

Reservoir Characteristics and Main Controlling Factors of Tight Sand Reservoir in Upper Paleozoic in XE Gas Field in the Eastern Ordos Basin

Yuzhe Zhou^{1,2}

¹China United Coalbed Methane Corp. Ltd., Beijing

²Unconventional oil and gas branch of CNOOC (China) Ltd., Beijing

Email: zhouyzh6@cnooc.com.cn

Received: Mar. 27th, 2018; accepted: Apr. 9th, 2018; published: Apr. 16th, 2018

Abstract

Aiming at revealing the characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoirs in the Upper Paleozoic in XE gas field in the eastern Ordos Basin, this paper studies the petrological features, grain size analysis, thin section analysis, SEM, capillary pressure analysis, X-ray diffraction of 45 wells. The result shows that the main lithology of reservoir of Shihezi Formation includes feldspar litharenite and lithic arkose. Meanwhile, the main lithology of reservoir of Taiyuan Formation was quartz sandstone. The main pore types include follows: primary intergranular pores, intergranular dissolved pores, intragranular dissolved pores and intercrystalline pores; the material bases of these tight reservoirs in this study area were controlled by sedimentary environment like shallow delta or tidal channel, and the present reservoirs' quality was determined by diagenesis. The compaction and cementation of silica, carbonate and clay mineral made the reservoir properties poor, and multi-phases dissolution was constructive for reservoir properties.

Keywords

XE Gas Field, Tight Sandstone, Reservoir Characteristics, Diagenesis

鄂尔多斯盆地东缘XE气田上古生界致密砂岩储层特征及主控因素

周煜哲^{1,2}

¹中联煤层气有限责任公司, 北京

²中海石油(中国)有限公司非常规油气分公司, 北京
Email: zhouyzh6@cnooc.com.cn

收稿日期: 2018年3月27日; 录用日期: 2018年4月9日; 发布日期: 2018年4月16日

摘要

为揭示鄂尔多斯盆地东缘XE气田上古生界致密砂岩储层特征及主控因素, 本文利用XE气田45口探井岩心观察、粒度分析、砂岩薄片鉴定、扫描电镜、毛细管压力分析、X衍射等手段, 系统研究储层岩石学特征、孔喉结构及成岩演化规律, 结果表明: 该区储层上、下石盒子组储层以长石岩屑、岩屑长石砂岩为主, 太原组储层以石英砂岩为主; 主要孔隙类型包括残余原生孔、粒间溶孔、粒内溶孔、晶间孔; 孔喉结构以中孔细喉及细孔细喉为主; 认为浅水三角洲、障壁海岸潮坪等沉积环境决定了储层的物质组成及结构特征, 而后期成岩作用决定了致密砂岩储层物性特征: 表现为压实作用、硅质胶结作用、碳酸盐胶结作用及粘土胶结作用使储层物性变差, 多期次生溶蚀作用形成各类次生溶孔, 改善致密储层储集能力。

关键词

XE气田, 致密砂岩, 储层特征, 成岩作用

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

致密砂岩气藏通常是指孔隙度小于 12%, 渗透率小于或等于 0.1 mD 的砂岩气层, 孔喉半径一般小于 0.5 μm 。自上世纪 70 年代以来, 全球已勘探发现致密砂岩气盆地 70 多个, 资源量约 $210 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。2014 年, 美国致密气产量达到 $1400 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占美国天然气总产量的 19.2%; 中国致密气产量为 $360 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占中国天然气总产量的 27.1%, 致密砂岩气已成为天然气勘探开发中的重要领域。

XE 气田位于鄂尔多斯盆地东缘(图 1), 经过近几年的勘探进程, 发现上石盒子组盒 2、盒 4 段、下石盒子组盒 6、盒 7、盒 8 段及太原组太 2 段等多套致密砂岩气层, 取得了重大勘探突破。但致密砂岩气藏具有横向变化快, 储层非均质性强的特点, 相对高孔渗的“甜点”气藏的主控因素尚不清楚[1] [2] [3]、同时致密砂岩气气藏由于储集砂体分布不均, 储层物性差, 有效厚度薄、自然能量不足, 油气井基本没有自然产能, 勘探开发难度愈来愈大。因此, 本文在前人研究基础上, 利用 45 口探井岩心、薄片、录井、测井等资料基础, 对研究区上古生界储层岩石学特征、孔隙类型、成岩作用进行详细研究, 寻找典型参数定量表征孔喉结构特征, 探讨不同期次成岩作用类型及其对孔隙演化的影响, 并结合上古生界储层分布规律与沉积环境变化, 综合分析致密砂岩储层特征并寻找主控因素, 以期为后续储层预测、精细评价提供依据。

2. 地质背景

XE 气田构造上位于鄂尔多斯盆地东缘, 横跨伊陕斜坡与晋西挠褶带两个构造单元, 面积 744.5 km^2 , 区内上古生界自下而上石炭系本溪组、二叠系太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组和石千峰组。

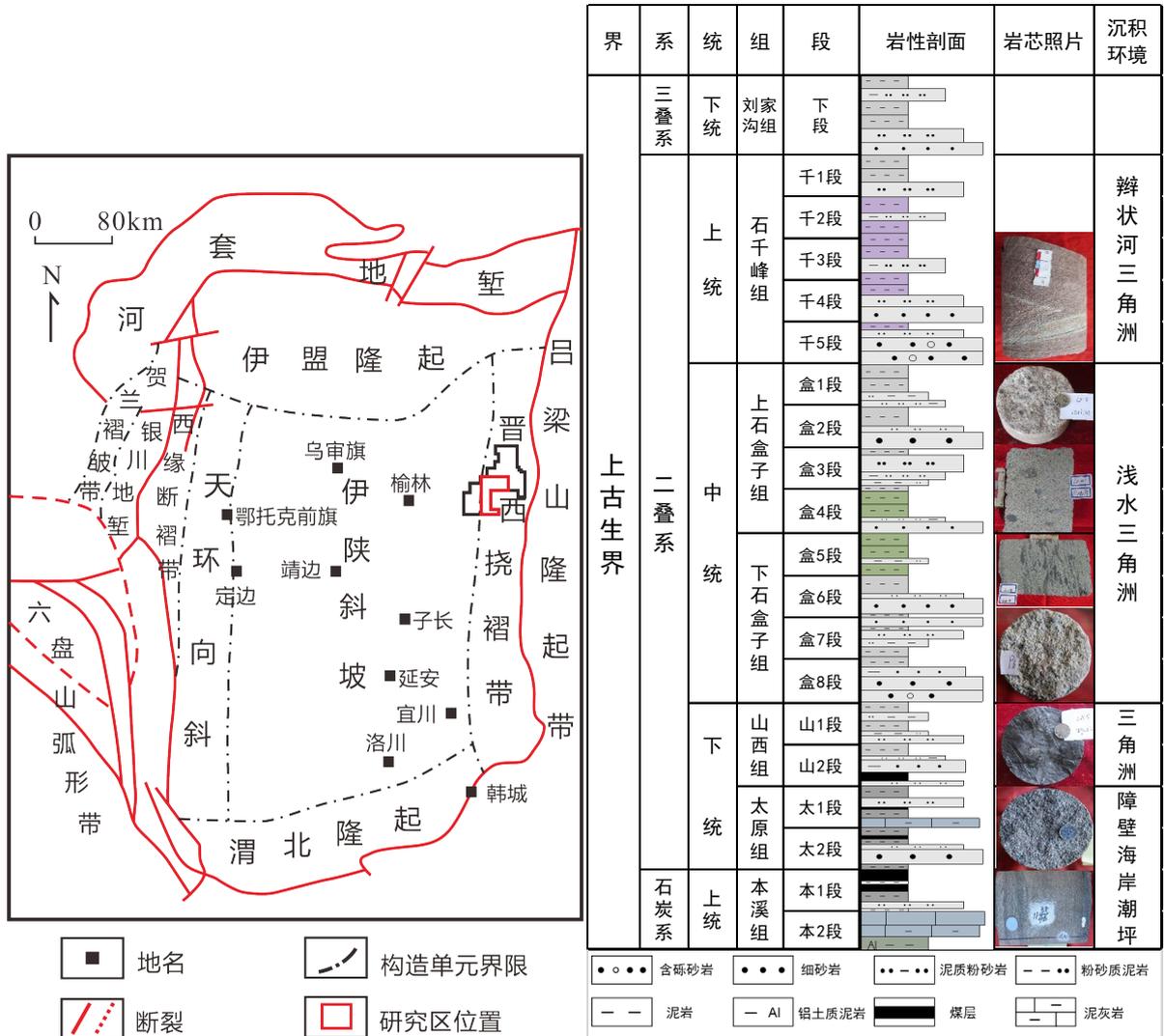


Figure 1. Geographic map and stratigraphic correlation chart of research area
 图 1. 研究区地理位置及地层综合柱状图

根据岩性组合特征可将本溪组划分为本 1 段和本 2 段，太原组划分为太 1 段和太 2 段，山西组划分为山 1 段和山 2 段，下石盒子组划分为盒 5 段、盒 6 段、盒 7 段、盒 8 段，上石盒子组划分为盒 1 段、盒 2 段、盒 3 段及盒 4 段，石千峰组划分为千 1 段、千 2 段、千 3 段、千 4 及千 5 段(图 1)。其中石千峰组、石盒子组地层呈典型的“泥包砂”特征，主要发育辫状河三角洲~浅水三角洲相，微相类型主要有水下分流河道、分流河道、河口坝、席状砂等，山西组、太原组、本溪组地层呈砂、泥、煤、灰互层特征，主要发育障壁海岸潮坪相，微相类型包括砂坪、泥坪、灰坪、潮汐水道、障壁砂坝、泻湖沼泽等。近几年的勘探开发成果显示，上石盒子组盒 2 段、盒 4 段、下石盒子组盒 6 段、盒 7 段、盒 8 段及太原组太 2 段是研究区主要储集层段。

3. 储层特征

3.1. 岩石学特征

晚古生代早期，受海西构造运动影响鄂尔多斯盆地东北部逐步抬高。上古生界自下而上发育障壁海

岸潮坪、辫状河三角洲、浅水三角洲等多种沉积环境，决定了本区致密储层岩石学特征复杂多样[4] [5]。研究区在上、下石盒子组及太原组已获得大量钻井取心，岩石薄片鉴定结果显示不同层位岩性差别较大：

1)上石盒子组：岩性主要为长石砂岩和岩屑长石砂岩，少量长石石英砂岩(图 2-a)。以含砾粗砂岩、粗砂岩、中砂岩为主。成分成熟度中等偏低，岩石组份中石英含量 40%~77%，平均 57.9%；长石含量 12%~43%，平均 28.6%，以斜长石居多；岩屑含量 3%~24%，平均 13.5%，主要成分为岩浆岩岩屑及变质岩岩屑，含极少量沉积岩岩屑及云母(表 1)。点~线接触为主，分选中等~较好，磨圆次棱角~次圆状。

2)下石盒子组：岩性主要为岩屑长石砂岩、长石岩屑砂岩及岩屑石英砂岩(图 2-b)，发育少量长石石英砂岩，以含砾粗砂岩、粗砂岩、中砂岩为主。成分成熟度中等，石英含量 44%~91%，平均 64.7%；长石含量 9%~31%，平均 16.6%，以斜长石居多；岩屑含量 6%~28%，平均 18.7%，以变质岩岩屑为主，含少量岩浆岩岩屑、沉积岩岩屑等(表 1)。线接触为主，分选中等~较差，磨圆次棱角~棱角状。

3)太原组：岩性主要为石英砂岩、岩屑石英砂岩(图 2-c)，以含砾粗砂岩、中砂岩为主。成分成熟度高，石英含量 72%~100%，平均 88.0%；长石含量 0%~10%，平均 3.6%；岩屑含量 2%~18%，平均 8.6%，以变质岩岩屑为主，含少量岩浆岩岩屑、沉积岩岩屑等(表 1)。线~缝合接触为主，分选较好，次棱角~次圆状磨圆。

3.2. 储集空间类型

结合研究区 26 口井太原组~石千峰组储集层共 612 个样品铸体薄片、阴极发光、扫描电镜资料，根据成因不同，研究区储层储集空间可分为残余原生孔、次生溶孔、晶间孔等 3 种类型，微裂缝不发育。

3.2.1. 残余原生孔

镜下可见石英、长石等刚性颗粒呈点~线接触，发育明显绿泥石矿物衬边，有利于抑制胶结作用，保留原生孔隙。残余原生孔最大孔径可达 150 μm，平均 30~50 μm，具有很好的连通性(图 3-a~图 3-b)。研

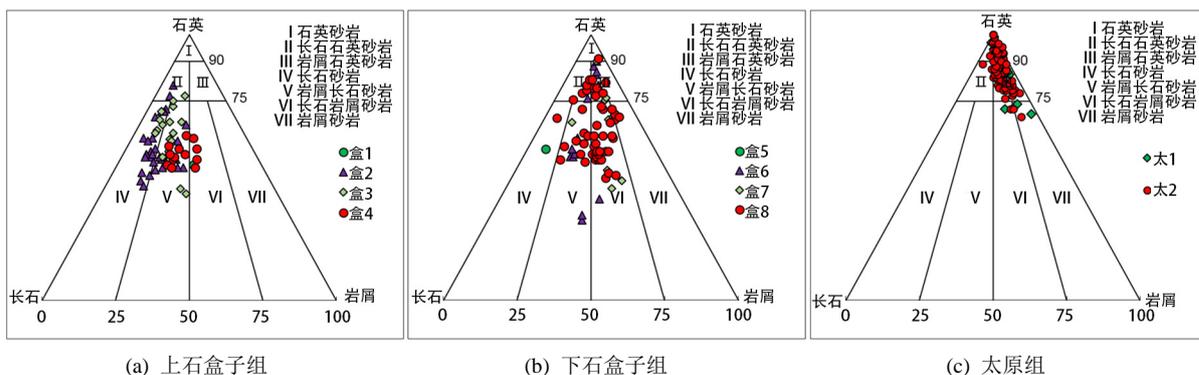


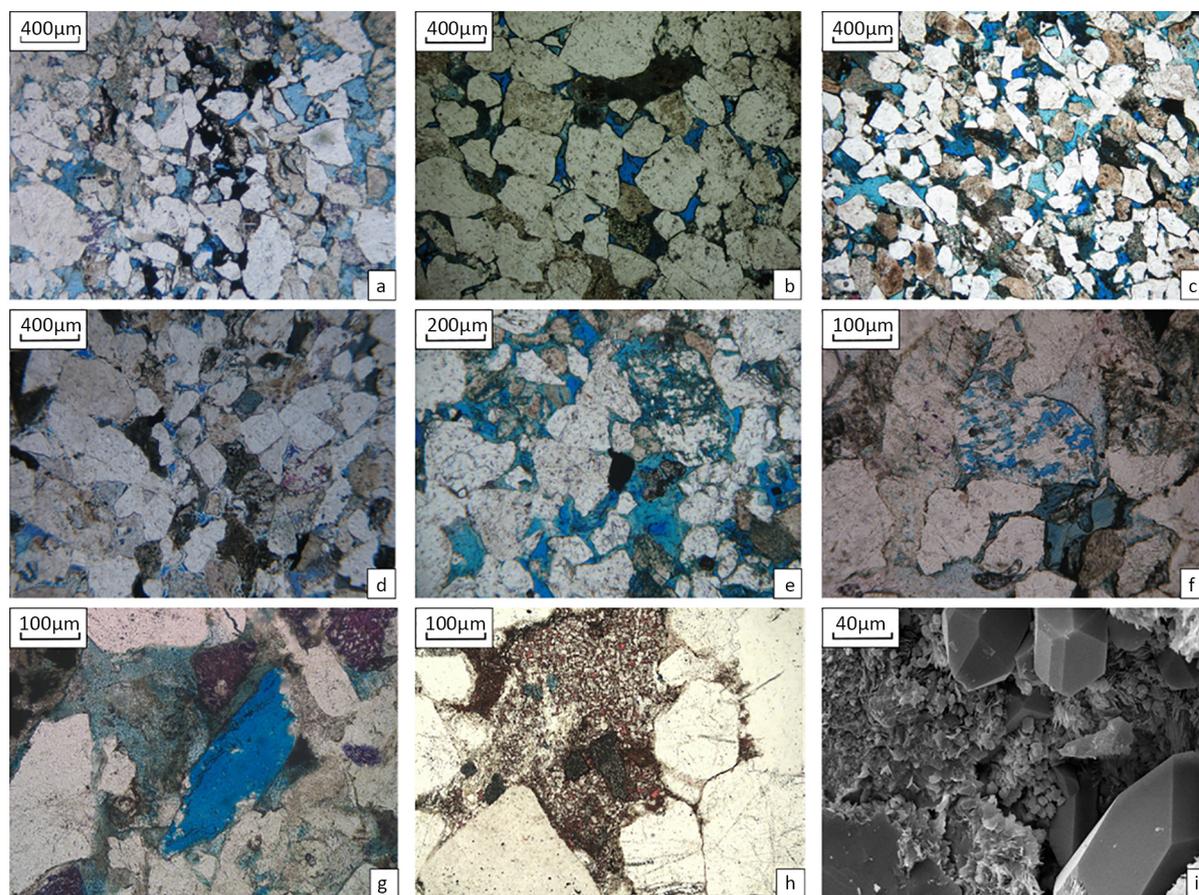
Figure 2. Sandstone compositional ternary diagrams in Upper Paleozoic in XE gas field

图 2. XE 气田上古生界砂岩成分分类三角图

Table 1. Characteristics of minerals of reservoir in Upper Paleozoic in XE gas field

表 1. XE 气田上古生界储层岩矿特征统计

层位	石英含量(%)	长石含量(%)				岩屑含量(%)		
		钾长石	斜长石	总量	岩浆岩	变质岩	沉积岩及云母等	总量
上石盒子组	57.9	2.9	25.7	28.6	6.2	6.6	0.7	13.5
下石盒子组	64.7	3.6	13.0	16.6	7.2	10.1	1.4	18.7
太原组	88.0	0.9	2.7	3.6	2.2	6.1	0.3	8.6



a、XE-251, 1478.4 m, 盒 2, 残余原生孔; b、XE-274, 1586.3 m, 盒 4, 残余原生孔; c、XE-264, 1348.1 m, 盒 4, 粒间溶孔与残余原生孔; d、XE-247, 1312.4 m, 盒 4, 粒间溶孔; e、XE-226, 1433.8 m, 千 5, 粒间溶孔与粒内溶孔; f、XE-267, 1499.85 m, 盒 8, 长石粒内溶孔; g、XE-218, 1765.87 m, 盒 8, 铸模孔与铁方解石交代; h、XE-214, 1826.0 m, 太 2, 高岭石晶间孔; i、XE-272, 1699.5 m, 太 2, 高岭石与石英充填粒间孔隙

Figure 3. Thin-section photomicrographs of pore types of reservoir in Upper Paleozoic in XE gas field

图 3. XE 气田上古生界储层孔隙类型镜下特征

究区残余原生孔在上石盒子组(平均埋深 1300~1500 m)十分发育, 下石盒子组(平均埋深 1500~1700 m)至太原组(平均埋深 1700~1900 m)残余原生孔逐渐减少至完全消失。

3.2.2. 次生溶孔

次生溶孔为本区上古生界储层最主要的孔隙类型, 可进一步划分为粒内溶孔、粒间溶孔。

1) **粒间溶孔:** 镜下表现为骨架颗粒边缘干净, 胶结物及杂基部分或全部被溶蚀, 溶蚀作用强烈时可见矿物颗粒呈悬浮状分布。被溶蚀矿物主要以早期碳酸盐胶结物、不稳定粘土矿物(水云母等)为主。粒间溶孔常作为喉道沟通孤立孔隙, 改善孔隙连通性(图 3-c~图 3-d)。

2) **粒内溶孔:** 镜下表现为长石沿节理缝溶蚀、不稳定岩屑溶蚀形成铸模孔以及少量石英颗粒边缘被溶蚀呈港湾状、锯齿状。主要发育在上石盒子组、下石盒子组长石岩屑砂岩、岩屑砂岩储层中, 研究区下石盒子组储层粒内溶孔最为发育, 常呈孤立状产出, 孔隙连通性差; 太原组储层发育部分石英溶孔, 后期常被高岭石等粘土矿物充填(图 3-e~图 3-g)。

3.2.3. 晶间孔

镜下表现为早期形成的各类孔隙(残余原生孔、粒间粒内溶孔等), 被自生沉淀的高岭石、石英等微晶

充填,形成微小细孔,一般为微~纳米级。扫描电镜可见高岭石书页状集合体与自形产出的石英微晶一同产出并充填孔隙,研究区晶间孔主要在下石盒子组及太原组储层中发育(图 3-h~图 3-i)。

统计研究区 612 个铸体薄片的镜下孔隙类型,结果显示上石盒子组以残余原生孔为主,占总孔隙的 43.6%,其次为粒间溶孔与粒内溶孔,分别占 27.9%与 22.7%;下石盒子组以粒内溶孔为主,占总孔隙 50.8%,其次为粒间溶孔,占 27.3%;太原组以粒间溶孔为主,占总孔隙 43.8%,其次为晶间孔,占 26.8% (图 4)。

3.3. 孔喉结构特征

统计 XE 气田 17 口探井 374 个样品的压汞法毛管压力测试数据,研究区上古生界储层排驱压力在 0.03~6.08 Mpa 之间,平均 1.03 Mpa,喉道中值半径在 0.001~1.33 μm 之间,平均 0.15 μm ;最大喉道半径在 0.01~21.37 μm 之间,平均 1.61 μm ,XE 地区储层孔喉结构以中孔细喉及细孔细喉型为主。

利用毛管压力曲线可以表征储层不同喉道的分布规律,从而可以定量评价储层的孔喉结构[6] [7]。通过统计分析,研究区太原组,上、下石盒子组储层排驱压力、中值半径具有明显差异:1、上石盒子组盒 2、盒 4 段储层孔喉结构以粗孔大喉为主,喉道分选性好,储层渗透性好,排驱压力低于 0.5 Mpa,中值半径大于 0.2 μm ,毛管压力曲线呈陡斜下凹形态;2、太原组、下石盒子组盒 6、盒 7 段储层孔喉结构以中孔细喉为主,储层渗透性中等;排驱压力介于 0.5~1.2 Mpa 之间,中值半径介于 0.05~0.2 μm ,毛管压力曲线呈一平缓斜线状;3、下石盒子组盒 8 段储层孔喉结构以细孔微喉为主,细歪度,储层渗透性较差,排驱压力一般大于 1.2 Mpa,中值半径小于 0.05 μm ,毛管压力曲线呈上凸形态(图 5)。

4. 储层发育主控因素

4.1. 沉积环境

鄂尔多斯盆地东缘上古生界沉积环境经历了本溪组、太原组滨浅海相障壁—潮坪—泻湖沉积,山西组海陆过渡相三角洲沉积,下石盒子组、上石盒子组浅水三角洲及石千峰组辫状河三角洲发育的内陆湖盆陆源碎屑沉积的发展演化阶段,不同类型的沉积作用对储层的影响包括:

1、宏观上控制了储层砂体形态与展布范围。研究区太原组主要发育潮坪、潮汐水道、泄湖等沉积亚相,其中障壁砂坝、潮汐水道、砂坪等沉积微相大面积连续发育,潮汐水道砂体厚度大[8]。上、下石盒子组主要发育三角洲平原、三角洲前缘亚相[9],分流河道、水下分流河道的频繁摆动、改道使砂体横向

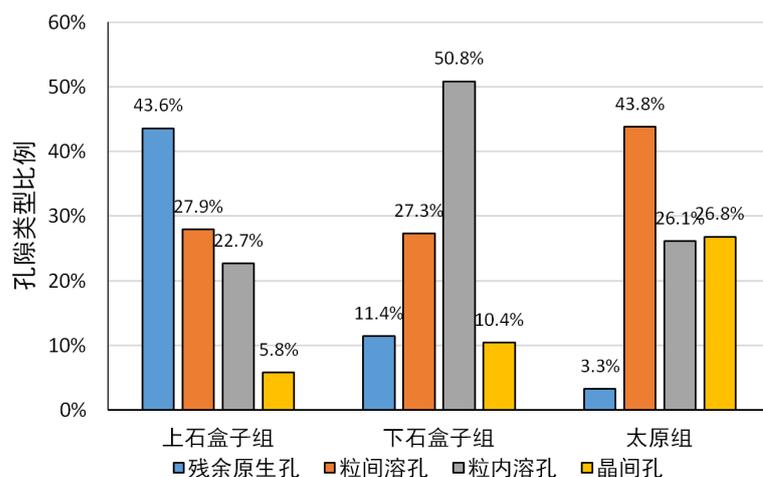


Figure 4. Histogram of pore types of reservoir in Upper Paleozoic in XE gas field

图 4. XE 气田上古生界储层孔隙类型分布

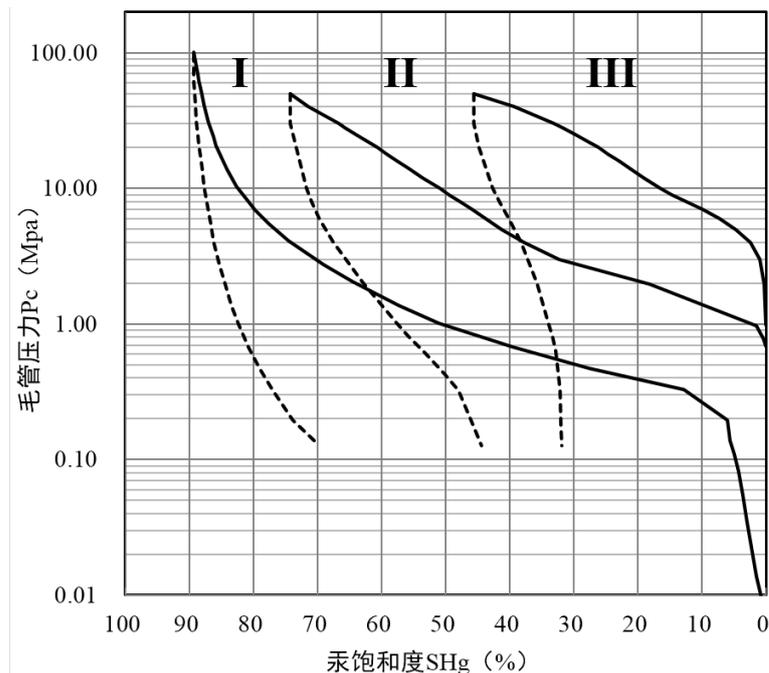


Figure 5. Histogram of capillary pressure curves of reservoir in Upper Paleozoic in XE gas field

图 5. XE 气田上古生界储层毛管压力曲线分类图

上复合叠置，连片性较好，区内储集层主要分布在分流河道、水下分流河道、河口坝和前缘席状砂等沉积微相中。同时大面积网状分布的分流河道在三维空间上形成了网状岩性疏导体系，也为后期成岩流体的进入并改善储层奠定了基础[10] [11] [12] [13]。

2、微观上控制了沉积物结构、成分成熟度等特征。研究区太原组太 2 段潮汐水道沉积物形成于强水动力条件下，储集层分选好，磨圆度高，长石、岩屑、杂基等含量极低，石英含量高；下石盒子组辫状河三角洲分流河道沉积物经过较短距离快速搬运并迅速沉降，储集层分选差，磨圆度差，长石、不稳定岩屑含量较高；上石盒子组三角洲前缘水下分流河道、席状砂等沉积物经较长距离搬运并淘洗，储集层分选较好，磨圆度较高，不稳定岩屑含量较低。

4.2. 成岩作用

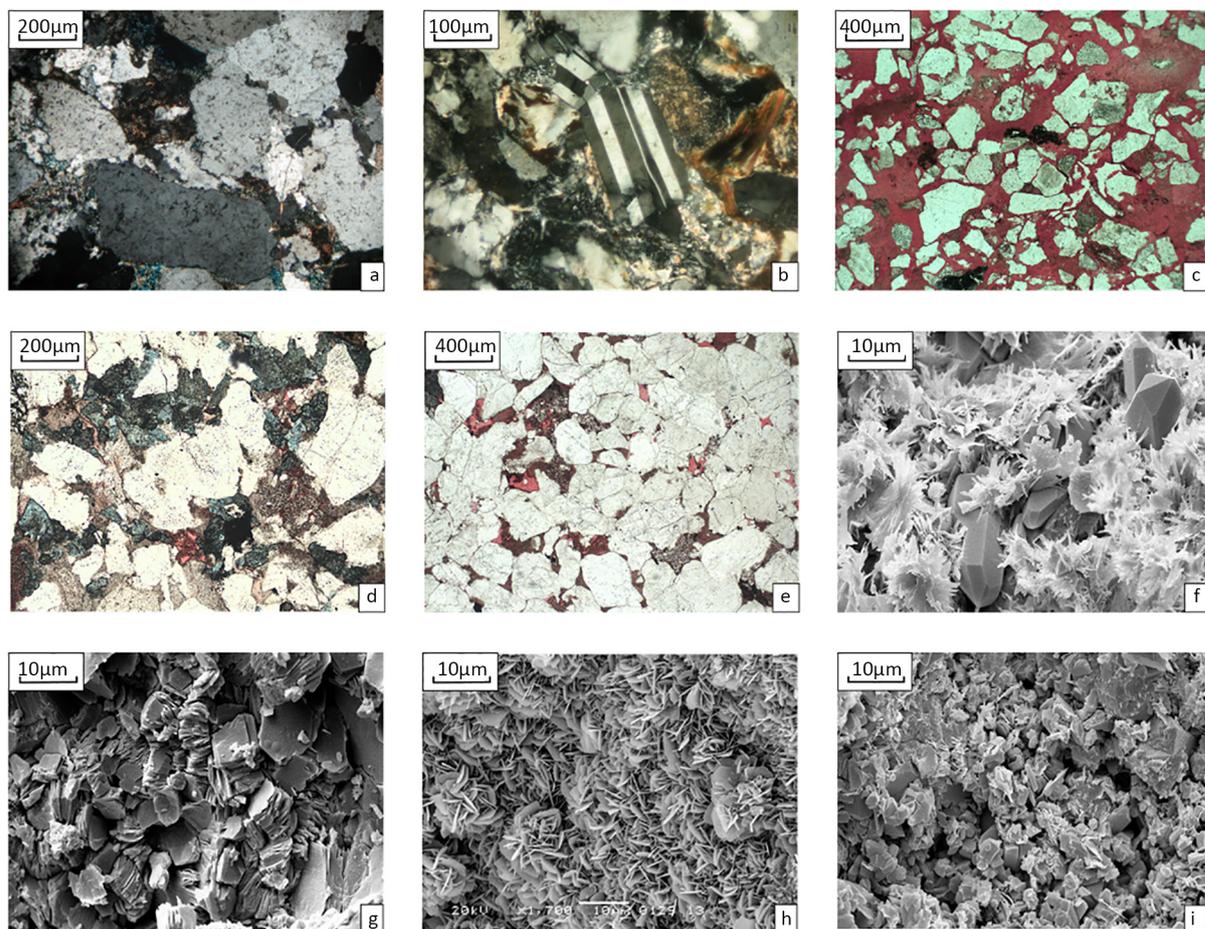
研究区储集层经历的成岩作用主要包括压实压溶、胶结、溶蚀以及交代作用。压实和胶结作用破坏储层原始孔隙，储层逐步变为致密；后期又经历了不同成因、不同类型的溶蚀作用，改善了原本致密储层的物性。

4.2.1. 压实作用

压实作用是本区储层致密主控因素，压实作用造成岩屑、云母等塑性颗粒挤压变形或假杂基化，同时也使得石英、长石等刚性颗粒相互挤压变形，呈线接触甚至缝合接触(图 6-a、图 6-b)。研究区上石盒子组埋深较浅，压实程度不高，残余原生孔隙较为发育；随埋深增加，下石盒子组、太原组压实程度不断增强，残余原生孔逐渐减少至基本消失(图 4)。

4.2.2. 胶结作用

研究区储层主要发育碳酸盐胶结、硅质胶结及自生粘土矿物胶结，其中碳酸盐胶结、硅质胶结降低



a、XE-341, 1735.43 m, 太2, 强压实; b、XE-352, 1725.5 m, 盒8上, 斜长石因挤压破碎; c、XE-363, 1374.7 m, 盒2, 方解石基底式胶结; d、XE-272, 1790.44 m, 太2, 铁白云石孔隙式胶结; e、XE-272, 1789.03 m, 太2, 石英次生加大; f、XE-341, 1728.02 m, 太2, 石英微晶与丝缕状伊利石; g、XE-224, 1780.37 m, 太2, 书页状高岭石集合体; h、XE-272, 1584.0 m, 盒8, 叶片状绿泥石; i、XE-341, 1718.6 m, 太2, 正八面体黄铁矿晶体

Figure 6. Thin-section photomicrographs of compaction and cementation

图 6. 压实作用与胶结作用典型镜下特征

了储层孔隙度, 而粘土矿物胶结降低了储层渗透性, 对孔隙度影响不大。储层胶结类型主要受到沉积环境及成岩演化阶段的控制:

1) 上石盒子组储层主要发育早期碳酸盐胶结, 碳酸盐胶结物一般不含铁或含铁量很低(图 6-c), 呈基底式胶结, 原生孔基本被破坏殆尽。早期碳酸盐胶结可提高储层抗压实强度, 并为后期次生溶蚀提供了基础;

2) 下石盒子组储层以晚期碳酸盐胶结为主(图 6-d), 胶结物主要为铁方解石、高镁方解石或者白云石、铁白云石, 形成于碱性成岩环境中, 表现为孔隙式胶结, 充填原生孔以及各类次生溶孔[14]。

3) 太原组储层以大量发育硅质胶结为特征, 镜下可见 II~III 型石英加大边, 形成于酸性成岩环境中, 同时可见微晶石英充填孔隙(图 6-e、图 6-f), 硅质胶结的 SiO_2 来源包括石英压溶作用及粘土矿物的成岩转化。

同时自生粘土矿物胶结在不同层位均有发育, 极大的破坏了储层的渗透性。粘土矿物包括高岭石、绿泥石、伊利石以及少量黄铁矿、硬石膏等。绿泥石在扫描电镜下一般呈叶片状附着于颗粒边缘(图 6-h); 高岭石扫描电镜下表现为假六边晶, 集合体一般呈蠕虫状、畴状, 形成于酸性成岩环境中(图 6-g); 伊利

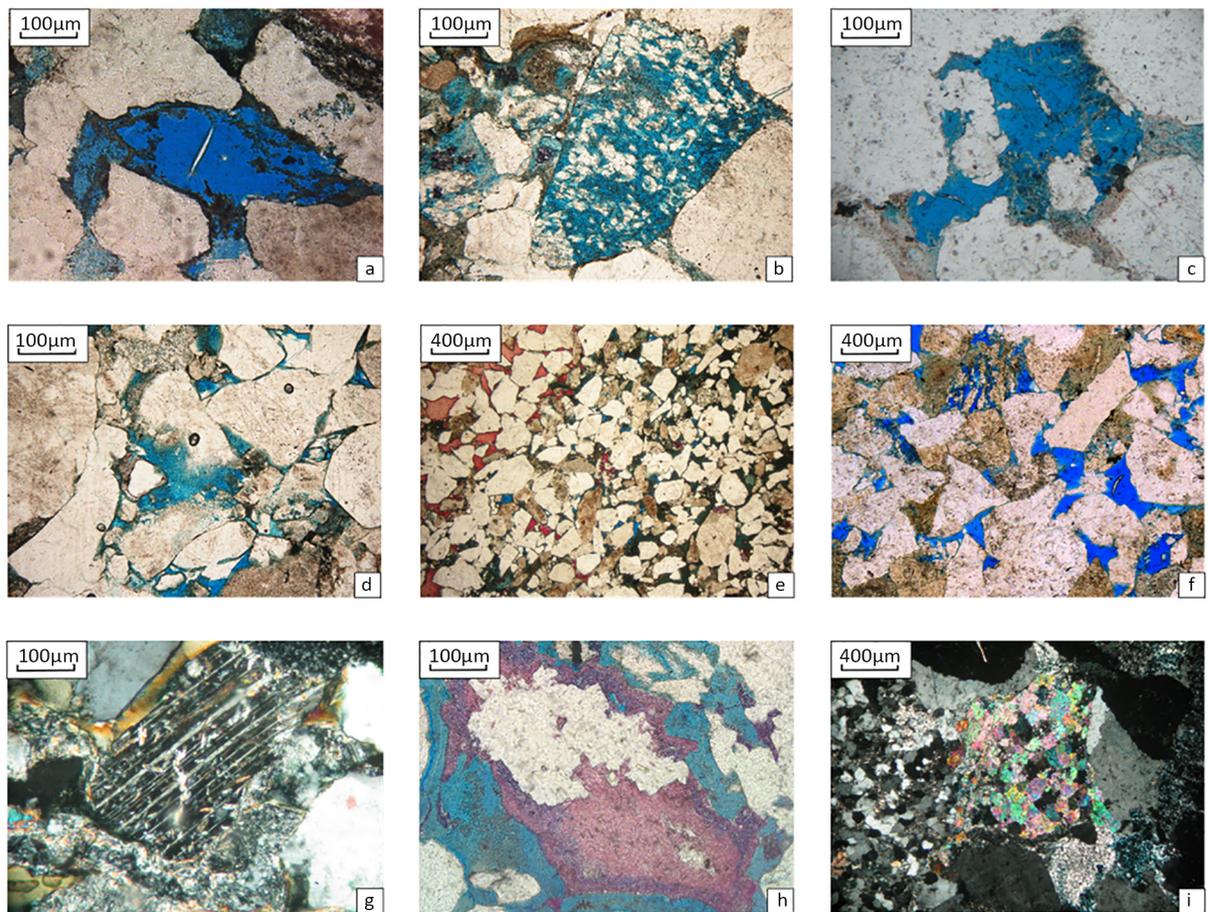
石胶结物呈发丝状、丝缕状，一般沿颗粒表面生长，极大的降低储层的渗透性(图 6-f)；黄铁矿主要在太原组储层中发育(图 6-i)，扫描电镜下呈正八面体产出，指示太原组储层已进入晚成岩阶段，其成因往往与有机质或烃类分布有关。

4.2.3. 溶蚀作用

溶蚀作用是本区最主要的建设性成岩作用，是改善储层致密性的关键，按照溶蚀对象的不同可分为矿物颗粒溶蚀和填隙物溶蚀 2 类：

1、矿物颗粒溶蚀

矿物颗粒的溶蚀主要包括长石、岩屑等易溶物质，也包括部分石英颗粒。其中研究区上石盒子组储集层富含长石、岩屑，易被溶蚀形成粒内溶孔，至太原组储集层以石英砂岩为主，可见石英颗粒的溶蚀现象，且溶蚀作用常沿石英颗粒边缘进行，最终形成粒间溶孔(图 7-a~图 7-c)。颗粒溶蚀作用增加了储集层孔隙体积，明显改善致密储层孔隙度。本区上、下石盒子组砂岩成分成熟度低，长石、岩屑含量高，粒内溶孔十分发育，属于中成岩 $A_1\sim A_2$ 期；太原组砂岩成分成熟度高，受碱性成岩环境影响[15] [16] [17] 发育少量石英粒内溶孔，属于中成岩 B 期至晚成岩阶段。



a、XE-323, 1679.86 m, 盒 6, 溶蚀铸模孔；b、XE-218, 1767.5 m, 盒 8 下, 长石粒内溶孔；c、XE-272, 1719.97 m, 太 2, 石英溶蚀孔；d、XE-218, 1697.3 m, 盒 6, 粒间溶孔；e、XE-218, 1671.7 m, 盒 6, 方解石胶结物部分被溶蚀；f、XE-327, 1311.81 m, 千 5, 粒间溶孔与粒内溶孔；g、XE-341, 1479.98 m, 盒 8, 斜长石绢云母化；h、XE-248, 1628.4 m, 盒 4, 方解石交代石英；i、XE-341, 1715.43 m, 太 2, 白云石交代变质岩岩屑

Figure 7. Thin-section photomicrographs of dissolution and metasomatism

图 7. 溶蚀作用与交代作用典型镜下特征

2、填隙物溶蚀

填隙物溶蚀包括碳酸盐、硅质等胶结物的溶蚀,以及粘土杂基的溶蚀。溶蚀强烈时镜下可见矿物颗粒边缘清晰,粒间杂基或胶结物基本不发育(图 7-d~图 7-f)。填隙物的溶蚀在本区太原组最为常见,中成岩 B 期至晚成岩阶段,有机质高成熟~过成熟,同时也是有机酸产生的高峰期[18],这部分酸性流体进入储层后溶解铁方解石、铁白云石等碳酸盐胶结物以及绿泥石等粘土矿物,沟通了残余原生孔隙及孤立粒内溶孔,对储集性能和疏导能力的改善起到了关键性作用。

4.2.4. 交代作用

研究区交代作用主要发育在下石盒子组与太原组,主要类型包括粘土矿物交代长石、碳酸盐交代碎屑颗粒等。其中粘土矿物主要为高岭石、伊利石、绢云母等。镜下可见粘土或碳酸盐矿物与被交代颗粒相互穿插,难以分辨(图 7-g~图 7-i)。交代作用往往与胶结作用相伴生出现,对孔渗保存不利,但单一的交代作用一般对储集性能影响不大。

4.3. 致密砂岩储层形成的主控因素

研究区上古生界致密砂岩储层受多种因素共同控制:1、沉积体系为大面积砂岩储层发育奠定基础。沉积体系宏观上控制了砂体大面积发育,纵向上相互叠置,同时微观上沉积作用控制了砂岩粒度、分选、磨圆、矿物含量等结构成熟度与成分成熟度,也为后期成岩作用改造奠定了基础;2、压实作用和胶结作用导致储层致密化,研究区最大古埋深介于 3500~4200 m 之间(早白垩世末期),强烈压实作用破坏了大部分原始孔隙,同时后期多种胶结物类型堵塞了粒间孔甚至次生孔,值得注意的是,也存在部分胶结作用比如早期绿泥石胶结、碳酸盐胶结等对孔隙的保存起到一定保护作用;3、溶蚀作用是优质储层形成的关键。通过研究发现,次生孔隙是研究区致密砂岩储层最重要的孔隙类型之一,通过薄片、X 衍射等岩石学特征分析,研究区砂岩含有较丰富的长石颗粒及多种岩浆岩岩屑、变质岩岩屑以及凝灰质岩屑等易溶组分,而太原组、本溪组海陆过度相煤系地层有机质以腐殖型为主,具有产生大量有机酸的条件,为上述不稳定矿物溶解提供了充分的酸性介质来源。因此,以成岩后期形成的各类次生溶孔(粒间溶孔、粒内溶孔、晶间孔)为主导,与残余原生孔共同组成研究区致密砂岩储层的储集空间。

5. 优质储集层形成与分布

近年来的勘探开发实践表明,XE 气田致密砂岩储集层纵向上层位分布多,平面上多层系叠合连片。不同层位储集层特征差异明显:例如研究区上石盒子组盒 2 段主要发育三角洲前缘分流河道、河口坝砂体,埋深较浅,是研究区最典型的优质储层之一:XE-259 井盒 2 段钻遇 8.4 m 浅灰色长石岩屑中砂岩,孔隙度 14.1%,渗透率 3.4 mD,镜下薄片显示残余原生孔十分发育,面孔率在 12%以上,该层经测试获得 $16.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流;研究区另一典型优质储层位于太原组太 2 段,主要发育潮汐水道、障壁砂坝砂体,埋深较深,溶蚀作用强烈,次生溶孔十分发育。如 XE-272 井太 2 段发育 10.4 m 浅灰色石英粗砂岩,孔隙度 10.3%,渗透率 0.34 mD,薄片观察显示石英溶蚀作用强烈(图 7-c),发育大量粒间溶孔,该层测试获得 $13.27 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流。

6. 结论

1) XE 气田上古生界上石盒子组、下石盒子组发育浅水三角洲沉积,砂岩岩性以长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩、长石砂岩为主,太原组发育障壁海岸潮坪沉积,砂岩长石、岩屑含量较低,以石英砂岩、岩屑石英砂岩为主。

2) 孔隙类型以残余原生孔、粒间溶孔、粒内溶孔、晶间孔为主,受岩性及成岩阶段控制,不同层位

储层的主要孔隙类型存在一定差异：上石盒子组以残余原生孔为主，下石盒子组以粒内溶孔为主，太原组以粒间溶孔为主。微观孔隙结构决定了储集层的渗流能力，通过多参数统计分析定量表征储集层孔喉结构，研究区储集层表现为渗透率与排驱压力呈负相关、与中值半径、最大孔隙半径呈正相关。

3) XE 气田致密砂岩储层的主控因素分析表明：浅水三角洲、障壁海岸潮坪等沉积环境为大面积储层发育奠定了基础，压实、胶结作用使得大部分储层致密化，同时后期溶蚀作用是改善致密储集层的关键，储层中长石、岩屑等不稳定矿物以及碳酸盐胶结物溶蚀，形成了各类次生溶孔，大幅改善了致密储层的储集性能。

基金项目

中国海洋石油总公司十三五重大项目《鄂尔多斯盆地东缘致密气成藏机理与控制因素分析》(CNOOC-KJ 135 ZDXM14 LTD 非常规分公司课题一)和国家科技重大专项(2016ZX05066)资助。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 丁晓琪, 张哨楠, 周文, 等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界致密砂岩储层特征及其成因探讨[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(4): 491-496.
- [3] 蒋凌志, 顾家裕, 郭彬程. 中国含油气盆地碎屑岩低渗透储层的特征及形成机理[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 13-18.
- [4] 席胜利, 李文厚, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地神木地区下二叠统太原组浅水三角洲沉积特征[J]. 古地理学报, 2009, 11(2): 187-194.
- [5] 杨华, 刘新社, 闫小雄. 鄂尔多斯盆地晚古生代以来构造-沉积演化与致密砂岩气成藏[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 174-183.
- [6] 唐海发, 彭仕宓, 赵彦超. 大牛地气田盒 2 + 3 段致密砂岩储层微观孔隙结构特征及其分类评价[J]. 矿物岩石, 2006, 26(3): 107-113.
- [7] 王伟力, 高海仁. 鄂尔多斯盆地中东部致密砂岩储层特征及控制因素[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(6): 71-77.
- [8] 郭书元, 张广权, 陈舒薇. 陆表海碎屑岩—碳酸盐岩混积层系沉积相研究——以鄂尔多斯东北部大牛地气田为例[J]. 古地理学报, 2009, 11(6): 611-617.
- [9] 谭晨曦, 李文厚, 张慧元, 等. 河流相致密砂岩储层成岩作用及其对储层的影响——以大牛地气田下石盒子组砂岩储层为例[J]. 矿物学报, 2011, 31(2): 211-220.
- [10] 张晓峰, 候明才, 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.
- [11] 张纪智, 陈世加, 肖艳, 等. 鄂尔多斯盆地华庆地区长 8 致密砂岩储层特征及其成因[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 679-684.
- [12] 李易隆, 贾爱林, 何东博. 致密砂岩有效储层形成的控制因素[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 71-82.
- [13] 罗静兰, 刘新社, 付晓燕, 等. 岩石学组成及其成岩演化过程对致密砂岩储集质量与产能的影响: 以鄂尔多斯盆地上古生界盒 8 天然气储层为例[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2014, 39(5): 537-545.
- [14] 朱国华, 寿建峰, 刘占国, 等. 中国主要含油气盆地碎屑岩储层图册[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012: 135-145.
- [15] 祝海华, 钟大康, 姚泾利, 等. 碱性环境成岩作用及对储集层孔隙的影响——以鄂尔多斯盆地长 7 段致密砂岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 51-59.
- [16] 李杪, 罗静兰, 赵会涛, 等. 不同岩性的成岩演化对致密砂岩储层储集性能的影响——以鄂尔多斯盆地东部上古生界盒 8 段天然气储层为例[J]. 西北石油大学学报(自然科学版), 2015, 45(1): 97-106.
- [17] 邱隆伟, 徐宁宁, 周涌沂, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地地区致密砂岩石英溶解作用及其对优质储集层的影响[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 38-44.
- [18] 帅燕华, 张水昌, 高阳, 等. 煤系有机质生气行为对储层致密化的可能影响及定量化评价[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(7): 1149-1155.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ag@hanspub.org