

渤南五区浊积水道砂体储层构型研究

李志鹏¹, 杨 勇¹, 侯加根², 郭迎春¹

(1. 中国石化胜利油田勘探开发研究院, 山东东营 257061; 2. 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249)

摘要:根据岩心、露头 and 测井等资料, 结合密井网条件下的连井剖面, 在浊积水道沉积模式的指导下, 建立浊积水道砂体内部构型模式, 研究渤南 5 区沙三段 9 砂组浊积水道构型。结果表明: 浊积水道主要发育 6 种岩相, 纵向上构成完整或不完整的鲍马序列; 单砂体受古地形控制平面上分东、西两个水系, 垂向叠加样式主要为相隔式和浅切式, 平面上展布样式主要为交切连片式、交切条带式和孤立条带式; 单一水道砂体一般厚度为 5~10 m, 宽度为 400~800 m, 平均为 570 m; 主要发育泥质、钙质和物性 3 种隔夹层, 单砂体间隔层较稳定, 连续性好; 单一水道砂体内部夹层发育少, 稳定性差, 倾角小。

关键词: 浊积砂体; 浊积水道; 储层构型; 隔夹层; 渤南油田

中图分类号: TE 122.2 **文献标志码:** A

引用格式: 李志鹏, 杨勇, 侯加根, 等. 渤南五区浊积水道砂体储层构型研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(5): 36-42.

LI Zhipeng, YANG Yong, HOU Jiagen, et al. Reservoir architecture of turbidity channels in the 5th area of Bonan Oilfield [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(5): 36-42.

Reservoir architecture of turbidity channels in the 5th area of Bonan Oilfield

LI Zhipeng¹, YANG Yong¹, HOU Jiagen², GUO Yingchun¹

(1. Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257061, China;

2. School of Geosciences in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Based on the dispositional model of turbidity channel, we established a reservoir architecture model of turbidity channels. We studied the reservoir architecture of the turbidity channels in the 9th sand group of E₂S₃ in Bonan Oilfield using the rock cores, outcrop, logging and the well pattern of the well sections. The results reveal that there are six types of lithofacies in the turbidity channels. The lithofacies forms are the complete or incomplete Bouma Sequence. The monosandbodies are divided into two river systems by the ancient landform. Vertically the monosandbodies are in apart form and shallow erosion form. In the horizontal plane, the monosandbodies are in intersecting flaky form, intersecting banded form and isolated banded form. The single channel sand bodies are mostly 5–10 m thick; the channel widths are 400–800 m, with a 570 m average. There are muddy interlayer, calcareous interlayer and physical interlayer. The interlayers between the monosandbodies are stable and in good continuity. On the other hand the interlayers in the single channel sand body are less and unstable. The dip angle of the interlayers in the single channel sand bodies is small.

Keywords: turbidity sand; turbidity channel; reservoir architecture; interlayer; Bonan Oilfield

20 世纪 80 年代 Allen 和 Miall 先后提出了沉积界面分级系列和储层构型要素分析法^[1-5]。目前国内应用现代沉积、露头和密井网等多种沉积环境

的储层构型进行了详细研究^[6-12], 在浊积水道储层构型方面也取得了一定成果^[13-15]。渤南油田位于沾化凹陷渤南洼陷的南部缓坡, 是胜利低渗透油田

的开发老区,沉积类型属典型的缓坡坡移浊积扇,浊积水道发育,平面上连片展布,井网控制程度高,为覆盖区浊积水道砂体的储层构型研究提供了很好的条件^[16-18]。目前渤南油田综合含水高,剩余油分布特征复杂,为了进一步改善渤南油田的开发效果,亟需对砂体内部建筑结构进行精细描述,为剩余油分布和井网调整提供指导。在这种背景下,笔者以层次分析的思想为指导,按照储层构型研究思路,利用露头照片、岩心资料和测井连井剖面等,以渤南五区为研究对象,对浊积水道砂体的储层构型进行研究,为渤南油田后续开发和其他地区浊积水道砂体储层构型研究提供指导和借鉴。

1 浊积水道砂体构型模式

1.1 岩相特征

根据渤南五区 15 口取心井的岩心资料,浊积水道发育泥岩、泥质粉砂岩、交错层状粉—细砂岩、块状粗—中砂岩、块状砂砾岩和块状泥砾砂岩 6 类岩相,其中块状砂砾岩相、块状粗—中砂岩相和交错层状粉—细砂岩相为典型的储层岩相,孔隙度一般为 15% ~ 20%,渗透率一般为 $(0 \sim 20) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,含油性以油浸和油斑为主(图 1)。块状泥砾砂岩相分选

度浊流成因。块状粗—中砂岩相分选差,以中砂为主,单层厚度大,可大于 10 m。交错层状粉—细砂岩相,以细砂为主,掺杂一定量的粉砂,发育板状交错层理和平行层理,属低密度浊流沉积。泥质粉砂岩相的泥质沉积和粉砂质沉积多呈薄互层状,发育水平层理和小型交错层理,属浊流消亡期的沉积产物。泥岩相颜色为黑色、深灰色,无明显沉积构造,属深湖相静水沉积。

6 种岩相叠置在一起可组成典型的鲍马序列,块状泥砾砂岩相→块状含砾砂岩相→块状中—粗砂岩相组成了鲍马序列底部的递变层理段;交错层状粉—细砂岩相为下平行层理段;泥质粉砂岩相为交错层理段;泥岩相为水平层理段。泥质岩相具有高自然电位和高电导率的特征,随砂质含量和粒度的增加,自然电位和电导率降低。受后期浊流的冲刷,地层记录中浊积水道主要保存了鲍马序列的递变层理段和下平行层理段,泥岩相主要发育在水道间溢流微相和深水湖盆泥微相中。

1.2 构型单元划分模式

目前,国内对浊积水道砂体的构型单元^[14-15]还没有形成统一的划分方案。笔者参照 Miall 的 6 级构型界面体系,充分考虑浊积水道砂体沉积时的水动力条件、沉积方式和沉积规律,建立了浊积水道砂体构型的 6 级界面划分方案(图 2)。Ⅰ级界面为交错层系界面,构型单元内层理类型相同。Ⅱ级界面为交错层系组界面,限定的构型单元为一个岩相单元。Ⅲ级界面为单一水道砂体的内部夹层,属于自旋回细粒沉积,相当于 Miall 定义的大型底形内增生体界面,类似于曲流河点坝内的侧积面,限定的构型单元为由几个岩相组成的韵律段,为一个完整或不完整的鲍马序列。Ⅳ级界面为一期浊流沉积中的单一浊积水道砂体的边界面,包括各浊积水道砂体之间的分界面和水道砂体与其他微相之间的分界面,相当于 Miall 定义的大型底形界面,为具有一定规模的侵蚀界面,类似于曲流河中的单一河道沉积。Ⅴ级界面为一期浊流沉积中多条水道形成的复合砂体边界面,相当于单砂体边界面,上下有较稳定的隔层。Ⅵ级界面为目前地层分层体系中的小层界面,纵向上一般包含 1 ~ 3 个单砂体,厚度一般为 10 ~ 30 m。这 6 级界面都可在岩心和露头上识别,覆盖区测井资料受纵向分辨率的影响可以识别Ⅲ级—Ⅵ级界面,地震资料可以用来识别Ⅵ级界面。

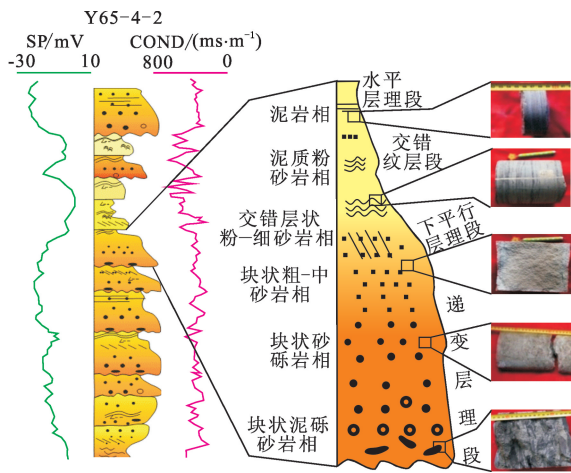
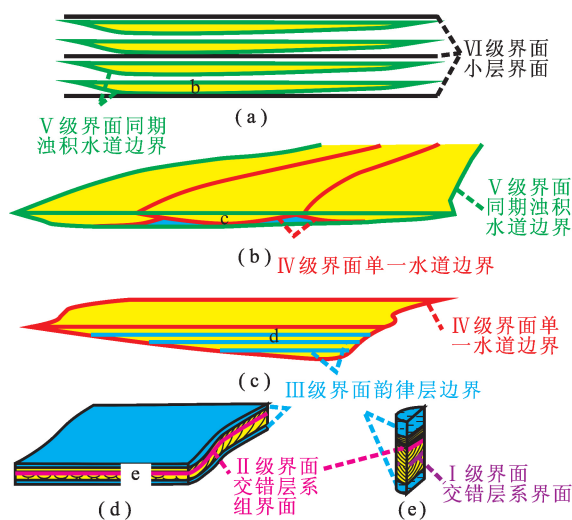


图 1 渤南五区浊积水道岩相类型

Fig. 1 Types and characteristics of lithofacies in Bonan Oilfield

极差,砾石主要是泥砾,磨圆差,多呈棱角状一次棱角状,排列杂乱,位于浊流沉积的底部,具冲刷面,属高密度浊流沉积。块状砂砾岩相分选差,粗砂较多,砾石直径多小于 3 mm,主要为石英砾和火山岩砾,呈次棱角一次圆状,发育在浊积水道的底部,属高密



注: (b) 为(a)中b的放大图; (c) 为(b)中c的放大图; (d) 为(c)中d的放大图; (e) 为(d)中e的放大图。

图2 浊积水道砂体构型界面划分方案

Fig. 2 Partition scheme of configuration interface in turbidity channel sand body

2 单砂体空间展布特征

渤南五区沙三段9砂组浊积扇沉积时期主要发育东西两个水系,纵向上自上而下可划分为1、2、3、4号4个小层,相当于VI级构型单元,地层厚度一般为10~30 m,4号小层相对最厚。本文中单砂体是纵向可分的一期浊积水道形成的砂体复合体,为V级构型单元,单砂体之间大部分区域存在隔层,开发中相对独立^[19]。单砂体的识别主要依靠取心井和测井资料由点到面、由精细剖面到平面组合,单砂体间一般存在泥质隔层,在岩心和测井资料上识别相对容易。剖面上单砂体的划分需要考虑古地形、地层厚度、差异压实和浊积水道沉积模式,一期浊积扇开始形成时浊流密度大,水动力强,下切作用和迁移能力强,水道控制范围大,随着浊流不断发展,湖水不断混入,浊流密度降低,水道下切作用和迁移能力降低,水道变窄,控制范围下降。根据以上浊积扇的发育规律,采用侧向相变、砂泥岩超短期旋回对比的方法,对渤南5区9砂组4个小层进行单砂体的划分,自上而下划分为13个单砂体,每个小层自下而上单砂体的控制范围不断减小(图3)。平面上单砂体的组合以砂体厚度中心线为主干,结合沉积模式进行合理组合。渤南五区沙三段9砂组浊积水道可分为东、西两个水系,1号、2号和4号小层西部水系发育明显,东部水系发育程度低;3号小层东、西部水系都有发育,且东、西两水系发育程度相当。总体上自4号小层到1号小层,浊积水系发育程度存在降低的趋势(图3)。



2.1 垂向叠加样式

渤南五区浊积水道砂体的垂向叠加样式可分为相隔式和浅切式两种。相隔式上下两单砂体之间存在泥质等细粒沉积物,可以作为很好的渗流屏障。浅切式是指后期单砂体切割前期单砂体,但切割深度小于前期单砂体厚度的一半^[9],上下两单砂体之间可以发生流体流动。渤南五区9砂组浊积水道单砂体总体上以相隔式为主,钻遇率大于70%。浅切式主要发育在水动力相对更强的西部水系,约占全区浅切式的70%,东部水系3号小层浅切式较发育。纵向上3号和4号小层单砂体浅切式较发育,占4个小层浅切式的60%以上,1号和2号小层相隔式占优势。

2.2 平面展布样式

渤南五区浊积水道单砂体平面样式可划分为交切连片式、交切条带式和孤立条带式3种,以交切条带式为主。交切连片式是指长宽比近于1:1的砂体,由于各浊积水道之间的侧向交切,砂体形成大面积的交切区,片状产出,砂体连通性好,横向连通性大于1500 m,平面上都发育在西部水系,纵向上主要发育在4-2、4-1和2-2的3个单砂体。交切条带式是指长宽比大于1:1,但小于3:1的单向延伸砂体,条带内存在几条浊积水道的侧向交切,砂体顺物源方向连通性好,横向上延展为600~1800 m,具一定连通性,平面上东西两个水系都有发育,纵向上主要发育在4-3、3-4、3-3、2-3、2-1、1-3和1-2共7个单砂体中。孤立条带式是指长宽比大于3:1,主要发育一条主水道砂体,顺物源方向连通性好,横向延伸一般小于800 m,连通性差,主要发育在东

部水系,西部水系发育较少,纵向上主要发育在 3-2、3-1 和 1-1 的 3 个单砂体中。

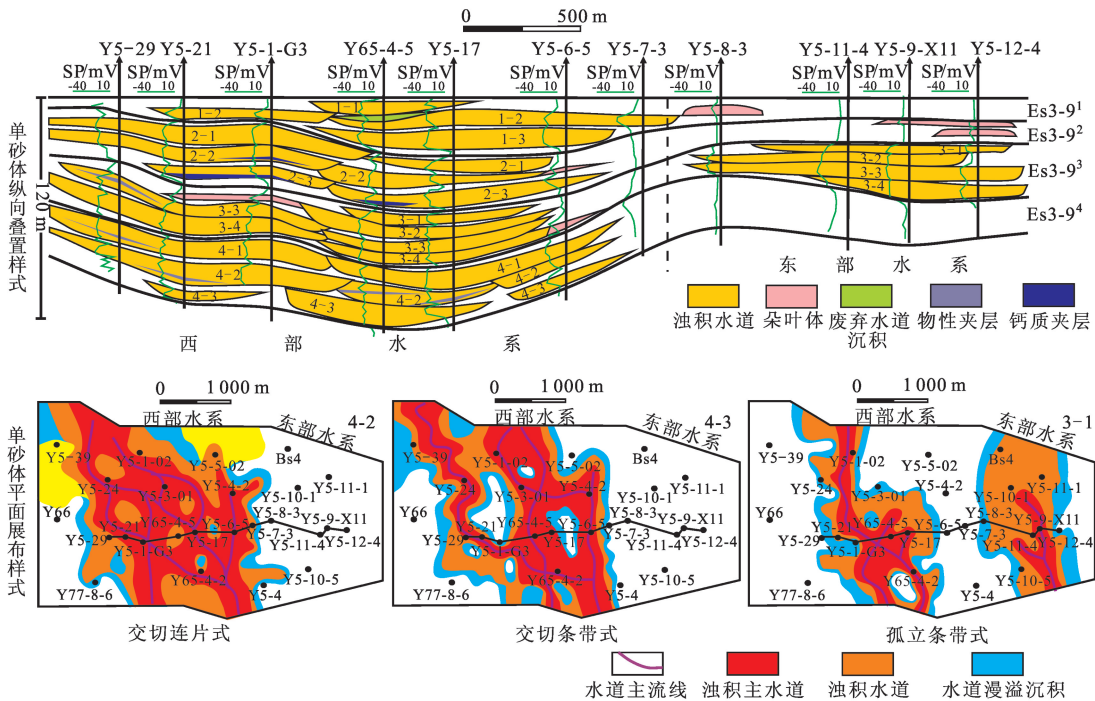


图 3 渤南五区浊积水道单砂体接触样式

Fig.3 Contact styles of turbidity channel monosandbody in the 5th area of Bonan Oilfield

3 单一水道特征

单一水道是构成单砂体的主要构型单元,为本次浊积水道构型研究的Ⅳ级构型单元。从图3横切水道体系的東西向剖面圖上看出,渤南5区9砂组的四个小层中4号、3号和2号3个小层的地层厚度整体变化不大,由于东、西部水系的砂岩发育程度不同,受后期压实作用的影响东部水系地层厚度相对较薄。1号小层浊积水道主要发育在西部水系的中部,西部水系的两边和东部水系砂体不发育,受后期压实作用影响地层厚度差异大。通过以上分析发现渤南5区9砂组各小层沉积时期整体地形较平

坦,浊积扇主要为充填沉积,所以可采用小层顶泥岩拉平下的高程差异、侧向相变、砂体厚度变化特征以及废弃水道沉积等方法在密井网连井剖面中划分单一水道(图3)。平面上单一水道的识别主要参考剖面划分中的单一水道边界,并考虑砂体厚度高值,根据沉积模式进行合理组合。渤南五区9砂组单一水道分界面发育位置继承性较好,主要发育在东、西部水系之间和西部水系的Y5-1-G3井与Y65-4-5井之间(图3)。

选取渤南五区9砂组的72条单一水道作为样本,对其宽度和深度进行测量(图4)发现:①单一水道的宽度一般为400~800 m,平均为570 m;②单一

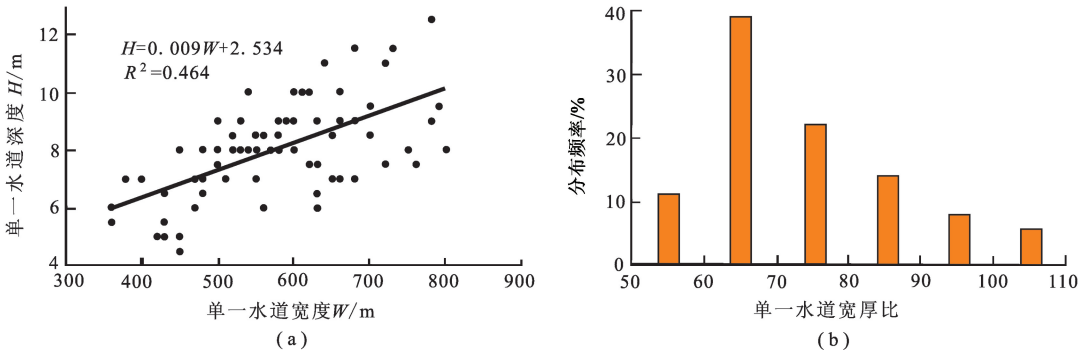


图 4 渤南五区单一浊积水道规模特征

Fig.4 Scale features of single turbidity channel in the 5th area of Bonan Oilfield

水道深度一般为 4 ~ 13 m, 平均为 8 m, 深度为 6 ~ 10 m 的水道约占全部水道的 77%; ③单一水道的宽度与深度呈正相关性, 宽深比一般为 60 ~ 90, 远大于陆相的曲流河(宽深比小于 10)和辫状河(宽深比大于 40)。④渤南五区 9 砂组 4 号、3 号和 2 号小层的水道宽度和深度相近, 1 号小层单一水道的宽度相对要窄一些(图 3)。

4 隔夹层类型及特征

根据成因, 渤南五区浊积水道砂体的隔夹层可分为沉积成因和成岩成因两类。根据岩性, 可划分为泥质隔夹层、物性隔夹层及钙质隔夹层 3 类。泥质隔夹层为沉积成因, 岩性主要为泥岩、油泥岩和粉砂质泥岩。泥岩和粉砂质泥岩自然伽马值高, 微电极低; 油泥岩自然伽马高, 微电极高。物性隔夹层也为沉积成因, 岩性较泥质隔夹层粗, 主要为泥质粉砂岩和泥质砂岩, 厚度较薄, 一般小于 1 m, 自然伽马出现回返现象, 回返幅度较小, 一般小于 40%。钙质隔夹层为成岩作用期地下水流动过程中不断钙化而形成, 属成岩成因, 岩性主要为钙质砂岩, 微电极和电阻率曲线上表现为高电阻尖峰状, 主要分布在

砂体底部。规模上可分为小层之间的隔层(VI级构型界面)、单砂体之间的隔层(V级构型界面)和单一水道砂体内的夹层(IV级构型界面)3级(图5)。通过研究区 200 多口井的统计, 发现小层间隔层主要为沉积成因的泥质隔层, 厚度大, 平均为 6.1 m, 横向稳定性好, 钻遇率大于 85%, 可全区对比(图 3 连井剖面)。单砂体之间的隔层也主要为沉积成因的泥质隔层和物性隔层, 具一定厚度, 平均为 1.5 m, 横向较稳定, 钻遇率为 72% ~ 91.5%, 研究区大部分区域可追踪对比(图 3 连井剖面)。单一水道内部夹层主要为沉积成因的物性夹层和成岩成因的钙质夹层, 厚度薄, 测井识别出的夹层厚度为 0.35 ~ 1.4 m, 平均为 0.7 m, 横向连通性差, 在一个井距以内, 难以井间对比, 发育频率低, 单井纵向一般发育 0 ~ 2 个, 发育频率平均为 0.12 层/m。单一水道内夹层在岩心上可识别到小于 0.5 m, 小于 0.5 m 的测井资料难以识别。根据对子井研究和取心井的观察描述, 发现单一水道内部沉积成因的物性夹层与水道砂体顶面夹角小, 一般小于 4°(图 6), 钙质夹层主要发育在水道砂体底部, 与水道底部平行。

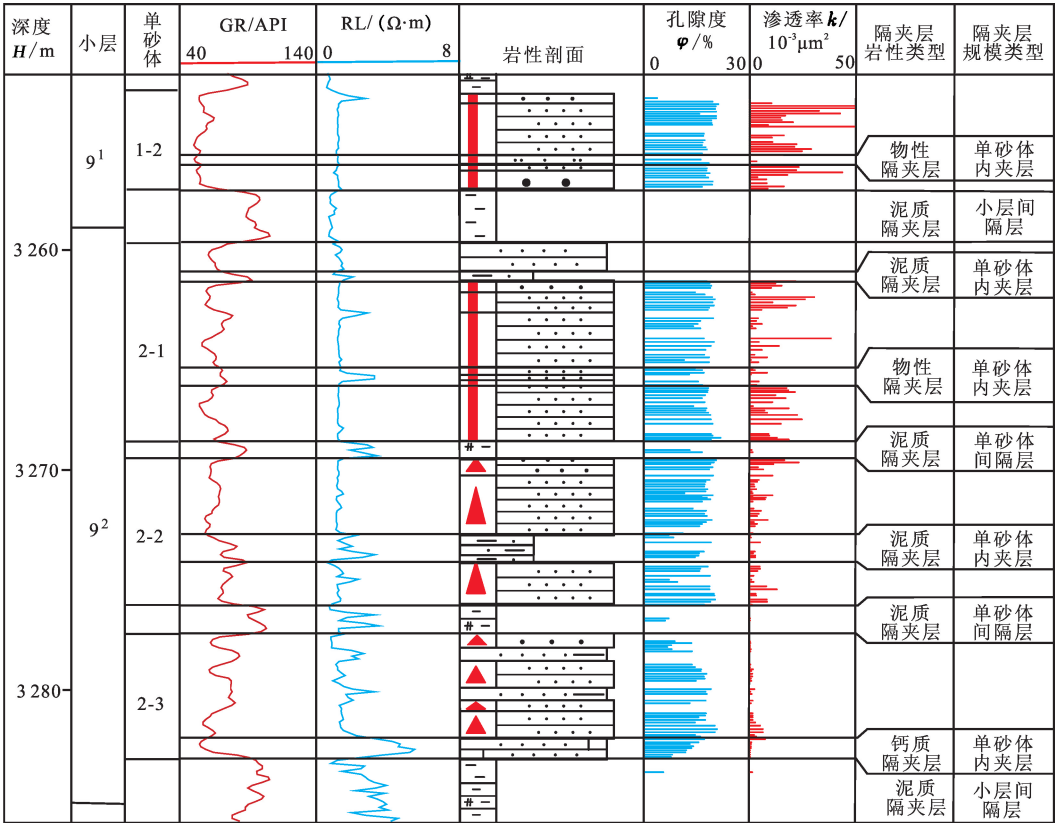


图 5 渤南五区浊积水道隔夹层特征

Fig.5 Characteristics of interlayer of turbidity channel in the 5th area of Bonan Oilfield

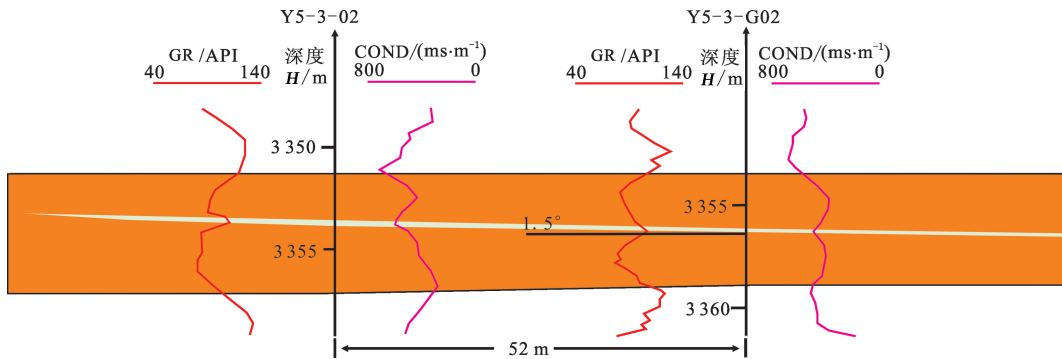


图 6 单一浊积水道物性夹层特征

Fig. 6 Characteristics of material interlayer of single turbidity channel

5 结 论

(1) 渤南五区浊积水道发育泥岩、泥质粉砂岩、交错层状粉—细砂岩、块状粗—中砂岩、块状砂砾岩和块状泥砾砂岩 6 类岩相, 叠置在一起可组成完整或不完整的鲍马序列, 其中块状砂砾岩相、块状粗—中砂岩相和交错层状粉—细砂岩相为主要储层岩相。

(2) 建立了浊积水道砂体构型的 6 级界面划分方案, I 级界面为交错层系界面, II 级界面为交错层系组界面, III 级界面为单一水道砂体的内部夹层, IV 级界面为一期浊流沉积中的单一浊积水道砂体的边界面, V 级界面为一期浊流沉积中多条水道形成的复合砂体边界面, VI 级界面为目前地层分层体系中的小层界面。

(3) 渤南五区沙三段 9 砂组分属于东西部两个水系, 西部水系砂体发育程度高, 东部水系发育程度低。单砂体的垂向叠加样式可分为相隔式和浅切式两种, 以相隔式为主, 平面上主要发育交切连片式、交切条带式 and 孤立条带式 3 种平面展布样式, 以交切条带式为主。

(4) 渤南五区 9 砂组单一浊积水道宽度与深度存在明显的正相关性, 宽深比一般为 60 ~ 90, 远大于陆相的曲流河和辫状河, 单一水道的宽度一般为 400 ~ 800 m, 平均为 570 m。

(5) 根据成因, 渤南五区浊积水道砂体的隔夹层可分为沉积成因与成岩成因两类。根据岩性, 可分为泥质隔夹层、物性隔夹层及钙质夹层 3 类。小层之间和单砂体之间隔层横向稳定性强, 厚度大, 单一水道内部夹层厚度为 0.35 ~ 1.4 m, 平均为 0.7 m, 横向连通性差, 在一个井距以内, 发育频率低, 产状与水道砂体顶面夹角小, 一般小于 4°。

参考文献:

[1] ALLEN J R L. The plan shape of current ripples in relation to flow condition[J]. Sedimentology, 1977, 24(1): 53-62.

[2] ALLEN J R L. Studies in fluvial sedimentation: bars, bar complexes and sandstone sheets (lower-sinuosity braided streams) in the Brownstones (L. Devonian), Welsh Broders [J]. Sedimentary Geology, 1983, 33(4): 237-293.

[3] MIAL L A D. Architecture elements analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits [J]. Earth Science Review, 1985, 22(2): 261-308.

[4] MIAL L A D. The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996: 74-98.

[5] MIAL L A D. Reconstructing the architecture and sequence stratigraphy of the preserved fluvial record as a tool for reservoir development: a reality check [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(7): 989-1002.

[6] 于兴河, 王德发, 郑浚茂, 等. 辫状河三角洲砂体特征及砂体展布模型——内蒙古岱海湖现代三角洲沉积考察 [J], 石油学报, 1994, 15(1): 26-37.

YU Xinghe, WANG Defa, ZHENG Junmao, et al. 3-D extension models of braided deltaic sandbody in terrestrial facies: an observation on deposition of modern deltas in Daihai lake, inner Mongolia [J]. Acta Petrolei Sinica, 1994, 15(1): 26-37.

[7] 贾爱林, 穆龙新, 陈亮, 等. 扇三角洲储层露头精细研究方法 [J]. 石油学报, 2000, 21(4): 105-108.

JIA Ailin, MU Longxin, CHEN Liang, et al. Approach for detailed study of reservoir outcrop [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(4): 105-108.

[8] 姚光庆, 马正, 赵彦超, 等. 浅水三角洲分流河道砂体储层特征 [J]. 石油学报, 1995, 16(1): 24-31.

YAO Guangqing, MA Zheng, ZHAO Yanchao, et al.

- Reservoir characteristics of distributary channel sand bodies of shallow water delta[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1995, 16(1): 24-31.
- [9] 李志鹏, 林承焰, 董波, 等. 河控三角洲水下分流河道砂体内部建筑结构模式[J]. *石油学报*, 2012, 33(1): 101-105.
- LI Zhipeng, LIN Chengyan, DONG Bo, et al. An internal structure model of subaqueous distributary channel sands of the fluvial-dominated delta[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(1): 101-105.
- [10] 岳大力, 吴胜和, 刘建民. 曲流河点坝地下储层构型精细解剖方法[J]. *石油学报*, 2007, 28(4): 99-103.
- YUE Dali, WU Shenghe, LIU Jianmin. An accurate method for anatomizing architecture of subsurface reservoir in point bar of meandering river[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(4): 99-103.
- [11] 李志鹏, 林承焰, 张家锋, 等. 高浅南区 Nm II 和 Nm III 油组高分辨率层序构型及其对储层构型的控制[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2012, 36(1): 20-25.
- LI Zhipeng, LIN Chengyan, ZHANG Jiafeng, et al. High-resolution sequence architecture and its control over reservoir architecture in Nm II & Nm III oil gropes, Gaoqiannan area[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2012, 36(1): 20-25.
- [12] 余成林, 李志鹏, 熊云斌, 等. 心滩储层内部构型分析[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2012, 34(3): 19-22.
- YU Chenglin, LI Zhipeng, XIONG Yunbin, et al. Analysis on internal architecture of batture bar reservoir[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2012, 34(3): 19-22.
- [13] 李磊, 邵子玮, 都鹏燕, 等. 穆尼盆地第四纪深水弯曲水道: 沉积构型、成因及沉积过程[J]. *现代地质*, 2012, 26(4): 349-354.
- LI Lei, SHAO Ziwei, DU Pengyan, et al. Quaternary sinuous submarine channel in Muni Basin: architecture, genesis and process[J]. *Geoscience*, 2012, 26(4): 349-354.
- [14] 赵晓明, 吴胜和, 刘丽. 尼日尔三角洲盆地 Akpo 油田新近系深水浊积水道储层构型表征[J]. *石油学报*, 2012, 33(6): 1049-1057.
- ZHAO Xiaoming, WU Shenghe, LIU Li. Characterization of reservoir architectures for Neogene deepwater turbidity channels of Akpo Oilfield, Niger Delta Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(6): 1049-1057.
- [15] 林煜, 吴胜和, 王星, 等. 深水浊积水道体系构型模式研究: 以西非尼日尔三角洲盆地某深水研究区为例[J]. *地质评论*, 2013, 59(3): 510-519.
- LIN Yu, WU Shenghe, WANG Xing, et al. Research on architecture model of deepwater turbidity channels system: a case study of a deepwater research area in Niger Delta Basin[J]. *Geological Review*, 2013, 59(3): 510-519.
- [16] 秦延才, 徐福刚, 赵翠霞, 等. 渤南油田沙三段含油体系研究[J]. *油气地质与采收率*, 2002, 9(3): 59-62.
- QIN Yancai, XU Fugang, ZHAO Cuixia, et al. Research on Es3 oil bearing system in Bonan Oilfield[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2002, 9(3): 59-62.
- [17] 武法东, 陈永进, 黄高健, 等. 渤南油田五区、六区层序地层格架与沉积类型[J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(5): 30-33.
- WU Fadong, CHEN Yongjin, HUANG Gaojian, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary types in the Block 5 and 6, Boanan Oilfield[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(5): 30-33.
- [18] 董春梅, 宋春刚. 渤海湾盆地渤南油田沙三段沉积微相研究[J]. *石油实验地质*, 2003, 25(4): 375-380.
- DONG Chunmei, SONG Chungang. Study on the sedimentary microfacies of the Sha-3 member in Bonan Oilfield[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(4): 375-380.

(编辑 徐会永)