文章编号:1673-5005(2019)03-0013-12

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2019.03.002

曲流河点坝储层构型表征与剩余油分布模式

王 珏,高兴军,周新茂

(中国石油勘探开发研究院,北京100083)

摘要:研究区为大港油田港东一区明化镇组曲流河沉积,利用区内丰富的岩心、测井等资料,通过单井识别、井间对 比等方法,对研究区曲流河沉积储层构型进行三维构型精细解剖。结果表明:曲流河点坝内呈剖面楔状、平面新月 状、由下至上物性变差的侧积砂体,侧积模式包括侧向加积及顺流加积并影响点坝内砂体的分布;侧积泥岩夹层呈 叠瓦状斜列构成点坝"半连通体";整个复合河道内部在平面上受废弃河道的遮挡或半遮挡,呈现弱连通—不连通; 点坝内部的剩余油集中在油层顶部及侧积层上部,受侧积层影响很大,同时还受到点坝侧积模式的影响。

关键词:曲流河;构型模式;地质知识库;侧积泥岩夹层;剩余油;大港油田

中图分类号:TE 122.2 文献标志码:A

引用格式:王珏,高兴军,周新茂.曲流河点坝储层构型表征与剩余油分布模式[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(3):13-24.

WANG Jue, GAO Xingjun, ZHOU Xinmao. Reservoir achitecture characterization and remaining oil distribution of meandering river[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2019, 43(3):13-24.

Reservoir achitecture characterization and remaining oil distribution of meandering river

WANG Jue, GAO Xingjun, ZHOU Xinmao

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

Abstract: Our study area is the meandering river deposited in the Mighuazhen formation of the Dagang oilfiled. Based on core and logging data, the 3-D reservoir architecture delineation was conducted by identifying architecture elements and boundaries in single wells and among multiple wells. The results show that the point bar shows a fining-upward sequence including 2 scenarios for deposition: migrating laterally or in the downstream direction. The HIS package is obliquely oriented to the abandoned channel, composing a semi-connected sandbody. After abandonment, the abandoned channel is either isolated from or connected with the active channel, leading to two spatial distribution of meandering river sandbodies. The remaining oil of the point bar is basically concentrated in the upper part of the point bar, especially on the top of the IHS package. The point bar deposition mode also affects the remaining oil distribution.

Keywords: meandering river; reservoir architecture; geological database; lateral accretion mudstone; remaining oil; Dagang Oilfield

河流砂体储层占中国东部中新生代陆相含油气 盆地中已开发油田储量的40%以上^[1],其中曲流河 砂体储层是河流储层的主要类型之一。鉴于东部老 油田已进入高含水开发阶段,挖潜难度日益增大,简 单的沉积相刻画已经不能满足生产的需求,亟需对 储层进行精细构型解剖,分析剩余油分布规律,寻找 挖潜方向。而点坝砂体作为曲流河沉积中的主要储 集体^[24],其内部构型研究受到了国内外学者的重 视^[5-7],并取得丰硕的理论研究成果^[8-11]。但对于相 关油田的构型精细解剖还不完善,因此笔者以大港 油田港东一区明化镇组曲流河沉积为研究对象,依 据该油田岩心、测井等丰富的动静态资料,对曲流河

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05010-001)

作者简介:王珏(1988-),女,工程师,硕士,研究方向为石油开发地质。E-mail: wangjuel116@ petrochina. com. cn。

储层构型表征进行研究。

1 研究区概况

研究区构造上位于黄骅坳陷中区北大港二级断 裂构造带的东南部,是北大港油田的主要开发区之 一(图1)。研究区面积约为32.1 km²,构造复杂,整 体上是一个受断东主断层控制的穹窿状逆牵引背斜 构造。以构造轴部的马棚口断层和一号断层所形成 的横穿整个构造的地堑陷落为界,整个背斜分为南 北两翼,构造差异较大。南翼构造简单,幅度小,地 层倾角为1°~3°,为较完整的向南倾没的单斜构 造;北翼由于逆牵引作用构造复杂,地层倾角为5° ~7°,呈地堑地垒相间的构造格架。研究层位明化 镇组明 II — IV 砂层组为曲流河沉积,物源区为位于 盆地北部的沧县隆起、燕山褶皱带以及南部的埕宁 隆起带。该沉积时期沉降范围扩大,沧县、埕宁隆起 的大部分被批覆,物源区后移,使得冲积平原扩展, 以发育曲流河沉积为主^[2]。



图 1 港东油田构造位置 Fig. 1 Structural location of Gangdong oilfield

自1965年钻探,到目前经历了40余年的勘探 开发,累积各类钻井总数为541口,采出程度为 30%,综合含水率为95%,已进入到特高含水开发 后期。要想继续稳产,认识剩余油的分布规律,则需 要进行储层构型的精细解剖,挖掘老油田的开发潜力。

2 沉积相标志

2.1 岩性与岩矿特征

港东一区明化镇组整体上由泥岩和砂岩互层构成,泥岩颜色主要呈紫红、棕红、浅棕红及杂色,且见有大量的钙质结核和铁质结核;砂岩岩性主要为细粒岩屑长石砂岩、含泥细粒岩屑质长石砂岩,伴有泥质团块和泥砾,这些均反映了水上浅水氧化—弱氧化的沉积环境。岩石矿物成分主要由长石和石英组成。其中石英平均含量为42.12%,一般介于33%~50%;长石平均含量为46.32%,一般介于36%~50%,主要为正长石和斜长石;岩屑平均含量为11.56%,一般介于10%~13%,岩屑以酸性火成岩为主,反映其母岩为酸性岩浆岩。胶结物多为泥质和钙质,泥质含量略高于钙质,有极少量的白云质和黄铁矿,胶结类型多为孔隙型及接触-孔隙型。矿物成分成熟度中等,磨圆以次圆—次尖为主,表明物源相对较近,为河流相沉积。

2.2 粒度特征

粒度概率曲线主要以两段式和三段式为主,总体上悬浮总体含量占 20% ~ 30%,跳跃总体含量约占 70%,滚动组分偶有发育。粒度中值一般为 0.08 ~ 0.29 mm,分选系数一般为 1.08 ~ 3.81,分选较好。反映了牵引流的搬运机制。

2.3 岩石相类型

研究区发育块状构造含砾中粗砂岩相、平行层理 中粗砂岩相、槽状交错层理砂岩相、斜层理砂泥岩相、 波状层理粉砂岩相及生物扰动泥岩相6种岩相类型。

(1)块状构造含砾中粗砂岩相。以灰色含砾中 粗砂岩为主,内部不显示层理,主要发育于点坝底部 (图2(a)),与上部岩石相多呈突变接触。在研究 区常见砾石呈叠瓦状定向排列,未见古生物化石和 植物碎屑。这类岩相反映了牵引流的水动力机制。 当水流以接近最大流速侵蚀凹岸和河床时,随着流 速的降低,所携带的粗颗粒最先沉积于冲刷面上,构 成底部滞留沉积^[4]。侵蚀作用越强,这类岩相沉积 的厚度越厚。由于该岩相形成于强水动力环境下, 古生物化石和植物碎屑均难以留存。

(2)平行层理中粗砂岩相。以灰色粗碎屑物质 为主,主要发育于点坝底部,与下部块状构造含砾中 粗砂岩多呈突变接触。这类岩相反映了高流态的水 动力环境,水流开始偏向凸岸变浅,流速有所降低但 仍很大,使得跳跃组分中的粗组分沉积,并产生平底 底形^[4],形成平行层理。 (3) 槽状交错层理砂岩相。这类岩相大量发育 于点坝的下部和中部(图2(b)), 与下部岩石相多 呈突变接触, 与上部岩石相多呈渐变接触。砂岩粒 度从中砂到细砂不等, 交错层理的规模从大型到小 型不等, 未见古生物化石。这类岩石相形成于单向 流水动力环境下。由于水流进一步偏向凸岸变浅, 流速降低, 致使跳跃组分中的中细组分依次沉积, 并 产生沙丘相的沙丘底形, 随着沙丘的移动形成槽状 交错层理^[4]。由下至上, 流速逐渐降低, 槽状交错 层理的规模也逐渐变小。

(4)斜层理砂泥岩相。这类岩相主要由灰色细砂岩、粉砂岩及深灰色粉砂质泥岩交互发育构成,多发育于点坝中部或普遍发育于点坝之中(图2
(c)),与下部岩石相多呈渐变接触。由下向上粉砂质的比例逐渐增加,内部发育低—高角度的交错层

理。这类岩相形成于点坝侧积过程,水流变化较大的环境中。其中砂岩代表中—高能水动力环境下的 沉积,粉砂岩或泥岩代表低能水动力环境下的沉积, 形成侧积泥岩夹层。

(5)波状层理粉砂岩相。这类岩相多发育于点 坝上部,与下部岩石相多呈渐变接触。这类岩相形 成于低水动力环境下,水流已较浅,流速较低,跳跃 负载中的细组分开始沉积,产生波纹或平底底形 (图2(d)),形成小型波状层理或水平纹层^[4]。

(6)生物扰动泥岩相。这类岩相多发育于河漫 滩和废弃河道上部,厚度变化较大,泥岩多呈紫红、 棕红等氧化色。这类岩相形成于静止的水环境下, 悬浮的泥质发生淤积,而内部偶有发育的砂岩夹层 是短期风暴的产物。







(d)波状层理,G225井, 2038.67 m

Fig. 2 Core photos of typical sedimentary structure of meandering river

3 曲流河储层构型分析

3.1 野外露头指导模式

对曲流河点坝内部构型沉积模式的研究一直备 受业界的关注,前人基于古代露头和现代沉积对其 进行了不同程度的探索,并取得诸多认识。在此方 面,薛培华^[12]通过对河北省拒马河现代沉积的研 究,提出了曲流河点坝"侧积体、侧积层、侧积面"三 要素及"点坝侧积体沉积迭式"的概念,由此认识到 点坝砂体是一种半连通式的储集体;尹燕义等^[6]通 过对饮马河大榆树林点坝的解剖,将侧积体划分为 涨冲落淤、涨淤落冲和涨淤落淤 3 种主要类型;马世 忠等^[4]通过对曲流点坝形成过程、洪水事件的水动 力条件及冲淤机制分析,结合大庆长垣曲流点坝垂 向层序、岩石类型等,建立了单一侧积体横向与垂向 沉积模式和点坝侧积体沉积迭式,建立了点坝三维 构型;并且通过对鄂尔多斯盆地白芨沟地区曲流河 古代露头的研究发现,曲流河内部呈"侧积"构型模 式, 侧积体在剖面呈上缓中陡下缓的凹面, 平面呈新 月形(图3)。同时国外学者也对此开展过一系列的 研究, 其中有代表性的是对加拿大阿尔伯塔地区 McMurray 地层曲流河沉积的精细解剖^[13], 提出了 顺流加积的侧积模式。



图 3 鄂尔多斯盆地白芨沟地区曲流河侧积 泥岩夹层产状及规模

Fig. 3 Dip and scale of lateral accretion muddy intercalation in Ordos Basin

3.2 曲流河储层构型解剖

3.2.1 曲流河砂体构型级次划分

Miall^[14]提出了河流相储层的6级划分方案.笔 者参考 Miall 的河流相构型级次划分原则,将研究区 曲流河沉积的构型界面划分为以下6个级次-1级 界面为交错层系界面,该面无明显侵蚀作用:2级界 面为交错层系组界面,反映了水流条件或方向的变 化.但无明显时间间断:3级界面为成因体内部的冲 刷面或沉积间断面,主要表现为河道内部小型洪水 期形成的填充体底部小型冲刷面[4]和大洪水事件 中的次洪峰沉积或不同水动力阶段沉积形成的界 面^[4].如侧积体内部不同加积体的界面.若为泥质 沉积层,则与4级界面相似,只是规模较小:4级界 面为成因体的顶底界面,是大洪水期形成的明显底 部冲刷面,对于曲流河主要表现为规模为几到几十 厘米的侧积泥岩或点坝与河道的接触界面:5级界 面为单期河道充填复合体的大型砂席或砂体界面. 以河道充填复合体底部滞留沉积及冲刷面为代表:6 级界面为单层界面,是一套连续性较好,分布广泛的 非渗透界面,以泛滥平原泥岩为代表,内部由若干同 时期沉积的单期河道构成。本次研究对曲流河各级 次界面进行了精细划分,重点揭示点坝内部4级构 型界面。

3.2.2 单井构型界面识别

(1)夹层成因分类。曲流河储层沉积中发育的 夹层主要分为两种:①大洪水期间能量的波动,使得 悬浮物质沉积,形成河道内部或侧积体内部规模小、 厚度薄、连续性差的夹层,但由于能量波动变化幅度 小,不会造成剥蚀充填的现象,所以保存较为完整; ②在一期洪水事件中,曲流河的蚀凹增凸作用形成 在凸岸堆积的侧积体,在后落洪期,由于河水降至低 处,细粒沉积物从悬浮状态沉积于始、中落洪期的砂 质沉积之上,形成批覆于侧积体上的侧积泥岩夹 层^[4],由于后期的洪水的冲刷作用,先期沉积在点 坝侧积体下部的泥质披覆往往受到不同程度的破 坏,仅保留上部泥质沉积,形成点坝特有的"半连通 体"模式。其中第一种夹层在测井曲线上表现为明 显的回返,本次研究重点讨论第二种夹层,即侧积泥 岩夹层的单井识别方法。

(2) 侧积泥岩夹层单井识别。侧积泥岩夹层发

育在曲流河沉积点坝内不同侧积体的界面处,属于 Miall 分级方案中的4级界面。侧积泥岩夹层通常 发育泥岩或粉砂质泥岩等细粒沉积,厚度较薄,约为 0.2~1m。在研究过程中,笔者通过取心井进行岩 电标定(图4),侧积泥岩夹层表现为自然电位曲线 向泥岩基线偏移,自然伽马曲线呈现高值,电阻率曲 线有明显回返,微电位、微梯度曲线有明显回返,且 幅度差变小,回返程度与夹层厚度呈正相关,回返程 度通常为1/3~2/3。据此电性曲线特征,可以对非 取心井点坝内部的侧积泥岩夹层进行识别。

3.2.3 曲流河储层三维构型表征

参照前人的研究方法^[15-18],首先绘制单砂层砂 体等厚图,可以反映砂体空间分布的几何形态、展布 特征及物源方向等,由于点坝砂体是复合河道内部 厚度最大的,因此在砂体等厚图中可以通过识别透 镜状砂体,勾绘出点坝的轮廓;其次将各井的测井曲 线标注在平面图上,根据测井相与岩相、沉积相的对 应关系,综合物源、水系的分布、河道的走向等,确定 相带展布关系;最后用单井相及多方向连井剖面约 束、校正平面相。在井控程度高的区域可以绘制砂 体顶部至层界面之间的细粒沉积厚度图,由于废弃 河道顶部细粒沉积厚度较大,可以通过识别新月形 的厚度带判定废弃河道可能的分布位置,即点坝的 边界。

通过对研究区各单砂层的平面构型刻画,得出 平面上曲流带砂体呈现两大类展布形态,一类是窄 条带状的砂体组合(图5(a)),砂体发育较差,平面 上连续性较差,砂体间发育大面积河漫滩泥质沉积, 如单砂层 Nm3-6-1,研究区范围内发育5条近北-南流向的曲流河,第2条曲流砂体内部发育16个点 坝砂体,点坝形态呈长条带状,点坝之间发育末期河 道沉积,废弃河道较少发育;第二类是宽条带状的砂 体组合(图5(b)),砂体非常发育,连片分布,如单 砂层 Nm3-8-3,研究区范围内发育4条近北-南流 向的曲流河,左侧宽条带曲流河由14个点坝组合而 成,点坝面积不一,最大面积为1.24 km²,最小面积 为0.12 km²,河道截弯取直频繁,发育4段废弃河 道,与末期河道呈C型组合,点坝之间发育末期河 道及废弃河道。



图 4 G225 井 NmIV-4-2 单砂层点坝内部侧积泥岩识别

Fig. 4 Identification of lateral accretion mudstone in point bar of well G225







选择重点区域采用连井井间对比的方法对曲流 河储层尤其是点坝内部构型进行了确定性解剖。首 先通过测井相分析、砂体厚度差异等方法,识别出点 坝和废弃河道。并以河道及点坝顶部泥质沉积为标 志层,采用层顶拉平的方法沿顺水流和垂直水流的方 向建立连井剖面;其次根据废弃河道与点坝的配置关 系以及地层倾角测井、对子井、水平井等资料对侧积 泥岩夹层倾角的统计^[3],对侧积泥岩夹层和侧积体进 行组合对比,进而得到井间配置关系。在无井控制的 区域,参考邻井的侧积体规模及侧积泥岩夹层产状, 最终实现对曲流河储层整体内部构型的刻画。所选 取区域的点坝侧积方式为侧向加积,侧积体之间发育 呈斜插的泥质楔子状的侧积泥岩夹层,方向指向河道 迁移的一侧,每个侧积体的规模有所差异,受控于水 动力的强弱变化。沿顺水流方向,侧积泥岩夹层在剖 面上呈水平状展布(图6(a));而沿垂直水流方向,在 井上和井间共识别出10期侧积泥岩夹层,发育在点 坝的中上部,形成"半连通体"(图6(b))。



Fig. 6 Cross section of reservoir architecture and sedimentary facies of meandering river

3.2.4 曲流河储层构型沉积模式

利用井网密度高、测录井资料丰富的优势,对研究区曲流河砂体构型进行了精细解剖,并结合前人 从古代露头及现代沉积研究中所得出的结论,总结 出了适用于研究区的曲流河构型沉积模式,进而对 现有曲流河沉积模式进行补充和完善。整体上研究 区曲流河点坝内呈剖面楔状、平面新月状、由下至上 物性变差的侧积砂体,之间由叠瓦状斜列的侧积泥 岩夹层阻挡,致使上点坝不连通,而整个复合河道内 部在平面上受废弃河道的遮挡或半遮挡,呈现弱连 通一不连通。

(1)研究区发育的点坝内部多表现为涨冲落淤 正韵律侧积体垂向模式(图7)。随着水动力的减 缓,侧积体内部结构由下至上渐变,表现为底部冲刷 面—平行层理中粗砂岩—槽状交错层理砂岩—斜杂 岩性层理砂泥岩薄互层—波状层理粉砂岩—水平纹 层泥或块状泥—侧积面。当水动力骤减时,内部结 构有不同程度的缺失,表现为砂泥突变。

(2)研究区内废弃河道泥岩充填类型包括泥岩 完全充填和泥岩不完全充填2种类型^[19-20]。前者 常发育于突弃型废弃河道。一旦废弃,废弃河道与 主流河道呈隔绝状态,只接受洪漫水流携带的悬浮 泥质及粉砂质沉积,使废弃河道在平面上形成环状 岩性非渗透遮挡条带,点坝在平面上形成独立不连 通的坨状储集体(图 8(a))。后者常发育于渐弃型 废弃河道。废弃河道内部水体与主流河道水体一直 呈连通状态,主流河道的小部分水体流经废弃河道, 形成河道沉积物;由于主流河道水体底部的中粗粒 物质难以运移到废弃河道中,废弃河道沉积粒度比 周围点坝沉积粒度细,在平面上形成物性弱渗透 性—非渗透性遮挡条带,点坝在平面上形成条带状 弱连通—不连通储集体(图 8(b))。





图 8 不同废弃河道泥岩充填类型下的曲流河砂体厚度等值线

Fig. 8 Isopach maps of two scenarios for spatial distribution of meandering river sandstone bodies

(3)研究区内点坝侧积模式分为侧向加积和顺 流加积2种类型^[17]。侧向加积主要为点坝随着河流 弯曲度的增加而形成的,侧积体平行于古水流方向, 砂体厚度在河道最大弧度处最厚,向两侧逐渐减薄, 主体砂体的组成部分为点坝及废弃河道(图9(a)); 顺流加积形成于河道加积的过程受到遮蔽物阻碍的 沉积环境中。河道由于受到遮蔽物的遮挡(如相邻点 坝、废弃河道、牛轭湖等),顺下游方向平行迁移。形 成的侧积体平行于末期河道两翼,并垂直于古水流方 向,砂体厚度向远离河道轴部的方向逐渐增厚,并向 河道翼部两侧逐渐减薄。主体砂体的组成部分为点 坝、废弃河道及凹岸沉积。(图9(b))。





(b)顺流加积

图 9 不同侧积模式下的点坝砂体厚度等值线图及点坝轴方向的剖面示意图



3.3 曲流河地质知识库建立

3.3.1 侧积泥岩夹层倾角和规模的确定

侧积泥岩夹层与砂体顶面呈一定角度相交,一般上部较缓,多尖灭于上覆河漫滩处;下部较陡,为 点坝内部控制剩余油分布的主要渗流屏障。其倾角 多受控于活动河道的河床底形,而河流的宽深比是 反映河床底形的重要参数。首先借助地层倾角测井 的解释结果初步判断侧积泥岩倾角介于3°~8°,平 均约为5.2°;其次选取点坝内部距离较近的对子 井,在单井识别出侧积泥岩的前提下,根据井上侧积 泥岩砂岩顶面拉平后的高程差 h,两井之间的直线 距离得出视倾角α,以及平面上两井连线方向与侧 积泥岩真倾向之间的夹角β,经过坐标转换计算出 侧积泥岩夹层倾角约为3.2°,再根据侧积泥岩倾角 θ及2个侧积泥岩之间的厚度H反推出侧积体的宽 度约为82 m(图10);此外对研究区内一水平井井 区点坝内部侧积泥岩夹层产状及侧积体规模进行了 定量计算,结果显示侧积泥岩夹层倾角介于4.13° ~8.2°,侧积体宽度平均值约为70m(算法见文献 [3])。



图 10 对子井求取侧积泥岩夹层倾角及规模

Fig. 10 Dip and scale calculation of lateral accretion muddy intercalation by pair wells

同时对研究区 50 余个点坝进行统计,将点坝的 砂体平均厚度作为河流满岸深度,统计结果介于 2.8~12.8 m,平均值为7.86 m,随后运用 Leeder^[21] 经验公式中河流满岸深度、河流满岸宽度、单一侧积 体宽度及侧积泥岩夹层倾角之间的关系为

$\lg W =$	1. $54lgh+0.8$	33. ($\left(1\right)$	
()	()	,	. /	

 $W_2 = 2W/3$, (2)

 $\tan \theta = h/W_2. \tag{3}$

式中,W为满岸河道宽度,m;h为满岸河道深度,m; W_2 为侧积体平面最大宽度,m; θ 为侧积泥岩夹角,(°)。

推算其平均河流满岸宽度为162 m,单一侧积体水平宽度为108 m,侧积夹角介于3.2°~7.2°,与地层倾角测井、对子井、水平井等资料所得的结果近似。

3.3.2 曲流河砂体规模尺度库的建立

砂体规模尺度库是定量描述砂体规模的参数 库,是进行砂体预测的重要依据。利用井网密集的 优势,对 50 余个点坝 25 余条废弃河道范围进行了 精细刻画,统计了包括砂体长度、宽度、厚度、长宽 比、宽厚比等在内的数据信息,建立了研究区曲流河 砂体规模尺度库。

曲流河点坝规模尺度库统计结果显示,点坝长 度分布在200~800 m,平均为400 m(图11(a));宽 度分布在200~900 m,平均为450 m(图11(b));厚 度分布在 2.8~12.8 m,平均为 7.86 m(图 11(c)); 长度与宽度之间相关性较差,长宽比分布在 0.44~ 1.38,平均为 0.88;宽度与厚度之间相关性不好,宽 厚比分布在 31.97~140.32,平均为 61.31;长度与 厚度之间相关性不好,长厚比分布在 22.5~115.3, 平均为 52.6。废弃河道规模尺度库统计结果显示, 废弃河道宽度分布在 40~100 m,平均为 60 m(图 11(d));厚度分布在 0.5~4 m,平均为 2.5 m(图 11 (e));宽度与厚度之间存在一定的相关性(图 11 (f)),宽厚比分布在 17.3~76.8,平均为 27。

4 曲流河砂体构型对剩余油的影响

为了研究点坝内部剩余油分布,在断块内钻取 了一口密闭取芯井 G2-56-2 井。电测曲线特征显 示该井 Nm3-2-2 具有典型点坝特征,从岩心观察 得出,18.5 m 厚砂体层内发育 5 个泥岩、粉砂岩或 细砂岩混杂的侧积层,厚度为 7 ~ 26 cm。对厚砂体 油层顶部钻取的 39 块岩样进行剩余油饱和度测试, 结果平均剩余油饱和度为 37.2%。层内自下而上 仍呈现水驱油效率变低,剩余油饱和度变高的趋势, 油层上部剩余油富集。39 块岩样中未水洗共 8 块, 占比 20.5%,弱水洗 7 块,占比 17.9%,中水洗 12 块,占比 30.8%,强水洗 12 块,占比 30.8%;未水洗 层主要位于油层顶部及侧积层上部(图 12)。



图 11 曲流河砂体规模尺度库数据统计





图 12 密闭取芯井剩余油分布

Fig. 12 Distribution of remaining oil in coring well

同时以港东油田曲流河构型研究成果为基础, 设计了15个机制模型,利用油藏数值模拟手段研究 点坝内部剩余油分布规律。模型基本参数为长600 m、宽500m、高6m,采用行列式注水方式,3口注水 井、3 口采油井,排距为 510 m,井距为 250 m,侧积 体砂体的渗透率为 1 000×10⁻³ μm²,侧积体孔隙度 为 30%。从模拟结果看出,无论侧积层倾角、侧积 层间距、侧积层遮挡程度、侧积层渗透性、注入速度 还是水驱油方向,都会因侧积层的存在对油水运移 产生影响。点坝内部死油区占比范围在13.2%~

35.05%,平均为24%(表1)。

表1 不同点坝模型水驱波及体积系数及死油区规模统计

 Table 1
 Swept volume and remaining oil saturation in different theoretical models

模型	波及体积系数/%	死油区占比/%	模型	波及体积系数/%	死油区占比/%
侧积倾角 5°	75.90	24.10	渗透率1×10 ⁻³ µm ²	75.90	24.10
侧积倾角 10°	79.27	20.73	渗透率 10×10 ⁻³ µm ²	73.89	26.11
侧积倾角15°	79.71	20. 29	逆侧积层注水	75.90	24.10
50 m 间距	64.95	35.05	顺侧积层注水	69.43	30. 57
100 m间距	75.90	24.10	注水速度 50 m ³ /d	68.61	31.39
150 m间距	74.77	25.23	注水速度 100 m ³ /d	79.57	20.43
2/3 遮档	75.99	24.01	注水速度 150 m ³ /d	86.80	13.20
1/3 遮挡	78.15	21.85			

点坝内部剩余油分布还与点坝形成的侧积模式 相关。其中平面上呈现宽条带状的砂体组合主要受 到顺流加积的控制,主体砂体由点坝、废弃河道及凹 岸沉积组成。凹岸沉积以细粒物质为主,多形成于 顺流加积过程中,水流在河道弯曲处受到阻碍,水流 方向急速改变,使得 1/3 水流分流形成反向涡流,对 遮挡物进行冲蚀。并在河道向下游移动的过程中, 在点坝背面形成凹岸沉积。Brian^[22]做过一个数值 模拟试验,试验结果显示凹岸沉积会有效提升点坝 内部连通性。而在研究区内,宽条带状砂体组合下 的点坝,整体采出程度较高,采出程度一般为 35% ~50%。平面上呈窄条带状的砂体组合主要受侧向 加积的控制,主体砂体由点坝及废弃河道组成,连通 性受废弃河道的影响较大,容易形成废弃河道边部 剩余油富集区。

5 结 论

(1)大港油田港东一区明化镇组为曲流河沉积,主要发育点坝、末期河道、废弃河道、河漫滩、决口扇、溢岸砂6种微相类型;从岩心分析来看,主要发育块状构造含砾中粗砂岩相、平行层理中粗砂岩相、槽状交错层理砂岩相、斜层理砂泥岩相、波状层理粉砂岩相及生物扰动泥岩相6种岩石相类型。

(2)从剖面和平面上对曲流河储层构型进行了 精细解剖,发现研究区主要发育窄条带状砂体组合 及宽条带状砂体组合。

(3)曲流河点坝内部多表现为涨冲落淤正韵律 侧积体垂向模式,与废弃河道的配置关系包括泥质 完全充填和泥质不完全充填2种,点坝内部侧积体 的侧积模式包括侧向加积和顺流加积2种类型;运 用地层倾角测井、对子井、水平井及经验公式等多种 方法对研究区侧积泥岩夹层的倾角进行了计算,倾 角介于 3°~8°。

(4) 点坝内部的剩余油集中在油层顶部及侧积 层上部,受侧积层影响很大;同时还受到点坝侧积模 式的影响。

参考文献:

[1] 裘怿楠.中国陆相碎屑岩储层沉积学的进展[J]. 沉积 学报,1992,10(3):16-24.

QIU Yinan. Developments in reservoir sedimentology of continental clastic rocks in China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1992,10(3):16-24.

 [2] 周新茂,胡永乐,高兴军,等.曲流河单砂体精细刻画 在老油田二次开发中的应用[J].新疆石油地质, 2010,31(3):284-287.

ZHOU Xinmao, HU Yongle, GAO Xingjun, et al. Application of fine description of single sand body in meandering river to old oilfield redevelopment [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010,31(3):284-287.

[3] 周新茂,高兴军,田昌炳,等.曲流河点坝内部构型要素的定量描述与应用[J].天然气地球科学,2010,21
 (3):421-426.

ZHOU Xinmao, GAO Xingjun, TIAN Changbing, et al. Quantitative description of internal architecture in point bar of meandering river [J]. Natural Gas Geosciences, 2010,21(3):421-426.

- [4] 马世忠,杨清彦.曲流河点坝沉积模式、三维构形极其 非均值模型[J].沉积学报,2000,18(2):241-247.
 MA Shizhong, YANG Qingyan. The depositional model, 3-D architecture and heterogeneous modle of point bar in meandering channels[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000,18(2):241-247.
- [5] 马世忠,吕桂友,闫百泉,等.河道单砂体"建筑结构控

三维非均值模式"研究[J]. 地学前缘,2008,15(1): 57-64.

MA Shizhong, LÜ Guiyou, YAN Baiquan, et al. Research on three-dimensional heterogeneous model of channel sandbody controlled by architecture [J]. Earth Science Frontiers, 2008,15(1):57-64.

- [6] 尹燕义,王国娟,祁小明. 曲流河点坝储集层侧积体类型研究[J]. 石油勘探与开发,1998,25(2):37-40.
 YIN Yanyi, WANG Guojuan, QI Xiaoming. A study on the lateral accretion body type of the meandering river point bar reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 1998,25(2):37-40.
- [7] 闫百泉,张鑫磊,于立民,等.基于岩心及密井网的点 坝构型与剩余油分析[J].石油勘探与开发,2014,41
 (5):597-604.

YAN Baiquan, ZHANG Xinlei, YU Limin, et al. Point bar configuration and residual oil analysis based on core and dense well pattern [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014,41(5):597-604.

- [8] 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 of anatomizing architecture of subsurface reservoir in point bar of meandering river[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007,28(4):99-103.
- [9] 马世忠,孙雨,范广娟,等.地下曲流河道单砂体内部 薄夹层建筑结构研究方法[J]. 沉积学报,2008,26
 (4):632-639.

MA Shizhong, SUN Yu, FAN Guangjuan, et al. The method of studying thin interbed architecture of burial meandering channel sandbody [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008,26(4):632-639.

[10] 秦国省,吴胜和,宋新民,等. 远源细粒辫状河三角洲 沉积特征与单砂体构型分析[J]. 中国石油大学学报 (自然科学版),2017,41(6):9-19.

> QIN Guosheng, WU Shenghe, SONG Xinmin, et al. Sedimentary characteristics of distal fine-grain braided delta and architecture analysis of single sand body[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2017,41(6):9-19.

[11] 刘海,林承焰,董春梅,等.基于地震沉积学的复杂曲流带沉积相研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(6):30-39.

LIN Hai, LIN Chenyan, DONG Chunmei, et al. Sedimentary facies of complex meandering belt based on seismic sedimentology [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42 (6):30-39.

- [12] 薛培华.河流点坝相储层模式概论[M].北京:石油 工业出版社,1991:55-63,125-128.
- [13] PHILLIP A L, STEPHEN M H, JERRY L J, et al. Sedimentology and stratigraphic architecture of a point bar deposit, lower cretaceous McMurray Formation, Alberta, Canada [J]. Bulletion of Canadian Petroleum Geology, 2001,59(2):147-171.
- [14] MIALL A D. Architecture-element analysis: a new method of facies applied to fluvial deposits[J]. Earth-Science Reviews, 1985,22:261-308.
- [15] 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I):111-121.
 WU Shenghe, YUE Dali, LIU Jianmin, et al. Hierachy modeling of subsurface palaeochannel reservoir architecture[J]. Science China: Earth Sciences, 2008,38(sup

 1):111-121.
 [16] 岳大力,吴胜和,谭河清,等.曲流河古河道储层构型 精细解剖:以孤东油田七区西馆陶组为例[J].地学 前缘,2008,15(1):101-109.

YUE Dali, WU Shenghe, TAN Heqing, et al. An anatomy of paleochannel reservoir architecture of meandering river reservoir: a case study of Guantao formation, the west 7th block of Gudong oilfield [J]. Earth Science Frontiers, 2008,15(1):101-109.

[17] 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.

> 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.

- [18] 单敬福,张吉,赵忠君,等.地下曲流河点坝砂体沉积 演化过程分析:以吉林油田杨大城子油层第 23 小层 为例[J].石油学报,2015,36(7):809-819.
 SHAN Jingfu, ZHANG Ji, ZHAO Zhongjun, et al. Analysis of sedimentary and evolution process for underground meandering river point bar: a case study from No. 23 thin layer of Yangdachengzi oil reservoir in Jilin oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015,36(7):809-
- [19] MARINUS E D, IRINA O. Connectivity of fluvial point-

819.

bar deposits: an example from the Miocene Huesca fluvial fan, Ebro Basin, Spain[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(9):1109-1129.

[20] 周新茂,高兴军,季丽丹,等.曲流河废弃河道的废弃 类型及机理分析[J].西安石油大学学报(自然科学 版),2010,25(1):19-23.

> ZHOU Xinmao, GAO Xingjun, JI Lidan, et al. Analysis on the types and the sedimentation mechanism of abandoned channel in meandering river[J]. Journal of Xi

'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2010, 25(1):19-23.

- [21] LEEDER M R. Fluviatile fining-upwards cycles and the magnitude of palaeochannels[J]. Geological Magazine, 1973,110(3):265-276.
- [22] BRIAN J W. Three-dimensional connectivity of pointbar depostis [J]. Journal of Sedimentary Research, 2010,80:440-454.

(编辑 徐会永)