

文章编号: 0253-2697(2024)03-0595-20 DOI:10.7623/syxb202403009

典型油气田

四川盆地川西气田多层系成藏条件 及勘探开发关键技术

熊亮¹ 隆轲² 曹勤明² 章顺利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:四川盆地油气资源丰富,在纵向上从海相到陆相发育多个成藏系统。近年来,川西气田在多个层系均取得了重大油气勘探成果。为了深化油气成藏富集规律认识,指导勘探开发,进一步扩大油气成果,梳理了川西气田的勘探开发历程并系统剖析了油气成藏条件。研究表明:川西坳陷发育多套优质烃源岩,物质条件充足;川西地区中三叠统雷口坡组四段发育局限台地潮坪相白云岩孔隙型储层,可实现四川盆地海相勘探领域由高能礁滩、岩溶等气藏向局限台地潮坪相白云岩气藏的拓展,丰富海相油气的勘探类型;上三叠统须家河组二段发育河口坝和 underwater 分流河道高能砂体,呈广覆叠置发育,与下伏小塘子组烃源岩或自身烃源岩构成了完整的源-储组合;中侏罗统沙溪庙组发育近物源扇三角洲和辫状河三角洲水下分流河道高能砂体,与下伏须家河组五段烃源岩构成了完整的源-储组合。川西地区从二叠系到三叠系雷口坡组发育的“直接式”和“接力式”通源断层、雷口坡组网状分布的微断层和裂缝、须家河组断裂-裂缝-砂体复合输导体系、沙溪庙组断层-砂体输导体系,这些均为高效的油气输导体系,确保了天然气能够高效运移成藏。建立了超深层潮坪相薄互层储层精细预测技术序列,形成了须家河组二段的薄储层预测及中-小尺度裂缝空间刻画技术,实现了储层的精细刻画,支撑了水平井的成功实施。通过量身打造开发方案并攻关钻完井工艺,实现了“少井高产”的开发目标和储量的有效动用。川西地区超深层复杂构造带潮坪相白云岩气藏的开发建产、须家河组的高效开发和沙溪庙组致密砂岩的勘探突破推动了相关领域的勘探开发及方法技术创新。

关键词:雷口坡组;须家河组;沙溪庙组;成藏条件;川西气田

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Multilayer accumulation conditions and key technologies for exploration and development of the West Sichuan gas field in Sichuan Basin

Xiong Liang¹ Long Ke² Cao Qinming² Zhang Shunli²

(1. Sinopec Southwest Oil and Gas Company, Sichuan Chengdu 610041, China;

2. Exploration and Production Research Institute, Sinopec Southwest Oil and Gas Company, Sichuan Chengdu 610041, China)

Abstract: Sichuan Basin has abundant oil-gas resources. Several hydrocarbon accumulation systems develop vertically from marine to terrestrial facies. In recent years, significant oil-gas exploration achievements have made in multiple strata of the West Sichuan gas field. To deepen the understanding of hydrocarbon enrichment regularities, guide the exploration and development practice, and further expand achievements in oil-gas production, this paper reviews the exploration and development history of the West Sichuan gas field and systematically analyzes the hydrocarbon accumulation conditions. The results show as follows. There are many sets of high-quality source rocks in western Sichuan depression, which provide sufficient material conditions. The development of tidal flat dolomite pore reservoir in the Member 4 of Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan area can expand marine exploration field from high-energy reef-beach and karst to confined platform tidal-flat dolomites, and enrich the types of marine oil-gas exploration. The superposed high-energy sandbodies widely developed at mouth bar and underwater distributary channel in the Member 2 of Upper Triassic Xujiahe Formation form a complete source-reservoir assemblage with inner source rocks or underlying Xiaotangzi Formation source rocks. The high-energy sandbodies widely developed at fan delta and braided river delta underwater distributary channels in Shaximiao Formation form a complete source-reservoir assemblage with source rocks of the Member 5 of Xujiahe Formation. The direct and relay through-source faults developed from Permian to Triassic Leikoupo Formation, the network micro-faults and fractures developed in Leikoupo Formation, the fault-fracture-sandbody transport system developed in Xujiahe Formation, and the fault-sandbody transport system developed in Shaximiao Formation in western Sichuan area are all efficient oil-gas transport systems, which ensure the efficient migration and accumulation of natural gas. The fine techniques of ultra-deep tidal-flat thin interbedded reservoir prediction are established, and the techniques of thin reservoir prediction and middle-small fracture space characterization for

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:熊亮,男,1975年9月生,2003年获西南石油学院硕士学位,现为中国石油化工股份有限公司西南油气分公司副总经理、研究员,主要从事石油地质勘探、非常规油气勘探开发及生产管理等工作。Email: xiongliang_xnyq@sinopec.com

通信作者:隆轲,男,1983年6月生,2010年获成都理工大学硕士学位,现为中国石油化工股份有限公司勘探开发研究院副研究员,主要从事天然气勘探工作。Email: longke_xnyq@sinopec.com

the Member 2 of Xujiahe Formation are formed, thus achieving fine reservoir characterization and supporting the implementation of horizontal wells. The development goals of high yield with fewer wells and effective use of reserves have been realized through well-matched development plan and research on drilling and completion technology. In western Sichuan area, the development and production of tidal-flat dolomite gas reservoirs in the ultra-deep complex structural belt, the efficient development of Xujiahe Formation, and the exploration breakthrough of Shaximiao Formation tight sandstone promote the process of exploration and development as well as the innovations of method and technology in relevant fields.

Key words: Leikoupo Formation; Xujiahe Formation; Shaximiao Formation; accumulation condition; West Sichuan gas field

引用:熊亮,隆轲,曹勤明,章顺利.四川盆地川西气田多层系成藏条件及勘探开发关键技术[J].石油学报,2024,45(3):595-614.

Cite: XIONG Liang, LONG Ke, CAO Qinming, ZHANG Shunli. Multilayer accumulation conditions and key technologies for exploration and development of the West Sichuan gas field in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(3): 595-614.

川西气田位于四川盆地西部,主要位于四川省成都市和德阳市境内,地貌为川西平原。川西气田经过半个世纪的持续勘探实践,先后在三叠系雷口坡组、须家河组、侏罗系沙溪庙组取得了天然气勘探成果。截至2022年底,川西坳陷雷口坡组四段(雷四段)上亚段累计提交天然气三级地质储量超过 $3\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中,川西气田(彭州气藏)提交的天然气探明地质储量超过 $1\,100 \times 10^8 \text{ m}^3$,完成了 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的产能建设,是继普光气田、元坝气田后中国石油化工股份有限公司(中国石化)在四川盆地拥有的第3个大型海相气田。川西坳陷须家河组的天然气三级地质储量达 $10\,200 \times 10^8 \text{ m}^3$,天然气资源丰富,截至2023年底,新场构造带须家河组二段(须二段)气藏已提交天然气控制和探明地质储量达 $4\,620 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。此外,2023年川西气田在沙溪庙组提交了控制储量 $123 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。这些都展现了川西气田天然气勘探开发的巨大前景。

川西气田在雷口坡组的勘探发现实现了四川盆地海相天然气勘探由高能礁滩、岩溶等向局限台地潮坪相白云岩的拓展,丰富了海相油气的勘探类型。新场—合兴场须二段气藏的成功勘探开发深化了深层致密砂岩气藏的地质认识,突破了深层致密砂岩天然气藏效益开发的技术难题。侏罗系沙溪庙组致密砂岩气藏勘探的商业突破有望形成又一个增储上产新阵地。

笔者回顾川西气田的勘探开发历程,总结川西气田的地质特征、成藏条件以及勘探关键技术,以期为国内外同类型气藏的勘探开发提供经验借鉴。

1 勘探开发历程

1.1 雷口坡组

四川盆地雷口坡组的油气探索始于20世纪60年代,川19井在中三叠统雷口坡组三段(雷三段)钻揭针孔白云岩储层,测试天然气产量为 $(23 \sim 26) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,从而在中坝地区发现了雷三段气藏。随后十余年间,中国石油化工股份有限公司西南油气分公司(西南油气分公司)在龙门山前北段安县地区先后实施了多口

钻井,均在雷口坡组钻揭孔隙型白云岩储层,但未获得好的油气显示,油气保存条件不利或构造位置偏低,以产水为主。进入21世纪,四川盆地海相储层取得了多项油气勘探突破^[1-2],再次展示出巨大的油气勘探潜力。2007年,中国石化加大川西地区的风险勘探力度,在川西坳陷新场构造带实施了天然气科学探索井——S1井,在雷口坡组顶部的马鞍塘组开展射孔酸化压裂测试,获得天然气产量达 $86.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,取得了川西地区雷口坡组天然气勘探的重大突破^[3],也即在川西坳陷海相储层中获得了高产工业油气流。2012年,按照探索区域不整合面岩溶气藏的勘探思路,西南油气分公司实施了3口风险探井。2014年,在龙门山山前构造带部署的C1井在雷四段上亚段获得天然气,其无阻流量超过 $330 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,取得了山前带雷口坡组天然气勘探的突破,发现了雷四段上亚段气藏^[4];同年,实施的CY1井和C2井实钻揭示厚度近100m的含藻白云岩储层,其中溶蚀孔、洞发育,酸化压裂测试分别获得了 $49 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流;3口井均获高产天然气流,由此成功发现了川西气田的彭州气藏。为进一步落实川西气田的构造特征,加快评价部署,西南油气分公司对连片三维地震进行了叠前深度偏移处理及解释工作,并于2016年在构造翼部较低部位分别部署了3口评价井,测试结果均显示气水同产或解释为气水同层,查明川西气田雷四段的气藏类型为构造型气藏。川西气田按照“整体部署、评建结合、动态调整、分部实施”的原则和“边评价、边认识、边落实、边建产能”的思路推进勘探开发一体化工作,已于2024年初全面建成 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的产能。

经过十几年的勘探实践,川西地区雷四段上亚段潮坪相白云岩的勘探成果丰硕,先后雷四段发现了3个潮坪相白云岩气藏。其中,川西气田的彭州气藏实现整体探明,开辟了新的建产阵地;新场气藏、马井气藏基本落实了雷四段的气藏特征,于2022年底提交天然气控制地质储量超过 $700 \times 10^8 \text{ m}^3$,并在斜坡带发现了多个构造-地层圈闭、岩性圈闭,落实油气资源量

超过 $2000 \times 10^8 \text{ m}^3$, 显示该层系具有较大的勘探开发潜力。

1.2 须家河组

自20世纪80年代起,川西坳陷上三叠统须二段经历了“三上三下”多轮油气勘探工作。1988年,X100井在须二段测试中获得 $18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流,标志着川西坳陷合兴场构造的须二段气藏进入勘探发现阶段。1994年,西南油气分公司围绕合兴场构造部署了6口探井,但仅有3口井获得工业气流,勘探工作陷入沉寂。进入21世纪以来,随着石油地质理论进步,西南油气分公司在“断层-裂缝”控藏理论指导下^[5],于2000年在新场构造完钻X8井,在须二段获得 $38 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流,这标志着发现了新场须二段气藏,须家河组也由此进入勘探开发一体化评价阶段;之后,又先后发现了X8-1井、L1井等高产井。为整体评价新场构造带的须二段气藏,截至2010年,中国石化累计部署钻井28口,提交天然气探明地质储量超过 $1200 \times 10^8 \text{ m}^3$,但试采的有效井仅有7口,评价工作逐步放缓。2011—2014年,以复式背斜为主要目标,在“裂缝控产”的理论指导下,西南油气分公司在新场构造和合兴场构造上共部署了7口探井,其中2口井获得工业气流但未实现商业突破。之后,须家河组的天然气勘探开发全部暂停。

自2018年以来,针对须家河组储层非均质性强、富集规律不清、钻井改造和提产难度大等一系列重大挑战,西南油气分公司开展了系列技术攻关。以“双源供烃、断-缝-砂输导、构造-输导体系叠合控富”的地质认识为指导,同时开展储层与裂缝精细刻画。定向井技术及“超高压+大排量+高强度”压裂技术的结合有效提高了单井产能,突破了须家河组长期“有气无田,有储量无产量”的局面,有力推动了新场—合兴场地区须二段气藏 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的产能建设工程。

1.3 沙溪庙组

川西地区侏罗系的油气勘探始于20世纪80年代,1981—1985年钻探的深层过路井C92井和C95井在下侏罗统千佛崖组—白田坝组钻遇裂缝型气层,但均未获得实质性突破。1997—2010年,川西地区针对中侏罗统沙溪庙组相继部署了6口井,但仅有2口井获得工业气流。2010—2017年,西南油气分公司在川西气田先后部署的海相探井均钻遇沙溪庙组,并见良好的油气显示,于是在C2井同井场部署了评价井,针对上沙溪庙组开展了小规模加砂压裂测试,但效果较差,仅获得低产油气流,勘探进入停滞阶段。

近年来,西南油气分公司借鉴邻区中江地区沙溪

庙组的成功经验,针对川西地区沙溪庙组气藏加大了地质—物探—工程技术的一体化攻关,在地质上提出了“源、相、位”三元控藏理论并确定了油气富集区,有效指导了钻井部署;在物探上通过开展新一轮三维地震处理解释,开展储层地震响应特征进一步分析并建立地震预测模式,实现了储层精细刻画与预测;在工程方面则通过提升和优化水平井的钻井技术,并配套水平井分段体积压裂,以提高单井产能。2023年,在川西气田实施评价井J101H井,其水平段长为975m,储层钻遇率高,气显示较好,经分段加砂压裂测试获得了 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流。J101H井的勘探开发突破证实川西气田沙溪庙组具有巨大的勘探潜力。

2 地质特征

2.1 区域地质背景

川西地区处于四川盆地西部的前陆坳陷(图1),该坳陷位于上扬子地台西北缘,在中生代—新生代形成并发展为典型冲断带和前陆盆地^[6]。研究区的构造走向总体呈NE向展布,西以关口断层(亦称安县—灌县断层或龙门山前缘断层)与龙门山逆冲推覆—滑覆构造带分界;东以龙泉山断裂—南江一线为界^[7-9]。自印支运动晚期以来,多期次构造运动的复合叠加使得现今川西地区的中—上三叠统总体表现为“两隆、两凹、两斜坡”的构造格局。“两隆”即龙门山山前构造带和新场构造带,“两凹”即成都凹陷和绵竹凹陷,“两斜坡”即广汉斜坡和绵阳斜坡,其中,隆起带和斜坡带是油气富集成藏的有利区带^[8]。

2.2 地层特征及成藏组合

川西地区二叠系—三叠系发育齐全,其中在晚三叠世前为海相碳酸盐台地发展阶段晚期^[10]。四川盆地的二叠系发育良好,受古构造及沉积环境影响,岩性、岩相的变化沿EW向较为显著。川西地区二叠系发育齐全:下二叠统梁山组受海水改造,残余厚度不大;中二叠统包括栖霞组和茅口组,茅口组顶部有不同程度地层缺失;上二叠统包括峨眉山玄武岩、龙潭组、长兴组。三叠系发育完整,但受印支运动影响,地层分布特征具有明显差异:飞仙关组、嘉陵江组的分布几乎遍及全区;早三叠世后,由于江南—雪峰隆起再次活动,中三叠统雷口坡组分布范围缩小,在川西地区保留最为完整,是白云岩广泛发育的基础;晚三叠世早期,印支运动造成上扬子台地大部分地区抬升成陆,进入前陆盆地沉积阶段,马鞍塘组为海陆过渡沉积,须家河组的沉积厚度大,在纵向上可分为5段,其中,小塘子组[须家河组一段(须一段)]、须家河组三段(须三段)、

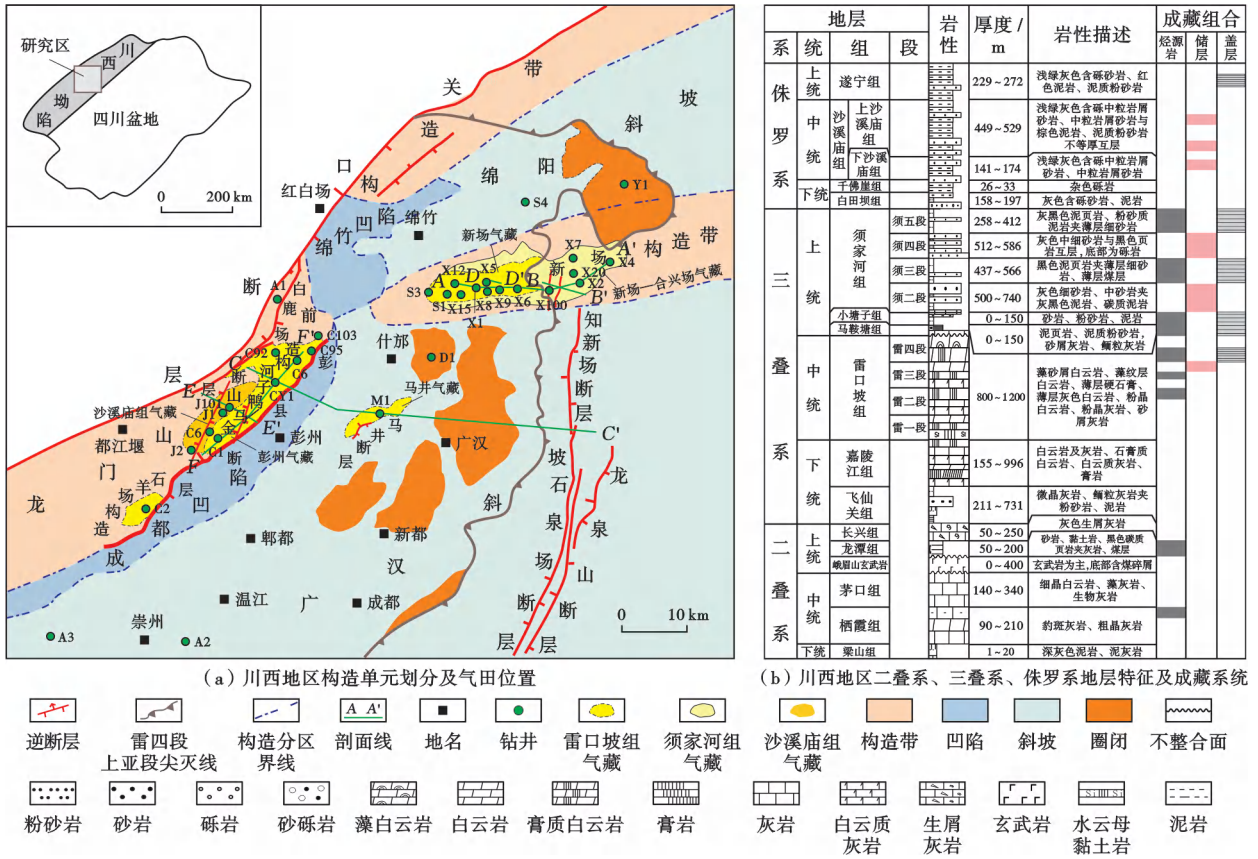


图1 川西气田区域构造位置及二叠系—侏罗系综合地层特征

Fig. 1 Regional tectonic location and Permian-Jurassic comprehensive stratigraphic characteristics of the West Sichuan gas field

须家河组五段(须五段)以泥页岩为主,是川西坳陷的主要烃源岩,须二段和须家河组四段(须四段)以厚层砂岩为主。

川西气田的三叠系主要在雷口坡组和须家河组成藏。二叠系发育区域优质烃源岩,雷口坡组发育厚度为100m的白云岩储层及含膏质烃源岩,二者形成双源(二叠系、雷口坡组)+雷口坡组白云岩的成藏组合。新场—合兴场气藏的主力产层段为须二段,以辫状河三角洲前缘沉积为主,砂体沉积微相主要为河口坝和下水分流河道^[11-12]。须二段自下而上可划分为下、中、上3个亚段10个砂组,须二段的套砂组与小塘子组和须二段泥岩段烃源岩构成了多套成藏组合^[13]。

此外,川西地区侏罗系沙溪庙组自下而上可划分为下沙溪庙组和上沙溪庙组,又细分为11个砂组。沙溪庙组的多套砂组与下伏的须五段烃源岩构成了一套成藏组合。

2.3 成藏特征

2.3.1 多套优质烃源岩为气田形成提供了的充足物质条件

四川盆地从海相到陆相发育多套高效烃源岩,川

西地区雷口坡组的天然气成藏特征已证实其气源主要来自二叠系和雷口坡组中的烃源岩^[14-18],具备充足的成藏物质基础。二叠系烃源岩在川西地区发育品质好,上二叠统深灰色灰岩、黑色泥岩烃源岩的厚度达50~150m,总有机碳(TOC)含量为0.60%~3.50%,有机质类型为II₁-III型,镜质体反射率(R_o)为1.50%~3.50%;该套烃源岩在中三叠世中-后期进入成熟演化阶段,在晚三叠世早期进入高成熟演化阶段,在晚三叠世末期达到过成熟演化阶段,累计生气强度为(18~24)×10⁸m³/km²[图2(a)],是雷口坡组成藏的远源烃源岩。雷口坡组烃源岩主要为发育在雷口坡组二段—四段内的富有机质含膏碳酸盐岩^[16-17],累计厚度达50~140m,平均TOC含量为0.64%,有机质类型以II₁型为主、兼具II₂型;热演化史分析表明,川西地区雷口坡组烃源岩在晚三叠世开始进入成熟演化阶段,在早侏罗世末期达到高成熟演化阶段,在晚侏罗世末期达到过成熟演化阶段;该套烃源岩具备一定的生烃潜力,生气强度达(15~40)×10⁸m³/km²[图2(b)],是研究区雷口坡组成藏的近源烃源岩,可以作为气藏源岩的有效补充。

川西坳陷须二段中的天然气主要来自下伏的小塘

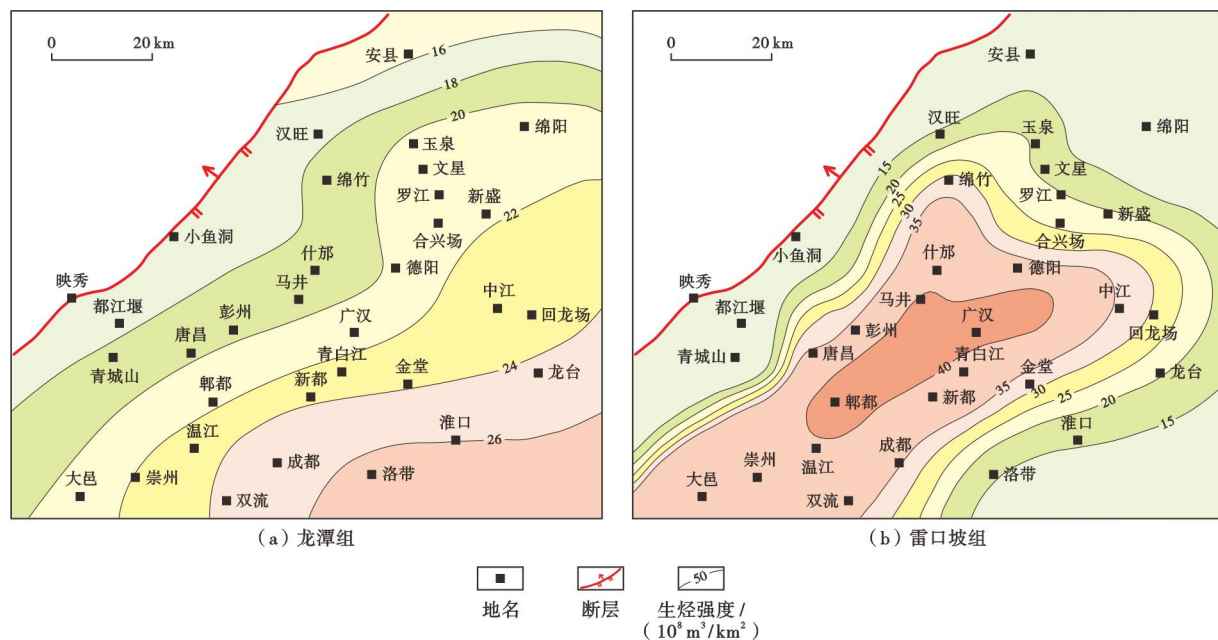


图 2 川西坳陷龙潭组和雷口坡组烃源岩生烃强度

Fig. 2 Hydrocarbon generation intensity of source rocks in Longtan Formation and Leikoupo Formation of western Sichuan depression

子组和须二段内部的烃源岩^[13]。川西坳陷在须家河组沉积期为四川盆地的沉积中心和生烃中心,具备优质烃源岩规模发育的地质背景。川西坳陷小塘子组以浅海陆棚沉积为主^[19],厚度为 60~210 m,有机质类型以 I 型和 II 型为主、含少量 III 型,TOC 含量为 0.38%~3.53%、平均为 1.36%, R_o 为 0.88%~3.06%、平均为 2.06%,处于过成熟演化阶段,生烃强度为 $(10\sim110)\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$ [图 3(a)]。须二段内部发育典型的煤系烃源岩,其沉积厚度为 30~160 m,有机质类型以 III 型为主、发育少量 II 型,平均 TOC 含量为 2.01%,少量碳质烃源岩的平均 TOC 含量可高达 19.65%, R_o 为 0.62%~2.99%、平均为 1.80%,处于高成熟演化阶段,生烃强度为 $(10\sim40)\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$ [图 3(b)]。广泛分布的优质烃源岩可为新场、合兴场等地区的正向构造单元持续供烃,这奠定了气田形成的物质基础。

川西地区沙溪庙组的天然气主要来自下伏的须五段烃源岩。川西地区紧邻须五段烃源岩的生烃中心,具有良好的烃源条件。须五段泥页岩的厚度较大,为 260~400 m;有机质丰度较高,TOC 含量主要分布在 1.5%~4.9%;有机质类型以腐殖型(III 型)为主,生烃潜力大;烃源岩成熟度较高, R_o 分布在 1.2%~1.6%;生烃强度为 $(20\sim50)\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$ [图 3(c)]。广泛分布的优质烃源岩为川西地区的正向构造单元持续供烃,由此奠定了川西地区沙溪庙组气田的物质基础。

2.3.2 规模储集体提供了天然气聚集的基础

(1) 雷口坡组优质潮坪相白云岩储层

包括四川盆地在内的扬子陆块在早一中三叠世处

于古特提斯洋域,纬度位于北纬 $0^\circ\sim20^\circ$ ^[20],处于海相克拉通演化阶段。中三叠世,中一上扬子地区西部为康滇古陆,南部为右江前陆盆地,西部边缘发育古陆或古隆起,海水流通受限,以发育半局限一半开阔碳酸盐陆表海台地沉积为特征^[21]。四川盆地在该时期所处的中一低纬度地区为干旱气候,低海平面往往是海相含盐地层形成的控制因素之一^[22],海水的浓缩、结晶和沉淀形成了厚而大的蒸发岩,同时海平面的周期性升降和岩性转换也有利于形成广泛分布的(藻)白云岩沉积^[23]。川西地区在雷四段上亚段沉积期总体处于潮坪沉积环境,水体整体较浅,海水的升降与微幅度的古地貌控制了沉积微相的分布。潮间带藻云坪、云坪微相在低海平面期的频繁暴露有利于准同生大气水淋滤溶蚀作用发生,并通过对含藻白云岩、晶粒白云岩进行改造,形成优质孔隙型储层^[24]。

川西地区雷四段上亚段储层与台缘滩、颗粒滩的储层特征完全不同,白云岩储层呈薄层分布,在纵向上呈多层叠加,具有典型的“薄互层储层”特征,俗称“五花肉”储层。储层累计厚度大,可达 60~100 m,可分为上、下 2 套储层,中间被厚度约为 25 m 的稳定分布的潮间下带致密灰岩隔开。储层的岩石类型主要包括晶粒白云岩、(含)藻白云岩、(含)灰质白云岩、(含)白云质灰岩和(颗粒)灰岩 5 类;优质溶蚀孔隙型储层均发育在白云岩中^[25],岩性由(含)藻白云岩、微晶—粉晶白云岩和(含)灰质白云岩组成,藻纹层白云石发育藻格架孔,孔隙主要呈顺层分布[图 4(a)],或溶蚀扩大成溶洞,呈不规则分布[图 4(b)],而微晶—粉晶白云岩发育晶间溶孔,孔

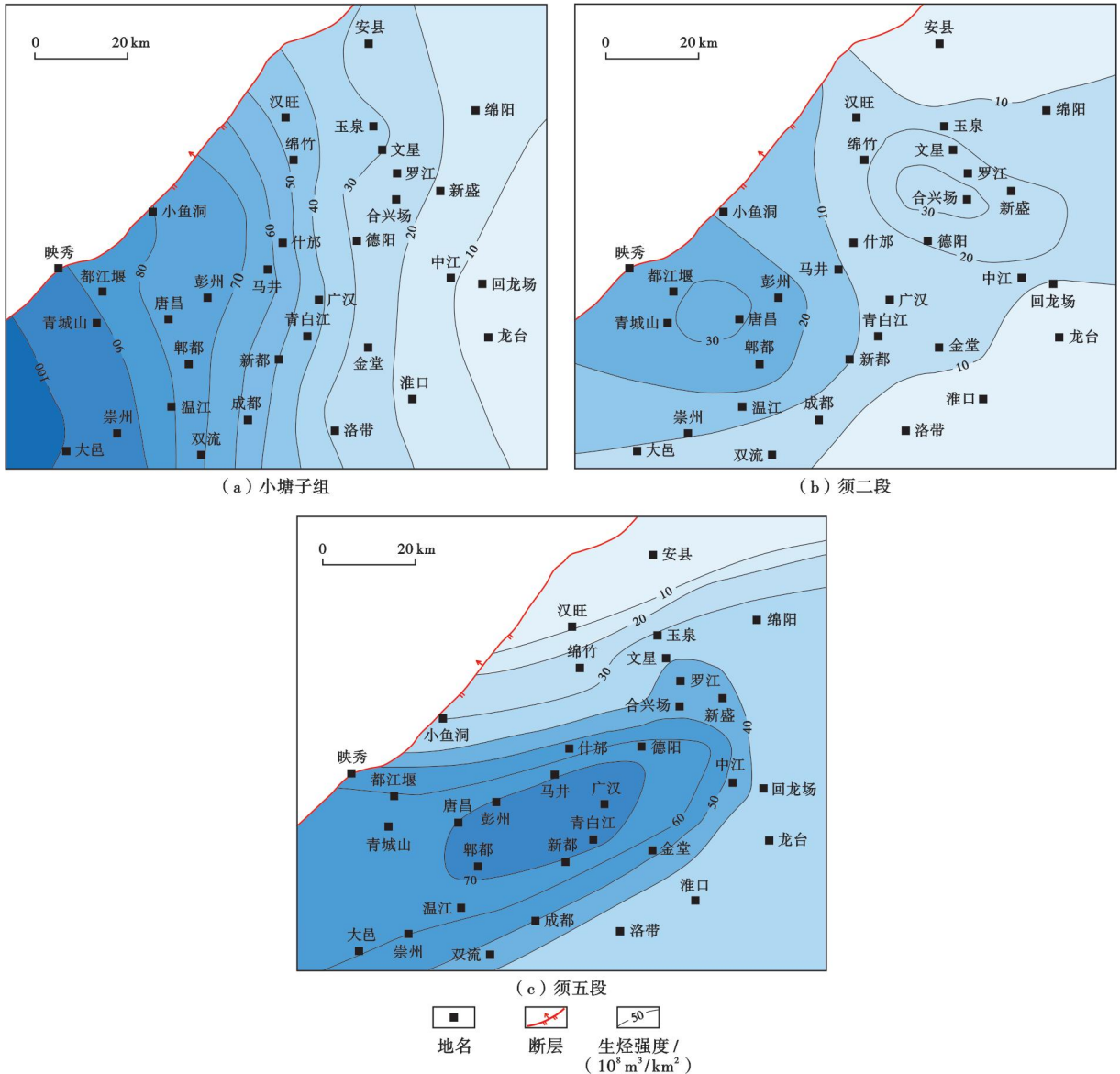


图3 川西坳陷小塘子组、须二段和须五段烃源岩生烃强度

Fig. 3 Hydrocarbon generation intensity of source rocks in Xiaotangzi Formation, Member 2 of Xujiache Formation and Member 5 of Xujiache Formation of western Sichuan depression

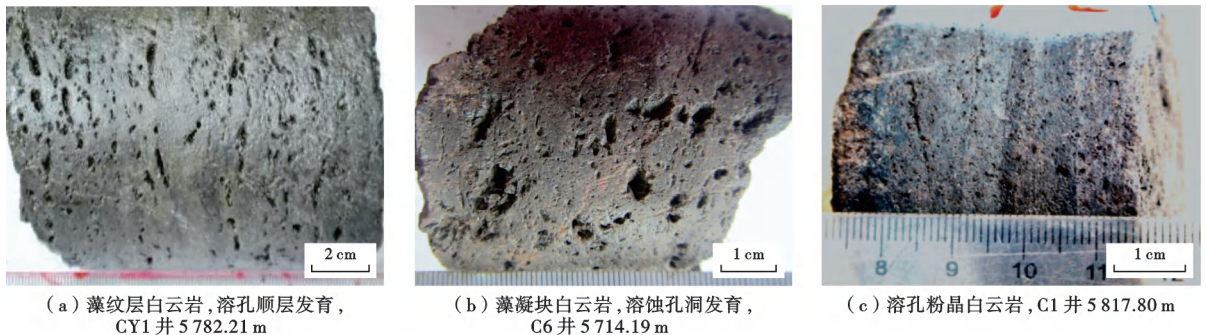


图4 川西气田雷四段上亚段储层的宏观特征

Fig. 4 Macroscopic reservoir characteristics of upper submember of Member 4 of Leikoupo Formation in the West Sichuan gas field

隙分布较均匀[图 4(c)]。储层的储集空间主要为晶间溶孔、晶间孔、藻间溶孔、鸟眼—窗格孔和溶蚀(裂)缝等。晶间孔多与晶间溶孔伴生,其孔径相对较小,一般为 0.02~

1.00 mm,孔隙多呈三角形,边界平直,晶间孔、晶间溶孔越发育的样品,其储层物性越好[图 5(a)—图 5(c)];藻间溶孔的分布多受藻及藻颗粒控制,在形状不规则的藻砂

屑、藻凝块黏结的白云岩中较常见,孔径一般为 0.01~0.65 mm,面孔率为 1%~5%[图 5(d)];鸟眼-窗格孔主要发育在由蓝绿藻丝体、藻迹等形成的藻纹层白云岩和少量残余结构的纹层状微晶-粉晶白云岩中,具定向分布,孔径为 0.02~0.40 mm,面孔率为 1%~9%[图 5(e)、图 5(f)],在孔隙发育程度较高的储层段均可形成 I 类优质储层;裂缝不但可以沟通孔隙空间,同时也可提高储层渗透性能,从而扩大孔隙空间,提高储层物性,方解石含量越高、裂缝越发育。

统计表明,雷四段上亚段岩心柱塞样的有效孔隙

度为 2.01%~23.70%,平均为 6.01%;有效渗透率为 0.021~18.400 mD,平均为 0.728 mD。按照四川盆地碳酸盐岩储层的分类评价标准,雷四段上亚段以发育 II—III 类储层为主,夹 I 类储层。

(2) 须二段叠覆分布的高能砂体储层

须二段沉积期,川西坳陷新场构造带受米仓山一大巴山 NE 向物源供给影响^[26],以发育三角洲前缘水下分流河道、河口坝沉积为主。河口坝和水下分流河道微相内的高能砂体呈“横向连片、纵向叠置”的分布特征(图 6)。

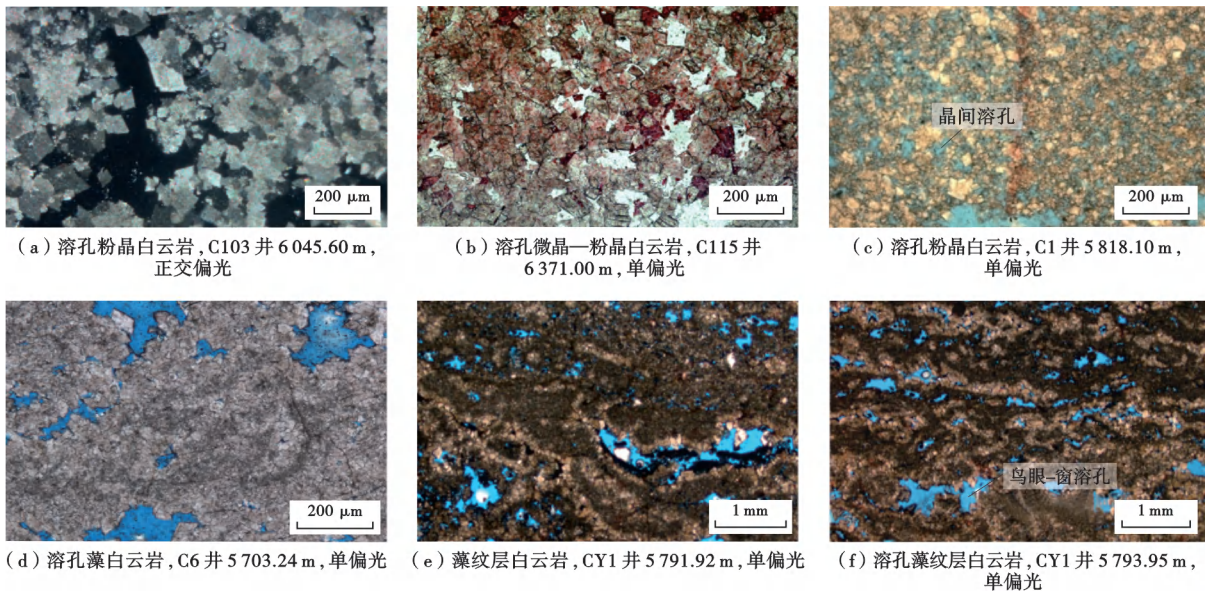


图 5 川西气田雷四段上亚段储层的微观特征

Fig. 5 Microscopic reservoir characteristics of upper submember of Member 4 of Leikoupo Formation in the West Sichuan gas field

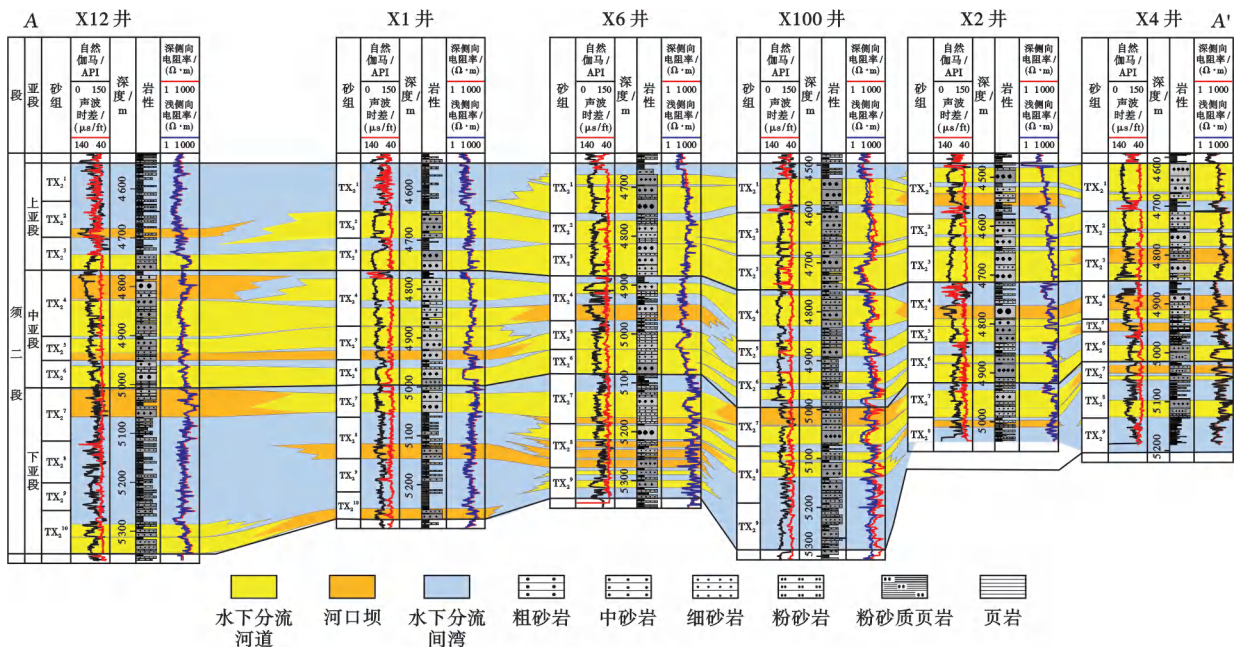


图 6 川西气田新场构造带须二段连井沉积微相对比(剖面位置见图 1)

Fig. 6 Comparison of well-tie sedimentary microfacies of Member 2 of Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of the West Sichuan gas field

川西坳陷须二段砂岩的岩石类型以岩屑砂岩、岩屑石英砂岩和岩屑长石砂岩为主,其次为长石岩屑砂岩和长石砂岩,含少量石英砂岩(图7)。岩石薄片分析显示,砂岩中石英含量平均为68.7%,岩屑含量平均为23.1%,长石含量平均仅为8.2%。岩屑类型以沉积岩岩屑和变质岩岩屑为主。砂岩受强水动力环境淘洗作用影响,泥质平均含量仅为0.6%。自生矿物以方解石、白云石等碳酸盐矿物为主,其次为自生石英。前人的研究^[27-28]表明,高石英含量、富含岩屑以及适度碳酸盐矿物胶结有利于原生孔隙保存和次生溶孔形成,这是须二段在深埋藏条件下储层发育的重要条件。

须二段致密砂岩储层的孔隙度主要分布在2.00%~6.00%、平均为3.79%,渗透率主要分布在0.01~1.00mD、平均为0.07mD,总体属于特低孔、特低渗储层。结合岩石显微薄片观察可知,须二段的储集空间以长石、岩屑等铝硅酸盐矿物溶孔为主,镜下可见岩屑及长石颗粒强烈溶蚀,溶孔内一般残留溶蚀产物或沥青等[图8(a)—图8(d)];此外,可见微裂隙、裂缝等,在裂缝附近,碎屑颗粒的溶蚀强度更强,反映裂

缝作为酸性流体的通道有利于溶蚀作用发生[图8(e)、图8(f)]。因此,须二段发育孔隙型、裂缝-孔隙型2种储层类型。

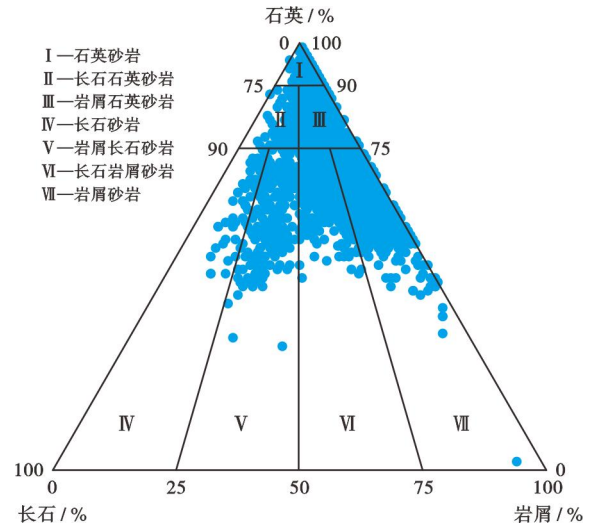


图7 川西坳陷新场构造带须二段岩石类型

Fig. 7 Rock types of Member 2 of Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of western Sichuan depression

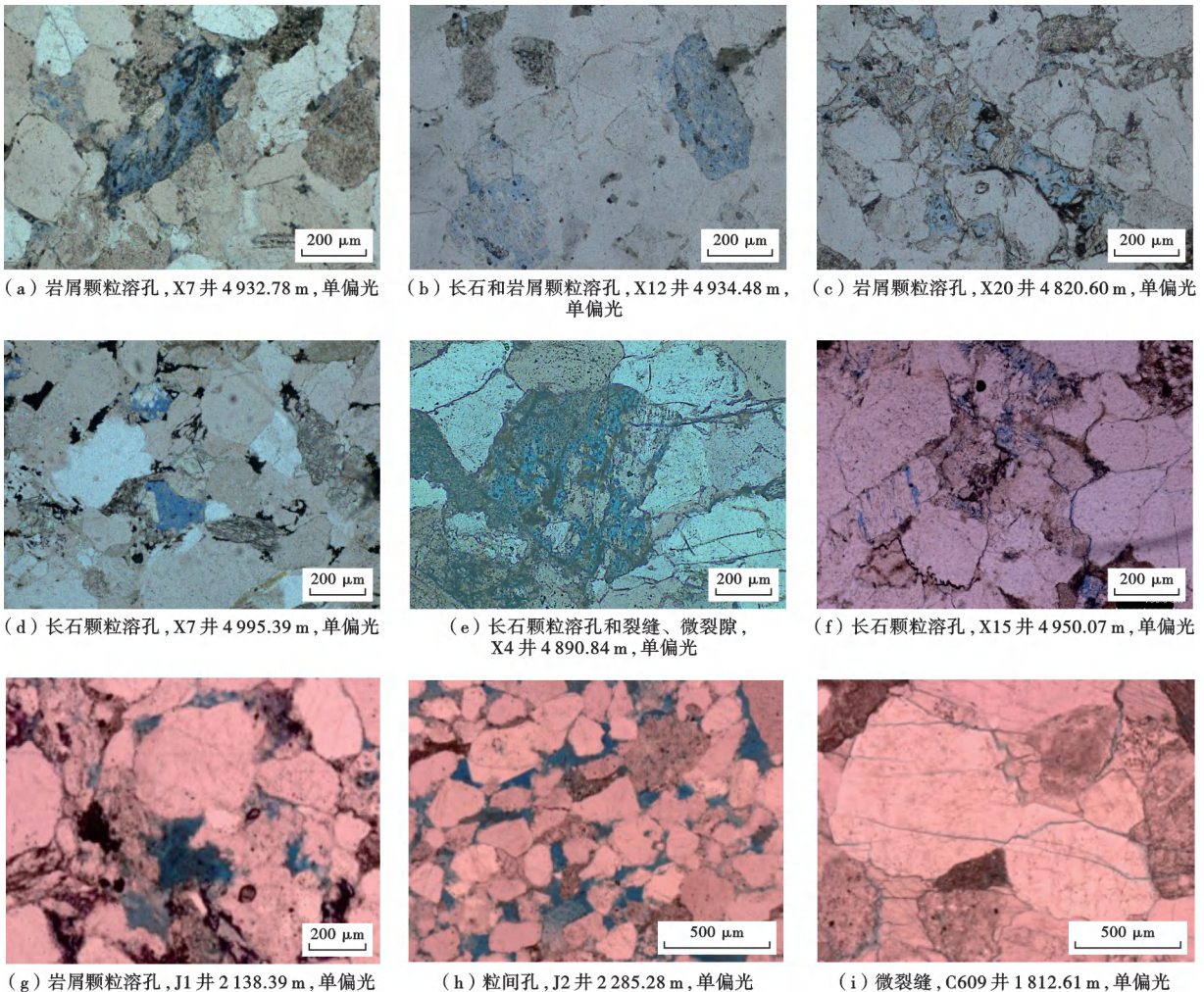


图8 川西坳陷新场构造带须二段、沙溪庙组的储集空间

Fig. 8 Reservoir spaces of Member 2 of Xujiahe Formation and Shaximiao Formation in Xinchang structural belt of western Sichuan depression

受初始沉积组分、成岩作用强度影响,须二段的储层物性在纵向上具有差异,以中亚段物性最好,其次为下亚段,上亚段略差(表 1)。总体上,新场构造带内的高能砂体呈广覆叠置发育,具备发育规模储集空间的优越储层条件。

表 1 川西坳陷须二段、沙溪庙组的储层物性

Table 1 Reservoir properties of Member 2 of Xujiahe Formation and Shaximiao Formation in western Sichuan depression

地层	孔隙度/%	渗透率/mD	样品数
上亚段	0.31~	0.001~	1657
	12.89/3.42	302.360/0.068	
须二段 中亚段	0.34~	0.003~	1577
	12.97/4.20	365.000/0.073	
下亚段	0.96~	0.010~	113
	11.36/3.27	41.400/0.070	
上沙溪庙组	1.17~	0.030~	193
	10.87/4.71	11.830/0.470	
下沙溪庙组	1.16~	0.016~	61
	15.02/6.56	129.900/0.970	

注:“/”后为平均值。

(3) 沙溪庙组河道砂体储层

川西地区沙溪庙组属于近源扇三角洲和辫状河三角洲沉积体系,物源主要来自于西部龙门山中段,有利沉积微相为扇三角洲和辫状河三角洲前缘水下分流河道,发育多期次片状叠置的河道砂体。

川西地区沙溪庙组的岩石类型(图 9)以岩屑砂岩为主(占样品总数的 80.4%),其次为岩屑石英砂岩(占样品总数的 13.6%)、少量长石岩屑砂岩(占样品总数的 4.7%)。岩石薄片分析显示,砂岩中石英含量平均为 55.4%,岩屑含量平均为 40.2%,长石含量平均为 3.4%。岩屑类型以沉积岩岩屑和变质岩岩屑为主。自生矿物以方解石、白云石等碳酸盐矿物为主。研究

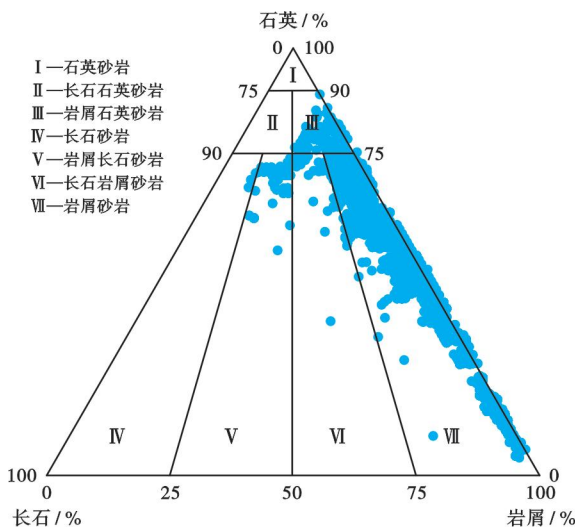


图 9 川西坳陷沙溪庙组的岩石类型

Fig. 9 Rock types of Shaximiao Formation in western Sichuan depression

表明,粗粒度、高石英含量以及沿裂缝的溶蚀作用是沙溪庙组中相对优质储层发育的重要条件。

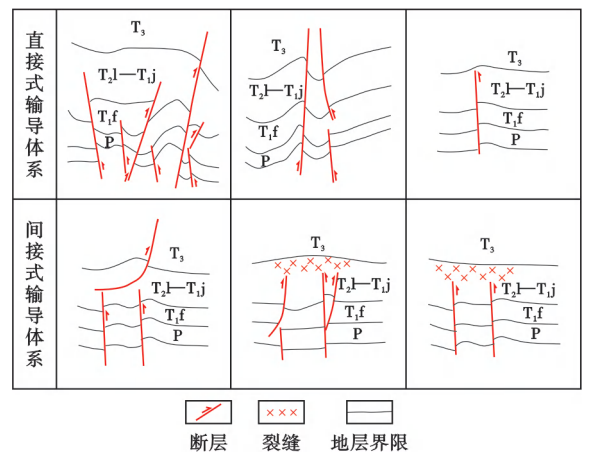
沙溪庙组砂岩储层的孔隙度主要分布在 4.0%~8.0%、平均为 5.6%,渗透率主要分布在 0.10~1.00 mD、平均为 0.61 mD,总体属于特低孔、特低渗储层。沙溪庙组的储集空间以粒间孔、长石和岩屑等铝硅酸盐粒内溶孔以及微裂缝为主[图 8(g)—图 8(i)]。因此,沙溪庙组发育孔隙型、裂缝-孔隙型 2 种储层类型。此外,受方解石的差异胶结成岩作用影响,沙溪庙组的储层物性在纵向上具有差异,下沙溪庙组的储层物性要略好于上沙溪庙组(表 1)。

2.3.3 高效输导体系保障了天然气的立体高效运移

(1) 雷口坡组断裂-裂缝高效输导体系

在川西地区的区域成藏中,多源供烃是基础,除此之外,地层内的微断裂可作为自身烃源的有效输导体系,而连接二叠系烃源岩的高效输导体系是区域成藏的关键。二叠系之上发育飞仙关组、嘉陵江组等厚度大的地层,且其中不乏致密泥岩和膏岩地层,因此,深切至二叠系烃源岩的断裂构造为研究区天然气垂向运移的主要通道。

川西气田雷口坡组气藏、马井构造雷口坡组气藏以及新场地区雷口坡组气藏在圈闭周缘均发育深切至二叠系的断裂构造,这些断裂为气藏的形成提供了天然气运移通道。川西地区主要发育由 2 种断裂构成的天然气运移通道:①切穿雷口坡组及二叠系的“直接式”通源断裂;②切穿二叠系但未延伸至雷口坡组的断裂,这种断裂与雷口坡组内部断裂组成了“接力式”断裂运移系统(图 10)。“直接式”通源断裂在川西探区数



注:P—二叠系;T_{1f}—三叠系飞仙关组;T_{2l}—三叠系雷口坡组;T_{1j}—三叠系嘉陵江组;T₃—上三叠统。

图 10 川西坳陷二叠系、三叠系的断裂特征及通源断层的输导样式

Fig. 10 Permian-Triassic fault characteristics and transport patterns of through-source faults in western Sichuan depression

量较少,主要集中在山前带,以彭县断裂为代表,大多发育于背斜构造两翼。在凹陷及斜坡区,除马井断裂外,基本不发育“直接式”通源断裂。“接力式”断裂运移系统相对较发育,主要发育在龙门山前大邑—金马—鸭子河—孝泉—绵竹一带,断裂规模均较小,也主要发育于背斜构造两翼。

川西拗陷雷口坡组受多期构造活动影响,形成了深切至二叠系的大断层,以及网状分布的微断层和裂缝,这些断层共同构成了雷口坡组网状和面状高效输导体系。

(2) 须家河组断层-裂缝-砂体复合输导体系

川西拗陷须二段输导体系主要由断层、裂缝和砂岩构成。受构造运动和储层演化影响,不同时期的输导体系具有差异。断层对沟通小塘子组和须二段内部的多套烃源岩与叠置高能砂岩具有重要作用。川西拗陷须二段内主要发育 EW 向、NE 向和 SN 向逆断层。SN 向断层的规模较大,断距为 15~75 m,平面延伸距离为 5.5~17.3 km,多向下断至雷口坡组和马鞍塘组,向上断至须三段或须四段(图 11)。这些断层可有效沟通小塘子组烃源岩与须二段砂体,为天然气运移提供高速通道。

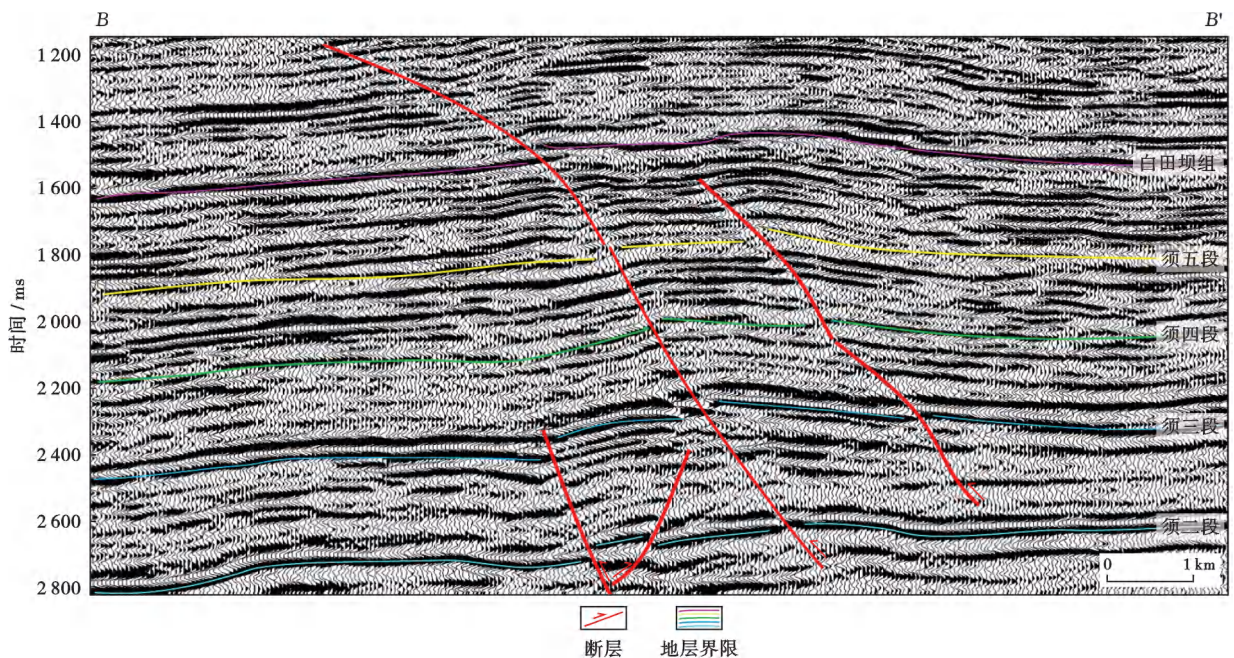


图 11 川西拗陷新场构造带过 SN 向断层的地震剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 11 Seismic section crossing the south-north trending fault in Xinchang structural belt of western Sichuan depression

结合地质历史分析,须二段内的断层主要受印支期、燕山期和喜马拉雅期等多期构造运动影响,具有“多期发育、差异活动”的特点^[29]。印支运动晚期,受米仓山—大巴山造山带向南挤压活动影响,在 SN 向的挤压应力作用下,EW 向断裂逐渐形成。该时期须二段砂岩的物性条件相对较好,油气可沿由 EW 向断层和广覆叠置砂体组成的复合输导体系进行横、纵向运移。燕山运动晚期,在 SN 向应力的持续作用及砂岩深埋致密化背景下,砂体不具备输导油气能力,输导体系以断层及派生裂缝为主,输导油气的效率及范围相对有限。喜马拉雅运动早—中期,受青藏高原隆升侧向挤压作用影响,地层发生抬升剥蚀,新场构造带的应力场转变为 EW 向,形成了大量 SN 向断层及其派生裂缝,裂缝以高角度缝、斜缝为主,部分为“酥饼状”层理缝^[30][图 12(a)—图 12(c)]。在断层及裂缝、微裂隙的改造下,致密化砂岩储层的物性得到显著改

善^[31-32],形成部分高渗基质储层^[33]。镜下可见含烃包裹体沿微裂隙成带分布[图 12(d)—图 12(f)],说明裂缝、微裂隙具备为烃类运移提供通道的能力。刘振峰等^[34]研究表明,断层及其派生的破碎带、诱导裂缝带规模巨大,断层滑动面在 400 m 之内均有分布。由 SN 向断裂派生的晚期裂缝多数为半充填、未充填状态^[35](图 12),这些断裂、裂缝叠合须二段规模发育的砂体,可组成断层-裂缝-高渗基质砂岩复合输导体系,除了为天然气提供高效运移通道外,也具备形成规模天然气藏储集空间的条件。

综上所述,新场构造带发育由断层-裂缝-高渗砂岩组成的复合输导体系,具备横、纵向立体高效输导天然气的地质条件,有利于天然气富集成藏。

(3) 沙溪庙组断层-砂体高效输导体系

川西地区沙溪庙组气藏属于远源气藏,其输导体系主要由断层和砂体构成。川西地区发育彭县断裂和

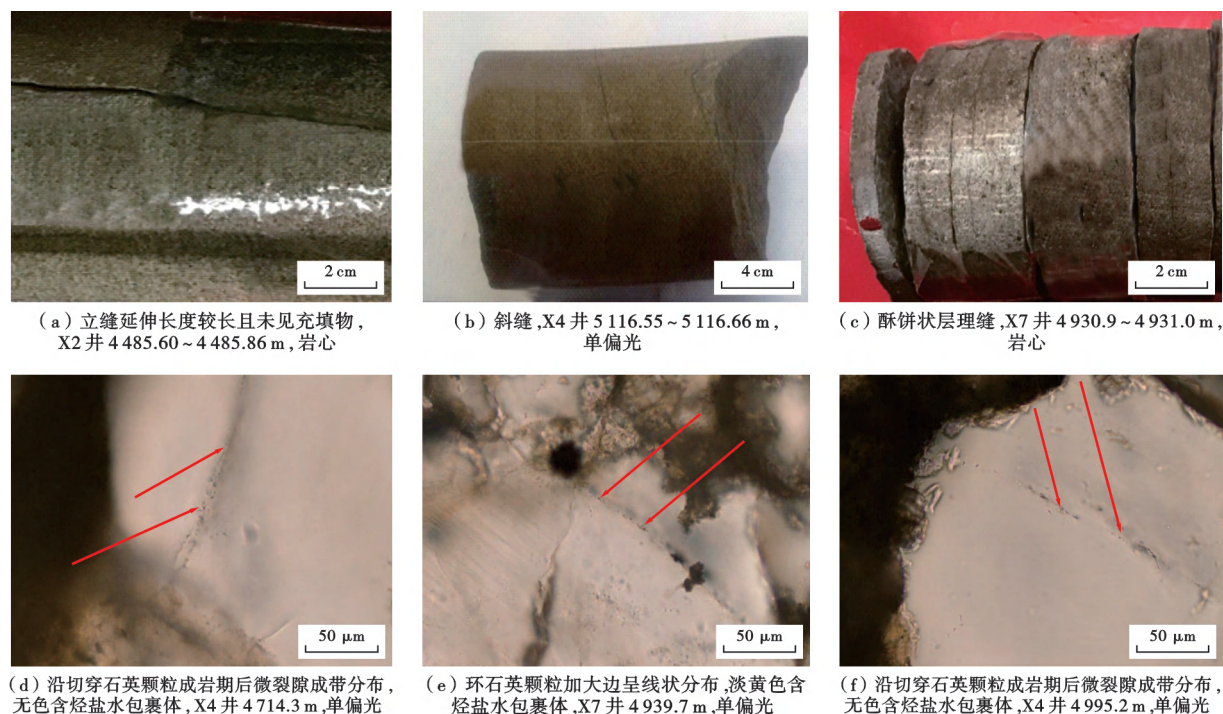


图12 川西坳陷新场构造带储层裂缝发育特征

Fig. 12 Fracture development characteristics of reservoirs in Xinchang structural belt of western Sichuan depression

多条反向的伴生断层,彭县断裂在平面延伸距离长,向下断至须五段烃源岩,向上断至沙溪庙组或蓬莱镇组。伴生断层虽未断至须五段烃源层,但与彭县断裂相接。天然气可通过烃源断层和伴生断层的运移通道实现高效向上运移,并在向上运移过程中当遇到下倾方向与断层相接的砂体时,沿砂体横向运移至沙溪庙组有利圈闭中聚集成藏。断层叠加沙溪庙组规模发育的砂体组成了断层-砂体高效输导体系。

2.3.4 成藏模式

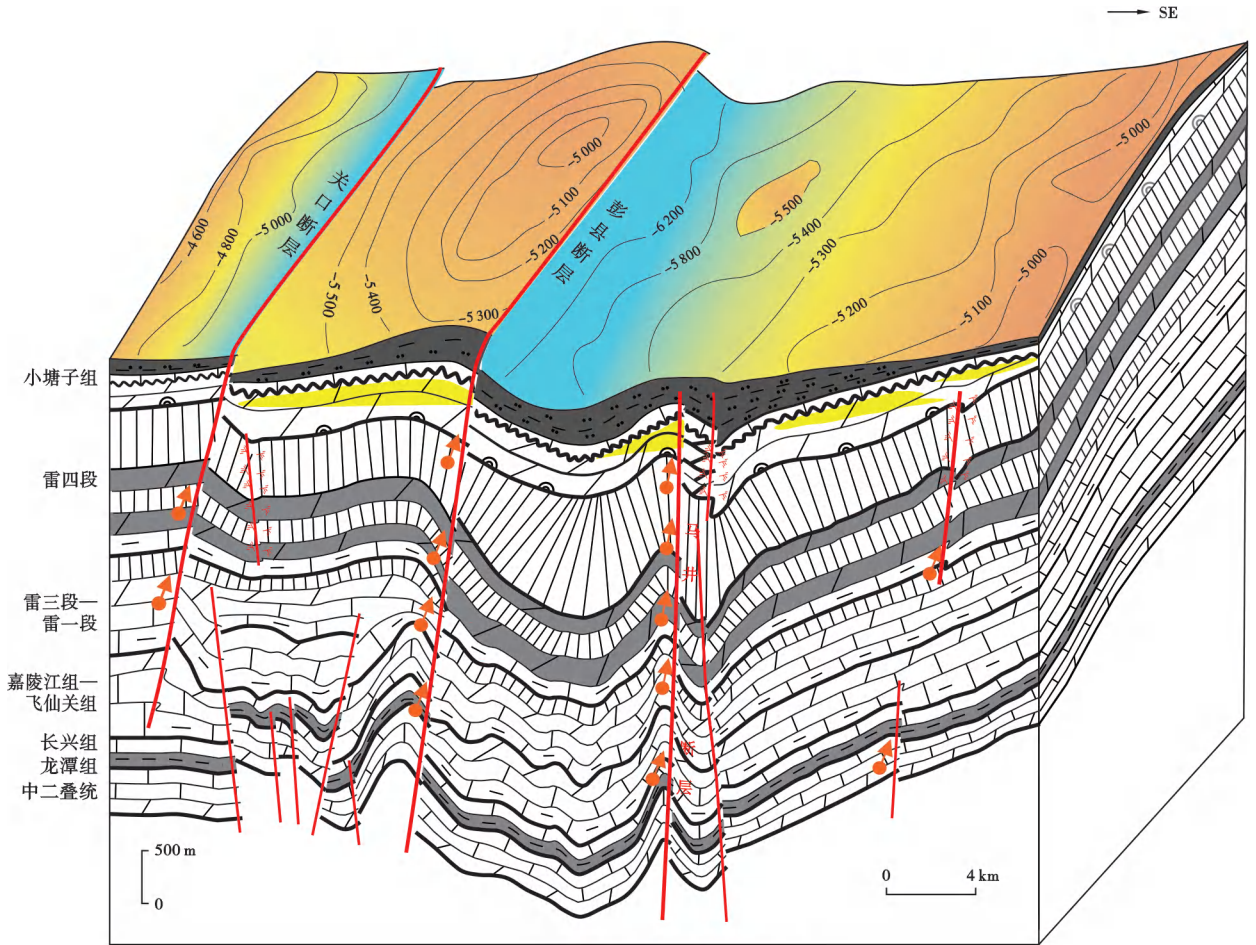
(1) 雷口坡组

多源供烃为川西气田雷四段气藏的形成提供了丰富的物质基础。断层与裂缝共同构成了输导体系。龙门山前构造带大断层发育,为下伏烃源岩向上运移提供了良好的通道;雷口坡组内层间小断层和裂缝是沟通雷口坡组自身烃源岩内油气运移的高效通道(图13)。大规模孔隙型白云岩储层的发育是气藏成藏的基础,为川西地区气藏的形成提供了充足的储集空间。受构造挤压影响,龙门山前局部构造圈闭发育,背斜在印支运动晚期已具雏形,在燕山期为继承性发展,形成了与雷口坡组、二叠系烃源岩生烃、生气高峰期匹配的构造圈闭(图13),为气藏的形成提供了规模聚集场所。早侏罗世晚期—中侏罗世为油气充注期,而在喜马拉雅期,古气藏则发生调整并最终定型,在构造有利部位聚集成藏,在构造不利部位仅残留无法自由运移的干沥青。龙门山山前构造带、新场构造带及斜坡带长期处于构

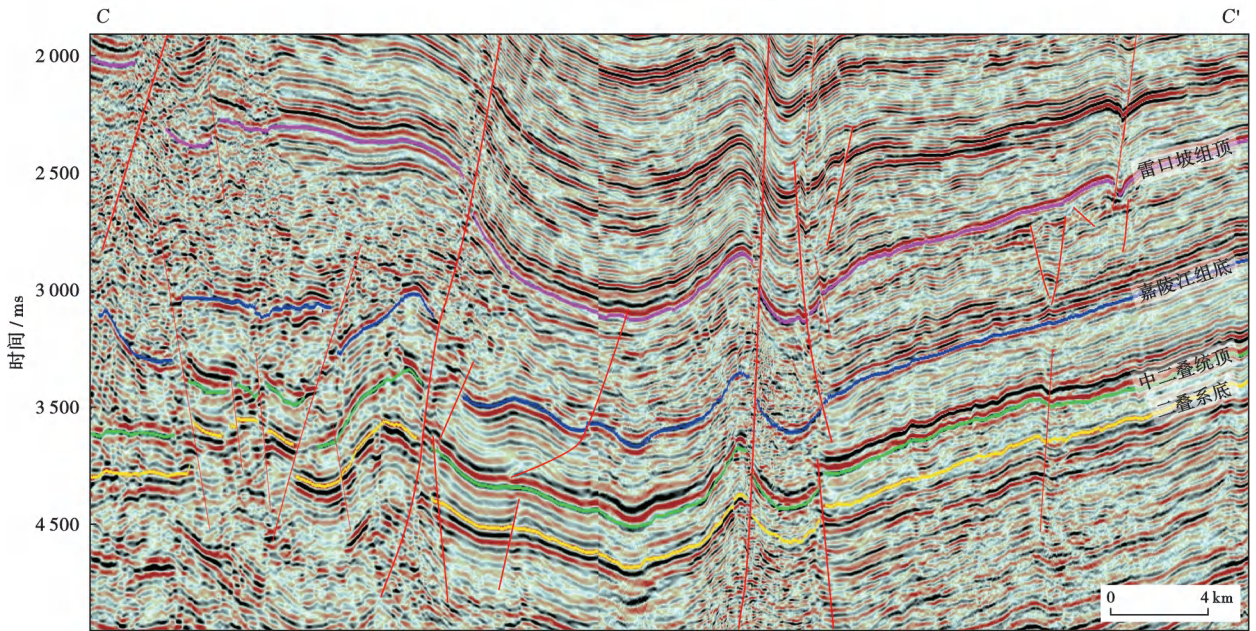
造高部位,有利于油气聚集成藏和气藏调整并最终定型。综上所述,川西气田雷四段气藏的成藏特征为:双源供烃、白云石化溶蚀叠加控储和复合圈闭控藏。

(2) 须二段

须二段储层自沉积初期开始在压实作用和胶结作用下孔隙度迅速降低,在晚侏罗世整体致密化^[36]。新场构造带须二段气藏烃源岩、储层、输导体系的时空耦合特征及天然气成藏过程表明,须二段气藏的形成主要经历了3个阶段:①晚三叠世—晚侏罗世,烃源岩处于低成熟阶段,烃类产物以低成熟气为主,小塘子组腐泥组和壳质组等富氢组分生成少量低成熟油;低成熟油气和烃源中的酸性流体沿断层与砂体组成的复合输导体系进行广覆式运移聚集,形成大面积分布的低丰度油气藏,尤其在构造高部位,油气丰度更高;储层中发育大量形成于低成熟油气充注过程的液态烃/油气包裹体。②早白垩世—晚白垩世,烃源岩处于高成熟阶段,烃类产物以高成熟度干酪根裂解气为主;由于烃源岩在低成熟阶段的排烃效率相对较低,一般低于30%^[37],因此,滞留于烃源岩内的液态烃在该阶段会发生裂解形成高成熟度的原油裂解气;该阶段储集层已发生致密化,输导体系以持续活动的断层及小范围的派生裂缝为主,成藏规模有限;储层内的流体由于受致密化影响,处于封闭、非流动状态,包裹体相对少见。③晚白垩世晚期至今,受喜马拉雅期造山运动影响,川西地区发生构造抬升,晚期发育SN向断层,地层温度、



(a) 川西气田雷口坡组成藏模式



(b) 川西气田地震剖面

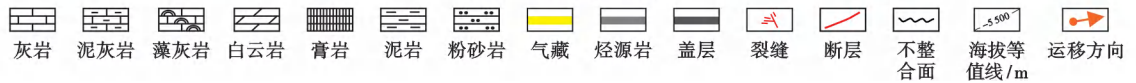


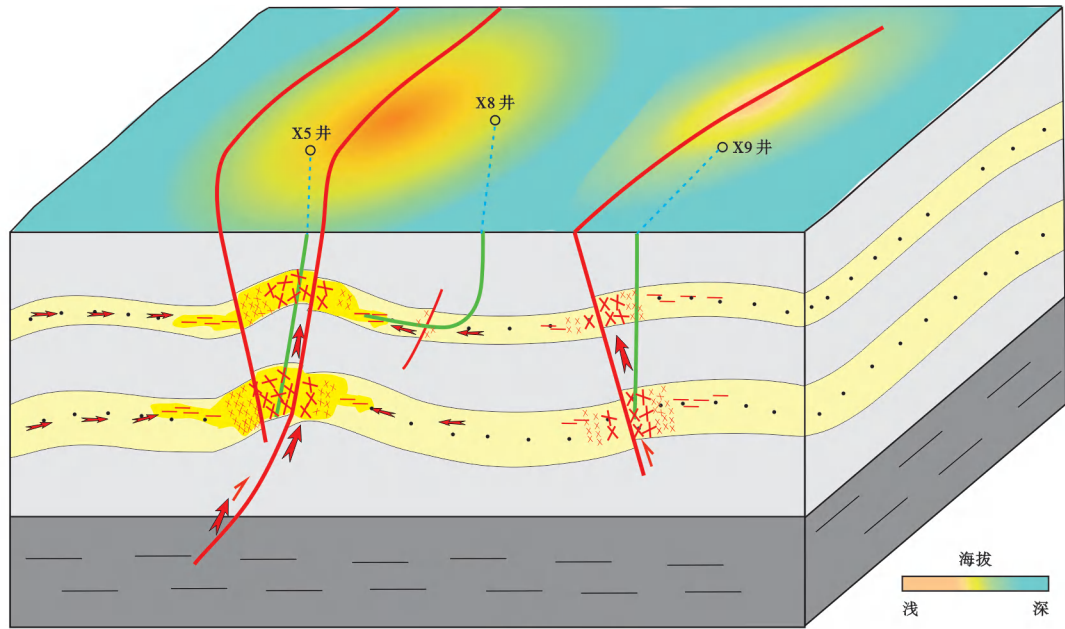
图 13 川西气田雷口坡组成藏模式及地震剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 13 Hydrocarbon accumulation model and seismic profile of Leikoupo Formation in the West Sichuan gas field

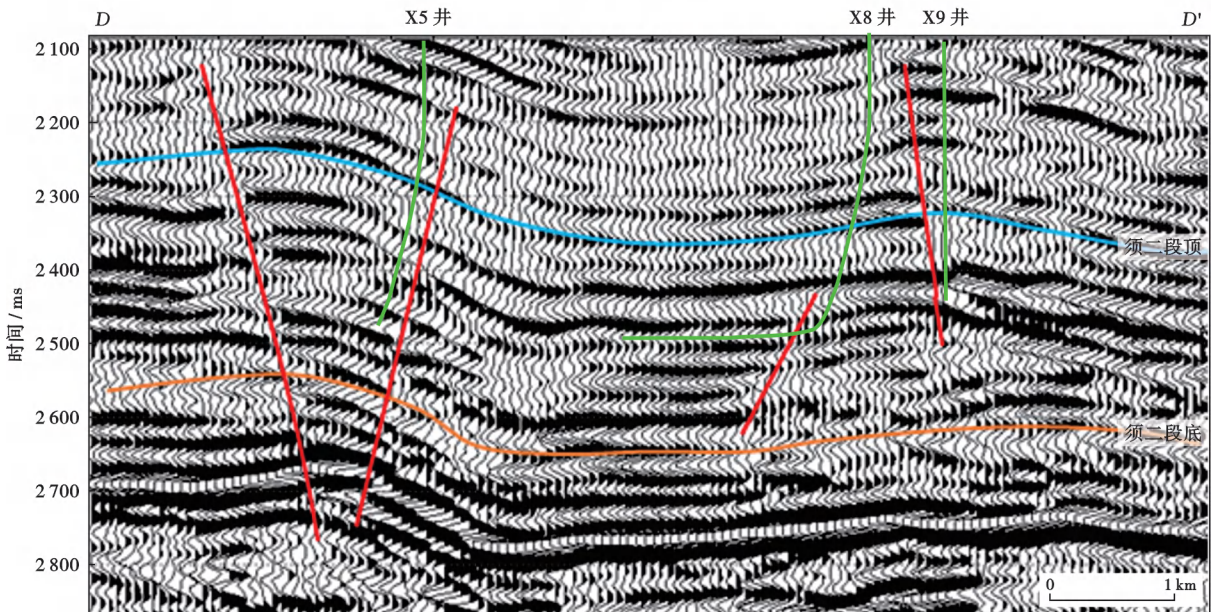
压力持续降低,但烃源岩的热演化过程仍在持续,烃源岩处于高成熟—过成熟阶段;致密化的储集层在断层、裂缝的改造作用下形成部分高渗基质储层;高成熟天然气随着压力和温度的降低逐渐膨胀解吸、脱溶,沿断层-裂缝-高渗基质砂岩储层组成的输导体系在横、纵向上运移聚集;该阶段储层内形成了与高温、低盐度汽化水伴生的气烃包裹体。

综上所述,川西坳陷新场构造带须二段气藏具有“多期充注成藏、构造-输导体系叠合控富”的成藏富集规律。晚侏罗世前,即在须二段储层尚未致密化之前,烃源岩已

进入低成熟阶段。低成熟油气沿断层-砂体进行广覆式立体充注(图 14),导致须家河组“整体低丰度含气”的成藏特征,而在构造高部位则形成相对高丰度的常规油气藏^[38],为须二段气藏的形成奠定了基础。喜马拉雅期的造山运动一方面通过规模断裂改善致密化砂岩储层的物性,形成高效复合输导体系,并为高成熟天然气大量充注提供通道;另一方面对早期构造进行调整。晚期构造的高部位与高效输导体系的叠合区是高成熟天然气运聚的有利位置(图 14),天然气富集程度高。



(a) 须二段气藏模式



(b) 过井地震剖面

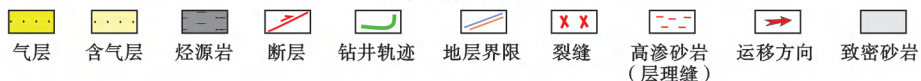


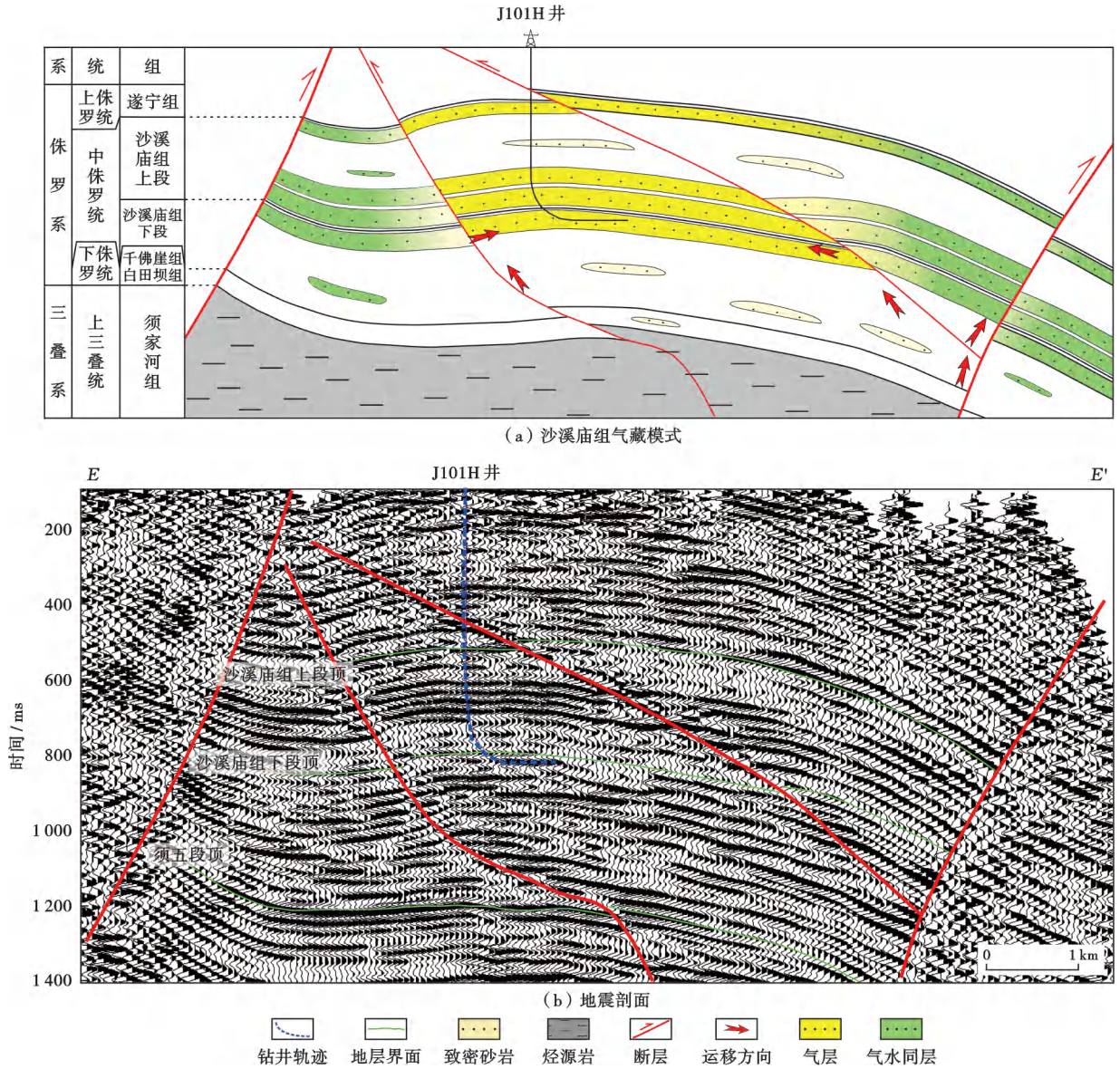
图 14 川西坳陷新场构造带须二段气藏富集模式及过井剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 14 Gas reservoir enrichment model and cross-well seismic section of Member 2 of Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of western Sichuan depression

(3) 沙溪庙组

须五段厚层烃源岩为川西地区沙溪庙组气藏的形成提供了丰富的气源基础。断层与砂体的组合构成了天然气输导体系。在川西地区龙门山山前构造带,彭县断层和反向伴生断层的发育为须五段烃源岩的向上运移提供了良好的高速运移通道,而多期次片状叠置的河道砂体则为川西地区沙溪庙组气藏

的形成提供了充足的储集空间。受构造挤压影响,龙门山前局部构造圈闭发育,背斜在印支运动晚期已具雏形,并在燕山期一喜马拉雅期呈继承性发展,为气藏的形成提供了规模聚集场所。综上所述,川西地区沙溪庙组气藏具有须五段厚层烃源岩供烃、烃源断层-砂体高效输导和复合圈闭控富的成藏富集规律(图15)。



(a) 沙溪庙组气藏模式

(b) 地震剖面

钻井轨迹
 地层界面
 致密砂岩
 烃源岩
 断层
 运移方向
 气层
 气水同层

图15 川西坳陷沙溪庙组气藏富集模式及过井剖面(剖面位置见图1)

Fig. 15 Gas reservoir enrichment model and cross-well seismic section of Shaximiao Formation in western Sichuan depression

3 勘探开发关键技术

3.1 不同类型储层的预测技术

3.1.1 超深层湖坪相薄互层储层精细预测技术

川西气田发育的白云岩储层受潮坪相高频旋回沉积控制,岩性呈频繁变化,储层呈薄夹层分布,并在纵向上呈多层叠置,横向上物性差异明显,为典型的多构

型薄互层储层类型,其储层的精细刻画对地球物理技术提出了更大挑战。目前,川西气田以高保真目标处理、原位岩石物理分析和辨识机理研究为基础,紧密围绕多构型薄互层地震辨识机理、高精度储层定量表征、裂缝综合预测、含气性检测及深层大斜度井跟踪及精确控制等主要研究内容,通过持续技术攻关及应用,建立了以“超深层多构型薄储层高精度预测”为核心的地

球物理关键技术体系^[39];以“高保真处理和高精度成像、高分辨率上下储层识别、高精度储层参数预测”等技术研究为重点,实现了有利相带、优质储层及流体分布的预测,落实了有利目标及开发潜力区,为川西地区超深层潮坪相多构型储层的高效勘探开发提供了重要技术保障。研发前,储层的预测厚度为 30 m,而研发后储层的预测厚度为 15 m,实现了对“五花肉”储层的精细预测。雷四段上亚段的薄储层预测精度由早期的 70% 提高到 89%,实现了 5 套小层分层的精细刻画(图 16)。

3.1.2 薄储层预测及中—小尺度裂缝空间刻画技术
针对新场构造带须二段岩性组合以厚层砂岩夹薄层泥岩为主、地震资料主频较低、薄层优质储层与围岩波阻抗差异微弱、定量预测难度较大等问题,建立了“分频重构叠前随机反演”储层预测技术。通过叠前分频反演,利用地震数据体中频信息结合测井中低频和高频信息,基于原始地震分辨率进行确定性反演获得纵波时差、横波时差、密度数据体,进而开展钻井高频信息(岩性、物性、流体)约束的随机反演(图 17),并通

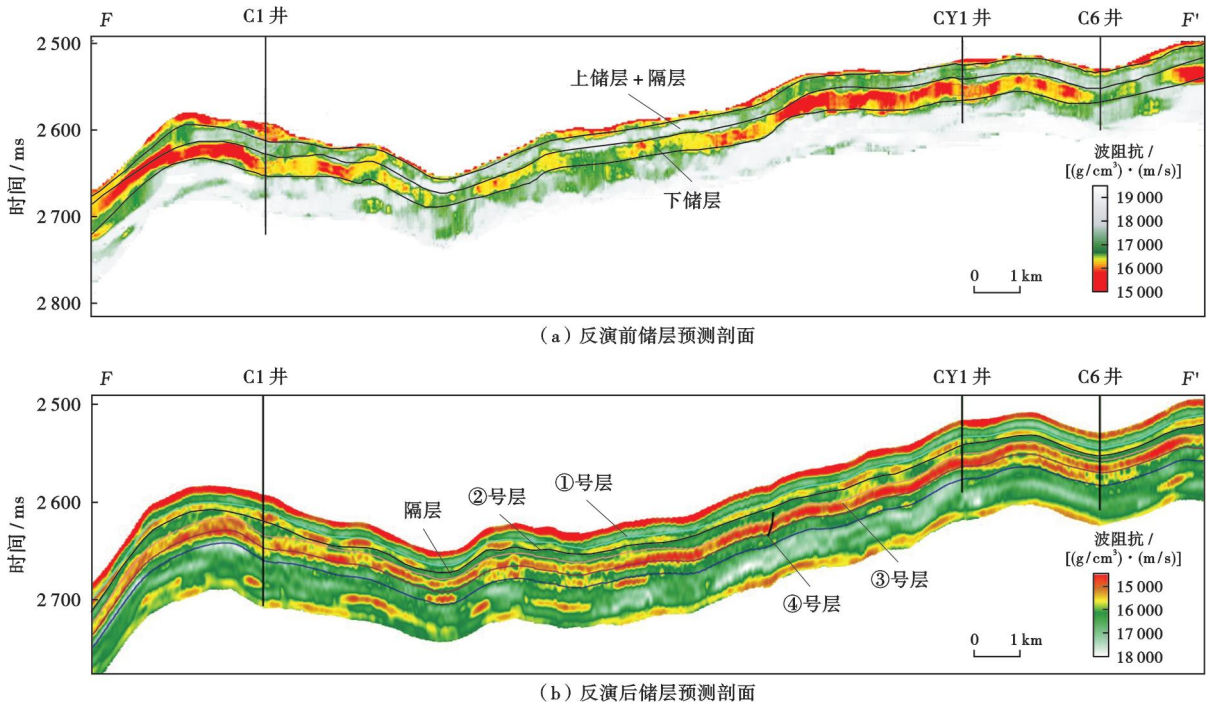


图 16 川西气田雷四段上亚段地震波形反演结果前后对比(剖面位置见图 1)

Fig. 16 Comparison of seismic waveform inversion results of the upper submember of Member 4 of Leikoupo Formation in the West Sichuan gas field

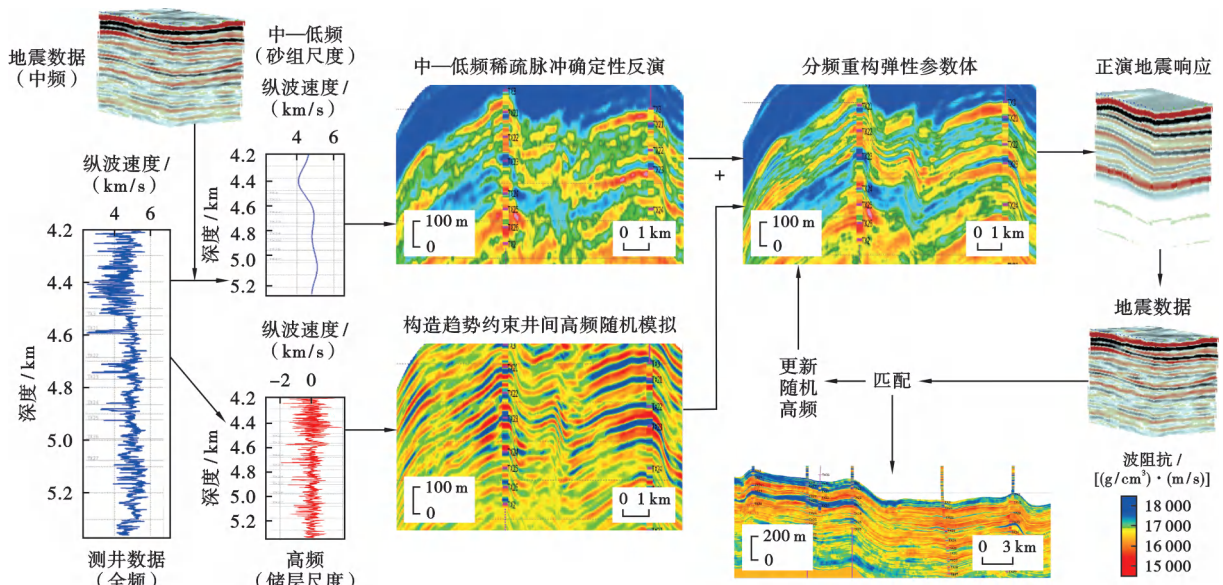


图 17 须二段薄储层叠前分频重构反演流程

Fig. 17 Workflow of pre-stack frequency division reconstruction and inversion for thin reservoirs in Member 2 of Xujiahe Formation

过反复迭代模拟,实现薄层优质储层预测。通过这一技术,实现了储层预测分辨率由30 m到10 m的跨越式进步,砂体预测的吻合率提高了18%,储层预测的吻合率提高了16%,有效提高了储层的钻遇率。

前人的研究^[40-41]表明,裂缝是控制须二段气藏单井产能的重要地质要素。须二段发育不同级别的断层,其派生的不同尺度裂缝分布复杂,如何准确地刻画出中一小尺度裂缝空间的分布对提高钻井成功率,实现效益开发至关重要。针对中一小尺度裂缝分布复杂的地质背景,建立了“熵+曲度+方位各向

异性”多属性中一小尺度裂缝空间刻画技术。该方法以裂缝地质发育模式为约束,通过利用成像测井裂缝解释结果,明确裂缝响应的熵属性值门槛,结合曲度属性对工作弯曲程度的反映,综合表征出裂缝发育程度(图18)。结合叠前反演数据,进行椭圆拟合方位速度比,明确了高角度裂缝发育的密度及方位,有效提高了裂缝空间刻画的精度。通过应用该方法,平均单井钻遇成像测井解释裂缝发育段的储层厚度达41.4 m,规模裂缝体钻遇率达100%,有力支撑了须二段气藏的高效开发。

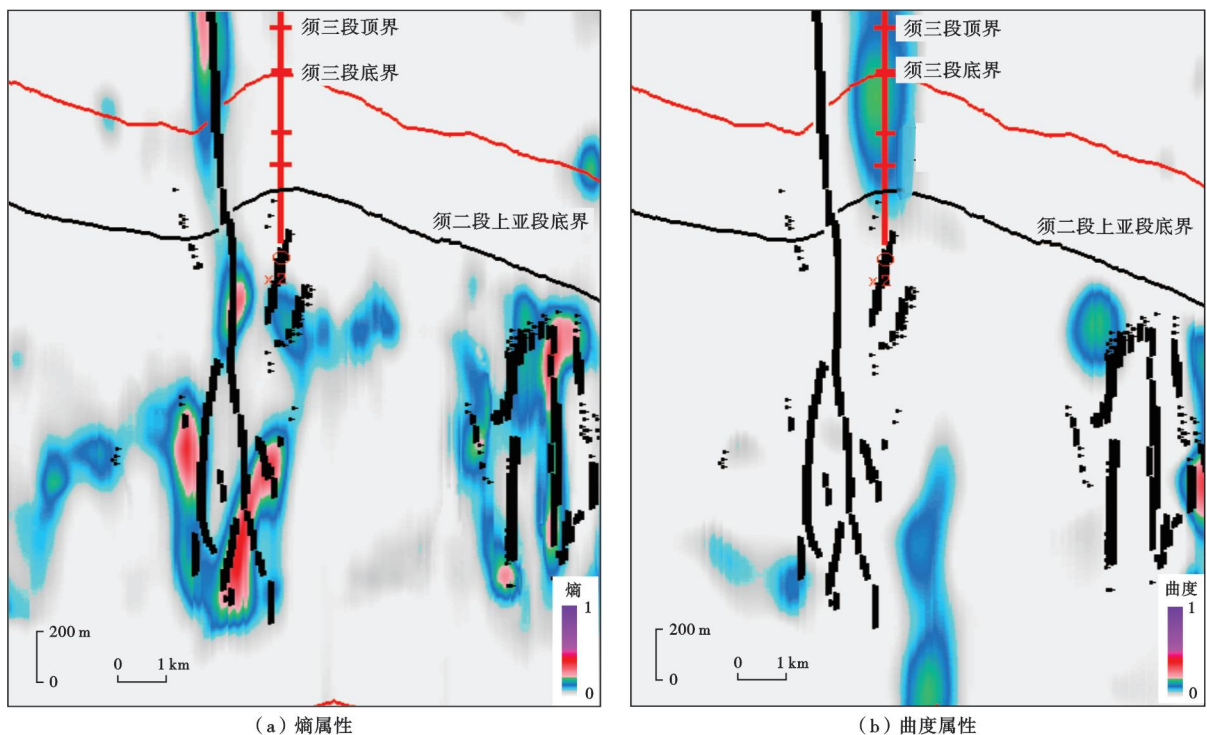


图18 川西坳陷新场构造带须二段熵+曲度属性的裂缝分布特征

Fig. 18 Fracture distribution characteristics of Member 2 of Xujiache Formation in Xinchang structural belt of western Sichuan depression based on entropy and curvature attributes

3.2 地质—工程一体化开发技术

针对超深层构造复杂、储层单层厚度薄、多层叠置、钻完井工程施工难、安全环保要求高等挑战,量身打造了复杂潮坪相碳酸盐岩气藏“一台多井立体开发井网设计”方案,部署井数由30口优化为17口,井场占地面积减少了40%;采用超长水平井开发模式,克服直井动用半径小、气井产能低达不到经济极限的难点,通过提高上、下储层的纵向动用程度,第1轮钻井揭示的储层平均段长达到520 m,第2轮钻井通过持续优化工程工艺,揭示储层的平均段长可达1 429 m,但直井平均钻揭的储层厚度仅为56.8 m,通过实施水平井大幅提高了优质储层的钻遇率。建立“三控三优”地质—工程一体化轨迹优

化调整模式,创新建立了轨迹精细控制模型,精准识别出雷口坡组顶层、隔层等标志层,中靶率为100%,储层钻遇率>85%,实现了多夹层薄互层储层的精准穿越。

在“构造—输导体系叠合控富”地质理论的指导下,须二段的钻井部署思路由之前的“大断层要躲、小断层要靠”转变为“大断层要靠、小断层要穿”,并创建了“近断褶、顺断面”的断褶裂缝类“甜点”定向井技术。通过精确控制钻井轨迹,尽量让钻井在断层上盘200 m内沿近断层走向的轨迹方向穿行(图19)。该方式可以有效地扩大井筒与高效输导体系的接触面积,提高单井产能。2022年,采用定向井技术部署的X20井,其天然气产量超过 $44 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

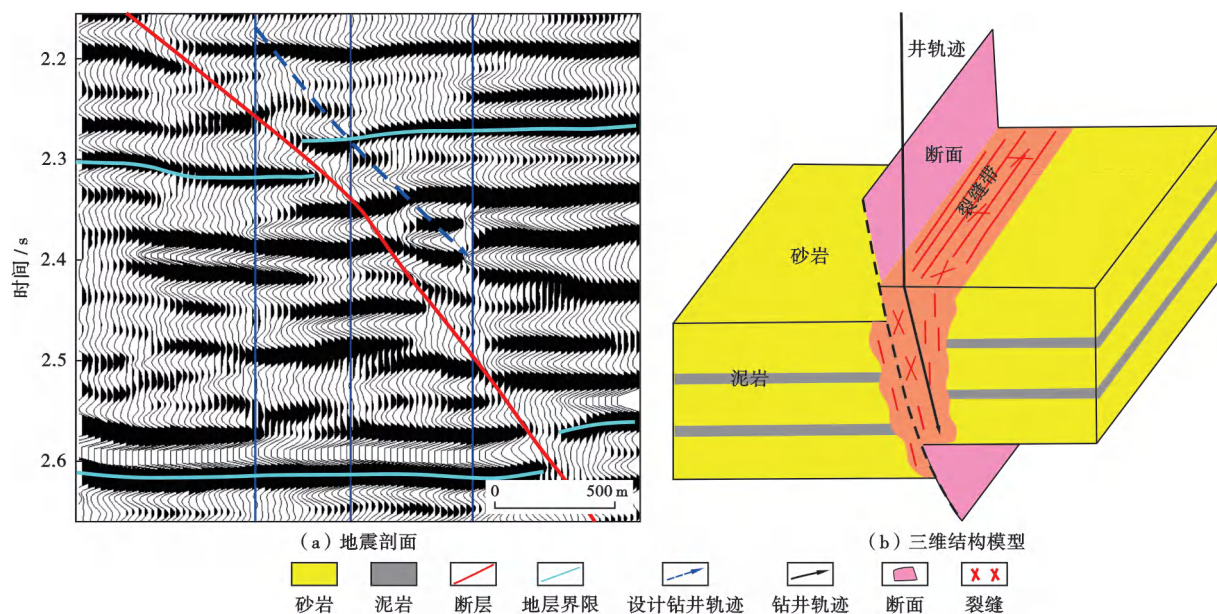


图 19 川西坳陷新场构造带须二段近断层定向井模式

Fig. 19 Near fault directional well model of Member 2 of Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of western Sichuan depression

在“烃源断层-砂体高效输导和复合圈闭控富”地质认识的指导下,龙门山山前构造带沙溪庙组的钻井部署思路由之前的“直井”转变为“水平井”。通过精确控制钻井轨迹,保持井轨迹在厚度约为 10 m 的薄层相对优质储层中穿行,确保了优质储层的钻遇率。

3.3 复杂气藏配套钻完井工艺技术

3.3.1 雷口坡组

(1) 钻井提速技术

直井段攻关致密地层提速技术,通过建立聚晶金刚石复合片(PDC)钻头门限钻压和门限扭矩模型,形成以“个性化钻头+低速大扭矩等壁厚螺杆”为核心的复合钻井技术。须家河组一小塘子组井段的钻趟数由前期的直井 23 趟缩短到现在的定向井 12 趟,机械钻速由 1.76 m/h 提高到 3.72 m/h,同比提速 111%,大幅缩短了钻井周期。利用预弯曲钻具组合匹配最优钻井参数,引导钻具组合形成有序的向前涡动,解决了平台丛式井井眼防碰的技术难题。

水平段引进最新一代 Lucida 抗 175 °C 高温旋转导向工具,解决小尺寸直径为 165.1 mm 井眼旋转导向工具耐高温、抗震动的难题。在实施过程中优化旋转导向工具串结构,采取“取消尾扶、减小直径为 162 mm 的测斜单元扶正器尺寸至 145 mm、研发具有倒划眼破岩能力的防卡 PDC 钻头”等一系列措施,降低卡钻风险,协同实施安全优快钻井。

(2) 完井投产技术

建立储层“甜点”定量评价方法,优选出重点高产潜力井段,指导滑套出酸口位置,针对不同储层建立差

异化布酸设计方法,形成了超长水平井“滑套定点+复合暂堵”为核心的分流酸化压裂技术,实现了超长水平井充分改造及优质储层的精准改造。

第 1 轮实施钻井 11 口,天然气的平均无阻流量达到 $133 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。第 2 轮实施钻井 6 口,通过总结首轮钻井的施工经验,聚焦地质目标,优化钻完井工艺及升级现场管控措施,提高优质储层钻遇率,实现了天然气的平均无阻流量超过 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

3.3.2 须二段

针对新场构造带须二段储层破裂压力高、应力差异大、压裂难度大等一系列工程难题,中国石油化工股份有限公司西南油气分公司积极开展设备升级与技术攻关,形成了“超高压+大排量+高强度”非对称复杂缝网压裂技术。以提排量、增规模,串网缝为技术目标,将井口设备压力上限由 105 MPa 提升至 140 MPa,提升施工排量和单段加砂量,采用后效射孔+前置酸降低破裂压力等,将排量由 $6 \sim 8 \text{ m}^3/\text{min}$ 提升至 $12 \sim 15 \text{ m}^3/\text{min}$,攻克了前期“压不开、加不进、提不上”的难题,实现了天然气产量大于 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产稳产。

3.3.3 沙溪庙组

针对致密砂砾岩储层形成了相对高石英含量+相对优质储层+低地应力+高声波时差/自然伽马地质工程双“甜点”的评价标准,形成了“密切割、大排量、强加砂”做大改造体积的压裂方法,并在此基础上,针对沙溪庙组“河道非均质、出砂严重、铺置有效性差、排液困难”问题,采用“精细布缝、高效铺置、增能快排”,实现了储层评价和资源释放。

4 结 语

(1) 川西气田发育多套含气层系, 近期已取得油气勘探突破并进入开发建产阶段。雷四段气藏的勘探开发历程揭示, 局限台地潮坪相发育厚(藻)白云岩储层是川西气田雷四段气藏发现的基础, 实现了四川盆地海相储层勘探方向由高能礁滩、岩溶等气藏向局限台地潮坪相白云岩气藏的拓展, 丰富了海相油气勘探类型。须家河组在“构造-输导体系叠合控富成藏”地质认识指导下, 突破了须家河组长期“有气无田, 有储量无产量”的局面。沙溪庙组在“烃源断层-砂体高效输导和复合圈闭控富”地质认识指导下, 取得了复杂山前构造带沙溪庙组勘探突破, 有力推动了川西地区的产能建设。

(2) 雷四段储层发育于局限环境, 潮间带水体较浅, 云坪/藻云坪广泛分布, 经常暴露, 准同生期大气水淋浴形成优质孔隙型储层, 白云岩储层呈薄层分布, 纵向多层叠加, 具有典型的“薄互层储层”特征。须二段发育河口坝和分流河道微相内的高能砂体, 广覆叠置发育, 具备规模储集空间。沙溪庙组发育扇三角洲和辫状河三角洲水下分流河道微相高能砂体, 具有典型的近物源片状砂砾岩储层特征。

(3) 川西地区从海相到陆相发育多套高效烃源岩, 为大型气田的形成提供了充足的物质条件。二叠系到雷口坡组发育的“直接式”和“接力式”通源断层, 以及雷口坡组网状分布的微断层和裂缝、须家河组断-缝-砂复合输导体系、沙溪庙组断层-砂体输导体系, 均为高效的油气输导体系, 确保了天然气能够高效运移成藏。川西气田雷四段的成藏特征可概括为: 双源供烃、白云石化溶蚀叠加控储、复合圈闭控藏; 须二段气藏具有“多期充注成藏, 构造-输导体系叠合控富”的成藏富集规律; 沙溪庙组气藏具有“须五段厚烃源岩供烃、烃源断层-砂体高效输导和复合圈闭控富”的成藏富集规律。

(4) 在勘探开发过程中, 针对雷四段潮坪相白云岩、须二段和沙溪庙组致密砂岩等不同类型复杂气藏的关键问题, 建立了不同类型储层的精细预测技术序列、中-小尺度裂缝空间刻画技术; 通过地质-工程一体化优化设计, 采用合理方案开发, 形成与之配套的钻完井工程工艺, 实现了“少井高产”; 海陆并举的勘探策略实现了川西地区超深层复杂构造带潮坪相白云岩气藏的开发建产、须家河组的高效开发和沙溪庙组致密砂岩的勘探突破, 推动了相关领域的勘探开发及方法技术创新。

参 考 文 献

- [1] 马永生, 蔡勋育. 四川盆地川东北区二叠系-三叠系天然气勘探成果与前景展望[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 741-750. MA Yongsheng, CAI Xunyu. Exploration achievements and prospects of the Permian Triassic natural gas in northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 741-750.
- [2] 杨雨, 文龙, 宋泽章, 等. 川中古隆起北部蓬莱气区多层系天然气勘探突破与潜力[J]. 石油学报, 2022, 43(10): 1351-1368, 1394. YANG Yu, WEN Long, SONG Zezhang, et al. Breakthrough and potential of natural gas exploration in multi-layer system of Penglai gas area in the north of central Sichuan paleo-uplift[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(10): 1351-1368, 1394.
- [3] 许国明, 宋晓波, 王琼仙. 川西坳陷中段三叠系雷口坡组-马鞍塘组油气地质条件及有利勘探目标分析[J]. 海相油气地质, 2012, 17(2): 14-19. XU Guoming, SONG Xiaobo, WANG Qiongxiang. Analysis of petroleum geologic conditions and favorable prospecting targets of Triassic Leikoupo-Ma'antang formations in the middle segment of Chuanxi depression, western Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2012, 17(2): 14-19.
- [4] 李书兵, 许国明, 宋晓波. 川西龙门山前构造带彭州雷口坡组大型气田的形成条件[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3): 74-82. LI Shubing, XU Guoming, SONG Xiaobo. Forming conditions of Pengzhou large gas field of Leikoupo Formation in Longmenshan piedmont tectonic belt, western Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 74-82.
- [5] 何志国, 熊亮, 杨凯歌. 川西坳陷中段新场构造须二气藏主控因素分析[J]. 天然气勘探与开发, 2006, 29(4): 18-22. HE Zhiguo, XIONG Liang, YANG Kaige. Mainly controlling factors of Xujiabe 2 Member gas reservoir in Xinchang structure, middle West-Sichuan sag[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2006, 29(4): 18-22.
- [6] 汪泽成, 赵文智, 彭红雨. 四川盆地复合含油气系统特征[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 26-28. WANG Zecheng, ZHAO Wenzhi, PENG Hongyu. Characteristics of multi-source petroleum systems in Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 26-28.
- [7] 童崇光. 四川盆地断褶构造形成机制[J]. 天然气工业, 1992, 12(5): 1-6. TONG Chongguang. Mechanism of forming fault-folded structure in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 1992, 12(5): 1-6.
- [8] 邓康龄, 余福林. 川西坳陷的复合构造与油气关系[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 214-219. DENG Kangling, YU Fulin. Compound structures and hydrocarbons in western Sichuan depression[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(2): 214-219.
- [9] 李智武, 刘树根, 陈洪德, 等. 川西坳陷复合-联合构造及其对油气的控制[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(5): 538-551. LI Zhiwu, LIU Shugen, CHEN Hongde, et al. Structural superimposition and conjunction and its effects on hydrocarbon accumulation in the western Sichuan depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5): 538-551.

- [10] 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. The formation and development of Sichuan Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [11] 商晓飞,赵磊,易杰,等.川西新场地区须家河组二段砂体沉积充填特征及定量地质建模[J].中国海上油气,2022,34(4):144-155.
SHANG Xiaofei, ZHAO Lei, YI Jie, et al. Sedimentary filling characteristics and quantitative geological modeling of sand bodies in Xu2 Member of Xujiahe Formation in Xinchang area, western Sichuan Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(4): 144-155.
- [12] 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.
- [13] 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 Xujiahe Formation in the Xinchang area of the western Sichuan depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(5): 633-640.
- [14] 谢刚平.川西坳陷中三叠统雷口坡组四段气藏气源分析[J].石油实验地质,2015,37(4):418-422.
XIE Gangping. Source of gas reservoirs in the fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(4): 418-422.
- [15] 杨克明.四川盆地西部中三叠统雷口坡组烃源岩生烃潜力分析[J].石油实验地质,2016,38(3):366-374.
YANG Keming. Hydrocarbon potential of source rocks in the Middle Triassic Leikoupo Formation in the western Sichuan depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(3): 366-374.
- [16] 隆轲,陈智远,宋晓波,等.川西地区中三叠统雷口坡组气藏气源分析[J].天然气工业,2019,39(增刊1):48-53.
LONG Ke, CHEN Zhiyuan, SONG Xiaobo, et al. Analysis of gas sources of Middle Triassic Leikoupo Formation in west Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(S1): 48-53.
- [17] 吴小奇,陈迎宾,翟常博,等.川西坳陷中三叠统雷口坡组天然气气源对比[J].石油学报,2020,41(8):918-927.
WU Xiaoqi, CHEN Yingbin, ZHAI Changbo, et al. Gas-source correlation of natural gas in the Middle Triassic Leikoupo Formation in the western Sichuan depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(8): 918-927.
- [18] 吴小奇,陈迎宾,翟常博,等.四川盆地中三叠统雷口坡组天然气来源及勘探方向[J].天然气地球科学,2020,31(9):1204-1215.
WU Xiaoqi, CHEN Yingbin, ZHAI Changbo, et al. Gas source and exploration direction of the middle Triassic Leikoupo Formation in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(9): 1204-1215.
- [19] 施振生,赵正望,金惠,等.四川盆地上三叠统小塘子组沉积特征及地质意义[J].古地理论,2012,14(4):477-486.
SHI Zhensheng, ZHAO Zhengwang, JIN Hui, et al. Depositional characteristics and its geological significance of the Upper Triassic Xiaotangzi Formation in Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(4): 477-486.
- [20] 万天丰,朱鸿.古生代与三叠纪中国各陆块在全球古大陆再造中的位置与运动学特征[J].现代地质,2007,21(1):1-13.
WAN Tianfeng, ZHU Hong. Positions and kinematics of Chinese continental blocks in reconstruction of global paleo-continent for Paleozoic and Triassic[J]. Geoscience, 2007, 21(1): 1-13.
- [21] 李凌,谭秀成,周素彦,等.四川盆地雷口坡组层序岩相古地理[J].西南石油大学学报(自然科学版),2012,34(4):13-22.
LI Ling, TAN Xiucheng, ZHOU Suyan, et al. Sequence lithofacies paleogeography of Leikoupo Formation, Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2012, 34(4): 13-22.
- [22] LOUCKS R G, SARG J F. Carbonate sequence stratigraphy: recent developments and applications [M]. Tulsa, Oklahoma: AAPG, 1993: 36.
- [23] 魏柳斌,包洪平,严婷,等.鄂尔多斯盆地东部奥陶系马家沟组五段5亚段微生物碳酸盐岩发育特征及储集意义[J].石油学报,2021,42(8):1015-1025.
WEI Liubin, BAO Hongping, YAN Ting, et al. Development characteristics and significance of microbial carbonate reservoirs in the fifth submember of Member 5 of Ordovician Majiagou Formation in the eastern Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(8): 1015-1025.
- [24] 宋晓波,隆轲,王琼仙,等.川西地区中三叠统雷口坡组四段上亚段沉积特征[J].石油实验地质,2021,43(6):976-985.
SONG Xiaobo, LONG Ke, WANG Qiongqian, et al. Sedimentary characteristics of the upper part of the fourth member of Leikoupo Formation of Middle Triassic in western Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(6): 976-985.
- [25] 王琼仙,宋晓波,王东,等.川西龙门山前雷口坡组四段储层特征及形成机理[J].石油实验地质,2017,39(4):491-497.
WANG Qiongqian, SONG Xiaobo, WANG Dong, et al. Reservoir characteristics and formation mechanism of the 4th Member of the Leikoupo Formation in Longmen Mountain front[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(4): 491-497.
- [26] 王兴龙,刘磊,林良彪,等.川西坳陷新场地区须二段沉积微相与砂体展布[J].成都理工大学学报(自然科学版),2021,48(1):23-34.
WANG Xinglong, LIU Lei, LIN Liangbiao, et al. Sedimentary micro-facies and distribution of sand bodies in the 2nd Member of Xujiahe Formation, Xinchang area, western Sichuan depression, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2021, 48(1): 23-34.
- [27] 罗龙,高先志,孟万斌,等.深埋藏致密砂岩中相对优质储层形成机理——以川西坳陷新场构造带须家河组为例[J].地球学报,2017,38(6):930-944.
LUO Long, GAO Xianzhi, MENG Wanbin, et al. The formation mechanism of the relatively high-quality reservoir in tight sandstones with deep burial: a case study of Xujiahe Formation in

- Xinchang structural belt of western Sichuan depression[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, 38(6): 930-944.
- [28] 郭迎春, 庞雄奇, 陈冬霞, 等. 川西拗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.
- [29] 张世华. 川西拗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.
- [30] 邓虎成, 周文, 周秋媚, 等. 新场气田须二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.
- [31] 曾联波, 吕文雅, 徐翔, 等. 典型致密砂岩与页岩层理缝的发育特征、形成机理及油气意义[J]. *石油学报*, 2022, 43(2): 180-191.
ZENG Lianbo, LÜ Wenya, XU Xiang, et al. Development characteristics, formation mechanism and hydrocarbon significance of bedding fractures in typical tight sandstone and shale[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 43(2): 180-191.
- [32] 赖锦, 肖露, 赵鑫, 等. 深层—超深层优质碎屑岩储层成因与测井评价方法——以库车拗陷白垩系巴什基奇克组为例[J]. *石油学报*, 2023, 44(4): 612-625.
LAI Jin, XIAO Lu, ZHAO Xin, et al. Genesis and logging evaluation of deep to ultra-deep high-quality clastic reservoirs: a case study of the Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa depression[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 44(4): 612-625.
- [33] 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.
- [34] 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——以四川盆地川西拗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.
- [35] 邵绪鹏, 刘振峰, 刘忠群, 等. 川西拗陷新场地区须二段断缝体地震预测与地质发育模式[J]. *油气地质与采收率*, 2022, 29(4): 1-11.
SHAO Xupeng, LIU Zhenfeng, LIU Zhongqun, et al. Seismic prediction and geological development mode of fault fracture bodies in 2nd Member of Xujiahe Formation in Xinchang area of western Sichuan depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(4): 1-11.
- [36] 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.
- [37] 李剑, 马卫, 王义凤, 等. 腐泥型烃源岩生排烃模拟实验与全过程生烃演化模式[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(3): 445-454.
LI Jian, MA Wei, WANG Yifeng, et al. Modeling of the whole hydrocarbon-generating process of sapropelic source rock[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(3): 445-454.
- [38] 张世华, 田军, 叶素娟, 等. 川西拗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 the Xu-2 Member in Xinchang structural zone, western Sichuan depression, China[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(S1): 17-22.
- [39] 叶泰然, 马灵伟, 张虹, 等. 川西彭州地区雷口坡组湖相薄层辨识机理研究[J]. *石油物探*, 2020, 59(3): 409-421.
YE Tairan, MA Lingwei, ZHANG Hong, et al. Strategy for identifying thin reservoirs in tide-flat facies in the Leikoupo Formation, Pengzhou, western Sichuan[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2020, 59(3): 409-421.
- [40] 田军, 张世华, 叶素娟, 等. 川西拗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.
- [41] 刘凤, 黎华继, 刘君龙, 等. 新场气田须二高产气藏主控地质因素[J]. *石油地质与工程*, 2021, 35(5): 22-26.
LIU Feng, LI Huaji, LIU Junlong, et al. Main controlling geological factors of Xu 2 high yield gas reservoir in Xinchang gas field[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2021, 35(5): 22-26.

(收稿日期 2023-08-01 改回日期 2024-01-12 编辑 雷永良)