

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

段文燊

(中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 成都 610041)

摘要: 基于对四川盆地中侏罗统下沙溪庙组多年的勘探实践, 研究了致密气成藏富集的关键条件, 认为下沙溪庙组致密气藏为多层叠置、整体含气的次生构造—岩性气藏, 具有明显的源控、相控、位控的“三元”控藏特点: ①下侏罗统自流井组、上三叠统须家河组暗色泥岩、碳质泥岩与煤层等多套源岩提供了天然气来源; ②冲积扇、三角洲相等沉积体系中的各类河道砂体和泥页岩组合形成的泥包砂结构是有利的富集组合体; ③广泛分布的“叶肢介页岩”或紫红色泥页岩层可以作为区域盖层; ④喜马拉雅运动之后形成的 3 大古隆起和 3 大拗陷, 隆拗相间, 发育了一系列下沙溪庙组顶部构造, 具有全盆地分布形成有利含气圈闭的条件; ⑤从须家河组断至下沙溪庙组的断层可以形成远源气藏的运移通道, 近源的自流井组烃源可以通过小断层或微裂缝就近输导。据此, 建立了下沙溪庙组致密气成藏模式, 认为下沙溪庙组具备形成大中型气田的基础, 川西地区勘探潜力最大, 川北及川南地区次之, 川中地区成藏条件配置较差, 勘探潜力较差。

关键词: 致密砂岩气; 成藏模式; 勘探潜力; 下沙溪庙组; 中侏罗统; 四川盆地

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

Exploration potential and favorable direction of tight gas in Middle Jurassic Xiashaximiao Formation in Sichuan Basin

DUAN Wenshen

(Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC Southwest Petroleum Company, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Tight gas is an important gas-pool type for natural gas resource and output increment in China. The Middle Jurassic Xiashaximiao Formation (J_2x) is an important target for the exploration of tight oil and gas in the Sichuan Basin. Based on decades of exploration practice and studies on accumulation conditions of tight gas, it was indicated that the J_2x formation gas reservoir is a secondary structural lithologic gas reservoir with multiple layers, and was constrained by source, position and sedimentary facies. The major characteristics of these reservoirs are (1) the dark mudstones, carbonaceous mudstones and coal seams in the Lower Jurassic Ziliujing and Upper Triassic Xujiahe formations provided abundant natural gas sources; (2) the mud-packed sand structure formed by the combination of various channel sand bodies and shale in sedimentary systems such as alluvial fans and deltas was favorable for the enrichment of natural gas; (3) the widely distributed “estheria shale” or purple-red mud shale layer acted as regional cap rock; (4) three major paleo-uplifts and three major depressions formed after the Himalayan Movement, developed a series of structures on the top of the Xiashaximiao Formation, which was favorable for the formation of gas-bearing traps distributed throughout the basin and (5) the faults from the Upper Triassic Xujiahe Formation to the Xiashaximiao Formation provided migration channels for far-source gas reservoirs, while gas in the Ziliujing Formation could migrate to near-source reservoirs through small faults or micro-fractures. Thus a tight gas accumulation model of the Xiashaximiao Formation was established. The Xiashaximiao Formation possesses the foundation for forming large and medium-sized gas fields. The western part of Sichuan Basin has the largest potential for gas exploration and followed by the northern and southern parts. In the central Sichuan Basin, the reservoir-forming conditions are poorly configured and made its exploration potential poor.

Key words: tight sandstone gas; accumulation pattern; exploration prospect; Xiashaximiao Formation; Middle Jurassic; Sichuan Basin

收稿日期: 2020-07-20; 修订日期: 2021-04-20。

作者简介: 段文燊 (1972—), 男, 博士, 高级工程师, 从事油气储层预测与井位部署研究。E-mail: 644379573@qq.com。

基金项目: 国家科技重大专项 (2016ZX05002-004) 资助。

致密气(本文的致密气指致密砂岩气)已成为全球天然气勘探的重点领域之一。按照渗透率和孔隙度的划分标准,致密砂岩泛指渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、孔隙度小于10%的砂岩^[1]。中国致密砂岩气分布范围广,在天然气资源量中所占比重较大,在探明地质储量中占到近40%^[1],是天然气勘探开发非常重要的组成部分。根据最新资评结果,致密砂岩气探明程度仅为10%左右,总体勘探程度较低,勘探潜力巨大。由于社会经济的发展,我国对天然气需求日益高涨,天然气进口量逐年增加,对外依存度也不断提高。因此,对天然气资源的勘探开发显得越来越迫切和重要。致密气作为天然气勘探的重要领域,将逐渐成为中国天然气产量的重要增长点。

四川盆地面积约 $19 \times 10^4 \text{ km}^2$,侏罗系下沙溪庙组沉积区超过了 $15 \times 10^4 \text{ km}^2$,在川西发现了新场、马井、中江、白马等多个气田,川中发现了公山庙气田,川南发现了大塔场气田,川东也有河道砂体储层发现,下沙溪庙组已经成为重要的天然气勘探开采层系。川西坳陷下沙溪庙组气藏气体成分主要为甲烷,不含 H_2S ,已经累计生产天然气超过 $30 \times 10^8 \text{ m}^3$,具有重要的经济价值、社会价值和环保意义。

下沙溪庙组作为致密砂岩气勘探的重要领域,研究及发表的文献较少,研究的工区零星分布在川西新场、川东北、赤水等探区,部分学者主要从沉积、烃源岩、储层、地震相、储层预测等进

行了研究^[2-14]。笔者自1997年以来,为支撑油气勘探开发工作,长期研究下沙溪庙组的地质、烃源、储层、油气运移与保存、圈闭、储层预测等问题,本文结合多个地区的研究成果,抛砖引玉,希望引起同行对下沙溪庙组致密砂岩气勘探开发的共鸣。

1 下沙溪庙组基本地质特征

四川盆地自晚三叠世以来,被龙门山、米仓山—大巴山和江南雪峰山四面围限,造山带向盆地内的轮番挤压控制了盆地的发育,形成共同主导的前陆盆地。下沙溪庙组顶部构造总体为川中高,川西、川北、川东及川南低的格局,川西和川北有-3 500 m的深凹,在中江—盐亭—仪陇形成了大型斜坡带(图1)。

下沙溪庙组发育多种类型碎屑岩沉积体系,地层岩性由灰、灰紫色厚层至块状长石石英砂岩、长石砂岩—紫红色粉砂岩、泥岩组成,粒度为粗粒、中粒至细粒等粒序有序组成,自下而上粒度由粗变细^[16];底部砂岩层位普遍含砾石,由2~4个不等厚的韵律层组成;每个韵律层下部砂岩均发育大型槽状层理、平行层理、斜层理;砂岩的厚度变化为数米至50 m左右^[16]。该组顶部为一套黄绿灰色页岩夹粉砂岩。川西南荣昌—自贡一带,还发育厚0.3~2 m的黑色页岩、油页岩的夹层,页岩夹层普遍含植物碎屑和少量植物化石,富含叶肢介化石,常称为“叶肢介页岩”,是盆地内上、下沙溪庙

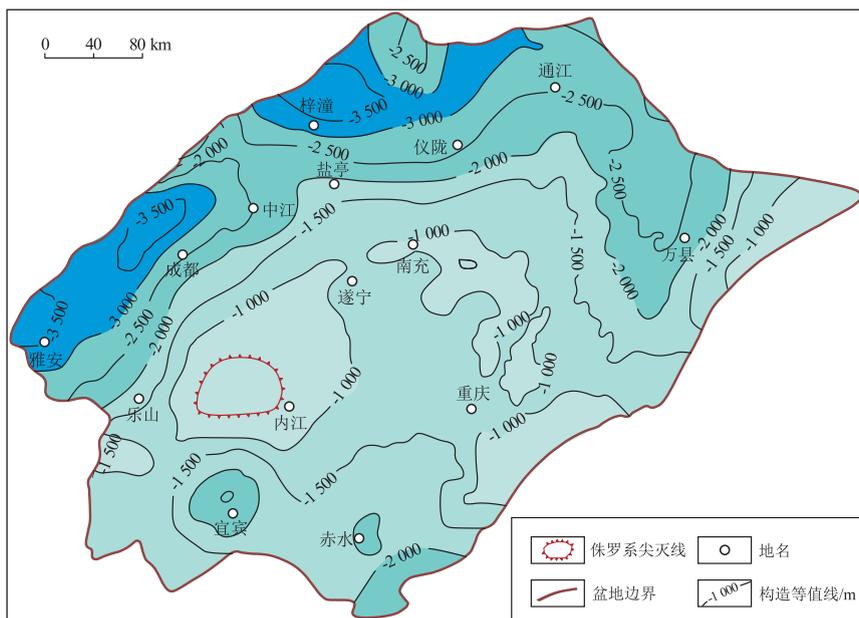


图1 四川盆地中侏罗统下沙溪庙组顶部构造埋深

Fig.1 Burial depth of structures on the top of Middle Jurassic Xiashaximiao Formation, Sichuan Basin

组地层分界的典型标志层。受燕山运动和龙门山、米仓山隆升的影响,下沙溪庙组沉积早期沉积环境变化较大,从盆地边缘至盆地内部为冲积扇、冲积平原、三角洲、浅湖相等沉积,形成了广泛分布的河道砂体,为下沙溪庙组提供了主要的储层沉积体系。

2 致密气富集地质条件

下沙溪庙组气藏为一多层叠置、整体含气的次生构造—岩性气藏,成藏条件的配置状况是其能否富集高产、稳产的重要条件,也是其实现高效勘探开发的基础。

2.1 烃源与运移

该气藏存在多套有利的烃源层段。下伏的下侏罗统自流井组 and 上三叠统须家河组须五段、须三段、须一段泥页岩为重要的烃源岩层系,可以提供丰富的天然气资源;川西—川北地区中侏罗统千佛崖组的泥页岩也具备较好的生烃能力。

2.1.1 自流井组烃源条件

自流井组湖相暗色泥岩及碳酸盐岩非常发育,自流井组大安寨段沉积期是四川盆地早侏罗世中期最大的一次湖侵期,构造活动较为平静,淡水生物大量繁殖生长,在大范围内分布着成层稳定的介屑灰岩与黑色泥页岩,烃源岩厚度多分布在 10~130 m 之间,可以形成良好的烃源。

自流井组暗色泥质岩有机碳含量为 0.07%~4.51%,平均为 1.19%;碳酸盐岩有机碳含量为 0.08%~1.54%,平均为 0.34%,均展示了自流井组

有较好的生烃潜力。泥质岩干酪根腐泥组含量很高,为 47%~79%;碳酸盐岩干酪根腐泥组含量为 33%~75%;源岩有机质类型主要为 II 型^[7],少数样品为 I 型,有机质类型较好。烃源岩 R_o 为 0.70%~1.12%,正处于成油高峰期,有利于油气的大量生成。从生烃强度平面图分析,仪陇地区为生烃强度最高的地区,达到了 $(80\sim 100)\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$ (图 2)。

2.1.2 须家河组烃源条件

须家河组烃源岩主要为暗色泥岩、碳质泥岩与煤层,暗色泥岩厚度较大,由盆地东南向西北逐渐增厚;煤层和碳质泥岩厚度相对较薄,且平面上变化较大。烃源岩厚度中心分布在川中以西地区,平均厚度 100~400 m,而广大川中地区厚度基本在 20~60 m。烃源岩演化程度由下向上逐渐降低,须一段、须三段、须五段的 R_o 值分别为 1.1%~2.2%,1.0%~1.8%,0.8%~1.4%,处于大量生气早、中期阶段。须家河组烃源岩具有川西厚度大、热演化程度高、生烃强度大(图 3)的特点,可以为上覆的侏罗系提供丰富的烃源,而川中和川南地区则具有厚度薄、演化程度低、生烃强度较低的特点,提供的烃源相对有限。

受燕山运动的影响,四川盆地发育大量东西向为主的断层;而在喜马拉雅运动的作用下,四川盆地又发育大量南北向为主的断层,断至须家河组的断层,为自流井组、须五段、须三段的烃源提供了向下沙溪庙组运移的良好通道。同时,下沙溪庙组底部受燕山运动和喜马拉雅运动的影响,还发育大量

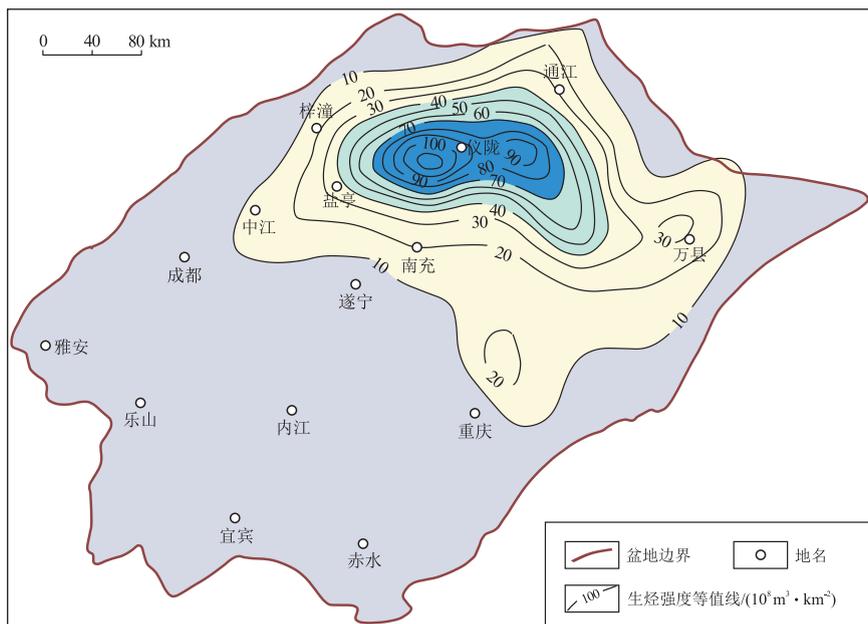


图 2 四川盆地地下侏罗统自流井组生烃强度平面分布

Fig. 2 Hydrocarbon generation intensity of Lower Jurassic Ziliujing Formation, Sichuan Basin

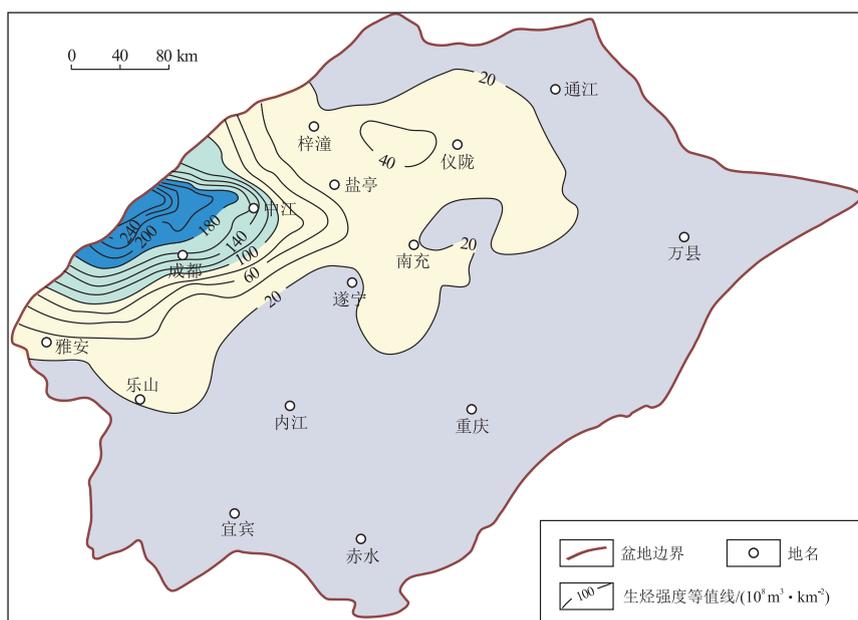


图 3 四川盆地上三叠统须家河组生烃强度平面分布

Fig.3 Hydrocarbon generation intensity of Upper Triassic Xujiahe Formation, Sichuan Basin

的微裂缝,由于生烃增压作用,这些微裂缝为千佛崖组、自流井组的烃源持续向上运移,并进入下沙溪庙组有效储层中聚集成藏提供了充足的通道。

2.2 储层

下沙溪庙组沉积环境主要为三角洲,水上、水下分流河道是主要的储集体。以中江地区为例,其储层孔隙类型以剩余粒间孔为主(图 4),粒间溶孔、粒内溶孔、晶间微孔、粒间微缝和解理缝等为辅;储层孔隙度平均为 8.64%,中值为 8.94%,主要分布在 7%~12%之间,占总样品数的 71.14%;渗透率平均值为 $0.78 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,中值为 $0.19 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,且主要分布在 $(0.08 \sim 0.64) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,占总样品数的 78.31%,属于中—低孔、低—特低渗储层。储层类型以孔隙型储层为主,少量裂缝—孔隙型储层,且随着孔隙度的增大,渗透率有明显变好的趋势,表明渗透率变化主要受孔隙发育程度控

制,储层的储集和渗透能力主要依赖于基质孔隙与喉道。

储层测井响应特征为“三低一高一中一负”,即低自然伽马、低中子、低密度,高声波,中等电阻率,自然电位相对负异常。声波时差、中子、密度等 3 种孔隙度曲线组合形态反映了储集性能的差异(图 5)。当地层含气性好时,声波时差升高,中子、密度测值降低,在测井曲线图上表现为密度与声波变化一致,与中子曲线出现反向交叉,即通常所说的中子“天然气挖掘效应”。当储层发育裂缝时,出现电阻率在高值背景下局部降低、声波跳跃的现象。

2.3 盖层与保存条件

下沙溪庙组内部的泥页岩可以作为直接盖层。由于泥页岩取心资料很少,据测井资料分析的泥页岩孔隙度均小于 3%,在含钙高的层段,甚

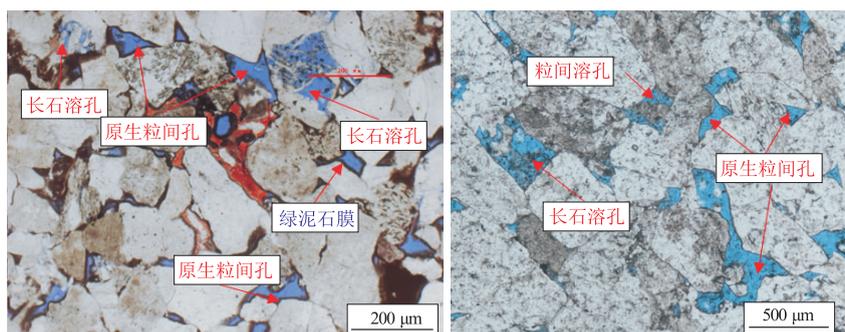


图 4 川西中江地区侏罗系下沙溪庙组储层孔隙特征

Fig.4 Pore characteristics of Jurassic Xiashaximiao Formation, Zhongjiang area, western Sichuan Basin

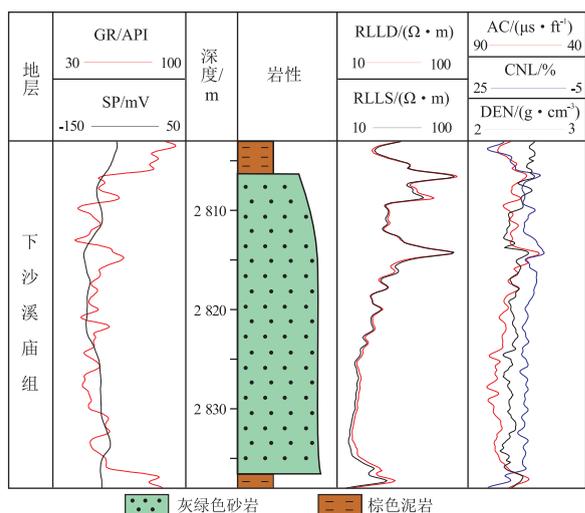


图 5 川西中江地区侏罗系下沙溪庙组储层测井响应特征

Fig.5 Logging response characteristics of Jurassic Xiashaximiao Formation, in Zhongjiang area, western Sichuan Basin

至小于 1%，因此可以作为较好的组内封隔层。由于水下分流河道为主要储集体，泥多砂少，呈现泥包砂的空间分布状态（图 6），由三维地震资料解释的条带状的河道砂体（红色—黄色）被广泛分布的泥页岩层（蓝色）包围，形成侧向封堵，有利于形成良好的横向封隔。广泛分布的“叶肢介页岩”或紫红色页岩层可以作为区域盖层，叶肢介页岩孔隙度一般小于 1%。这种泥包砂的组合结构非常有利于局部富集区的形成。

2.4 河道砂体识别与圈闭类型

河道砂体的识别、刻画和预测是寻找有利储集砂体和有利天然气富集区的关键。经过多年研究与勘探实践，建立了一套利用三维地震资料进行储层预测的方法技术^[11-12]，即三维可视化透

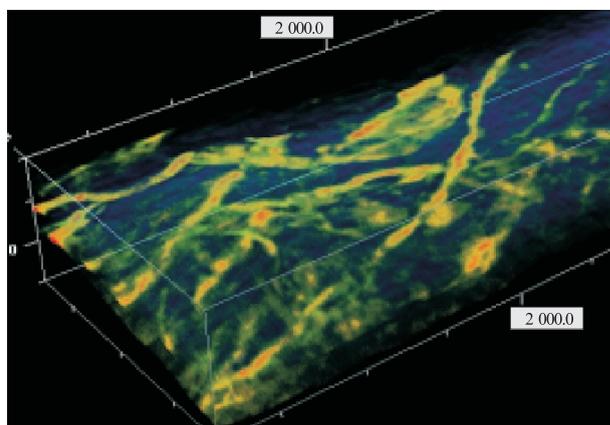


图 6 四川盆地侏罗系下沙溪庙组储层与直接盖层空间关系示意
亮色为储集砂体，暗色为盖层

Fig.6 Spatial relationship between Jurassic Xiashaximiao Formation reservoir and direct seal, Sichuan Basin

视数据体诊断与检测、精细解释振幅数据体描绘地震振幅异常平面展布、波阻抗反演与砂体预测、振幅+波阻抗+频率综合预测甜点。充分利用三维地震资料，结合沉积相、微相的研究，采用地震相、多属性融合、频谱分解等技术，对川西新场、合兴场、马井、中江、丰谷、洛带以及川北阆中—元坝、黔北赤水、川东涪陵等地区开展了砂体精细预测研究，识别、预测了典型的河道砂体，并得到了钻井资料的验证，证实了预测的可靠性。

根据盆地内现有的资料情况，以分布于四川盆地不同部位的 5 个工区为例（图 7）。川西 zj 工区清晰地展示了一条南北向分布的河道砂体，Z19 井证实砂体厚度 21.9 m，测井孔隙度 12.7%，渗透率 $0.17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，测试产量 $74\ 142 \text{ m}^3/\text{d}$ ，已经累计生产天然气超过 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，具有良好的经济价值。川北 lz 工区也清晰地展示了一条近东西向分布的河道砂体，lz2 井证实砂体厚度 35 m，气测全烃最高达 38%，具有良好的含气性。川南 gd 工区的 G9 井在下沙溪庙组钻遇 20 m 砂体，中途测试油气同产，产量为 $9.31 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，储层较为致密，孔隙度仅有 4.2%，渗透率也只有 $0.18 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。川中、川东等工区也在下沙溪庙组发现了类似的河道砂体，值得在进一步的勘探中引起业界的重视。此外，在水平井施工中，基于典型河道砂体的精细刻画和甜点储层的精确预测，可沿着河道砂体的轴向实施水平井，减少井场的建设费用，提高单井产量和气田的开发效益。

多期次构造运动形成的局部构造有利于油气向构造高部位聚集，河道或者条带状分布的砂体孔渗性较周围的泥页岩高，有利于油气向砂岩储层聚集，为形成岩性圈闭提供了基础，因此有利于在全盆地形成构造—岩性圈闭和岩性圈闭。在现今存在局部构造的地区，则有利于形成构造—岩性圈闭。例如川西的新场—丰谷构造带、龙泉山构造带、川北的通南巴构造带等；在川中古隆起的北部斜坡带、川南低缓褶皱带以及大巴山前缘，可以形成一系列的岩性圈闭。目前获得良好油气勘探成效的川西新场气田、中江气田，主要为构造—岩性圈闭。

3 成藏模式

四川盆地地下沙溪庙组油气运移受燕山运动和喜马拉雅运动的影响较大，构造运动为油气从须家河组、自流井组向上运移和组内调整提供了条件。燕山运动导致四川盆地内部以隆升为主，且隆起幅度和范围大，有利于油气向隆起部位运移聚集。喜

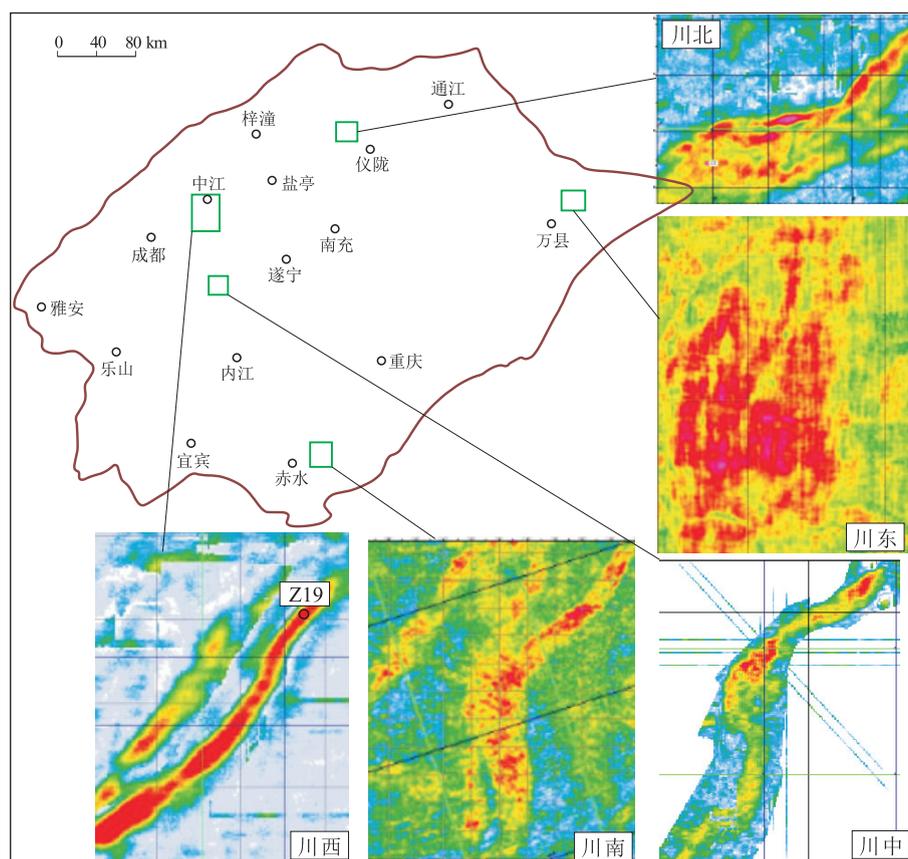


图7 四川盆地侏罗系下沙溪庙组储层分布预测示意

图中红色表示河道砂体

Fig.7 Reservoir distribution of Jurassic Xiashaximiao Formation, Sichuan Basin

马拉雅运动后,形成了三大古隆起,即龙门山山前古隆起、川中古隆起和华蓥山古隆起,以及三大拗陷,即川西拗陷、川北拗陷和川鄂拗陷,即形成“三拗三隆”的构造格局。这种拗隆配置的构造格局,有利于须家河组油气的再次运移和侏罗系气藏的调整,从而形成大面积分布的以侏罗系下沙溪庙组、上沙溪庙组、蓬莱镇组为代表的次生气藏。

作为这一动态成藏体系中的下沙溪庙组,其气藏特征为典型的下生上储的组合特征,形成三叠系—侏罗系的致密气次生成藏组合(图8)。须家河组、自流井组、千佛崖组烃源层提供气源;油气在非均质性较强的下沙溪庙组3~4套相对较高孔渗性的叠置河道砂体中聚集;燕山和喜马拉雅运动形成的断层、微裂缝提供了天然气运移通道;下沙溪庙组内部的泥页岩层形成直接的封隔层,遂宁组厚达200~300 m的泥页岩层形成区域盖层。沙溪庙组与上下岩石这种储盖组合、烃源与运移通道在空间的不同配置,利于形成不同的成藏组合。如在局部构造发育的部位,利于天然气富集形成构造—岩性气藏;在构造不发育的斜坡部位,基于砂体尖灭和局部孔渗变化,利于形成非均质性更强的

岩性气藏。

这种成藏组合及天然气运聚表现出明显的特征,即源控——近烃源岩、相控——储层位于三角洲前缘及平原(水下)分流河道优势沉积微相及有利成岩相,位控——圈闭位于相对高部位并有断层沟通烃源。据此建立了下沙溪庙组致密气成藏模式(图8),近源—相带控富、断裂—构造控聚的成藏模式,具有典型的源控、相控、位控的“三元”控藏特征。

4 勘探前景及有利勘探方向

基于成藏富集条件和成藏模式的研究,认为下沙溪庙组气藏为一多层叠置整体含气的次生构造—岩性气藏,具有良好的天然气成藏地质条件,具备形成大中型气田的地质基础。四川盆地在喜马拉雅运动之后形成了“三隆三拗”的构造格局,发育的一系列局部构造,有利于天然气的聚集和成藏。但不同的局部构造,由于其成藏地质条件的差异,勘探前景略有不同。根据四川盆地沙溪庙组的构造格局,结合对烃源岩、储盖层及保存条件的匹配关系研究,划分为如下5个区带(图9)进行分析。

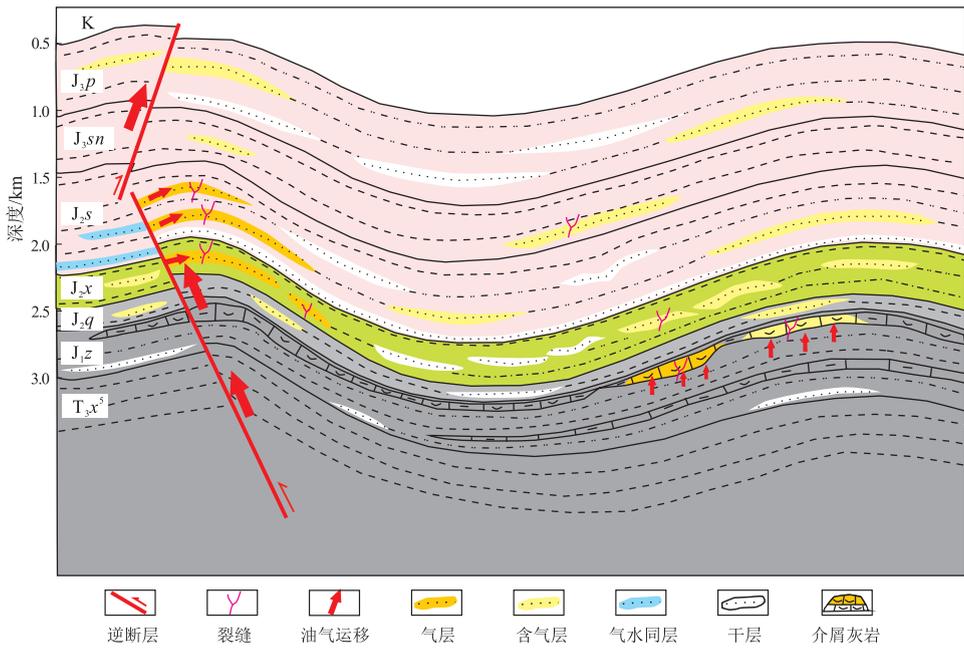


图 8 四川盆地侏罗系下沙溪庙组天然气成藏模式

Fig.8 Gas accumulation pattern of Jurassic Xiashaximiao Formation, Sichuan Basin

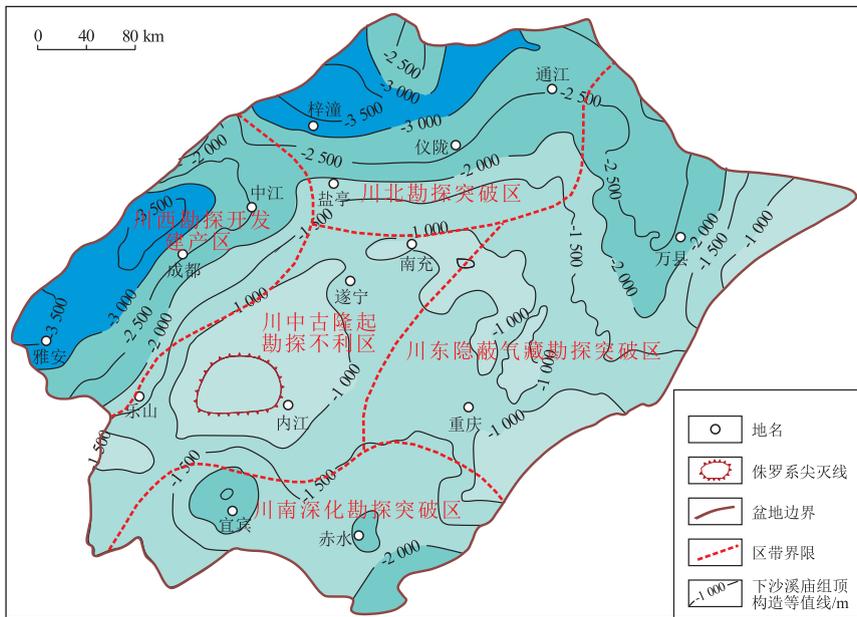


图 9 四川盆地侏罗系下沙溪庙组勘探开发前景预测

Fig.9 Exploration prospect of Jurassic Xiashaximiao Formation, Sichuan Basin

(1)川西地区,须家河组烃源条件优越,构造深度-2 500~ -3 000 m,局部构造发育的新场—丰谷构造带、龙泉山构造带、中江—回龙构造带及成都凹陷内部的凹中隆构造是有利的勘探开发地区。目前已经在新场、马井、中江、高庙子等建成了大中型气田,有望持续发现新的气田,实现新的增储增产。

(2)川北地区,自流井组和千佛崖组烃源充足,小断层和微裂缝发育,构造深度-2 000 ~

-3 000 m,有利于在下沙溪庙组聚集成藏。通南巴构造带及川中隆起北部斜坡的局部构造,将是加强勘探、实现油气发现的有利地区。前期专层井勘探很少,过路井已经在阆中、八角场、通南巴等发现了油气显示,在没有储层改造的条件下产量较低,有望通过专层井储层改造,获得具有经济价值的油气发现。建议该地区加大勘探力度,结合新的增产工艺技术的应用,实现新的增储增产。

(3)川南地区,由于须家河组的烃源条件较川

西、川北差,自流井组灰岩层较厚,在断层不发育的地区,油气难以运移聚集,成藏条件总体较差。但在川南地区的凹中隆构造仍然存在局部富集的构造条件,存在油气垂向及侧向运移的可能。通过深化研究,有望实现新的勘探目标。前期已经在凹中隆的观音场构造、大塔场构造、官渡构造发现了天然气藏。

(4)川东南地区,华蓥山扫帚状构造带的大多数局部构造核部下沙溪庙组已经剥蚀殆尽,不具备基本成藏条件。在局部高陡构造不发育的向斜或者斜坡区,通过三维地震勘探,有望发现局部的凹中隆构造或者局部岩性圈闭,在自流井组丰富烃源的支撑下,形成局部富集的隐蔽气藏。

(5)川中地区,自流井组的烃源发育,但下沙溪庙组埋藏较浅或局部剥蚀,虽然发育有河道砂体,但是油气的保存条件较差,难以规模聚集,因此总体成藏条件较差,暂时不宜作为勘探目标。

因此,除川中古隆起区之外,下沙溪庙组具有全盆地分布的含气圈闭,具有进行规模化致密气勘探开发的条件。

5 结论

(1)通过对四川盆地地下沙溪庙组烃源、储层、构造、盖层、运移、保存、圈闭等基本成藏地质条件的研究,认为下沙溪庙组具有良好的天然气成藏地质条件,具备形成大中型气田的地质基础。

(2)建立了四川盆地地下沙溪庙组致密气成藏模式,即:近源—相带控富、断裂—构造控聚,具有明显“三元”控藏特征。

(3)基于三维地震资料建立的精细河道砂体预测技术,能有效预测有利储集砂体,特别是河道砂体的精确预测,为水平井实施提供了轨迹设计和优化的条件,有利于进行规模勘探开发。

(4)四川盆地地下沙溪庙组致密气勘探潜力大,特别是烃源配置较好的川西地区、川北地区,是近期加快勘探的重点地区;川南地区是进一步深化研究、优选勘探目标的地区。

参考文献:

[1] 戴金星,倪云燕,吴小奇.中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J].石油勘探与开发,2012,39(3):257-264.
DAI Jinxing, NI Yunyan, WU Xiaoqi. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 257-264.

[2] 汪泽成,邹才能,陶士振,等.大巴山前陆盆地形成及演化与油气勘探潜力分析[J].石油学报,2004,25(6):23-28.

WANG Zecheng, ZOU Caineng, TAO Shizhen, et al. Analysis on tectonic evolution and exploration potential in Dabashan Foreland Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 25(6): 23-28.

[3] 郑荣才,彭军,吴朝容.陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义[J].沉积学报,2001,19(2):249-255.
ZHENG Rongcai, PENG Jun, WU Chaorong. Grade division of base-level cycles of terrigenous basin and its implications [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 249-255.

[4] 陈恭洋,晋静,罗迎春,等.沉积相控制下致密砂岩气藏分布特征:以四川盆地川西坳陷中段蓬莱镇组为例[J].石油与天然气地质,2017,38(3):467-477.
CHEN Gongyang, JIN Jing, LUO Yingchun, et al. Characteristics of tight sandstone gas reservoir distribution under control of sedimentary facies: a case study from the Penglaizhen Formation in the central Western Sichuan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 467-477.

[5] 文华国,郑荣才,叶泰然,等.米仓山—大巴山前陆盆地地下沙溪庙组高分辨率层序地层学特征[J].矿物岩石,2005,25(1):83-90.
WEN Huaguo, ZHENG Rongcai, YE Tairan, et al. High resolution sequence stratigraphy of the Lower Shaximiao Formation in the foreland basin of Micang-Daba Mountain [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2005, 25(1): 83-90.

[6] 黄滢竹,龚文平,张方.成都凹陷下沙溪庙组物源分析[J].长江大学学报(自然版),2014,11(31):35-38.
HUANG Yingzhu, GONG Wenping, ZHANG Fang. Study on provenance of Lower Shaximiao Formation in Chengdu Sag [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2014, 11(31): 35-38.

[7] 王玮,黄东,易海永,等.淡水湖相页岩小层精细划分及地球化学特征:以四川盆地侏罗系大安寨段为例[J].石油实验地质,2019,41(5):724-730.
WANG Wei, HUANG Dong, YI Haiyong, et al. Stratigraphic division and geochemical characteristics of freshwater lacustrine shale: a case study of Jurassic Da'anzhai section, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2019, 41(5): 724-730.

[8] 钱利军,欧蔚华,郝强.川西孝泉下沙溪庙组储层特征研究及主控因素[J].中国西部科技,2015,14(10):33-36.
QIAN Lijun, OU Lihua, HAO Qiang. Reservoir characteristics and influencing factors of the Middle Jurassic formation in Xiaquan area of western Sichuan [J]. Science and Technology of West China, 2015, 14(10): 33-36.

[9] 叶素娟,吕正祥.川西新场气田下沙溪庙组致密储层特征及储集性影响因素[J].矿物岩石,2010,30(3):96-104.
YE Sujuan, LÜ Zhengxiang. Reservoir characterization and factors influencing reservoir characteristics of the Lower Shaximiao Formation in Xinchang gas field, western Sichuan, China [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2010, 30(3): 96-104.

[10] 陈迎宾,王彦青,胡焯.川西坳陷中段侏罗系气藏特征与富集主控因素[J].石油实验地质,2015,37(5):561-565.
CHEN Yingbin, WANG Yanqing, HU Ye. Characteristics and main factors controlling the Jurassic gas reservoirs in the middle section of the Western Sichuan Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(5): 561-565.

- ZHAO Guoying, YAN Wei, CHEN Guangjin, et al. Measurement and calculation of high-pressure interfacial tension of methane+nitrogen/water system[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2002, 26(1): 75-82.
- [22] 刘濮毓. 柴北缘西段古近系盖层封闭能力综合评价[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020: 39-40.
- LIU Puyu. Comprehensive evaluation of sealing ability of Paleogene caprocks in the western part of the northern margin, Qaidam Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020: 39-40.
- [23] 张连英. 高温作用下泥岩的损伤演化及破裂机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- ZHANG Lianying. Research on damage evolution and fracture mechanisms of mudstone under high temperature[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [24] 吕延防, 张绍臣, 王亚明. 盖层封闭能力与盖层厚度的定量关系[J]. 石油学报, 2000, 21(2): 27-30.
- LV Yanfang, ZHANG Shaochen, WANG Yaming. Research of quantitative relations between sealing ability and thickness of caprock[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(2): 27-30.
- [25] 张蕾. 盖层物性封闭力学机制新认识[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(1): 112-116.
- ZHANG Lei. Reevaluation of caprock physical sealing mechanic[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(1): 112-116.
- [26] 付广, 张发强, 吕延防. 厚度在泥岩盖层封盖油气中的作用[J]. 天然气地球科学, 1998, 9(6): 20-25.
- FU Guang, ZHANG Faqiang, LV Yanfang. The function of thickness in sealing oil and gas by mudstone caprock[J]. Natural Gas Geoscience, 1998, 9(6): 20-25.
- [27] 俞凌杰, 范明, 刘伟新, 等. 盖层封闭机理研究[J]. 石油实验地质, 2011, 33(1): 91-95.
- YU Lingjie, FAN Ming, LIU Weixin, et al. Seal mechanism of cap rocks[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1): 91-95.
- [28] 林潼, 王孝明, 张璐, 等. 盖层厚度对天然气封闭能力的实验分析[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(3): 322-330.
- LIN Tong, WANG Xiaoming, ZHANG Lu, et al. Experimental analysis of the effect of caprock thickness on sealed natural gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(3): 322-330.
- [29] 付晓飞, 吴桐, 吕延防, 等. 油气藏盖层封闭性研究现状及未来发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3): 454-471.
- FU Xiaofei, WU Tong, LYU Yanfang, et al. Research status and development trend of the reservoir caprock sealing properties[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3): 454-471.

(编辑 黄娟)

(上接第431页)

- [11] 王威, 徐国盛, 倪更生, 等. 川西苏码头构造侏罗系次生气藏成藏条件研究[J]. 石油实验地质, 2009, 31(1): 74-78.
- WANG Wei, XU Guosheng, NI Gengsheng, et al. The research on accumulation condition for secondary gas pool in Penglaizhen Formation, the Sumatou structure of west Sichuan[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2009, 31(1): 74-78.
- [12] 段文燊, 张虹. 新场气田 J_3p 含气砂体预测研究[J]. 矿物岩石, 1999, 19(2): 37-40.
- DUAN Wenshen, ZHANG Hong. The research on the prediction of J_3p gas-bearing sand of Xinchang gas field[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1999, 19(2): 37-40.
- [13] 段文燊, 吴朝容. 川西岩性气藏地震勘探关键技术研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2011, 33(4): 1-6.
- DUAN Wenshen, WU Chaorong. Key technologies of seismic exploration in lithologic gas reservoir of western Sichuan[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011, 33(4): 1-6.
- [14] 吴朝容, 段文燊, 蒋晓红. 河道砂体识别技术[J]. 石油物探, 2003, 42(2): 204-207.
- WU Chaorong, DUAN Wenshen, JIANG Xiaohong. Identification of channel sand[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2003, 42(2): 204-207.
- [15] 王旭, 李祖友, 严小勇, 等. 川西侏罗系气藏动态特征及开采对策[J]. 中外能源, 2015, 20(2): 53-60.
- WANG Xu, LI Zuyou, YAN Xiaoyong, et al. Dynamic character and production countermeasure for Jurassic gas reservoirs in west Sichuan[J]. Sino-Global Energy, 2015, 20(2): 53-60.
- [16] 王大洋, 王峻. 川西前陆盆地中侏罗统沙溪庙组沉积相及平面展布特征研究[J]. 四川地质学报, 2010, 30(3): 255-259.
- WANG Dayang, WANG Jun. Sedimentary facies and its distribution of the Middle Jurassic Shaximiao Formation in the West Sichuan Foreland Basin[J]. Acta Geologica Sichuan, 2010, 30(3): 255-259.

(编辑 徐文明)