

文章编号: 0253-2697(2023)06-0917-16 DOI:10.7623/syxb202306003

四川盆地天府气田沙溪庙组大型致密砂岩气藏 形成条件及勘探开发关键技术

杨雨¹ 谢继容¹ 曹正林^{2,3} 文龙² 王小娟² 肖尧⁴ 杨建⁵ 唐青松¹ 唐大海⁶
李明秋² 关旭² 曾青高⁴ 陈伟华⁵ 陈康² 肖红林⁴

(1. 中国石油西南油气田公司 四川成都 610051; 2. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院 四川成都 610051;
3. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 4. 中国石油西南油气田公司致密油气勘探开发项目部 四川成都 610041;
5. 中国石油西南油气田公司工程技术研究院 四川成都 610017; 6. 中国石油西南油气田公司川西北气矿 四川江油 621741)

摘要:四川盆地天府气田于2019年和2021年分别在沙溪庙组二段(沙二段)和沙溪庙组一段(沙一段)发现大型致密砂岩气藏;2022年,气藏探明储量为 $1349 \times 10^8 \text{ m}^3$,产量为 $15.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。基于岩心和地球化学分析等资料,对天府气田沙溪庙组的沉积储层特征、天然气地球化学特征、气藏类型及气藏形成条件开展了研究。研究结果认为:天府气田沙一段为浅水三角洲—湖泊相沉积,沙二段为河流相沉积;储层的岩性以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主,储集空间主要为残余粒间孔,其次为长石溶孔;天然气的气源主要来自三叠系须家河组;沙一段和沙二段1亚段6砂组、8砂组、9砂组的天然气以煤型气为主,少量为混合气,而沙二段1亚段7砂组具有混合气和油型气的特征;天府气田沙溪庙组气藏整体为大型岩性气藏,具有“双源多期充注、断砂复合输导、环源规模聚集、河道差异富集”的成藏规律。通过研究天府气田沙溪庙组大型致密砂岩气藏,配套形成了一系列勘探开发关键技术:①高精度等时地层格架约束下的精准选层技术;②以三维地震为核心的砂体精细刻画及靶体精准预测技术;③以水平井+体积压裂为核心的提速提产配套技术;④以快速快投、优化简化为目的的地面配套集输处理;⑤以规模效益开发为核心的一体化技术经济模板。天府气田的发现提升了中国致密砂岩气的勘探开发水平,丰富了致密砂岩气的勘探方法,有效推动了四川盆地致密砂岩气的勘探开发进程。

关键词:四川盆地;沙溪庙组;致密砂岩;成藏条件;勘探开发技术

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Forming conditions and key technologies for exploration and development of large tight sandstone gas reservoirs in Shaximiao Formation, Tianfu gas field of Sichuan Basin

Yang Yu¹ Xie Jirong¹ Cao Zhenglin^{2,3} Wen Long² Wang Xiaojuan² Xiao Yao⁴ Yang Jian⁵ Tang Qingsong¹
Tang Dahai⁶ Li Mingqiu² Guan Xu² Zeng Qinggao⁴ Chen Weihua⁵ Chen Kang² Xiao Honglin⁴

(1. PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Sichuan Chengdu 610051, China; 2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Sichuan Chengdu 610051, China; 3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 4. Tight Oil and Gas Exploration and Development Project Department, PetroChina Southwest Oil and Gas Filed Company, Sichuan Chengdu 610041, China; 5. Engineering and Technology Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Sichuan Chengdu 610017, China; 6. Northwest Sichuan Division, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Sichuan Jiangyou 621741, China)

Abstract: Large tight sandstone gas reservoirs in Tianfu gas field of Sichuan Basin were discovered in the Member 2 of Shaximiao Formation in 2019 and the Member 1 of Shaximiao Formation in 2021, respectively. The proven reserves are $1349 \times 10^8 \text{ m}^3$ and the production is $15.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ in 2022. Based on the core and geochemical analysis data, the paper investigates the sedimentary reservoir characteristics, natural gas geochemical characteristics, gas reservoir types and gas reservoir formation conditions of Shaximiao Formation in Tianfu gas field. In the study area, shallow-water deltaic and lacustrine deposits are found in the Member 1 of Shaximiao Formation, while fluvial deposits are found in the Member 2 of Shaximiao Formation. The lithologies of the reservoir are mainly composed of feldspathic litharenite and lithic arkose, and the reservoir spaces are mainly occupied by residual intergranular pores, followed by feldspar dissolution pores. The natural gas source of reservoir is mainly from the Triassic Xujiahe Formation. The natural gas in the Member 1 of Shaximiao Formation and the 6th, 8th and 9th sand groups of 1st submember of Member 2 of Shaximiao Formation is dominated by coal-type gas with a small amount of mixed gas, while the gas in the 7th sand group of 1st submember of Member 2 of Shaximiao For-

基金项目:国家科技重大专项“四川盆地二叠系—中三叠统大型气田富集规律与目标评价”(2016ZX05007-004)和中国石油天然气股份有限公司科技重大专项“西南油气田天然气上产300亿立方米关键技术研究与应用”(2016E-06)资助。

第一作者及通信作者:杨雨,男,1971年11月生,1996年获成都理工大学硕士学位,现为中国石油西南油气田公司高级工程师、四川省石油学会常务副理事长,主要从事石油与天然气地质勘探研究与技术管理工作。Email:yangyu@petrochina.com.cn

mation is characterized by the occurrence of both mixed gas and oil-type gas. The gas reservoir in Shaximiao Formation of Tianfu gas field is a large lithologic gas reservoir with accumulation regularity of dual-source and multi-phase charging, fault and sandbody transport, accumulation around the source, and differential enrichment at the channel. A series of key exploration and development technologies have been developed by tackling the key exploitation problems of large tight sandstone gas reservoirs in Shaximiao Formation of Tianfu gas field, i. e., (1) technology of precisely choosing layers under the constraint of high-precision isochronous stratigraphic framework, (2) technology of finely characterizing sand bodies and precisely predicting target based on 3D seismic survey, (3) supporting technology to accelerate exploration and production based on horizontal well and volume fracturing, (4) processing technology of exploitation and transportation on the ground for the purpose of fast construction, investment, optimization and simplification, (5) integrated technical and economic template for scale and cost-effective development. The discovery of Tianfu gas field has improved the exploration and development of tight sandstone gas in China, and enriched the exploration methods of tight sandstone gas, and effectively promoted the exploration and development process of tight sandstone gas in Sichuan Basin.

Key words: Sichuan Basin; Shaximiao Formation; tight sandstone; accumulation condition; exploration and development technology

引用:杨雨,谢继容,曹正林,文龙,王小娟,肖尧,杨建,唐青松,唐大海,李明秋,关旭,曾青高,陈伟华,陈康,肖红林. 四川盆地天府气田沙溪庙组大型致密砂岩气藏形成条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2023, 44(6): 917-932.

Cite: YANG Yu, XIE Jirong, CAO Zhenglin, WEN Long, WANG Xiaojuan, XIAO Yao, YANG Jian, TANG Qingsong, TANG Dahai, LI Mingqiu, GUAN Xu, ZENG Qinggao, CHEN Weihua, CHEN Kang, XIAO Honglin. Forming conditions and key technologies for exploration and development of large tight sandstone gas reservoirs in Shaximiao Formation, Tianfu gas field of Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(6): 917-932.

四川盆地侏罗系沙溪庙组的勘探始于20世纪70年代^[1-4],早期围绕构造圈闭开展勘探,先后发现平落坝、大塔场、五宝场等气藏^[5-6],这些气藏的探明储量均小于 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$,规模较小,勘探开发成果与社会经济效益十分有限^[7]。

中国石油西南油气田公司于2019年通过老井上试,在J23井沙溪庙组二段(沙二段)6砂组测试获得 $21.83 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流,发现天府气田沙二段气藏;同年,部署探井QL18井,在沙溪庙组7砂组测试获得 $9.06 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流。2021年6月,YQ3预探井在沙溪庙组一段(沙一段)测试获得 $32.95 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气井,发现天府气田沙一段气藏。以上重大突破揭示天府气田的沙溪庙组具有纵向多层含气的特点,明确了沙溪庙组的有利勘探区,拉开了天府气田沙溪庙组大型致密砂岩气藏勘探开发的序幕^[8-13]。2022年,天府气田沙溪庙组气藏探明储量为 $1349 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

为提高天然气自给能力、保障国家能源安全、实现“碳达峰碳中和”目标^[14],笔者以天府气田沙溪庙组为目的层,总结了沙溪庙组的大型致密砂岩气藏类型及特征,揭示了气藏的成藏条件,提出了勘探开发的配套关键技术,评价了勘探开发的成效及未来潜力,以期响应国家清洁能源号召、丰富中国致密砂岩气勘探方法、使四川盆地致密气储量发现再上新台阶。

1 沙溪庙组大型致密砂岩气藏类型及特征

1.1 沉积储层特征

四川盆地侏罗系陆相地层主要经历了晚印支期、燕山期和喜马拉雅期等多期次构造运动,其中,燕山期

和喜马拉雅期的构造运动对侏罗系沙溪庙组影响最大^[15-16]。川中地区在EW向区域应力背景和稳定基底制约下构造形变相对较弱,构造发展整体表现为平缓升降、褶皱强度小。天府气田的区域构造位置包括川中古隆中斜(古生代隆起、中生代斜坡)平缓带和川北古中拗陷(古生代—中生代拗陷)低缓带[图1(a)];矿权区北至绵阳市盐亭县、南至成都市简阳区、西与龙泉山相接、东至遂宁市射洪县,横跨成都市、绵阳市、遂宁市3个行政区,可细分为三台区块、盐亭区块和简阳区块3大含气区块[图1(b)]。

天府气田沙溪庙组的岩性以紫红色泥岩夹灰绿色、灰色粉砂岩和砂岩为主。沙溪庙组的分界标志在底部为下伏的凉高山组灰黑色泥页岩(图2),在顶部为遂宁组底部砖红色粉砂岩和细砂岩。在天府气田范围内,沙一段顶界普遍可见叶肢介页岩层,在区域上可对比,以此为界可将沙溪庙组划分为2段(沙一段和沙二段)^[17]。

沙一段主要发育紫红色泥岩夹块状浅灰色、灰色长石岩屑砂岩,为浅水三角洲—湖泊相沉积,其中,发育水下分流河道微相。沙一段可进一步划分为3个亚段,各个亚段均发育多套较大规模的三角洲朵叶体,各个朵叶体交互沉积。从湖盆边部向湖盆中部,沉积微相由河道和分流间湾向河口砂坝和远砂坝转变,并逐渐过渡为滩坝砂体和湖相泥。潮湿期,湖域面积较大,砂体经过相对短距离搬运后即入湖,由于入湖后可容纳空间相对稳定,水下分流河道砂体呈侧向迁移、垂向叠置,从而形成相对宽而长的叠置河道砂带[图3(a)];干早期,三角洲朵叶体向湖方向迁移。随着湖平面频繁升降,造成不同气候条件下的两类扇体在空间上接替发育。

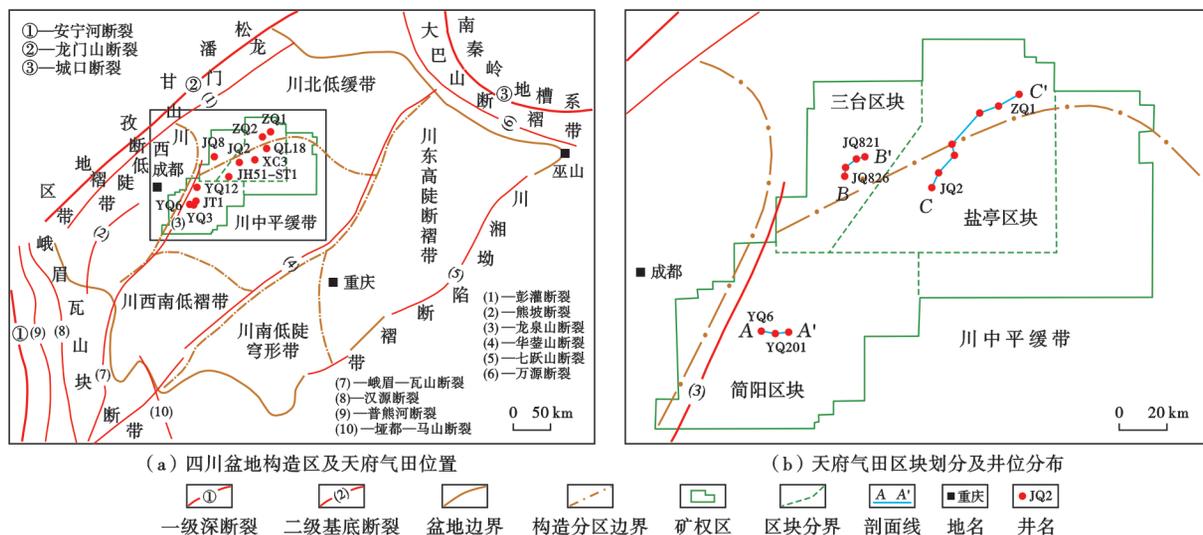


图 1 四川盆地区域地质概况
Fig. 1 Regional geology of Sichuan Basin

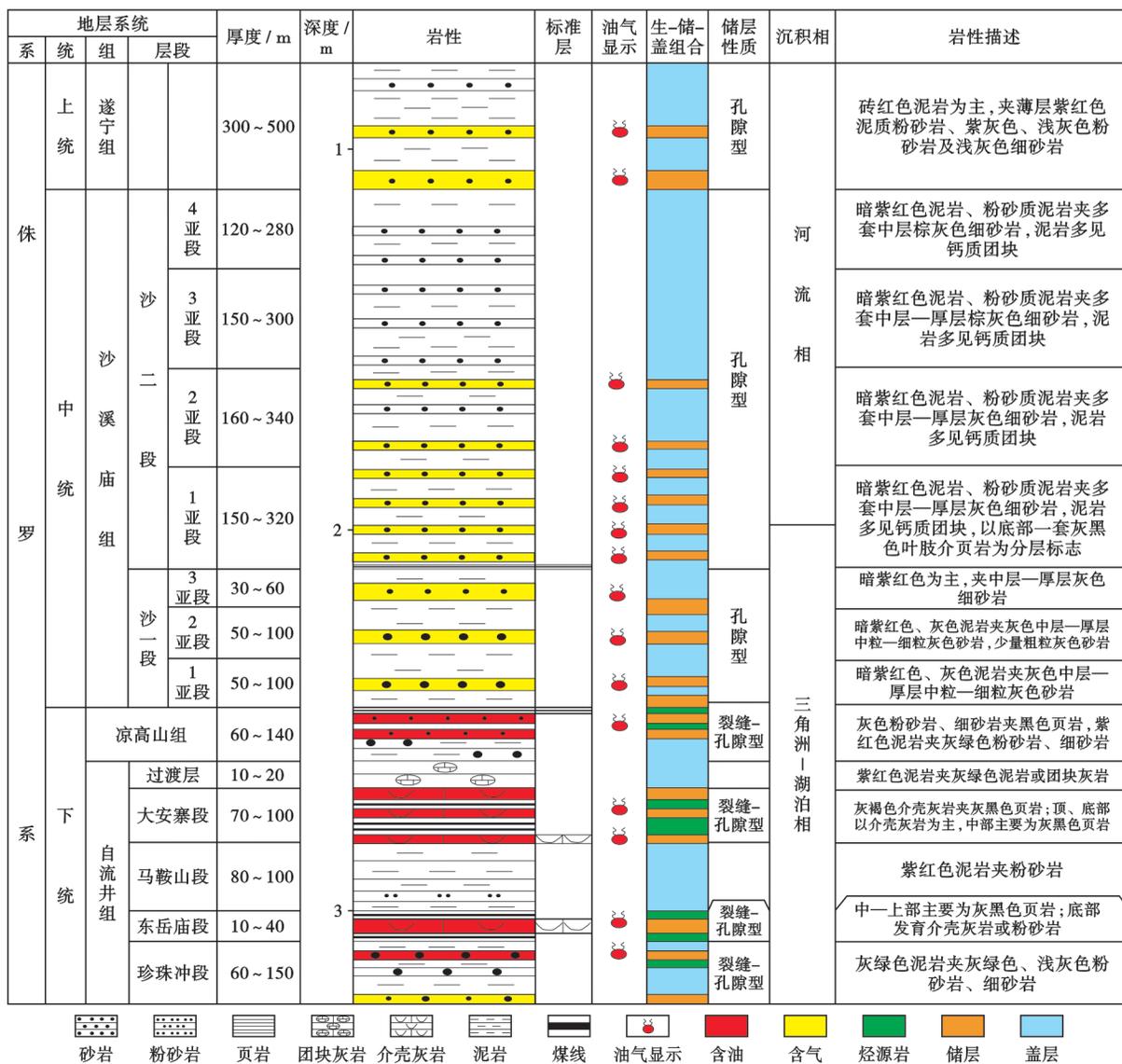


图 2 天府气田侏罗系沙溪庙组综合地层特征

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic characteristics of Jurassic Shaximiao Formation in Tianfu gas field

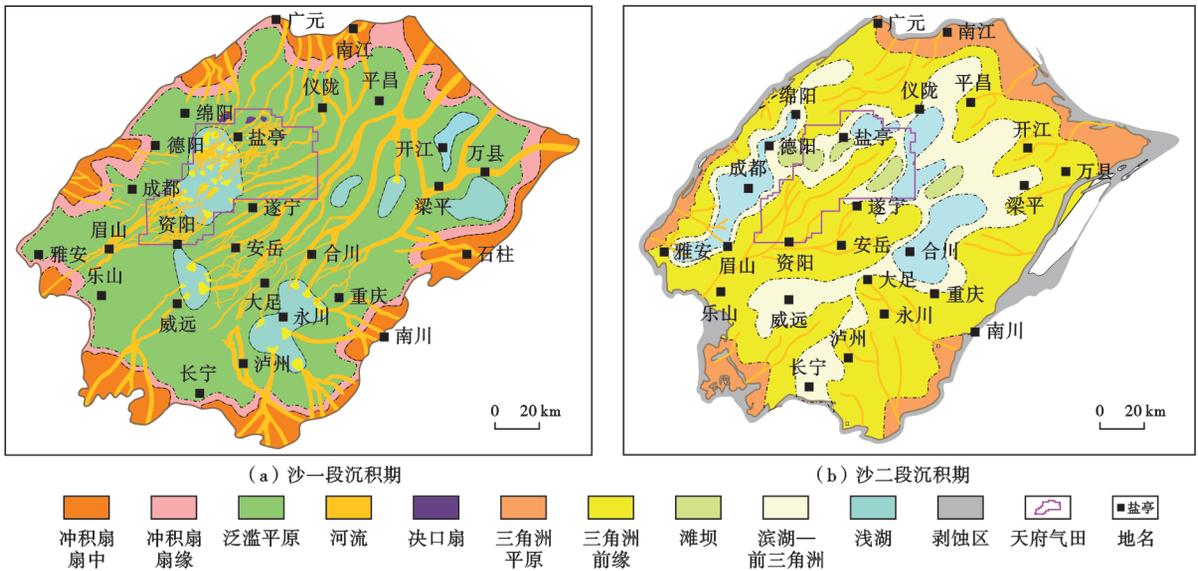
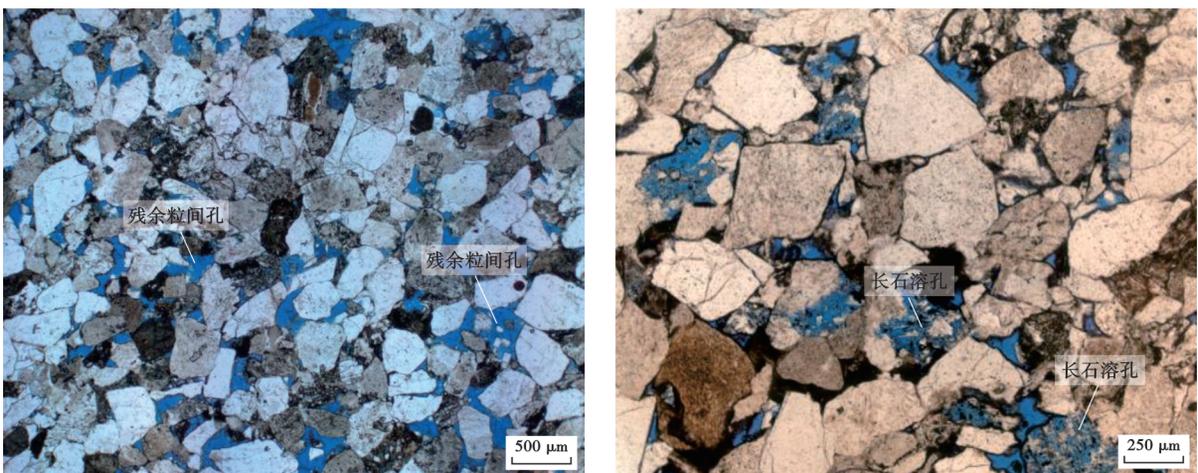


图3 天府气田及其邻区沉积相
 Fig. 3 Sedimentary facies of Tianfu gas field and its adjacent region

沙二段沉积期,随着气候逐渐干旱,湖泊范围再次缩小、变浅,盆地内以陆上强氧化沉积环境为主[图 3(b)],形成大套河流相沉积,主要为灰色、浅灰色、灰褐色中层一厚层细粒—粗粒岩屑长石砂岩以及岩屑长石砂岩与紫红色、灰绿色泥岩组成的不等厚互层沉积。洪水期,由于河流补给作用较强,研究区内形成浅而广的暂时性湖泊,河流所携带的砂体在河道前端快速堆积,可形成扇状河口砂坝,但其在规模上比正常的三角洲朵叶体规模小很多,且由于湖泊的水体能量弱、存在时间短,所以河口砂坝的反韵律特征发育不明显,波浪成因的沉积构造也相对较少;之后,随着气候变干旱,湖泊逐渐萎缩,仅在局部洼地发育一些残余湖相沉积。沙二段沉积期以发育陆上河流沉积为主,可容纳空间有限且不稳定,砂体发育至一定规模即会发生侧向迁移,

造成沙二段 1 亚段发育大量 NE 向窄而细的河道砂。其中,在沙二段 1 亚段 6 砂组和 7 砂组沉积期,河道间和河道前部发育大量扇状沉积;在沙二段 1 亚段 8 砂组和 9 砂组沉积期,川中地区逐渐转变为陆上河流沉积。

基于高分辨层序地层学原理,通过井-震结合搭建的等时地层格架,沙溪庙组在纵向上可划分为 23 期砂组^[10,17]。其中,沙一段(沙溪庙组 1 砂组—5 砂组)和沙二段 1 亚段(沙溪庙组 6 砂组—9 砂组)为天府气田的有利储集层段。储层的岩石类型以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主;储集空间主要为残余粒间孔,其次为长石溶孔(图 4);孔隙度主要分布在 7%~14%,渗透率主要分布在 0.1~1.0 mD,总体属于低孔、特低渗孔隙型储层。储层的分布主要受三角洲前缘水下分流



(a) 残余粒间孔,孔径约为 500 μm , JT1 井 1941.09 m, 铸体薄片
 (b) 长石溶孔和残余粒间孔, YQ1 井 2196.15 m, 铸体薄片

图 4 天府气田沙溪庙组主要储集空间特征

Fig. 4 Characteristics of reservoir space within Shaximiao Formation in Tianfu gas field

河道、长石溶蚀等建设性沉积、成岩作用共同控制^[18], 储层具有纵向多层、平面叠置连片的发育特征。

1.2 天然气地球化学特征

天府气田沙溪庙组气藏以天然气为主。天然气的相对密度为 0.590~0.789, 平均临界温度为 204.65 K, 平均临界压力为 4.58 MPa; 天然气组分中的甲烷含量为 77.6%~93.66%, 二氧化碳含量为 0~0.77%, 氮气含量为 0.13%~3.49%, 硫化氢含量为 0。沙一段天然气整体的相对密度为 0.630~0.648, 轻烃含量较高, 甲烷含量为 88.81%, 非烃气体中氮气含量一般小于 1%、二氧化碳含量一般小于 1%、不含硫化氢; 沙二段天然气整体的相对密度为 0.590~0.789, 轻烃含量较高, 甲烷含量为 88.91%, 非烃气体中氮气含量一般小于 4%、二氧化碳含量一般小于 1%、不含硫

化氢。

在天然气碳同位素中, 乙烷的碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_2$)与母质类型相关且受成熟度影响较小, 常结合丙烷的碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_3$)来判别油型气和煤型气^[19-21]。一般认为: $\delta^{13}\text{C}_2 < -28.8\text{‰}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3 < -25.5\text{‰}$ 为油型气; $\delta^{13}\text{C}_2 > -25.1\text{‰}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3 > -23.2\text{‰}$ 为煤型气; 碳同位素值介于油型气与煤型气指标之间的为混合气。根据 $\delta^{13}\text{C}_2$ 和 $\delta^{13}\text{C}_3$ 构建的天然气成因识别图版(图5)分析, 天府气田沙一段以及沙二段1亚段6砂组、8砂组和9砂组以煤型气为主, 含有少量混合气, 气源主要来自三叠系须家河组^[10, 22-25], 因此压力系数整体较高。沙溪庙组7砂组中天然气的 $\delta^{13}\text{C}_2$ 和 $\delta^{13}\text{C}_3$ 偏轻, 具有混合气和油型气的特征, 侏罗系烃源岩对其有重要贡献^[10, 22-25], 压力系数偏低。

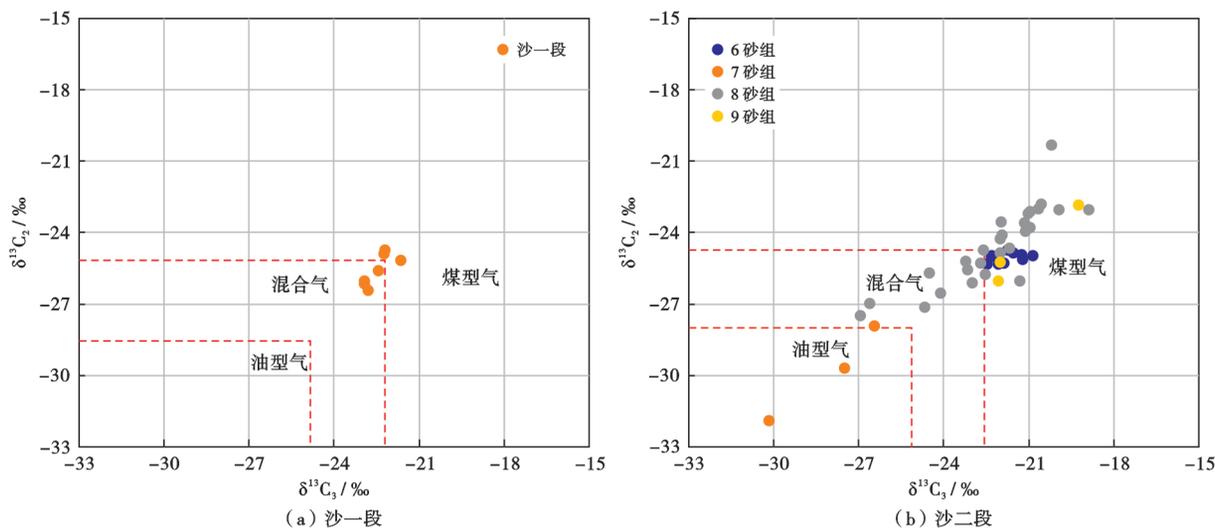


图5 天府气田天然气成因判别

Fig. 5 Genetic identification of natural gas in Tianfu gas field

1.3 气藏类型

天府气田简阳区块的沙一段1亚段—3亚段均产气。其中, 沙一段1亚段的含气性最佳, 纯粹产气; 沙一段2亚段和3亚段在近龙泉山断裂东侧的局部低部位砂带和东侧大断裂附近的少量气井中为气水同产。YQ3井区的气井位于简阳区块中部砂带上(图6), 含气砂带内未见地层水产出, 且穿过沙一段3个亚段的气井, 其气藏均分布在三角洲前缘水下分流河道和河口坝砂体内, 属于岩性气藏。天府气田三台区块的沙二段1亚段8砂组(图7)和盐亭区块的沙二段1亚段6砂组—9砂组经测试均为纯粹产气, 不产地层水; 三台区块和盐亭区块的气井分布不受构造高低控制, 气藏主要分布在优质河道砂体内(图7、图8), 表明沙二段1亚段6砂组—9砂组的气藏受河道砂岩性圈闭控制。

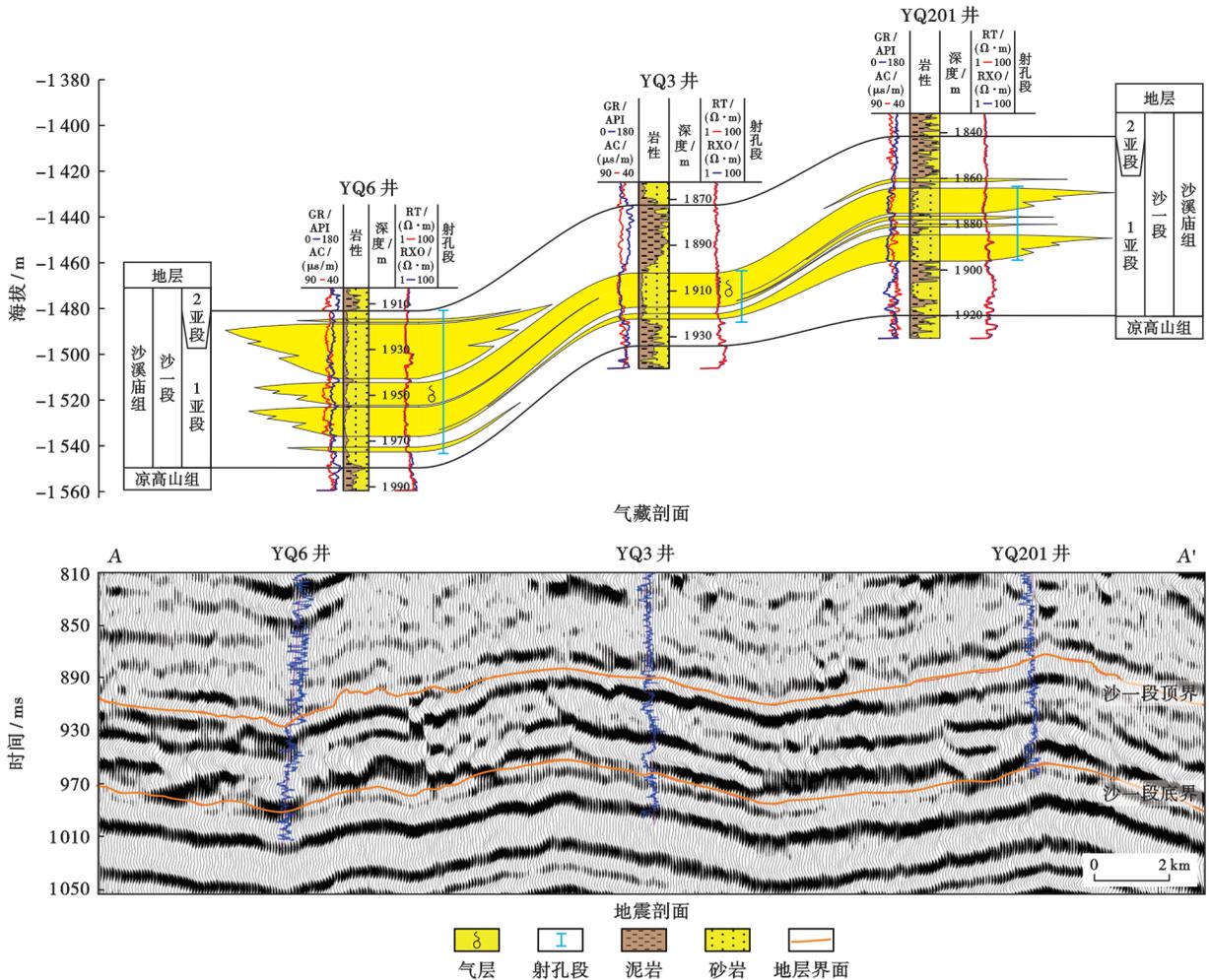
1.3.1 简阳区块沙一段气藏

YQ6井区沙一段1亚段储层的岩心分析显示: 孔

隙度主要分布在 11.0%~13.0%, 平均为 11.7%, 中值为 11.7%; 渗透率主要分布在 0.100~1.000 mD, 平均为 1.512 mD, 中值为 0.428 mD; 为低孔、特低渗孔隙型储层。简阳区块沙一段的气藏类型为岩性气藏, 气藏中央部位的埋深为 2097.90 m、驱动类型为弹性气驱、平均温度为 338.81 K、平均压力为 18.21 MPa、压力系数为 0.96~1.01, 属常压气藏。简阳区块沙一段在纵向的 3 个亚段均获气。根据单层测试, 沙一段1亚段的测试产气量为 $(1.07\sim 10.95) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 沙一段2亚段的测试产气量为 $(11.15\sim 15.17) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 沙一段3亚段的测试产气量为 $(13.49\sim 25.63) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 表现出纵、横向整体富气的特征。

1.3.2 三台区块沙二段气藏

在 JQ18 井区和 JQ8 井区, 沙二段1亚段8砂组储层的岩心分析表明: 孔隙度主要分布在 10.0%~12.0%, 平均为 11.5%, 中值为 11.3%; 渗透率主要分



注:GR—自然伽马;AC—声波时差;RT—地层真电阻率;RXO—冲洗带地层电阻率。

图6 天府气田简阳区块沙一段1亚段气藏剖面及地震剖面(剖面位置见图1)

Fig. 6 Gas reservoir and seismic profiles of the submember 1 of Member 1 of Shaximiao Formation in Jianyang block of Tianfu gas field

布在 0.100~1.000 mD, 平均为 0.453 mD, 中值为 0.208 mD; 为低孔、特低孔隙原型储层。三台区块气藏中央部位的埋深为 2305.00 m、平均温度为 341.38 K、平均压力为 25.18 MPa、压力系数为 1.04~1.19, 属常压气藏。2022 年, 三台区块沙二段气藏获气井的单井测试产量平均为 $34.61 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

1.3.3 盐亭区块沙二段气藏

在盐亭区块, JQ2 井区、ZQ1 井区和 ZQ2 井区气藏中央部位的埋深为 1979.95 m、平均温度为 332.94 K、平均压力为 18.99 MPa、压力系数为 0.95~0.98, 属常压气藏。2022 年, 盐亭区块沙二段 8 砂组获气井的井均测试产量为 $21.65 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

2 沙溪庙组大型岩性气藏的形成条件

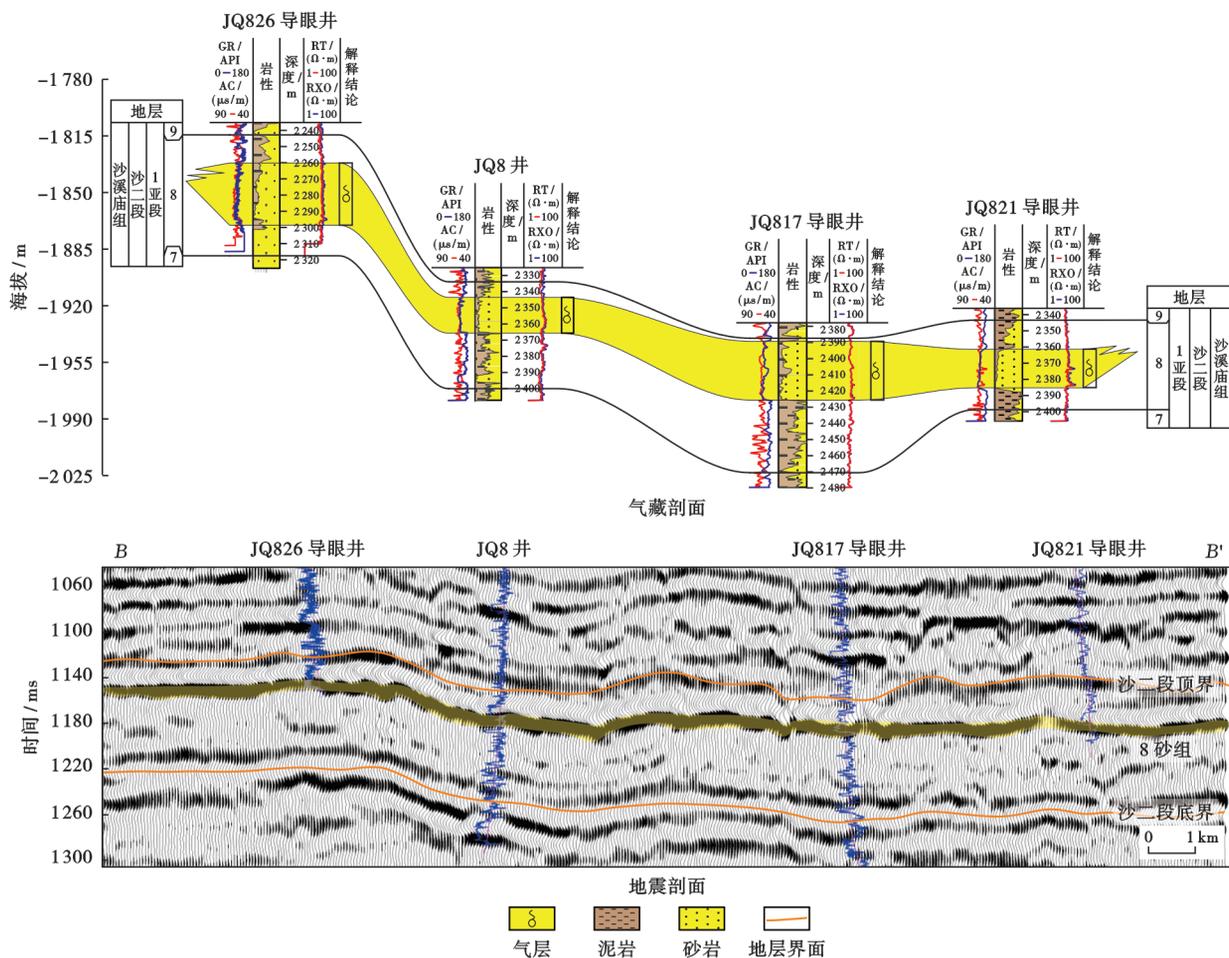
2.1 优越的烃源条件——油气成藏富集的物质基础

天府气田沙溪庙组气藏的主要供气源岩包括三叠系须家河组五段(须五段)的暗色含煤泥岩, 以及侏罗

系自流井组大安寨段的湖相泥页岩(表 1)。

在天府气田及其周缘地区, 须五段暗色泥岩的厚度为 80~150 m[图 9(a)], 煤层厚度为 10~20 m。须五段烃源岩的干酪根类型以 III 型为主, 主要生气; 总有机碳(TOC)含量普遍在 1.0%~2.5%, 有机碳含量较高; 镜质体反射率(R_o)为 1.2%~1.5%, 处于高成熟阶段; 生气强度为 $(20 \sim 30) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$; 生烃中心在川西地区[图 9(b)]。大安寨段烃源岩的厚度为 30~50 m[图 9(c)]; 干酪根类型以 II 型为主, 以生油为主, 生气为辅; TOC 含量普遍在 1.0%~2.0%; R_o 为 1.0%~1.2%, 处于成熟阶段; 生气强度为 $(0.5 \sim 2.0) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$; 生烃中心在川中—川东北地区[图 9(d)]。整体而言, 须家河组烃源岩的生气强度大、烃源条件优越, 是天府气田主要的烃源岩, 次要烃源岩为大安寨段[10, 22-25]。

基于烃源岩厚度、TOC 含量和氢指数等参数, 通过物理模拟实验定量计算, 对须五段和大安寨段烃源



注:GR—自然伽马;AC—声波时差;RT—地层真电阻率;RXO—冲洗带地层电阻率。

图7 天府气田三台区块沙二段1亚段8砂组气藏剖面及地震剖面(剖面位置见图1)

Fig. 7 Gas reservoir and seismic profiles of the 8th sand group within the submember 1 of Member 2 of Shaximiao Formation in Santai block of Tianfu gas field

岩的生烃增压能力进行的评价(图10)表明,须五段烃源岩的生烃增压量在28~49 MPa,而大安寨段烃源岩的生烃增压仅能够提供3~10 MPa的剩余压力,因此,须家河组烃源岩可为沙溪庙组砂岩储层增补更大的压力,从而使得地层压力整体呈现出西高东低的特征。

2.2 高效输导体系——油气大面积立体成藏的关键

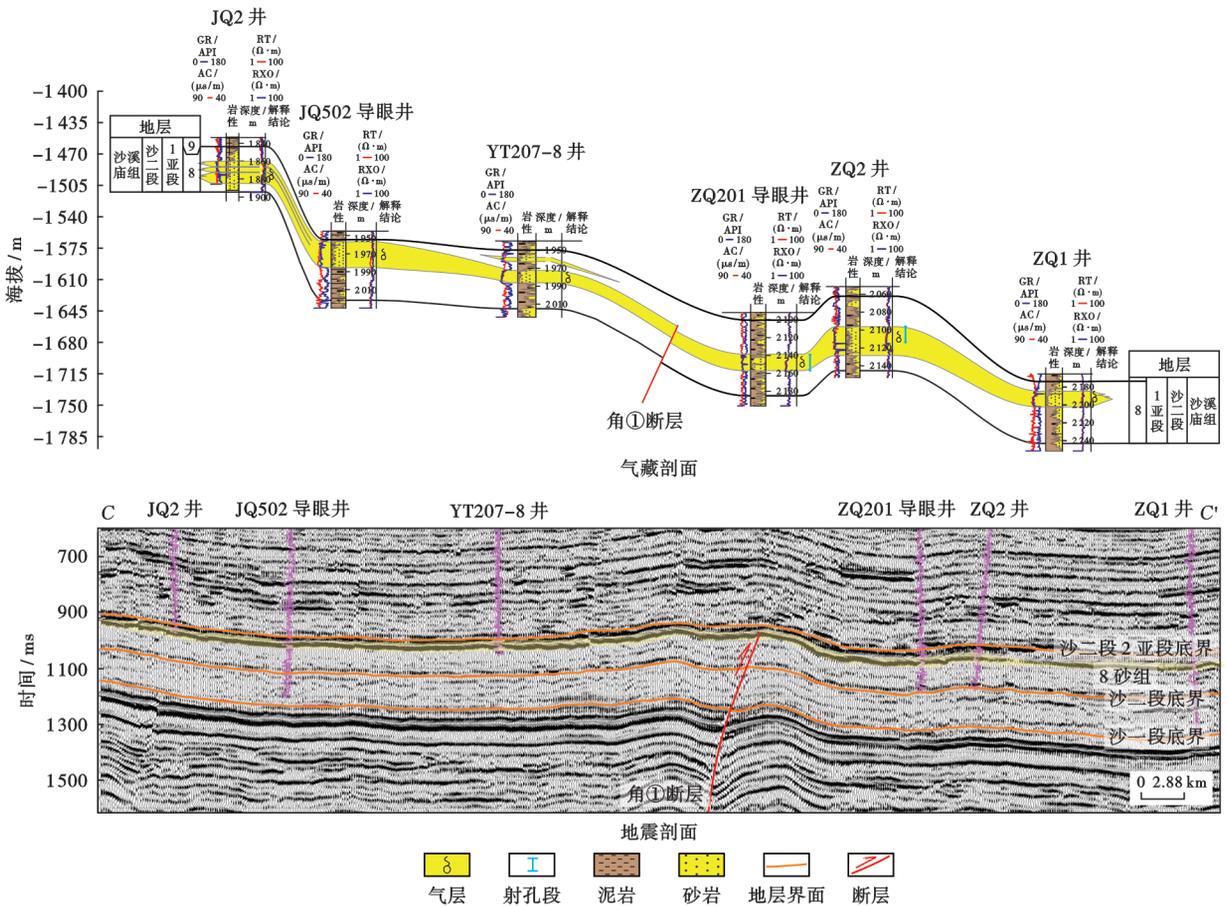
2.2.1 “通源”断层是油气成藏的关键

断层是沟通须家河组烃源岩与沙溪庙组储层的关键,并从根本上决定了气藏成藏与否^[25-29]。天府气田发育断至须家河组的大型“通源”断层并在沙溪庙组内部发育小型正断层(图8)。大型“通源”断层主要发育在龙泉山断裂带、八角场地区、金华地区、简阳—乐至地区,是沟通须家河组烃源岩的气源断裂;侏罗系内部从沙溪庙组断至凉高山组和自流井组大安寨段烃源岩的正断层是沟通侏罗系烃源岩的气源通道,这些通道连接沙溪庙组内各期砂组,起到在砂组之间纵向再输导和调整油气的作用。

天府气田天然气的主要类型为煤型气,含混合气,在局部井区为油型气(图5)。可以判断,区域逆断层是天府气田的主力气源通道,可造成天然气垂向高效运移,而侏罗系内部的正断层在此期间也发挥着接力输导油气和沟通侏罗系自身烃源岩的作用。“通源”断层在宏观上控制着气藏的分布;而侏罗系内部的小断层由于断距小且断层两侧储层的连通性好、单井产量无明显差异,说明其不具有明显的控藏作用。

2.2.2 优质储层的发育程度决定了含气区的分布

天府气田的烃源、断裂和砂体的配置关系良好,砂体内优质储层的发育程度决定了油气的充注范围。储层物性好、厚度大,在连通砂体多的情况下,可形成多条横向快速运移通道,这有利于油气远距离运移和储层大面积含气。天府气田沙二段1亚段8砂组的优质储层呈大面积叠置发育,其西与龙泉山断裂对接、东与角①号断裂对接(图8),形成了天然气的高效输导通



注:GR—自然伽马;AC—声波时差;RT—地层真电阻率;RXO—冲洗带地层电阻率。

图8 天府气田盐亭区块沙二段1亚段8砂组气藏剖面及地震剖面(剖面位置见图1)

Fig. 8 Gas reservoir and seismic profiles of the 8th sand group within the submember 1 of Member 2 of Shaximiao Formation in Yanting block of Tianfu gas field

表1 天府气田主要烃源岩的地球化学及生烃参数

Table 1 Geochemistry and hydrocarbon generation parameters of main source rocks in Tianfu gas field

烃源岩地层	厚度/ m	TOC/ %	R _o / %	生气强度/ (10 ⁸ m ³ /km ²)
须家河组五段	80~150	1.0~4.0	1.4~1.8	20~30
大安寨段	30~50	1.0~2.0	1.0~1.2	0.5~2.0

注:TOC—总有机碳,R_o—镜质体反射率。

道,加之气源充足,导致气藏充注程度高,压力系数达0.90~1.06。天府气田沙二段1亚段6砂组、7砂组和9砂组的优质储层仅发育在盐亭区块,在三台区块砂岩的物性较差,而外围的储层欠发育,含气性较差。盐亭区块下伏的烃源层主要为川中地区的三叠系须家河组和侏罗系,其烃源条件较川西地区差,因此油气充注程度受限,气藏以低压为主。简阳区块沙一段的三角洲分流河道砂岩呈大面积叠置发育,砂体厚度大、分布范围广、储集条件优越,断层-砂体的组合条件好,加之整体须家河组气源充足,地层压力相对较高,压力系数达0.94~1.01。总体而言,天府气田的油气具有

“择优充注、差异富集”的特征。

2.3 关键成藏期各要素的优越匹配关系

在天府气田沙溪庙组致密气储层中,流体包裹体均一温度的变化范围大(100~160℃,图11),且显示至少存在2期油气充注。第1期油气充注发生在白垩纪中—晚期(对应沙溪庙组埋深最大时期),距今88~68Ma;第2期油气充注发生在古新世—渐新世,距今47~38Ma(图12)。

沙溪庙组自沉积后经历了地层压实和孔隙度降低,期间,川西地区的烃源岩开始生烃但未达到高峰。晚侏罗世至白垩纪,三叠系须家河组烃源岩大量生烃,储层由于溶蚀作用形成次生孔隙,加之气源断层活动频繁,有利于深部油气运移,并使得天然气运移至川中地区成藏。古新世至今,天府气田东部地区的下侏罗统烃源岩生烃充注,但其充注效率低于西部地区,期间,受断层活化或层内小断层分布影响,原气藏发生后期调整。天府气田发育多级输导断裂,断层-砂体的组合类型多,呈“双源多期充注、断砂复合输导、环源规模聚集、河道差异富集”的成藏模式(图13)。

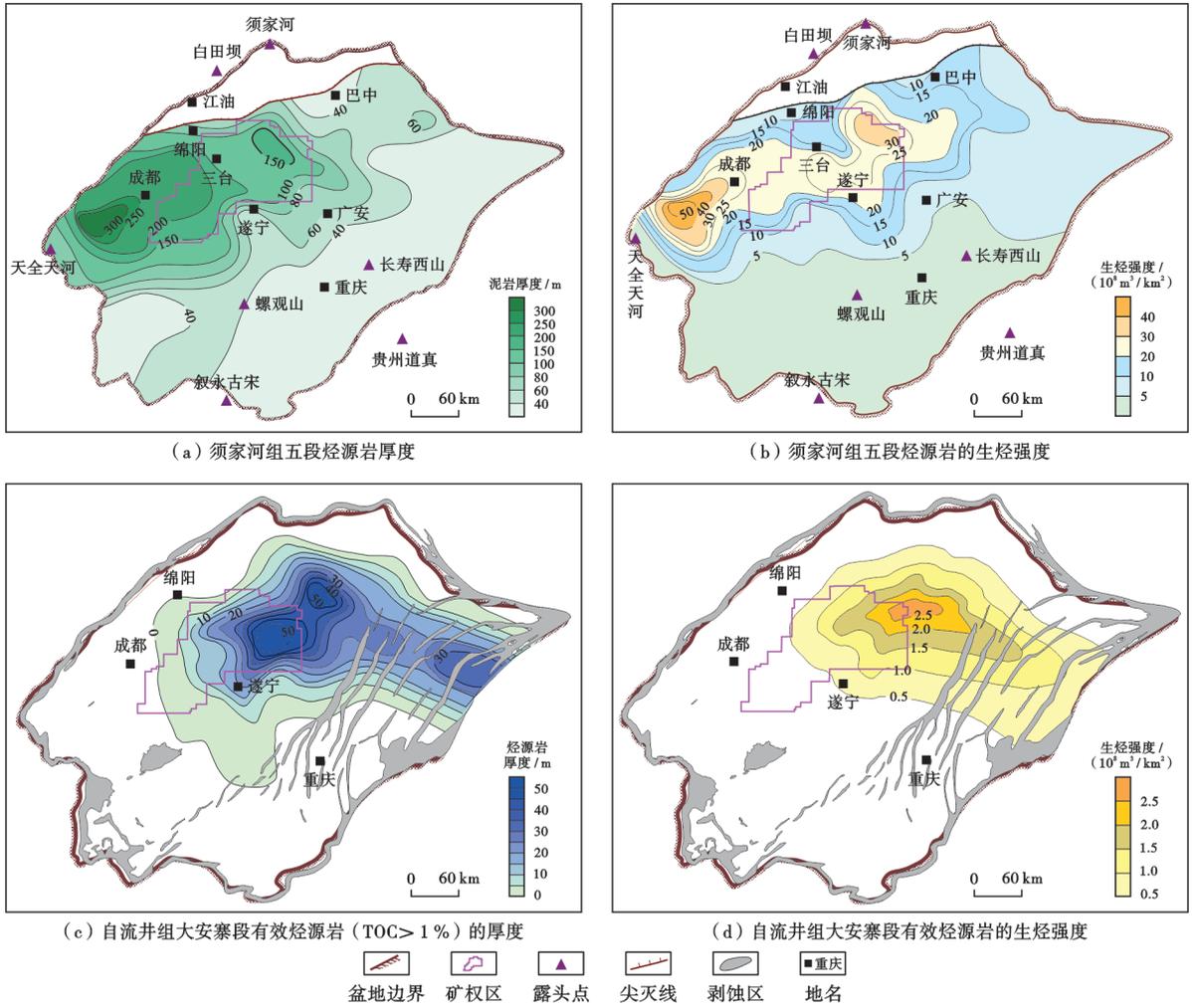


图 9 四川盆地须家河组五段和自流井组大安寨段烃源岩厚度及生烃强度

Fig. 9 Source rock thickness and hydrocarbon generation intensity of the Member 5 of Xujiahe Formation and the Da'anzhai Member of Ziliujing Formation in Sichuan Basin

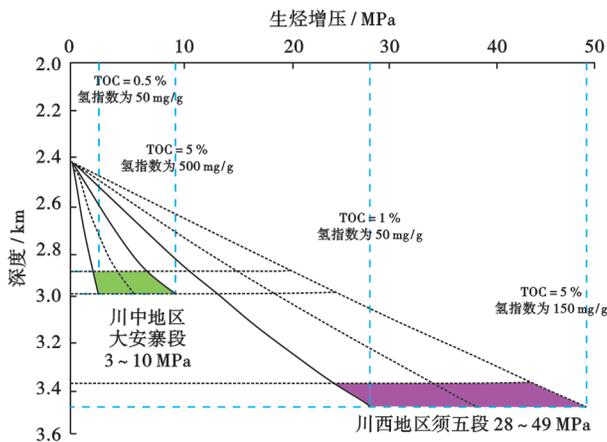


图 10 川西地区须五段与川中地区自流井组大安寨段烃源岩的生烃增压对比

Fig. 10 Comparison of pressurization during hydrocarbon generation of source rocks between the Member 5 of Xujiahe Formation in western Sichuan Basin and the Da'anzhai Member of Ziliujing Formation in central Sichuan Basin

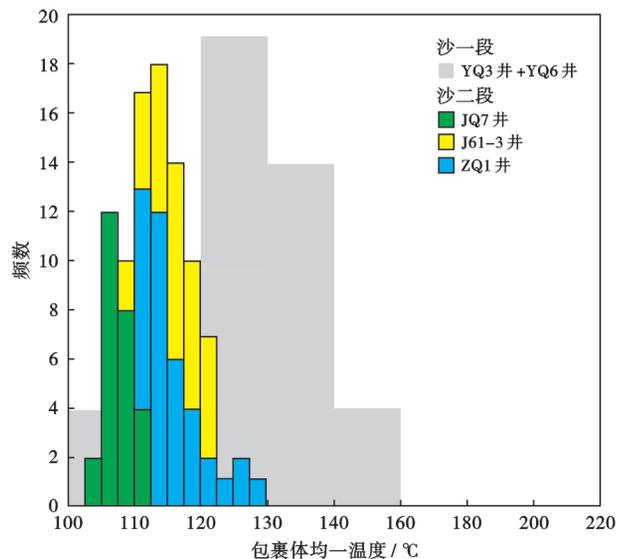


图 11 沙溪庙组流体包裹体的均一温度分布

Fig. 11 Homogenization temperature distribution of fluid inclusions in Shaximiao Formation

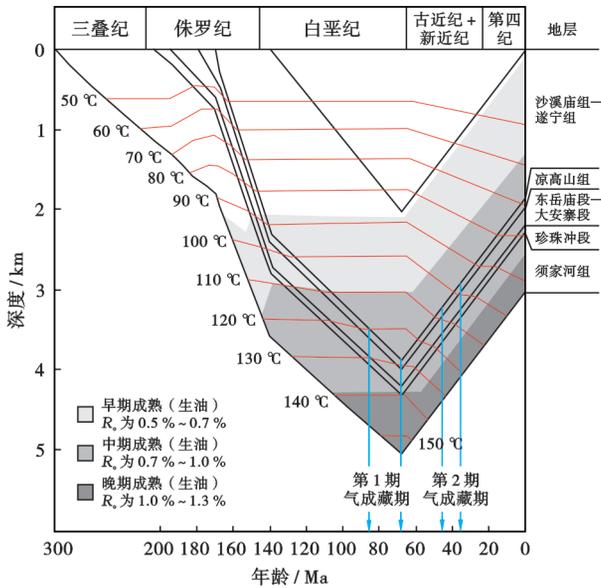


图 12 川中地区沙溪庙组的油气成藏史

Fig. 12 Hydrocarbon accumulation history of Shaximiao Formation in central Sichuan Basin

3 致密气勘探开发关键技术

3.1 高精度等时地层格架约束下的精准选层技术

沙溪庙组厚度大,纵向上分布了多期次的河道砂体,单一地层层序划分难以满足精细勘探开发的需求,这制约了对不同砂组开展井位部署、储量计算以及开发单元描述等工作。针对这一问题,以地震沉积学原理为基础,应用全局自动等时建模技术可实现对研究区的河道期次进行可靠的等时划分。该方法以“最小成本函数”为核心,结合地质沉积“泥包砂”、地震反射“强亮点”等特征以及河道在纵、横向上出现的顺序,开展全局人工智能等时建模,确定单期河道砂组的顶、底等时界面;之后,再以单期砂层组为框架,以处理后的高分辨率地震数据为基础,依次刻画出各期河道在横向上的展布和纵向上的叠置关系。基于该方法的有效应用,天府气田的沙溪庙组可统一划分出 23 期河道,主要砂组具有“宽度窄、延伸远”的特征。以此为基础,通过对不同期次砂组从物性、含气性、面积和埋深等方

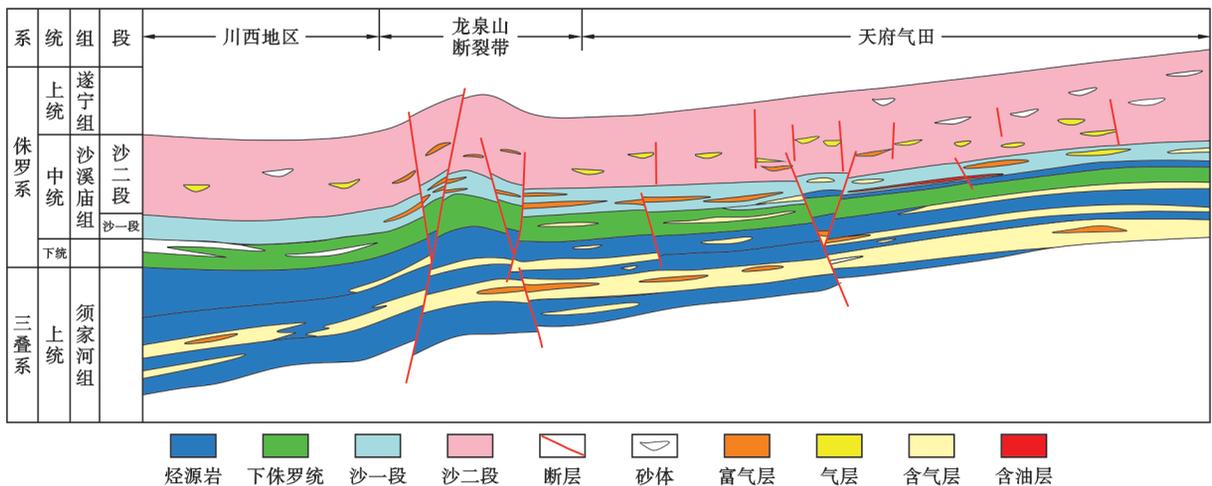


图 13 天府气田沙溪庙组的油气成藏模式

Fig. 13 Hydrocarbon accumulation pattern of Shaximiao Formation in Tianfu gas field

面开展地质综合评价优选,明确沙溪庙组的优势期次砂组及区块,为有利区带的划分提供依据。

3.2 以三维地震为核心的砂体及靶体精准预测技术

3.2.1 三维砂体精细雕刻

受地震资料的分辨率限制,砂体的识别及精细刻画在纵向上可依据地震反射能量的变化来分析单一砂体,而在横向上,由于砂体边界受岩性、物性影响可导致其地震反射特征变化较大,单一砂体边界的地震识别及砂体精细刻画存在多解性^[30]。目前,通过引入频谱分解图像(RGB 色彩模式)像素边界识别技术和多地震属性融合内幕表征技术,沙溪庙组河道砂体在平面上的边界及内幕特征可在一定程度上得到增强和细化。进一步基于三

维体的空间雕刻技术,以选取砂组边界约束的动态门槛下限值为“种子点”,在三维地震空间内开展人机交互快速河道砂体追踪,可实现快速、准确地雕刻河道砂体的空间形态及分布特征^[31-34](图 14)。三维砂体的精细雕刻可为沙溪庙组纵向多层河道砂组的立体勘探开发、目标靶体的优化设计提供更为直观的数据信息。

3.2.2 测井精细评价及靶体选取

针对天府气田沙溪庙组储层为致密砂岩的特征,在储层物性、含气性测井敏感参数分析的基础上,以不同砂体为分类依据,中国石油西南油气田公司开展了常规测井与阵列声波测井相结合的高分辨率致密气测井精细评价研究。

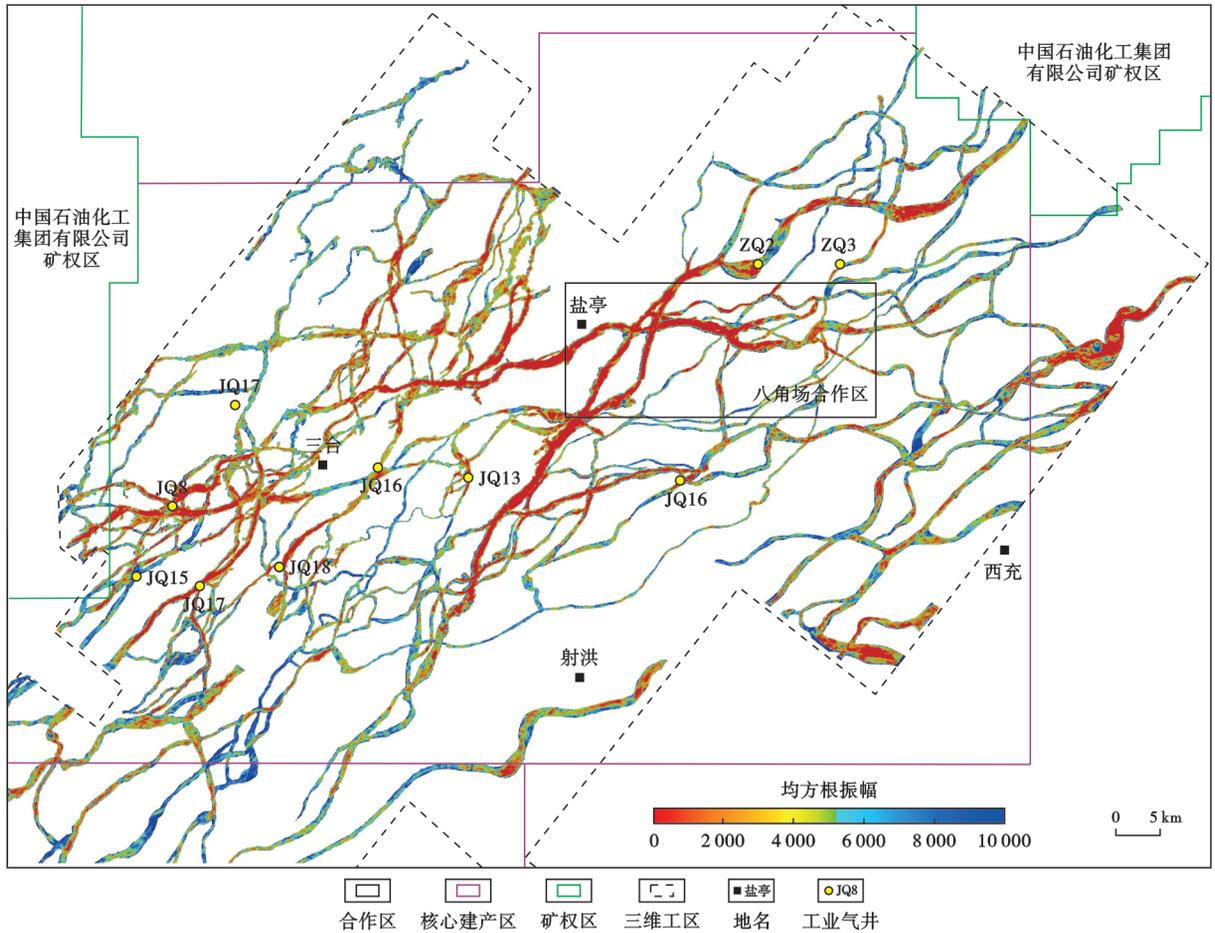


图 14 天府气田沙溪庙组 8 砂组河道砂体的分布

Fig. 14 Distribution of channel sand bodies of the 8th sand group of Shaximiao Formation in Tianfu gas field

沙溪庙组储层的声波骨架参数存在差异。对比 Wyllie 模型、Raymer 模型和声波地层因子的应用效果,基于声波地层因子可建立不同砂体的孔隙度预测模型,并结合岩心孔隙度与渗透率的相关性可建立渗透率预测模型。此外,在地层条件下岩电实验、地层水分析和孔隙度解释基础上,应用 Archie 公式可建立沙溪庙组致密气饱和度解释模型。测井资料的处理结果显示,测井的物性与含气性解释成果与岩心分析结果吻合较好,这表明相应的测井解释模型有效、适用。中国石油西南油气田公司在此基础上创新建立了基于纵横波速度比—中子声波包络面积交会法、孔隙度—电阻率交会法、气测录井指示法等多方法相结合的致密砂岩含气性判别技术与解释标准,提高了测井解释的符合率,应用效果显著,可支撑单井的试气选层及水平井的靶体选取。

3.3 以水平井+体积压裂为核心的提速提产配套技术

3.3.1 精细平台水平井组部署技术

天府气田沙溪庙组多期河道砂体呈纵横向叠置发育,河道形态不规则,宽度主要为 300~1 500 m。油公司根据河道形态、砂体物性及地面条件开展了“精细平

台水平井组”部署,主要包括:相向式、并排式和立体式(图 15)。

(1) 相向式水平井组:该类平台部署于单条窄河道或多条窄河道交汇处。水平井的“相向式”部署即在平台两侧沿河道向两个相反的方向部署水平井,并最大限度地利用可动用储量,其水平井长度根据河道砂体的物性进行调整,如 JQ511 平台针对沙溪庙组 6 砂组设计的 4 口水平井[图 15(a)]。

(2) 并排式水平井组:该类平台部署于单条宽河道(河道宽度大于 1 000 m)。水平井的“并排式”部署即沿河道同向并排部署 2 口水平井,水平井的间距根据河道砂体的物性和河道宽度进行调整,如 JQ501 平台针对沙溪庙组 8 砂组设计的 4 口水平井[图 15(b)]。

(3) 立体式水平井组:该类平台部署于多期河道砂体纵向叠置的交汇处。水平井的“立体式”部署同时动用不同时期的河道砂体的储量,达到纵向立体式开发的目的。例如,JQ12 平台位于沙溪庙组 6 砂组—9 砂组的交汇处,采用“立体式”水平井部署模式,针对 6 砂组—9 砂组分别部署水平分支[图 15(c)]。

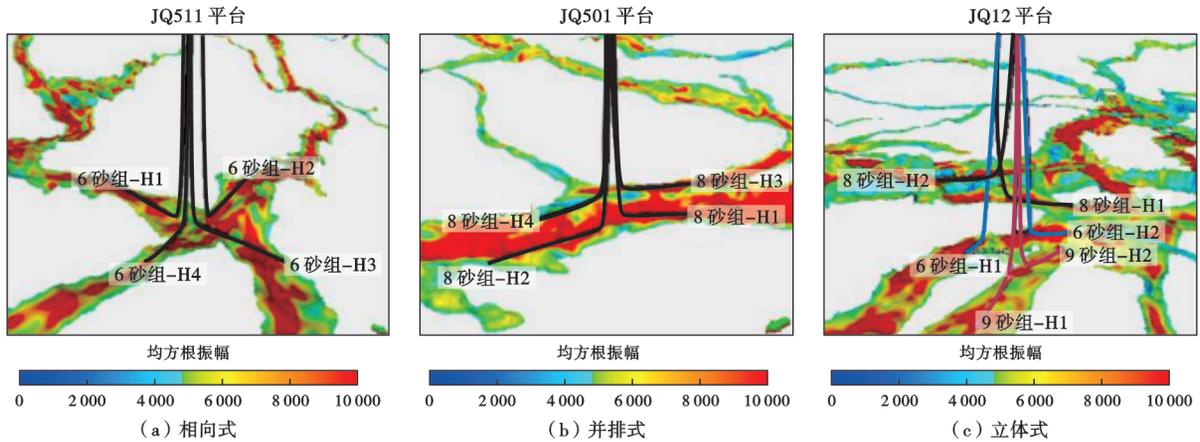


图 15 天府气田钻井平台水平井组的部署

Fig. 15 Deployment of horizontal well group of drilling platform in Tianfu gas field

3.3.2 水平井优快钻井技术

该技术通过持续攻关与优化,形成了常规两开井身结构及“小井斜扭方位”的井眼轨迹设计;配合优选油基钻井液与防泥包强攻击性钻头,配套降扭减阻工具,形成了“二维井段常规定向+三维井段旋转导向”的水平井轨迹分段控制方案;采用“高钻压+高转速+大尺寸钻杆+大排量”的“两高两大”钻井参数模式,形成了以“旋转导向系统+油基钻井液+钻井参数强化”为主体的浅埋深三维水平井钻井提速技术,钻井周期最短为 8.16 d。

3.3.3 水平井体积压裂技术

真三轴大型物理模拟实验和微地震监测表明,沙溪庙组储层难以形成复杂缝网,需采用多条主裂缝替代复杂缝网进行储层改造。目前,油公司创建了渗流-应力耦合多裂缝竞争延伸模型,通过大夹角井“短簇距+非均匀布孔”、小夹角井“长簇距+复合暂堵”的多裂缝延伸控制技术,实现了储层的有效改造。针对储层水敏性较强的问题,采用“高黏度携细砂+低黏度携粗砂”的加砂模式,形成水敏储层“控液提砂”的压裂工

艺,将压裂施工的液砂比降低至 $3\text{ m}^3/\text{t}$,解决了压裂增产与储层伤害之间的矛盾。此外,油公司通过自主研发低温全金属可溶桥塞及变黏滑溜水,实现了关键配套工具及液体体系的国产化。

3.4 以快速快投、优化简化为目的的地面配套集输处理技术

3.4.1 持续推进致密气标准化建设,降低地面投资

沙溪庙组气藏属于窄河道砂体,具有砂体厚度小、砂体分布广、井控储量低、井位优选难度大、平台实施井位少等特点,由于地面投资大,采用常规方式建设难以实现效益开发。在沙溪庙组气藏的开发过程中,早期的地面建设沿用常规气开发模式,设置了高压井口、水套炉、分离器计量等复杂装置,费用高[图 16(a)]。为了进一步提高致密气开发的经济效益,通过开展地面工艺流程的优化简化工作,初步形成致密气集气站、平台场站标准化设计[图 16(b)]。标准化设计采用电感应加热取代了传统水套炉加热;采用两相或多相流量计取代分离计量;优化地面工艺布局,减少征地面积;简化自控、监控、桥架等附属设施。标准化设计可

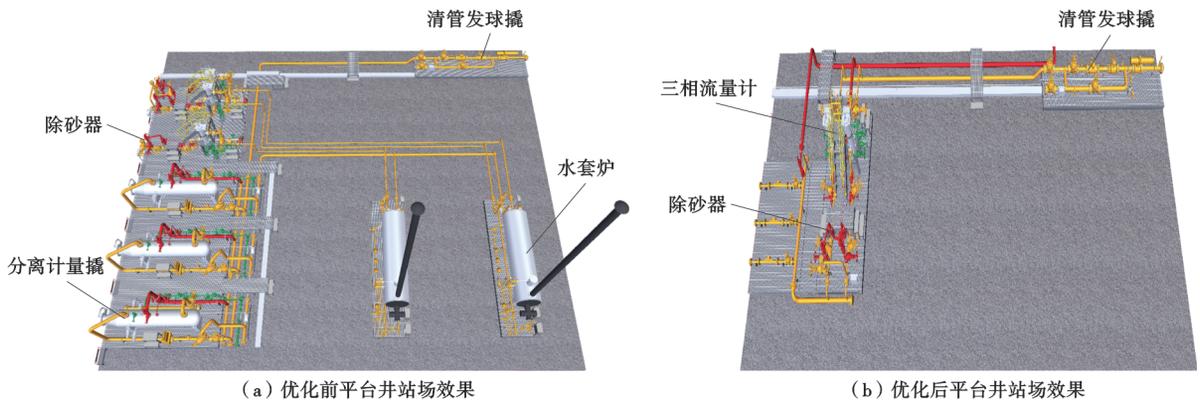


图 16 平台井站场优化前后效果对比

Fig. 16 Comparison of effect before and after optimization of platform well station

以提前对场站材料和设备进行规模化采购,缩短工期、降低投资,从而缩短建设周期。天府气田对20个平台开展了标准化设计的推广应用,其建设周期缩短了20%,单井平台的投资下降约为40%。下一步将在生产递减期试用井下节流工艺,进一步简化地面工艺流程,降低投资。

3.4.2 推进边远井建设液化天然气(LNG)、压缩天然气(CNG)站模式,加快产能发挥

在沙溪庙组气藏的建产中,边远井基本上都无可依托的外输管线,试油获气后新建管线投资大、工期长。中国石油西南油气田公司通过建设LNG、CNG站的模式,实现了边远井产能的快速发挥。单井配产在 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以内的井采用建设CNG站模式生产,单井配产在 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上的井采用建设LNG站模式生产,缩短了建产周期,加快了产能发挥。通过近年来的摸索,中国石油西南油气田公司致密油气勘探开发项目部采用零散气回收模式投产的LNG、CNG站达5座,产气量约为 $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。下一步将在天府气田的探转采过程中实施进一步优化后的橇装LNG、CNG站模式,提前发挥探井产能。

3.4.3 推进致密气“三同步”快速投产模式,提前回收试油期间放喷气

中国石油西南油气田公司在致密气的生产中推广“试油测试+排采生产+一体化脱水脱烃”的“三同步”快速建产模式,统筹考虑“邻井排液试油+本井临时排采+后续平台建设”的生产运行模式,通过合理布局、优化工艺流程和理清管理界面,确保新建产能安全投运。排采生产不仅能提前发挥气井产能、减少资源浪费、降低碳排放和环保风险,同时也可为进一步优化简化地面建设流程、持续完善致密气开采的地面建设标准化创造有利条件。“三同步”快速建产模式的推广应用将为致密气加快上产和提质增效提供高效的解决方案。2022年,中国石油西南油气田公司采用此模式陆续投产26个平台60口井,预测产气量为 $500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,实现了气井产能的提前发挥。

3.5 以规模效益开发为核心的一体化技术经济模板

3.5.1 勘探开发一体化

2018年以来,中国石油西南油气田公司立足成藏条件优越的川中地区,通过“老井上试+新井部署”结合,快速查明了研究区的含气性,发现了天府气田沙二段气藏,展现出盆地致密气良好的勘探前景。“探井占边+开发评价井加密”相结合的勘探开发一体化快速探明了天府气田沙二段气藏,发现了沙一段多层含气,证实了含气砂体的资源规模大。基于前期探井、评价井的部署统筹和后期开发井的部署,提前预留出开发

井井口。按照一体化部署原则,平台的井口数平均为3~4口,大幅缩短了后期开发井的钻完井周期,降低了钻井的工程成本。

3.5.2 地质工程一体化

积极推进致密气的地质与工程施工一体化建设包括:①组织勘探、地质、钻采、物探等多专业、多单位组成联合跟踪小组,形成成熟有效的“录井一定向一导向—地震一体化”跟踪模式,确保储层的钻遇率,将储层钻遇率从早期的70%提高到90%;②开展地质工程一体化提速降本钻井技术的现场试验及实施效果评价,优化地质工程一体化的钻井技术模板,实现安全快速钻井,目前水平井的钻井周期已从早期的30d下降到18.44d;③持续开展“一砂一策、一井一策、一段一策”的地质工程一体化试油方案设计,建立川中地区沙溪庙组致密气地质工程一体化的试油模板,目前测试产气量已从初期的 $5.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提高到 $43 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

3.5.3 技术经济一体化

通过超前谋划、精心组织,细化施工安排,强化技术与经济管理一体化管控,做到人人进驻现场、事事有人跟踪、实时沟通协调、处处抓好质量,把“深严细实”的作风落实到每个环节,不断推动致密气的产能建设提速提效。技术经济一体化的主要措施包括:

(1)突出技术创效。通过部署勘探开发一体化大平台、实施装配式地坪和应急池、减小硬化面积等措施,降低单井平均钻前费用;通过建立完善井的工程技术经济模板,实施工厂化作业、实施小井眼和优化压裂改造参数等措施,降低单井平均钻试成本(可下降22%);地面工程以“管用、实用、好用”为原则,形成总图布局、设备设施、物资需求、应用功能、建设流程“五个标准化”;推行“中低压集气+气液混输+集中增压和处理”的集输工艺,以及“井口固定油嘴+电感应加热+两相(多相)流量计”的设计,节约投资(可达15%),缩短工期。

(2)突出致密气“项目制”管理。积极推进致密气的“项目制”管理模式,落实“甲方主导、责权统一”的特色化管理流程;致密气团队以实际行动践行“三个一体化”指导思想,科学保障“储量向产能的快速转换、产能向产量的快速转换”;积极探索市场化合作超额收益分享的激励政策,强化项目经理对承包商的激励与约束。

(3)突出“业财融合”。坚持用业务的优化带动财务的优化,积极尝试优化简化地面设计。例如,根据沙溪庙组的试采情况,单井的地面流程可划分为排采期、稳产期和递减期3阶段,经过3个阶段的设计优化,单井的地面投资可下降30%。

4 勘探开发成效及展望

2018—2022年,天府气田沙二段气藏集中建产,已建成的产能达 $24.88 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,形成了勘探开发一体化配套技术。目前,在川中地区沙溪庙组成藏有利区,通过开展勘探开发一体化评价和部署,在富气层系、富气区块、控制储量和单井产能试验成效等多方面成效显著。具体表现为:①向南拓区,发现了沙一段气藏,其中,简阳区块甩开部署的YQ3井在沙一段获得 $32.95 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流;②落实了天府气田的7套富气层系(纵向上沙一段的1砂组—3砂组和沙二段1亚段的6砂组—9砂组)和3个富气区(三台区块、盐亭区块、简阳区块),提交的三级储量达 $3000 \times 10^8 \text{ m}^3$;③在勘探开发一体化评价中,盐亭区块和三台区块已部署42个平台53口开发评价井,积极开展了多砂组评价工作,大幅提高了单井产量,实现了沙溪庙组气藏的有效动用。此外,沙溪庙组气藏通过先导与试采一体化实施,快速确定了效益开发技术对策;基于高效实施方案,快速实现了储量向产能转化;基于快建快投,实现了产量的跨越式增长。2022年,天府气田累计完钻162口井,获得工业气井145口,其中77口井投产,单井平均最终可采储量(EUR)为 $1.24 \times 10^8 \text{ m}^3$,水平井的单井平均EUR为 $1.43 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。天府气田的井口产能为 $900 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,2022年的产气量为 $15.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,已实现规模效益开发。

天府气田沙溪庙组致密砂岩气藏在勘探开发过程中积累了大量成熟、有效的关键技术,这对于四川盆地须家河组、沙溪庙组等致密砂岩气富集层系的下一步规模增储与产能建设具有重要意义^[35]。目前,除沙溪庙组外,致密气的后备接替领域研究不足,有必要持续加强陆相致密气其他层次的研究工作,以实现四川盆地在“十四五”(2021—2025年)规划中达成致密气的万亿立方米增储、 $80 \times 10^8 \text{ m}^3$ 上产愿景。

5 结论与认识

(1)天府气田沙溪庙组气藏以不含硫的清洁天然气为主。地质综合评价结果表明,天府气田的简阳区块沙一段气藏、三台区块沙二段气藏和盐亭区块沙二段气藏均为岩性气藏。沙一段和沙二段1亚段6砂组、8砂组、9砂组中的天然气以煤型气为主,少量为混合气,气源主要来自须家河组;沙二段1亚段7砂组中的天然气具有混合气和油型气的特征。

(2)基于高分辨率等时地层格架下的沉积储层、气源、断层-砂体配置和成藏期次的系统研究,明确了四川盆地天府气田沙溪庙组的大型致密砂岩气藏具有

“双源多期充注、断砂复合输导、环源规模聚集、河道差异富集”的规律,这一认识可有效指导勘探部署。

(3)致密气勘探开发的关键技术包括:针对高精度等时地层格架约束下的精准选层技术;以三维地震为核心的砂体精细刻画及靶体精准预测技术;以水平井+体积压裂为核心的提速提产配套技术;以快建快投、优化简化为目的的地面配套集输处理技术;以规模效益开发为核心的一体化技术经济模板。这些关键技术推进了四川盆地致密气的规模增储与产能建设。

参 考 文 献

- [1] 段文燊. 四川盆地中侏罗统下沙溪庙组致密气勘探潜力及有利方向[J]. 石油实验地质, 2021, 43(3): 424-431.
DUAN Wenshen. Exploration potential and favorable direction of tight gas in Middle Jurassic Xiashaximiao Formation in Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(3): 424-431.
- [2] 赵霞飞, 赵拓宇, 张闻林, 等. 四川盆地中北部下一中侏罗统主要目的层沉积相与地震沉积学[J]. 天然气勘探与开发, 2021, 44(1): 90-103.
ZHAO Xiafei, ZHAO Tuoyu, ZHANG Wenlin, et al. Sedimentary facies and seismic sedimentology for the main exploration targets of Lower-Middle Jurassic in the northern part of central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2021, 44(1): 90-103.
- [3] 丘东洲. 四川盆地西部坳陷晚三叠—早白垩世地层沉积相[J]. 四川地质学报, 2000, 20(3): 161-170.
QIU Dongzhou. Sedimentary facies of the Upper Triassic—Lower Cretaceous of the west Sichuan Basin depression[J]. Acta Geologica Sichuan, 2000, 20(3): 161-170.
- [4] 黄东, 杨跃明, 杨光, 等. 四川盆地侏罗系致密油勘探开发进展与对策[J]. 石油实验地质, 2017, 39(3): 304-310.
HUANG Dong, YANG Yueming, YANG Guang, et al. Countermeasure and progress of exploration and development of Jurassic tight oil in the Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(3): 304-310.
- [5] 陈世佳, 代鸿鸣, 王廷栋. 天然气储层沥青的生标物分布与干气运移[J]. 西南石油学院学报, 1993, 15(增刊1): 60-62.
CHEN Shijia, DAI Hongming, WANG Tingdong. Distribution of biomarkers and dry gas transport of natural gas reservoir bitumen[J]. Journal of Southwest-China Petroleum Institute, 1993, 15(S1): 60-62.
- [6] 徐宇轩, 代宗仰, 胡晓东, 等. 川东北沙溪庙组天然气地球化学特征及地质意义——以五宝场地区为例[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(1): 209-219.
XU Yuxuan, DAI Zongyang, HU Xiaodong, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Shaximiao Formation in northeastern Sichuan Basin: a case study from Wubaochang area[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(1): 209-219.
- [7] 梁狄刚, 冉隆辉, 戴弹申, 等. 四川盆地中北部侏罗系大面积非常规石油勘探潜力的再认识[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 8-17.
LIANG Digang, RAN Longhui, DAI Danshen, et al. A re-recog-

- dition of the prospecting potential of Jurassic large-area and non-conventional oils in the central-northern Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(1): 8-17.
- [8] 刘君龙, 纪友亮, 杨克明, 等. 川西地区中侏罗世前陆盆地河流层序结构及控制因素[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(1): 14-25.
LIU Junlong, JI Youliang, YANG Keming, et al. Sequence architecture and its controlling factors of Middle Jurassic fluvial successions in western Sichuan foreland basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(1): 14-25.
- [9] 杨跃明, 王小娟, 陈双玲, 等. 四川盆地中部地区侏罗系沙溪庙组沉积体系演化及砂体发育特征[J]. *天然气工业*, 2022, 42(1): 12-24.
YANG Yueming, WANG Xiaojuan, CHEN Shuangling, et al. Sedimentary system evolution and sandbody development characteristics of Jurassic Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(1): 12-24.
- [10] 张本健, 潘珂, 吴长江, 等. 四川盆地金秋气田侏罗系沙溪庙组多期砂组天然气复合成藏机理及模式[J]. *天然气工业*, 2022, 42(1): 51-61.
ZHANG Benjian, PAN Ke, WU Changjiang, et al. Compound gas accumulation mechanism and model of Jurassic Shaximiao Formation multi-stage sandstone formations in Jinqu gas field of the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(1): 51-61.
- [11] 郭贵安, 关旭, 肖富森, 等. 四川盆地中部侏罗系沙溪庙组致密砂岩气藏地震一体化描述技术[J]. *天然气工业*, 2022, 42(1): 40-50.
GUO Guian, GUAN Xu, XIAO Fusen, et al. Integrated seismic description technology for tight sandstone gas reservoir of Jurassic Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(1): 40-50.
- [12] 杨春龙, 苏楠, 芮宇润, 等. 四川盆地中侏罗统沙溪庙组致密气成藏条件及勘探潜力[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.
- [13] 刘占国, 陈娅娜, 倪超, 等. 川中地区中一下侏罗统砂岩储层特征[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2010, 32(2): 35-40.
LIU Zhanguo, CHEN Ya'na, NI Chao, et al. Characteristics of sandstone reservoirs of Middle-Lower Jurassic in central Sichuan area[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2010, 32(2): 35-40.
- [14] 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.
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.
- [15] 童崇光. 四川盆地构造演化与油气聚集[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
TONG Chongguang. Tectonic evolution and oil-gas accumulation of Sicuan Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.
- [16] 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
GUO Zhengwu, DENG Kangling, HAN Yonghui. The formation and development of Sichuan Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [17] 肖富森, 韦腾强, 王小娟, 等. 四川盆地川中一川西地区沙溪庙组层序地层特征[J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(9): 1216-1224.
XIAO Fusen, WEI Tengqiang, WANG Xiaojuan, et al. Research on the sequence stratigraphy of the Shaximiao Formation in Chuanzhong-Chuanxi area, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(9): 1216-1224.
- [18] 王小娟, 洪海涛, 吴长江, 等. 四川盆地川中地区侏罗系沙溪庙组致密砂岩储层特征及成因[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2022, 52(4): 1037-1051.
WANG Xiaojuan, HONG Haitao, WU Changjiang, et al. Characteristics and formation mechanisms of tight sandstone reservoirs in Jurassic Shaximiao Formation, central of Sichuan Basin[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2022, 52(4): 1037-1051.
- [19] 伊培荣, 彭峰, 韩云. 天然气地质学的新发展[J]. *天然气地球科学*, 1997, 8(4): 1-7.
YI Peirong, PENG Feng, HAN Yun. New developments in natural gas geology[J]. *Natural Gas Geoscience*, 1997, 8(4): 1-7.
- [20] 刚文哲, 高岗, 郝石生, 等. 论乙烷碳同位素在天然气成因类型研究中的应用[J]. *石油实验地质*, 1997, 19(2): 164-167.
GANG Wenzhe, GAO Gang, HAO Shisheng, et al. Carbon isotope of ethane applied in the analyses of genetic types of natural gas[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1997, 19(2): 164-167.
- [21] 王杰, 贾会冲, 孙晓, 等. 鄂尔多斯盆地富县古生界天然气成因及气源综合识别[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(9): 1476-1484.
WANG Jie, JIA Huichong, SUN Xiao, et al. Comprehensive evaluation on origin and source of natural gas in the Paleozoic in Fuxian area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(9): 1476-1484.
- [22] 杨春龙, 谢增业, 李剑, 等. 四川盆地中侏罗统沙溪庙组天然气地球化学特征及成因[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(8): 1117-1126.
YANG Chunlong, XIE Zengye, LI Jian, et al. Geochemical characteristics and genesis of natural gas in Shaximiao Formation of Middle Jurassic in Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(8): 1117-1126.
- [23] 肖富森, 黄东, 张本健, 等. 四川盆地侏罗系沙溪庙组天然气地球化学特征及地质意义[J]. *石油学报*, 2019, 40(5): 568-576.
XIAO Fusen, HUANG Dong, ZHANG Benjian, et al. Geochemical characteristics and geological significance of natural gas in Jurassic Shaximiao Formation, Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(5): 568-576.
- [24] 王玲辉, 赵虎, 沈忠民, 等. 四川中江气田沙溪庙组天然气成因类型及气源对比[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2017, 44(2): 158-163.
WANG Linghui, ZHAO Hu, SHEN Zhongmin, et al. Correlation of gas sources and genetic types of natural gas in Jurassic Shaximiao Formation of Zhongjiang gas field, Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2017, 44(2): 158-163.
- [25] 张道伟, 杨雨. 四川盆地陆相致密砂岩气勘探潜力与发展方向[J]. *天然气工业*, 2022, 42(1): 1-11.
ZHANG Daowei, YANG Yu. Exploration potential and develop-

- ment direction of continental tight sandstone gas in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(1): 1-11.
- [26] 范赛华, 谢辉, 李彬文, 等. 川西坳陷东坡地区沙溪庙组断裂对天然气富集的控制作用[J]. *中国地质*, 2022, 49(4): 1275-1284.
FAN Saihua, XIE Hui, LI Binwen, et al. Controlling effect of Shaximiao Formation fault on gas accumulation in eastern slope area of western Sichuan depression[J]. *Geology in China*, 2022, 49(4): 1275-1284.
- [27] 唐大海, 陈洪斌, 谢继容, 等. 四川盆地西部侏罗系沙溪庙组气藏成藏条件[J]. *天然气勘探与开发*, 2005, 28(3): 14-19.
TANG Dahai, CHEN Hongbin, XIE Jirong, et al. Reservoir forming conditions of Jurassic Shaximiao Formation, West Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2005, 28(3): 14-19.
- [28] 李忠平, 冉令波, 黎华继, 等. 窄河道远源致密砂岩气藏断层特征及天然气富集规律——以四川盆地中江气田侏罗系沙溪庙组气藏为例[J]. *天然气工业*, 2016, 36(7): 1-7.
LI Zhongping, RAN Lingbo, LI Huaji, et al. Fault features and enrichment laws of narrow-channel distal tight sandstone gas reservoirs; a case study of the Jurassic Shaximiao Fm gas reservoir in the Zhongjiang gas field, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(7): 1-7.
- [29] 郭彤楼, 王勇飞, 叶素娟, 等. 四川盆地中江气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. *石油学报*, 2022, 43(1): 141-155.
GUO Tonglou, WANG Yongfei, YE Sujuan, et al. Accumulation conditions and key technologies for exploration and development of Zhongjiang gas field in Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(1): 141-155.
- [30] 刘致水, 王康宁, 包乾宗, 等. 致密砂岩储层岩石物理横波速度预测方法——以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. *石油学报*, 2022, 43(9): 1284-1294.
LIU Zhishui, WANG Kangning, BAO Qianzong, et al. Prediction method of rock physics S-wave velocity in tight sandstone reservoir; a case study of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(9): 1284-1294.
- [31] 曾焱, 黎华继, 周文雅, 等. 川西坳陷东坡中江气田沙溪庙组复杂“窄”河道致密砂岩气藏高产富集规律[J]. *天然气勘探与开发*, 2017, 40(4): 1-8.
ZENG Yan, LI Huaji, ZHOU Wenya, et al. High-yield enrichment laws of Shaximiao Formation tight sandstone gas reservoir of complex “narrow” channel in Zhongjiang gas field, in the eastern slope of west Sichuan depression[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2017, 40(4): 1-8.
- [32] 付蕾, 张本健, 曹正林, 等. 四川盆地川中地区侏罗系沙溪庙组不同类型砂体地质特征及地震精细雕刻[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(1): 85-93.
FU Lei, ZHANG Benjian, CAO Zhenglin, et al. Geological characteristics and seismic fine description of different types of sand bodies in Jurassic Shaximiao Formation in central Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(1): 85-93.
- [33] ZHANG Xiaojun, FU Meiyuan, DENG Hucheng, et al. River channel pattern controls on the quality of sandstone reservoirs; a case study from the Jurassic Shaximiao Formation of western Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 205: 108925.
- [34] DONG Jun, LI Shubing, YE Sujuan, et al. Natural gas geochemistry of Jurassic Shaximiao Formation in the western Sichuan Basin, China: fault-controlled differentiation in accumulation process[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 942414.
- [35] 庞雄奇, 贾承造, 宋岩, 等. 全油气系统定量评价: 方法原理与实际应用[J]. *石油学报*, 2022, 43(6): 727-759.
PANG Xiongqi, JIA Chengzao, SONG Yan, et al. Quantitative evaluation of whole petroleum system: principle and application[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(6): 727-759.

(收稿日期 2022-11-15 改回日期 2023-02-03 编辑 雷永良)