

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.05.009

浅水湖盆三角洲前缘砂体空间结构及 剩余油分布模式

徐 慧,何岩峰,陶 磊,王 相,窦祥骥

(常州大学 石油工程学院,江苏 常州 213164)

摘要:以 SP 油田葡萄花油层葡 I 油组为例,研究了基准面的变化以及旋回类型,并分析了对剩余油分布的影响。结果表明:葡 I 油组可分为一个长期基准面上升半旋回、一个中期基准面上升半旋回和一个中期基准面下降半旋回、5 个短期基准面向上变深又变浅的对称旋回以及 3 个短期基准面变深的非对称旋回;浅水三角洲水下分流河道砂体频繁改道,形成复杂的空间结构。研究区的砂体垂向叠加模式可分为两端厚中间薄下部连通、一端薄中间及一端等厚上部连通、两端薄中间厚上部连通、近似等厚连通等 4 种;平面上砂体叠加模式可分为连片式、交切条带式及孤立条带式 3 种。受基准面变化的影响,垂向上剩余油主要富集在砂体较薄及夹层遮挡的部位。平面上剩余油主要分布在背物源方向及分流河道部位。

关键词:基准面旋回;分流河道砂体;空间结构;剩余油

中图分类号:TE 122

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2020)05-0067-09

Spatial Structure of Sand Body and Remaining Oil Distribution Model in Delta Front of Shallow Lake Basin

XU Hui, HE Yanfeng, TAO Lei, WANG Xiang, DOU Xiangji

(School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Taking PI oil group of Putaohua reservoir in SP oilfield as an example, the variation of base level and cycle type are studied, and the influence on remaining oil distribution is analyzed. The results show that the PI oil group can be divided into a long-term baseline rising half-cycle, a medium-term baseline rising half-cycle and a medium-term baseline falling half-cycle, five short-term baseline upward deepening and shallow symmetrical cycles and three short-term baseline deepening asymmetrical cycles. Shallow water delta underwater distributary channel sand bodies frequently divert, forming complex spatial structure. The vertical overlapping modes of sand bodies in the study area can be divided into four types. Two ends are thick with thin middle and connecting bottom, one end is thin as

收稿日期:2020-04-28。

作者简介:徐慧(1984—),男,山东济宁人,博士,讲师。E-mail: xuhui@cczu.edu.cn

引用本文:徐慧,何岩峰,陶磊,等.浅水湖盆三角洲前缘砂体空间结构及剩余油分布模式[J].常州大学学报(自然科学版),2020,32(5):67-75.

well as middle and the other end are equally thick with connecting top; two ends are thin with thick middle and connecting top; whole connection with approximately equal thickness. The overlapping modes of sand bodies in the plane can be divided into three types, the connection type, the intersection strip type and the isolated strip type. Affected by the change of datum level, the remaining oil in vertical direction is mainly concentrated in the thinner sand body and the sheltered part of interlayer. On the plane, the remaining oil mainly distributes in the direction of back provenance and distributary channel.

Key words: base level cycle; distributary channel sand body; spatial structure; residual oil

1 油藏概况

SP 油田葡萄花油层油藏埋深为 1 420~1 550 m, 平均厚度 53.9 m。沉积单元砂体平均厚度为 2.09 m, 大于 3 m 砂层仅占 16.6%, 平均有效厚度仅有 1.6 m。平均渗透率为 192 mD, 平均孔隙度为 23%。原始地层压力 13.6 MPa, 饱和压力 5 MPa, 地面原油密度 0.867 8 t/m³, 原油体积系数 1.078; 原始溶解气油比为 20.65 m³/t, 地下原油黏度 9.9 mPa·s, 是一个中孔、中低渗、低饱和的窄薄砂体油藏。

该油藏 1987 年 10 月依靠天然能量开发, 1989 年 9 月采用 350 m×350 m 反九点法面积井网进行注水开发, 经过三批加密, 截至 2017 年 12 月, 综合含水率已达 87.6%, 步入高含水后期, 采出程度仅为 20.4%, 单井日产油不足 1.0 t/d。储层砂体分布零散, 叠置类型认识不清, 导致剩余油分布规律不明确, 降水增油难度较大。研究该储层砂体空间结构, 有利于总结浅水湖盆三角洲前缘砂体叠加样式, 明确剩余油分布规律, 对下一步的生产挖潜提供依据。

2 基准面旋回划分

葡萄花油层属于浅水三角洲沉积体系, 处于三角洲前缘, 水下分流河道是其主要储集类型^[1-2]。葡萄花油层经历了湖盆萎缩又扩张的过程^[3], 主力层复合河道砂体宽度 600~800 m, 非主力层河道砂体的宽度一般为 300~400 m。分流河道窄薄, 分叉改道频繁, 形成了复杂的空间结构。在三角洲内前缘的水陆交互带区域, 由河流频繁改道, 多期叠汇而形成。一般厚度较大, 分布面积较广。短暂间歇期所沉积的泥往往由于较强烈的冲刷作用而难以保留, 造成砂体内部夹层发育较弱^[4]。研究区 3 沉积单元近三角洲平原的水陆交互带区域多发育该类型的砂体。主要由于 3 沉积单元沉积时期处于基准面上升早期, 可容纳空间较小, 河流能量较强, 冲刷切叠严重, 形成了大片连通的砂体。复合砂体较厚, 单个砂体向上粒度逐渐变细、厚度逐渐减薄, 底部保存不完整, 基本不发育泥质隔层^[5]。在三角洲内前缘的前端, 由于搬运能力减弱, 砂体逐渐变成窄条状, 与上一期的砂体形成切叠关系, 短暂间歇期沉积的泥部分被保留下来, 造成砂体连通性变差, 对注水开发起到一定的遮挡作用。研究区大部分发育的是该类型的砂体, 在基准面上升或下降的时期均发育。由于可容纳空间相对较大, 河流能量较弱, 沉积物有间歇暴露和弱冲刷侵蚀作用, 形成枝状弱连通的砂体类型。在三角洲外前缘欠补偿区域, 水体较深, 搬运能力进一步减弱, 细粒的砂沉积下来, 形成孤立砂体^[6]。

2.1 长 期

岩性上, 葡 I 油组内部泥岩主要是灰色、灰绿色和杂色块状泥岩, 葡 I 油组以外泥岩变为深灰色水平层理, 不明显页理泥岩; 电测曲线上, 葡 I 油组顶底界处声波曲线值突然增大; 古生物资料上, 葡 I 油组上下泥岩中富含介形虫, 葡 I 油组内部罕见介形虫; 沉积环境上看, 葡 I 油组顶、底界处存在河流三角

洲相到半深湖、深湖相沉积环境上的突变。葡萄花油层底面为一平行不整合面,在地震剖面上相当于松辽盆地 T1-1 反射层^[7]。

2.2 中 期

整个葡 I 油组是一个水体变浅后又变深的过程,界面以下,砂岩厚度由下而上厚度增大,砂泥比增加, A/S 比增加,为中期基准面下降半旋回,界面以上砂岩厚度由下而上厚度减小,砂泥比减小, A/S 比减小,为中期基准面上升半旋回,上下油组的分界面处为一个基准面旋回的转换面;其次,界面处发育疏松的杂色泥岩,如图 1 所示。

2.3 短 期

短期基准面旋回是高分辨率层序地层格架建立和分析的基础地层单元,其识别主要通过岩心、测井、露头等综合资料判定^[8]。一个完整的短期基准面旋回是由代表基准面上升半旋回和下降半旋回的岩石记录构成,但受可容空间与沉积物供给速率比值的控制,经常发育只代表上升期或只代表下降期的不对称半旋回。其界面可以是侵蚀不整合面或无沉积作用面,也可以是与之对应的连续沉积界面,其识别标志主要是垂向岩相组合和界面接触关系^[9]。

2.3.1 向上变深又变浅的对称旋回

向上变深又变浅的对称旋回主要分布于三角洲平原的溢岸砂和分流间湾微相、三角洲前缘的席状砂和席间泥微相、水下分流河道和道间泥微相的交互区域。主要在高可容纳空间、基准面上升幅度大而下降幅度小、沉积速率低于可容纳空间的增大速率的条件下形成。

2.3.2 向上变深非对称旋回

向上变深的非对称旋回主要分布于三角洲前缘的水下分流河道微相区域,进一步细分为低可容纳空间和高可容纳空间 2 种亚类型。高可容纳空间向上变深的非对称型短期基准面旋回岩性岩相组合保存相对完整,单期砂体较厚,单砂体间的切叠关系较弱,以垂向加积为主,表现为多个向上变细、变薄的河道叠置。低可容纳空间向上变深的非对称型短期基准面旋回,多期砂体切叠,剥蚀严重,旋回沉积记录保存不完整,单期砂体厚度较薄,仅保留底部少量水下分流河道沉积物^[10-11]。

对于上升半旋回,地层基准面持续上升,可容纳空间增长速率与沉积物供给速率的比值持续增大,使得北部物源所携带的碎屑物质不断向陆方向退积,沉积相向陆方向迁移,因而沉积微相演化序列从三角洲平原的溢岸砂→分流间湾→三角洲前缘的水下分流河道→席状砂→席间泥微相到演化,如图 2 所示。

对于下降半旋回沉积,则呈现相反的规律。随着地层基准面持续下降,可容纳空间增长速率与沉积物供给速率的比值小于 1,使得北部物源所携带的碎屑物质不断向湖方向进积,沉积相向陆方向迁移,因而沉积相演化序列呈反向演化,向下物性越来越差,如图 3 所示。

3 砂体叠加模式

3.1 垂向叠加模式

由于基准面上升、下降的变化以及三角洲前缘不同区域的河道的切叠作用等因素影响,复合砂体内部单期砂体存在多种空间结构。

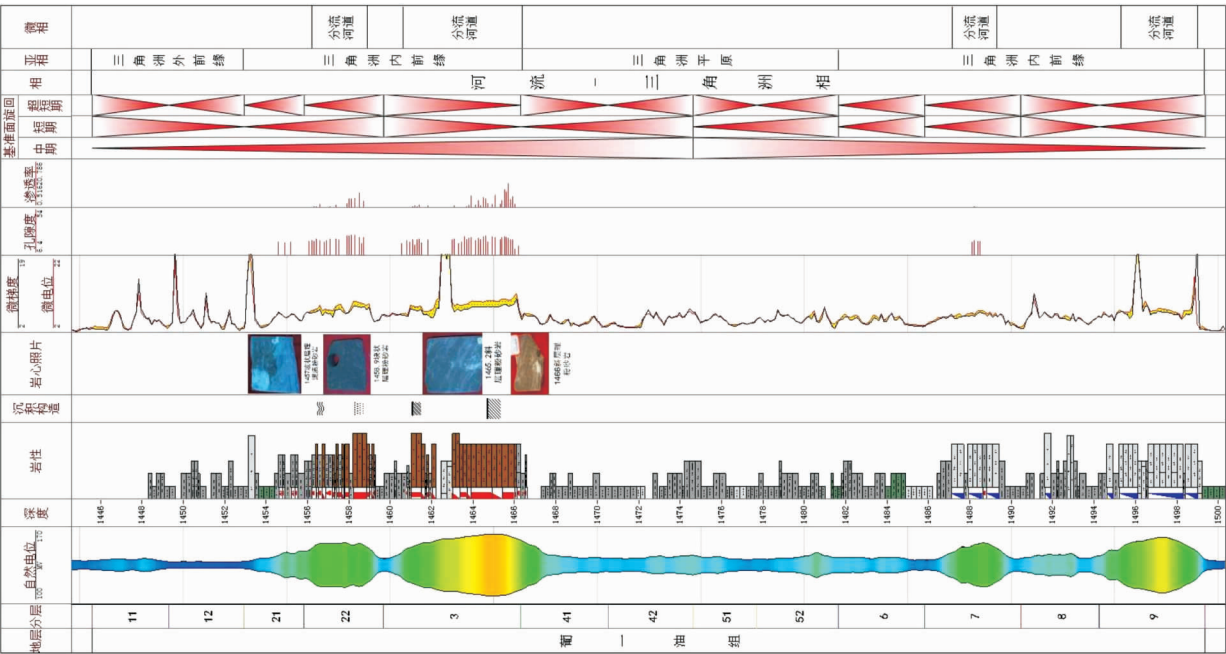


图 1 S29-J17 井葡 I 油组基准面旋回划分方案

Fig.1 Baseline cycle division scheme of PI oil formation of well S29-J17

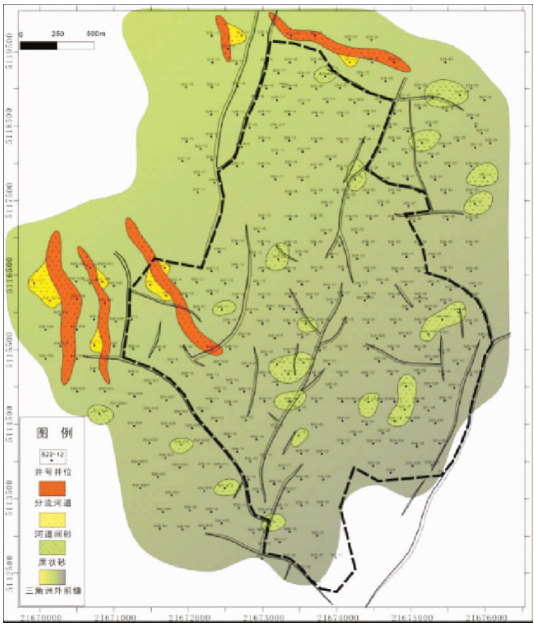


图 2 1₁单砂体平面分布图

Fig.2 Single sand body plane distribution map of 1₁

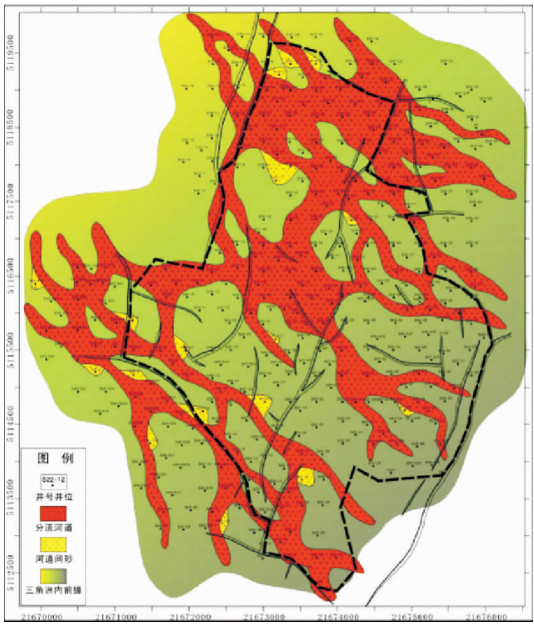


图 3 3₃单砂体平面分布图

Fig.3 Single sand body plane distribution map of 3₃

3.1.1 基准面上升时期

1)两端不等厚,中间薄

平行物源方向,由于基准面上升,可容纳空间逐渐增大,沉积速度减小,后期河道砂体逐渐向物源方向偏移,延伸长度变短,厚度减薄,物性变差,局部范围内砂体内部夹层发育,如图 4 所示。

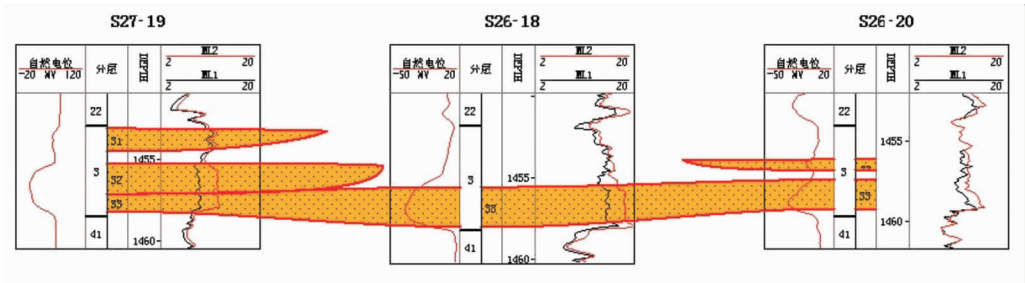


图 4 S27-19 井—S26-20 井连井砂体剖面

Fig.4 Continuous well sand body profile form Well S27-19 to S26-20

2)近似等厚

可容空间增大,河道迁移交切严重,在三角洲内前缘区域,形成近似等厚的砂体叠加模式。如 3¹单砂体底部发育钙质夹层,展布范围 1~2 井距,如图 5 所示。

3.1.2 基准面下降时期

1)无切叠一端薄,切叠一端等厚,上部连通

该类型砂体发育于基准面下降晚期,可容纳空间逐渐减小,沉积速度逐渐增大,河道切叠频繁,单砂体间夹层基本不发育,砂体内部连通性较好,如图 6 所示。

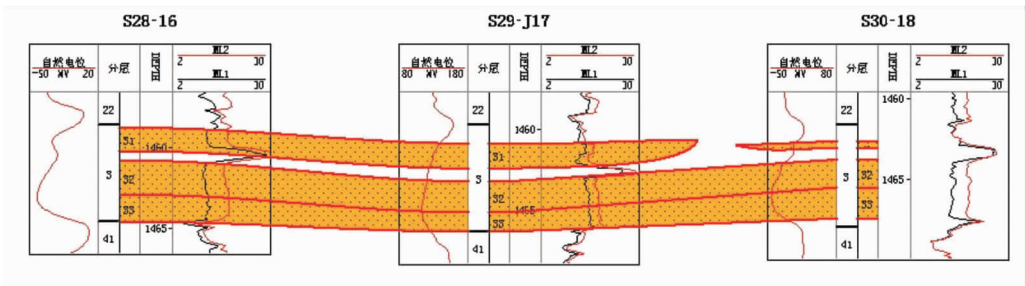


图 5 S28-16 井—S30-18 井连井剖面

Fig.5 Continuous well sand body profile form Well S28-16 to S30-18

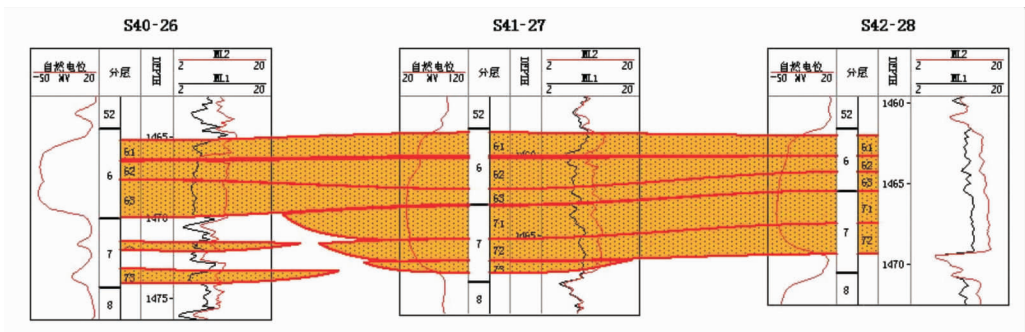


图 6 S40-26—S42-28 井连井砂体剖面

Fig.6 Continuous well sand body profile form Well S40-26 to S42-28

2)两端薄,中间厚,上部连通

由于不同分支河道的能量、迁移路径等区别,形成了与类型(1)不同的叠加方式,如图 7 所示。

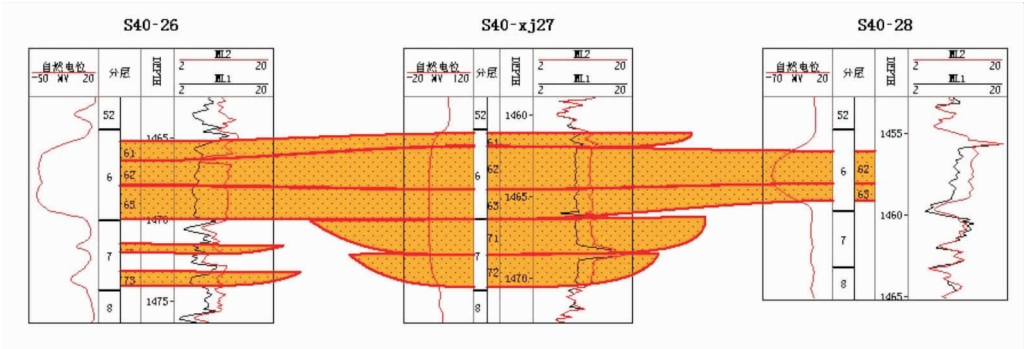


图 7 S40-26—S40-28 井连井砂体剖面

Fig.7 Continuous well sand body profile form Well S40-26 to S40-28

3.2 平面叠加模式

1)连片式。砂体叠置样式为垂向上多期分流河道相互切叠、侧向上单期分流河道砂体发生多次侧向迁移而形成的多期叠置厚砂体分布样式。该样式砂体规模较大,因砂体间交切频繁,很难保存单一成因完整的分流河道,分流河道之间泥质隔夹层不发育,总体呈连片式产出。该样式主要发育在中期基准面上升半旋回的下部,形成叠置连片的砂体。

2)侧向交切条带式。砂体叠置样式为垂向上单层分流河道呈叠加式、侧向上分流河道多次迁移形成的砂体分布样式。侧向上由主干分流河道与汉道侧向迁移,形成横向延伸较远的连续砂体。该样式主要发育在中期基准面下降半旋回的上部或上升半旋回的下部。

3)孤立条带式。砂体叠置样式为垂向上单层分流河道砂体呈孤立式、侧向上基本无迁移的砂体分布样式。泥质隔夹层非常发育,砂体呈孤立透镜状分布于泥岩中,呈“泥包砂”特征。该样式主要发育在三角洲前缘沉积欠补偿区,三角洲发育初期水系较简单时期或三角洲发育末期萎缩阶段,如图 8 所示。

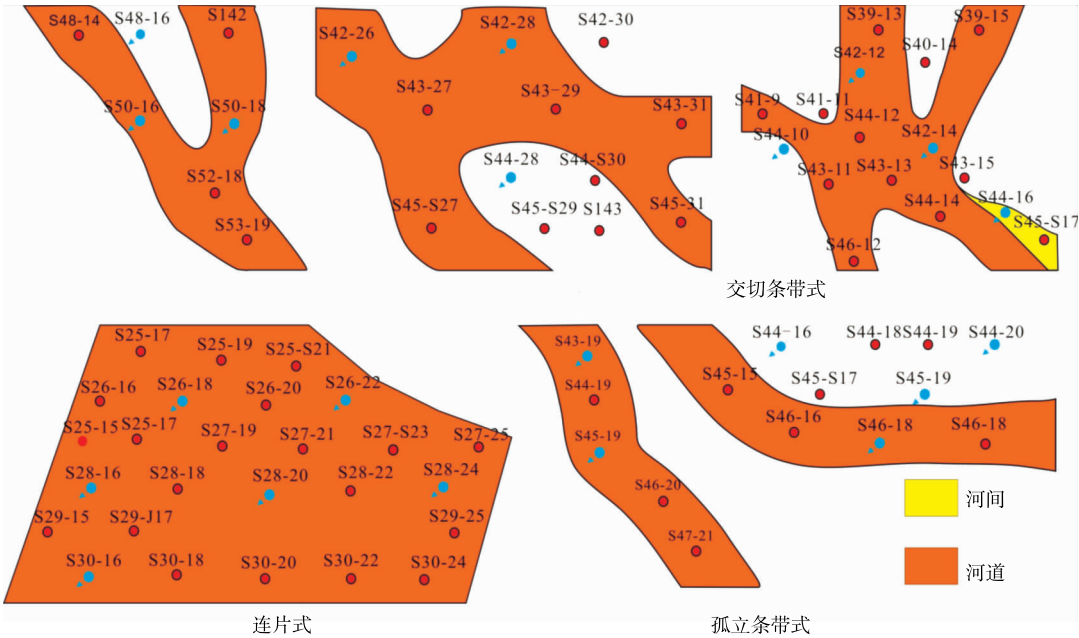


图 8 平面砂体分布样式

Fig.8 Distribution style of planar sand body

4 剩余油分布模式

4.1 垂向剩余油分布模式

4.1.1 两端厚,中间薄,下部连通

S26-18 井为注水井,在放大注水量的过程中,左侧的 S27-19 井表现出更明显的受效效应,而 S26-20 井受效效应较弱,说明 S27-19 井是主要的水淹方向,水淹程度大于 S26-20 井方向。对于该类型的复合砂体,注入水主要沿着砂体厚度较大的方向运移,而厚度较小的一侧受注入水波及较弱(图 9)。

4.1.2 近似等厚

29-J17 井 3 沉积单元受垂向上夹层的影
响,夹层下部水淹严重,但夹层上部未水淹。说
明尽管连同两侧水井的砂体厚度较大,但夹层
依然遮挡了注入水的波及,造成了夹层上部剩
余油富集,见表 1。

4.1.3 一端薄,中间及一端等厚,上部连通

井。S41-27 井的取芯结果显示,6 小层的所有砂体和 7¹ 砂体水淹,下部砂体受泥质夹层的遮挡,未水淹。这说明,S40-26 井的注入水先沿 6 小层推进,然后受重力作用影响,下部逐渐水淹,水洗厚度较大,水洗程度相对均匀,见表 1。

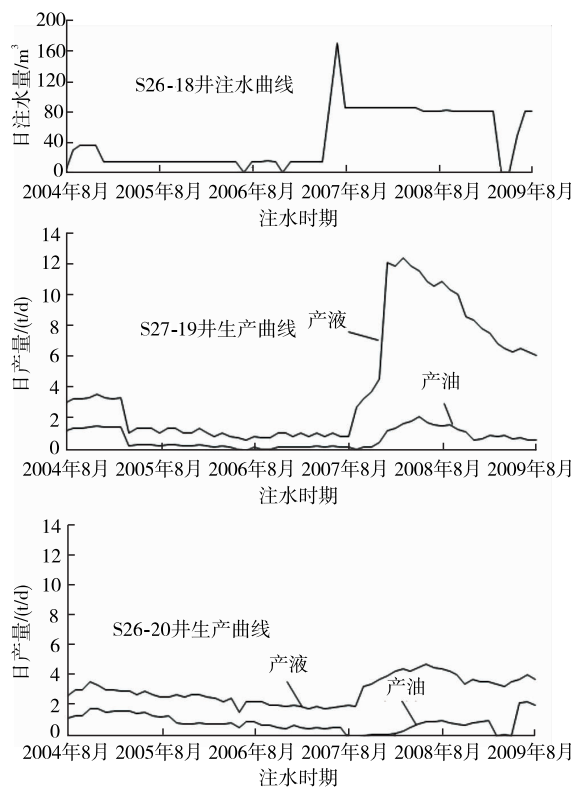


图 9 S26-18 井组注采曲线

Fig.9 Injection-production curve of S26-18 well group

表 1 S29-J17, S41-27 井井岩心水淹状况图

Table 1 Core waterflooding chart of well S41-27 and S29-J17

井号	SP/mV 100 ■ 180 GR/API 50 ■ 150	微梯度/ ($\Omega \cdot m$) 0 ■ 30 微电位/ ($\Omega \cdot m$) 0 ■ 30	岩性	孔隙度/% 15 ■ 30	渗透率/mD 0.01 ■ 1000	剩余油饱和度/% 0 ■ 100	水洗情况
S29-J17							未水洗 弱水洗 中水洗 强水洗
S41-27							未洗 中洗

4.1.4 两端薄,中间厚,上部连通

S40-26 井为注水井,S40-28 井均为采油井。S40-XJ27 井取芯结果表明,6 和 7 小层的砂体均发生了中-强程度的水洗,说明注入水同样受惯性力和重力作用,向 S42-28 井方向运移。同时说明 7¹砂体和 7²砂体间的钙质夹层展布范围极小,并未隔开两个单砂体,见表 2。

4.2 平面剩余油分布模式

对于连片式砂体而言,由于平面上河道交切频繁,且夹层多不发育或弱发育,平面上,向物源一侧物性较好,背物源一侧物性略差,注入水沿着向物源一侧波及较强,背物源方向剩余油相对富集。

对于交切式砂体而言,沿着主河道方向,注入水波及较强,分支河道方向,波及较弱,剩余油主要富集在分支河道。

对于孤立式砂体而言,向物源一侧注入水波及较强,背物源方向注入水波及较弱,如图 10 所示。

表 2 S40-XJ27 井岩心水淹状况图
Table 2 Core waterflooding chart of well S40-XJ27

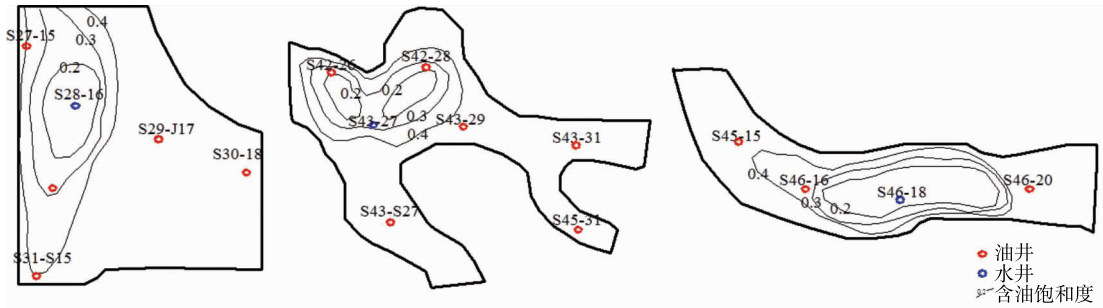
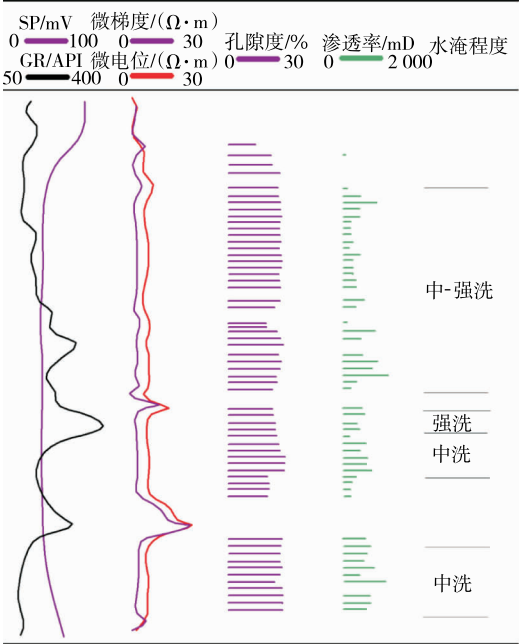


图 10 平面剩余油分布图
Fig.10 Residual oil plane distribution map

5 结 论

- 1) 葡 I 油组可分为一个长期基准面上升半旋回、一个中期基准面上升半旋回和一个中期基准面下降半旋回、5 个短期基准面向上变深又变浅的对称旋回以及 3 个短期基准面变深的非对称旋回。
- 2) 受基准面异旋回和河道自旋回的影响,研究区的砂体垂向叠加模式可分为两端厚中间薄下部连通、一端薄中间及一端等厚上部连通、两端薄中间厚上部连通、近似等厚连通等 4 种;平面上砂体叠加模式可分为:连片式、交切条带式、孤立条带式等 3 种。
- 3) 受基准面变化的影响,垂向上剩余油主要富集在砂体较薄及夹层遮挡的部位。平面上剩余油主要分布在背物源方向及分流河道部位。

参考文献:

- [1]刘媛,朱筱敏,袁红旗,等.三肇凹陷白垩系姚一段葡萄花油层浅水三角洲高分辨率层序地层新认识[J].中国石油大学学报(自然科学版),2010,34(4):7-12.
- [2]楼章华,卢庆梅,蔡希源,等.湖平面升降对浅水三角洲前缘砂体形态的影响[J].沉积学报,1998,16(4):27-31.
- [3]史超群,鲍志东,方松,等.松辽盆地大安油田葡萄花油层沉积微相特征及其演化[J].中国海洋大学学报,2015,45(6):91-99.
- [4]朱筱敏,潘荣,赵东娜,等.湖盆浅水三角洲形成发育与实例分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(5):7-11.
- [5]孙雨,马世忠,闫百泉,等.浅水湖盆河控三角洲短期基准面旋回结构样式与沉积演化:以松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层为例[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(8):3406-3412.
- [6]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.
- [7]任延广,王雅峰,王占国,等.松辽盆地北部葡萄花油层高频层序地层特征[J].石油学报,2006,27(s1):25-30.
- [8]刘宗堡,马世忠,孙雨,等.三肇凹陷葡萄花油层高分辨率层序地层划分及沉积特征研究[J].沉积学报,2008,26(3):399-406.
- [9]封从军,鲍志东,张吉辉,等.扶余油田中区泉四段基准面旋回划分及对单砂体的控制[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(s):62-67.
- [10]徐慧,林承焰,雷光伦,等.水下分流河道单砂体剩余油分布规律与挖潜对策[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(2):14-19.
- [11]贾珍臻,林承焰,董春梅,等.大庆升平油田葡萄花油层葡一油组浅水三角洲储层构型研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(6):9-15.

(责任编辑:殷丽莉)