

# 马家山—小涧子油田砂岩成岩作用 及其对储层的影响

杨仁超<sup>1</sup> 樊爱萍<sup>1,2</sup> 韩作振<sup>1</sup> 柳益群<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学地质科学与工程系, 山东 青岛 266510; 2. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069)

**摘要:** 为了揭示鄂尔多斯盆地马家山—小涧子油田砂岩成岩作用对储层的控制作用, 综合采用了薄片鉴定、铸体薄片、压汞、扫描电镜、X-射线衍射和包裹体分析等多种方法。研究认为: 该区延长组长  $6_1$ 、长 4+5 段砂岩成岩作用进入了中成岩阶段的 A 期; 成岩相的平面分布具有明显的规律性, 由水下分流河道砂体及河口砂坝中心向边缘, 直至水下分流间湾, 依次发育溶蚀孔隙相、绿泥石胶结相、碳酸盐胶结相及压实杂基相 4 种成岩相类型; 储层物性依次变差; 有利的储集相带为水下分流河道砂体和河口砂坝中心的溶蚀孔隙相和绿泥石胶结相。

**关键词:** 鄂尔多斯盆地; 延长组; 砂岩储层; 成岩作用; 成岩相

**中图分类号:** P588.21      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2007)02-0283-06

马家山—小涧子油田位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡的西部, 北至马家山、南至罗卜塬、西至沙腰峁、东至王洼子, 面积约  $2.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。其勘探目的层系主要为上三叠统长 4+5 和长 6 油层组, 进一步细分为长  $4+5_1$ 、长  $4+5_2$ 、长  $6_1$  油层段 3 个小层, 埋深 1 800~2 450 m。储集体主要是三角洲前缘水下分流河道及河口坝砂体, 砂体总体呈东厚西薄的特点。长  $6_1$  沉积时期, 湖平面下降, 三角洲沉积占主导地位, 砂岩厚度最大。长  $4+5_2$  沉积期, 湖平面有所上升, 三角洲沉积体系向后退缩, 砂体平均厚度最小。长  $4+5_1$  沉积期, 湖平面又有所下降, 砂体发育较好。

针对鄂尔多斯盆地西缘油气储层沉积相及成岩作用的研究已有很多<sup>[1-9]</sup>, 但就成岩阶段、成岩相及其对储层的控制、储层预测等关键问题, 尚未取得统一认识。笔者以马家山—小涧子地区延长组长  $6_1$ 、长 4+5 段为目的层, 在 60 余口井岩心描述的基础上, 通过薄片鉴定、铸体薄片、扫描电镜、X-射线衍射和包裹体分析等方法, 对储集层成岩作用、成岩相及孔隙演化进行分析和研究, 旨在揭示该区砂岩储层的物性演化规律; 结合砂体平面展布, 对储层进行综合评价和有利区带预测, 为油气勘探开发提供依据。

## 1 成岩程度的确定

中国石油行业一般将成岩阶段划分为同生期、早成岩

期、中成岩期、晚成岩期和表生成岩期。依据古温度、粘土矿物组合及序列、有机质成熟度、岩石结构及孔隙特征等成岩阶段划分的标志, 对本区长 4+5、长  $6_1$  储层成岩阶段的划分进行了详细研究。

### 1.1 流体包裹体

流体包裹体测温是确定成岩古温度的最有效的方法之一<sup>[10]</sup>。流体包裹体测温实验在莱卡 THMSJ600 冷热台测温系统上完成, 根据室温下包裹体的成分和相态, 将与成岩作用有关的流体包裹体划分为盐水溶液包裹体、 $\text{CO}_2$  包裹体和烃类包裹体 3 类。

盐水溶液包裹体在本区发育丰富, 它的个体通常不大, 一般  $2\sim 4 \mu\text{m}$ ; 形态各异, 有椭圆形、长条形和不规则状等形状; 颜色则以浅色为主, 无色或淡黄色; 在石英裂隙和加大边中都有产出。

$\text{CO}_2$  包裹体主要呈三相产出, 由  $\text{CO}_2$  气体、液态  $\text{CO}_2$ 、盐水溶液组成。这类包裹体数量较少, 不足包裹体总量的 5%, 个体明显大于盐水溶液包裹体, 一般大于  $5 \mu\text{m}$ ; 包裹体轮廓以负晶形为主; 主要沿石英边部或颗粒内部发育。

本区发育的液态烃包裹体数量较少, 个体较大; 透射光下颜色以淡褐色、褐色为主, 荧光激发下, 发黄绿色; 主要分布在石英加大边和微裂隙中。

研究区砂岩中盐水溶液包裹体分布最为广泛, 在成岩

收稿日期: 2006-09-19; 改回日期: 2006-10-19

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2003CB214603)资助

作者简介: 杨仁超, 男, 1976 年生, 博士生, 讲师, 从事沉积学研究; E-mail: rc\_yang@sina.com。

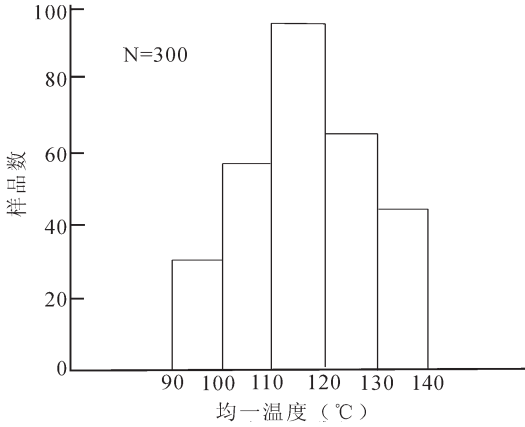


图 1 流体包裹体均一温度分布直方图

Fig.1 Homogenization temperature distribution of fluid inclusions

早、中阶段矿物中均有产出;而烃类包裹体则是中成岩阶段的产物<sup>[9]</sup>。研究区与液态烃伴生的盐水溶液包裹体均一温度分布范围为 90~140°C,主体为 110~120°C(图 1)。

1.2 粘土矿物组合

X 射线衍射分析表明(表 1), 本区粘土矿物以绿泥石(8%~43%,平均 26.9%)、高岭石(16%~52%,平均 30.5%)为主,伊/蒙混层(4%~43%,平均 22.8%)次之,伊利石(12%~29%,平均 19.8%)最少。伊/蒙混层比全部在 20%以下,说明成岩作用已达到中期阶段。

1.3 镜质体反射率与岩石结构

经实验测定,本区延长组长 6<sub>1</sub>、长 4+5 段有机质镜质体反射率 R<sub>o</sub> 为 0.71%~1.05%,表明有机质演化处于低成熟-成熟阶段。岩石类型主要为岩屑长石砂岩、长石岩屑砂岩和长

石砂岩,少量岩屑石英砂岩,孔隙式胶结,碎屑颗粒接触紧密,多以线接触为主,可见缝合线状接触。孔隙类型以次生孔隙为主,原生孔隙保留很少,长石、岩屑的溶蚀现象较为普遍,含铁方解石、铁方解石等较晚的成岩矿物未见溶解。

根据上述研究,按照中国石油天然气行业碎屑岩成岩阶段划分标准(SY/T5477-2003),将马家山—小涧子油田主要储集层延长组长 6<sub>1</sub>、长 4+5 段砂岩成岩阶段确定为中成岩 A 期。

2 成岩作用对储层的影响

沉积物在进入埋藏成岩环境之后,不同的成岩作用类型及不同的成岩作用强度对储集层的储集性能起着决定性的作用<sup>[11-14]</sup>。压实作用对本区砂岩原生孔隙的破坏十分明显;溶解作用则对砂岩储层物性的改善起着至关重要的作用;而胶结作用往往具有双重性质。

2.1 压实作用

机械压实作用主要发生于成岩作用早期,对埋深较浅的地层作用较明显,可造成砂岩原始孔隙的大量丧失。机械压实作用在本区主要表现为:(1)长石、石英等刚性颗粒发生破裂(图 2-A);(2)云母、泥岩等塑性岩屑颗粒发生弯曲、变形或被刚性碎屑插入;(3)碎屑颗粒接触更加紧密,由点接触到线接触,直至凹凸接触。

2.2 胶结作用

2.2.1 早成岩期绿泥石或伊/蒙混层胶结

早成岩期本区发育的岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩随埋深增加发生水化水解作用,形成自生蒙脱石。水化水解作用产生的 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>等离子使孔隙水质体的 pH 值高于 7,随着埋藏深度的增加,地层温度逐渐升高,碎屑岩中的蒙脱石逐渐脱去层间水,晶格重新排列,形成自生伊利石/蒙脱石混层<sup>[15]</sup>

表 1 X 射线衍射粘土矿物含量分析(%)

Table 1 XRD analysis of the content of clay minerals

样品号	井深(m)	层位	高岭石(K)	绿泥石(Ch)	伊利石(I)	伊/蒙混层(I/S)	间层比(S%)
胡 146-1	2147.5	长 4+5 <sub>1</sub>	30	44	14	12	<20
元 67-6	2273.4	长 4+5 <sub>2</sub>	23	20	23	34	<20
元 74-6	2213.5	长 4+5 <sub>2</sub>	34	33	20	13	<20
元 120-1	2257.8	长 6 <sub>1</sub>	28	28	22	22	<20
元 29-2	2179.2	长 4+5 <sub>2</sub>	29	23	20	28	<20
元 68-3	2215.5	长 4+5 <sub>2</sub>	12	16	29	43	<20
元 228-7	1825.5	长 4+5 <sub>1</sub>	24	35	15	26	<20
耿 34-15	1942.8	长 4+5 <sub>2</sub>	17	52	15	16	<20
耿 35-6	1824.8	长 4+5 <sub>2</sub>	8	39	27	26	<20
耿 113-1	2260.8	长 4+5 <sub>2</sub>	34	25	12	29	<20
耿 116-4	2372.2	长 4+5 <sub>2</sub>	39	43	14	4	<20
耿 117-1	2212.4	长 4+5 <sub>1</sub>	18	16	27	39	<20
耿 131-1	2385.4	长 4+5 <sub>2</sub>	37	24	22	17	<20
耿 33-1	2259.3	长 6 <sub>1</sub>	16	34	21	29	<20
耿 128-9	2282.6	长 6 <sub>1</sub>	38	25	14	23	<20
耿 130-6	2523.5	长 6 <sub>1</sub>	43	31	22	4	<20

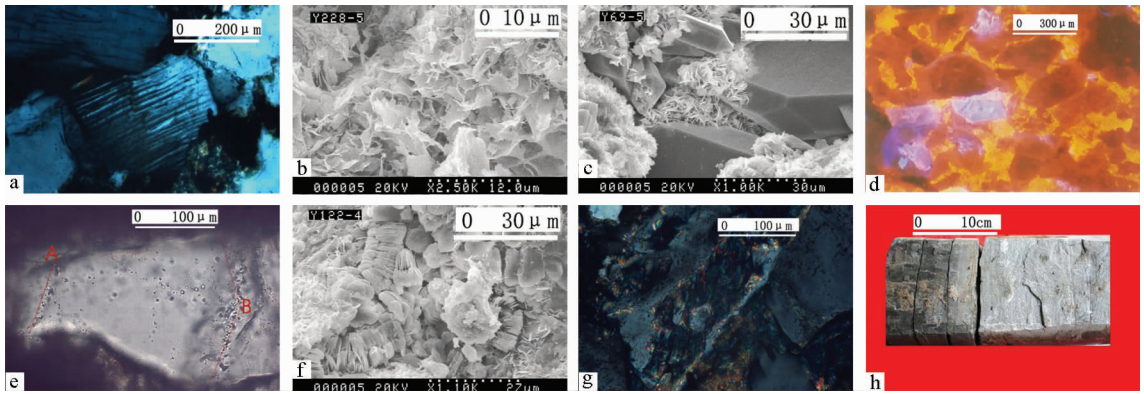


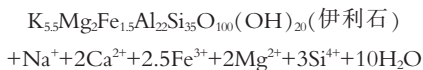
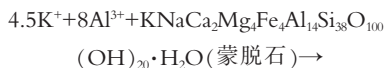
图 2 研究区储集砂岩成岩作用

A—元 74 井斜长石双晶断裂, 正交偏光, 2200.1m; B—元 228 井伊/蒙混层, 扫描电镜, 1824.5m; C—元 69 井绿泥石薄膜与自生石英, 扫描电镜, 2197.5m; D—元 69 井方解石, 阴极光, 2199.3m; E—耿 115 井石英加大边、次生盐水包裹体, 单偏光, 2225.1m; F—元 122 井自生高岭石, 扫描电镜, 2197.5m; G—元 74 井长石被方解石交代, 正交偏光, 2215.2m; H—元 29 井高角度裂缝及油斑含油, 2179.2~2179.4m

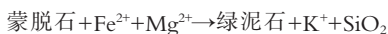
Fig.2 Diagenesis of sandstone reservoirs in the study area

A—Twin fracture of plagioclase, crossed polarized light, 2200.1 m, well Yuan74; B—Illite/smectite, SEM, 1824.5 m, well Yuan 228; C—Chlorite film and authigenic quartz, SEM, 2197.5 m, well Yuan 69; D—Calcite, CL, 2199.3 m, well Yuan 69; E—Quartz overgrowths and secondary saline inclusions, plane polarized light, 2225.1 m, well Geng 115; F—Authigenic kaolinite, SEM, 2197.5 m, well Yuan 122; G—Replacement of feldspar by calcite, crossed polarized light, 2215.2 m, well Yuan74; H—High-angle fissures and oil stains, 2179.2–2179.4 m, well Yuan29

(图 2-B), 反应式如下:



泥质沉积物在压实成岩过程中释放出  $Si^{2+}$ 、 $Al^{3+}$ 、 $Na^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$  等各种离子, 这些物质随压实水一起进入砂岩孔隙系统中, 与蒙脱石发生反应, 形成绿泥石<sup>[19]</sup>, 反应式如下:



储层中发育的绿泥石(图 2-C)和伊/蒙混层薄膜, 一方面充填原生孔隙, 使孔隙度降低; 另一方面绿泥石薄膜的形成阻碍了孔隙水与颗粒的进一步反应, 并限制了石英次生加大的发育, 有利于原生孔隙的保存<sup>[17,18]</sup>。

### 2.2.2 早成岩 B 期方解石

早期方解石呈微晶状, 填充孔隙(图 2-D), 降低了岩石的孔隙度和渗透率。

### 2.2.3 中成岩 A 期硅质胶结和高岭石的形成

研究区砂岩中硅质胶结物主要为石英加大边(图 2-E), 其次为充填粒间孔隙的自生石英小颗粒(图 2-C)。硅质胶结交代早先形成的绿泥石和方解石, 表明孔隙流体性质由碱性转化为酸性。石英加大边中烃类包裹体的存在, 证实加大边的形成与油气运移密切相关。硅质胶结一方面堵塞孔喉并使粒间孔隙减小; 另一方面增加颗粒的抗压实程度和支撑能力, 又有利于粒间孔隙的保存。

高岭石是砂岩中常见的自生粘土矿物, 多充填溶蚀粒间孔隙, 与自生石英伴生, 扫描电镜下观察呈蠕虫状或书页状集合体(图 2-F)。高岭石书页状晶形保留了良好的晶间孔,

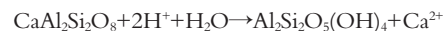
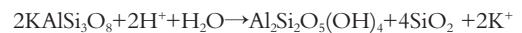
是重要的储集空间组成部分。

### 2.2.4 中成岩 A 期末碳酸盐胶结

晚期方解石胶结比较常见, 与早期方解石有明显不同的是晚期方解石在成分上含  $Fe^{2+}$ , 为含铁方解石和铁方解石。铁方解石往往交代长石、岩屑等碎屑颗粒(图 2-G), 并堵塞溶蚀粒间孔隙和剩余原生孔隙, 极大地降低了储层的孔隙度。

### 2.3 溶蚀作用

中成岩 A 期, 随着埋深和古地温的不断加大, 有机质成熟, 排出大量有机酸和  $CO_2$ , 这些物质运移进入碎屑岩后导致孔隙水介质转化为酸性。在酸性介质条件下, 长石碎屑发生溶解, 形成大量自生高岭石:



另一方面, 早成岩 B 期形成的方解石遭受不同程度的溶解, 其反应机理如下:



方解石分解产生的  $CO_3^{2-}$  及孔隙流体中不断富集的  $Ca^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ , 为晚期铁方解石的形成奠定了物质基础<sup>[19]</sup>。中成岩 A 期, 长石和早期方解石大量溶蚀, 形成粒内溶蚀孔隙和溶蚀粒间孔隙, 极大地改善了储层物性。

### 2.4 破裂作用

构造运动可以使岩石发生破裂, 形成裂缝<sup>[20]</sup>。研究区裂缝以斜交缝和近垂直的高角度缝为主, 裂缝面多平直, 为构造应力形成的剪切缝。古地磁分析表明, 裂缝的走向以 NEE 为主, NW 向少量。裂缝与燕山期和喜马拉雅期构造应力场有关, 并受 NW 向盆地基底断裂影响<sup>[2]</sup>。统计结果表明, 本区 47% 的裂缝为钙质或泥质半充填, 48% 未充填, 仅有 5% 的裂缝



被自生矿物完全充填;95%的裂缝是有效裂缝,近40%的裂缝见油迹或油斑(图2-H)。裂缝的发育进一步改善了储层的物性,从而更有利于油气的运移、储集。

### 3 成岩相与孔隙发育的关系

根据上述成岩现象和成岩阶段的研究,以起主导作用的成岩作用为依据,将本区划分为溶蚀孔隙相、绿泥石胶结相、碳酸盐胶结相及压实杂基相等4种主要成岩相。以上4种成岩相是根据占主导地位的成岩现象来划分的,其间必然存在重叠与交叉,即:碳酸盐胶结相中也有粘土矿物胶结的成分;溶蚀孔隙相中,随着长石的溶蚀,必然产生大量的高岭石胶结;绿泥石胶结相中,则常含有较多的高岭石、伊/蒙混层等胶结物。

#### 3.1 溶蚀孔隙相

溶蚀孔隙相中,溶蚀作用对储层的改善起主导作用。该成岩相分布在水下分流河道、河口坝砂体的中轴部,这些部位发育的砂岩原始孔渗条件相对较好,有利于有机质热演化过程中由于脱羧基作用产生的酸性流体优先进入,溶蚀长石和早期方解石,增加孔隙度。这些储层的孔隙度为8%~13%,渗透率为 $(0.1\sim 2.6)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,排驱压力为 $(0.25\sim 3)\times 10^5\text{Pa}$ ,大部分属IIA类储层,少数属IB、IIB类储层(图3)。

#### 3.2 绿泥石胶结相

绿泥石胶结相中胶结物以绿泥石为主,常含有较多的高岭石、伊/蒙混层等自生矿物。绿泥石胶结物有两种,一种是绿泥石薄膜,如前所述,绿泥石薄膜的形成阻碍了早期石英次生加大的形成,有利于原生孔隙的保存;另一种为充填孔

隙的叶片状绿泥石,使孔隙度降低。绿泥石胶结相常沿溶蚀孔隙相相边部分布,溶蚀作用相对不发育,储层物性较溶蚀孔隙相相差。孔隙度为5%~9%,渗透率为 $(0.05\sim 1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,排驱压力为 $(7\sim 1)\times 10^5\text{Pa}$ ,属于IIB、IIIA类储层。

#### 3.3 碳酸盐胶结相

属于碳酸盐胶结相的砂岩,碳酸盐胶结物含量占岩石总体积的10%~25%,最高可达30%。呈孔隙充填式胶结或嵌晶式胶结,胶结物主要为方解石、含铁方解石和铁方解石,代表成岩早期胶结而晚期未发生明显溶蚀的储层类型,其孔渗性较差。该成岩相常出现在水下分流河道、河口砂坝的边部,常围绕绿泥石胶结相和溶蚀孔隙相分布,形成一个围绕优质储层的“钙壳”。其可能的成因为:在压实成岩过程中,泥岩中排出大量富含 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 的孔隙水,进入邻近的砂岩并在砂体边部优先沉淀,形成钙质胶结层,储层孔隙度大为降低;且造成后期的成岩流体很难在其间流动,因此溶蚀作用很少发生;加之水下分流河道砂体及河口砂坝的边部的砂岩一般粒度细、杂基高,使得最终的物性较差。孔隙度一般为2%~7%,渗透率为 $(0.03\sim 0.1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,排驱压力为 $(11\sim 4)\times 10^5\text{Pa}$ ,属IIIB、IIIA类储层。

#### 3.4 压实杂基相

压实杂基相多对应于水下分流间湾沉积微相,主要在本区南部发育。由于此处水力条件较弱,原始沉积物粒度细小,砂层很薄,且泥质杂基含量高,砂体原始孔隙度低。从而进一步抑制了成岩过程中地下流体的流动,不利于薄层砂岩的改造。该成岩相中砂岩的孔隙度一般 $<3\%$ ,渗透率为 $(0\sim 0.03)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,排驱压力大于 $10\times 10^5\text{Pa}$ ,属于致密储层。

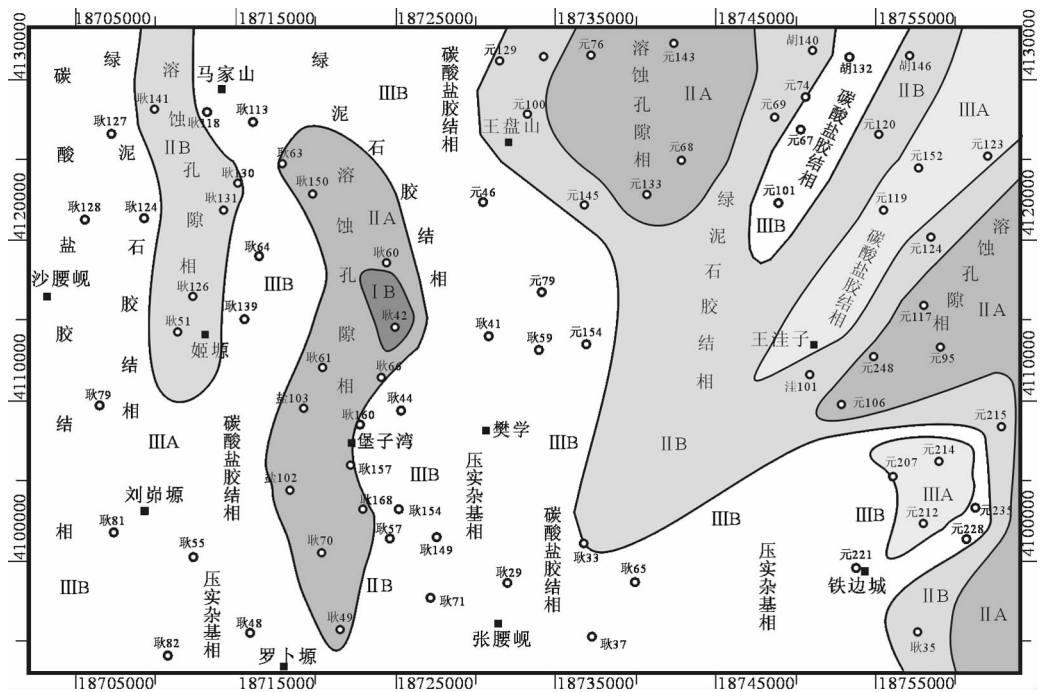


图3 砂岩成岩相与储层评价平面图

Fig.3 Plan of diagenetic facies of sandstone and reservoir assessments

## 4 结 论

马家山—小涧子油田主要储层延长组长<sub>6<sub>1</sub></sub>、长<sub>4+5</sub>段成岩作用进入了中成岩阶段 A 期。压实作用使砂岩储集空间变小、孔渗性变差,溶蚀作用和破裂作用大大地改善了储层的物性,胶结作用往往具有双重性质。本区发育溶蚀孔隙相、绿泥石胶结相、碳酸盐胶结相及压实杂基相 4 种类型,不同的成岩相,油气储层性质不同。溶蚀孔隙相物性最好,大部分属 II A 类储层,少数属 I B、II B 类储层;绿泥石胶结相物性次之,属于 II B、III A 储层;碳酸盐胶结相物性较差,属 III B、III A 类储层;压实杂基相属于致密储层。成岩相的平面分布具有明显的规律性,由水下分流河道砂体和河口砂坝中心向边缘,直至水下分流间湾,溶蚀孔隙相、绿泥石胶结相、碳酸盐胶结相及压实杂基相依次分布,储层物性由好变差,有利的储集相带为水下分流河道砂体和河口砂坝中心的溶蚀孔隙相和绿泥石胶结相。

## 参考文献(References):

- [1] 聂永生,田景春,夏青松,等.鄂尔多斯盆地白豹—姬源地区上三叠统延长组物源分析[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(5): 4-6.  
Nie Yongsheng, Tian Jingchun, Xia Qingsong, et al. Source analysis of Yanchang formation in Baobao-Jiyuan region, Ordos basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2004, 11 (5): 4-6 (in Chinese with English abstract).
- [2] 赵文智,胡素云,汪泽成.鄂尔多斯盆地基底断裂在上三叠统延长组石油聚集中的控制作用[J]. 石油勘探与开发, 2003, 36(5): 1-5.  
Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Wang Zecheng. Key role of basement fault control on oil accumulation of Yanchang Formation, Upper Triassic, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(5): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王多云,李凤杰,王峰,等.储层预测和油藏描述中的一些沉积学问题[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 193-197.  
Wang Duoyun, Li Fengjie, Wang Feng, et al. Some Sedimentological Problems on Reservoir Prediction and Oil-pool Characterisation [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(2): 193-197 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王峰,王多云,郑希民,等.陕甘宁盆地姬源地区延长组三角洲前缘微相组合及特征[J]. 沉积学报, 2005, 23(2): 218-224.  
Wang Feng, Wang Duoyun, Zheng Ximin, et al. The Microfacies Combination and Characteristics of Delta Front in Yanchang Formation (Triassic) of Jiyuan Area Shaanxi-Gansu-Ningxia Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23 (2): 218-224 (in Chinese with English abstract).
- [5] 王琪,史基安,王多云,等.鄂尔多斯盆地西部三叠系长<sub>2</sub>油层组砂岩成岩演化特征[J]. 天然气地球科学, 2005, 12(3): 261-268.  
Wang Qi, Shi Jian, Wang Duoyun, et al. Characteristics of diagenetic evolution of Chang sandstones (uppertriassic) in the western Ordos basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 12(3): 261-268 (in Chinese with English abstract).

- [6] 王琪, 嵯喜准, 陈国俊, 等. 鄂尔多斯盆地盐池—姬源地区三叠系长<sub>4+5</sub>砂岩成岩演化特征与优质储层分布 [J]. 沉积学报, 2005, 23(3): 397-405.  
Wang Qi, Zhuo Xizhun, Chen Guojun, et al. Characteristics of diagenetic evolution of Chang 4+5 Sandstones (Upper Triassic) in Yanchi-Jiyuan area, Ordos Basin and distribution of High-Quality Reservoir [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(3): 397-405 (in Chinese with English abstract).
- [7] 王琪, 嵯喜准, 陈国俊, 等. 鄂尔多斯西部长<sub>6</sub>砂岩成岩演化与优质储层 [J]. 石油学报, 2005, 26(5): 17-23.  
Wang Qi, Zhuo Xizhun, Chen Guojun, et al. Diagenetic evolution and high-quality reservoir in Chang<sub>6</sub> sandstone in the western Ordos Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 26(5): 17-23 (in Chinese with English abstract).
- [8] 费安玮, 刘成林, 甘军, 等. 鄂尔多斯盆地三道坎组混合沉积的生物扰动构造与古地理 [J]. 中国地质, 2004, 31(4): 347-355.  
Fei Anwei, Liu Chenglin, Gan Jun, et al. Bioturbation structures and paleogeography of mixed deposits of the Lower Ordovician Sandakan Formation, Ordos basin [J]. Geology in China, 2004, 31 (4): 347-355 (in Chinese with English abstract).
- [9] 陶士振. 包裹体应用于油气地质研究的前提条件和关键问题 [J]. 地质科学, 2004, 39(1): 77-91.  
Tao Shizhen. Premise conditions and key problems of applied study of inclusion in oil-gas geology [J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(1): 77-91 (in Chinese with English abstract).
- [10] 刘林玉, 曹青, 柳益群, 等. 白马南地区长<sub>81</sub>砂岩成岩作用及其对储层的影响 [J]. 地质学报, 2006, 80(5): 712-717.  
Liu Linyu, Cao Qing, Liu Yi qun, et al. Chang 81 sandstone diagenesis and the influence on Chang 81 reservoir of south Area of Baima, Ordos Basin [J]. Acta Geological Sinica, 2006, 80(5): 712-717 (in Chinese with English abstract).
- [11] Barnes D A, Lundgren C E, Longman M W. Sedimentology and diagenesis of the St. Peter Sandstone, Central Michigan basin, United States [J]. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull, 1992, 76: 1507-1532.
- [12] Wilson M D, Stanton P T. Diagenetic mechanisms of porosity and permeability reduction and enhancement [C]//In: Wilson M D (ed.). Reservoir Quality Assessment and Prediction in Clastic Rocks. SEPM Short Course, 1994. 5: 59-118.
- [13] Cagatay M N, Saner S, Al-Saiyed I, et al. Diagenesis of the Safaniya Sandstone Member (mid-Cretaceous) in Saudi Arabia [J]. Sedimentology, 1996, 105: 221-239.
- [14] 朱筱敏, 张强, 吕雪雁, 等. 塔里木盆地塔北与塔中地区东河砂岩段沉积特征对比 [J]. 中国地质, 2005, 32 (4): 648-654.  
Zhu Xiaomin, Zhang Qiang, Lü Xueyan, et al. Comparison of the sedimentary characteristics of the Donghe sandstone between the Tabei and Tazhong areas, Tarim basin [J]. Geology in China, 2005, 32(4): 648-654 (in Chinese with English abstract).
- [15] 郑浚茂, 庞明. 碎屑储集岩的成岩作用研究 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989: 93-96.  
Zheng Junmao, Pang Ming. Study on Diagenesis of Clastic Reservoirs [M]. Wuhan: Press of China University of Geology,

- 1989:93-96(in Chinese).
- [16] 楼章华, 赵霞飞. 吉木萨尔凹陷仓房沟群火山砂岩的典型成岩反应及其物性特征[J]. 石油与天然气地质, 1992, 13(2):167-174. Lou Zhanghua, Zhao Xiafei. Typical diagenetic reactions and physical property of volcanic sandstone in Changfanggou Group, Jimosal depression [J]. Oil & Gas Geology, 1992,13(2):167-174(in Chinese with English abstract).
- [17] 柳益群, 李文厚. 陕甘宁盆地东部上三叠统含油长石砂岩的成岩特点及孔隙演化[J]. 沉积学报, 1996, 14(3):87-96. Liu Yiqun, Li Wenhou. Diagenetic characteristics and porosity evolution of the oil-bearing arkoses in the Upper Triassic in the eastern Shaan-Gan-Ning Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(3):87-96(in Chinese with English abstract).
- [18] 黄思静, 谢连文, 张萌, 等. 中国三叠系陆相砂岩中自生绿泥石的形成机制及其与储层孔隙保存的关系[J]. 成都理工大学学报, 2004, 31(3):273-281. Huang Sijing, Xie Liansheng, Zhang Meng, et al. Formation mechanism of authigenic chlorite and relation to preservation of porosity in nonmarine Triassic reservoir sandstones, Ordos Basin and Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2004, 31(3):273-281(in Chinese with English abstract).
- [19] 刘林玉, 柳益群, 李文厚. 吐鲁番坳陷西山窑组富煤的河流沉积与储集层的成岩作用研究[J]. 岩相古地理, 1998, 18(4):9-16. Liu Linyu, Liu Yiqun, Li Wenhou. Diagenesis of the coal rich fluvial sediments and reservoirs in the Xishanyao Formation, Turpan depression, Xinjiang [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1998, 18(4):9-16(in Chinese with English abstract).
- [20] 许建华, 张世奇, 纪友亮, 等. 藏北羌塘盆地中上侏罗统碎屑岩储层成岩演化特征[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(1):4-9. Xu Jianzhang, Zhang Shiqi, Ji Youliang, et al. Diagenetic evolution of clastic reservoirs in the upper and middle Jurassic in Qiangtang basin of northern Xizang area [J]. Journal of the University of Petroleum, 2001, 25(1):4-9(in Chinese with English abstract).

## Diagenesis of sandstone in the Majiashan-Xiaojianzi oilfield, Ordos basin and its effect on reservoirs

YANG Ren-chao<sup>1</sup>, FAN Ai-ping<sup>1,2</sup>, HAN Zuo-zhen<sup>1</sup>, LIU Yi-qun<sup>2</sup>

(1. Department of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, Shandong, China;

2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

**Abstract:** Integrated methods, including thin section identification, cast thin section examination, mercury penetration, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and fluid inclusion analysis, were used to reveal the controls of sandstone diagenesis in the Majiashan-Xiaojianzi oilfield on reservoirs. Study indicates that the diagenesis of sandstone of the Chang 6<sub>1</sub> and Chang 4+5 members in the Yanchang Formation has reached stage A of the middle diagenetic phase. The distribution of diagenetic facies exhibits a distinctive regularity: dissolution pore facies, chlorite cement facies, carbonate cement facies and compact matrix facies occur in succession from the sand bodies of subaqueous distributary channels and center of river mouth sandbars to margins and down to the subaqueous distributive bay. The physical properties of sandstone become poor successively. The favorable reservoirs are dissolution pore facies and chlorite cement facies in the sand bodies of subaqueous distributary channels and center of river mouth sandbars.

**Key words:** Ordos basin; Yanchang Formation; sandstone reservoir; diagenesis; diagenetic facies

**About the first author:** YANG Ren-chao, male, born in 1976, Ph.D candidate and lecturer, specializes in sedimentology; E-mail: rc\_yang@sina.com.