

彭松,李珊珊,李明,等. 流动单元研究在乌石 A 油田扇三角洲沉积体系复杂储层的应用[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(4):10-17.

流动单元研究在乌石 A 油田扇三角洲沉积体系复杂储层的应用

彭松,李珊珊,李明,谭舜,朱金起
(中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东湛江 524057)

摘要:乌石 A 油田为近年来在南海西部盆地新发现的油田之一,主要发育近源扇三角洲沉积体系,通过评价井产能测试和测压取资料表现出研究区储层渗流特征复杂,产能与测井解释储层物性相关性差,常规方法无法准确表征储层渗流特征。针对海上油田资料较匮乏的特点,应用流动单元研究思路,以微观孔隙结构特征分类为基础划分流动单元,总结归纳各类流动单元的微观与宏观特点,提出以分选性、电性、孔隙度 3 参数在全区范围内划分流动单元以及评价其产能,评价结果与实测结果吻合度较高,目前来看此方法能准确评价此类复杂储层,有效指导该油田后期开发部署。

关键词:扇三角洲;复杂储层;微观孔隙结构;流动单元

中图分类号:P736

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.04002

1 流动单元研究现状

自 1984 年 Hearn 提出流动单元的概念以来,国内外学者对此开展了不同方面的研究,将储层细分至流动单元能够深化储层认识、进一步揭示储层非均质性特征以及提高油藏数值模拟精度,因此在诸多已开发油田有较好的应用效果。

目前国内外流动单元研究方法归纳起来主要有以下 4 类:①以储层沉积学为理论基础,研究流动单元;②着眼于各个储层参数,以数学方法分析为主,进行流动单元研究;③渗流实验理论为基础,借助大量实验数据分析,进行流动单元研究;④利用测井和地震资料响应特征研究流动单元。笔者认为以上 4 种方法都有各自的适应性:储层

沉积研究方法主要针对流动单元形成宏观机理进行剖析,易于定性描述,难于定量表征,对于渗流规律复杂的储层研究精度有所欠缺;数学统计研究方法是采用应用聚类分析、灰色关联、神经网络等方法对多个储层参数进行统计分析寻找数据之间的相关性,但这类方法对数据的依赖性很高,其参数的选择和权重的把握对结果影响较大,而其结果也往往缺乏理论支持;渗流实验研究方法是采用岩心实验数据剖析渗流机理,通过大量的实验数据研究流动单元,这种方法准确性较高但对于岩心资料过于依赖,往往难于应用到非取心段;测井或地震响应方法研究能够在宏观上直观的表征流动单元分布特征,但目前该方法往往受到资料品质的限制,目前国内外应用的较少。综上所述,流动单元研究的准确性往往对数据量与其代表性有着较高的要求,因此易于应用在开发中后期有较多资料基础的油田,国内外也有较多的应用实例。而对于海上处于开发初期的油田,只有少量的岩心和测试测压资料,各项资料相对匮乏,

收稿日期:2018-08-23

基金项目:国家重点课题专项(2016ZX05024-006)

作者简介:彭松(1983—),男,硕士,工程师,主要从事海上油气田开发地质及储层研究工作。E-mail:pengsong1@cnooc.com.cn

数据往往代表性不足,导致常规流动单元研究方法往往出现较大的误差,难以系统深入地开展流动单元的研究。

2 流动单元研究

2.1 油田简介

本次研究区乌石 A 油田位于南海北部湾盆地乌石凹陷的东北部(图 1),已钻探井评价井 10 口,多口井测试取得工业油流发现,而油田目前也即将投入开发,主要含油层位古近系始新世流沙港组三

段(简称流三段)。流三段时期为乌石凹陷湖盆二期扩张的初始阶段,物源主要由凹陷北斜坡向凹陷沉降中央充填,沿凹陷边缘发育来自 NE 向扇三角洲相沉积。流三段共经历了 3 次湖退、湖进沉积,以此划分为 3 个油组,主要目的层为 I 油组,即沉积晚期大规模湖退形成扇三角洲前积体。

目前油田开发面临的主要问题是:储层岩性变化较快,储层渗流关系复杂,产能难以准确评价。具体表现为:测试低产井段反而测井孔隙度大,测试高产井段反而测井孔隙度小,测井孔隙度与测试、测压结果毫无规律(图 2、3),按照常规方法无法对此类储层准确评价产能。

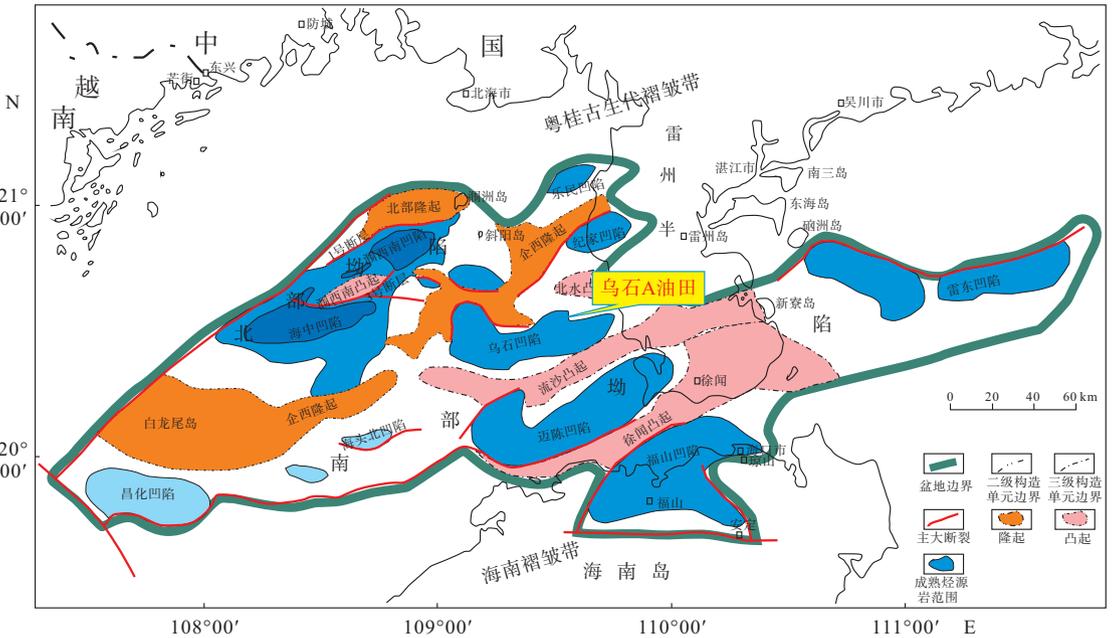


图 1 乌石 A 油田构造位置

Fig.1 Tectonic location of WS A Oilfield

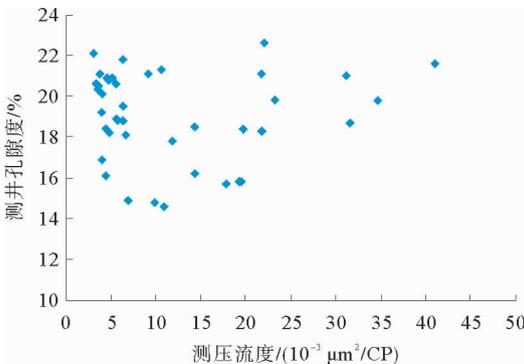


图 2 测压流度与测井孔隙度关系

Fig.2 Relationship between pressure liquidity and logging porosity

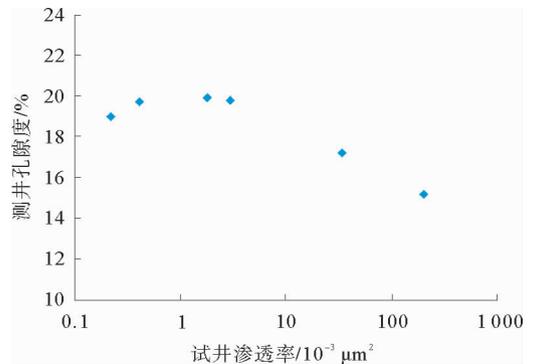


图 3 试井渗透率与测井孔隙度关系

Fig.3 Relationship between testing permeability and logging porosity

2.2 基于微观分析的流动单元划分

流动单元指的渗流特征相同、水淹特征一致、具有相似孔隙结构的储层单元^[1-4]。

储层质量指数(RQI):

$$RQI = 0.0314 \sqrt{k/\varphi_c}$$

标准孔隙度(φ_z):

$$\varphi_z = \varphi_c / (1 - \varphi_c)$$

流动分层指数(FZI):

$$FZI = \frac{1}{\sqrt{F_s \tau S_{gv}}} = RQI / \varphi_z$$

式中: k 为渗透率, μm^2 ;

φ_c 为有效孔隙度,小数;

τ 为孔隙介质迂曲度;

F_s 为形状系数;

S_{gv} 为单位颗粒体积的表面积, μm^{-1} 。

FZI指数定义可以看出,其能够综合反映岩石成分、孔隙结构等地质特征^[5-7]。也可以认为

FZI在一定范围内的样品具有相同的孔喉特征。因此,笔者从流动单元形成的渗流成因入手开展研究,通过对岩心及薄片资料进行分析其微观特征:岩性在纵向上变化较快,在镜下也表现出复杂多样的孔隙结构(图4)。为进一步揭示孔喉特征与渗流特征的关系,选取不同岩心薄片图像分析结果中的粒径分选系数、平均配位数、平均孔喉比、平均孔径、平均喉道、面孔率和泥质含量7个反应孔隙结构特征的参数,结合渗透率和FZI指数进行相关性分析及聚类分析,发现有以下2个特征:①粒径分选系数高的样本FZI指数相对较为接近,而粒径分选系数低的样本FZI指数变化较大;②平均配位数、平均孔径较小的样品渗透率以及FZI指数相关性较差。也就表明,粒径分选系数高的孔隙结构有一定的相似性,而粒径分选系数低的孔隙结构变化大;孔隙度较小,渗透率较低,物性差的样品,影响因素较多(往往由于测量系统误差),导致相关性差,此类数据的干扰性大。

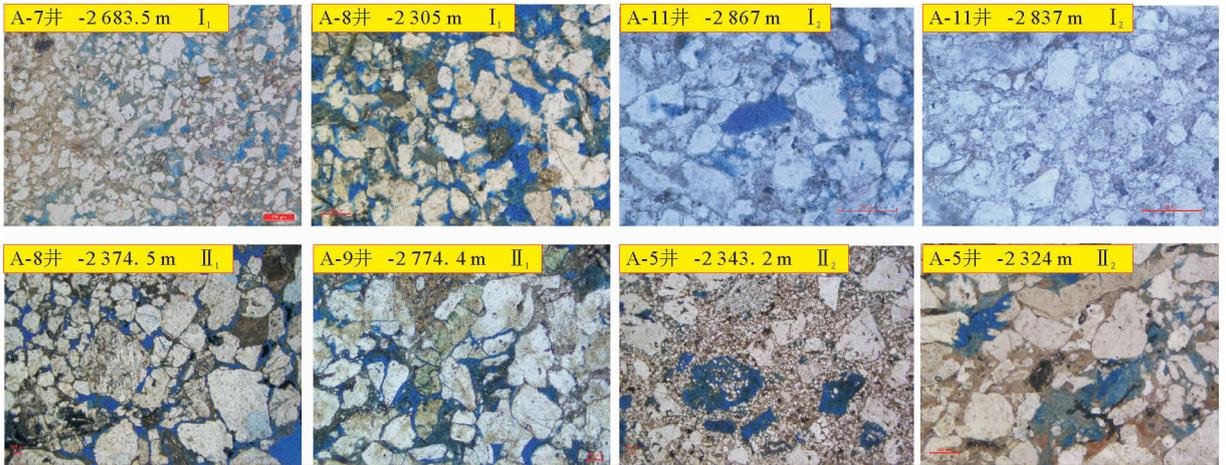


图4 储层薄片镜下特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of the reservoir

结合这2个特征可以进一步分析:粒径分选系数高的样本主要为不含砾的中细砂岩,而粒径分选系数较低的主要为含砾中砂岩或杂砂岩,由于FZI指数表现出的渗流特征的不同,因此分为2类流动单元:I类流动单元是粒径分选系数 >1.0 的储层,以中细砂岩储层为主;II类流动单元是粒径分选系数 <1.0 的储层,以含砾砂岩储层为主。但进一步研究发现,在I类流动单元中也存在差异,还可以进一步划分为2类:I1类流动

单元特点是配位数较高,平均孔径大、喉道较大、孔喉比低、泥质含量低,FZI指数表现出分布集中;I2类流动单元特点则是配位数较低、平均孔径小、喉道小,泥质粉砂质含量高,渗透率较低导致FZI指数分布不均。对于II类流动单元同样也存在差异,可以进一步分为2类:II1类特点是配位数较高,平均孔径大,平均喉道大,泥质含量中一低,通过相关性分析表明喉道大小和黏土质矿物含量对渗透率影响较大;II2类特点是配位

数较低,平均孔径大,平均喉道小,黏土质矿物含量较高,渗透性较低但 FZI 指数毫无规律。对于 I₂ 类和 II₂ 类共同特征都是孔隙度小渗透率低, FZI 指数系统误差大,单独分类以减少对其他流动单元规律的影响。

2.3 非取心段流动单元划分参数选取

上述微观分析后,能对取心段能很容易划分流动单元,但对于海上油气田,取心较少,还需要以岩电参数作为“桥梁”对非取心段进行流动单元的划分。

分类后结果可以看出,两类流动单元在渗流特征上表现出截然不同的特征: I 类流动单元孔隙度与流度有较好的相关性(图 5),岩心孔渗散点图上来看相关系数 > 0.75(图 6),这也表明, I 类流动单元可以用测井孔隙度为主要参数去表征产能高低;而 II 类储层则孔隙度与渗透率的相关性较差,无规律,难以用孔隙度去表征。

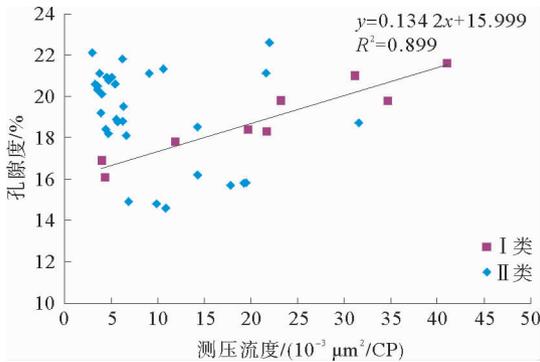


图 5 测压流度与测井孔隙度关系(分类)

Fig. 5 Relationship between pressure liquidity and logging porosity (classification)

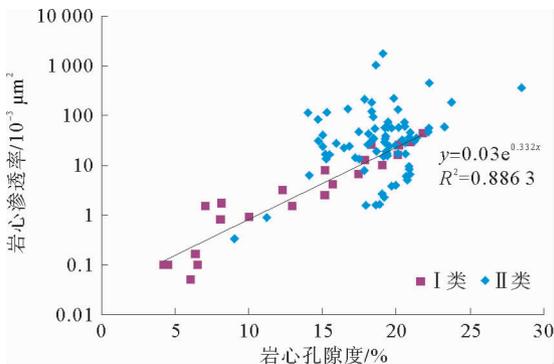


图 6 岩心孔隙度与岩心渗透率关系(分类)

Fig. 6 Relationship between core permeability and core porosity (classification)

对岩电参数相关性研究发现 II 类流动单元渗透性与油层段电阻率,表现出较为良好的相关性。在对测压流度、比采油指数与电阻率关系图来看(图 7、8)相关系数均较高,对此我们也进一步分析其原因:研究区油藏成藏充注强度大,研究区范围内几乎没有可动水水层,电阻率只受束缚水饱和度影响。而在纯油层中束缚水的赋存状态有微孔喉水和薄膜水(颗粒表面的水膜)2 类,由于黏土质点间富微孔和极大的比面,有相当一部分水与黏土矿物伴生。黏土膜微孔和表面富含地层水,极大地扩大了储集层导电网络的截面积,这是导致低电阻率油层的最主要原因。而 II 类流动单

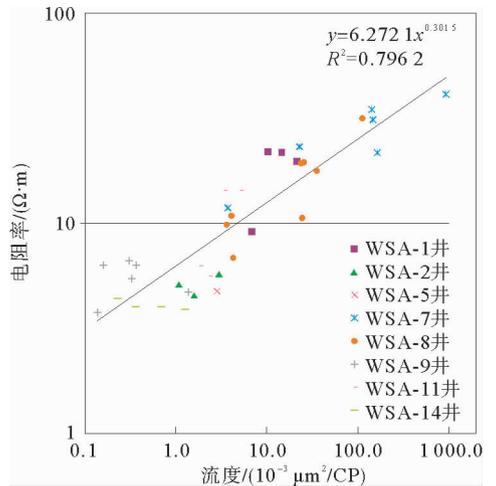


图 7 测压流度与电阻率关系

Fig. 7 Relationship between pressure liquidity and logging resistivity

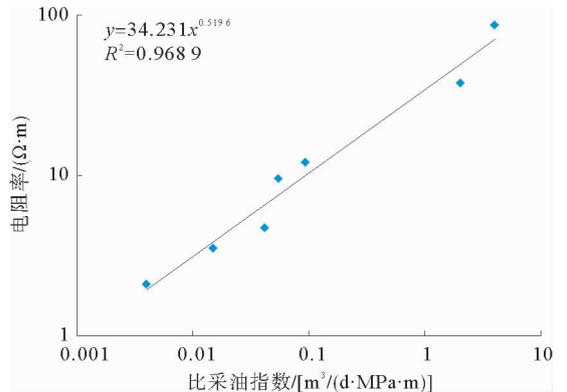
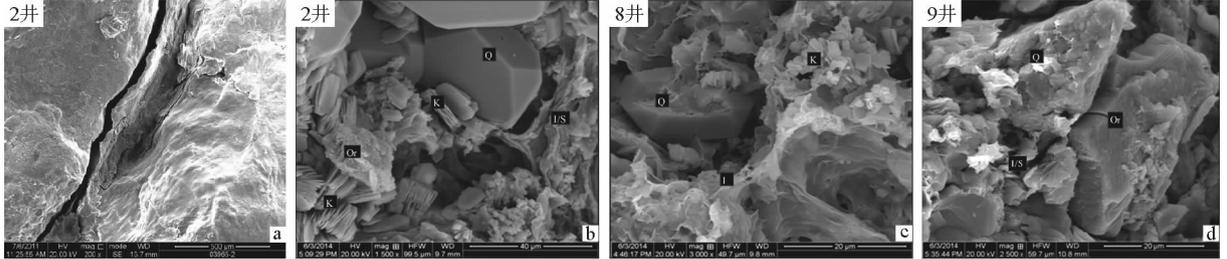


图 8 比采油指数与电阻率关系

Fig. 8 Relationship between specific productivity index and logging resistivity

元黏土质矿物含量高,尤其是高岭土及伊利石(图9),这些黏土质矿物广泛分布在储层颗粒之间,形成厚层黏土膜吸附较多的束缚水,束缚水在降低了电阻率同时会在一定程度上阻碍流体流动,降

低渗透率。对于此类流动单元,主要由于束缚水降低其渗透率,因此,电阻率则可以在一定程度上反映II类流动单元的渗流能力^[8-16],从而定量计算产能。



注:图 a 颗粒间充填它形结构黏土质,贴粒缝较发育;图 b 颗粒间充填高岭石等黏土矿物;图 c, d 颗粒间充填片状伊利石等黏土矿物

图 9 岩石颗粒间黏土特征

Fig. 9 Characteristics of intergranular clay minerals

2.4 流动单元划分

选取粒径分选系数、测井孔隙度和电阻率对全油田所有井划分流动单元(图 10)。

各个参数对流动单元划分尺度不一,粒径分选系数主要对流动单元类别进行判别,而孔隙度和电阻率则分别对这 2 类流动单元进行进一步的

划分标尺,同样也是分别衡量 2 类流动单元的重要参数^[17-20]。而对于 I₂ 类和 II₂ 类基本属于低孔特低渗储层,对产能基本没有贡献。划分流动单元后对各个测试段储层的渗流特征进行重新评价,看见其结果与研究区产能测试吻合度较高(表 1,图 11),通过流动单元的划分有效提高了复杂储层的产能评价精度。

| 流动单元分类 | 典型岩心(井壁心)照片 | 典型微观照片 | 典型空隙半径分布 | 微观特征总结 | 渗流规律 |
|-----------------|-------------|--------|----------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| I ₁ | | | | 中细砂岩为主 1.分选系数>1 2.配位数>0.8 3.平均孔隙半径>2 μm 4.孔喉比<4 5.泥质含量<6% | 与孔隙度相关性较好 |
| I ₂ | | | | 中细砂岩, 泥质粉细砂岩 1.分选系数>1 2.配位数<0.8 3.平均孔隙半径<2 μm 4.孔喉比>4 5.泥质含量>6% | 与孔隙度有一定的相关性, 但孔隙度小, 泥质含量高 |
| II ₁ | | | | 含砾中砂岩、粗砂岩 1.分选系数<1 2.配位数>0.8 3.平均孔隙半径>2 μm 4.孔喉比<4 5.泥质含量<6% | 油层中与电阻率相关性较好 |
| II ₂ | | | | 含砾粉细砂岩、杂砂岩 1.分选系数<1 2.配位数<0.8 3.平均孔隙半径>2 μm 4.孔喉比>4 5.泥质含量>6% | 油层中与电阻率有一定的相关性, 但电阻率低, 泥质含量高 |

图 10 不同流动单元特征

Fig. 10 Characteristics of different flow unit

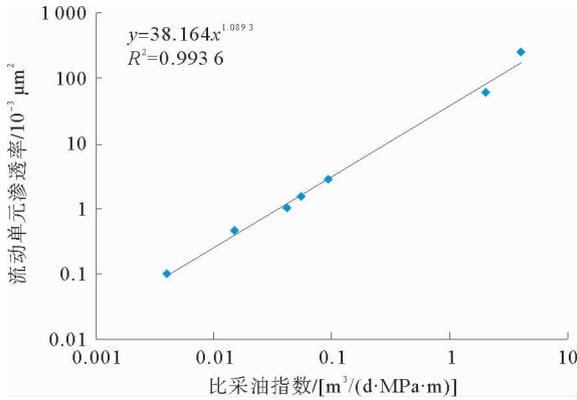


图 11 流动单元解释渗透率与产能关系

Fig. 11 Relationship between flow unit permeability and productivity

3 扇三角洲复杂储层流动单元分布规律探讨

通过对全区所有井流动单元划分可以看到,流动单元的分布是有规律性的,与其沉积成岩作用密不可分(图 12)。

从沉积角度来说,流动单元的成因与沉积微相展布息息相关,纵向上来看,研究区是典型的扇三角洲水下分流河道特征:底部强水动力冲刷导致砂泥混杂质,易形成 II₂ 类流动单元;下部为砂砾岩储层以及槽状交错层理的含砾砂岩层是往往对应 II₁ 类流动单元;上部平行层理的中细砂岩

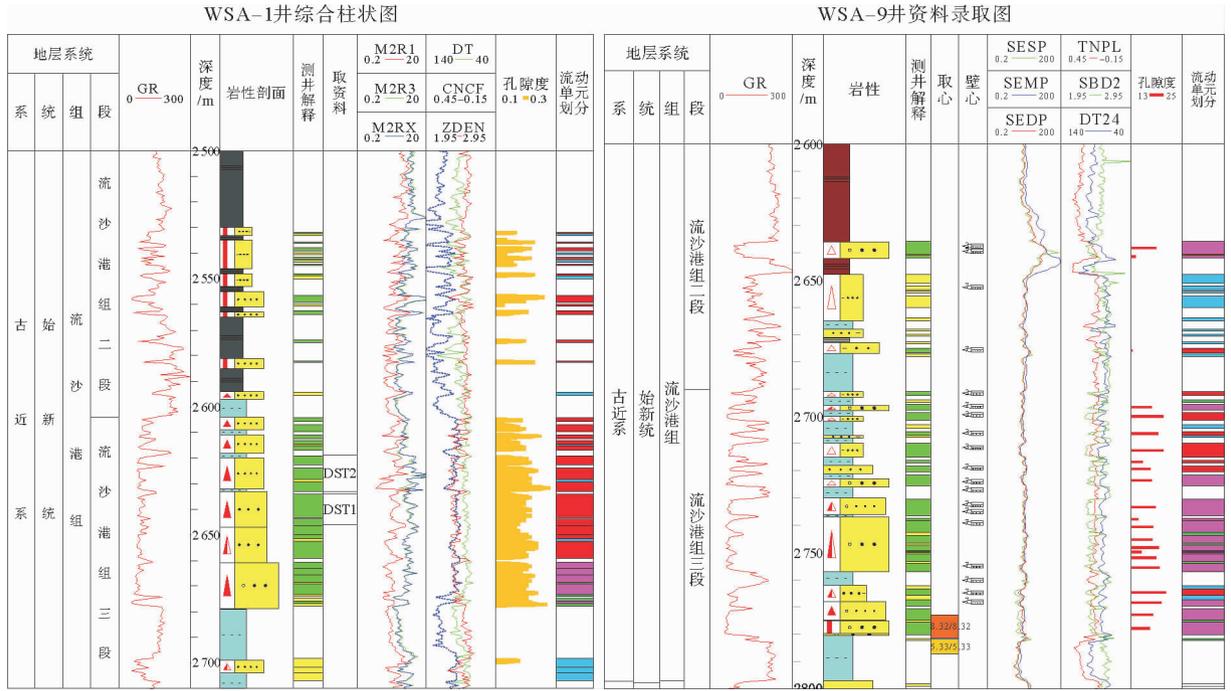
表 1 产能测试结果与流动单元组成

Table 1 Capacity test results and flow unit composition

| 井区 | 测试方式 | 测试油组 | 射孔井段 m | 射开厚度 m | 有效厚度 m | 油嘴 mm | 产量/(m ³ /d) | | | 井底流压 /MPa | 外推压力 /MPa | 生产压差 /MPa | 采油指数/ [m ³ /(d·MPa)] | | 比采油指数/ [m ³ /(d·MPa·m)] | | 流动单元组成 |
|---------|------------------|--------------------------------|----------------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|------------------------|-------------|--------------|------------------|--------------|------------------|------------------------------------|--------|---------------------------------------|----------------|----------------------------------|
| | | | | | | | 油 | 气 | 水 | | | | 实际 | 理论 | 实际 | 理论 | |
| WSA-1 | DST1 | L ₂ I | 2634.0~2646.0 | 12.0 | 16.9 | 3.18 注氮气举 12.7 | 11.10 23.60 | 微量 微量 | 0.00 0.00 | 19.276 4.048 | 29.815 | 10.539 25.767 | 0.936 | 0.714 | 0.055 | 0.042 | I ₁ 、I ₂ |
| | DST2 | | 2619.0~2633.0 2634.0~2646.0 | 26.0 | 36.0 | 3.18 6.35 | 17.80 44.30 | 少量 4 563 | 0.00 0.00 | 23.421 16.777 | 29.599 | 6.178 12.822 | 3.347 | 4.245 | 0.093 | 0.118 | I ₁ 、I ₂ |
| WSA-2 | DST1 | L ₂ I | 2432.0~2446.0 | 14.0 | 13.0 | 注氮气举 11.11 注氮气举 11.11 | 2.17 1.03 | 微量 微量 | 0.00 0.00 | 5.945 6.043 | 23.930 | 17.985 17.887 | 0.058 | 0.048 | 0.004 | 0.004 | I ₂ 、II ₂ |
| WSA-2Sa | DST1 | L ₂ I | 2432.0~2452.0(斜) 2431.49~2451.13(垂) | 20.0 (斜) 19.6 | 20.9 | 3.18 注氮气举7.94 | 6.80 15.10 | 少量 少量 | 0.00 0.00 | 14.800 6.895 | 23.552 | 8.752 16.657 | 0.879 | 0.551 | 0.042 | 0.026 | I ₁ 、II ₂ |
| WSA-5 | DST1 | | 2324.0~2348.0 | 24.0 | 6.0 | 注氮气举9.53 | 1.77 | 微量 | 0.00 | 3.361 | 22.915 | 19.554 | 0.091 | 0.071 | 0.015 | 0.012 | II ₁ 、II ₂ |
| WSA-8Sa | DST1 | L ₂ I | 2486.0~2520.0 | 34.0 | 17.80(垂) 18.80(斜) | 6.53 (11h05) | 107.80 | 15 171 | 0.00 | 21.798 | 24.525 | 2.727 | 36.232 | 47.412 | 2.036 | 2.664 | I ₁ 、II ₁ |
| | | | | | | 4.76 (15h47) | 54.90 | 8 195 | 0.00 | 22.733 | | 1.792 | | | | | |
| | | | | | | 7.14 (8h0) | 122.90 | 16 269 | 0.00 | 21.083 | | 3.442 | | | | | |
| | | | | | | 9.53 (9h01) | 189.10 | 23 989 | 0.00 | 19.091 | | 5.434 | | | | | |
| DST2 | L ₂ Ⅷ | 2263.0~2274.0 2282.0~2296.0 | 25.0 | 20.17(垂) 21.60(斜) | 4.76 (15h57) | 28.30 | 3 800 | 0.00 | 22.224 | 23.252 | 1.028 | 81.301 | 86.663 | 4.031 | 4.297 | I ₁ | |
| | | | | | 7.14 (11h01) | 125.30 | 15 787 | 0.00 | 20.390 | | 2.862 | | | | | | |
| | | | | | 9.53 (7h59) | 209.80 | 23 241 | 0.00 | 19.496 | | 3.756 | | | | | | |
| | | | | | 12.70 (5h00) | 328.30 | 33 615 | 0.00 | 18.451 | | 4.801 | | | | | | |

对应的往往是 I₁ 类流动单元;顶部块状泥质粉细砂岩段或由于冲刷形成的含少量砾石的粉细砂岩大多数为 I₂ 类储层。从平面分布规律来看,近物源端砂砾岩快速沉积,导致 II 类流动单元较为发育,远物源端粒度变细,砂岩的分选磨圆变好,导致 I 类流动单元逐渐发育、II 类发育逐渐减少。

研究区的主要成岩作用为压实作用,物性变化受压实作用的影响十分明显,往往在深埋藏的强压实区域,喉道半径大幅减少,促使 I₁ 类向 I₂ 类转化,II₁ 类向 II₂ 类转化,因此在强压实区储层往往较其他相同沉积环境储层分布更多的 I₂、II₂ 类流动单元。



注:红色表示 I₁类,蓝色表示 I₂类,黄色表示 II₁类,绿色表示 II₂类

图 12 典型井流动单元划分

Fig. 12 Typical well flow unit classification

4 结论

(1)对于乌石 A 油田近源扇三角洲沉积体系的复杂储层,测试产能差异较大且无规律,通过微观孔隙结构各个参数分析,按照微观特征不同,有两大类不同的流动单元: I 类(主要是分选较好的中细砂岩储层)及 II 类(主要是分选较差的砂砾岩储层),这两类在宏观和微观上都表现出不同特征,根据相关性分别用孔隙度(孔渗关系良好)和电阻率(束缚水饱和度影响渗流能力)表征其渗流特征后,能较好的与测试测压结果相吻合,从而能准确评价油田储层产能,为油田开发提供有力数据支持。

(2)对于复杂储层受到海上油气田取资料的限制,常规以数据分析为主的流动单元研究方法往往难以开展。从流动单元成因出发,根据其不同的微观孔隙结构特征聚类分析,有助于将看似复杂的渗流特征抽丝剥茧,找到其分布规律,在进一步寻找参数的相关性,将流动单元应用到非取心段,能有效解决类似油田资料少划分精度差的问题。

参考文献:

- [1] 吴胜和,王仲林.陆相储层流动单元研究的新思路[J].沉积学报,1999,17(2): 252-256.
- [2] 岳大力,吴胜和,林承焰.碎屑岩储层流动单元研究进展[J].中国科技论文在线,2008,3(11):810-817.
- [3] 王京红,侯连华,吴锡令,等.注水开发后期河流相储层流动单元特征[J].石油大学学报(自然科学版),2004,28(4): 25-30.
- [4] 陈欢庆,胡永乐,闫林,等.流动单元研究进展[J].地球学报,2010,31(6):875-844.
- [5] 朱玉双,柳益群,赵继勇.华池油田长 3 岩性油藏流动单元划分及其合理性验证[J].沉积学报,2008,26(1):121-126.
- [6] 胡文,朱东亚,陈庆春,等.流动单元划分新方案及其在临南油田的应用[J].地球科学,2006,31(2):191-199.
- [7] 陈哲,陆军,赵耀辉,等.绥靖油田杨 19 区延 91 油藏流动单元划分合理性研究[J].石油与天然气地质,2015,36(3):497-503.
- [8] 赵军龙,李甘,朱广社,等.低阻油层成因机理及测井评价方法综述[J].地球物理学进展,2011,26(4):1334-1343.
- [9] 于红岩,李洪奇,郭兵,等.基于成因机理的低阻油层精细评价方法[J].吉林大学学报(自然科学版),2012,42(2): 336-342.
- [10] 李跃林,段迎利,王利娟,等.基于流动单元的原始地层电阻率反演及其应用[J].西安石油大学学报(自然科学版),2006,31(4):33-37.

- [11] 秦瑞宝,刘树武,张厚和. 一个低电阻率油气藏的测井评价[J]. 中国海上油气地质,1994,8(1):31-36.
- [12] 刘军海,刘玉洁,王永兴,等. 基于显微图像的储层流动单元划分方法[J]. 大庆石油学院学报,2005,29(5):4-11.
- [13] 张 吉,张烈辉,南力亚. 碎屑岩流动单元研究进展及认识[J]. 中国海上油气(地质),2003,17(4):285-288.
- [14] 中国石油勘探与生产公司. 渤海湾地区低电阻率油气层测井技术与解释方法论文集[C]. 北京:石油工业出版社,2000:59-103.
- [15] 孙建孟,陈钢花,杨玉征,等. 低阻油气层评价方法[J]. 石油学报,1998,19(3):83-88.
- [16] 穆龙新,田中元,赵丽敏. A 油田低电阻率油层的机理研究[J]. 石油学报,2004,25(2):69-73.
- [17] Zemanek J. Low-resistivity hydrocarbon-bearing sand reservoirs[J]. SPE, 1987, 4(6): 1-10.
- [18] Worthington P F, Pallatt N. Effect of variable saturation exponent on the evaluation of hydrocarbon saturation[J]. SPE, 1992, 7(4): 331-336.
- [19] Hamada G M, Al-Blehed M S, Al-Awad M N, et al. Petrophysical Evaluation of Low-Resistivity Sandstone Reservoirs with Nuclear Magnetic Resonance Log[J]. Petroleum Science and Engineering, 2001, 29(2): 129-138.
- [20] 曾文冲. 油气层储集层测井评价技术[M]. 北京:石油工业出版社,1991:24-68.

APPLICATION OF FLOW UNITS TO COMPLICATED RESERVOIR OF A FAN DELTA DEPOSITIONAL SYSTEM IN WUSHI A OILFIELD

PENG Song, LI Shanshan, LI Ming, TAN Shun, ZHU Jinqi

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

Abstract: The WS-A Oil Field is a newly discovered one in the western basin of the South China Sea, which is mainly accumulated in a near-provenance fan deltaic depositional system. The productivity and pressure testing data of the evaluation well demonstrates that the reservoir of the field is complex in flowing characteristics, and the production capacity is poorly related with the reservoir physical property from logging interpretation, and thus the conventional method is not able to accurately characterize the flowing characteristics of the reservoir. Therefore, the concept of flow unit is introduced in this article. Since such a case is relatively scarce in offshore oil fields, we have to classify the flow units upon the basis of both the micro and macro characteristics of pore throat structure. Sorting of the sediments, electrical properties and porosity parameters are selected from among the others as the criteria for flow unit classification and production capacity evaluation. Evaluation results are well correlated with the measured data, suggesting that this method can accurately and effectively evaluate the complex reservoir as such and guide the oilfield development at present and in the future.

Key words: fan delta; complicated reservoir; micro pore throat structure; flow units