

鄂尔多斯盆地超低渗透储层形成的宏观地质因素分析

于红岩^{1,2}, 李洪奇^{1,2}, 党娜¹, 于晓禾^{1,2}

1. 中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院, 北京 102249
2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

摘要 鄂尔多斯盆地由于特殊的构造特征和沉积背景形成了大面积的低渗透储层。根据扫描电镜、铸体薄片、岩心观察、物性分析、岩心分析化验等资料总结分析了鄂尔多斯盆地 X 油田长 6₃ 超低渗透储层的微观特征, 分析得出超低渗透储层主要受沉积和成岩作用影响。研究区岩性偏细, 以细砂岩为主; 填隙物含量高; 储集空间主要以剩余原生粒间孔与溶蚀孔隙为主。从物性角度来看, 储层主要属于低孔、特低孔、超低孔-超低渗透储层, 以小孔细喉型为主。储层微观特征主要受宏观地质因素控制。沉积作用控制着储层的岩性和填隙物的含量, 决定着原生孔隙的大小。成岩作用的压实作用与胶结作用破坏了原生孔隙, 溶蚀作用提供了大比例的次生孔隙, 改善了研究区的储集空间。

关键词 超低渗透; 储层特征; 沉积作用; 成岩作用

中图分类号 P56

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.09.005

Macro Geology Factor Analysis of Ultra Low Permeability Reservoir Formation in Ordos Basin

YU Hongyan^{1,2}, LI Hongqi^{1,2}, DANG Na¹, YU Xiaohe^{1,2}

1. College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract Due to the special structures and the depositional setting of Ordos Basin, a large scale low-permeability reservoir is formed there. Based on the studies of scanning electron microscope, casting sheet image, core observation, physical property analysis and core analysis testing, the microscopic features of the ultra low permeability reservoir in Ordos Basin X area Chang6₃ are analyzed. It is shown that the ultra low permeability reservoir is controlled by deposition and diagenesis. The area has few slender rock, and is mainly covered with sandstone, and high interstitial materials. Remaining primary intergranular pores and dissolution pores serve chiefly as the storage space. As far as its physical properties are concerned, the reservoir belongs to a low porosity-extra low porosity-ultra low porosity-ultra permeability reservoir; the reservoir is mainly in the fine pore narrow throat mode. The reservoir microscopic features are controlled by macro geological factors. The deposition decides the reservoir's lithology, interstitial content and sizes of primary pores. The compaction and the cementation of diagenesis destroy primary pores, but the denudation provides a wide range of secondary pores, which improve the storage space of the research area.

Keywords ultra low permeability; reservoir characteristics; sedimentation; diagenesis

0 引言

世界石油紧缺带动着油气田勘探开发向低、深、难发展, 低渗透、低电阻率、火山岩、碳酸盐岩等复杂疑难储层早已被

列入重要的勘探领域, 早期认为没有勘探价值的低渗透储层也由于几次的试油试采成功而被地质学家们认可。在国内, 一般把渗透率小于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层称为低渗透储层, 小于

收稿日期: 2012-02-14; 修回日期: 2012-03-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2009AA062802)

作者简介: 于红岩, 博士研究生, 研究方向为测井资料处理与解释, 电子信箱: hongyan-yu@163.com; 李洪奇(通讯作者), 教授, 研究方向为数据挖掘、测井复杂储层评价、测井地质学, 电子信箱 hg.li@cup.edu.cn

$10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层称为特低渗透储层, 而超低渗透储层是低渗透储层中渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的部分^[1]。

1907 年发现的延长油矿特低渗透油藏是中国最早发现的低渗透油藏; 1991 年中国已经发现了近百个低渗透油藏; 1992 年, 在西安国际会议上, 对低渗透储层得到了比较一致的认识; 2004 年中国新增的低渗透油藏的储量占新增油藏储量的一半。由于超低渗透储层的渗透率很低, 为了有效寻找优质储层的分布, 针对其成因机理进行分析具有重要的理论和现实意义。

目前国内外针对低渗透储层, 乃至超低渗透储层研究已经取得了一定成果。张立强等^[2]针对羌塘地区低渗透储层进行研究, 从沉积的角度分析了其成因并对其有利储层进行了预测; 高辉等^[3]从多方面探索得到了安塞油田特低渗透的成因。前人没有针对宏观地质因素对低渗透储层微观特征的控制进行系统的总结, 本文以鄂尔多斯盆地 X 油田为例, 从宏观控制因素分析超低渗透储层的成因。

1 地质背景

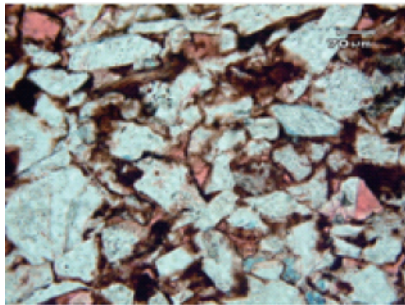
鄂尔多斯盆地的三叠系是一个南北向的矩形盆地。整个盆地西翼较窄东翼宽缓, 根据地质、构造等特征, 可将盆地划

分为伊盟隆起、渭北隆起、晋西挠褶带、伊陕斜坡、天环坳陷及西缘逆冲带 6 个二级构造单元, 其中伊陕斜坡是主力产区。X 油田位于鄂尔多斯盆地中南部, 构造隶属于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡。研究区属于典型的黄土塬地貌, 区内地形比较复杂。研究区的延长组主要以三角洲沉积为主, 属于岩性油藏, 具备高丰度、大厚度的生油岩, 为形成多油层复合发育区提供了良好的基础。

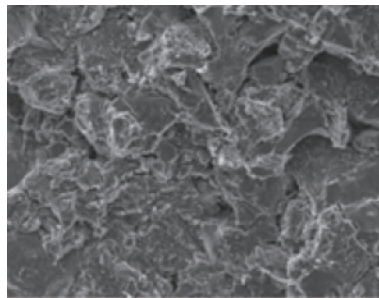
2 储层特征

2.1 岩性特征

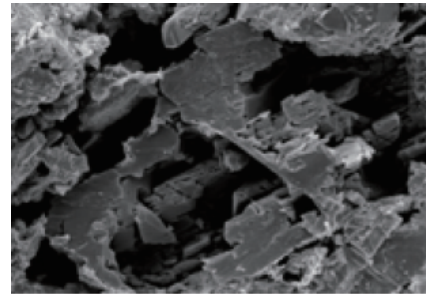
研究区长 6₃ 油层组主要由陆源碎屑岩组成, 其中包括灰绿色细砂岩、粉砂岩, 深灰色泥质粉砂岩, 黑色泥岩和碳质泥岩等; 砂岩粒度普遍较细, 以细砂岩为主; 砂岩颜色以灰绿色、浅灰色、浅灰白色为主, 含油较好为深灰褐色。岩石类型主要以岩屑长石砂岩和长石砂岩为主, 还有少量的长石岩屑砂岩。储层砂岩中长石、石英和岩屑的含量占主导地位, 石英含量占碎屑组分的 26%—35%, 长石含量为 32.5%—52.5%, 岩屑含量为 15%—28%, 成分成熟度偏低。填隙物类型以伊利石、碳酸盐、绿泥石、硅质为主, 其中伊利石和碳酸盐含量较高, 绿泥石膜发育普遍, 见图 1(a)。伊利石是研究区长 6₃ 储层



(a) 薄的绿泥石膜及粒间孔
(a) Fine chlorite membrane and intergranular pore



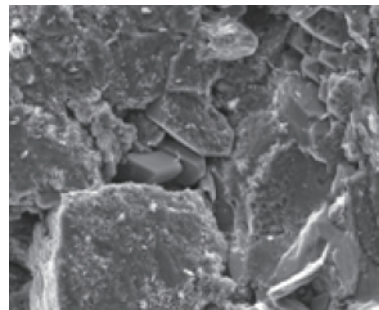
(b) 粒间孔溶孔发育
(b) Developed intergranular pores and dissolved pore



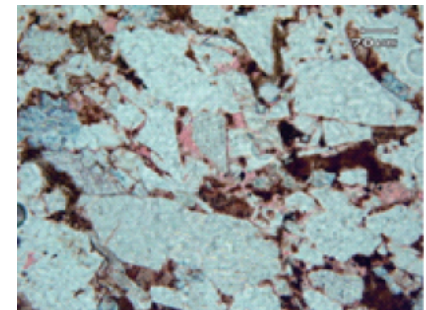
(c) 长石粒内溶蚀孔隙
(c) Feldspar intergranular dissolved porosity



(d) 颗粒间线状紧密接触, 方解石、铁白云石充填孔隙
(d) Intergranular striation in close contact, ferroan calcite and ferroan dolomite fill pore



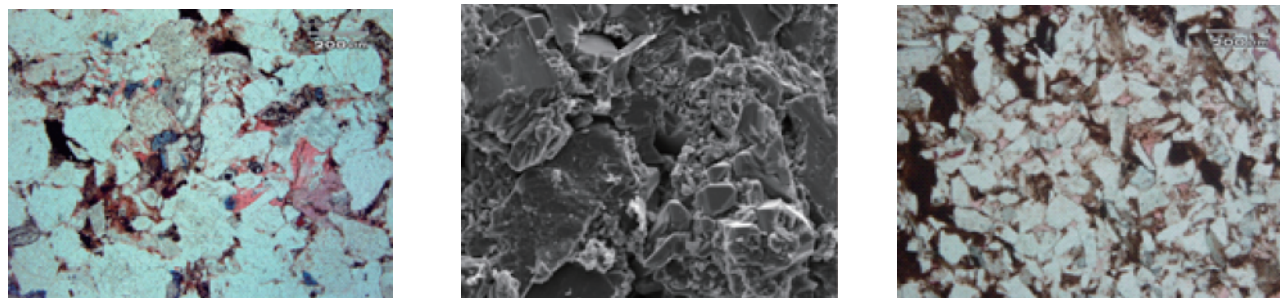
(e) 粒间及粒表分布叶片状绿泥石及丝缕状伊利石, 见石英次生加大
(e) Foliaceous chlorite and filamentary goeschwitzite distribute in intergranular and granule phase; The quartz secondary enlargement



(f) 粒间孔、长石溶孔, 绿泥石呈分散状及绒球状
(f) Intergranular pore, feldspar dissolved porosity, chlorite in disperse state and bobbles state

图 1 研究区长 6₃ 储层微观照片

Fig. 1 Micrographs of Chang 6₃ sandstone reservoir in research area



(g) 石英加大普遍,铁白云石沿白云岩屑生长
(g) Quartz enlarges generally, ferroan dolomite grows along dolomite debris
(h) 自生石英充填残余孔隙喉连通形态
(h) Autogeny quartz fills residual pore
(i) 粒间孔发育
(i) Developed intergranular pore

图 1 研究区长 6₃ 储层微观照片 (续)

Fig. 1 Micrographs of Chang 6₃ sandstone reservoir in research area (continued)

中含量较高的填隙物,常常以片状或丝状充填孔隙,有的呈孔隙桥接的形式出现。绿泥石在长 6₃ 储层中发育多种产状,主要是孔隙衬垫和孔隙充填,储层中大多数黑云母也发生了绿泥石化。碳酸盐大部分为晚期胶结的铁方解石和铁白云石,呈次生加大和连晶状产出。储层分选性为中偏好,磨圆度多为次棱角状,颗粒之间以线、点-线接触为主。支撑方式多为颗粒支撑,胶结类型以孔隙式胶结为主。

2.2 储集空间特征

研究区长 6₃ 油层组发育粒间孔隙、溶蚀孔隙、微孔隙和微裂缝,其中以粒间孔隙与溶蚀孔隙为主,而微孔隙在研究区只占总孔隙的 0.33%,因此没有对研究区储集空间的改进做出贡献。孔隙组合类型主要为粒间孔、粒间孔-溶孔和溶孔-粒间孔,整个地区面孔率普遍较低,平均为 2.74%。

粒间孔隙主要是一部分在压实作用破坏后没有发生胶

结作用的原生粒间孔和一部分被绿泥石粘土衬边包围或半包围的碎屑颗粒之间的原生粒间孔,平均孔径在 21.75μm 左右,占总孔隙 49.81%,见图 1(a)、1(b)、1(i)。

溶蚀孔隙主要以长石溶孔为主,其次是岩屑溶孔,同时也少量发育碳酸盐溶孔、杂基溶孔等。骨架颗粒中的长石、云母、碳酸盐岩屑以及含有铝硅酸矿物的岩屑被不同程度溶蚀后在粒内形成大小不等、形貌各异的孔隙,占总孔隙 43.12%,见图 1(c)。

2.3 物性与孔隙结构特征

由图 2 可以看出,研究区的排驱压力都比较大,而且孔隙喉结构比较差。统计得到研究区的排驱压力主要在 0.6—2.1MPa 区间,平均值为 1.97MPa;中值压力主要在 4.4—5.4MPa 区间,平均值为 5MPa;分选系数在区间 1.3—1.8 分布,平均值为 1.39。排驱压力较高,喉道偏细,分选好,孔隙组

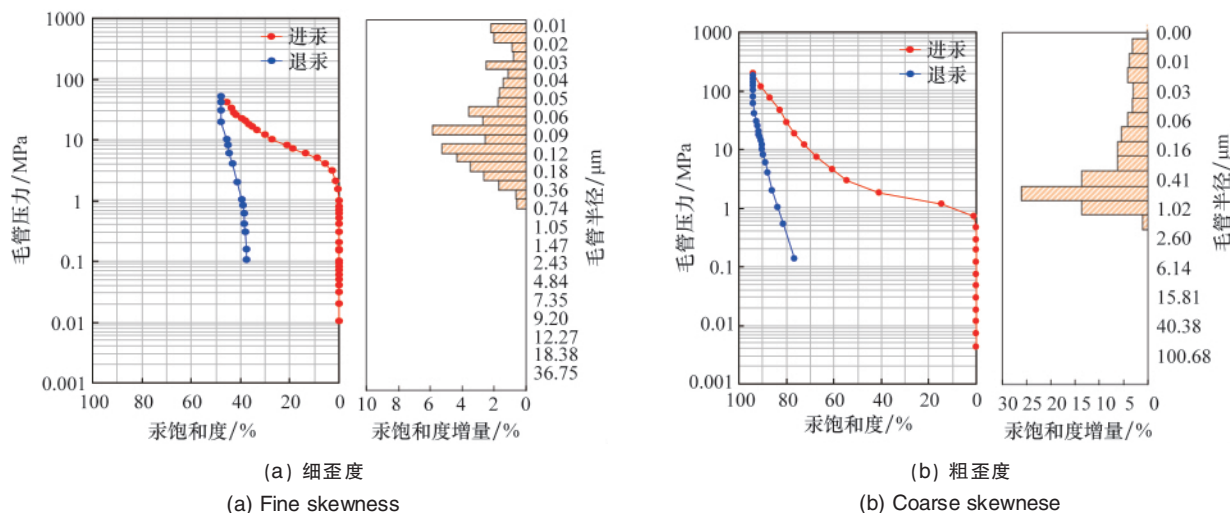


图 2 毛管压力曲线及孔隙分布直方图

Fig. 2 Capillary pressure curve and pore throat distribution histogram

合类型以小孔细喉型为主。

由图 3 可以看出,孔隙度主要集中在 10%—15% 的区间

内,平均值为 9.36%;渗透率主要集中在小于 0.1×10⁻³μm² 的区间内,其次是 0.1×10⁻³—0.2×10⁻³μm² 区间内,平均值为

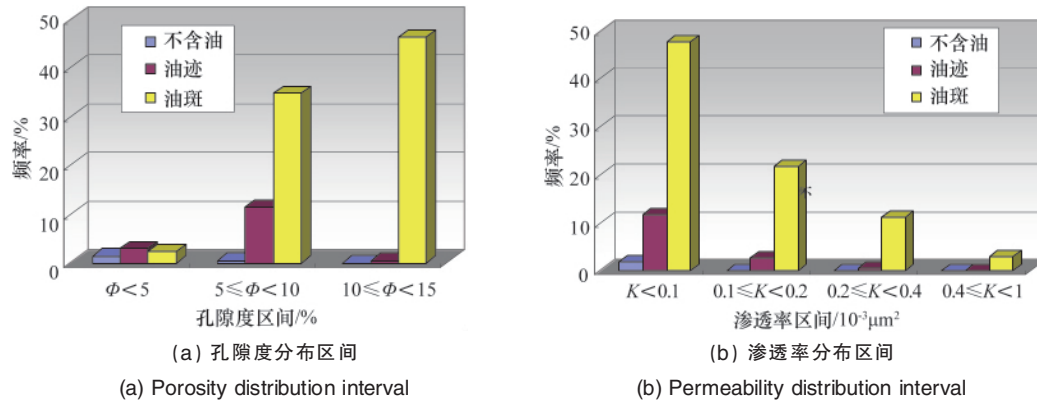


图3 储层物性分布区间

Fig. 3 Physical properties interval in reservoir

$0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 属于低孔特低孔超低孔-超低渗透储层。

3 宏观控制因素

沉积环境、沉积相带和成岩作用等宏观地质因素控制着储层的岩性、物性、孔隙类型、结构、矿物成分、压实等特征,从而控制着超低渗透储层的形成与分布^[4-5]。

3.1 沉积特征

沉积环境和沉积相决定着沉积地层的岩石类型、岩石结构及纵横向的组合,决定着生、储、盖的发育和分布;不同的沉积环境对应不同的砂岩粒度组成,导致了不同的物性特征^[6-7]。研究区长6油层组在盆地演化过程中是沉积物充填高峰期之一,无论是盆地东北的曲流河三角洲沉积,或者是盆地西南的辫状河三角洲沉积,均为强进积建设期,自下而上可以分为长6₃、长6₂、长6₁3个沉积旋回,每个旋回由砂岩、粉砂岩以及泥岩组成。研究区北部为东北沉积体系向南的延伸部分,沉积亚相从三角洲前缘过渡到滨浅湖,微相从水下分支河道、支流间湾和席状砂演化为半深湖泥和深湖泥,弱水动力的低能沉积环境导致研究区岩性以细、粉砂岩为主,泥质含量高,黏土沉积多^[8-9]。从薄片分析数据可以清晰得到这些特征。泥质团块状分布形式对储层的孔喉结构进行改造,使喉直径变小、孔隙度降低而形成差的孔喉结构,导致研究区储层呈现低孔超低渗透特征。

3.2 成岩特征

成岩作用阶段相对沉积作用阶段是漫长而复杂的,一系列复杂交错的物理、化学变化对砂岩储层进行改造,主要表现为压实作用和胶结作用减小和破坏储层孔隙,溶蚀作用增加储层次生孔隙^[10-12]。因此成岩作用对储层的物性以及孔隙结构起着至关重要的作用^[2]。

3.2.1 压实作用

经统计计算得到研究区长6₃储层属于中等压实。压实作用在研究区主要造成了两种结果。对早期绿泥石膜发育比较完全的细砂岩,机械压实作用强度相对较弱,碎屑颗粒间多呈点-线状接触,为储层保存了大量的残余粒间孔隙。而对于

绿泥石薄膜不发育而云母、塑性岩屑及泥质杂基含量较高的砂岩,机械压实作用强烈,碎屑颗粒间紧密接触,以线状接触为主,塑性岩屑和黑云母碎屑发生强烈的假杂基化,导致砂岩的原生孔隙大量消失。所以压实作用是造成研究区超低渗透的主要控制因素之一。

3.2.2 胶结作用

(1) 硅质胶结

硅质胶结物在研究区普遍分布,平均含量为1.3%左右。由于研究区长6₃储层岩石成熟度低,所以硅质胶结物相对含量较少。硅质胶结物主要来源于石英压溶作用,但是从薄片分析得出,研究区压溶作用很少发生,无法为硅质胶结物生成提供有利条件;研究区蒙脱石发育较少,因此在向伊利石转化过程中可提供的SiO₂相对就较少,同样就没有SiO₂的生成,这又阻止了硅质胶结物的生成^[13-14]。硅质以石英次生加大边和呈自形石英晶体充填孔隙。图1(e)、1(g)、1(h)所示特征普遍存在。这两种形式都对储层孔隙大小以及结构起到了破坏作用,也是研究区低孔超低渗透的主要控制因素之一。

(2) 碳酸盐胶结

碳酸盐胶结物在鄂尔多斯盆地中生界碎屑岩储层中广泛分布,研究区长6₃储层砂岩中的碳酸盐胶结物含量较高(4.39%),占胶结物总量的21.87%。碳酸盐胶结物主要呈粒间胶结物、交代物或次生孔隙内填充物形式出现。常见微晶状、晶粒状或连晶状产出,成分上主要以铁方解石、铁白云石为主,伴有少量的方解石、白云石,见图1(d)、1(g)。胶结作用严重破坏了储层的粒间孔隙。多期碳酸盐胶结的发育是导致储层物性变差的重要原因,但早期的胶结作用又有力抗拒了压实作用对储层的影响,同时也对晚期的溶蚀作用产生次生孔隙提供了易溶物质。这也是研究区主要储集空间的来源。

(3) 黏土矿物胶结作用

研究区黏土矿物主要包括绿泥石、伊利石、伊/蒙混层,其中以伊利石、绿泥石胶结作用最强,见图1(a)、1(e)、1(f)。伊利石多存在于孔隙壁和喉道壁,呈蜂窝状、薄膜状或充填孔隙,在喉道桥接处堵塞喉道,伊利石生长对孔隙性和渗透性

影响极大,是储层超低渗透的一个重要原因。绿泥石是整个延长组地层普遍发育的一种成岩产物。研究区长 6_3 储层中通常发育早期的孔隙衬垫和晚期孔隙充填两种产出状态的绿泥石,孔隙衬垫在颗粒表面形成黏土包壳,是最主要的赋存状态。同时绿泥石膜在研究区也普遍存在,后期的黏土矿物胶结作用是填充大部分孔隙,所以黏土矿物胶结作用是造成研究区超低渗透的主要控制因素之一。

3.2.3 溶蚀作用

研究区的溶蚀作用表现为石英和长石的溶蚀,其中最主要的是长石溶蚀产生的次生孔隙,见图1(c)。研究区长 6_3 砂层组共发生两期溶蚀作用,前期溶蚀作用发生在胶结作用之前,长石岩屑溶孔被随之而来的胶结作用填充,并没有保存下来;后期的溶蚀作用发生在胶结作用之后,烃源岩中的有机酸对长石、岩屑等铝硅酸盐矿物以及碳酸盐胶结物起到很强的溶蚀作用^[15-16]。这期溶蚀作用形成的次生孔隙大部分得以保存,尤其是长石溶孔,成为研究区主要的油气储集空间。

4 结论

(1) 研究区长 6_3 超低渗透储层的形成和分布宏观上主要受沉积环境、沉积相带、压实作用、胶结作用、溶蚀作用等地质因素的控制。沉积特征决定着地层的岩石类型、岩石组构。研究区岩石成分成熟度低,填隙物以黏土矿物和碳酸盐岩为主。

(2) 较强的压实作用破坏了研究区大量原生粒间孔隙,但是后期溶蚀作用的改造提供了大量的次生孔隙,尤其是长石溶孔,改变了研究区储集空间的类型。

(3) 泥质团块状分布改变了储层的孔喉结构,压实作用使塑性岩屑假杂基化,胶结作用充填孔隙,均是导致研究区储层呈现低孔、特低孔、超低孔-超低渗透特征的内在因素。

参考文献 (References)

- [1] 曾大乾,李淑贞.中国低渗透砂岩储层类型及地质特征[J].石油学报,1994,15(1):38-46.
Zeng Daqian, Li Shuzhen. *Acta Petrolei Sinica*, 1994, 15(1): 38-46.
 - [2] 张立强,纪友亮.羌塘盆地侏罗系低渗透砂岩储层成因分类及有利储层预测[J].中国石油大学学报:自然科学版,2001,25(5):6-11.
Zhang Liqiang, Ji Youliang. *Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition*, 2001, 25(5): 6-11.
 - [3] 高辉,宋广寿,孙卫,等.储层特低渗透成因分析与评价——以安塞油田沿25区块为例[J].地球科学进展,2007,22(11):1134-1140
Gao Hui, Song Guangshou, Sun Wei, et al. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(11): 1134-1140.
 - [4] 冯娟萍,李文厚,欧阳征健,等.陕北青化砭油田长2砂岩储层物性的控制因素[J].吉林大学学报:地球科学版,2008,38(3):17-23.
Feng Juanping, Li Wenhui, Ouyang Zhengjian, et al. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2008, 38(3): 17-23.
 - [5] 付国民,李鑫,梁志录,等.油层砂岩成岩作用及其对储层性质的影响[J].西安科技大学学报,2007,27(3):377-381.
Fu Guomin, Li Xin, Liang Zhilun, et al. *Journal of Xi'an University of*
- [6] Yang X, Zhao W, Zou C, et al. Origin of low-permeability reservoir and distribution of favorable reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(4): 57-61.
 - [7] 宋子齐,王静,路向伟,等.特低渗透油气藏成岩储集相的定量评价方法[J].油气地质与采收率,2006,13(2):21-23.
Song Ziqi, Wang Jing, Lu Xiangwei, et al. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2006, 13(2): 21-23.
 - [8] 郝世彦,李旦.志丹油田义正区三叠系延长组长6石油地质特征[J].西北地质,2005,38(4):94-110.
Hao Shiyan, Li Dan. *Northwestern Geology*, 2005, 38(4): 94-110.
 - [9] 宋凯,吕剑文,杜金良,等.鄂尔多斯盆地中部上三叠统延长组物源方向分析与三角洲沉积体系[J].古地理学报,2002,4(3):59-65.
Song Kai, Lu Jianwen, Du Jinliang, et al. *Journal of Palaeogeography*, 2002, 4(3): 59-65.
 - [10] 张金亮,林辉,司学强,等.鄂尔多斯盆地王窑地区块上三叠统长6油层成岩作用研究[J].中国海洋大学学报,2004,34(4):625-635.
Zhang Jinliang, Lin Hui, Si Xueqiang, et al. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(4): 625-635.
 - [11] Salem A M, Morad S, Mato L F, et al. Diagenesis and reservoir quality Evolution of fluvial sandstones during progressive burial and uplift: Evidence from the Upper Jurassic Boipeba Member, Reconcavo Basin, Northeast Brazil[J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(7): 1015-1040.
 - [12] 高剑波,庞雄奇,王志欣,等.鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组碎屑岩储层低渗特征及含油性主控因素[J].中国石油大学学报:自然科学版,2007,31(1):5-12.
Gao Jianbo, Pang Xiongqi, Wang Zhixin, et al. *Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition*, 2007, 31(1): 5-12.
 - [13] 赵虹,党犇,党永潮,等.安塞油田延长组储集层特征及物性影响因素分析[J].地球科学与环境学报,2005,27(4):45-48.
Zhao Hong, Dang Ben, Dang Yongchao, et al. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2005, 27(4): 45-48.
 - [14] Houseknecht D W. Assessing the relative importance of compaction process sand cementation to reduction of porosity in sandstones [J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 71(6): 633-642.
 - [15] Beard D C, Weyl P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand[J]. *AAPG Bulletin*, 1973, 5(2): 349-369.
 - [16] 李红,柳益群,刘林玉.鄂尔多斯盆地西峰油田延长组长81低渗透储层成岩作用[J].石油与天然气地质,2006,27(2):209-217.
Li Hong, Liu Yiqun, Liu Linyu. *Oil and Gas Geology*, 2006, 27(2): 209-217.

(责任编辑 马宇红,代丽)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。