

# 塔里木盆地孔雀河斜坡

## 志留系致密砂岩储层特征及主控因素

王斌<sup>1</sup>, 赵永强<sup>1</sup>, 王恕一<sup>1</sup>, 张根法<sup>2</sup>, 罗宇<sup>1</sup>, 陈绪云<sup>2</sup>, 雷蕾<sup>3</sup>

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

2. 中国石油化工股份有限公司 西北油田分公司 勘探开发研究院, 乌鲁木齐 830011;

3. 北京华油光大能源技术有限公司, 北京 100029)

**摘要:**综合利用岩心、薄片、铸体薄片、扫描电镜和物性分析等资料,对塔里木盆地孔雀河斜坡志留系储层特征进行了总结,从碎屑组分、沉积和成岩等多方面分析了储层发育的主控因素。研究表明:研究区志留系储层的岩石类型以岩屑砂岩、长石岩屑砂岩为主,结构成熟度中等,成分成熟度较低。物性总体较差,属于低孔—特低孔、特低渗的致密砂岩储层,储集空间主要为粒间溶孔、粒内溶孔和微裂缝,孔喉连通性差。沉积作用是控制志留系砂岩储层形成的基础;强烈的压实作用和普遍的胶结作用是致密砂岩储层形成的关键因素;构造破碎作用和溶蚀作用是形成储层次生孔隙的重要因素。

**关键词:**致密砂岩;储层特征;主控因素;志留系;孔雀河斜坡;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

## Characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoirs in Silurian of Kongquehe slope, Tarim Basin

Wang Bin<sup>1</sup>, Zhao Yongqiang<sup>1</sup>, Wang Shuyi<sup>1</sup>, Zhang Genfa<sup>2</sup>, Luo Yu<sup>1</sup>, Chen Xuyun<sup>2</sup>, Lei lei<sup>3</sup>

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

3. Beijing China-Petroleum Everbright Energy Technology Co Ltd, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The sandstone reservoir characteristics such as clastic component, sedimentation, diagenesis and so on in the Silurian of Kongquehe slope were analyzed based on the data of core, casting film, electron microscope scanning and reservoir property analysis to determine the main controlling factors of reservoir quality. The research result shows that reservoir lithology is mainly lithic sandstone and feldspathic litharenite, which have medium texture maturity and lower maturity composition. Reservoir accumulation properties are worse, which belong to low-porosity and extra-low-permeability tight sandstone reservoirs. Main reservoir space is corrosion pore between grains or in grains and a few micro-fractures. The connectivity between pore space and throat is poor. Sedimentation is the fundamental factor for the development of sandstone reservoirs in Silurian. Strong compaction and widespread cementation are the dominant factors. Structure fracturing and dissolution are also important factors for the formation of secondary pores in sandstone reservoirs.

**Key words:** tight sandstone; reservoir characteristics; main controlling factors; Silurian; Kongquehe slope; Tarim Basin

孔雀河斜坡位于塔里木盆地东北缘,西北为塔北隆起库尔勒鼻凸,东北连接库鲁克塔格隆起,南邻满加尔坳陷,是一个连接库鲁克塔格隆起和北部坳陷的北西向过渡斜坡带(图1)。长期的构造演化和多期构造运动的叠加影响造成该区地质条件复杂,油气勘探难度较大<sup>[1-6]</sup>。近年油气勘探

中,孔雀1井、华英参1井和龙口1井在志留系获得不同级别的油气显示,英南2井和满加尔坳陷满东1井在志留系获得工业性油气流,这些成果显示了孔雀河斜坡志留系具有较好的油气勘探潜力。

受海西期构造运动的影响,孔雀河地区侏罗系直接超覆在志留系之上。钻井揭示志留系是以致

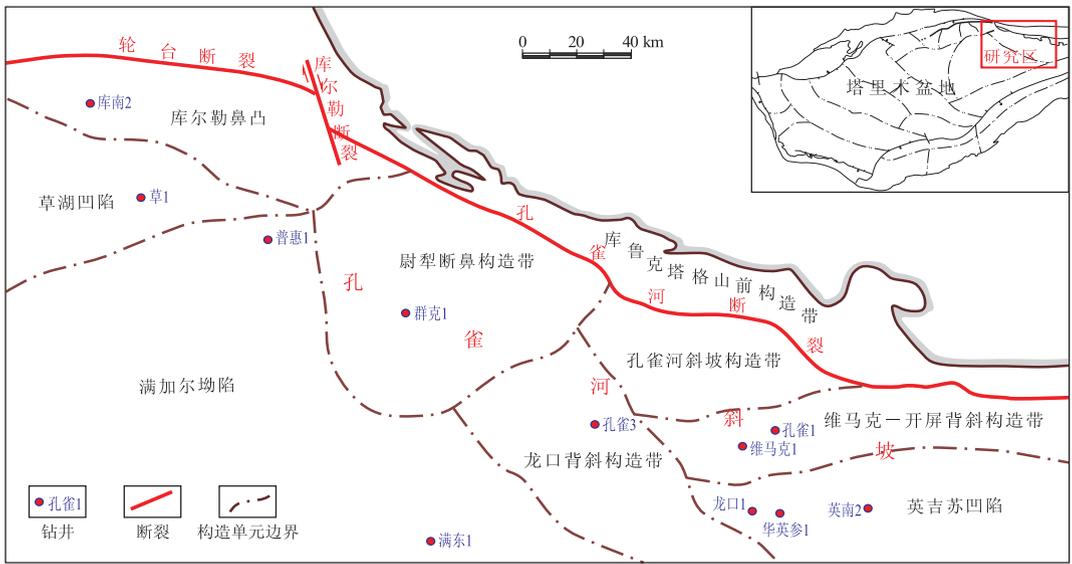


图 1 塔里木盆地孔雀河斜坡构造位置

Fig.1 Structural location of Kongquehe slope in Tarim Basin

密砂岩为主,砂岩含量达到 80% 以上,但是储层的发育特征及成因机制研究较为薄弱。笔者充分利用岩心、薄片、铸体薄片、扫描电镜和物性分析等资料,对志留系储层特征进行了总结,从碎屑组分、沉积和成岩等多方面分析了储层发育的主控因素,对进一步的油气勘探具有重要的现实意义。

## 1 储层特征

### 1.1 储层岩石学特征

根据 6 口钻井录井和取心资料统计,志留系储层岩性主要为细砂岩和粉砂岩,部分为中—粗砂岩,粗粒和中粒砂岩主要出现在孔雀 1 井和英南 2 井(图 2a)。对 381 个薄片镜下分析结果统计显示,岩石类型以岩屑砂岩、长石岩屑砂岩为主,少数为岩屑长石砂岩和岩屑石英砂岩。碎屑组分中石英含量为 25%~50%,长石含量为 10%~30%,岩屑含量为 30%~50%(图 2b)。填隙物包括杂基和胶结物,它是沉积和成岩作用的综合产物。杂基主要

为泥质杂基,充填在颗粒之间,其次为铁泥质、灰泥质和泥灰质,泥质杂基含量为 0%~20%。胶结物类型比较多,有自生黏土矿物、方解石、浊沸石和次生增长石英等。颗粒分选性中等—好,一般呈次圆—次棱角状,磨圆程度较好—中等。颗粒支撑为主,粒间多呈线接触,少量凹凸接触。胶结类型以孔隙式胶结为主,局部呈基底式胶结。结构成熟度中等,成分成熟度低—中等。

### 1.2 储层物性特征

从研究区 6 口钻井取心样品物性资料统计分析得知(表 1,图 3),研究区志留系砂岩储层孔隙度最大为 18.3%,最小为 2.9%,平均为 7.75%,大多数样品集中在 6%~10%;渗透率最大为  $16.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,最小为  $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为  $1.25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,90% 以上的样品小于  $8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。频率分布范围具有单峰特征,孔隙度—渗透率相关性差,说明微裂缝对储层物性的改善提供了一定的贡献。综合分析认为总体属于低孔—特低孔、特低渗的致密砂岩储层。

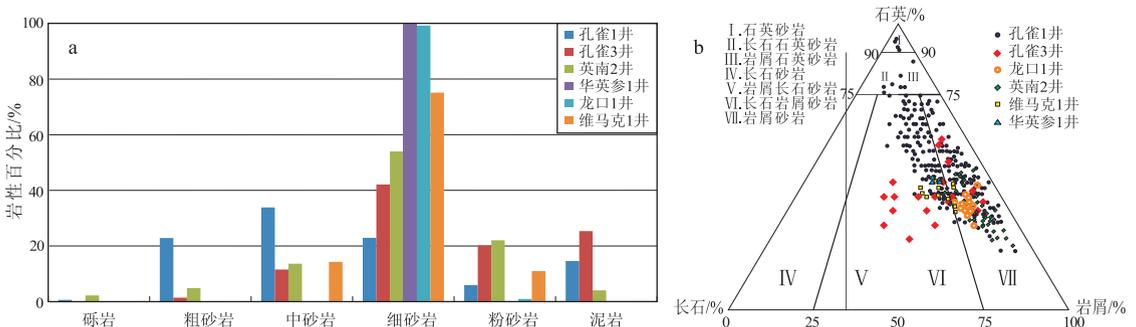


图 2 塔里木盆地孔雀河地区志留系钻井岩性统计与岩石组分

Fig.2 Drilling lithology and rock type in Silurian of Kongquehe region, Tarim Basin

表1 塔里木盆地孔雀河地区志留系储层孔隙度—渗透率

Table 1 Porosity and permeability in Silurian of Kongquehe region, Tarim Basin

物性	井号					
	英南2井	华英参1井	龙口1井	维马克1井	孔雀1井	孔雀3井
孔隙度/%	4.7~16.66 9.69(650)	4.02~7.73 6.42	6.5~15.6 10.12	2.22~18.3 7.97(112)	2.9~11.1 6.53(128)	3.2~8.5 5.76(28)
渗透率/ 10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	0.11~19 1.57(610)	0.24~0.68 0.51	0.1~7 1.64	0.06~16.9 1.56(104)	0.05~12.3 0.95(124)	0.05~2.21 0.77(11)

注:表中分式含义为:最小值~最大值  
平均值(样品数)°

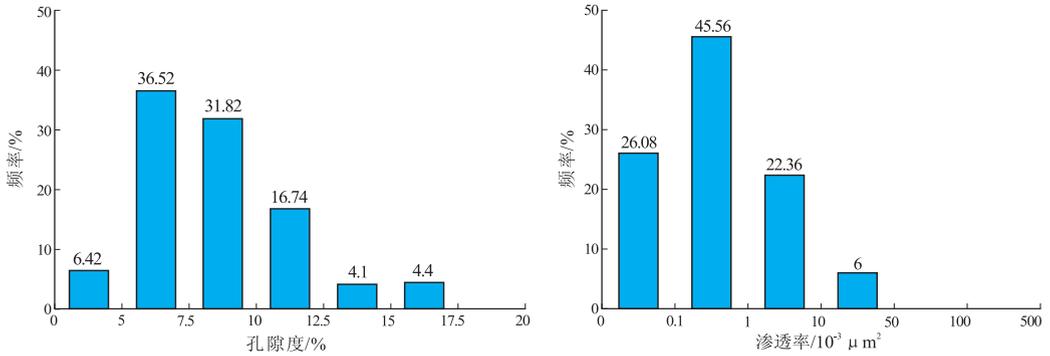


图3 塔里木盆地孔雀河地区志留系储层孔隙度—渗透率统计直方图

Fig.3 Frequency histogram for porosity and permeability of reservoirs in Silurian of Kongquehe region, Tarim Basin

1.3 储集空间类型及孔喉特征

据岩心观察、薄片鉴定和扫描电镜等分析,研究区志留系砂岩储层在经历了压实、胶结等成岩作用改造后,碎屑颗粒相互嵌合,致使原生孔隙多已消失,主要发育粒间溶孔、粒内溶孔和微裂缝等多种类型的次生孔隙,为志留系砂岩储层主要的储集空间类型。

粒间溶孔:主要为长石、岩屑等碎屑颗粒边缘及粒间胶结物(黏土矿物、方解石等)被溶蚀形成的孔隙,孔隙边缘多呈明显的溶蚀痕迹,形态多样(图4a,b,c)。

粒内溶孔:砂岩中长石、岩屑等不稳定颗粒的内部被溶蚀产生的孔隙,其形态主要为斑点状、蜂窝状,孔隙细小(图4d,e)。

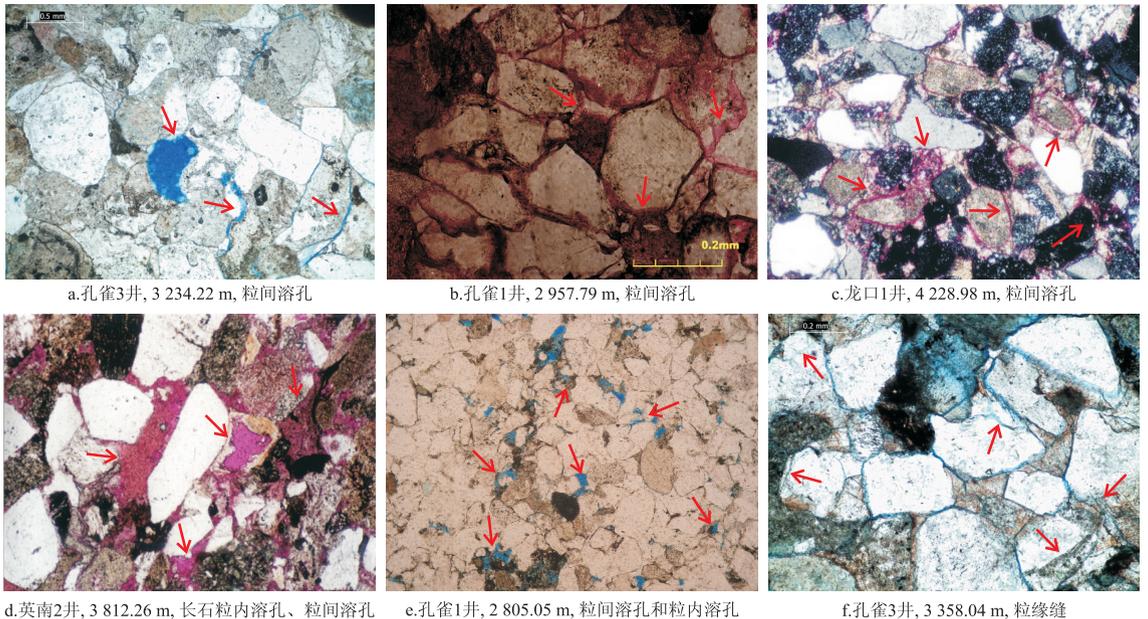


图4 塔里木盆地孔雀河地区志留系砂岩储层孔隙类型图版

Fig.4 Pore styles of sandstone reservoirs in Silurian of Kongquehe region, Tarim Basin

表 2 塔里木盆地孔雀 1 井志留系储层压汞分析统计

Table 2 Data table for mercury porosimeter analysis in Silurian of well Kongque1, Tarim Basin

深度/m	排驱压力/ MPa	最大孔喉 半径/ $\mu\text{m}$	最小流动 半径/ $\mu\text{m}$	平均半径/ $\mu\text{m}$	分选系数	体积 百分数/%	退汞 效率/%	样品 数/个
1 829.5~2 438	0.3~0.6	1.3~3.0	0.3~0.6	0.6~1.4	0.4~1.0	24.0~30.5	2.8~42.4	4
	0.4	2.2	0.5	1.0	0.7	27.1	37.4	
2 438~2 787	0.4~0.6	1.3~1.9	0.3~0.4	0.6~1.0	0.4~0.7	30.1~42.1	39.8~49.6	3
	0.5	1.5	0.4	0.8	0.5	35.3	46.0	
2 787~3 412.5	0.4~2.5	0.3~1.9	0.1~0.4	0.2~0.9	0.1~0.5	22.5~61.2	19.0~48.1	18
	1.0	0.9	0.2	0.4	0.3	39.8	36.4	

注:表中分式含义为: $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

微裂缝:由构造破碎作用形成,在致密砂岩储层的低孔渗条件下,微裂缝不仅是油气的有效储集空间,而且大大改善了储层渗滤能力<sup>[7-9]</sup>。研究区志留系砂岩储层多为粒缘缝,其次为穿插岩石的不规则微裂缝,少量沿矿物解理发育的微缝。这些缝宽度一般为 0.01~0.02 mm,延伸不远,无一定方向(图 4f)。

据孔雀 1 井压汞资料分析结果(表 2),志留系砂岩储层平均孔喉半径为 0.4~1.0  $\mu\text{m}$ ,属于细喉、特细喉道型;排驱压力较大,为 0.3~2.5 MPa,平均为 0.4~1.0 MPa,退汞效率低,平均为 37.4%~46%,表明储层孔隙连通性较差。

## 2 成岩作用与成岩演化

### 2.1 成岩作用

压实作用:依据地层厚度趋势法推算海西早期志留系最大埋深超过 4 500 m,强烈的压实作用使长石颗粒和黑云母等发生变形,颗粒间以线接触为主,少量为凹凸接触,储层颗粒间的原生孔隙急剧减少,渗透性降低。

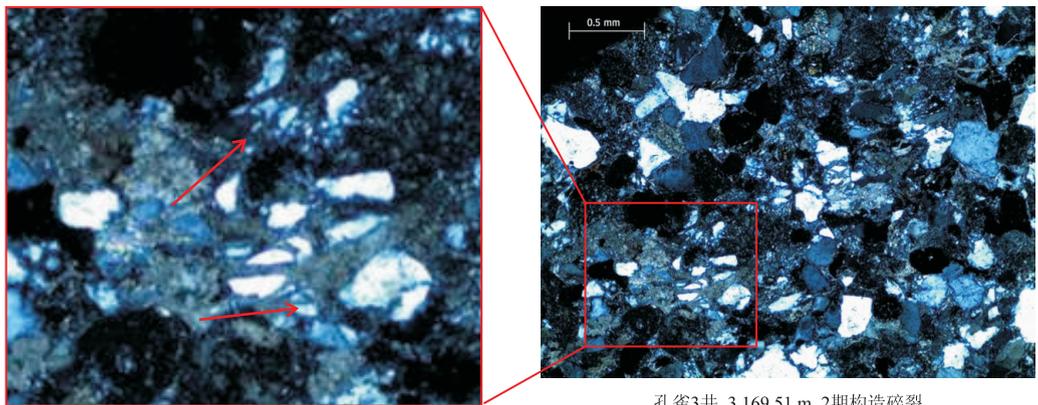
胶结作用:胶结作用相当普遍,胶结物类型多,主要有黏土胶结、方解石胶结、浊沸石胶结和自生

石英胶结等。黏土胶结主要表现为薄膜环边胶结和粒间充填;自生石英胶结表现为石英颗粒次生加大;碳酸盐岩胶结主要为方解石胶结,多呈连晶状胶结,在岩石中呈斑块状产出;浊沸石可见其充填于长石岩屑的溶蚀边缘(粒间溶蚀扩大孔)或交代长石岩屑边缘。

溶蚀作用:溶蚀作用相对较弱,主要表现为:

①对颗粒的溶蚀具选择性,以长石岩屑溶蚀为主,主要为颗粒边缘溶蚀形成粒间溶蚀扩大孔,少量粒内溶蚀,形成粒内小的微孔;②沸石和方解石胶结物局部被溶蚀,形成大小不一的孔隙。

构造破碎作用:从孔雀 1 井和孔雀 3 井岩石薄片可见构造碎裂作用形成的破碎带和微裂缝局部十分发育。薄片可见至少两期构造破碎:第一期发生在方解石胶结前,碎屑颗粒破碎呈带状分布,破碎的矿物又被方解石穿插胶结(图 5);第二期发生在胶结作用之后,形成粒缘、粒内等微裂缝,一般未充填,局部裂缝有少量被溶蚀,成为现今有效的储集空间。碎裂化作用形成大小不等的微裂隙,虽然孔隙度增加不明显,但它能比较有效地改善储层的渗透状况,成为酸性流体的运移通道,使储层发生溶解作用。



孔雀 3 井, 3 169.51 m, 2 期构造碎裂

图 5 塔里木盆地孔雀河地区志留系砂岩储层构造破碎作用

Fig.5 Structure fracturing of sandstone reservoirs in Silurian of Kongquehe region, Tarim Basin

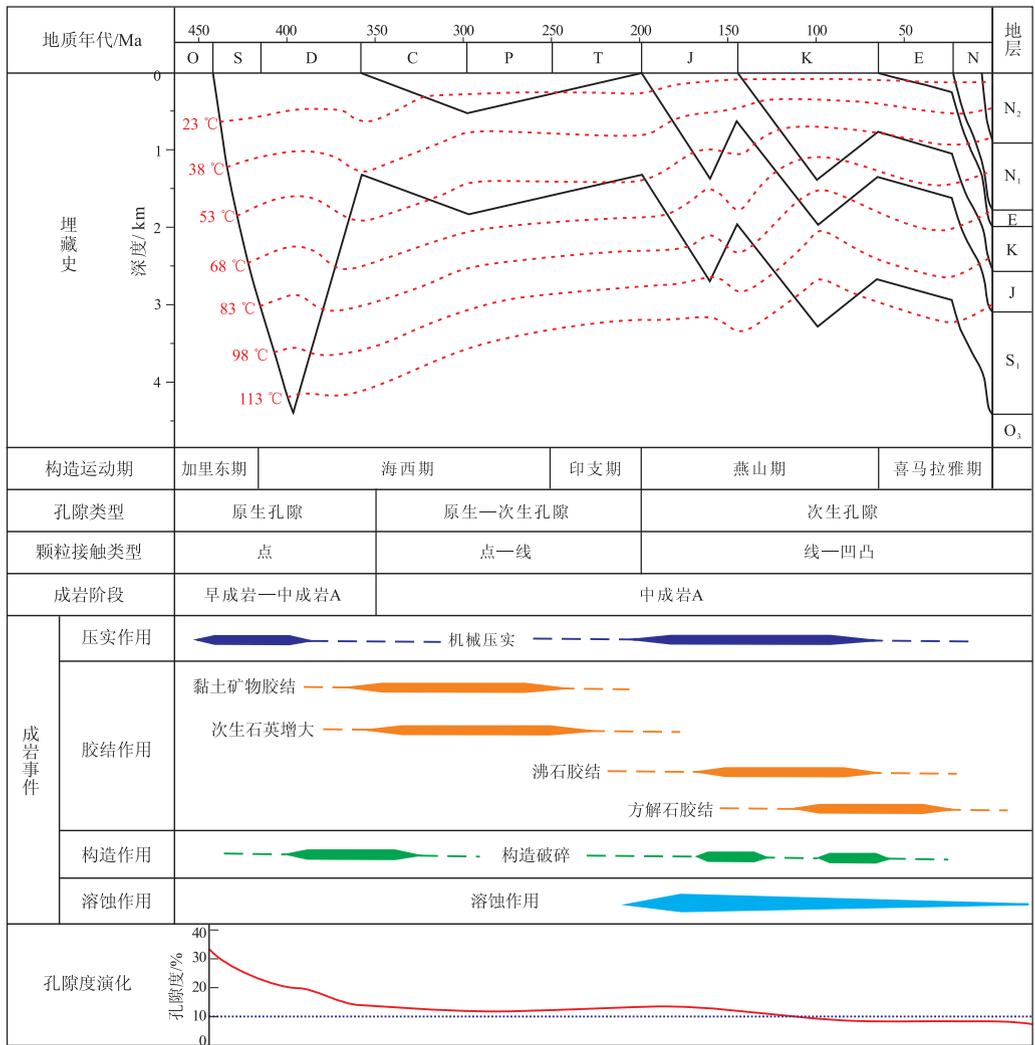


图6 塔里木盆地孔雀河地区志留系储层成岩演化序列模式

Fig.6 Diagenetic stages and evolutionary sequences of reservoirs in Silurian of Kongquehe region, Tarim Basin

### 2.2 成岩演化

根据铸体薄片观察、包裹体测温及埋藏史模拟等综合分析认为,孔雀河地区志留系砂岩储层的成岩演化序列为:氧化铁质及黏土膜形成→压实作用→黏土矿物胶结→浊沸石胶结→一期构造破碎作用→方解石胶结→二期构造破碎作用→溶蚀作用。

研究区志留纪—早泥盆世快速沉积沉降,志留系埋深最大超过4 500 m,成岩作用以压实作用为主,原生孔隙迅速减少,孔隙度不断降低。海西早期志留系上部地层遭受剥蚀,残余地层在泥盆纪末进入早成岩阶段—中成岩阶段A期,至三叠纪末成岩作用强度变化不大。侏罗纪—第三纪随着沉积物叠加,成岩作用进一步发展,志留系储层均进入中成岩阶段A期,原生孔隙多已消失,随着构造破碎作用局部发育,酸性流体进入发生溶蚀作用,形成次生孔隙(图6)。

## 3 致密砂岩储层形成的主控因素

### 3.1 沉积作用是控制砂岩储层形成的基础

沉积作用对储层影响的实质是决定了储层岩石类型和结构组分,对储层后期成岩作用的类型、强度及进程有重要的影响,控制着有利储层的空间分布<sup>[10-12]</sup>。通过岩心、测井相及地震相等综合分析认为,研究区志留系为无障壁海岸滨岸砂沉积,局部发育滨岸三角洲(如孔雀1井—维马克1井区)。随着波浪和潮汐作用的改造及古岸线的不断迁移,可形成宽而厚的砂质沉积,为有利储层的发育提供了物质基础。

### 3.2 压实作用和胶结作用是导致储层致密化的关键因素

成岩作用在砂岩埋藏过程中对其孔隙度和渗透率的改造起着关键作用<sup>[13-18]</sup>。研究区志留系储层成岩作用复杂,具有多期性和多样性的特点,经历了

压实、胶结及溶蚀等多种成岩作用改造。早期强烈的压实作用使原生孔隙急剧减少,渗透性降低。中成岩阶段各种类型的胶结作用普遍发育,使原生残留孔隙空间进一步减少,孔隙连通性变差。所以,压实作用和胶结作用是导致储层致密化的关键因素。

### 3.3 构造破碎作用和溶蚀作用是储层次生孔隙形成的重要因素

研究区受多期构造运动的叠加影响,构造破碎作用非常普遍。构造破碎作用使砂岩储层颗粒形成破碎带和微裂缝,微裂缝能有效地改善储层的孔隙连通性和渗透状况。同时含有机酸流体通过微裂缝进入以后对铝硅酸盐矿物溶蚀形成局部发育的次生孔隙,成为志留系储层有效的储集空间。因此,构造破碎作用和溶蚀作用是储层次生孔隙形成的重要因素,构造破碎发育及有利于有机酸流体进入的部位是寻找志留系有利储集体的方向。

## 4 结论

1) 孔雀河地区志留系储层的岩石类型以岩屑砂岩、长石岩屑砂岩为主,结构成熟度中等,成分成熟度较低。

2) 物性总体较差,属于低孔—特低孔、特低渗的致密砂岩储层,储集空间主要为粒间溶孔、粒内溶孔和微裂缝等次生孔隙。

3) 强烈的压实作用和普遍的胶结作用是致密砂岩储层形成的关键因素;构造破碎作用和溶蚀作用是形成储层次生孔隙的重要因素。因此,在沉积砂体分布区,构造破碎发育及有利于有机酸流体进入的部位是寻找志留系有利储集体的方向。

### 参考文献:

- [1] 何治亮,毛洪斌,周晓芳,等.塔里木多旋回盆地与复式油气系统[J].石油与天然气地质,2000,21(3):207-213.  
[2] 高长林,叶德燎,张玉箴,等.塔里木中生代盆地扩张和盆

地俯冲与地幔柱[J].石油实验地质,2003,25(6):661-669.

- [3] 张克银,邵志兵,邹志荣.塔里木盆地孔雀河地区复式油气系统[J].新疆石油地质,2004,25(2):122-124.  
[4] 杨铭,汤达祯,邢卫新,等.塔里木盆地孔雀河古斜坡成藏条件新认识[J].石油实验地质,2007,29(3):275-279.  
[5] 刘朝露,贾承造,夏斌,等.塔东地区盆山耦合与油气成藏模式研究[J].天然地球科学,2005,16(5):552-558.  
[6] 邱荣华,李永林,肖学,等.塔里木盆地孔雀河区块石油地质条件与勘探前景[J].河南石油,2003,17(1):1-5.  
[7] 曾联波.低渗透砂岩油气储层裂缝及其渗流特征[J].地质科学,2004,39(1):11-17.  
[8] 蔡希源.深层致密砂岩气藏天然气富集规律与勘探关键技术[J].石油与天然气地质,2010,31(6):707-714.  
[9] 曾联波,康永尚,肖淑容.吐哈盆地北部凹陷低渗透砂岩储层裂缝发育特征及成因[J].西安石油大学学报:自然科学版,2008,23(1):22-25.  
[10] Beard D C, Weyl P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand[J]. AAPG Bulletin, 1973, 57(2): 349-369.  
[11] 王峰,田景春,陈蓉,等.鄂尔多斯盆地北部上古生界盒 8 储层特征及控制因素分析[J].沉积学报,2009,27(2):238-245.  
[12] 王少依,张惠良,寿建峰,等.塔中隆起北斜坡志留系储层特征及控制因素[J].成都理工大学学报:自然科学版,2004,31(2):148-152.  
[13] 郑浚茂.碎屑储集岩的成岩作用[M].北京:中国地质大学出版社,1989.  
[14] 赵欣,陈强路,孙渊,等.塔里木盆地东北部中上奥陶统致密砂岩储集性能与成因[J].石油实验地质,2012,34(5):466-473.  
[15] 刘林玉,陈刚,柳益群,等.碎屑岩储集层溶蚀型次生孔隙发育的影响因素分析[J].沉积学报,1998,16(2):97-100.  
[16] 蒋恕,蔡东升,朱筱敏,等.辽河坳陷辽中凹陷成岩作用与中深层孔隙演化[J].石油与天然气地质,2007,28(3):362-369.  
[17] 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.  
[18] Ceriani A, Giulio A D, Goldstein R H, et al. Diagenesis associated with cooling during burial: An example from Lower Cretaceous reservoir sand-stones[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(9): 1573-1591.

(编辑 韩 或)