

文章编号:1000-0550(2025)04-1336-08

滨岸相储层构型界面表征及其对剩余油分布的控制 ——以珠江口盆地A油田为例

商建霞¹,张乔良²,叶青¹,刘鹏超¹,晁彩霞²

1.中海石油(中国)有限公司海南分公司,海口 570100
2.中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东湛江 524057

摘要 【目的】文昌A油田珠江组二段一油组属于滨岸相砂体,由于沉积时期水体频繁动荡变化导致储层内部泥质、钙质隔夹层发育。油藏开发进入特高含水期后,受隔夹层影响,剩余油分布十分复杂,为延缓老油田产量递减,亟须开展隔夹层分布研究以明确剩余油分布及挖潜方向,然而隔夹层厚度基本在2 m以下,预测十分困难。【方法】针对此现状,在明确隔夹层类型及成因基础上,依据储层构型理论,采用“级次划分、成因分析、界面识别、定量表征”方法对砂体内部不同级次储层构型界面成因及展布进行研究,精细刻画复杂薄夹层的展布,明确剩余油分布,并提出油田开发调整策略。【结果】对砂体内部7-3级构型界面进行逐级识别与表征,总结出剩余油分布模式分为受平行状夹层遮挡的“屋脊油”、受斜交状夹层遮挡的“夹角油”两种类型,将开发目标调整为小层内部受不同期次构型界面遮挡的剩余油富集区,提出挖潜策略由“水上找油、顶部挖潜”转变为“夹缝找油、内部挖潜”。【结论】该研究成果大幅提高了单井产能,实施后单井日产油127 m³/d,累增油6.57×10⁴ m³,对高含水油田剩余油挖潜及提高采收率具有重要意义。

关键词 文昌A油田;滨岸相;构型界面;隔夹层;剩余油

第一作者简介 商建霞,女,1986年出生,硕士,高级工程师,油田开发地质研究,E-mail: shangjx@cnooc.com.cn

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.081

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2023.081

0 引言

滨岸相储层由于其砂体分布广泛且连续性好,通常作为一类较为优质的储层,具有物性好,单井产能高等特点。但由于受海平面升降、水体动荡、物源等沉积环境变化影响,其内部常形成夹层,从而使得内部结构具强非均质性,特别是油田进入开发后期,夹层成为该类储层控制剩余油分布的关键因素。因此,厘清滨岸相连续砂体内部夹层对于开发后期油田精细挖潜至关重要。国内外学者提出了多种隔夹层预测方法:林承焰等^[1]采用地质统计学方法预测隔夹层的空间展布;于兴河等^[2]侧重于野外露头观测、岩心观察等方法;张宪国^[3]等通过开展地震沉积学等方法进行隔夹层研究;李海东等^[4]采用储层构型及层次分析方法进行辫状河储层薄夹层分析。然而,前

人对隔夹层刻画主要集中在河流相、三角洲相^[5-7]等储层,而针对滨岸相储层内部隔夹层定量表征研究甚少,且研究层次也仅限于复合砂坝级以上。海上油田受稀井网及取心测试资料少等条件的限制,储层内部薄夹层分布预测一直成为制约海上油田高效开发的技术瓶颈之一,亟须探索新的隔夹层预测技术和开发策略,以期在该类型储层高含水期油田开发中取得突破。

随着油气藏开发程度的不断深入,刻画储层内部结构的储层构型分析成为储集层精细化研究的新手段^[8]。研究表明,储层内部构型单元之间发育的构型界面对地下流体运动有显著的阻隔和控制作用^[9],本文以珠江口盆地A油田珠江组二段一油组(简称“Z₂I油组”)滨岸相储层为研究对象,在储层构型级次划分及成因模式的指导下,分级次描述不同成因

收稿日期:2023-02-02;修回日期:2023-08-25;录用日期:2023-10-19;网络出版日期:2023-10-19

基金项目:中海石油(中国)有限公司重大专项(CNOOC-KJ135 ZDXM 38 ZJ 01 ZJ)[Foundation: CNOOC China Limited Major Project, No. CNOOC-KJ135 ZDXM 38 ZJ 01 ZJ]

单元之间“界面”(“隔夹层”)特征,总结归纳两种剩余油分布模式,提出了水平井层内精细挖潜的策略,指导了多口调整井方案制定及实施,效果显著。

1 油藏概况

文昌A油田位于南海北部大陆架珠江口盆地西部珠三坳陷的文昌B凹陷中部东侧(图1),珠三南大断裂带西侧,油田所处海域水深约125 m。油田共包括3个区块,其中ZJ₂I油组是A区块中的主力油组。ZJ₂I油组属于滨岸相沉积,储层物性好,属中—高孔、高渗储层,原油性质好,为轻质原油,生产井具有较高的产能。油藏类型为层状构造油藏,内部隔夹层十分发育,目前地质储量采出程度41.8%,综合含水93%,已进入特高含水开发阶段,剩余油分布复杂。

2 储层构型界面层次分析

2.1 储层构型单元分类

ZJ₂I油组泥岩颜色主要是浅灰色和灰绿色,反映当时的沉积环境为半氧化—半还原的浅水环境,发育低角度交错层理、微波状层理、透镜状层理及生物扰动构造。砂岩中石英含量较高,含量为75%~95%,为中等—高成熟度,符合滨岸相沉积特征。岩

心粒度累积概率曲线分析主要表现为两段式,以跳跃组分为主,悬浮组分次之;有的样品含少量滚动组分,略具三段式特征。其中,跳跃总体占50%~80%,有的跳跃组分呈双跳跃段,分选较好;悬浮总体占20%~30%,优势粒度分布区间相对集中,表明沉积物经过一定程度的波浪淘洗和筛选。

基于岩心观察、岩石薄片鉴定、岩石粒度分析等分析结果,ZJ₂I油组主要发育临滨砂坝主体、临滨砂坝侧缘、临滨浅滩、滨海泥4种储层构型单元(图2)。

(1) 临滨砂坝主体:岩性以中砂岩、钙质砂岩为主,含少量的细粒长石石英砂岩和石英砂岩,自然伽马曲线呈漏斗形,平滑或微齿状,顶部突变,底部渐变;电阻率曲线呈高幅漏斗形;密度低值,中子低值,声波高值,含油性好。

(2) 临滨砂坝侧缘:岩性以中砂岩—细砂岩为主,相比于临滨砂坝主体,自然伽马曲线为指形,幅度较高,整体呈低幅漏斗形,弱齿化,电阻率曲线呈中—低幅差;密度高值,中子低值,声波低值,含油性较好。

(3) 临滨浅滩:岩性以粉砂岩、细砂岩为主,含泥质条带,自然伽马曲线形态为中—低幅指形,微齿化,其值低于临滨砂坝侧缘,顶底渐变,整体表现为箱形;电阻率曲线呈低幅平直状和微齿状,中子密度曲线呈锯齿状,含油性一般。

(4) 滨海泥:岩性以粉砂质泥岩、泥岩为主,可见

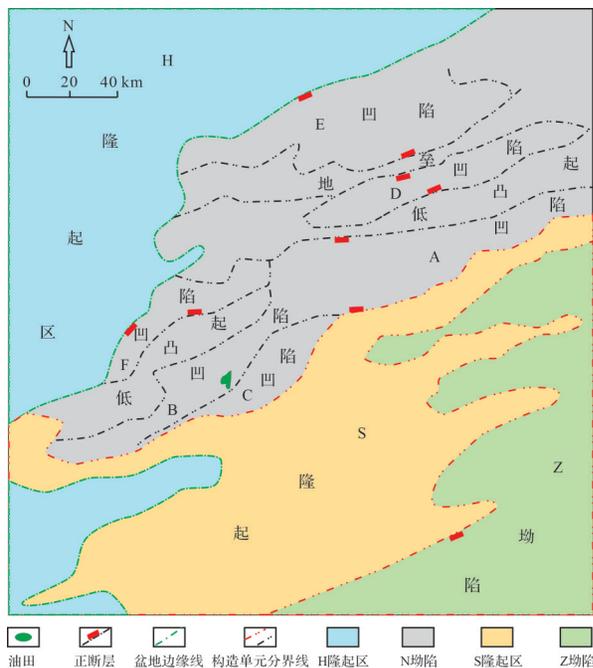


图1 珠江口盆地西部构造区划图及研究区位置
Fig.1 Structural map of the western Pearl River Estuary and the location of the study area

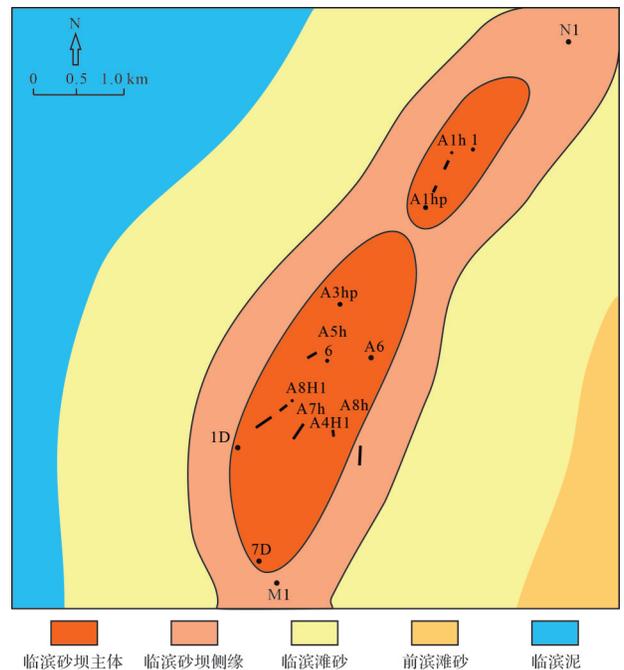


图2 研究区ZJ₂I-2-1-2单层构型平面分布
Fig.2 Planar distribution of 2-1-2 single layer configuration of oil group ZJ₂I in the study area

水平层理、块状层理,自然伽马曲线形态为泥岩高值特征,整体表现为箱形;电阻率呈低幅平直状和微齿状。

2.2 构型界面层次划分及成因分析

Miall *et al.*^[10-12]认为地层是由连续沉积单元和沉积间隔的界面组成,连续的沉积单元即构型单元,沉积间断界面即构型界面,而构型界面与隔夹层是对应的,因此隔夹层类型也具有层次性。参照 Miall 提出的河流相储集层构型界面分级,并参考前人关于滨岸相储层构型分类方案研究成果^[13-14],综合考虑研究区实际情况,结合岩心、测井、高分辨率三维地震、生产动态及化验分析等资料,采用“模式指导、级次划分、成因分析”的方法,将目的层构型界面按正序由大到小从7级划分至3级构型界面(表1、图3)。

(1) 7级构型界面为滨岸相复合砂体之间的界面,是受区域海平面抬升导致水体加深、可容空间增大而沉积的海泛泥岩,同时代表该沉积时期构造运

动、气候或物源供给发生了变化,与研究区 ZJ_2 I 油组间界面相对应。该界面处泥岩厚度在 20 m 以上,分布广泛且稳定,对流体运动具有阻隔作用。测井曲线表现为泥岩特征,自然伽马高值,基本在 140 API 之上;声波时差高值,平均为 105 $\mu\text{s}/\text{ft}$;中子高值,平均为 32%;电阻率低值,平均为 2.1 $\Omega\cdot\text{m}$;密度低值,平均为 2.2 g/cm^3 ,泥质含量一般大于 30%,地震剖面上为连续强反射特征。

(2) 6级界面为临滨、前滨等亚相之间的界面,为水动力条件周期性变化形成的一级洪泛泥岩,分布较为连片,对应于 ZJ_2 I 油组内部三个砂层组之间的隔夹层,厚度为 10~28 m,平均为 13.5 m。测井曲线表现为泥岩特征,自然伽马高值,基本在 105 API 之上,声波时差高值,中子高值,电阻率低值,密度低值,该界面地震反射为中—强振幅、中等连续波谷反射。

表1 研究区滨岸相砂体层次结构划分及研究方法

Table 1 Classification and research methods of littoral-facies hierarchy in the study area

| 界面级次 | 界面类型 | 构型单元 | 成因解释 |
|------|-----------|-------|---|
| 7级 | 区域海泛面 | 滨岸相 | 区域海平面的上升,可容空间增大沉积的海泛泥岩 |
| 6级 | 一级洪泛泥岩 | 临滨、前滨 | 海平面上升,临滨环境过渡为滨外环境沉积的滨外泥 |
| 5级 | 二级洪泛泥岩 | 复合砂坝 | 中期水动力条件的差异变化,生物沉积成岩共同作用形成、沉积成因 |
| 4级 | 单一砂坝之间夹层 | 单一砂坝 | 短期水动力条件变化,坝间水动力弱区、坝顶滞留沉积、坝向岸方向静水细粒沉积 |
| 3级 | 单一砂坝内部覆盖泥 | 增生体 | 一期短时间内水动力变化,单一砂坝内部增生体之间的细粒沉积,涨潮、落潮形成细粒沉积物 |

(3) 5级界面为复合砂坝之间的界面,与小层间的界面相对应。研究区存在两种成因的界面:一种是由于中期水动力条件变化形成的二级洪泛泥岩,厚度约 7 m;另一种是由于水体的突然变化导致大量生物死亡,后期在沉积成岩共同作用下形成的钙质隔夹层,钙质层分布与沉积旋回的终点对应性较好(对应于 ZJ_2 I -1-1、 ZJ_2 I -1-2 小层顶部),岩性以生物碎屑灰岩为主,部分含钙质砂岩,颜色呈浅灰色、灰白色,其岩性致密、渗透性差、导电性差,对流体阻隔作用较强。由于受地震分辨率限制,该级次的构型界面在地震剖面上无法识别,可依据测井曲线旋回变化进行识别划分,钙质隔夹层测井响应特征为低自然伽马,平均为 51 API;声波时差曲线较低,平均为 69 $\mu\text{s}/\text{ft}$;中子曲线平均为 9%;密度曲线平均为 2.53 g/cm^3 ;电阻率曲线平均约 14 $\Omega\cdot\text{m}$,远高于其他岩性。

(4) 4级界面为单一砂坝之间的夹层,为受短期水动力条件的控制,在坝间水动力弱区沉积、坝顶滞

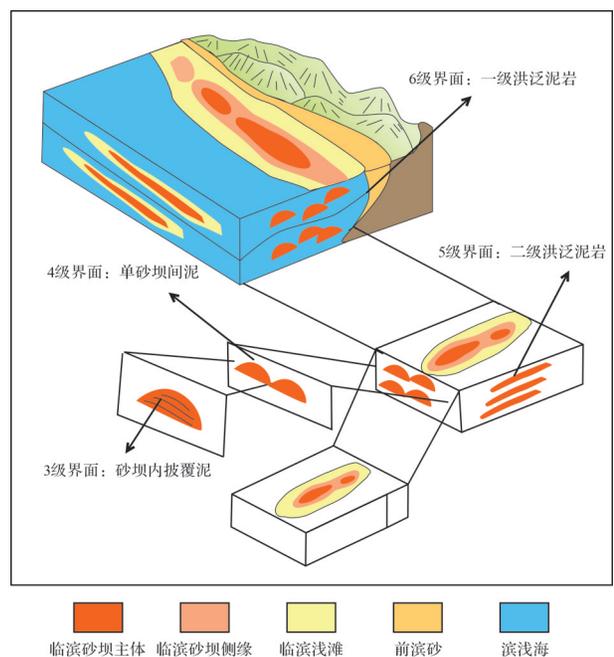


图3 研究区 ZJ_2 I 油组构型模式

Fig.3 Configuration pattern of oil group ZJ_2 I in the study area

留沉积、坝向岸方向静水环境下沉积的细粒物质,岩性以泥质粉砂岩、粉砂质泥岩为主。通过调研滨岸相露头及现代沉积模式,结合岩心资料,认为坝砂内部夹层延伸规模几百到几千米,厚度3 m以下;滩砂内部夹层延伸规模几百到一千多米,厚度2 m以下。该级次构型界面岩心上表现为颗粒细的砂泥过渡段,单井测井曲线上表现为泥岩夹层特征。

(5) 3级界面指的是单一砂坝内部由于受涨潮、落潮等影响在不同增生体之间沉积的披覆泥,是一种静水环境下的细粒沉积,常表现为物性差的低渗条带,岩性以泥质粉砂岩为主,厚度在几厘米到几十厘米之间。厚度在二十厘米以上夹层可依据单井测井曲线回返变化识别,二十厘米以下夹层则主要依据沉积模式指导及岩心观察进行识别划分。

3 构型界面识别及定量表征

3.1 单砂坝之间4级界面识别及定量表征

3.1.1 4级界面识别

1) 基于定向井信息的垂向界面识别

当垂向上不同期次储层构型单元相互叠置时,在不同期次滨岸砂坝之间往往发育泥质隔夹层及物

性突变面等。具体识别标志体现在两方面,一是每期滨岸砂坝沉积结束时由于水动力强度变弱往往导致漫流细粒物质发生沉积,其岩性细、泥质含量高,表现为夹层特点,例如本区内A3、A6、A7井垂向上两期砂坝之间的泥质夹层(图4a);二是由于水下分流河道的不断迁移摆动,造成后期砂体对前一期砂体切割后细粒物质被破坏,但残留了物性差的砂岩过渡段,例如研究区内A1、A2、A4井垂向上两期砂坝之间的曲线回转界面即代表了两期砂体的分界面(图4b)。根据以上两种识别标志可将垂向上不同期次单砂体进行有效区分。

2) 基于水平井信息的侧向界面识别

同一时期但不同储层构型单元侧向拼接,是指在同一地质时期内,可能存在多个砂坝,或者单一砂坝发生侧向迁移,导致侧向上不同构型单元相互叠置拼接。本次依据水平井钻遇岩性情况确定侧向隔夹层的分布。例如,水平井A1h井在水平段斜深2 433~2 510 m处钻遇岩性由灰褐色富含油粉砂岩变为深灰色泥岩,即预测在该深度段内钻遇了滩砂相和临滨泥的过渡界面。再结合砂体发育厚度、微相平面分布规律以及调研野外露头及现代沉积模式,由此综合确定储层构型单元的侧向界面(图5),据此可将侧向上同

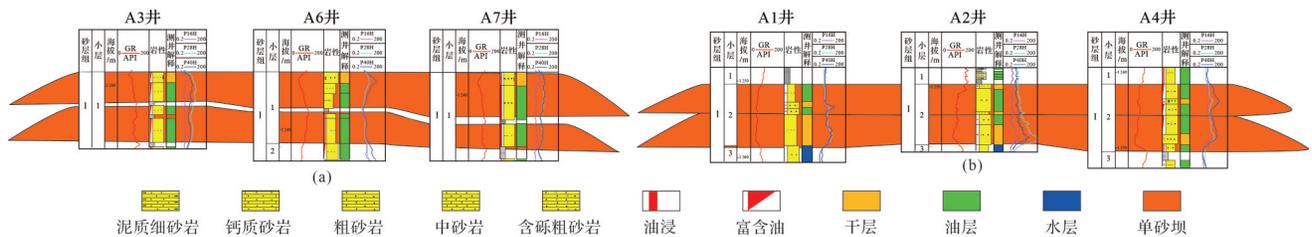


图4 研究区单砂坝之间垂向构型界面样式

(a)单砂坝间发育夹层;(b)单砂坝间曲线回转

Fig.4 Vertical configuration between single sands in the study area

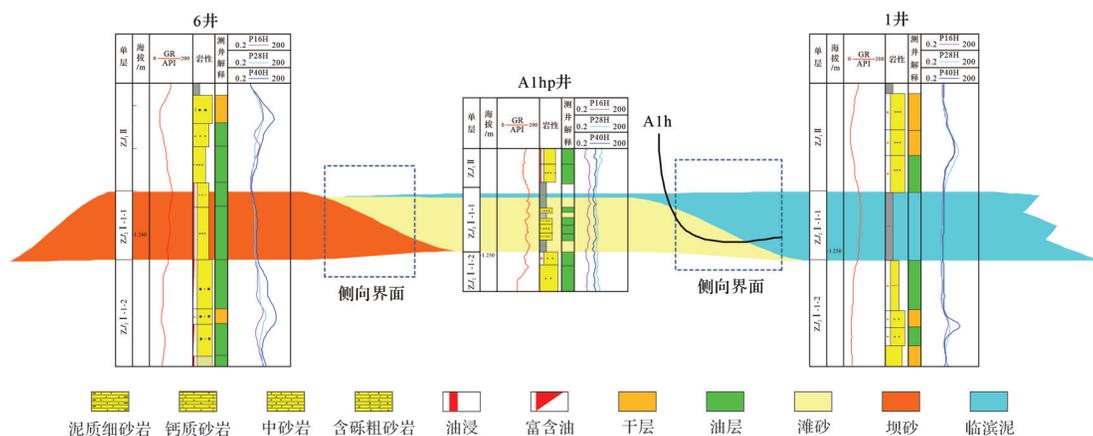


图5 研究区单砂坝之间横向构型界面样式

Fig.5 Horizontal configuration between single sands in the study area

期次但不同单砂体间界面进行有效划分。

3.1.2 4级界面定量表征

通过调研国内外滨岸相砂坝发育特征^[15-16],并结合岩心观察及测井响应特征,认为研究区隔夹层分布受滩坝砂体展布控制,坝砂内部夹层横向规模300~1 500 m,延伸规模800~3 000 m,厚度介于0.5~3.2 m,局部可达8 m;滩砂内部夹层横向规模300~1 000 m,延伸规模500~1 500 m,厚度介于0.5~1.2 m。依据对滩坝砂体展布规模的认识,借助三维地质建模软件,开展对4级单砂体间界面的空间展布预测,结果表明单砂体间泥质夹层分布较稳定,但局部因砂体切割叠置,夹层不发育,夹层不发育区主要集中在A8井西南部、1d井区南部以及A5与A6井之间区域,面积均小于1.26 km²。

3.2 单砂坝内部3级界面识别及定量表征

单砂体内3级界面在岩心上表现为泥质纹层或灰质纹层等细粒沉积,呈平行状或斜交状,测井曲线表现与泥质夹层或钙质夹层特征相似,但曲线回返幅度较4级夹层低。

3级夹层属于单砂体内部增生体之间夹层,其成因决定了该类型夹层分布不稳定,空间上呈零星或块状分布,在个别小层以点状分布。依据岩心、测井、钻井等资料识别20 cm以上厚度的隔夹层,依据岩心观察及沉积模式指导对20 cm以下厚度的夹层进行识别,从而得出研究区3级夹层发育特征(表

表2 研究区3级夹层分布特征参数统计表

Table 2 Distribution characteristics of the level 3 inter-layer in the study area

| 夹层样式 | 平行状夹层 | 斜交状夹层 |
|------|-----------|-----------|
| 规模/m | 200~800 | 100~600 |
| 倾角 | 0.3°~0.6° | 0.4°~1.2° |

2),其中3级夹层规模100~800 m,倾角为0.3°~1.2°。

4 临滨砂坝内部构型界面及对剩余油的控制作用

油藏进入开发后期,剩余油分布往往受多种因素控制,研究区滨岸相储层由于内部隔夹层发育且对剩余油控制作用最为明显,因此结合油田实际情况,本文主要针对储层构型界面(即“隔夹层”)及其对剩余油分布的控制作用开展研究。不同级次的隔夹层的分布范围、厚度及物性存在差异,对油水运动的遮挡效果不同,导致水淹位置及程度不同。通过上述分析,可知研究区发育从7级到3级不同级次的隔夹层,其中对开发后期生产影响比较大的是小层内部的5级及3级隔夹层的分布,下面分别对这两种级别的隔夹层进行阐述。

4.1 构型界面分布样式

通过岩心观察、调研国内外实例并结合本区实际,将研究区单砂体之间及内部夹层样式分为水平状、斜交状两种样式(图6)。

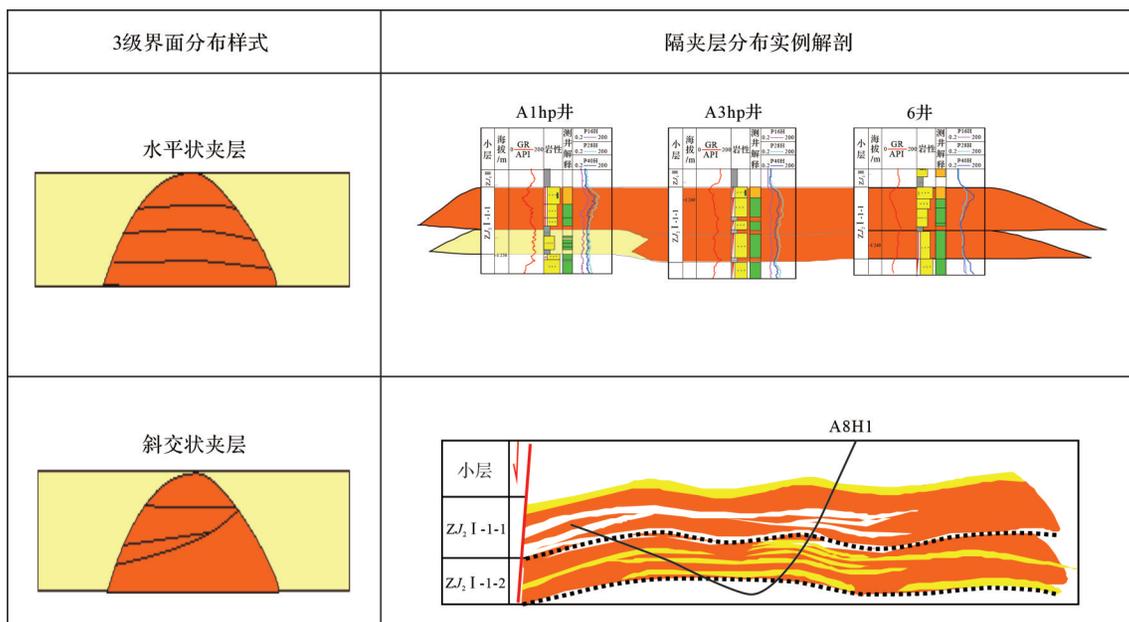


图6 研究区构型界面分布样式及实例

Fig.6 Study area configuration and distribution and examples

1) 平行状隔夹层

多套隔夹层近似平行分布,主要发育在砂坝或沙滩中部区域,对应储层构型界面中的7级到3级均有发育。一般属于沉积成因,岩性为泥岩或粉砂质泥岩,往往属于水动力相对较弱的砂坝顶部或增生体之间的静水期沉积物,该类隔夹层延伸距离相对较远,长度约几十米到几百米,在研究区沿北东—南西向呈带状分布,厚度自南向北逐渐减薄。

2) 斜交状隔夹层

多套隔夹层之间相互斜交呈楔状,常见于与岸线相交方向,隔夹层延伸距离可达数百米。通过本区岩心及化验分析资料可知,该类隔夹层在本区发育有两种成因,一类是发育于水动力相对较强的临滨砂坝侧缘处,以钙质砂岩为主,对流体的阻隔作用较强;另一种属于沉积成因,发育于砂坝边部向沙滩过渡区域,是水动力变弱时沉积的细粒物质。由于隔夹层之间相互斜交、共同作用,加剧了储层非均质性,因此斜交状隔夹层对流体的阻隔作用相对更强。

4.2 构型界面对剩余油分布的控制作用

基于上述隔夹层展布认识建立三维地质模型,并开展了油藏数值模拟,进而建立了研究区两种剩余油分布模式,一种是受水平状夹层遮挡在其下部形成的屋脊式剩余油,另一种是受斜交状夹层遮挡形成的夹角式剩余油。

4.2.1 屋脊式剩余油

水平状隔夹层对底水锥进有明显的抑制作用,在其下方往往存在较多剩余油。这是由于研究区内纵向储层物性较接近中—高孔、中—高渗储层,在底水向上驱替过程中,若遇到上部具有低渗透性或不渗透性的隔夹层阻挡,将在隔夹层下方发生平面运移,导致隔夹层下部石油难以向上驱替而剩余油聚集。水平状隔夹层的厚度及延伸范围决定了它对流

体的阻隔能力,其中研究区内4~5级隔夹层厚度大、延伸范围广,其下部剩余油较富集,而3级隔夹层因分布范围有限阻隔作用相对较弱,其下部水淹程度相对较高。研究表明,在ZJ₂ I -1小层中下部存在受5级水平界面遮挡的剩余油(图7a),据此实施加密调整井A3H1井进行挖潜,实施后该井实钻水淹层情况(图7b)与钻前预测基本一致,证实了水平状隔夹层下部剩余油富集的认识。在周边生产井处于特高含水、低产低效的情况下,该井投产初期含水率降低13.4%,累产油13.14×10⁴ m³,效果远超预期。

4.2.2 夹角式剩余油

斜交式隔夹层展布有一定倾斜度,多条发育则可相交成一定夹角,从而对流体驱替起到一定的抑制作用。底水向上驱替时,若遇到上部或侧面的具有低渗透性或不渗透性的隔夹层阻挡,在隔夹层夹角处由于无法被驱替而剩余油富集,或在倾斜隔夹层下部由于底水发生了平面运移,导致剩余油聚集。其中隔夹层厚度及范围越大,并且相交程度越高,其对水体的遮挡效果也会更加有效。研究发现,在研究区南部ZJ₂ I -1小层内部多条3~4级斜交式夹层发育处剩余油富集(图8a),通过部署实施A8H1井证实该处水淹情况(图8b)与钻前预测剩余油结果基本一致。可见,虽然斜交状夹层厚度相对较薄,但因其发育复杂,且有多条夹层共同作用,其对剩余油阻隔效果仍然较为明显。

4.3 基于界面表征的剩余油挖潜策略

文昌A油田自进入高含水阶段以后历经两轮加密调整,第一轮实施的是“水上找油,顶部挖潜”策略,共实施5口水平井,但由于生产井水平段位于夹层上部,下部受隔夹层遮挡的剩余油无法动用,动用范围局限导致油井产能低,产液量低于300 m³/d。通过开展上述研究,基于隔夹层及剩余油分布新认识,该油

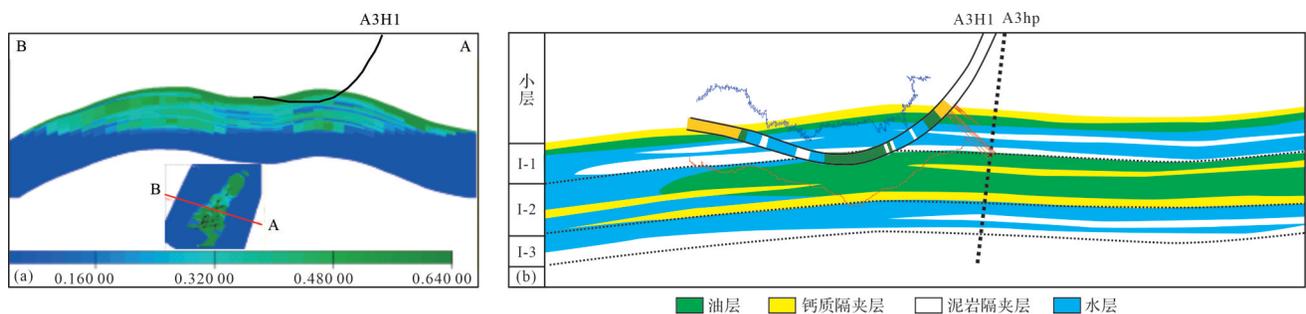


图7 研究区屋脊式剩余油分布实例
(a)剩余油饱和度图(数值模拟结果);(b)钻后模式

Fig.7 Example of roof type remaining oil distribution in the study area

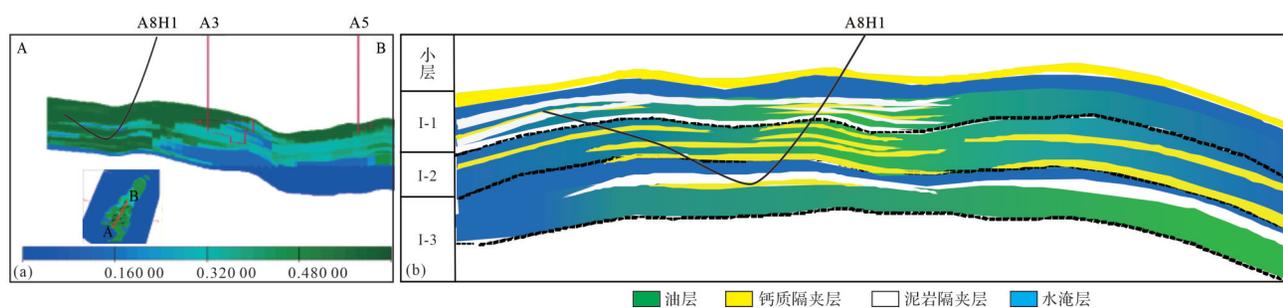


图8 研究区夹角式剩余油分布实例

(a)剩余油饱和度图(数值模拟结果);(b)钻后模式

Fig.8 Example of angled remaining oil distribution in the study area

田转变了挖潜策略,依据“夹缝找油、内部挖潜”策略实施了第二轮加密调整,实施2口水平井,投产后产液量大幅提升,高达800 m³/d,累产油39.6×10⁴ m³,大幅提高了单井产能及“双高”油田开发效果。

5 结论

(1)文昌A油田Z₂I油组的研究成果应用表明,当油田进入开发中后期,在砂体内部开展储层构型解剖及构型界面成因级次研究能有效刻画复杂薄夹层的分布,进而指导复杂油气田“双高”阶段剩余油分布预测以及油田开发策略的调整。

(2) A油田Z₂I油组滨岸相发育临滨砂坝主体、临滨砂坝侧缘、临滨浅滩、滨海泥四种储层构型单元。构型界面按正序由大到小从7级划分至3级,其中,7级构型界面为滨岸相复合砂体之间的隔夹层,6级界面为临滨与前滨等亚相之间的隔夹层,5级界面为复合砂坝之间的隔夹层,4级界面为单一砂坝之间的夹层,3级界面指的单一砂坝内部增生体之间夹层。对剩余油分布具有明显控制作用的构型界面有2套,分别对应4级界面和3级界面。

(3) Z₂I油组小层内部构型界面分布样式分水平状和斜交式两种,剩余油分布模式分为受平行状夹层遮挡的“屋脊油”、受斜交状夹层遮挡的“夹角油”两种类型。依据剩余油分布新认识,指导后续油田调整挖潜思路由“水上找油,顶部挖潜”转变为“夹缝找油、内部挖潜”,大幅提高了水平井单井产能,实现了高含水期复杂储层内部精准挖潜。

参考文献(References)

[1] 林承焰,程盼,任丽华,等. 奥里诺科重油带MPE-3区块Oficina组辫状河三角洲沉积相定量刻画[J]. 沉积学报,2019,37(3):

610-622. [Lin Chengyan, Cheng Pan, Ren Lihua, et al. Quantitative description of the braided river delta sedimentary facies of the Oficina Formation in MPE-3 block of the orinoco heavy oil belt [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(3): 610-622.]

[2] 于兴河. 油田开发中后期储层面临的问题与基于沉积成因的地质表征方法[J]. 地学前缘,2012,19(2):1-14. [Yu Xinghe. Existing problems and sedimentogenesis-based methods of reservoir characterization during the middle and later periods of oilfield development[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 1-14.]

[3] 张宪国,吴啸啸,黄德榕,等. 极限学习机驱动的地震多属性融合识别曲流带单一点坝[J]. 石油地球物理勘探,2021,56(6):1340-1350. [Zhang Xianguo, Wu Xiaoxiao, Huang Derong, et al. Single point bar interpretation in meandering belt with extreme learning machine driven multiple seismic attributes fusion[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(6): 1340-1350.]

[4] 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):26-30. [Cui Jian, Li Haidong, Feng Jiansong, et al. Barrier-beds and inter-beds 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): 26-30.]

[5] 吴胜和,岳大力,刘建民,等. 地下古河道储层构型的层次建模研究[J]. 中国科学:地球科学,2008,38(增刊1):111-121. [Wu Shenghe, Yue Dali, Liu Jianmin, et al. Hierarchy modeling of subsurface palaeochannel reservoir architecture[J]. Science China Earth Sciences, 2008, 38(Suppl. 1): 111-121.]

[6] 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.]

[7] 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.]

[8] 曾祥平. 储集层构型研究在油田精细开发中的应用[J]. 石油勘

- 探与开发, 2010, 37(4): 483-489. [Zeng Xiangping. Application of reservoir structure research in the fine exploitation of oilfields [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(4): 483-489.]
- [9] 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): 49-51. [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): 49-51.]
- [10] Miall A D. Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits[J]. *Earth-Science Reviews*, 1985, 22(4): 261-308.
- [11] Miall A D. The geology of fluvial deposits[M]. Heidelberg: Springer, 1996: 1-178.
- [12] Miall 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.
- [13] 薛永超, 程林松. 滨岸相底水砂岩油藏开发后期剩余油分布及主控因素分析: 以NH25油藏为例[J]. *油气地质与采收率*, 2010, 17(6): 78-81. [Xue Yongchao, Cheng Linsong. Study on main factors controlling remaining oil distribution in shore sandstone-bottom water reservoirs of mature stage-case study of NH25 reservoir[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2010, 17(6): 78-81.]
- [14] 商晓飞, 郭颖, 侯加根, 等. 湖泊滨岸砂坝内部结构特征剖析及其地质意义: 以峡山湖现代砂坝沉积为例[J]. *沉积学报*, 2018, 36(5): 877-889. [Shang Xiaofei, Guo Ying, Hou Jiagen, et al. Anatomy of architecture characteristics in lacustrine sand banks and its geological implications: A case study of modern sand banks in Xiashan lake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(5): 877-889.]
- [15] 龙明, 徐怀民, 江同文, 等. 滨岸相碎屑岩储集层构型动态评价[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(6): 754-763. [Long Ming, Xu Huaimin, Jiang Tongwen, et al. Performance evaluation for littoral-facies clastic reservoir architecture[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6): 754-763.]
- [16] Clark J D, Kevin T. Pickering architectural elements and growth patterns of submarine channels: Application to hydrocarbon exploration[J]. *AAPG Bulletin* 1996, 80(2): 194-221.

Architecture Interface Characterization of Littoral Facies Reservoir and the Remaining Oil Distribution: A case study from the Wenchang A oilfield in the Pearl River Mouth Basin

SHANG JianXia¹, ZHANG QiaoLiang², YE Qing¹, LIU PengChao¹, CHAO CaiXia²

1. Hainan Branch, China National Offshore Oil Corporation, Haikou 570100, China

2. Zhanjiang Branch, China National Offshore Oil Corporation, Zhanjiang, Guangdong 524057, China

Abstract: [Objective] The second section and one oil formation of the Zhujiang Formation in Wenchang A oilfield belong to the littoral facies sand body. Owing to the frequent turbulence and changes of the water body during the sedimentary period, internal layers and calcareous inter-layers developed. At the ultra-high water-cut stage, the remaining oil distribution is complex because of the influence of the inter-layer, and it is urgent to determine the inter-layer distribution to clarify the subsequent digging direction. However, the thickness of the inter-layer is below 2 m, making it difficult to predict. [Methods] Based on the type and origin of the inter-layers and according to the guidance of reservoir architecture theory, the "graded division, genesis analysis, interface identification and quantitative characterization" method was used to identify and characterize the inter-layers and remaining oil resolution. [Results] The 7-3 architecture interface inside the sand body was characterized, and the remaining oil distribution pattern can be divided into two types: "roof type oil" controlled by parallel inter-layers and "angle oil" controlled by crossed inter-layers. The development target is adjusted to the remaining oil enrichment area controlled by the inter-layers, and a strategy is proposed for the first time from "oil digging at the top above water-layers" to "oil digging in the gap". [Conclusions] The daily oil output can be increased to 127 square meters per day, and the cumulative oil increase is 65 700 cubic meters. This study is important for the remaining oil tapping and oil recovery enhancement at the high-water-cut stage.

Key words: Wenchang A oilfield; littoral facies; architecture interface; inter-layer; remaining oil