

鄂尔多斯盆地代家坪地区延长组8段低孔渗砂岩成岩作用及成岩相

周翔¹,何生¹,陈召佑²,王芙蓉¹,周思宾²,刘萍¹

[1. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室,湖北武汉430074;

2. 中国石化华北油气分公司勘探开发研究院,河南郑州450006]

摘要:上三叠统延长组长8段砂岩是鄂尔多斯盆地代家坪地区重要的勘探目的层,以长石岩屑细砂岩和岩屑长石细砂岩为主,目前处于中成岩A期,属典型低孔特低渗储层。强烈的成岩作用是储层致密化的主要原因,其中压实作用和碳酸盐胶结作用造成储层原生孔隙大量丧失,绿泥石胶结和长石溶蚀对储层物性改善起到了积极作用,碱-酸-碱交替的成岩介质环境变化控制了粘土矿物形成、碳酸盐胶结物沉淀以及长石溶蚀作用。综合多项定性和定量参数,将长8段砂岩划分为5种成岩相类型,定量计算不同成岩相埋藏过程中孔隙演化表明,由沉积作用形成的不同成岩相中砂岩原始组分差异是导致胶结类型和溶蚀程度差异的物质基础,不同成岩相中成岩作用类型及强度是造成砂岩孔隙演化及物性差异的主要原因。优质砂岩储层分布与成岩相密切相关,其中分布于水下分流河道砂体中的弱压实绿泥石胶结相和中压实次生溶蚀相砂岩物性最好,是研究区长8段砂岩储层中最有利的成岩相带。

关键词:成岩作用;成岩相;致密砂岩;延长组;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Diagenesis and diagenetic facies of low porosity and permeability sandstone in Member 8 of the Yanchang Formation in Daijiaping area, Ordos Basin

Zhou Xiang¹, He Sheng¹, Chen Zhaoyou², Wang Furong¹, Zhou Sibin², Liu Ping¹

[1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Exploration and Production Research Institute, SINOPEC North China Company, Zhengzhou, Henan 450006, China]

Abstract: Member 8 sandstone of the Upper Triassic Yanchang Formation is the major exploration target in Daijiaping area, Ordos Basin. Member 8 sandstone of the Yanchang Formation mainly consists of feldspathic litharenite and lithic arkose, currently is at the A phase of middle diagenesis stage, and is categorized into low-porosity and extremely low-permeability reservoir. The intensive diagenesis is main cause of reservoir densification. Compaction and carbonate cementation largely reduce the primary porosity, while chlorite cementation and feldspar dissolution improve the reservoir quality, and the alkaline-acidic-alkaline change of diagenetic environment control the formation of clay mineral, the precipitation of carbonate cements, and the dissolution of feldspar. Five types of diagenetic facies are identified in the Member 8 sandstone of the Yanchang Formation according to multiple qualitative and quantitative parameters. Quantitative calculation of porosity evolution in different diagenesis facies shows that the differences of primitive compositions among different diagenetic facies as a result of sedimentation is the material basis of the cementation types and the dissolution strength, while the differences of diagenesis types and intensity is the main cause of the differences in porosity evolution and reservoir quality. The distribution of high quality reservoirs is closely related to the diagenesis facies. The weakly-compacted chlorite cement facies and moderately-compacted secondary dissolution facies in subaqueous distributary channel sandstone show the best reservoir quality, thus are the most favorable diagenesis facies in the Member 8 sandstone of the Yanchang Formation reservoir.

Key words: diagenesis, diagenetic facies, tight sandstone, Yanchang Formation, Ordos Basin

鄂尔多斯盆地位于华北地台西部,是一个稳定沉降、凹陷迁移的多旋回沉积盆地,上三叠统延长组是盆地中生界重要含油气层位之一。受沉积环境、砂岩物

质成分及成岩作用等因素的影响,盆地内延长组储层普遍致密化,以低孔低渗储层为主,仅局部发育少量相对高孔渗储层。研究表明成岩作用类型及强度是影响

收稿日期:2015-06-08;修订日期:2015-12-10。

第一作者简介:周翔(1988—),男,博士研究生,储层地质与有机地球化学。E-mail:zhouxiang2206@163.com。

通讯作者简介:何生(1956—),男,教授、博士生导师,油气地质。E-mail:shenghe@cug.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05005-001);高等学校学科创新引智计划资助项目(B14031)。

储层物性演化的重要因素,平面上优质储层的分布受成岩相控制^[1-3]。本文在大量岩心样品测试分析的基础上,对长8段砂岩成岩作用类型及其与储层物性关系进行了系统研究,依据岩石类型、成岩作用特征及视压实率、视胶结率对成岩相进行定量划分,通过埋藏过程中不同成岩相带中储层孔隙演化过程的定量计算,分析影响成岩相物性的主要控制因素,为延长组有利储集相带的预测提供地质依据。

研究区为鄂尔多斯盆地西南部代家坪地区,位于渭北隆起以北,天环坳陷南端(图1a,b),主要含油层位长8油层组发育一套浅灰色细砂岩、粉砂岩、暗色泥岩夹薄层煤岩,属典型浅水三角洲前缘沉积(图1c),具有砂体粒度细、厚度变化大、沉积相变快的特点^[4-5],受沉积相和成岩作用影响,储层物性在垂向和横向上均表现出很强的非均质性。

1 储层基本特征

薄片观察表明长8段砂岩岩性为长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩,砂岩成分成熟度、结构成熟度均较低,颗粒以次棱角、次圆状为主,分选中等。细砂岩含量占

全部砂岩的82%,同时含少量灰白色中砂岩、浅灰色粉砂岩。碎屑颗粒以长石、石英为主,分别为47.83%和30.74%。岩屑以浅变质片岩、千枚岩、板岩及火成岩岩屑为主。填隙物中绿泥石体积分数最高(4.22%),其次为方解石(4.01%),高岭石(3.91%)、混层粘土(3.51%)、石英加大(2.6%)、伊利石(1.33%)、白云石(1.2%)、自生长石(0.3%)。

长8段砂岩储集空间以残余粒间孔、长石粒内溶孔为主,次为岩屑溶孔、晶间孔,平均面孔率为8.62%。实测孔隙度为4.82%~15.90%,平均为10.42%,渗透率为 $0.02 \times 10^{-3} \sim 1.30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.26 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图2),为典型低孔特低渗储层。

2 成岩作用类型及特征

2.1 压实作用

长8段砂岩碎屑颗粒间以线接触、点-线接触为主,表明储层压实强度中等。镜下常见的压实现象有石英、长石等刚性颗粒表面挤压破裂和碎屑颗粒之间的位移、重排(图3a),泥岩岩屑、火山岩屑等塑性颗粒扭曲、塑性变形,黑云母假杂基化等压实构造(图3b)。

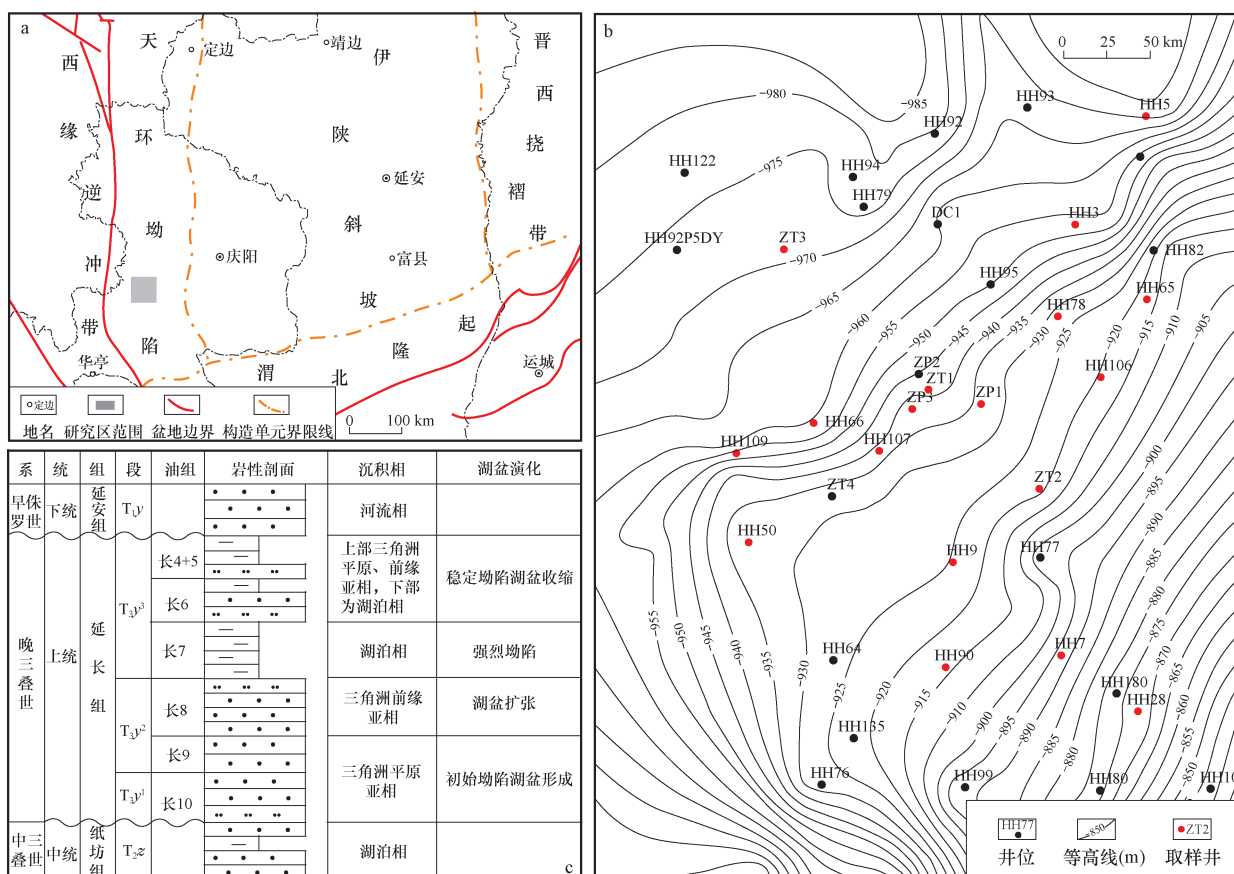


图1 鄂尔多斯盆地代家坪地区构造位置及地层综合柱状图

Fig. 1 Location and stratigraphic column of Daijiaping area, Ordos Basin

a. 鄂尔多斯盆地南部构造单元划分及研究区位置;b. 研究区长8储层顶面构造及取样井井位;

c. 鄂尔多斯盆地南部中生界综合柱状图)

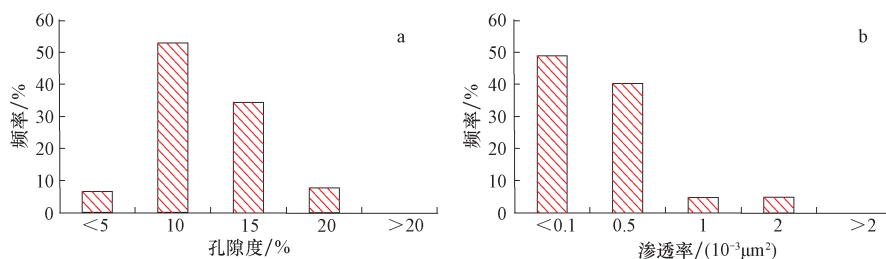


图2 鄂尔多斯盆地代家坪地区长8段砂岩物性分布直方图

Fig. 2 Histogram of the Member 8 sandstone of the Yanchang Formation in Daijiaping area, Ordos Basin

2.2 胶结作用

2.2.1 硅质胶结

硅质胶结主要有石英次生加大和自生石英两种表现形式,平均含量为5.32%。石英次生加大多出于碎屑石英表面或充填粒间孔隙,宽度一般为8~11 μm,最宽为15 μm(图3c),呈等厚环边状包裹碎屑石英颗粒,加大边中盐水包裹体均一温度分布在70~110℃,主要形成于埋藏深度小于2 000 km的浅埋藏阶段,是早成岩B期产物。自生石英晶形良好,晶体呈六方双锥状,是埋藏深度大于2 000 km的中成岩A期产物,多见于长石溶蚀孔隙中(图3d),是长石溶蚀形成的SiO₂过饱和和沉淀的产物。

2.2.2 粘土矿物胶结

绿泥石是长8段砂岩中最重要的粘土矿物,形成于富铁的碱性环境,搬运过程中黑云母等暗色矿物水解,在河口处发生絮凝形成含铁沉积物,为绿泥石的形成提供丰富的铁来源^[6-8]。研究区绿泥石以孔隙衬里较为常见,呈近似等厚环边状包裹碎屑颗粒,厚度约3~7 μm,最大可达10 μm。颗粒接触处自生绿泥石不发育,表明绿泥石沉淀开始于沉积作用后、压实作用已进行至颗粒目前接触阶段的成岩早期。电镜下常见绿泥石围绕自生石英生长,并逐渐包裹自生石英(图3e),表明绿泥石生长持续到自生石英沉淀开始以后的成岩阶段。绿泥石在碎屑颗粒表面持续生长所增加的机械强度,抵消了一部分埋藏过程中上覆地层机械压实作用,同时绿泥石占据碎屑颗粒表面体积阻止石英成核,在一定程度上抑制了石英次生加大,有利于原生孔隙的保存(图4)。不同时期形成的绿泥石具有不同的元素构成(表1;图3f),沉积早期富铁、镁的孔隙水中由颗粒表面粘土矿物转化形成的颗粒环边绿泥石相对富Fe,而相对晚期形成的孔隙衬里绿泥石Fe含量有所降低,不同时期形成的绿泥石元素构成上的差异,是绿泥石从沉淀到继续生长的各成岩阶段,成岩介质中铁离子消耗、Fe/Mg比值降低的反映^[9]。

粘土矿物中高岭石含量为11%~68%,仅次于绿泥

石,集合体呈书页状、蠕虫状(图3g),堆积松散,具有较强的晶间孔隙,主要以孔隙充填形式产出,高岭石可指示成岩介质的酸碱条件,常见于长石溶蚀孔中,是储层强烈溶蚀的标志。酸性介质环境中硅铝酸盐矿物溶蚀是自生高岭石的主要来源^[10],长8段砂岩长石含量最高达55%,为自生高岭石形成提供了丰富的物质基础。

自生伊利石集合体呈毛发状、纤维状充填粒间孔隙(图3h),形成于中成岩A期,封闭的流体系统中由溶蚀作用产生的K、Na等碱性离子富集,使孔隙流体酸性降低,在较高温度条件下K离子过饱和促进高岭石向伊利石转化,是自生伊利石的重要来源。自生伊利石通过堵塞一部分孔隙吼道,使有效孔隙变成无效的微孔而降低储层的渗流能力。

2.2.3 碳酸盐矿物胶结

根据长8段砂岩中方解石胶结物的产状与碎屑颗粒间接触关系可将方解石分为I型方解石和II型方解石两种类型。I型方解石呈微晶状集合体,粒径10~20 μm,充填原生粒间孔隙(图3i,j),呈孔隙式胶结。I型方解石中Mn含量较低,不含或含极少量Fe,阴极发光以橘黄色为主,发光强度较强(图3k)。方解石中的δ¹³C(PDB)相对较重,为-0.31‰~-3.3‰,δ¹⁸O(PDB)相对较轻,为-19.5‰~-22.1‰,反映其形成与有机质脱羧基作用关系不大,是早成岩A期孔隙水中CaCO₃过饱和和沉淀的产物^[11]。

II型方解石以含铁方解石、铁方解石为主,晶形粗大,集合体呈斑块状,充填粒间孔隙并包裹I型方解石(图3k),部分或完全交代碎屑颗粒、微晶石英(图3l)。镜下可观察到长石溶蚀孔隙被II型方解石胶结(图3m),表明II型方解石沉淀晚于长石溶蚀,II型方解石沉淀同时不断交代长石,加速了长石溶蚀。II型方解石中Fe、Mg含量较高,其中FeO含量为0.42%~0.75%,MnO含量为1.45%~2.16%(表2),阴极发光以橘红色为主,发光强度中等。II型方解石中δ¹³C(PDB)为-6.9‰~-4.4‰,相对较轻,δ¹⁸O(PDB)为-19.72‰~-22.60‰,表明有机质成熟脱羧基产生的CO₂部分进入II型方解石,是中成岩A期产物。

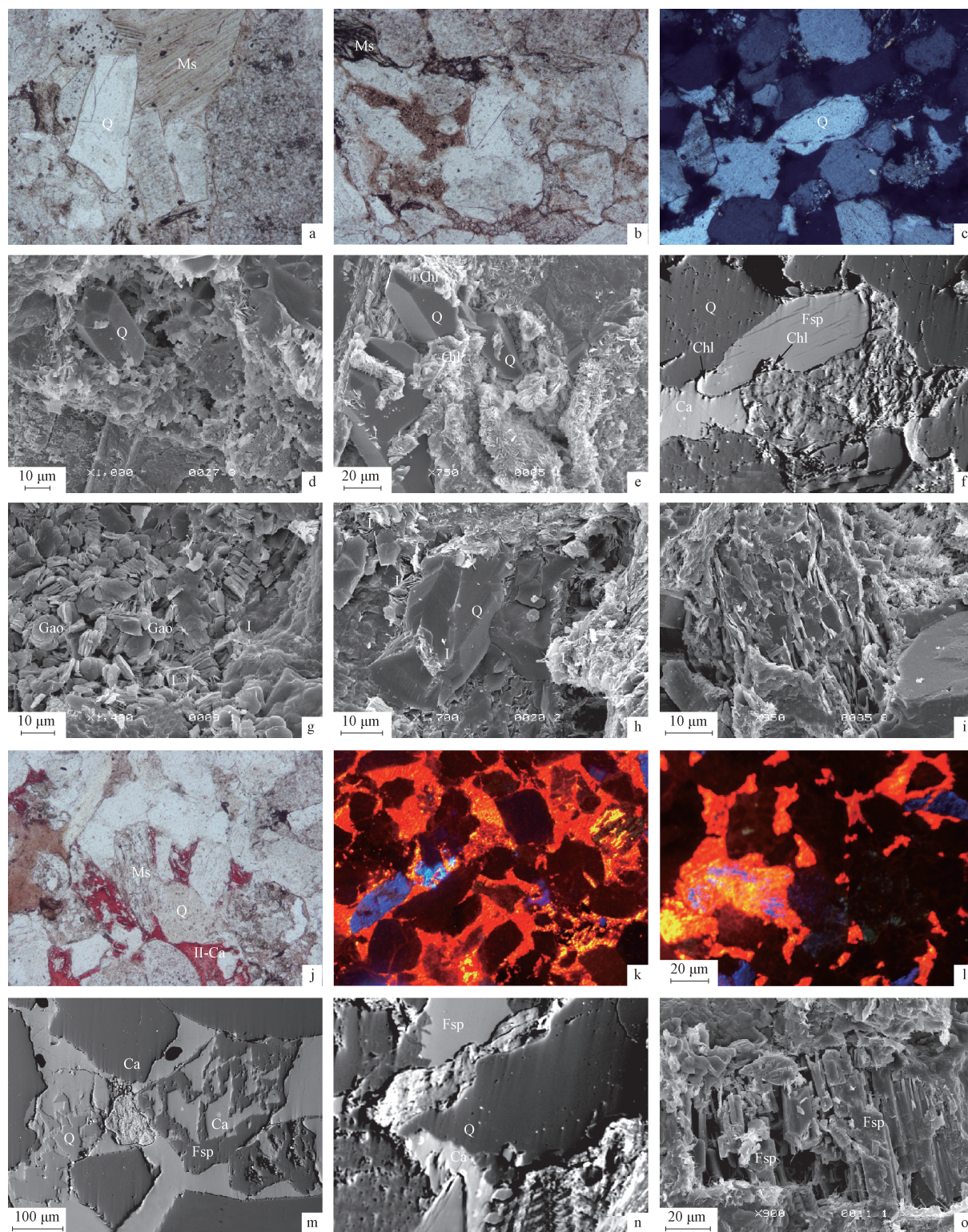


图3 鄂尔多斯盆地代家坪地区长8段砂岩成岩作用特征

Fig. 3 Diagenetic characteristics of the Member 8 sandstone of the Yanchang Formation in Daijiaping area, Ordos Basin

a. 泥质杂基塑性变形, 石英颗粒(Q)表面挤压破裂, HH92井, 2 264.76 m; b. 黑云母(Ms)假杂基化, 塑性颗粒定向排列, HH3井, 2 437.6 m; c. 石英(Q)表面次生加大, HH7井, 2 102.05 m; d. 自生石英(Q)充填长石溶蚀孔隙, ZP1井, 2 157.19 m, SEM; e. 自生石英(Q)充填粒间体积, 叶片状绿泥石(Chl)覆盖自生石英表面, HH107井, 2 438.95 m, SEM; f. 叶片状绿泥石(Chl)覆盖石英(Q)颗粒表面, HH78井, 2 400.93 m, BSE; g. 书页状高岭石(Gao)充填粒间孔隙, 集合体间夹杂片状伊利石(I), HH109井, 2 338.75 m, SEM; h. 次生石英(Q)晶体充填粒间孔隙, 片丝状伊利石(I)附着于粒表, 见次生溶蚀孔, HH92井, 2 272.14 m, SEM; i. I型方解石充填(I-Ga)粒间体积, 胶结致密, HH78井, 2 407.34 m, SEM; j. I型方解石(I-Ga)充填粒间体积, II型方解石(II-Ga)充填长石(Fsp)次生溶蚀孔隙, HH92井, 2 269.92 m, SEM; k. I型方解石(I-Ga)发橘黄色光, II型方解石(II-Ga)发橘红色光, 斜长石(Fsp)发蓝光, 石英(Qa)发棕色光, ZP1井, 2 348.33 m; l. I型方解石(I-Ga)发橘黄色光, II型方解石(II-Ga)发橘红色光, 斜长石(Fsp)发蓝光, 石英(Qa)发棕色光, ZP2井, 2 383.35 m; m. 方解石(Ga)交代钾长石(Fsp), HH109井, 2 439.35 m, BSE; n. 方解石(Ga)交代碎屑石英(Q), HH78井, 2 401.50 m, BSE; o. 钾长石(Fsp)沿解理面溶蚀呈蜂窝状, HH107井, 2 438.9 m, SEM

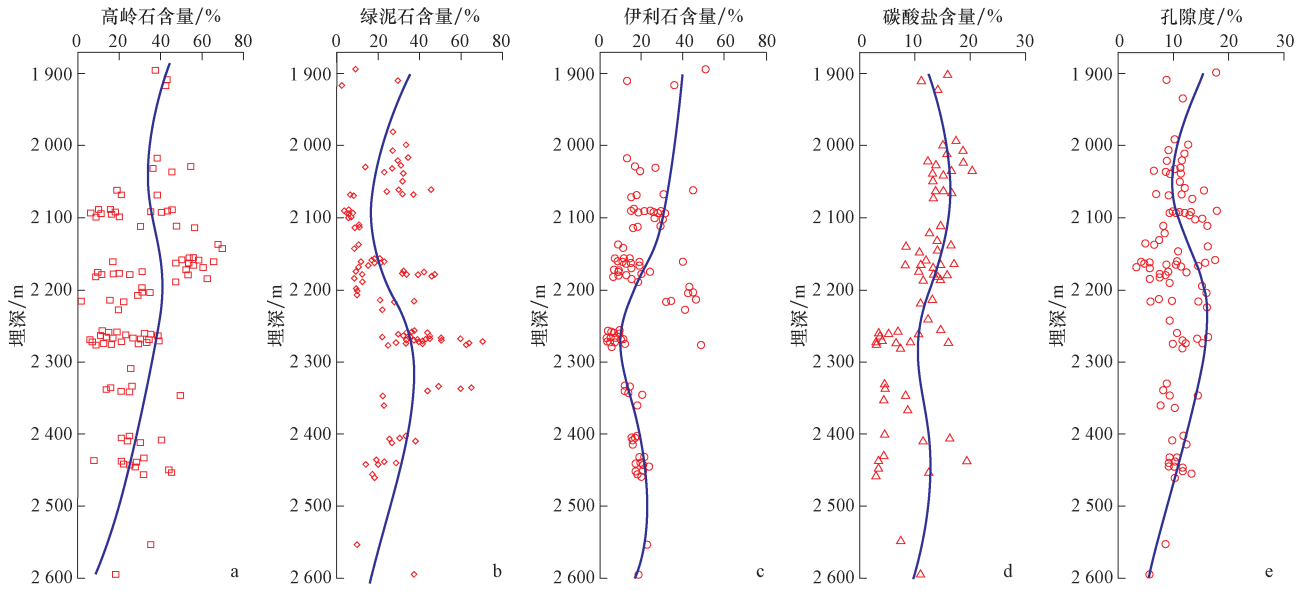


图 4 鄂尔多斯盆地代家坪地区长 8 段砂岩粘土矿物、碳酸盐含量及孔隙度与埋深关系

Fig. 4 Depth vs. clay content, carbonate content and porosity of Member 8 sandstone of the Yanchang Formation in Daijiaping area, the Ordos Basin

表 1 代家坪地区不同世代自生绿泥石化学组成电子探针分析结果
Table 1 Chemical compositions of authigenic chlorite of different generations based on electron probe analysis in Daijiaping area

样品 序号	绿泥石组成含量/%					
	FeO	MgO	CaO	MnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
1	34.91	3.82	1.01	1.42	21.79	38.00
2	32.00	9.09	0.26	0.14	21.75	31.07
3	23.82	13.11	0.05	0.40	23.17	26.72
4	2.76	2.04	0.05	0.01	30.85	52.19
5	1.12	0.56	0.08	0.07	37.07	51.16

2.3 交代作用

常见交代现象有方解石对石英、长石的交代,主要是沿颗粒边缘和解理缝进行的,与碎屑颗粒呈镶嵌状接触,可见部分石英次生加大后被碳酸盐矿物交代,说明石英次生加大形成于碳酸盐交代之前(图 3n)。

2.4 溶蚀作用

晚侏罗世末期长 8 段砂岩埋藏达到 2 200 ~ 2 400 m,进入生烃门限,有机质脱羧基形成的酸性流体沿构造裂缝进入储层,改变了早期碱性的成岩介质环境,造

成储层大范围的溶蚀。镜下常见钾长石沿节理缝溶蚀形成粒内溶孔、沿颗粒边缘溶蚀呈港湾状、阶梯状(图 3o);溶蚀作用较强时整个颗粒被溶蚀仅残存少量晶骸(图 3l),但残留长石残晶的光性方位仍保持一致;方解石边缘溶蚀呈锯齿状,局部见方解石胶结物与颗粒一起溶蚀,形成长条状孔隙。

2.5 成岩阶段及成岩演化序列

研究区长 8 段砂岩地史时期最大埋藏深度达到 3 000 m,利用岩石声发射测定长 8 储层埋藏时经历的最高古温度为 110 ~ 135 ℃,根据 SY/T 5577 - 2003 成岩阶段划分方案,研究区长 8 砂岩处于中成岩 A 期,这与镜质体反射率 R_o (0.79% ~ 1.09%) 和混层粘土含量 S (15% ~ 25%) 所指示的成岩阶段是一致的。根据自生矿物或成岩事件首次出现的相对顺序,将长 8 砂岩储层主要成岩事件顺序归纳为机械压实—早期绿泥石膜沉淀—I 型方解石胶结—石英次生加大—酸性流体侵入—长石、岩屑溶蚀—自生高岭石、自生石英析出—自生伊利石沉淀—II 型方解石胶结(图 5)。

表 2 鄂尔多斯盆地代家坪地区长 8 段砂岩碳酸盐矿物电子探针分析结果

Table 2 Carbonate minerals of the Member 8 sandstone of the Yanchang Formation in Daijiaping area, Ordos Basin based on electron probe analysis

井号	深度/m	矿物	点数	矿物成分含量/%							
				MgO	K ₂ O	MnO	Al ₂ O ₃	CaO	FeO	SiO ₂	CO ₂
HH1	2 179.50	I 型方解石	4	0.024	—	1.134	0.007	54.06	0.049	0.014	44.712
HH50	2 443.27	I 型方解石	5	0.001	0.008	0.669	0.016	56.157	0.039	0.045	43.065
HH1	2 179.50	I 型方解石	6	0.028	0.01	0.521	0.003	54.91	0.092	0.064	44.372
HH1	2 194.35	II 型方解石	8	0.214	0.057	2.16	0.064	52.275	0.424	0.984	43.7
HH107	2 454.69	II 型方解石	4	0.166	0.03	2.025	0.067	54.051	0.675	0.228	42.758
HH50	2 454.90	II 型方解石	6	0.115	0.014	2.211	—	55.236	0.471	0.102	41.851
HH106	2 419.40	II 型方解石	6	0.155	0.008	1.491	0.022	54.85	0.477	0.084	42.913
HH50	2 443.27	II 型方解石	9	0.139	—	1.682	0.341	53.06	0.746	0.596	43.436

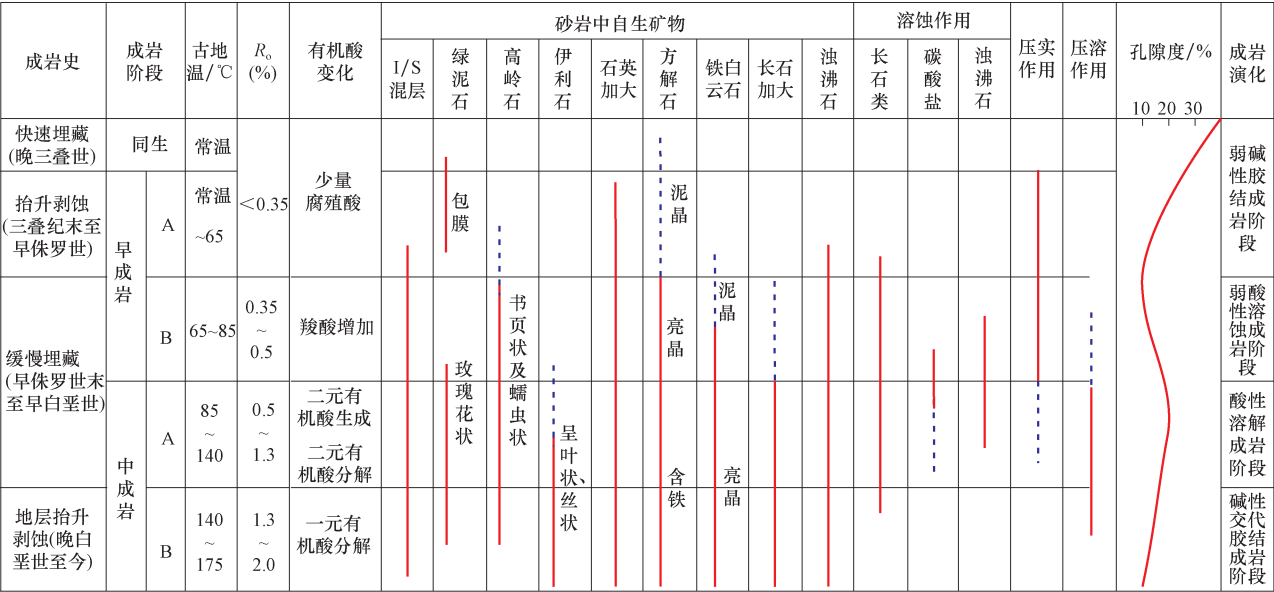


图 5 鄂尔多斯盆地代家坪地区长 8 段砂岩成岩序列
Fig. 5 Diagenetic sequences of the Member 8 sandstone of the Yanchang Formation in Daijiaping area, Ordos Basin

3 成岩相划分及物性特征

3.1 成岩相划分

成岩相是沉积物经历一定成岩作用和演化阶段的产物,是成岩环境的岩石学特征、地球化学特征、岩石物理特征和成岩产物在纵向与平面分布特征的综合反映^[12]。基于铸体薄片和扫描电镜资料揭示的岩石类型、主要成岩作用类型结合视压实率、视胶结率等定性和定量参数^[13-14],将长 8 段砂岩划分为强压实泥质杂基充填相、中压实长石次生溶蚀相、中压实高岭石胶结相、弱压实绿泥石胶结相、弱压实碳酸盐胶结相等 5 种类型成岩相(图 6)。

3.2 成岩相孔隙演化分析

砂岩成岩演化是一个复杂的物理化学变化过程,原生孔隙的破坏、保存及次生孔隙的形成均受到各种成岩作用的影响^[15-16]。通过现今孔隙结构、胶结物含量及不同成因类型孔隙相对含量分析,定量计算各种成岩作用过程中孔隙度演化,对储层成岩历史研究、储层物性影响因素分析及储层质量预测具有重要意义。

3.2.1 孔隙度演化定量分析方法

初始孔隙度可根据 Scherer 和 Beard 提出的不同分选状况下未固结砂岩的实测孔隙度关系式计算^[17-18]：
$$POR_0 = 20.91 + 22.90/S_0 \quad (1)$$
式中： POR_0 为原始孔隙度，%； S_0 为特拉斯克分选系数。

假定压实过程骨架颗粒体积不变,在压实过程造

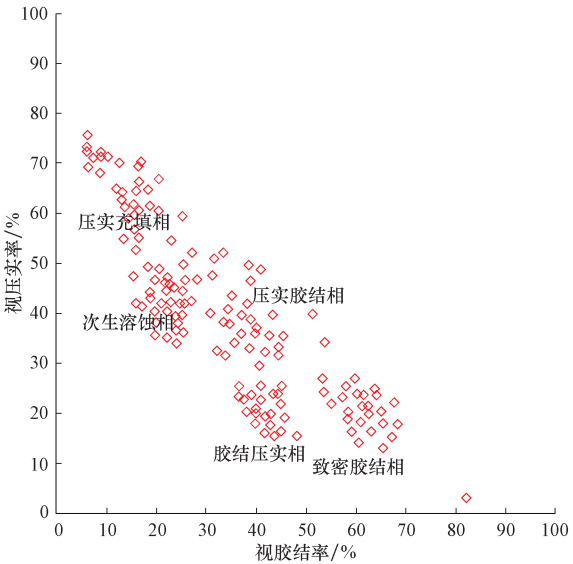


图 6 鄂尔多斯盆地代家坪地区长 8 段砂岩成岩相划分
Fig. 6 Diagenetic facies division of the Member 8 sandstone of the Yanchang Formation in Daijiaping area, Ordos Basin

成的孔隙度损失为^[19-20]：

$$COPL = POR_0 - \frac{IGV - POR_0 \times IGV}{1 - IGV} \quad (2)$$

式中： $COPL$ 为由压实作用造成的孔隙度损失，%； IGV 为粒间体积，是粒间孔隙度、胶结物含量和胶结物溶孔的总和，%。

储层压实后孔隙度为：

$$POR_1 = \frac{POR_0 - COPL}{1 - COPL} \quad (3)$$

式中： POR_1 为储层压实后的孔隙度，%。

储层在胶结过程中损失的孔隙度为：

$$CEPL = \frac{(POR_0 - COPL) \times CEM}{IGV} \quad (4)$$

式中: $CEPL$ 为储层在胶结过程中损失的孔隙度, %;
 CEM 为胶结物含量, %。

储层胶结后的孔隙度为:

$$POR_2 = \frac{POR_0 - COPL - CEPL}{1 - COPL} \quad (5)$$

式中: POR_2 为储层胶结后的孔隙度, %。

溶蚀增加孔隙度为:

$$CRPI = CRP \times (1 - COPL) \quad (6)$$

式中: $CRPI$ 为溶蚀孔孔隙度, %。

储层溶蚀后孔隙度为:

$$POR_3 = \frac{POR_0 - COPL - CEPL + CRPI}{1 - COPL} \quad (7)$$

3.2.2 成岩相孔隙演化过程

研究区 18 口井 163 块样品分析表明, 长 8 段砂岩原始孔隙度为 36.23% ~ 37.63%, 平均为 36.87%, 由沉积作用造成碎屑颗粒的分选、磨圆等沉积物结构差异对不同成岩相初始孔隙度的影响较小, 但沉积作用造成的成岩相间碎屑物质成分差异, 决定了埋藏后成岩作用类型和强度, 是形成成岩相间孔隙演化及物性

差异的主要原因。其中同沉积时弱碱性还原环境中绿泥石胶结增强了颗粒的抗压实能力, 在一定程度上抑制了早期石英次生加大, 有利于原生孔隙的保存, 加之次生溶蚀改造形成了物性最好的弱压实绿泥石胶结成岩相(图 7)。有机质脱羧基作用形成的酸性流体溶蚀长石、不稳定岩屑及 I 型方解石, 极大的改善了储层物性, 形成了物性较好的中压实长石次生溶蚀成岩相; 长石溶蚀造成孔隙流体中 Al^{3+} 和 SiO_2 浓度增加, 在流体排出受阻时沉淀为高岭石、自生石英, 形成物性较差的中压实高岭石胶结成岩相。高含量的泥质杂基在强烈的压实作用下挤压变形进入粒间体积, 石英压溶重结晶及后期粘土矿物、碳酸盐胶结, 形成了压实强度最大的强压实泥质杂基充填成岩相。成岩早期孔隙水中 $CaCO_3$ 过饱和和沉淀充填粒间孔隙, 阻止了压实作用的继续进行, 形成了压实强度最小但物性最差的碳酸盐致密胶结成岩相。由成岩介质环境变化所控制的粘土矿物形成、碳酸盐胶结物沉淀以及长石溶蚀, 是造成孔隙演化差异的主要原因。不同的成岩相由于成岩作用类型和强度的差异经历不同的孔隙演化过程, 是形成现今物性差异的关键因素。

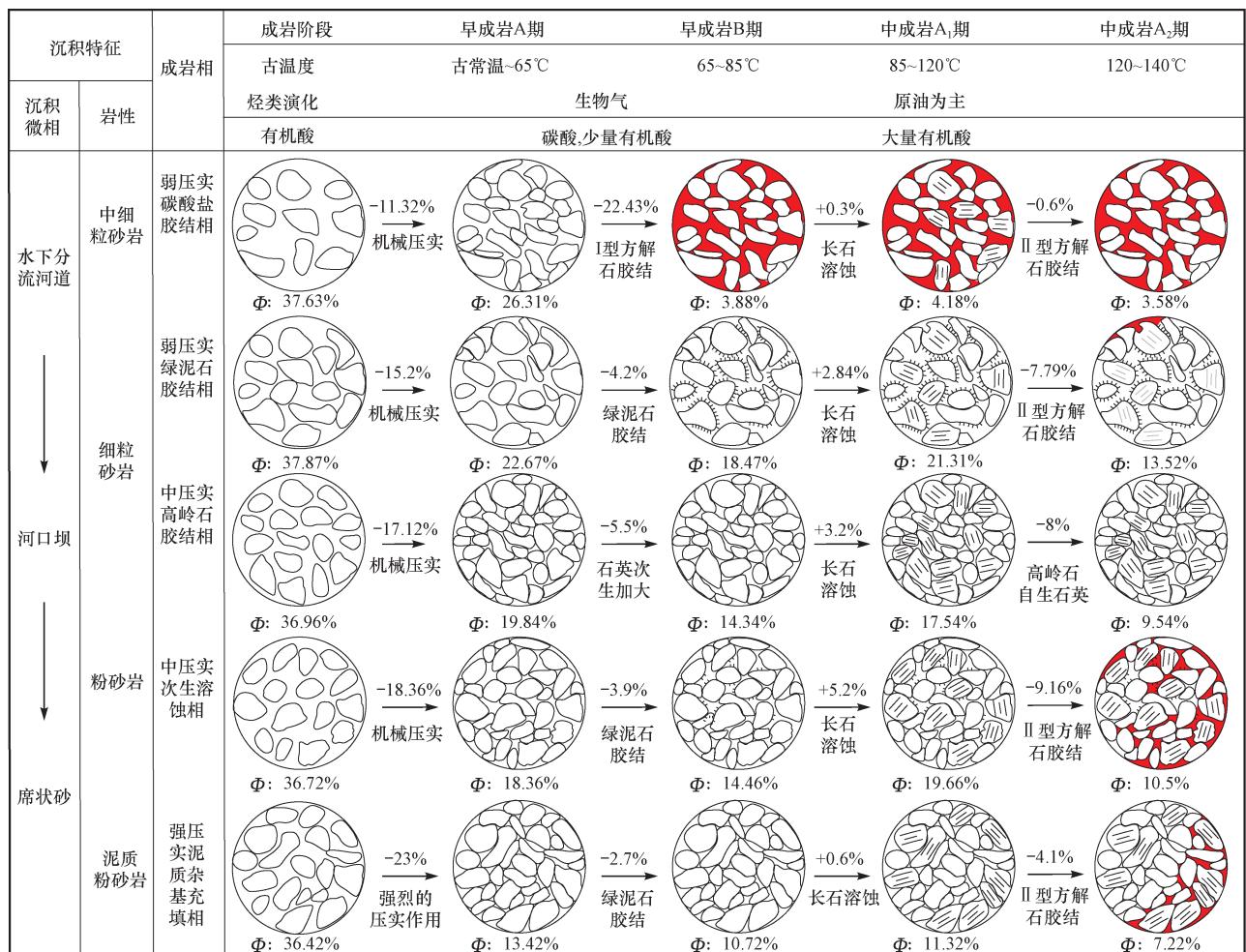


图 7 鄂尔多斯盆地代家坪地区不同成岩相孔隙度(Φ)演化模式

Fig. 7 Porosity(Φ) evolution models of different diagenesis facies in Daijiaping area, Ordos Basin

4 成岩相特征及分布

4.1 强压实泥质杂基充填成岩相

该成岩相主要发育在水下分流河道间(图8),以细粒长石岩屑砂岩、岩屑砂岩为主,分选中等-较差,胶结物以硅质、伊利石为主,含少量I型方解石,填隙物中云母、千枚岩、板岩及沉积岩屑等塑性组分含量高。由于储层中缺少石英等刚性颗粒支撑,在强烈挤压作用下泥质杂基塑性变形进入粒间孔隙,造成原生粒间孔隙大量丧失(图9a),中成岩A期的石英压溶、伊利石胶结进一步降低储层物性。孔隙类型以很小的残余粒间孔、填隙物内微孔隙、溶孔为主,平均孔隙度为7.2%,渗透率平均为 $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图9f)。

4.2 中压实长石次生溶蚀成岩相

该成岩相主要分布在水下分流河道等水动力较强沉积环境中,以中细粒长石砂岩、岩屑长石砂岩为主,分选中等-较好,胶结物以高岭石、伊利石、自生石英为主,岩石中长石、不稳定火山岩屑含量较高,在酸性流体作用下形成长石粒内溶孔、填隙物内溶孔、方解石粒间等次生溶孔(图9b),孔隙度平均为10.6%,渗透率平均为 $0.21 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是研究区有利储集层类型之一,对油气的聚集具有重要作用。

4.3 中压实高岭石胶结成岩相

该成岩相主要分布在前缘席状砂、分流间湾等沉积微相中,以中细粒、细粒岩屑长石砂岩、长石砂岩为主,分选较好,胶结物以石英加大、高岭石、伊利石为主,填隙物中泥质杂基含量较高。由长石次生溶蚀造成孔隙流体中 Al^{3+} 、 SiO_2 等过饱和沉淀形成自生高岭石和自生石英,孔隙类型以高岭石晶间孔、残余粒间孔为主(图9c),含少量微孔,孔隙度平均为9.6%,渗透率平均为 $0.14 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

4.4 弱压实绿泥石胶结成岩相

该成岩相主要发育在水下分流河道、水下分流河道交汇处沉积的中细粒石英砂岩中,胶结物以绿泥石、伊利石为主,含少量石英加大、方解石。该成岩相原始孔隙性较好,早期的强绿泥石胶结增强了颗粒间抗压强度、阻止石英次生加大,保存了大量原生粒间孔,孔隙类型以残余粒间孔为主、含部分长石溶蚀孔隙(图9d),储层物性相对较高,孔隙度平均为13.62%,渗透率平均为 $0.26 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是研究区物性最好的一类储层。

4.5 弱压实碳酸盐胶结成岩相

该成岩相主要发育在三角洲平原分流河道、三角洲前缘水下分流河道,以中-细粒、细粒长石岩屑砂岩

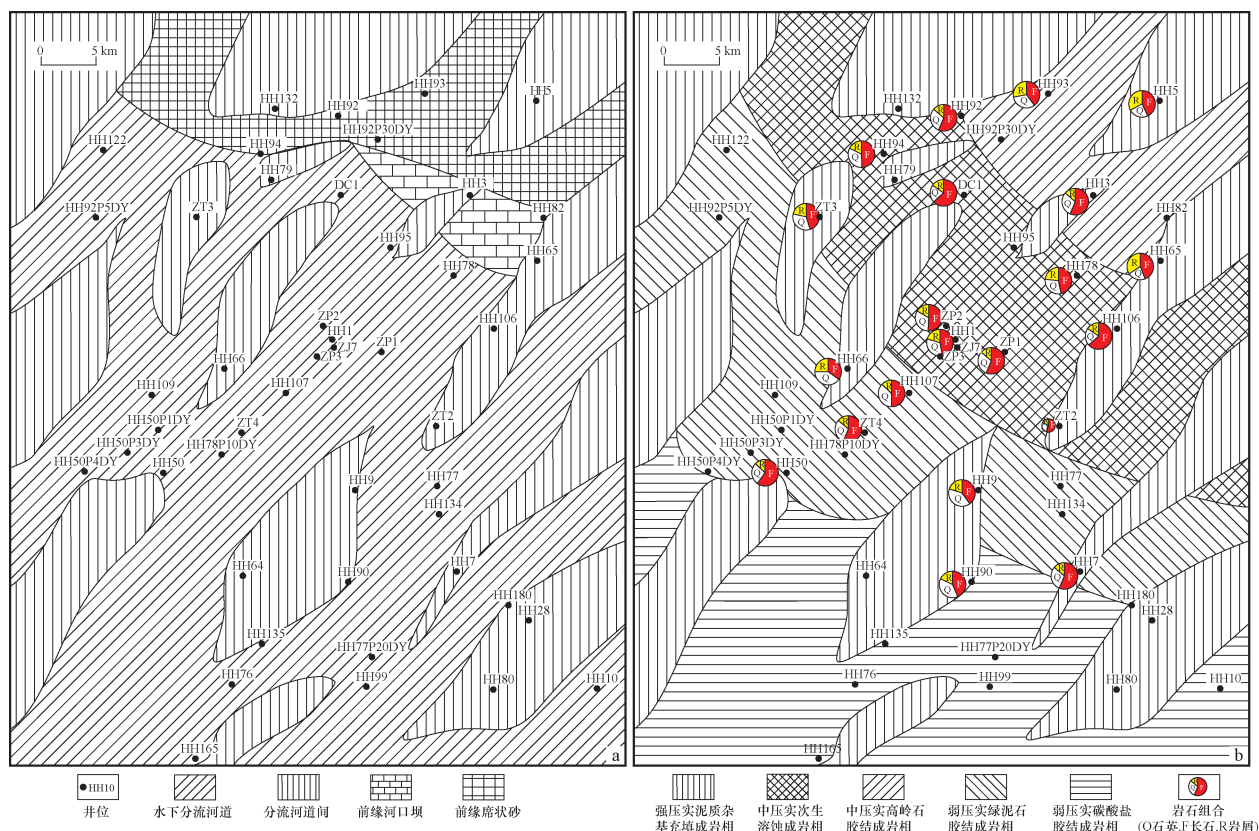


图8 鄂尔多斯盆地代家坪地区长8段储层沉积相及成岩相分布

Fig. 8 Sedimentary and diagenetic facies distribution of the Member 8 of the Yanchang Formation reservoir in Daijiaping area, Ordos Basin

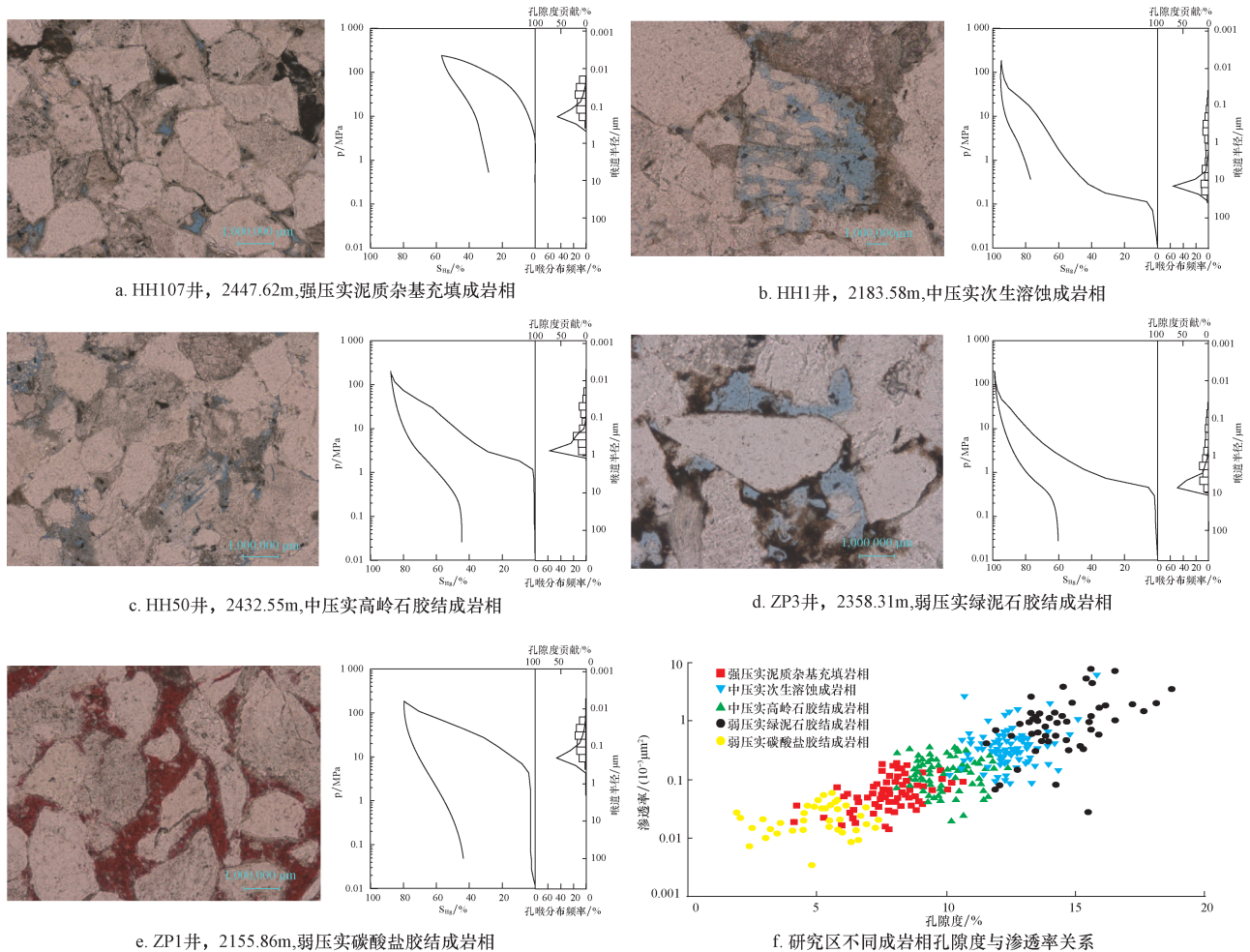


图9 鄂尔多斯盆地代家坪地区不同成岩相孔隙类型和孔隙结构特征

Fig. 9 Pore types and pore structure characteristics of different diagenesis facies in Daijiaping area, Ordos Basin

为主,胶结物以碳酸盐为主,含少量绿泥石。早期Ⅰ型方解石嵌晶状胶结,充填并封闭粒间孔隙,极大的降低储层渗流能力,使溶蚀期酸性介质难以进入,几乎不形成次生溶蚀孔,Ⅱ型方解石呈连晶状胶结并交代部分Ⅰ型方解石,造成储层物性进一步降低,砂岩中仅发育少量残余粒间孔、填隙物内微孔(图9e),砂岩孔隙度普遍小于5%,平均为3.8%,渗透率平均为 $0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是研究区物性最差的一种成岩相类型,多为非储层。

5 结论

1) 延长组长8储层属典型低孔特低渗油藏,在埋藏成岩过程中经历了复杂的成岩演化,包括压实、胶结、交代和溶解,其中压实作用、碳酸盐胶结、石英加大、自生高岭石沉淀是造成储层物性降低的重要原因,颗粒表面绿泥石膜、长石及不稳定岩屑溶蚀对储层物性改善起到积极作用。

2) 长8储层处于中成岩A期,成岩序列为机械压实—早期绿泥石膜沉淀—Ⅰ型方解石胶结—石英次生

加大—酸性流体侵入—长石、岩屑溶蚀—自生高岭石、自生石英析出—自生伊利石沉淀—Ⅱ型方解石胶结。

3) 通过视压实率、视胶结率结合主要成岩事件特征将长8储层划分为5种成岩相类型,不同成岩相埋藏过程中孔隙演化定量计算表明由沉积作用造成岩石原始组分的差异是形成不同成岩相中成岩作用类型和强度差异的物质基础,成岩介质环境变化所控制了粘土矿物形成和碳酸盐岩胶结物沉淀以及长石溶蚀,是造成孔隙演化差异的主要原因。

4) 优质储层的分布与成岩相密切相关,分布于水下分流河道中的弱压实绿泥石胶结相和中压实次生溶蚀相砂岩物性最好,是研究区长8段砂岩储层中最有利的成岩相带。

参考文献

- [1] 高辉,李天太,解永刚,等.三角洲前缘亚相致密砂岩储层的成岩作用与有利成岩相带:以鄂尔多斯盆地子洲气田山23段砂岩为例[J].现代地质,2013,27(2):373-388.
- Gao Hui, Li Tiantai, Xie Yonggang, et al. Diagenesis and favorable diagenetic facies of tight sandstone reservoir in delta front subfacies: a case study on the shan₂ sandstone of Zizhuo gas field in Ordos Basin

- [J]. *Geoscience*, 2013, 27(2): 373–388.
- [2] 王峰, 陈蓉, 田景春, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长4+5油层组致密砂岩储层成岩作用及成岩相[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(2): 199–206.
- Wang Feng, Chen Rong, Tian Jingchun, et al. Diagenesis and diagenetic facies of the Chang 4+5 tight sandstone reservoirs in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(2): 199–206.
- [3] 张海涛, 时卓, 石玉江, 等. 低渗透致密砂岩储层成岩相类型及测井识别方法——以鄂尔多斯盆地苏里格气田下石盒子组8段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(2): 256–264.
- Zhang Haitao, Shi Zhuo, Shi Yujiang, et al. Diagenetic facies types and logging identification methods for low-permeability tight sandstone reservoir; a case study on the 8th member of Xiashihezi Formation in Sulige gasfield, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(2): 256–264.
- [4] 张峭楠, 胡江奈, 沙文武, 等. 鄂尔多斯盆地南部镇泾地区延长组沉积特征[J]. *矿物岩石*, 2000, 20(4): 25–30.
- Zhang Shaonan, Hu Jiangnai, Sha Wenwu, et al. The sedimentary characteristics of Yanchang Formation in Zhenyuan and Jingchuan districts, southern part of Ordos Basin[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2000, 20(4): 25–30.
- [5] 罗静兰, 李忠兴, 史成恩, 等. 鄂尔多斯盆地西南部上三叠统延长组长8、长6油层组的沉积体系与物源方向[J]. *地质通报*, 2008, 27(1): 101–111.
- Luo Jinglan, Li Zhongxing, Shi Chengen, et al. Depositional systems and provenance directions for the Chang 6 and Chang 8 reservoir groups of the Upper Triassic Yanchang Formation in the southwestern Ordos Basin, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(1): 101–111.
- [6] 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(自然科学版)*, 2004, 31(3): 273–281.
- Huang Sijing, Xie Lianwen, Zhang Meng, et al. Formation mechanism of authigenic chlorite and relation to preservation of porosity in non-marine Triassic reservoir sandstones, Ordos Basin and Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2004, 31(3): 273–281.
- [7] Jeffrey D G. Origin and growth mechanism of authigenic chlorite in sandstones of the lower Vicksburg formation, South Texas[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2001, 71(1): 27–36.
- [8] 刘春燕. 致密碎屑岩储层“甜点”形成及保持机理——以鄂尔多斯盆地西南部镇泾地区延长组长8油层组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(6): 873–879.
- Liu Chunyan. Formation and preservation mechanism of sweet spot in tight clastic reservoirs—A case study of Chang 8 oil layer of Yanchang Formation in Zhenjing area, southwest Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(6): 873–879.
- [9] Baker J C, Havord P J, Martin K R, et al. Diagenesis and petrophysics of the Early Permian Moogooloo Sandstone, southern Carnarvon Basin, Western Australia[J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(2): 250–265.
- [10] 张永旺, 曾溅辉, 曲正阳, 等. 东营凹陷砂岩储层自生高岭石发育特征与成因机制[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(1): 73–79.
- Zhang Yongwang, Zeng Jianhui, Qu Zhengyang, et al. Development characteristics and genetic mechanism of authigenic kaolinite in sandstone reservoir of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin. [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(1): 73–79.
- [11] 王琪, 糕喜准, 陈国俊, 等. 延长组砂岩中碳酸盐胶结物氧碳同位素组成特征[J]. *天然气工业*, 2007, 27(10): 28–32.
- Wang Qi, Zhou Xizhun, Chen Guojun, et al. Characteristics of carbon and oxygen isotopic compositions of carbonate cements in Triassic Yanchang sandstone in Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(10): 28–32.
- [12] 邹才能, 陶士振, 周慧, 等. 成岩相的形成、分类与定量评价方法[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(5): 526–540.
- Zou Caineng, Tao Shizhen, Zhou Hui, et al. Genesis, classification and evaluation method of diagenetic facies[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(5): 526–540.
- [13] 王昌勇, 王成玉, 梁晓伟, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区上三叠统延长组长8油层组成岩相[J]. *石油学报*, 2011, 32(4): 596–604.
- Wang Changyong, Wang Chengyu, Liang Xiaowei, et al. Diagenetic facies of the Chang8 oil-bearing layer of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Jiyuan area, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(4): 596–604.
- [14] 付晶, 吴胜和, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组储层定量成岩相研究[J]. *地学前缘*, 2013, 20(2): 86–97.
- Fu Jing, Wu Shenghe, Fu Jinhua, et al. Research on quantitative diagenetic facies of the Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(2): 86–97.
- [15] 罗静兰, 张成立, 闫世可, 等. 盆地埋藏史及其对砂岩储层物性演化的影响——以陕北延长油区砂岩储层为例[J]. *石油与天然气地质*, 2001, 22(2): 123–123.
- Luo Jinglan, Zhang Chengli, Yan Shike, et al. Effect of burial history on physical property of sandstone reservoir; take Yanchang oil region in north Shaanxi as an example. [J]. *Oil & Gas Geology*, 2001, 22(2): 123–123.
- [16] 吴小斌, 侯加根, 孙卫. 特低渗砂岩储层微观结构及孔隙演化定量分析[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2011, 42(11): 3438–3445.
- Wu Xiaobin, Hou Jiagen, Sun Wei. Microstructure characteristics and quantitative analysis on porosity evolution of ultra-low sandstone reservoir[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, 42(11): 3438–3445.
- [17] Scherer, M. Parameters influencing porosity in sandstones; a model for sandstone porosity prediction[J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 71(5): 485–491.
- [18] Beard D C, Weyl P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand [J]. *AAPG Bulletin*, 1973, 57(2): 349–369.
- [19] Ehrenberg S N. Measuring sandstone compaction from modal analyses of thin section; how to do it and what the result mean [J]. *Journal of Sediment Research*, 1995, 65(2a): 369–379.
- [20] Nguyen B T T, Jones S J, Gouly N R, et al. The role of fluid pressure and diagenetic cements for porosity preservation in Triassic fluvial reservoir of the Central Craben, North Sea [J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(8): 1273–1302.