高波,潘哲君,刘连杰,等.松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂砾岩储层有效性综合评价.吉林大学学报(地球科学版),2025,55(1):31-45.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230115.
Gao Bo,Pan Zhejun,Liu Lianjie,et al. Comprehensive Evaluation on the Effectiveness of Conglomerate Reservoir in Shahezi Formation of Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2025,55(1):31-45.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230115.

松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂砾岩储层有效性综合评价

高 波[1,2],潘哲君[1],刘连杰[2],李玲玲[2],洪淑新[2],潘会芳[2],张 波[2]
1.东北石油大学地球科学学院,黑龙江 大庆 163318
2.大庆油田有限责任公司勘探开发研究院,黑龙江 大庆 163712

摘要:松辽盆地徐家围子断陷深层砂砾岩层系中天然气藏为典型的低孔、低渗非常规资源类型,局部发育高孔、高渗带,满足致密气成藏需求。为揭示砂砾岩储层结构及其对试气产能的影响,应用薄片鉴定、扫描电镜、压汞、二维核磁等技术方法,开展松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂砾岩储层的有效性剖析。研究结果表明:天然气储层岩性以砂岩、砾岩为主,成分成熟度及结构成熟度低,储集空间以次生溶蚀孔隙为主,局部发育沟通孔隙的微裂缝,提高了储层的渗透性;砂砾岩储层孔喉半径分布范围大(纳米级—微米级),属于微孔喉型储层,受岩石分选、黏土矿物及碳酸盐等胶结物发育程度的影响,砾岩孔喉连通性好于砂岩,粗砂岩好于细砂岩;在垂向上,层序四孔喉结构好于其他层序;储层孔隙度主要分布于0.3%~8.0%之间,渗透率多小于$0.987\ 0\times10^{-3}\mu m^2$,据物性与试气产能相结合的经验统计法,估算最小流动孔喉半径进而确定致密砂岩孔隙度下限为3.0%,渗透率为$0.019\ 7\times10^{-3}\mu m^2$,致密砾岩孔隙度下限为2.8%,渗透率为$0.019\ 7\times10^{-3}\mu m^2$。

关键词:致密储层;砂砾岩;孔隙结构;物性下限;综合评价;沙河子组;徐家围子断陷;松辽盆地
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230115 **中图分类号**:P618.13 **文献标志码**:A

Comprehensive Evaluation on the Effectiveness of Conglomerate Reservoir in Shahezi Formation of Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin

Gao Bo[1,2], Pan Zhejun[1], Liu Lianjie[2], Li Lingling[2], Hong Shuxin[2], Pan Huifang[2], Zhang Bo[2]
1. *School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing* 163318, *Heilongjiang, China*
2. *Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing* 163712, *Heilongjiang, China*

收稿日期:2023-05-06
作者简介:高波(1984—),女,高级工程师,主要从事非常规储层评价方面的研究,E-mail:gb915@petrochina.com.cn
通信作者:潘哲君(1974—),男,教授,博士,主要从事非常规油气工程与地质一体化方面的研究,E-mail:zhejun.pan@nepu.edu.cn
基金项目:国家自然科学基金项目(U23A20596);黑龙江省"揭榜挂帅"科技攻关项目(DQYT 2022-JS-758)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (U23A20596) and Heilongjiang Province "Unveiling the List and Leading the Way" Science and Technology Research Project (DQYT 2022-JS-758)

Abstract: The natural gas reservoir in the deep sand and gravel strata of the Xujiaweizi fault depression in the Songliao basin is a typical unconventional resource type of "low porosity and low permeability", with locally developed high porosity and high permeability zones, meeting the requirements for tight gas reservoir formation. Using techniques such as thin section identification, scanning electron microscopy, mercury intrusion detection, and two-dimensional nuclear magnetic resonance, an effective analysis of the sand and gravel reservoirs in the Shahezi Formation of the Xujiaweizi fault in the Songliao basin was conducted to reveal the structure of the sand and gravel reservoirs and their impact on productivity. The research results indicate that the lithology of natural gas reservoirs is mainly composed of sandstone and conglomerate, with low compositional and structural maturity. The reservoir space is mainly composed of secondary dissolution pores, and locally developed microcracks connecting pores, which improve the permeability of the reservoir; The distribution range of pore throat radius in gravel reservoirs is large (nanoscale to micrometer scale), belonging to the micropore throat type reservoir. Influenced by rock sorting, clay minerals, and the development degree of carbonates and other cementitious substances, the connectivity of pore throats in gravel reservoirs is better than that in sandstone, and that in coarse sandstone is better than that in fine sandstone. In the vertical direction, the pore throat structure of the fourth sequence is better than other sequences; The porosity of the reservoir is mainly distributed between 0.3% and 8.0%, and the permeability is mostly less than $0.987\ 0\times10^{-3}\ \mu m^2$. Based on the empirical statistical method combining physical properties and gas production capacity, the minimum flow pore throat radius is estimated to determine the lower limit of porosity for tight sandstone as 3.0%, with a permeability of $0.019\ 7\times10^{-3}\ \mu m^2$. The lower limit of porosity for tight conglomerate is 2.8%, and the permeability is $0.019\ 7\times10^{-3}\ \mu m^2$.

Key words: tight reservoir; sandy conglomerate; pore structure; physical property lower limit; comprehensive evaluation; Shahezi Formation; Xujiaweizi fault depression; Songliao basin

0 引言

致密气是一种储集于低孔、低渗储层(孔隙度小于10%,空气渗透率小于$0.987\times10^{-3}\ \mu m^2$)中的天然气资源,通过后期工程改造才能实现经济开采[1-3]。致密气资源分布于全球70多个盆地,资源量为常规天然气资源量的3～4倍[4]。我国的鄂尔多斯盆地、四川盆地、塔里木盆地、准噶尔盆地、松辽盆地等都具备形成致密砂岩气藏的地质条件,其中鄂尔多斯盆地、四川盆地勘探程度较高[5]。在致密储层中,深层致密砂砾岩储层逐渐引起重视,尤其近几年渤海湾盆地济阳坳陷深层砂砾岩体的油气勘探取得了巨大突破[6],冀中坳陷廊固凹陷西部沙河街组三段下部的深层砾岩体中也获得油流和油气流[7]。

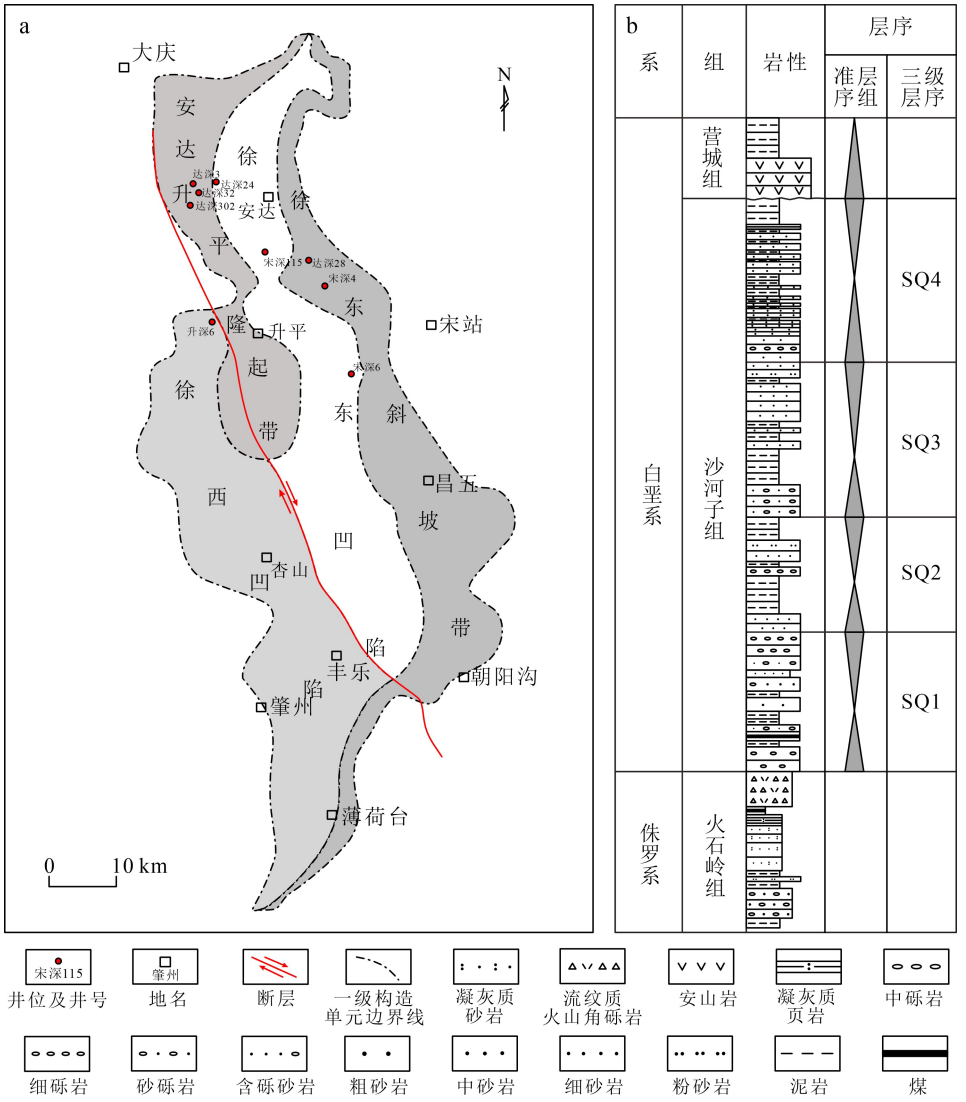
在松辽盆地徐家围子断陷沙河子组满凹含气,具有4 200亿m^3的资源潜力,是大规模效益增储的资源基础[8-9]。近年来,部署的水平井和直井均获工业气流,展现出良好的勘探前景。沙河子组沉积于断陷湖盆,砂体具"多岩性、多物源、多沉积相带"的特点,广泛分布辫状河三角洲、扇三角洲和湖相沉积,地层厚度为500～1 000 m,发育砂岩、砾岩、泥岩和煤层多套岩性组合[10-11]。沙河子组储层普遍发育砂砾岩,具有"源储叠置、近源聚集"的成藏特点,储层普遍含气,具有较大勘探潜力[11]。但目前对致密砂砾岩储层有效性研究尚不够深入,制约了甜点分类及资源潜力评价。本文应用薄片鉴定、扫描电镜、压汞、二维核磁等多项技术手段,开展了松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂砾岩储层岩性、储集空间类型、孔喉连通性和物性下限等研究,以期为砂砾岩勘探开发提供依据。

1 区域地质特征

松辽盆地是我国东北地区大型中—新生代陆相沉积盆地,面积约为$26\times10^4\ km^2$。徐家围子断陷为松辽盆地规模较大的断陷,处于东南断陷区一级构造单元内,在多期拉张和挤压应力作用下形成,不

仅平面上分割性较强，而且次级构造形态也比较丰富。该断陷位于中央隆起带东翼一侧、松辽盆地中部徐家围子—北安断陷带上，西邻中央古隆起，东接朝阳沟凸起，北部以鞍部与林甸黑鱼泡断陷沟通，南与王府断陷相连，为一近南北走向的具西断东超构造的箕状断陷，可划分为安达升平隆起带、徐西凹陷、徐东凹陷和徐东斜坡带 4 个一级构造单元（图 1a），面积为 5 350 km^2。

沙河子组总体表现为南北向展布[12-13]，地层发育特征受控陷断层影响，断层下盘厚度大，上盘遭受剥蚀变薄，靠近徐西断层一侧地层厚度大，向东呈楔状变薄。沉积物粒度上，靠近徐西断层附近沉积物粒度较大，远离徐西断层沉积物的粒度相应减小。依据地层岩性及组合，沙河子组具有断陷地层岩性复杂、互层频繁的特点，发育砾岩、砂砾岩、含砾砂岩、砂岩、粉砂岩、泥岩、煤和凝灰岩等多种岩性，每种岩性的单层厚度一般几米至十几米，岩性一般不纯，垂向上交替发育（图 1b）。其中，陡坡带地形起伏更大，物源供给相对充足，主要发育近源搬运、快速堆积的产物，以砾岩、砂砾岩、含砾砂岩等相对较粗的岩性为主，粉砂岩和泥岩一般以夹层形式发育，岩石的成分和成熟度都偏低。



据文献[12－13]修编。

图 1　松辽盆地徐家围子断陷一级构造单元划分(a)及沙河子组岩性剖面图(b)

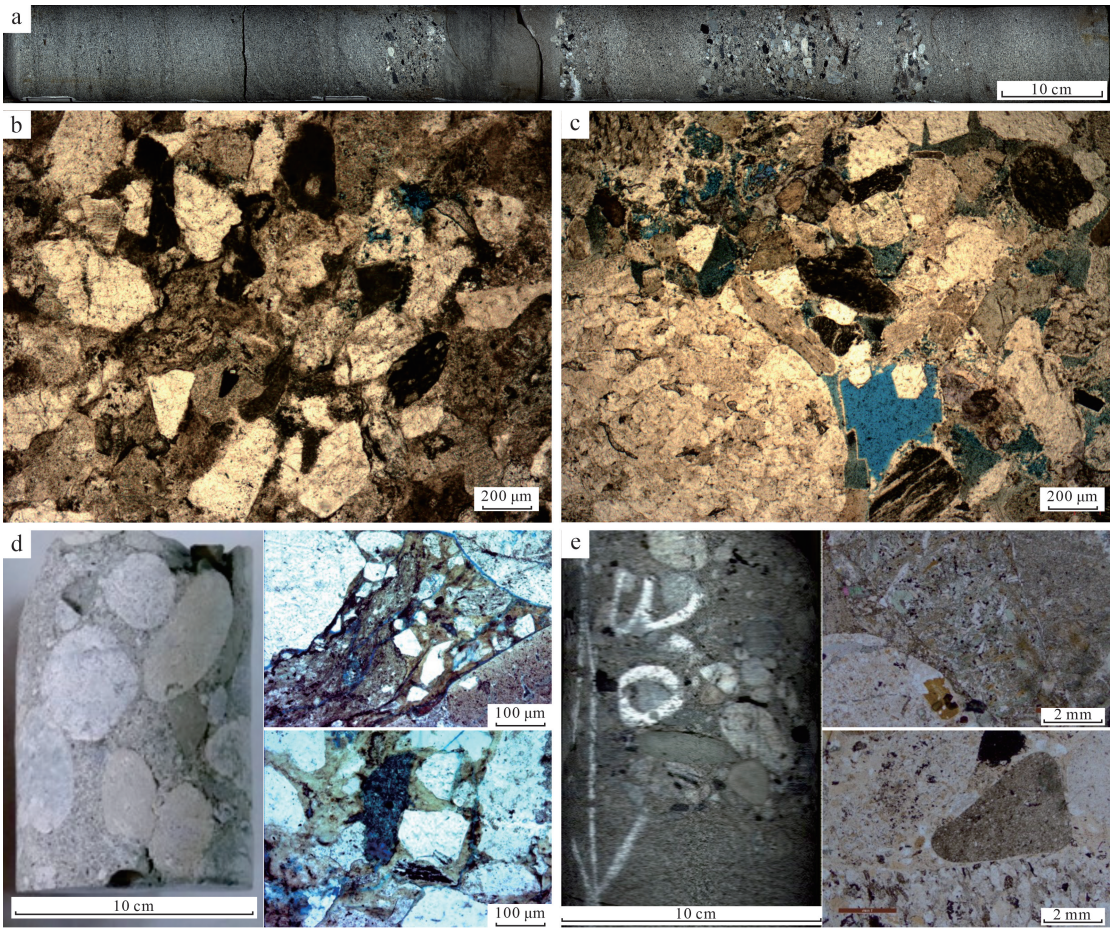
Fig.1　Division of structural units in Xujiaweizi fault depression (a) and lithological profile of Shahezi Formation (b) of Songliao basin

2 储层基本特征

2.1 岩石学特征

松辽盆地徐家围子断陷沙河子组储集层岩性包括砾岩、砂岩两大类(图2),细分为含砂砾岩、砂质砾岩、含砾砂岩、砾质砂岩等。砾岩为复成分砾岩,砾径一般为2～10 mm,个别达18 mm,属于中—细砾岩,其非均质性强[14-16],成分成熟度低,砾石成分以中、酸性喷发岩为主,其次为变质岩砾石,还有少量沉积岩砾石。砾石体积分数在60%～92%之间,多呈现点接触和点—线接触,砾石支撑(图2d、e);填隙物体积分数为8%～40%,呈孔隙式胶结,其中砂级碎屑填隙物体积分数可达2%～32%,泥质仅体积分数为2%～8%;胶结物主要为方解石,其次为硅质胶结物。沙河子组砾岩具低结构成熟度的特征,砾石大小混杂,分选多为中—差,呈次棱角—次圆状(图2)。

松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂岩储层主要为长石岩屑砂岩(图3),基于成分统计,成分成熟度较低,多小于0.6,粒级混杂,粒度主要在0.03～1.20 mm之间,不等粒砂岩、粗砂岩、中砂岩和细砂岩皆有分布。砂岩中碎屑颗粒体积分数为63%～94%,平均为84%,颗粒之间以线接触为主,其中碎屑成分主要由石英、长石和岩屑组成。石英约占碎屑总量的15%～37%,平均为30%;长石约占碎屑总量的10%～33%,平均为20%,以钾长石为主,斜长石次之;岩屑约占碎屑总量的17%～60%,平均为38%,以酸性喷发岩为主,其次见少量变质岩屑。填隙物主要为泥质杂基和方解石等碳酸盐胶结物,其次为硅质胶结物等,另有少量菱铁矿和黏土矿物,偶见浊沸石胶结物。泥质体积分数为1%～34%,平均为9%,多呈条带状分布;方解石等碳酸盐胶结

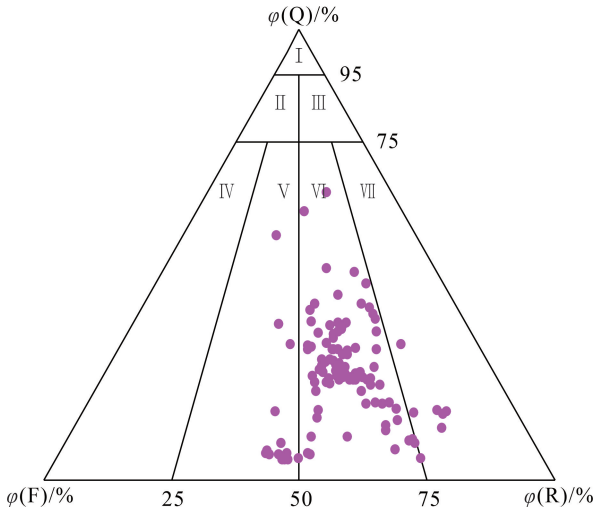


a. 宋深115井,3 388.86～3 389.86 m,粗砂岩、砂质砾岩,岩心照片; b. 宋深115井,3 279.21 m,中粒岩屑砂岩,单偏光; c. 宋深115井,3 527.20 m,含砾砂岩,单偏光; d. 宋深4井,2 566.42 m,砂质砾岩,单偏光; e. 宋深115井,3 442.00 m,含砂砾岩,单偏光。

图2 研究区沙河子组岩心及镜下照片特征

Fig.2 Characteristics of Shahezi Formation core and microscopic photos in the study area

物较为普遍，体积分数为 2%～26%，平均为 7%。砂岩分选性中等，呈次棱角—次圆状，长石风化程度中等—较强。



Ⅰ.石英砂岩；Ⅱ.长石石英砂岩；Ⅲ.岩屑石英砂岩；Ⅳ.长石砂岩；Ⅴ.岩屑长石砂岩；Ⅵ.长石岩屑砂岩；Ⅶ.岩屑砂岩。Q.石英；F.长石；R.岩屑。

图 3　松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂岩储层类型图

Fig. 3　Sandstone reservoir types of Shahezi Formation in Xujiaweizi fault depression, Songliao basin

2.2　储集空间特征

根据铸体薄片和扫描电镜观察，砂砾岩的面孔率普遍较低，多小于 4%，甚至部分样品面孔率小于 1%。砂岩、砾岩储集空间均以次生溶蚀孔隙为主，局部见裂缝发育。其中砂岩溶蚀孔隙按照发育位置，分为长石粒内溶孔、粒间溶孔等（图 4a、b），以长石、岩屑溶孔为主。此外，岩石中泥质杂基较发育。随着成岩演化程度升高，蒙脱石、高岭石向伊利石、绿泥石转化，在此过程中于黏土矿物片间形成晶间孔（图 4c）；原生孔隙受控于压实作用、胶结作用，随埋深增加而逐渐减少，但由于石英等刚性颗粒支撑，在颗粒格架间、颗粒周围残余少量原生粒间孔、粒缘缝（图 4d、e）。

砾岩中孔隙类型多样，溶蚀孔隙主要为砾内溶孔（图 4f），在泥质杂基中见少量黏土晶间孔，少量残余原生砾间孔（图 4g），砾岩中微裂缝较为发育，包括砾缘缝、砾内缝、填隙物内裂隙等（图 4h、i、j）。徐家围子断陷沙河子组控陷断层显示了非常典型的断层生长特征，即从北向南断层发育程度变好[17]，这决定了砾岩中局部微裂缝发育的特征。断层砂体为有机酸等流体提供输导通道，有效输导通道是次生孔隙发育的关键。

3　储层孔隙结构特征及影响因素

3.1　储层孔隙结构整体特征

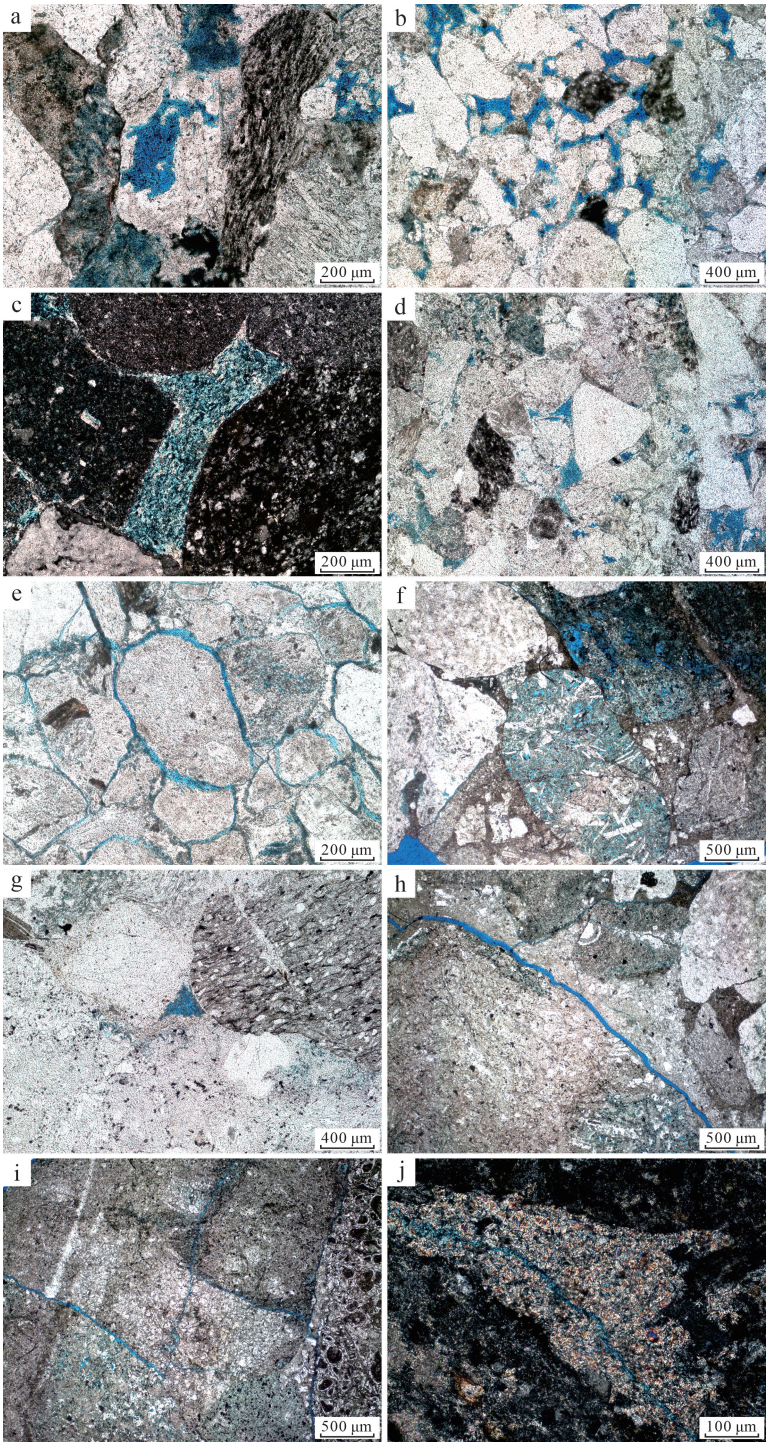
孔隙结构是指孔隙和喉道的形态、大小、发育程度及其相互关系[17]。致密储层的孔隙结构是决定其储层物性及油气产能的重要因素。根据铸体薄片、扫描电镜和压汞等测试分析，研究区储层孔喉大小分布范围广，分选较差，孔径较小，喉道普遍狭窄，孔隙结构总体较差。样品间平均孔隙半径主要为 0.004～0.400 μm，平均值为 0.120 μm；排驱压力为 1～40 MPa，平均值为 14 MPa；最大汞饱和度较小，主要在 20%～80%之间，平均值为 54%，进汞曲线和退汞曲线差异大，表明储层孔喉连通性差[18]。

3.2　不同岩性孔喉结构特征

松辽盆地徐家围子断陷沙河子组储层岩性分为砂岩、砾岩两大类，细分为 10 余种亚类，孔喉结构特征在不同岩性上差异较大。以安达地区达深 24 井、达深 28 井两口重点井为例，研究不同岩性孔喉结构特征。

达深 24 井以砂岩为主，岩石类型多样，包括含砾细砂岩、细砂岩、含砾粗砂岩和粗砂岩等。通过对比分析，粗砂岩和含砾粗砂岩孔隙度分别为 7.1%、9.4%和 3.2%，渗透率分别为 0.128×10^{-3}、0.138×10^{-3}和 0.049×10^{-3} μm²；细砂岩和含砾细砂岩孔隙度分别为 5.1%、3.9%，渗透率分别为 0.128×10^{-3}、0.069×10^{-3} μm²（图 5）。粗砂岩物性好于细砂岩，在相同毛管压力下，粗砂岩毛管压力曲线斜率较低，较为平缓，孔喉分选性较好，进汞饱和度高达 70%～90%；细砂岩毛管压力曲线斜率大，为细歪度，孔喉分选性差，进汞饱和度普遍较低，均小于 40%。表明该井粗砂岩孔隙结构好，而细砂岩储层致密，孔喉连通性较差（图 5）。

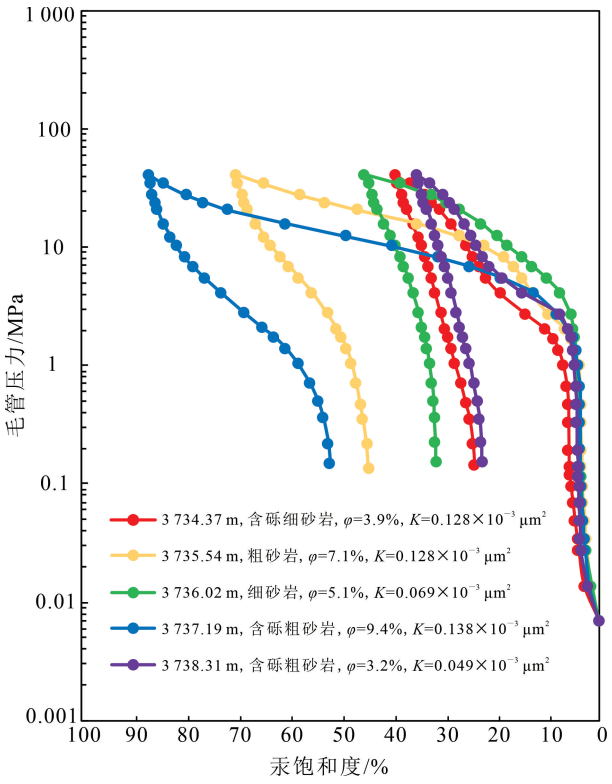
达深 28 井以砾岩为主，包括砂质砾岩、砾岩等。分析表明该井砾岩孔隙度为 6.4%～8.3%，渗透率为 0.118×10^{-3}～7.965×10^{-3} μm²，物性整体较好。砾岩毛管压力曲线斜率较低，孔喉分选性较好，进汞饱和度均在 80%以上。通过对比松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂砾岩储层不同岩性孔喉结构特征，表明该地区砂岩储层中粗砂岩物性好于细砂岩，砾岩物性略好于砂岩，即粒度越粗、孔喉结构越好，孔喉连通性越好（图 6）。



a. 宋深4井,2 775.51 m,长石粒内溶孔,单偏光; b. 宋3井,2 231.73 m,粒间溶孔,单偏光; c. 宋深4井,2 772.11 m,黏土矿物晶间孔,单偏光; d. 宋深4井,2 775.51 m,原生粒间孔,单偏光; e. 升深6井,3 210.43 m,粒缘缝,单偏光; f. 达深3井,3 512.79 m,砾内溶孔,单偏光; g. 达深302井,3 448.02 m,原生砾间孔,单偏光; h. 达深3井,3 512.79 m,砾缘缝,单偏光; i. 达深3井,3 512.79 m,砾内缝,单偏光; j. 宋深6井,3 094.88 m,填隙物内裂隙,正交偏光。

图4 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂砾岩孔隙特征

Fig.4 Pore characteristics of sandstone conglomerates in Shahezi Formation of Xujiaweizi fault depression in Songliao basin



φ. 孔隙度；K. 渗透率。

图 5　达深 24 井砂岩储层毛管压力曲线

Fig. 5　Capillary pressure curve of sandstone reservoir in Dashen 24 Well

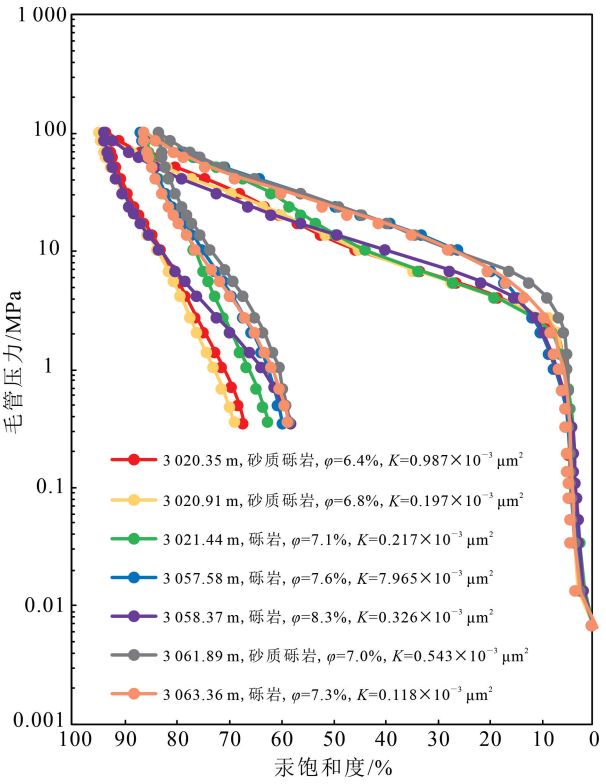


图 6　达深 28 井砾岩储层毛管压力曲线

Fig.6　Capillary pressure curve of conglomerate reservoir in Dashen 28 Well

3.3　不同层序孔喉结构特征

松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂砾岩储层纵向上划分为 4 个层序[19]，分别为层序四、层序三、层序二、层序一，不同层序间储层孔喉结构差异较大。本次选取安达地区宋深 115 井重点井，研究纵向上不同层序间孔喉结构特征。分析表明：层序四孔喉半径分布范围大，在 0.001 6～1.000 0 μm 之间，呈现多峰特征（图 7）；储层有效孔隙度为 2.3%～6.9%，变化范围较大，孔隙度中等，渗透率为 0.069 1×10⁻³～0.207 3×10⁻³ μm²，渗透率整体较好；进汞饱和度整体大于 80%，孔喉结构较好（图 7）。层序二—层序三孔喉半径分布于 0.001 6～0.250 0 μm之间，孔喉半径分布范围较小，分选性差，呈现多峰特征；储层有效孔隙度为0.6%～4.1%，渗透率多分布于 0.019 7×10⁻³～0.098 7×10⁻³μm²之间；储层物性整体较差，毛细管压力曲线斜率较高，为细歪度，孔喉结构差（图 7）。

通过对比单井不同层序孔喉特征（图 7），揭示纵向上层序四孔隙度、渗透率好于层序二、层序三，孔喉连通性较好。这表明松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂砾岩储层孔隙结构随埋深增加整体呈现变差的趋势。

3.4　填隙物对孔喉结构的影响

填隙物的形成伴随着整个沉积、成岩阶段，在不同时期影响着储层的孔隙结构。在碎屑岩储层中，杂基和胶结物作为碎屑颗粒间的填隙物，对储层孔隙结构起着不同程度的破坏作用。

松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂砾岩储层中填隙物成分包括泥质杂基、方解石胶结物、硅质胶结物等。砂砾岩中泥质杂基包括伊利石、伊/蒙混层、绿泥石等黏土矿物，多呈团块状分布于碎屑颗粒间，部分黏土矿物贴附于颗粒表面，可见绿泥石以薄膜状分布于颗粒周围，伊利石呈发丝状在颗粒间搭桥状分布（图 8a）。方解石胶结物以团块状、嵌晶状分布于碎屑颗粒间，在扫描电镜下可见自生石英沿粒间孔隙发育（图 8b）。

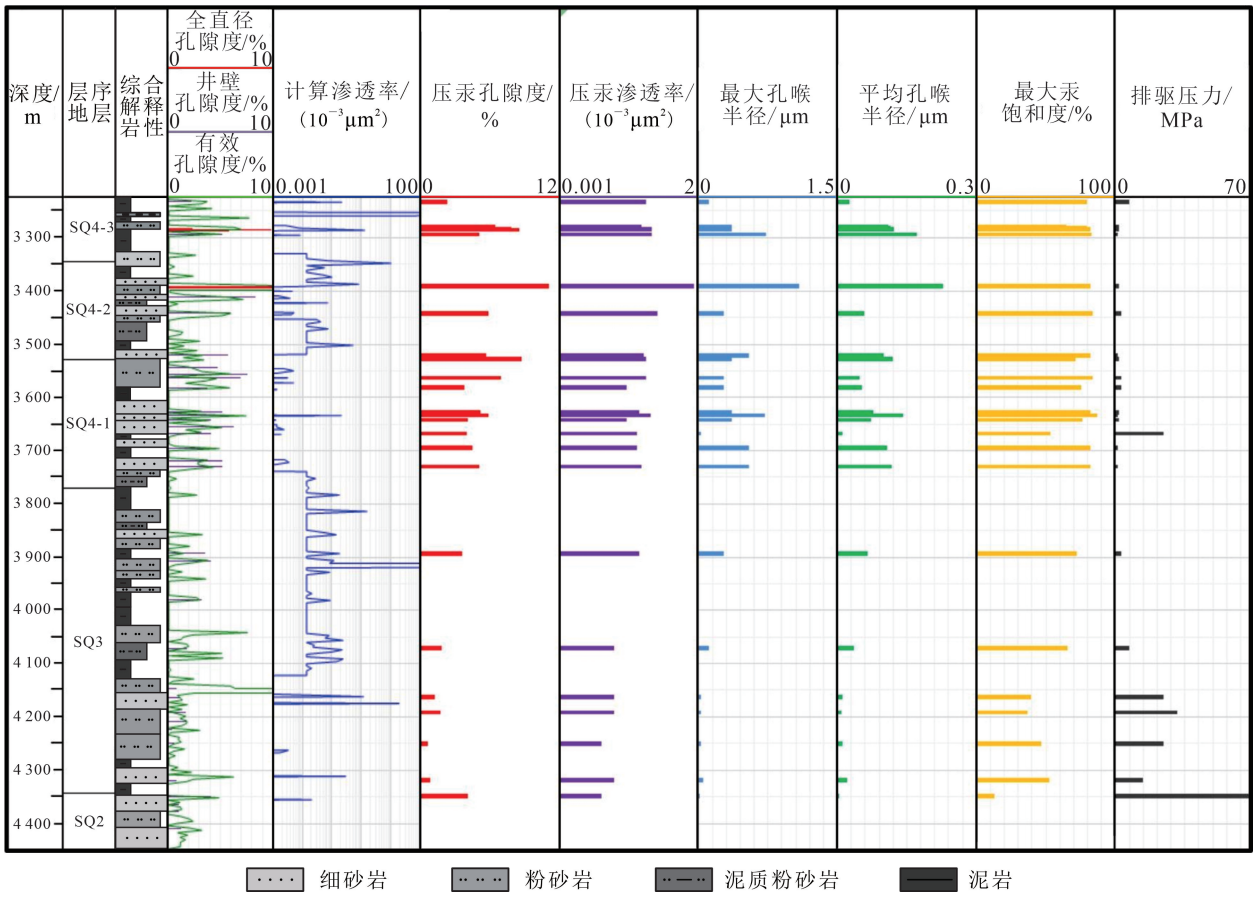
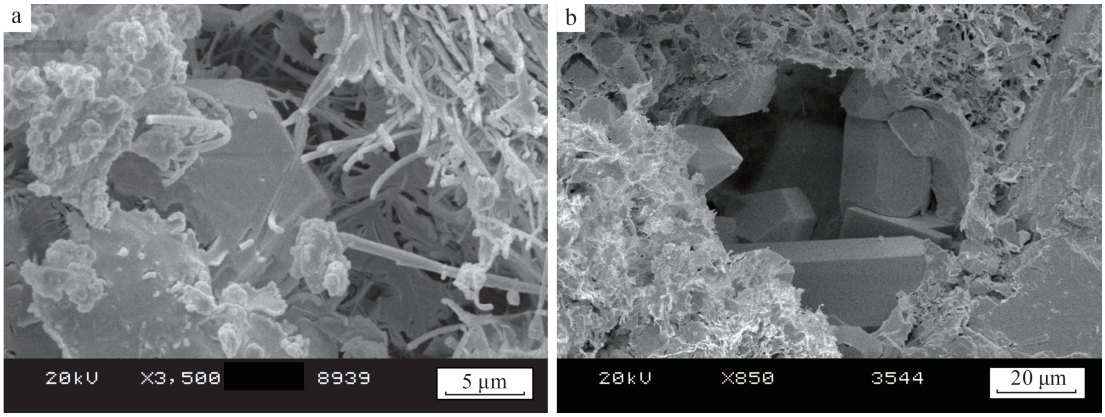


图7 宋深115井综合解释柱状图

Fig.7 Comprehensive interpretation bar chart of Songshen 115 Well



a. 宋深10井,2 856.60 m,发丝状伊利石; b. 宋深115井,3 544.00 m,自生石英沿粒间孔隙发育。

图8 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂砾岩扫描电镜特征

Fig.8 Scanning electron microscopy characteristics of Shahezi Formation conglomerate in Xujiaweizi fault depression of Songliao basin

在填隙物影响储集物性方面,以达深32井同一岩性砂质砾岩孔隙结构特征为例,分析表明该井砾岩孔隙度最低为3.1%,最高可达11.7%,渗透率最低为0.078 9×10^{-3} μm²,最高为1.924 7×10^{-3} μm²,毛管压力曲线可知进汞饱和度最高在90%以上,曲线较平缓,最低仅30%,储层物性分布范围广,孔喉结构差异性较大(图9)。

结合达深32井中薄片鉴定、扫描电镜以及压汞

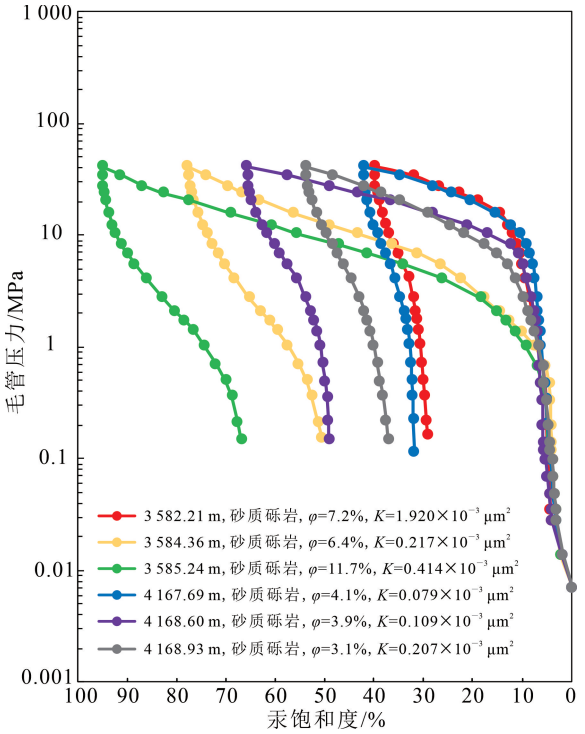


图 9　达深 32 井储层毛管压力曲线

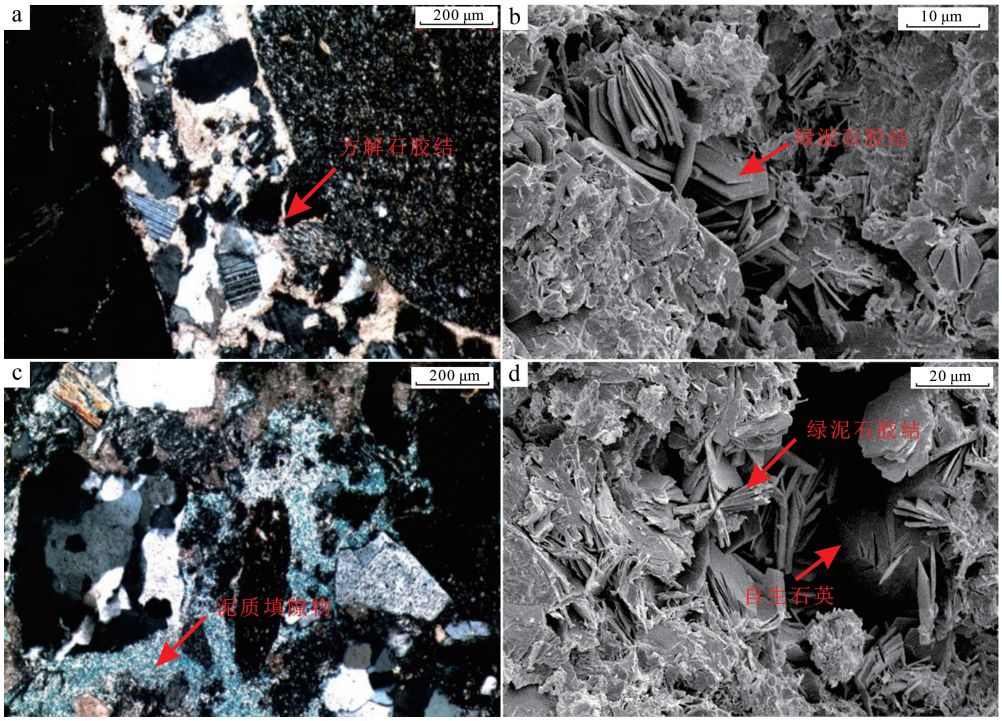
Fig.9　Capillary pressure curve of reservoir in Dashen 32 Well

曲线配套分析认为，砂质砾岩孔喉结构差异性较大的原因可能与黏土矿物分布、胶结物发育有关。砂质砾岩中泥质杂基富集分布，黏土矿物在颗粒周围分散分布，方解石胶结物、自生石英发育，这导致了该类型岩石储层孔隙度、渗透率普遍偏低，孔喉连通性差，进汞饱和度低（图 9、图 10）。

4　储层物性下限的确定

松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂砾岩储层物性较差，孔隙度主要介于 0.3%～8.0%之间，渗透率主要介于 $0.098\ 7\times10^{-3}$～$0.987\ 0\times10^{-3}$ μm^2之间（图 7），属于低孔、低渗致密储层。砾岩孔隙度略好于砂岩，纵向上层序四物性好于其他层序。随埋深增加，孔隙度整体降低，局部发育次生孔隙带，渗透率与孔隙度呈正相关性，随孔隙度增加而有改善的趋势。储层物性评价及下限确定是储层分类评价及资源量估算的关键。

物性下限是指具有储集和产出能力储层的孔隙度、渗透率下限，包括低产气储层物性，而不是必须具备工业产能。目前，国内外一般是采用岩心测试



a. 达深 32 井，4 167.69 m，φ=4.1%，$K=0.079\times10^{-3}$ μm^2，方解石胶结；b. 达深 32 井，4 167.69 m，φ=4.1%，$K=0.079\times10^{-3}$ μm^2，绿泥石胶结；c. 达深 32 井，4 168.6 m，φ=3.9%，$K=0.109\times10^{-3}$ μm^2，泥质填隙物；d. 达深 32 井，4 168.60 m，φ=3.9%，$K=0.109\times10^{-3}$ μm^2，绿泥石胶结。

图 10　松辽盆地徐家围子断陷达深 32 井储层填隙物微观特征

Fig.10　Microscopic characteristics of reservoir interstitial materials in Dashen 32 Well of Xujiaweizi fault depression in Songliao basin

分析[20-22]、测井[23-25]和试油[25-27]等基础资料进行储层物性下限的确定[28-30]。其原理主要有两方面:一方面基于统计学方法,利用经验统计法、孔隙度-渗透率交会法和物性试油试气法等方法;另一方面是基于渗流力学的原理,利用最小流动孔喉半径法、束缚水饱和度法、产能模拟法和相渗分析法等求取。本文应用经验统计法、最小流动孔喉半径法共同约束沙河子组砂砾岩储层物性下限的确定。

4.1 物性与试气产能相结合的经验统计法

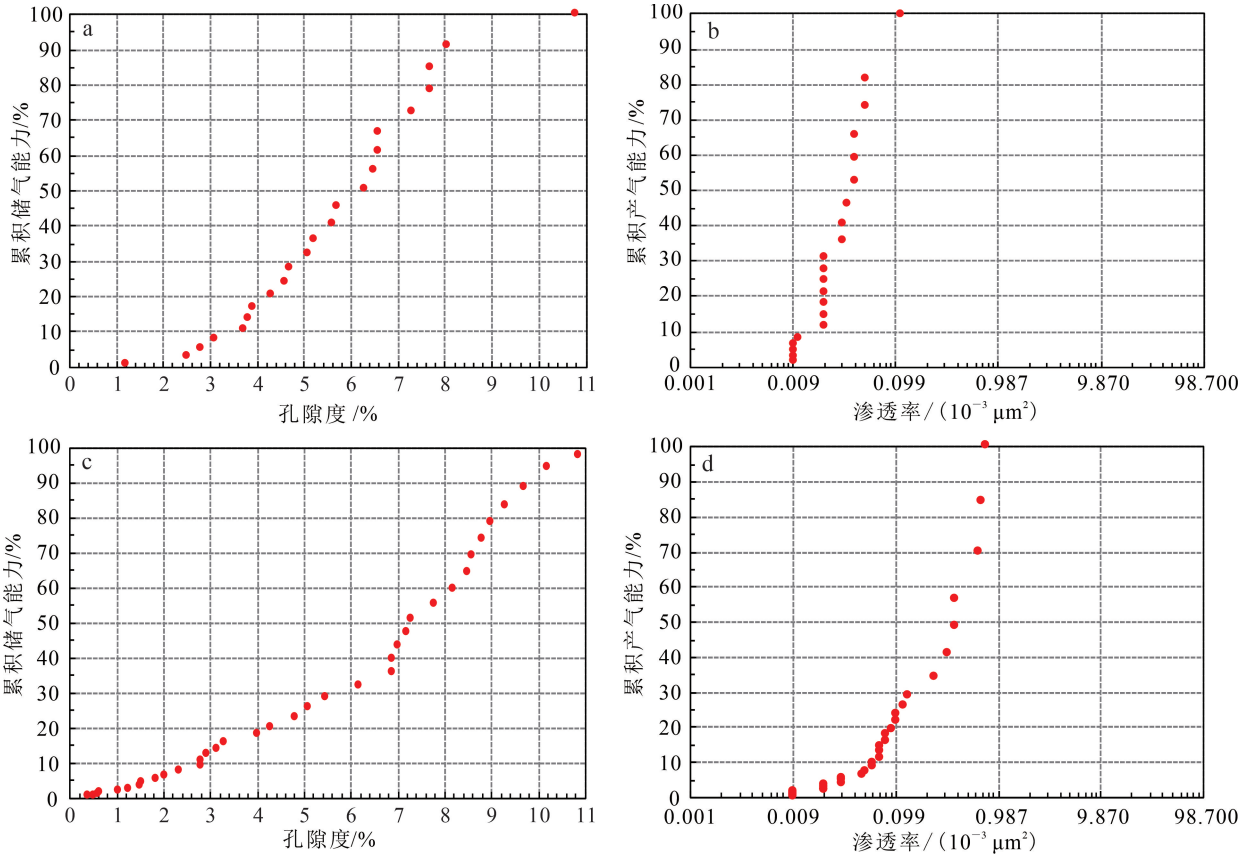
目前,经验统计法在国内外均得到了较为广泛的使用,是一种以岩心测试分析得到的孔隙度和渗透率资料为基础,根据数据统计原理以低孔低渗段累积储渗能力丢失不超过总量累积的5%来划分物性下限的方法。其中储气能力和产气能力计算公式[31]为:

$$Q_{\varphi i}=\varphi_i H_i/(\sum\varphi_i H_i);$$

$$Q_{Ki}=K_i H_i/(\sum K_i H_i)。$$

式中:$Q_{\varphi i}$为样品储气能力,%;Q_{Ki}为样品产气能力,%;φ_i为样品孔隙度,%;K_i为样品渗透率,0.987×10^{-3} μm²;H_i为样品长度,m。

本文采用与试气产能相结合的经验统计法来划分徐家围子地区沙河子组致密砂砾岩物性下限,根据试气结果为低产气层砂砾岩层段的物性分析数据,按照累积储气能力和产气能力丢失10%为界限。从图11中可以看出,砂岩孔隙度为3.7%,渗透率为0.019 7×10^{-3} μm²处和砾岩孔隙度为2.8%,渗透率为0.059 2×10^{-3} μm²处,累积曲线有明显拐点,且其丢失储油能力和产油能力都比较小,据此确定致密砂岩孔隙度下限为3.7%,渗透率下限为0.019 7×10^{-3} μm²(图11a、b);致密砾岩孔隙度下限为2.8%,渗透率下限为0.059 2×10^{-3} μm²(图11c、d)。



a. 砂岩,5口井,n=23; b. 砂岩,5口井,n=21; c. 砂砾岩,9口井,n=38; d. 砂砾岩,10口井,n=35。

图11 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂岩、砂砾岩累积储能产能丢失图

Fig.11 Loss of accumulated energy storage capacity of sandstone and gravel in Shahezi Formation of Xujiaweizi fault depression in Songliao basin

4.2　最小流动孔喉半径法

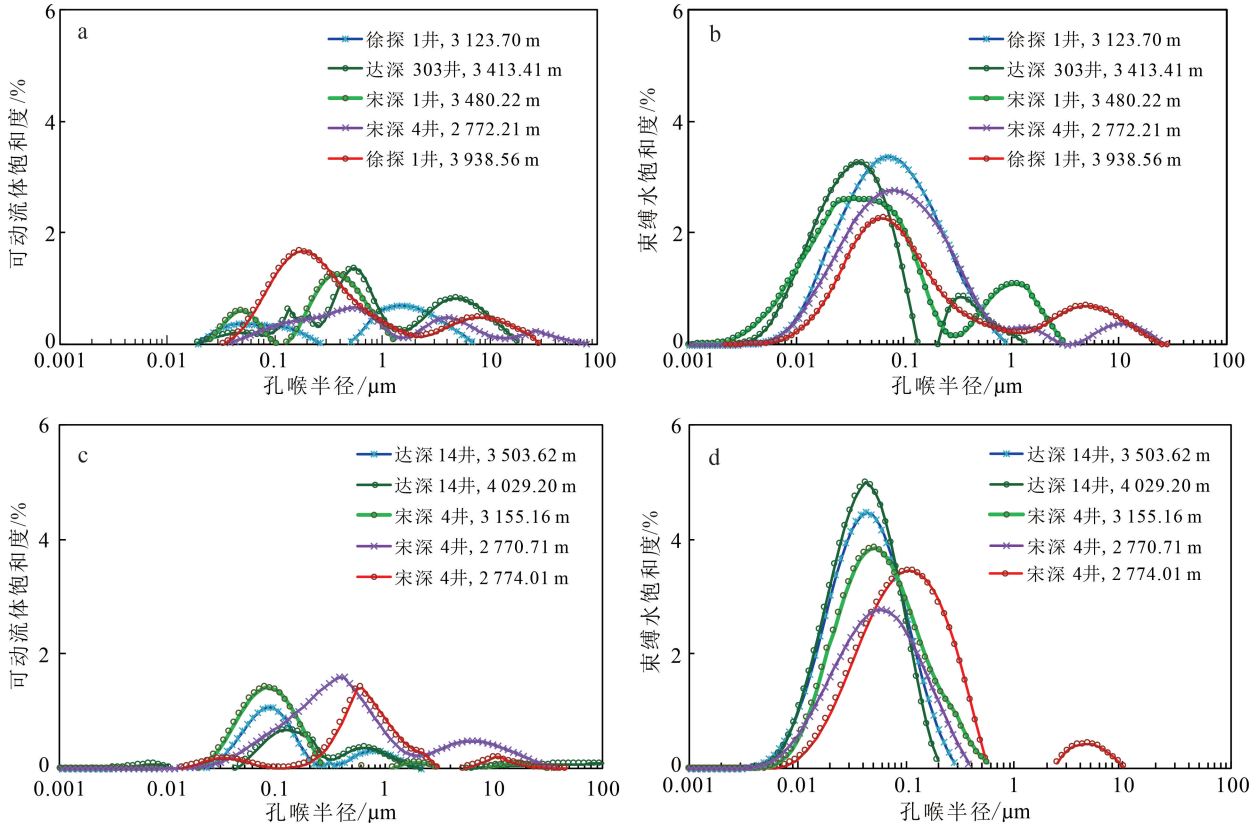
岩石喉道半径的大小是决定油气是否能在一定压差下从岩石中流出的关键因素。这种既能储存油气又能使油气渗流的最小喉道半径即为油气的最小流动孔喉半径。确定了储层的最小流动孔喉半径，即可依据统计分析的原理，绘制孔喉半径与孔隙度和渗透率的相关曲线图，根据最小流动孔喉半径求出相应的孔隙度和渗透率的下限。

本文采用核磁共振法确定最小流动孔喉半径。首先将核磁共振法测得 T_2（横向弛豫时间）谱分布图转换孔喉半径分布图，进一步绘制出可动流体分布与孔喉半径关系图以及束缚水分布与孔喉半径关系图；然后统计出可动流体分布的最小孔喉半径。根据样品统计，砂岩和砂砾岩中可动流体分布的最小孔喉半径为 0.03 μm，而束缚水主要分布在小于 0.10 μm 孔喉中（图 12）。

利用储层孔隙度、渗透率与压汞实验分析的孔喉半径作相关性分析，以压汞平均孔喉半径 0.03 μm为界限，研究区砂岩孔隙度的下限为3.0%，渗透率下限为 $0.019\ 7\times10^{-3}$ μm²；砾岩孔隙度的下限为 2.8%，渗透率下限为 $0.019\ 7\times10^{-3}$ μm²（图 13）。

4.3　砂砾岩储层物性下限的取值

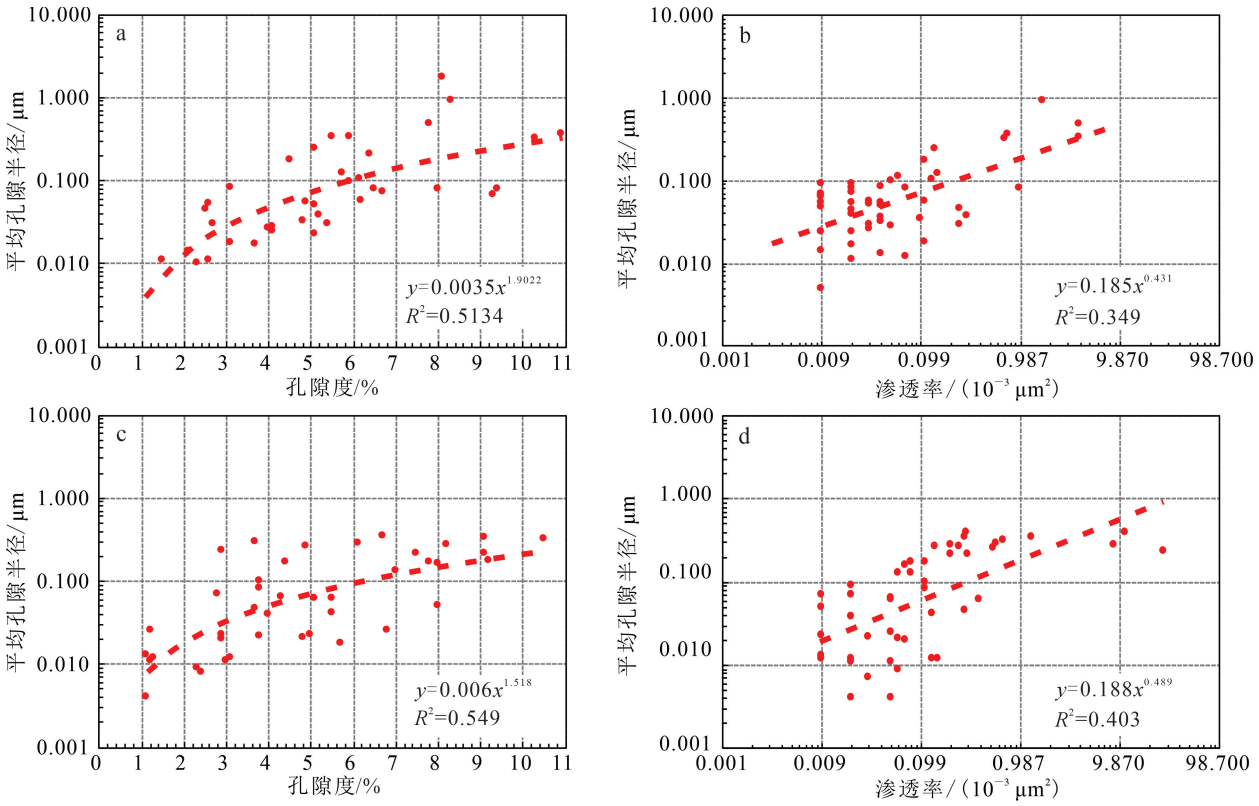
经验统计法是基于致密储层的物性统计数据为基础，是一种静态的统计方法；而最小流动孔喉半径法是基于渗流力学的原理求取，是动态的方法；两种方法所求取的物性下限差异较小，说明对于求取研究区有效储层物性下限值是合理的，故取该值作为研究区致密储层的物性下限。最终确定研究区致密砂岩孔隙度下限为 3.0%，渗透率为 $0.019\ 7\times10^{-3}$ μm²；致密砾岩孔隙度下限为 2.8%，渗透率为 $0.019\ 7\times10^{-3}$ μm²。



a. 砂岩可动流体饱和度分布；b. 砂岩束缚水饱和度分布；c. 砂砾岩可动流体饱和度分布；d. 砂砾岩束缚水饱和度分布。

图 12　松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂岩和砂砾岩可动流体饱和度分布、束缚水饱和度分布与孔喉半径关系图

Fig.12　Relationship between movable fluid saturation distribution, bundled water saturation distribution, and pore throat radius of sandstone and conglomerate in Shahezi Formation of Xujiaweizi fault depression in Songliao basin



a. 砂岩,19口井,$n=67$; b. 砂岩,19口井,$n=67$; c. 砂砾岩,16口井,$n=55$; d. 砂砾岩,16口井,$n=50$。

图13 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂岩和砂砾岩孔隙度、渗透率与平均孔隙半径关系图

Fig.13 Relationship between porosity, permeability, and average pore radius of sandstone conglomerates in Shahezi Formation of Xujiaweizi fault in Songliao basin

5 结论

1)松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂砾岩储层埋深较大,储层岩性以砂岩、砾岩为主,成分成熟度、结构成熟度低,储层非均质性较强。砂岩、砾岩储集空间类型均以次生溶蚀孔隙为主,残余粒间孔、黏土矿物晶间孔均普遍发育,砾岩中微裂缝较为发育。

2)沙河子组砂砾岩储层孔隙结构整体较差,孔喉半径分布范围大,进汞饱和度较低,属于微孔微喉型储层。受岩石分选性、黏土矿物及碳酸盐等胶结物发育程度的影响,孔隙结构非均质性较强。综合分析认为砾岩孔喉连通性好于砂岩、粗砂岩好于细砂岩,层序四孔喉结构整体好于其他层序。

3)沙河子组砂砾岩储层物性较差,孔隙度主要为0.3%~8.0%,渗透率主要为$(0.098\ 7\sim0.987)\times10^{-3}\mu m^2$,属于低孔、低渗致密储层。基于统计学原理、渗流力学原理,采用与试气产能相结合的经验统计法,根据核磁共振、压汞和物性分析等资料,利用最小流动孔喉半径法确定了致密砂岩孔隙度下限为3.0%,渗透率为$0.019\ 7\times10^{-3}\mu m^2$;致密砾岩孔隙度下限为2.8%,渗透率为$0.019\ 7\times10^{-3}\mu m^2$。

参考文献(References):

[1] Christophe M, Jamie S, Steve S. Unconventional Gas: A Review of Regional and Global Resource Estimates [J]. Energy, 2013,55:571-584.

[2] Masters J A. Deep Basin Gas Trap, Western Canada [J]. AAPG Bulletin,1979,63(2):152-181.

[3] Law B E, Curtis J B. Introduction to Unconventional Petroleum Systems[J] AAPG Bulletin,2002,86(11):1851-1852.

[4] 邹才能,杨智,何东博,等.常规-非常规天然气理论、技术及前景[J].石油勘探与开发,2018,45(4):575-587. Zou Caineng, Yang Zhi, He Dongbo, et al. Theory, Technology, and Prospects of Conventional Unconventional Natural Gas [J]. Petroleum Exploration and Development,2018,45(4): 575-587.

[5] 郭迎春,陈冬霞,庞伟奇,等.致密砂岩气成藏研究进展及值得关注的几个问题[J].石油与天然气地质,2013,

34(6)：717－724.
Guo Yingchun, Chen Dongxia, Pang Weiqi, et al. Research Progress on Tight Sandstone Gas Reservoir Formation and Several Noteworthy Issues [J]. Petroleum and Natural Gas Geology, 2013, 34 (6): 717－724.

[6] 于雯泉，孙晓庆，李丽.断陷湖盆深层砂砾岩体储层控制因素分析[J].中国科技信息，2009(10)：34－37.
Yu Wenquan, Sun Xiaoqing, Li Li. Analysis of Control Factors for Deep Sand and Gravel Reservoirs in Faulted Lake Basins [J]. China Science and Technology Information, 2009 (10): 34－37.

[7] 朱庆忠，李春华，杨合义.廊固凹陷沙三段深层砾岩体油藏成岩作用与储层孔隙关系研究[J].特种油气藏，2003，10(3)：15－18.
Zhu Qingzhong, Li Chunhua, Yang Heyi. Study on Diagenesis and Reservoir Pore Relationship of Deep Conglomerate Reservoirs in the Third Section of the Shahejie Formation in Langgu Depression [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2003, 10 (3): 15－18.

[8] 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，2016，26(2)：53－60.
Lu Jiamin, Liu Chao. Reservoir Formation Conditions and Resource Potential of Tight Sandstone Gas in Fault Basin: A Case Study of the Lower Cretaceous Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Basin, Songliao Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 26 (2): 53－60.

[9] 邵曌一，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)：101－108.
Shao Zhaoyi, Wu Chaodong, Zhang Dazhi, et al. Reservoir Characteristics and Control Factors of the Shahezi Formation in the Xujiaweizi Fault Depression of the Songliao Basin [J] Geology of Petroleum and Natural Gas, 2019, 40 (1): 101－108.

[10] 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 Shuangfang, Gu Meiwei, Zhang Feifei, et al. The Formation Stages and Types of Tight Sandstone Gas Reservoirs in the Shahezi Formation of the Xujiaweizi Fault Depression [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37 (6): 12－21.

[11] 周翔，李绍虎.基于层序地层格架的成岩作用研究：以徐家围子断陷沙河子组为例[J].吉林大学学报(地球科学版)，2022，52(6)：1800－1812.
Zhou Xiang, Li Shaohu. Research on Diagenesis Based on Sequence Stratigraphic Framework: Taking the Shahezi Formation in the Xujiaweizi Fault Depression as an Example [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52 (6): 1800－1812.

[12] 冯子辉，任延广，王成，等.松辽盆地深层火山岩储层包裹体及天然气成藏期研究[J].天然气地球科学，2003，14(6)：436－442.
Feng Zihui, Ren Yanguang, Wang Cheng, et al. Research on Inclusions and Natural Gas Accumulation Periods in Deep Volcanic Reservoirs in the Songliao Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14 (6): 436－442.

[13] 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 Evaluation of Tight Reservoirs in the Shahezi Formation of Xujiaweizi Fault Depression [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2016, 23 (3): 113－117.

[14] 季汉成，赵澄林，刘孟慧.蒙古林油田阿尔善组砾岩储层岩石学[J].石油与天然气地质，1995，16(4)：354－359.
Ji Hancheng, Zhao Chenglin, Liu Menghui. Petrology of Conglomerate Reservoirs in the Alshan Formation of the Mongolian Forest Oilfield [J]. Petroleum and Natural Gas Geology, 1995, 16 (4): 354－359.

[15] 王成，官艳华，肖利梅，等.松辽盆地北部深层砾岩储层特征[J].石油学报，2006，27(增刊 1)：52－56.
Wang Cheng, Guan Yanhua, Xiao Limei, et al. Characteristics of Deep Conglomerate Reservoirs in the Northern Songliao Basin [J]. Journal of Petroleum, 2006, 27 (Sup.1): 52－56.

[16] 邵红梅.松辽盆地北部徐家围子断陷深层碎屑岩储层特征研究[D].长春：吉林大学，2005：71－73.
Shao Hongmei. Study on the Characteristics of Deep Clastic Reservoirs in the Xujiaweizi Fault Depression in the Northern Part of the Songliao Basin [D]. Changchun: Jilin University, 2005: 71－73.

[17] 张大智，初丽兰，周翔，等.松辽盆地北部徐家围子断陷沙河子组致密气储层成岩作用与成岩相特征[J].吉林大学学报(地球科学版)，2021，51(1)：22－34.
Zhang Dazhi, Chu Lilan, Zhou Xiang, et al. Diagenesisand Diagenetic Characteristics of Tight Gas Reservoirs in the Shahezi Formation of the Xujiaweizi

Fault in the Northern Part of the Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021,51 (1): 22-34.

[18] 罗蛰潭,王允诚.油气储集层的孔隙结构[M].北京:科学出版社,1986.
Luo Zhetan, Wang Yuncheng. Pore Structure of Oil and Gas Reservoirs [M]. Beijing: Science Press, 1986.

[19] 赵福海,孙国庆,张野.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. Sedimentary Characteristics Under the Subdivision Sequence Framework of the Shahezi Formation in the Northern Xuxi Area of the Songliao Basin [J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 2022, 41 (1): 11-22.

[20] 郭思祺,肖佃师,卢双舫,等.徐家围子断陷沙河子组致密储层孔径分布定量表征[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(11):3742-3751.
Guo Siqi, Xiao Dianshi, Lu Shuangfang, et al. Quantitative Characterization of Pore Size Distribution in Tight Reservoirs of the Shahezi Formation in the Xujiaweizi Fault Depression [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2016,47 (11): 3742-3751.

[21] 王成,邵红梅,洪淑新,等.松辽盆地北部深层碎屑岩储层物性下限及与微观特征的关系[J].大庆石油地质与开发,2007,26(5):18-24.
Wang Cheng, Shao Hongmei, Hong Shuxin, et al. Lower Limit of Physical Properties of Deep Clastic Reservoirs in the Northern Songliao Basin and Their Relationship with Microscopic Characteristics [J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 2007, 26 (5): 18-24.

[22] 王小军,白雪峰,李军辉,等.松辽盆地北部下白垩统扶余油层源下致密油富集模式及主控因素[J].石油勘探与开发,2024,51(2):248-259.
Wang Xiaojun, Bai Xuefeng, Li Junhui, et al. The Enrichment Pattern and Main Controlling Factors of Tight Oil Under the Source of the Lower Cretaceous Fuyu Oil Layer in the Northern Part of the Songliao Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024,51 (2): 248-259.

[23] 陈思芮,王卫学,曲希玉,等.东营凹陷北带沙四上亚段砂砾岩储层物性主控因素分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(4):1091-1106.
Chen Sirui, Wang Weixue, Qu Xiyu, et al. Analysisof the Main Controlling Factors for the Physical Properties of Sandstone Reservoirs in the Upper Sub Segment of Shasi in the Northern Belt of Dongying Depression [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52 (4): 1091-1106.

[24] 付金华,罗安湘,张妮妮,等.鄂尔多斯盆地长7油层组有效储层物性下限的确定[J].中国石油勘探,2014,19(6):82-88.
Fu Jinhua, Luo Anxiang, Zhang Nini, et al. Determination of the Lower Limit of Effective Reservoir Physical Properties of the Chang 7 Oil Formation in the Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2014,19 (6): 82-88.

[25] 张立亚,徐文,沈艳杰.松辽盆地南部深层致密砂岩气储层形成机制及成藏主控因素[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(5):1707-1717.
Zhang Liya, Xu Wen, Shen Yanjie. Formation Mechanism and Main Controlling Factors of Deep Tight Sandstone Gas Reservoirs in the Southern Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52 (5): 1707-1717.

[26] 操应长,王艳忠,徐涛玉,等.东营凹陷西部沙四上亚段滩坝砂体有效储层的物性下限及控制因素[J].沉积学报,2009,27(2):230-237.
Cao Yingchang, Wang Yanzhong, Xu Taoyu, et al. The Lower Limit of Physical Properties and Control Factors of Effective Reservoirs in the Upper Sub Section of Shasi Formation in the Western Part of Dongying Depression [J]. Journal of Sedimentology, 2009,27 (2): 230-237.

[27] 史原鹏,刘占国,王少春,等.深层—超深层优质碎屑岩储层成因及主控因素:以河套盆地临河坳陷古近系渐新统临河组为例[J].石油勘探与开发,2024,51(3):478-489.
Shi Yuanpeng, Liu Zhanguo, Wang Shaochun, et al. Genesis and Main Controlling Factors of High-Quality Clastic Rock Reservoirs in Deep to Ultra Deep Layers: A Case Study of the Paleogene Oligocene Linhe Formation in the Linhe Depression of the Hetao Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024,51 (3): 478-489.

[28] 张增宝.准噶尔盆地阜康凹陷深层侏罗系砂岩储层差异性成岩演化与烃类充注[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(6):1672-1688.
Zhang Zengbao. Differential Diagenetic Evolutionand Hydrocarbon Filling of Deep Jurassic Sandstone

Reservoirs in Fukang Sag, the Junggar Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023,53 (6): 1672 - 1688.

[29] 刘硕，王飞，于瑞，等.致密砂岩储层微观孔喉结构及其分形特征[J].吉林大学学报(地球科学版)，2024，54(1)：96 - 107.
Liu Shuo, Wang Fei, Yu Rui, et al. Microscopic Pore Throat Structureand Fractal Characteristics of Tight Sandstone Reservoirs [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024,54 (1): 96 - 107.

[30] 汪成，陈冬霞，李洪博，等.珠江口盆地陆丰凹陷深部储层原生孔隙特征及发育机制[J].吉林大学学报(地球科学版)，2023，53(1)：44 - 59.
Wang Cheng, Chen Dongxia, Li Hongbo, et al. Primary Pore Characteristics and Development Mechanism of Deep Reservoirs in Lufeng Sag, the Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53 (1): 44 - 59.

[31] 李烨，司马立强，闫建平，等.低孔、低渗致密砂岩储层物性下限值的确定：以川中 P 地区须二段气藏为例[J].天然气工业，2014，34(4)：52 - 56.
Li Ye, Sima Liqiang, Yan Jianping, et al. Determination of the Lower Limit of Physical Properties of Low Porosity and Low Permeability Tight Sandstone Reservoirs: A Case Study of the Second Member Gas Reservoir in the P Area of Central Sichuan [J]. Natural Gas Industry, 2014,34 (4): 52 - 56.