

文章编号: 0253-9985(2011)01-0075-08

鄂西渝东地区石柱复向斜志留系小河坝组 致密砂岩成岩作用

王 勇¹, 施泽进², 刘亚伟³, 汪健辉⁴

(1. 成都理工大学 核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学“油气藏地质及开发工程”

国家重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 中国石化 江汉油田分公司, 湖北 潜江 433124

4. 中国石化 南方勘探开发分公司, 四川 成都 610000)

摘要: 通过普通薄片及铸体薄片鉴定、镜质体反射率、粘土矿物 X-射线衍射、扫描电镜等测试分析, 对鄂西渝东地区石柱复向斜志留系小河坝组成岩现象、成岩序列及成岩演化进行了深入的研究和探讨, 明确了该区小河坝组目前已达晚成岩-表生成岩期, 建立了该区成岩演化序列, 探讨了成岩作用对储层孔隙的影响及其致密化过程。研究表明, 该区小河坝组砂岩储层经历了沉积、同生期和早成岩期的致密化过程和中成岩期及表生成岩期的正向改造过程。由于早成岩期结束时储层非常致密的格局已经形成, 这种早期的致密化过程严重影响了次生孔隙的形成, 使得储层未能在次生孔隙形成的最佳时期内形成大量的次生孔隙。

关键词: 成岩作用; 成岩演化; 致密化; 小河坝组; 石柱复向斜; 鄂西渝东地区

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A

Diagenesis of tight sandstone in the Silurian Xiaoheba Formation of the Shizhu Synclinorium, western Hubei-eastern Chongqing Area

Wang Yong¹, Shi Zejin², Liu Yawei³ and Wang Jianhui⁴

(1. College of Applied Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu,

Sichuan 610059, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of

Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. SINOPEC Jiangnan Oilfield Company, Qianjiang, Hubei 433124, China;

4. SINOPEC Southern Petroleum Exploration and Development Company, Chengdu, Sichuan 610000, China)

Abstract Based on observations of a large number of cores and thin sections, and the experimental analysis of vitrinite reflectance(R_o), X-ray diffraction of clay minerals, scanning electron microscope (SEM), this paper discusses in detail diagenetic phenomenon, sequence and evolution of the Silurian Xiaoheba Formation in the Shizhu Synclinorium, western Hubei-eastern-Chongqing Area. It is defined that the Xiaoheba Formation currently is in the epigenetic-telogenetic stage. We establish the diagenetic evolution sequence in the area and discuss the influence of diagenesis on reservoir porosity and the densification process of reservoirs. According to this study, sandstone reservoirs in the Xiaoheba Formation experienced a densification process during sedimentation, syn-sedimentation and eogenetic stage and a positive alteration process during the mesogenetic and telogenetic stages. When eogenetic phase ended, reservoirs in the study area had become very tight, which badly affected the development of secondary pores. Therefore, secondary pores failed to be formed in the best period of their development.

Key words diagenesis; diagenetic evolution; densification; Xiaoheba Formation; Shizhu Synclinorium; western Hubei-eastern-Chongqing Area

收稿日期: 2010-09-11

第一作者简介: 王勇 (1979-), 男, 博士、讲师, 沉积储层及地球化学。

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国石油化工股份有限公司联合基金资助项目 (40739903)。

随着油气勘探的深入,人们逐渐认识到成岩过程其实才是储层优劣的最终决定因素,尤其是深部储层(大于 3 500 m)^[1],成岩过程对储层的影响明显大于沉积过程本身的影响。如塔里木盆地满加尔凹陷北部志留系砂岩,尽管目前其埋藏达 5 000~ 6 500 m,但却形成了一套平均孔隙度为 10%~ 15%,渗透率为 $10 \times 10^{-3} \sim 80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的优质储层,而在凹陷东部及南部这套储层虽然埋深较浅(3 700~ 5 000 m),但储层发育状况却比北部差得多,这与压实作用和胶结作用的先后顺序有着密切的联系^[2];又如目前中国海相碳酸盐岩储量规模最大、储层埋藏最深、碳酸盐岩储层次生孔隙最发育的普光气田,有机酸溶蚀和 TSR 溶蚀是普光优质储层次生孔隙大量发育的主要原因^[3-4],因此,优质储层的形成无不与成岩作用的后期改造紧密相关。基于上述认识,20 世纪 90 年代中期开始出现“成岩学家”(diageneticist)一词,这意味着国际上成岩作用研究在沉积学中的地位已经发生重要转变,一个新的研究群体或“共同体”已经形成^[5]。近年来,随着现代分析测试技术的发展及油气地质理论的创新,成岩作用研究已由原来的定性研究逐步转向量化分析,从简单的岩石学范畴拓展到盆地规模多因素的综合研究,并与沉积学、层序地层学、成藏动力学等学科紧密结合,成岩相、成岩演化数值模拟、成岩层序地层学以及砂岩动力成岩作用的概念及研究思路也应运而生^[5-15]。2005 年“第三届全国沉积大会”和 2008 年“第五届全国油气储层大会”均将成岩作用列为大会的重要议题,反映了成岩作用研究在我国开始逐渐得到重视。鉴于成岩作用对储层后期改造的重要性,本文对石柱复向斜小河坝组成岩作用和成岩演化进行了深入地分析,对于理解小河坝组储层的致密化过程和局部相对较好的储层的形成机制具有重要的理论意义。

1 地质概况

石柱复向斜位于重庆东部与湖北西部交界处,属于四川盆地东部边缘,为七岳山复背斜与方斗山复背斜所挟持的范围内,面积约 4 300 km²^[16](图 1)。由于前期勘探主要是针对海相碳酸盐岩开展的,而将海相碎屑岩沉积的志留系一直作为区域性的烃源岩和盖层来认识,致使其基础地质工作研究

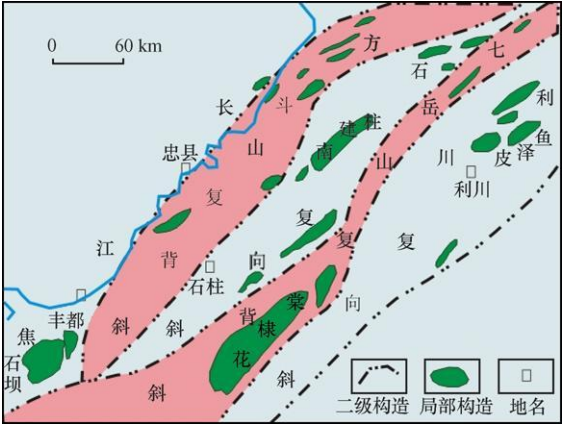


图 1 石柱复向斜构造简图
Fig. 1 Outline map showing structures in the Shizhu Synclinorium

明显不足,因此开展沉积相、层序地层的精细研究及成岩作用研究,是本区志留系地层开展进一步勘探的基础。本文重点探讨该区小河坝组成岩作用。

研究区小河坝组为一套过渡沉积体系的三角洲沉积物^[17],沉积了一套较厚的砂体,岩性以粉砂岩为主,夹少量细砂岩。岩石中泥质含量高,泥质常夹于粉砂岩中呈纹层或条带状产出。储层平均孔隙度为 2.74%,渗透率为 $0.083 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为典型的致密砂岩储集体。成海^[18]认为石柱复向斜满足深盆地形成的 3 个基本地质条件(充足的气源、连片的致密砂岩储集层和稳定的负向构造),将这一地区的天然气定义为深盆地,作者认为能否将其定义为深盆地还有待商榷,但有一点是肯定的,研究区有充足的气源和大套的致密砂岩储集层,具有良好的勘探前景。

2 主要成岩作用类型

砂岩自沉积后随埋深的不断增加,所经受的温度、压力及孔隙水的物理化学性质不断变化,导致岩石成分、孔隙结构、储集性能等在多种成岩作用的共同影响下发生复杂的变化而保存至今。通过普通薄片、铸体薄片镜下观察及扫描电镜、X-射线衍射等研究表明,本区小河坝组所经历的成岩作用主要有压实作用、胶结作用、溶解作用与破裂作用。

2.1 破坏性成岩作用

2.1.1 压实作用

压实作用表现为当堆积的沉积物在上覆重力

作用下, 地层水不能相应地排出时, 产生液化。当松软沉积物的内部改造位移不大时, 泥质层形成变形纹层, 包绕砂质层或嵌入砂质层中, 而砂质层经液化后可沿泄水流动方向向上注入; 当上覆为不透水泥质层时, 砂质沿泄水沟垂直切穿上覆泥质层形成砂岩脉 (图 2a), 而未切穿上覆泥质层时, 砂质堆积在泄水口形成小锥体或透镜体 (图 2b)。在泥质粉砂切穿砂质层时, 可发生砂质层的断裂。随着埋深的增加, 砂粒接触点所承受的压力比正常孔隙流体压力高, 其溶解度增加, 导致砂质碎屑呈嵌合接触或缝合线接触, 砂质透镜体或砂球内因压溶作用造成硅质胶结物呈石英次生加大边产出。大多数岩石经压实压溶作用后, 岩石中孔隙减少甚至消失。按照常用的压实强度分级, 区内志留系小河坝组砂岩为中-强压实。

2.1.2 胶结作用

1) 粘土杂基胶结作用

根据岩石薄片资料并参照 X-射线衍射分析数据, 粘土杂基胶结物主要以伊利石、伊蒙混层矿物、绿泥石作为粉砂岩的胶结物或作为泥质层夹于粉砂岩中 (图 2c)。粘土杂基在小河坝组储层中普遍发育, 主要以两种方式产出: 一是孔隙充填式, 即粘土杂基主要以集合体的形式充填于细砂或粉砂粒间孔隙中, 这种粘土矿物主要为与碎屑同沉积的机械搬运粘土矿物, 也叫泥质杂基, 在成岩期部分有重结晶现象。受沉积环境影响, 这些泥质物通常构成泥质纹层, 但已不属于碎屑胶结物的范畴而是砂泥混积物。二是以粘土薄膜形式的形式产出, 即自生粘土矿物平行于碎屑颗粒表面分布, 或在颗粒表面上形成粘土包壳。从粘土包壳与颗粒的接触形式来看, 它们是在机械压实后期开始形成的, 矿物成分主要为重结晶的伊利石或较纯净的绿泥石。

粘土矿物的胶结作用不仅减少了岩石的孔隙空间, 而且对喉道的影响极大, 甚至堵塞喉道而使渗透率大大降低。大多数情况下, 由粘土杂基胶结的粉砂岩中往往没有粒间孔隙发育。

2) 碳酸盐胶结作用

碳酸盐胶结物以方解石最为常见, 是研究区小河坝组最广泛的一种胶结现象, 在各剖面不同层段中都发育, 形成时期从同生期一早成岩期一晚成岩期均有出现。方解石胶结物有两种:

一是从同生期一早成岩期富含钙质的孔隙水中沉淀出的无铁方解石, 通常在细砂、粉砂中以晶粒状胶结物出现, 而在砂质透镜体、砂球中多呈连生式胶结; 另一种是形成于晚成岩期的铁方解石, 这种方解石形成于溶解作用之后, 以充填次生粒间孔为主, 呈层状分布或充填于透镜状、球状砂体的次生孔隙中, 多呈连生式胶结, 堵塞砂岩孔隙, 铁方解石的充填作用致使岩石储集物性遭到极大的破坏。

3) 硅质胶结作用

硅质胶结表现为与石英颗粒光性方位的同轴增生, 即围绕相应的石英颗粒表面产生次生加大, 小河坝组砂岩中石英次生加大现象通常发育于早成岩阶段一中成岩阶段。对几条实测剖面中粉砂岩样品的观察发现, 石英次生加大边多数发生在砂球及透镜状砂体内, 呈斑状分布, 多形成于早成岩期一中成岩期, 成因与成岩压实压溶作用和粘土转化的化学物质迁移有关。大多数砂球及透镜状砂体内由较纯净的石英砂构成, 石英接触紧密, 以线及缝合线接触为主, 石英次生加大发育程度中等。但在少量细粒石英砂岩中, 可见到砂岩粒间孔中有发育的次生加大现象, 通常以 II 级加大为特征, 堵塞了部分原生粒间孔。

4) 自生菱铁矿

小河坝组中自生菱铁矿普遍发育, 遍及剖面的各个层段中。自生菱铁矿在储层中以自形菱面体或集合体零星分布于粉砂岩岩层中, 在少部分粉砂岩中呈密集斑点状分布, 含量可达 20%。菱铁矿大小不等, 粒径为 0.03~0.50 mm 左右, 岩石中分布较均匀。各剖面中菱铁矿普遍氧化并伴有溶解, 为表生期暴露于大气水氧化环境所致 (图 2d)。菱铁矿溶蚀孔多以粒内溶孔和铸模孔为主, 一般呈分散状分布, 基本不连通。尽管菱铁矿溶蚀孔普遍发育于砂质层中, 但由于溶解作用是后期地表淡水溶蚀, 因此对储层建设意义不大。

2.2 建设性成岩作用

2.2.1 溶蚀作用

溶蚀作用对储层具有建设性作用。据显微镜和扫描电镜观察, 溶蚀作用主要出现于粗粉砂岩、细-粗粉砂岩中, 发生于早成岩期一中成岩期和表生期。溶蚀作用分为成岩水溶蚀及淡水溶蚀,

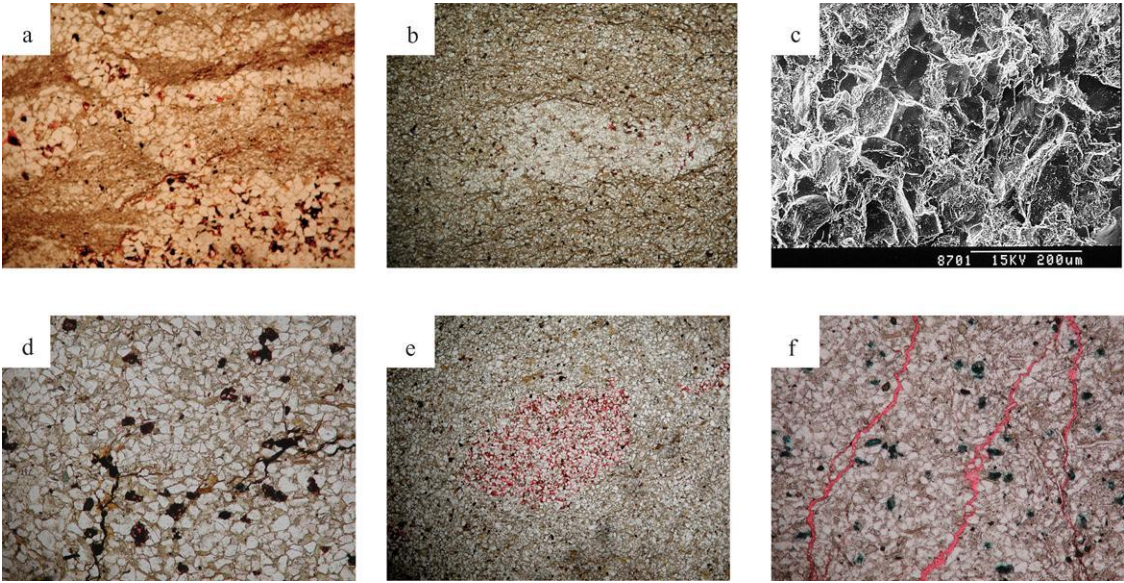


图 2 石柱复向斜志留系小河坝组成岩显微图片

Fig. 2 Micrographs of diagenesis of the Silurian Xiaheba Formation in the Shizhu Synclinorium

a 泄水沟垂直穿切上覆泥质层形成砂岩脉, 黄草场剖面; b. 砂质堆积在泄水口形成小锥体或透镜体, 三泉剖面; c. 颗粒间为伊利石胶结物, 部分伊利石呈薄膜状, 黄草场剖面, 扫描电镜; d. 微粒泥质岩屑石英砂岩菱铁矿氧化并伴有弱溶蚀现象, 双留坝剖面; e. 球状砂体中的粒间溶孔, 三泉剖面, 铸体薄片; f. 泥质岩屑石英粉砂岩中的破裂缝, 黄草场剖面, 铸体薄片

早-中成岩期的溶蚀作用以成岩水溶蚀为主, 发生在粉砂岩层中的透镜状、斑块状砂质体中(图 2e)。被溶组分主要为连生式无铁方解石胶结物, 少部分为长石。从整个层段的各类岩石看, 溶孔分布极不均匀, 溶蚀发育区通常为斑块状、透镜状及层状分布, 少量为细分散状溶孔, 在含泥质杂基的粉砂岩中少见溶蚀。另一种溶蚀主要发生在表生期, 以菱铁矿和晚期充填粒间铁方解石溶蚀为主, 从早期无铁方解石胶结至表生期铁方解石溶解, 是一种溶蚀—充填—再溶蚀过程。此外, 在部分破裂缝边缘也有较弱的溶蚀作用。

2.2.2 破裂作用

破裂缝是岩层在外部应力作用下变形形成的, 而溶缝是在破裂缝基础上, 地下流体沿破裂缝两侧溶蚀, 使破裂缝宽度扩大而成。理论上这两类破裂缝在改善储层物性和扩溶储集空间两个方面都起着重要作用。在小河坝组砂岩中, 破裂缝相对较发育, 裂缝主要出现在砂泥互层的砂质岩层中, 泥岩中虽然也见有破裂缝, 但相对于砂岩明显偏少。大多数破裂缝细而短, 缝宽约 0.01~0.10 mm, 少数可达 0.50 mm。溶蚀破裂缝对致密

岩层渗透率增大起着重要的作用(图 2f)。

3 成岩作用阶段划分

本文主要以粘土矿物组合及伊/蒙混层比、岩石中镜质体反射率以及自生矿物特征为成岩作用阶段划分的主要依据。

沉积岩粘土矿物 X-射线衍射定量分析(表 1)显示小河坝组砂岩中粘土矿物主要为伊利石、绿泥石, 部分岩石中尚存在伊/蒙混层和蒙脱石。各样品中伊利石含量较高, 其次为绿泥石及伊/蒙混层。粘土以泥质杂基和自生粘土混合组成, 常见的粘土矿物组合以伊利石+绿泥石为主, 其次为伊利石+伊/蒙混层+绿泥石, 两种组合反映了区内粘土矿物在成岩过程中的变化趋势。依据 2003 年中华人民共和国石油天然气行业新的成岩阶段划分标准(SY/T5477—2003), 按粘土矿物的分带特点及其与成岩阶段和有机质热成熟度的关系, 小河坝组砂岩成岩阶段已达到晚成岩—表生成岩期, 有机质演化处于成熟—过成熟期。

岩样中有机质镜质体反射率是温度的函数, 在成岩过程中经热演化作用会使镜质组分的反射

表 1 石柱复向斜志留系小河坝组粘土矿物 X-射线衍射分析结果

Table 1 Results of X-ray diffraction of clay minerals in the Silurian Xiaheba Formation of the Shizhu Synclinorium

样品编号	剖面	粘土矿物, %		
		伊利石	伊 蒙混层	绿泥石
N6668	三泉	52	24	24
N6669	小河坝	50	15	25
N6670	三泉	63	0	37
N6671	冷水溪	78	13	9
N6672	冷水溪	57	0	43
N6673	小河坝	82	0	18
N6674	双流坝	66	0	34
N6675	黄草场	50	0	50
N6676	双流坝	50	0	50
N6677	黄草场	54	0	46

率增高。应用镜质体反射率可以确定岩石所经受的最高温度及有机质的成熟度, 可作为划分成岩阶段的定量标准, 通常情况下, 将 R_o 数据与岩石学结果联系起来进行研究, 以便得到更为准确的结果。为此, 我们选了 7 件样品做了镜质体反射率测定, 测点数在 9~13。结果表明, 该区间测点镜质体反射率均大于 1.7%, 在 1.75%~1.79% 之间 (表 2), 这个 R_o 数据远远高于石油窗的 0.6%~1.2%, 按照中石油 (2003) 成岩阶段划分方案, 研究区的成岩演化达到晚成岩阶段, 这与 X-衍射分析结果相一致。

自生矿物是划分成岩阶段的重要标志之一。石英是小河坝组常见的自生矿物, 常以石英加大边的产出方式, 且通常发育于砂质透镜体和砂球中, 常见 I-II 级加大, 大多数石英加大边较窄, 少数砂岩中可见具自形晶面特征的石英加大边。扫描电镜显示部分岩石中局部粒间孔中伴生石英小

表 2 石柱复向斜志留系小河坝组镜质体反射率测定

Table 2 Measured R_o of the Silurian Xiaheba Formation in the Shizhu Synclinorium

样品编号	R_o , %	测点数 n	标准偏差, %
07255	1.76	9	0.01
07255	1.79	13	0.02
07255	1.75	11	0.05
07255	1.75	8	0.03
07255	1.77	13	0.03
07255	1.81	9	0.03
07255	1.79	13	0.03

晶体。总体上看, 由于受压实作用、岩石粒度、砂质透镜体等因素的限制, 自生石英次生加大不太发育。砂岩中的加大级别和自形程度, 可以反映成岩阶段达到晚成岩期, 与成岩酸性水最活跃的时期相吻合。

4 志留系小河坝组砂岩成岩演化及储层致密化过程

通过以上分析可知, 小河坝组经历了同生期、早成岩 A 和 B 期、中成岩 A 和 B 期、晚成岩期及表生期 (图 3)。

沉积期研究区主要处在三角洲前缘的沉积环境中, 沉积物较细, 且泥质含量高, 奠定了该区致密储层的物质基础。在同生期至早成岩 A 早期, 岩石处于弱固结-半固结状态, 机械压实作用易于发生, 由于此时沉积物埋藏较浅, 机械压实量有限, 到早成岩 A 期结束早成岩 B 期开始时, 压实作用达到顶峰, 到早成岩 B 期结束时压实、压溶作用基本停止。同时, 在早成岩 A 和 B 期, 随着岩石埋藏深度的增加和成岩环境的变化, 岩石中开始出

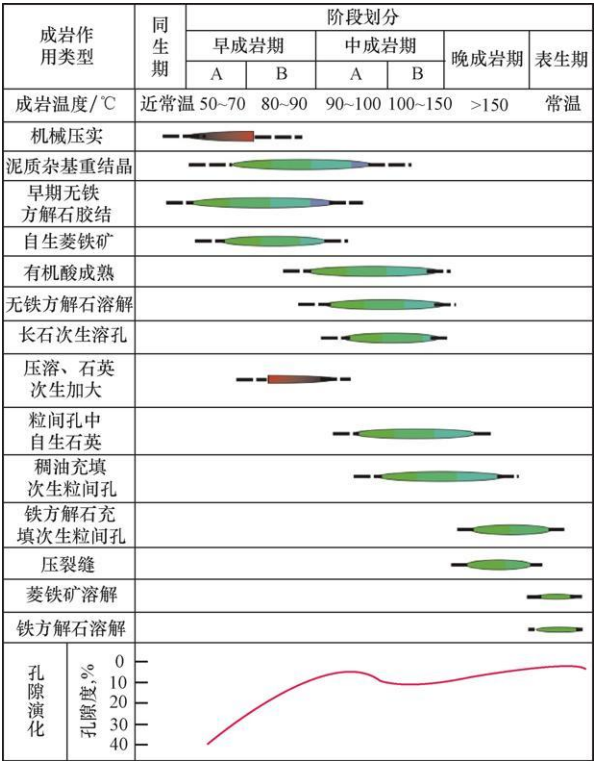


图 3 石柱复向斜志留系小河坝组储集砂岩成岩演化序列
Fig 3 Diagenetic evolutionary series of reservoir sandstones in the Silurian Xiaheba Formation of the Shizhu Synclinorium

现早期无铁方解石胶结物和自生菱铁矿,它们充填了大部分剩余原生空间。早成岩期是岩石致密化的重要时期。早成岩结束时,研究区砂岩孔隙度由沉积之初的 36.4% (由 Beard和 Weyl在 1973 提出的砂岩初始孔隙度计算式得来)降至 0.8% 左右 (图 4), 储层已经变得相当致密。随着沉积埋深的继续增加, 沉积物开始进入中成岩期, 此时下伏龙马溪组中的泥岩有机质已逐渐进入成熟阶段, 参与成岩反应的水介质具有强酸性。这一阶段最重要的成岩作用是早期方解石胶结及长石在酸性环境中的溶蚀作用, 形成了一定数量的球状或透镜状溶蚀斑块 (图 2e)。该过程一直持续到晚成岩初期, 但可惜的是由于此时的岩石已经变的非常致密, 也没有因构造活动形成裂缝, 使得酸性流体在岩层中的流动能力受到了很大的限制, 从而造成了在这一次生孔隙形成的最佳时期内形成的次生孔隙量非常有限。经铸体薄片统计, 这一阶段形成的次生孔隙量仅 1.7% 左右 (图 4)。同时, 在酸性环境下, 部分剩余粒间孔中开始出现很少量自生石英。进入晚成岩期后, 由于有机质

的排酸能力开始降低, 孔隙水的 pH 值开始增大, 变为弱碱性, 铁方解石开始沉淀, 占据了很少一部分原生和次生孔隙, 同时受构造作用影响, 志留系地层开始抬升, 出现了一定数量的破裂缝, 这些破裂缝对储层的渗透率有一定的改善作用, 但对孔隙度的贡献甚小。这一时期内成岩作用对储层孔隙度的影响很小。晚成岩期后, 小河坝组部分暴露于地表, 岩石中部分矿物发生氧化和溶蚀, 主要表现为菱铁矿普遍遭受氧化转变成褐铁矿, 并且溶蚀形成了少量的粒内溶孔和铸模孔, 据铸体薄片统计, 表生期形成的方解石及菱铁矿溶孔和铸模孔约占 0.3% (图 4)。

5 成岩强弱对储层的影响

从区域上来看, 在不同的地区, 成岩作用的强弱也存在一定的差别, 造成了即使是在同一沉积微相中的砂体, 在不同的区域其物性也存在较大的差别 (表 3)。在 4 条不同区域剖面中, 双流坝剖面的孔隙度明显高于其他 3 条剖面。镜下统计表

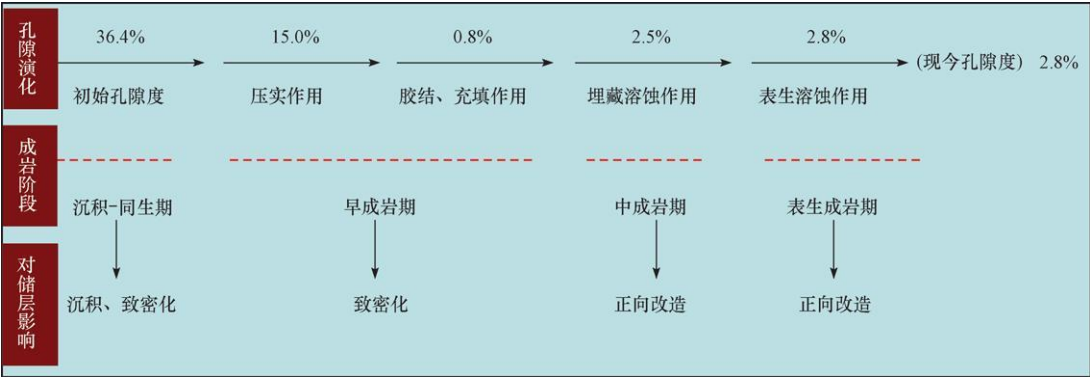


图 4 石柱复向斜志留系小河坝组孔隙演化及致密化过程

Fig. 4 Evolution of pores and their densification process in the Silurian Xiaohedaba Formation in the Shizhu Syncline

表 3 石柱复向斜志留系小河坝组各剖面储层孔隙度及成岩影响状况统计

Table 3 Statistics of the average porosity and diagenetic impacts of reservoirs on the different sections of the Silurian Xiaohedaba Formation in the Shizhu Syncline

	剖面			
	三泉	黄草场	双流坝	小河坝
样品沉积环境	水下分流河道	水下分流河道	水下分流河道	水下分流河道
平均孔隙度, %	1. 58	1. 62	5. 38	1. 19
压实 (中- 弱压实样品频率)	0. 46	0. 44	0. 56	0. 53
胶结物含量, %	15. 21	15. 80	9. 99	12. 33
溶蚀强弱 (次生孔面孔率), %	2. 13	1. 44	2. 10	0. 94
(微)裂缝 (有裂缝的样品频率)	0. 30	0. 46	0. 55	0. 20

明(表 3), 双流坝剖面相对于其他 3 个剖面而言, 其成岩具有以下特点: 1) 压实作用弱, 这使得其有可能保留较多的粒间孔; 2) 胶结作用较弱, 胶结物含量最低, 即被胶结物充填的粒间孔可能较少, 使其可能残余较多的粒间孔; 3) 双流坝剖面是除三泉剖面外溶蚀作用最强的剖面, 溶蚀作用是对储层储集性能最直接的改善; 4) 裂缝发育情况统计表明, 双流坝剖面中有超过一半的样品有裂缝或微裂缝发育, 明显高于其他剖面。受以上因素的影响, 在双流坝地区形成了一套相对较好的储层。因此, 虽然区内储层整体比较致密, 但在有利的成岩组合(弱压实 + 弱胶结 + 强溶蚀)区域中, 仍然可以形成相对较好的储层。

成岩作用的差异性导致在相同沉积环境中的砂物性产生了差异, 但由于该区勘探程度低, 工作开展时工区内钻至志留系的井只有 1 口(建深 1 井), 仅凭几条剖面 and 1 口井很难进行成岩相、成岩层序地层学以及砂岩动力成岩作用等方面的研究, 但随着勘探的深入, 这些工作将陆续地开展, 为在本区志留系致密砂岩中寻找油气提供必要的指导。

估计全球致密砂岩气资源量为 $600 \times 10^{12} \sim 3\,000 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 是常规天然气资源的 1~5 倍^[19]。我国一些大型盆地中已经发现了资源量可观的致密砂岩气藏, 如鄂尔多斯盆地的大牛地气田^[20]、四川盆地的新场气田^[21]、吐哈盆地的小草湖气田^[22]等, 这些气藏的发现和开发是对我国常规储层油气藏的有益补充, 同时也对油气勘探开发工作者提出了更高的要求挑战, 我国很多学者^[23-26]已经开始关注致密砂岩气藏的勘探与开发了。由于我国常规储层气藏数量有限, 今后将较多的面临致密砂岩含气区^[27]。因此, 尽快形成一套针对致密砂岩行之有效的勘探和开发手段已成当务之急。

6 结论

1) 工区小河坝组砂岩主要成岩作用有压实作用、胶结作用、溶蚀作用、破裂作用, 其中压实和胶结作用是储层致密化的主要原因, 而溶蚀作用、破裂作用则对储层起到了一定的改善作用。

2) 小河坝组砂岩中粘土矿物主要为伊利石、绿泥石, 部分岩石中尚存在伊蒙混层和蒙脱石, 且其镜质体反射率均大于 1.7%, 说明本区有机质演化已达到成熟 - 过成熟阶段, 成岩阶段已进入

晚成岩 - 表生成岩阶段。

3) 目前的研究表明, 小河坝组砂岩储层经历了漫长的成岩演化过程, 沉积、同生期和早成岩期主要为致密化过程, 中成岩期及表生成岩期则主要为储层的正向改造过程。但因早成岩期结束时, 受强烈的压实和胶结作用的影响, 储层非常致密的格局已经形成, 这种致密性严重影响了次生孔隙的形成, 使得储层未能在次生孔隙形成的最佳时期内形成大量的次生孔隙。

参 考 文 献

- [1] 吴富强, 鲜学福. 深部储层勘探、研究现状及对策 [J]. 沉积与特提斯地质, 2006, 26(2): 68-71.
Wu Fuqiang Xian Xuefu. Current state and countermeasure of deep reservoirs exploration [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2006, 26(2): 68-71.
- [2] 钟大康, 朱筱敏, 李树静, 等. 早期碳酸盐胶结作用对砂岩孔隙演化的影响——以塔里木盆地满加尔凹陷志留系砂岩为例 [J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 885-890.
Zhong Dakang Zhu Xiaomin Li Shujing et al. Influence of early carbonate cementation on the evolution of sandstones: a case study from Silurian sandstones of Manjialier Depression, Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6): 885-890.
- [3] 张水昌, 朱光有, 梁英波. 四川盆地普光大型气田 H_2S 及优质储层形成机理探讨 [J]. 地质论评, 2006, 52(2): 230-235.
Zhang Shuichang Zhu Guangyou Liang Yingbo. Probe into formation mechanism of H_2S and high-quality reservoirs of Puguang large gas field in Sichuan Basin [J]. Geological Review, 2006, 52(2): 230-235.
- [4] 马永生, 郭彤楼, 赵雪凤, 等. 普光气田深部优质白云岩储层形成机制 [J]. 中国科学 (D 辑), 2007, 37(增刊 2): 43-52.
Ma Yongsheng Guo Tonglou Zhao Xuefeng et al. Generation mechanism of deep high-quality dolomite reservoirs in Puguang Gas Field [J]. Science in China (Series D), 2007, 37(S2): 43-52.
- [5] 李忠, 陈景山, 关平. 含油气盆地成岩作用的科学问题及研究前沿 [J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2113-2122.
Li Zhong Chen Jingshan Guan Ping. Scientific problems and frontiers of sedimentary diagenesis research in oil-gas-bearing basins [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 2113-2122.
- [6] Hurst A, Nadeau P H. Clay microporosity in reservoir sandstones: an application of quantitative electron microscopy in petrophysical evaluation [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(4): 563-573.
- [7] Makowitz A, Lander R H, Milliken K L. Diagenetic modeling to

- assess the relative timing of quartz cementation and brittle grain processes during compaction [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(6): 873– 885
- [8] Mowers T T, Budd D A. Quantification of porosity and permeability reduction due to calcite cementation using computer-assisted petrographic image analysis techniques[J]. AAPG Bulletin, 1996 80(3): 309– 322
- [9] 宋成辉, 李晓, 陈剑, 等. 储层成岩- 储集相划分方法[J]. 天然气工业, 2004 24(10): 27– 29
Song Chenghui, Li Xia, Chen Jian, et al Diagenetic-storing facies division of reservoir[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(10): 27– 29
- [10] 代金友, 张一伟, 熊琦华, 等. 成岩作用对储集层物性贡献比率研究[J]. 石油勘探与开发, 2003 30(4): 54– 55.
Dai Jinyou, Zhang Yiwei, Xiong Qihua, et al Effects of diagenesis on reservoir property and quality[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(4): 54– 55
- [11] 何东博, 应凤祥, 郑竣茂, 等. 碎屑岩成岩作用数值模拟及其应用[J]. 石油勘探与开发, 2004 31(6): 66– 68.
He Dongbo, Ying Fengxiang, Zheng Junmao, et al Numerical simulation of clastic diagenesis and its application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(6): 66– 68
- [12] 应凤祥, 罗平, 何东博, 等. 中国含油气盆地碎屑岩储集层成岩作用与成岩数值模拟[M]. 石油工业出版社, 2004.
Ying Fengxiang, Luo Ping, He Dongbo, et al Clastic reservoir diagenesis and numerical simulation of petroleum basins, China [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 2004.
- [13] 寿建峰. 砂岩动力成岩作用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005
Shou Jianfeng. Dynamical diagenesis of sandstone [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 2005.
- [14] 曹寅. 石油地质样品分析测试技术及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
Cao Yin. Petroleum geology sample analysis testing technique and its application [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 2006
- [15] Ketzer J M, Holz M, Morad S, et al Sequence stratigraphic distribution of diagenetic alterations in coal-bearing paralic sandstones: evidence from the Rio Bonito Formation (Early Permian), southern Brazil [J]. Sedimentology, 2003 50 (5): 855– 877.
- [16] 刘远远. 鄂西渝东石炭系向斜石炭系地震储层预测[J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(增刊 1): 41– 43.
Liu Yuanyuan. Seismic reservoir prediction in stacto-stalagmite synclinal carboniferous system in western Hubei eastern Chongqing Area [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2004 26(S1): 41– 43.
- [17] 马东洲, 陈洪德, 朱利东. 川南下志留统石牛栏组沉积体系与岩相古地理[J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2006 33(3): 228– 232
Ma Dongzhou, Chen Hongde, Zhu Liliang, et al Depositional system and lithofacies and paleogeography of the Silurian Shiniulan Formation in the Southern Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2006, 33(3): 228– 232
- [18] 成先海, 张萍. 中扬子西部志留系深盆气勘探开发前景与对策[J]. 资源环境与工程, 2008, 22(1): 22– 25
Cheng Xianhai, Zhang Ping. Prospects and countermeasures for exploring and developing the deep-basin gas in Silurian in the West of the Middle Yangtze Area [J]. Resources Environment & Engineering, 2008, 22(1): 22– 25
- [19] 丁晓琪, 张哨楠, 周文, 等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界致密砂岩储层特征及其成因探讨[J]. 石油与天然气地质, 2007 28(4): 491– 496
Ding Xiaoli, Zhang Shaonan, Zhou Wen, et al Characteristics and genesis of the Upper Paleozoic tight sandstone reservoirs in the Northern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(4): 491– 496
- [20] 唐海发, 彭仕宓, 赵彦超. 大牛地气田盒 2+ 3 段致密砂岩储层微观孔隙结构特征及其分类评价[J]. 矿物岩石, 2006 26(3): 107– 113
Tang Haifa, Peng Shimu, Zhao Yanchao. Characteristics of pore structure and reservoir evaluation in H2+ 3 tight gas reservoir Daniudi gas field [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2006, 26(3): 107– 113.
- [21] 卜淘, 段永明, 曹波, 等. 大型多层致密砂岩气藏中后期稳产技术对策——以新场气田上沙溪庙组气藏为例[J]. 石油天然气学报, 2007 29(5): 133– 136
Bo Tao, Duan Yongming, Cao Bo, et al Technical countermeasures for depletion during middle and late developing phase in large-scale tight sandstone gas reservoirs [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(5): 133– 136.
- [22] 姜振学, 林世国, 庞雄奇. 小草湖地区西三窑组致密砂岩气藏类型判识[J]. 天然气工业, 2006, 26(9): 4– 7
Jiang Zhenxue, Lin Shiguo, Pang Xiongqi. Discrimination of types of tight sand gas reservoirs in Xisanyao Formation in Xiaocaohe area [J]. Natural Gas Industry, 2006 26(9): 4– 7.
- [23] 焦述蓉, 张虹, 赵爽. 川西 DY 地区须家河组致密砂岩储层预测技术及应用效果分析[J]. 石油与天然气地质, 2008 29(6): 774– 780
Qiao Shurong, Zhang Hong, Zhao Shuang. Reservoir prediction techniques and their application to tight sandstones of the Xujiahe Formation in DY Area Western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(6): 774– 780
- [24] 肖芝华, 钟宁宁, 黄志龙, 等. 从模拟实验看致密砂岩储层的石油成藏条件[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(6): 722– 725
Xiao Zhihua, Zhong Ningning, Huang Zhilong, et al A study on hydrocarbon pooling conditions in tight sandstones through simulated experiments [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(6): 722– 725

north Hu in Sag[C]// SEG Houston 2009 International Exposition and Annual Meeting, 2009: 1020- 1024.

[21] Edna LM, William AM. A 3-D model of the Sudbury Igneous Complex[C]// SEG 1995. 1995: 777- 780

[22] 杨庚, 王晓波, 李本亮, 等. 准噶尔盆地西北缘斜向挤压构造与油气分布规律[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(1): 26- 29
Yang Geng Wang Xiaobo Li Benliang et al Oblique compressional structures and hydrocarbon distribution patterns in the northwestern margin of the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(1): 26- 29

[23] 许风光, 邓少贵, 范宜仁, 等. 火成岩储层测井评价进展综述[J]. 勘探地球物理进展, 2006, 29(4): 239- 243
Xu Fengguang Deng Shaogui Fan Yiren, et al Progress of log evaluation for igneous reservoir[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2006, 29(4): 239- 243

[24] 黄布宙, 潘保芝. 松辽盆地北部深层火成岩测井响应特征及岩性划分[J]. 石油物探, 2001, 40(3): 43- 44.
Huang Buzhou Pan Baozhi The log characteristics of deep igneous rocks and lithology determination in the northern Songliao Basin[J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2001, 40(3): 43- 44.

[25] 陈立英, 吴海波, 邢丽波. 火成岩复杂岩性测井识别及测井资料数字处理[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(6): 877- 879
Chen Liying Wu Haibo Xing Libo Complex igneous rock lithologic logging recognition and numerical process of logging data[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2005, 27(6): 877- 879

[26] 冉启全, 胡永乐, 任宝生. 火成岩岩性识别方法及其应用研究——以大港枣园油田枣 35 块火成岩油藏为例[J]. 中国海上油气, 2005, 17(1): 26- 30.
Ran Qiquan, Hu Yongle Ren Baosheng A lithologic identification method of igneous rocks and its application a case of the igneous reservoir in Block Zao-35[J]. China Offshore Oil and Gas, 2005, 17(1): 26- 30.

[27] 冯翠菊, 王敬岩, 冯庆付. 利用测井资料识别火成岩岩性的方法[J]. 大庆石油学院学报, 2004, 28(4): 9- 11
Feng Cuiju, Wang Jingyan Feng Qingfu Distinguishing igneous rock lithology by logging data[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2004, 28(4): 9- 11

(编辑 张亚雄)

(上接第 82 页)

[25] 杨克明, 张虹. 地震三维三分量技术在致密砂岩裂缝预测中的应用——以西新场气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 683- 689
Yang Keming Zhang Hong Application of 3D-3C seismic technique to the prediction of fractures in tight sandstone[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 683- 689

[26] 刘金库, 彭军, 刘建军, 等. 绿泥石环边胶结物对致密砂岩孔隙的保存机制——以川中- 川南过渡带边界地区须家河组储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(1): 53- 58.
Liu Jinku Peng Jun, Liu Jianjun, et al Pore-preserving mechanism of chlorite rims in tight sandstone-an example from the T₃x Formation of Baojie area in the transitional zone from the central to Southern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(1): 53- 58.

[27] 王金琪. 中国大型致密砂岩含气区展望[J]. 天然气工业, 2000, 20(1): 10- 16
Wang Jinqi Prospects for the large sized tight sandstone gas bearing regions in China[J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(1): 10- 16.

(编辑 张亚雄)

《油气藏评价与开发》创刊暨征稿启事

《油气藏评价与开发》期刊将于 2011 年 4 月正式出版, 主办单位为中国石油化工集团公司华东石油局。该刊为双月刊, 对国内外公开发行人, 重点栏目有: 油气地质、油气藏评价、石油工程、非常规油气、综合信息等。

值此创刊之际, 热忱欢迎广大作者踊跃来稿。

通讯地址: 江苏省南京市江东中路 315 号中泰国际广场 6 号楼 1528 室

邮政编码: 210019

电子邮箱: 66scj@vip.sina.com

联系电话: 0523-86667121, 0523-86667184, 025-58777235

《油气藏评价与开发》编辑部