

苏丹 Fula 油田辫状河储层内夹层沉积成因及井间预测

袁新涛, 吴向红, 张新征, 晋剑利

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:针对辫状河储层内隔夹层的复杂结构特征,依据沉积学及高分辨率层序地层学基本原理,对 Fula 油田辫状河储层内隔夹层的沉积成因及井间预测方法进行研究。结果表明:废弃河道、坝间泥、心滩落淤层、越岸沉积是构成辫状河夹层的主要沉积类型,泥质沉积物的保存与可容纳空间、沉积物供给速度有着密切联系;在沉积成因分析基础上,可根据单井测井解释和连井对比来描述各类夹层的空间形态,建立夹层的沉积模式;在辫状河相储层中,应用多点地质统计学方法预测井间泥质夹层分布,可以更有效地体现夹层的几何形态和分布规律,其更加符合辫状河夹层的沉积模式。

关键词:层序地层学; 辫状河; 夹层; 沉积成因; 井间预测; 多点地质统计; Fula 油田

中图分类号:P 631.4

文献标志码:A

Sedimentary origin and interwell prediction of interbeds in braided river reservoir, Fula Oilfield in Sudan

YUAN Xin-tao, WU Xiang-hong, ZHANG Xin-zheng, JIN Jian-li

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

Abstract: According to the characteristics of complicated reservoir architecture of braided river and based on the basic principle of sedimentology and high resolution sequence stratigraphy, sedimentary origin of interlayer and interbed were analyzed and a method was proposed for predicting impermeable layer between wells. The results show that abandoned channel, interbar mud, fall silt and overbank are main origin types in barrier and interbed construct. Preservation of muddy deposition is closely related to accommodation space and sedimentary alimentation. Based on analysis of deposit genesis, shapes of different interbed types of mud were described according to single well log interpretation and well correlation. And sedimentary model of barrier and interbed was developed. Furthermore, the sedimentary model can be used in constructing training image after optimal selection. Prediction of barrier and interbed achieved by multi-point statistics can effectively reflect the geometric morphology and distribution of interbed, which is more consistent with the sedimentary model of the braided river.

Key words: sequence stratigraphy; braided river; barrier and interbed; sedimentary origin; interwell prediction; multi-point statistics; Fula Oilfield

辫状河储层是碎屑岩沉积中重要的储层类型之一,在世界各大油气田中占有重要地位,世界范围内不乏有以辫状河沉积为主要储集单元的大油田,如国外的阿拉斯加和北海油田以及国内的北大港油田等^[1]。对于投入开发的该类油田,复杂的夹层分布是形成储层非均质性的主要原因,夹层的描述及预测是整个油藏储层静态表征的重点内容。总

的来看,目前有关辫状河储层夹层的研究仍局限在探讨其沉积模式^[2-9]以及利用密井网条件对辫状河心滩坝进行尝试性构型解剖^[10-11],缺乏对辫状河泥岩夹层在沉积学指导下进行井间预测的系统性研究,而且由于辫状河类型多样,储层结构复杂,在某一地区建立的沉积模式并不一定适用于其他地区。笔者选取苏丹 Fula 油田辫状河储层作为研究对象,

从沉积成因分析入手,对该油田夹层的分布模式和井间预测方法进行研究。

1 油藏地质概况

Fula 油田位于苏丹西南部, Muglad 盆地西北部。构造上位于 Fula 凹陷中部构造带南部 Fula 断裂带上,主要为断垒构造。发育 3 套含油层系,包括下白垩统 Abu Gabra 组和 Bentiu 组地层,以及上白垩统 Aradeiba 组地层。其中 Bentiu 组为该油田的主力层,属辫状河沉积;地层厚度为 380 ~ 487 m;储层岩性为长石石英砂岩;储层物性好,孔隙度平均为 26.6%,渗透率平均为 $702 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属高孔高渗储层;总体上具有“砂包泥”的结构特点,岩性夹层发育,其岩石类型为泥岩或泥质粉砂岩(图 1)。油藏埋深约为 1.25 km,原始油藏压力 11 MPa,压力系数 0.88,原始油气比很低(小于 3),饱和压力很低(0.61 MPa)。原油为重质油(18 ~ 22 API),地下原油黏度为 0.15 ~ 1.0 Pa·s。地层水矿化度很低,平均低于 1.0 g/L, pH 值为 7.6 ~ 7.8,属于 NaHCO_3 水型。目前该油田钻井接近 200 口,平均井距 150 ~ 200 m。

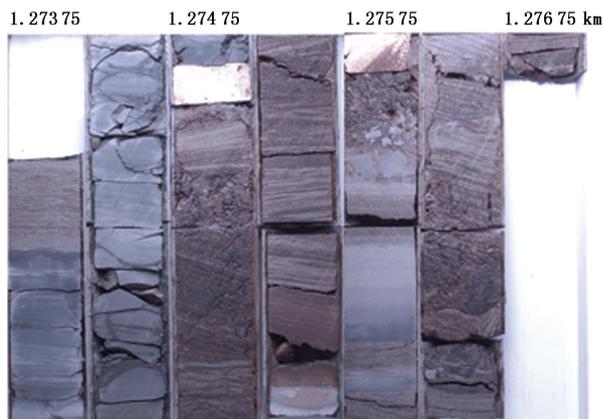


图 1 泥质夹层岩心剖面(FN12 井,1.27375 ~ 1.2768 km)
Fig. 1 Core section of shaly barrier and interbed
(well FN12, 1.27375 ~ 1.2768 km)

Bentiu 组油藏属块状底水油藏,储层可进一步分为 Bentiu 1、Bentiu 2、Bentiu 3 共 3 个砂组,砂组之间没有稳定的隔层分隔。原油主要集中于 Bentiu 1 砂组内,因此该层将作为重点研究对象。对于该类型油藏,夹层分布直接影响着油藏内流体运动规律和底水上升速度,准确描述和预测夹层的空间分布是油藏合理开发的重要基础。

2 泥质夹层的沉积成因

Fula 油田夹层基本为泥质沉积物。根据碎屑颗

粒在水流中的搬运和沉积作用原理,作为悬浮组分的泥质颗粒,只能在静水环境中沉积。因此,泥质类夹层应该沉积于流水速度极低的部位,主要包括废弃河道、坝间泥、心滩落淤层和洪泛期越岸沉积这几类。

2.1 废弃河道

在有关辫状河储层沉积模式研究的早期,学者普遍认为由于辫状河道的频繁改道和冲刷,废弃河道少见且基本不接受沉积。近年来国外学者通过露头 and 现代沉积考察,认为辫状河道废弃是频繁发生的,一个河道从形成至废弃的周期一般从几天至几十年^[12]。河道废弃后,仅有少量的水流缓慢流过,其携带的悬浮颗粒由于流速的突然降低而沉积下来,形成泥岩或泥质粉砂岩夹层。废弃河道泥岩一般为块状层理,常见植物碎片;泥质粉砂岩常具有波状层理。与曲流河相不同的是,辫状河废弃河道弯度较小,有时具有多个分支,废弃时间较短,河道有时会重新复活。从理论上讲废弃河道沉积的夹层可分临时废弃河道沉积和永久废弃河道沉积两种类型。前者沉积时间较短,形成夹层的厚度较小,其上覆盖新的河道沉积;后者形成夹层的厚度较大,其上被洪泛期越岸沉积所覆盖,但实际上由于辫状河道冲刷频繁,短期的洪泛沉积常遭受侵蚀而得不到保存,因此利用井资料来区分这两种废弃河道是很困难的。

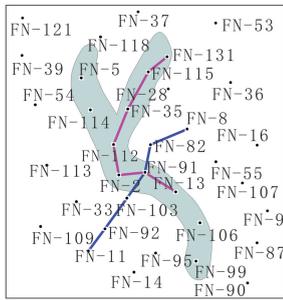
图 2 为 Fula 油田 Bentiu 1 地层夹层的连井对比剖面,剖面位置见图 2(a)。图 2(a)在平面上显示了其中一条废弃河道夹层的分布范围,即废弃河道 A。沿该废弃河道的对比剖面上看(图 2(b)),夹层 A 厚度为 3 ~ 5 m,横向分布稳定。从垂直该废弃河道的剖面看,A 层延伸不到一个井距(图 2(c))。这条泥岩夹层的走向也验证了该区古水流的方向。

2.2 坝间泥

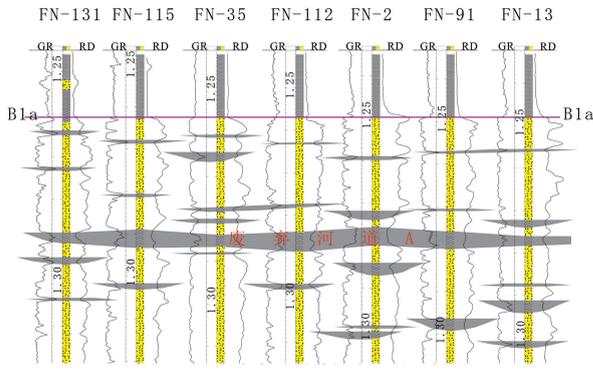
在心滩背水流处,由于水流能量减弱,悬浮颗粒在心滩后翼或侧翼沉积下来,形成坝间泥^[13]。这类夹层岩性多为粉砂质泥岩和泥质粉砂岩,其厚度在心滩顶部较小,向坝的侧缘部位逐渐增大。由于水流的突然减弱,在心滩从顶部到下游的方向,会出现沉积物粒度的突然变细。坝间泥少见层理构造,常含有植物碎片。由于心滩的频繁迁移,坝间泥的沉积时间往往较短。平面上通常呈分散片状,有时候会和辫状河道沉积交织在一起。通常来讲,在整个河床中部水流流速高的地方,坝间泥较少沉积,而在河床边部水流流速较低的地方,坝间泥较为发育。

2.3 心滩落淤层

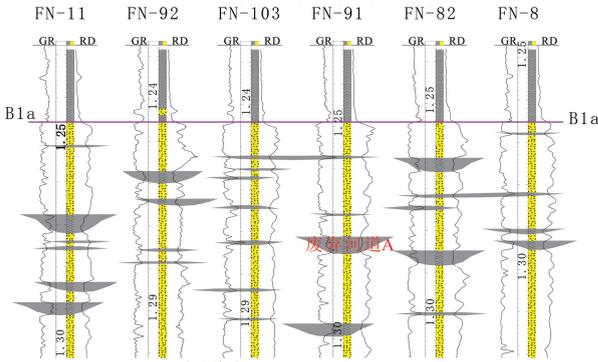
洪水泛滥末期,随着水体能量的减弱,大量悬浮颗粒在心滩顶部沉积下来,形成心滩落淤层。岩性通常为泥岩或粉砂岩,有时见波状层理。心滩落淤层沉积为事件性沉积,而且由于辫状河心滩的快速迁移,心滩顶部接受沉积的时间较短,因此心滩落淤层的厚度往往较薄。平面上,心滩落淤层类似于心滩的形状,呈菱形或椭圆形。



(a)剖面位置



(b)沿废弃河道井间夹层对比剖面



(c)垂直废弃河道井间夹层对比剖面

图2 夹层对比剖面

Fig.2 Contrast section of barrier and interbed

2.4 越岸沉积

与心滩落淤层类似,该类夹层也形成于洪水泛滥末期。起初高能水流携带细粒沉积物漫出主河道,后随着水体能量减少这些细粒物质沉积下来,生成洪泛期越岸沉积泥岩。岩性主要为泥岩和粉砂岩,具波状层理或块状层理。由于和心滩的频繁迁移相比,整个辫状河道带的迁移频率要低的多,因此

与心滩接受落淤层沉积不同,河道带两岸可连续多次长时期接受悬浮物沉积。与心滩落淤层相比,越岸沉积广阔且连续,厚度也相应较厚。如果能够得到保存,就会在辫状河相储层中形成较稳定隔层。

辫状河储层内的夹层除上述4种成因类型外,在辫状河道底部沉积的泥砾也往往形成岩性夹层。但这些泥砾富集层在空间上分布极不稳定,物性差异较大,规模小,因此并不作为主要的夹层成因类型。

3 夹层分布模式

3.1 泥质岩类保存条件

辫状河储层内部泥质夹层的形成,除了受前期成因因素控制外,还受到后期河道侵蚀和冲刷的影响。宏观上讲,在可容纳空间较小和沉积物供应速度较大的情况下(低 A/S),这种侵蚀和冲刷作用就越强,能够保存下来的泥质岩类就越少,而在可容纳空间较大和沉积物供应速度较小的情况下,泥质岩类能够保存下来的就越多(高 A/S)。体现在岩性剖面上,前者环境下沉积的储层具有很高的砂地比,而后者情况下储层砂地比有所降低。Fula 油田 Bentiu 1 储层砂地比高达 80%,属于低 A/S 环境沉积。

从微观上讲,对于废弃河道、坝间泥、落淤层、越岸沉积这4类泥质沉积来说,保存条件也有所差别。从图3可以看出,这4类泥质沉积的实际物理沉积界面离基准面的距离有所差异,这也可以理解为在

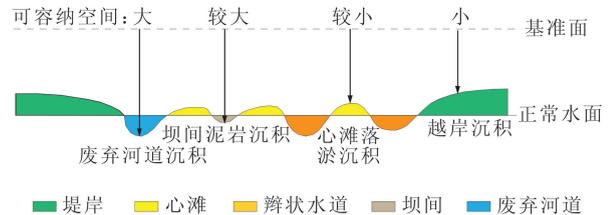


图3 泥质沉积界面与基准面的垂向距离

Fig.3 Vertical distance between shaly deposition interface and base level

局部它们具有不同的可容纳空间。如果基准面进一步降低,处于高部位的河岸两侧会最先高过基准面,由沉积区转为剥蚀区,而低部位的废弃河道则很难高过基准面。因此在沉积物供应速度基本相等的情况下,按照低 A/S 泥岩难保存而高 A/S 泥岩易保存这个原则,废弃河道泥岩更容易保存,其次为坝间泥和心滩落淤层,而越岸沉积可容纳空间最小,将来最易遭受冲刷和侵蚀。在高 A/S 环境下,这种差异性

可能很小,可以忽略。但在低 A/S 环境下,这种差异就明显表现出来。对于 Fula 油田 Bentiu 1 储层,很难找到延伸两个井距以上的越岸沉积泥岩,而废弃河道泥岩则容易通过井间对比识别出来(图2)。

3.2 夹层沉积模式

通过 Fula 油田单井夹层测井解释和连井剖面对比,并参考前人现代沉积考察和露头描述成果,可粗略估计废弃河道、坝间泥、心滩落淤层、越岸沉积这4类泥质沉积的空间几何形态。废弃河道在平面上呈低弯度蛇曲状,剖面上呈透镜状;而坝间泥呈椭圆或长条状,剖面上为透镜状或楔形;心滩落淤层为椭圆或菱形薄片状;越岸沉积由于受水流冲刷和侵蚀作用,呈不规则片状。具体的参数见表1。总体来看,夹层的井间对比效果较差,只有废弃河道在顺河道方向以及越岸沉积在一两个井距范围内才可以得到有效对比,大多数情况下夹层只有单井钻遇甚

至没有井钻遇。这就给油藏内夹层的空间预测带来了很大困难。

通过上述泥质夹层的成因及空间几何形态分析,可建立 Fula 油田辫状河储层内夹层的沉积和分布模式(图4)。废弃河道、坝间泥、心滩落淤层、越岸沉积是辫状河泥质夹层的主要沉积成因类型。其中心滩落淤层和越岸沉积为洪泛期事件沉积,而废弃河道和坝间泥除接受洪泛沉积外,主要为水流突然减速后的静水沉积。这些泥质岩类经过后续冲刷和改造后,辫状河储层内的夹层形成了废弃河道泥岩、坝间泥+落淤层、越岸沉积的三元结构组合。从图4可以看出,废弃河道泥岩与河道砂岩互相叠置,越岸沉积向河道带外侧方向不断增多,坝间泥和落淤层充填于其中,这三者与河道砂岩一起,共同组成了辫状河储层的空间结构。

表1 夹层几何形态

Table 1 Geometric shapes of barrier and interbed

成因类型	平面形态	垂向形态	长度 L/m	宽度 b/m	厚度 δ /m	顺河道连续性	垂直河道连续性
废弃河道	低弯度蛇曲	顶平底凸透镜状	600 ~ 2000	100 ~ 200	1 ~ 5	好	差
坝间泥	椭圆或长条	透镜状、楔状	100 ~ 200	50 ~ 100	0.5 ~ 2	差	差
心滩落淤层	椭圆或菱形	薄层状	200 ~ 300	150 ~ 200	0.3 ~ 0.6	较差	差
越岸沉积	不规则片状	层状	300 ~ 1000	200 ~ 500	0.5 ~ 2	较好	较差

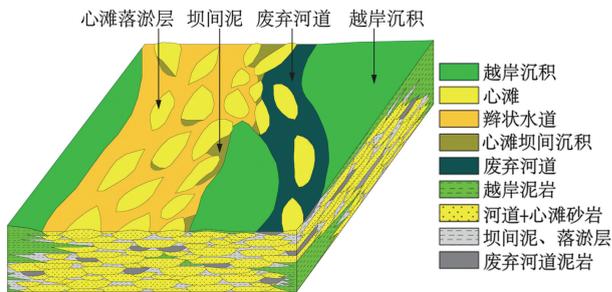


图4 泥质夹层沉积模式

Fig. 4 Sedimentary model of shaly barrier and interbed

4 夹层井间预测

由于辫状河储层内泥质夹层分布复杂,井间对比效果较差,而地震反演的精度又远远达不到夹层预测的精度,因此要想预测夹层的空间分布,还得借助地质建模手段。对于岩性这种离散变量的模拟,传统的建模算法主要包括两类,即基于像素的序贯指示算法和基于目标的示性点过程法。但是,这两类算法在模拟夹层分布时都存在一些不完善的地方。序贯指示算法模拟井间夹层分布时,能够保证模拟结果完全忠实于井点数据,但由于其模拟过程主要依靠变差函数分析,仅受控于变程、方位角等简

单参数,辫状河泥质夹层的空间几何形态及分布规律并没有得到体现。基于目标的算法虽然能够定义每种夹层的几何形态,但前提是要在单井识别出每个夹层的具体类型和展布方向,这无论从工作量还是准确度方面都是不可能完成的。另外,基于目标的模拟方法仅能够定义规则形状,辫状河储层内泥质沉积在后期冲刷和改造后,形成的夹层形态复杂,很难用几何尺寸或方向来定义。

为了避免上述方法的不足,在 Fula 油田辫状河储层夹层井间预测中采用了多点地质统计学模拟方法。该方法分为两步完成:第一步,以井网相对较密的一个小区块为研究对象,选取一段地层进行序贯指示模拟,得到夹层的初始分布模型,在此基础上依照辫状河夹层分布模式手动修改,从而建立夹层的三维训练图像(图5)。第二步,以训练图像作为控制参数,建立全区夹层的分布模型。

图6是多点地质统计学算法和序贯指示算法建立的夹层模型的剖面对比。从图中来看,应用多点地质统计学算法的模拟结果,更加符合辫状河储层内夹层的沉积模式,各类泥质夹层的形态和分布规律均得到了体现。而采用序贯模拟算法的模拟结

果,看不出各类夹层之间的差异,夹层的井间分布形态仅仅为平行地层方向从井点向周围的简单外推。

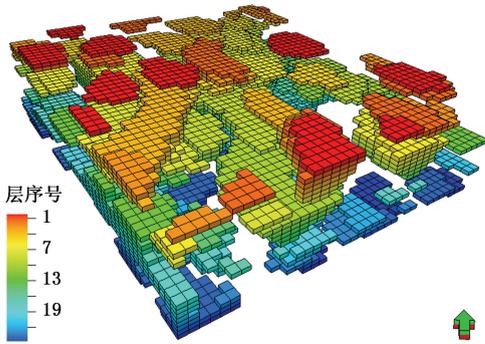


图5 夹层训练图像

Fig.5 Training image of barrier and interbed

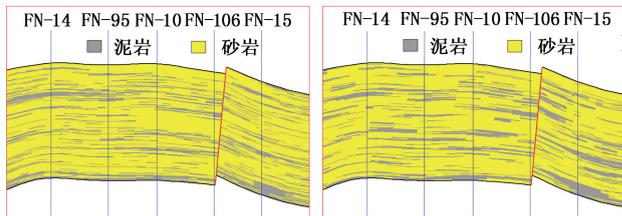


图6 夹层模拟结果剖面

Fig.6 Section of barrier and interbed in lithologic model

5 结论

(1)废弃河道、坝间泥、心滩落淤层、越岸沉积是形成辫状河相储层内夹层的主要的沉积成因类型。废弃河道和坝间泥主要为静水沉积,心滩落淤层和越岸沉积为洪泛期末事件沉积。

(2)辫状河储层内泥质沉积的保存与可容纳空间、沉积物供给速度有关。废弃河道泥岩更容易保存,其次为坝间泥和心滩落淤层,而越岸沉积最易遭受冲刷和侵蚀。

(3)在辫状河相储层中,应用多点地质统计学方法预测井间泥质夹层分布可以更有效地体现夹层的几何形态和分布规律,更加符合辫状河夹层的沉积模式。

参考文献:

[1] 于兴河,马兴祥,穆龙新,等. 辫状河储层地质模式及层次界面分析[M]. 北京:石油工业出版社,2004.

[2] 廖保方,张为民,李列,等. 辫状河现代沉积研究及相模式:中国永定河剖析[J]. 沉积学报,1998,16(1):34-38.

LIAO Bao-fang, ZHANG Wei-min, LI Lie, et al. Study on modern deposit of a braided stream and facies model; taking the Yongding river as an example[J]. Acta Sedim-

entologica Sinica,1998,16(1):34-38.

[3] 刘波,赵朝卿,李广月,等. 储层砂质辫状河的识别:以大庆喇嘛甸-萨尔图油田西部PI₂为例[J]. 石油学报,2002,23(2):43-46.

LIU Bo, ZHAO Han-qing, LI Guang-yue, et al. Reservoir identification of sandy braided river; taking PI₂ zone, Maladian-Saertu Oilfield in Daqing as an example [J]. Acta Petrolei Sinica,2002,23(2):43-46.

[4] 何顺利,兰朝利,门成全. 苏里格气田储层的新型辫状河沉积模式[J]. 石油学报,2005,26(6):26-29.

HE Shun-li, LAN Chao-li, MEN Cheng-quan. New braided river model in Sulige gas field of Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005,26(6):26-29.

[5] 束青林. 孤岛油田馆陶组河流相储层隔夹层成因研究[J]. 石油学报,2006,27(3):100-103.

SHU Qing-lin. Interlayer characterization of fluvial reservoir in Guantao formation of Gudao Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006,27(3):100-103.

[6] LYND S R M, HAJEK E A. Conceptual model for predicting mudstone dimensions in sandy braided-river reservoirs [J]. AAPG Bulletin, 2006,90(8):1273-1288.

[7] KJEMPERUD A V, SCHOMACKER E R, CROSS T A. Architecture and stratigraphy of alluvial deposits, Morrison formation (upper Jurassic), Utah [J]. AAPG Bulletin, 2008,92(8):1055-1076.

[8] 李东海,姜在兴,李继山. 济阳拗陷东部新近系馆陶组下段辫状河三角洲沉积研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,2003,27(3):10-14.

LI Dong-hai, JIANG Zai-xing, LI Ji-shan. Sedimentary study of braided river delta in Guantao formation, east Jiyang [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003,27(3):10-14.

[9] 任怀强,刘金华,杨少春,等. 吐哈盆地红台地区辫状河三角洲砂岩储层微观特征[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(5):12-15.

REN Huai-qiang, LIU Jin-hua, YANG Shao-chun, et al. Sandstone reservoir microscopic characteristics of braid delta of Hongtai area in Tuha Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(5):12-15.

[10] 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):7-10.

LIU Yu-ming, HOU Jia-gen, WANG Lian-min, et al. Architecture analysis of braided river reservoir [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,33(1):7-10.