

砂质辫状河储层构型表征及其对剩余油的控制 ——以渤海海域P油田为例

徐中波¹ 申春生¹ 陈玉琨² 康凯¹ 罗宪波¹
何新容¹ 李林¹ 张博文¹

(1.中海石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300452;2.新疆油田公司勘探开发研究院 新疆克拉玛依 834014)

摘要 砂质辫状河内部不同级别的构型模式,特别是心滩坝及其内部夹层的构型特征尤为重要,直接控制了油田开发中后期剩余油富集与分布。采取现代地质调查与地下地质解剖相结合的思路,以渤海海域P油田为例,分别从辫流带、心滩坝及心滩坝内部夹层三个级次,探讨了砂质辫状河构型特征及其对剩余油分布规律的影响。结果表明砂质辫状河道具有三种充填样式,且以砂质充填为主,心滩坝与辫状河道呈“宽坝窄河道”的分布样式;坝内落淤层具有穹窿式和水平式两种分布样式。此外,从5级至3级构型单元逐步细分,通过三种识别标志划分单一辫流带,平均宽厚比约178;心滩坝辫状河道宽度与心滩坝宽度比约为1:3.8,心滩坝宽度与长度比约为1:2.2;心滩坝内部单期落淤层近水平分布,多期之间互相平行,一般2~4个。不同级次储层构型要素对剩余油分布的控制存在差异性。对于辫流带级次,层间隔层直接控制剩余油分布;心滩坝级次泥质半充填河道底部砂体连通,侧翼上部水淹程度较低,剩余油富集;受落淤层和物性界面的影响,心滩坝内部剩余油主要呈“分段式”富集在落淤层下方垂积体的顶部和水驱较弱的边部。该成果在油田老区综合调整方案和新区开发方案设计上得到了应用,也在调整井部署,尤其是水平井挖潜剩余油等方面,提供了地质依据。

关键词 辫状河 储层构型 现代沉积 露头 砂体叠置样式 剩余油

第一作者简介 徐中波 男 1984年生 硕士 油气储层地质 E-mail: xuzhb2@cnooc.com.cn

中图分类号 P618.13 **文献标识码** A

0 引言

储层构型研究的核心主要是研究储层的沉积微相及其在空间上的展布^[1-2]。近些年,国内外学者对地下储层构型做了大量探索性的工作^[3-8]。目前,砂质辫状河储层也已进行了较为深入细致的研究,在构型模式、定量关系以及地下储层构型表征方法方面取得了一些成果和认识,但由于受辫状河沉积作用的多样性、地下储层的复杂性等因素影响,对砂质辫状河储层构型定量模式的研究多集中在辫流带级次的规模方面,但对心滩坝级次成因单元的定量规模关系研究较少,关于砂质辫状河砂体内部隔夹层的模式研究也较为局限^[9-14]。此外,与曲流河研究精度相比,辫状河心滩坝砂体内部不同泥质夹层所控制的剩余油分布模式尚不确定^[15-17]。

渤海海域P油田是河流相储层为主的大型整装油田,其主力区块目前已进入中高含水阶段,层间、平

面、层内矛盾突出,剩余油预测及稳产难度越来越大。以P油田主力区块为例,按照层次分析、模式拟合、动静结合的思路,从辫流带、心滩坝及心滩坝内部夹层三个级次进行了构型解剖,建立了砂质辫状河心滩坝及其内部构型要素的定性、定量分布模式,重点对研究区目的层心滩坝和辫状河道的展布进行了预测,进而分析不同级次渗流屏障对剩余油分布的控制作用。

1 研究区概况

P油田位于渤海中南部海域渤南低凸起中段的东北端(图1)。该油田为一断裂背斜构造,受两组南北向走滑断层控制且内部受NE或EW向次生断层复杂化,断裂系统发育;以辫状河沉积为主,砂地比约30%,主力含油层系为馆陶组,油藏埋深910~1400m,纵向连续含油,无底水天然能量,油藏类型为岩性—构造油气藏,属于海上大型复杂河流相水驱开发油田(图2)。

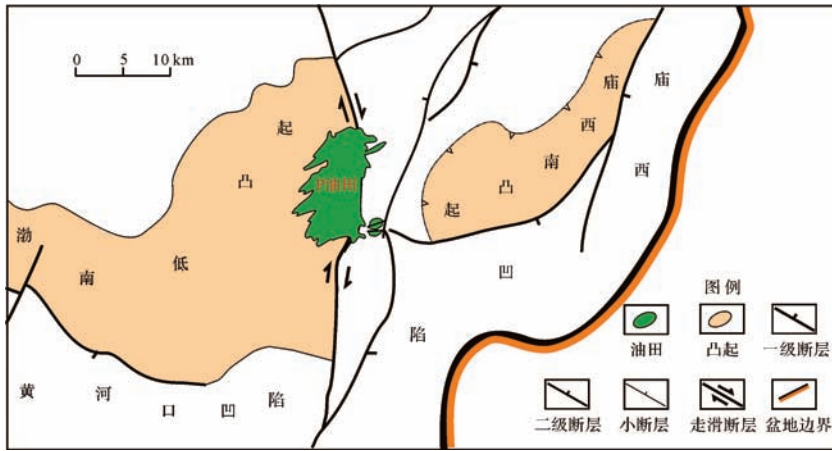


图1 研究区构造位置图

Fig.1 The location map of structure zone in the study area

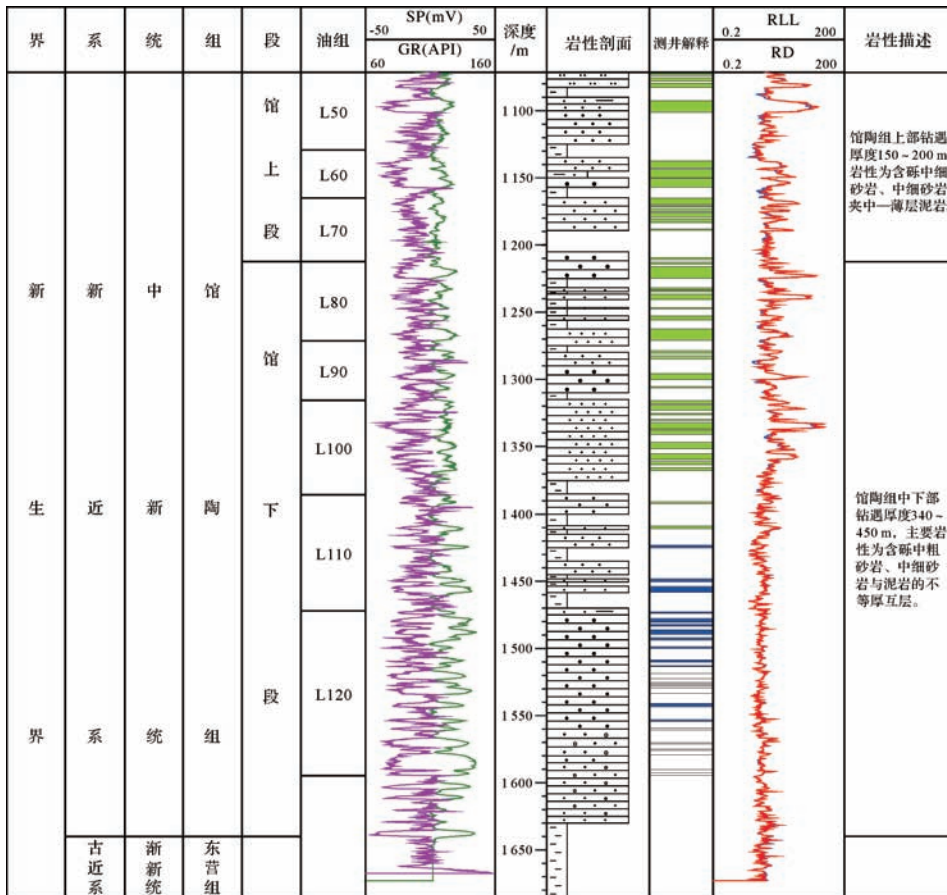


图2 研究区馆陶组地层综合柱状图

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column in the study area

P 油田于 2003 年初投产,已开发 12 年,钻井密度达到 29 口/km²,井距 150~300 m,侧钻井资料较为丰富,部分井已侧钻 6 次,井距小于 100 m,目前综合含水率已达 70%,但采出程度仅为 12%,剩余油仍有很大潜力。研究区丰富的钻井资料和动态资料为开

展本次研究奠定了坚实的基础。

2 辫状河储层层次构型研究

地下储层构型研究主要依据地震和钻井等资料^[18],但由于该油田现有地震资料的有效频带范围

为10~70 Hz,主频较低,约28 Hz。并且核心部位受浅层气影响而地震反射杂乱,难以应用地震切片对构型单元进行分辨和识别。

结合动、静态资料,通过大量的相似露头类比和现代河流沉积的统计分析,参考Maill构型理论的界面层次,依据“模式指导、层次约束、动静结合”的思路即在不同层次的模式指导下,依据河流沉积模式进行不同层次的井间构型分布预测,然后分多个层次进行了辫状河内部多级构型研究(重点是5、4、3级构型),并在此基础上总结剩余油分布模式。

2.1 露头与现代河流沉积类比

2.1.1 露头和现代沉积类比的适用性

受沉积、构造、成岩等地质因素影响,露头和现代沉积的储层构型模式应用于地下储层构型分析前,应进行适用性分析。通过采用两种手段进行适用性分析:

(1) 河型类比

不同类型的辫状河具有不同的构型要素类型和空间组合关系,因此类比露头或现代河流沉积时,首先确定辫状河河型。在辫状河河型分类方面,Miall(1985,1988,1996)划分出的16种河流类型中,把辫状河分为砾质辫状河和砂质辫状河。砂质辫状河又分为深的终年砂质辫状河(South Saskatchewan型)、浅的终年砂质辫状河(Platte型)、高能砂质辫状河以及漫流末端辫状河(Bjou Creek型),并总结了不同类型辫状河的沉积构型模式。

经过多年的研究,河流地质家和地貌学的专家们认识到河流的满岸水流深度决定了水流形成的沙丘高度,沙丘高度又决定了其形成的交错层层组的厚度,而河流满岸水流深度与河道带宽度之间存在统计关系。因此,只需测出砂层交错层层组的厚度便可利用辫状河满岸水流深度与沙丘高度、砂层交错层层组厚度和河道宽度之间相互的统计公式求出河道带的宽度。

根据研究区3口取芯井的岩芯观察,馆陶组岩性主要为细、中细、含砾中粗粒岩屑长石砂岩,单层厚度2~5m,属于砂质辫状河相;交错层理系平均厚度为12~30cm,由Leclair经验公式计算出研究区馆陶组辫状河古水深为3~6m,属于深的终年砂质辫状河沉积^[19-20]。类比原型挑选的是河型一致的大同吴官屯辫状河露头和孟加拉Jamuna河的辫状河段。

(2) 应用密井网资料抽稀验证适用性

结合丰富的侧钻井资料,利用抽稀后的小井距井

区的钻井资料验证露头构型模式和现代沉积构型要素的规模、尺寸等,对于相似的露头和现代沉积予以采用。结果表明,大同吴官屯辫状河露头和孟加拉Jamuna河的构型模式和构型要素规模与研究区相符。

2.1.2 类比适用露头的沉积

露头类比研究是储层构型研究的一项重要内容。山西省大同市云岗镇云冈石窟景区附近出露四条连续性好的辫状河砂体露头,露头区距大同市区约14km,分别被称为石窟剖面、晋华宫剖面、铁路桥剖面和吴官屯剖面。于兴河(2004)、吴胜和(2012)、陈玉琨(2012)等对云冈组四条剖面的层次界面、岩相类型、构型要素识别以及砂体叠置样式等进行过详细研究,并统计了辫状河道及各种类型坝的宽度、厚度数据。依据上述研究区以及原型区的地质概况,进行了类比分析的工作,通过分析后的结果表明,露头区吴官屯剖面与研究区之间存在较好的可比性,两者之间的相似性如下:

(1) 发育的气候条件相同,均属于相对较干旱的气候环境;

(2) 都发育典型深河型砂质辫状河储层。研究区与原型区单一辫流带厚度近似。P油田馆陶组单一期次砂体厚度平均约为5m,露头区单一期次砂体厚度平均约为5.1m,均属于中等深度的辫状河;依据Miall(1996)关于辫状河的分类标准均属于常年流水的深河型砂质辫状河。

(3) 构型要素特征相似:垂向河道充填复合体之间发育稳定分布的泛滥平原泥岩;叠置砂体之间为连通、半连通和不连通接触样式;单期河道充填复合体内部表现为“宽坝窄河道”样式。由此可见,吴官屯露头剖面原型模型与地下研究区沉积特征类似,可以用于指导地下储层的构型解剖。

根据露头剖面所划分出的9种岩相类型,结合对剖面的精细描述,在构型要素分析的基础上,对吴官屯剖面沉积构型进行了系统的观察和描述,归纳出以下6种构型要素的不同岩相组合类型,其主要特征描述如下(表1)。

在辫流带级次,吴官屯剖面自下而上共发育四期河流沉积,期次之间泛滥平原泥岩稳定分布,厚度0.2~1.3m。砂体叠置形式为垂向不连通的层状孤立式。单期河流沉积砂体目视平均厚度从下往上逐渐变小,泛滥平原泥岩厚度和分布范围逐渐增大。在心滩坝级次,心滩坝级次构型要素主要包括心滩坝和辫

表1 露头剖面岩相组合及构型要素特征

Table 1 Architecture elements classification and characteristics of Wuguantun sandstone

构型要素	岩相组合	几何特征	沉积作用	层次界面
辫流带 (BRB)	任意组合	顶平底凸的板状,宽度大于 200 m,厚度约 1~5 m	垂向加积、填积、侧向加积等	五级界面限定的构型单元,侵蚀的基底
砂质河道 (SCH)	Gm→St-ln→Sst→Fsc; Sm→St-Sn→Fsc	顶平底凸的透镜状,宽度约 12~30 m,厚度 1.5~3 m	垂向加积、填积	
泥质河道 (SMCH;MCH)	Fsc-Fp;Sm→Fsc-Fp	顶平底凸的透镜状,宽度约为 12 m,厚度约为 3 m	填积	四级界面限定的构型单元,侵蚀的基底常与顶面不平行
砂坝 (LB)	Sm-Sp→Ssp	顶平顶凸的透镜状	顺流加积、侧向加积垂向加积	
越岸沉积(OF)	Fsc;Fl	席状,顶部常被侵蚀	漫积	四级、五级界面

状河道。根据岩相和砂体剖面形态,在各单一期次沉积砂体内部,可识别出心滩坝和辫状河道砂体,两者形态差异大,界面处存在清晰的岩相变化面。在心滩坝内部夹层级次,辫状河道砂体内部夹层主要包括心滩坝内部夹层和河道内部夹层。河道内部夹层为河道废弃—复活后残留的泥质细粒物质,分布较为局限。心滩坝内部夹层根据成因可分为两类:坝上沟道和落淤层,两者岩性相似,仅规模和展布特征不同。坝上沟道则呈窄条带状零散分布;落淤层呈连片状广泛发育在心滩坝内,是辫状河砂体内主要的渗流屏障。

2.1.3 类比现代河流沉积的构型要素规模

通过现代沉积一个时间点的沉积形态总结辫流带内沉积微相的定量关系是可行的。通过大量的现代沉积采样,以流量、流速相对稳定的平水期的规模作为主要测量点,统计单一辫流带及其内部沉积微相定量关系,可以对单一辫流带内部沉积微相单元的规模起到一定的约束作用。

在选取河流的流域范围内,对典型河段的测量部位和测量时期的选择至关重要。比如心滩坝在汛期由于水位上升而导致的测量数据偏小,反映了洪水期

心滩坝的规模变化大,并可能由此导致一定的误差。因此,本文采样点数据的选取和测量针对平水期,具体的测量平面、剖面见图 3。

利用 Google 卫星照片选取现代典型的砂质辫状河流 Jamuna 河(孟加拉),统计其河道充填复合体和内部的沉积微相规模尺度,利用该规模和构型要素之间的统计关系作为本油田单一微相单元的表征约束条件之一(图 4)。该河流名称为雅鲁藏布江,流入印度后称为“不拉马普特拉河”,又流经孟加拉国(Jamuna 贾木纳河),最后注入孟加拉湾,全程表现为辫状河的特征。根据测量的数据进行统计,心滩坝宽度与心滩坝长度、心滩坝宽度与辫状河道之间具有较好的正相关关系。随着心滩坝宽度的增大,心滩坝的长度也增大,心滩坝宽:心滩坝长 $\approx 1:3$;随着心滩坝宽度的增大,辫状河道的宽度也增大,但一般不超过 400 m。辫状河道宽:心滩坝宽 $\approx 1:4$ 。

2.2 储层构型分级模式

结合油田的实际需要,将研究区辫状河储层构型分析总体上划分为 3 个层次:第一个层次为单一河道充填单元(顶底面相当于 Maill 的 5 级界面);第二个层次是沉积微相规模(顶或底面当于 Maill 的 4 级界

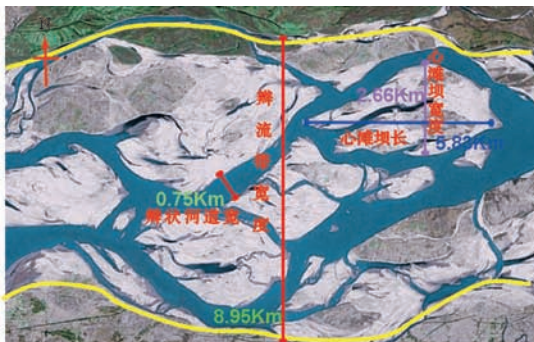
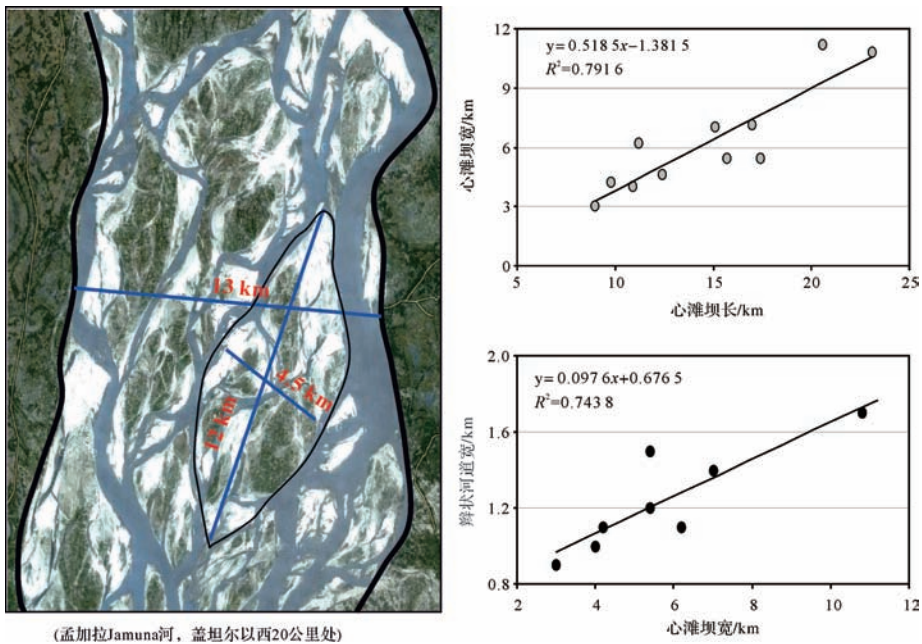


图3 测量部位的平面、剖面示意图(Jamuna 河)

Fig.3 The plane and profiles for measuring point(Jamuna River)



(孟加拉Jamuna河, 盖坦尔以西20公里处)

图4 现代沉积不同构型单元相关性统计

Fig.4 Correlation statistics of architecture units in modern river

面),即将单一河道充填单元细分为心滩坝、辫状河道、溢岸砂体及泛滥平原;第三个层次为心滩坝内部结构(相当于 Maill 的3级界面),主要包括增生体和落淤层。

(1) 单一辫流带级次构型表征

河道充填复合体内部往往包含两个或多个单一河道充填单元,在河道充填复合体内部首先识别出单一河道充填单元砂体,目的是搞清河道的延伸方向及相邻河道砂体间的连通状况,为准确地判断油水井的注入或来水方向,提供更准确的地质依据^[21-22]。

单一辫流带级次构型表征主要是在河道充填复合体基础上识别单一河道充填单元边界。主要识别标志有:①河道砂体顶面高程差。不同期次的河道砂体存在明显的高程差,划分为不同期次的两条单一辫状河沉积。②两期单一河道充填单元侧向叠置。在同一时间单元(一个单砂层)内,后期沉积的河道对前期形成的河道侧向切割,如区域上存在这种特征,可以认为是两期河道侧向叠置。③河间沉积。同一单层内,两期河道充填复合体由于快速的迁移或者分叉,在平面上形成局部的沉积间断期,沉积泛滥平原泥岩或者薄层的溢岸砂体。因此沿河道走向不连续分布的河间砂体(河间泥或溢岸沉积)可作为不同河道充填复合体分界的标志。④不同河道充填单元砂体具有不同的水淹程度的差异。

根据上述识别标志将研究区 L60 油组复合砂体进一步细分为7个单一辫流带充填单元。统计显示,单一辫流带宽度为800~1200 m,砂体厚度3~10 m,平均宽厚比约178。

(2) 心滩坝级次构型研究

在单一河道充填单元内进行心滩坝和辫状河道的展布研究,是进行砂体内部夹层预测的基础。在单井沉积微相划分的基础上,总结了辫状河道不同充填样式与心滩坝的3种组合模式,分别是砂质充填河道、泥质半充填河道、泥质充填河道与心滩坝组合模式(图5)。砂质充填河道剖面上呈现顶平底凸的透镜状,是指河道内充填沉积物以砂质岩相为主体的辫状河道,其砂岩厚度与同期心滩坝砂岩厚度相当或略小。向上粒度变细,代表了河道发育的一个完整周期。半泥质充填河道是指河道下部充填砂质岩相,上部充填泥质岩相的辫状河道,砂岩厚度与同期沉积的心滩坝厚度存在明显差异,泥质充填部分表现为典型的槽状形态。泥质充填河道形态为顶平底凸的透镜状,是指河道内充填沉积物以泥质细粒岩相为主体的辫状河道。

在单井识别以及定性、定量模式指导下,进行了研究区单一辫流带内部心滩坝和辫状河道的三维组合分析。“厚度控制”即根据辫状河道与心滩坝的组合模式可知,砂质充填河道的厚度与心滩坝厚度相

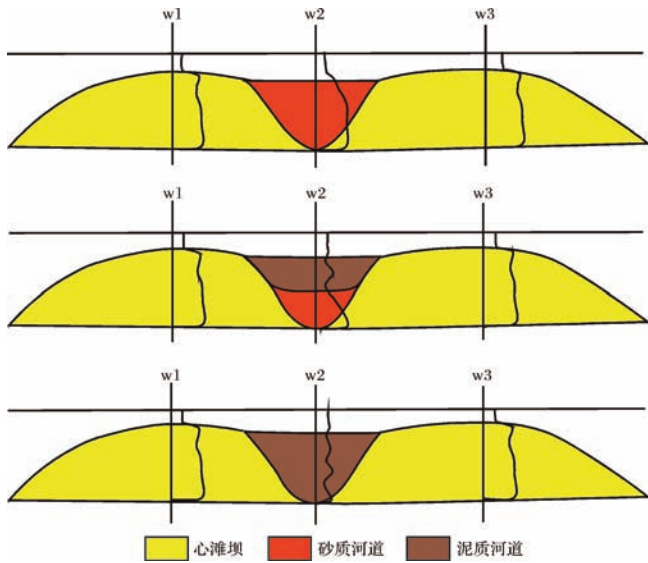


图5 辫状河道不同充填样式与心滩坝组合关系

Fig.5 The relation between bar and braided channel

当,而泥质充填和半泥质充填的河道砂体厚度明显小于心滩坝,因此,根据其砂岩厚度分布可以初步预测心滩坝或砂质河道,以及泥质、半泥质辫状河道的分布范围。“规模约束”是指在心滩坝和辫状河道的定量规模都限定在单一河道充填单元宽度的条件下,三者之间并满足一定的定量关系,利用该约束关系可以进一步预测砂质河道和心滩坝的分布范围。以L60油组为例,其辫流带宽度为1 150~1 625 m,心滩坝平均宽375 m,心滩坝平均长度813 m,辫状河平均宽度为100~350 m。

利用上述方法对研究区主力单层进行了四级构型要素的展布研究(图6)。结果表明研究区辫状河道宽度与心滩坝宽度比约为1:3.8,心滩坝宽度与心滩坝长度比约为1:2.2。心滩坝与辫状河道呈“宽坝窄河道”的分布样式。

(3) 心滩坝内部构型研究

结合心滩坝内部构型模式和密井网资料,从心滩坝的生长过程入手,按照流水侵蚀或加积的方向,确定其顶部落淤层的分布范围和特征。以Ng-L62单层C09井所在的心滩坝为例,来说明心滩坝内部夹层的拟合方法。首先,通过该心滩坝的形态及与辫流带位置关系可定性认知其为横向砂坝,内部夹层界面展布模式为近穹窿状。其次,在单井上识别界面或者夹层,统计每口井的夹层个数,以厚度最大的砂体、夹层最多的井位为起点,做纵、横剖面。按照穹窿式展布的夹层模式进行拟合,得到剖面上的界面组合关系。

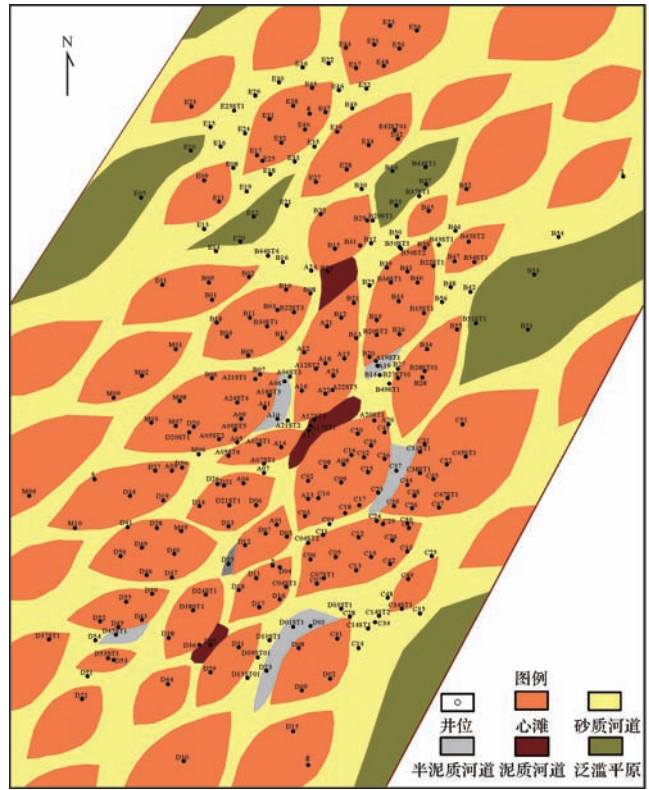


图6 Ng-L62 单层心滩坝级次构型要素平面图

Fig.6 The architecture plane of bar level in Ng-L62 formation

然后,沿顺物源和垂直物源2个方向做多条剖面,同时,分析不同期次落淤层的分布特征。最后,综合不同期次垂积体的演化特征,通过多维互动的方法,得到落淤层的空间分布形态(图7)。

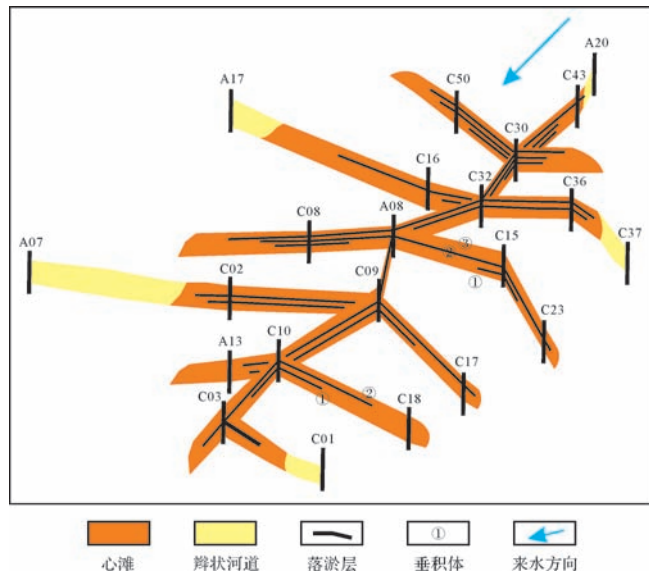


图7 Ng-L62 单层心滩坝内落淤层展布栅状图

Fig.7 Fence map of silting layer in bars in Ng-L62 formation

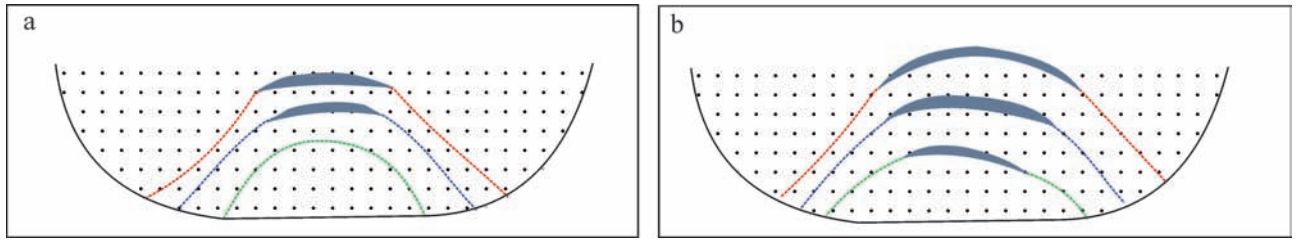


图8 落淤夹层分布模式图(a.近水平式;b.穹窿式)

Fig.8 Distribution pattern of muddy intercalations in longitudinal bar(a. nearly horizontal, b. the fornix)

分析表明,研究区主要发育穹窿式或近水平式两种落淤层:单期落淤层近水平分布,多期之间互相平行,自下而上落淤层分布范围从坝头至坝尾逐渐增大。其次心滩坝内夹层数较少,一般2~4个(图8)。

2.3 动静结合验证

结合随钻测压、水淹层解释、生产动态资料,在隔夹层分布及水淹特征认识的指导下,以不同级次构型要素的渗流屏障(差异)为重点,分别对河道充填复合体级次、心滩坝与辫状河道级次进行动态验证,检验构型研究成果。

(1) 河道充填复合体级次验证

对于河道充填复合体级次,重点验证不同河道充填复合体的层间隔层。部分开发井侧钻后出现分段水淹,验证了层间隔层的稳定性,也验证了河道充填复合体细分的合理性。

(2) 单一辫流带内部验证

对于单一河道充填单元内部级次,重点验证心滩坝与河道组合关系。研究表明,对于心滩坝级次,对流体渗流起作用的主要是泥质河道或半泥质河道。泥质充填河道侧向遮挡作用明显,致使注采不连通的心滩坝或者辫状河道砂体剩余油较富集。

3 各级构型单元剩余油富集模式

利用动态分析及油藏工程方法,以不同级次构型要素的渗流屏障(差异)为重点,对不同级次构型要素的渗流屏障对剩余油分布的影响进行分析^[23-27]。

(1) 辫流带级次:与底水天然能量开发油藏相比,P油田为层状注水开发油藏,其剩余油分布除了受垂向渗流屏障的遮挡影响之外,侧向渗流屏障对剩余油分布也有重要影响。辫流带级次侧向遮挡体主要包括单一辫流带之间的泛滥平原沉积和溢岸沉积。前人对单河道(单一辫流带)之间的剩余油分布已研究较多,认识较为清晰,下文重点讨论垂向水平分布的隔层对层状注水开发油藏剩余油分布的影响。以

A16井组为例,A22井侧钻后出现分段水淹。通过这一成果不仅可分析油水运动特征,而且提出河道充填复合体级次隔层控制的剩余油分布规律。发育层间隔层的井区有利于注水开发,水洗程度高,剩余油较少;不发育层间隔层的井区,砂体顶部剩余油较富集(图9)。

(2) 心滩坝级次:心滩坝级次的渗流屏障主要包括泥质充填河道和半泥质充填河道。半泥质充填河道的渗流屏障一般分布在砂体顶部,对底水天然能量开发油藏影响不大,而对于类似P油田的注水开发油藏,泥质充填河道或半泥质充填河道控制其剩余油分布。对于砂质充填的辫状河道,其与心滩坝砂体连通,无遮挡作用,整体水驱效果好。而半泥质充填的辫状河道在侧向具有半遮挡作用,沿水驱方向心滩坝侧翼砂体顶部有剩余油富集。以A02ST1井组为例,生产动态资料证实A09ST05井的L60小层砂体下部水淹,且产液量有限。分析表明,该井与A02ST01分属不同的心滩,中间为半泥质充填河道,一定程度上阻碍了注入水流动;而在遮挡层的背面,会有剩余油的分布(图10)。

针对本区,总结了3种剩余油富集模式:a.砂质充填的辫状河道,与心滩坝砂体连通,遮挡作用弱,整体水驱效果好;b.半砂质充填的辫状河道在侧向具有半遮挡作用,沿水驱方向心滩坝侧翼砂体顶部有剩余油富集;c.泥质充填辫状河道侧向遮挡作用明显,致使注采不连通的心滩坝或者辫状河道砂体剩余油较富集。因此,泥质或半泥质充填河道对流体渗流起作用。半泥质充填河道底部砂体连通,无遮挡作用,上部不连通,导致邻近的砂质河道或者心滩坝侧翼上部水淹程度较低,剩余油富集(图11)。

(3) 心滩坝内部级次:心滩坝内部夹层对流体有影响作用的主要是连片分布的落淤层。考虑到研究区以纵向砂坝为主,以及落淤层在坝头、坝中和坝尾分布范围的不同,按照注水开发油藏,反9点面积井

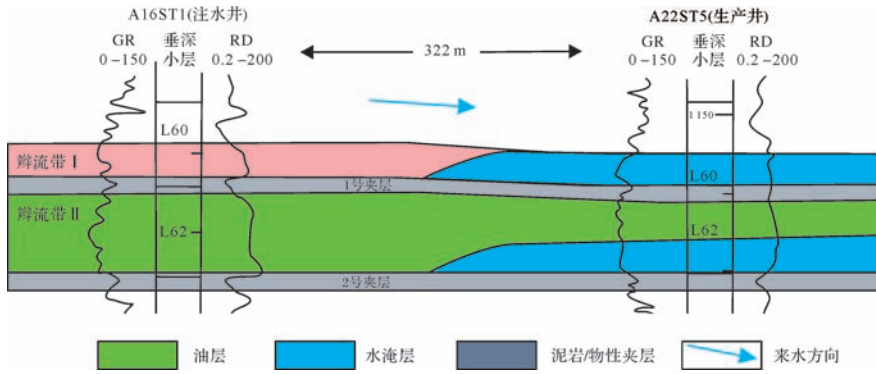


图9 A16井区注入水运移示意图

Fig.9 The migration of water in the area around Well A16

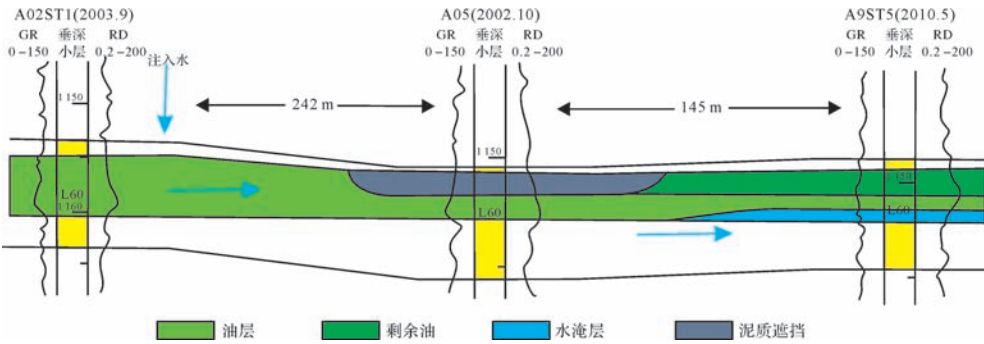


图10 泥质半充填辫状河道影响的剩余油分布

Fig.10 The distribution of remaining oil influenced by semi-mud channel

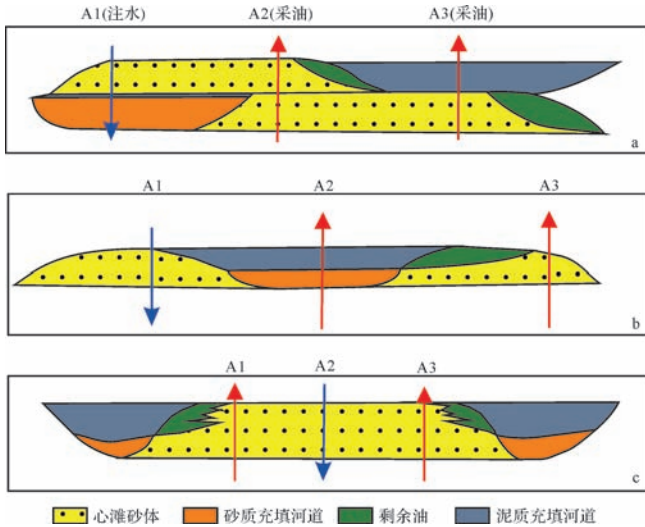


图11 心滩坝级次构型要素对剩余油分布的影响

Fig.11 The effects of architecture element of bar level on remaining oil distribution

表2 注水油藏概念模型设计方案

Table 2 Design proposal for water injection model			
方案号	心滩坝类型	注水方向	韵律性
1	纵向砂坝	坝中注水	均质韵律
2		坝侧缘注水	
3		坝头注水	
4		坝尾注水	

坝内部不同部位的开发效果及落淤层对剩余油分布的控制表现为两种类型:

① 在注采平衡、射孔程度较高的条件下,以坝中注水为例进行说明(图12)。图中位于心滩坝中部的B井注水,A、C两井采油,于心滩坝中部的B井注水,A、C两井采油,B、C两井之间的物性夹层也起到垂向渗流遮挡作用,提高了采油井和注水井之间的驱油效率,在井网波及范围内采收率较高,剩余油主要富集在水驱较弱的边部。

② 从坝缘(包括坝头、坝侧和坝尾)注水生产时,剩余油的分布受落淤层和物性界面分布范围的影响,剩余油富集生产井间,以及水驱范围内的夹层下部区域。在心滩坝内部,井间剩余油主要富集在早期物性夹层或落淤层下方垂积体的顶部(图13)。

网,设计了4个概念模型(表2)。

模型所有参数均取自该油田,设置极限含水率为95%,模拟生产30年。通过采出程度、剩余油饱和度、含水率以及累积产油量等参数分析表明,纵向砂

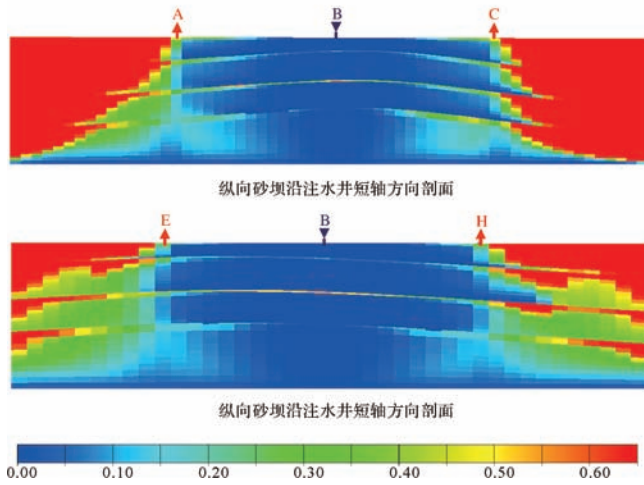


图12 纵向砂坝中注水开发的剩余油饱和度分布图
Fig.12 The distribution of remained oil on the condition of water injecting in the middle of longitudinal bars

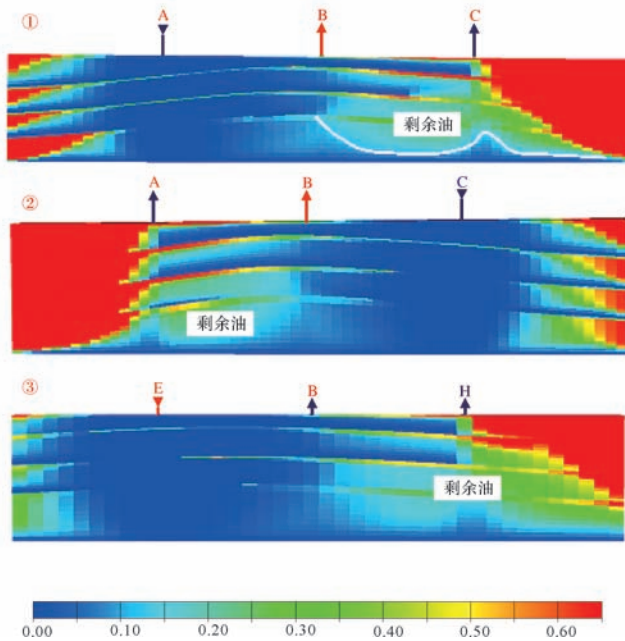


图13 心滩坝缘(①坝头、②坝尾、③坝侧缘)注水开发的剩余油饱和度剖面图

Fig.13 The distribution of remaining oil on the condition of water injecting in the side of bars

综合以上认识,明确了不同级次构型要素对剩余油的控制,进而指导三维精细地质建模研究,并结合水淹特征预测各级次剩余油分布、指导中高含水阶段厚油层水平井部署、优化油田开发井网等方面,并可为类似油田中高含水期综合调整、老区剩余油挖潜等具有一定的指导和借鉴意义。

4 结论与认识

(1) 以层次分析、模式拟合、动静结合为核心,建立了砂质辫状河心滩坝及其内部构型要素的定性、定量分布模式,进而厘清砂质辫状河构型解剖流程和方法。

(2) P 油田辫状河道主要有砂质充填、泥质半充填、泥质充填等三种充填样式,且以砂质充填为主。辫状河道宽度与心滩坝宽度比约为 1 : 3.8,心滩坝宽度与心滩坝长度比约为 1 : 2.2,心滩坝与辫状河道呈“宽坝窄河道”的分布样式;心滩坝内泥质夹层主要包括沟道和落淤层,落淤层具有穹窿式和水平式两种分布样式。

(3) 不同级次储层构型要素对剩余油分布的控制存在差异性。辫流带级次,层间隔层直接控制剩余油分布;心滩坝级次泥质半充填河道底部砂体连通,侧翼上部水淹程度较低,剩余油富集;受落淤层和物性界面的影响,心滩坝内部剩余油主要呈“分段式”富集在落淤层下方垂积体的顶部和水驱较弱的边部。

参考文献 (References)

- 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.
- Miall A D. The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology[M]. Berlin: Springer, 1996: 57-98.
- 于兴河,马兴祥,穆龙新,等. 辫状河储层地质模式及层间界面分析[M]. 北京:石油工业出版社,2004. [Yu Xinghe, Ma Xingxiang, Mu Longxin, et al. Analysis of Braided River Reservoir Geological Model and Hierarchy Interface [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.]
- 张昌民. 储层研究中的层次分析法[J]. 石油与天然气地质,1992, 13(3):344-350. [Zhang Changmin. Hierarchy analysis in reservoir researches[J]. Oil & Gas Geology, 1992, 13(3): 344-350.]
- 于兴河. 油气储层表征与随机建模的发展历程及展望[J]. 地学前缘,2008,15(1):1-15. [Yu Xinghe. A review of development course and prospect of petroleum reservoir characterization and stochastic modeling[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(1): 1-15.]
- 李阳. 河流相储层沉积学表征[J]. 沉积学报,2007,25(1):48-52. [Li Yang. Characterization of sedimentology in fluvial facies reservoir [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(1): 48-52.]
- 陈欢庆,赵应成,舒治睿,等. 储层构型研究进展[J]. 特种油气藏, 2013,20(5):7-13. [Chen Huanqing, Zhao Yingcheng, Shu Zhirui, et al. Advances in reservoir architecture research[J]. Special Oil and Reservoir, 2013, 20(5): 7-13.]
- 赵翰卿. 储层非均质体系、砂体内部建筑结构和流动单元研究思路探讨[J]. 大庆石油地质与开发,2002,21(6):16-18,43. [Zhao

- Hanqing. Approach to the study thinking about reservoir heterogeneous system, sand-body internal construction structure and flow unit[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2002, 21(6): 16-18, 43.]
- 9 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*, 2009, 33(1): 7-11.]
 - 10 钟思瑛,刘金华,乔力,等. 真武油田辫状河心滩微相储层构型研究[J]. *特种油气藏*,2014,21(2):32-36. [Zhong Siying, Liu Jinhua, Qiao Li, et al. Study on the texture of braided bar microfacies reservoirs in the Zhenwu oilfield [J]. *Special Oil and Reservoir*, 2014, 21(2): 32-36.]
 - 11 李宇鹏,吴胜和,耿丽慧,等. 基于空间矢量的点坝砂体储层构型建模[J]. *石油学报*,2013,34(1):133-139. [Li Yupeng, Wu Shenghe, Geng Lihui, et al. Spatial-vector-based reservoir architecture modeling of point-bar sand[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 21(2): 133-139.]
 - 12 白振强. 辫状河砂体三维构型地质建模研究[J]. *西南石油大学学报:自然科学版*,2010,32(6):21-24. [Bai Zhenqiang. Study on the 3D architecture geological modeling of braided fluvial sandbody [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2010, 32(6): 21-24.]
 - 13 伍涛,王建国,王德发. 辫状河砂体储层沉积学研究——以张家口地区露头砂体为例[J]. *沉积学报*,1998,16(1):27-33. [Wu Tao, Wang Jianguo, Wang Defa. Reservoir sedimentology of braided river sandbodies—a case study of the outcrop in Zhangjiakou region[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(1): 27-33.]
 - 14 葛云龙,逯径铁,廖保方,等. 辫状河相储集层地质模型——“泛连通体”[J]. *石油勘探与开发*,1998,25(5):77-79. [Ge Yunlong, Lu Jingtie, Liao Baofang, et al. A braided river reservoir geological model—“pan communicated sandbody” [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1998, 25(5): 77-79.]
 - 15 廖保方,张为民,李列,等. 辫状河现代沉积研究与相模式——中国永定河剖析[J]. *沉积学报*,1998,16(1):34-39. [Liao Baofang, Zhang Weimin, Li Lie, et al. Study on modern deposit of a braided stream and facies model—taking the Yongding River as an example [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(1): 34-39.]
 - 16 赵春明,胡景双,霍春亮,等. 曲流河与辫状河沉积砂体连通模式及开发特征——以渤海地区秦皇岛32-6油田为例[J]. *油气地质与采收率*,2009,16(6):88-91. [Zhao Chunming, Hu Jingshuang, Huo Chunliang, et al. Sandbody interconnectivity architecture and development characteristics of meandering river and braided river deposits; a case study of Qinhuangdao 32-6 Oilfield, Bohai area[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2009, 16(6): 88-91.]
 - 17 李顺明,宋新民,蒋有伟,等. 高尚堡油田砂质辫状河储集层构型与剩余油分布[J]. *石油勘探与开发*,2011,38(4):474-482. [Li Shunming, Song Xinmin, Jiang Youwei, et al. Architecture and remaining oil distribution of the sandy braided river reservoir in the Gaoshangpu oilfield [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(4): 474-482.]
 - 18 吴胜和,翟瑞,李宇鹏. 地下储层构型表征:现状与展望[J]. *地学前缘*,2012,19(2):15-23. [Wu Shenghe, Zhai Rui, Li Yupeng. Subsurface reservoir architecture characterization; current status and prospects[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 15-23.]
 - 19 Leclair S F, Bridge J S, Wang Feiqiao. Preservation of cross-strata due to migration of subaqueous dunes over aggrading and non-aggrading beds; comparison of experimental data with theory[J]. *Geoscience Canada*, 1997, 24(1): 55-66.
 - 20 Miall A D, Jones B G. Fluvial architecture of the Hawkesbury sandstone (Triassic), near Sydney, Australia[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(4): 531-545.
 - 21 陈程,贾爱林,孙义梅. 厚油层内部相结构模式及其剩余油分布特征[J]. *石油学报*,2000,21(5):99-102. [Chen Cheng, Jia Ailin, Sun Yimei. Microfacies architecture patterns and the distribution of the remaining oil within thick pays[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(5): 99-102.]
 - 22 陈莉,芦凤明,范志勇. 大港油田官80断块辫状河储层构型表征[J]. *大庆石油学院学报*,2012,36(2):71-76. [Chen Li, Lu Fengming, Fan Zhiyong. The characterization of braided river reservoir configuration in 80-fault-block Dagang oil field[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2012, 36(2): 71-76.]
 - 23 杜庆军,陈月明,侯键,等. 胜坨油田厚油层内夹层分布对剩余油的控制作用[J]. *石油天然气学报*,2006,28(4):111-114. [Du Qingjun, Chen Yueming, Hou Jian, et al. Control of interlayer on the distribution of remaining oil in thick reservoirs of Shengtuo oilfield[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2006, 28(4): 111-114.]
 - 24 杨少春,王燕,钟思瑛,等. 海南南地区秦一段储层构型对剩余油分布的影响[J]. *中南大学学报:自然科学版*,2013,44(10):4161-4166. [Yang Shaochun, Wang Yan, Zhong Siying, et al. Reservoir architecture in member 1 of Taizhou Formation of southern Hai'an area effects on remaining oil distribution[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2013, 44(10): 4161-4166.]
 - 25 熊光勤,刘丽. 基于储层构型的流动单元划分及对开发的影响[J]. *西南石油大学学报:自然科学版*,2014,36(3):107-114. [Xiong Guangqin, Liu Li. Flow units classification based on reservoir architecture and its influence on reservoir development[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2014, 36(3): 107-114.]
 - 26 王改云,杨少春,廖飞燕,等. 辫状河储层中隔夹层的层次结构分析[J]. *天然气地球科学*,2009,20(3):378-383. [Wang Gaiyun, Yang Shaochun, Liao Feiyan, et al. Hierarchical structure of barrier beds and interbeds in braided river reservoirs[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(3): 378-383.]
 - 27 姜香云. 河流相储层构型分析与剩余油分布模式研究——以孤东油田七区西馆上段为例[D]. 北京:中国石油大学(北京),2007. [Jiang Xiangyun. The study on fluvial architecture and distribution model of remaining oil—a case study of 7th block, Gudong oilfield [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2007.]

Architecture Characterization For Sandy Braided River Reservoir and Controlling Factors of Remaining Oil Distribution

—A case study of P oilfield (Neogene), Bohai offshore, China

XU ZhongBo¹ SHEN ChunSheng¹ CHEN YuKun² KANG Kai¹ LUO XianBo¹
HE XinRong¹ LI Lin¹ ZHANG BoWen¹

(1. Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300452, China;

2. Xinjiang Oilfield Company Exploration and Development Research Institute, Karamay, Xinjiang 834014, China)

Abstract: The architecture of braided river, especially the muddy intercalation, plays a key role in the enhancement of remaining oil. Based on the outcrop, modern sediments and underground reservoir, taken P oilfield as an example, the different level of the internal architecture elements are studied in order to obtain a qualitative and quantitative distribution pattern of the heterogeneity character of the sandy braided river reservoir. Also, the architecture characterization technique for underground braided river reservoir is studied in this work. Based on the proposed distribution pattern and the related characterization techniques, the different control of architecture element to the distribution of remaining oil is analyzed: ① the sandy braided rivers have three filling types, dominated by sandy fillings. The distribution styles of channel bars and braided rivers display "wide bar-narrow channel". The sludge beds within channel bars show two distribution styles as dome-like and horizon-like. ② architectures from 5 to 3 hierarchies are characterized successively. Based on three identification marks, single braided belts are characterized with width of 800~1 200 m, thickness of 3~8 m and average width/thickness ratio about 178. Channel bars are characterized by principles of thickness-controlled, scale-constraint and multidimensional interaction. The width ratio of braided rivers and channel bars is about 1:3.8, and width/length ratio of channel bars is about 1:2.2. Single periodic sludge bed within channel bars are horizontally distributed and different periodic sludge beds are parallel with each other. The distribution range of sludge beds from bottom up decreases from bar head to bar tail. The quantity of sludge beds within channel bars are generally low (about 2~4). ③ reservoir architectures of different hierarchies exert different controls on the distribution of remaining oil. The interlayers control the remaining oil directly in the hierarchy of braided river belts. In the hierarchy of channel bars, the sandbodies are connected at the bottom of muddy semi-filling channels, resulting in relatively poor water flooding degree and enriched remaining oil in the upper part. Influenced by sludge beds and petrophysical boundaries, the remaining oil within in channel bars is mainly distributed as "segment-like" at the top of aggraded bodies under the sludge beds and the margin part with poor water flooding. This research has been applied in the optimization of water injection and deployment of wells of oilfields.

Key words: braided river; architecture character; modern sedimentary; outcrop; stacking pattern; remaining oil