

[文章编号] 1671-9727(2008)05-0502-06

河流相储层剩余油成因类型及分布模式

付国民^{1,2} 董 冬³ 王 锋¹ 董满仓⁴

(1. 长安大学资源学院, 西安 710054; 2. 中原油田博士后工作站, 河南濮阳 457001;

3. 胜利油田大明集团股份有限公司, 山东东营 257061; 4. 延长油田股份有限公司, 陕西延安 716000)

[摘要] 以鄂尔多斯樊家川油田为例, 通过综合分析开发地质、生产动态资料, 研究了河流相储层剩余油成因类型及分布模式。河流相储层剩余油可细分为 13 种成因类型, 其中井网未控制型、注采不完善型、层间干扰型、呈片分布差油层型、微正向构造控制型剩余油是注水开发后期主要挖潜的对象。在纵向上, 剩余油分别呈分散相、片状、集合块状连续层状分布于单砂体不同部位, 在渗透性差异较大的不同砂体之间由于层间干扰形成层间干扰型剩余油; 在平面上, 河道砂主体侧缘主要为决口扇或溢岸成因的薄层近未水淹剩余油层和上倾尖灭型剩余油。而在河流相复合砂体的任何部位, 都可能存在被漏掉的微砂体、微构造型、外延断棱型剩余油。

[关键词] 剩余油; 成因类型; 分布模型; 河流相; 樊家川

[分类号] TE321

[文献标识码] A

河流相储层是中国大部分老油田主要储集类型, 其内部建筑结构极为复杂, 平面、层间、层内非均质性较严重, 造成注水开发中后期 60%~70% 的剩余油残存在未被注入水波及的区域。这部分剩余油分布极为分散和复杂。而在油田开发后期积极寻找并挖潜此类剩余油, 已成为中国大部分老油田稳产的重要战略措施, 因此, 搞清这部分剩余油成因类型及分布模式, 可以有效指导开发后期油田的综合调整及剩余油挖潜, 提高最终采收率。

樊家川油田是鄂尔多斯盆地南部投产较早的中小型砂岩油田, 主要储集层下侏罗统延长组延 9 油组是由多期不同规模不同类型河道砂体交错叠置的厚油层, 非均质性非常严重。经过十余年的注水开发, 油田已进入高含水后期开采阶段, 层间、平面矛盾极其突出, 产量锐减, 采出程度仅为 14%; 但根据密闭检查井和分段动态测试表明, 油层内仍有 86% 的高度分散及隐蔽的剩余油。

1 剩余油成因类型划分

剩余油分布格局的形成, 概括起来讲, 其一是由于井网控制不住及面积注水井网本身面积波及系数的差异造成的; 其二在于储层的非均质性, 断层分割造成不连通性, 以及注采系统与其相互配置关系和适应性^{[1]~[3]}。也有专家将剩余油成因类型简单归纳为井网本身控制型及干扰型两类^{[4]、[5]}。然而, 河流相储层在高含水后期, 剩余油分布极其复杂, 以上成因分类不能有效地指导具体剩余油挖潜措施的制定。通过利用取心、试油、数模、同位素吸水剖面、新钻油水井电测解释及生产动态资料, 在分析储层沉积、非均质性、构造、开发工程等因素对剩余油影响的基础上, 将剩余油成因类型分为以下 13 类(图 1):

(1) 井网未控制型剩余油。对河流相储层来说, 厚度小于 1~2 m, 宽度不足 200~300 m 的微砂体较发育, 甚至许多期次的主河道、废弃河道、

[收稿日期] 2007-02-20

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2003CB214601)

[作者简介] 付国民(1968—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 油藏描述、储层地质学, E-mail: guominfu2000@163.com。

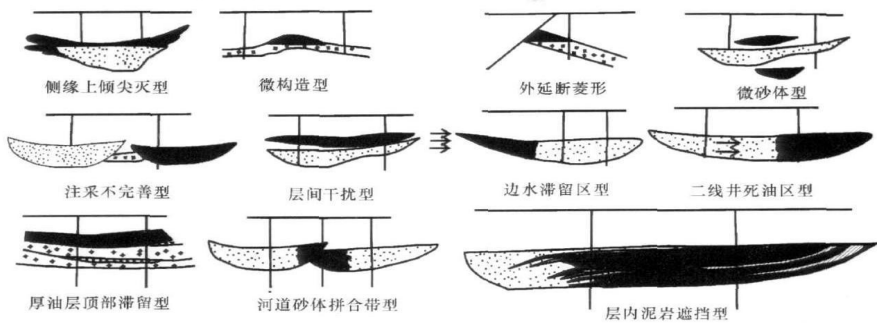


图 1 河流相储层剩余油成因类型

Fig.1 The genetic type of the remaining oil in the fluvial reservoirs

串沟充填、决口扇等砂体都属于这类砂体。其含油丰度较高,但对大多数井网来说难以控制其分布,因而是剩余油的挖潜重点。樊家川油田如 $y^{9^{1-1}}$ 单元的樊北 1-5、樊 1-61、樊 3-51 等井区位于窄小河道砂体,现开发层系未控制,形成剩余油潜力区。

(2)注采不完善型剩余油。这是厚油层严重平面非均质性形成剩余油的重要方式。原井网只有油井或只有水井钻遇河道砂体,通过河间薄砂层将油水井相连;或油水井之间有大片低渗透层及断层遮挡,都有可能造成注采不完善,形成剩余油。樊家川油田樊 5-31 井组 $y^{9^{1-1}}$ 单元中,在左右两条河道砂体拼接部位的樊 3-5、樊 3、樊 4-5 等井区发育河间薄层砂,河道两侧为漫滩席状薄层砂,注水井樊 2-4、樊 1、樊 4-3 位于漫滩席状砂体,樊 3、樊 4-5 位于河间薄层砂体,从而使主河道砂体中油井如樊 4-4、樊 3-4、樊 3-51、樊 2-5 井注采不完善,形成剩余油(图 2);而樊 1-5 井与对应的注水井樊 1-4 皆位于主河道砂体,形成强水淹。对这类剩余油主要采用钻高产加密井的方法挖掘剩余油。

从广义上讲,由于油层污染、套损、二线受效同样造成注采不完善,形成剩余油潜力区。樊家川油田二线受效井和套损井较多,如樊 2-5、樊 3-4、樊 8-7、樊 11-5、樊 1-3、樊 4-6、西樊 5-1、樊 5-1、樊 8-8 等井,多数因套损原因目前液量很低,其潜力得不到有效发挥。部分采油井在中低含水阶段,因套损关井,从而形成剩余油潜力区。

(3)厚油层顶部滞留型剩余油。由于厚油层层内存在夹层以及渗透率的差异,使得注入水沿油层底部高渗带推进,而在厚油层顶部注入水未波及或波及程度很弱,从而形成剩余油。如樊家

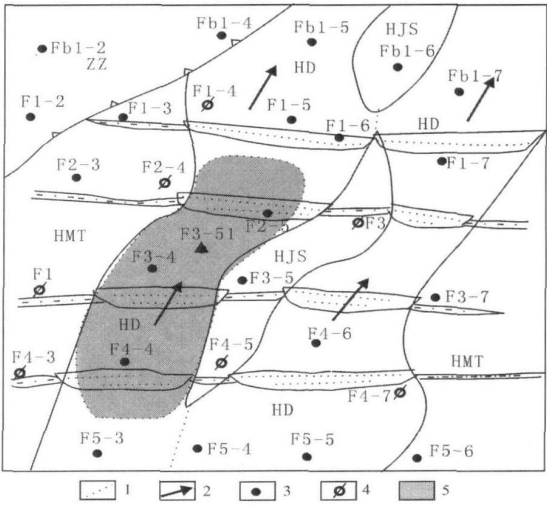


图 2 $y^{9^{1-1}}$ 砂体注采不完善形成剩余油分布

Fig.2 The distribution of the remaining oil caused by faultiness in injection-production in $y^{9^{1-1}}$ sand body

1. 河道边界; 2. 水流方向; 3. 油井; 4. 注水井; 5. 剩余油富集区。HD: 河道; ZZ: 岸后沼泽; JKS: 决口扇; HDJ: 河道间; HJS: 河间席状砂; HMT: 河漫滩

川油田 1999 年以后投产的新樊 11-3、樊 8-71、樊 3-51 等井均射开厚油层顶部,这些井投产初期含水都比较低,表明油层顶部存在一定的剩余厚度。

(4)河道拼接带或河道边部不规则处剩余油。在以多条河道砂体拼接组合的大面积分布砂体中,在大排距、稀井网注采条件下,由于注入水优先沿每条河道的主体带推进,而在不同河道砂的拼接带留下一条带状剩余油。同时对单一河道砂体局部地区边部曲折多变,水驱效果差形成剩余油。如樊家川油田 $y^{9^{1-2}}$ 单元的樊 1-3、樊 7-7、樊 8-7、樊 11-5、樊 11-21 等井由于位于主体河道的边部,尽管经历 10 余年的开采,但这些井含水相对较低,目前含水一般都低于 65%。

(5)井间微型正向构造内剩余油。河流相储层,特别是辫状河、网状河储层砂体,由于古地貌差异及差异压实作用,微型正向构造极其发育,受油水重力差作用,注入水或边水很难推进到构造高部位而形成水动力滞留带区,剩余油富集。如樊家川油田 1999 年投产的樊 8-71、樊 3-51 两口井均处于构造高部位,投产后初含水低于 2%,日产油均在 5 t 以上。对樊家川油田从 1999 年以后投产的 13 口新井初含水及日产油量统计,生产效果好的井均处在构造高点处,并且大部分井点处在滞留区,而且没有经过压裂措施改造。

(6)断层遮挡性剩余油。在封闭断层附近,由于注入水驱替不到而形成剩余油富集区,应通过打定向井来挖潜这种剩余油。樊家川油田断层不发育,未形成此类剩余油。

(7)层间干扰型剩余油。在多层合注合采情况下,由于层间非均质性,在同一生产压差下,低渗透层难以动用,从而形成剩余油富集区。如樊家川油田樊 10-2 井区樊 10-2 井合注 y^{9^1} 和 y^{9^2} ,根据 1995~1997 年吸水剖面资料,受 y^{9^2} 层间干扰同井组 y^{9^1} 层储量动用程度低。2000 年距樊 10-2 井 200~400 m 的调整井新樊 11-3 井射开 y^{9^1} 层,日产油 12.4 t,含水 4.6%;樊 11-21 井射开 y^{9^1} 层,日产油 7.5 t,含水 4.6%。

(8)呈片分布差油层型剩余油。在河道砂主体内部、边缘或外部,通常有大量溢岸相薄砂体分布。这类决口扇、溢岸沉积薄砂层一般分布大于两个井距,物性较差,测井解释常常为差油层,在合采合注条件下,受到主体河道砂体平面或层间干扰,或注采压力太小而不能动用或动用较差,形成剩余油。大庆北部河流相储层研究表明这类成片差油层类的剩余油占整个剩余油潜力的 40% 左右。樊家川油田樊 8-6 井区分布 y^{9^1} 期河漫滩相成片差油层,由于注入水沿南北向主河道推进,此处形成绕流区,剩余油富集。1999 年后的调整井证实此点,樊 8-71 井射开 y^{9^1} 层,日产油 5.1 t,含水 1.1%。

(9)低渗透层遮挡或主体砂边缘上倾尖灭形成剩余油。平面上连续性和连通较好的同一油层在局部物性变差,形成低渗透遮挡,甚至在构造低部位形成剩余油富集区。樊家川油田樊 11-21 井位于构造边部,由于低渗透层遮挡,注入水难以波及形成低渗透层遮挡型剩余油,2000 年射开 y^{9^1}

层,日产油 7.5 t,含水 4.6%。

另一方面,受河流相沉积条件及压实作用控制,许多河道砂体边缘具有上倾尖灭特征。它们不仅原始含油,而且是注水开发后期油藏内分散相剩余油重新聚集的场所,因而通常为剩余油潜力区。如樊家川油田樊 10-51 井的 $y^{9^{1-1}}$ 单元,由于尖灭区遮挡,在樊 10-51 井区形成剩余油,射开后初含水为 7.3%,日产油 5.5 t。

(10)滞留区型剩余油。行列式或面积井网中,在注水井之间、集团状采油井之间及边水与注水井之间存在压力平衡区,形成滞留性剩余油。对樊家川油田从 1999 年以后投产的 13 口新井初含水及日产油量统计,生产效果好的井 60% 井点在滞留区,而且没有经过压裂措施改造。其次,该油田采用反九点法面积注水方式,边角井间存在一定滞留区;同时由于部分井区井网不规则,在反九点法井网单元的锐角区三口油井间,如樊 4-4、樊 5-3、樊 5-4 间;樊 6-4、樊 7-4、樊 7-5 间,存在剩余油富集区。

(11)切叠性厚油层的上部河道单元及不同河道砂体连通时,处于较高层位的河道砂中滞留性剩余油。由于不同期的河道砂体掘蚀和叠合,上下河道砂常互相窜通,上部单元注入水在重力作用下,部分进入下部单元,使下部单元砂体受到更好的注水效果而上部单元形成剩余油。其次,同期不同河道或不同期河道相互切叠,位置较高的河道砂体一般未水淹,形成剩余油。如樊家川油田 1999 年以后投产的新樊 11-3、樊 10-51、樊 3-51 等井均射开叠合性厚油层油层顶部,这些井投产初期含水都比较低,表明油层顶部存在一定的剩余厚度。

(12)泥岩夹层遮挡形成局部滞留剩余油。根据点砂坝半连通体沉积模式,河流相油层主体——点砂坝体内部通常分布有丰富的侧积或溢岸成因的泥片、泥楔或泥层,呈斜切、横切、复切、直切等方式分布于点砂坝体内,造成众多屏蔽滞留剩余油,在主力油层水洗后,其内部仍有此类剩余油存在,但呈高度分散状况。水平井技术可有效地开采点砂坝内一组同相泥屑遮挡形成的剩余油。

(13)水洗区分散相剩余油。分散相剩余油即油层水洗后残存于注水波及区油层孔隙中的剩余油,多呈膜状、滴状散布于油层中,是当今三次采

油的主要对象。

2 河流相储层砂体剩余油分布模式

2.1 单一河道砂体垂向上剩余油分布模式

河道砂体是河流相储层主要的砂体成因类型, 渗透率分布主要以正韵律为主, 存在严重的层内非均质性, 因而控制和影响单砂层垂向上注入水波及体积和层内剩余油分布。对于单期河流形成的厚层砂体来讲, 正韵律下部高渗主力油层段主要为分散相剩余油分布区, 也存在大量的但难以发现的泥岩遮挡滞留型剩余油区; 而在正韵律上部低渗段, 则为近于原始状况的剩余油, 上下部分为含油饱和度渐变的过渡区(图 3)。但对复杂正韵律而言, 层内剩余油的分布也出现多段富集的状况, 并不总是位于中上部。从理论上讲, 均质韵律驱油效率高, 剩余油不富集; 复合韵律比较复杂, 剩余油在上部及下部都可富集。此外层内夹层的发育使剩余油分布进一步复杂化, 造成强水淹和弱水淹间互产出, 夹层下部附近驱油效率远低于其他区域, 在高含水后期, 形成死油区。

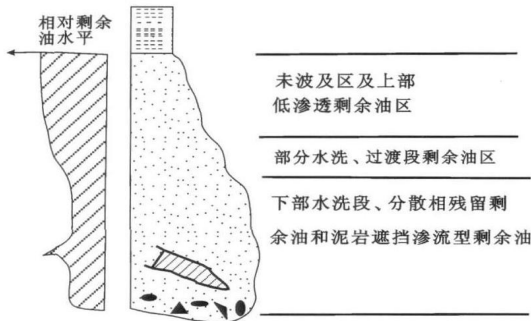


图 3 河道砂体剩余油垂向分布模式

Fig.3 The vertical distribution mode of the remaining oil in the channel sand
(据董冬 2000 年资料修改)

2.2 河道砂体走向剩余油分布模式

带状河道走向也存在渗流的差异性, 剩余油分布表现出规律性的变化。带状河道砂体实际上是由若干点砂坝砂体拼合而成, 其间常有废弃泥岩楔斜向分布, 沿河道砂体走向连通性具有多变特征, 即不完全连通。因此, 沿河道砂体走向剩余油分布具有强烈的不均一性, 很可能每一个点砂坝内部都具有独特的剩余油分布^{[6]、[7]}。考虑侧积面泥层具有与侧积面一致的侧凸形态及点坝间斜列泥岩体的产状特征, 并结合河道砂体内流体

沿走向的优势渗流趋势^{[8]、[9]}, 综合推论各点坝体凸侧外缘是大型滞留性剩余油分布的有利部位, 彼此沿走向组合为断续折线形的宏观组合趋势^{[10]、[11]}(图 4)。



图 4 沿河道砂体走向剩余油分布模式

Fig.4 The longitudinal distribution mode of the remaining oil in the channel sand

2.3 储层横向结构及剩余油分布模式

河流相储层在横剖面上多具中厚边薄的透镜状, 高孔渗区主要集中于砂体中央近下部的点坝相^{[12]、[13]}。在该区分散相剩余油及泥岩楔遮挡滞留性剩余油零星分布。在砂体外缘拼接有堤岸及决口扇、废弃河道薄砂层, 物性变差, 在此处发育低渗薄层性剩余油; 在河道砂体两侧, 则为渗透率尖灭型剩余油发育区。图 5(A) 给出了河流相砂体横向结构概念模型, 图 5(B) 为对应水驱后剩余油分布的概念模型。

2.4 河流相储层空间剩余油分布模式

通过平面及垂向上研究河流相储层砂体非均质性 & 剩余油分布, 总结出河流相储层垂向及平面剩余油分布模式(图 6, 图 7), 即高含水期河流相储层砂体尚留有原始储量的 60%~70% 左右的剩余油^{[14]~[16]}。在纵向上, 剩余油分别呈分散相、片状、集合块状连续层状分布于单砂体不同部位。其中对每个厚层河道砂油层而言, 下部粗粒(河床滞留及点坝相)内的水洗部位主要是分散相剩余油或泥楔滞留性剩余油; 中部为过渡段, 部分水洗; 上部粉砂岩及泥岩(堤岸及河漫亚相)部分水洗及未水洗, 主要为层状低渗剩余油, 渗透性差异较大的不同砂体之间由于层间干扰形成层间干扰型剩余油。在平面上, 河道砂主体侧缘主要为

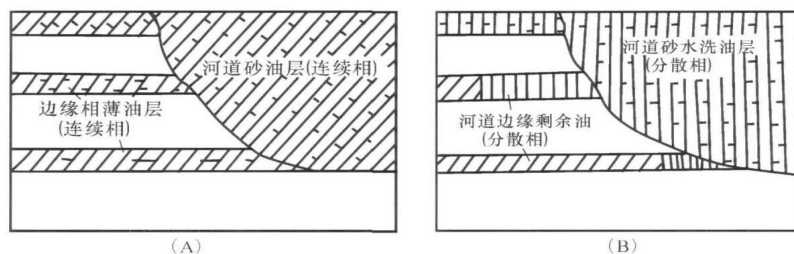


图 5 河流相储层横向结构及剩余油分布概念模式

Fig. 5 The transverse framework and the distribution mode of the remaining oil in the fluvial reservoirs

1. 连续相河道边缘薄油层; 2. 连续相河道砂油层; 3. 分散相河道砂水洗油区; 4. 分散相河道边缘剩余油

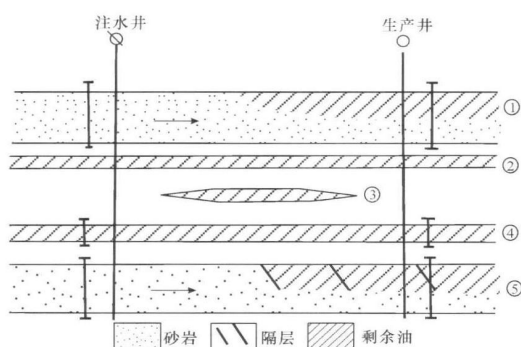


图 6 河流相储层垂向剩余油分布模式

Fig. 6 The vertical distribution mode of the remaining oil in the fluvial reservoirs

①层内非均质性形成剩余油; ②隔层损失形成剩余油; ③井间未钻遇砂体形成剩余油; ④层间干扰形成剩余油; ⑤隔层遮挡形成剩余油

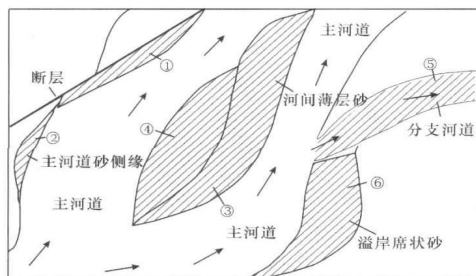


图 7 河流相储层剩余油平面分布模式

Fig. 7 The the plane distribution mode of the remaining oil in the fluvial reservoirs

①断层遮挡形成剩余油; ②主河道侧缘形成剩余油; ③河间薄层砂富集剩余油; ④河道砂注采不完善富集剩余油; ⑤分支河道控制不住型剩余油; ⑥溢岸席状砂富集剩余油

决口扇或溢岸成因的薄层近未水淹剩余油层和上倾尖灭型剩余油; 而在河流相复合砂体的任何部位, 都可能存在被漏掉的微砂体、微构造型、外延断棱型剩余油。

3 结论

(1) 河流相储层在高含水期剩余油分布极为分散和隐蔽, 根据形成机理及分布规律可划分为 13 种成因类型, 较前人分类更为精细, 与剩余油挖潜的生产实践相适应。其中井网未控制型剩余油、注采不完善型剩余油、层间干扰型剩余油、呈片分布差油层型剩余油、微正向构造控制剩余油是注水开发后期主要挖潜的对象。

(2) 高含水期河流相储层砂体, 垂向上正韵律下部高渗主力油层段主要为分散相剩余油分布区; 而在正韵律上部低渗段, 则为近于原始状况的剩余油。沿带状河道走向, 各点坝体凸侧外缘是大型滞留型剩余油分布的有利部位。

(3) 高含水期河流相储层砂体尚留有原始储量的 60%~70% 左右的剩余油。不同渗透性的砂体之间由于层间干扰形成层间干扰型剩余油; 河道砂主体侧缘主要为决口扇或溢岸成因的薄层近未水淹剩余油层和上倾尖灭型剩余油; 而在河流相复合砂体的任何部位, 都可能存在被漏掉的微砂体、微构造型、外延断棱型剩余油。

[参 考 文 献]

- [1] 刘国旗. 河流相多层砂岩油藏剩余油描述及挖潜技术[J]. 大庆石油勘探与开发, 2001, 20(5): 34—37.
- [2] 刘建民. 河流成因储层剩余油分布规律及控制因素探讨[J]. 油气采收率技术, 2000, 10(4): 50—53.
- [3] 于洪文. 大庆油田北部剩余油研究[J]. 石油学报, 1993, 14(3): 172—180.
- [4] 吕晓光. 厚油层平面非均质性挖潜方法探讨[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(4): 58—71.
- [5] 赵霞飞. 河流相模式与储层非均质性[J]. 成都理工学院学报, 1999, 26(4): 357—364.
- [6] 董冬. 河流相储层剩余油类型及分布规律[J]. 油气采

- 收率技术, 1999, 6(3): 39—46.
- [7] 魏兵. 应用储层流动单元研究高含水油田剩余油分布[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 403—410.
- [8] 魏纪德. 大庆油田剩余油的影响因素及分布[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(1): 57—59.
- [9] 陈程. 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.
- [10] 陈亮. 严重非均质油藏高含水期剩余油研究进展[J]. 石油大学学报, 1996, 20(6): 101—105.
- [11] 林成焰. 剩余油形成与分布[M]. 北京: 石油大学出版社, 2000.
- [12] ABBOTS F V, VAN KUIJK A D. Using 3D Geological Modelling and Connectivity Analysis to Locate Remaining Oil Targets in the Brent Reservoir of the Mature Brent Field[A]. SPE 38473.
- [13] McDOUGALL S R, SORBIE K S. The Impact of Wettability on Waterflooding: Pore-Scale Simulation [A]. SPE 25271.
- [14] RACKLEY S A, TANNEMAAT R J. Analysis of Uncertainties in Applying the Waxman-Smiths Equation to the Determination of Remaining Oil Saturation[A]. SPE 17687.
- [15] CHANG M M, MAEREFAT N L, TOMUTSA L, et al. Evaluation and Comparison of Residual Oil Saturation Determination Techniques [A]. SPE 14887.
- [16] BLACKWELL R J. An Overview of In-Situ Methods for Determining Remaining Oil Saturations[A]. SPE 13702.

Genetic type and distribution mode of the remaining oil in the fluvial reservoirs

FU Guo-min^{1,2}, DONG Dong³, WANG Feng¹, DONG Man-cang⁴

1. The Resource College in Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. The Zhongyuan Oilfield Postdoctoral Workstation, Puyang 710054, China;

3. The Daming Conglomerate Corporation of Shengli Oilfield, Dongying 257061, China;

4. Yanchang Oil Field Stock Company, Yanan 716000, China

Abstract: This paper studies the genetic type and distribution mode of the remaining oil in the fluvial reservoirs in the Fanjiachuan oilfield of Ordos Basin by comprehensively analyzing exploitation geology and dynamic information of production. The remaining oil in the fluvial reservoirs is subdivided to 13 genetic types, in which the type not controlled by well net, the type of faultiness in injection-production, the type caused by disturbance in bed, the type of bad reservoirs distribution in patch, and the type controlled by tiny positive direction structure are the objects of the main digging potentials. In the vertical, the remaining oil is distributed over different parts of the single sand body in the forms of separate, patch, aggregate block and layer form, and in the different penetrability sand bodies, there exists the remaining oil of the type caused by disturbance in bed. In the plane, there exist the thin layer and no-water flooding remaining oils caused by crevasse splay and overflow bank and the updip wedge-out type remaining oil in the side of the main channel sand. However, there may exist the fine omitted sand body, the fine construction and extensive fault ridge remaining oil in any part of the fluvial facies complex sand body.

Key words: remaining oil; genetic type; distribution mode; fluvial facies; Fanjiachuan oilfield