

松辽盆地徐家围子断陷沙河子组储层特征及控制因素

邵墨一^{1,2}, 吴朝东¹, 张大智², 杨步增²

(1. 北京大学 地球科学与空间学院, 北京 100871; 2. 中国石油 大庆油田有限责任公司, 黑龙江 大庆 163712)

摘要:徐家围子断陷沙河子组是松辽盆地北部近期天然气勘探的主要目标,这类致密砂砾岩气层的储层特征及控制因素研究是首要的。通过分析其白垩系早期拉张构造背景条件下形成的一套断陷沉积,纵向上可划分为4个三级层序,各层序在断陷湖盆陡坡带和缓坡带发育扇三角洲和辫状河三角洲沉积。研究表明其储层主要为砂砾岩和含砾粗砂岩等粗碎屑岩。沙河子组储层孔隙包括原生粒间孔和次生孔隙,孔隙度主要分布在2%~8%,渗透率多小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为致密储层。沙河子组储层发育的控制因素包括埋深、沉积相带、岩石类型和次生成岩作用,埋藏浅的扇三角洲(辫状河三角洲)前缘、平原相砂砾岩储层物性好,含火山碎屑物质的砂岩、砂砾岩易于形成溶蚀孔隙,改善储集性能。徐家围子断陷沙河子组有利储层主要位于埋深小于4 000 m的安达东、西两侧的扇三角洲前缘、平原区和徐东、徐西的构造高部位扇体发育区,埋藏较浅的安达中部滨浅湖相和埋藏较深的徐东、徐西斜坡扇体发育区也是较有利的储层发育区。

关键词:储层特征;有利区预测;致密砂砾岩;沙河子组;徐家围子断陷;松辽盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Reservoir characteristics and controlling factors of Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin

Shao Zhaoyi^{1,2}, Wu Chaodong¹, Zhang Dazhi², Yang Buzeng²

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Daqing Oilfield Company Ltd., PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163712, China)

Abstract: The Shahezi Formation in the Xujiaweizi Fault Depression is the main target for recent natural gas exploration in the northern Songliao Basin. It is of great significance to study the reservoir characteristics and controlling factors of such tight glutenite gas reservoir. The deposits in the fault depression formed in an early Cretaceous extensional tectonic environment, can be divided into four third-order sequences vertically, each of which develops depositions of fan delta and braided delta in the steep and gentle slope zones of the rifted lacustrine basin. The reservoir is dominated by coarse clastic rocks such as glutenites and pebbly coarse sandstones. The reservoir pores of the Shahezi Formation consist of primary intergranular pores and secondary pores, with porosity mainly in the range of 2% to 8% and with permeability usually less than $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, indicating a tight reservoir. The controlling factors for reservoir development in the Shahezi Formation include burial depth, sedimentary facies belt, rock type and epigenesis. The fan delta front (braided delta) with shallow depth and glutenite reservoir of plain facies are characteristic of good reservoir quality, while the sandstones and glutenites with pyroclastic materials, tend to form dissolution pores and improve the reservoir performance. The favorable reservoirs of the Shahezi Formation in the Xujiaweizi Fault Depression are mainly located in the fan-delta front and the plain area with a burial depth less than 4 000 m at the east and west sides of Anda, as well as in the higher part of fan development zone of Xudong and Xuxi areas. The shore-shallow lake facies with shallow depth in central Anda and the Xudong and Xuxi slope fan development zones with deep depth are also favorable zones for reservoir development.

Key words: reservoir characteristic, favorable region prediction, tight glutenite, Shahezi Formation, Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin

收稿日期:2018-09-13;修订日期:2018-10-15。

第一作者简介:邵墨一(1983—),女,博士、工程师,石油地质、沉积储集层和层序地层。E-mail:shaozhaoyi@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05047-001);中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2016E-02)。

松辽盆地北部深层已在营城组火山岩取得重要勘探进展^[1-4],累计提交探明储量2 000多亿方。近年来随着勘探程度的提高^[5],剩余火山岩目标主要是小规模火山岩体和隐蔽性更强的层状致密火山岩^[6],储量接替难度大,迫切需要转变勘探思路,研究探索新的接替领域^[7-9]。通过深入分析地质条件和资源潜力,认识到徐家围子断陷沙河子组是下一步勘探重要的接替领域。

徐家围子断陷沙河子组是一套含煤和暗色泥岩以陆源碎屑岩沉积为主的地层^[10-12],由于埋藏深、成岩作用强、储层致密,过去一直作为深层重要的烃源岩研究,没有作为勘探目的层^[13-14]。随着非常规致密气勘探理论的深入和致密天然气藏勘探工艺技术的提高,沙河子组致密砂砾岩气藏已逐渐成为重要且现实的接替领域^[15-18],近年来,已陆续在安达地区和徐东地区取得勘探突破,徐家围子断陷沙河子组业已成为松辽盆地北部近期天然气勘探的主要目标。通过构造背景条件下的断陷沉积分析、层序地层学、储层特征及气藏控制因素研究,对徐家围子断陷沙河子组下步勘探有利区进行了预测,划分出两类有利勘探区,展现了该区良好的勘探前景。

1 区域地质背景

松辽深层断陷经历了初始张裂、强烈拉张和褶皱萎缩3个阶段,沙河子组是断陷强烈拉张时期的充填产物。受早期拉张与晚期挤压及走滑作用的综合影响,形成西断东超、中部隆起的复式箕状断陷结构。依据基岩顶面起伏、深层各反射层构造形态、断陷期地层发育展布情况,将徐家围子及周边划分为6个一级构造单元,其中徐家围子断陷区自西向东包括徐西凹陷、升平兴城凸起、徐东凹陷和徐东斜坡4个一级构造单元(图1a)。徐家围子断陷沙河子组内部存在四个规模较大的层序界面^[19],将沙河子组自下而上划分为4个三级层序,形成4套完整的沉积旋回(图1b),每套层序的低位域和高位域砂砾岩、砂岩储层相对发育^[20],湖侵体系域暗色泥岩较发育,是主要的烃源岩层段^[21]。

徐家围子断陷沙河子组在西侧陡坡带发育扇三角洲沉积,东侧缓坡带发育辫状河三角洲沉积,形成以粗碎屑为主的储层类型。由于断陷具有近物源、短物源的沉积特点,储层纵横向变化快、非均质性强(图2)。

2 沙河子组储层岩石学特征

通过岩心观察和薄片鉴定分析,沙河子组发育陆

源碎屑岩、火山沉积碎屑岩和火山碎屑岩,包括砂砾岩、砂岩、煤层以及凝灰质砂砾岩、凝灰质砂岩、沉凝灰岩等十多种岩性^[22]。

沙河子组砂砾岩按砾石含量包括砾岩、砂质砾岩和含砾砂岩,按砾径大小又可划分为粗砾石、中砾岩和细砾岩。砾石成份以中性、酸性火山岩为主,分选磨圆都比较差。西部扇三角洲以砾岩、砂质砾岩等为主,岩性较粗,东部辫状河三角洲发育砂质砾岩、含砾砂岩等,岩性相对较细。沙河子组砂岩类型主要为长石岩屑砂岩,少量岩屑砂岩和岩屑长石砂岩,成分成熟度和结构成熟度都较低^[10,23]。

从徐家围子断陷沙河子组已钻探井的显示和测井解释情况统计,粗碎屑的砾岩、砂质砾岩、含砾砂岩和砂岩均见到含气层,依据有单层试气成果和岩性较单一合试层试气成果统计(共16口井16层),试气见气流的岩性主要是砂砾岩的共13层,占到总气层数的81.2%,细砂岩3层,占18.8%。目前获工业气流的宋深9H井、宋深12H井和徐探1井均为砂砾岩和砂质砾岩,说明砂砾岩类是沙河子组主要的储集类型^[24-25]。

3 储层微观孔隙结构及物性特征

3.1 储层微观结构特征

通过岩石薄片和铸体薄片观察分析,依据孔隙成因及几何形状特点^[26],徐家围子断陷沙河子组储层分为原生孔隙和次生孔隙两大类^[27-29]。原生孔隙主要为粒间孔隙,发育于颗粒支撑岩石的碎屑颗粒之间的原生孔隙。本区粒间孔隙往往受到成岩作用的改造而缩小成为残余的原生粒间孔^[30](图3a),多发育于砾石支撑岩石的颗粒之间,埋藏深度较浅。在强压实作用下,此类孔隙孔径相对较小,仅局部零星可见。

次生孔隙是岩石经成岩改造后形成的孔隙。研究区主要发育有溶蚀作用形成的各类溶蚀孔和少量的裂缝。①粒间溶孔:在原生粒间孔隙与剩余粒间孔隙的基础上经过次生溶蚀作用后形成的溶蚀孔。粒间溶孔形态不规则,外形呈港湾状,孔隙大小和分布不均,常与长石、岩屑溶孔等伴生,并被细小的溶蚀缝连通。②粒内溶孔及铸模孔:主要是长石或岩屑颗粒被局部溶蚀产生的孔隙。该区铸体薄片可见粒内溶蚀孔隙(图3b),是徐家围子断陷沙河子组较常见的孔隙类型,是不稳定颗粒完全被溶蚀后形成的孔隙,孔隙几何形态与被溶颗粒相似,常通过原来的泥质包壳而保留颗粒外形,常见长石和岩屑溶蚀形成的铸模孔(图3c)。

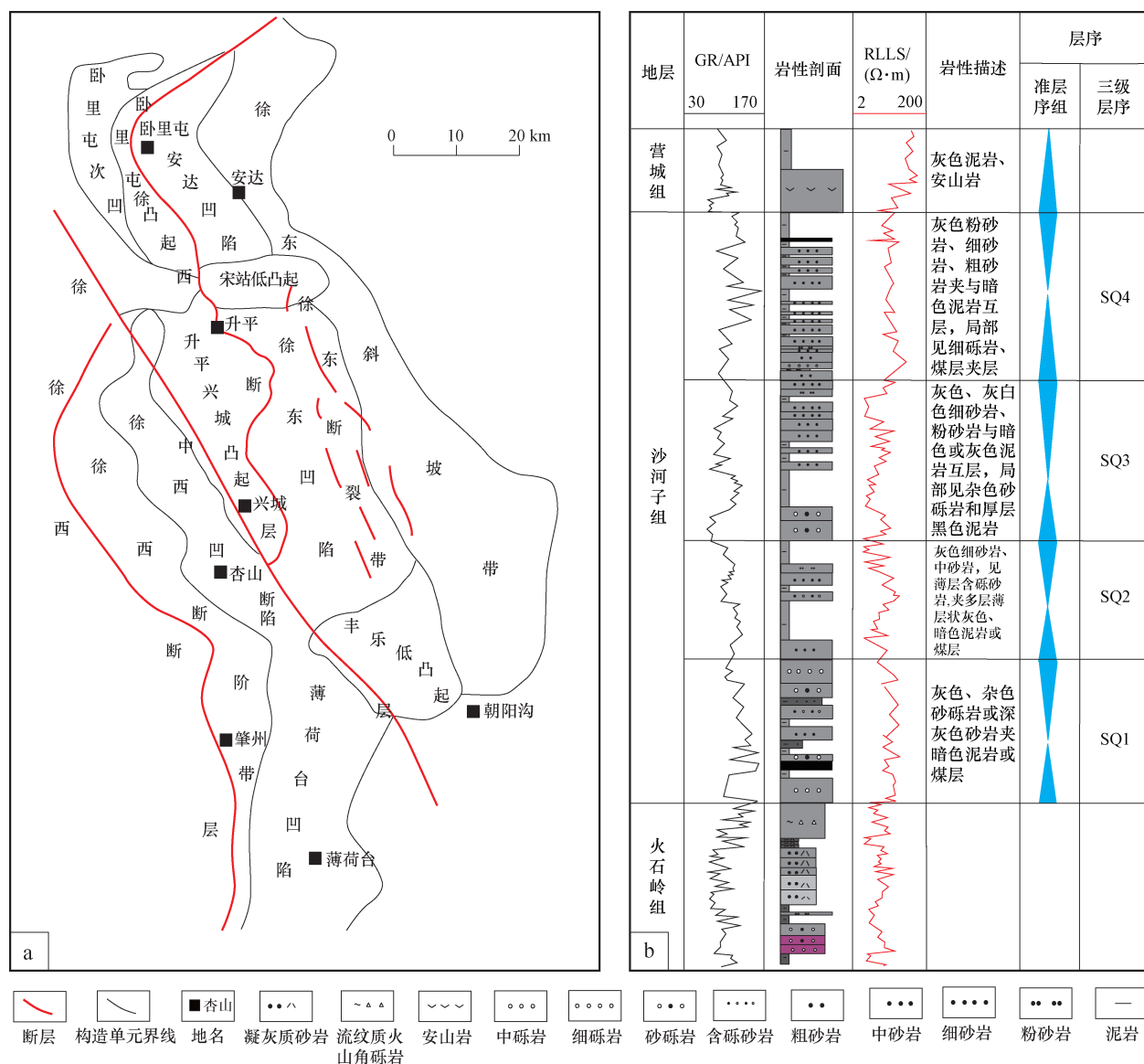


图1 徐家围子断陷构造特征及沙河子组岩性剖面

Fig. 1 Tectonic characteristics for Xujiaweizi Fault Depression and the lithologic profile of Shahezi Formation

a. 徐家围子断陷构造单元划分; b. 徐家围子断陷沙河子组地层综合柱状图

③ 裂缝:在部分样品中发育有裂缝,主要为压实作用、收缩作用以及各种构造应力作用形成的,一般在长石和岩屑颗粒上,也见顺颗粒边缘在杂基充填中有裂缝(图 3d)。

3.2 物性特征

通过对沙河子组岩心分析孔隙度和渗透率数据的分析表明,其孔隙度值主要分布在 2% ~ 8%,占样品总数的 72.2%,平均值为 4.3%。渗透率主要分布范围为小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,占样品总数的 71%。

美国早在 1978 年天然气政策法案规定,砂岩储层对天然气的渗透率等于或小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时的气藏可以被定义为致密砂岩气藏。美国联邦能源

委员会也把致密含气砂岩定义为空气渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩。按照我国的行业标准,把覆压条件下基质渗透率不大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩气层定义为致密砂岩气,徐家围子断陷沙河子组地面空气渗透率多小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,因此属于致密气范畴。

4 储层控制因素

储层物性影响因素包括原始沉积环境、后生成岩变化和裂缝改造等^[31]。通过对相关因素进行分析,徐家围子断陷沙河子组储层物性与岩性、次生溶蚀作用等有关,具体表现在以下方面。

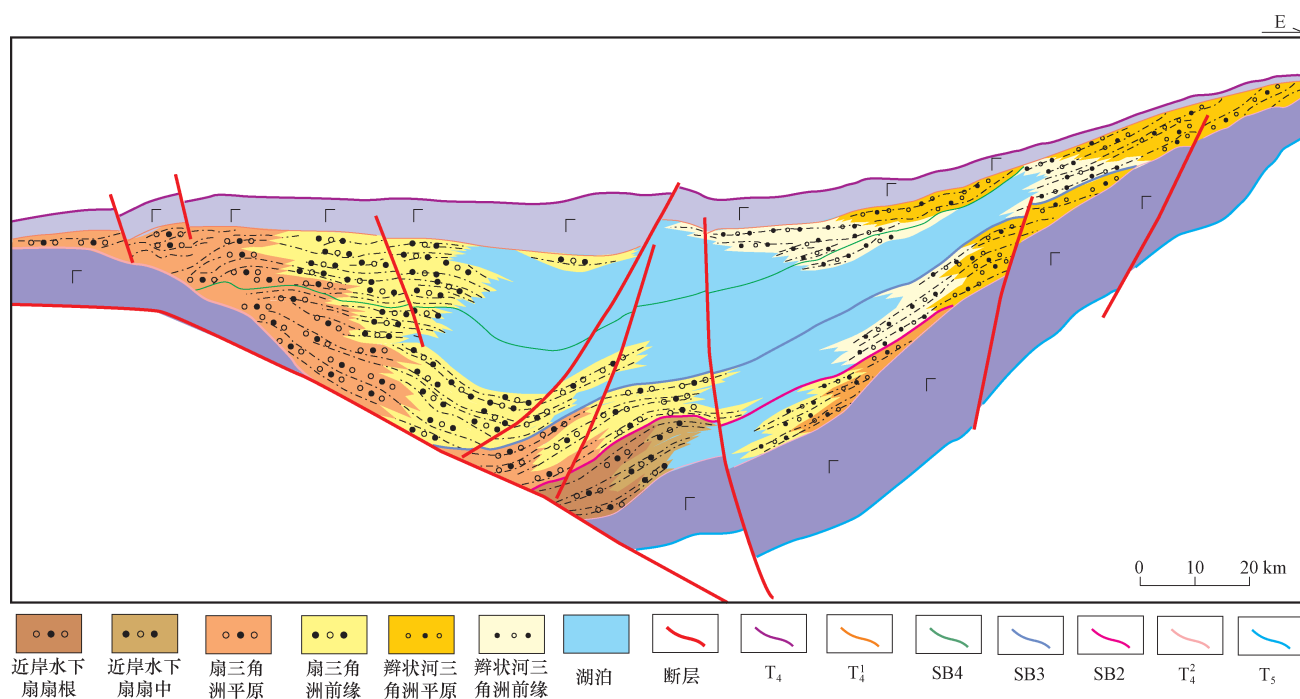


图2 徐家围子断陷沙河子组沉积相剖面

Fig. 2 Sedimentary facies profile of Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression

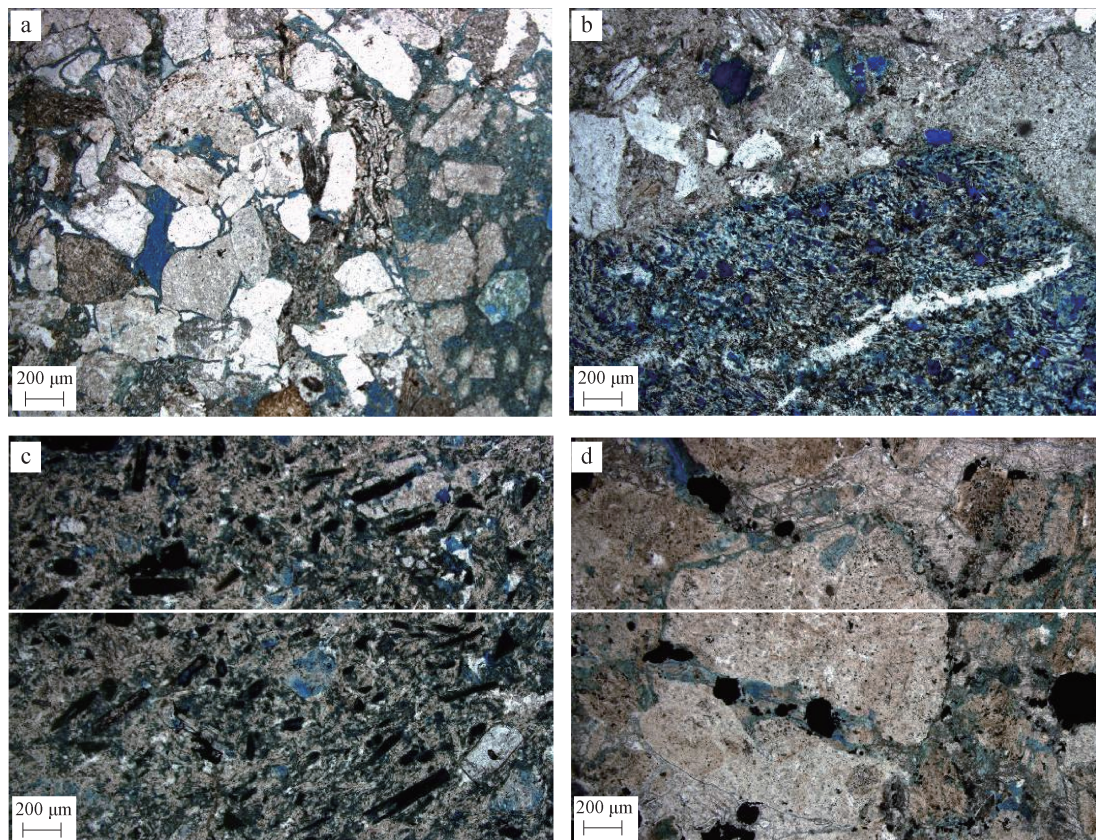


图3 徐家围子断陷沙河子组储层微观孔隙结构

Fig. 3 Micro-pore structure of Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression

- a. 砂质砾岩, 粒间孔, 达深14井, 埋深3 674.84 m, SQ4; b. 凝灰质砂砾岩, 粒内孔, 达深303井, 埋深3 414.391 m, SQ3;
c. 砾岩, 铸模孔, 达深14井, 埋深3 505.53 m, SQ3; d. 砾岩, 网状缝, 达深14井, 埋深3504.97m, SQ3

4.1 埋藏深度

徐家围子断陷沙河子组储层物性随埋深增大总体上具有减小趋势,但相同深度孔隙度变化范围比较大,说明影响因素比较复杂,特别是在埋深较大的3 500 ~ 4 000 m,也存在孔隙度相对较高的样品。因此,寻找优质储层,一方面要在埋深较浅的高部位,也要针对高孔隙成因,研究预测好储层发育部位。

4.2 沉积相带

沙河子组不同相带储层物性存在差异。经钻井资

料揭示分析,在各沉积微相类型中,扇三角洲前缘水下分流河道砂体、席状砂以及辫状河三角洲前缘水下分流河道、河口砂坝孔隙度最好,平原相辫状河道物性条件也较好(图4)。

4.3 岩性

由沙河子组岩性与孔隙度关系图统计得出,在沙河子组中砂砾岩物性要比砂岩好,砂砾岩孔隙度平均为4.13%,砂岩孔隙度平均为3.13%。凝灰质砂岩和凝灰岩储层物性最好,平均孔隙度分别可达到5.33%和5.40%。(图5)。

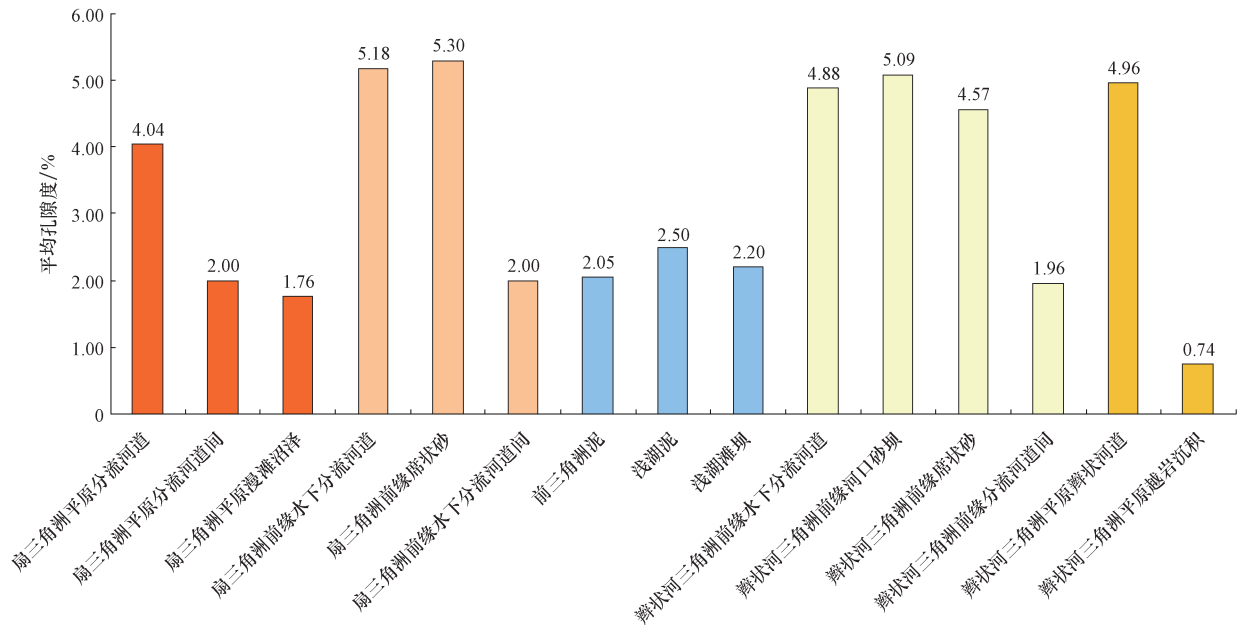


图4 徐家围子断陷沙河子组沉积微相与孔隙度关系

Fig. 4 Relationship between sedimentary microfacies and porosity of Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression

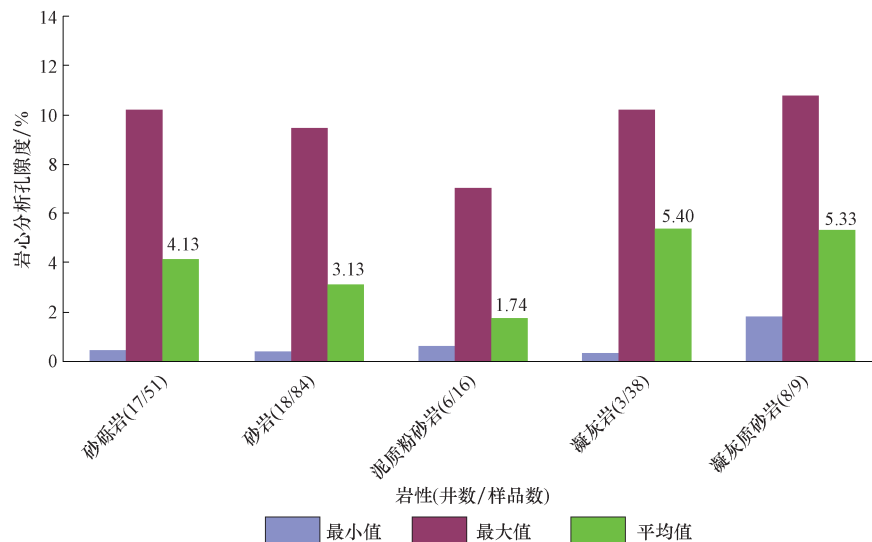


图5 徐家围子断陷沙河子组不同岩性储层有效孔隙度统计

Fig. 5 Statistical histogram of effective porosity of different lithologic reservoirs in Shahezi Formation of Xujiaweizi Fault Depression

4.4 成岩作用

成岩作用对储层孔隙既有破坏作用也有改善作用,由于沙河子组埋深较大,压实作用和胶结作用强,是储层物性变差的主要因素。沙河子组储层岩石薄片鉴定和铸体薄片图像分析发现,部分砾岩以及含砾砂岩中,长石岩屑和火山岩碎屑成分经后期各种有机酸的溶解、溶蚀作用产生次生孔隙,在一定程度上增加了储层的孔隙空间,对改善沙河子组储层物性有一定的积极作用。

5 有利储层发育区预测

依据对储层物性影响因素的分析,可以对有利储层发育区进行宏观预测,由于受压实和胶结成岩作用影响,埋深是重要影响因素^[32],从目前勘探实践看,有效储层埋深一般不超过4 000 m。

沉积微相对储层物性的影响也比较明显,但考虑到平面宏观预测的资料精度,目前主要按照前缘、平原亚相最有利,滨浅湖亚相区较差考虑。

岩性的影响体现在两个方面,粗细变化对储层物性的影响实际上是沉积相变化影响的直接原因,可与沉积相影响结合考虑,含火山成分的影响通过次生溶蚀作用体现,可与次生成岩改造结合考虑^[33]。

成岩作用的影响除了考虑埋深,预测岩石中火山成分变化是一个重要切入点,分析火山物质含量变化规律,预测高含火山物质主要发育层位和平面位置,对于预测有利储层发育区具有重要意义,是下步储层研究工作的一项重要任务。

综合沙河子组 SQ1—SQ4 等4个层序埋深、沉积相和岩性变化,将沙河子组按储层发育程度划分为3类区。埋藏小于4 000 m,以扇(辫状河)三角洲前缘、平原相为主的区域划分为一类区,该区域沙河子组储层孔隙度一般为4%~6%,是最有利储层发育区,主要位于徐西坳陷南北和西侧斜坡高部位、安达升平隆起带、徐东坳陷北部和徐东斜坡带,是目前勘探的首选地区;埋深小于4 000 m 邻近扇(辫状河)三角洲前缘的滨浅湖区为二类有利区,该区域砂砾岩孔隙度一般3%~5%,主要分布于徐西坳陷南部和徐东坳陷北部,通过地球物理手段,可以预测寻找局部储层甜点区;徐西坳陷和徐东坳陷中部深洼区,埋深一般大于4 500 m,沉积相带以湖湘为主,基本没有钻井揭示,推测孔隙度一般在2%~4%,储层致密,现有技术条件下勘探发现的难度较大(图6)。

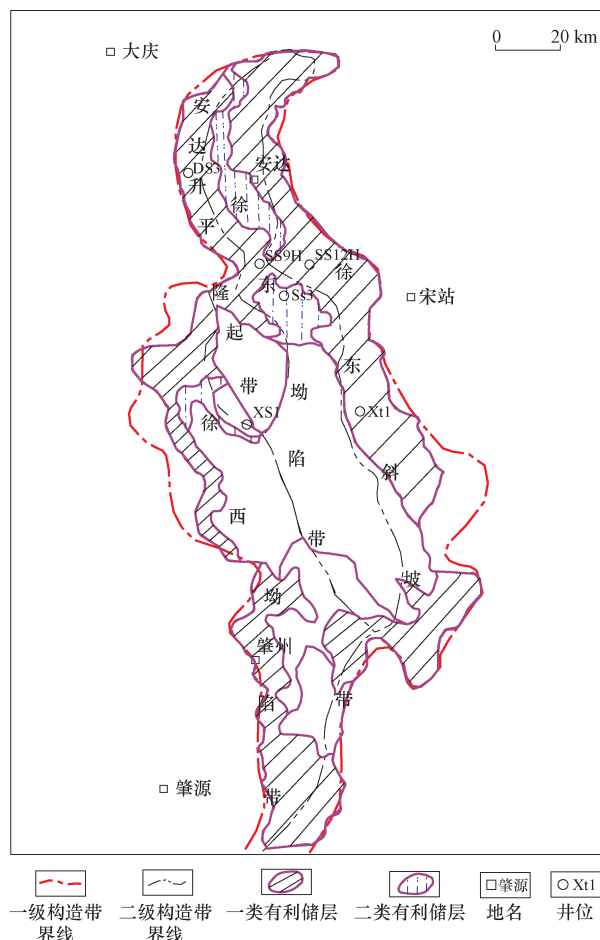


图6 徐家围子断陷沙河子组有效储层发育区预测

Fig. 6 Prediction of effective reservoir development area of Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression

6 结论

1) 徐家围子断陷沙河子组为断陷沉积,扇三角洲、辫状河三角洲形成近物源、短物源沉积,储层纵横向变化快,非均质性强。沙河子组含气性好的储层岩石类型以砂砾岩为主。沙河子组储层发育少量原生粒间孔,以次生溶蚀孔隙为主,孔隙度低,物性条件差,为致密储层。

2) 影响沙河子组储层物性的因素主要有埋深、沉积相带、岩性类型和次生成岩作用,埋藏浅的扇(辫状河)三角洲前缘、平原物性最好,含火山碎屑物质储层受溶蚀作用影响可改善储集物性条件。

参考文献

- [1] 印长海, 绪磊, 杨亮, 等. 莺山凹陷营城组火山岩储层特征及成因[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 5: 92-96.
Yin Changhai, Xu Lei, Yang Liang, et al. Characteristics and genesis of volcanic reservoirs in the Yingcheng Formation of the Lushan de-

- pression[J]. *Petroleum Geology & Development in Daqing*, 2014, 5: 92–96.
- [2] 刘计勇, 兰正凯, 皮定成, 等. 松辽盆地徐家围子断陷层火山岩储层特征[J]. *内蒙古石油化工*, 2009, 24: 172–173.
- Liu Jiyong, Lan Zhengkai, Pi Dingcheng, et al. Characteristics of volcanic reservoirs in Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2009, 24: 172–173.
- [3] 王民, 卢双舫, 王文广, 等. 火山岩储层天然气运聚成藏模拟: 以徐家围子断陷深层为例[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2017, 42(3): 397–409.
- Wang Min, Lu Shuangwei, Wang Wenguang, et al. Gas Migration and Accumulation Modelling in Volcanic Reservoirs, Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin[J]. *Journal of Earth Science*, 2017, 42(3): 397–409.
- [4] 周义博. 徐家围子断陷气源断裂输导天然气能力评价[J]. *大庆石油地质与开发*, 2016, 35(1): 19–24.
- Zhou Yibo. Evaluation of the Gas Transporting Capacity for The source-rock Faults in Xujiaweizi Fault Depression[J]. *Petroleum Geology & Development in Daqing*, 2016, 35(1): 19–24.
- [5] 黄玉龙, 刘春生, 张晶晶, 等. 松辽盆地白垩系火山岩气藏有效储层特征及成因[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(3): 420–428.
- Huang Yulong, Liu Chunsheng, Zhang Jingjing, et al. characteristics and genesis of the effective volcanic gas reservoirs of the lower, Songliao Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(3): 420–428.
- [6] 魏翔宇, 高有峰, 魏琴, 等. 蚀变对中基性火山岩储层的控制作用: 以松辽盆地徐家围子断陷下白垩统营城组为例[J]. *世界地质*, 2017, 36(2): 541–551.
- Wei Xiangyu, Gao Youfeng, Wei Qin, et al. Control effect of alteration on medium-basic volcanic reservoirs: A case study of the Lower Cretaceous Yingcheng Formation in the Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin[J]. *Global Geology*, 2017, 36(2): 541–551.
- [7] 付广, 康德江. 松辽盆地北部深层含气系统演化及对天然气成藏与分布的控制作用[J]. *油气地质与采收率*, 2006, 2: 30–34.
- Fu Guang, Kang Dejiang. Evolution of deep gas-bearing systems in the northern Songliao Basin and its control on gas accumulation and distribution[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2006, 2: 30–34.
- [8] 吴河勇, 冯子辉, 杨永斌, 等. 松辽盆地北部深层天然气勘探风险评价[J]. *天然气工业*, 2006, 6: 6–9.
- Wu Heyong, Feng Zihui, Yang Yongbin, et al. Risk assessment of deep natural gas exploration in the northern Songliao Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 6: 6–9.
- [9] 巩磊, 高帅, 吴佳朋, 等. 徐家围子断陷营城组火山岩裂缝与天然气成藏[J]. *大地构造与成矿学*, 2017, 41(2): 283–290.
- Gong Lei, Gao Shuai, Wu Jiapeng, et al. Natural Gas Accumulation and Fractures in Volcanic Rocks of Yingcheng Formation in Xujiaweizi Fault Depression[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2017, 41(2): 283–290.
- [10] 柳成志, 王子佳. 徐家围子断陷沙河子组储层特征研究[J]. *石油化工高等学校学报*, 2014, 1: 52–55.
- Liu Chengzhi, Wang Zijia. Reservoir Characteristics of Shahezi Group Xujiaweizi Fault Depression[J]. *Journal of Petrochemical Universities*, 2014, 1: 52–55.
- [11] 蔡全升, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 强烈断陷期小型湖盆沉积充填演化特征——以松辽盆地徐家围子断陷宋站地区沙河子组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(2): 259–269.
- Cai Quansheng, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, et al. Sedimentary filling evolution of small-scale lake basins during intensive faulting: an example from the Shahezi Formation of Songzhan region in Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(2): 259–269.
- [12] 王义章. 松辽盆地北部徐家围子断陷深层烃源岩评价及分布特征研究[J]. *西部探矿工程*, 2017, 29(9): 75–77, 81.
- Wang Yizhang. Evaluation and distribution characteristics of deep source rocks in Xujiaweizi fault depression, northern Songliao Basin[J]. *West-china Exploration Engineering*, 2017, 29(9): 75–77, 81.
- [13] 张尔华, 姜传金, 张元高, 等. 徐家围子断陷深层结构形成与演化的探讨[J]. *岩石学报*, 2010, 1: 149–157.
- Zhang Erhua, Jiang Chuanjin, Zhang Yuangao, et al. Discussion on the formation and evolution of deep structures in Xujiaweizi fault depression[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 1: 149–157.
- [14] 蒙启安, 杨永斌, 金明玉. 断裂对松辽盆地庆深大气田的控制作用[J]. *石油学报*, 2006, S1: 14–17.
- Meng Qi'an, Yang Yongbin, Jin Mingyu. Control of faults on Qingshen gas field in Songliao Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, S1: 14–17.
- [15] 赵静. 致密砂砾岩有效储层主控因素——以松辽盆地南部A断陷为例[J]. *断块油气田*, 2017, 2: 165–168.
- Zhao Jing. Main controlling factors of effective reservoir of tight glutenite——Taking A fault zone in southern Songliao Basin as an example[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2017, 2: 165–168.
- [16] 高阳, 李忠新. 基于主成分分析的致密砂砾岩孔隙度测井评价方法[J]. *沉积学报*, 2016, 4: 716–724.
- Gao Yang, Li Zhongxin. Main controlling factors of tight sandy conglomerate effective reservoir: a case study of A Fault Depression in southern Songliao Basin[J]. *Journal of Sedimentology*, 2016, 4: 716–724.
- [17] 陆加敏, 刘超. 断陷盆地致密砂砾岩气成藏条件和资源潜力——以松辽盆地徐家围子断陷下白垩统沙河子组为例[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(2): 53–60.
- Lu Jiamin, Liu Chao. Accumulation of glutenite gas reservoir conditions and resource potential in faulted basins: A case study of the Lower Cretaceous Shahezi Formation in the Xujiaweizi fault depression of the Songliao Basin[J]. *China Petroleum Exploration*[J]. 2016, 21(2): 53–60.
- [18] 王晓莲. 徐家围子断陷沙河子组致密储层分级评价[J]. *特种油气藏*, 2016, 23(3): 113–117.
- Wang Xiaolian. Classification of tight reservoirs in the Shahezi Forma-

- tion of Xujiaweizi Fault Depression[J]. Specialty Oil and Gas Reservoirs, 2016, 23(3): 113–117.
- [19] 陈俊安, 赵泽辉, 江黎. 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组层序地层格架建立与模式研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 10: 183–190.
- Chen Junan, Zhao Zehui, Jiang Li. Establishment and model of sequence stratigraphic framework of Shahezi Formation in Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 10: 183–190.
- [20] 任延广, 朱德丰, 万传彪, 等. 松辽盆地北部深层地质特征与天然气勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2004, 4: 12–18.
- Ren Yanguang, Zhu Defeng, Wan Chuanqi, et al. Deep geological characteristics and natural gas exploration direction in the northern Songliao Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2004, 4: 12–18.
- [21] 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 Shuangwei, Gong Xinghui, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary characteristics of the Shahezi Formation in the southern Xujiaweizi fault depression[J]. Petroleum Geology & Development in Daqing, 2015, 34(2): 26–33.
- [22] 刘超. 松辽盆地徐家围子地区沙河子组气源岩与致密砂砾岩气资源潜力评价[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(3): 429–438.
- Liu Chao. Evaluation of gas source rocks and tight glutenite gas resources potential of Shahezi Formation in Xujiaweizi area, Songliao Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(3): 429–438.
- [23] 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): 12–21.
- Lu Shuangwei, Gu Meiwei, Zhang Feifei, et al. The accumulation period and type division of tight glutenite gas reservoirs in Shahezi Formation of Xujiaweizi fault depression[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(6): 12–21.
- [24] 肖丽华, 张磊, 田伟志, 等. 徐家围子断陷深层致密砂砾岩优质储层预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 4: 1174–1182.
- Xiao Lihua, Zhang Lei, Tian Weizhi, et al. Prediction of high-quality reservoirs of deep tight glutenite in Xujiaweizi fault depression[J]. Journal of Central South University: Natural Science, 2014, 4: 1174–1182.
- [25] 王雪峰. 徐家围子断陷营城组火山岩断盖时空匹配及其对天然气成藏的控制作用[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(4): 9–14.
- Wang Xuefeng. Time-space matching of volcanic rock faults in the Yingcheng Formation of Xujiaweizi fault depression and its control on natural gas accumulation[J]. Petroleum Geology & Development in Daqing, 2017, 36(4): 9–14.
- [26] 司马立强, 杨国栋, 吴丰, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组致密砂砾岩孔隙分形特征及影响因素探讨[J]. 测井技术, 2016, 5: 609–616.
- Sima Liqiang, Yang Guodong, Wu Feng, et al. Pore fractal characteristics and influencing factors of tight glutenite in Baikouquan Formation of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Well Logging Technology, 2016, 5: 609–616.
- [27] 宋延杰, 胡凯, 唐晓敏, 等. 基于孔隙曲折度与等效岩石元素理论的致密砂砾岩导电模型[J]. 东北石油大学学报, 2015, 1: 9–16.
- Song Yanjie, Hu Kai, Tang Xiaomin, et al. Conductive model of tight glutenite based on pore tortuosity and equivalent rock element theory[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2015, 1: 9–16.
- [28] 刘庆辉. 安达南部地区沙河子组地层致密砂砾岩储层特征与预测[J]. 长江大学学报(自科版), 2014, 16: 38–40.
- Liu Qinghui. Characteristics and prediction of tight glutenite reservoirs in the Shahezi Formation in the southern part of Anda[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science), 2014, 16: 38–40.
- [29] 冉法海. 徐家围子断陷营城组火山岩储层微观孔隙结构特征[J]. 西部探矿工程, 2013, 11: 53–54.
- Ran Fahai. Micro-pore structure characteristics of volcanic reservoirs in the Yingcheng Formation of the Xujiaweizi fault depression[J]. West-china Exploration Engineering, 2014, 16: 38–40.
- [30] 孟元林, 梁洪涛, 魏巍, 等. 浊沸石溶蚀过程的热力学计算与次生孔隙发育带预测——以徐家围子断陷深层为例[J]. 沉积学报, 2013, 3: 509–515.
- Meng Yuanlin, Liang Hongtao, Wei Wei, et al. Thermodynamic calculation of turbidite dissolution process and prediction of secondary pore development zone——A case study of the deep layer of Xujiaweizi fault depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 3: 509–515.
- [31] 程志国, 胡婷婷, 瞿建华, 等. 准噶尔盆地玛西地区致密砂砾岩优质薄储层预测[J]. 物探与化探, 2015, 5: 891–896.
- Cheng Zhiguo, Hu Tingting, Yan Jianhua, et al. Prediction of high quality thin reservoirs of tight glutenite in Marcy area of Junggar Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 5: 891–896.
- [32] 张大智, 张晓东, 杨步增. 徐家围子断陷沙河子组致密气地质甜点综合评价[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(5): 98–103.
- Zhang Dazhi, Zhang Xiaodong, Yang Buzeng. Comprehensive evaluation of geological sweet point of tight gas of Shahezi Formation in Xujiaweizi fault depression[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(5): 98–103.
- [33] 张晓东, 于晶, 张大智, 等. 徐家围子断陷沙河子组致密气成藏条件及勘探前景[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(5): 86–91.
- Zhang Xiaodong, Yu Jing, Zhang Dazhi, et al. Tight gas accumulation conditions and exploration prospects of Shahezi Formation in Xujiaweizi fault depression[J]. Petroleum Geology & Development in Daqing, 2014, 33(5): 86–91.

(编辑 张玉银)