

河口坝内部储层构型及剩余油分布特征 ——以大港油田枣南断块长轴缓坡辫状河三角洲为例

印森林¹,陈恭洋¹,戴春明²,吴胜和³,芦凤明⁴,冯文杰³

(1. 长江大学 计算机科学学院,湖北 荆州 434023; 2. 中国石油 吉林油田扶余采油厂,吉林 松原 138000; 3. 中国石油大学 地球科学学院,北京 102249; 4. 中国石油 大港油田公司 勘探开发研究院,天津 大港 300280)

摘要:利用岩心、测井、地震及分析化验资料,综合层次分析、模式拟合及数值模拟等方法对河口坝内部储层构型模式进行研究,同时探讨了其内部夹层控制的剩余油分布特征。研究表明:受分流水道不同的沉积物卸载方式控制,河口坝内部夹层具有侧向叠置状及上拱状两种分布样式。侧向叠置状夹层样式在垂生物源方向呈一定倾角的侧向叠置状;上拱状夹层样式在垂生物源方向上呈多层隆升状。其中不同夹层分布样式的规模和方向存在较大差异。不同样式夹层剩余油富集方式存在差异。平行物源方向上,剩余油往往富集在夹层控制的注采不对应的前积体(增生体)内部,且其前端剩余油富集程度较高。垂生物源方向上,对侧向叠置状夹层样式来说,剩余油大量富集在坝主体内部夹层隔挡的侧积体内;对上拱样式来说,剩余油受水驱控制大量富集在拱状高部位。

关键词:储层构型;河口坝;夹层;剩余油;枣南断块

中图分类号:TE121.3 **文献标识码:**A

Reservoir architecture and remaining oil distribution in mouth bar—A case study on the braided delta of long-axis gentle slope in Zaonan fault block of Dagang Oilfield

Yin Senlin¹, Chen Gongyang¹, Dai Chunming², Wu Shenghe³, Lu Fengming⁴, Feng Wenjie³

(1. College of Computer Science, Yangtze University, Jinzhou, Hubei 434023, China; 2. Fuyu Production Company of Jilin Oilfield, PetroChina, Songyuan, Jilin 138000, China; 3. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 4. Exploration & Development Research Institute, Dagang Oilfield Company, PetroChina, Dagang, Tianjin 300280, China)

Abstract: Cores, well logging and seismic and laboratory analysis data as well as hierarchical analysis, model fitting and numerical simulation methods, were used in the study of internal configuration and distribution of remaining oil controlled by intercalations in the mouth bar of Dagang Oilfield. Result shows that there are two intercalation distribution patterns in the mouth bar as the result of different unloading patterns of sediments in distributed channels, namely the lateral overlapping pattern and the upwarping pattern. The former presents itself as a lateral stack of intercalations with certain dips crossing source direction and the latter shows a parallel uplifting pattern of multiple intercalations crossing source direction. The scales and directions of different patterns vary greatly. Remaining oil distributions in intercalations of different patterns are different. Along the provenance direction, the oil gathered inside and at the front of prograding accretion formed within intercalations. When crossing the provenance direction, the oil accumulated in the lateral accretion bodies blocked by internal interlayers in the bar for the lateral overlapping pattern and in higher places for the upwarping pattern.

Key words: reservoir architecture, mouth bar, intercalation, remaining oil, Zaonan fault block

三角洲是河流携带大量沉积物流入相对静止和稳定的汇水盆地或区域所形成的、不连续岸线的、突出的似三角形沉积体^[1]。多年来,因其复杂沉积成因特征及其良好的储层质量和可观的地质储量,受到了地质学家的广泛关注,成为油气田勘探开发的重点与热点^[2-5]。三角洲按照形态、水体深浅、营力性质、粒度

及供源性质具有多种分类方案,多种分类方案体现了三角洲沉积体复杂的沉积机制及多样化的沉积构型模式。其中,按照构造背景与供源性质的联合分类对于表征我国陆相复杂油田具有典型意义^[6]。目前,发育于短轴陡坡的辫状河三角洲沉积序列、岩相组合、构型要素、沉积构型模式等方面的研究取得了较多的认

收稿日期:2015-05-06;修订日期:2015-06-08。

第一作者简介:印森林(1983—),男,博士、讲师,储层沉积学及油气田开发地质。E-mail:yinxianlove@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05030-005-02;2011ZX05009-003)。

识^[7-17],特别是对于河口坝内部夹层的倾角、规模及分布样式等有了较大的进展^[18-20],然而,对于发育于长轴缓坡的辫状河三角洲垂向沉积序列、岩相组合、构型要素及沉积构型模式等方面还有待于进一步的研究,特别是长轴缓坡的辫状河三角洲前缘的典型构型要素河口坝内部夹层规模、分布样式、叠置关系及其对剩余油分布的控制作用方面的研究还存在较大不足。

本文以黄骅拗陷南部风化店油田枣南断块为例,研究发育于长轴缓坡断陷盆地边缘的辫状河三角洲前缘河口坝内部夹层形态、规模、方向及其叠置样式,同时研究隔夹层样式对剩余油分布的控制作用。枣V油组为枣南孔一段主要含油层系。油藏埋深为1 700~2 150 m,研究区完钻各类井共278口,其中取心井10口,井距平均约为120 m,局部最小井距可达20 m。同时,有覆盖全区的三维地震资料。

1 地质概况

枣南断块隶属于黄骅拗陷南部的风化店油田,总

体上是一个被断层复杂化的大致呈北东—南西走向的地垒式长轴背斜(图1)。

研究区为典型的断块油藏,断块整体呈北东向展布,中部比较平缓,两侧呈单斜向两边倾斜。目的层为辫状河三角洲前缘亚相沉积,岩性以细粉砂岩为主,以砂泥岩互层为主(图2)。平面上各层分流水道—河口坝呈连片分布,砂体连通性较好。研究区属中孔中渗储层,孔隙类型以粒间孔隙为主,储层喉道以孔隙缩小型喉道为主,属于中喉型储层。粘土成分以蒙脱石和蒙/伊混层为主,储层敏感性表现为强水敏、强盐敏、中等速敏或中等酸敏,胶结物以泥质为主。层内和层间渗透率变异系数基本大于0.7,储层非均质性严重^[21-23]。油田进入开发中后期受到不同级次储层构型单元的控制,油田呈现高含水、高采出程度、剩余油高度分散的“三高”阶段。

2 河口坝构型特征

油田进入高含水期后,单砂体内部的低渗透夹层

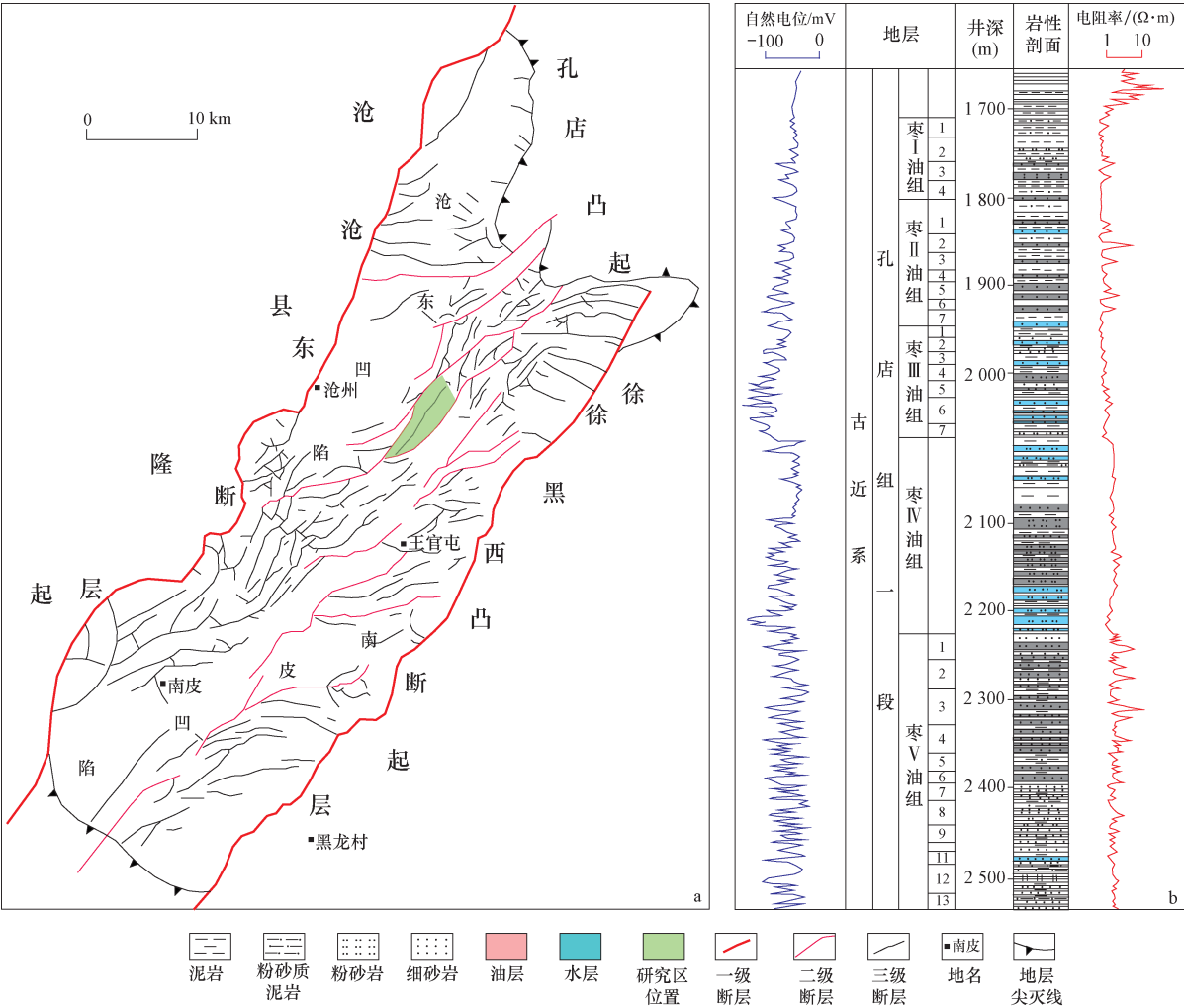


图1 研究区位置及地层柱状图

Fig. 1 Location and stratigraphic column of the study area

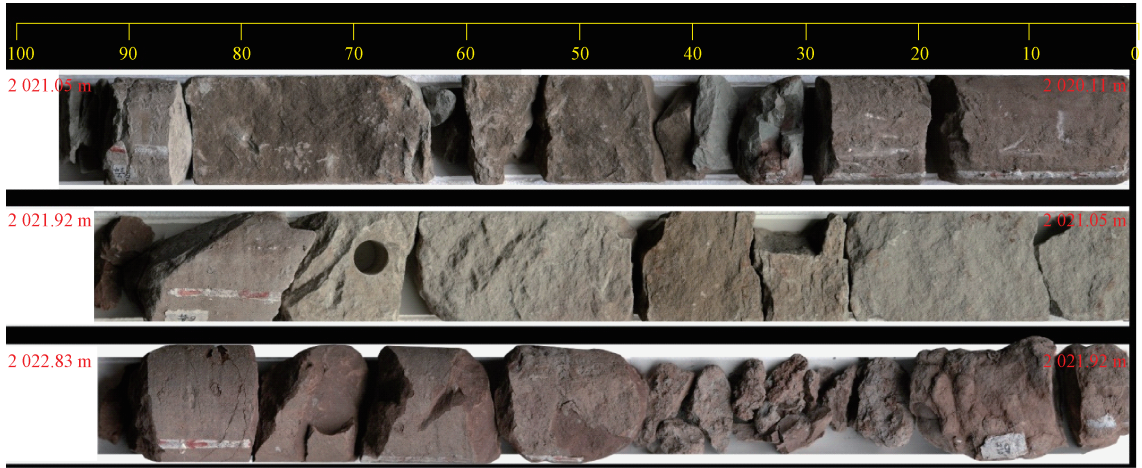


图2 大港油田枣南断块 1281-8 井灰色粉砂岩与紫红色泥岩互层(2 020.11~2 011.83 m)
Fig. 2 Interbedded gray siltstone and purple muddy stone in Zaonan fault block of Dagang Oilfield

是制约剩余油分布的关键,是合理调整注采方案的基础,因此研究单砂体内部夹层规模及其展布特征具有重要理论和生产意义。如单一河口坝内部包含多期增生体,增生体之间发育不稳定的泥质或钙质夹层。这些泥质或钙质夹层的存在对油田开发及剩余油分布有着重要的影响。特别是在研究区沉积砂体连片分布的情况下,了解单一微相内部夹层的三维空间展布特征可为剩余油的挖掘及后期的调整提供地质依据。

2.1 河口坝构型级次及夹层识别

河口坝砂体的构型级次一般对应于 Miall 的 4 级构型单元,吴胜和提出了更加系统的正序分级分类方案,把河口坝定义为 8 级构型单元,河口坝砂体在向湖盆推进过程中形成的河口坝内部的次级成因单元,对应 9 级构型单元,而 9 级构型界面是指河口坝内部的夹层^[24-27]。本次研究采用后者构型分级方案。

通过取心井观察发现,研究区发育灰色、紫红色、灰绿色泥质或泥粉砂质夹层,其电性特征在自然电位和电阻率曲线都有明显的回返,约占曲线最大幅度的 1/4 以上。因此,首先选取典型的取心井,进行砂体内部夹层识别,建立夹层测井响应模板(图 3)。然后,利用夹层的测井解释模板,对研究区进行单井夹层及不同级次砂体构型解释。最后,遵循河口坝的增生体发育模式,结合密井网区的剖面数据及典型井区的动态资料对夹层的井间分布作出推测,最终确定研究区典型层位的夹层空间展布特征及其规模。

2.2 河口坝内部夹层分布样式及其成因分析

本次研究选择重点层位的密井网区进行河口坝内

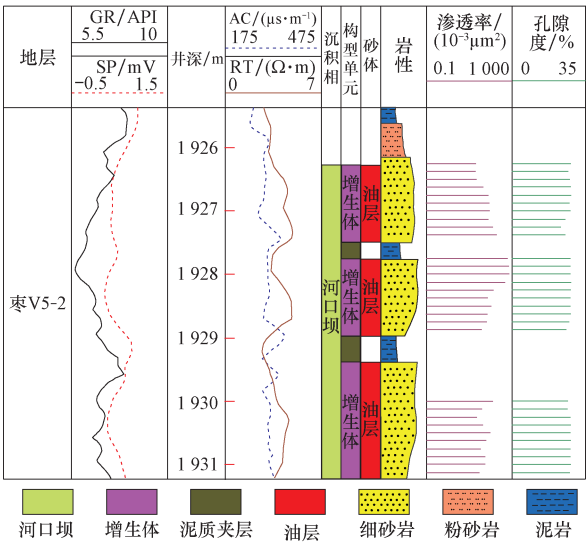


图3 大港油田枣南断块泥质夹层岩-电响应(Z1281-7 井)
Fig. 3 Well logging response of muddy intercalation in Zaonan fault block of Dagang Oilfield(Well Z1281-7)

部夹层的识别。分析发现,河口坝内部夹层在研究区整体呈连续或部分连续分布,平行物源方向的连续性相对好于垂直物源方向。夹层在平行物源方向上向湖盆方向倾斜(图 4),由于夹层是连续或部分连续的,因此其延伸规模范围较大,约 200~1 200 m。在垂直物源方向上,多期夹层主要呈侧向叠置状或相互平行的上拱状两种分布样式。

2.2.1 河口坝内部夹层定性及定量特征

(1) 侧向叠置状夹层

通过对研究区内部夹层剖面分布特征研究发现,研究区的侧向叠置状夹层具小角度的倾角,连续、部分连续地斜交于河口坝底部。统计表明,其砂体宽度约 200~700 m,宽度范围相对较大。此类样式的夹层主要由辫状分流河道频繁地侧向迁移形成,多期增生体侧向相互叠置,从而形成了整体宽度较大的河口坝体。

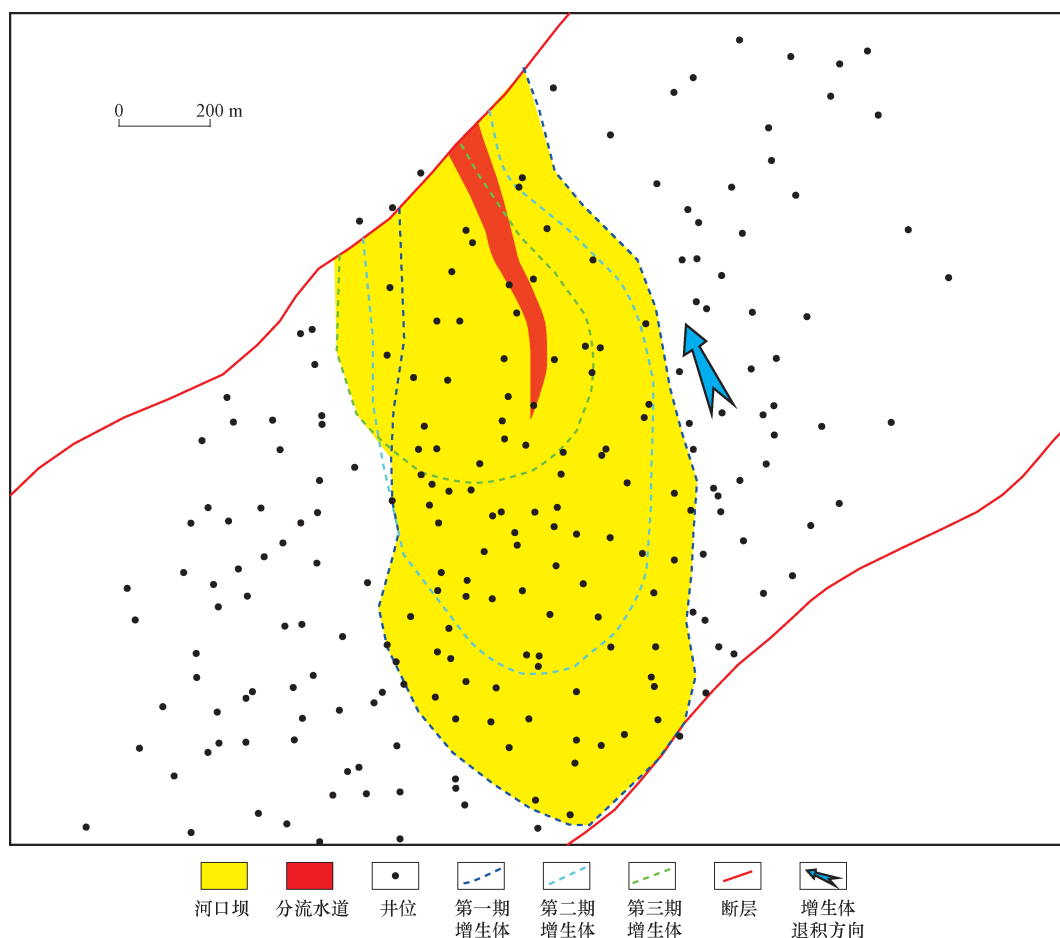


图4 大港油田枣南断块枣V段单一河口坝内部增生体分布示意图

Fig. 4 Planar distribution of accretions in a single mouth bar, Zaonan fault block of Dagang Oilfield

夹层分布的剖面特征反映了分流水道的迁移方向及增生体形成的先后顺序(图5)。从图中可以看出,侧向叠置状夹层在平行源方向依然具有低角度前积特征,同时其夹层在单一河口坝内部分布相对较为稳定,分布范围300~400 m。在垂物源方向上,分流河道是逐渐向东迁移的,1,2及3号增生体依次向东不断增生直至一期单一河口坝沉积结束,单一河口坝不同位置夹层分布样式及其规模存在差异,如在靠近湖盆中心过程中BB'剖面底部夹层断续分布,CC'剖面顶部夹层呈断续分布,DD'剖面底部夹层呈有界面无夹层状等。受分流水道的连续侧向迁移,在形成侧向叠置状夹层分布样式的过程中,最后形成宽度较大,厚度相对较薄的河口坝体(图5)。

(2) 上拱状夹层

在研究区还存在另外一种类型的夹层分布样式,即上拱状夹层分布样式。多个剖面数据统计分析发现,上拱状夹层是具有一定弧度的透镜状夹层,在宽带状和窄带状河口坝内部均有发育(图6,图7),但是在窄带状河口坝中更易发育。夹层宽度范围较大,约200~600 m,受河口坝体的规模所限制。此类夹层是在辫状分流河道未发生侧向摆动或摆动范围较小,河

道相对较为固定时期所形成的,河口坝体直接向湖盆进积,形成的多期增生体平行物源前积叠置,侧向迁移增生受限。剖面分析发现,由于增生体呈“底平顶凸”的形态,在一期增生体形成后,后期增生体由于沉积底型是上凸的,因此呈拱状沉积,弧度自下而上逐渐较小。不同砂体类型分布有较大差异性,窄带状砂体分布较为明显,其隆起幅度较大(2~4 m),且单一河口坝内部夹层分布连续性较好;而对于宽带状砂体来说,其隆起幅度较小(1~2 m),且单一河口坝内部夹层分布连续性较差(图6,图7)。

2.2.2 夹层倾角计算

三角洲前缘储层河口坝内部夹层的倾角对油田开发中后期的注采开发尤其重要。对于河口坝内部的夹层,本次利用密井网区“对子井”及小井距分析河口坝内部不同样式的夹层倾角。在三角洲前缘夹层沉积模式和动态数据的联合指导和反复验证下,获取井间较可靠的夹层倾角预测结果。然后依照以下公式进行夹层倾角的计算:

$$\tan\theta = (h_1 - h_2)/L \quad (1)$$

式中: θ 为夹层倾角, ($^{\circ}$); L 为同一夹层上两口井的水

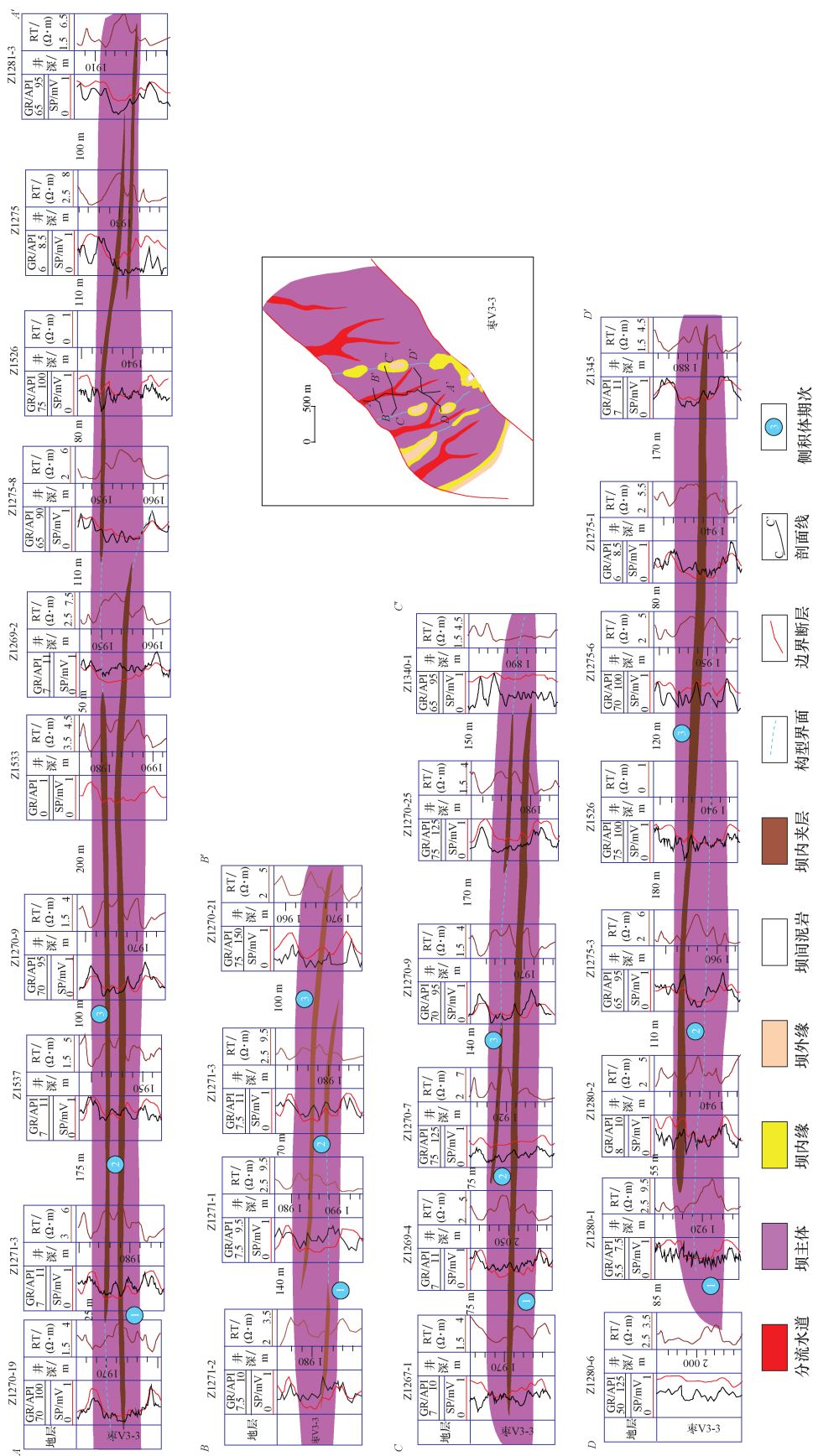


图5 大港油田东南断块侧向叠置状夹层分布

Fig. 5 Distribution of lateral stacking intercalations, Zaonan fault block of Dagang Oilfield

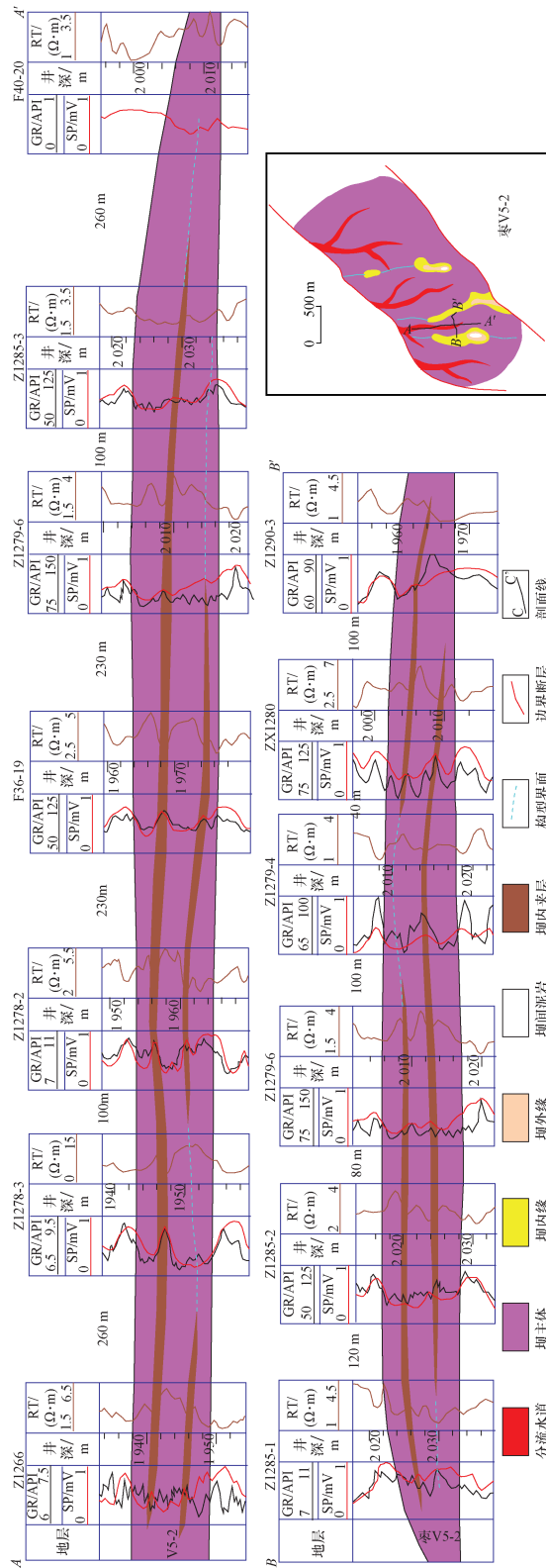


图6 大港油田枣南断块上拱状夹层展布 (窄带状, 枣V5-2)
Fig. 6 Distribution of upwarping intercalations in Zaonan fault block of Dagang Oilfield (narrow, Zao V5-2)

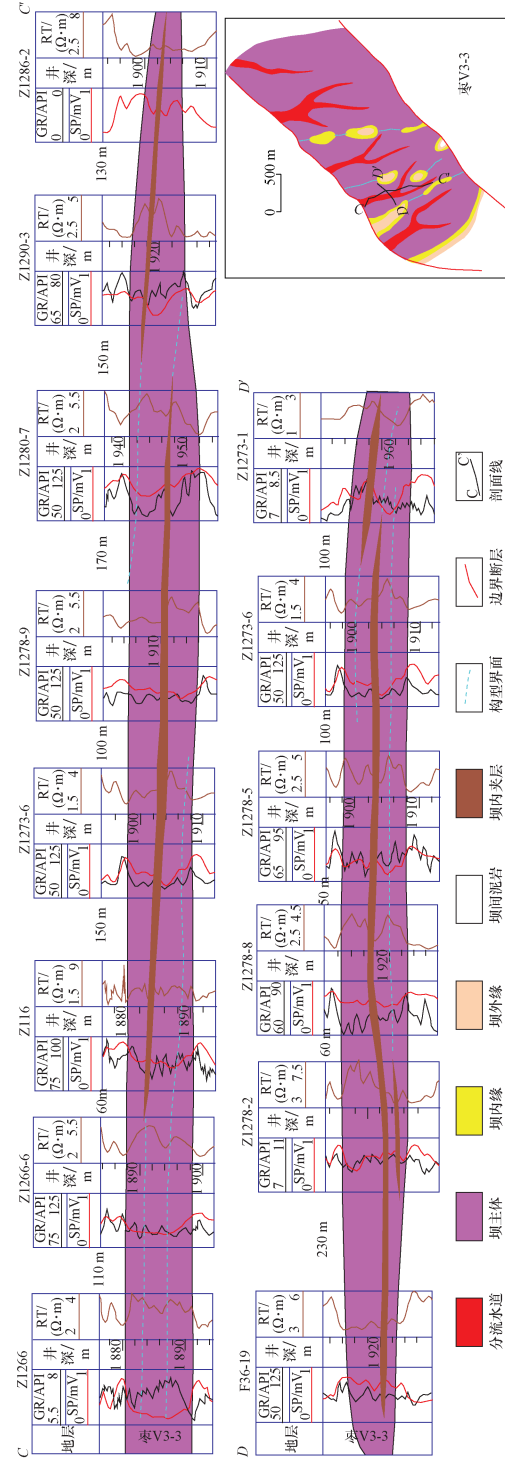


图7 大港油田枣南断块上拱状夹层展布 (宽带状, 枣V3-3)
Fig. 7 Distribution of upwarping intercalations in Zaonan fault block of Dagang Oilfield (wide, Zao V3-3)

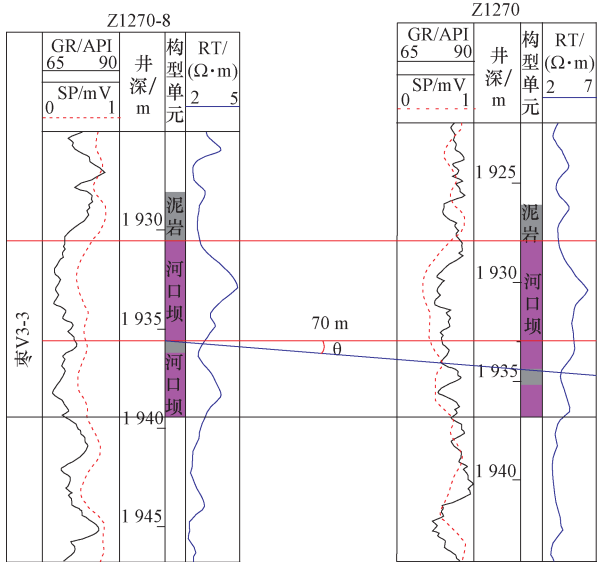


图 8 大港油田枣南断块枣 V3-3 单层小井距夹层倾角分析

Fig. 8 Analysis of dip angle with small well spacing in Zao V3-3,Zaonan fault block of Dagang Oilfield

平方向间的距离, m ; h_1 和 h_2 分别为两口井的夹层顶面相距最近旋回顶面的距离, m 。例如, Z1270-8 井与 Z1270 井之间夹层在垂直物源方向上相对于最近旋回顶面倾角约为 1.2° (图 8)。

采用此方法,在研究区选取数据齐全的井区数个,按照平行物源方向和垂直物源方向对夹层倾角进行统计,通过计算这些井区的倾角参数及结果(表 1,表 2)。数据统计表明,平行物源夹层的倾角范围 $0.5^\circ \sim 1.4^\circ$,垂直物源方向夹层的倾角范围约为 $0.6^\circ \sim 1.7^\circ$ 。

2.2.3 夹层成因分析

1) 侧向叠置状夹层分布模式及其成因

在三角洲向湖(海)推进的过程中,沉积物整体向湖(海)盆方向进积。然而,受到多种异旋回因素的控制,特别是基准面变化,引起了河口坝内部夹层的分布

表 1 大港油田枣南断块枣 V 段平行物源方向
河口坝内部夹层倾角统计

Table 1 Statistics of interbedd dip angle in mouth bar along deposit moving direction in Zao 5 th member in Zaonan fault block of Dagang Oilfield				
对子井		L/m	($h_1 - h_2$)/m	倾角/($^\circ$)
Z1270-8	Z1270	70	1.5	1.23
Z1274-1	Z1270-12	60	1.0	1.00
Z1274-5	Z1275-3	100	2.4	1.38
Z1287-2	Z1287-5	100	1.0	0.60

表 2 大港油田枣南断块枣 V 段垂直物源方向
河口坝内部夹层倾角统计

Table 2 Statistics of interbedd dip angle in mouth bar crossing source direction in Zao 5 th member in Zaonan fault block of Dagang Oilfield				
对子井		L/m	($h_1 - h_2$)/m	倾角/($^\circ$)
Z1274-1	Z1270-6	20	1.0	2.86
Z1275-8	Z1270-8	50	1.4	1.60
F36-21	Z1274-1	160	3.0	1.10
Z1274-3	Z1274-5	110	2.2	1.15

具有两种重要的特征。在基准面逐步上升的过程中,分流河道携带沉积物不断的卸载散开,而三角洲朵体在基准面上升过程中不同位置受力不平衡,朵体会渐渐侧向偏离分流河道入湖(海)垂直岸线的方向,导致了河口坝内部夹层的侧向迁移型特征,最终会形成侧向叠置状夹层分布模式。

2) 上拱状夹层分布模式及其成因

当沉积物整体向湖(海)盆方向稳定进积时,还会形成另外一种模式。在基准面缓慢下降的过程中,三角洲朵体在基准面下降过程中整体受力相对均衡时,朵体在渐续向湖(海)中心推进,形成以分流河道为中心的坝体会从中央沉积砂体逐步隆起厚度大,而边部则因为沉积物供给少而厚度小的特点。因此,形成了上拱状夹层分布样式。

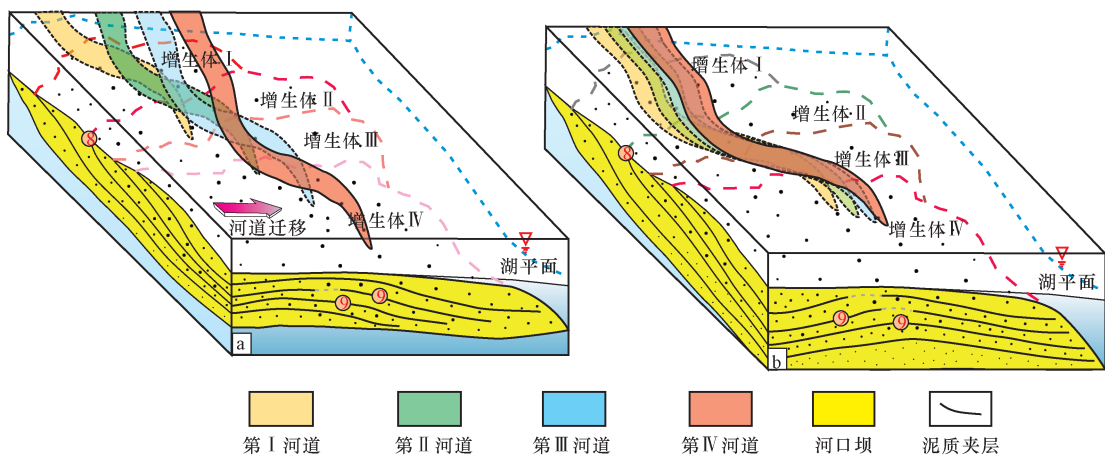


图 9 大港油田枣南断块枣 V 段河口坝内部泥质夹层分布模式

Fig. 9 Distribution of internal muddy intercalation in the mouth bar of Zao 5th member in Zaonan fault block of Dagang Oilfield

a. 侧向叠置状夹层分布样式;b. 上拱状夹层分布样式

3 河口坝内部剩余油分布特征

研究区为复杂断块油藏,断层发育程度极高。工区范围内分为6个断块区(枣43、枣1270、枣1266、枣1288、枣1281及枣2),同时在断块区内部还发育多条低序次断层,因此,从地质的角度来说,研究区受构造与储层构型的双重影响导致了剩余油分布异常复杂。为了深入探讨研究区河口坝内部剩余油的分布特征,本次采用概念模型的方法,利用数值模拟研究区剩余油的分布特征。具体步骤如下:

1) 建立构型概念模型

参考前述河口坝的内部夹层分布模式与模型,设计方案,坝体长度(600~1 000 m),坝体宽度(200~400 m),坝体厚度:8~12 m,夹层倾角[0.5°~1.4°(平行),0.6°~1.7°(垂直)],夹层规模:[200~600 m(平行),200~350 m(垂直)](图10a,b)。

2) 建立储层参数模型

根据研究区孔隙度和渗透率资料,对解释的井间参数进行插值,建立孔渗参数模型(表3)。

3) 数值模拟

在储层构型控制下对储层参数进行建模,建立储层参数的空间分布特征,对于含油饱和度来说,给定一个与研究区相当的均值模型($S_o=65\%$)。在孔隙度、渗透率和饱和度参数设置的基础上进行数值模拟。

通过注采井网数值模拟结果表明(图10c—e),在河口坝整体向湖盆进积过程中,不论是侧向叠置状还是上拱式,在平行物源方向上,都呈前积式,剩余油分布具有一致性。研究发现,剩余油往往富集在夹层控制的注采不对应的前积体(增生体)内部,其剩余油储量大,挖潜价值较高;同时,夹层控制的水动力滞留区剩余油富集程度较高,一般分布于前积体前端,三维空间内呈半环带状,具有较高的挖潜价值;

在垂直物源方向上,对于侧向叠置状夹层样式,

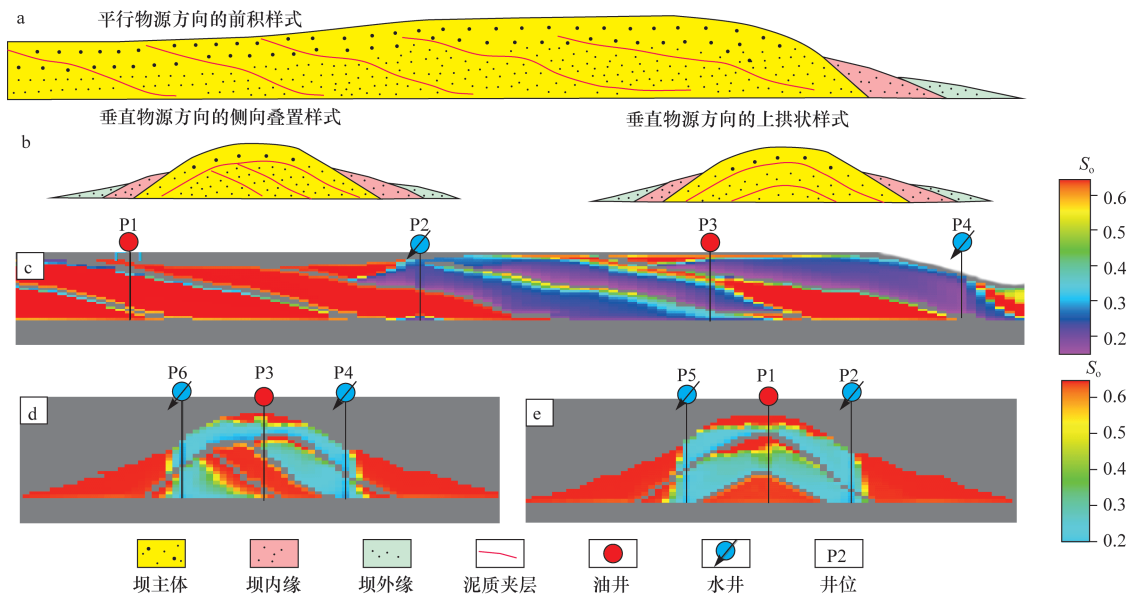


图10 河口坝内部夹层概念模型及剩余油分布特征

Fig. 10 Conceptual model of intercalation and remain oil distribution in the mouth bar

a. 平行物源方向前积样式;b. 垂直物源方向侧向叠置状和上拱式夹层分布样式;c. 前积式剩余油分布特征;
d. 侧向叠置状内部剩余油分布特征;e. 上拱式内部剩余油分布特征

表3 储层概念模型参数设置

Table 3 Reservoir parameter setting for conceptual model			
构型单元	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	
		水平方向	垂直方向
分流河道	20~32	800	80
坝主体	14~28	500	50
坝内缘	8~14	5	0.5
坝外缘	1~8	1	0.1
夹层	0.1	0.001	0.000 1

其侧向泥岩夹层隔档作用较强,在构成的注采井网剖面显示,剩余油大量富集在坝主体内部夹层隔挡的侧积体内;同时,其边部剩余油受水驱影响而较少富集。

对于上拱样式来说,一般由于坝体上部侧向隔档作用较弱,剩余油受水驱控制大量富集在较高部位,上拱式侧翼一般水驱作用明显,剩余油富集程度低;同时,因为坝体底部砂体规模一般较小,在现有井网条件下易造成注采不对应,形成剩余油。

4 讨论与结论

辫状河三角洲一般发育于短轴陡坡边缘,然而在物源、坡度变化的情况下也会发育在长轴缓坡,对于短轴陡坡辫状河三角洲及长轴缓坡浅水三角洲的关注较多^[7-8],以此为基础建立了不同类型三角洲的沉积模式,然而,在长轴缓坡辫状河三角洲具有其特殊性,其重要的特点是短轴陡坡辫状河三角洲的分流河道发育程度高;而长轴缓坡辫状河三角洲河口坝发育程度高。其不同的构型要素组成方式,构成了内部夹层分布模式的差异性;这种差异性对于油气田中后期的开发来说非常重要。

通过以上研究表明:

1) 提出了长轴缓坡辫状河三角洲前缘河口坝内部夹层的分布样式及成因

其一,侧向叠置状样式。夹层在垂直物源方向呈一定倾角的侧向叠置状,反映了三角洲朵体在基准面上升过程中不同位置受力不均衡渐渐侧向偏离分流河道入湖(海)垂直岸线的方向,导致了河口坝内部夹层的侧向迁移型特征。其二,上拱状夹层分布模式。夹层在垂直物源方向上呈多层隆升状,三角洲朵体在基准面下降过程中整体受力相对均衡时,以分流河道为中心的坝体会从中央沉积砂体逐步隆起厚度大,而边部则因为沉积物供给少而厚度小的特点,形成了上拱状夹层分布样式。

2) 阐明了长轴缓坡辫状河三角洲前缘不同夹层规模特征

侧向叠置状夹层发育在宽度较大的河口坝内部,宽度为20~700 m,夹层倾角为 $0.6^{\circ} \sim 1.7^{\circ}$ 。上拱状夹层其宽度为200~600 m,其隆升弧度由下至上逐渐减小。两种样式在平行物源方向均呈低角度向湖盆方向倾斜,规模为200~1 200 m,夹层倾角为 $0.5^{\circ} \sim 1.4^{\circ}$ 。

3) 探讨了不同夹层分布样式下剩余油分布特征。

平行物源方向上,不同夹层分布样式剩余油分布具有一致性。研究发现,剩余油往往富集在夹层控制的注采不对应的前积体(增生体)内部;同时,夹层控制的水动力滞留区剩余油富集程度较高,一般分布于前积体前端,三维空间内呈半环带状。

垂直物源方向上,对侧向叠置状夹层样式来说,剩余油大量富集在坝主体内部夹层隔挡的侧积体内;对上拱样式来说,剩余油受水驱控制大量富集在较高部位;同时,因为坝体底部砂体规模一般较小,在现有井网条件下易形成注采不对应,富集了剩余油;

参考文献

- [1] 于兴河. 碎屑岩系油气储层沉积学[M]. 北京:石油工业出版社, 2008:339-341.
- [2] Yu Xinghe. Clastic reservoir sedimentology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008:339-341.
- [3] Mcpherson J H, Shanmugam G, Moiola R J. Fan deltas and braid deltas: Conceptual problems in: Fan Deltas; Sedimentology and Tectonic Settings (Eds by Nemec W. and Steel R. J.), 1998, Blackie and Son, London:14-22.
- [4] Jones B J, Woodroffe C D. Tropical Deltas of Southeast Asia-sedimentology, stratigraphy, and petroleum geology//Deltas in the Gulf Carpentaria, Australia: forms, processes, and products[M]. SEPM Special Publication NO. 76, 2003:21-43.
- [5] Liu J T, HSU R T, Huang J S. Tropical Deltas of southeast Asia-sedimentology, stratigraphy, and petroleum geology//Sediment dispersal pattern off an eroding delta on the west coast of Taiwan[M]. SEPM Special Publication NO. 76, 2003:45-70.
- [6] 刘自亮. 辫状河三角洲前缘厚层储集砂体沉积学研究——以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例[D]. 成都理工大学, 2004.
- [7] Liu Ziliang. Sedimentary anatomy of thick sandstones on braided delta front-for example: Yanchang Formation in Longdong area in Ordos basin[D]. Chengdu university of technology, 2004.
- [8] 于兴河, 李胜利, 李顺利. 三角洲沉积的结构——成因分类与编图方法[J]. 沉积学报, 2013, 31(5):782-797.
- [9] Yu Xinghe, Li Shengli, Li Shunli. Texture-genetic classifications and mapping methods for deltaic deposits [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5):782-797.
- [10] 于兴河, 王德华, 孙志华. 湖泊辫状河三角洲岩相、层序特征及储层地质模型——内蒙古岱海湖现代三角洲沉积考察[J]. 沉积学报, 1995, 13(1):48-58.
- [11] Yu Xinghe, Wang Dehua, Sun Zhihua. Lithofacies types, vertical profile features and reservoir geological models of braided deltaic sandbodies in faulted lake basin-the observation on deposition of modern deltas in Daihai lake, inner Mongolia[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(1):48-58.
- [12] 朱筱敏, 刘媛, 方庆, 等. 大型坳陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式[J]. 地学前缘, 2012, 19(1):89-99.
- [13] Zhu Xiaomin, Liu Yuan, Fang Qing, et al. Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake. example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin[J]. Earth science frontiers, 2012, 19(1):89-99.
- [14] 焦养泉, 李思田, 杨士恭. 三角洲-湖泊沉积体系及聚煤研究——以鄂尔多斯盆地神木地区延安组Ⅱ单元为例[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1992, 17(2):113-120.
- [15] Jiao Yangquan, Li Sitian, Yang Shigong. Delta-lacustrine depositional system and coal accumulation research[J]. Earth science-journal of China university of Geosciences, 1992, 17(2):113-120.
- [16] 周银邦, 吴胜和, 岳大力, 等. 分流河道砂体构型分析方法在萨北油田的应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2008, 23(5):6-10.
- [17] Zhou Yinbang, Wu Shenghe, Yue Dali, et al. Application of the architectural analysis method of distributary sand body in Sabei Oilfield [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2008, 23(5):6-10.
- [18] 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.
- [19] Li Zhipeng, Lin Chengyan, Dong Bo, et al. An internal structure mo

- del of subaqueous distributary channel sands of the fluvial - dominated delta[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(1): 101 - 105.
- [12] 赵小庆, 鲍志东, 刘宗飞, 等. 河控三角洲水下分流河道砂体储层构型精细分析——以扶余油田探 51 区块为例[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(2): 181 - 187.
- Zhao Xiaoqing, Bao Zhidong, Liu Zongfei, et al. An in-depth analysis of reservoir architecture of underwater distributary channel sand bodies in a river dominated delta: A case study of T51 Block, Fuyu Oilfield[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(2): 181 - 187.
- [13] 邓庆杰, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 浅水三角洲分流河道砂体沉积特征——以松辽盆地三肇凹陷扶 II - I 组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(1): 118 - 127.
- Deng Qingjie, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, et al. Sedimentary characteristics of shallow-water delta distributary channel sand bodies: a case from II - I formation of Fuyu oil layer in the SanZhao Depression, Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(1): 118 - 127.
- [14] 张云银, 杨泽蓉, 孙淑艳, 等. 临南洼陷三角洲地震岩相解释方法[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(3): 404 - 410.
- Zhang Yun yin, Yang Zerong, Sun Shuyan, et al. Seismic lithofacies interpretation of delta deposits in the Linnan subsag[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(3): 404 - 410.
- [15] 王俊辉, 姜在兴, 张元福, 等. 三角洲沉积的物理模拟[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(6): 758 - 764.
- Wang Junhui, Jiang Zaixing, Zhang Yuanfu, et al. Physical simulation of deltaic deposits[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(6): 758 - 764.
- [16] 封从军, 鲍志东, 单启铜, 等. 三角洲平原复合分流河道内部单砂体划分——以扶余油田中区南部泉头组四段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(1): 128 - 135.
- Feng Congjun, Bao Zhidong, Shan Qitong, et al. Superimposition patterns of underwater distributary channel sands in deltaic front and its control on remaining oil distribution: a case study from K₁q⁴ in J19 block, Fuyu oilfield[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(1): 128 - 135.
- [17] 何文祥, 吴胜和, 唐义疆, 等. 河口坝砂体构型精细解剖[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(5): 42 - 46.
- He Wenxiang, Wu Shenghe, Tang Yijiang, et al. Detailed architecture analyses of debouch bar in Shengtuo Oilfield, Jiyang Depression[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(5): 42 - 46.
- [18] 李云海, 吴胜和, 李艳平, 等. 三角洲前缘河口坝储层构型界面层次表征[J]. *石油天然气学报*, 2007, 29(6): 40 - 52.
- Li Yunhai, Wu Shenghe, Li Yanping, et al. Hierarchical boundary characterization of delta front mouth bar reservoir architecture[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2007, 29(6): 40 - 52.
- [19] 温立峰, 吴胜和, 王延忠, 等. 河控三角洲河口坝地下储层构型精细解剖方法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(4): 1072 - 1078.
- Wen Lifeng, Wu Shenghe, Wang Yanzhong, et al. An accurate method for anatomizing architecture of subsurface reservoir in mouth bar of fluvial dominated delta[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2011, 42(4): 1072 - 1078.
- [20] 辛治国. 河控三角洲河口坝构型分析[J]. *地质评论*, 2008, 54(4): 528 - 531.
- Xin Zhiguo. Architecture analyses of debouch bar of fluvial dominated delta[J]. *Geological review*, 2008, 54(4): 528 - 531.
- [21] 王振彪, 裴亦楠. 大港枣园油田冲积扇储层研究[J]. *石油勘探与开发*, 1991, 18(4): 86 - 92.
- Wang Zhenbiao, Qiu yinan. A study of zaoyuan alluvial fan reservoir, Dagang oil field[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1991, 18(4): 86 - 92.
- [22] 林承焰, 刘泽容, 邓俊国. 黄骅坳陷南部枣园油田下第三系孔店组一段沉积模型[J]. *地质论评*, 1993, 39(增刊): 41 - 46.
- Lin Chengyan, Liu Zerong, Deng Junguo. A sedimentary model for the palaeogene of the first member of the Kongdian Formation in the Zaoyuan oil field in the southern part of the Huanghua depression[J]. *Geological review*, 1993, 39(sup): 41 - 46.
- [23] 石占中, 纪友亮. 湖平面频繁变化环境下的扇三角洲沉积——以黄骅坳陷枣园油田孔一段沉积为例[J]. *西安石油学院学报(自然科学版)*, 2002, 17(1): 24 - 27.
- Shi Zhazhong, Ji Youliang. Fan-delta sedimentation formed under the environment of lake level frequently varying—taking the first member of kongdian formation, huanghua depression as an example[J]. *Journal of Xi'an Petroleum Institute(Natural Science Edition)*, 2002, 17(1): 24 - 27.
- [24] Miall A D. Architectural elements analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits[J]. *Earth Science Reviews*, 1985, 22(4): 261 - 308.
- [25] Miall A D. Architectural elements and bounding surfaces in fluvial deposits: Anatomy of the Kayente Formation(Lower Jurassic), southwest Colorado[J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 55: 233 - 262.
- [26] Miall A D. The geology of fluvial deposits[M]. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1996: 75 - 178.
- [27] 吴胜和, 纪友亮, 岳大力, 等. 碎屑沉积地质体构型分级方案探讨[J]. *高校地质学报*, 2013, 19(1): 1 - 12.
- Wu Shenghe, Ji Youliang, Yue Dali, et al. Discussion on hierarchical scheme of architectural units in clastic deposits[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2013, 19(1): 1 - 12.

(编辑 张玉银)