

# 北部湾盆地乌石凹陷东区流沙港组三段 储层物性主控因素及分布规律

曾小明, 邹明生, 张辉, 于佳, 陈晓武, 莫冯阳

(中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057)

**摘要:**南海北部湾盆地乌石凹陷东区流沙港组三段扇三角洲储层砂体厚度大、岩性复杂、物性变化快、优质储层展布不清, 制约了下一步的开发部署。利用分析化验、钻测井和测试资料, 从沉积环境、成岩作用和构造三方面来探讨其对储层物性的控制作用。沉积环境中的泥质杂基含量和分选磨圆对物性影响较大; 成岩作用中的压实作用和溶解作用决定了孔隙的后期演化; 古构造和断裂系统控制了酸性流体运移方向和路径。靠近大断裂的扇三角洲外前缘近端的水下分流河道储层, 由于杂基含量低, 分选磨圆较好, 溶解作用强, 物性较好, 产能较高, 是研究区的优质储层。

**关键词:**主控因素; 流沙港组三段; 优质储层; 扇三角洲; 乌石凹陷; 北部湾盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

## Main controls on the distribution of the 3rd member of Liushagang Formation in eastern Wushi Sag, Beibu Gulf Basin

Zeng Xiaoming, Zou Mingsheng, Zhang Hui, Yu Jia, Chen Xiaowu, Mo Fengyang

(Zhanjiang Branch, CNOOC Ltd, Zhanjiang, Guangdong 524057, China)

**Abstract:** Fan delta reservoirs in the 3rd member of Liushagang Formation in the eastern Wushi Sag, Beibu Gulf Basin are characterized by large thickness of sand bodies, complicated lithology, rapid change of physical properties, and unclear distribution of good-quality reservoirs, which restricts further development. The controls of the sedimentary environment, diagenesis and structure on reservoir physical properties were studied using drilling, logging and testing data. Shale content, sorting and psephicity have a huge influence on physical properties. Compaction and dissolution controlled later reservoir porosity evolution. Paleotectonics and fracture systems controlled acid fluid migration direction and path. Underwater distributary channels of the proximal outer fan delta front near the large fault which exhibited low matrix content, good sorting and psephicity, good physical properties, high productivity and were good-quality reservoirs in the study area.

**Key words:** main control; 3rd member of Liushagang Formation; good-quality reservoir; fan delta; Beibu Gulf Basin

南海北部湾盆地面积约  $3.98 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 海域油气资源丰富, 但目前只在涠西南凹陷进行了油气开采。随着涠西南凹陷的开采, 已开始面临诸多油田开发中后期的问题, 急需找到新的替代产量。近年来, 乌石凹陷东区的勘探取得了较大的突破和进展, 在流沙港组三段(以下简称流三段)发现了较大的储量, 但是其储层存在岩性复杂、物性较差、非均质性强、有的井测试为高产、有的井测试为低产、优质储层成因和展布范围不清的问题。为此, 本次研究从沉积环境、成岩作用和构造 3 个方面来分析探讨其对物性的影响, 据此来预测优质储层的展

布, 以指导下一步的开发方案制定, 最终进行开发实施。

### 1 区域地质概况

乌石凹陷位于南海北部湾盆地南部坳陷的东部, 是新生代形成的具有“南断北超”结构特征的箕状凹陷, 北临企西隆起, 南靠流沙凸起<sup>[1]</sup>(图 1)。研究区流三段地层比较厚, 约 200~650 m, 岩性主要为砂砾岩和含砾砂岩, 沉积体系为物源来自北东方向粗粒扇三角洲, 其中  $L_3 \text{ II}$  油组为其主力油组, 油层厚度可达 57 m。

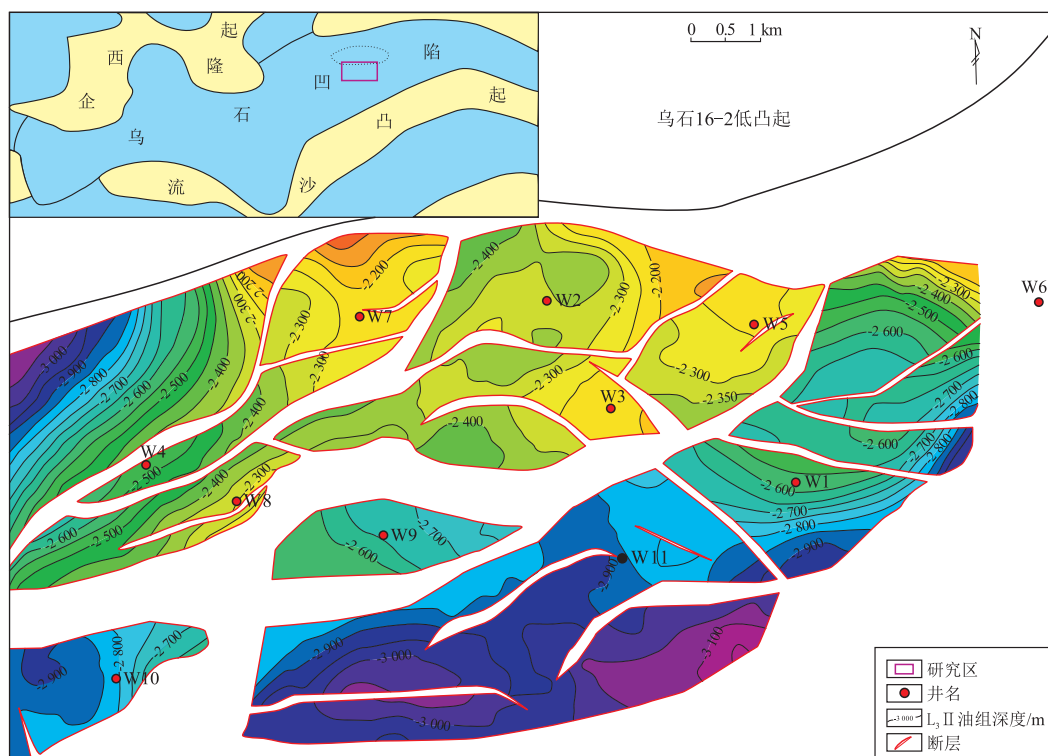


图1 研究区地理位置

Fig.1 Location of study area

## 2 储层特征

### 2.1 岩石学特征

薄片资料统计分析表明,研究区砂岩岩石类型主要为岩屑砂岩,石英绝对含量为 10.5%~83.3%,平均为 28.7%;长石绝对含量为 3.2%~14.6%,平均为 6.9%;岩屑(包括多晶石英)绝对含量为 14.0%~73.1%,平均为 46.2%。颗粒间主要呈点—线式接触,颗粒磨圆以次圆—次棱角状为主,分选中—差。砂岩成分成熟度和结构成熟度都较低,表现为近源快速沉积特征。填隙物主要包括泥质杂基和胶结物,其中泥质杂基含量较高,约 2.4%~13.5%,平均为 5.2%,而胶结物含量较低,约 0.5%~5.0%,平均为 1.5%,主要为自生黏土矿物(高岭石、伊利石等),含少量的铁方解石、菱铁矿等碳酸盐胶结物。

### 2.2 物性特征

从薄片分析来看,流三段储层面孔率变化较大,分布在 5.0%~23.0%之间,平均为 13.2%。总体上来看,面孔率由北东向西南方向逐渐变小,与构造趋势比较一致;但渗透率变化趋势不一样,渗透率的高值区分布在中部的 W4、W7 和 W8 井。从岩心和壁心分析化验资料来看,其孔渗关系比较复杂,决定渗透率大小的不是孔隙度的大小,而是喉道的大小和分布。流三段孔隙度主要分布在

15.0%~22.0%,平均值为 18.4%;渗透率主要分布在  $(0.1\sim 222.8)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,平均值为  $39.4\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,主要表现为中孔低渗特征,局部发育中孔中渗储层。

### 2.3 孔隙结构

孔隙定量分析表明,研究区流三段由于埋藏深度较大,原生孔隙保存较少。储层孔隙类型以次生孔隙为主,原生孔隙占 7.9%~36.5%,次生孔隙占 63.5%~92.1%。其中,次生孔隙中铸模孔占 50.9%,长石粒内溶孔占 19.4%,岩屑粒内溶孔占 13.2%,粒间溶孔占 12.1%,其他的占 4.4%。喉道类型复杂多样,缩颈型喉道、片状喉道、弯片状喉道、管束状喉道都可见。

## 3 物性主控因素

储层物性主要受沉积环境、成岩作用和构造的共同控制,三者时空上相互影响和联系<sup>[2-9]</sup>。构造位置和构造活动会影响储层的沉积环境及流体运移路径和强度;沉积环境又决定了储层的岩石组分和成熟度,后期还影响成岩作用的类型和强度;成岩作用最终决定了孔隙的后期演化。不同成因类型的储层其各因素的影响程度不一样<sup>[10]</sup>。

### 3.1 沉积环境

综合岩心观察描述、粒度分析、测井相等相标志,认为研究区流三段为物源来自于北东方向的水

进型扇三角洲,其中主力油组 L<sub>3</sub> II 油组以扇三角洲前缘沉积为主,扇三角洲前缘又可进一步细分为内前缘、外前缘近端和外前缘远端(图 2)。

不同的沉积微相带,其水力条件、碎屑成分、粒度、分选、磨圆度和杂基含量都不一样,这决定了其初始的孔隙结构,同时还影响后期的孔隙演化<sup>[11]</sup>。对于扇三角洲来说,沉积环境中杂基含量和颗粒分选磨圆通常是物性的主控因素之一<sup>[12]</sup>(图 3)。一方面,分选磨圆差的碎屑岩储层的原始孔隙度就低<sup>[13]</sup>,同时杂基的存在会堵塞孔隙和喉道,还会抑制早期胶结物的发育,杂基在压实过程中还是良好的润滑剂,并且颗粒大小混杂堆积,分选磨圆差可增强早期的机械压实作用,对原生孔隙破坏能力会更大;另一方面,杂基的存在会阻碍地下酸性流体的活动,抑制了溶解作用,使得孔隙后期无法得到有效的改善,孔隙连通性会变差<sup>[14]</sup>。

### 3.1.1 扇三角洲内前缘

扇三角洲内前缘水下分流河道沉积微相带(W1、W2、W3、W5、W9 和 W11 井),岩性以砂砾岩为主,由于地形较陡,表现为近物源快速沉积,粒度累积概率曲线上以跳跃—悬浮两段式为主,悬浮段发育,重力流特征(图 4);测井上表现为大套箱状

砂体,岩心上表现为砂泥岩混杂堆积,呈块状或者粗尾递变构造;碎屑颗粒分选磨圆差,以次棱角状为主;岩石组分中岩屑含量较多,同时杂基含量也高(6.8%~8.9%),表现为杂基支撑;孔喉半径小,分布在 0.862~2.047 μm,排驱压力大,虽然孔隙度较大(18.2%~23.2%),但孔隙连通性差,配位数只有 0.61~0.90,多为死孔隙,物性较差,渗透率分布在 (10.7~34.4)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,表现为低渗特征(表 1)。

### 3.1.2 扇三角洲外前缘

扇三角洲外前缘近端的水下分流河道沉积微相带(W4、W7 和 W8 井),水力条件较强,岩性以含砾砂岩和中粗砂岩为主,沉积物经过了一定距离的搬运,粒度累积概率曲线上以滚动—跳跃—悬浮三段式为主,少量的跳跃—悬浮两段式,牵引流特征;经过了一定的淘洗,分选磨圆更好,以次棱—次圆状为主,岩石组分中岩屑含量也减少,泥质被带走的更多,杂基含量更少(3.5%~5.1%),表现为颗粒支撑(图 4);孔喉半径分布在 2.913~2.667 μm,排驱压力较小,孔隙连通性有所改观,配位数分布在 1.00~1.10,物性变好,渗透率可达 (102.2~484.6)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,表现为中渗特征(表 1)。

扇三角洲外前缘远端水下分流河道和席状砂沉积微相带(W10 井),水力条件较弱,岩性以中—细砂岩为主,测井上表现为中低幅漏斗形;粒度累积概率曲线上以跳跃—悬浮两段式为主,虽然其分选磨圆较好(图 4),但其粒度较细,泥质含量高(10.8%),孔喉半径小(1.002 μm),排驱压力大,物性较差,渗透率约 3.4×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,表现为低渗—特低渗特征(表 1)。

## 3.2 成岩作用

研究区储层物性特征和成岩作用关系研究表明,对储层物性和孔隙演化影响最大的是压实作用和溶解作用,其次是胶结作用。

### 3.2.1 压实作用

压实作用的强弱不仅和埋深有关系,还受到沉

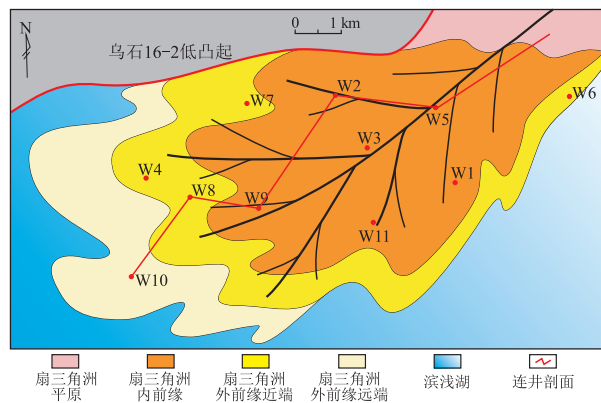


图 2 北部湾盆地乌石凹陷东区 L<sub>3</sub> II 油组沉积相

Fig.2 Sedimentary facies of L<sub>3</sub> II in eastern Wushi Sag, Beibu Gulf Basin

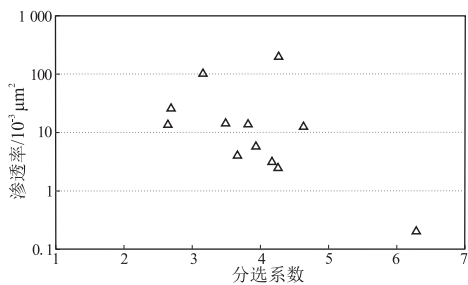
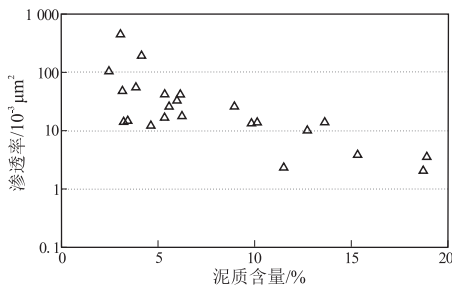


图 3 北部湾盆地乌石凹陷东区储层泥质含量、分选系数和渗透率关系

Fig.3 Relationship between clay content, sorting coefficient and permeability in eastern Wushi Sag, Beibu Gulf Basin

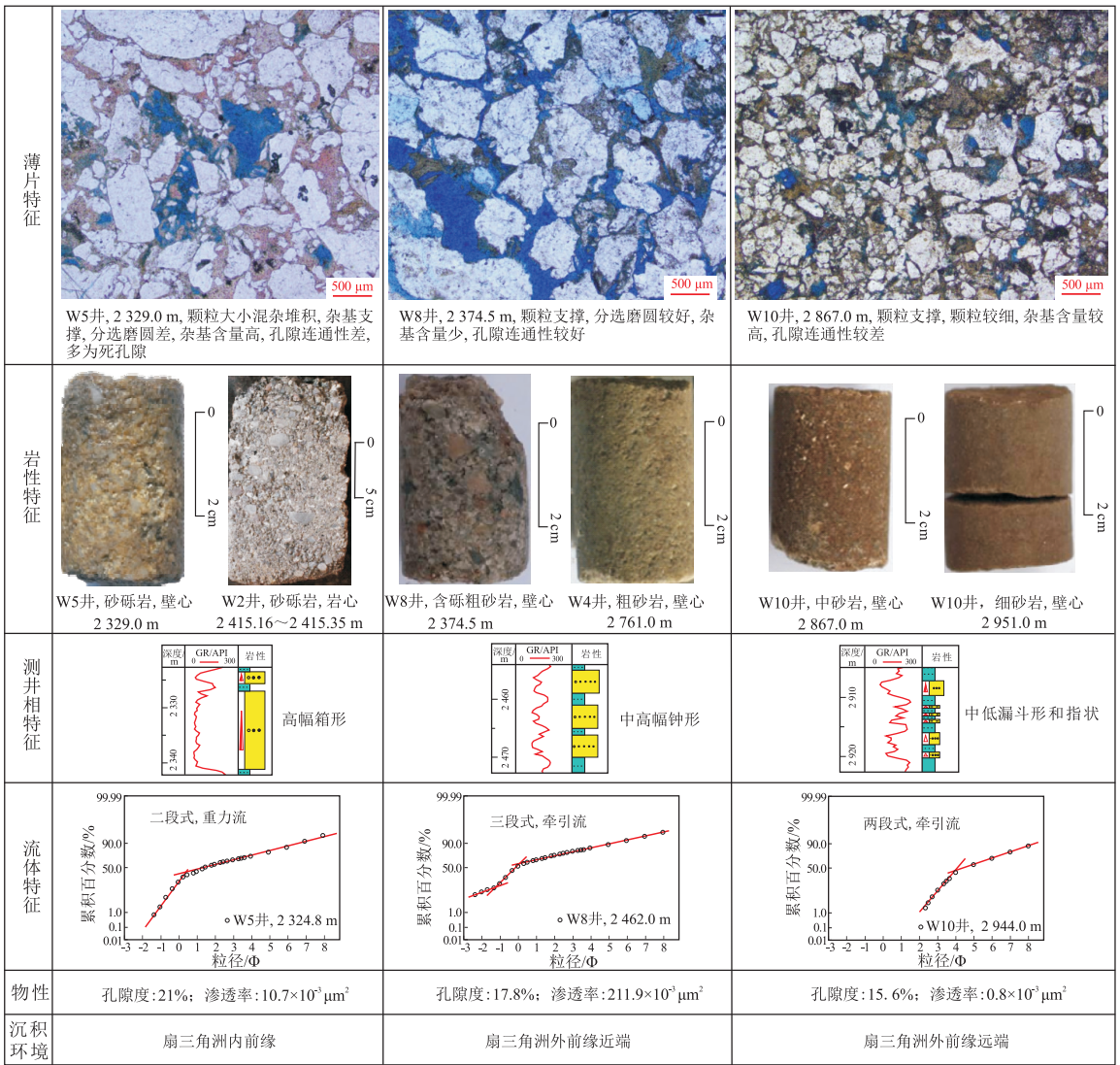


图 4 北部湾盆地乌石凹陷东区流三段不同沉积相带储层特征  
物性为薄片特征中壁心样品分析化验结果。

Fig.4 Reservoir characteristics in different sedimentary facies of L<sub>3</sub> in eastern Wushi Sag, Beibu Gulf Basin

表 1 北部湾盆地乌石凹陷东区流三段不同沉积相带储层物性及孔隙结构

Table 1 Reservoir properties and pore geometry in different sedimentary facies of L<sub>3</sub> in eastern Wushi Sag, Beibu Gulf Basin

相带	井名	岩性	孔隙度/ %	渗透率/ 10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	埋深/ m	杂基 含量/%	分选 系数	孔喉半径/ μm	配位数	流体 性质	物性 样品数
内 前 缘	W1	砂砾岩	20.5	15.7	2 642	8.0	4.08	0.862	0.61	重力流	4
	W2	砂砾岩	18.2	34.4	2 418	8.0		1.128		重力流	5
	W3	砂砾岩	18.4	14.2	2 272	6.8	4.68		0.90	重力流	4
	W5	砂砾岩	21.0	10.7	2 329	8.9	4.58		0.64	重力流	1
	W9	含砾粗砂岩	18.8	25.4	2 771	8.8	4.81	2.047		重力流	26
	W11	含砾粗砂岩	23.2	28.2	2 907					重力流	1
外 前 缘	W4	含砾中粗砂岩	19.7	109.4	2 635	5.1	4.45	2.913	1.10	牵引流	4
	近端 W7	含砾中粗砂岩	16.3	484.6	2 291					牵引流	1
	W8	含砾中粗砂岩	16.6	102.2	2 431	3.5	3.54	2.677	1.00	牵引流	7
	远端 W10	中细砂岩	16.2	3.4	2 892	10.8	2.90	1.002		牵引流	5

积物的粒径、分选、岩石组分的影响,在相同的埋深下储层的粒度越细、泥质和岩屑含量越高、分选越

差,受到的压实作用越强<sup>[15-19]</sup>。由于研究区抗压能力弱的岩屑和泥质含量高、埋深较大(约

2 400~2 900 m),流三段储层发生了较强烈的压实作用,压实作用损失的孔隙可达 21.6%~27.7%,是孔隙减小的主要原因。薄片上主要表现为:云母和岩屑等塑性颗粒产生塑性变形,颗粒被挤入孔隙中,堵塞孔隙(图 5a);石英等刚性颗粒出现破裂现象,颗粒间呈线接触(图 5b)。在不同相带,压实作用强度也不一样,内前缘颗粒比外前缘粗,埋深也更浅,导致内前缘压实率平均为 68.1%,外前缘压实率平均为 78.4%,外前缘压实作用强度比内前缘要高。

### 3.2.2 胶结作用

研究区胶结作用较弱,胶结物含量较少,分布在 0.5%~11%之间,平均为 2.7%,胶结率为 12.1%~39.3%,表现为弱胶结。一方面是由于研究区储层的泥质杂基含量比较高(图 5c),储层油气充注强度大,抑制了碳酸盐和硅质等胶结物的发育<sup>[20]</sup>;另一方面成岩早期形成的碳酸盐胶结物经溶解或蚀变后,保存下来的量极少。胶结物主要为自生黏土矿物,少量的铁方解石、铁白云石和菱铁矿,其中铁方解石和铁白云石呈亮晶晶状分布于粒间残余孔隙内,自生黏土矿物(高岭石、伊利石等)也会堵塞孔隙和喉道(图 5f),使物性降低。

### 3.2.3 溶解作用

由于研究区流三段的岩石类型主要为岩屑砂岩,成分成熟度较低,含有较多的长石和岩屑等不稳定组分,这为后期的溶蚀作用提供了物质基础。并且流三段处在中成岩 A 期,有机质处在成熟热

演化生油阶段,往外排出大量的有机酸,对储层中不稳定组分有较强的溶蚀作用,溶解作用增加的孔隙度达 4.5%~18%,溶解率达 63.5%~92.1%,表现为强溶解特征。其中被溶解组分主要为长石颗粒,少量的岩屑和碳酸盐胶结物。长石的溶蚀往往沿解理开始,随着溶蚀程度的增加,分别形成长石粒内溶孔、粒间溶孔(图 5d)、蜂窝状溶孔直至铸模孔<sup>[21-22]</sup>(图 5e)。研究区溶解作用较强,产生的较多次生孔隙,对孔隙和喉道有扩大作用,极大地改善了孔隙结构。

### 3.3 构造

古构造和断裂对次生孔隙的发育有重要的控制作用,因为古构造和断裂系统控制了酸性流体运移路径和方向<sup>[23]</sup>,同时在油气充注后,改变了流体性质,可以抑制成岩后期碳酸盐和自生黏土矿物的沉淀,弱化石英的次生加大<sup>[24-29]</sup>,有利于孔隙的保存,因此长期继承性的构造高部位通常次生孔隙发育,物性较好。研究区断裂比较发育,流三段的断层可以沟通流二段成熟的烃源岩。流二段烃源岩排出的酸性流体先通过断裂向上进行垂向运移,然后进入储集层进行侧向运移,对储层中的不稳定组分进行溶蚀形成次生孔隙。大断层附近通常微断层或者裂缝较发育,对流体的流动起到了较大的贡献作用,因此次生孔隙比较发育,而随着离断面距离的增大,酸性流体消耗量加大,pH 值会升高,溶蚀能力减弱<sup>[30-31]</sup>(图 6)。因此研究区 W8 和 W4 井距断层只有 10~30 m,同时 W8 井是一个古构造

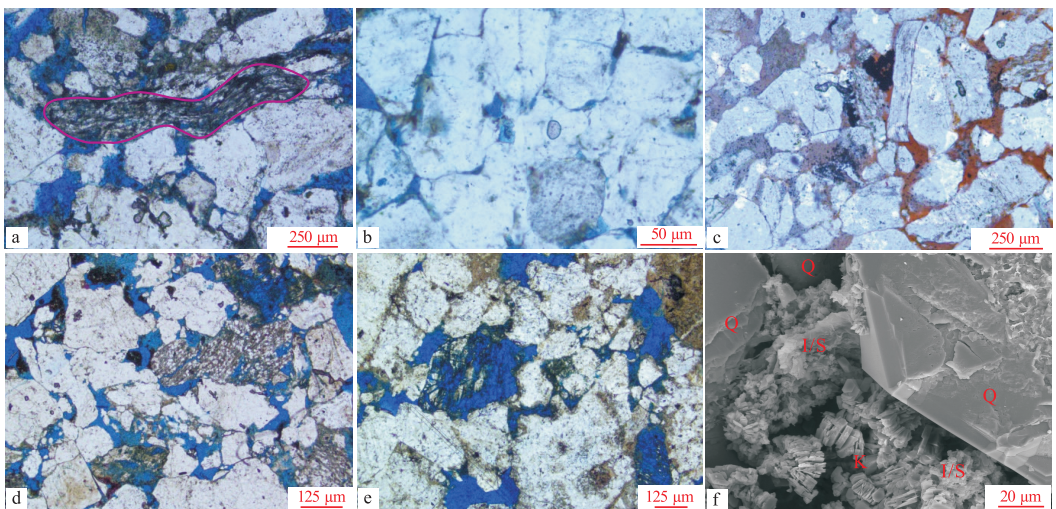


图5 北部湾盆地乌石凹陷东区流三段储层铸体薄片和扫描电镜特征

a. W8 井, 2 442.80 m, 岩屑被挤压变形, 部分进入了孔隙中; b. W11 井, 2 900.00 m, 碎屑颗粒间呈线接触; c. W3 井, 2 372.69 m, 颗粒间被大量泥质杂基充填, 一定程度上抑制了胶结物的形成; d. W7 井, 2 290.50 m, 长石和岩屑颗粒被溶蚀形成粒内和粒间溶孔; e. W9 井, 2 774.91 m, 长石颗粒被强烈溶蚀, 形成铸模孔; f. W8 井, 2 462.00 m, 石英(Q)颗粒间孔隙充填书页状高岭石(K)和片状伊蒙混层(I/S), 堵塞孔隙

Fig.5 Casting thin sections and SEM characteristics of L<sub>3</sub> in eastern Wushi Sag, Beibu Gulf Basin

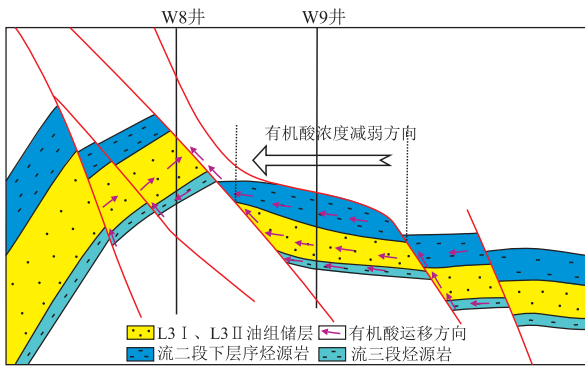


图 6 北部湾盆地乌石凹陷东区断裂控制有机酸运移路径模式

Fig.6 Organic acid migration path controlled by fractures in eastern Wushi Sag, Beibu Gulf Basin

高点(图 1),更容易接触到酸性流体,并且流体的输入和输出能力较强,可及时将溶解产物高岭石和硅质等带走<sup>[32]</sup>,有效次生孔隙度才得以形成。

### 4 优质储层分布

前文研究表明,沉积环境、成岩作用和构造共同控制了流三段储层的物性展布特征,物性最好的地方主要集中在大断裂附近的扇三角洲外前缘近端相带。扇三角洲内前缘虽然表现为大套厚层箱状砂体,但由于其泥质杂基含量高,颗粒分选磨圆差,原始孔隙度较小,杂基支撑,压实作用强,孔隙连通性差,物性较差。外前缘远端,岩性较细,泥质含量重,埋深大,压实作用强,原生孔隙保存较少,次生孔隙不发育,物性较差。而扇三角洲外前缘近端,分选磨圆变好,原始孔隙度较大,泥质含量较

小,颗粒支撑,溶解作用强,次生孔隙发育,孔隙连通性较好,物性较好,可以作为良好的油气储集层。这与测试资料吻合情况较好,扇三角洲内前缘的 W1、W2 和 W5 井 DST 测试日产原油分别为 44.3、2.2、1.8 m<sup>3</sup>(图 7);而在扇三角洲外前缘近端 W8 的侧钻井 DST 测试日产原油可达 189.1 m<sup>3</sup>;扇三角洲外前缘远端 W10 井虽然没有做 DST 测试,但进行了 MDT 测试,测试结果多为干点。

### 5 结论

(1) 研究区流三段为粗粒的扇三角洲沉积,岩性以砂砾岩和含砾砂岩为主,物性主要为中孔低渗,局部发育中孔中渗储层。沉积环境、成岩作用和构造是流三段储层物性的主要控制因素,且各因素间相互影响。沉积环境是影响储层物性的物质基础,分选磨圆好,泥质含量低的储层物性通常较好;成岩作用决定了孔隙的后期演化;构造控制了酸性流体运移路径和方向,靠近断层附近的储层溶蚀作用强,次生孔隙发育。

(2) 不同沉积相带的储层物性有一定的分布规律:扇三角洲内前缘沉积速率快,砂泥岩混杂堆积,杂基含量高,重力流特征,分选磨圆差,强压实、中等溶解成岩相,孔隙度较大,但孔隙连通性差,表现为中孔低渗特征;扇三角洲外前缘近端岩性以含砾砂岩为主,沉积物搬运距离更远,经过一定的淘洗,杂基含量更少,牵引流特征,分选更好,磨圆中等,强压实、强溶解成岩相,表现为中孔中渗特征;扇三角洲外前缘远端岩性以中—细砂岩为主,埋深

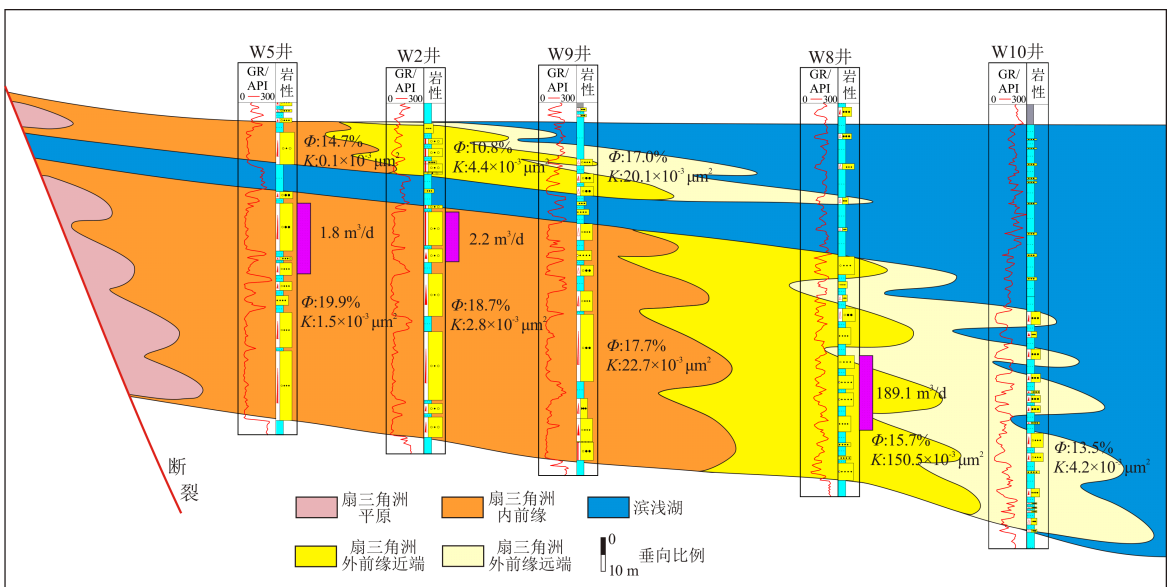


图 7 北部湾盆地乌石凹陷东区 L<sub>3</sub> II 油组沉积相连井剖面

Fig.7 Cross-section showing sedimentary facies of L<sub>3</sub> II in eastern Wushi Sag, Beibu Gulf Basin

最大,粒度最细,泥质含量重,强压实、弱溶解成岩相,表现为中—低孔、低—特低渗特征。因此优质储层分布在靠近大断裂的扇三角洲外前缘近端的水下分流河道储层中,是下一步优先开发的目标区块。

#### 参考文献:

- [1] 柳永杰,赵志刚,李建红,等.乌石凹陷成藏组合划分及主控因素分析[J].中国海上油气,2008,20(2):82-86.  
Liu Yongjie,Zhao Zhigang,Li Jianhong,et al.Hydrocarbon play division and major control analysis in Wushi Sag,Beibuwan Basin[J].China Offshore Oil and Gas,2008,20(2):82-86.
- [2] 康海亮,林畅松,李洪辉,等.库车坳陷依南地区阿合组致密砂岩气储层特征与有利区带预测[J].石油实验地质,2016,38(2):162-169.  
Kang Hailiang,Lin Changsong,Li Honghui,et al.Reservoir characteristics and favorable zone prediction of tight sandstone gas of the Ahe Formation in Yinan area,Kuqa Depression[J].Petroleum Geology & Experiment,2016,38(2):162-169.
- [3] 陈平,马英俊,施琰,等.迈陈凹陷东部涸洲组储层特征及影响因素:以XW6油藏为例[J].石油实验地质,2015,37(4):460-465.  
Chen Ping,Ma Yingjun,Shi Yan,et al.Reservoir characteristics and influencing factors of Weizhou Formation in eastern Maichen Sag, Beibuwan Basin: A case study of reservoir XW6[J].Petroleum Geology & Experiment,2015,37(4):460-465.
- [4] 史基安,王琪.影响碎屑岩天然气储层物性的主要控制因素[J].沉积学报,1995,13(2):128-139.  
Shi Ji'an,Wang Qi.A discussion on main controlling factors on the properties of clastic gas reservoirs[J].Acta Sedimentologica Sinica,1995,13(2):128-139.
- [5] Lima R D,De Ros L F.The role of depositional setting and diagenesis on the reservoir quality of Devonian sandstones from the Solimões Basin, Brazilian Amazonia [J]. Marine and Petroleum Geology,2002,19(9):1047-1071.
- [6] 齐亚林,赵彦德,王克,等.鄂尔多斯盆地姬塬与黄陵地区长8段储层主控因素研究[J].石油实验地质,2015,37(3):334-340.  
Qi Yalin,Zhao Yande,Wang Ke,et al.Reservoir main controlling factors of Chang8 sandstones in Jiyuan and Huangling areas,Ordos Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2015,37(3):334-340.
- [7] 陈大友,朱玉双,张皎生,等.鄂尔多斯盆地马岭地区长8储层成岩作用与有利成岩相带[J].石油实验地质,2015,37(6):721-728.  
Chen Dayou,Zhu Yushuang,Zhang Jiaosheng,et al.Diagenesis and favorable diagenetic facies of the eighth member of Yanchang Formation in Maling area, the Ordos Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2015,37(6):721-728.
- [8] 孙梦迪,于炳松,李娟,等.渝东南地区龙马溪组页岩储层特征与主控因素[J].特种油气藏,2014,21(4):63-66.  
Sun Mengdi,Yu Bingsong,Li Juan,et al.Features and major controlling factors of Longmaxi shale reservoir in Southeastern Chongqing [J].Special Oil & Gas Reservoirs,2014,21(4):63-66.
- [9] 陈吉,吴远坤,孙爱艳,等.南堡油田沙一段储层特征及控制因素[J].特种油气藏,2015,22(1):36-40.  
Chen Ji,Wu Yuankun,Sun Aiyun,et al.Reservoir features and controlling factors of Shayi Member,Nanpu Oilfield [J].Special Oil & Gas Reservoirs,2015,22(1):36-40.
- [10] 钟大康,朱筱敏,周新源,等.塔里木盆地中部泥盆系东河砂岩成岩作用与储集性能控制因素[J].古地理学报,2003,5(3):378-390.  
Zhong Dakang,Zhu Xiaomin,Zhou Xinyuan,et al.Diagenesis and controlling factors of reservoir quality of Devonian Donghe sandstones in central Tarim Basin[J].Journal of Palaeogeography,2003,5(3):378-390.
- [11] 马奔奔,操应长,王艳忠,等.东营凹陷盐家地区沙四上亚段砂砾岩储层岩相与物性关系[J].吉林大学学报(地球科学版),2015,45(2):495-506.  
Ma Benben,Cao Yingchang,Wang Yanzhong,et al.Relationship between lithofacies and physical properties of sandy conglomerate reservoirs of Es<sub>4</sub><sup>s</sup> in Yanjia area,Dongying Depression [J].Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2015,45(2):495-506.
- [12] 鲁新川,孔玉华,常娟,等.准噶尔盆地西北缘克百地区二叠系风城组砂砾岩储层特征及主控因素分析[J].天然气地球科学,2012,23(3):474-481.  
Lu Xinchuan,Kong Yuhua,Chang Juan,et al.Characteristics and main controlling factors of sand-gravel stone reservoir of Permian Fengcheng Formation in Kebai area,northwest Junggar Basin [J].Natural Gas Geoscience,2012,23(3):474-481.
- [13] Beard D C,Weyl P K.Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand [J].AAPG Bulletin,1973,57(2):349-369.
- [14] 王瑞飞,孙卫.储层沉积—成岩过程中物性演化的主控因素[J].矿物学报,2009,29(3):399-404.  
Wang Ruifei,Sun Wei.Main factors controlling the evolution of physical properties during the process of reservoir sedimentation—diagenesis [J].Acta Mineralogica Sinica,2009,29(3):399-404.
- [15] 操应长,惠克来,王健,等.砂岩机械压实与物性演化成岩模拟实验初探[J].现代地质,2011,25(6):1152-1158.  
Cao Yingchang,Xi Kelai,Wang Jian,et al.Preliminary discussion of simulation experiments on the mechanical compaction and physical property evolution of sandstones [J].Geoscience,2011,25(6):1152-1158.
- [16] 张顺存,黄治超,鲁新川,等.准噶尔盆地西北缘二叠系砂砾岩储层主控因素[J].兰州大学学报(自然科学版),2015,51(1):20-30.  
Zhang Shuncun,Huang Zhijiu,Lu Xinchuan,et al.Main controlling factors of Permian sandy conglomerate reservoir in the northwestern Junggar Basin [J].Journal of Lanzhou University (Natural Sciences),2015,51(1):20-30.
- [17] 尤丽,李伟,李才,等.琼东南盆地宝岛区深埋藏储层物性主控因素[J].特种油气藏,2014,21(3):37-40.  
You Li,Li Wei,Li Cai,et al.Main factors affecting physical properties of deep burial reservoir in Baodao area of southeast Hainan Basin [J].Special Oil & Gas Reservoirs,2014,21(3):37-40.

- [18] 葛善良,鲁新便,盛海波,等.塔中顺9井区柯下段致密砂岩储层特征及成岩演化[J].油气地质与采收率,2014,21(4):42-45.  
Ge Shanliang, Lu Xinbian, Sheng Haibo, et al. Reservoir characteristics and diagenesis evolution of tight sandstone reservoir of Shun9 well block in Tazhong area [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(4): 42-45.
- [19] 赵杰,李宏为,杨全凤,等.巴音都兰凹陷阿尔善组碎屑岩储层特征及其主控因素[J].断块油气田,2015,22(3):291-295.  
Zhao Jie, Li Hongwei, Yang Quanfeng, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of clastic rocks in Aershan Formation of Bayindulan Sag [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2015, 22(3): 291-295.
- [20] 纪友亮,高崇龙,刘玉瑞,等.高邮凹陷阜一段油气充注对储层物性演化的影响[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(1):133-139.  
Ji Youliang, Gao Chonglong, Liu Yurui, et al. Influence of hydrocarbon charging to the reservoir property in 1st member of Funing Formation in Gaoyou Depression [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(1): 133-139.
- [21] 孟万斌,吕正祥,刘家铎,等.川西中侏罗统致密砂岩次生孔隙成因分析[J].岩石学报,2011,27(8):2371-2380.  
Meng Wanbin, Lü Zhengxiang, Liu Jiaduo, et al. Genesis of secondary porosity in Middle Jurassic tight sandstone in western Sichuan [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2371-2380.
- [22] 袁晓光,李维锋,董宏,等.克百地区二叠系火山岩储层特征及其控制因素分析[J].断块油气田,2015,22(4):445-449.  
Yuan Xiaoguang, Li Weifeng, Dong Hong, et al. Characteristics and controlling factors of Permian volcanic reservoirs in Kebai Area [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2015, 22(4): 445-449.
- [23] 钟大康,朱筱敏,周新源,等.构造对砂岩孔隙演化的控制:以塔里木中部地区东河砂岩为例[J].地质科学,2004,39(2):214-222.  
Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Zhou Xinyuan, et al. Effect of structure on sandstone's porosity evolution: A case study from the Donghe sandstones in central Tarim [J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(2): 214-222.
- [24] 袁东山,张枝焕,刘洪军.油气充注对晚期碳酸盐矿物胶结作用的影响[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2005,27(2):298-300.  
Yuan Dongshan, Zhang Zhihuan, Liu Hongjun. The effect of oil and gas filling on the carbonate minerals cementation in the late stage [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(2): 298-300.
- [25] 钟大康,朱筱敏,张枝焕,等.东营凹陷古近系砂岩储集层物性控制因素评价[J].石油勘探与开发,2003,30(3):95-98.  
Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Zhang Zhihuan, et al. Controlling factors of sandstone reservoir of the Paleogene in Dongying Sag [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 95-98.
- [26] Marchand A M E, Smalley P C, Haszeldine R S, et al. Note on the importance of hydrocarbon fill for reservoir quality prediction in sandstones [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(9): 1561-1572.
- [27] 曲希玉,邱隆伟,宋璠,等.大牛地气田石英次生加大特征及其对储层物性的影响[J].石油实验地质,2014,36(5):567-573.  
Qu Xiyu, Qiu Longwei, Song Fan, et al. Characteristics and its effect on reservoir physical property of quartz overgrowth at Daniudi Gas Field [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(5): 567-573.
- [28] 赵姗姗,张哨楠,万友利.塔中顺托果勒低隆区柯坪塔格组长石溶蚀及对储层的影响[J].石油实验地质,2015,37(3):293-299.  
Zhao Shanshan, Zhang Shaonan, Wan Youli. Feldspar dissolution and its effect on reservoir in Kepingtage Formation, Shuntuoguole Low Uplift, central Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(3): 293-299.
- [29] 于川淇,李劭彧,邓西里,等.长石与流体相互作用的模拟实验研究[J].特种油气藏,2014,21(1):120-123.  
Yu Chuanqi, Li Shaoyu, Deng Xili, et al. Physical modeling experimental study on feldspar-fluid interaction [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(1): 120-123.
- [30] 张琴,钟大康,朱筱敏,等.东营凹陷下第三系碎屑岩储层孔隙演化与次生孔隙成因[J].石油与天然气地质,2003,24(3):281-285.  
Zhang Qin, Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, et al. Pore evolution and genesis of secondary pores in Paleogene clastic reservoirs in Dongying Sag [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(3): 281-285.
- [31] 钟大康,朱筱敏,周新源,等.次生孔隙形成期次与溶蚀机理:以塔中地区志留系沥青砂岩为例[J].天然气工业,2006,26(9):21-24.  
Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Zhou Xinyuan, et al. Phases of secondary pore generation and dissolution mechanism: Taking Silurian asphaltic sandstone in central Tarim Basin as an example [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(9): 21-24.
- [32] 陈鑫,钟建华,袁静,等.渤南注陷古近系高岭石发育特征及转化机理[J].石油勘探与开发,2009,36(4):456-462.  
Chen Xin, Zhong Jianhua, Yuan Jing, et al. Development and formation of Paleogene kaolinite, Bonan Subsag [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(4): 456-462.

(编辑 韩 彧)