

Diagenetic Characteristics of the Eocene Shahejie Formation Sandstone of the Shijiutuo Uplift in Bohai Sea

Yumin Qi

CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Tianjin
Email: qiym@cnooc.com.cn

Received: Feb. 5th, 2018; accepted: Feb. 19th, 2018; published: Feb. 26th, 2018

Abstract

The sandstone reservoirs are mainly controlled by diagenesis in the Eocene Shahejie Formation of the Shijiutuo Uplift in Bohai Sea. Using petrographic thin sections, casting thin sections, X-ray diffractometry, scanning electron micrograph observations, physical properties data and other analysis materials, diagenesis and porosity evolution characteristics are analyzed in the the Eocene Shahejie Formation Sandstone in Bohai Sea. The sandstone reservoir pores mainly consist of the intergranular pores and intragranular secondary pores. Compaction levels are incoordinate in different sandstones and the well-sorted and fairly coarse sandstones present relatively weak compaction. Calcite, ferrocalcite, dolomite, ferrodolomite and kaolinite are the major cements and other cements like authigenic quartz and illite are rarely observed in microscope. The latest diagenetic stage of the sandstones is the stage B of mesogenetic diagenesis and the most is evolved to the stage A of mesogenetic diagenesis. The sandstone diagenetic evolution sequence is established based on different diagenesis phenomena and relationship among them and fluid-inclusion homogenization temperatures. The sandstone porosity evolution features are inverted through quantitatively estimating the compaction intensity and the contents of authigenic minerals and dissolution. The relatively weak compaction, early hydrocarbon filling and feldspar dissolution benefit for the sandstone reservoir development, and the carbonate cements obviously damaged the sandstone reservoir.

Keywords

Bohai Sea, Eocene, Sandstone, Diagenesis, Porosity Evolution

渤海石臼坨凸起古近系沙河街组砂岩成岩作用特征

齐玉民

中海能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津
Email: qiym@cnooc.com.cn

收稿日期: 2018年2月5日; 录用日期: 2018年2月19日; 发布日期: 2018年2月26日

摘要

渤海石白坨凸起古近系沙河街组砂岩储层的发育主要受成岩作用的控制。利用普通薄片、铸体薄片、X衍射分析、扫描电镜和物性分析等实验测试资料, 分析了渤海石白坨凸起古近系沙河街组砂岩成岩作用和孔隙演化特征。研究表明, 砂岩储层孔隙类型主要为粒间孔、粒内溶孔; 不同类型的砂岩压实差异较大, 分选较好、粒度较粗的砂岩压实较弱; 自生矿物主要为(铁)方解石、(铁)白云石、高岭石, 其他胶结物(如自生石英、伊利石等)较少; 经历的最晚成岩阶段为中成岩B期, 大部分砂岩储层目前处于中成岩A期。根据成岩作用类型及其相互关系、包裹体均一温度等资料, 建立了成岩演化序列; 通过对压实作用、自生矿物和溶蚀的定量估算, 反演了砂岩储层的孔隙演化特征。对砂岩储层发育有利的成岩作用主要是整体压实作用不强、早期油气充注以及长石颗粒的溶蚀, 方解石胶结物对储层的破坏较显著。

关键词

渤海, 古近系, 砂岩, 成岩作用, 孔隙演化

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

砂岩是碎屑岩储层中最重要的一种储层类型。砂岩在成岩过程的压实作用、胶结作用和溶蚀作用等因素直接影响砂岩的储集性能[1], 因此, 开展砂岩成岩作用研究具有重要的理论和实践意义。成岩作用的概念由 Walther 于 1894 年提出后, 针对砂岩成岩作用的研究已有 120 多年的历史[2]。20 世纪 50~70 年代及其之前, 仅限于一些描述性的工作或单纯的岩石学方面的研究。20 世纪 70~90 年代开始, 砂岩成岩作用的研究取得重要进展, 其中最重要的是砂岩中发现大量由成岩作用形成的次生孔隙, 同时, 砂岩次生孔隙成因机理的研究也有了新进展[3] [4]; 隐蔽油气藏逐渐成为油气勘探的主要领域, 其所属层位多位于中深部, 而与溶蚀作用有关的次生孔隙存在与否是中深部储层能否成藏的关键, 与之相关的成岩作用研究也成为沉积学和储层地质学的一个极为重要内容[5]。进入 21 世纪后, 随砂岩油气勘探进入非常规勘探阶段, 研究则主要涉及孔隙保存的成岩作用机制、成岩作用的定量化研究以及可预测的动力学模式的建立等[6]。

渤海石白坨凸起古近系沙河街组砂岩储层埋深多大于 3000 m。勘探实践证明, 渤海海域埋深超过 3000 m 的储层物性普遍较差, 成为制约油气成藏的关键。因此, 寻找中深层储层中的相对优质储层至关重要。成岩作用与原生孔隙的保存和次生孔隙的形成有着密不可分的关系, 因此, 中深部储集层的成岩演化及其对孔隙演化产生何种影响是预测深部有利储集层必须要开展的工作[7]。石白坨凸起及其围区多个含油构造上陆续发现一批古近系沙河街组砂岩优质储层, 尤其钻探的 D4 井沙河街组获得高产油气流, 表明该地区中深层沙河街组具有极大的油气勘探开发潜力。石白坨凸起及其围区沙河街组砂岩相对优质

储层分布是决定油气藏分布的关键要素,但是前期研究[8] [9]注重单个成岩现象的描述,很少涉及不同成岩阶段成岩作用机制以及成岩现象之间的关系方面的研究,孔隙演化的研究以定性为主。因此,此次研究侧重于成岩现象的精细描述,对自生矿物之间及与其他成岩现象的赋存关系进行了深入刻画,建立了更精确的成岩演化序列;在不同成岩现象定量统计的基础上,反演了砂岩储层不同成岩阶段的孔隙演化特征。

2. 地质简况

石白坨凸起位于渤海湾盆地中北部,处于渤中凹陷和秦南凹陷两大生烃凹陷之间(图 1),油气源充足,是油气运移的优势区域[10] [11]。研究区沙河街组(E_2s)由下至上分别划分为沙四段(E_2s^4)至沙一段(E_2s^1),以断陷作用为主,形成了多凸多凹的构造格局[12]。沙四段沉积期为初始断裂期,总体上为干旱条件下的小型湖泊和冲积扇;沙三段沉积期为强烈裂陷期,水体变深,主要沉积物为半深湖~深湖相的大套暗色泥岩;沙二段沉积期湖水变浅,以滨浅湖沉积为主;沙一段沉积期裂陷作用加强,湖域面积进一步扩大,滨浅湖相发育广泛,深湖、半深湖范围扩大。

3. 岩石学及储集性特征

薄片观察和统计表明,研究区沙河街组砂岩表现为石英含量相对较低,平均值为 27.39%,岩屑、长石含量相对较高,平均值分别为 40.39%和 32.22%。岩石类型以岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩为主,分别占到了总样品数的 47.78%和 25.56%,其次为岩屑砂岩,占 19.17%,长石砂岩含量相对最少,仅占 7.5% (图 2)。岩石粒度以粗~细粒为主,占 64.76%,粉粒和不等粒分别占 11.43%、23.81%。砂岩基本上属于低杂基含量的净砂岩,86%的样品杂基含量分布低于 8%以下;具有差~中等的分选性,磨圆度主要为次棱角状,胶结类型以孔隙式和孔隙~接触式为主,颗粒接触关系主要为点接触,其次为线~点接触和线接触。可知,砂岩成分成熟度较低,结构成熟度中等。

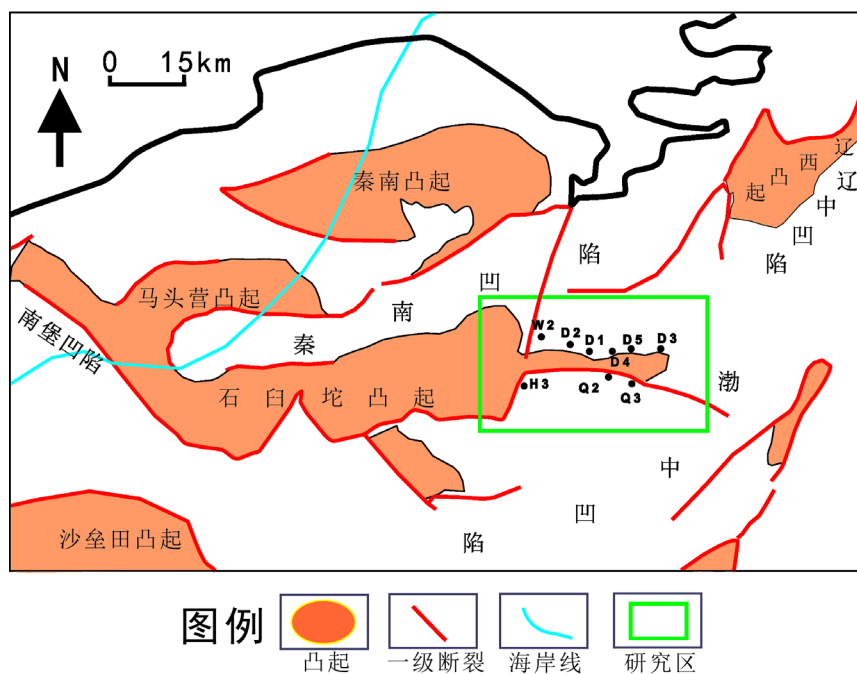


Figure 1. Locality of the study area

图 1. 研究区构造位置图

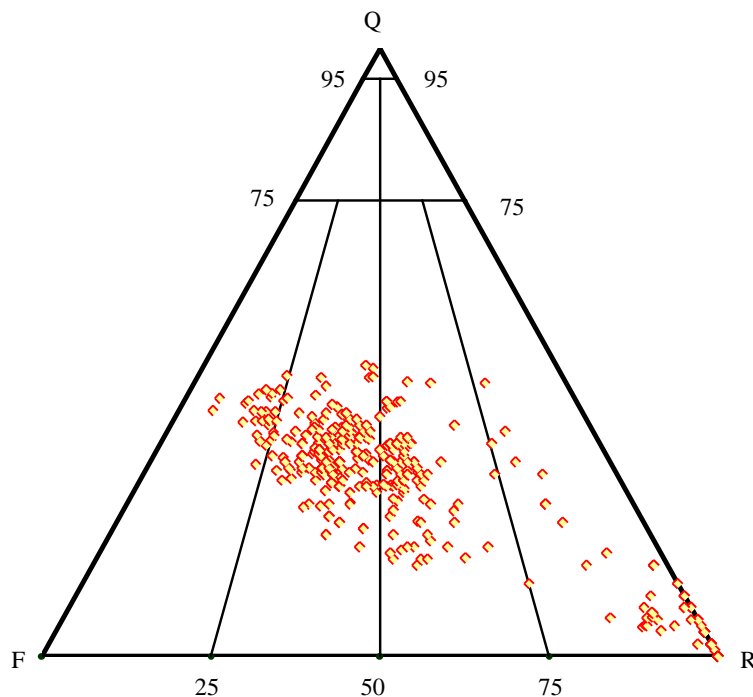


Figure 2. Triangulation point map of the sandstones
图 2. 砂岩三角投点图

铸体薄片观察和统计表明,沙河街组砂岩储层总孔隙率平均值在 10.59% 左右,主要的储集空间类型为粒间孔、溶蚀孔,其他类型的孔隙极少,主要为晶间孔以及少量微裂缝等(图 3、图 4)。岩心物性分析表明,砂岩孔隙度主要分布在 15%~30% 之间,占总样品数的 71%,平均孔隙度为 20.8%;渗透率主要分布在 1~500 mD 之间,占总样品数的 70%,平均值为 460.2 mD,说明研究区沙河街组砂岩主要发育高中孔~中渗储层。

4. 成岩作用特征

4.1. 自生矿物产状

通过对研究区沙河街组砂岩常规薄片、铸体薄片、阴极发光薄片、扫描电镜等的观察和描述,主要成岩作用类型包括压实作用、自生矿物的析出、溶蚀作用,其他成岩作用现象较少见。

4.1.1. 压实作用

压实作用在沙河街组砂岩储层中的表现具有较大的差异,在杂基含量少、粒度较粗、分选较好的砂岩中的压实作用并不强烈,主要表现为点~线接触,部分仅为点接触,但在杂基含量高、粒度细、分选差的砂岩中,压实对孔隙的破坏作用较大。根据粒间体积~负胶结物孔隙度关系分析表明,沙河街组砂岩遭受的压实破坏差异较大,较多物性差的储层遭受的压实破坏大,如含泥不等粒长石岩屑砂岩,粗-中粒岩屑长石砂岩普遍表现为遭受的压实破坏较弱(图 5)。

4.1.2. 自生矿物析出

自生矿物的析出主要取决于孔隙流体的成分浓度、PH 值、温度以及压力等条件。研究区沙河街组砂岩的自生矿物类型主要为碳酸盐矿物,如(铁)方解石、(铁)白云石,以及高岭石,少量其他胶结物,如自生石英、黄铁矿、伊利石、绿泥石等(图 6)。

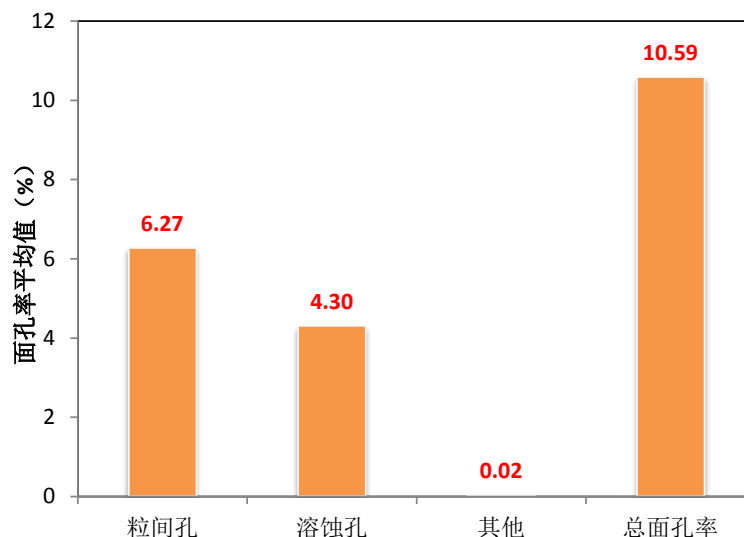
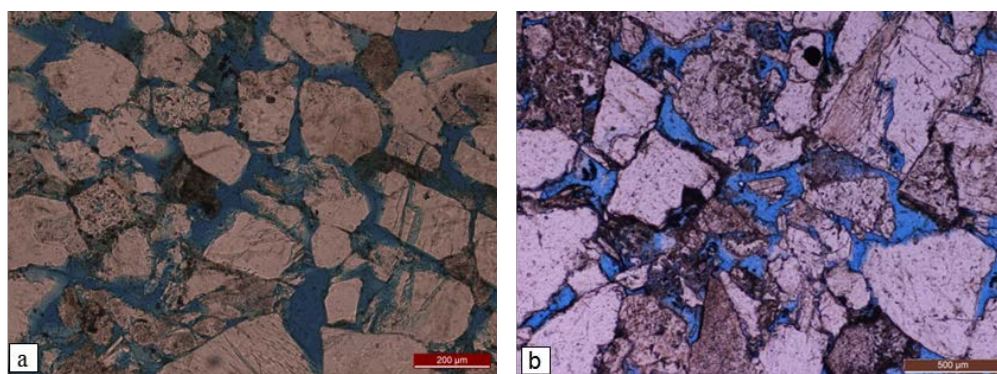


Figure 3. Plane porosity of different pores
图 3. 不同类型孔隙的面孔率



(a) 粒间孔与粒内溶孔, 中粒岩屑长石砂岩, D 1, 3209 m, E_2S^{1+2} , -; (b) 粒间孔与粒内溶孔, 粗-中粒岩屑长石砂岩, D 2, 3321.4 m, E_2S^{1+2} , -。

Figure 4. Types of the sandstone porosity
图 4. 砂岩孔隙类型

1) 石英

主要以孔隙充填、次生加大边的形式产出(图 7(a), 图 7(b))。自生石英晶体较为细小, 晶面较完整、洁净、晶棱清晰, 常呈它形粒状以集合体的形式产出; 受偏光显微镜分辨率的影响, 在偏光显微分析中容易低估其含量, 然而扫描电镜下可以明显观察到砂岩孔隙中有大量的自生石英晶体。在石英含量高的显微薄片, 常可见石英次生加大边, 但未见完整发育的次生加大边, 主要为 II~I 级加大边, 加大边薄, 分布不连续, 仅部分发育, 多存在于颗粒不接触部位, 表明次生加大作用主要形成于颗粒点~线接触之后。

2) 碳酸盐矿物

自生碳酸盐矿物在研究区沙河街组砂岩中普遍存在, 但分布不均, 主要有(铁)方解石、(铁)白云石, 少量菱铁矿。早期方解石呈孔隙式和连晶式产出(图 7(c)), 沉淀于岩石大规模压实作用之前, 往往具有很大的负胶结物孔隙度, 导致后期流体活动受到极大限制, 几乎不发生溶蚀作用[13]。中晚期碳酸盐胶结物多呈分散状充填于粒间孔及粒内溶孔中(图 7(d)), 使砂岩孔隙度降低, 储层质量变差, 是储层致密的重要因素之一。

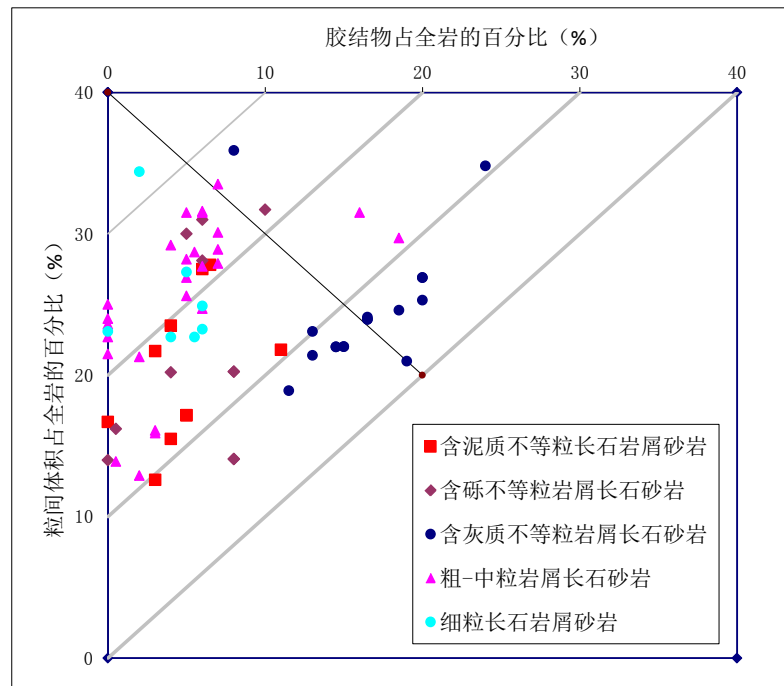


Figure 5. Relation diagram of intergranular volume and negative cementation porosity of the sandstones

图 5. 砂岩粒间体积 - 负胶结物孔隙度关系图

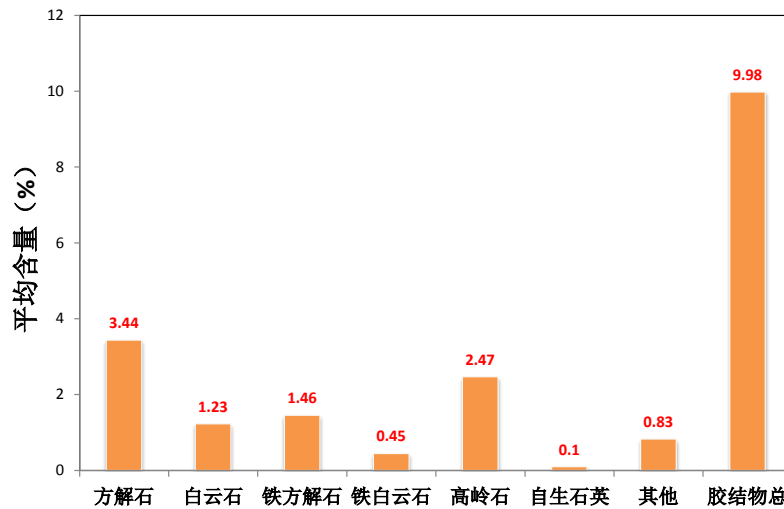


Figure 6. Average distribution histogram of the different cements

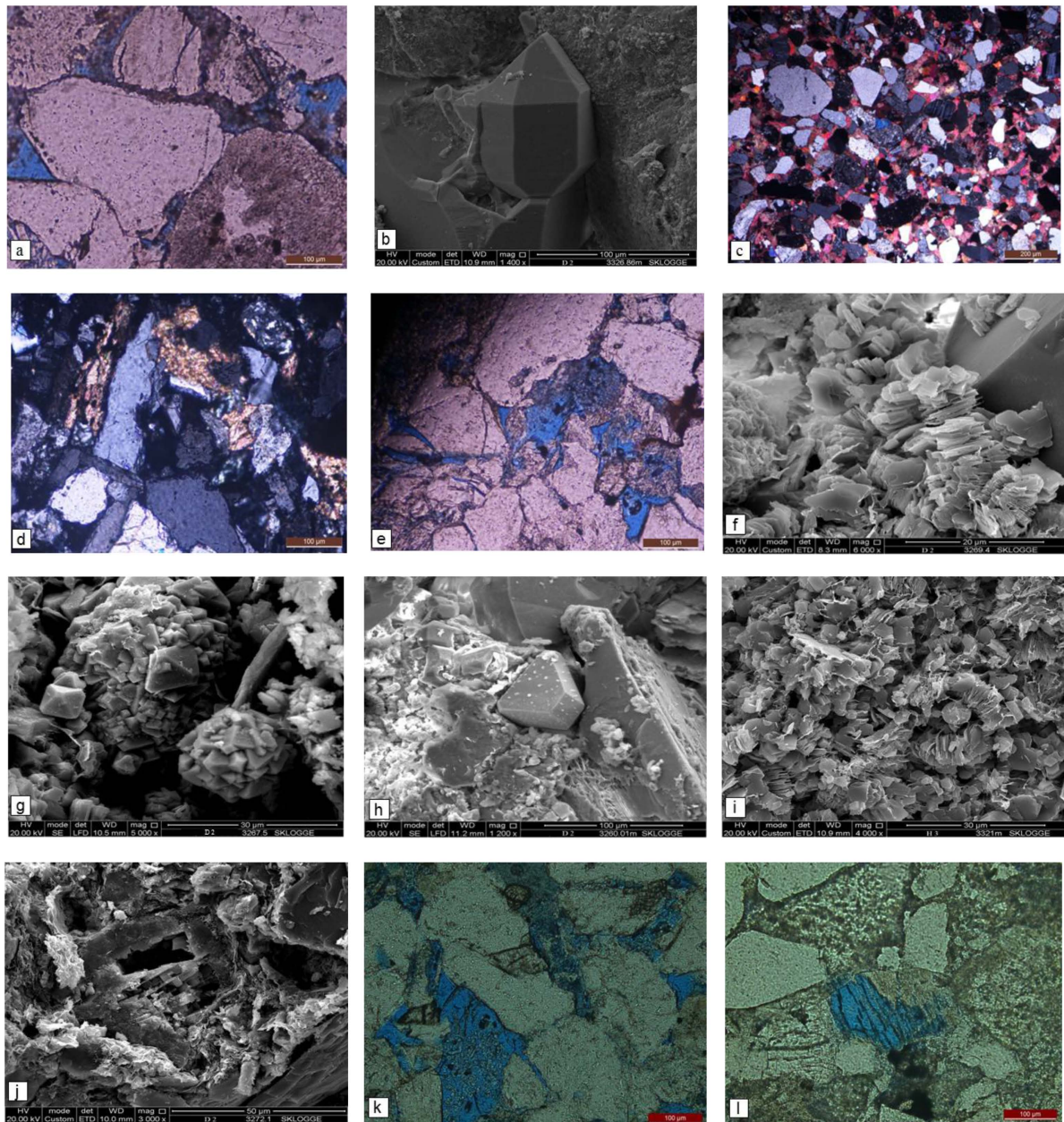
图 6. 胶结物平均含量分布直方图

3) 粘土矿物

自生粘土矿物较发育，主要是高岭石，少量伊利石，偶见绿泥石。

① 自生高岭石

铸体薄片和扫描电镜下，常见自生高岭石与长石溶蚀相伴生，显示二者成因上的联系。在显微镜和扫描电子显微镜下，高岭石呈假六方片状，集合体呈书页状或蠕虫状，富含晶间孔隙，主要以充填粒间孔、粒内溶孔的方式产出(图 7(e)-(f))。



(a) 石英Ⅱ级加大边, H 3, 3320.8 m, E_{2S}^{1+2} , -; (b) 自生石英晶体, D 2, 3326.86 m, E_{2S}^{1+2} , SEM; (c) 连晶方解石, W 2, 3327.36 m, E_{2S}^{1+2} , +; (d) 交代方解石, W 2, 3321.75 m, E_{2S}^{1+2} , +; (e) 粒间充填高岭石, H 3, 3327.93 m, E_{2S}^{1+2} , -; (f) 粒间充填高岭石, D 2, 3269.4m, E_{2S}^{1+2} , SEM; (g) 莓球状黄铁矿⁺, D 2, 3267.5 m, E_{2S}^{1+2} , SEM; (h) 晶粒状黄铁矿⁺, D 2, 3260.01 m, E_{2S}^{1+2} , SEM; (i) 粒内溶孔中高岭石向伊利石转化, H 3, 3321m, E_{2S}^{1+2} , SEM; (j) 长石粒内溶孔充填伊利石, D2, 3272.1m, E_{2S}^{1+2} , SEM; (k) 长石、岩屑溶蚀, H 3, 3327.93 m, E_{2S}^{1+2} , -; (l) 斜长石溶蚀, D 4, 3454.98 m, E_{2S}^{1+2} , -。

Figure 7. Types and occurrences of the cements and the dissolution
图 7. 自生矿物类型及赋存方式、溶蚀作用

② 自生伊利石

研究区自生伊利石主要呈丝发状、卷曲片状充填于孔隙及喉道中(图 7(g)~(h)), 部分充填状伊利石为高岭石伊利石化的产物, 部分自生伊利石为蒙脱石向伊利石转化的产物, 呈蜂巢状以颗粒包膜的形式产出。

4) 黄铁矿

沙河街组砂岩中的黄铁矿主要为莓球状, 少量为晶粒状(图 7(i)~(j))。莓球状黄铁矿主要与同生期和成岩早期的厌氧还原条件下的细菌硫酸盐还原作用有关; 晶粒状黄铁矿呈立方体状、八面体状等, 是温度、压力进一步升高的成岩环境中的产物, 主要产于后生成岩阶段, 其形成与热硫酸盐还原作用有关[14]。

4.1.3. 溶蚀作用

研究区沙河街组砂岩内骨架颗粒的溶蚀主要表现为碎屑长石和岩屑中铝硅酸盐矿物的溶蚀(图 7(k)~(l))。长石的溶蚀最为明显, 主要是钾长石和钠长石的溶蚀, 表现为沿颗粒边缘和解理缝的溶蚀, 部分长石被溶蚀成窗格状, 溶蚀程度更高的表现为铸模孔。岩屑的溶蚀则主要表现为岩屑中的铝硅酸盐矿物等易溶矿物(如长石等)遭受选择性溶蚀, 常形成粒内溶孔。填隙物的溶蚀主要表现为少量的方解石、白云石等碳酸盐矿物的溶蚀。

4.2. 成岩演化序列

4.2.1. 成岩现象的先后次序

自生矿物的赋存关系是指岩石中自生矿物的产出状态, 也直接反映了自生矿物形成的先后顺序, 因此是研究成岩演化、建立成岩演化序列的基础。由于自生矿物形成及颗粒溶蚀均需漫长的地质时间, 各成岩现象必然出现重叠[15]。

碳酸盐矿物(主要是方解石)有两种赋存状态, 一种是呈连晶状分布于粒间孔隙中(图 7(c)), 颗粒呈点接触, 是显著压实作用前的自生矿物, 属于早期自生矿物; 另一种为充填溶蚀孔隙以及交代碎屑颗粒(图 7(d)), 说明形成于岩屑、长石溶蚀之后。

自生石英有两种赋存形式(图 7(a)、图 7(b)), 一种是早期沿着石英颗粒边缘呈 II~I 级次生加大, 也可呈充填状石英晶体出现, 形成时间早。连晶方解石充填严重地区不发育自生石英, 可见连晶充填方解石早于自生石英的形成。另一种自生石英充填于溶蚀孔隙中, 比溶蚀作用稍晚。由于自生石英的沉淀需要酸性环境, 因此, 可以推测自生石英主要形成于早成岩早期相对开放的环境以及有机酸大量生成时期。

自生粘土矿物主要为高岭石, 此外还见有少量的伊利石。高岭石主要有两种产出形式, 一是充填于粒间孔隙中(图 7(f)), 形成时间较早, 扫描电镜下可见自生石英晶体之上生长高岭石, 表明高岭石形成晚于早期自生石英; 二是充填于岩屑、长石溶蚀孔隙中, 形成于颗粒溶蚀之后(图 7(e))。伊利石存在三种赋存方式: 1) 呈蜂巢状包覆于颗粒之上; 2) 呈丝缕状或卷曲片状充填于孔隙内(图 7(j)); 3) 表现为高岭石局部伊利石化(图 7(i))。蜂巢状伊/蒙混层由蒙脱石伊利石化转化而来, 形成最早; 充填于粒间的伊利石可由钾长石溶蚀和高岭石伊利石化形成, 其形成时间晚于钾长石溶蚀及高岭石形成; 高岭石伊利石化需要的较高的温度, 一般需大于 120℃~140℃, 因此, 其形成时间最晚。

研究区自生黄铁矿主要呈莓球状、晶粒状, 二者的形成机制不同。莓球状主要形成于同生期至早成岩阶段, 与还原环境下的还原硫酸盐菌的作用有关, 扫描电镜下可见莓球状黄铁矿被高岭石包裹(图 7(g)), 说明早期黄铁矿形成早于早期高岭石。溶蚀孔隙中充填的黄铁矿常与沥青质伴生, 说明黄铁矿的形成与油气充注具有密切的相关关系, 形成较晚。

综合上述现象, 可以归纳出研究区沙河街组砂岩主要成岩现象发生的大致先后顺序(由早到晚)如下: 水解作用→莓球状黄铁矿→连晶方解石→早期自生石英、石英次生加大→早期溶蚀→早期高岭石→晚期溶蚀→晚期高岭石→晚期石英→充填、交代状方解石→晚期黄铁矿→伊利石。

4.2.2. 最晚成岩演化阶段

通过对区内 6 口井岩屑、岩心采样进行粘土矿物 X 衍射分析发现, 粘土矿物包括伊利石、高岭石、

伊/蒙混层, 自 870~3300 m 粘土矿物中伊/蒙混层占 60%~90%伊利石, 3300 m 后伊/蒙混层急剧向伊利石转化, 储层发育段粘土矿物伊-蒙混层中的蒙皂石层含量介于 5%~20%之间, 处于有序混层带~超点阵有序混层带; 通过泥岩有机质镜质体反射率测定, 镜质体反射率值介于 0.5%~1.0%之间, 有机质演化处于成熟阶段。从部分自生矿物中获得的包裹体温度数据可知, 最高均一温度分布在自生石英中, 为石英颗粒的加大边, 其最高均一温度为 149℃; 其次是自生方解石, 最高均一温度为 147℃。因此, 综合判定研究区沙河街组砂岩储层经历了由同生期→早成岩期→中成岩期的演化, 目前主要储层处于中成岩 A 期, 部分已经到达中成岩 B 期。

4.2.3. 成岩演化序列

根据成岩作用类型及其相互关系、成岩作用温度和有机质成熟度等, 依照石油行业碎屑岩成岩阶段划分标准[15]将研究区沙河街组砂岩成岩阶段划分为同生阶段、早成岩阶段、中成岩阶段 A 期, 局部地区进入中成岩 B 期, 并建立了成岩演化序列(图 8)。

1) 同生阶段

同生阶段是指沉积物沉积以后, 到沉积物完全被新的沉积物覆盖而与水体脱离接触之前的, 温度为古常温。河流带来陆源碎屑沉积物, 以及 Fe、Mn 等淡水中最为丰富的元素在孔隙中沉淀。岩石固结程度极低, 原生粒间孔隙大量发育。该阶段所经历的主要成岩作用为铝硅酸盐骨架颗粒及同期火山物质的水化水解作用。

2) 早成岩 A 期

早成岩 A 期是各种成岩作用现象最为发育的成岩阶段, 铝硅酸盐骨架颗粒及同期火山物质的水化水解作用继续发生, 莓球状黄铁矿则在细菌硫酸盐还原作用下发生沉淀, 生物气阶段细菌作用产生少量有

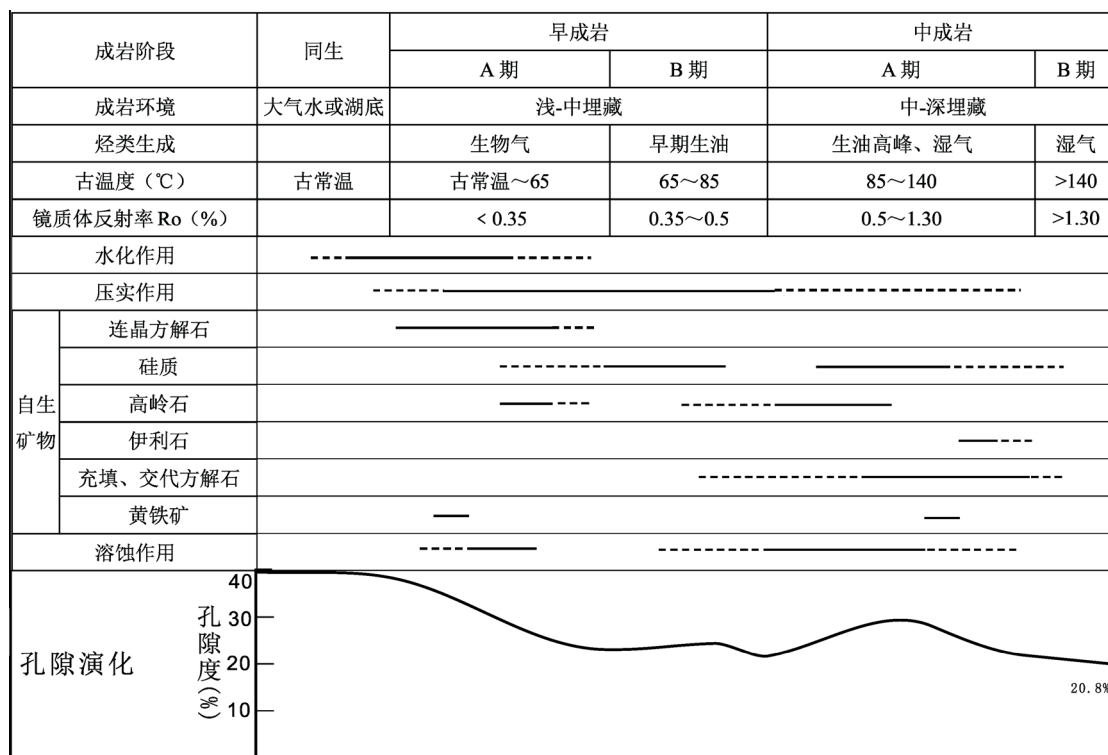


Figure 8. The diagenetic sequence and porosity evolution chart

图 8. 成岩序列与孔隙演化图

机酸并形成 CO_2 生成的早期高峰以及早期沉积流体溶解的 CO_2 对岩石碎屑造成早期溶蚀, 为成岩流体介质提供 Ca 、 Mg 、 K 、 Na 、 Fe 等金属离子以及 Si 等非金属离子。在酸性条件下, 粘土杂基蚀变成高岭石。在 pH 值相对较高的环境中, 发生早期方解石胶结作用, 形成大量的连晶方解石胶结物。沉积流体中溶解的、岩石碎屑水化作用以及溶解产生的 Si 在早期酸性环境中达到饱和而形成早期硅质胶结物, 主要以颗粒接触部位的石英次生边的形式产出。

压实作用使原生粒间孔隙度迅速降低, 在缺乏早期胶结作用的层段, 压实作用是该阶段孔隙降低的主要因素。一些塑性颗粒含量较高的砂岩因压实而变得致密, 致使水岩比很低而导致之后的胶结、溶蚀等化学成岩作用几乎不发育。早期连晶方解石使岩石的抗压实能力增强, 富含早期连晶方解石的砂岩表现为具有较高的负胶结物孔隙度。

3) 早成岩 B 期

早成岩 B 期古温度为 $65^\circ\text{C}\sim 85^\circ\text{C}$, R_o 为 $0.35\%\sim 0.5\%$ 。岩石进一步被压实, 塑性颗粒进一步变形, 颗粒呈点~线接触, 压实作用明显减弱, 化学成岩作用变得更为重要。由于早成岩 A 期孔隙流体的大量排出, 水化作用及有机质低成熟阶段排出的少量有机酸对长石等碎屑的溶蚀, 蒙脱石开始通过伊/蒙向伊利石转化, 成岩流体中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Fe^{2+} 等离子浓度的升高, 出现与埋藏成岩作用有关的自生石英及石英次生加大、碳酸盐等自生矿物的沉淀。本阶段碎屑的溶蚀产生少量次生溶孔, 但是因后期胶结物的大量沉淀而难以保存; 同时, 胶结作用也使后期压实作用趋缓。

4) 中成岩 A 期

研究区凉上段、沙一段该阶段的古温度为 $85^\circ\text{C}\sim 140^\circ\text{C}$; R_o 为 $0.5\%\sim 1.30\%$, 有机质处于成熟阶段。岩石固结程度较高, 岩石变得致密, 压实作用对粒间孔隙的影响趋缓, 压实作用的影响相对减小, 胶结作用是该阶段孔隙度降低的主要原因。中成岩 A 期有机质进入成熟阶段, 生成大量有机酸, 使孔隙流体在一定程度上偏酸性, 主要成岩作用为不稳定组分的溶蚀, 对矿物颗粒和易溶胶结物产生一定的溶蚀作用, 对储层物性有一定的改善。硫酸盐与烃类发生氧化还原反应生成 H_2S 与 Fe^{2+} 结合形成晶粒状黄铁矿。发生长石等铝硅酸盐矿物发生溶蚀, 释放的 K^+ 加之较高的成岩温度, 蒙脱石伊利石化速度加快, 并产生高岭石的伊利石化。当铝硅酸盐矿物溶蚀使孔隙流体中 Ca^{2+} 浓度提高时, 加之蒙脱石伊利石化向孔隙流体提供的 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子, 造成碳酸盐矿物的沉淀及其对长石、岩屑等颗粒的交代。长石等铝硅酸盐矿物的溶蚀以及蒙脱石伊利石化使孔隙流体中 Si^{4+} 浓度增加, 产生自生石英的沉淀, 主要以充填状石英晶体为主。

5) 中成岩 B 期

部分自生石英、自生方解石包裹体均一温度大于 140°C 及泥岩镜质体反射率 R_o 大于 1.3% , 表明研究区部分地区凉上段开始进入中成岩 B 期。持续的埋藏压实使储层进一步变得致密, 同时, 硅质胶结物和晚期碳酸盐胶结物继续沉淀, 使储层物性进一步降低。

4.3. 孔隙演化特征

选择 40% 作为研究区砂岩初始孔隙度[16]。沉积埋藏早期, 由于机械压实作用和早期碳酸盐矿物的充填, 使得孔隙度迅速减小至 30% 左右, 之后由于颗粒中的长石、岩屑中的长石斑晶等的水化、溶蚀等使得孔隙度略有增加, 之后由于长石溶解产物石英、高岭石等的充填, 进一步的机械压实破坏等, 孔隙度进一步减小到约 25% , 到早成岩 B 期末, 由于有机质演化形成的酸性条件, 导致部分长石进一步溶解, 产生少量的溶蚀孔隙, 孔隙度略有上升, 但随后形成的石英、高岭石对孔隙进行了一定的破坏, 直到有机质成熟的中成岩 A 期, 较多长石的溶解进一步有效提高了孔隙度, 溶蚀期末孔隙度接近 30% , 之后形成石英、高岭石、方解石、白云石、伊利石以及黄铁矿等自生矿物进一步减小了孔隙度, 使得最后砂岩

孔隙度接近 21% (图 8)。

5. 成岩作用对砂岩储层发育的影响

压实作用在成岩早期阶段对孔隙破坏作用最大, 研究区沙河街组砂岩储层整体压实作用较弱, 是原生粒间孔隙保存较好的重要因素。对于中深层储层而言, 胶结作用对储层破坏作用较大。早期自生矿物的析出具有双重作用, 一方面占据原生孔隙空间, 另一方面在一定程度上抑制了埋藏过程中压实作用, 对孔隙保存有利。晚期生成的自生矿物更多则是充填已有孔隙, 降低储层的孔渗性。自生矿物类型及其含量对砂岩的物性影响较为明显, 碳酸盐岩胶结物含量对与储层物性呈负相关, 特别是其中的方解石含量对储层物性的影响更为明显(图 9(a)), 而自生高岭石含量与物性成明显的正相关(图 9(b)), 其原因是高岭石是长石溶蚀形成的, 长石溶蚀的产物除高岭石、自生石英外, 还有孔隙。研究区沙河街组砂岩储层中次生孔隙较发育, 主要为岩屑、长石颗粒的粒内溶孔, 少量胶结物溶孔等, 约占总面孔率的 41%, 极大地改善了砂岩储层的物性。

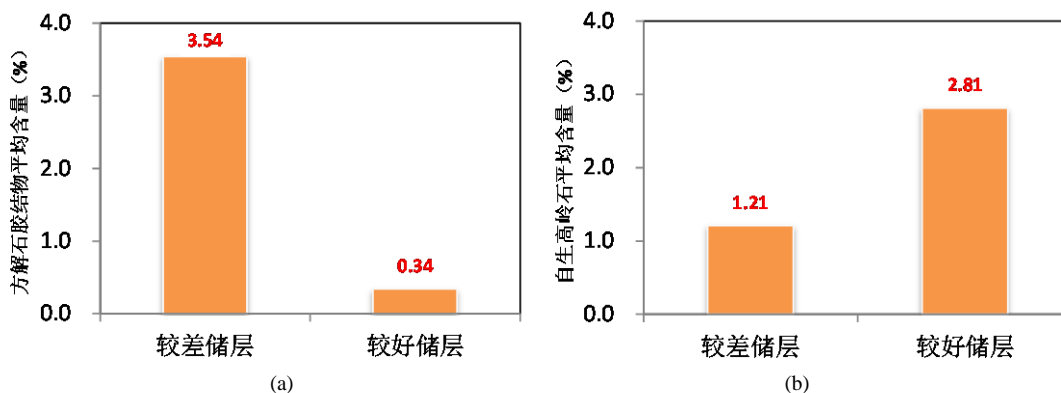
烃类进入储层后一方面可以抑制一部分成岩作用的进行, 另一方面可形成异常高压, 从而保护孔隙 [18]。烃类早期充注可抵消部分机械压实作用, 并且, 早期烃类的进入孔隙, 使最初的水-岩两相系统转变为水-油(气)-岩三相系统, 改变了成岩化学环境并且可阻止溶解物质的搬运, 抑制成岩胶结作用的进行, 从而使原生孔隙得以保存。

储层中的异常高压可减小小岩石骨架承受的有效应力, 从而减小压实作用对储层孔隙的影响, 使得部分原生孔隙得以保存(钟大康等, 2008)。研究区地层压力测试数据显示出沙河街组砂岩储层中有异常压力存在, A-3、35-1 构造存在明显异常高压, 地层压力系数为大于 1.18。因此推断研究区烃类的注入造成储层中具有异常高压, 且在储层形成过程中发挥了一定的作用。

6. 结论

1) 压实作用对孔隙的破坏较大, 但分选较好、粒度较粗的砂岩压实较弱; 自生矿物主要为(铁)方解石、白云石、高岭石, 少量石英、黄铁矿、伊利石等; 溶蚀作用主要表现为钾长石和钠长石的溶蚀。

2) 研究区沙河街组砂岩目前主要处于中成岩 A 期, 部分已经到达中成岩 B 期。根据自生矿物之间以及与其他成岩现象的赋存关系, 归纳出研究区沙河街组砂岩主要成岩现象发生的先后顺序, 进一步建立了成岩演化序列。



备注: 以行业标准[17]为评价基础, 文中较好储层与较差储层分别指孔隙度 $\geq 20\%$ 和渗透率 ≥ 10 mD、孔隙度 $< 20\%$ 和渗透率 < 10 mD 的储层。

Figure 9. Cements content in the sandstone reservoirs with different physical properties

图 9. 不同物性砂岩储层中胶结物含量差异图

3) 早成岩 A 期以压实和早期碳酸盐胶结物的破坏为主, 孔隙度由 40% 下降至 25%; 中成岩 A 期的有机酸的注入, 导致长石、岩屑大量溶蚀, 孔隙度由 25% 上升至 30%, 之后由于方解石、高岭石等进一步充填, 最终演化到目前的孔隙度 20.8%。

4) 研究区沙河街组砂岩储层整体压实作用较弱以及早期油气的注入, 是原生粒间孔隙保存较好的重要因素; 碳酸盐岩胶结物尤其是方解石对储层物性的破坏较明显; 溶蚀作用极大地改善了砂岩储层的物性。

参考文献 (References)

- [1] 西北大学地质系. 碎屑岩的成岩作用[M]. 西安: 西北大学出版社, 1986.
- [2] 余承玲. 四川盆地中西部地区上三叠统须家河组碎屑岩储层特征及成岩作用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- [3] 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.
- [4] Schmidt, V. and McDonald, D.A. 砂岩成岩过程中的次生储集孔隙[M]. 陈荷立, 汤锡元, 译. 北京: 石油工业出版社, 1982.
- [5] 刘文芳. 准噶尔盆地腹部侏罗系成岩作用及其对储层质量的控制作用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2008.
- [6] 张娜. 川西孝 - 新 - 合地区上、下沙溪庙组碎屑岩储层特征及成岩作用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- [7] 宋国奇, 刘鹏, 刘雅利. 渤海洼陷沙河街组四段下亚段成岩作用与储层孔隙演化[J]. 沉积学报, 2014, 32(5): 941-948.
- [8] 谢武仁, 邓宏文, 王洪亮, 等. 渤中凹陷古近系储层特征及其控制因素[J]. 沉积与特提斯地质, 2008, 28(3): 101-107.
- [9] 王元君, 冯明石, 王峻, 等. 渤中凹陷石南斜坡区古近系中深层优质储层特征[J]. 矿物岩石, 2012, 32(3): 77-84.
- [10] 石文龙, 赖维成, 魏刚, 等. 渤海 428 构造围斜坡区构造——岩性油气藏成藏规律与勘探潜力分析[J]. 中国石油勘探, 2012(2): 22-26.
- [11] 官大勇, 魏刚, 王粤川, 等. 渤海海域渤中地区中深层储层控制因素分析——以石臼坨凸起东段陡坡带沙河街组为例[J]. 天然气勘探与开发, 2012, 35(2): 5-7.
- [12] 吴磊, 徐怀民, 季汉成. 渤海湾盆地渤中凹陷古近系沉积体系演化及物源分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(1): 81-88.
- [13] 白玉彬. 鄂尔多斯盆地长 7 致密油成藏机理与富集规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014.
- [14] 王正瑛, 张锦泉, 王文才, 等. 沉积岩结构构造图册[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [15] 应凤祥, 何东博, 龙玉梅, 等. SY/T 5477-2003 碎屑岩成岩阶段划分[S]. 北京: 国家经济贸易委员会, 2003.
- [16] Beard, D.C. and Weyl, P.K. (1973) Influence of Texture on Porosity and Permeability of Unconsolidated Sand. *AAPG Bulletin*, 57, 349-369.
- [17] 任延广, 王成, 吴梅波, 等. SY/T 6285-2011 油气储层评价方法[S]. 北京: 国家能源局, 2011.
- [18] 吕正祥, 刘四兵. 川西须家河组超致密砂岩成岩作用与相对优质储层形成机制[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2374-2382.

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