

基于辫状河储层构型的流动单元划分及其分布规律

王石¹, 万琼华^{2,3}, 陈玉琨², 李学伟⁴, 梁杰³

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;
3. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东广州 518067; 4. 中国石油大港油田分公司第六采油厂, 天津 300280)

摘要: 随着对辫状河储层构型研究的深入, 储层构型控制下的流动单元分布规律成为研究的重点问题。以大港油田区 A 油田馆陶组辫状河储层为例, 在辫状河储层构型分析的基础上, 研究了辫状河流动单元的划分方法及其分布规律。首先在渗流屏障的识别、连通体划分和连通体内渗流差异分析的基础上, 结合研究区储层非均质特征, 优选了泥质含量、孔隙度、流动带指数和流度 4 个判别参数, 应用聚类分析的方法, 将储层划分为最好(I类)、较好(II类)、中等(III类)、较差(IV类)和最差(V类)5类流动单元; 然后根据流动单元的判别标准, 进行单井流动单元划分, 并在此基础上, 运用流动单元剖面和平面互动分析的方法, 研究了流动单元的平面和剖面分布规律。结果表明: 平面上, 优质流动单元主要分布在心滩核部、砂质充填河道等砂体主体部位; 垂向上, 河道底部的流动单元优于河道顶部, 在心滩内部夹层上、下流动单元类型会发生变化。

关键词: 辫状河 流动单元 聚类分析 渗流屏障 连通体

中图分类号: TE112.221

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2015)05-0047-05

Flow units division and their distribution law based on braided river reservoir architecture

Wang Shi¹, Wan Qionghua^{2,3}, Chen Yukun², Li Xuewei⁴, Liang Jie³

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China; 3. Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Guangzhou City, Guangdong Province, 518067, China; 4. No.6 Oil Production Plant, Dagang Oilfield Company, PetroChina, Tianjin City, 300280, China)

Abstract: Following the study of braided river reservoir architecture, the flow unit distribution controlled by reservoir architecture becomes more and more important. Taking the braided river reservoir in the Guantao Formation in Dagang A Oilfield for example, the thesis focuses on the method of classifying braided river flow units and their distribution law based on reservoir architecture analysis. Firstly, based on the seepage barrier identification, the connected volume division and seepage variation analysis, as well as considering the reservoir heterogeneity, four parameters including shale index, porosity, FZI (flow zone index) and K/μ were selected to divide the reservoirs into five types of I, II, III, IV and V by using the method of cluster analysis. Secondly, every single well was interpreted and the type of flow unit was identified according to the standard. And the distribution both in plane and on section was studied under the guidance of reservoir architecture and flow unit model using interactive analysis between horizontal and sectional characteristics of flow unit. The results can be concluded as follows: ① Horizontally, the core part of channel bar and sand-filling river course are generally served as the well reservoir flow unit. ② Vertically, the flow units in the bottom are generally better reservoirs than those in the upper part, and the type of flow units above and below the interlayers inside of the channel bar does not always remain the same.

Key words: braided river; flow unit; cluster analysis; seepage barrier; connected volume

收稿日期: 2015-07-14。

作者简介: 王石(1986—), 男, 河南南阳人, 在读博士研究生, 从事矿产普查与勘探方面的研究。联系电话: 13810596382, E-mail: wsfly123@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项“复杂储层构型精细表征与建模”(2011ZX05009-003)。

随着 Hearn 在 1984 年首次提出流动单元的概念^[1],中外学者不断更新流动单元的定义以及划分方法,总的来说,目前地学界对流动单元的理解并不统一:国外学者主要根据 Hearn 的原始定义展开研究,研究方法从定性、半定量发展到定量,流动单元的概念则由原始的纯地质的静态概念发展到地质与油藏工程综合的动静结合的概念,对油气田勘探和开发的实用性也逐渐提高;而中国的多数学者把流动单元理解为建筑结构的一部分,或者是储层质量差异的一个体现,或者是岩石物理相的细分,也有学者认为流动单元是相对概念,它的内涵应结合不同的开发和生产条件而有所改变。因此有关流动单元的概念及其划分方法在世界上还未形成统一的认识,关于流动单元的划分理论、沉积对流动单元的控制及流动单元对剩余油的控制等相关研究还不够^[2-3]。

目前,对于辫状河储层复杂的地下构型结构、强烈的非均质性、多样的砂泥组合以及开发动态的多变性,虽然已有不少学者开展了辫状河储层构型研究^[4-6],但在构型研究的基础上展开流动单元的研究仍很少见。精细的构型分析与流动单元划分相结合意义重大。首先,构型研究是渗流屏障识别和连通体确定的坚实基础;其次,由于不同构型单元沉积环境、成岩作用不同,本身也存在渗流差异,即构型单元的分布在一定程度上控制了流动单元的展布。为此,以大港油区 A 油田为例,综合利用测井、取心资料、高品质地震资料以及丰富的开发动态资料,采用聚类分析的方法,对研究区进行了储层流动单元划分,并在前期储层构型研究的基础上分析了流动单元的分布规律,以期深化流动单元概念,为辫状河储层勘探开发提供参考。

1 地质概况

大港油区 A 油田构造上位于黄骅拗陷歧口凹陷的西南部(图 1)。其主要含油层段为新近系馆陶组和明化镇组。该油田平均井距为 150 m,个别井距小于 50 m,钻井、测井资料和动态资料丰富,该油田于 1971 年底投产,至今已有 40 余年的开发历史,根据其油田产量变化情况,大致可分为产量上升阶段、保持稳产阶段、产量下降阶段和综合治理保持低速稳产阶段。目前该油田亟需采取措施,以确保稳产,须将地质综合研究与生产开发紧密结合起来。而流动单元的划分,包括储层渗流屏障识别、连通体的划分和流动单元分布规律等相关研究能



图 1 大港油区 A 油田区域构造位置

Fig.1 Location and tectonic settings of the study area in A Oilfield

够满足这样的要求。

2 基于储层构型研究的渗流屏障与连通体

2.1 渗流屏障

A 油田馆陶组及明下段不存在不整合接触,并且在研究目的层钙质胶结带发育较少,为此主要研究泥质屏障和封闭性断层屏障。

泥质屏障 研究区馆陶组发育辫状河沉积,明化镇组发育曲流河沉积。垂向上,由于发育多期河流相砂体,砂体间稳定分布的泥质隔层成为垂向渗流屏障;侧向上,泥质充填的辫状水道和溢岸泥质沉积形成侧向泥质屏障。在构型研究中,泥质屏障可以通过沉积相分布特征来确定,笔者将辫状河上部为泥岩、下部为连通砂体的泥质半充填河道定义为泥质半屏障^[4],而将泥质全充填河道定义为泥质屏障(图 2)。垂向泥质屏障有助于分层开采,阻止底水锥进,而侧向发育的泥质屏障则会影响注水开发效果^[7]。

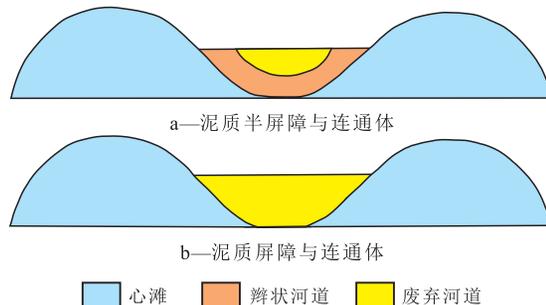


图 2 储层构型单元内泥质屏障与连通体分布

Fig.2 Distribution characteristics of shale barrier and connected sand bodies in reservoir architecture unit

封闭性断层屏障 A油田断层发育,分为东北向及北西向2组断裂和若干条断层。其中,五级断层发育在断块内部,断距小,延伸短,对油气的渗流有一定控制作用,在油田开发后期注水过程中起到一定的遮挡作用,是有效的渗流屏障(图3)。

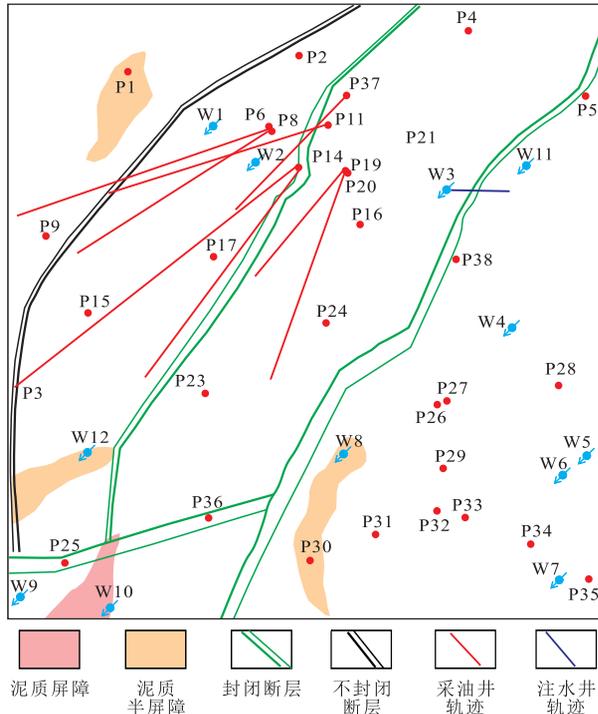


图3 A油田渗流屏障分布示意
Fig.3 Distribution characteristics of seepage barrier in A Oilfield

2.2 连通体

在单砂体划分对比和储层构型分析的基础上,结合对渗流屏障分布规律进行连通体的划分。其研究思路为:首先根据各井单层划分对比结果和上、下单砂体间的垂向渗流屏障确定连通体的垂向关系;然后根据构型分析的砂体横向尖灭特征及断层的横向封堵性,确定连通体的平面分布。连通体内渗流差异主要是分析渗流差异界面,该界面可以是明确的物理界面,如复合体内单砂体间或韵律层间的边界,也可以是不具有物理意义的边界,如在一个正韵律砂体内根据储层质量差异划分的几个相对均质段之间的边界^[8-9]。研究区馆陶组发育的辫状河沉积连通体为:①垂向上,发育多期河流相砂体间稳定分布的泥质隔层,其限定的储层为连通体,其外缘被层间隔层、层内稳定的夹层以及封闭性断层所限定,连通体之间没有流体流动;②在同期水道与心滩沉积组合中,泥质充填、泥质半充填的辫状河道和溢岸泥质沉积形成侧向泥质屏障,其限定的储层连通体,部分被泥质屏障遮挡,但另一部分与其他单元相连通。③在心滩内部发育的落

淤层和沟道沉积泥质屏障,其限定的储层连通体内部再没有泥质屏障的存在,且连通体内部渗流特征只受泥质充填差异影响。

3 流动单元划分

3.1 参数优选

考虑到A油田层内非均质程度为中等,流动单元的划分难度较大,仅依据一种参数不能反映流动单元的全部特征,因此,综合考虑岩性、储层物性和流体性质等各方面参数,主要包括泥质含量、粒度中值、孔隙度、渗透率、流动带指数和流量等^[10-14],其中,流动带指数是将结构与矿物地质特征和孔喉特征相结合来判定孔隙几何相的参数。这些参数可根据岩心分析和测井资料求取。

在参数优选过程中,考虑到生产实际的需要,主要通过参数与水淹资料的相关性进行统一分析。由于在A油田中具有水淹资料的取心井仅2口,岩心样本只有16组,无法满足研究需要,因此,附加采用具有水淹资料的48组测井数据,总计64个样本。而对于粒度中值,主要依靠10组岩心数据进行相关性分析。

通过各参数与水淹层测井资料相关性分析发现,泥质含量、孔隙度、流动带指数和流量与水淹层测井资料相关性良好,但是渗透率、粒度中值与水淹层测井资料相关性较差(图4);研究区垂向、平面上原油粘度差异较大,并且原油粘度对于储层渗流

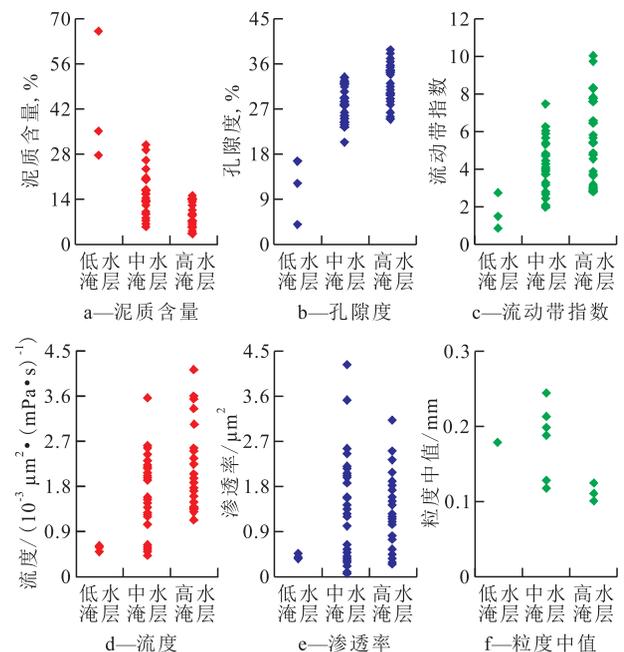


图4 A油田不同参数与水淹程度的关系
Fig.4 Relationship between each parameter and water flooded degree in A Oilfield

性能影响较大,因此,考虑原油粘度的影响,将流度作为划分流动单元的参数非常必要。因此,本次研究采用泥质含量、渗透率、流动带指数和流度4个参数对该油田进行流动单元划分。

3.2 流动单元划分

根据取心井资料中的230个样本数据,利用SPSS统计学软件进行聚类分析,将研究区储层划分为5类流动单元(表1)。

表1 A油田流动单元划分标准
Table1 Division of flow units standard table in A Oilfield

流动单元	泥质含量,%			孔隙度,%			流动带指数			流度/(10 ⁻³ μm ² ·(mPa·s) ⁻¹)		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
最好(I类)	2.98	13.58	8.46	21.2	37.5	32.2	2.26	8.08	4.28	0.05	13.48	1.10
较好(II类)	14.03	25.50	19.24	20.2	35.5	32.2	1.05	5.65	3.35	0.03	6.92	1.09
中等(III类)	23.86	39.16	28.86	18.9	36.8	30.2	0.44	4.64	2.49	0.01	6.48	0.20
较差(IV类)	39.94	61.00	48.41	14.9	34.7	28.2	0.41	3.58	1.38	0.01	0.51	0.15
最差(V类)	78.15	85.25	81.71	13.8	30.8	28.3	0.26	1.91	0.74	0.004	0.26	0.10

I类流动单元以中、细砂岩为主,泥质含量为2.98%~13.58%,孔隙度为21.2%~37.5%,流动带指数为2.26~8.08,流度为0.05×10⁻³~13.48×10⁻³ μm²/(mPa·s)。构型单元类型主要为心滩、河道等。

II类流动单元以细砂岩为主,泥质含量为14.03%~25.50%,孔隙度为20.2%~35.5%,流动带指数为1.05~5.65,流度为0.03×10⁻³~6.92×10⁻³ μm²/(mPa·s)。构型单元类型主要为心滩等。

III类流动单元以粉、细砂岩为主,泥质含量为23.86%~39.16%,孔隙度为18.9%~36.8%,流动带指数为0.44~4.64,流度为0.01×10⁻³~6.48×10⁻³ μm²/(mPa·s)。构型单元类型主要为心滩、边滩等。

IV类流动单元以含泥细砂岩为主,泥质含量为39.94%~61.00%,孔隙度为14.9%~34.7%,流动带指数为0.41~3.58,流度为0.01×10⁻³~0.51×10⁻³ μm²/(mPa·s)。此类流动单元岩性细、泥质含量明显变高,物性明显变差。

V类流动单元以粉砂岩为主,泥质含量为78.15%~85.25%,孔隙度为13.8%~30.8%,流动带指数为0.26~1.91,流度为0.004×10⁻³~0.26×10⁻³ μm²/(mPa·s)。构型单元类型主要为洪泛平原、河道边缘和废弃河道边缘。

3.3 单井流动单元

辫状河单井流动单元的划分主要是反映储层内部的渗流差异。单井流动单元的划分可分为2步:①在垂向上划分储层与非储层;②对于储层,根据研究区流动单元划分的相关参数及分类标准,对单井流动单元进行划分。

单井流动单元划分结果与水淹层测井资料匹配分析结果表明:流动单元与水淹情况具有较好的相关性(图5),高水淹层主要为I类和II类流动单元,分别占了33%和67%;中水淹层主要为II类和III

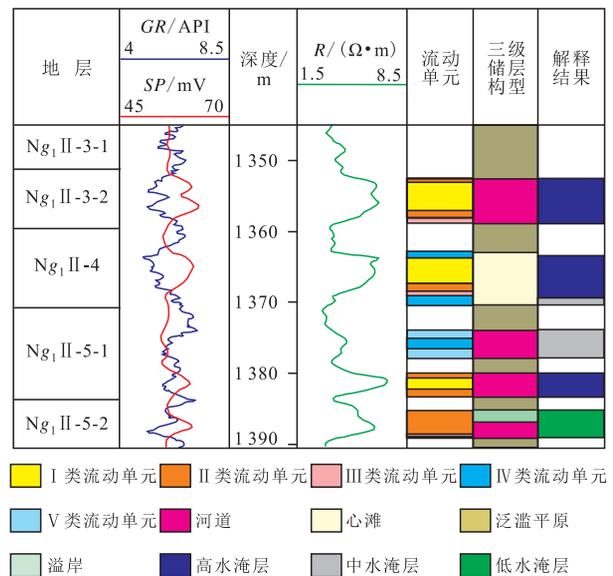


图5 单井流动单元划分结果
Fig.5 Results of flow unit division on single well

类流动单元,分别占69%和22%,其次为I类流动单元,占9%;低水淹层主要为III类、IV类和V类流动单元,分别占34%,33%和33%。说明流动单元划分结果比较可靠,可用于指导油气田开发。

4 流动单元分布特征

根据单井流动单元划分、流动单元平面与剖面展布互动分析的研究思路^[10-11],在储层构型控制和流动单元划分指导下分析流动单元分布特征。以重点开发层位Ng₁ II-3-1为例,分析流动单元与储层构型单元的关系。结果(表2)表明,优质流动单元主要分布在心滩核部、砂质充填河道等砂体主体部位,心滩边部以及泥质屏障附近区域多分布物性较差的流动单元,说明储层构型单元对流动单元的分布具有一定的控制作用。

表2 流动单元与储层构型单元的关系

流动单元	储层构型单元所占比例, %			
	砂质充填河道	心滩核部	心滩边部	溢岸
I类	45.32	38.60	18.09	
II类	31.20	29.02	26.07	
III类	10.20	25.30		46.03
IV类	8.08	3.82	27.91	
V类	5.20	3.26	27.93	49.27

通过对岩性、物性和电性分析认为:河道沉积总体表现为正韵律,物性较好的流动单元多分布在河道的下部,而物性相对较差的流动单元则多位于河道的中上部。分析心滩内部构型时发现,心滩内部发育落淤层和坝上沟道。经过对流动单元的剖面分析得知,部分落淤层、坝上沟道附近流动单元会发生改变,这说明层间夹层的发育对储层渗流能力起到一定的影响作用;由于河道底部多发育滞留沉积,并且为正韵律,河道底部的流动单元多优于河道上部;在心滩的不同部位,发育不同类型的流动单元,也反映出心滩沉积的复杂性。

5 结论

选取泥质含量、孔隙度、流动带指数和流度4个参数,应用聚类分析方法,将大港油区A油田储层划分为5类流动单元。流动单元与水淹情况有较好的相关关系,高水淹层主要是I类和II类流动单元,低水淹层往往是物性较差的流动单元,因此,所建立的流动单元划分方案可用于指导油气田开发。

平面上,优质流动单元主要分布在心滩核部、砂质充填河道等砂体主体部位,心滩边部以及泥质屏障附近区域多分布较差的流动单元;垂向上,河道底部的流动单元优于河道上部,由于层间夹层对储层渗流能力的影响,心滩内部夹层附近流动单元类型会发生变化。

参考文献:

- [1] Hearn C L, Ebanks W J, Tye R S, et al. Geological factors influencing reservoir performance of Hartog Draw Field, Wyoming [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1984, 36(9): 1 335-1 344.
- [2] Ebanks W J Jr. Flow unit concept-integrated approach to reservoir description for engineering projects [J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 71(5): 551-552.
- [3] 彭仕宓, 尹志军, 常学军, 等. 陆相储集层流动单元定量研究新方法[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(5): 68-70.
Peng Shimi, Yin Zhijun, Chang Xuejun, et al. A new quantitative

method to study flow unit of non-marine reservoir [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(5): 68-70.

- [4] 陈玉琨, 吴胜和, 毛平, 等. 砂质辫状河储集层构型表征——以大港油区羊三木油田馆陶组为例[J]. *新疆石油地质*, 2012, 33(5): 523-526.
Chen Yukun, Wu Shenghe, Mao Ping, et al. Characterization of sandy braided river reservoir configuration— an example from Guantao formation in Yangsanmu oilfield, Dagang oil region [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2012, 33(5): 523-526.
- [5] 刘钰铭, 侯加根, 王连敏, 等. 辫状河储层构型分析[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2009, 33(1): 7-11.
Liu Yuming, Hou Jiagen, Wang Lianmin, et al. Architecture analysis of braided river reservoir [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2009, 33(1): 7-11.
- [6] 李顺明, 宋新民, 蒋有伟, 等. 高尚堡油田砂质辫状河储集层构型与剩余油分布[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(4): 474-482.
Li Shunming, Song Xinmin, Jiang Youwei, et al. Architecture and remaining oil distribution of the sandy braided river reservoir in the Gaoshangpu Oilfield [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(4): 474-482.
- [7] 崔建, 李海东, 冯建松, 等. 辫状河储层隔夹层特征及其对剩余油分布的影响[J]. *特种油气藏*, 2013, 20(4): 26-31.
Cui Jian, Li Haidong, Feng Jiansong, et al. Barrier-beds and interbeds characteristics and their effects on remaining oil distribution in braided river reservoirs: A case study of the Ng IV oil unit in shallow north Gaoshangpu oilfield [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2013, 20(4): 26-31.
- [8] 张本华. 曲流河储层构型中废弃河道的识别及其分布模式——以孤岛油田馆上段为例[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(3): 18-21, 25.
Zhang Benhua. Discussion on abandoned channels recognition and distribution models on meandering river reservoir architecture research—case study of upper member of Guantao formation in Gudao oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(3): 18-21, 25.
- [9] 王鸣川, 朱维耀, 董卫宏, 等. 曲流河点坝型厚油层内部构型及其对剩余油分布的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(3): 14-17.
Wang Mingchuan, Zhu Weiyao, Dong Weihong, et al. Study on distribution and influence factors of remaining oil in point bar of meandering river [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(3): 14-17.
- [10] 刘吉余, 郝景波, 伊万泉, 等. 流动单元的研究方法及其研究意义[J]. *大庆石油学院学报*, 1998, 22(1): 5-7.
Liu Jiyu, Hao Jingbo, Yin Wanquan, et al. Studying method and its significance of flow units [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 1998, 22(1): 5-7.
- [11] 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): 252-257.
Wu Shenghe, Wang Zhonglin. A new method of non-marine reservoir flow unit study [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(2): 252-257.

(下转第68页)