

文章编号: 1009-3850(2011)04-0051-07

萨北油田北二西区点坝内部侧积层定量表征

周银邦^{1,2}, 吴胜和², 岳大力², 钟欣欣²

(1. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学资源与信息学院, 北京 102249)

摘要: 萨北油田北二西区萨 II 1 + 2b 小层层内非均质性强, 剩余油分散。本文依据研究区的地质特征和沉积环境, 认为该区点坝内部侧积层的坝面分布为水平斜列式, 分布形态呈“缓-陡”模式。基于研究区的密井网资料, 在点坝内部侧积层分布模式的指导下, 利用经验公式、岩心以及密井网剖面的方法对点坝内部侧积层进行了定量表征。得出研究区位于点坝顶部的侧积层倾角多在 5° 以内, 而位于点坝中部的侧积层角度在 4 ~ 10° 之间, 侧积层间距为 40m, 单一侧积体水平宽度约 70m。以这些参数为基础, 结合研究区侧积层的“缓-陡”模式, 建立了能够用于油藏数值模拟的三维构型模型, 分析了侧积层控制的剩余油分布模式, 为厚油层剩余油挖潜提供了更准确的地质依据。

关键词: 储层构型; 侧积层; 点坝; 废弃河道

中图分类号: TE319

文献标识码: A

目前, 国内的大多数油田已经进入了高含水期, 油层水淹严重, 剩余油高度分散, 尤其对于河流相储层而言, 层间的非均质性研究已经不能满足开发的需要, 储层精细描述的重点已经由层间转为层内。裘亦楠^[1] (1985) 指出如何利用地下地质资料, 将层内非均质特性做出正确的地质描述或预测, 是油田开发工作者主要努力的方向之一。点坝内部的侧积层作为储层内部的非渗透遮挡夹层, 直接影响砂体内部连通状况及注采受效情况, 其控制的剩余油储量逐渐成为挖潜的主要目标。自从 1985 年 A. D. Miall^[2] 提出构型要素分析法后, 国内外很多专家学者在不同方面丰富了点坝内部侧积层的沉积理论, 取得了较好的成果(薛培华^[3], 1991; 焦养泉^[4], 1995; 尹燕义^[5], 1998; 束青林^[6], 2006; 马世忠^[7], 2008), 但对于地下点坝内部侧积层定量化的识别方法方面尚需进一步深入。本次研究在侧积层空间组合模式的指导下, 针对萨北油田北二西区

三队试验区萨 II 1 + 2b 小层层内非均质性强的特点, 研究地下侧积层的识别方法和分布规律, 建立点坝内部侧积层的构型模型, 为河流相储层精细表征和剩余油挖潜提供服务。

1 研究区地质概况

萨北油田北二西区位于大庆长垣萨尔图油田纯油区内, 地质储量 12820.6×10^4 t, 构造较为平缓, 地层倾角 3° 左右, 地面平均海拔高度 150m 左右。研究区三队试验区位于北二西区中部, 面积 0.3 km², 共 60 口井, 井距平均在 100m 以内。发育萨尔图、葡萄花和高台子三套含油层系, 均属于河流-三角洲沉积。前人已在“旋回对比、分级控制”的地层对比原则指导下建立了研究区精细的地层格架。萨 II 1 + 2b 小层属于萨 II 油组中萨 II 1 + 2 ~ 3 砂岩组, 主要为三角洲平原分流河道沉积。油层埋藏深度 870 ~ 1200m, 砂泥质交互分布, 非均质性强。目

收稿日期: 2010-09-10; 改回日期: 2010-09-17

作者简介: 周银邦(1983-), 女, 在读博士后, 储层地质和油藏描述专业。E-mail: zhou-yinbang@163.com

资助项目: 国家高技术研究发展计划“863”计划(2008AA06Z206); 教育部高等学校博士点专项科研基金项目(20060425004)

前,由于特高含水期剩余油高度分散,挖潜难度大,各层系间含水差异越来越小,注水低效无效循环越来越严重,迫切需要分析厚油层的内部结构,研究剩余油分布规律。

2 侧积层的模式认知

由于周期性的洪水作用,在两次洪泛沉积事件之间细粒悬浮物质沉积在点坝砂体内部,形成泥质侧积层,并呈一定角度分布。按照侧积层的坝面形态可以将侧积层的模式归纳为:水平斜列式、阶梯斜列式以及波浪式^[8]。研究区萨Ⅱ1+2b形成于姚家组三段沉积末期,湖泊开始扩张,水位变化不大、点坝表面地形平缓,气候略为湿润,这种条件下形成的侧积层模式多为水平斜列式。整个侧积层的

倾角在剖面上呈“缓-陡”模式(图1):即在点坝内侧积层顶部侧积层角度较缓,中部侧积层角度较陡,在靠近废弃河道的部位角度相对较大,在点坝的凸岸角度相对较小。形成这种模式的主要原因是由于侧积层是披覆于活动点坝的坝面而形成的,而坝面形态又受控于活动河道的河床底形,因此河床底形的形态影响了侧积层的分布形态。现代沉积和露头成果显示,侧积泥岩可以从上点坝向下点坝延伸,达到砂体厚度的1/2至2/3处,这是因为常年水位和水动力影响了侧积层“陡”岸的沉积。如果常年水位较深,则侧积层“陡”岸可能更短,也有可能不存在;当水动力较大时,侧积层“陡”岸被冲刷及浸泡,保存下来的机会更小。

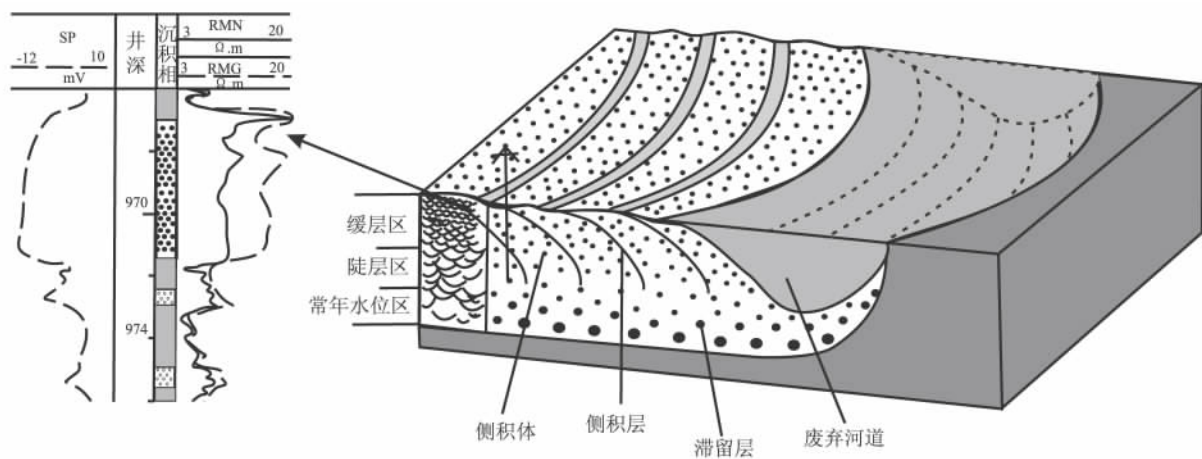


图1 点坝内部侧积层“缓-陡”模式

Fig.1 “Gentle-steep” model for the laterally accretionary beds within a point bar

3 地下侧积层分布的识别方法

点坝内部解剖的实质是在单井解释侧积层的基础上,在点坝内部构型模式指导下,对井间侧积体(层)进行拟合,构建点坝内部构型模型。依据点坝的识别标志(即沉积层序上的正韵律、砂体厚度大以及紧邻废弃河道分布),按照废弃河道所在的位置以及砂体厚度平面分布图,在研究区识别出4个完整的点坝,平均厚度为5.5m,河流满岸宽度为60~100m,单一点坝长度为300~400m。

3.1 点坝内部侧积层的单井解释

分流河道内泥质侧积层的岩性主要包括泥岩、粉砂质泥岩及部分泥质粉砂岩。相对曲流河砂体,侧积层较薄,一般在0.1~0.3m之间。测井曲线表现为微电极曲线明显回返,幅度差减小,自然伽马曲线见回返,自然电位曲线轻微回返。通过岩心标

定测井,分析侧积体和侧积层的测井响应,据此在非取心井中进行解释。图2为B2-351-JP61井的取心剖面,萨Ⅱ1+2b单层主要为河道砂体点坝沉积,由于点坝内部包括侧积体、侧积层和侧积面三要素,因此在单期河道沉积内可识别出3个侧积体和两个侧积层(图2)。

3.2 侧积层的井间预测

侧积层的厚度、宽度、倾向、间距及倾角及是确定地下点坝砂体内部侧积层定量模式的必须条件,侧积层的厚度可以通过单井岩心标定测井识别,单一侧积体的水平宽度可以通过Leeder^[8]的经验公式推算,侧积层的倾向即废弃河道的倾向,侧积层的间距可以通过对子井来预测(下文介绍到)。因此,井间预测最重要的参数是侧积层的倾角,识别侧积层倾角的方法可以归纳为以下三个方面:

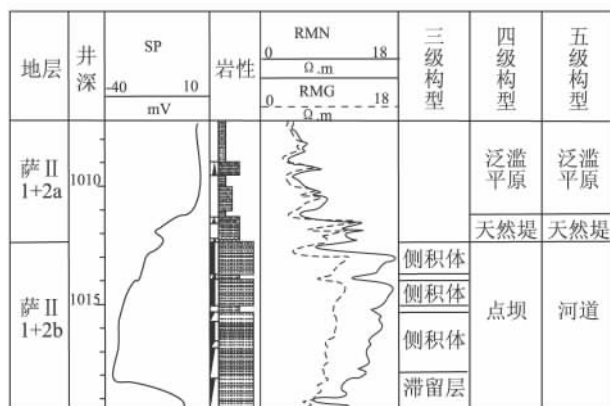


图2 点坝内部侧积层识别(B2-351-JP61 井)

Fig.2 Recognition of the laterally accretionary beds within a point bar through the B2-351-JP61 well

1. 经验公式预测范围

经验公式是通过露头以及现代沉积总结出的能够反映构型单元间相互关系的定量表征。应用公式计算出的数值多为一个范围,并不代表一个具体特定的值。根据经验公式,可以在构型分析时把握地下构型单元的大概规模(虽然不可能很精确,但是数量级没有问题),这样可以避免出现大的误差。目前高弯曲度曲流河的经验公式较为完善,已在胜利油田孤东、孤岛油田、大港油田、青海油田等多个油田进行过预测,均取得了良好的效果。预测侧积层倾角的步骤为:

①曲率推算

首先在研究区利用 Schumm^[10] (1972) 公式计算其原始活动河道曲率,该公式是根据澳大利亚半干燥—半潮湿地区 36 条稳定河流得出的,对于大庆的气候条件是适用的。

$$P = 3.5F^{-0.27} (1),$$

$$F = 255M^{-1.08} (2)$$

(P: 曲率, F: 宽深比, M: 粉砂泥质百分含量)

根据取心井 B2-350-J45 岩心分析结果,萨 II 1+2b 沉积单元粉砂泥质百分含量 M 大于 20%,由此估算曲率大于 1.8。

②河流满岸深度推算

对于曲流河而言,河流满岸深度与单一河道内部点坝砂体最大厚度相当(Leeder, 1973)^[9]。因此,地下河流满岸深度可以通过压实校正后的单一河道内部点坝砂体的最大厚度来推算。推算过程包括两个步骤:首先,识别单一河道内部点坝砂体的最大厚度,这一厚度必须是保存完整的单一向上变细的正旋回,且具有典型曲流河的二元结构,河道

之间不发生相互切割或叠置,点坝形态保存完整。其次,对测量的最大单一旋回厚度进行压实校正,以恢复到沉积时的单一旋回厚度。研究区的压实系数为 1.1,通过研究区保存完整的单一向上变细的旋回厚度经过压实校正后得到研究区萨 II 1+2b 河流满岸深度为 5m 左右。

③侧积层倾角推算

Leeder (1973)^[9] 通过研究认为,对于河道弯曲度大于 1.7 的样本,满岸深度和满岸宽度具有较好的双对数关系(公式 3),点坝内部单一侧积体宽度大约等于 2/3 满岸河流宽度(公式 4),并推导出计算点坝内部泥质侧积层倾角的公式(公式 5)。得到的关系式为:

$$\log w = 1.54 \log h + 0.83 (3), w_1 = 2/3 w (4),$$

$$w = 1.5 h / \tan \theta (5)$$

(w: 河流满岸宽度, m; h: 河流满岸深度, m;

w₁: 单一侧积体水平宽度, m; θ : 侧积层倾角, 弧度)

通过上述公式推算萨 II 1+2b 平均河流满岸宽度 100m 左右,而单一侧积体水平宽度约为河流满岸宽度的 2/3,即 70m 左右,点坝内侧积层倾角为 4.5°左右。

2. 岩心识别

岩心识别是侧积层预测的最直观方法,通过取心井的岩心资料既可以识别出侧积层的规模也可以很直观的测量侧积层的倾角,但通常因为取心资料稀缺,测量的角度只代表了局部点的角度,没有宏观的概念,所能达到的目的仅仅可以确定侧积层倾角位于点坝的具体部位。值得注意的是,直井岩心测量侧积层倾角时需要消除构造的影响,并且排除后期因为工程原因而造成的误差(如岩心方位摆放错误等)。通过对研究区内的几口典型取心井 B2-350-J45、B2-323-JP43、B2-323-JP42、B2-361-JE68 井的目的层进行观测与统计,得到侧积层的倾角都在 1.5~7°之间(表 1)。从统计可以看出,位于点坝上部的侧积层角度较小,在 5°以内,位于点坝中部的侧积层角度较大,在 4~10°之间,点坝底部几乎不发育侧积层。

3. 地下密井网剖面预测

大庆油田已经历勘探开发五十多年,井距平均已达到 100m 左右,部分井距在 50m 以内,因此对于储层内部构型解剖非常有利。研究过程中可首先在整个研究区或者与研究区相邻的区块利用密井网资料建立各种沉积模式,在这些模式的基础上综合各种识别方法拟合地下储层构型并间预测。

(1) 对子井

对于井距很小的两口井(对子井),应用同一侧积层的相对高差与井距可计算其倾角,已知两口井的井距,在地层顶面拉平的前提下,可以确定同一侧积层在两口井上的相对高差(图3),因此倾角 θ 的计算公式为:

$$\tan\theta = \Delta h/L \quad (6)$$

(θ :侧积层倾角,°; Δh :同一侧积层在两口井上的相对高差,m; L :井距,m)

研究区对子井 B2-341-P55 与 B2-D4-42 两口井之间的井距 $L=35.6\text{m}$,同一侧积层在两口井上的相对高差 $\Delta h=1.2\text{m}$ 。根据公式4 计算萨 II 1 + 2b 单层该点坝内侧积层倾角 θ 为 1.9° 。应用同样的方法对研究区其它对子井进行推算,侧积层的倾角均在 2° 左右。

将对子井中同一条侧积层相连,沿着侧积方向

延伸会与点坝顶面相交,相邻侧积层的相交点之间的距离在平面上的投影距离 ΔL 即为侧积层的水平间距。应用研究区对子井资料亦可得出侧积层的水平间距为 40m 左右。

表1 检查井侧积层倾角岩心测量统计表

Table 1 Statistics of the dip angles of the laterally accretionary beds through the selected wells

井号	深度(m)	角度(°)	点坝部位
B2-350-J45	1014	2	上部
	1016.2	3	上部
	1012	3.5	上部
B2-362-JP25	1069	5	上部
	1060.6	10	中部
	1012	9	中部
	1017.2	8	中部
B2-323-JP43	968.78	1.5	上部
	969.53	4	中部
	1075.75	7	中部

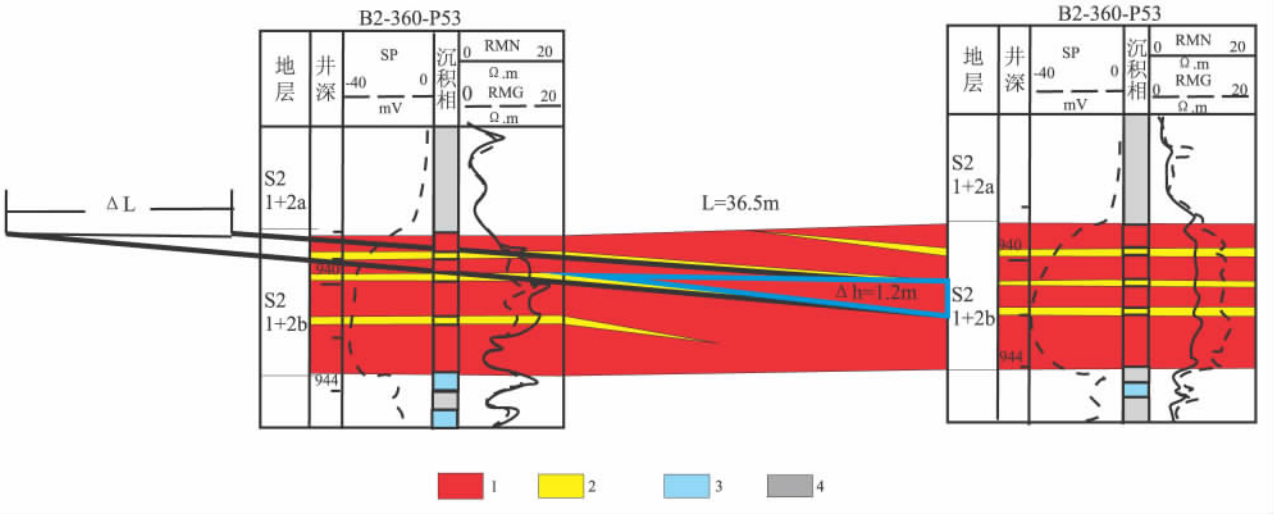


图3 应用对子井资料计算侧积层倾角与间距

1. 点坝; 2. 侧积层; 3. 溢岸; 4. 泛滥平原

Fig.3 Dip angles and spaces of the laterally accretionary beds based on the couple well data

1 = point bar; 2 = laterally accretionary bed; 3 = overbank; 4 = flood plain

(2) 废弃面

另外,通过密井网资料识别的废弃面也可以反映侧积层的倾向以及倾角。废弃河道代表一个点坝的结束,废弃河道与点坝的接触面称之为废弃面,在消除地下微构造的影响之下废弃面倾斜角度的大小代表了侧积层的倾角大小。废弃河道的宽度受单一河道带宽度的影响,因此只有在井距较小的情况下,废弃河道过的井越多,则越能够反映出废弃面的产状。在三队试验区附近有一点坝内部井网较密,井距在 $20 \sim 30\text{m}$ 之内,沿废弃河道的方

向做一条剖面,识别出点坝内部废弃面通过了两口井,在顶拉平的情况下根据这两口井废弃面的连线测量出废弃面的倾角为 2.1° (图4)。

综合上述各种方法可以判定侧积层的间距在 40m 左右,单一侧积体水平宽度在 70m 左右,侧积层的倾角多在 $2 \sim 10^\circ$ 之间,钻遇点坝顶部侧积层的井较多,多在 5° 以内,而点坝中部的侧积层角度较大,在 $4 \sim 10^\circ$ 之间,这更加验证了研究区点坝内部侧积层呈“缓-陡”模式分布。

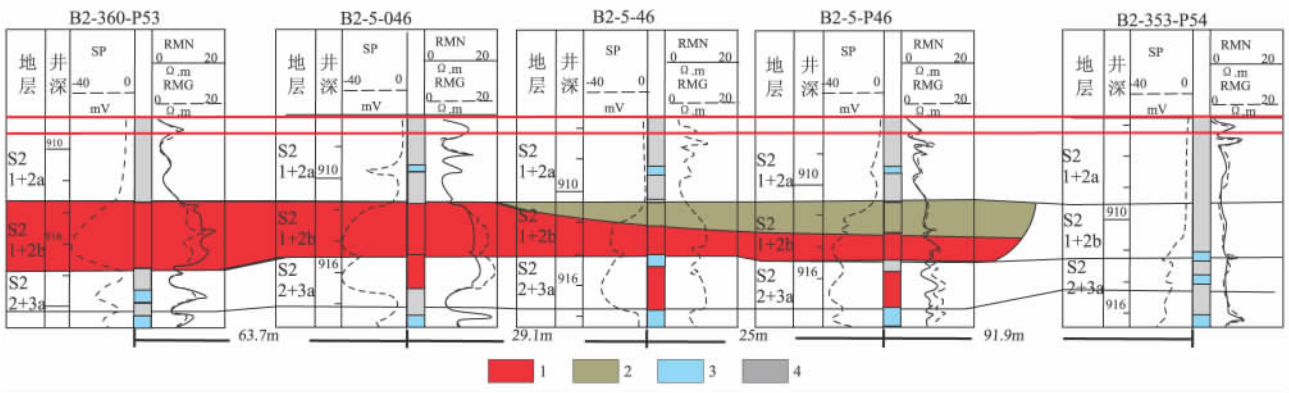


图 4 废弃面识别侧积层倾角

1. 点坝; 2. 侧积层; 3. 溢岸; 4. 泛滥平原

Fig. 4 Determinations of the dip angles of the laterally accretionary beds based on the abandoned channel surface

1 = point bar; 2 = laterally accretionary bed; 3 = overbank; 4 = flood plain

4 侧积层控制的剩余油分布

4.1 点坝内部侧积层建模

三维构型模型的最终目的是要建立三维侧积层模型,但是目前的建模软件均很难实现侧积层的建模,更难以建立用于数值模拟的侧积层模型。本次研究采用了油藏数字表征软件(Direct 软件) 提出的嵌入式三维地质建模新方法。该方法有三个主要步骤: 首先,按较粗略的网格分辨率,建立相对均质的曲流河砂体初始三维模型; 其次,通过自动模式拟合算法,建立侧积面三维曲面模型; 最后,对曲流河砂体初始三维模型进行局部网格加密,并对侧积面穿过的加密网格赋予夹层属性,最终将侧积泥岩夹层嵌入到点坝砂体模型中。实践表明,该方法自动化程度高,通过自动模式拟合能进行有效的井间夹层预测; 同时通过嵌入式建模技术,满足了层次分析的需要,同时提高了建模精度。

在单井泥质侧积层解释的基础上,以上述点坝内部构型分布定量模式为指导,对泥质侧积层的井间分布进行预测,应用序贯指示模拟方法建立三维相模型,然后采用嵌入式建模方法在相模型中嵌入侧积层,使之既符合地质模式,又与地下资料相吻合。本次本次建模网格大小设置为 5m × 5m × 0.1m,建立了试验区萨 III1 + 2b 小层的构型模型(图 5),再现了研究区各构型要素的空间分布特征。图 5 分别是研究区构型模型的顶部、中部以及底部切片(图 5)。

4.2 剩余油分布模式

动态分析及油藏数值模拟结果表明,点坝内部剩余油主要分布在中上部(剩余油饱和度大于

50%) ,且注采井间侧积体内的剩余油更富集。这主要是由于点坝砂体表现为明显的正韵律特征,底部渗透率较高且连通,顶部相对低渗,再加上泥质侧积层的遮挡,导致注入水比较容易沿着点坝下部推进,点坝侧积体中上部剩余油富集,且这一“半连通体”模式导致注水方向本身影响开发效果的程度很小,平行、斜交与垂直夹层倾向注水采出程度相差仅 0.5% 左右。从平面上来看,侧积夹层的分割作用易在平面上形成条带状剩余油分布,当点坝砂体内部可以形成较为完善的注采关系时,不同侧积层顶部的水驱油状况存在较大差异,因此形成平面上条带状的剩余油分布模式。

针对上述剩余油分布模式,可以采用细分开层系,完善注采井网,实施老井补孔、卡改、封堵炮眼等措施来进一步挖潜剩余油。对于点坝砂体内部的注水井,根据注采井组层内的分析结果,对点坝砂体内部无效循环部位实施封堵,使注入水更多的沿着侧积层方向流动,挖潜侧积层遮挡形成窄条带状剩余油,实现层内细分注水,改善层内的开发效果。另外,对于发育规模大、上部侧积层发育、与上部单元隔层稳定的点坝砂体,可以利用水平井挖潜点坝体内部注采不完善形成的片状剩余油,提高井点对点坝砂体内部各个侧积体的控制程度,完善点坝砂体内部的注采关系。大庆油田自 2003 年以来,共投产 8 口水平井挖潜点坝砂体顶部各种剩余油,投产初期平均产油量为 33. 4t/d,含水率为 66. 5%,投产 1 年后产油量为 12. 4t/d,含水率为 86. 1%。水平井产量约为周围直井单井产量的 3 ~ 4 倍,取得了较好的效果。

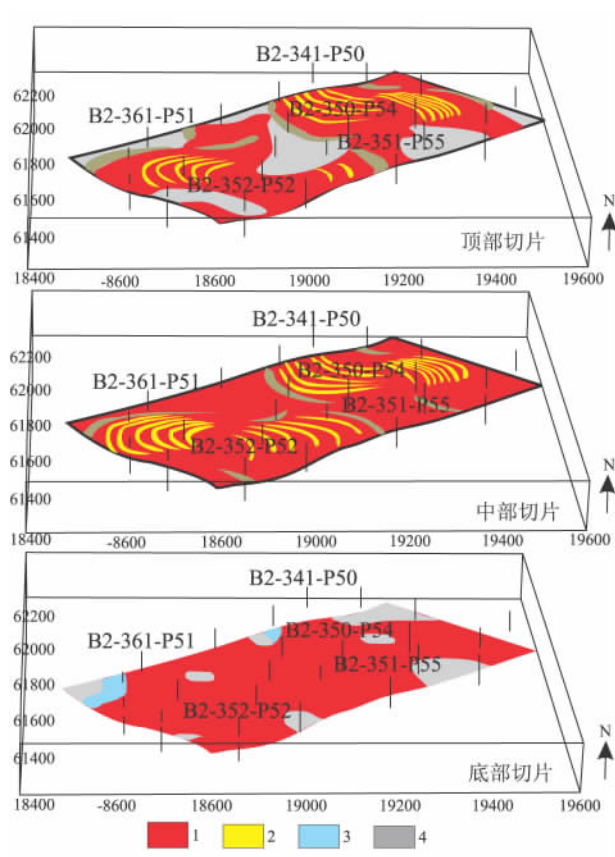


图5 试验区构型模型切片

1. 侧积体; 2. 废弃河道; 3. 侧积层; 4. 天然堤

Fig. 5 Sections of the architectural model for the study area
1 = laterally accretionary body; 2 = abandoned channel; 3 = laterally accretionary beds; 4 = natural levee

5 结论

(1) 结合萨北油田的地质背景和沉积环境,认为研究区侧积层坝面分布为水平斜列式,分布形态呈“缓-陡”模式。在此模式指导下,通过单井资料识别侧积层的规模,并应用经验公式、岩心资料以及地下密井网剖面方法对地下点坝砂体内部侧积层进行井间预测。经过上述方法得出研究区的4个点坝内部侧积层的倾角在 $2 \sim 10^\circ$ 之间,点坝顶部侧积层倾角多在 5° 以内,而点坝中部的侧积层角度在 $4 \sim 10^\circ$ 之间,侧积层的间距在40m左右,单一侧积

体水平宽度在70m左右。

(2) 基于上述侧积层要素的定量表征,应用Direct软件的嵌入式三维地质建模新方法建立了研究区点坝内部侧积层的构型模型。通过油藏数值模拟及动态分析结果表明,点坝内部剩余油在剖面上主要分布在中上部,且注采井间侧积体内的剩余油更富集,平面上由于不同侧积层顶部的水驱油状况存在较大差异而使得剩余油呈条带状分布。针对剩余油分布模式提出利用层内细分和水平井的挖潜方式,为下一步挖潜指明了方向。

致谢: 研究中得到中国石油大庆油田研究院杜庆龙副总地质师,白振强工程师的指导和帮助,在此表示谢意!

参考文献:

- [1] 裴亦楠,许仕策,肖敬修. 沉积方式与碎屑岩储层的层内非均质性 [J]. 石油学报, 1985, 6(1): 41-49.
- [2] MIALD A D. The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology [M]. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1996. 57-98.
- [3] 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. 51-63.
- [4] 焦养泉,李祺. 河道储层砂体中隔挡层的成因与分布规律 [J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(4): 78-91.
- [5] 尹燕文,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.
- [6] 束青林. 河道砂侧积体对剩余油分布的影响—以孤岛油田上段3~4砂组高弯度曲流河为例 [J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(2): 45-48.
- [7] 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.
- [8] 李阳,郭长春. 地下侧积砂坝建筑结构研究及储层评价—以孤岛油田七区西 N_{g52+3} 砂体为例 [J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 942-948.
- [9] LEEDER M R. Fluvial fining upwards cycles and the magnitude of paleochannels [J]. Geological Magazine, 1973, 110(3): 265-276.
- [10] SCHUMM S A. Fluvial paleochannels [A]. Rigby J K and Hamblin W K. Recognition of ancient sedimentary environments [C]. Tulsa: SEPM special publications 16, 1972. 98-107.

Quantitative characterization of laterally accretionary beds within the point bars in West II district of the Sabei Oil Field, Daqing placanticline

ZHOU Yin-bang^{1,2}, WU Sheng-he², YUE Da-li², ZHONG Xin-xin²

(1. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, SINOPEC, Beijing 100083, China*; 2. *School of Resources and Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China*)

Abstract: The SaII 1 + 2b layers from the West II district of the Sabei Oil Field are typical of highly heterogeneity and dispersion of residual oil. The laterally accretionary beds within the point bars in the study area are horizontally aligned and display the “gentle-steep” patterns. The quantitative characterization of laterally accretionary beds within the point bars are determined on the basis of empirical formula, cores and dense well section data. The results of research in this study show that the dip angles of laterally accretionary beds are less than 5° for the top of the point bars, and range between 4° to 10° for the middle part of the point bars. The space between the laterally accretionary beds is about 40 m, and the width of a single laterally accretionary body is about 70 m. The integration of above-mentioned parameters and “gentle-steep” patterns results in the construction of 3D model for the numerical simulation of oil reservoirs. The model for residual oil in this study may provide relatively accurate geological information for the exploration and development of residual oil within thick oil reservoirs.

Key words: reservoir architectures; laterally accretionary bed; point bar; abandoned channel