

引用: 姜洪福, 艾鑫, 罗光东, 等. 松辽盆地徐家围子断陷白垩系沙河子组深层致密气成藏机理及勘探突破 [J]. 中国石油勘探, 2024,29(1):130-141.
Jiang Hongfu, Ai Xin, Luo Guangdong, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism and exploration breakthrough of deep tight gas in the Cretaceous Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2024,29(1):130-141.

松辽盆地徐家围子断陷白垩系沙河子组 深层致密气成藏机理及勘探突破

姜洪福 艾鑫 罗光东 耿长喜 王延志 李召兵 李文龙 余文学 陈建国 宫秀坤
杨炜华 郭晶 陈海滨

(中国石油大庆油田钻探工程公司)

摘 要: 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂砾岩埋深大、岩性致密, 目前对其成藏控制因素认识不足, 且受投资成本和勘探开发技术的制约, 沙河子组一直未能实现储量和产量的突破。使用地震、岩心、测井、录井及地质分析化验资料, 从煤系烃源岩生烃潜力、致密砂砾岩展布、储集物性、地层超压等方面分析了沙河子组致密气成藏控制因素, 力图寻找富气甜点、指导井位部署。结果表明, 沙河子组储层与烃源岩叠置, 致密非浮力成藏动力过程致使异常高压的出现, 并造就了满盆含气的格局。沙河子组致密砂砾岩储层在纵横向上叠置发育, 储层内部发育的多层高孔渗带成为致密砂砾岩气藏的“甜点”。在致密气成藏理论的指导下, 精准刻画了优质富气“甜点”的分布并设计了最优气井轨迹, 充分发挥地质工程一体化优势, 以优快钻井和最优改造体积为目标, 部署了宋深9-平5井, 测试产量达 $106 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 取得了沙河子组致密气藏的重大突破, 为后期松辽盆地沙河子组致密气藏勘探开发带来了广阔的前景。

关键词: 松辽盆地; 沙河子组; 致密气藏; 产能突破; 资源潜力

中图分类号: TE112.1

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2024.01.010

Hydrocarbon accumulation mechanism and exploration breakthrough of deep tight gas in the Cretaceous Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin

Jiang Hongfu, Ai Xin, Luo Guangdong, Geng Changxi, Wang Yanzhi, Li Zhaobing, Li Wenlong, Yu Wenxue,
Chen Jianguo, Gong Xiukun, Yang Weihua, Guo Jing, Chen Haibin

(CNPC Daqing Drilling Engineering Corporation)

Abstract: The glutenite in Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression in Songliao Basin has a large burial depth and tight lithology. At present, due to the insufficient understanding of controlling factors for hydrocarbon accumulation, and limited by investment cost and exploration and development technology, no breakthrough has been achieved in reserves and production in Shahezi Formation. By using seismic, core, wireline logging, mud logging and experimental data, the controlling factors for tight gas accumulation in Shahezi formation

基金项目: 中国石油集团公司前瞻性基础性重大科技项目“松辽盆地深部油气系统研究”(2021DJ0205)。

第一作者简介: 姜洪福(1965-), 男, 黑龙江大庆人, 博士, 2007年毕业于中国地质大学(北京), 教授级高级工程师, 主要从事石油地质综合研究及油气勘探开发方面的工作。地址: 黑龙江省大庆市让胡路区爱国路12号大庆钻探工程公司, 邮政编码: 163453。E-mail: jianghongfu@petrochina.com.cn

通信作者简介: 罗光东(1981-), 男, 安徽安庆人, 硕士, 2010年毕业于东北石油大学, 高级工程师, 主要从事天然气勘探开发方面的工作。地址: 黑龙江省大庆市让胡路区为民街10-4大庆钻探工程公司致密气项目经理部, 邮政编码: 163458。E-mail: luoguangdong@petrochina.com.cn

收稿日期: 2023-05-22; 修改日期: 2023-12-26

are analyzed from aspects of hydrocarbon generation potential of coal measure source rocks, distribution of tight glutenites, reservoir physical properties and formation overpressure, so as to identify gas sweet spots and guide well location deployment. The study results show that the reservoir and source rock in Shahezi formation are superimposed, and the non-buoyancy dynamic process during the accumulation of tight gas leads to the occurrence of abnormal high pressure and the pattern of gas-bearing in the entire basin. The tight glutenite reservoirs in Shahezi Formation are superimposed vertically and laterally, and multi-layer high porosity zones in the reservoir serve as the "sweet spot" of tight glutenite gas reservoir. Guided by the tight gas accumulation theory, the distribution of high-quality gas "sweet spot" has been accurately characterized and the optimal well trajectory has been designed. By giving full play to the advantage of geology and engineering integration, and aiming at the optimal and fast drilling operation and maximum reservoir reconstruction volume, a well Songshen 9-Ping 5 has been deployed, and the gas rate of $106 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ has been tested, marking a major breakthrough in tight gas reservoir in Shahezi Formation, which brings broad prospects for the future exploration and development of tight gas reservoir in Shahezi Formation in Songliao Basin.

Key words: Songliao Basin, Shahezi Formation, tight gas reservoir, production capacity breakthrough, resource potential

0 引言

勘探实践证明,我国东部盆地深层地质条件复杂,已探明或待提交的储量多属于特低渗透致密气藏,给效益开采带来极大挑战^[1-2]。松辽盆地为我国最早发现的陆相大型含油气盆地^[3-4],自2002年松辽盆地徐家围子断陷徐深1井营城组火山岩获得高产工业气流以来,深层火山岩取得一系列突破^[5-7],但其下部的沙河子组烃源岩较发育且岩性致密,故沙河子组储层未受到过多关注。近年来,随着勘探的不断深入,沙河子组多口井获工业气流,证实了沙河子组致密气具有广阔的勘探开发前景^[8-9]。经资源潜力评价,松辽盆地沙河子组分布面积约为 $5.0 \times 10^4 \text{ km}^2$,总资源量约为 $4.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中徐家围子断陷沙河子组分布面积为 3731 km^2 ,资源量约为 $3520 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[10-11]。截止到目前,仅在徐家围子断陷沙河子组提交了 $189 \times 10^8 \text{ m}^3$ 探明储量,但由于对沙河子组的成藏控制因素认识不足,且受投资成本和勘探开发技术的制约,沙河子组一直未能实现储量和产量的进一步突破^[12]。

前人对沙河子组的研究主要集中在层序地层、储层特征及沉积相展布等方面,同时从构造断裂、沉积背景、气源条件、运移条件及成藏期次等方面分析了沙河子组的成藏条件,对沙河子组源内自生自储的成藏组合、致密砂砾岩气富集、沙河子组主要存在3次油气大量充注时期的认识达成了共识^[13-14]。但目前针对徐家围子断陷沙河子组成藏动力过程的研究多从单一要素出发,对其深层致密非浮力油气成藏机理及满盆含气特征缺乏认识和讨论。

近年来,随着非常规储层改造技术的进步及开发成本的下降^[15],大庆油田开始对沙河子组致密气进行有效勘探开发技术探索。利用地震、岩心、测井等资料,从烃源岩条件、储层物性、沉积相带展布、地

层超压等方面分析了沙河子组的成藏控制要素,厘定沙河子组致密气藏的成藏机理。在理论认识的基础上,徐家围子断陷宋站低凸起部署的宋深9—平5井在提高单井产能指标的同时,以追求提高单井累计产气量和气田采收率为目标,取得革命性实践成果,实现测试产量 $106 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,突破了沙河子组致密气藏历史性纪录。同时宋深9—平5井的勘探突破,使得沙河子组成藏机制的认识研究更深一步,为后期高效勘探开发提供了有效途径。

1 地质背景

徐家围子断陷是松辽盆地面积最大、勘探程度最高且最具优势的一个断陷,是由徐西断裂和徐中断裂控制的箕状断陷^[16],西侧与古中央隆起带毗邻,东侧与朝59古隆起—万隆古隆起相接,面积约为 5350 km^2 ,内部可划分为安达凸起、升平凸起、安达凹陷、徐西凹陷、徐东凹陷、徐东斜坡带、三站凹陷(图1)。徐家围子断陷深部地层从下至上依次为火石岭组、沙河子组、营城组^[17]。徐家围子断陷沙河子组是形成于强烈断陷期的一套致密砂砾岩,并发育大面积的暗色泥岩及煤层。前人依据沙河子组内部砂砾岩与泥岩的频繁交互特征、测井曲线变化特征及地震反射特征等建立区域统一精细等时层序地层格架,将沙河子组自下而上划分为SQ1、SQ2、SQ3、SQ4四个三级层序^[18-20](图2),地层整体表现为东高西低的格局,断层走向以南北向和北西向为主。

2 沙河子组致密气成藏控制要素

2.1 煤系烃源岩晚期持续生烃,气源充足

沙河子组是徐家围子断陷深层最主要的烃源岩层,属煤系烃源岩,发育大量的灰黑色、黑色泥

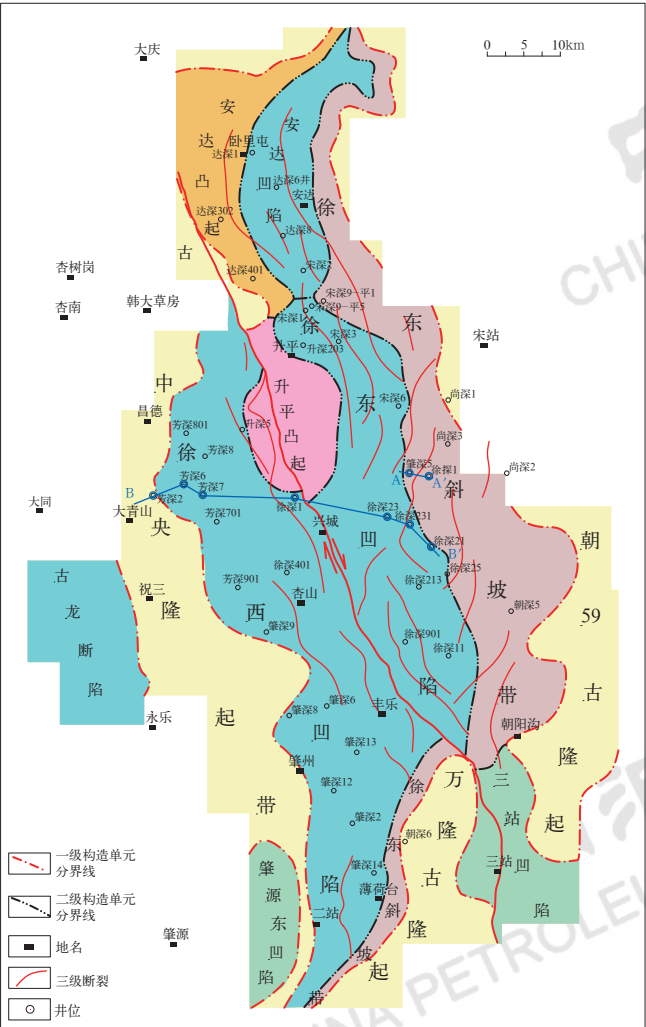


图1 徐家围子断陷构造单元划分图

Fig.1 Division of structural units in Xujiaweizi Fault Depression

岩、煤层等，分布面积广、厚度大，厚度一般为200~2000m。沙河子组纵向上4个层序均发育煤系烃源岩，均可作为气源层。沙河子组暗色泥岩有机质含量高，TOC平均为1.07%，热解生烃潜量平均为0.35mg/g，氯仿沥青“A”含量平均为0.057%；煤层TOC平均为68.6%，H/C原子比平均为0.59%^[21]。色谱—质谱分析显示，煤系烃源岩正构烷烃曲线呈双峰型分布，主峰碳数分别为17和25，反映出有机质主要来源于陆生高等植物，并混合有湖相水生生物。煤系烃源岩显微组分以结构镜质体、丝质体和惰质体为主^[18,22]，有机质类型主要为Ⅲ型，部分为Ⅰ—Ⅱ型，大部分处于过成熟演化阶段($R_o>2.0\%$)。在 $R_o>2.0\%$ 时，Ⅲ型干酪根的O/C原子比仍在随热演化进程而减少，说明深层Ⅲ型干酪根晚期仍在排烃(图3)。

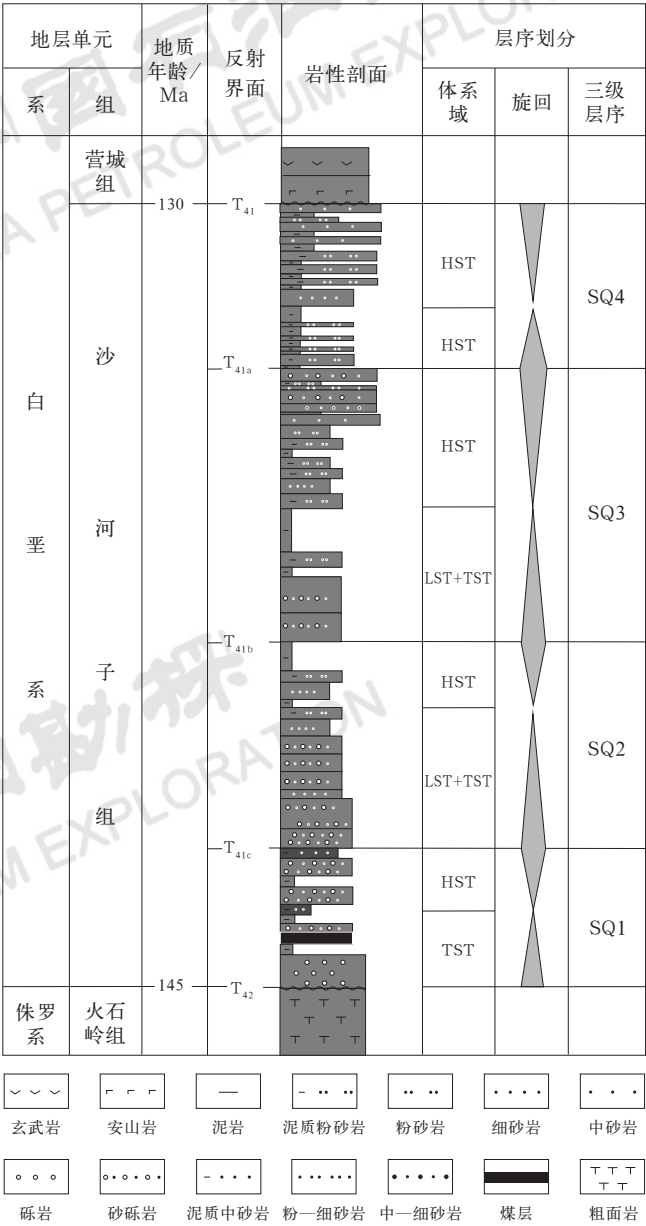


图2 松辽盆地深层综合柱状图(据文献[17]修改)

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column of deep formations in Songliao Basin (modified after reference [17])

烃源岩生气强度是烃源岩厚度、面积、密度、TOC、氢指数(I_H)、成气转化率的综合反映。经评估，徐家围子断陷沙河子组总生气量约为 $28\times10^{12}\text{m}^3$ ，其中暗色泥岩生气量约为 $23.36\times10^{12}\text{m}^3$ 、煤层生气量约为 $5.06\times10^{12}\text{m}^3$ 。沙河子组暗色泥岩生气强度大于 $50\times10^8\text{m}^3/\text{km}^2$ 的面积约为560km²，煤层生气强度大于 $20\times10^8\text{m}^3/\text{km}^2$ 的面积约为407km²(图4)。徐家围子断陷沙河子组煤系烃源岩分布面积广、厚度大、生气强度高，同时有晚期生烃、持续排烃的特点，这为徐家围子断陷沙河子组地层普遍高压、满盆含气格局的形成奠定了良好的物质基础。

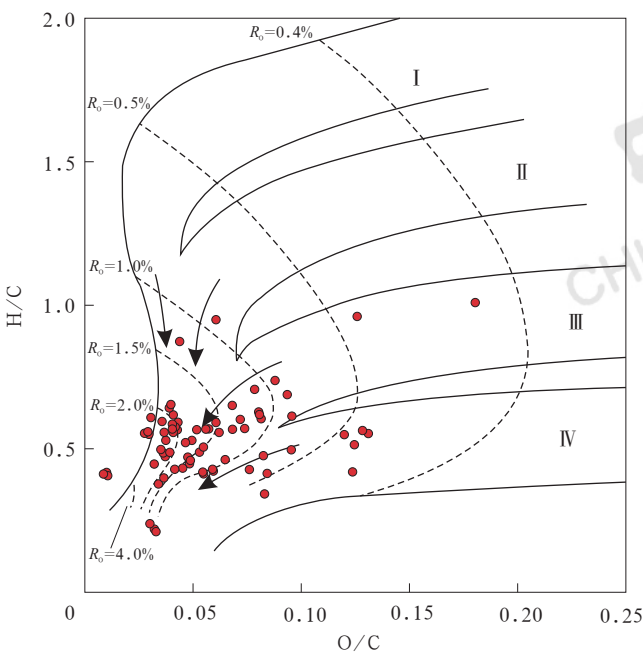


图 3 徐家围子断陷沙河子组 O/C—H/C 原子比交会图
Fig.3 Cross plot of O/C—H/C atomic ratio in Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression

2.2 粗碎屑砂砾岩体储层纵横向叠置，致密储层内部高孔渗甜点发育

徐家围子断陷沙河子组粗碎屑砂砾岩体储层在纵向上叠置发育，孔隙度和渗透率均较低，属于典型的特低孔致密储层。储层内部由于强烈的溶蚀作用而发育多层高孔渗带，成为砂砾岩致密气藏的“甜点”，扇三角洲前缘和辫状河三角洲前缘发育有利储层。

徐家围子断陷沙河子组主要发育扇三角洲、辫状河三角洲、湖泊相^[19]沉积(图 5)。SQ1 至 SQ4 时期，早期沙河子组沉积范围较小，洼槽分割发育，随断陷活动增强，湖盆范围扩大，晚期受剥蚀影响，湖盆缩小，沙河子组 SQ3 时期沉积范围最大，总体上为一个完整的沉积演化过程，呈现“浅水小盆”沉积特点。SQ4 时期，宋站低凸起沙河子组为扇三角洲相沉积，主体发育扇三角洲平原亚相，边部发育扇三角洲前缘亚相。扇三角洲平原亚相是扇三角洲陆上部分与冲积扇的过渡，主要由分流河道、分流河道间、漫滩沼泽微相构成；扇三角洲前缘沉积是扇三角洲沉积主体，

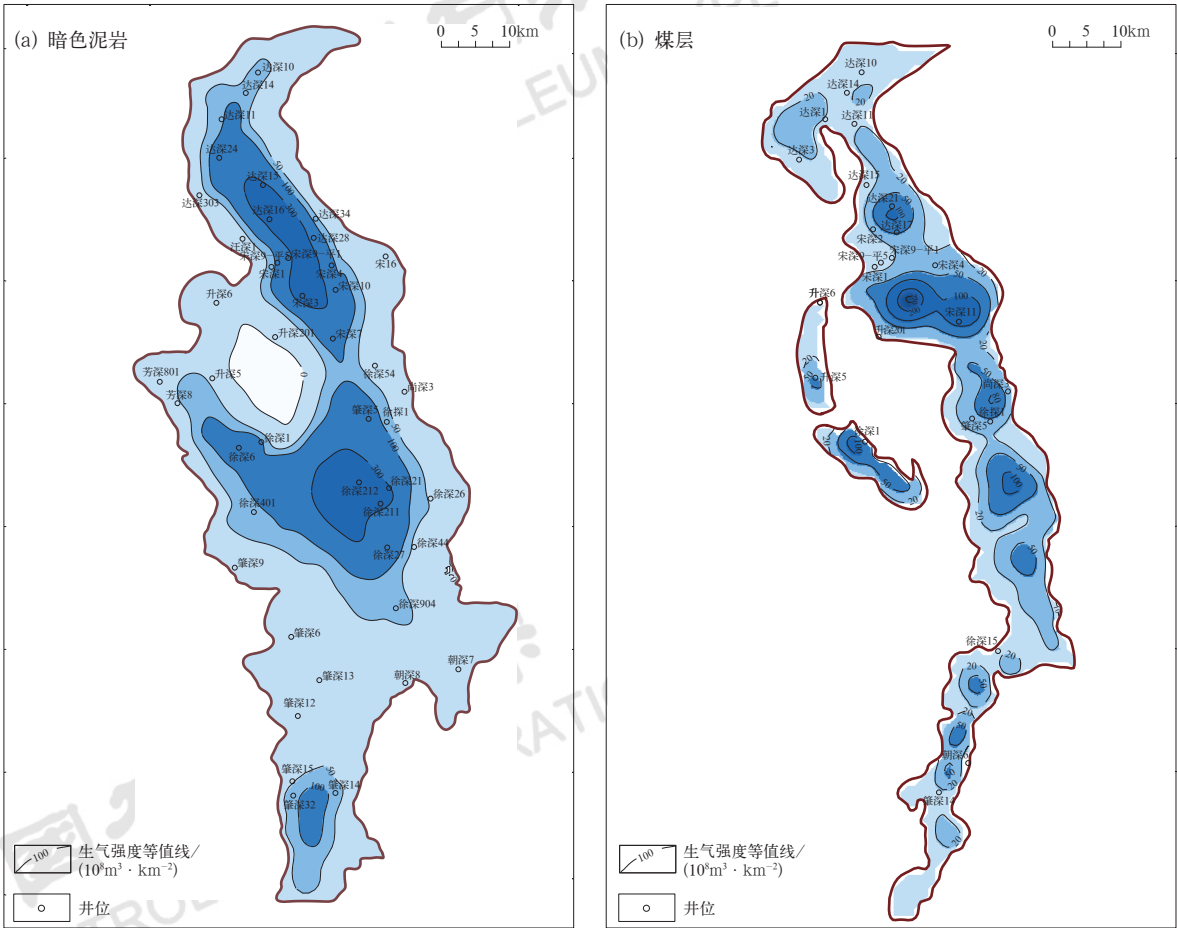


图 4 徐家围子断陷沙河子组暗色泥岩 (a) 及煤层 (b) 生气强度平面图
Fig.4 Contour map of gas generation intensity of dark mudstone (a) and coal seam (b) in Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression

图 5 徐家围子断陷沙河子组 SQ1—SQ4 沉积相平面展布图

Fig.5 Sedimentary facies map of SQ1–SQ4 in Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression

由水下分流河道、水下分流河道间、河口沙坝沉积及前缘席状砂沉积微相构成^[20,23]。在各期湖岸线的周边发育湖漫滩沉积, 是有利储层分布区域。

沙河子组储层岩石类型主要为砂砾岩、砂岩, 埋藏深度大, 成岩作用强, 储层物性较差。储集空间类型主要为粒间孔、粒内溶孔, 同时发育晶间孔及微裂缝等多种储集类型^[24-25] (图6)。沙河子组24口井340块岩心分析统计结果表明, 砂砾岩孔隙度主要集中在3.0%~9.0%之间, 中值为5.7%, 渗透率主要集中在0.03~0.5mD之间, 中值为0.085mD; 砂岩孔隙度主要集中在2.0%~7.0%之间, 中值为3.1%, 渗透率主要集中在0.03~0.3mD之间, 中值为0.05mD, 属特低孔致密储层。沙河子组SQ1层序储层孔隙度分布在0.5%~10.4%之间, 平均为2.9%, 渗透率分布在0.01~1.09mD之间, 平均为0.14mD; SQ2

层序储层孔隙度分布在0.7%~8.7%之间, 平均为2.67%, 渗透率分布在0.004~2.9mD之间, 平均为0.11mD; SQ3层序储层孔隙度分布在0.6%~10.2%之间, 平均为5.43%, 渗透率分布在0.002~5.83mD之间, 平均为0.2mD; SQ4层序储层孔隙度分布在0.6%~11%之间, 平均为4.19%, 渗透率分布在0.003~6.61mD之间, 平均为0.26mD。徐家围子断陷沙河子组SQ4层序储层物性明显较SQ1—SQ3层序物性更好, 高孔渗带主要分布于达深14H—达深6—达深15井区、宋深4—宋深10井区、徐深21—徐深212井区、徐深44—徐深27—徐深213井区和徐深54井区辫状河三角洲平原末端和辫状河三角洲前缘相带, 以及达深1—达深24井区、达深302—达深4井区、宋深2—宋深9H井区和徐深801—徐深401井区扇三角洲平原和扇三角洲前缘相带。

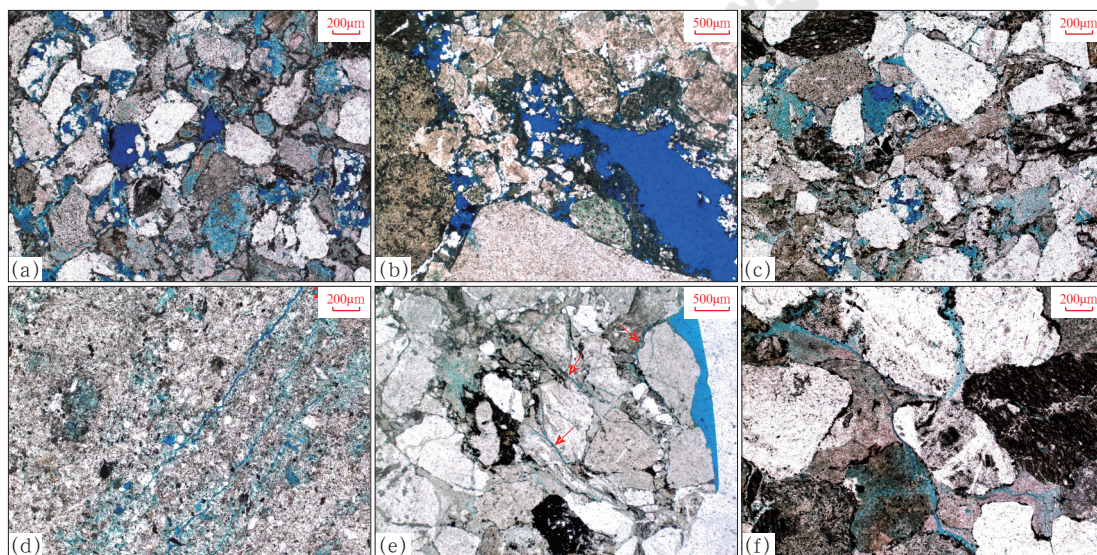


图6 徐家围子断陷沙河子组孔隙发育特征图

Fig.6 Characteristics of pore development in Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression

(a) 达深16井, 3619.32m, 粒间孔与长石/岩屑粒内溶孔; (b) 徐探1井, 3936.86m, 凝灰质溶蚀特大孔; (c) 达深21井, 3425m, 黏土基质间微孔与长石粒内溶孔; (d) 达深303井, 3410.81m, 微裂缝带; (e) 达深21井, 3489.47m, 粒缘/粒内/基质内微裂缝与颗粒破碎; (f) 达深21井, 2944m, 粒缘/基质内微裂缝

宋深9—平1导眼井、徐探1井等8口井岩心孔隙度、渗透率及薄片分析结果表明, 随埋深增加, 储层物性呈下降趋势, 但发育多层高孔渗带。如宋深9—平1导眼井沙河子组3273.5~3274.0m孔隙度为8.8%, 3463.0~3463.5m孔隙度为5.0%, 3802.0~3802.5m孔隙度为13.3% (图7)。

从单一层序看, 断陷边部到斜坡区储层从厚层型到互层型, 粒度逐渐变细; 平面上随着各层序的进积和退积, 造成徐东斜坡带砂砾岩、砂岩储层均有发育 (图8)。徐东地区肇深5井、徐探1井沙河子组地

层揭示厚度大、层序揭示全, 徐探1井粒度粗, 以粗砂岩、砂质砾岩、砂砾岩为主; 肇深5井粒度细, 以粉—细砂岩为主。在沉积相和储层微观孔隙结构分析基础上, 开展了相控地质统计学反演, 井—震联合优选了对油气储层敏感的地震属性参数, 多属性、多信息融合预测落实了“甜点”储层的空间分布特征。结果表明, 从徐东斜坡带到徐东凹陷中部, 沙河子组连续沉积, 向徐东凹陷中部沉积规模逐渐增大, 徐东斜坡带储层厚度为120~300m, 预测徐东凹陷中部储层厚度为700~1000m。

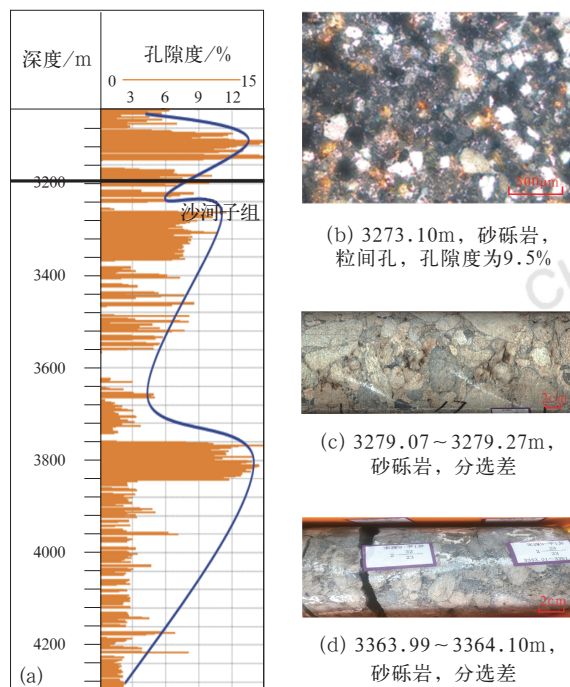


图7 宋深9—平1导眼井沙河子组孔隙度(a)及岩心图(b—d)
Fig.7 Porosity (a) and core photos (b—d) in Shahezi Formation in Songshen 9—Ping1 pilot well

2.3 致密非浮力高压气藏造就满盆含气格局

通过对徐家围子断陷沙河子组117口井数据进行统计, 其中15口井在沙河子组下压力计进行监测。统计结果表明: 安达地区沙河子组储层埋深为3100~3988m, 地层压力为38.8~54.8MPa, 压力系数为1.25~1.44; 徐西地区沙河子组储层埋深为3628~4233m, 地层压力为38.9~64.7MPa, 压力系数为1.35~1.53。沙河子组整体表现为异常高压特征, 压力系数为1.2~1.5, 预测徐西凹陷和徐东凹陷中部压力系数超过1.6(图9), 超压特征表明沙河子组成藏体系封闭性较好, 有利于致密砂砾岩气的保存。

从安达凹陷西部陡坡带到安达凹陷再到徐东斜坡带, 气测全烃由3%增至10%再减至0.5%, 孔隙度由3.0%增至7.8%再减至3.1%, 安达凹陷内部含气性、物性均好于安达凹陷西部陡坡带和徐东斜坡带。安达凹陷内部日产气量为 $(6.2\sim12.6)\times10^4\text{m}^3$, 安达凹陷西部陡坡带和徐东斜坡带日产气量小于 4000m^3 。从徐西凹陷西部陡坡带—徐西凹陷—徐东凹

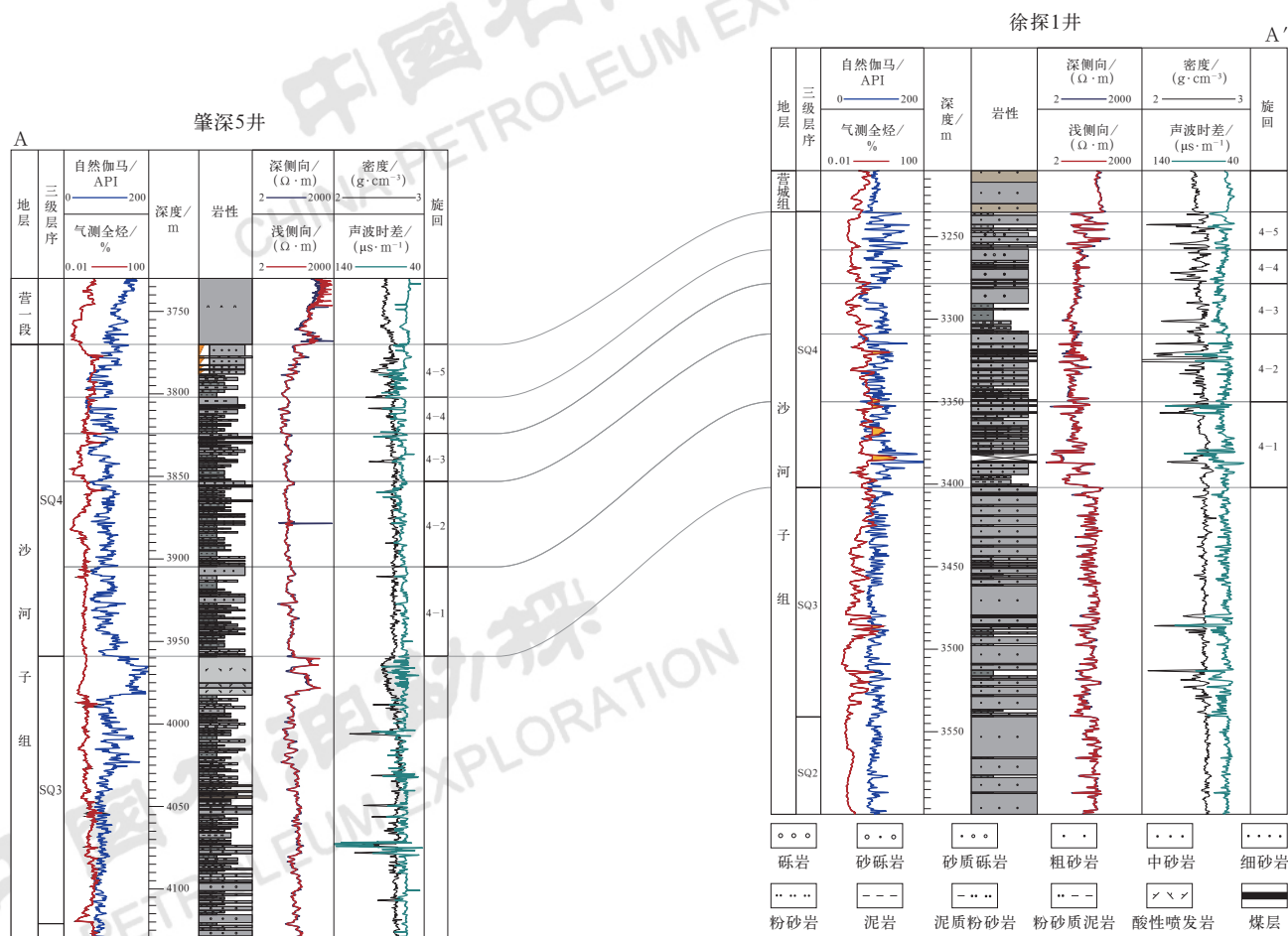


图8 肇深5井—徐探1井连井剖面图(剖面位置见图1)

Fig.8 Correlation section cross wells Zhaoshen 5—Xutan 1 (section location is in Fig.1)

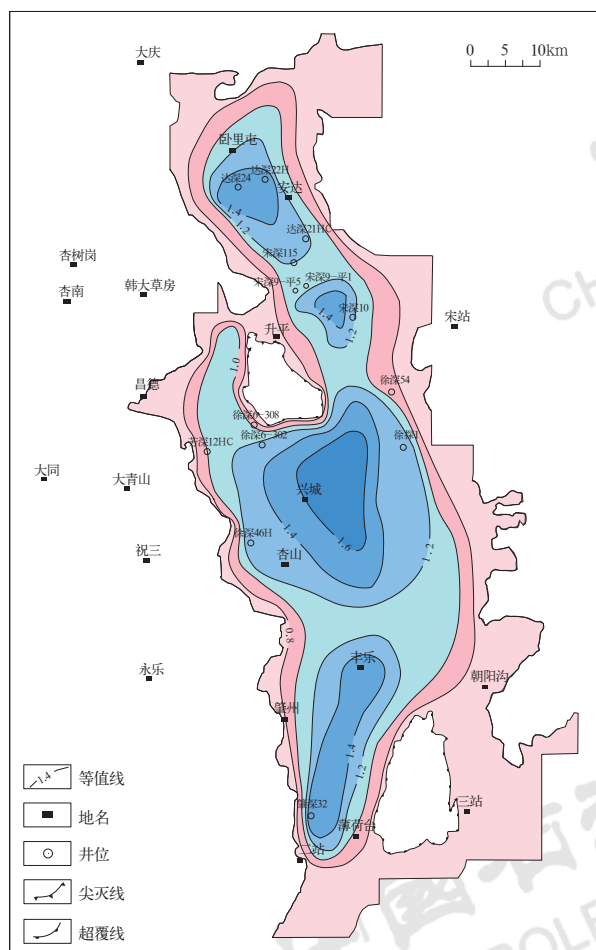


图 9 徐家围子断陷沙河子组压力系数等值线图

Fig.9 Contour map of pressure coefficient in Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression

陷—徐东斜坡带，气测全烃由 0.3% 增至 3%~10% 再减至 0.8%，孔隙度由 3.2% 增至 6.0% 再减至 4.6%，徐西凹陷—徐东凹陷内部含气性、物性均好于徐西凹陷西部陡坡带和徐东斜坡带。徐西凹陷—徐东凹陷内部日产气量为 $(5.5 \sim 20.0) \times 10^4 \text{ m}^3$ 。由此可见沙河子组整体含气，生烃凹陷内部好于凹陷两侧斜坡带、徐西凹陷—徐东凹陷中部好于凹陷边部，离生烃中心较近的井，含气显示明显要好于远离生烃中心的井，试气效果也较好。由此可见，沙河子组气藏具有近源聚集、满盆含气的特点。

徐家围子断陷沙河子组气藏属于致密深盆油气藏，致密深盆油气藏是烃源岩排出的油气进入了与烃源岩层紧密相邻的致密储层，因不受浮力控制而就近聚集形成的油气藏，深盆气藏中含气面积与气源岩分布面积几乎相同，天然气多储存于致密储层中，但含气密度不均匀^[26]。经统计，形成致密深盆油气藏目的层孔隙度小于 12%、渗透率低于 1mD。徐家围子断陷沙河子组储层属特低孔致密储层，孔渗满足致密深盆油气藏形成的条件，气源岩层和储层紧密相邻，徐家围子断陷中心巨厚的湖相暗色泥岩持续大量生气，天然气在压实作用和膨胀作用产生的压差驱动下排出气源岩，首先在气源岩和储集岩的接触面上聚集，逐渐把储层中的水驱走，形成气水倒置的格局（图 10）。沙河子组煤系烃源岩持续大量生气，供气速率大于泄水速率，致使地层普遍高压、满盆含气（图 11）。

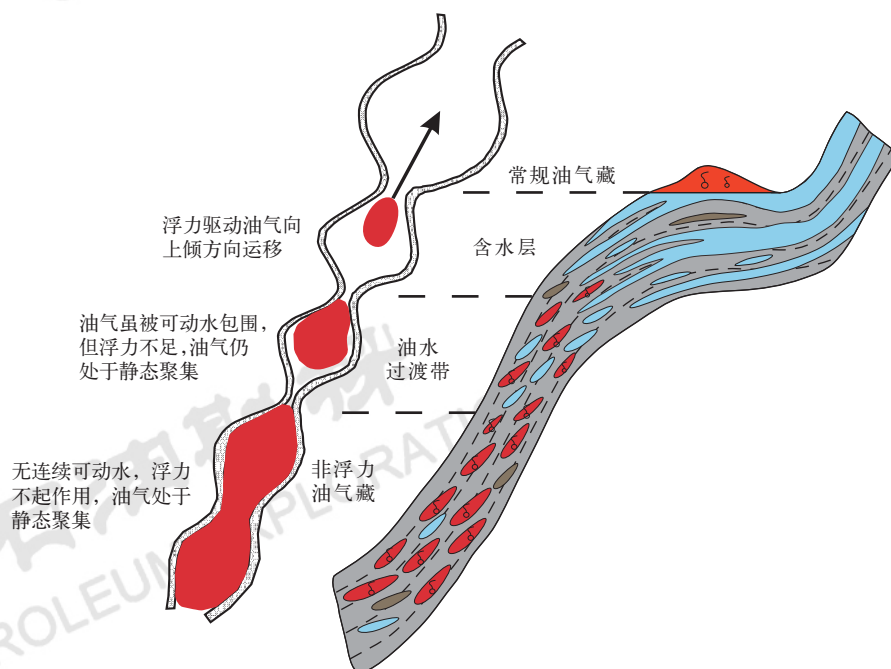


图 10 深盆气成藏模式图（据文献[26]修改）

Fig.10 Hydrocarbon accumulation pattern of deep gas in the basin (modified after reference [26])

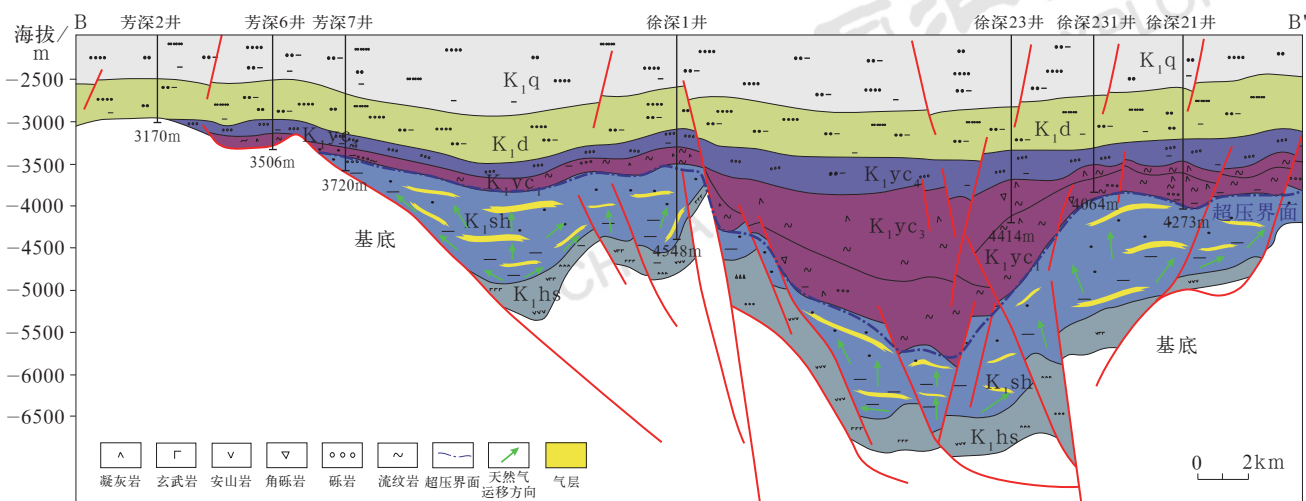


图 11 徐家围子断陷沙河子组致密气成藏模式图

Fig.11 Hydrocarbon accumulation pattern of tight gas in Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression

K₁q—泉头组; K₁d—登娄库组; K₁yc₄—营四段; K₁yc₃—营三段; K₁yc₁—营一段; K₁sh—沙河子段; K₁hs—火石岭组

3 沙河子组致密气藏宋深 9—平 5 井实现重大历史突破

以沙河子组烃源岩特征、沉积相带分布、储层物性分析为基础,重点考虑其致密深盆油气藏具备的致密非浮力高压条件,初步预测了沙河子组优质甜点的分布。徐家围子断陷沙河子组 SQ4 层序有利储层分布范围最广,Ⅰ类储层呈连片分布于达深 14H—达深 6—达深 15、宋深 4—宋深 10、徐深 21—徐深 212、徐深 44—徐深 27—徐深 213、徐深 54、达深 1—达深 24、达深 302—达深 4、宋深 2—宋深 9H 和徐深 801—徐深 401 等井区,Ⅱ类储层围绕Ⅰ类储层大面积分布,同时在升深 203—升深 201 井区、芳深 8—芳深 11—芳深 701 井区及肇深 12 井区、肇深 15 井区发育。在有利分布区带预测的指导下,通过“地质+地震”“地质+建模”“地质+地应力”三结合的方式,形成水平井优化部署技术,在徐家围子断陷宋站低凸起部署宋深 9—平 5 井。

宋深 9—平 5 井部署目的是开展提产试验,提升单井产能并确定主体开发技术。针对沙河子组 SQ4 砂体,采用地质工程一体化进行井位和轨迹优化,依托宋深 9H 导眼井入靶,轨迹方位角为 10.17°,于 2022 年 10 月 6 日开钻,12 月 11 日完钻,完钻层位沙河子组,完钻井深 4839m,水平段长 1254m,钻遇砂砾岩 1006m,砂岩钻遇率为 80.22%。钻进过程中见多层气测异常显示,全烃最大值为 62.78%,测井解释致密气Ⅰ类储层厚 713.0m,致密气Ⅱ类储层厚 24.4m。

施工过程中,充分发挥地质工程一体化优势,以地质模型为基础,优选钻头、动力钻具及提速工具,施工中采用优快钻井系统,优化“三大两高”激进式钻井参数,创出徐家围子断陷沙河子组水平井钻井施工纪录,钻井周期为 65.71d,钻完井周期为 86.25d,钻完井周期较设计缩短 22.51d。

宋深 9—平 5 井压裂段为 4416.0~3248.5m,段长 1167.5m,采用密集切割大规模体积压裂工艺,分 22 段 53 簇进行压裂,平均段长 31.2m、簇间距 16.9m。施工排量为 10~16m³/min,压力为 63~81MPa,用液强度为 27.23m³/m,加砂强度为 3.32t/m,同时开展极限加砂试验,最高砂比达 32%。该井累计加液 32335m³,加砂 2208m³,最终实现了加砂强度 7.93t/m,创造了沙河子组致密气藏水平井压裂段数、施工排量、用液强度、加砂强度等新纪录。

宋深 9—平 5 井采用水平井多段,段内多簇,高强度加砂,大排量压裂工艺施工,于 2023 年 4 月 18 日试气结束,12mm 油嘴测试产量 106×10⁴m³/d,创造了徐家围子断陷沙河子组致密气藏首口天然气测试产量达百万立方米的历史纪录。

宋深 9—平 5 水平井提产试验的成功,不仅验证了徐家围子断陷沙河子组致密砂砾岩非浮力成藏理论的准确性,同时也为总结修正致密气成藏主控要素和“甜点”富集规律提供了关键案例。徐家围子断陷沙河子组致密砂砾岩与煤系烃源岩互层发育,属于自生自储式成藏组合。尽管徐西断裂、徐中断裂及徐东断

裂整体切割沙河子组及上覆沉积地层,并控制了区域构造与沉降格局,从而影响砂砾岩扇体甚至煤系烃源岩的空间分布特征,但断裂并未作为天然气运移通道及圈闭条件对沙河子组致密气岩性气藏成藏过程产生重要影响。因此,断裂并不是徐家围子断陷沙河子组致密气藏的关键控制因素,实际上致密气富集“甜点”主要受厚层优质储层的控制,砂砾岩储层与煤系烃源岩的互层尽管理论上增大了源储接触面积,但并不利于致密气的富集,这也是导致宋深9—平5井仅在厚层砂砾岩储层发育的3248.5~4416.0m井段获得产量突破的原因。厚层优质砂砾岩储层的精准预测是现阶段沙河子组致密气勘探开发的关键。

4 沙河子组致密气勘探前景

4.1 沙河子组满盆含气,具备规模储量条件

徐家围子断陷沙河子组分布面积为3731km²,储层埋深为3200~3800m左右,有效厚度为21~87m;烃源岩发育,厚度为400~1000m,最大生气强度超过400×10⁸m³/km²,大于20×10⁸m³/km²的面积为1824.1km²,生气强度大的区带,探井产气量高^[27]。扇三角洲前缘和辫状河三角洲前缘发育有利储层,孔隙度约为5.2%,随埋深增加,储层物性呈下降趋势,但发育多层高孔渗带。

沙河子组整体表现为满凹含砂、满盆含气特征,烃源岩分布面积广、厚度大、生气强度高,地层普遍异常高压,具有源储叠置、近源聚集、持续成藏的特点,具备规模储量条件。徐家围子断陷沙河子组砂砾岩分布面积为3700km²,厚度为500~3000m,沙河子组4个三级层序(SQ1—SQ4)落实131个甜点体(I类甜点24个、II类甜点107个),估算资源量为7250×10⁸m³,其中探明储量为189×10⁸m³。下一步重点针对安达—宋站洼槽环宋深3井烃源岩发育区,开展致密储层评价预测技术攻关,落实岩性体目标1001.3km²、资源量1650×10⁸m³,计划分两轮部署22口井,争取探明1000×10⁸m³储量规模。

4.2 科技创新实现致密气藏经济有效动用

基于以沉积相控储层建模、甜点储层反演及地质工程一体化技术为核心的沙河子组致密气精细气藏描述技术,创建地质、工程、效益优选标准,立足富集区动用最大化,开展“地下地面定井位、地应力裂缝定方向、储层应力定轨迹”,精准刻画气井轨迹

空间展布。

充分发挥地质工程一体化优势,以单井产能为核心,EISC(工程作业智能支持中心)优快钻井、地质模型为技术保障,确保水平段有利于压裂改造最佳方向、位置及优化的水平段长度,保障压裂改造有利井筒条件。以达到储层“最优改造体积”为目标,对影响不同工艺改造体积的“关键参数”优化设计,形成以“密切割+暂堵转向+微缝有效支撑”为核心的体积压裂技术系列,具备支撑沙河子组经济有效开发的提产能力。

沙河子组具备规模储量条件,年产能规模可达100×10⁸m³。面对致密气藏经济有效动用难的挑战,以科技创新为手段,开展“富集区优选及潜力评价、立体开发优化部署、地质工程一体化建井、提质增效效益开发”研究,部署的宋深9—平5井创造了沙河子组近40年勘探以来的测试产量历史纪录,为后期松辽盆地沙河子组致密气藏勘探开发带来了广阔的前景。

5 结论

(1) 沙河子组气藏具有近源聚集、满盆含气的特点。沙河子组煤系烃源岩分布面积广、深度大,其中暗色泥岩TOC平均为1.07%,煤层TOC平均为68.6%,有机质类型主要为Ⅲ型,部分为I—II型,大部分处于过成熟演化阶段($R_o>2.0\%$),其晚期生烃、持续排烃的特点为沙河子组气藏提供充足的气源。沙河子组致密粗碎屑砂砾岩体储层在纵向上叠置发育,储层内部由于强烈的溶蚀作用而发育多层高孔渗带,成为砂砾岩致密气藏的“甜点”。沙河子组源储叠置,深部储层致密,无连续可动力,浮力对油气运移不起作用,油气处于静态聚集,沙河子组的致密非浮力高压条件造就了其满盆含气的格局。

(2) 宋深9—平5井试气产量创造了徐家围子断陷沙河子组致密气藏历史纪录,说明储层改造效果好,验证了以“密切割+暂堵转向+微缝有效支撑”及极限加砂为核心的新型体积压裂技术试验的可行性,为后续沙河子组储层改造提供了压裂设计思路 and 重要技术支撑。

(3) 徐家围子断陷沙河子组致密气富集“甜点”主要受厚层优质储层的控制,厚层优质砂砾岩储层的精准预测是沙河子组致密气勘探开发的关键。下一步勘探将围绕3个层次展开:一是以宋深9—平5井突破为契机,重点开展该井东南部沙河子组SQ4高产

砂体分布预测, 积极拓展勘探场面; 二是进一步夯实基础地质研究, 开展全断陷各个层段有利砂体精细分布预测并进行优选, 对沙河子组天然气成藏规律整体把握; 三是继续完善针对致密砂砾岩的储层改造及压裂技术, 力争实现高产。

参考文献

- [1] 姜洪福, 辛世伟. 海塔油田滚动开发探索实践[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
Jiang Hongfu, Xin Shiwei. Exploration practice of rolling development of Haita Oilfield[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [2] 姜洪福, 雷友忠, 皮蔚峰, 等. 松辽盆地三肇凹陷特低渗透扶杨油层开发理论与实践[M]. 北京: 地质出版社, 2021.
Jiang Hongfu, Lei Youzhong, Pi Yufeng, *et al.* Development theory and practice of ultra-low permeability Fuyang reservoir in Sanzhao Sag, Songliao Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2021.
- [3] 潘继平. 中国油气勘探开发新进展与前景展望[J]. 石油科技论坛, 2023, 42(1): 23–31.
Pan Jiping. New progress and outlook of China's oil and gas exploration and development[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2023, 42(1): 23–31.
- [4] 臧亚辉, 李继木, 宁君, 等. 松辽盆地南部海力锦地区上白垩统姚家组砂岩物源示踪及其构造背景综合研究: 来自岩石地球化学及锆石 U–Pb 年代学的制约[J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 175–190.
Zang Yahui, Li Jimu, Ning Jun, *et al.* Provenance and tectonic setting of the Upper Cretaceous Yaojia Formation sandstones in the Hailijin area, southern Songliao Basin: constraints from petrogeochemistry and zircon U–Pb chronology[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 175–190.
- [5] 门广田. 徐家围子断陷火山岩天然气成藏与分布主控因素研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2007.
Men Guangtian. Main controlling factors of gas accumulation and distribution in volcanic rocks in Xujiaweizi fault depression[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2007.
- [6] 舒萍, 毕晓明, 丁日新, 等. 徐深气田火山岩气藏气井产能特征与控制因素分析[J]. 中国科技信息, 2009, 15: 32–34.
Shu Ping, Bi Xiaoming, Ding Rixin, *et al.* Analysis of gas well productivity characteristics and control factors of volcanic gas reservoir in Xushan Gasfield[J]. China Science and Technology Information, 2009, 15: 32–34.
- [7] 罗光东. 徐家围子断陷兴城地区营城组火山岩旋回和期次的划分与对比[J]. 中外能源, 2012, 17(5): 69–72.
Luo Guangdong. Division and correlation of volcanic cycles and periods of Yingcheng Formation in Xingcheng area of Xujiaweizi fault depression[J]. Global Energy, 2012, 17(5): 69–72.
- [8] 赵福海, 孙国庆, 张野, 等. 松辽盆地徐西北部地区沙河子组细分层序格架下的沉积特征[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(1): 11–22.
Zhao Fuhai, Sun Guoqing, Zhang Ye, *et al.* Sedimentary characteristics under the fine-stratified sequence framework of Shahezi Formation in northwestern Xuxu area, Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(1): 11–22.
- [9] 张大智, 初丽兰, 李鑫, 等. 断陷盆地致密砂砾岩储层甜点综合评价及勘探成效: 以松辽盆地北部徐家围子断陷下白垩统沙河子组为例[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(5): 73–82.
Zhang Dazhi, Chu Lilan, Li Xin, *et al.* Comprehensive sweet point evaluation and exploration results of tight glutenite reservoir in fault basin: a case study of the Lower Cretaceous Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression in the northern Songliao Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(5): 73–82.
- [10] 印长海, 杨亮, 杨步增. 松辽盆地北部沙河子组致密气勘探及下步攻关方向[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(5): 135–141.
Yin Changhai, Yang Liang, Yang Buzeng. Exploration of tight gas in Shahezi Formation in northern Songliao Basin and its future development direction[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 135–141.
- [11] 白雪峰, 梁江平, 张文婧, 等. 松辽盆地北部深层天然气地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2018, 28(10): 1443–1452.
Bai Xuefeng, Liang Jiangping, Zhang Wenjing, *et al.* Geological conditions, resource potential and exploration direction of deep natural gas in northern Songliao Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 28(10): 1443–1452.
- [12] 李国欣, 朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 1–12.
Li Guoxin, Zhu Rukai. Development status, challenges and concerns of unconventional oil and gas in petrochina[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 1–12.
- [13] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望: 以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173–187.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, *et al.* Types, characteristics, mechanisms and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulation: a case study of tight oil and tight gas in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173–187.
- [14] 卢双舫, 谷美维, 张飞飞, 等. 徐家围子断陷沙河子组致密砂砾岩气藏的成藏期次及类型划分[J]. 天然气工业, 2017, 37(6): 12–20.
Lu Shuangfang, Gu Meiwei, Zhang Feifei, *et al.* Accumulation stages and types of tight conglomerate gas reservoirs in Shahezi Formation, Xujiaweizi fault depression[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(6): 12–20.
- [15] 胥云, 雷群, 陈铭, 等. 体积改造技术理论研究进展与发展方向[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 874–887.
Xu Yun, Lei Qun, Chen Ming, *et al.* Progress and development of volume stimulation techniques[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 874–887.
- [16] 侯启军. 松辽盆地北部深层断陷地质结构及演化研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
Hou Qijun. Geological structure and evolution of deep fault

- depression in northern Songliao Basin[D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [17] 蔡全升, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 松辽盆地徐家围子北部宋站地区沙河子组地震相与沉积相解释应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2017,32(4):1-10.
- Cai Quansheng, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, *et al.* Seismic facies and sedimentary facies interpretation of Shahezi Formation in Songzhan area, north Xujiaweizi, Songliao Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 2017,32(4):1-10.
- [18] 冯子辉, 李景坤, 李振广. 大庆探区煤系烃源岩的生烃条件研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2002,21(5):1-4.
- Feng Zihui, Li Jingkun, Li Zhengguang. A study on hydrocarbon potential of coal measure source rock in prospect area of Daqing[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2002,21(5):1-4.
- [19] 赵春娟, 徐淑娟, 程宏岗, 等. 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组沉积相类型及演化模式[J/OL]. 沉积学报, 2022:1-22[2023-05-01]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.106>.
- Zhao Chunjuan, Xu Shujuan, Cheng Honggang, *et al.* Sedimentary facies type and evolution model of Shahezi Formation in Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin [J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022:1-22[2023-05-01]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.106>.
- [20] 杨壮, 胡明毅, 蔡全升. 宋站地区达深2井区沙河子组层序划分与沉积相分析[J]. 中国海上油气, 2019,31(1):41-50.
- Yang Zhuang, Hu Mingyi, Cai Quansheng. Sequence division and sedimentary facies analysis of Shahezi Formation in Dashen2 wellblock of Songzhan region, Songliao Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2019,31(1):41-50.
- [21] 刘伟, 李景坤, 宋兰斌, 等. 汪深1井天然气成因类型及气源分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(1):38-40.
- Liu Wei, Li Jingkun, Song Lanbin, *et al.* Genetic type and source of the gas in well Wangshen No.1[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005,24(1):38-40.
- [22] 杨玉峰, 任延广, 李景坤, 等. 松辽盆地汪升地区深层天然气地球化学特征及成因[J]. 石油勘探与开发, 1999,26(4):18-21.
- Yang Yufeng, Ren Yanguang, Li Jingkun, *et al.* Geochemical characteristics and origin of natural gas in WangSheng area Songliao Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999,26(4):18-21.
- [23] 王晓莲. 徐家围子断陷安达凹陷沙河子组层序四沉积相研究及勘探意义[J]. 大庆石油地质与开发, 2015,34(3):47-52.
- Wang Xiaolian. Study and exploration significance of sequence SQ4 sedimentary facies of Shahezi Formation in Anda Sag, Xujiaweizi fault depression[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015,34(3):47-52.
- [24] 蔡来星, 卢双舫, 巩兴会, 等. 徐家围子断陷南部沙河子组层序地层格架及沉积特征[J]. 大庆石油地质与开发, 2015,34(2):26-33.
- Cai Laixing, Lu Shuangfang, Gong Xinghui, *et al.* Sequence stratigraphic framework and sedimentary characteristics of Shahezi Formation in southern Xujiaweizi fault depression[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(2):26-33.
- [25] 邵翌一, 吴朝东, 张大智, 等. 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组储层特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2019,40(1):101-106.
- Shao Zhaoyi, Wu Chaodong, Zhang Dazhi, *et al.* Reservoir characteristics and controlling factors of Shahezi Formation in Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019,40(1):101-106.
- [26] 张金亮, 常象春. 深盆地地质理论及应用[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- Zhang Jinliang, Chang Xiangchun. Geological theory and application of deep basin gas[M]. Beijing: Geology Press, 2002.
- [27] 刘超. 徐家围子断陷沙河子组致密气生储盖条件及成藏特征研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2015.
- Liu Chao. Research on tight gas reservoir-capping conditions and reservoir-forming characteristics of Shahezi Formation in Xujiaweizi fault depression[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2015.