

鄂尔多斯盆地红河油田 长8致密砂岩储层成岩特征

王明培¹, 夏东领², 伍岳², 庞雯², 邹敏²

(1. 中国石化华北油气分公司, 郑州 450000; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:综合利用铸体薄片、扫描电镜和电子探针等分析化验资料,对鄂尔多斯盆地红河油田三叠系延长组长8致密砂岩储层的成岩作用类型、分布特征及主控因素进行了系统研究。研究区长8储层目前处于中成岩A阶段,主要成岩类型为压实作用、溶解作用及2期方解石、2期高岭石、3期绿泥石胶结作用。独立型薄层砂体分布在河道边部和河道上游,其塑性矿物含量高,以强压实作用为特征,溶解作用和胶结作用较弱,发育强压实成岩相。复合型厚层砂体分布在河道中心,其中顶部和底部砂体以强方解石胶结为特征;中部砂体根据砂体岩相类型存在多个成岩序列和成岩相,其中富含刚性矿物中—细砂岩岩相主要发育绿泥石胶结中溶解成岩相,过渡型细砂岩岩相由于早期方解石胶结程度差异,可发育方解石中胶结成岩相或高岭石中胶结成岩相。

关键词:成岩作用;成岩相;砂岩岩相;长8储层;红河油田;鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Diagenesis features of Chang 8 tight sandstone reservoir in Honghe Oil Field, Ordos Basin

WANG Mingpei¹, XIA Dongling², WU Yue², PANG Wen², ZOU Min²

(1. North China E&P Company, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450000, China;

2. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: The diagenesis types, distribution characteristics and main controlling factors of the tight sandstone reservoir in the 8th member of Triassic Yanchang Formation (Chang 8) in the Honghe Oil Field, Ordos Basin, were systematically studied by using thin sections, scanning electron microscopy and electron probe. The Chang 8 reservoir in the study area is currently in the middle A diagenesis stage. The diagenesis types related to the reservoir quality mainly include compaction, dissolution, calcite cementation, kaolinite cementation and chlorite cementation. The isolated thin layer sand body has a high plastic mineral content and was deposited in the channel flanks and upper reaches of the river. The diagenesis of this sandstone is characterized by strong compaction, weak dissolution and cementation, forming strongly compacted diagenetic facies. The stacked thick sand body was deposited in the center of the river. The top and bottom sand bodies are strongly cemented by calcite, while those in the central part developed multiple diagenetic sequences corresponding to different sandstone lithofacies types. The middle-fine sandstone lithofacies, rich in rigid minerals, includes chlorite cement, and the transitional fine sandstone lithofacies mainly contains kaolinite cement or middle calcite cement.

Key words: diagenesis; diagenetic facies; sandstone lithofacies; Chang 8 reservoir; Honghe Oil Field; Ordos Basin

红河油田位于鄂尔多斯盆地天环凹陷南部(图1a),面积2 515.6 km²,整体构造简单,地层自西向东平缓倾斜^[1-3]。三叠系延长组长8油层组是主要生产开发层位,油层厚度约80~100 m,包含长8₁和长8₂两个亚油层组(图1b),其中长8₁亚油层组是主力产油层,平均孔隙度8.6%,平均渗透率

$0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,具有典型致密储层特征。前期对已开发井区内油气高产富集规律分析表明,基质储层质量是影响油井高产的重要地质因素。对于常规储层,沉积微相是影响储层分布及储集性能的重要地质因素;而对于低孔低渗致密储层,由于其成岩强度高,成岩类型多,成岩作用对储层质量的影响

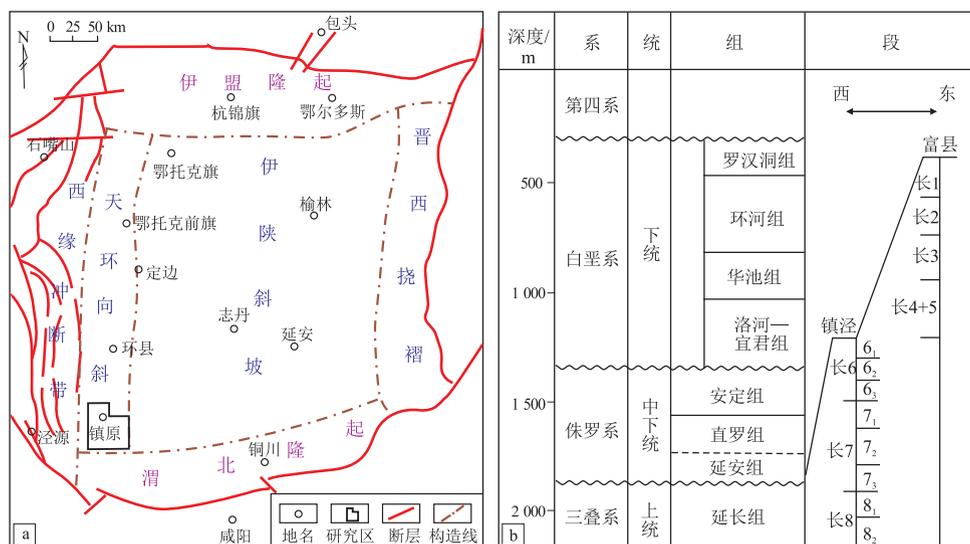


图1 鄂尔多斯盆地红河油田构造位置(a)及中生界地层(b)

Fig.1 Structural location (a) and stratigraphic column of Mesozoic (b), Honghe Oil Field, Ordos Basin

更为明显^[4-8]。在有利沉积相带内理清成岩作用发育规律、预测有利成岩相带是优选致密储层“甜点”的重要工作内容^[9-12]。本文以红河油田长8致密砂岩储层为研究对象,结合铸体薄片、扫描电镜和电子探针等分析化验资料,在沉积微相分析基础上,对研究区成岩作用类型、成岩演化序列、成岩分布特征及主控因素等内容进行了系统研究,以期对研究区后续优质储层预测及致密油开发选区提供地质依据。

1 储层沉积及岩石学特征

红河油田长8储层沉积时期构造环境整体较稳定,沉积相类型为浅水辫状河三角洲下平原沉积,发育分流河道、溢岸砂体和分流间湾3种微相类型,主体砂体的微相类型为分流河道^[13-14]。

通过对1000多块岩石薄片的观察,认为研究区长8储层砂岩主要为长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩。碎屑石英(Q)、长石(F)及岩屑(R)的平均含量分别为45%、26%和29%。石英以单晶石英为主;长石以斜长石为主,少量为钾长石;岩屑以火成岩和变质岩岩屑居多,沉积岩岩屑较少。填隙物以泥质杂基为主,含量约10%~15%,胶结物主要为方解石、高岭石、绿泥石和自生石英等。总体上,长8储层砂岩成分成熟度属于中等。

粒度上以细粒为主,含少量中粒。分选性中等,顺物源方向总体上呈变好趋势。磨圆度以次棱角状为主,其次为次圆状,顺物源方向磨圆度由次棱角状向次圆状过渡。胶结类型以薄膜—孔隙型为主,其次为孔隙型、薄膜型,压嵌、基底型胶结少

见。颗粒间以线接触为主,其次为点—线接触,少量为点接触和凹凸接触。总体上,长8储层砂岩具有较高的结构成熟度。

2 成岩作用类型

储层从埋藏初期到成藏之前会经历一系列成岩事件,这些成岩事件的发生过程、先后次序和发生强度决定了现今储层形态^[15-23]。红河油田长8砂岩的成岩作用类型众多,其中与储层质量密切相关的成岩作用主要有如下几种类型。

2.1 压实作用

研究区长8储层压实作用镜下鉴定特征为:碎屑颗粒呈线接触—凹凸接触,定向排列(图2a);云母、泥岩等塑性岩屑颗粒受压弯曲、变形,呈假杂基状堵塞粒间孔隙(图2b)。压实作用的强度与储层岩性关系密切,长8砂岩石英含量低,长石和塑性岩屑含量高,塑性成分受压易变形,颗粒以细砂为主,粒度细,抗压能力弱,故压实作用强烈。压实作用是引起研究区长8储层孔隙减少、渗透性下降的最主要原因^[3]。

2.2 溶解作用

研究区长8储层存在2期溶解现象,主要为长石和岩屑颗粒溶解,以长石溶解最为普遍(图2c)。第一期发生在早成岩期,镜下表现为颗粒相互之间穿插的不规则接触。早成岩期沉积体接受大气淡水淋滤,大量颗粒被溶解形成次生孔隙,但由于之后的快速压实作用,这些孔隙难以被保存下来。第二期发生在成岩后期,与有机质分解产生的酸性流体有关,镜下表现为颗粒间呈正常的点线接触,但

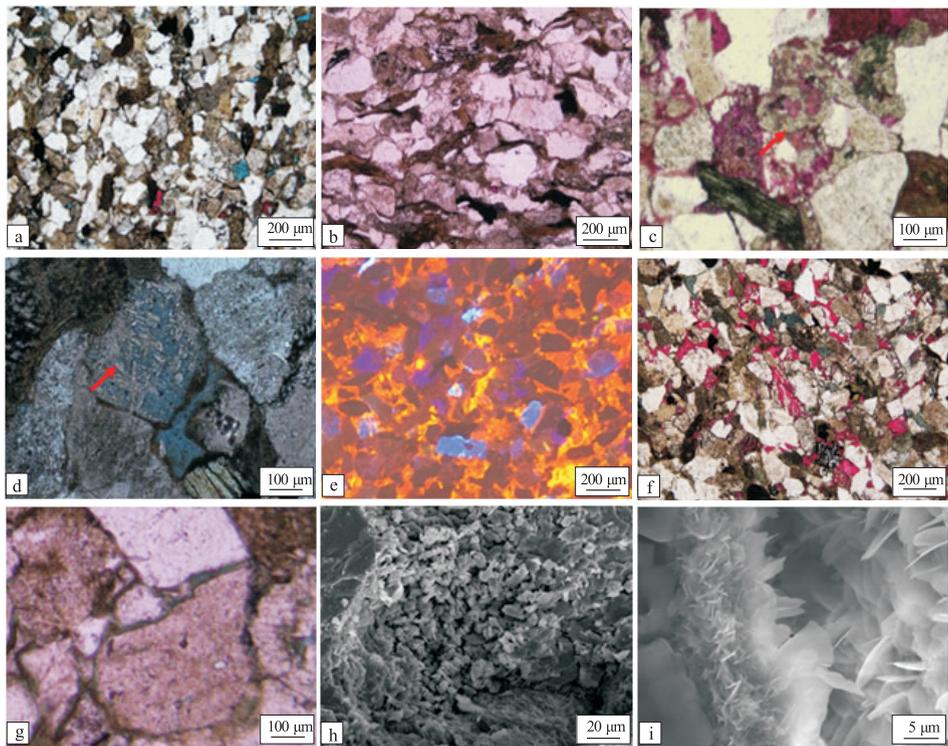


图 2 鄂尔多斯盆地红河油田长 8 砂岩储层不同成岩作用镜下特征

a. 粉—细岩屑长石砂岩, 强压实作用, 颗粒间呈凹凸接触, HH127 井, 2 355.73 m, 铸体薄片(-); b. 粉—细岩屑长石砂岩, 强压实作用, 云母受压弯曲变形, HH105 井, 2 256.33 m, 铸体薄片(-); c. 细粒长石岩屑砂岩, 溶解作用, 岩屑颗粒部分溶解, ZJ20 井, 2 204.81 m, 铸体薄片(-); d. 细粒岩屑长石砂岩, 溶解作用, 长石颗粒边缘溶解, HH1057-3 井, 2 243.53 m, 铸体薄片(-); e. 细粒长石砂岩, 早期含铁方解石胶结作用, HH91 井, 1 888.75 m, 阴极发光; f. 细粒长石砂岩, 交代方解石胶结物填充于孔隙内, HH31 井, 2 268.92 m, 铸体薄片(-); g. 细粒长石砂岩, 长石高岭土化, HH1057-3 井, 2 232 m, 铸体薄片(-); h. 细粒长石砂岩, 书页状自生高岭石胶结, ZJ19 井, 2 291.365 m, 扫描电镜; i. 细粒长石砂岩, 绿泥石衬边胶结, HH105 井, 2 263.92 m, 扫描电镜

Fig.2 Microscopic features of different types of diagenesis for Chang 8 reservoir in Honghe Oil Field, Ordos Basin

边缘被溶蚀成不规则形状(图 2d)。该期溶解作用的强度与颗粒粒度和是否发育衬边绿泥石有关, 细砂岩和发育衬边绿泥石的砂岩更易发育溶解作用, 粉砂岩基本不存在溶解作用。

2.3 胶结作用

研究区长 8 储层胶结作用主要包括碳酸盐胶结和自生黏土矿物胶结 2 类, 不同胶结类型对储层发育影响各不相同。

2.3.1 碳酸盐胶结作用

长 8 储层碳酸盐胶结期次为 2 期, 胶结物主要为方解石和铁方解石。早期生成的胶结物以铁方解石为主, 晶粒较大, 呈连晶状或零星状充填在粒间孔隙中(图 2e), 早期胶结使得原生孔隙度大为降低。晚期生成的碳酸盐胶结物主要为方解石, 以交代形式出现或充填在长石和岩屑发生溶解产生的次生孔隙内(图 2f), 表明溶解作用之后碳酸盐胶结作用仍在持续, 该期方解石约占全部方解石含量的 5%~10%, 对储层影响不大。

研究区连晶式铁方解石强胶结多发育在颗粒度较粗、塑性成分含量较低的储层中, 这类储层

通常早期压实程度相对较弱, 为后期方解石沉淀保留了大量沉淀空间。

2.3.2 自生黏土矿物胶结作用

研究区长 8 储层自生黏土矿物胶结以高岭石胶结和绿泥石胶结为主, 伊利石和伊蒙混层胶结发育较少, 分布局限, 不作重点介绍。

研究区长 8 储层存在 2 期高岭石胶结。第一期高岭石为在早成岩过程中酸性流体对长石颗粒淋滤蚀变而成, 蚀变高岭石在镜下表现为长石颗粒表面污浊(图 2g)。蚀变高岭石的形成使得长石颗粒抗压性降低, 并影响后续成岩作用。第二期高岭石为在成岩后期形成的自生高岭石, 呈书页状、蠕虫状集合体堵塞在孔隙中(图 2h)。自生高岭石的形成在很大程度上与长石的溶解有关, 长石溶解之后提供 Al 和 Si 离子, 在相对封闭的成岩环境下就近沉淀形成高岭石。长 8 砂岩以第二期高岭石胶结为主, 主要发育在粒度细、塑性组分含量高(大于 50%)的砂岩中, 且主要沉淀在砂体中下部。

研究区长 8 储层发育 3 期绿泥石胶结作用, 分别呈现 3 种赋存状态。第一期绿泥石形成于成岩

早期,与湖水进退有关。该期绿泥石呈薄膜状平行颗粒表面生长,晶型不完整,厚度约 0.001 mm。研究区处于水动力较强的三角洲下平原环境,分流河道在搬运石英、长石等碎屑颗粒过程中携带铁离子入湖,与湖水中的电解质发生絮凝沉淀,形成薄膜绿泥石。第二期绿泥石以孔隙衬边方式产出,由孔隙水沉淀形成,镜下表现为针叶状绿泥石集合体,垂直于碎屑颗粒表面向孔隙中心生长(图 2i)。该期绿泥石的形态与 BEYENE 等^[24]通过物理模拟实验得到的 pH 值在 8.22 时孔隙水沉淀形成的绿泥石类似,表明两者发育可能存在类似的条件,即:(1)充足的铁离子来源;(2)碱性环境;(3)足够的生长空间。第三期绿泥石形成于成岩后期,在镜下表现为玫瑰花状集合体充填在孔隙中,通常发育在云母较多的部位。第一期薄膜状绿泥石能够阻碍碎屑颗粒与孔隙水的接触,抑制石英次生加大边的形成;第二期衬边式绿泥石可以增强岩石抗压实能力,镜下显示发育衬边绿泥石的砂岩多为点接触或线接触,而没有衬边绿泥石的砂岩多为凹凸接触。

3 成岩阶段及成岩序列

根据上述成岩作用类型及特征,结合镜下鉴定获得的自生矿物分布和形成顺序,参照《中华人民共和国石油天然气行业标准 SY/T 5477-2003 碎屑岩成岩阶段划分》^[25],认为研究区长 8 储层现今处于中成岩阶段 A 期,形成的典型成岩序列为:压实—薄膜绿泥石胶结—蚀变高岭石胶结—铁方解石胶结—衬边绿泥石胶结—溶解—自生高岭石胶结—孔隙式绿泥石胶结—方解石交代(图 3)。成岩特点可以概括为压实作用持续发生,溶解作用幕式发生,2 期方解石、2 期高岭石、3 期绿泥石胶结作用交叉发生。

4 不同地质因素对成岩作用影响

不同沉积微相砂体由于其在岩相类型、砂体结

构、砂泥岩配置关系及成岩环境等方面存在差异,会经历不同的成岩演化而发育不同成岩相。本文拟从泥岩隔夹层、砂体结构和砂体岩相 3 个方面来讨论沉积微相对成岩相的控制作用。

4.1 泥岩隔夹层

砂泥岩沉积界面处分布的泥岩隔夹层饱和含钙地层水,在早成岩期的快速压实作用下迅速排出,经由沉积界面运移在相邻砂体内沉淀,形成碳酸盐胶结。研究区长 8₁ 小层邻近泥岩分布的砂体内碳酸盐强胶结物来源于临近泥岩中的无机碳源,主要有以下两方面证据:(1)对 20 块细砂岩内钙质胶结物及 5 块位于砂岩附近的泥岩样品进行碳氧同位素分析,结果显示砂岩内钙质胶结物碳同位素与邻近泥岩样品内碳同位素特征相似,介于 -4‰~-2.3‰,平均为 -2.58‰;(2)通过统计长 8₁ 小层顶底稳定分布的泥岩厚度和相邻强钙质胶结砂岩厚度,发现泥岩厚度越厚,钙质砂岩厚度越厚。分布在砂泥沉积界面处的砂岩由于成岩早期碳酸盐强胶结作用而过早致密化,后续成岩流体难以进入而极大抑制了其他成岩作用的发生,其典型成岩序列为薄膜绿泥石胶结—快速压实—铁方解石强胶结,形成方解石强胶结成岩相(图 4a),孔隙基本不发育,储层质量差。

4.2 砂体结构

砂体结构指砂体垂向叠加样式、砂泥岩配置关系及砂体厚度。研究区长 8₁ 小层存在独立型和叠置型 2 种砂体结构。

独立型砂体垂向上仅发育单期砂体,厚度一般小于 7 m,岩性上以细—粉砂岩为主,分选差,塑性成分含量高,主要分布在河道边部和河道上游(图 5)。压实作用强烈是其典型成岩特征,胶结作用和溶解作用由于孔隙早被压实而发育程度弱,其成岩序列为蚀变高岭石—快速强压实—弱胶结,发育强压实成岩相(图 4b),储层质量差。

叠置型砂体垂向上存在多期砂体叠置,厚度

成岩阶段	早成岩阶段		中成岩阶段
	A	B	A
压实作用	—————		
溶解作用	———	———	———
胶结作用	绿泥石	———	———
	高岭石	———	———
	方解石	———	———
颗粒接触类型	点接触	点—线接触	线接触
有机质成熟阶段	未成熟		低成熟
I/S混层中S占比	70%以上	70%~50%	50%~35%

图 3 鄂尔多斯盆地红河油田长 8 储层成岩序列

Fig.3 Diagenetic sequence of Chang 8 reservoir in Honghe Oil Field, Ordos Basin

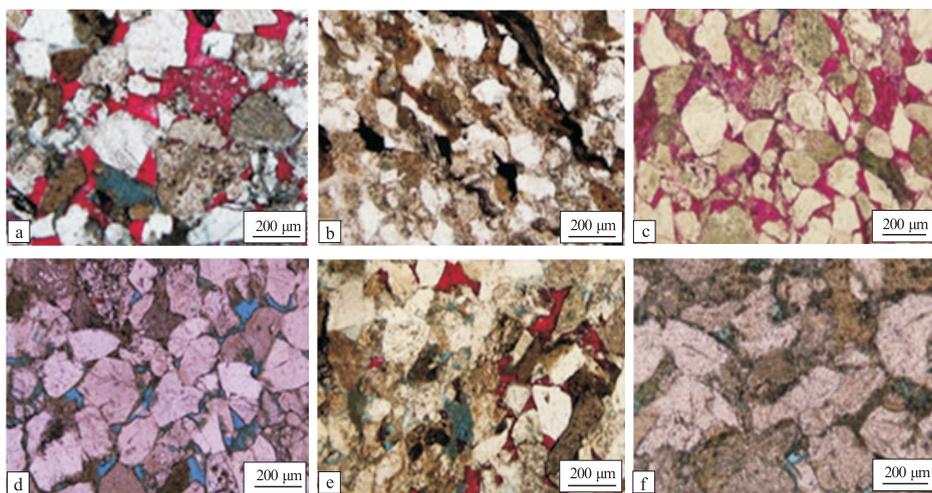


图 4 鄂尔多斯盆地红河油田长 8 储层不同成岩相镜下特征

a.方解石强胶结成岩相,HH59 井,2 164.31 m,铸体薄片(-);b.强压实成岩相,HH311 井,2 182.95 m,铸体薄片(-);c.绿泥石胶结中溶解成岩相,HH12 井,2 090.92 m,铸体薄片(-);d.绿泥石胶结中溶解成岩相,HH105 井,2 259.15 m,铸体薄片(-);e.方解石中胶结成岩相,HH127 井,2 354.61 m,铸体薄片(-);f.高岭石中胶结成岩相,HH127 井,2 346.77 m,铸体薄片(-)

Fig.4 Microscopic features of different diagenetic facies of Chang 8 reservoir in Honghe Oil Field, Ordos Basin

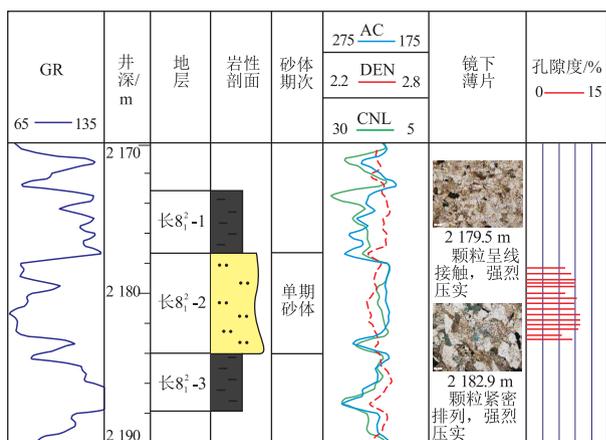


图 5 鄂尔多斯盆地红河油田 HH311 井长 8₁ 小层独立型砂体结构及成岩作用

Fig.5 Isolated sand body and diagenesis of Chang 8₁ reservoir in well HH311, Honghe Oil Field, Ordos Basin

大,主要分布在河道中心和河道中下游(图 6)。叠置型砂体成岩类型垂向上具有三分特征,上文已介绍顶部和底部砂体由于邻近泥质隔夹层而以碳酸盐强胶结作用为主,发育方解石强胶结成岩相;位于中部的砂体,其成岩类型和成岩强度与砂岩岩相类型有关,下面将展开介绍。

4.3 砂岩岩相

前期研究发现,成岩作用与砂岩内塑性矿物含量和颗粒粒度关系密切。塑性矿物由于抗压实能力弱而影响压实作用的发生,研究区长 8 砂岩塑性矿物主要包括黏土化长石,以及泥岩、喷发岩、片岩、千枚岩、板岩、云母等岩屑。颗粒粒度影响成岩作用的机理在于:一方面颗粒粒度较小时,在上覆

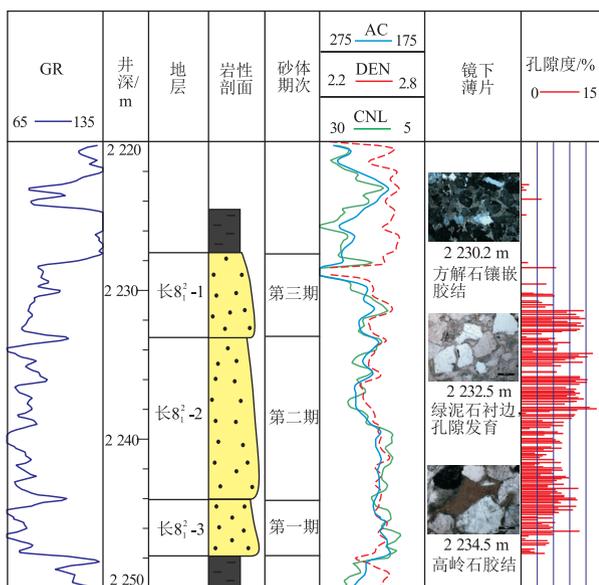


图 6 鄂尔多斯盆地红河油田 HH1057-3 井长 8₁ 小层叠置型砂体结构及成岩作用

Fig.6 Stacked sand body and diagenesis of Chang 8₁ reservoir in well HH1057-3, Honghe Oil Field, Ordos Basin

载荷作用下颗粒易于滑动和重新排列,从而使颗粒之间的支撑力减小,有利于压实作用发生;另一方面颗粒粒度较小,流体运移受阻而不利于后期成岩流体交换,抑制胶结作用和溶解作用的发生。以塑性矿物含量和颗粒粒度作为分类标准,笔者将长 8 砂岩分为富含塑性矿物细—粉砂岩、富含刚性矿物中—细砂岩、过渡型细砂岩 3 类岩相。

4.3.1 富含塑性矿物细—粉砂岩岩相

该类岩相塑性成分含量大于 60%,颗粒粒径小于 220 μm,多分布于独立型薄层砂体内,平面上

砂体结构	岩相类型	所处砂体位置	成岩序列	成岩相类型
叠置厚砂体	富含刚性矿物中—细砂岩	砂体中部	第一期绿泥石胶结 → 快速压实 → 第二期绿泥石胶结 → 溶解 → 高岭石弱胶结	绿泥石胶结中溶解相
		砂体顶部、底部	第一期绿泥石胶结 → 快速压实 → 方解石强胶结	方解石强胶结相
	过渡型细砂岩	砂体中下部	第一期绿泥石胶结 → 蚀变高岭石胶结 → 快速压实 → 方解石弱胶结 → 第二期绿泥石胶结 → 高岭石中胶结	高岭石中胶结相
		砂体中上部	第一期绿泥石胶结 → 蚀变高岭石胶结 → 快速压实 → 方解石中胶结 → 第二期绿泥石胶结 → 高岭石弱胶结	方解石中胶结相
孤立薄砂体	富含塑性矿物—粉砂岩	砂体整段	蚀变高岭石胶结 → 快速强压实 → 弱胶结 → 云母黏土矿物交代	强压实相

图 7 鄂尔多斯盆地红河油田长 8 致密储层成岩演化模式

Fig.7 Diagenesis evolution patterns of Chang 8 reservoir in Honghe Oil Field, Ordos Basin

位于河道上游及河道边部。主要成岩类型为压实作用,典型成岩序列为蚀变高岭石胶结—快速强压实—弱胶结,发育强压实成岩相,储层质量差。

4.3.2 富含刚性矿物中—细砂岩岩相

该类岩相塑性成分含量小于 50%,颗粒粒径大于 220 μm,多分布于独叠置型厚层砂体内,平面上呈透镜状位于河道内部。研究区该类岩相发育 2 类成岩序列,取决于成岩早期方解石胶结程度。当早期方解石胶结程度较弱时,保留了部分原生孔隙,有利于后期酸性流体运移而易发生溶解作用,此时发生的成岩序列为薄膜绿泥石胶结—快速压实—衬边绿泥石胶结—中溶解—高岭石弱胶结,形成绿泥石胶结中溶解成岩相(图 4c, d),次生孔隙发育,储层质量好。当早期方解石胶结程度较强时,此时大部分原生孔隙已被占据而不利于后期酸性流体交换发生溶蚀,此时发生的成岩序列为薄膜绿泥石胶结—快速压实—方解石强胶结,形成方解石强胶结成岩相,储层质量差。

4.3.3 过渡型细砂岩岩相

该类岩相塑性成分含量介于 50%~60%,颗粒粒径介于 100~220 μm,多分布于独叠置型厚层砂体内,平面上广泛分布在河道中下游。该类岩相颗粒粒度较细,原生孔喉较小,根据其所处的砂体位置也存在 2 类成岩序列。当其位于砂体中上部时,距离顶部泥岩有一定距离,此时早期方解石中等胶结,典型的成岩序列为薄膜绿泥石胶结—快速压实—方解石中胶结—衬边绿泥石胶结—高岭石弱胶结,发育方解石中胶结相,储层质量中等(图 4e)。当其位于砂体中下部时,此时早期方解石胶结程度较弱,相对封闭的成岩环境有利于后期长石

溶解所提供的 Al 和 Si 离子原地沉淀形成自生高岭石,典型的成岩序列为薄膜绿泥石胶结—快速压实—方解石弱胶结—衬边绿泥石胶结—高岭石胶结,发育高岭石中胶结相,储层质量中等(图 4f)。

4.4 成岩演化模式

综合上述对研究区长 8 储层成岩作用类型识别,成岩序列构建及不同地质因素与成岩作用关系的探讨,建立了红河油田长 8 致密砂岩储层成岩演化模式(图 7)。

5 结论

(1)红河油田长 8 致密砂岩储层目前处于中成岩 A 阶段,其成岩特点为压实作用持续发生,溶解作用幕式发生,2 期方解石、2 期高岭石、3 期绿泥石胶结作用交叉发生。完整成岩序列概括为:压实作用—薄膜绿泥石胶结—蚀变高岭石胶结—铁方解石胶结—衬边绿泥石胶结—溶解—自生高岭石胶结—孔隙式绿泥石胶结—方解石交代。

(2)临近泥质隔夹层的砂体由于其可以优先捕获泥岩提供的含钙流体,铁方解石胶结程度高,发育方解石强胶结成岩相;独立型砂体以富含塑性矿物—粉砂岩岩相为主,颗粒粒度细、富含塑性矿物,发育强压实成岩相;位于叠置型砂体中部的过渡型细砂岩岩相由于早期方解石胶结程度差异可发育方解石中胶结成岩相或高岭石中胶结成岩相,富含刚性矿物中—细砂岩岩相主要发育绿泥石胶结中溶解成岩相。

参考文献:

[1] 尹伟,胡宗全,李松,等.鄂尔多斯盆地南部镇泾地区典型油

- 藏动态解剖及成藏过程恢复[J].石油实验地质,2011,33(6):592-596.
- YIN Wei, HU Zongquan, LI Song, et al. Dynamic analysis and accumulation process recovery of typical reservoirs in Zhenjing region, south of Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(6): 592-596.
- [2] 徐美娥,尹伟,陈冬,等.鄂尔多斯盆地红河油田延长组致密砂岩储层反演预测[J].中国石油勘探,2015,20(1):63-68.
- XU Meie, YIN Wei, CHEN Dong, et al. Inversion prediction of tight sandstone reservoir of Yangchang Formation of Honghe Oilfield in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(1): 63-68.
- [3] 梁承春,郭景祥.鄂尔多斯盆地红河油田延长组长8₁小层致密砂岩成岩作用与储层特征[J].油气地质与采收率,2017,24(1):57-63.
- LIANG Chengchun, GUO Jingxiang. Diagenesis and reservoir characteristics of tight sandstones of Chang 8₁ member of Yanchang Formation in Honghe Oilfield, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(1): 57-63.
- [4] GRANT N T, MIDDLETON A J, ARCHER S. Porosity trends in the Skagerrak Formation, Central Graben, United Kingdom continental shelf; the role of compaction and pore pressure history[J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(6): 1111-1143.
- [5] 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.
- [6] AMTHOR J E, OKKERMAN J. Influence of early diagenesis on reservoir quality of rotliegende sandstones, northern Netherlands[J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(12): 2246-2265.
- [7] 高阳,张建丽,李海燕,等.南堡凹陷高尚堡油田深层储层成岩作用及孔隙演化[J].断块油气田,2016,23(6):703-708.
- GAO Yang, ZHANG Jianli, LI Haiyan, et al. Diagenesis and porosity evolution of deep E₃²⁺³ Formation in Gaoshangpu Oilfield, Nanpu Sag[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(6): 703-708.
- [8] 黄国霖,陈世加,姚宜同,等.合水—华池地区长7油层组相对高孔渗成因分析[J].断块油气田,2016,23(1):40-45.
- HUANG Youlin, CHEN Shijia, YAO Yitong, et al. Cause analysis of higher porosity and permeability reservoir group in Chang 7, Heshui-Huachi Region[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(1): 40-45.
- [9] 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, northeastern Brazil[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84, (7): 1015-1040.
- [10] YANG Renchao, FAN Aiping, HAN Zuozhen, et al. Diagenesis and porosity evolution of sandstone reservoirs in the East II part of Sulige Gas Field, Ordos Basin[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(3): 311-316.
- [11] PETERS D. Recognition of two distinctive diagenetic facies trends as aid to hydrocarbon exploration in deeply buried Jurassic Smackover carbonates of southern Alabama and southern Mississippi; abstract[J]. AAPG Bulletin, 1985, 69(2): 295-296.
- [12] 何崇康,成良丙,陈旭峰,等.鄂尔多斯盆地新安边油田长7致密油有效储层识别与甜点优选[J].石油实验地质,2017,39(6):812-818.
- HE Chongkang, CHENG Liangbing, CHEN Xufeng, et al. Effective reservoir identification and "sweet spot" optimization of Chang 7 tight oil reservoir in Xin'anbian oil field, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(6): 812-818.
- [13] 尹伟,郑和荣,胡宗全,等.鄂南镇泾地区延长组油气富集主控因素及勘探方向[J].石油与天然气地质,2012,33(2):159-165.
- YIN Wei, ZHENG Herong, HU Zongquan, et al. Main factors controlling hydrocarbon accumulation and favorable exploration targets for the Yanchang Formation in Zhenjing area, south Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 159-165.
- [14] 韩永林,王成玉,王海红,等.姬塬地区长8油层组浅水三角洲沉积特征[J].沉积学报,2009,27(6):1057-1067.
- HAN Yonglin, WANG Chengyu, WANG Haihong, et al. Sedimentary characteristics of shallow-water deltas in Chang-8 subsection of Yanchang Formation, Jiyuan area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(6): 1057-1067.
- [15] 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. Diagenesis of Chang 8₁ reservoir with low permeability in Xifeng Oilfield, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(2): 209-217.
- [16] 田亚铭,施泽进,宋江海,等.鄂尔多斯盆地宜川—旬邑地区长8储集层碳酸盐胶结物特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),2011,38(4):378-384.
- TIAN Yaming, SHI Zejin, SONG Jianghai, et al. Characteristics of carbonate cements of member 8 of Yanchang Formation in the Yichuan-Xunyi area, Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2011, 38(4): 378-384.
- [17] 窦伟坦,田景春,徐小蓉,等.陇东地区延长组长6—长8油层组成岩相研究[J].成都理工大学学报(自然科学版),2005,32(2):129-132.
- DOU Weitan, TIAN Jingchun, XU Xiaorong, et al. Diagenetic facies study on Chang 6-8 oil formations of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2005, 32(2): 129-132.
- [18] 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.
- ZHENG Junmao, PANG Ming. Study on clastic diagenesis[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1989.
- [19] 罗静兰,张晓莉,张翔,等.成岩作用对河流—三角洲相砂岩储层物性演化的影响:以延长油区上三叠统延长组长2砂岩为例[J].沉积学报,2001,19(4):541-547.
- LUO Jinglan, ZHANG Xiaoli, ZHANG Yunxiang, et al. The diagenetic impact on reservoir-quality evolution of fluvial-deltaic sandstones: taking an example from the Upper Triassic sandstones of Chang 2 Formation in the Yanchang Oil Field[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4): 541-547.

2010[S].北京:中国标准出版社,2010.

People's Republic of China General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, China National Standardization Administration. Isolation method for kerogen from sedimentary rock; GB/T 19144-2010[S]. Beijing: China Standard Press, 2010.

[30] JIN Jian, DUPRÉ C, YONEDA K, et al. Characteristics of extracellular hydrocarbon-rich microalga *Botryococcus braunii* for biofuels production: recent advances and opportunities[J]. Process Biochemistry, 2016, 51(11): 1866-1875.

[31] GOUVEIA J D, RUIZ J, VAN DEN BROEK L A M, et al. *Botryococcus braunii* strains compared for biomass productivity, hydrocarbon and carbohydrate content[J]. Journal of Biotechnology, 2017, 248: 77-86.

[32] 秦建中, 申宝剑, 陶国亮, 等. 优质烃源岩成烃生物与生烃能力动态评价[J]. 石油实验地质, 2014, 36(4): 465-472.

QIN Jianzhong, SHEN Baojian, TAO Guoliang, et al. Hydrocarbon-forming organisms and dynamic evaluation of hydrocarbon generation capacity in excellent source rocks[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(4): 465-472.

[33] 张林晔, 刘庆, 张春荣. 东营凹陷成烃与成藏关系研究[M]. 北京: 地质出版社, 2005.

ZHANG Linye, LIU Qing, ZHANG Chunrong. Study on the genetic relationships between hydrocarbon occurrence and pools formation in Dongying Depression [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.

[34] 李友川, 邓运华, 张功成. 中国近海海域烃源岩和油气的分带性[J]. 中国海上油气, 2012, 24(1): 6-12.

LI Youchuan, DENG Yunhua, ZHANG Gongcheng. Zoned distribution of source rocks and hydrocarbon offshore China [J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(1): 6-12.

[35] 陈洁, 宋启泽. 有机波谱分析[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.

CHEN Jie, SONG Qize. Organic spectral analysis [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007.

[36] 卢龙飞, 蔡进功, 刘文汇, 等. 泥质烃源岩中黏土矿物结合有机质热演化的红外发射光谱研究[J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 215-222.

LU Longfei, CAI Jingong, LIU Wenhui, et al. Infra-red emission spectroscopy study of thermal evolution of organic matter bound by clay minerals in muddy hydrocarbon source rocks[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(2): 215-222.

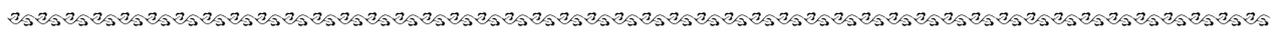
[37] 刘大锰, 金奎励, 毛鹤龄, 等. 烃源岩显微组分的显微傅利叶红外光谱研究[J]. 岩石学报, 1998, 14(2): 222-231.

LIU Dameng, JIN Kuili, MAO Heling, et al. Study of macerals in hydrocarbon source rocks by Fourier transform infrared microspectroscopy[J]. Acta Petrologica Sinica, 1998, 14(2): 222-231.

[38] 王飞宇, 张泉兴, 肖贤明. 莺—琼盆地梅山组烃源岩中树脂物质的特征和赋存形式[J]. 石油学报, 1996, 17(1): 54-60.

WANG Feiyu, ZHANG Quanxing, XIAO Xianming. The characteristics and occurrences of plant resin materials in Meishan Group source rock of Yacheng Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 1996, 17(1): 54-60.

(编辑 徐文明)



(上接第 792 页)

[20] 卢德根, 刘林玉, 刘秀蝉, 等. 鄂尔多斯盆地镇泾区块长 8₁ 亚段成岩相研究[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(1): 82-86.

LU Degen, LIU Linyu, LIU Xiuchan, et al. Diagenetic facies of Chang 8₁ sub-member of Triassic Yanchang Formation in Zhenjing block of Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2010, 22(1): 82-86.

[21] 史基安, 王金鹏, 毛明陆, 等. 鄂尔多斯盆地西峰油田三叠系延长组长 6—8 段储层砂岩成岩作用研究[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 373-380.

SHI Ji'an, WANG Jinpeng, MAO Minglu, et al. Reservoir sandstone diagenesis of member 6 to 8 in Yanchang Formation (Triassic), Xifeng Oilfield, Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3): 373-380.

[22] 陈朝兵, 朱玉双, 陈新晶, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长 8₂ 储层沉积成岩作用[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 685-693.

CHEN Zhaobing, ZHU Yushuang, CHEN Xinjing, et al. Sedimentation and diagenesis of Chang 8₂ reservoir in the Yanchang Formation in Jiyuan region, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 685-693.

[23] 钟大康, 周立建, 孙海涛, 等. 储层岩石学特征对成岩作用及孔隙发育的影响: 以鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 890-899.

ZHONG Dakang, ZHOU Lijian, SUN Haitao, et al. Influences of petrologic features on diagenesis and pore development: an example from the Triassic Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 890-899.

[24] BEYENE G H, Helge H, PER A, et al. Experimental nucleation and growth of smectite and chlorite coatings on clean feldspar and quartz grain surfaces [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 68(3): 664-674.

[25] 国家经济贸易委员会. SY/T 5477-2003, 碎屑岩成岩阶段划分[S]. 北京: 石油工业出版社, 2003.

State of Economic and Trade Commission. SY/T 5477-2003, The division of diagenetic stages in clastic rocks [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.

(编辑 韩 颀)