

四川盆地大安探区须家河组致密气成藏条件与勘探领域

罗瑀峰¹, 厚刚福², 刘占国², 熊加贝¹, 伍松林², 芮昀¹,
陈星渝², 袁晓俊¹, 宋兵², 伍劲², 刘少治²

1 中国石油浙江油田公司勘探开发研究院; 2 中国石油杭州地质研究院

摘要 四川盆地大安探区为复杂构造变形区,为了厘清须家河组致密气成藏条件,落实下一步勘探领域,对其烃源岩、沉积体系、致密砂岩储层和圈闭条件开展系统研究。结果表明:①大安探区须家河组发育浅水三角洲沉积体系,须四段和须六段发育多期三角洲平原亚相辫状分流河道,砂体叠置连片分布,受压实作用和胶结作用的影响,储层普遍致密,后期溶蚀作用和裂缝有效改善了储层物性。②须三段和须五段为研究区主力烃源岩层,烃源岩厚度大、面积广、有机质丰度高,以Ⅲ型和Ⅱ₂型干酪根为主,目前处于成熟—高成熟阶段,为大安探区致密气成藏奠定了资源基础。③须四段和须六段致密砂岩储层在垂向上与须三段和须五段烃源岩成不等厚互层,构成下生上储式源储组合,有利于形成构造气藏;须三段和须五段主力烃源岩层内部发育“泥包砂”型曲流河河道致密砂岩储层,源储一体,构成自生自储式源储组合,有利于形成透镜状构造—岩性气藏。提出了丹凤场构造带背斜主体部位和临江向斜北、临江向斜中、临江向斜南、云锦向斜东等构造翼部的须四段和须六段为下一步构造气藏重点接替领域;丹凤场背斜、来苏向斜北和临江向斜中部的须三段和须五段源储一体,有利于形成“泥包砂”型构造—岩性气藏,为下一步致密气的潜在探索领域。

关键词 浅水三角洲;致密砂岩气;成藏模式;勘探领域;须家河组;大安探区;四川盆地

中图分类号:TE122.1 **文献标识码**:A

引用: 罗瑀峰, 厚刚福, 刘占国, 等. 四川盆地大安探区须家河组致密气成藏条件与勘探领域[J]. 海相油气地质, 2025, 30(2):157-166.

LUO Yufeng, HOU Gangfu, LIU Zhanguo, et al. The formation conditions and exploration fields of tight gas of Xujiache Formation in Da'an exploration area, Sichuan Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2025, 30(2):157-166.

0 前言

致密气是指覆压基质渗透率小于或等于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩气层,单井一般无自然产能或自然产能低于工业气流下限,在一定经济条件和技术措施下可获得工业天然气产量^[1]。致密气研究起步于20世纪50年代,加拿大阿尔伯达盆地巨型深盆地气藏^[2]、美国圣胡安盆地的隐蔽气藏、美国Raton盆地的盆地中心气等致密气先后获得较为可观的勘探突破和储量发现^[3-5]。与国外相比,国内致密气研究起步较晚,虽然早在20世纪70年代初发现了中坝气田^[6],但直到20世纪90年代才认识到其属于致密气藏的范畴。自2014年起,苏里格气田致密气年产

量连续6年保持在 $230 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上,2020年的年产量更是超过 $260 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[7],揭开了中国致密气勘探开发的新篇章。2020年以来,四川盆地金秋地区沙溪庙组致密气勘探获得重大突破^[8],新增天然气地质储量近 $3000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。此外,近年来在准噶尔盆地八道湾组、塔里木盆地巴什基奇克组以及吐哈盆地水西沟群也相继获得致密气勘探发现,展现出中国致密气广阔的勘探前景。

四川盆地致密气资源也相当丰富,其中三叠系须家河组是主要产层,总地质资源量为 $3.15 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占四川盆地致密气总地质资源量的79%,资源基础雄厚,勘探潜力大。截至目前,四川盆地须家河组提交天然气三级储量 $14257.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中探明

收稿日期:2024-10-09;改回日期:2024-12-03

本文受中国石油天然气股份有限公司基础性前瞻性重大科技专项(编号:2023ZZ02)资助

第一作者: 罗瑀峰, 硕士, 工程师, 主要从事油气勘探研究工作。通信地址:311100 浙江省杭州市余杭区荆山湾路9号;E-mail: luoyf85@petrochina.com.cn

通信作者: 厚刚福, 硕士, 高级工程师, 主要从事沉积储层及油气勘探方面的研究。通信地址:310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号;E-mail: hougf_hz@petrochina.com.cn

储量主要集中于盆地东南部的前陆盆地隆起区。前陆盆地隆起区经历了多期构造变形活动,属于复杂构造变形区,但目前对复杂构造变形区致密气成藏要素时空配置与气藏富集规律的认识不明确,无法落实下一步的勘探领域,严重制约了致密气勘探发现和规模增储。为了探讨以上问题,寻找新的勘探接替领域,本文以大安探区须家河组为例,通过对烃源岩特征、沉积体系、储层特征及圈闭特征的详细分析,系统梳理了致密气的成藏条件及富集规律,建立成藏模式,以期为四川盆地复杂构造变形区下一步致密气勘探提供地质依据,同时也为国内外具有类似地质条件的其他盆地致密气勘探提供些许借鉴和参考。

1 地质概况

四川盆地位于扬子地块西部,其四周为高大山系所环绕,西以龙门山断褶带为界,东北部与大巴山断褶带相接,西南部毗邻峨眉瓦山块断带,东南部接川湘拗陷断褶带。盆地轴向北东,呈菱形,面积约 $19\times 10^4\text{ km}^2$ 。中三叠世末,受印支早幕运动的

影响,龙门山岛链开始缓慢上升,四川盆地逐渐由海盆转变为陆盆,盆地性质也由克拉通盆地演化为前陆盆地,沉降中心位于龙门山前的川西凹陷,凹陷以东主要为宽缓的前陆盆地斜坡区及隆起区。

大安探区在大地构造位置上处于四川盆地东南华蓥山断裂西南端帚状构造发育区,位于川南低陡褶皱带、川东高陡褶皱带2个二级构造单元的交界处,整体呈现隆洼相间的构造格局,发育隔档式褶皱,印支运动、燕山运动以及喜马拉雅运动等多期构造活动的相互叠加及改造控制着研究区现今构造的形成演化,区内发育西山—新店子—龙洞坪、西温泉—东山—黄瓜山—坛子坝、丹凤场—花果山—六合场、温南—走马场—临峰场等4个背斜构造带,板桥—来苏—云锦、临江、璧山—护国寺等3个向斜构造带(图1a)。上三叠统须家河组是在中、下三叠统碳酸盐岩之上沉积的一套西厚东薄、呈箕状分布的以砂、泥岩为主的“三明治”结构沉积建造^[9],最大厚度达3 000 m。根据沉积旋回特征,可将四川盆地须家河组划分为六段,在研究区仅发育须三段、须四段、须五段和须六段(图1b)。其中须三段和须五段以沼

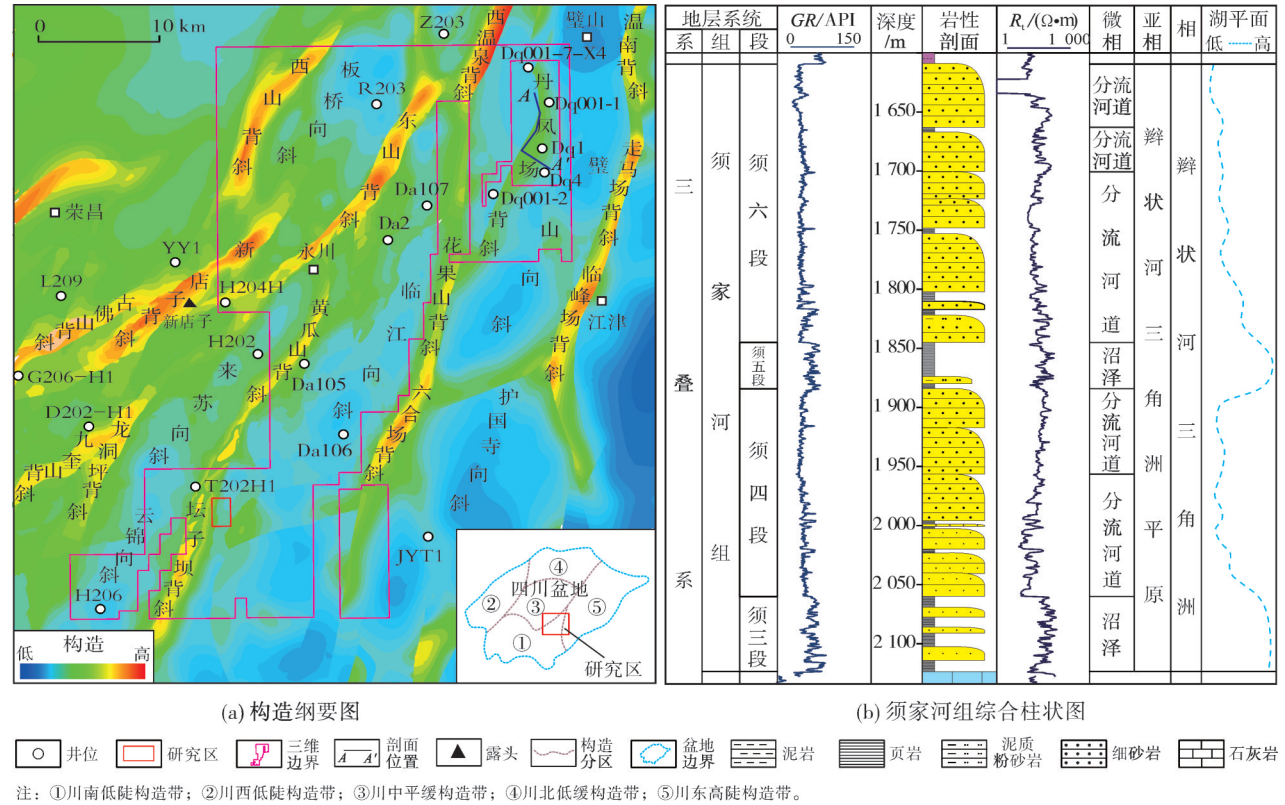


图1 四川盆地大安探区构造纲要及须家河组综合柱状图

Fig. 1 Structural outline and comprehensive column of Xujiahe Formation of Da'an exploration area in Sichuan Basin

泽相泥岩沉积为主,主要发育暗色泥岩和碳质泥岩,为须家河组主力烃源岩层和盖层;须四段和须六段以河流相、三角洲相砂岩沉积为主,砂体在平面上分布极为稳定,但相变较快,非均质性强,为须家河组主力含气层段。在垂向上,烃源岩与储层近距离或直接接触、交互叠置,呈现出下生上储式源储配置关系^[10-11],有利于天然气规模聚集成藏,勘探潜力大。

2 致密气成藏条件

2.1 烃源岩条件

研究区发育须三段和须五段2套烃源岩(图2)。烃源岩的岩性主要为深灰色泥岩和碳质泥岩,为典型的煤系烃源岩^[12],分布较稳定。须三段烃源岩厚度通常介于20~90 m,最大可达100 m以上;须五段

烃源岩厚度通常介于20~50 m,最大可达70 m以上。对4口钻井和新店子剖面的34块泥岩样品的分析表明,须家河组为中等—较好烃源岩,具备一定的生烃潜力:须三段 TOC 介于 2.57%~3.00%, 平均 2.80%;须五段 TOC 介于 1.14%~2.24%, 平均 1.86% (图3);显微组分测定显示,干酪根类型主要为腐泥组(无定形体)和惰质组(藻类体),烃源岩有机质类型为Ⅱ₂型和Ⅲ型;镜质组反射率(R_o)为0.97%~1.29%,指示烃源岩有机质热演化处于成熟—高成熟阶段,表明盆地东南部须家河组烃源岩已进入规模生气阶段。另外,大安探区须家河组天然气干燥系数约为1.1,相对偏小,甲烷碳同位素组成($\delta^{13}C_1$)多处于-37.0‰~-36.0‰,相对偏轻,这都指示天然气主要源于自身煤系腐殖型烃源岩。

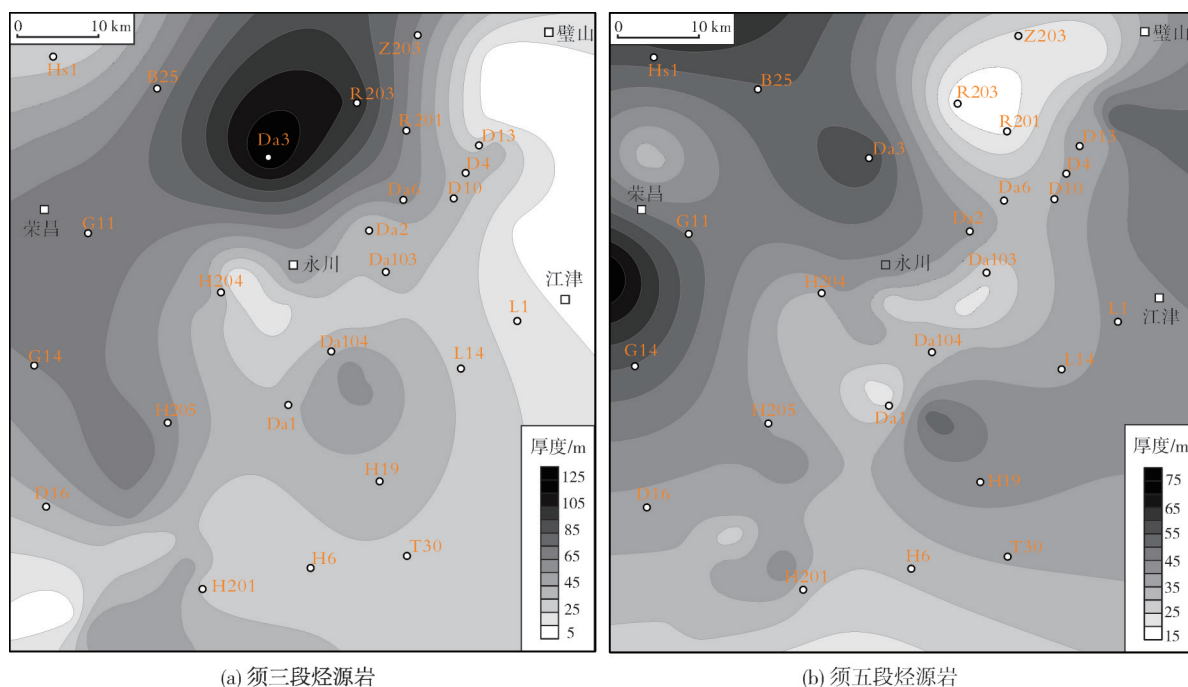


图2 四川盆地大安探区须三段、须五段烃源岩厚度分布图

Fig. 2 Source rock thickness contour maps of the 3rd and 4th members of Xujiache Formation in Da'an exploration area, Sichuan Basin

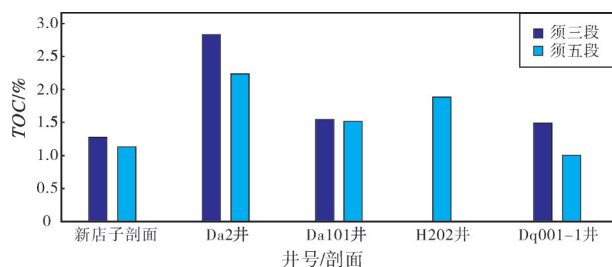


图3 大安探区须三段、须五段烃源岩有机碳含量直方图

Fig. 3 TOC histogram of source rocks of the 3rd and 5th members of Xujiache Formation in Da'an exploration area

2.2 沉积与储层条件

2.2.1 沉积体系与砂体分布特征

前人对四川盆地东南部须家河组沉积体系和砂体分布规律的研究较少,尤其对大安探区须家河组沉积体系的研究鲜有报道^[13]。本次研究通过对3条野外露头 and 5口井共计40 m的岩心观察、30块薄片鉴定,结合60口井的录井、测井相及1 000 km²三维地震相分析,厘清了研究区须家河组沉积体系

与砂体分布规律。

川东南地区须三段和须五段岩性主要包括细砂岩、粉砂岩和页岩,垂向上呈“泥包砂”结构,局部可见极为明显的河道二元结构(图4a),且单期河道在侧向上逐渐尖灭,厚层泥岩中见层状煤(图4b-d)及植物碎片、植物根系化石(图4e),指示须三段和须五段水动力条件较弱,主要发育河流—三角洲平原沉积,泛滥平原沼泽环境占主体地位(图5),以泥岩和碳质泥岩沉积为主,厚度30~50 m不等,局部夹薄层细砂岩和泥质粉砂岩条带,自然伽马测井曲线表现为微齿状高伽马特征(图1b)。

须四段和须六段规模砂体发育,单层厚度大,通常大于20 m。岩性主要包括中砂岩、细砂岩和少

量粉砂岩,粒度相对较粗,在垂向上呈正旋回样式,自然伽马测井曲线表现为钟形或箱形(图1b)。单套砂体底部发育冲刷面(图4f),砂岩中亦可见大量古树木、古树叶化石(图4g),呈就地倒伏状埋藏,未经长距离搬运,局部还可见古土壤层(图4h)。砂岩中还可见大量泥砾(图4i)及杂乱分布的碳屑和泥质撕裂屑(图4j),指示须四段和须六段主要发育三角洲平原亚相,主要发育辫状河分流河道微相砂体。须四段砂体厚度介于120~200 m,砂地比为80%~90%;须六段砂体厚度介于125~220 m,砂地比为85%~95%。辫状河分流河道微相砂体呈毯式大范围分布,面积可达3 000 km²(图5),为致密砂岩储层的发育奠定了基础。

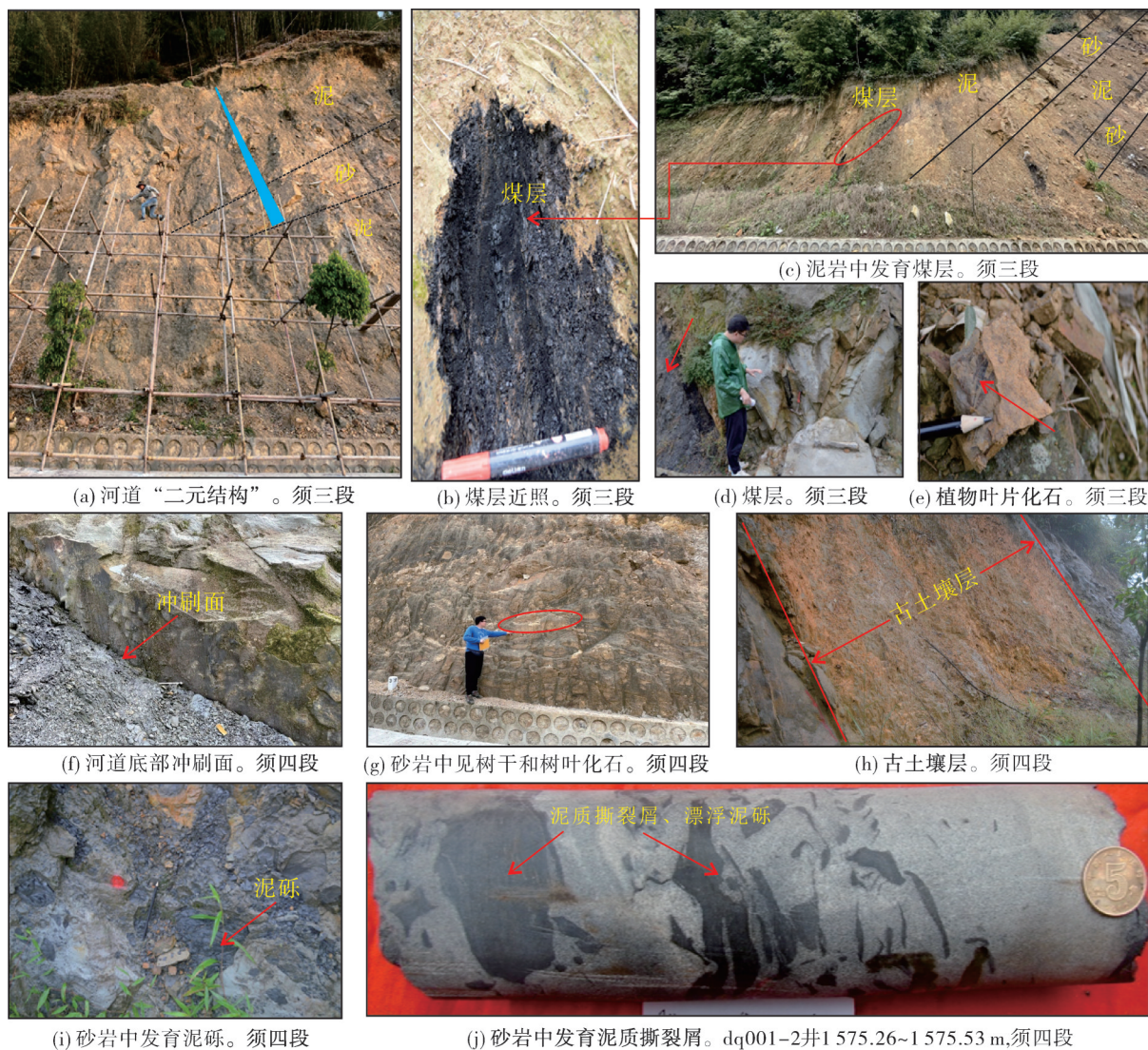


图4 大安探区须家河组新店子剖面、Dq001-2井辫状河三角洲平原典型沉积构造

Fig. 4 Typical sedimentary structures of braided river delta plain in Xindianzi section and Dq001-2 well of Xujiahe Formation in Da'an exploration area

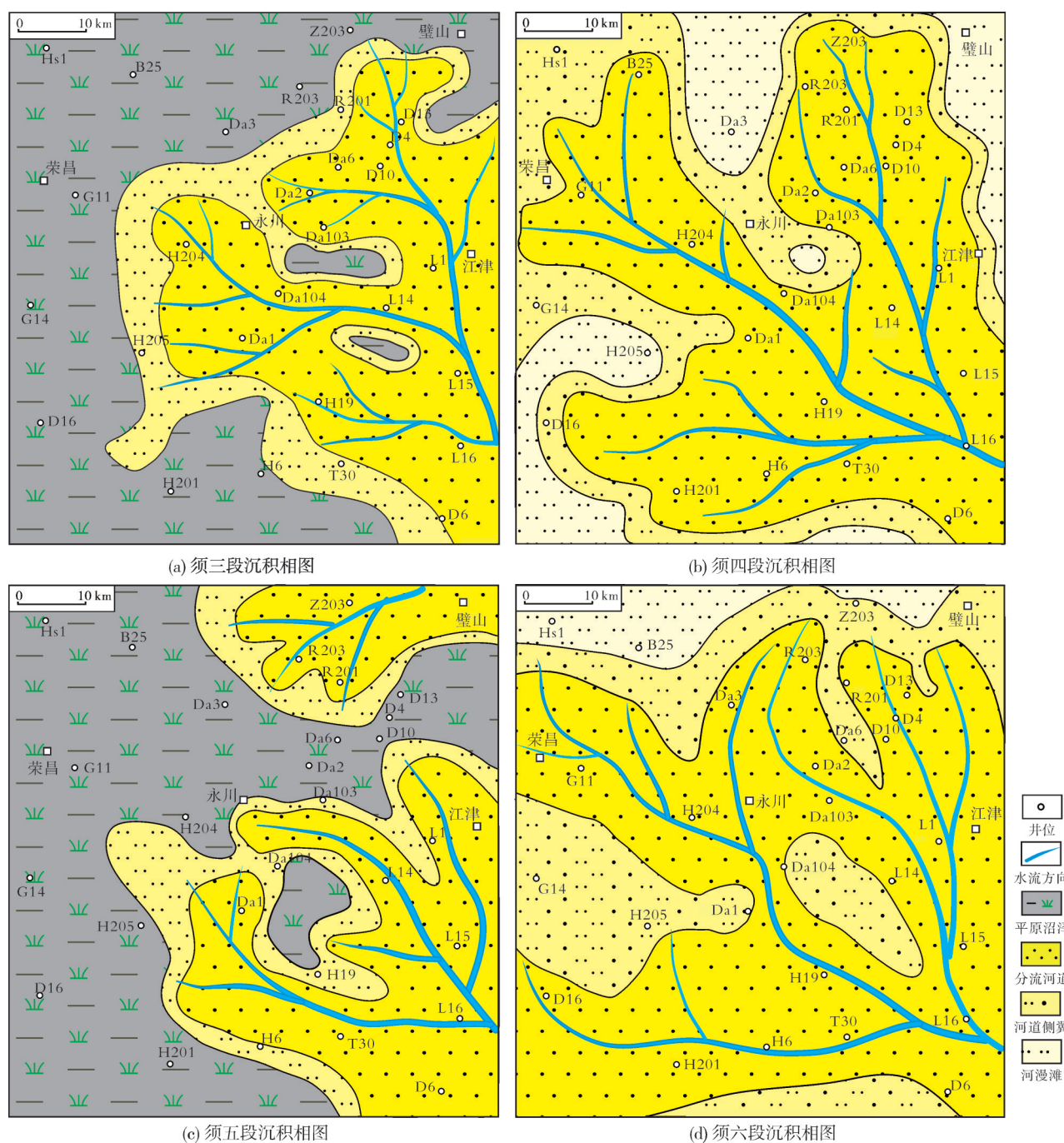


图5 四川盆地大安探区须家河组沉积相图

Fig. 5 Sedimentary facies maps of Xujiahe Formation in Da'an exploration area, Sichuan Basin

2.2.2 储层类型与物性特征

沉积体系分析表明,四川盆地东南部须家河组发育三角洲平原亚相,须四段和须六段发育辫状分流通道微相,砂体粒度相对较粗,以中砂岩、中—细砂岩和细砂岩为主。储层岩石类型以富含石英的长石石英砂岩和岩屑石英砂岩为主。铸体薄片鉴定分析表明,

须四段储层孔隙类型包括原生粒间孔(图6a)、溶蚀孔(图6b)和微裂缝(图6c),其中原生粒间孔占71%,其次为溶蚀孔,约占29%。须四段储层孔隙度介于3%~9%(图7a),平均值为5.86%;渗透率介于 $(0.01\sim 0.5)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ (图7b),平均值为 $0.31\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。须六段储层孔隙度介于3%~7%(图7a),平均值为5.74%;渗透率介于 $(0.01\sim 1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ (图7b),平均

值为 $0.28 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。物性数据表明须家河组储层总体属于典型的致密砂岩储层。强压实作用和胶结作用是储层致密化的关键因素。须家河组为煤系成岩环境,烃源岩生烃期形成的腐殖酸溶蚀不稳定的长石和火山岩屑,形成铸模孔和粒内溶孔,因此溶蚀作用是须家河组致密砂岩储层增孔的主

要因素^[14]。另外,古近纪以来,喜马拉雅运动导致盆地东南部持续抬升,构造抬升过程中形成断层并伴生大量微裂缝^[15],裂缝的发育改善了储层渗透性,有利于致密气运移并规模聚集。因此,在盆地东南部须家河组整体为致密砂岩储层的背景下,仍发育相对有效储层。

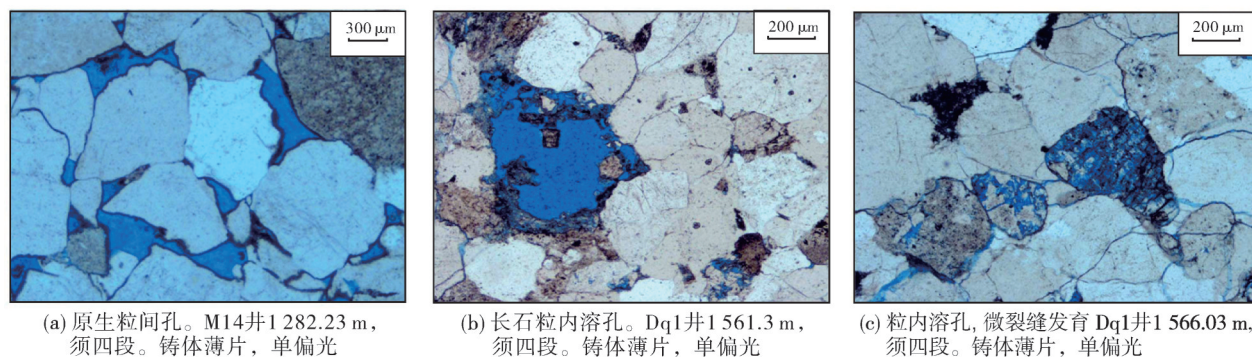


图6 四川盆地大安探区须四段储层孔隙类型

Fig. 6 Pore types of the 4th member Xujiahe Formation in Da'an exploration area, Sichuan Basin

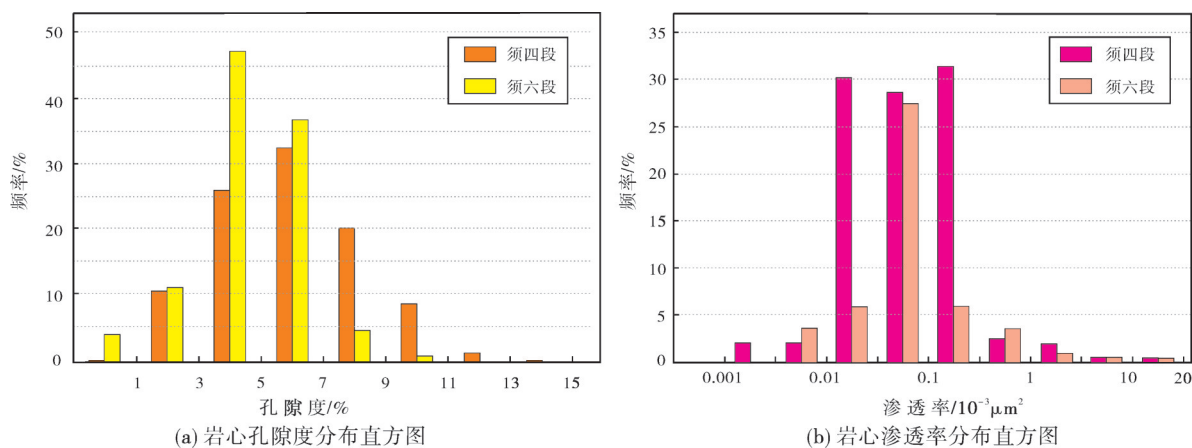


图7 四川盆地大安探区须四段、须六段储层物性直方图

Fig. 7 Physical property histograms of the 4th and 6th members of Xujiahe Formation in Da'an exploration area, Sichuan Basin

2.3 圈闭条件与天然气成藏模式

2.3.1 圈闭条件

晚三叠世以来,四川盆地先后经历了印支期、燕山期和喜马拉雅期等3期构造运动,为须家河组多种圈闭类型的形成创造了条件^[16]。尤其是喜马拉雅运动对大安探区进行了叠加改造,大安探区先是受南北挤压,后转化为东西向挤压,导致西部向南、东部向北的反扭作用形成向北收敛向南撒开,并向西突出的帚状构造。须家河组多数构造遭受剥蚀,但在各构造之间,发育一批隐伏构造,为后期

背斜圈闭的形成奠定了基础。以大安探区丹凤场须四段气田为例,丹凤场构造位于以须家河组为轴向北北东向展布的长轴背斜,高点海拔-1211 m,闭合度89 m,闭合面积16.81 km²,浅层须家河组构造背斜轴部未受到断层切割,背斜圈闭形态较完整,对油气保存和聚集创造了有利的圈闭条件。

大安探区须三段和须五段以三角洲平原亚相沉积为主,局部发育隐蔽型曲流河河道微相,河道砂体呈带状分布于三角洲平原亚相泥岩中,侧向相变较快,垂向上与三角洲平原相泥岩呈千层饼状叠置发育,源储一体,在一定的构造背景下,有

利于形成局部受构造高点控制、侧向受岩性变化控制的岩性圈闭。目前大安探区致密气勘探主要围绕须四段和须六段构造气藏进行勘探,对须三段和须五段源内构造-岩性气藏的研究程度较低,勘探上未取得大的发现和突破,但多口井在须三段和须五段见良好油气显示,表明须三段和须五段具有较大的勘探潜力。

2.3.2 致密砂岩气成藏模式

基于烃源岩、规模有效储层和圈闭类型及其配置关系的研究,建立了大安探区须家河组2种致密砂岩气成藏模式(图8)。

(1) 下生上储成藏模式

大安探区须家河组发育须三段和须五段2套烃源岩,有机碳含量较高,有机质类型为Ⅱ₂型和Ⅲ型,目前处于成熟—高成熟阶段。晚侏罗世中期—早白垩世,须家河组烃源岩逐渐成熟并开始生气,天然气生成量相对较小;晚白垩世,须家河组烃源岩进入高成熟阶段,天然气开始大量生成^[17-18],经断裂或裂缝运移,进入须四段和须六段致密砂岩储

层,并在构造高部位聚集,形成下生上储构造气藏(图8)。须五段和侏罗系厚层泥岩为气藏的最终形成提供了良好的盖层条件,有利于天然气在圈闭内聚集之后形成有效保存。已发现的丹凤场须四段气藏属于该类成藏模式。

(2) 自生自储式成藏模式

须三段和须五段为主力烃源岩层,局部发育隐蔽型曲流河道,河道砂体规模较小,储集条件虽不及须四段,但呈透镜状夹于厚层烃源岩中。在研究区构造较为发育的背景下,背斜主体部位及背斜翼部的透镜状砂岩,有利于优先捕获本层烃源岩生成的天然气并聚集,形成自生自储式岩性气藏(图8)。须三段和须五段厚层暗色泥岩可为透镜状岩性圈闭形成良好的盖层条件,源储盖一体,保存条件优越,有利于构造-岩性圈闭的最终成藏。因此,须三段和须五段具备形成“泥包砂”型透镜状构造-岩性气藏条件。目前,多口井在该层段见到良好的油气显示,但截至目前没有专层井进行测试分析,对其含气性的了解不够充分,可作为下一步勘探接替层段。

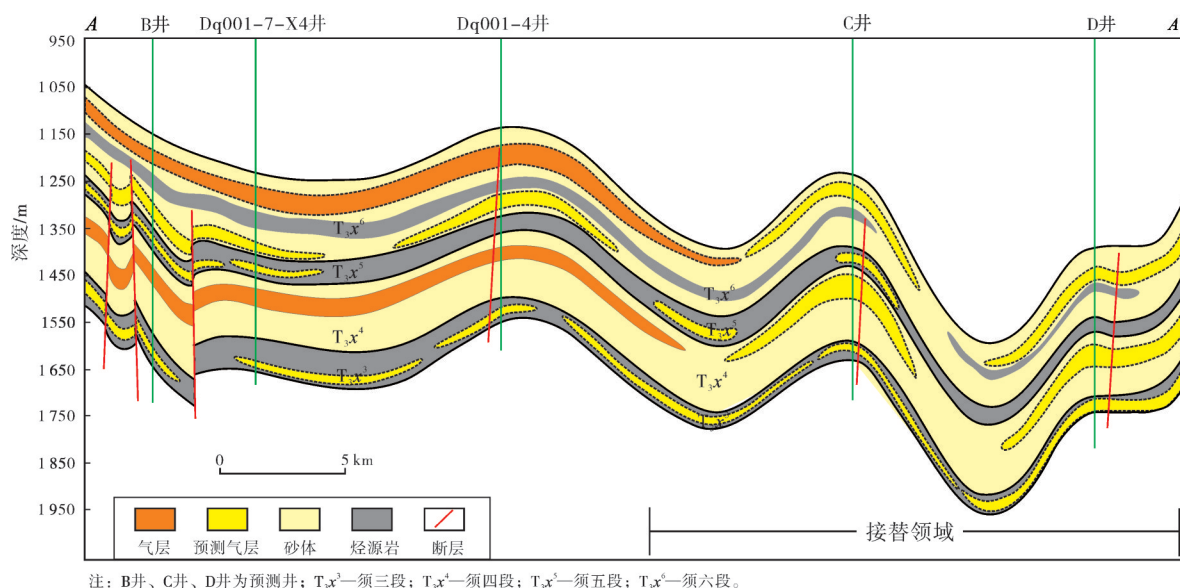


图8 四川盆地大安探区丹凤场背斜须家河组致密气成藏模式图(剖面位置见图1a)

Fig. 8 Tight gas accumulation model of Xujiahe Formation of Danfengchang anticline in Da'an exploration area, Sichuan Basin(location is shown in Fig.1a)

3 致密气勘探领域

基于所建立的下生上储、自生自储两类致密气成藏模式,优选了大安探区须家河组致密气下一步的勘探领域(图9)。丹凤场背斜带须家河组具有须三段和须五段2套烃源岩,须四段和须六段辫状

分流河道砂体发育,储层较致密,但溶蚀作用和裂缝的存在有效改善了储层物性^[19],使得大安探区须家河组仍发育规模有效储层,且背斜形态较完整,已发现丹凤场气田,多口井获工业气流。丹凤场背斜北段及南段发育隐伏构造,有利区面积168 km²,勘探程度仍较低,为下一步构造气藏勘探重点方

向。临江向斜北、临江向斜中、临江向斜南和云锦向斜东等构造翼部,分流河道砂体和烃源岩同样发育,有利于形成构造圈闭(图9a),有利区面积480 km²,为下一步致密气重点接替领域。另外,须三段和须五段作为大安探区须家河组主力烃源岩

层,层内发育隐蔽型曲流河道,尤其是在丹凤场背斜、来苏向斜北和临江向斜中部(图9b),河道砂体发育,源储组合佳,有利于形成“泥包砂”型透镜状构造-岩性气藏,有利区面积300 km²,为下一步致密气潜在探索领域。

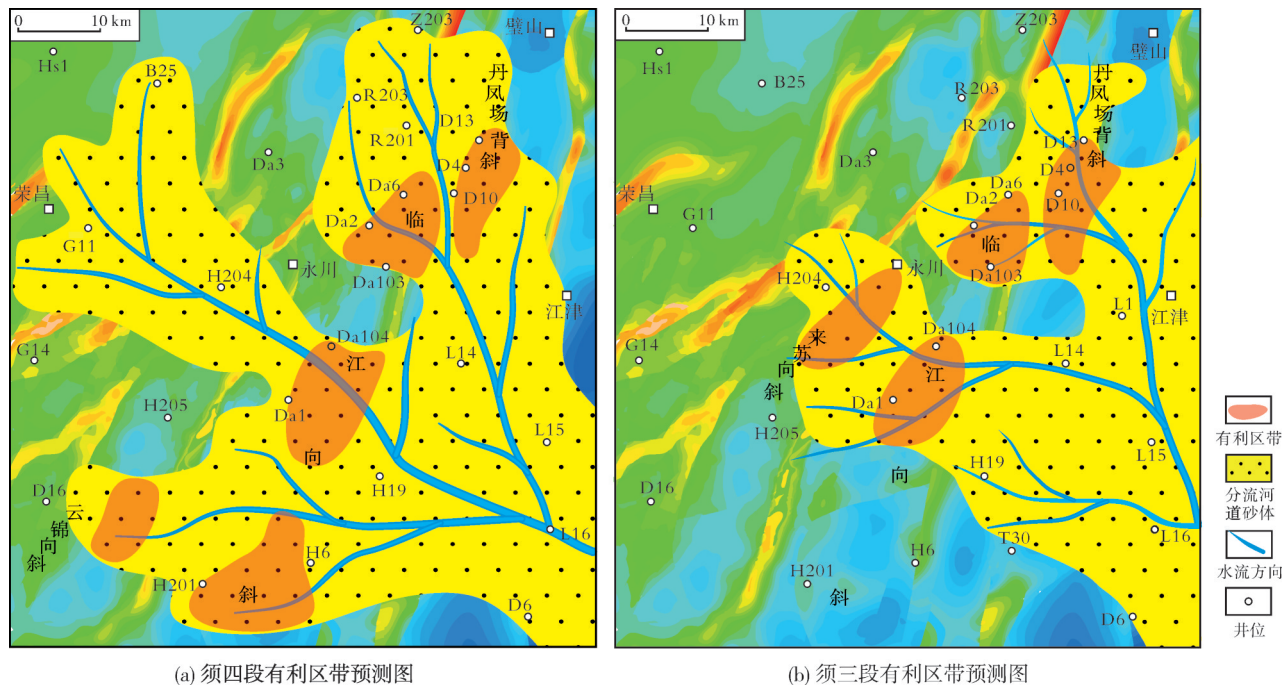


图9 四川盆地大安探区须三段、须四段致密气有利区带预测图

Fig. 9 Prediction maps of favorable tight gas zones of the 3rd and 4th members of Xujiahe Formation in Da'an exploration area, Sichuan Basin

4 结论

(1)大安探区须家河组发育浅水三角洲沉积体系,须四段和须六段发育多期叠置连片的三角洲平原亚相辫状分流河道砂体,受压实作用和胶结作用影响,储层普遍致密,后期溶蚀作用和裂缝有效改善了储层物性。须三段和须五段为研究区主力烃源岩层,烃源岩厚度大、面积广、有机质丰度高,以Ⅲ型和Ⅱ₂型干酪根为主,目前处于成熟—高成熟阶段,为大安探区致密气成藏奠定了资源基础。

(2)须四段和须六段致密砂岩储层在垂向上与须三段和须五段烃源岩成不等厚互层,构成下生上储式源储组合,有利于形成构造气藏;须三段和须五段主力烃源岩层内部发育“泥包砂”型曲流河道致密砂岩储层,源储一体,构成自生自储式源储组合,有利于形成透镜状构造-岩性气藏。

(3)丹凤场构造带背斜主体部位的须四段和须六段为下一步构造气藏勘探的重点领域;临江向斜

北、临江向斜中、临江向斜南和云锦向斜东等构造翼部的须四段和须六段为下一步构造气藏的重点接替领域;丹凤场背斜、来苏向斜北和临江向斜中部的须三段和须五段源储一体,有利于形成“泥包砂”型构造-岩性气藏,为下一步致密气潜在探索领域。

参考文献

- [1] 国家能源局. 致密砂岩气地质评价方法: SY/T6832—2011 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
National Energy Bureau. Geological evaluating methods for tight sandstone gas: SY/T6832—2011 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [2] MASTERS J A. Deep basin gas trap, western Canada [J]. AAPG bulletin, 1979, 63(2): 152–181.
- [3] ROSE P R, EVERETT J R, MERIN I S. Possible basin centered gas accumulation, Raton Basin, southern Colorado [J]. Oil & gas journal, 1984, 82(40): 190–197.
- [4] LAW B E, CURTIS J B. Introduction to unconventional petroleum systems [J]. AAPG bulletin, 2002, 86(11): 1851–1852.
- [5] LAW B E. Basin-centered gas systems [J]. AAPG bulletin,

- 2002, 86(11): 1891–1919.
- [6] 周文, 王允诚. 四川中坝须二致密砂岩气藏成藏机理[J]. 成都地质学院学报, 1992(3): 93–99.
- ZHOU Wen, WANG Yuncheng. Zongba X- II tight sandstone gas pool formation mechanism in west depression in Sichuan Basin [J]. Journal of Chengdu Institute of Geology, 1992(3): 93–99.
- [7] 王继平, 张城玮, 李建阳, 等. 苏里格气田致密砂岩气藏开发认识与稳产建议[J]. 天然气工业, 2021, 41(2): 100–110.
- WANG Jiping, ZHANG Chengwei, LI Jianyang, et al. Tight sandstone gas reservoirs in the Sulige gas field: development understandings and stable-production proposals [J]. Natural gas industry, 2021, 41(2): 100–110.
- [8] 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 development direction of continental tight sandstone gas in the Sichuan Basin [J]. Natural gas industry, 2022, 42(1): 1–11.
- [9] 魏国齐, 杨威, 刘满仓, 等. 四川盆地大气田分布、主控因素与勘探方向[J]. 天然气工业, 2019, 39(6): 1–12.
- WEI Guoqi, YANG Wei, LIU Mancang, et al. Distribution rules, main controlling factors and exploration directions of giant gas fields in the Sichuan Basin [J]. Natural gas industry, 2019, 39(6): 1–12.
- [10] 赵文智, 卞从胜, 徐春春, 等. 四川盆地须家河组须一、三和五段天然气源内成藏潜力与有利区评价[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(4): 385–393.
- ZHAO Wenzhi, BIAN Congsheng, XU Chunhui, et al. Assessment on gas accumulation potential and favorable plays within the Xu-1, 3 and 5 members of Xujiahe Formation in Sichuan Basin [J]. Petroleum exploration and development, 2011, 38(4): 385–393.
- [11] 李剑, 魏国齐, 谢增业, 等. 中国致密砂岩大气田成藏机理与主控因素: 以鄂尔多斯盆地和四川盆地为例[J]. 石油学报, 2013, 34(增刊1): 14–28.
- LI Jian, WEI Guoqi, XIE Zengye, et al. Accumulation mechanism and main controlling factors of large tight sandstone gas fields in China: cases study on Ordos Basin and Sichuan Basin [J]. Acta petrolei sinica, 2013, 34(S1): 14–28.
- [12] 李军, 郭彤楼, 邹华耀, 等. 四川盆地北部上三叠统须家河组煤系烃源岩生烃史[J]. 天然气工业, 2012, 32(3): 25–28.
- LI Jun, GUO Tonglou, ZOU Huayao, et al. Hydrocarbon generation history of coal-measure source rocks in the Upper Triassic Xujiahe Formation of the northern Sichuan Basin [J]. Natural gas industry, 2012, 32(3): 25–28.
- [13] 郑荣才, 李国辉, 常海亮, 等. 四川盆地东部上三叠统须家河组层序-岩相古地理特征[J]. 中国地质, 2015(4): 1024–1036.
- ZHENG Rongcai, LI Guohui, CHANG Hailiang, et al. Sedimentary sequence and paleogeographic characteristics of the Upper Triassic Xujiahe Formation in eastern Sichuan Basin [J]. Geology in China, 2015(4): 1024–1036.
- [14] 杨威, 谢武仁, 俞凌杰, 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 and experiment, 2021, 43(4): 655–663.
- [15] 孙海涛, 钟大康, 王威, 等. 四川盆地马路背地区上三叠统须家河组致密砂岩储层成因分析[J]. 沉积学报, 2021, 39(5): 1057–1067.
- SUN Haitao, ZHONG Dakang, WANG Wei, et al. Origin analysis of a tight sandstone reservoir for the Xujiahe Formation of the Upper Triassic at the Malubei area in the Sichuan Basin, China [J]. Acta sedimentologica sinica, 2021, 39(5): 1057–1067.
- [16] 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.
- [17] 李勇, 陈世加, 路俊刚, 等. 近源间互式煤系致密砂岩气成藏主控因素: 以川中地区须家河组天然气为例[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(6): 798–808.
- LI Yong, CHEN Shijia, LU Jungang, et al. Main controlling factors of near-source and interbedded-accumulation tight sandstone gas from coal-bearing strata: a case study from natural gas of Xujiahe Formation, central Sichuan Basin [J]. Natural gas geoscience, 2019, 30(6): 798–808.
- [18] 刘忠群, 徐士林, 刘君龙, 等. 四川盆地川西坳陷深层致密砂岩气藏富集规律[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 31–40.
- LIU Zhongqun, XU Shilin, LIU Junlong, et al. Enrichment laws of deep tight sandstone gas reservoirs in the western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. Natural gas industry, 2020, 40(2): 31–40.
- [19] 王珂, 张荣虎, 李宝刚, 等. 致密砂岩储层构造裂缝特征及地质建模: 以塔里木盆地库车坳陷大北12气藏为例[J]. 海相油气地质, 2023, 28(1): 72–82.
- WANG Ke, ZHANG Ronghu, LI Baogang, et al. Characteristics and geological modeling of structural fractures in tight sandstone reservoir: taking Dabai-12 gas reservoir in Kuqa Depression, Tarim Basin as an example [J]. Marine origin petroleum geology, 2023, 28(1): 72–82.

The formation conditions and exploration fields of tight gas of Xujiahe Formation in Da'an exploration area, Sichuan Basin

LUO Yufeng¹, HOU Gangfu², LIU Zhanguo², XIONG Jiabei¹, WU Songlin², RUI Yun¹,
CHEN Xingyu², YUAN Xiaojun¹, SONG Bing², WU Jin², LIU Shaozhi²

1. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Zhejiang Oilfield Company;

2. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology

Abstract: In order to clarify the conditions for the formation of tight gas reservoirs in complex structural deformation zones and implement the next exploration areas, a systematic study is conducted on the hydrocarbon source rocks, sedimentary systems, tight sandstone reservoirs, and trap conditions of the Xujiahe Formation in Da'an exploration area of Sichuan Basin. The results show that: (1)The Xujiahe Formation in the Da'an exploration area has developed a shallow water delta sedimentary system, and the multi-stage sand bodies of the delta plain braided distributary channels in the 4th and 6th members are stacked and connected. Due to compaction and cementation, the reservoirs were generally dense, and later dissolution and fractures effectively improved the physical properties of the reservoirs. (2)The 3th and 5th members are the main source rock layers in the study area. The source rocks are thick, wide distribution in area, and have high organic matter content, mainly consisting of type III and type II₂ kerogen. Currently, they are in the mature to high mature stage, laying a resource foundation for the formation of tight gas reservoirs in Da'an exploration area. (3)The tight sandstone reservoirs of the 4th and 6th members are interbedded with the source rocks of the 3th and 5th members in an uneven thickness in the vertical direction, forming a lower source-upper reservoir combination, which is conducive to the formation of structural gas reservoirs. The main source rock layers of the 3th and 5th members are developed with "mudstone wrapping sandstone" type meandering river channel sand bodies and tight sandstone reservoirs, forming a self generating and self storing combination, which is conducive to the formation of lens-shaped lithological gas reservoirs. The main part of Danfengchang anticline belt and the north, middle, and south wings of Linjiang syncline, as well as the east wing of Yunjin syncline are proposed as the key replacement areas of structural gas reservoir of the 4th and 6th members in Da'an exploration area. Of the Danfengchang anticline, the north of Laisu syncline, and the central part of Linjiang depression, the 3th and 5th members are integrated with source and reservoir, which is conducive to the formation of a "mudstone wrapping sandstone" type structural-lithological gas reservoir and is a potential exploration area for tight gas reservoirs in the next step.

Key words: shallow water delta; tight sandstone gas; accumulation model; exploration field; Xujiahe Formation; Da'an exploration area; Sichuan Basin

LUO Yufeng, First author: MSc, Engineer, mainly engaged in oil and gas exploration and research. Add: No. 9 Jingshanwan Rd., Yuhang District, Hangzhou, Zhejiang 311100, China. E-mail: luoyf85@petrochina.com.cn

HOU Gangfu, Corresponding author: MSc, Senior Engineer, mainly engaged in sedimentology-reservoir geology and oil and gas exploration. Add: No. 920 Xixi Rd., Xihu District, Hangzhou, Zhejiang 310023. E-mail: hougf_hz@petrochina.com.cn