

四川盆地中国石化探区须家河组致密砂岩气 勘探开发进展与攻关方向

郑和荣,刘忠群,徐士林,刘振峰,刘君龙,黄志文,黄彦庆,石志良,武清钊,范凌霄,高金慧

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:四川盆地须家河组致密砂岩气的勘探取得了丰硕的成果,但是气藏整体表现为“储层致密、大面积含气、局部富集”的特点,开发生产中普遍呈现出储量丰度低、普遍产水和裂缝控产等特征,储量动用难度大。近年来,以有效建产和高效勘探为主要目标,应用地质-工程一体化的思路,开展了四川盆地中国石化探区须家河组的新一轮勘探开发攻关研究,在基础地质理论认识和勘探开发关键技术等方面取得了重要进展。在成藏模式、天然气富集规律和圈闭评价方面,建立了“先成藏后致密、超压驱动、晚期调整”的成藏模式,明确了“早期构造控带、差异致密控储、构造调整控产”的天然气富集规律,建立了基于古今构造及形变的圈闭动态评价方法。关于致密砂岩气藏甜点,划分了2类4型气藏甜点模式,并建立了相应的评价标准。针对致密砂岩裂缝预测,形成了最大似然、构造熵、形态指数和曲度等多属性融合的断褶缝体精细刻画技术。在致密砂岩组分和流体识别上,构建了粒度参数测井连续评价和中子声波包络面含气性识别测井评价技术。针对致密砂岩储层保护和改造,初步形成了氮气钻井和提高产量技术,制定了不同甜点类型储层压裂改造技术和对策。当前,须家河组勘探开发工作中的重点是如何实现规模有效开发。通过近几年的攻关研究,认为下步的勘探开发应集中以下几个方面:一是在全盆范围内进一步深化须家河组天然气差异富集规律研究;二是按照不同甜点类型开展精细的地质评价;三是进一步攻关裂缝体内幕精细刻画、优质储层精细预测和流体预测等关键技术,大力发展提高产量工程工艺技术和开发政策优化技术;四是坚持地质-工程一体化,建立分类动用的思想,优先开发动用裂缝型甜点储量,以大幅度提高产量为目标攻关基质储渗型甜点储量,实现须家河组难动用储量的有效建产和高效勘探。

关键词:氮气钻井;差异富集规律;地质-工程一体化;致密砂岩气;须家河组;四川盆地

中图分类号:TE132.1

文献标识码:A

Progress and key research directions of tight gas exploration and development in Xujiahe Formation, Sinopec exploration areas, Sichuan Basin

Zheng Herong, Liu Zhongqun, Xu Shilin, Liu Zhenfeng, Liu Junlong, Huang Zhiwen, Huang Yanqing,
Shi Zhiliang, Wu Qingzhao, Fan Lingxiao, Gao Jinhui

(Petroroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Gas exploration in tight sandstones of the Xujiahe Formation in Sinopec's exploration areas, Sichuan Basin, has been fruitful. However, gas in the formation is pervasive but only locally enriched in rather tight layers, which results in low reserve abundance, water production being common and gas yields being controlled by fractures. Exploitation of the gas reservoirs in the formation has therefore been a challenge. With exploration and productive capacity building being pursued strategically in an efficient way by the group in the areas in recent years, Sinopec has followed a roadmap leading to an integrated geology and engineering during a new round of exploration and development activities in the areas of the basin. Significant progresses have been made in the basic geological theories and key technologies of exploration and development. The gas accumulation pattern, summarized as “charging prior to tightening and overpressure-driven with late adjustment”, and the enrichment law, briefly described as “early structure controlling enrichment zones, differential tightening process controlling reservoir physical properties and late structural activities determining well performance”, are combined to establish a trap dynamic evaluation method based on paleo and modern structures and deformation

收稿日期:2020-10-20;修订日期:2021-07-20。

第一作者简介:郑和荣(1962—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质。E-mail:zhengherong_syky@sinopec.com。

通讯作者简介:刘忠群(1972—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质。E-mail:liuzq_syky@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技部项目(P18089, P19012)。

history. Sweet spot classification criteria have been established with 2 categories and 4 types of sweet-spot modes being built. For tight sandstone fracture prediction, an integrated technology of multi-attributes, including maximum likelihood, structural entropy, shape index and curvature, was used to describe fault-fold fractured reservoirs. To better identify the components of tight sandstone and fluids, we performed continuous logging evaluation of grain-size parameter and neutron acoustic envelope logging evaluation of gas-bearing properties. A nitrogen gas drilling technology has been proposed to enhance well performance and stimulation procedures have been tailored for different types of reservoirs. At present, the key exploration and development issue of the Xujiahe Formation is how to realize a large-scale and effective development. Based on the research in recent years, we suggest the following domains that require a continuous attention: a basin-wide study of differential enrichment of gas in the Xujiahe Formation; a fine geological evaluation of different types of sweet spots; fine description of the interior of fracture bodies, accurate prediction of high-quality reservoirs and development of fluid and engineering technologies for production enhancement and optimization; as well as an integration of geology and engineering combined with differential exploitation strategy according to different types of reserves. Only with development priority being given to sweet spots with well-developed fractures and study being focused on the improvement of production from sweet spots in porous matrix, will an effective exploration and production of gas from these hard-to-get reserves in the Xujiahe Formation be possible.

Key words: nitrogen drilling, differential enrichment pattern, geology-engineering integration, tight sand gas, Xujiahe Formation, Sichuan Basin

致密砂岩气藏最早于1927年发现于美国圣胡安盆地,中国自1971年发现了川西中坝气田之后,逐步系统开展了致密砂岩气藏的勘探和开发研究^[1-3]。“十一五”以来,随着储层压裂改造技术在致密砂岩气勘探开发中得到广泛应用,掀起了中国致密砂岩气勘探开发热潮,效果显著^[4-6],已有规模产出的盆地有四川、鄂尔多斯、柴达木、松辽、渤海湾、塔里木及准噶尔等盆地,目前中国已成为仅次于美国和加拿大的致密砂岩气生产大国^[7]。

四川盆地陆相致密砂岩气资源十分丰富,主要分布在上三叠统须家河组和侏罗系^[3,8-9],其中须家河组具有大面积含气特征,是四川盆地致密砂岩气藏勘探开发的主要层系之一。迄今为止,在须家河组已经发现了新场、广安、合川、安岳、大邑、元坝、通南巴、蓬莱和剑阁等多个大、中型致密砂岩气田^[10-28](图1),三级地质储量约 $3 \times 10^{12} \text{ m}^3$,展现出巨大的勘探开发潜力。根据全国油气资源动态评价结果,四川盆地中国石化探区须家河组致密砂岩气地质资源量为 $40\,481.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[29],已探明地质储量为 $2\,691.32 \times 10^8 \text{ m}^3$,探明率6.6%,仍然是勘探开发重要领域。

尽管四川盆地须家河组致密砂岩气勘探取得了丰硕成果,但是须家河组气藏储层致密、储量动用困难、开发效果差^[11-12,27-28],形成了储量规模大、但无法规模有效开发的被动局面,严重制约了勘探开发的深入开展,在2018年之前一度陷入近10年的停滞期。近年来,通过加强须家河组气藏基础地质研究和勘探开

发关键技术攻关,进一步深化了成藏富集规律和高产主控因素的认识,再加上工程工艺技术的进步,须家河组致密砂岩气的勘探开发又呈现出良好的上升势头。本文通过系统回顾和总结近期勘探开发理论和关键技术成果和经验,为下步勘探开发工作指明方向。

1 勘探开发现状

1.1 区域地质概况

四川盆地是在上扬子克拉通基础上发展起来的大型叠合盆地,面积约 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$,具有基底和沉积盖层二元结构,其沉积盖层由厚达6 000~12 000 m的海相和陆相地层组成。盆地边界具有明显菱形特点,盆地内部根据基底断裂细分为川北低缓构造带、川西低缓构造带、川中平缓构造带、川西南低陡构造带、川南低陡构造带和川东高陡构造带等次级构造单元(图1)^[20,30-31]。

盆地经历了多期构造运动,油气资源特别丰富,发育多套海、陆相烃源岩和源-储组合。上三叠统须家河组是中三叠统海相地层之上的一套砂-泥岩互层为主夹煤层的陆相碎屑岩沉积,受多物源、多期构造运动、古侵蚀面和前陆盆地等因素控制,发育大型湖相浅水三角洲沉积,厚度为200~4 000 m,呈西厚东薄的特征。纵向上须家河组自下而上划分为6段,依次为须一段(T_3x^1)、须二段(T_3x^2)、须三段(T_3x^3)、须四段(T_3x^4)、须五段(T_3x^5)和须六段(T_3x^6),其中 T_3x^1 ,

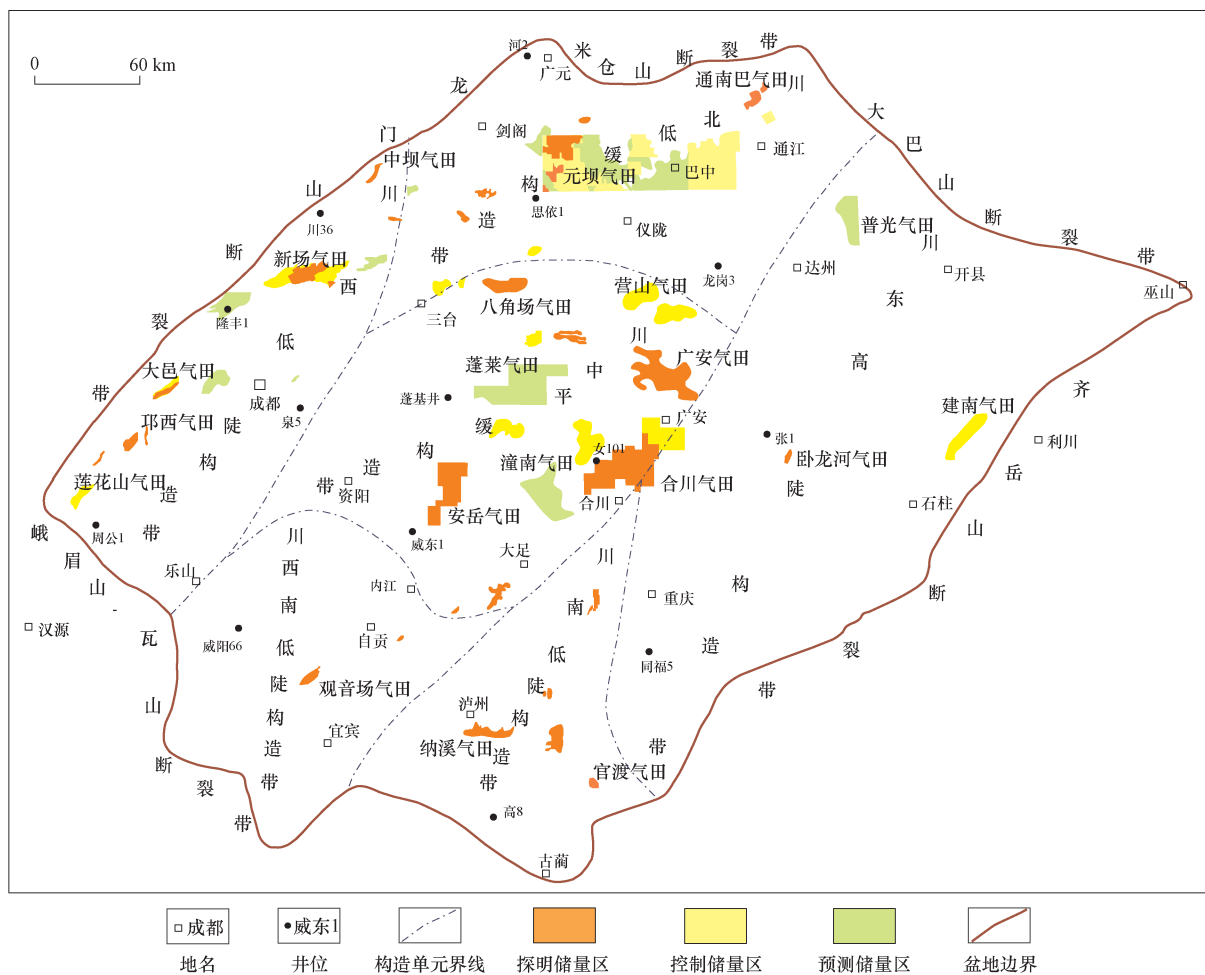


图1 四川盆地构造单元划分及须家河组气田分布

Fig.1 Structural units and gas fields in the Xujiahe Formation, Sichuan Basin

T_3x^3, T_3x^5 以煤系泥岩为主,是主要烃源层,各段内泥岩层间的砂岩也可以成为储集层; T_3x^2, T_3x^4, T_3x^6 以砂岩为主,是主要储集层,层段内砂岩层间的少量薄煤层(煤线)或炭质泥岩也可以成为烃源层。烃源层和储集层的交替发育构成了须家河组独特的“三明治式”生-储-盖组合^[20],是油气就近运移聚集成藏的重要地质基础。

1.2 气藏地质及工程特征

四川盆地须家河组总体上分布面积广、埋深普遍较大,主要发育三角洲沉积体系下的富石英类、富长石类、富岩屑类砂岩及砾岩等多种类型储层,储层成岩作用复杂、普遍致密、非均质性强、连续性差,局部发育裂缝。气藏类型多样,包括构造、岩性和构造-岩性复合型等多种类型^[13],具有“近源成藏、大面积含气、局部富集”的特点^[26]。气藏普遍具有储量丰度低、气-水关系复杂、气井产量差异大、普遍产水和裂缝控产等显著特征^[8,11,13,32]。

以川西坳陷为代表的须家河组气藏埋藏深、超致密,平均孔隙度为3%,平均渗透率为 $0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,处于压扭构造运动环境,水平最小主应力与垂向应力接近,水平最大主应力介于140~160 MPa,呈现走滑断层甚至逆断层的应力状态^[33],导致储层破裂压力高,压裂难度大,压裂设备及井况要求高,裂缝纵向延伸难度大,早期压裂施工均因这些原因导致储层压不开而失败。另外,须家河组储层水平层理缝普遍发育,通过研究认为地层状态下水平缝已张开,具有较好的径向渗流能力,压裂施工时,易使地层水平方向压开,难以产生纵向裂缝,同时水平缝张开度小于支撑剂直径,出现易进液、难进砂的问题,造成压裂效果差。水平缝和局部高角度构造缝的发育使储层裂缝易受入井流体污染,固相堵塞裂缝,基质储层水锁伤害严重,渗透率平均伤害率大于83%,钻完井中储层保护难度大。须家河组储层厚大砂体发育、优质储层纵向不连续叠置分布,砂泥岩交互导致岩石力学、地应力等差异大,非均质性强,工程地质甜点评价和储层改造工艺优

化难度大。到了川中、川东北地区,须家河组埋深、地应力均呈现显著的变化,其工程地质特征和施工难度也发生相应的变化。

2 中国石化探区勘探开发进展

进入21世纪以来,随着川西坳陷新场构造带新851井钻获高产工业气流,四川盆地中国石化探区须家河组致密砂岩气的勘探开发迈入快速发展阶段,先后在川西坳陷中段须家河组发现了超千亿立方米储量规模的新场大气田,大邑须三段中型气田,高庙子-丰谷须二段、须四段和崇州须三段等含气构造。在川东北通南巴区块发现了马路背地区须家河组气田及元坝地区须二段、须三段气田,在资阳区块东峰场区块须五段获得勘探突破。中国石化探区须家河组累计提交天然气三级地质储量超 $1.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$,展现出巨大的勘探开发潜力。

近几年,中国石化区块须家河组勘探开发呈现多地区、多层位不断有勘探开发突破井出现的新局面,又开展了新一轮以有效建产和高效勘探为目的的攻关研究。

2.1 川西探区勘探开发进展

2.1.1 勘探进展

川西坳陷中国石化探区须家河组勘探始于20世纪80年代,直至20世纪末,主要运用传统背斜控藏理论的勘探思路,主要在发育背斜圈闭和古今构造叠合圈闭部位开展勘探^[15,27,29-30],先后发现了龙门山前构造带鸭子河构造须二段气藏、孝泉构造须四段气藏和合兴场须二段气藏。随着2000年新场构造带新851井在须二段获得高产气流,发现了新场须二段气藏,伴随复式成藏理论和隐蔽油气藏理论的发展,川西坳陷须家河组勘探进入快速发展阶段,先后在须二段、须三段、须四段和须五段均获得了勘探突破。2000—2014年期间,先后发现了新场、大邑、高庙子-丰谷、洛带和中江-回龙等须家河组大中型气田及含气构造。但是,随着正向构造主体油气储量的不断发现,储量动用难度逐渐增大,无法实现规模有效开发。随后川西坳陷须家河组致密砂岩的勘探工作基本处于停滞状态。

“十三五”期间,在深化构造、沉积、优质储层形成机制、成藏富集规律等关键地质问题及工程工艺新技术研究的基础上,须家河组勘探工作重新启动。2019—2020年,中国石化西南油气分公司部署在川西坳陷成都凹陷南斜坡和中江-回龙斜坡的3口探井均取得了良好的效果,其中中江-回龙斜坡的中江20井

须二下亚段压裂后测试日产气量 $5.87 \times 10^8 \text{ m}^3$,成都凹陷南斜坡的安阜1井在须三中亚段压裂后测试获得工业气流、崇州108井在须三中亚段获得气流,初步显示出良好的发展势头。

2.1.2 开发进展

川西坳陷中国石化探区须家河组天然气探明储量约 $1\,773 \times 10^8 \text{ m}^3$,主要分布在新场气田须二段,约 $1\,250 \times 10^8 \text{ m}^3$,占70%。因此新场气田须二段气藏是开发的重点领域。新场气田须二段气藏自2000年10月第一口勘探井新851井获得高产,拉开了勘探开发的序幕,大致可以分为以下几个阶段:2000—2004年勘探发现阶段,该阶段以新851井、新856和联150井成功为代表;2005—2006年围绕新851井区滚动勘探开发阶段,该阶段以构造、“暗点”模式、裂缝综合预测成果和含气性检测成果为依据,围绕新851井区进行滚动勘探开发部署;2007—2010年勘探甩开、开发跟踪评价阶段,该阶段以新场8井、新5井以及新301井等勘探开发井的成功为代表;2010—2014年地质-工程一体化初步探索阶段,以新601井为代表。以上阶段的开发呈现气井产能差异大、高产井比例低、普遍产水和储量动用率低等特点,不能实现规模开发,以局部单井生产为主,之后开发工作基本都处于停滞状态。

2018年以来,为了攻关川西新场构造带须二段气藏难动用储量,中国石化石油勘探开发研究院成立攻关团队,院企联合,开展了新一轮以难动用储量开发评价为主要目标的攻关研究。通过研究,深化了成藏模式及富集规律认识,建立了2类4型新的气藏“甜点”模式及评价标准,明确了高产主控因素,形成了断褶裂缝体精细刻画技术,明确了不同甜点类型的工程地质特征及改造技术,开展了裂缝型甜点和基质型甜点储量评价,明确了裂缝型甜点在现有工艺下可以有效建产。裂缝型甜点区部署的两口开发评价井均获得产量突破,新8-3井氮气钻后无阻流量为 $53 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,新盛101井压后稳定产量为 $15.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。目前正开展开发先导试验,计划“十四五”期间完成规模建产,该区难动用储量开发评价取得良好的效果,极大提振了规模有效开发的信心,推动了整个中国石化探区须家河组的开发工作。

2.2 通南巴地区勘探开发进展

该地区油气勘探工作始于20世纪50年代,2006年部署在马路背构造上的马2井试获天然气产量 $4.038 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,发现了马路背须家河组气田^[22]。自

2006年以来,中国石化勘探分公司加大了对该地区陆相层系的勘探力度,先后部署了多口陆相专层评价井,多口井在须家河组测试获高产工业气流,其中马101井须二下亚段获日产 $60.11 \times 10^4 \text{ m}^3$ 高产工业气流,马103井须二上亚段获日产 $13.28 \times 10^4 \text{ m}^3$ 工业气流,目前两口井累计产天然气超 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。这两口井生产表现出“高产、稳产、不含水、采出程度高”的特点。但在该区众多井中只有这两口井生产效果好,其他井要么产量低、要么递减快,开发呈现高产井比例低、不能规模有效建产,开发工作一度停滞。

通过多年的攻关,近年来逐步明确了该区优质储层形成机制,建立了“双源供烃、立体输导、断褶皱控富”的成藏富集模式,认识到马101井、马103井之所以能够高产稳产是因为部署在了褶皱枢纽裂缝有利发育区与优质储层发育有利区的叠合部位,并攻关形成了断缝与褶皱缝精细刻画关键技术,为井位部署提供了关键依据。

在这些认识和关键技术的指导下,先后部署的多口井均获得产量突破,部署的马3井须四段常规射孔测试获 $10.11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流,马5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。目前通南巴区块正进行新一轮的勘探部署工作,正编制开发方案,计划“十四五”期间实现有效建产。

2.3 元坝地区勘探开发进展

元坝区块位于四川盆地东北部的川北低缓构造带,该区于20世纪50年代开始开展地面石油地质调查等工作^[29],可分为两个阶段:2006年以前地质普查和圈闭寻找阶段,2006年以后勘探发现及成果扩大阶段。

2006年以前共采集两批次二维地震,后一批次(2003年)落实了区域构造、地层岩性、岩相变化特征,期间部署了川复69井等陆相浅层井,在大安寨段见到好的油气显示。2006—2010年,完成了二维和三维地震资料采集,部署了元坝1井等针对长兴组的探井,发现了元坝气田,这些井在须家河组见到较好的油气显示,部分井测试获产,2010年提交了须二下亚段气藏控制储量。2010年以后,针对须家河组部署了多口陆相专层井,陆续发现了须二段、须三段和须四段气藏,三级地质储量超过 $7\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

元坝须家河组虽然获得了规模储量,但开发效果不好^[34],主要表现出“初产高、递减快、累产低”的生产特征,几十口井中只有两口井具有较好的生产效果,不能实现规模有效建产,开发一直处于停滞。

2018年后重新开展元坝须家河组的开发评价工作,认识了主要优质储层类型及成因机制,明确了钙屑砂质砾岩、中-粗粒钙屑砂岩、高声波时差石英砂岩和中-粗粒岩屑砂岩为优质储层,但优质储层厚度薄、分布散、空间上体积小、裂缝分布非均质性强,导致虽然部署井位多,但钻遇到裂缝发育且单井优质储层累计厚度大的井不多,同时当时工程技术不很成熟,造成低效井比例高。近两年主要根据获得的认识及成果,选择优质储层累计厚度大、裂缝相对发育的老井,采用页岩气大规模压裂技术^[35-37],通过压裂沟通钻井周边优质储层,开展老井复试,元坝6井压裂复试获得较好效果,日产量基本稳定在 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,陆续优选出多口老井准备压裂改造。

2.4 资阳探区勘探开发进展

资阳-东峰场区块位于川中隆起构造带西南端,于20世纪50年代开展石油地质勘查,可分为3个阶段。①早期普查阶段,1967年针对须家河组实施第一口探井,未发现工业油气层;1996年中国石化西南石油局获资阳-东峰场勘探登记区块;1997年针对雷口坡组实施了一口探井,未获工业油气成果。②初期勘探阶段,至2010年完成该区块二维地震详查勘探;2010—2013年针对须二段或海相地层实施4口探井,均未获突破;2014年部署资阳三维地震勘探;2020年5月实施东峰5井,在须五段测试获 $2.54 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 无阻流量,从而发现了须五段气藏,并申报预测储量。③勘探-开发评价阶段,2020年紧跟勘探成果,东峰5井同井场部署的评价井东峰501HF水平井获得高产,无阻流量 $46.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,该区突破主要得益于两方面:一是认识到须五段水下分流河道砂发育于须五段烃源岩之中,为成藏提供了气源;二是水平井压裂技术大幅度提高气井产量,目前正开展开发评价。

3 中国石油探区勘探开发进展

中国石油探区须家河组勘探始于20世纪50年代,2004年以前以构造圈闭勘探为主,发现了中坝、八角场、邛西、充西与磨溪等典型构造气藏^[4,8,11,31]。2005年以广安2井须六段日产天然气 $4.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 为标志,须家河组勘探进入到大面积岩性气藏勘探的新阶段,相继在川中发现了广安、合川、安岳等千亿立方米级大气田和蓬莱、荷包场、龙女寺、潼南、营山等中型气田或含气构造,三级储量约 $1.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$,产气层位主要为须二段、须四段和须六段,气藏类型主要为背

斜-岩性气藏和断背斜-岩性气藏,大多数气藏与岩性圈闭有关,具有含水普遍、储量丰度较低、气-水关系复杂、分布广和面积大等特点。

长期以来,针对上三叠统须家河组的天然气勘探一直把须一段、须三段和须五段作为烃源岩,须二段、须四段和须六段作为目的层段,对须一段、须三段和须五段的关注较少。近期的勘探发现,在以须二段、须四段和须六段为目的层的勘探过程中,须一段、须三段和须五段气显示频繁,且多井测试获工业气流,部分为高产井^[38],例如:剑门102井须三段测试日产气约为 $102 \times 10^4 \text{ m}^3$,目前剑阁地区须三段已经提交了天然气预测储量,展示出较大的勘探潜力。

尽管中国石油在川中地区须家河组陆续发现了多个探明储量千亿立方米级的大气田,川中地区也是须家河组天然气主产区,但是由于这些气藏也难以规模效益开发,中国石油探区须家河组的勘探开发也一度陷入停滞。由此可见,中国石化和中国石油探区面临的问题是一样的,即如何突破须家河组致密砂岩规模有效开发的难题。

2018年以来,随着对四川盆地陆相致密气的重新认识,中国石油西南油气田公司按照“勘探上落实油气区带,控制储量规模,开发集中建产,滚动探明”的思路,重新启动了须家河组的勘探开发工作,取得了良好的效果,在多点、多层系获得了重要突破,展现出良好的势头。2018年部署在安岳地区须家河组底构造高石梯鼻突轴部的岳101-X105井和岳101-X106井两口开发井经酸化后测试获天然气日产量 $81 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $80 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产气流,再次证明了安岳地区须家河组致密砂岩气巨大的开发潜力。2019年和2020年在中台山地区部署的中台H103井和中台108-X1井分别须二段测试获日产量 $80.16 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $126.65 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产工业气流,进一步证明了中台山构造良好的天然气勘探开发前景,为川中致密砂岩气增储上产、多层系立体开发奠定坚实基础。2020年,位于川中地区秋林鼻状构造北西翼的风险探井三台1井在须三段测试获日产天然气 $22.82 \times 10^4 \text{ m}^3$,这是继川中-川西地区致密砂岩气勘探在沙溪庙组打开新局面后,向深层迈进,在须家河组取得的重要新进展,进一步证实川中-川西须家河组是利富气区带,勘探潜力巨大。2021年1月7日,五宝浅20井须家河组测获日产 $16.16 \times 10^4 \text{ m}^3$ 工业气流,进一步验证了川东地区三叠系须家河组致密砂岩含气性,表明川东地区浅层致密砂岩气藏具有纵向上多层系、多砂体的勘探潜力及良好的勘探开发效益。

由上分析可见,基本上是2018年以来,中国石化和中国石油对须家河组致密砂岩气开展了新一轮的勘探开发工作,在多地、多层位打出了一批高产井,尤其是中国石化在川西新场构造带、通南巴区块开始了开发先导试验,推进了开发进程。这一轮取得的油气成果主要得益于以下几点:①对须家河组致密砂岩气规模储量的信心,坚信巨大储量是存在的,只要认识和技术到位就可以动用;②充分认识到裂缝是高产的主要控制因素,应本着“先肥后瘦”的思路,优先动用裂缝区储量;③裂缝成因机制研究和精细刻画技术取得重要进展,基本能刻画清楚裂缝体轮廓;④氮气钻井、大规模体积压裂等工程工艺技术和压裂装备水平的提高;⑤是地质-工程一体化的思路在研究中的应用。上述各种因素共同推动了勘探开发工作。

4 勘探开发理论及技术进展

2018年以来,中国石化开展了新一轮的须家河组致密气砂岩攻关,主要集中成藏富集规律、气藏“甜点”类型及标准、裂缝成因及精细刻画和提高产量工艺技术等方面,取得了重要进展。

4.1 明确了川西坳陷须二段成藏过程及天然气富集规律

川西坳陷新场构造带须二段气藏是典型致密砂岩气藏,也是目前川西坳陷乃至中国石化探区须家河组已发现探明储量规模最大的气藏。因此,本文以新场构造带须二段气藏为例,论述近期在须家河组致密砂岩气成藏富集规律研究方面取得的进展。

4.1.1 厘定了各成藏事件时空序列及成藏过程

重新厘定了重要成藏事件、关键时期及其时空配置关系,建立了须二段气藏主要成藏事件的时空序列(表1)。

研究认为,须二段沉积之后,随着埋深增大,压实和胶结作用使储层的原生孔隙迅速减小,但在此期间燕山早期和中期发生的两次溶蚀作用起到了增孔作用,形成了大量的溶蚀孔隙,一定程度上减缓了储层的致密化进程。随后燕山中期,构造圈闭开始发育,此时储层属于低孔、低渗储层,地层超压也开始快速增加,此时作为主力气源的马鞍塘组-小塘子组烃源岩已进入高-过成熟演化阶段^[39-40],开始大规模生排烃,天然气充注进入高峰期,形成了大面积的低渗岩性-构造气藏(图2a)。

表 1 川西坳陷中段须二段气藏成藏事件时间关系

Table 1 Gas pooling events and timing in T₃x², Western Sichuan Depression

时间轴线	主要事件	形成时间/Ma	埋藏深度/m	埋藏曲线		异常压力曲线	储层孔隙度/%
				浅	深	低	
晚 ↑ 早	晚期调整	燕山晚期—喜马拉雅期 (100~5)	5 000~6 000			4~5 (有效裂缝“甜点区”)	
	差异致密	燕山中期 (140~100)	4 600~6 000			4~5	
	主成藏期	燕山中期 (150~125)	3 600~5 000			8~15	
	晚期溶蚀	燕山中期 (165~140)	2 800~3 800			10~15	
	构造圈闭	燕山中期 (约160)	3 000			20~25	
	早期溶蚀	燕山早期 (约175)	2 600			20~25	

早期形成的低渗岩性—构造气藏在进一步深埋过程中,储层孔隙度进一步降低,并在早白垩世早期完全致密,但是由于储层碎屑组分、粒度和孔隙类型等不同,致密化程度存在差异,导致储层物性呈现较强的非均质性(图 2b),在整体致密背景下发育相对优质储层。

燕山晚期—喜马拉雅期,川西坳陷构造活动不断增强,发生整体抬升,构造形态整体具有继承性,但局部地区的构造形态发生调整并形成了大量的晚期断裂、褶皱和伴生裂缝,对已经致密化的气藏进行调整和改造(图 2c),在裂缝发育部位形成“甜点”,同时气—水关系也在构造起伏、断层破裂、水平层理缝张开中变得复杂。

4.1.2 明确了天然气富集规律

综合分析成藏关键地质要素的形成演化和成藏过程,认为川西坳陷须二段气藏的天然气富集规律可以概括为“早期构造控带、差异致密控储、构造调整控产”。

1) 成藏期古构造控制了天然气富集的范围和规模

新场构造带须二段气藏成藏期次和古构造形成时间的关系研究结果表明,构造圈闭在天然气大规模充注之前已经形成,构造圈闭的形成发育与天然气成藏的时空配置非常有利,成为天然气成藏聚集的有利地带,在烃源岩十分发育的背景下,古构造的位置就是现今天然气富集的位置,古构造位置和规模基本决定了现今天然气富集的区带和范围(图 3,图 4a)。所以在进行勘探研究中,很关键的一点就是在印支期、燕山期和喜马拉雅期剥蚀量恢复的基础上,通过 TSM 盆地模拟软件恢复主成藏期的古构造,圈定出有利古构造范

围,也是现今天然气富集的位置,所以总结为“早期构造控带”。

2) 差异致密作用是相对优质储层形成的关键因素

气藏形成后,随着成岩作用进一步增强,储层进一步致密直至完全致密化,但是由于储层刚性与塑性成份含量不同、粒度大小不同和孔隙类型不同,致密化存在较大的差异性(图 4b,图 5)。通过对储层致密化差异性的研究,认为致密化差异性造成现今储层优劣的关键因素,主要表现在几个方面:①粒间孔隙与粒内溶蚀孔致密化的差异,粒间孔相对于粒内孔更容易被压缩,导致现今储层粒间孔含量很少,一般占比在 1% 以下,但粒内溶蚀孔分布于长石颗粒内,不易被压缩,导致粒内溶孔是现今储层主要储集空间,一般占比 3% 左右;②粒度大小的差异性,粒度越大,抗压实能力越强,这是造成现今储层中粗粒砂岩物性偏好的原因,粒度越粗,残余粒间孔越多,物性越好,孔隙结构越有利;③碎屑组分的差异性,富含石英等刚性颗粒越多,抗压实能力越强;④绿泥石含量的影响,粒间孔中绿泥石包壳的存在,有利于粒间孔的保存。以上多种因素的叠加,造成现今的储层在整体致密背景下发育相对优质储层,总结为“差异致密控储”。

3) 晚期构造调整形成的断缝系统使气水关系复杂,控制裂缝甜点分布

储层完全致密化后,燕山晚期—喜马拉雅期的构造活动形成了多条晚期的南北向断裂和伴生褶皱,其伴生的构造裂缝连通了储层中的孤立孔隙,极大提高了致密化后储层的渗流能力,使得聚集在孤立孔隙中的天然气发生流动、调整和再次聚集,形成了中高产的裂缝型“甜点”。同时地层水沿着南北向的断裂向上

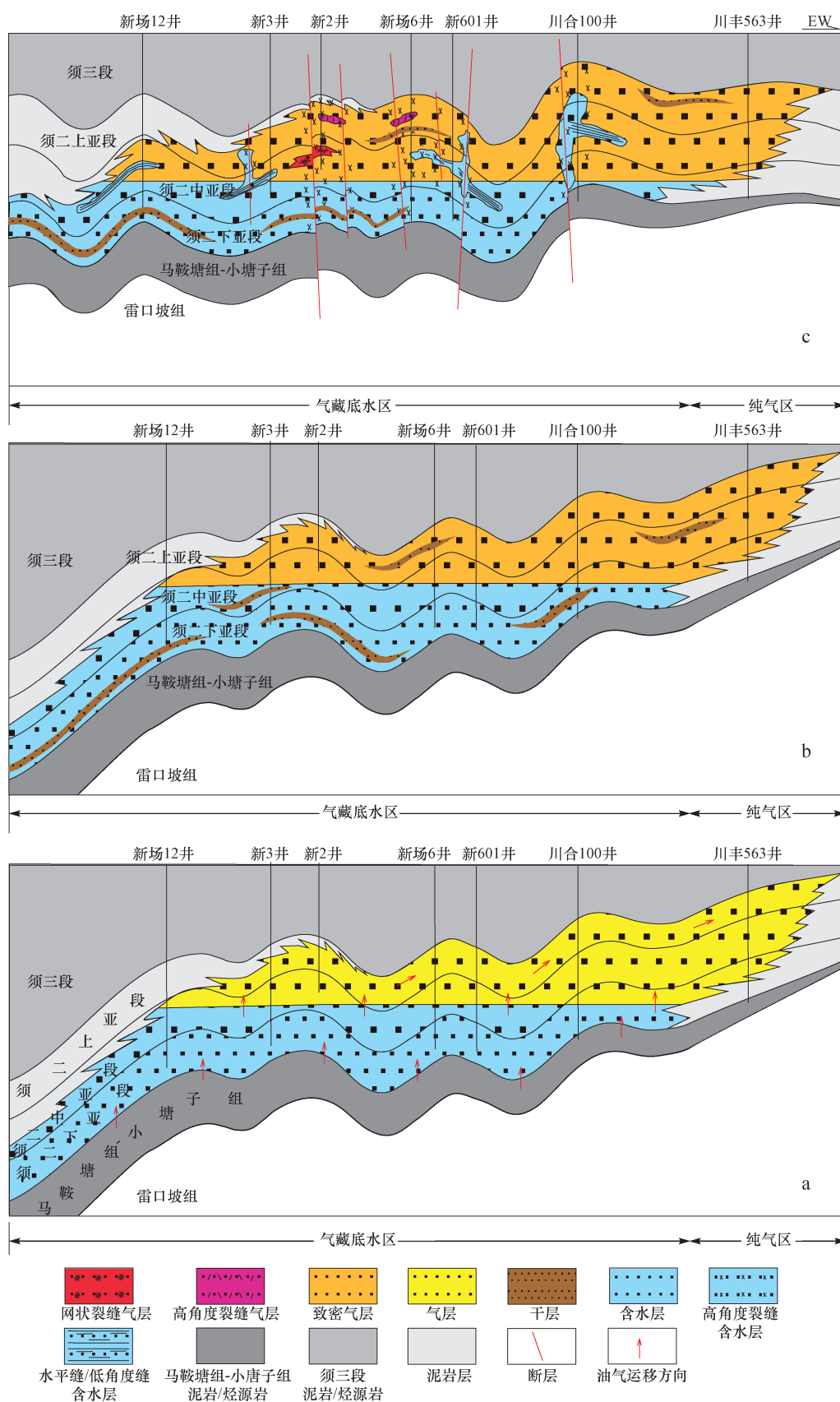


图2 川西坳陷新场构造带须二段气藏成藏演化过程

Fig. 2 Gas pooling evolution of T_3x^2 , Xinchang structural belt, Western Sichuan Depression

a. 主成藏期; b. 差异致密化期; c. 现今

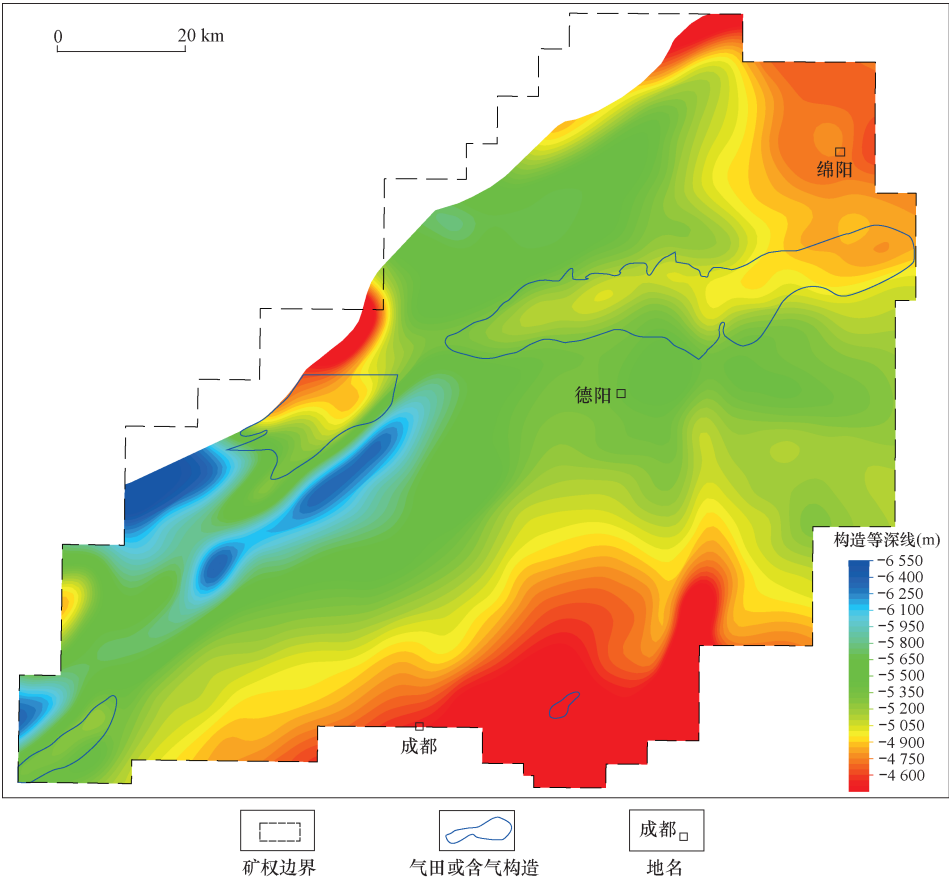


图 3 川西坳陷中段须二段主成藏期古构造与气田分布关系

Fig. 3 Paleostructures in the main forming period of T_3x^2 gas reservoirs and their relationship with gas field distribution in the second member of Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression

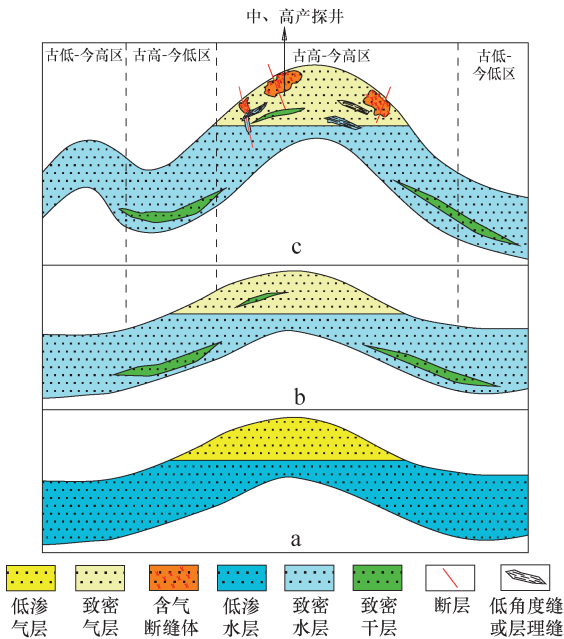


图 4 川西坳陷新场构造带须二段气藏天然气富集动态模式

Fig. 4 Dynamic model of gas enrichment in T_3x^2 , Xinchang structural belt, Western Sichuan Depression
a. 早期构造控带; b. 差异致密控带; c. 构造调整控带

下运移,并在低角度张开层理缝发育的部位发生横向运移,改变了原先气藏的气水关系,使其复杂化(图 4c)。致密化作用使气层致密化的同时也使得水层致密化,现今见到的干层主成藏期是水层,也为现今气水关系的研究增加了难度。根据这些地质特征,总结为“构造调整控产”。

4.2 形成了勘探有利区带及圈闭动态评价技术

基于成藏富集规律的新认识,形成了基于古今构造及形变的有利勘探区带和圈闭的动态评价思路和方法(图 6)。该方法突出以古今构造及形变的有利区评价为基础,以差异致密控储的地质要素评价和控气、控水晚期构造及其伴生裂缝的评价为重点,开展有利区带、圈闭和目标的逐级评价和优选(图 6)。具体评价流程:首先通过主成藏期古构造有利区和储层砂体发育有利区的叠合圈定天然气成藏时的富集有利区带;其次在成藏期的富集有利区内,通过现今构造的有利区、古今构造形变有利区和储层差异致密控储形成的优质储层有利区叠合评价,圈定出现今的天然气富集

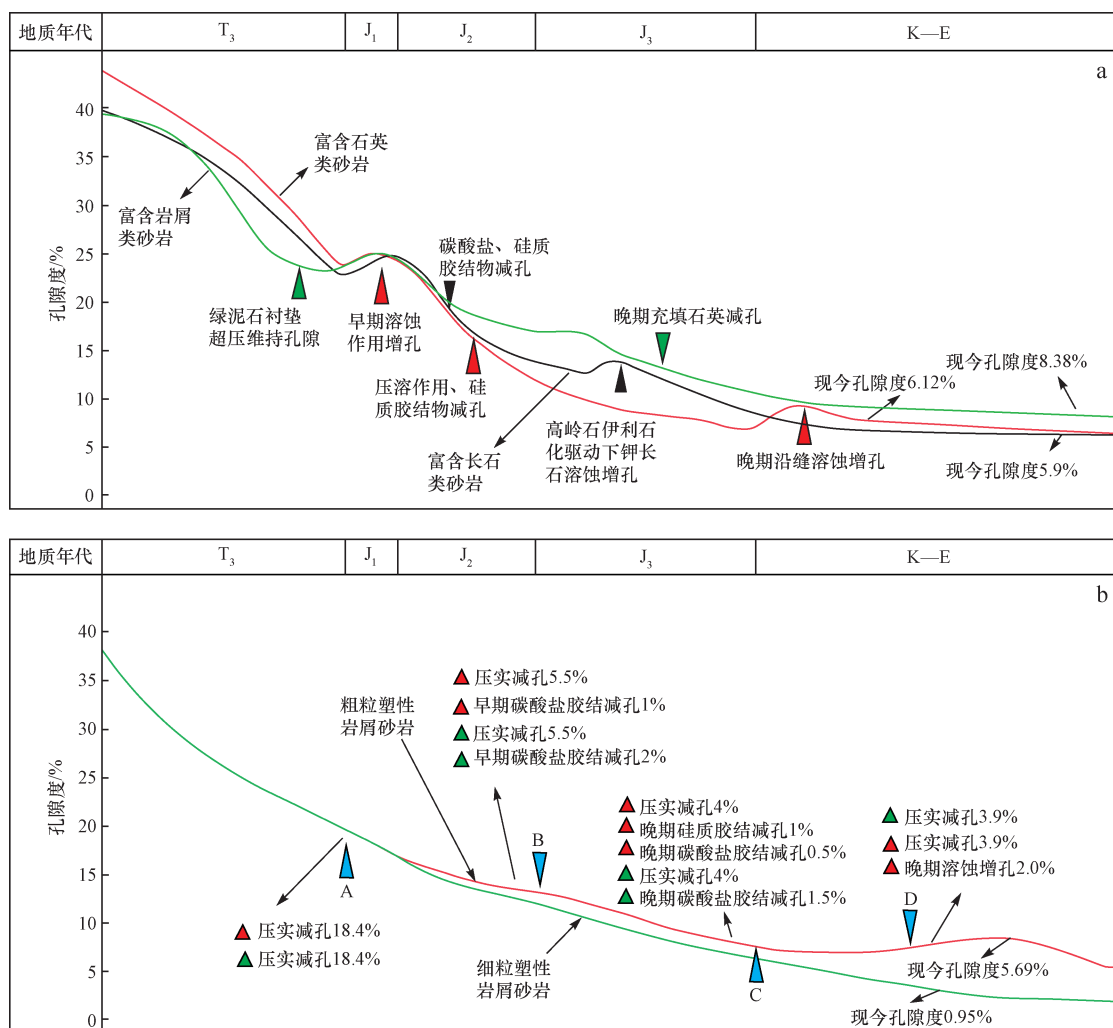


图5 川西坳陷中段须家河组不同类型储层致密化的差异性

Fig. 5 Differentiated tightening process of different types of reservoirs in the Xujiahe Formation, central Western Sichuan Depression

a. 不同组分砂岩; b. 不同粒度砂岩

有利区;最后,在现天然气富集区带内,运用地震多属性融合的技术评价出晚期断裂、褶皱及裂缝体发育有利区。在上述关键地质要素评价基础上,优选出古今构造有利区、优质储层有利区、断褶皱发育有利区叠合发育的部位,即为有利的目标区。通过这种评价,可以确定出裂缝发育含气有利区和基质储层含气有利区。

4.3 建立了致密砂岩气藏“甜点”模式及其评价标准

4.3.1 提出了储层分类新方案

关于致密砂岩储层的分类,前人主要基于储层孔隙度参数、参考渗透率,对致密砂岩储层进行划分。但是致密砂岩储层孔隙度较低,好储层和差储层之间孔隙度差异小,基于孔隙度划分储层,不能很好地表征其差异性。同时由于裂缝的发育,渗透率之间差异大,且渗透率对气井产能影响很大。因此本文在深入研

究川西坳陷须二段气藏储层特征基础上,建立了重点考虑渗透率、兼顾岩相构型的致密砂岩储层分类方法(图7)。

在渗透率标准方面,本文结合研究区岩心分析、测井解释数据,对不同类型储层渗透率下限进行了界定:①通过测井手段,评价了断裂附近构造裂缝发育区储层渗透率和孔隙度,将断裂派生构造缝影响的储层渗透率下限定为 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;②基于岩心数据,分析了沉积层理缝影响的储层渗透率,对沉积成因层理缝影响的储层渗透率下限定为 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;③结合气井产能,对气层孔隙度和渗透率进行分析,明确了有效基质储层渗透率下限为 $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在此基础上,将储层划分出了2类4型(图7):一是裂缝-孔隙型,又可细分为构造缝+层理缝的网状缝型和构造单缝型;另一种类型为孔隙型,可以细分为层理缝型和基质型。

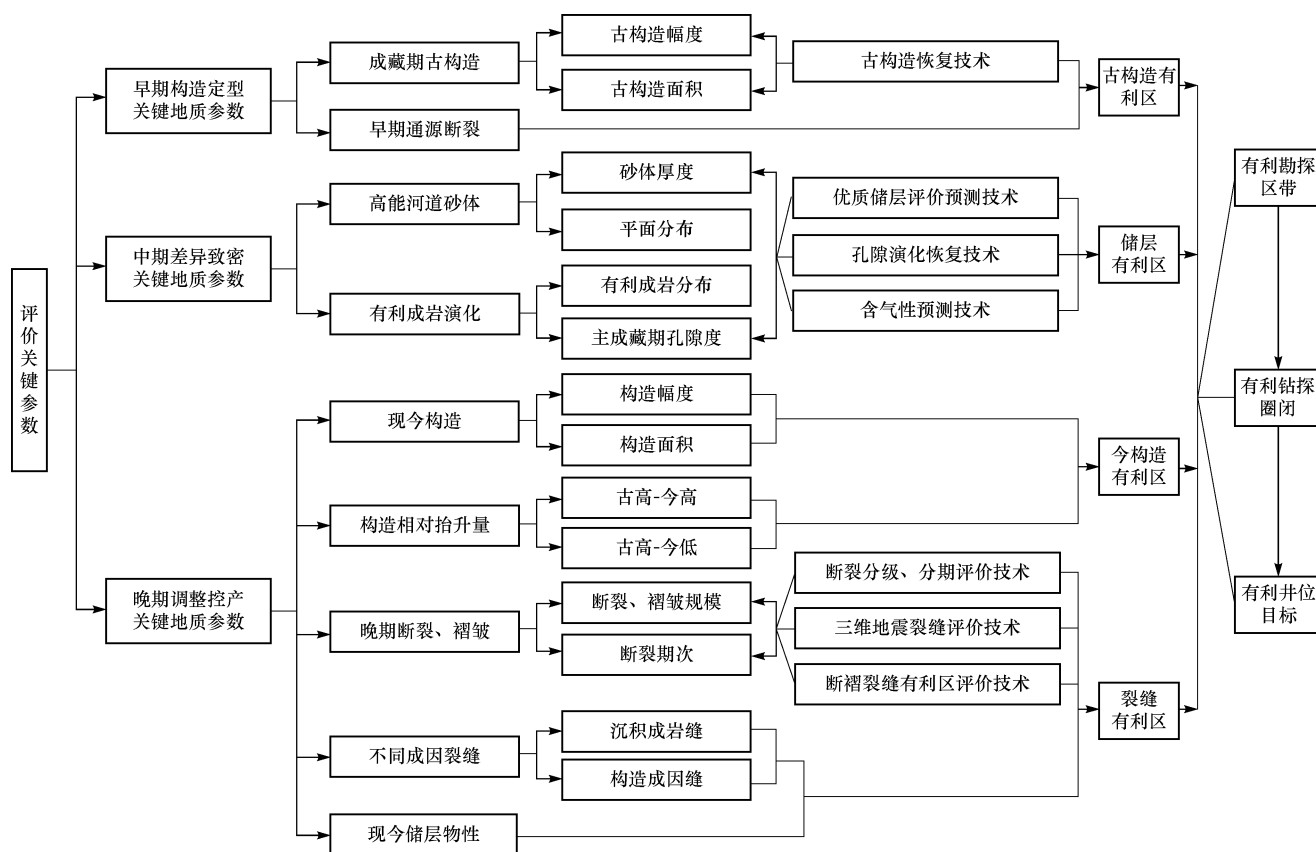


图6 川西坳陷中段须家河组天然气富集区及有利圈闭评价方法

Fig. 6 Evaluation methods for gas enrichment zones and promising traps in the Xujiahe Formation, central Western Sichuan Depression

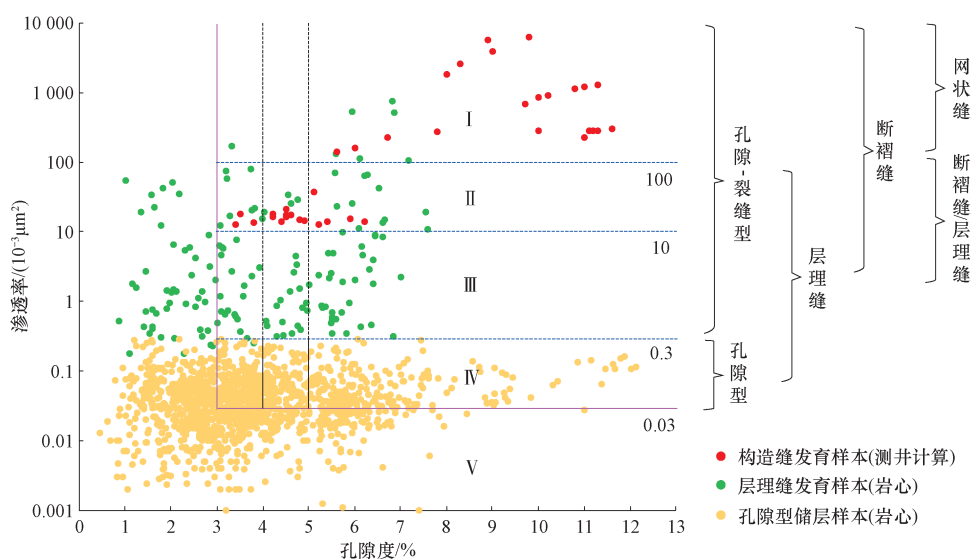


图7 川西坳陷新场构造带须二段储层分类评价

Fig. 7 Classification and evaluation of T_3x^2 reservoirs, Xinchang structural belt, Western Sichuan Depression

4.3.2 建立了气藏“甜点”模式及标准

气藏“甜点”是优质储层、有效裂缝和有利含气叠合的地质体,并在现有工艺技术条件下或进一步攻关

后具有经济勘探开发价值,三者的有机结合可以形成不同类型的甜点。基于致密储层的新分类方案,综合考虑岩石相、物性和裂缝等因素,结合气井产能,新场气田须二段气藏“甜点”可以划分2类4型。

1) 断褶裂缝型甜点

断褶裂缝型“甜点”主要指由断层、褶皱形成的有效裂缝发育区与优质储层有利区、含气有利区叠合发育的地质体,这类甜点在现有工艺技术条件下可有效建产,可进一步分为网状缝型和构造单缝型两个类型。

① 网状缝型

网状缝型甜点岩石相主要以发育层理缝的“千层饼状”、平行层理等中-粗砂岩相为主,孔隙度大于3%,渗透率大于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;在平缝较为发育的基础上,断层、褶皱形成的高角度缝叠加形成网状缝。这类型甜点的气井表现为高产、稳产能力强和累产高的特征,如新2井、新851井和新856井等,目前新2井累产天然气超过 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

② 构造单缝型

构造单缝型甜点岩石相主要以层理缝相对不发育的块状层理、斜层理等中砂岩相为主,孔隙度大于3%,渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;平缝基本不发育,主要以断层与褶皱形成的高角度裂缝为主,纵向延伸的高角度裂缝沟通了有利基质储层。这种类型甜点的气井表现为中高产、稳产和累产较高等特征,如联150井和新601井等,这类井目前累产天然气超过 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2) 基质储渗型甜点

基质储渗型甜点是指储层中断层、褶皱形成的构造裂缝不发育,以孔隙型储层为主的甜点类型,这类甜点在目前技术条件还无法有效建产,需要开展提高产量的新工艺攻关,根据层理缝是否发育又可以划分为层理缝型和孔隙型两个类型。

① 层理缝型

层理缝型甜点指断褶裂缝型甜点之外的一种甜点类型,岩石相以发育“千层饼”状、平行层理中-粗砂岩相为主要特征,构造裂缝不发育,基质储层物性好,孔隙度大于3%,渗透率大于 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储层孔隙结构好,中值半径为 $0.02 \sim 0.04 \mu\text{m}$,层理缝的发育增加了储层渗透性,但以径向渗流为主。这种类型甜点高角度缝发育程度较低,平缝密集发育,目前工艺条件下不能有效建产,需要开展新工艺攻关。

② 孔隙型

孔隙型甜点同样是不受断裂控制的一种甜点类型,岩石相以发育块状层理、斜层理中砂岩相为主要特征,基质储层物性好,孔隙度大于3%,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 $0.02 \mu\text{m}$ 。这种类型甜点构造缝及层理缝不发育,在现有技术条件下不能有效建产,需要开展新工艺攻关。

对于基质储渗型甜点,前期许多人认为基质孔隙中

不含天然气,现有工艺条件下无法压开,不具备开发潜力。但是,通过富集规律研究,在先成藏、后致密的条件下,在含气范围内基质孔隙中应封存大量的天然气,为证实这一观点,专门选择了基质储渗型甜点发育的高庙2井,开展大规模加砂压裂,获得日产 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的稳定产量,证实基质储渗型甜点富含天然气,具有开发潜力。

4.4 初步形成裂缝体精细刻画技术

须家河组储层岩性致密,裂缝可以显著改善储层的孔、渗条件,使其成为油气聚集的有利场所,进而成为具有勘探开发价值的“甜点”。但是,由于裂缝地质尺度和地震资料信息承载尺度之间的巨大差异,地震裂缝预测长期以来一直是勘探开发实践工作中的难题^[43]。除却信息尺度的差异,裂缝预测不能得到有效解决的很大一部分原因在于其相应的地质模式不清晰,预测目标不明朗。实践工作中的裂缝预测不能局限于寻找单条裂缝,而应该寻找有效裂缝相对聚集的地质单元——裂缝体。

裂缝体是指与断层、褶皱伴生的裂缝和岩石孔隙结合所形成的不规则分布的、具有一定规模的、渗透性能好的地质单元。通过研究,在川西新场须二段、通南巴须家河组裂缝体大致可以分为3种类型:断缝型、褶皱缝型和断褶缝融合型。断缝体包含3个组构单元:断层滑动面、滑动破碎带和滑动破碎带外侧的诱导裂缝带。滑动破碎带和诱导裂缝带是中、高角度构造裂缝(倾角 $>30^\circ$)较为发育部位。由滑动破碎带和诱导裂缝带组成的中高角度裂缝发育带分布在断层滑动面两侧约400 m范围内,其中200 m范围之内,特别是逆断层的上盘是目前高产井的主要分布部位。褶皱与其伴生缝最相关的是距枢纽的位置和褶皱的强度(宽高比),距枢纽越近,褶皱强度越强,裂缝越发育。新场须二段气藏研究后认为距枢纽400 m之内、宽高比大于25的部位是裂缝发育有利部位。

在裂缝体地质模式指导下,就可以研究裂缝聚集部位的地震响应特征,进而预测裂缝体的空间分布状况。由裂缝到裂缝体,研究尺度得以放大,使得利用地震资料精细刻画裂缝聚集单元更具可操作性。在实际工作中,首先根据地质、测井和地震信息开展综合研究,建立不同研究区裂缝体地质模式,根据地质模式筛选与裂缝体紧密相关断层、褶皱的敏感地震属性,对断层与褶皱进行描述,在二者描述基础上,筛选与二者有关的裂缝体的敏感属性,对裂缝体进行刻画,最终得到地下断层、褶皱和相关裂缝系统的完整刻画结果,指导勘探开发实践。在新场地区须二段储层裂缝预测中,

应用该方案选择对断层较为敏感的最大似然属性、对褶皱较为敏感的形态指数和曲度属性、对断缝体较为敏感的构造熵属性充分融合,完整地刻画了致密砂岩储层中的规模有效裂缝体。通过该项技术,可较为准确地确定裂缝体的轮廓外形,为评价裂缝体甜点储量及井位部署提供可靠的裂缝信息,在新场须二段气藏,依据此项技术部署的两口开发评价井均获得高产。

4.5 形成致密储层测井精细评价技术

通过储层特征研究,认为优质储层的形成与碎屑粒度、长石含量、石英含量和裂缝等均紧密相关,所以要求测井不但要解释出孔隙度、渗透率和含气饱和度等参数,还要解释储层粒度及矿物成分等信息。

须家河组致密砂岩储层岩性类型多、矿物成分复杂、超低孔渗、孔隙结构复杂、气-水关系复杂和裂缝类型多等特征,造成了利用常规测井资料评价储层及识别流体难度大。针对致密储层地质特点,利用薄片、X衍射、物性、岩电等分析测试资料,开展“四性”关系精细研究,建立了储层多参数测井评价体系。在碎屑组分方面,首次建立了岩石粒度识别模板及包含石英、岩屑、炭屑、泥质及孔隙度的测井评价体积模型;在物性方面,除应用多矿物体积模型获取孔隙度参数外,还建立了基质与裂缝渗透率评价模型;在饱和度方面,建立并优选了变“m”的饱和度评价模型,提高了评价精度;在裂缝评价方面,除利用成像测井获取裂缝参数外,还以“岩心刻度成像、成像刻度常规”的思路,建立了利用常规测井资料评价裂缝参数的方法技术,解决了无成像测井资料情况下的裂缝评价问题。同时,在流体识别方面,针对致密气藏流体信号弱及钻井液侵入裂缝导致电阻率变低造成流体识别难的问题,开展了流体与不同测井响应关系研究,借鉴非常规页岩气的评价思路,确定了利用中子和声波曲线叠合技术,将气层测井响应的微弱信号放大,构建了含气指示曲线,并利用已知井的测试结果,建立了基于电阻率与含气指示曲线的流体识别图版及识别标准,解决了川西须二段裂缝发育的致密储层流体识别难题。

4.6 初步形成氮气钻井提高产量技术

须家河组砂岩储层存在水敏和弱酸敏,储层发育层理缝和构造缝,固相堵塞伤害和基质水锁伤害严重,常规钻井、完井方法易发生储层伤害,储层保护难度大,后期解堵措施有效性差。具有低伤害、零污染的氮气钻井工艺在普光、龙岗、元坝和大邑等地区须家河组试验均获得成功,大邑1井和大邑102井在须家河组低

压地层采用氮气钻井,分别获得无阻流量 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的天然气产能,证实钻井过程中储层保护技术的重要性。

对于地层压力较高的川西新场深层须家河组致密砂岩,中国石化西南油气分公司通过工程技术攻关,解决了氮气钻井过程地层出水、井壁掉块和高压井控风险等问题,形成氮气钻井井身结构优化设计、套管材质优选与强度校核、基于氮气钻井岩屑浓度控制的注入参数优化、井控装备及工艺优化等一系列技术,为氮气钻井的施工设计、方案优化和安全实施提供依据和保障^[44]。根据近几年的攻关成果和认识,针对裂缝发育有利区部署了新8-2井,采用了氮气钻井,获无阻流量 $53 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,目前稳定日产量 $6.6 \times 10^4 \text{ m}^3$,对比邻井产量提升5~35倍以上(图8),钻完井工程费用节约近1200万元,经济效益十分显著。该井的成功应用表明,氮气钻井技术对致密砂岩裂缝型甜点能够有效地保护储层并获得高产。

4.7 提高产量压裂改造技术取得新进展

川西须二段气藏前期储层改造效果差异大,前期大量的压裂实施表现出施工破裂压力高、延伸压力高、施工排量低、施工砂比低、裂缝纵向延伸难度大、施工加砂难度大等难点,尚未形成主体改造工艺。经过近年攻关,初步形成超高压压裂工艺技术、精细分层-体积压裂技术、在线变粘压裂技术等多种工艺方法。在新场气田须二段气藏的开发评价井位实施工作中取得了较好效果。新盛101井断缝型甜点采用套管注入、桥塞封隔实现大规模加砂压裂(图9),压后稳定产量 $15.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,川高561井层理缝型甜点通过高能气体配合酸化近井解堵后,实现稳产 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,高庙2井孔隙型甜点分3段加砂压裂后实现稳产 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。工程实践表明,不同甜点类型储层需要不同的改造技术对策,有针对性的储层改造技术能够有效提高单井产量。

储层改造技术的进步,主要得益于地质-工程一体化的实施^[45]。①通过地质研究,划分出了不同的甜点类型,不同甜点的工程地质特征、改造难度均不同,为开展针对性的改造方案提供了基础;②地质-工程一体化的设计思路,一口井中可能发育不同的甜点,需要区分不同的甜点设计不同的改造方案,一井一策,一段一策;③压裂装备水平的提高;④以页岩气体积压裂工艺技术须家河组压裂中的作用。这些技术和设备水平的提高和提高都为须家河组致密气藏的改造提供了有利条件。

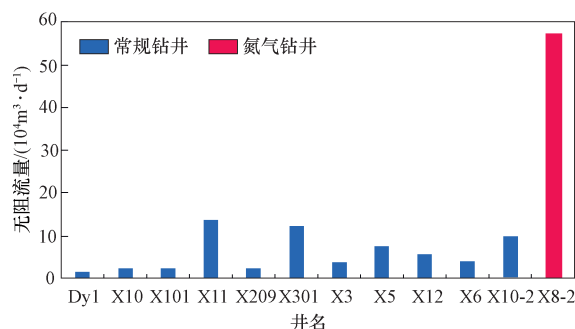


图8 川西坳陷中段氮气钻井与常规钻井产气量对比

Fig. 8 Comparison of gas production between nitrogen drilling and conventional drilling in the central part of Western Sichuan Depression

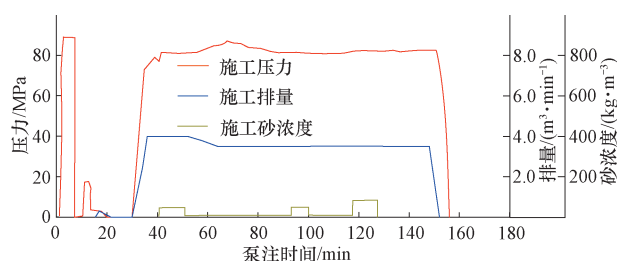


图9 川西坳陷新场气田新盛101井 T_3x^{2-4} 砂组加砂压裂泵注曲线

Fig. 9 Pumping curves of fracturing in T_3x^{2-4} sand unit in Well Xinsheng-101, Xinchang gas field, Western Sichuan Depression

5 下步攻关方向

四川盆地须家河组致密砂岩气经过多轮次的勘探开发,每一轮次的结果相似,均是发现大规模的地质储量,但是无法规模有效建产,导致勘探开发工作停滞。所以,当前须家河组勘探开发工作中的重点是要解决规模有效开发问题。这一轮次的勘探开发工作能否跳出窠臼,勘探开发思路、方向和关键技术研发至关重要。

通过近几年攻关,认为须家河组的勘探开发应坚持以下几个方面:①坚定须家河组发育大规模储量及可规模有效动用的信心;②站在全盆地的角度,进一步深化研究须家河组天然气差异富集规律;③按照裂缝型和基质储渗型两大类,开展精细地质评价,进一步攻关裂缝体内幕精细刻画技术、优质储层精细预测技术和流体预测技术等;④坚持地质-工程一体化,本着“先肥后瘦、先易后难”的原则,优先开发动用裂缝型甜点储量,同时开展基质储渗型储量大幅度提高产量的工程工艺技术攻关,实现整体规模有效开发须家河组致密砂岩气难动用储量。

5.1 勘探开发理论及技术攻关方向

5.1.1 持续深化须家河组天然气差异富集规律

四川盆地须家河组分布范围广,含气层段多,纵向深度分布范围大,经历了多期次的构造活动,各成藏地质要素的形成演化、成藏模式和富集规律在时空上必然存在显著差异。处于不同构造区带的同一含气层系、同一构造区带的不同含气层系,因构造活动强度、物源体系、沉积环境、岩石组分、烃源分布、源-储组合和埋藏演化历史都存在差异,必然导致烃源岩发育演化、储层成岩演化、源-储组合类型、裂缝发育程度、成藏类型、成藏机制和天然气富集规律等方面存在差异。因此后续应在全盆和时空变化的角度深化须家河组天然气成藏模式和富集规律研究。

富集规律研究应着重放在以下几个方面。①储层致密化的差异性研究。前期研究表明致密化差异性不仅与孔隙类型、颗粒大小、刚性成分有关,也与曾经经历的埋藏深度有关。不同地区储层的历史埋藏深度不同,同一地区纵向上不同层位埋藏深度也不同,致密化程度都会有显著差异,造成先成藏后致密、边成藏边致密和先致密后成藏均可能存在。②气藏致密化后封闭程度差异性研究。致密化程度不同造成气藏封存程度不同,即气藏储层孔隙内流体流动性能不同,后期构造、断裂活动会对不同封存程度的气藏改造产生显著的差异,封存程度越好的气藏越易保存,现今的储量规模越大,气水关系相对简单,封存程度越差的气藏越易被破坏,现今表现为气水关系极为复杂。③烃源岩分布及演化的差异性研究。不同地区烃源岩的差异性必然对成藏的差异性有显著影响。④晚期构造对气藏调整的差异性研究。不同构造单元的须家河组气藏,构造断裂演化具有很大的差异性,必然造成其对气藏后期的调整、破坏有显著的差异。总之,须家河组气藏的富集规律研究,应从全盆角度,利用历史的、辩证的思维考虑其在整个时空中的变化及差异性,才有可能全面揭示其富集规律。

5.1.2 进一步攻关裂缝体内幕精细描述技术

近期攻关中,裂缝体轮廓描述技术取得重要进展,但尚不能精细描述裂缝体的内幕,即裂缝体内裂缝更发育的位置、裂缝孔隙度和渗透率、优质储层分布及气水分布等,而在气藏开发中必须了解这些内幕属性,所以应着重开展裂缝体内幕精细描述技术攻关。此方面的研究需要从含裂隙储层的岩石物理建模、裂缝体三维地震波场模拟、地震属性分析及岩石物理参数反演

等多方面入手进行技术攻关。

须家河组致密砂岩储层矿物组分复杂,岩屑等不稳定组分含量较高,岩石低孔、低渗且孔隙结构类型复杂,裂缝、微裂缝类型多样且非均质性强,气水关系复杂,常规岩石物理建模方法不再适用。为此,需要开展含裂隙致密砂岩储层岩石物理建模方法研究,以获取可靠的岩石物理参数,为地震波场模拟、敏感属性分析及岩石物理参数反演提供依据。

地下裂缝体轮廓多样,其内部裂缝类型及分布非均质性很强,不同的裂缝体内幕会引起不同的地震波场响应,目前针对裂缝体开展的地震波场模拟工作多局限于二维,这对于研究裂缝可能造成的各向异性特征而言是非常不充分的。后续研究需要进一步结合具体研究目标,抽提典型模型,开展三维裂缝体模型构建和地震波场模拟,分析裂缝定向排列方式、流体充填情况对裂缝体地震响应的影响,为利用地震属性(地震结构属性、地震各向异性)分析及岩石物理参数反演手段刻画裂缝体内幕提供依据。

5.1.3 持续攻关优质储层精细刻画技术

在深层致密围岩背景下,精细优质储层预测始终是一个未完全解决的难题,下步应持续开展攻关研究。优质储层的岩石物理特征和地震响应异常不明显,如何精细刻画大套砂岩中的优质储层也是后续勘探开发实践中需要解决的问题。微弱的岩石物理及地震响应异常是优质储层精细刻画面临的主要困难。应对此种情况,需要开展地质-地球物理一体化技术攻关,开展基于岩相的优质储层反演技术研究。

从先期研究情况来看,尽管须家河组砂岩巨厚,但是存在“厚砂体、薄储层”的特点,优质储层纵向上零散的夹持于厚层砂体中,虽然累计厚度较大,但平均单层厚度小,并且优质储层往往与特定的岩石相类型关系密切。基于此认识,需要在岩相分析环节加强地质研究,确定与优质储层关系密切的岩相类型,并分析其相应的岩石物理参数组合特征,在岩石物理参数反演的基础上刻画三维空间中有利岩相的分布状况。在有利岩相预测结果基础上,根据特定有利岩相孔隙度分布方面的先验认识,在岩相约束之下,综合地震信息开展储层物性预测,减少单纯依靠微弱的岩石物理特征和地震响应特征进行预测的不确定性。

5.1.4 持续攻关流体预测技术

致密储层精细流体预测也是一个始终未完全解决的技术难题,困扰了地质工作者几十年,下步应持续开

展攻关研究。由于须家河组储层致密,孔隙度低,流体对岩石弹性参数的影响程度低,流体检测困难,传统的振幅和频率域属性检测效果差。根据这种情况,需要构建对流体敏感的岩石物理参数模型,利用高分辨率叠前弹性反演技术,提取高分辨率弹性参数数据体,进行含气性预测。对流体敏感性高的弹性参数需要满足3个要求:①比传统参数(如体积模量、剪切模量)识别流体能力强;②流体的识别门槛异常值易于确定;③降低或者消除深度压实作用对门槛值的干扰。除此之外,开展深度学习含气性预测也非常必要。在对流体较为敏感的弹性参数研究基础上,通过深度学习研究,和其他地震属性相结合,以进一步减少预测的多解性,形成多参数组合的智能化含气性预测技术。

5.1.5 强化钻完井及储层改造提产技术攻关

大幅度提高产量的钻完井工艺技术是解放须家河组致密难动用储量的关键“钥匙”之一,始终是攻关的重点。前期大量研究和生产实践表明,针对性的钻完井和储层改造技术能够有效提高单井的产能。从工程技术适应性来分析,坚持地质-工程一体化思路指导的工程技术研究是须家河组气藏大规模开发动用的必由之路。需要持续攻关的大幅度提高单井产量的工艺技术包括:①氮气钻完井技术,特别是井壁稳定性评价、钻井和井筒安全、配套的测试工艺及投产完井技术等攻关;②层理缝发育储层需要继续攻关低伤害、大排量、高砂比和纵切割的压裂技术方法;③基质孔隙型储层需要从优化体积压裂规模、降低超高压施工成本和地应力区优选等方面开展攻关;④开展水平井提高产量试验;⑤开展工程甜点研究,建立地质-工程双甜点标准,同时开展压裂动态监测方法、压后评价方法和控缝控水设计研究。

5.1.6 深入开展开发政策优化技术研究

须家河组致密气藏渗流特征与常规气藏差异较大^[46],目前针对这类气藏的开发政策优化主要面临3个关键问题:①裂缝-基质供排气机理、超致密孔隙性储层非达西渗流、储层-裂缝应力敏感及气-水两相渗流认识不清;②气层纵向多层叠置,在多层合采下不同甜点储层对产能的贡献认识不清;③不规则形状裂缝体内单井动用储量精确计算方法不成熟。上述关键问题严重制约气井井控储量评价及开发指标预测,造成效益开发技术政策难以制定。因此,亟需攻关基质-裂缝气-水两相渗流实验方法,开展非线性渗流、两相渗流及多层合采实验,揭示气藏渗流机理,在此基

础上开展开发层系划分,形成考虑非线性渗流及层间干扰的双重介质数值模拟方法,为井型井网优化、合理产量及采气速度等开发技术政策研究提供技术支撑。

须家河组气藏主要存在断褶裂缝型及基质储渗型两类“甜点”,不同“甜点”类型渗流特征及开采规律差别大,需要探索适应不同甜点类型地质特征、效益开发的井网井型优化方法及储层改造配套工艺。由于气藏气水分布复杂,气井出水对气井产量及采收率影响大,需要攻关不同类型甜点产水早期预警、整体控水及控-堵-排一体的开发对策。不同类型甜点开发层系、井网井型及压裂参数组合对开发指标影响较大,需要研发多参数开发技术政策优化技术,以提高气藏开发效益、储量动用程度及采收率,确保气藏效益开发。

5.2 下步勘探开发重点攻关类型及地区

综合近期攻关成果,认为中国石化探区须家河组致密砂岩勘探开发工作中,一方面要坚定资源信心和可实现规模有效开发的信心;另一方面应优先解决有效开发的问题,建立分类动用、地质-工程一体化的攻关研究思路。通过近几年的攻关,基本形成了裂缝体储量可以有效动用,基质储渗体储量具有一定的产能,通过新工艺攻关,能进一步提高产量的统一认识,为推动须家河组致密砂岩难动用储量的开发奠定了思路基础。

5.2.1 优先动用裂缝体储量,重点在川西坳陷、元坝地区、通南巴和普光地区开展评价研究

在须家河组致密砂岩气勘探开发中,要建立分类动用的思想,即要分裂缝体储量和基质储渗体储量两大类型进行地质评价和工艺研究,本着“先肥后瘦、先易后难”的原则,在开发中应优先开展裂缝体甜点储量的有效建产。前期有人认为这类储量规模不大,不具备开发价值。通过近年研究,认为在中国石化探区中这类储量规模不小,一方面在川西坳陷新场构造带的研究中,通过储量评价,裂缝体储量占总储量规模约18%,在川西新场-合兴场-高庙地区裂缝体储量约 $600 \times 10^8 \text{ m}^3$,扩展到丰谷、中江-回龙、大邑、鸭子河及梓潼凹陷等地区,裂缝体储量应该更多,估计在 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上。另一方面,通过初步研究,晚期断裂与多期褶皱在川东北通南巴区块、普光区块、元坝区块东部及阆中区块均十分发育,这些区块裂缝体储量占比会更高。近几年在通南巴区块多口井试获高产气流或钻遇好的气显示,也证明了裂缝体储量的存在,估计上述几个区块裂缝体储量规模较大,推测应在 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上。所以,应优先开展中国石化探区内裂缝

体储量勘探开发综合评价工作,重点针对川西坳陷、川东北通南巴区块、普光区块、元坝区块东部开展裂缝体储量评价,开展关键技术攻关研究,优先实现这些区块裂缝体甜点的规模有效建产。目前正在川西新场地区须二段气藏开展裂缝体储量年产量 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的开发先导试验,计划“十四五”期间进行规模建产,这些开发的新进展充分展示了须家河组裂缝体甜点储量巨大的开发价值。

5.2.2 大力开展基质储渗体提高产量工程工艺攻关,重点在川西坳陷和元坝地区开展研究

在重点进行裂缝体甜点储量的研究时,也应重视须家河组基质储渗体储量的攻关研究,大部分储量赋存于此类储层中。这种储量目前主要问题是单井产量低、累产低和提产工程工艺技术不成熟,达不到开发经济界限,但近两年借鉴页岩气大规模体积压裂思路,在新场地区须二段气藏高庙2井和元坝地区须三段气藏元坝6井两口老井开展大规模压裂,取得了较高产的稳定工业气流,说明工艺技术进步可以较大规模的提高基质储渗体储量的单井产量,下步关键要做好优质储层评价和提高产量的钻完井工艺研究。目前,在新场须二段气藏正准备部署一口水平井,探索水平井大规模压裂的提产效果。针对这类储量,建议主要在川西坳陷须二段、须三段气藏和元坝地区须家河组气藏中开展提高产量工程工艺攻关研究。

5.2.3 地质-工程一体化是须家河组致密砂岩气藏高效勘探开发的必由之路

须家河组致密砂岩气藏是典型的非常规气藏,其勘探开发思想、方向及关键技术都迥异于常规气藏,其勘探开发行为要遵循其独特的地质特征,在勘探开发中必须坚持地质-工程一体化:①基质储渗体储量本身无自然产能或较低,必须通过工程工艺大幅度提高其产量,释放其产能;②裂缝体储量虽然现有工艺条件下可有效建产,但其极易受到污染,氮气钻井等技术未完全成熟,尤其是完井提产技术,同时裂缝体储量下部一般都含水,在开发中都必须着重考虑工程因素,如何保护气层、如何大幅度提高产量、如何避水及如何控制压裂缝长和缝高等,都必须开展地质-工程一体化研究和设计。

总之,通过近几年的攻关,看到了须家河组规模有效开发的广阔前景,在开发工作的带动下,勘探一定会发现更多的储量,中国石化探区须家河组致密砂岩气必将迎来一个大发展时期。

6 结论

1) 四川盆地中国石化探区须家河组致密砂岩气的勘探取得了丰硕的成果,多地区、多层段获得了突破,先后发现了多个大、中型气田,累计提交天然气三级储量超过 $1.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$,展示出巨大的勘探开发潜力。

2) 通过近期川西坳陷须家河组气藏成藏富集规律的深化研究,建立了关键成藏事件时空序列,明确了天然气“早期构造控带、差异致密控储、构造调整控产”的富集规律,形成了基于古今构造及形变的有利勘探区带和圈闭动态评价思路和方法。

3) 通过强化开发地质基础理论研究和生产实践,建立了断褶裂缝型和基质储渗型2类4型气藏“甜点”模式和评价标准,有效指导了新场须二段气藏的开发评价,取得了良好效果。

4) 通过技术攻关和地质-工程一体化实践,形成了须家河组致密砂岩断褶裂缝体刻画技术和储层测井精细评价技术,针对不同“甜点”类型提高产量的氮气钻井和压裂改造技术取得新进展,为须家河组致密砂岩气的勘探开发提供了重要的技术支撑和保障。

5) 须家河组致密砂岩气下一步的勘探开发工作需要从全盆地角度持续深化差异富集规律研究,持续攻关断褶裂缝体内幕精细刻画、优质储层精细刻画和流体预测等关键技术,在地质-工程一体化思路下强化钻完井及储层改造提产技术和开发政策优化技术等攻关研究,实现整体规模有效动用须家河组致密砂岩气难动用储量。

参 考 文 献

- [1] 杨克明,庞雄奇. 致密砂岩气藏形成机制与预测方法——以川西坳陷为例[M]. 北京:科学出版社,2012:i-ii.
Yang Keming, Pang Xiongqi. The formation mechanism and prediction of tight sandstone gas reservoirs: A case study from western Sichuan Depression[M]. Beijing: Science Press, 2012: i-ii.
- [2] 谢刚平,朱宏权,叶素娟,等. 四川盆地叠覆型致密砂岩气区地质特征与评价方法[M]. 北京:科学出版社,2018.
Xie Gangping, Zhu Hongquan, Ye Sujuan, et al. The geological characteristics and evaluation methods of tight sandstone gas reservoirs in west Sichuan Basin[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [3] 杨克明,朱宏权,叶军,等. 川西致密砂岩气藏地质特征[M]. 北京:科学出版社,2012.
Yang Keming, Zhu Hongquan, Ye Jun, et al. The geological characteristics of tight sandstone gas reservoirs in west Sichuan Basin[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [4] 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 features of large gas play fairways in the Upper Triassic Xujiahe Formation of the Sichuan Foreland Basin and evaluation of favorable exploration zones[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(3): 15-21.
- [5] 席胜利,刘新社,孟培龙. 鄂尔多斯盆地大气区的勘探实践与前瞻[J]. 天然气工业,2015,35(8):1-9.
Xi Shengli, Liu Xinshe, Meng Peilong. Exploration practices and prospect of Upper Paleozoic giant gas fields in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(8): 1-9.
- [6] 王屿涛,吕纯刚,姚爱国,等. 准噶尔盆地致密砂岩气资源潜力及勘探前景[J]. 天然气地球科学,2015,26(5):855-860.
Wang Yutao, Lyu Chungang, Yao Aiguo, et al. Tight sandstone gas resource potential and exploration prospect in the Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(5): 855-860.
- [7] 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 of tight sand gas accumulation theory and favorable exploration zones in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(2): 199-210.
- [8] 卞从胜,王红军,汪泽成,等. 四川盆地致密砂岩气藏勘探现状与资源潜力评价[J]. 中国工程科学,2012,14(7):74-80.
Bian Congsheng, Wang Hongjun, Wang Zecheng, et al. Exploration status and potential evaluation of tight gas in Sichuan Basin[J]. Engineering Sciences, 2012, 14(7): 74-80.
- [9] 郑志红,李登华,白森舒,等. 四川盆地天然气资源潜力[J]. 中国石油勘探,2017,22(3):12-19.
Zheng Zhihong, Li Denghua, Bai Senshu, et al. Resource potentials of natural gas in Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(3): 12-19.
- [10] 戴金星. 中国煤成大气田及气源[M]. 北京:科学出版社,2014:115-211.
Dai Jinxing. Large size coal-derived gas fields and their sources in China[M]. Beijing: Science Press, 2014: 115-211.
- [11] 赵正望,李楠,刘敏,等. 四川盆地须家河组致密气藏天然气富集高产成因[J]. 天然气勘探与开发,2019,42(2):39-47.
Zhao Zhengwang, Li Nan, Liu Min, et al. Origin of gas accumulation and high yield in tight gas reservoirs of Xujiahe Formation, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2019, 42(2): 39-47.
- [12] 赵正望,唐大海,王小娟,等. 致密砂岩气藏天然气富集高产主控因素探讨——以四川盆地须家河组为例[J]. 天然气地球科学,2019,30(7):963-972.
Zhao Zhengwang, Tang Dahai, Wang Xiaojuan, et al. Discussion on main controlling factors of natural gas enrichment and high yield in tight sandstone gas reservoirs: Case study of Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(7): 963-972.
- [13] 李伟,邹才能,杨金利,等. 四川盆地上三叠统须家河组气藏类型与富集高产主控因素[J]. 沉积学报,2010,28(5):1037-1045.
Li Wei, Zou Caineng, Yang Jinli, et al. Types and controlling factors of accumulation and high productivity in the Upper Triassic Xujiahe Formation gas reservoirs, Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(5): 1037-1045.
- [14] 曾青高,龚昌明,李俊良,等. 川中地区须家河组气藏勘探成果及

- 潜力分析[J]. 天然气工业, 2009, 29(6): 13-18.
- Zeng Qinggao, Gong Changming, Li Junliang, et al. Exploration achievements and potential analysis of gas reservoirs in the Xujiahe formation, central Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(6): 13-18.
- [15] 刘殊, 任兴国, 姚声贤, 等. 四川盆地上三叠统须家河组气藏分布与构造体系的关系[J]. 天然气工业, 2018, 38(1): 1-14.
- Liu Shu, Ren Xingguo, Yao Shengxian, et al. Relationship between gas reservoir distribution and structural system of Upper Triassic Xujiahe Formation in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(1): 1-14.
- [16] 钟兵, 杨洪志, 徐伟, 等. 川中地区上三叠统须家河组气藏开发有利区评价与优选技术[J]. 天然气工业, 2012, 32(3): 62-64.
- Zhong Bing, Yang Hongzhi, Xu Wei, et al. Assessment and optimization of the gas play fairways in the Upper Triassic Xujiahe Formation of the central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(3): 62-64.
- [17] 唐大海, 王小娟, 陈双玲, 等. 四川盆地中台山地区须家河组致密砂岩气藏富集高产主控因素[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(11): 1575-1584.
- Tang Dahai, Wang Xiaojuan, Chen Shuangling, et al. Analysis about the main controlling and high output in Xujiahe Formation of Zhongtaishan area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(11): 1575-1584.
- [18] 范增辉, 欧阳诚, 李乐, 等. 川西凹陷中段须家河组成藏条件及勘探有利区分析[J]. 重庆科技学院学报, 2014, 16(1): 26-29.
- Fan Zenghui, Ou Yangcheng, Li Le, et al. Main factors controlling hydrocarbon accumulation conditions of the Xujiahe Formation in middle segment of western Sichuan Basin[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 16(1): 26-29.
- [19] 陈涛涛, 贾爱林, 何东博, 等. 川中地区须家河组致密砂岩气藏气水分布形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 218-223.
- Chen Taotao, Jia Ailin, He Dongbo, et al. Mechanisms of gas-water distribution in tight sandstone gas reservoirs of Xujiahe Formation, central Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 218-223.
- [20] 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.
- [21] 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(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.
- [22] 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.
- [23] 程洪亮, 李昌峰, 卢娟, 等. 四川盆地元坝气田须家河组三段气藏致密钙屑砂岩储层发育机理[J]. 世界地质, 2019, 38(1): 175-183.
- Cheng Hongliang, Li Changfeng, Lu Juan, et al. Development mechanism of tight calcarenaceous sandstone reservoir of the third member of Xujiahe Formation in Yuanba gas field of Sichuan Basin[J]. Global Geology, 2019, 38(1): 175-183.
- [24] 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 the 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.
- [25] 王雪柯, 李伟, 张本健, 等. 四川盆地西北部上三叠统须三段储层超致密与气藏超压成因[J]. 天然气工业, 2019, 39(11): 25-35.
- Wang Xueke, Li Wei, Zhang Benjian, et al. The formation mechanisms of ultra-tight and overpressured gas reservoir in the third Member of Upper Triassic Xujiahe Formation in the northwestern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(11): 25-35.
- [26] 卞从胜, 王红军, 汪泽成, 等. 四川盆地川中地区须家河组天然气大面积成藏的主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 548-555.
- Bian Congsheng, Wang Hongjun, Wang Zecheng, et al. Controlling factors for massive accumulation of natural gas in the Xujiahe Formation in central Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 548-555.
- [27] 谢刚平, 叶素娟, 田苗, 等. 川西凹陷致密砂岩气藏勘探开发实践新认识[J]. 天然气工业, 2014, 34(1): 44-53.
- Xie Gangping, Ye Sujuan, Tian Miao, et al. New understandings of exploration and development practices in tight sandstone gas reservoirs in Western Sichuan Depression[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(1): 44-53.
- [28] 段永明, 张岩, 刘成川, 等. 川西致密砂岩气藏开发实践与认识[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(7): 1352-1359.
- Duan Yongming, Zhang Yan, Liu Chengchuan, et al. Practice and understanding of tight sand gas reservoir development in western Sichuan, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(7): 1352-1359.
- [29] 龙胜祥, 刘娅昭, 许华明, 等. 四川盆地中国石化探区天然气勘探开发领域与技术攻关方向[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(9): 1195-1203.
- Long Shengxiang, Liu Yazhao, Xu Huaming, et al. Exploration domains and technological breakthrough directions of natural gas in Sinopec exploratory areas, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(9): 1195-1203.
- [30] 胡东风, 王良军, 黄仁春, 等. 四川盆地中国石化探区油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(3): 283-290.
- Hu Dongfeng, Wang Liangjun, Huang Renchun, et al. Petroleum exploration history and enlightenment in Sichuan Basin: A case study on

- Sinopec exploration areas[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(3): 283–290.
- [31] 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: 6–15.
- Du Jinhu, Xu Chunhui, Wei Guoqi, et al. Large lithologic gas provinces exploration of Xujiahe Formation in Sichuan Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 6–15.
- [32] 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. Exploration prospect and gas reservoir characteristics of Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(6): 40–44.
- [33] Zhang Jincai, Zheng Herong, Wang Guoli, et al. In-situ stresses, abnormal pore pressures and their impacts on the Triassic Xujiahe reservoirs in tectonically active western Sichuan basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 122: 104708.
- [34] 唐自成, 钟大康, 王威, 等. 川东北元坝地区须家河组三段钙屑砂岩孔隙类型及地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 1115–1125.
- Tang Zicheng, Zhong Dakang, Wang Wei, et al. Pore types and geological significance of calcarenaceous sandstones in the 3rd member of Xujiahe Formation in Yuanba area, Northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 1115–1125.
- [35] 何治亮, 聂海宽, 蒋廷学. 四川盆地深层页岩气规模有效开发面临的挑战与对策[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(2): 135–145.
- He Zhiliang, Nie Haikuan, Jiang Tingxue. Challenges and countermeasures of effective development with large scale of deep shale gas in Sichuan Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(2): 135–145.
- [36] 左如斯, 杨威, 王乾右, 等. 川西坳陷须家河组陆相页岩岩相控制下的微观储集特征[J]. 特种油气藏, 2019, 26(6): 22–28.
- Zuo Rusi, Yang Wei, Wang Qianyou, et al. Lithofacies-control microscopic reservoir characterization of the continental shale in the Xujiahe Formation of western Sichuan Depression[J]. Special oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(6): 22–28.
- [37] 陶亮, 郭建春, 李凌铎, 等. 致密油藏体积压裂水平井产能评价新方法[J]. 特种油气藏, 2019, 26(3): 89–93.
- Tao Liang, Guo Jianchun, Li Lingze et al. New productivity evaluation of horizontal well with volume-fracturing in tight oil reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(3): 89–93.
- [38] 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.
- Lyu 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.
- [39] 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.
- [40] 江兴歌, 曾华盛, 朱建辉, 等. 川西坳陷中部上三叠统烃源岩动态演化模拟[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 545–551.
- Jiang Xingge, Zeng Huasheng, Zhu Jianhui, et al. Dynamic evolution simulation of the Upper Triassic source rocks in central part of western Sichuan Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 545–551.
- [41] 林小兵, 田景春, 刘莉萍, 等. 四川盆地川西坳陷须家河组硅质碎屑颗粒溶蚀作用及机理[J]. 石油实验地质, 2019, 41(3): 404–410.
- Lin Xiaobing, Tian Jingchun, Liu Liping, et al. Dissolution mechanism of siliciclastic particles in Xujiahe Formation, West Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(3): 404–410.
- [42] 杨威, 谢武仁, 俞俊杰, 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, 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.
- [43] 吴朝容. 致密砂岩气藏裂缝性储层预测方法—以川西坳陷新场气田须二段为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2004.
- Wu Chaorong. The prediction of fractured gas reservoirs of tight clastic rock—the 2nd member of Xujiahe Formation of Xinchang gas field as case[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2004.
- [44] 龙刚, 朱化蜀, 王希勇, 等. 川西低渗气藏气体钻井提速潜力评价龙刚[J]. 钻采工艺, 2011, 34(4): 25–27.
- Long Gang, Zhu Huashu, Wang Xiyong, et al. Evaluation of gas drilling potential ROP in Chuanxi low permeability gas reservoirs[J]. Drilling & Production Technology, 2011, 34(4): 25–27.
- [45] 孙焕泉, 周德华, 赵培荣, 等. 中国石化地质工程一体化发展方向[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(3): 269–280.
- Sun Huanquan, Zhou Dehua, Zhao Peirong, et al. Geology-engineering integration development direction of Sinopec[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 269–280.
- [46] 蔡君碧, 占天慧, 邓庄, 等. “动态法”产能方程在高压气藏开发中的应用: 以四川盆地安岳气田为例[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(5): 72–79.
- Cai Junjun, Zhan Tianhui, Deng Zhuang, et al. Application of the productivity equation dynamic method based on in high-pressure gas reservoir development: Taking Anyue Gas Field in Sichuan Basin as an example[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(5): 72–79.