

库车坳陷东部下侏罗统致密砂岩储层特征及主控因素^①

张妮妮^{1,2} 刘洛夫^{1,2} 苏天喜^{1,2} 戴琦雯^{1,2} 赵园园^{1,2}

(1.中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249;2.中国石油大学盆地与油藏研究中心 北京 102249)

摘要 塔里木盆地致密砂岩气分布广、勘探潜力大,是今后勘探的重要前瞻性领域。库车坳陷东部下侏罗统砂岩储层普遍致密,加强其储层特征及主控因素的研究,对指导下一步的天然气勘探开发具有重要意义。为了揭示了塔里木盆地库车坳陷东部下侏罗统致密砂岩储层的发育规律及主控因素,通过铸体薄片、阴极发光、扫描电镜、激光共聚焦等测试手段并结合测井资料,研究了储层的岩石学特征、孔隙结构特征和物性特征。结果表明,该区储层岩石类型以岩屑砂岩为主,岩石成分成熟度低,结构成熟度中等;孔隙结构主要为中孔细喉和小孔微喉,孔隙连通性较差;孔隙度大部分为4%~12%,平均为8.12%,有效空气渗透率主要为 $(0.1\sim 3)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,属于典型的致密砂岩储层。在此基础上,综合分析了致密储层与沉积作用、成岩作用、构造作用的关系。研究认为,储层的物性受沉积作用、成岩作用、构造作用等的共同影响,其中主控因素是受沉积作用控制的粒度、成岩作用中的压实作用和构造压实作用。

关键词 储层特征 主控因素 致密砂岩 下侏罗统 库车坳陷东部

第一作者简介 张妮妮 女 1988年出生 硕士研究生 沉积(岩石)学及储层地质学 E-mail: lanhudieznn@163.com

通讯作者 刘洛夫 男 教授 E-mail: liulf@cup.edu.cn

中图分类号 TE122.2 **文献标识码** A

近年来随着常规油气藏储量的减少以及勘探难度的增加,致密砂岩储层作为一种非常规油气藏在石油勘探开发领域已成为国内外众多学者研究的热点和前沿问题,针对致密砂岩气国内外都已经实现了工业化开采^[1-5],尤其在目前已成为油气勘探开发方面的重要突破点^[6-11]。研究区库车坳陷东部下侏罗统气藏储集砂体具有岩性致密、物性较差、成岩作用复杂等地质特征,勘探开发难度较大。笔者在铸体薄片、阴极发光、扫描电镜、激光共聚焦等大量测试资料分析研究区致密砂岩储层岩石学特征、孔隙结构特征以及物性特征的基础上,试图寻找研究区下侏罗统致密砂岩储层与常规储层之间的差别,探讨该区致密砂岩储层的特征及其主控因素,以便在储层整体致密的背景下更加准确地进行储层描述并掌握优质储层的空间展布规律,寻找有利的甜点区,为预测致密砂岩储层油藏的勘探提供借鉴意义。

1 区域地质背景

库车坳陷位于塔里木盆地北部,北界紧邻南天山,南界至塔北戈壁和塔里木河中游流域,西起阿克苏市东部,东至库尔勒市西部,为一东西向延伸、西宽

东窄的前陆坳陷,东西长约450 km,南北宽30~125 km,面积约为42 700 km²^[12-15]。根据中—新生界构造变形特点及形成时代,库车坳陷东部可划分为北部单斜带、克拉苏—依奇克里克—吐格尔明构造带、拜城凹陷、阳霞凹陷和东秋里塔格构造带等5个二级构造单元(图1)。本次研究区位于库车坳陷东部,主要包括依奇克里克构造带—吐格尔明构造带,根据其所处构造位置和储层特征的差异,至西向东又可分为依西地区、依南地区和明南地区。研究区目的层位下侏罗统可分为阿合组和阳霞组两个组,主要发育一套湖

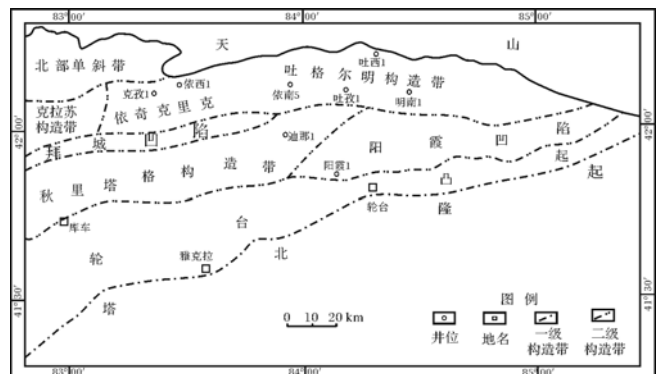


图1 研究区构造区划图

Fig.1 Tectonic units of the study area

①国家自然科学基金项目“鄂尔多斯盆地三叠系延长组致密油含油边界识别研究”(批准号:41372143)资助
收稿日期:2013-11-18;收修改稿日期:2014-05-12

泊—辫状河三角洲陆源碎屑岩沉积^[16]。

2 储层特征

2.1 岩石学特征

根据岩芯描述、露头资料和薄片资料的统计分析,对库车坳陷东部下侏罗统阳霞组和阿合组储层的岩石学特征进行了研究。

研究区阳霞组主要为一套中—细粒的岩屑砂岩(图2a)。石英含量一般占碎屑组分的31.82%~54.89%,长石含量为1.93%~23.01%,岩屑含量为34.62%~54.75%,岩屑以变质岩岩屑为主,岩浆岩岩屑次之(图3a)。岩石成分成熟度具有西低东高的特点,结构成熟度中等,颗粒间以点—线接触为主,孔隙式胶结。填隙物含量一般在7.4%~12.9%之间,胶结

物以碳酸盐矿物为主,可见方解石、铁方解石、白云石、铁白云石、菱铁矿(表1)。

阿合组储层岩石粒度整体较粗,以砾岩、含砾粗砂岩、不等粒砂岩为主。岩石类型以岩屑砂岩为主,次为长石岩屑质石英砂岩及长石质岩屑砂岩(图2b)。石英含量一般占碎屑组分的26.5%~52.4%,优质储层一般具有较高的石英含量,长石含量为6%~35.34%,岩屑含量为32.09%~53.25%,其中岩屑以变质岩岩屑为主,岩浆岩岩屑次之(图3b),具有溶蚀现象。岩石成分成熟度低,结构成熟度中等—高,颗粒间以线、凹凸—线接触为主,胶结类型为接触—孔隙和压嵌—孔隙式胶结。填隙物含量6.85%~10.9%,其中胶结物含量为0.94%~4.7%,主要的自生矿物为铁方解石、方解石、铁白云石、硅质、黄铁矿等(表1)。

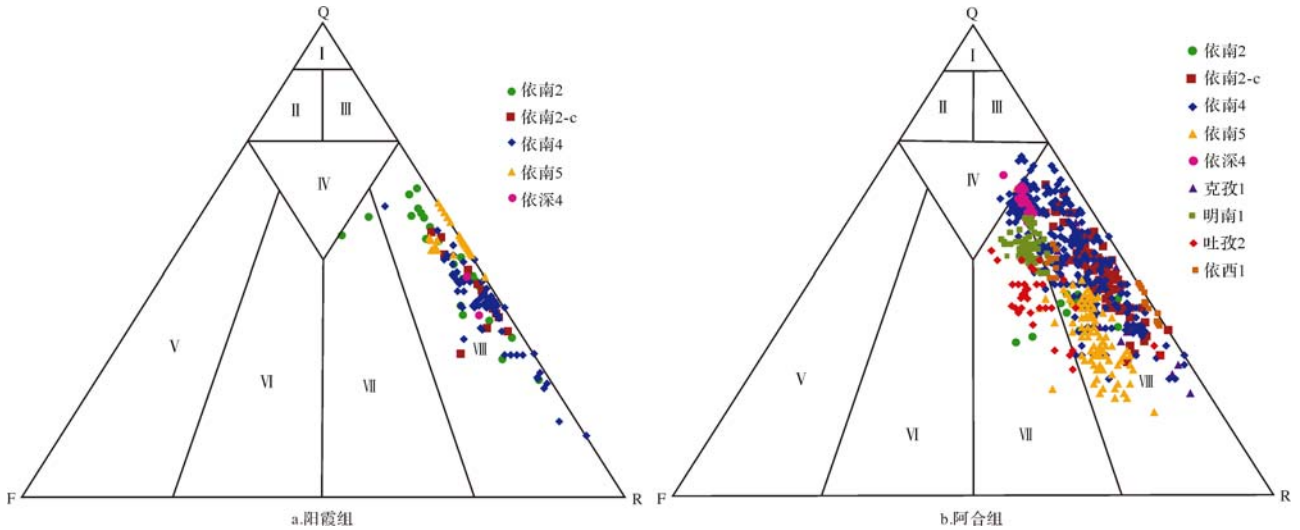


图2 塔里木盆地库车坳陷东部下侏罗统储层矿物成分三角图

I. 石英砂岩; II. 长石质石英砂岩; III. 岩屑质石英砂岩; IV. 长石岩屑质石英砂岩; V. 长石砂岩; VI. 岩屑质长石砂岩; VII. 长石质岩屑砂岩; VIII. 岩屑砂岩

Fig.2 Triangular plot of mineral composition of Lower Jurassic in eastern Kuqa depression, Tarim Basin

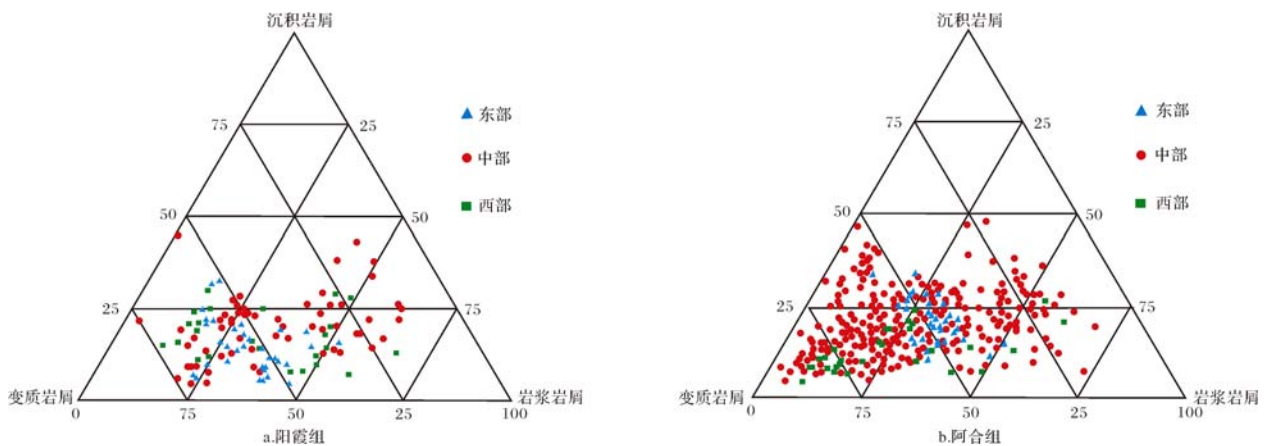


图3 塔里木盆地库车坳陷东部下侏罗统储层岩屑成分三角图

Fig.3 Triangular plot of detritus composition of Lower Jurassic reservoir in eastern Kuqa depression, Tarim Basin

表1 塔里木盆地库车坳陷东部下侏罗统储层岩石薄片数据统计表

Table 1 Rock slice data of Lower Jurassic reservoir in eastern Kuqa depression, Tarim Basin

| 层位 | 井 | 井段 | 分选性 | 磨圆 | 接触关系 | 胶结类型 | 杂基/% | 胶结物/% | 填隙物/% | 碎屑颗粒/% |
|-----|-----|-------------------|-----|----------|------|-------|------------------|------------------|-------------------|---------------------|
| J1y | 依南2 | 4 534.8~4 702.5 | 中—好 | 次棱—次圆 | 点—线 | 孔隙式 | 4~20 11.1(91) | 1~5 1.3(68) | 5~22 12.9(91) | 80~94 87.5(91) |
| | 依南5 | 4 533.09~4 695.95 | 好、中 | 次棱—次圆 | 点—线 | 孔隙 | 4~30 6.26(38) | <1~13 4.2(35) | 5~30 10.13(38) | 70~95 89.86 |
| | 明南1 | 603.59~782.63 | 中、好 | 次棱—次圆 | 点—线 | 孔隙 | 3~8 5.9(13) | <1~7 4.3(13) | 7~13 10.2(13) | 75.5~88 83.1(7) |
| | 依西1 | 2 893.2~3 530.1 | 好、中 | 次圆、次棱—次圆 | 线 | 孔隙 | 3~30 9.2(95) | <1~15 3.6(91) | 4~33 12.9(95) | 67~96 87.03(95) |
| | 克孜1 | 4 015.88~4 143.74 | 好、中 | 次棱—次圆 | 线 | 孔隙 | 8~15 11.6(6) | <1~8 4.5(6) | 8~22 16.6(6) | 78~92 83.8(6) |
| J1a | 依南2 | 4 738.94~4 966.7 | 中 | 次圆—次棱 | 线—凹凸 | 接触—孔隙 | 4~20 7.87(33) | 1~8 1.8(23) | 5~20 9.51(33) | 80~95 91.1(33) |
| | 依南5 | 4 765.04~5 013.2 | 好、中 | 次棱—次圆 | 点—线 | 孔隙 | 5~9 6.85(109) | <1~6 1.57(97) | 5~9 6.85(109) | 91~96 93.18(109) |
| | 依西1 | 408.75~413.9 | 好 | 次棱—次圆 | 凹凸—线 | 孔隙 | 5~8 6.2 | 3~6 4.5 | 9~14 10.9 | 86~91 89.1 |
| | 克孜1 | 4 356.7~4 388.19 | 好 | 次棱—次圆 | 凹凸—线 | 压嵌—孔隙 | 5~7 5.2(13) | <1~6 3.6(13) | 8~11 8.9(13) | 89~92 91.0(13) |

附注： $\frac{\text{含量范围}}{\text{平均(样品数)}}$ 。

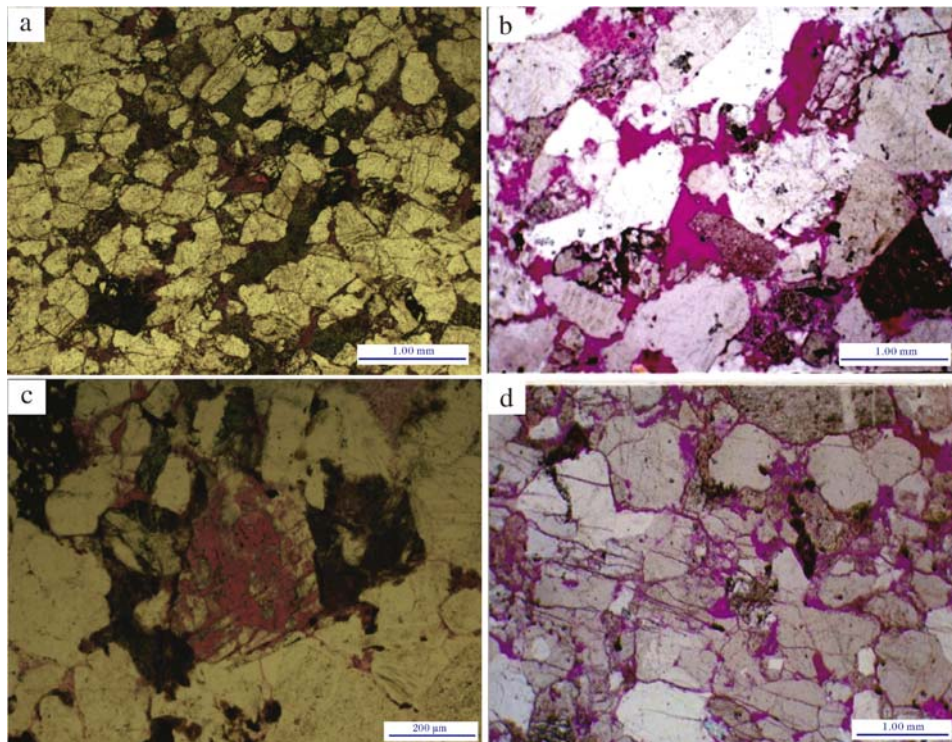


图4 塔里木盆地库车坳陷东部下侏罗统储层孔隙类型图

Fig.4 Pore types of Lower Jurassic reservoir in eastern Kuqa depression, Tarim Basin

2.2 孔隙结构特征

据铸体薄片资料,研究区下侏罗统储层孔隙类型主要为微孔隙(图4a)和溶蚀孔隙(图4b,c),含少量原生孔隙,局部发育裂缝(图4d),裂缝提高了致密储

层的渗透率。通过对研究区下侏罗统大量压汞资料的整理分析,总结出了下侏罗统四种压汞曲线形态,据此可将研究区储层的孔隙结构划分为四类(图5), I类孔隙结构:中孔中喉型,孔喉分选较好,粗歪度,

是研究区储层物性最好的一类孔隙结构,主要分布在东部明南地区;Ⅱ类孔隙结构:中孔细喉型,孔喉分选较好,较粗歪度,是研究区储层物性较好的一类孔隙结构,主要分布在中部依南地区断层附近的区域;Ⅲ类孔隙结构:小孔微喉型,孔喉分选差,细歪度,是研究区储层普遍发育的一类孔隙结构,主要分布在中部依南地区远离断层的区域;Ⅳ类孔隙结构:微孔微喉型,孔喉分选差,细歪度,是研究区储层物性最差的一类孔隙结构,主要分布在西部依西地区。

针对于非常规致密储层孔隙结构的特殊性质,采用激光共聚焦扫描显微镜技术^[17-18]对研究区的 20

块样品进行了观察,激光共聚焦图像显示,致密砂岩孔隙结构较复杂,孔隙、喉道具有一定的连通性。研究区阿合组与阳霞组孔隙结构的微观孔喉结构存在明显差异,具体表现在阿合组储层粒度较大,主要以粒内、粒间溶孔为主,且孔隙连通性较好,孔隙结构主要为中孔细喉,减孔原因主要是快速埋藏阶段颗粒的紧密压实。而阳霞组储层粒度较细,主要以微孔隙为主,次为粒间溶孔和微裂缝,孔隙连通性较差,主要的减孔原因是粒间杂基含量高,堵塞孔喉,并可见孔喉及裂缝中充填有沥青(图 6)。

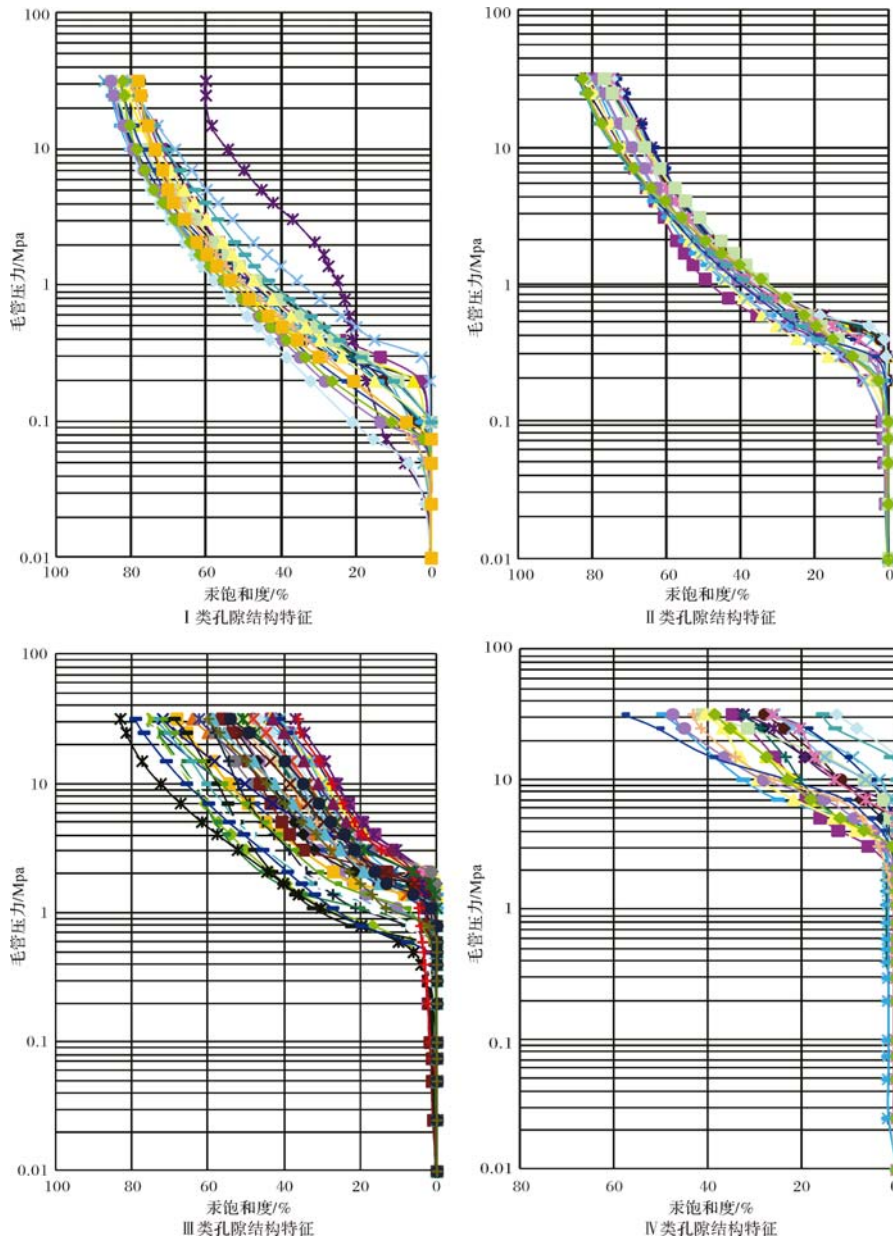


图 5 塔里木盆地库车坳陷东部下侏罗统储层典型压汞曲线

Fig.5 Typical mercury injection curves of Lower Jurassic reservoir in eastern Kuqa depression, Tarim Basin

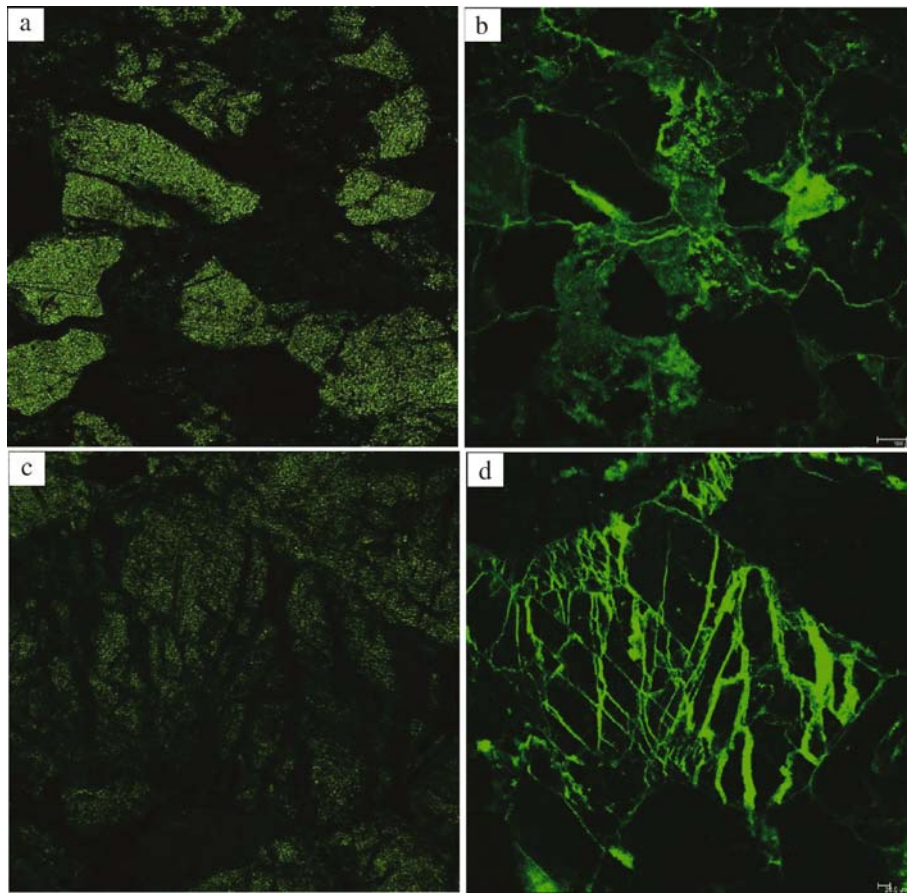


图6 塔里木盆地库车坳陷东部下侏罗统储层激光共聚焦特征

Fig.6 Typical characteristics of Lower Jurassic tight sandstone in eastern Kuqa depression, Tarim Basin through laser confocal microscopy

2.3 物性特征

根据库车坳陷东部9口钻井的岩芯实测孔隙度、渗透率分析结果,库车坳陷东部下侏罗统阿合组储层孔隙度主要为4%~12%,平均为8.12%,有效空气渗透率主要为 $(0.1\sim 3)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,其中小于 $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的样品占54%(图7a);阳霞组储层孔隙度主要为2%~8%,平均为6.12%,有效空气渗透率主要为 $(0.1\sim 2)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,其中小于 $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的样品占80%(图

7b)。按照赵靖舟(2011)对致密砂岩气的定义^[10-20],将孔隙度一般小于10%,空气渗透率一般小于 $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 定义为致密型储层,因此结合研究区的孔隙结构和物性特征可以判断下侏罗统阿合组、阳霞组砂岩为典型的致密型储层。

3 致密砂岩储层主控因素

沉积相是形成低渗透储层的基础,对储层质量具

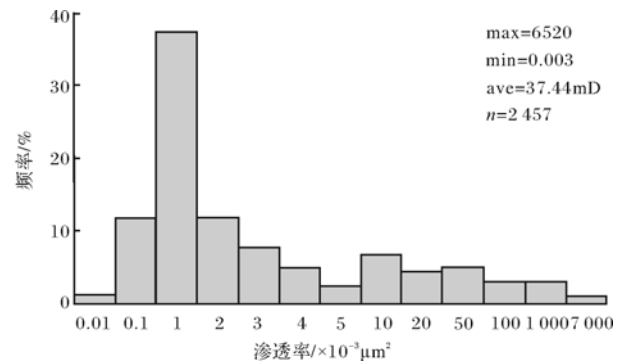
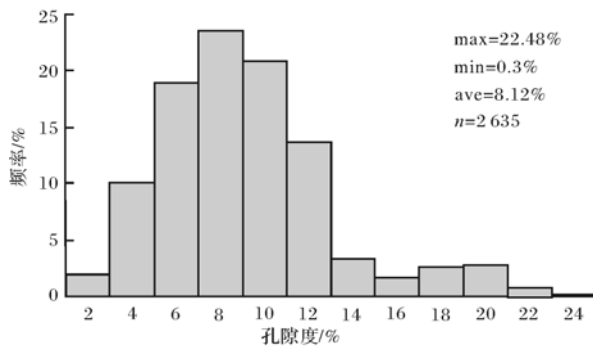


图7a 塔里木盆地库车坳陷东部阿合组孔隙度、渗透率分布频率图

Fig.7a Histogram of porosity and permeability of Ahe Formation in eastern Kuqa depression, Tarim Basin

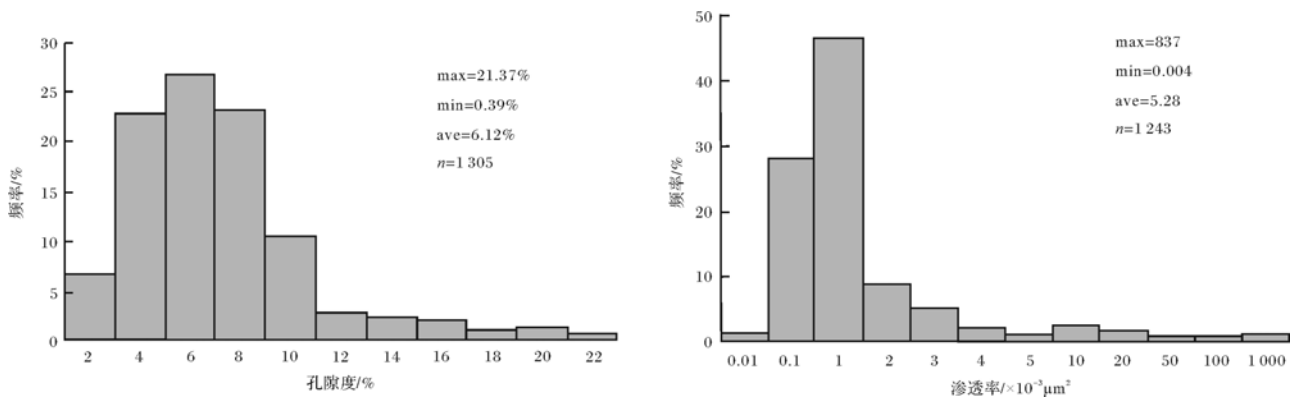


图 7b 塔里木盆地库车坳陷东部阳霞组孔隙度、渗透率分布频率图

Fig.7b Histogram of porosity and permeability of Yangxia Formation in eastern Kuqa depression, Tarim Basin

有较强的先天控制作用,并决定了后期成岩作用的类型和强度,成岩作用则通过控制储层的致密化程度从而影响现今气藏的分布,构造作用则一般是将致密砂岩储层改造成特低孔低渗或者低孔高渗储层^[21-23]。根据现有的资料以及前人的研究成果分析认为,库车坳陷东部地区下侏罗统储层主要受沉积作用(粒度)、成岩作用(压实作用)和构造作用的影响。

3.1 沉积作用

沉积环境所控制的岩石粒度、碎屑组分以及泥质含量等因素对储层的性质有重要的影响,主要体现在不同沉积相带中储层的物性不同,只有具备有利沉积相带的砂体才能发育优质储层。

研究区下侏罗统为一套湖泊—辫状河三角洲沉积。其中阿合组主要为辫状河三角洲平原分流河道砂体,岩石粒径较粗,物性较好;而阳霞组主要为辫状河三角洲前缘水下分流河道砂体,岩石粒径较细,物性相对较差。

通常,储层物性的变化与砂岩颗粒的粒度、分选程度、磨圆、排列方式、胶结类型以及碎屑组分和泥质含量有关。为了突出显示研究区以上因素对储层物

性的影响程度,对研究区不同粒度储层的物性作了统计分析。研究表明,储层的粒度大小与物性之间的具有很好的相关性,总体表现为粒度越粗,孔隙度、渗透率越大(图 8)。储层孔隙度与碎屑组分含量的相关性统计表明,无论是阿合组还是阳霞组,刚性颗粒石英的含量与储层孔隙度呈现出一定的正相关关系,而塑性岩屑含量与储层孔隙度之间呈现出一定的负相关关系。但相关性均不明显,说明碎屑组分对储层物性的贡献不是最主要的。储层的物性与泥质含量也呈一定的负相关关系,但由于研究区泥质含量总体不高,因此其对储层物性的影响程度不大。

3.2 成岩作用

储集体形成之后,储集物性将会受到成岩作用的控制和改造,其中不同的成岩作用对储层物性的改造起不同的作用。

3.2.1 压实作用强

研究区储层经历了长期浅埋、短期深埋的埋藏过程,后期又受到了强烈的构造挤压,压实作用很强^[24-25]。研究区储层压实作用的镜下特征主要有三种表现形式:①塑性颗粒的挤压变形,如云母被压断

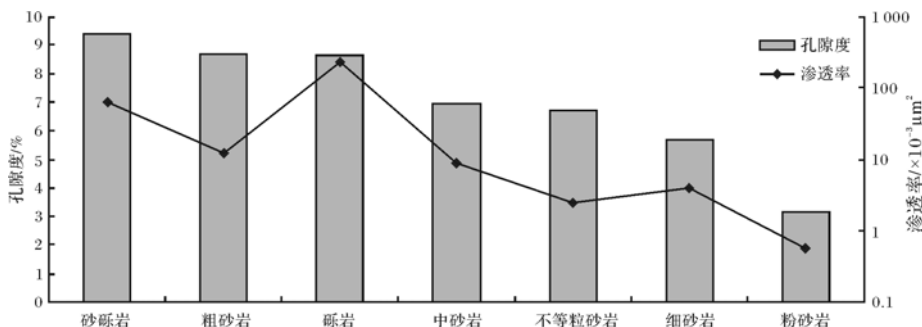


图 8 塔里木盆地库车坳陷东部下侏罗统不同粒度储层的物性

Fig.8 Physical property of different grain size of Lower Jurassic reservoir in eastern Kuqa depression, Tarim Basin

(图 9a), 泥岩岩屑被挤压成假杂基(图 9c); ②颗粒接触关系的变化, 如点—线—凹凸接触(图 9d); ③刚性颗粒的破碎(图 9b)。另外, 由于本地区下侏罗统为煤系地层, 成岩阶段早期呈酸性的地层水不利于储层中早期碳酸盐胶结物的形成。缺乏早期碳酸盐胶结物, 因此会使岩石易于压实而损失孔隙, 从而不利于孔隙的保存。所以成岩压实作用对储层物性有极重要的影响, 是孔隙减少的主要原因。在镜下铸体薄片详尽定量统计的基础上, 参考塔里木盆地相似岩性砂岩在正常成岩压实条件下的压实减孔率^[26], 可知研究区东部由压实作用引起的减孔量为 18.55%~20.1%, 研究区西部为 22.5%~24.0%, 两者正常压实量相差约 5.0%~6.0%。

3.2.2 胶结作用较弱

胶结作用也是储层孔隙减少的一个重要因素, 研

究区胶结物类型多样, 其中黏土矿物和碳酸盐胶结较常见(图 10)。由于早期煤系地层酸性水介质环境的影响, 研究区早期碳酸盐胶结不发育, 晚期碳酸盐胶结以连晶方解石和铁白云石为主, 但是研究区储层中碳酸盐胶结物含量较小, 与物性的相关关系不明显。黏土矿物以高岭石和伊利石为主, 其中高岭石主要来源于长石的溶蚀, 伊利石主要来源于早期成岩高岭石和钾长石的反应。随着成岩作用的进行, 在晚期成岩阶段, 高岭石胶结物不发育, 而主要以伊利石胶结为主, 伊利石充填于孔隙之中, 破坏了孔喉连通性, 对储层有一定的破坏作用。但是研究区下侏罗统储层整体胶结物含量低, 大部分含量小于 8%, 与储层物性相关性不明显, 说明由胶结作用造成的减孔量较少。从图 11 也可以明显的看出阳霞组和阿合组压实作用减少的孔隙度要远大于胶结作用。

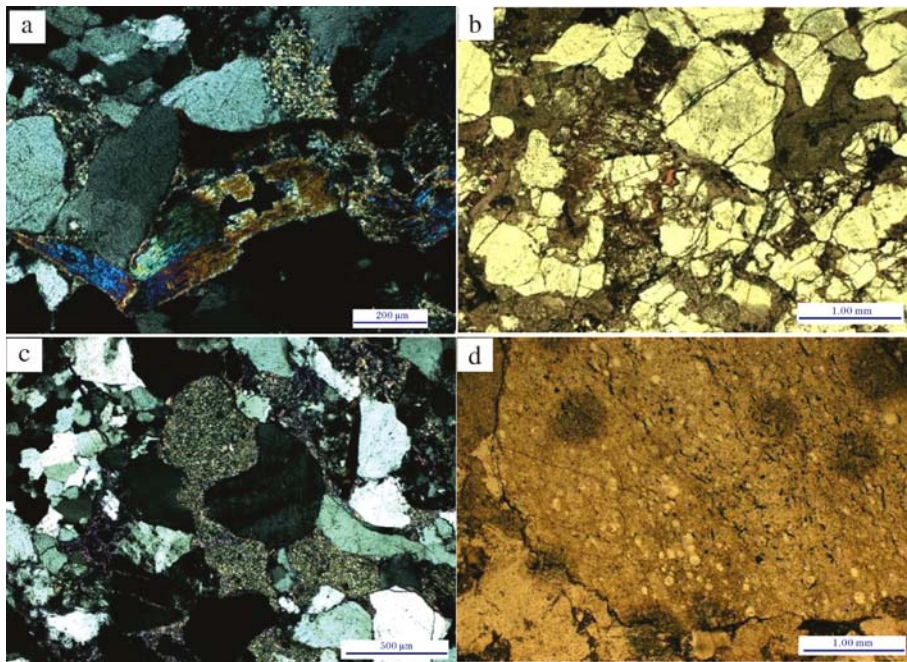


图 9 塔里木盆地库车坳陷东部下侏罗统储层压实作用

Fig.9 Compaction of Lower Jurassic reservoir in eastern Kuqa depression, Tarim Basin

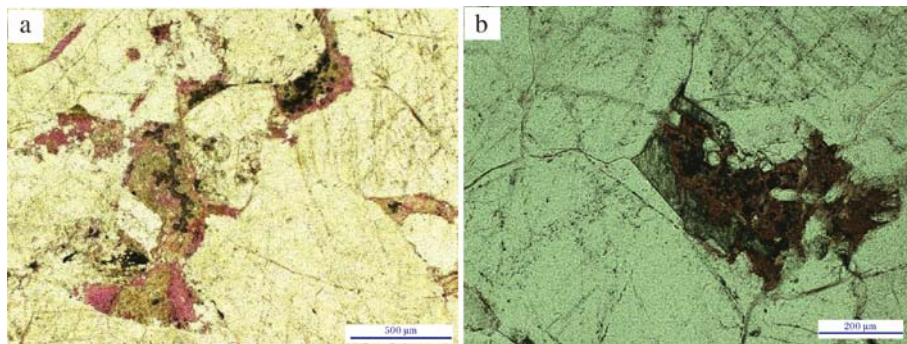


图 10 塔里木盆地库车坳陷东部下侏罗统储层胶结作用

Fig.10 Cementation of Lower Jurassic reservoir in eastern Kuqa depression, Tarim Basin

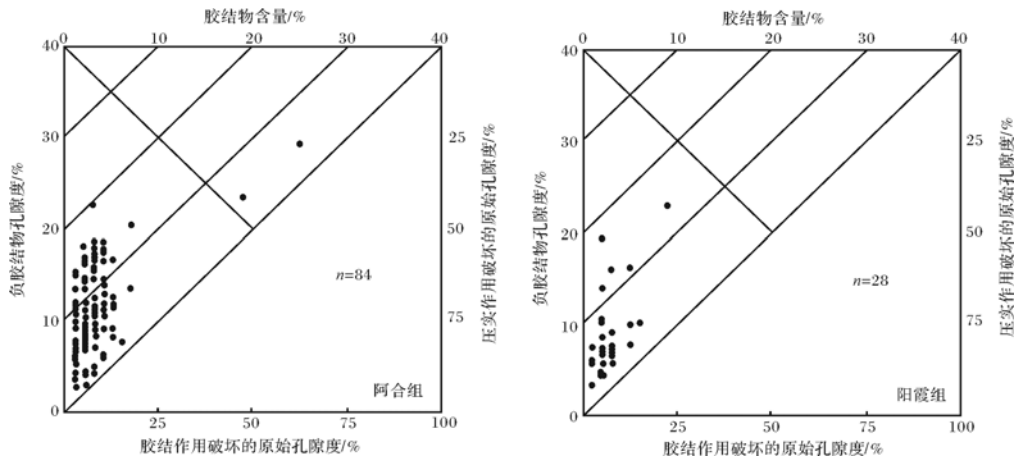


图 11 塔里木盆地库车坳陷东部下侏罗统储层压实减孔和胶结减孔对比图

Fig.11 Comparison of pore reduction by compaction and cementation of Lower Jurassic reservoir in eastern Kuqa depression, Tarim Basin

表 2 塔里木盆地库车坳陷东部下侏罗统储层孔隙结构统计表

Table 2 Pore structure statistics of Lower Jurassic reservoir in eastern Kuqa depression, Tarim Basin

| 统 | 组 | 井名 | 面孔率/% | 孔喉配位数/个 | 粒间溶孔/% | 粒内溶孔/% | 微孔隙/% | 构造缝/% | 溶蚀缝/% | 压溶缝/% |
|------|-----|------|-------|---------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 下侏罗统 | 阳霞组 | 依西 1 | 1.4 | | 4.76 | 15.38 | 82.53 | 0.22 | 0 | 0.2 |
| | | 依南 2 | 1.41 | 0~1 | 0.54 | 76.08 | 23.36 | 0.16 | 0 | 0.1 |
| | 阿合组 | 依南 4 | 2.46 | 0~1 | | 15 | 85 | 0.54 | 0 | 0.2 |
| | | 依西 1 | 0.3 | | | | 100 | | | |
| | | 依南 2 | 2.78 | 0~1 | 2.21 | 49.85 | 47.93 | 0.31 | 0 | 0.3 |
| | | 依南 4 | 3.6 | 0~2 | 7.23 | 21.26 | 70.9 | 0.47 | 0.8 | 0.1 |

3.2.3 溶蚀作用较弱

溶蚀作用对储层性质起到一定的改善作用,研究区储层以长石和岩屑为主的碎屑颗粒的溶蚀作用所增加的孔隙量有限。由表 2 可知,除了依南 2 井粒内溶孔较发育以外,研究区大部分次生孔隙都不发育,多以微孔隙为主。所以本区溶蚀作用对储层物性的改善作用不大。

3.3 构造作用

构造挤压作用对储层的影响通常包括两个方面。一方面,构造挤压会在正常压实作用的基础上进一步加大孔隙度的减小,对储层物性起到破坏作用;另一方面,构造作用产生的裂缝能够连通孔隙,从而改善储层的物性^[27]。

根据前人研究成果^[28],库车东部地区构造挤压应力主要为 60~130 MPa,造成的构造挤压减孔量约为 5%~10%。

构造应力的侧向挤压导致硬的岩层产生裂缝,连通孔隙,为岩层中流体的流动提供了良好的通道。研究区下侏罗统构造应力产生的储层裂缝有效改善了储层物性,使储集性提高,特别是提高了渗透性。根

据铸体薄片分析资料,研究区下侏罗统储层以粗砂岩、砂砾岩裂缝最发育。同时,同一岩性中裂缝发育情况下的孔隙度平均值要明显高于裂缝不发育情况下的孔隙度平均值。

4 结论

(1) 库车坳陷东部下侏罗统储层岩石类型主要为岩屑砂岩,部分为长石岩屑质石英砂岩及长石质岩屑砂岩,表现为石英、长石含量低,而岩屑含量较高。

(2) 储层成分成熟度低,结构成熟度中等—高,孔隙结构主要为中孔细喉和小孔微喉,孔隙连通性较差。

(3) 砂岩储层的孔隙度大部分为 4%~12%,平均为 8.12%,有效空气渗透率主要为 $(0.1 \sim 3) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,塔里木盆地库车坳陷东部下侏罗统属于致密储层。

(4) 储层发育受沉积作用、成岩作用和构造作用的综合影响,其中岩石粒度、成岩压实作用和构造挤压是影响储层物性的主控因素。压实作用对原始孔隙的破坏量最大,压实减孔量一般可达 20%~24%。

参考文献 (References)

- 1 Golab A N, Knackstedt M A, Averdunk H, et al. 3D porosity and mineralogy characterization in tight gas sandstones[J]. *The Leading Edge*, 2010, 29(12): 1476-1483.
- 2 Higgs K E, Zwingmann H, Reyes A G, et al. Diagenesis, porosity evolution, and petroleum emplacement in tight gas reservoirs, Taranaki Basin, New Zealand[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77(12): 1003-1025.
- 3 Neves F A, Al-Marzoug A, Kim J J, et al. Fracture characterization of deep tight gas sands using azimuthal velocity and AVO seismic data in Saudi Arabia[J]. *The Leading Edge*, 2003, 22(5): 469-475.
- 4 Smith T, Sayers C M, Liner C. Introduction to this special section: Tight gas sands[J]. *The Leading Edge*, 2010, 29(12): 1463.
- 5 Grechka V, Mazumdar P, Shapiro S A. Predicting permeability and gas production of hydraulically fractured tight sands from microseismic data [J]. *Geophysics*, 2010, 75(1): B1-B10.
- 6 张晓峰, 侯明才, 陈安清. 鄂尔多斯盆地东北部下石盒子组致密砂岩储层特征及主控因素[J]. *天然气工业*, 2010, 30(11): 34-38. [Zhang Xiaofeng, Hou Mingcai, Chen Anqing. Features and main controlling factors of tight sandstone reservoirs in the Lower Shihezi Formation in the northeastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(11): 34-38.]
- 7 张超, 李旭平, 钟建华, 等. 吐哈盆地巴喀油田下侏罗统致密砂岩储层特征及主控因素分析[J]. *山东科技大学学报: 自然科学版*, 2011, 30(6): 65-72. [Zhang Chao, Li Xuping, Zhong Jianhua, et al. Properties and the main controlling factors of compact sandstone reservoirs in Lower Jurassic series of Baka oilfield in Tuha Basin[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science*, 2011, 30(6): 65-72.]
- 8 康毅力, 罗平亚. 中国致密砂岩气藏勘探开发关键技术现状与展望[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(2): 239-245. [Kang Yili, Luo Pingya. Current status and prospect of key techniques for exploration and production of tight sandstone gas reservoirs in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(2): 239-245.]
- 9 李建忠, 郭彬程, 郑民, 等. 中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(4): 607-615. [Li Jianzhong, Guo Bincheng, Zheng Min, et al. Main type, geological features and resource potential of tight sandstone gas in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(4): 607-615.]
- 10 童晓光, 郭彬程, 李建忠, 等. 中美致密砂岩气成藏分布异同点比较研究与意义[J]. *中国工程科学*, 2012, 14(6): 9-15. [Tong Xiaoguang, Guo Bincheng, Li Jianzhong, et al. Comparison study on accumulation & distribution of tight sandstone gas between China and the United States and its significance[J]. *Engineering Sciences*, 2012, 14(6): 9-15.]
- 11 张国生, 赵文智, 杨涛, 等. 我国致密砂岩气资源潜力、分布与未来发展地位[J]. *中国工程科学*, 2012, 14(6): 87-93. [Zhang Guosheng, Zhao Wenzhi, Yang Tao, et al. Resource evaluation, position and distribution of tight sandstone gas in China[J]. *Engineering Sciences*, 2012, 14(6): 87-93.]
- 12 何登发, 周新源, 杨海军, 等. 库车坳陷的地质结构及其对大油气田的控制作用[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(1): 19-32. [He Dengfa, Zhou Xinyuan, Yang Haijun, et al. Geological structure and its controls on giant oil and gas fields in Kuqa depression, Tarim Basin: A clue from new shot seismic data[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(1): 19-32.]
- 13 贾进华, 薛良清. 库车坳陷中生界陆相层序地层格架与盆地演化[J]. *地质科学*, 2002, 37(增刊): 121-128. [Jia Jinhua, Xue Liangqing. Pattern and evolution of Mesozoic continental sequence stratigraphy in the Kuqa depression[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37(Suppl.): 121-128.]
- 14 卢双舫, 赵孟军, 付广, 等. 塔里木盆地库车油气系统富气的主控因素分析[J]. *大庆石油学院学报*, 2001, 25(3): 10-13. [Lu Shuangfang, Zhao Mengjun, Fu Guan, et al. Key factor analysis of enriching in natural gas in Kuche petroleum system, Tarim Basin[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2001, 25(3): 10-13.]
- 15 吕锡敏, 皮学军, 任战利, 等. 库车前陆盆地含油气系统的地质特征[J]. *天然气地球科学*, 2004, 15(3): 214-217. [Lü Ximin, Pi Xuejun, Ren Zhanli, et al. The geological characteristics of the petroleum system in Kucha Foreland Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(3): 214-217.]
- 16 杨申谷, 邹华耀. 依南构造下侏罗统储层影响因素分析[J]. *河南石油*, 2004, 18(4): 4-6. [Yang Shenggu, Zou Huayao. An analysis of influential factors on Lower Jurassic reservoirs in Yinan Structure[J]. *Henan Petroleum*, 2004, 18(4): 4-6.]
- 17 孙先达, 索丽敏, 张民志, 等. 激光共聚焦扫描显微检测技术在大庆探区储层分析研究中的新进展[J]. *岩石学报*, 2005, 21(5): 1479-1488. [Sun Xianda, Suo Limin, Zhang Minzhi, et al. New progress of reservoir research by the technology of laser confocal scanning microscope analysis in the Daqing exploration area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(5): 1479-1488.]
- 18 应凤祥, 杨式升, 张敏, 等. 激光扫描共聚焦显微镜研究储层孔隙结构[J]. *沉积学报*, 2002, 20(1): 75-79. [Ying Fengxiang, Yang Shisheng, Zhang Min, et al. Application of laser scanning confocal microscope to the measurement of pore texture in reservoirs[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(1): 75-79.]
- 19 白玉彬, 赵靖舟, 方朝强, 等. 鄂尔多斯盆地长6油层组准连续型致密砂岩油藏形成机理[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(1): 65-71. [Bai Yubin, Zhao Jingzhou, Fang Chaoqiang, et al. Forming mechanism of quasi-continuous tight sandstone reservoir of Chang 6 oil-bearing formation, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(1): 65-71.]
- 20 赵靖舟, 付金华, 姚涇利, 等. 鄂尔多斯盆地准连续型致密砂岩大气田成藏模式[J]. *石油学报*, 2012, 33(增刊): 37-52. [Zhao Jingzhou, Fu Jinhua, Yao Jingli, et al. Quasi-continuous accumulation model of large tight sandstone gas field in Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 33(Suppl.): 37-52.]
- 21 Morad S, Al-Ramadan K, Ketzer J M, et al. The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: A review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy [J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94(8): 1267-1309.

- 22 刘吉余,马志欣,孙淑艳. 致密含气砂岩研究现状及发展展望[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(3): 316-319. [Liu Jiyu, Ma Zhixin, Sun Shuyan. Present research situation and prospects of tight gas sands [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(3): 316-319.]
- 23 杨升宇,张金川,黄卫东,等. 吐哈盆地柯柯亚地区致密砂岩气储层“甜点”类型及成因[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 272-282. [Yang Shengyu, Zhang Jinchuan, Huang Weidong, et al. “Sweet spot” types of reservoirs and genesis of tight sandstone gas in Kekeya area, Turpan-Hami Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 272-282.]
- 24 寿建峰,朱国华,张惠良. 构造侧向挤压与砂岩成岩压实作用——以塔里木盆地为例[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 90-95. [Shou Jianfeng, Zhu Guohua, Zhang Huiliang. Lateral structure compression and its influence on sandstone diagenesis—A case study from the Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(1): 90-95.]
- 25 杨威,魏国齐,李宇平,等. 库车前陆盆地地下侏罗统成岩作用[J]. 天然气工业, 2005, 25(9): 17-19. [Yang Wei, Wei Guoqi, Li Yupin, et al. Diageneses of lower Jurassic in Kuche Foreland Basin [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(9): 17-19.]
- 26 寿建峰,斯春松,朱国华,等. 塔里木盆地库车坳陷下侏罗统砂岩储层性质的控制因素[J]. 地质论评, 2001, 47(3): 272-277. [Shou Jianfeng, Si Chunsong, Zhu Guohua, et al. Controlling factors of the properties of the Lower Jurassic sandstone reservoirs in the Kuqa depression, Tarim Basin [J]. Geological Review, 2001, 47(3): 272-277.]
- 27 杨帆,邸宏利,王少依,等. 塔里木盆地库车坳陷依奇克里克构造带侏罗系储层特征及成因[J]. 古地理学报, 2002, 4(2): 46-55. [Yang Fan, Di Hongli, Wang Shaoyi, et al. Reservoir characteristics and genesis of the Jurassic in Yiqikelike tectonic zone of Kuqa depression in Tarim Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2002, 4(2): 46-55.]
- 28 张荣虎,姚根顺,寿建峰,等. 沉积、成岩、构造一体化孔隙度预测模型[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(2): 145-151. [Zhang Ronghu, Yao Genshun, Shou Jianfeng, et al. An integration porosity forecast model of deposition, diagenesis and structure [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2): 145-151.]

Reservoir Characteristics and Main Controlling Factors of the Lower Jurassic Tight Sandstone in Eastern Kuqa Depression

ZHANG NiNi^{1,2} LIU LuoFu^{1,2} SU TianXi^{1,2} DAI QiWen^{1,2} ZHAO YuanYuan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249;

2. Basin and Reservoir Research Center, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249)

Abstract: The tight sandstone gas of Tarim Basin has a large distribution and great exploration potential, which is an important prospective exploration field of the basin in the future. The Lower Jurassic sandstone in eastern Kuqa depression is commonly tight. It is important for the further exploration and development to strengthen the study of its reservoir characteristics and the main controlling factors. In order to reveal the controlling factors and development mechanism of the Lower Jurassic tight sandstone reservoir in eastern Kuqa depression, by use of the tests of casting section, cathodeluminescence, scanning electron microscope and laser confocal microscopy are applied, together with the geological and logging analyses. The lithology, pore structure characteristics and physical properties are carried out in this paper. The results show that lithic sandstone is the main reservoir rock type, and the rock composition maturity is low while the textural maturity is of medium degree. The pore structure is mainly mesoporous with fine throat and micropore with fine throat. Majority of the porosity values ranges from 4% to 12%, with an average of 8.12%, and the effective air permeability is mainly $(0.1 \sim 3) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; On the basis of the comprehensive analyses of sedimentation, diagenesis and tectonics of tight reservoir strata, the studies suggest that the reservoir physical property is mainly controlled by sedimentation, diagenesis and tectonism. The main controlling factors are granularity and compaction.

Key words: reservoir characteristics; main controlling factors; tight sandstone; Lower Jurassic; eastern Kuqa depression