upper Triassic Xujiahe Formation in northeastern Sichuan Basin

Zhao Zhengwang¹, Zhang Hang², Zhang Xiaoli¹, Zeng Lingping²

(1 Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company; 2 Branch of Chuandongbei Gas Field, PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company)

Abstract: The exploration of tight gas in the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin has always focused in western, central and northern Sichuan Basin, while that in eastern Sichuan Basin has not been attached emphasis due to its complex structural location in ejective fold structural belt, resulting in a low exploration level. In recent years, new breakthroughs have successively been made in the exploration of tight gas in Xujiahe Formation in northeastern Sichuan Basin, and high-yield commercial gas flows have been tested in two wells, which show tight gas potential in Xujiahe Formation in the syncline area in eastern Sichuan Basin. From the perspective of source rock, reservoir and structural conditions, the geological characteristics of tight gas reservoir in Xujiahe Formation in northeastern Sichuan Basin are analyzed, so as to open a new prelude to the tight gas exploration in eastern Sichuan Basin. The study results show that: (1) The hydrocarbon source of Xujiahe Formation gas reservoir in northeastern Sichuan Basin was mainly supplied by source rocks in the Upper Triassic Xujiahe Formation and the Upper Permian Wujiaping Formation, with high intensity of hydrocarbon generation and characteristics of “hydrocarbon supply by dual sources”, which had the material basis for tight gas accumulation; (2) The matrix pores were underdeveloped in Xujiahe Formation reservoir in northeastern Sichuan Basin, and the “fracture-sand body” served as high-quality reservoir. The large-area sand bodies and quasi-continuous

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大专项“四川盆地新区新领域致密气成藏主控因素与有利目标优选”(2021DJ21-01-03)。

第一作者简介: 赵正望(1975-), 男, 重庆人, 硕士, 2005年毕业于中国地质大学(北京), 高级工程师, 现主要从事油气地质综合研究工作。

地址: 四川省成都市天府大道北段12号中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 邮政编码: 610041。E-mail: zhao_zw@petrochina.com.cn

收稿日期: 2022-02-16; 修改日期: 2023-04-02

fractures in the fifth member of Xujiahe Formation delivered favorable conditions for the formation of large-scale superior “fracture-sand body” reservoir; (3) The gas reservoir in the fifth member of Xujiahe Formation in northeastern Sichuan Basin is characterized by “hydrocarbon supply by dual sources, two-stage gas accumulation and quasi-continuous distribution”, showing superior conditions for gas accumulation. To sum up, Xujiahe Formation in northeastern Sichuan Basin has the conditions for forming large-area and “quasi-continuous” gas reservoir, which has great exploration potential and is of great significance for promoting the exploration of tight gas in the syncline area in the ejective fold structural belt in eastern Sichuan Basin.

Key words: Sichuan Basin, northeastern Sichuan Basin, Upper Triassic, Xujiahe Formation, tight gas, geological characteristics, dual source hydrocarbon supply, quasi-continuous gas reservoir

0 引言

近60年来,四川盆地上三叠统须家河组(T_3x)致密气勘探取得了丰硕的成果^[1-5],先后发现了中坝、平落坝、新场、八角场、广安、合川、安岳、元坝及马路背等大中型气藏,它们主要分布在川西、川中及川北地区。川东地区构造上位于川东隔档式褶皱构造带^[6-8],背斜主要出露上三叠统须家河组,宽缓向斜出露侏罗系,须家河组致密气勘探一直未引起重视。近年来,面对国家对油气需求的持续增长与常规油气增长乏力的情况,非常规致密油气逐渐成为油气勘探的生力军^[9-13]。随着地质认识程度的不断提高,以及钻井工艺、储层改造、地震采集及识别技术的不断突破^[14-17],致密气勘探取得了重要进展。随着致密气勘探不断向纵横扩展,以前不受重视的向斜区也得到了地质学家的青睐。

川东北地区主要位于川东隔档式褶皱构造带向斜区,前期天然气勘探主要以二叠系和三叠系礁、滩及石炭系为目的层,未对浅层上三叠统须家河组致密气进行针对性勘探。近期,通过对五宝场地区老井复查,几乎每口井须家河组均有油气显示,尤其是须五段,油气显示频繁,显示级别较高,多为气侵。2019年对老井wbq15井须四段—须六段进行试气,测试获气超过 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,生产测井结果表明天然气主要来自须五段,同年部署的wbq20井须五段测试也获得超过 $16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流,展示出川东北地区须家河组良好的勘探潜力。由于川东北地区须家河组勘探及研究程度低,成藏地质特征及气藏类型尚不清楚,制约了下一步的勘探,为此,本文以须五段为例,从烃源、储集与构造等基本地质条件入手,分析川东北地区须家河组致密气成藏地质特征及气藏类型,建立成藏模式,对推动川东隔档式褶皱构造带向斜区致密气勘探具有重要意义。

1 研究区位置及沉积背景

研究区地理位置处于四川盆地东北部,位于万源以南、达州以北、平昌以东、开州以西,面积约为 3000 km^2 。地貌以山地、丘陵为主,背斜成山,紧密而狭窄;向斜为谷,平缓而开阔,间有高阶台地,地表形态零乱,冲沟发育,多山间凹地。研究区构造上东北部与大巴山弧形构造带相邻、东南部与罗家寨构造带相邻、西南紧靠铜锣峡及七里峡北倾没端、西北为铁山坡构造带,包括铁山坡、五宝场、渡口河等潜伏构造(图1)。

川东北地区须家河组主要为一套深灰色泥岩、页岩夹浅灰色砂岩,地层厚度为 $400 \sim 600 \text{ m}$,由下至上可划分为须二段、须三段、须四段、须五段、须六段(须一段在区内缺失)^[18],沉积环境主要为冲积扇—三角洲—湖泊,物源主要来自大巴山^[19-21]。由于靠近物源区,川东北地区须家河组砂岩十分发育,须二段、须三段、须四段和须六段砂地比为 $60\% \sim 90\%$,而在须五段沉积时期,由于物源区活跃程度相对较弱,湖盆范围扩大,区内表现为“泥包砂”的沉积格局,砂岩累计厚度为 $30 \sim 60 \text{ m}$,砂地比为 $30\% \sim 50\%$,以三角洲前缘沉积为主,主要发育五宝场—七里北和罗家寨—黄龙场两个砂带,砂体呈北东—南西向片状分布,沉积微相以水下分流河道为主^[4,22]。

2 须家河组致密气成藏地质条件

2.1 烃源条件

为了明确川东北五宝场地区须家河组天然气来源,对wbq15井和wbq20井的6个样品天然气组分及碳同位素进行了分析,五宝场地区须家河组天然气组分主要为轻烷烃,其中甲烷含量普遍在97%以上,而川中广安地区须家河组甲烷含量为 $86.07\% \sim 94.22\%$,平均为 90.75% ,五宝场地区须

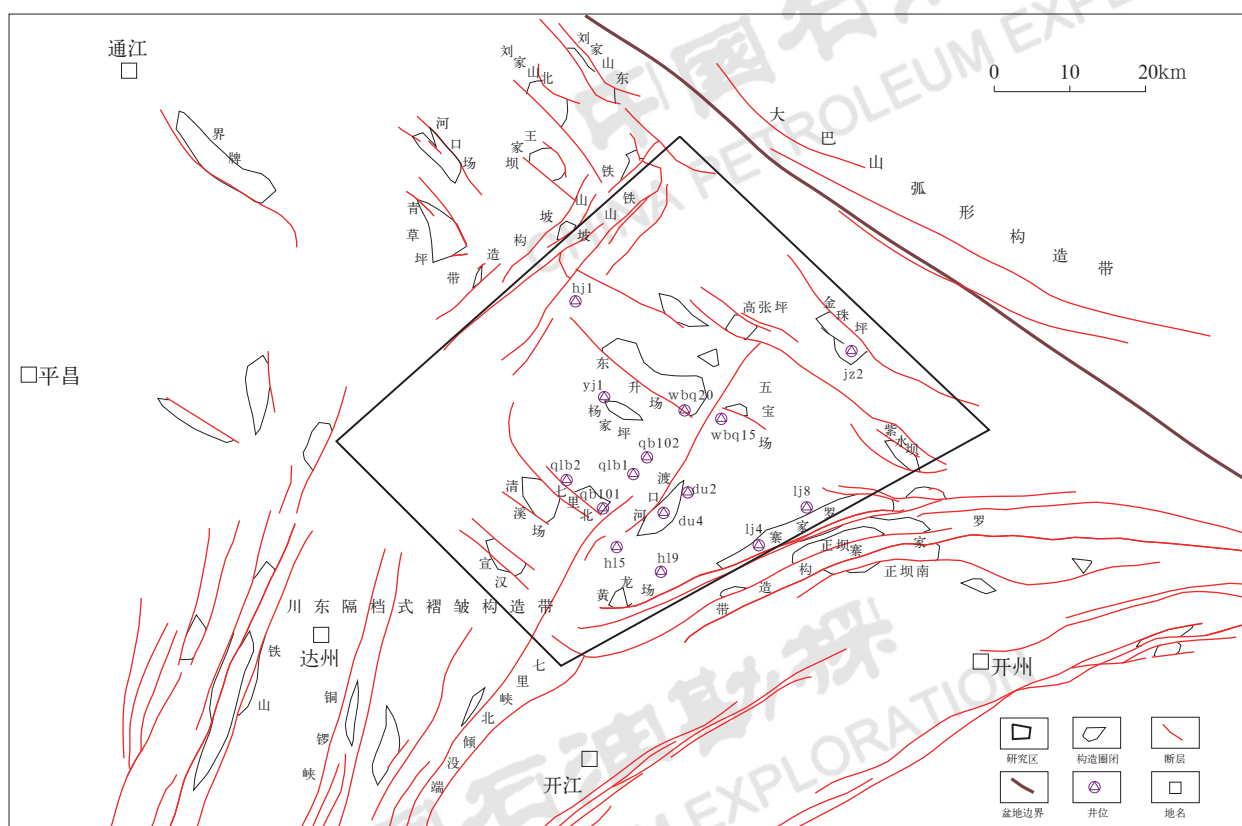


图1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study area

家河组甲烷含量略高于广安地区。根据天然气碳同位素分析发现,wbq15井 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2$,呈正碳同位素序列特征,与川中地区须家河组(guangan1井,hechuan1井)类似,其中 $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 分别为 $-33.97\text{‰} \sim -33.71\text{‰}$ 、 $-26.72\text{‰} \sim -23.33\text{‰}$,其平均值分别为 -33.78‰ 、 -26.5‰ ;wbq20井 $\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3$,碳同位素呈倒转分布,其中 $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 分别为 $-29.55\text{‰} \sim -28.7\text{‰}$ 、 $-29.35\text{‰} \sim -29.17\text{‰}$,其平均值分别为 -29.01‰ 、 -29.28‰ , $\delta^{13}\text{C}_2$ 值轻于 -28.5‰ ,具有油型气的特征,甲烷和碳同位素值倒转是由于海相烃源供给所致^[23-26]。两口井须家河组天然气碳同位素呈现明显不同,wbq15井与广安地区类似,为自生自储天然气,而wbq20井与广安地区差异明显,与马路背地区特征类似(图2),前人研究表明,马路背须家河组天然气由上二叠统吴家坪组烃源供给^[27]。根据五宝场地区地震资料解释,须家河组沉积期断裂发育,发育沟通上二叠统吴家坪组烃源的断层,具备海相烃源供给条件,由此认为五宝场地区须家河组天然气除了自身烃源外,可能存在上二叠统吴家坪组海相烃源贡献。

川东北地区上三叠统须家河组烃源岩主要为灰黑色泥岩、页岩及煤层,区内烃源岩厚度大,主要分布在100~200m,尤以须五段烃源岩厚度大,最厚达70m。研究区内须家河组烃源岩属腐殖型,有机碳含量普遍较高,大部分区域超过1.6%,平均为2.6%,属于中等—较好烃源岩,有机质类型主要为Ⅲ型,局部见Ⅱ₂型,实测镜质组反射率(R_o)主要在1.5%~2.0%之间变化,烃源岩处于高成熟—过成熟阶段,以生气为主,在中侏罗世进入生烃门限,晚侏罗世末期—古近纪末期处于生烃高峰期^[28]。五宝场地区须家河组生烃强度分布在 $(10 \sim 30) \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$,生烃强度较大,烃源持续充注须家河组储层形成致密气藏;上二叠统吴家坪组烃源岩生烃强度为 $(15 \sim 40) \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$ ^[29],通过烃源断层为须家河组致密气藏连续供烃,因此该区具有“双源供烃”特征,具备致密气成藏的烃源基础。

2.2 储集条件

通过对川东北地区须五段砂体对比分析,须五段中下部发育一层较稳定的砂岩,砂岩厚度主要分布在20~40m,该层砂岩是川东北地区须家河组的主要产

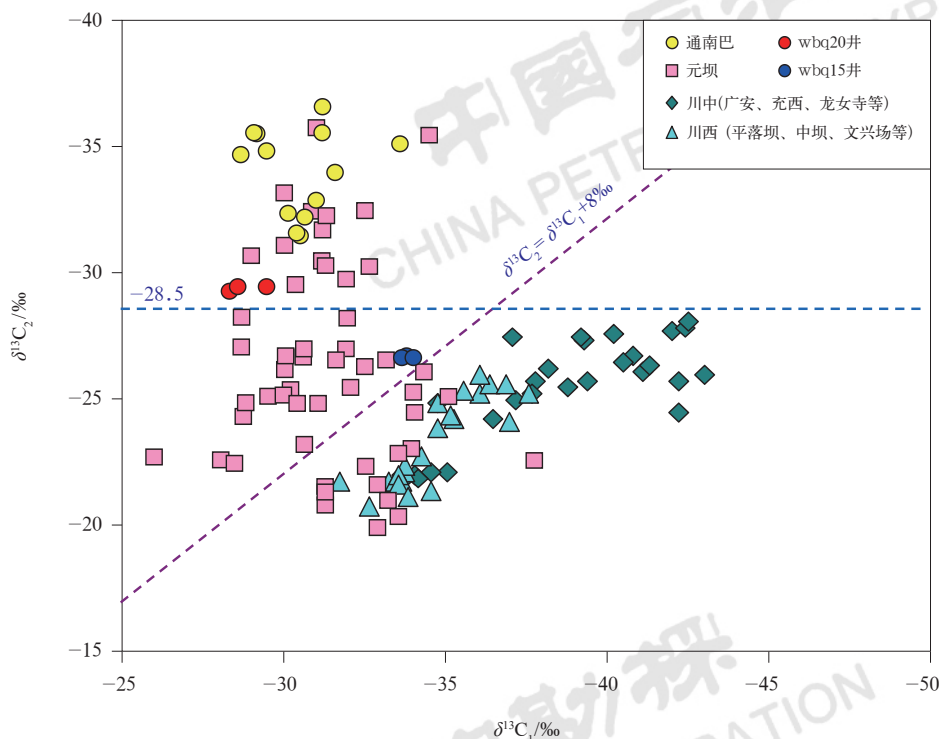


图2 五宝场及邻区须家河组天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 $\delta^{13}\text{C}_2$ 关系图

Fig.2 $\delta^{13}\text{C}_1$ - $\delta^{13}\text{C}_2$ cross plot of natural gas in Xujiache Formation in Wubaochang and adjacent areas

层段, 储集岩性以灰白色、浅灰色粗—中粒岩屑砂岩和岩屑石英砂岩为主, 磨圆中等, 颗粒以线接触为主, 局部受压溶作用呈凹凸接触, 表明压实作用较强。依据 wbq15 井等须五段物性资料分析, 储集砂岩孔隙度分布在 3%~9%, 主要集中在 3.5%~7%, 渗透率分布在 0.001~1.5mD, 主要集中在 0.01~1mD, 表明研究区内须五段储层具有低—特低孔、特低渗特点, 表现为致密储层特征。铸体薄片及扫描电镜等观察分析表明(五宝场地区仅 wbq15 井须五段取心, 微观资料较缺乏), wbq15 井须五段孔隙类型以次生孔为主, 发育粒内容孔、粒间溶孔, 见少量的杂基孔、铸模孔, 孔隙多孤立存在, 自然连通性较差, 孔隙之间发育微裂缝(图3)。川东北地区须五段底界断裂密集, wbq15 井处于两条断裂正中间, 离断裂相对较远, 发育微裂缝, 而离断裂更近的区域, 微裂缝更为发育, 从川东北地区须五段底界地震相干预测图可以佐证, 川东北地区须五段裂缝整体发育, 呈片状连续分布, 越靠近断裂, 裂缝越发育(图4)。综上初析, 川东北地区须五段储集空间由孔隙和裂缝共同组成, 孔隙多孤立存在, 发育的裂缝除了作为储集空间, 还起到沟通孔隙的作用, 使得一些孤立的无效孔隙与裂缝连通, 成为有效孔隙, 形成裂缝性致密砂岩

储集体, 简称“缝砂体”, 为油气运聚提供了储集场所, 因此, “缝砂体”是研究区内须家河组优质储层形成的关键。通过对 wbq15 井、wbq20 井等须五段测井解释, 须五段储层发育, 主要产层段测井解释孔隙度主要集中在 3.5%~7% 之间, 储层厚度主要分布在 8~15m, 横向连续分布, 储层发育区主要分布在五宝场—七里北和罗家寨—黄龙场两个沉积砂带内, 面积约为 560km²(图5), 同时须五段裂缝整体较发育, 储层发育区即是“缝砂体”发育区, 因此川东北地区须五段具备形成规模性“缝砂体”的地质条件, 具有良好的储集条件。

2.3 构造及保存条件

川东北地区靠近盆地边缘, 须家河组经历了印支运动、燕山运动及喜马拉雅运动多期构造叠加和改造, 使地层挤压剧烈, 断层发育。研究区内主要受到两个方向的构造应力作用^[30-31]: 一是来自东南方向, 使研究区内的构造及断裂呈北东—南西向, 形成渡口河、黄龙场等潜伏构造, 具有川东隔档式褶皱构造带的身影; 二是来自东北方向, 大巴山弧形构造向西南挤压, 在研究区内形成北西—南东向构造与断层, 如杨家坪等潜伏构造。因此, 研究区内构造上具有北西—

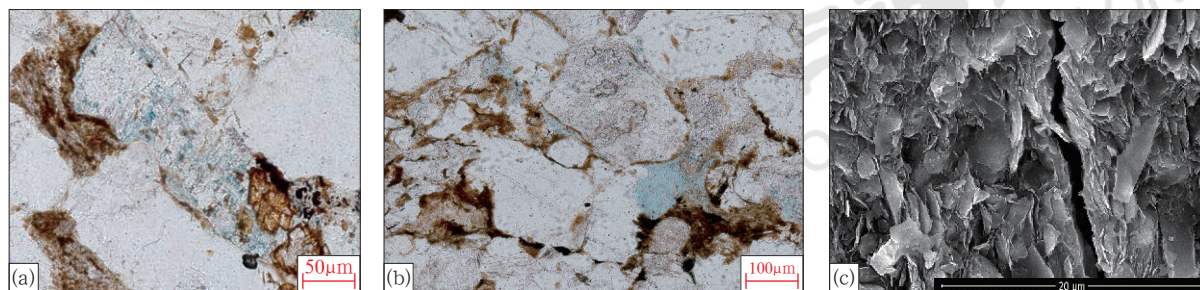


图3 川东北地区wbq15井须五段储集空间

Fig.3 Characteristics of reservoir space in the fifth member of Xujiache Formation in Well wbq15 in northeastern Sichuan Basin

(a) 粒内溶孔, 铸体薄片; (b) 粒间溶孔、微裂缝, 铸体薄片; (c) 微裂缝, 扫描电镜

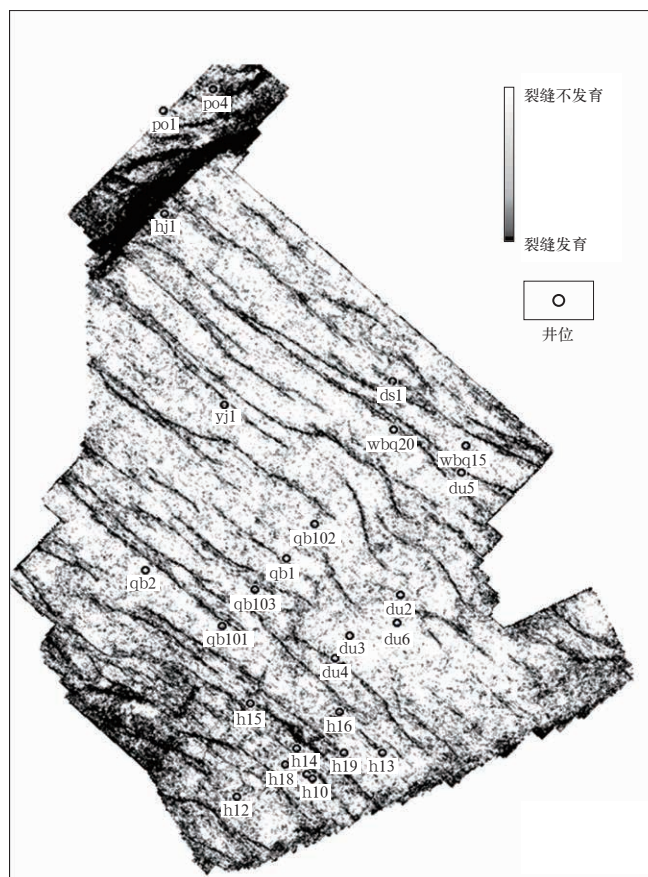


图4 川东北地区须五段底界地震相干预测图

Fig.4 Seismic coherence prediction of the base of the fifth member of Xujiache Formation in northeastern Sichuan Basin

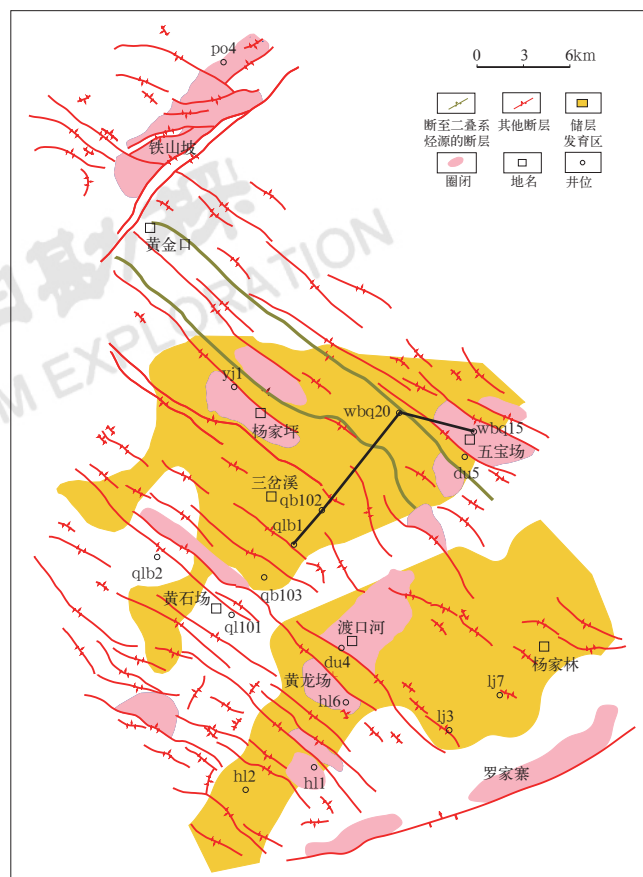


图5 川东北地区须五段底界断裂与储层发育区分布图

Fig.5 Fault and reservoir distribution in the fifth member of Xujiache Formation in northeastern Sichuan Basin

南东向大巴山弧形褶皱与北东—南西向川东隔档式褶皱的双重身影。研究区由西向东依次发育铁山坡、五宝场—黄龙场和罗家寨3排北东—南西向背斜构造, 其中五宝场—黄龙场构造轴线被北西—南东向的断层切割形成多个构造高点, 由北向南依次为五宝场、渡口河和黄龙场高点, 这也表明北东—南西向构造形成时间早于北西—南东向构造。五宝场—黄

龙场和罗家寨两排背斜构造向南逐渐靠拢, 于黄龙场地区交织, 其间的向斜较窄, 最大宽度为6km, 背斜与向斜最大宽度比为1:1, 而铁山坡与五宝场—黄龙场两排背斜构造几乎平行, 其间的向斜较宽缓, 宽度为30km, 背斜与向斜宽度比为1:5, 向斜内发育七里北和杨家坪等北西—南东向断背斜构造。研究区内断层十分发育, 断层走向以北西—南东向为主。

根据断裂分级评价,研究区内须家河组断裂可划分为3级:一级断裂为向下断至上二叠统吴家坪组的断裂(两条),二级断裂为向下断至雷口组—嘉陵江组的断裂,三级断裂为须家河组内部断裂。断裂起双重作用,一是为形成“缝砂体”提供了有利构造条件;二是作为烃源的运移通道,特别是一级断裂对沟通吴家坪组的烃源起到至关重要的作用。关于保存条件,根据川东地区须家河组水侵井平面分布规律,水侵主要分布于距离露头区5km以内;从气显示、水侵与埋深关系可知,随着埋藏深度的增加,油气显示逐渐增加,埋深在1000m以深,油气显示显著增加,而水侵则明显减少。因此,远离露头区(大于5km)、埋深大于1000m的川东向斜区有利于天然气聚集藏,具有较好的保存条件,而五宝场地区仅铁山坡和罗家寨背斜核部出露须家河组,且发育通天断裂,罗家寨和铁山坡分别分布于五宝场地区的东、西两侧,五宝场以西距离铁山坡

露头5km与以东距离罗家寨露头5km之间的区域,须家河组埋深大于2000m,保存条件较好。

2.4 源储匹配关系

由于靠近大巴山物源区,川东北地区须家河组砂体十分发育,须四段及以下地层和须六段以砂岩沉积为主,间夹薄层泥岩,须五段主要为泥岩夹砂岩沉积。依据源储配置关系,须五段成藏组合最好,既发育烃源岩,又发育储层,具有“源储共生”的特点,储集砂体夹于烃源岩中,储集砂岩与烃源岩大面积直接接触,上、下烃源岩生成的油气通过蒸发、渗透、扩散等方式直接向储层充注,成藏匹配关系好,有利于油气运聚成藏;同时,在wbq20井附近发育由须家河组断至上二叠统吴家坪组的断层(图5、图6),上二叠统吴家坪组优质烃源岩生成的油气通过此断裂运移到须家河组储层中,又具有远源成藏特征,这种“双源供烃”特征保证了须家河组具有优越的成藏条件。

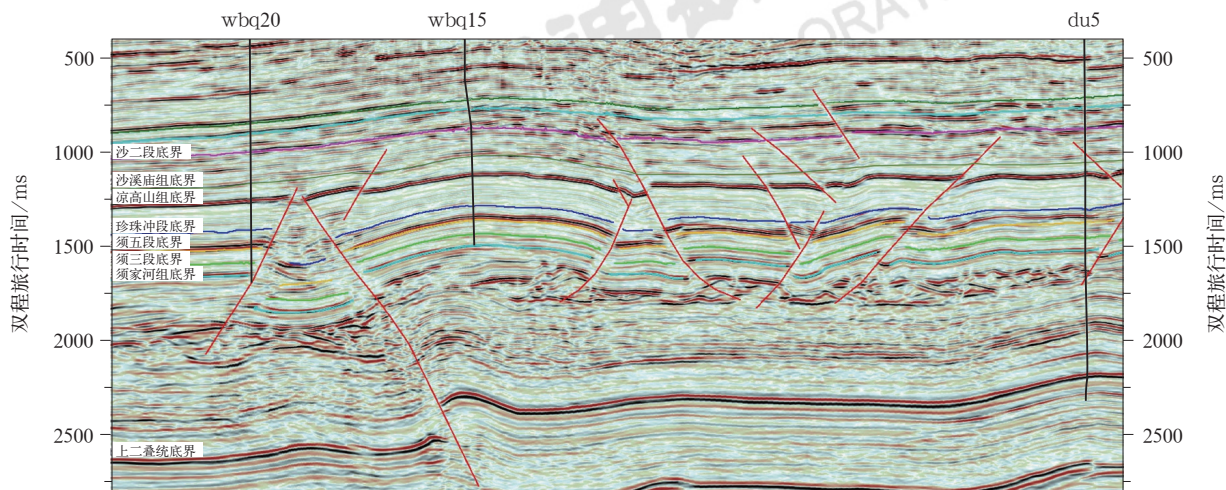


图6 川东北地区须家河组地震剖面图

Fig.6 Seismic profile of Xujiache Formation in northeastern Sichuan Basin

3 成藏主控因素及成藏模式

3.1 气藏基本特征

五宝场地区须五段气藏为“准连续性”气藏。老井复查表明,川东北地区须家河组油气显示频繁,几乎每口井均有气显示,具有大面积含气特点。研究区内须五段储集砂体被北西—南东向断层切割形成多个断块,由wbq15井和wbq20井须五段产层中部地层压力分析可知,wbq15井产层中部压力为

28.58MPa、压力系数为1.12,wbq20井产层中部压力为54.38MPa、压力系数为1.56,两口井为非同一压力系统,表明各断块之间气藏不连通,为独立气藏。根据五宝场地区须五段气藏剖面分析(图7),每个断块天然气的分布不受构造圈闭的控制,各含气断块衔接在一起,平面上大面积连续分布,形成“准连续性”气藏^[32],区别于马路背地区须家河组“断缝体”气藏^[27]。

五宝场须五段气藏中部温度分布在81.1~88.9℃,压力系数为1.12~1.56,为常温—高压气藏。气藏天然气甲烷含量高,气质好,为干气,不产地层水。

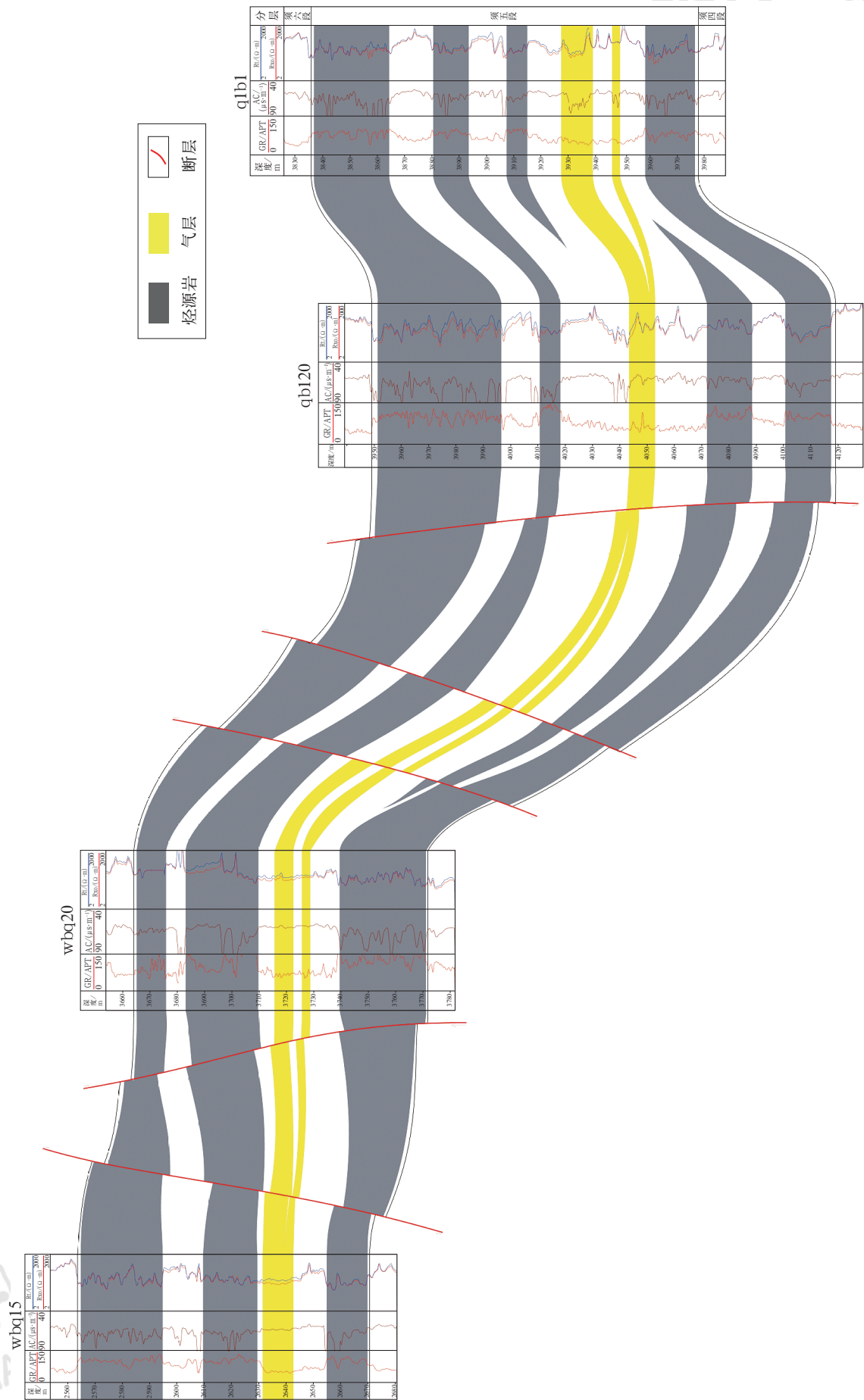


图 7 川东北地区须家河组五段成藏剖面图 (剖面位置见图 5)

Fig.7 Cross-well gas reservoir section in the fifth member of Xujiache Formation in northeastern Sichuan Basin(section location is in Fig.5)

3.2 成藏主控因素

3.2.1 “双源供烃”为形成须家河组准连续性气藏奠定了资源基础

川东北地区须家河组气藏烃源主要来自上三叠统须家河组 and 上二叠统吴家坪组,具有“双源供烃”特点,须家河组生烃强度最高达 $30 \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$,吴家坪组生烃强度最大为 $40 \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$,烃源基础雄厚。川东北地区处于大巴山前缘,须五段主要为三角洲前缘沉积,须五段产层段砂体分布稳定,该储集砂体上下泥页岩也大面积稳定发育,具有典型的“泥包砂”特征,有利储集砂体与烃源岩大面积直接接触,源储配置俱佳。此外,川东北地区构造挤压作用强烈,断裂十分发育,主要发育两类气源断裂:一类为成排分布的须家河组内部逆断层(主要为二级、三级断裂),沟通自身烃源;另一类为二叠系深部断裂(一级断裂),沟通下伏上二叠统吴家坪组优质烃源岩,进一步补充了须家河组气源供给,形成“双源供烃”。综上所述,须家河组烃源岩与储集砂岩大面积直接接触,面排供烃,须家河组内部断裂沟通自身烃源岩,立体输导供烃;上二叠统吴家坪组烃源岩通过深部断裂局部供烃,此类“双源供烃”特点奠定了须家河组大面积“准连续性”气藏形成的基础。

3.2.2 优质“缝砂体”控制了须家河组连续性气藏富集区

川东北地区须五段砂体发育,储层致密,储层孔隙度主要分布在 $3\% \sim 7\%$,储集空间主要为粒内溶孔和粒间溶孔,孔隙本身连通性较差,如果没有裂缝的沟通,这些大量发育的微孔隙将成为无效孔隙,因此,孔隙与裂缝组成的“缝砂体”是须家河组优质储层储集空间主要存在形式,同时,孔隙的发育程度与微裂缝连通孔隙程度共同控制了“缝砂体”的优劣。从 wbq15 井和 wbq20 井须家河组天然气试采结果来看,wbq15 井试采近 3 年,累计生产天然气超过 $4000 \times 10^4 \text{m}^3$,wbq20 井试采近 1 年,累计生产天然气约 $150 \times 10^4 \text{m}^3$,显然,wbq15 井开发效果优于 wbq20 井。根据 wbq15 井和 wbq20 井储集特征分析,wbq15 井须五段储层孔隙度平均达 6% ,而 wbq20 井须五段储层孔隙度平均为 3.6% ,钻井资料分析,wbq15 井和 wbq20 井须五段微裂缝均较发育,显然,wbq15 井须五段“缝砂体”较 wbq20 井更发育。因此,优质“缝砂体”控制了须家河组连续性气藏富集区。

3.2.3 断层使得须家河组气藏最终定型为“准连续性”气藏

研究区处于大巴山前缘及川东构造带,断层十分发育,断层走向主要为北西—南东向,断层不仅具有沟通烃源、改善储层的作用,而且分割五宝场须家河组气藏,形成多个断块含气区。各断块含气区不属同一压力系统,受岩性与断裂的控制而具有独立流体体系,各断块含气区彼此相接,连续分布,最终形成“准连续性”气藏。

3.3 成藏模式

川东北地区须家河组气藏烃源丰富,具有“双源供烃”的特点,上二叠统吴家坪组优质烃源岩生成的天然气沿深大断裂向上输导,与须家河组自身烃源岩生成的天然气一起在“缝砂体”富集成藏。从成藏过程分析,须家河组气藏可能主要表现为两期成藏:

(1) 在晚侏罗世末,构造及裂缝开始形成,此时为须家河组生烃高峰期,须家河组烃源岩生产的天然气直接注入须家河组砂岩储层中,形成大面积分布的构造—岩性气藏,此为须家河组早期成藏。(2) 喜马拉雅期,五宝场须家河组储层已经致密,同时断裂与裂缝大量产生^[33-35],形成“缝砂体”。断裂具有沟通烃源和调整气藏的双重作用,首先,断至(断穿)吴家坪组的大断裂沟通吴家坪组烃源岩,使得须家河组天然气更加富集;其次,断裂分隔致密气藏形成断块气藏,各断块气藏不连通,此为须家河组晚期气藏。川东北五宝场地区须家河组成藏主控因素分析认为,气藏主要受储层与断裂共同控制,晚期成藏是对早期成藏的叠加改造,最终形成大面积分布的“准连续性”气藏。由此,川东北地区须家河组气藏具有“双源供烃、两期成藏、准连续性分布”的特点(图 8),成藏条件优越,具有较大的勘探潜力。

致密气成藏的关键是“源”与“储”及其匹配关系。从成藏特征分析,五宝场须家河组气藏具有“双源供烃”特点,生烃强度较大,资源基础雄厚,同时“缝砂体”发育,须五段“源”与“储”同为一体,具有源储共生的特征,上二叠统吴家坪组烃源岩生成的油气经断裂运移至须家河组储层中,又具有远源成藏特点,源储匹配关系好,因此,五宝场地区须家河组具备良好致密气成藏条件。然而,川东北五宝场地区须家河组致密气藏具有独特性,不同于川中地区须家河组致密气藏。川中地区处于平缓构造带,构造作用力弱,断裂欠发育,须家河组为自生自储气藏,储集空间主要

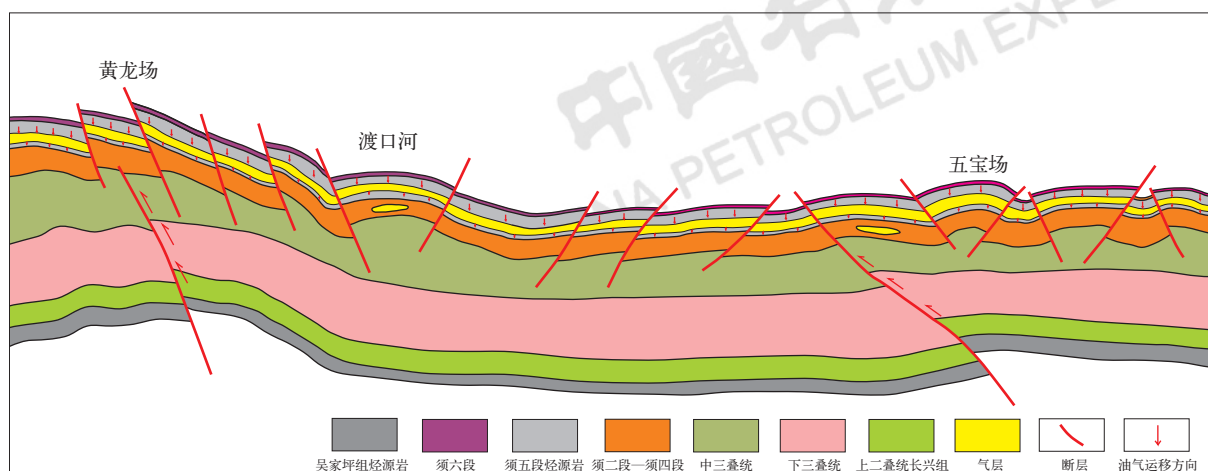


图8 川东北地区须家河组成藏模式图

Fig.8 Gas accumulation pattern in Xujiache Formation in northeastern Sichuan Basin

表现为孔隙^[36-40]；而五宝场须家河组气藏位于大巴山前缘，构造挤压强烈、断裂发育，储层更致密，优质储层主要以“缝砂体”形式存在，“缝砂体”是五宝场地区须家河组天然气勘探的主要对象。

根据气藏类型分析，五宝场须五段气藏为大面积分布的“准连续性”气藏，主要分布在五宝场—七里北和罗家寨—黄龙场两个砂带内，呈北东—南西向展布，预测含气面积约560km²，估算资源量为600×10⁸m³，具有一定的气藏规模。从成藏模式看，五宝场须家河组气藏具有“双源供烃、两期成藏、准连续性分布”的特点，成藏潜力较大。因此，川东北地区须家河组气藏具有一定的规模，勘探潜力较大。

综上分析，川东北地区须家河组成藏具有“双源供烃”“缝砂体”储层及“准连续性”气藏类型的特点。“缝砂体”储层主要形成于断裂发育区储集砂体内，主要分布在五宝场—七里北和罗家寨—黄龙场地区，是川东北地区须家河组天然气勘探的主要对象，这为进一步拓展川东隔档式褶皱构造带向斜区天然气勘探指明了方向，同时对类似构造复杂区陆相致密气勘探具有一定借鉴意义。

4 结论

(1) 川东北地区构造挤压强度大，断裂非常发育，深部断裂沟通了上二叠统吴家坪组烃源岩，弥补了须家河组自身烃源的不足，同时大量断裂伴生缝连通须家河组致密砂岩，形成大面积分布的“缝砂体”储层，为天然气聚集提供了空间保障。

(2) 川东北地区须五段主要为泥岩夹砂岩沉积，

自身源储配置关系较好，加上上二叠统吴家坪组优质烃源补给，“双重烃源”特征决定了须五段是须家河组最佳勘探目的层。同时，须五段气藏为大面积分布的“准连续性”气藏，估算资源量为600×10⁸m³，具有一定的气藏规模，打破了川东北地区须家河组不具备勘探价值的传统认识。

参考文献

- [1] 李国辉, 李楠, 谢继容, 等. 四川盆地上三叠统须家河组前陆大气区基本特征及勘探有利区[J]. 天然气工业, 2012, 32(3): 15-21.
Li Guohui, Li Nan, Xie Jirong, et al. Basic characteristics of the foreland atmospheric area of the Upper Triassic Xujiache Formation in Sichuan Basin and the prospective areas for exploration[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(3): 15-21.
- [2] 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): 1037-1044.
Li Wei, Zou Caineng, Yang Jinli, et al. Types and controlling factors of accumulation and high productivity in the Upper Triassic Xujiache Formation gas reservoirs, Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(5): 1037-1044.
- [3] 杜金虎, 徐春春, 魏国齐, 等. 四川盆地须家河组岩性大气区勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
Du Jinhui, Xu Chunhui, Wei Guoqi, et al. Large lithologic gas provinces exploration of Xujiache Formation in Sichuan Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [4] 赵正望, 谢继容, 李楠, 等. 四川盆地须家河组一、三、五段天然气勘探潜力分析[J]. 天然气工业, 2013, 33(6): 23-28.
Zhao Zhengwang, Xie Jirong, Li Nan, et al. Gas exploration potential of the 1st, 3rd and 5th members of Xujiache Fm reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(6): 23-28.
- [5] 蔡勋育, 刘金连, 张宇, 等. 中国石化“十三五”油气勘探进展与“十四五”前景展望[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(1): 31-42.
Cai Xunyu, Liu Jinlian, Zhang Yu, et al. Sinopec: progress in oil and gas exploration during the 13th Five-Year Plan period

- and prospects for the 14th Five-Year Plan period[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(1):31–42.
- [6] 汪泽成, 赵文智, 徐安娜, 等. 四川盆地北部大巴山前带构造样式与变形机制[J]. 现代地质, 2006,20(3):429–435.
Wang Zecheng, Zhao Wenzhi, Xu Anna, *et al.* Structure styles and their deformation mechanisms of Dabashan foreland thrust belt in the north of Sichuan Basin[J]. Geoscience, 2006,20(3):429–435.
- [7] 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 the Sichuan Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [8] 杨春龙, 苏楠, 芮宇润, 等. 四川盆地中侏罗统沙溪庙组致密气藏条件及勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2021,26(6):98–109.
Yang Chunlong, Su Nan, Rui Yurun, *et al.* Gas accumulation conditions and exploration potential of tight gas reservoir of the Middle Jurassic Shaximiao Formation in Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(6):98–109.
- [9] 于兴河, 李顺利, 杨志浩. 致密砂岩气储层的沉积—成岩成因机理探讨与热点问题[J]. 岩性油气藏, 2015,27(1):1–13.
Yu Xinghe, Li Shunli, Yang Zhihao. Discussion on sedimentary and diagenetic mechanism and hot issues of tight sandstone gas reservoir[J]. Lithologic Reservoirs, 2015,27(1):1–13.
- [10] 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 progress in geological understanding of tight sandstone gas[J]. Lithologic Reservoirs, 2017,29(1):11–20.
- [11] 黄鑫, 董秀成, 肖春跃, 等. 非常规油气勘探发现现状及发展前景[J]. 天然气与石油, 2012,30(6):38–41.
Huang Xin, Dong Xiucheng, Xiao Chunyue, *et al.* Current situation and development prospect of unconventional oil and gas exploration and development[J]. Natural Gas and Oil, 2012,30(6):38–41.
- [12] 赵群, 杨慎, 钱伟, 等. 中国非常规天然气开发现状及前景思考[J]. 环境影响评价, 2020,45(5):34–38.
Zhao Qun, Yang Shen, Qian Wei, *et al.* Current situation and prospect of unconventional gas development in China[J]. Environmental Impact Assessment, 2020,45(5):34–38.
- [13] 魏国齐, 张福东, 李君, 等. 中国致密砂岩气成藏理论进展[J]. 天然气地球科学, 2016,27(2):199–210.
Wei Guoqi, Zhang Fudong, Li Jun, *et al.* New progress in tight sandstone gas reservoirs and favorable exploration areas in China [J]. Natural Gas Geoscience, 2016,27(2):199–210.
- [14] 魏志鹏, 冯青, 曾鸣, 等. 应用地质成果优化致密气水平井压裂设计[J]. 天然气勘探与开发, 2020,43(2):79–87.
Wei Zhipeng, Feng Qing, Zeng Ming, *et al.* Optimizing fracturing design for tight-gas horizontal wells based on geological achievements[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2020,43(2):79–87.
- [15] 张超, 郝明慧, 杨国通, 等. 致密气生产井微型压裂诊断技术[J]. 油气井测试, 2020,29(4):51–55.
Zhang Chao, Hao Minghui, Yang Guotong, *et al.* Micro-fracturing diagnosis technology for tight gas producing wells[J]. Well Testing, 2020,29(4):51–55.
- [16] 刘子雄, 李啸南, 王金伟, 等. 致密气藏水平井甜点段识别方法研究[J]. 中国石油勘探, 2021,26(3):117–125.
Liu Zixiong, Li Xiaonan, Wang Jinwei, *et al.* Study on method of sweet spot interval identification of tight gas reservoir in horizontal well[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(3):117–125.
- [17] 郑新权, 何春明, 杨能宇, 等. 非常规油气藏体积压裂2.0工艺及发展建议[J]. 石油科技论坛, 2022,41(3):1–9.
Zheng Xinquan, He Chunming, Yang Nengyu, *et al.* Volumetric fracturing 2.0 process for unconventional oil and gas reservoirs and R&D suggestions[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2022,41(3):1–9.
- [18] 张健, 李国辉, 谢继容, 等. 四川盆地上三叠统划分对比研究[J]. 天然气工业, 2006,26(1):12–15.
Zhang Jian, Li Guohui, Xie Jirong, *et al.* Stratigraphic division and correlation of upper Triassic in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2006,26(1):12–15.
- [19] 郑荣才, 戴朝成, 罗青林, 等. 四川类前陆盆地上三叠统须家河组沉积体系[J]. 天然气工业, 2011,31(9):16–24.
Zheng Rongcai, Dai Zhaocheng, Luo Qinglin, *et al.* Sedimentary system of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Sichuan foreland basin[J]. Natural Gas Industry, 2011,31(9):16–24.
- [20] 谢继容, 李国辉, 唐大海, 等. 四川盆地上三叠统须家河组物源供给体系分析[J]. 天然气勘探与开发, 2006,9(4):1–3.
Xie Jirong, Li Guohui, Tang Dahai, *et al.* Analysis on provenance supply system of Upper Triassic Xujiahe Formation, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2006,9(4):1–3.
- [21] 李雅楠, 郑荣才, 李国辉, 等. 四川盆地三台—盐亭地区上三叠统须家河组沉积体系分析[J]. 岩性油气藏, 2014,26(2):29–45.
Li Yanan, Zheng Rongcai, Li Guohui, *et al.* Sedimentary system analysis of Upper Triassic Xujiahe Formation in Santai–Yanting area, Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2014,26(2):29–45.
- [22] 赵正望, 丰妍, 李楠, 等. 川东北合作区致密气勘探开发潜力评价及目标优选[R]. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 2022.
Zhao Zhengwang, Feng Yan, Li Nan, *et al.* Evaluation of tight gas exploration and development potential and target optimization in northeast Sichuan cooperation zone[R]. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, 2022.
- [23] 戴金星. 天然气中烷烃气碳同位素研究的意义[J]. 天然气工业, 2011,31(12):14–19.
Dai Jinxing. Significance of the study on carbon isotopes of alkane gases[J]. Natural Gas Industry, 2011,31(12):14–19.
- [24] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地天然气特征及气源[J]. 地学前缘, 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.
- [25] 陈沁, 谢增业, 张璐, 等. 川东北五宝场地区须家河组和沙溪庙组天然气地球化学特征及其勘探意义[J]. 天然气地球科学, 2022,33(10):1648–1660.
Chen Qin, Xie Zengye, Zhang Lu, *et al.* Geochemical characteristics and exploration significance of natural gas in Xujiahe Formation and Shaximiao Formation in Wubaochang area, northeast Sichuan[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(10):1648–1660.
- [26] 王威, 林良彪. 四川盆地东北部马路背地区上三叠统须家河组二段气藏高产机制[J]. 天然气工业, 2017,37(12):11–16.
Wang Wei, Lin Liangbiao. High-yield mechanism of the

- second member of Upper Triassic Xujiahe reservoir in the Malubei area, NE Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017,37(12):11-16.
- [27] 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.
- [28] 陈盛吉, 杜敏, 王世谦, 等. 四川盆地上三叠统须家河组资源潜力评价研究[R]. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 2008.
- Chen Shengji, Du Min, Wang Shiqian, *et al.* Prospective evaluation of oil & gas in Upper Triassic of Xujiahe Formation in Sichuan Basin[R]. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, 2008.
- [29] 张心翌, 庞宏, 庞雄奇, 等. 四川盆地上二叠统龙潭组烃源岩生、排烃特征及资源潜力[J]. 石油与天然气地质, 2022,26(5):621-622.
- Zhang Xingang, Pang Hong, Pang Xiongqi, *et al.* Hydrocarbon generation and expulsion characteristics and resource potential of source rocks in Longtan Formation of Upper Permian in Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022,26(5):621-622.
- [30] 邹玉涛, 段金宝, 赵艳军, 等. 川东高陡断褶带构造特征及其演化[J]. 地质学报, 2015,89(11):2046-2052.
- Zou Yutao, Duan Jinbao, Zhao Yanjun, *et al.* Structural characteristics and evolution of high steep fault fold belt in eastern Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 2015,89(11):2046-2052.
- [31] 蒋炳铨. 川东一带隔档、隔槽式褶皱形成力学机制[J]. 四川地质学报, 1984,5(1):1-12.
- Jiang Bingquan. Mechanical mechanism for the formation of barrier and trough folds in the east Sichuan first belt[J]. Journal of Sichuan Geology, 1984,5(1):1-12.
- [32] 邹才能, 陶士振, 朱如凯, 等. “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 Rukai, *et al.* Formation mechanism and distribution of “continuous” gas reservoirs and their atmospheric zones: taking the Upper Triassic Xujiahe Formation of Sichuan Basin as an example[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009,36(3):307-319.
- [33] 李剑, 魏国齐, 谢增业, 等. 中国致密砂岩大气田成藏机理与主控因素: 以鄂尔多斯盆地和四川盆地为例[J]. 岩性油气藏, 2013,34(增刊1):15-28.
- Li Jian, Wei Guoji, Xie Zengye, *et al.* Accumulation mechanism and main controlling factors of large tight sandstone gas fields in China: cases study on Ordos Basin and Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2013,34(S1):15-28.
- [34] 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]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2005.
- Li Yanfeng. Mesozoic-Cenozoic superimposed orogeny and foreland deformation in the northeastern Sichuan Basin[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2005.
- [35] 李玉玺, 范存辉, 李虎, 等. 川东北元坝中部须家河组构造裂缝形成期次分析[J]. 西北地质, 2018,51(1):265-272.
- Li Yuxi, Fan Cunhui, Li Hu, *et al.* Formation stages about structural fractures of Xujiahe formation fault-fold belt of central Yuanba area, northeast Sichuan[J]. Northwestern Geology, 2018,51(1):265-272.
- [36] 谢继容, 张健, 李国辉, 等. 四川盆地须家河组气藏成藏特点及勘探前景[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008,30(6):40-44.
- Xie Jirong, Zhang Jian, Li Guohui, *et al.* The characteristics of gas reservoir and prospect of exploration in Xujiahe Formation, Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008,30(6):40-44.
- [37] 杨威, 谢增业, 金惠, 等. 四川盆地上三叠统须家河组储层评价及天然气成藏机理[J]. 天然气工业, 2010,30(12):10-15.
- Yang Wei, Xie Zengye, Jin Hui, *et al.* Reservoir evaluation and natural gas accumulation mechanism of Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010,30(12):10-15.
- [38] 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):925-936.
- 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: a case study of Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019,30(7):925-936.
- [39] 田冷, 何顺利, 刘胜军, 等. 广安地区须家河组气藏气水分布特征[J]. 天然气工业, 2009,29(6):23-26.
- Tian Leng, He Shunli, Liu Shengjun, *et al.* Gas water distribution characteristics of Xujiahe Formation gas reservoir in Guang'an area[J]. Natural Gas Industry, 2009,29(6):23-26.
- [40] 朱如凯, 邹才能, 张翥, 等. 致密砂岩气藏储层成岩流体演化与致密成因机理: 以四川盆地上三叠统须家河组为例[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2009,39(3):327-339.
- Zhu Rukai, Zou Caineng, Zhang Nai, *et al.* Evolution of diagenetic fluids and mechanism of tight genesis in tight sandstone gas reservoirs: taking Xujiahe Formation of Upper Triassic in Sichuan Basin as an example[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009,39(3):327-339.