

曲流河道沉积演化过程与历史重建^① ——以吉林油田扶余采油厂杨大城子油层为例

单敬福¹ 赵忠军^{2,3} 李浮萍^{2,3} 孙立勋⁴ 汤乃千¹ 王博⁵ 高怀玺⁴

(1.长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室 武汉 430100; 2.中国石油长庆油田分公司苏里格气田研究中心 西安 710018;
3.低渗透油气田勘探开发国家工程实验室 西安 710018; 4.辽河油田兴隆台采油厂地质研究所 辽宁盘锦 124010;
5.新疆油田公司采油一厂 新疆克拉玛依 834000)

摘要 高弯曲流单期河道内点坝内部侧积泥岩夹层所形成的天然渗流屏障是影响剩余油赋存的主控因素,其单砂体内部薄夹层空间分布规模小、井间不易追踪对比,研究难度和所需资料要求程度较高等诸多不利因素,制约着点坝砂体内部建筑结构的精细解剖。因此,本文试图充分利用岩芯、测井、密井网等资料,在废弃河道和点坝砂体的识别、恢复、河工参数的拟合和估算等基础上,结合前人研究成果,判别点坝侧积体的规模、倾向和倾角,并以此为基础,结合点坝地质概念模型,从单一期河道内多个点坝中,将属于同期的侧积体识别出来,然后进行编号组合,按照河道蛇曲化的规律进行过程分析和再现其沉积演化过程。这种方法实现了从成因过程学角度来解释点坝内部建筑结构及其空间叠置规律问题,使河流相储层建筑结构分析不仅仅停留在结果层面,而是注重从成因、过程视角去恢复和重建曲流河道历史演化过程,使曲流点坝内部砂体建筑结构解剖结果将更合理、更可信,并有效指导了油田中后期剩余油的预测和挖潜。

关键词 曲流河道 河道演化 侧积体 沉积过程 砂体建筑结构

第一作者简介 单敬福 男 1977年出生 博士后 副教授 沉积、储层与开发地质学研究 E-mail: shanjingfu2003@163.com

中图分类号 TE121.3 **文献标识码** A

0 引言

河流—三角洲储层构型是近20年来地学又一热点问题,众多学者基于不同视角,采用不同的研究手段方法,对储层进行了精细解剖并以此为基础构建地质模型。然而地下储层是极其复杂的,多数砂体是复合砂体,并不是单一成因的,且有多个同期与后期叠加改造的结果,如河流相在横向迁移摆动过程中,有侵蚀、切割和废弃现象等等,这些都一定程度上使砂体复杂化了,如果不能从成因演化规律入手,直接对沉积结果进行描述,往往容易把原本复杂的储层粗化、简单化,从而得出错误的结论和认识,不利于油田后期措施的调整和开发方案的实施。对于曲流河储层成因的砂体建筑结构解剖,前人已做了大量的研究,如隋新光^[1-2]强调枯水期与洪水期水道中主流线位置及水动力存在差异,并指出点坝主要是在洪水期

形成的;吴胜和等^[3-4]通过对河流相储层构型,提出了层次约束、模式拟合和多维互动的地下储层构型分析与建模方法,主要对建模的思路和研究方法进行了系统概括和总结;岳大力等^[5]通过综合野外露头、现代沉积以及由此建立的经验公式等方法,建立了孤东油田曲流点坝内部构型定量模式,优点是把地质统计学等数学方法引入到储层建筑结构解剖中来,并尝试对储层进行定量化表征;林承焰等^[6]通过对松辽盆地大庆油田外围河流相储层砂体建筑结构的精细解剖,提出了河流—三角洲前缘水下分流河道的岔道口是一种潜在剩余油有利富集区理论;马世忠等^[7-9]在充分考虑点坝内部侧积泥岩夹层影响储层渗透率空间分布基础上,提出了曲流点坝三维构型模式,其中强调从侧积泥、侧积面、废弃河道3个重要构型要素入手,参考河道几何学和河工参数,来识别、恢复和测算(13种提取方法)点坝侧积体(包括倾角、倾向、规

^①国家自然科学基金项目(批准号:41372125)、湖北省教育厅基金项目(编号:Q20121210)与中国地质大学(武汉)重点实验室开放基金项目(编号:TPR-2012-23)联合资助
收稿日期:2014-07-08;收修改稿日期:2014-08-28

模)规模,总结侧积泥岩薄夹层空间分布密度和河道侧积规律;张昌民等^[10]通过识别废弃河道、末期河道,利用河道流线的变化,来分析河道摆动规律,把分析砂体建筑结构首次提升到过程演化层次。上述研究成果的取得,为油田开发措施的实施与调整提供了重要参考依据,也进一步丰富了储层构型理论。

然而,在储层表征过程中,以往的研究成果中,都过多注重对沉积结果进行描述,对于恢复其演化过程,则很少提及,只是国内个别学者通过河道主流线的方式去阐述河流演化变迁历史,这种方法使河流演化历史在一定程度上得到了重建,相对以往有了长足的进步^[10]。实际上,河道主流线的提出本身就是一个模糊抽象的概念,其核心是通过河道主流线初始位置和末期位置的估算,然后中间内插主流线,通过对主流线的变迁来重建河道演化历史,尽管思路正确,但是主流线的初始位置判别方法、依据及如何内插主流线等方面则论述较少,实际上,主流线的识别向来是个难点,也是关键点。笔者就这些问题,试图通过重构河道沉积过程研究思路和方法,从半定性半定量角度去重建曲流河道演化历史,使基于河道历史过程重建的砂体建筑结构解剖结果更合理、更接近于地下真实情况。

本次研究选取吉林油田扶余采油厂杨大城子油层为主要研究对象,扶余油田构造位置上处于松辽盆地南部中央凹陷区东缘,扶新隆起带扶余3号构造上,是一个被断层复杂化的多高点穹隆背斜,油藏主要受构造控制,属于裂缝性低渗透构造砂岩油藏。油田开采的主要目地层为泉台组四段的扶杨油层,储层分布比较稳定岩性主要为粉砂岩和细砂岩。前人研究结果证实,吉林油田扶余采油厂杨大城子油组主要发育曲流河沉积。扶余油田自1970年规模投产以来,随着油田开发的深入,目前已进入高含水后期开采阶段,正面临严峻的开发形势。虽然不同时期针对研究区块开展过精细油藏描述工作,但是这种基于小层的油藏描述研究已不能满足油田进一步深入发展的需要,而且随静态、动态资料的增加,以及认识程度不断加深,开发问题不断增加,已有成果需不断调整改进。由于这一时期剩余油分布极为复杂,呈高度的分散状态,迫切需要通过储层构型等新的研究手段和方法对储层建筑建筑结构进行精细解剖,以解决因地质认识不清而导致的注采井网不完善、分注及有效注水率低和注水效果变差等问题。

1 研究方法

在开展曲流河道砂体建筑结构解剖之前,要充分利用前期沉积微相研究成果,确定河道与非河道之间的界限,这些工作同时也是沉积微相图编制过程中重点和核心内容。实际上,沉积微相研究过程中识别出的河道与废弃河道两种微相,是储层构型工作中最为关键的两个参数,其中废弃河道最为关键,同时也是最难识别,因为废弃河道的识别主要通过测井数据来识别,而能够钻遇废弃河道的井数量又很少,与此同时,实践也证明,废弃河道的实际宽度比预想的要小得多,钻井完全揭示有很大困难。

对于废弃河道,前人认为有两种形式,一种是单水流形成的废弃河道,如串沟型、颈切型和决口改道型;另外一种是多水流作用形成的废弃河道,例如串流改道型废弃河道^[11]。此外,从岩性旋回和测井曲线响应特征上,又可以将废弃河道划分为突弃和渐弃两种类型,识别标志主要是看岩性是突变还是渐变,如果是前者,则废弃河道内部水体与主流河道呈隔绝状态,只有洪水期上部才会接受细粒沉积,形成岩性突变;如果是后者,则废弃河道中水体与主流河道水体始终相连,整条河道逐渐废弃,也有学者将这种废弃类型称之为“末期河道”^[10],实际上都是废弃河道的一种。

之所以强调废弃河道的重要性,是因为突弃型废弃河道的个数既可以揭示区域内前期有多少条河道存在过,又可以指示前期河道残留点坝的侧积方向;渐弃型废弃河道可以指示单一河道点坝侧积方向。这两种废弃河道共性就是在平面上都较难识别,不同点就是它们在平面上表现形式不同,突弃型废弃河道多不完整,在平面多呈孤立、新月形状分布,而渐弃型废弃河道则平面是完整的、延续性好,是河道最终淤塞填满的最终证据。因此,在对相对完整单一河道进行解剖时,主要利用渐弃型废弃河道、单一河道平面展布和砂体厚度图3个参数,采用初期河道路线与末期河道流线(渐弃废弃河道)包络最大面积法,结合局部砂厚中心连线来识别点坝,在点坝圈定基础上,再结合野外露头与现代沉积、河工参数估算等方法,对研究区侧积体规模进行判识,提取侧积体的长宽、倾角、倾向和间距这4个关键参数,之后进行单一河道内部多个点坝侧积体同期次编号和组合工作,最后将侧积体按发育顺序依次展开,完成单一河道沉积过程的重建,具体研究思路见图1。

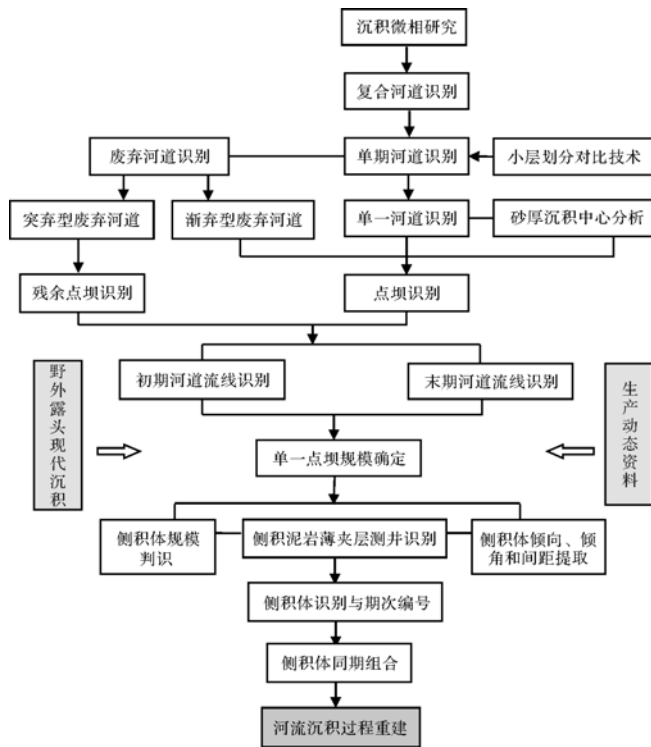


图1 研究流程图

Fig.1 The flow chart of this study

2 单一河道识别

本次研究提出的单期河道和单一条河道概念,两者是有区别的,在充分遵循纵向分期,平面分支原则基础上,单期河道强调纵向的期次性,而单一条河道则强调的是平面河道的分支性。

复合河道内部包含了若干单期河道,沉积微相图中的河道大多也都是复合河道级别,对于复合河道的形成,主要是河道在平面上常常有迁移摆动、废弃和切割等作用造成的,从而形成了分布规模较大的复合河道,展宽一般可达到上千米甚至几千米,在测井曲线上,复合河道经常表现为复合钟形、复合箱型和复合钟箱型。当可容空间较大时,复合曲线形态容易区分,如图2a;如果可容纳空间较小,则两组测井曲线形态难以区分,表现为晚期河道对早期河道强烈的切割、改造与破坏,甚至模糊了两者之间的界限,也易与单期河道内侵蚀或落於(单期河道演化过程中次级洪水事件形成的泥质薄夹层)程度不一情况相混淆。对于图2c模式,一定将其置于多个骨架剖面中进行分析,反复多观察几个邻近剖面,总结砂体发育规律,如表现出厚度与邻井差异太大,沉积上无法解释情况下,考虑合理劈分,当然,在解释过程中如有岩芯底砾岩证据作支撑则效果会更好。值得注意的是,在进行

砂体建筑结构分析过程中,一定要在河道单期尺度上进行研究才具有实际意义。因此,采取的办法是利用小层对比技术将复合河道分期,每一期对应一个小层地层单元,因此,精准小层地层格架是后续研究工作基础。单期河道界面级别相当于Miall构型界面的5级,而复合河道则为6级^[12]。

单一河道识别方法较多,也比较成熟,具代表性如张昌民等^[10]和岳大力^[13]分别对单期河道的识别方法做过详细的论述,归纳起来主要有3个识别标志,分别是①高程差异;②厚度差异;③废弃河道,识别实例如下:

(1) 废弃河道识别河道边界

废弃河道的存在,标志该期河道沉积过程的结束,因此可以作为河道边界的重要识别标志,如图3a所示,在Z11井测井曲线表现为渐弃曲线类型,表明过Z10井河道在此逐渐废弃,从而在此界定此河道砂体与过Z12井的河道不是同一河道。另外,废弃河道配合砂体厚度图,结合一定的方法,还可以识别次级构型单元——点坝,具体如何识别将在点坝识别部分详细论述。

(2) 小层顶面拉平河道砂体高程差异

在小层地层单元等时格架建立基础上,对目标小层顶部拉平,根据河道砂体顶面距拉平基准面距离来界定河道发育的期次,即河道二元结构顶界面越远,则发育期次越早,否则越晚,实际上,笔者认为这种方法忽略了因深层砂泥岩差异压实作用而形成的河道的上提下拉现象对河道期次划分的影响,如图3b所示,在标志层顶拉平条件下,砂泥岩差异压实作用未对河道期次厘定产生影响,由此判定在Z2-13-11井处的河道砂体要比在Z2-13-9井处的河道砂体发育早,因此,在这两口井间之间可推断出存在一河道边界。

(3) 厚度不大的河间砂体

如果在一条河道侧向延伸过程中,如果该层段钻遇非河道砂泥岩时,在排除不是小层穿时或非断层干扰等前提下,可以推断在该井处附近存在河道边界,如图3c所示,在Z2-13-18井与Z2-13-15两井之间,因前者钻遇了厚度较大的细粒沉积,因此推测在该处存在河道边界。

3 点坝识别

点坝是曲流河道砂体中砂体骨架,与构型界面与Miall四级界面相对应^[12]。点坝的形成于河道中单

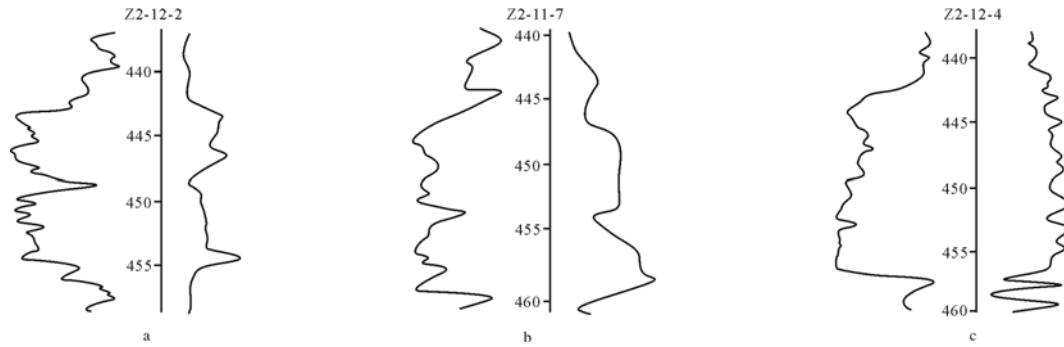


图2 晚期河道切叠早期河道类型

a.切叠程度较轻河道界面清晰可识别;b.切叠程度中等,河道界面测井曲线已远离基线,仍可识别;c.切叠较为严重,河道界面已难以识别

Fig.2 The model diagram of early riverway stacked by late stage riverway

a. Easier to identifiable type in the stacked riverway; b. medium to identifiable type in the stacked riverway; c. difficult to identifiable type in the stacked riverway

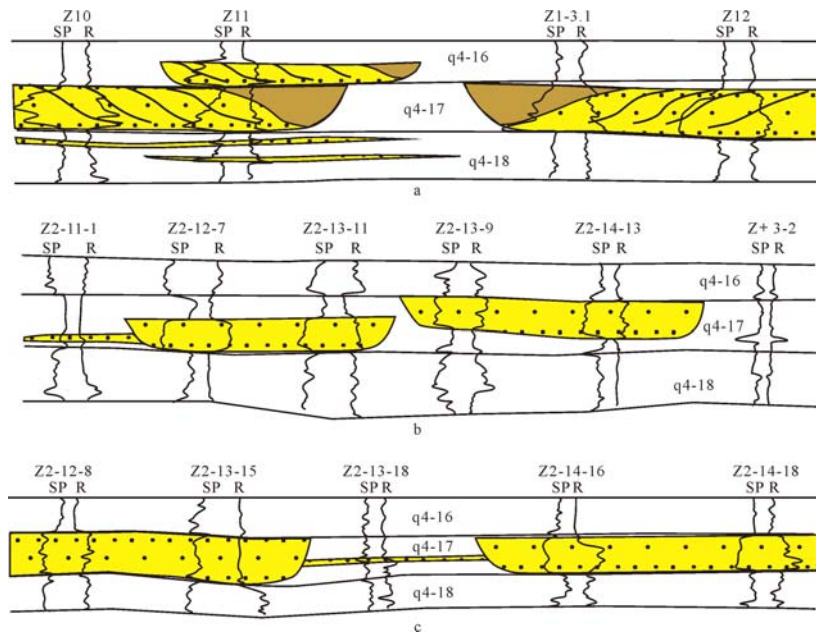


图3 单一河道识别标志

a.利用废弃河道识别单一期河道边界;b.利用高程差异识别河道边界;c.利用不连续河间砂体识别单期河道边界

Fig.3 The identification sign of a single channel

a. a single channel boundary identified by abandoned channel; b. a single channel boundary identified by elevation difference; c. a single channel boundary identified by discontinuous inter-channel sandbody

向横向环流,非对称的横向环流自然引起了输砂的不平衡,使凹岸遭受掏蚀,凸岸沉积,形成了由若干侧向排列、呈一定角度堆叠、富砂为特征的点坝砂体,且其中相间排列的侧积体之间被泥质薄夹层所分隔(侧积泥岩夹层形成于洪水间歇期),这一现象已被现代沉积所揭示。而对于深埋地下的点坝,由钻井揭示的资料所限,对其内部结构解剖一直以来是个难点,且研究成果也很少,因此,笔者本次借助密集井网条件,以沉积微相研究成果为基础,采用初期河道流线与末

期河道流线包络方法,结合砂体厚度图,对点坝进行预测,这里有一个关键步骤就是初期与末期河道流线的识别及包络线的确定。此外,还可以采用密井网解剖法和废弃河道法辅助进行综合判断。

(1) 初、末期河道流线包络线法

末期河道流线实际上就是渐弃废弃河道平面展布的轨迹,渐弃废弃河道与突弃废弃河道不同,其见证了河道从诞生至最终被淤塞消亡的整个演化过程,因此,渐弃废弃河道最终地质记录的位置就是末期河

道流线所处的位置。对于渐弃废弃河道的识别标志,就是岩性向上是逐渐由粗变细的,即二元结构中的细粒部分所占比重大,而突弃则完全不同,即岩性由粗不协调地直接变细,响应的测井曲线形态前者表现为陡幅钟形,后者为锤型。

曲流河不断侧积的结果就是砂体随着河流弯度指数增大而不断向两侧迁移富集,导致砂体呈串珠状非线性展布,基于这样沉积过程,笔者提出了一个识别点坝的方法,就是水道发育的第一期时,其流线以最短路径连接砂体沉积中心,即沿着图4中蓝线轨迹方向,而最后一期水道流线路径最长,即沿着图4中红线轨迹方向,显然,第一期河道流线和最后一期河道流线所包络的范围,恰好是点坝所处位置,因此,利用这种方法,可以有效预测和识别点坝。

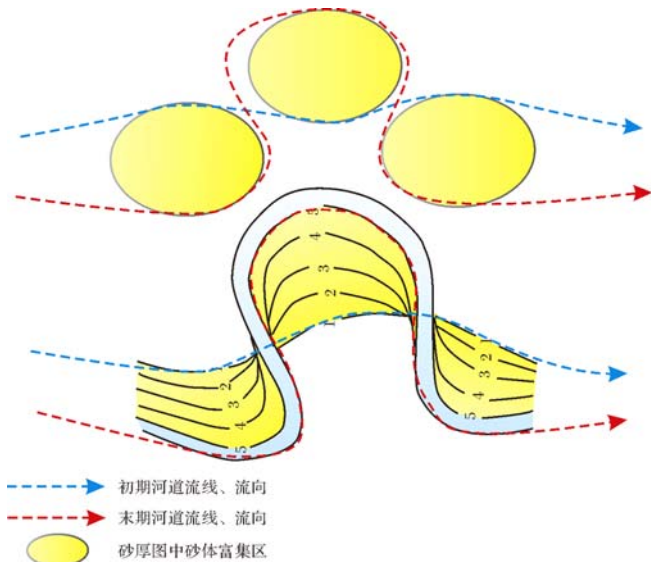


图4 利用初末期河道流线结合砂厚法圈定点坝模式图
Fig.4 The mode chart of point bar delineation using early-final stage river flow lines combining sand thickness method

在单期曲流河道为主的砂体等厚图中,砂体厚度中心多呈非线性、非对称串珠状展布(图5),而不是预想中的长条带状展布,这可能与曲流河不断蛇曲,砂体不断侧向迁移富集有关,由此导致砂体沿轴线在两侧非对称性展布。而对于长条带状展布的曲流河道砂体,其多出现在复合河道等厚图中,可能是多期河道叠置累加的结果。根据包络线法则,对研究区q4-17小层点坝进行了识别,结果识别出了7个点坝,见图5。

(2) 密井网解剖法

通过对单井点坝的识别,结合沉积相平面展布特

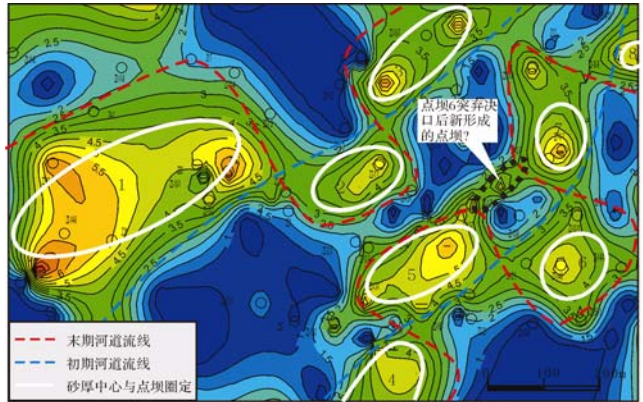


图5 采用初末期流线包络线法结合砂厚圈定点坝
Fig.5 The point bar delineation using early-final stage river flow lines combining sand thickness method

征,利用插值法对点坝进行识别。其过程主要是通过多井岩芯相、测井相等方面研究,然后进行点坝组合。点坝是曲流河道中最为主要的构型单元,是水流携砂不断侧向加积的产物,因此在单井上具有明显河流二元结构特征,且下部多见大型槽状、板状交错层理,上部则主要为小型波纹、交错和上攀层理,最终过渡到二元结构顶部的水平层理,正韵律,电测曲线多表现为箱型或钟形。这种方法的优点是比较直接快速,缺点是当资料不全,有可能引起误判,而且在识别过程由于缺乏对点坝在单期河道中发育规律的考虑,容易得出错误的结论。

(3) 废弃河道法

在密集井网条件下,也可以有条件地通过对废弃河道的识别与组合,来识别点坝。废弃河道标志着一期河道演化的结束,也就是侧积历史的终结,因此废弃河道会常常与点坝伴生,识别出多个废弃河道环,也就是识别出了多少个点坝(图6)。

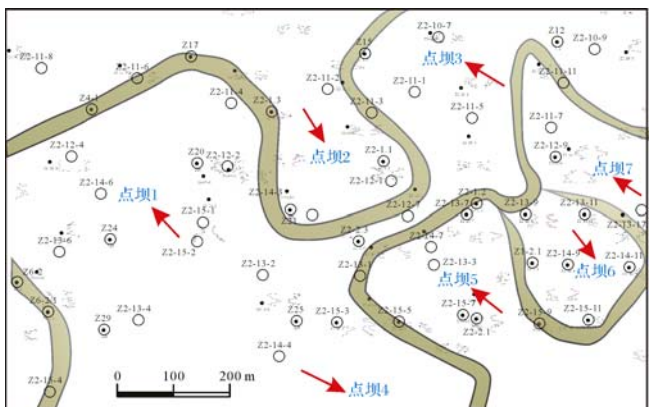


图6 利用密集井网对废弃河道的识别
Fig.6 The identification of abandoned channel using dense well pattern

4 侧积体识别

点坝侧积体研究层次相当于 Miall 界面构型理论中的 3 级^[12], 其对地质资料的要求比较高的。由于研究区为密集井网, 还有多口对子井, 因此, 研究条件是具备的, 可以开展相应侧积体的识别工作。侧积体研究方法已比较成熟, 如马世忠等^[8]通过对曲流点坝内部薄夹层的研究, 认为单一侧积泥岩薄夹层建筑结构是点坝解剖中最为关键结构参数, 利用这一结构参数最终完成了点坝的精细解剖; 岳大力等^[13]基于野外露头 and 现代沉积, 在借鉴国内外河流经验公式对点坝侧积体展布的规模、倾向和倾角进行了详细的研究; 张昌民等^[10]也对点坝侧积体的识别方法进行了详细讨论和总结, 由此可见, 点坝侧积体的研究方法已比较成熟, 概括起来, 对点坝侧积体的研究主要有 3 个方面: ①侧积体的规模(长宽); ②侧积体倾向; ③侧积体倾角^[13]。除了上述 3 个方面外, 笔者认为还有一个重要参数对于沉积演化过程分析至关重要, 那就是侧积体排列间距的估算, 因此, 笔者在引用前人成熟理论和方法的基础上, 增加侧积夹层间距方面的研究, 最终完成研究区点坝建筑结构精细解剖。现以点坝 1 为例, 结构参数提取过程如下:

(1) 侧积体规模提取

侧积体规模的提取无非包括侧积体空间展布的长度和宽度, 其中长度的求取也是点坝长度的求取, 对于这方面的研究, 国内一些学者通过 Google 地图上的卫星图片拾取多条曲流河的样本(图 7), 发现点坝长度(W_d)是活动水道的宽度(W)的函数, 即满足:

$$W_d = 85 \ln(W) + 250 \quad (1)$$

W_d : 点坝长度(侧积体长度), 单位 m;

W : 活动水道的宽度, 单位 m。

根据已知密集井网与相控基础上, 求得废弃河道(相当于末期活动水道)宽度约为 100 m, 带入上述公式, 求得点坝侧积体长度(也是点坝长度)约为 650 m, 而侧积体宽度计算按 Ethridge Schumm 关系式^[14], W_L (侧积体宽度) = $2/3W$, 将废弃河道数据带入上式中, 可求得侧积体宽度 W_L 大约为 67m。

(2) 侧积体倾向提取

点坝侧积体倾向提取目前应用比较成熟的还是利用废弃河道平面分布规律来提取侧积体倾向。废弃河道平面分布是河道演化的最终残留轨迹, 侧积层总是向废弃方向倾斜, 因此, 废弃方向指示了侧积体的倾向, 提取原则是在新月形的废弃河道上, 把凸岸



图 7 卫星照片活动水道与点坝长度关系示意图
(据岳大力, 2006)

Fig.7 The schematic diagram showing the relationship between activities waterways and point bar(after Yue, 200)

指向凹岸方向作为侧积体的倾向。

(3) 侧积体倾角提取

侧积层倾角提取, 一般常用的主要有 4 种方法, 分别是岩芯法、对子井技术、废弃面技术和连续取芯分段提取技术^[8]。岩芯法和连续取芯分段提取技术需要取芯段有具水平层理的暗色泥岩段, 以便于进行拉平校正, 以消除后期构造因素的影响。本次研究根据实际资料的情况, 主要采取废弃面和对子井技术, 由于侧积面并非是一个平面, 而是呈上缓—中陡—下缓的凹面, 而中缓又是其近似的均值, 所以一般用侧积面中部的倾角代替侧积体倾角。前人通过野外露头 and 现代沉积及研究实例, 得出侧积体倾角上部平均 8° 、中部 12° 和下部 20° ^[8], 本次结合对子井技术最终求取其倾角均值为 $\arctg(3.0/17) \approx 10^\circ$ (图 8)。

(4) 侧积夹层间距提取

侧积夹层间距实际上就是侧积泥岩夹层近河道顶部位置之间的间隔, 是储层构型平面图中非常重要的一个参数, 其求取方法主要是在侧积层倾角提取基础上, 利用公式:

$$\Delta L = \Delta l + \Delta z / \text{tg}\theta \quad (2)$$

ΔL : 侧积夹层间距, 单位 m;

Δl : 对子井井距, 单位 m;

Δz : 对子井上下两个夹层两井点处落差, 单位 m;

θ : 侧积体倾角。

将如图 8 中所示的相应数据代入式(2), 即可求得侧积夹层间距大约为 31.2 m。

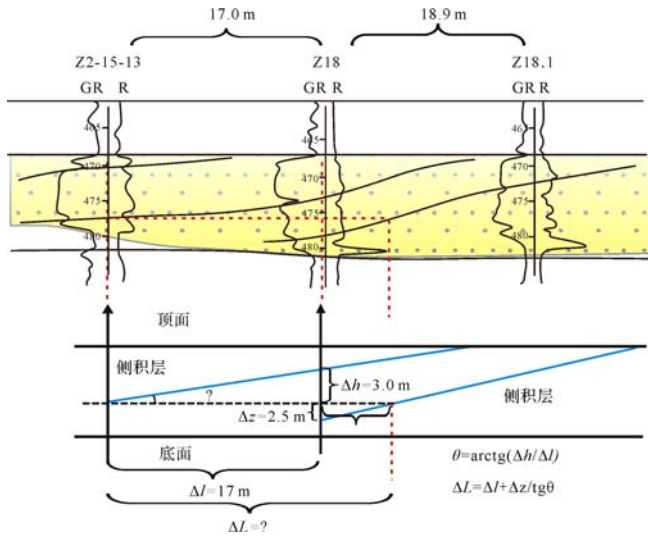


图8 利用对子井技术估算侧积体倾角及间距

Fig.8 The estimates of lateral accretion bodies distance and dip using pairs well technology

(5) 点坝侧积体精细解剖

通过对研究区点坝侧积体规模、倾向、倾角和侧积夹层间距等参数的提取,建立了点坝建筑结构识别关键参数数据库,并以此为基础,通过近20条骨架剖面,对研究区第17小层地层单元的曲流河道砂体进行精细解剖,解剖结果见图9,对已识别出的7个主要点坝内部结构进行了精细解剖,其中在Z24井区的点坝单元中识别出了7个侧积体,向Z24-Z2-12-4井方向侧积,最终在Z4-1井处以渐弃废弃河道终结。另外,在Z2-14-9井区发育的点坝,在沉积第6个侧积体单元时,由截弯曲直作用,该处点坝遭受了废弃,从而结束了其沉积发育历史,形成了残余型点坝。

5 河道演化过程与历史重建

与构造发育史一样,河道也存在从诞生到最终消亡的演变过程,因此通过其演变过程的历史重建,有助于对砂体建筑结构进行精细解剖,并从成因的角度给予合理的解释。关于河道演化过程重建方面的研究成果较少,只是近几年,这方面问题才得到了国内众多学者的关注,并提出了用河道流线,通过对河道初始位置和末期河道的识别,中间插值河道流线的方法试图分析和描述河道演化历史^[10,15-16]。河道流线按笔者的理解就是不同期次河道核部顺流途经的路线,这种路径如果能通过一定的方法求取,那么河道的演变历史的恢复自然就解决了,然而遗憾的是,前人对河道流线如何提取和构建的问题却没有给

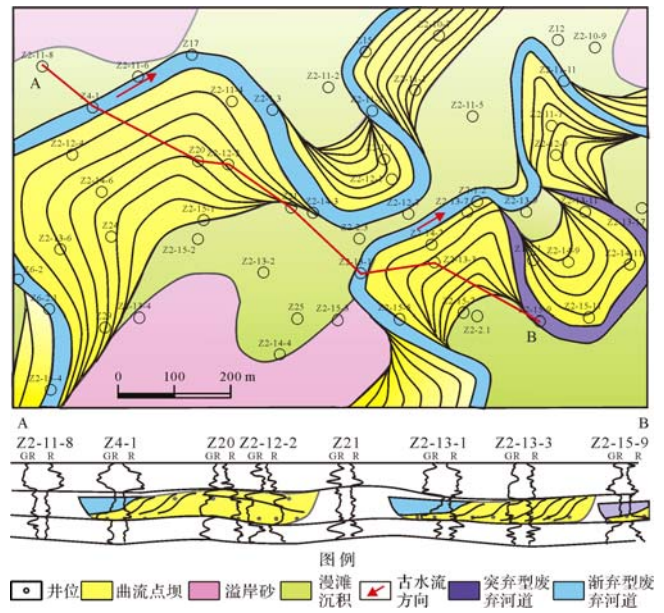


图9 点坝侧积体建筑结构解剖图

Fig.9 The structural and anatomical map of point bar

与详细的分析和描述。笔者认为,如果能够把每期侧积体识别出来,河道演化的问题也能迎刃而解,因为每一期侧积体单元代表一次洪水期砂质沉积事件,而侧积体间的侧积泥岩夹层代表的是憩水期泥质沉积事件,因此,可以用单期侧积体的在整条河道的延伸轨迹近似代替一期河道流线,从而就克服了河道主流线位置无法估算与河道内插主流线误差较大等问题。

实际上侧积体的识别难度较大,这要求的资料比

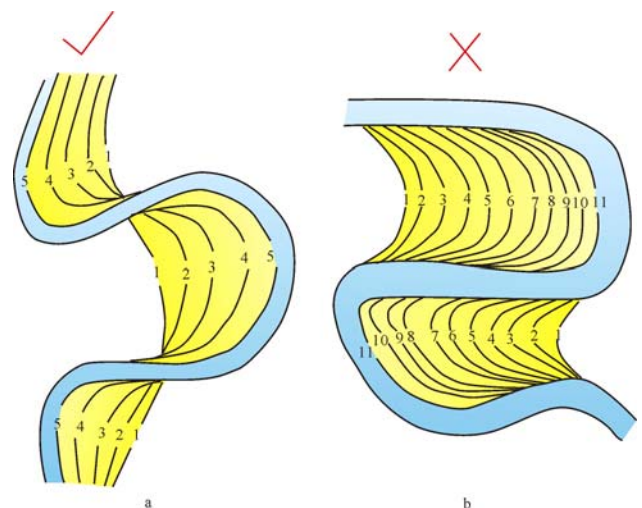


图10 点坝侧积体同期组合正确与错误对比图

a.正确点坝侧积体堆叠方式;b.错误点坝侧积体堆叠方式

Fig.10 Right and wrong comparison chart of corresponding time period point bar combination

a. the correct case of lateral accretion bodies accumulation; b. the wrong case of lateral accretion bodies accumulation

较苛刻,如必须有密集井网等,除此之外,最大的难点在于同一河道位于不同点坝单元同期侧积体组合问题,如图 10a 所示,按发育顺序,从第 1→第 5 排列的侧积体,按相邻相近原则,对同期次侧积体进行组合,其临近同期侧积体对接是合理的,能够保证每期次的侧积体都位于不断蛇曲化的流线上,因此,图 10a 是一个正确的侧积体空间叠置模式,而图 10b 则是错误的点坝侧积体构建模式,相邻点坝同期侧积体对接不合理,如第 1 期次侧积体两者不在一流线上。

因此,要对河道沉积演化史进行重建,就必须先对点坝侧积体进行识别、精细解剖与组合。如图 10a,可以获得 5 条河道流线,然后按发育顺序依次复原排开,以便再现河道沉积演化历史。值得注意的

是,不能把研究顺序搞反,如先河道流线后侧积体识别流程是错误的。河道初始位置的确定,可以采用图 4 中的基于砂厚图的包络线法,即可有效识别河道初始位置和末期河道位置,中间河道流线用同期侧积体组合形成的轨迹代替,这样就可对曲流河道沉积演化史进行有效的恢复和重建。

以扶余采油厂杨大城子油层组第 17 小层单元为例,根据图 9 点坝建筑结构精细描述与刻画为基础,综合运用基于砂厚的包络线法、同期侧积体组合法,对研究区河道演化史进行了恢复,重建结果见图 11 所示,由 a→f 是一个关键时间节点,在这段沉积期,河道正常蛇曲,而到了 f→g,右下方的曲流河道其中第 6 个曲流环,可能处于洪水期,水动力增强,加之此

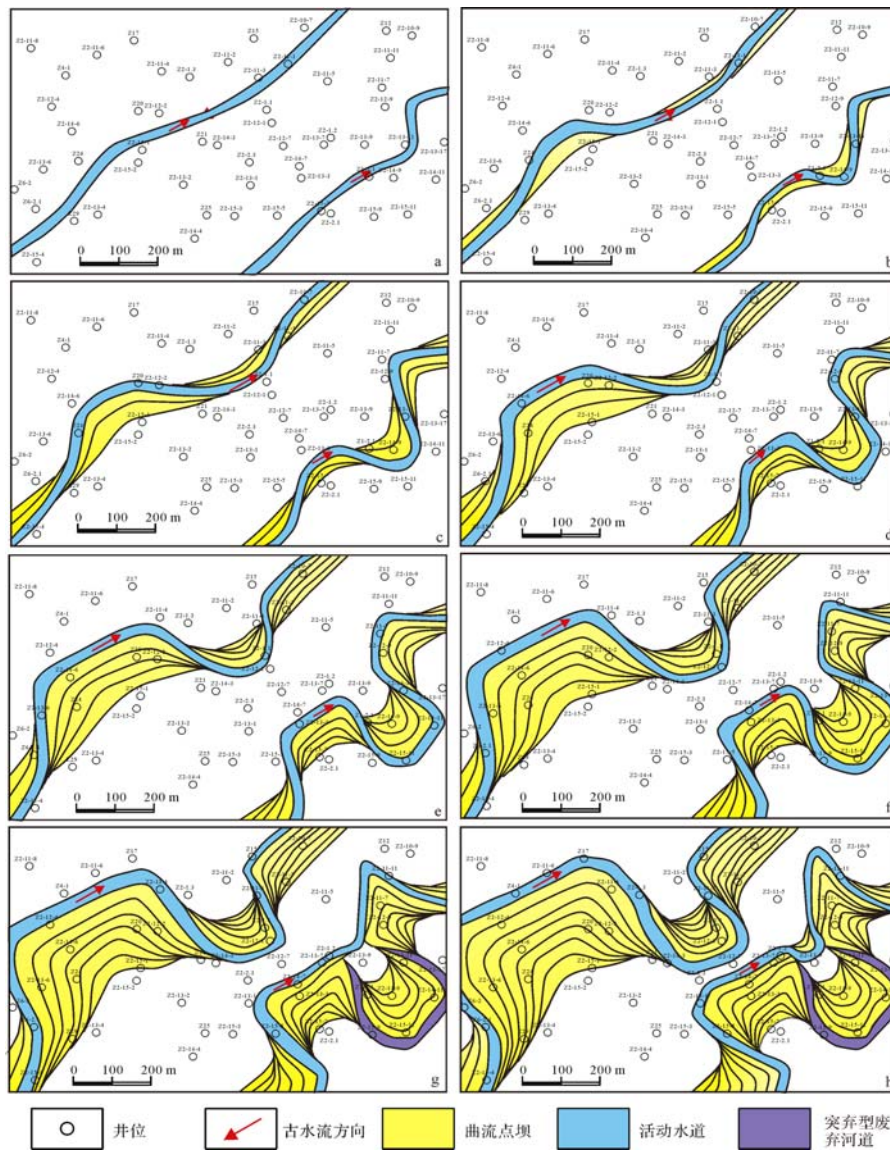


图 11 曲流河道沉积演化历史恢复图

Fig.11 Sedimentary evolution recovery map of meandering river

处的河道弯度指数过大,造成了决口改道,颈项截弯曲直作用的结果便是该曲流环所在的点坝废弃,改道后的水流在旁侧开始了新一轮曲流河道演化历史。

6 结论与讨论

关于曲流河研究,很多学者都认为其已相当成熟的一个河型,然而,对于河流演化历史的恢复方面的研究,成果则相对比较少,主要体现在以往的研究大都关注其沉积模式、地质概念模型方面,更多的是静态和结果上的描述,对成因和过程上的描述则比较少,这可能与曲流砂体结构复杂、研究难度太大有关。笔者提出的基于砂厚包络线法识别点坝,这种方法易操作,但是,这种方法也不能做到百分之百的准确,单一河道识别精确与否要受多种因素控制,如前期小层对比是否等时,砂体厚度图井间预测是否准确,定相是否合理等方面的制约。当然,单一河道和点坝的识别,最好还是要综合其它多种方法,如废弃河道面法等等,才能得到更理想的结果。不可否认,对于河道频繁改道,砂体极度复杂化的区域,其过程基本上是不可恢复的。同一河道内点坝同期侧积体组合问题,同样也不能做到绝对等时,因为相邻点坝两侧的侧积体由于规模太小,目前来看,是无法做到准确识别的,因此,只能在研究过程中采取“相邻相似”原则进行近似对接组合,使其尽可能符合地质规律,还原地下真是情况。

在重点论述曲流河道砂体建筑结构、河道演化过程及历史重建问题基础上,对成果进行了系统总结,结论如下:

(1) 在沉积微相研究成果的基础上,通过基于砂厚分析的初、末河道流包络线法,可以有效识别圈定点坝,通过该方法,将第17小层识别出了7个点坝单元。砂体等值图上,曲流河砂厚中心呈非线性串珠状,这恰好符合曲流河砂体平面展布规律,与曲流河道侧向迁移摆动,使砂体平面分布不均衡,砂体侧积的结果是局部砂厚中心呈非线性串珠状排列的主控因素。

(2) 以点坝1结构解剖为例,通过采用对子井技术、经验公式和卫星照片等资料,估算其点坝的长度大约为650 m,宽度大约67 m,侧积倾角平均约 10° ,侧积夹层间距约31.2 m。

(3) 以小层对比与沉积微相研究结果为基础,通过采用初、末期河道流线包络线法、砂厚中心连线法和废弃河道法,首先完成对曲流点坝的识别,然后在

单期河道砂厚图上,对初期河道流线识别采用最短路径法,对末期河道流线采用最长路径法,完成河道初始位置和末期位置的估算,而中间的河道流线用单期点坝侧积体代替,用侧积体的演化历史去河道流线迁移历史,最后用该方法,完成了第17小层单元曲流河道沉积演化史的重建,重建结果表明,研究总共发育了8期次曲流环。其中在Z2-14-9井区,河道演化中间出现了废弃然后再演化的过程,出现终止的时段处于第6期曲流环,在该曲流环发育末期,河道由于在该井处发生了颈项截弯曲直作用,将Z2-14-9井区的曲流环整体废弃,在Z2-13-9井处继续完成两期曲流环沉积后,最终结束了单一河道的沉积演化史。

参考文献 (References)

- 1 隋新光,赵敏娇,渠永宏. 水平井挖潜技术在大庆油田高含水后期厚油层剩余油开发中的应用[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(1): 112-119. [Sui Xinguang, Zhao Minjiao, Qu Yonghong. Application of latent power tapping in horizontal wells in remaining oil of thick reservoirs in the later period of strong water sensitivity of Daqing Oil Field[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2006, 30(1): 112-119.]
- 2 隋新光. 曲流河道砂体内部建筑结构研究[D]. 大庆:大庆石油学院, 2006: 19-22. [Sui Xinguang. A study on internal architecture of channel sand in meandering river[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2006: 19-22.]
- 3 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(D辑):地球科学, 2008, 38(增刊1): 111-121. [Wu Shenghe, Yue Dali, Liu Jianmin, et al. Level modeling research of reservoir architecture for underground ancient channel[J]. Science China (Seri.D): Earth Sciences, 2008, 38(Suppl. 1): 111-121.]
- 4 吴胜和,纪友亮,岳大力,等. 碎屑沉积地质体构型分级方案探讨[J]. 高校地质学报, 2013, 19(1): 12-22. [Wu Shenghe, Ji Youliang, Yue Dali, et al. Discussion on hierarchical scheme of architectural units in clastic deposits[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(1): 12-22.]
- 5 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.]
- 6 林承焰,余成林,董春梅,等. 老油田剩余油分布——水下分流河道岔道口剩余油富集[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 829-835. [Lin Chengyan, Yu Chenglin, Dong Chunmei, et al. Remaining oils distribution in old oilfields; enrichment of remaining oils in underwater distributary channel crotches[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5): 829-835.]
- 7 马世忠,杨清彦. 曲流点坝沉积模式、三维构形及其非均质模型

- [J]. 沉积学报, 2000, 18(2): 241-247. [Ma Shizhong, Yang Qingyan. The depositional model, 3-D architecture and heterogeneous model of point bar in meandering channels[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(2): 241-247.]
- 8 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 for studying thin interbed architecture of burial meandering channel sandbody[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(4): 632-639.]
- 9 马世忠, 吕桂友, 闫柏泉, 等. 河道单砂体“建筑结构控三维非均质模式”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.]
- 10 张昌民, 尹太举, 喻辰, 等. 基于过程的分流平原高弯河道砂体储层内部建筑结构分析——以大庆油田萨北地区为例[J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 653-662. [Zhang Changmin, Yin Taiju, Yu Chen, et al. Reservoir architectural analysis of meandering channel sandstone in the delta plain based on the depositional process[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 653-662.]
- 11 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 the abandoned channel in meandering river[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2010, 25(1): 19-23.]
- 12 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.
- 13 岳大力. 曲流河储层构型分析与剩余油分布模式研究——以孤岛油田馆陶组为例[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2006: 68-103. [Yue Dali. The study on architecture analysis and remaining oil distribution patterns of meandering river reservoir—a case study of Guantao Formation, Gudao oilfield[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2006: 68-103.]
- 14 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. [Xue Peihua. An Introduction to Reservoir Models of Point Bar Facies[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 55-63, 125-128.]
- 15 赵翰卿, 付志国, 刘波. 应用精细地质研究准确鉴别古代河流砂体[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(2): 68-70. [Zhao Hanqing, Fu Zhiguo, Liu Bo. Identification of the paleochannel sandbodies based on detailed geological study[J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(2): 68-70.]
- 16 裘亦楠. 储层沉积学研究工作流程[J]. 石油勘探与开发, 1990, 17(1): 85-90. [Qiu Yanan. A proposed flow-diagram for reservoir sedimentological study[J]. Petroleum Exploration and Development, 1990, 17(1): 85-90.]

Evolution Process and Historical Reconstruction of Meandering River : An example from Fuyu oil reservoir of Yangdachengzi Oil Production Plant in Jilin Oilfield

SHAN JingFu¹ ZHAO ZhongJun^{2,3} LI FuPing^{2,3} SUN LiXun⁴
TANG NaiQian¹ WANG Bo⁵ GAO HuaiXi⁴

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, MOE, Yangtze University, Wuhan 430100;

2. Research Center of Sulige Gas Field, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018;

3. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an 710018;

4. Geological Institute of Oil Production Plant in Liaohe Oilfield, Panjin, Liaoning 124010;

5. First Oil Production Plant in Xinjiang Oilfield, Karamay, Xinjiang 834000)

Abstract: Fluvial-delta reservoir architecture has been another geological hotspot over the past 20 years, and many scholars constructed geological models based on different perspectives and different research methods. However, the underground reservoirs are extremely complex which are composite sandbodies and reformed frequently, not single cause, such as there is erosion, cut and discarded phenomena etc. when channels swing and migrate, which make the sandbodies complicated in a certain extent. The wrong conclusions and understandings are drawn easily and make the complex reservoirs originally crude and simplistic if can not start from the causes of evolution, but describe results of the deposition directly. All of these will be not conducive to adjust for the late oilfield.

The natural flow barrier from point-sandbar deposit of meandering river is a main controlling factors for residual oil, and its scale is small, difficult to identify, research difficulty and more need of information and other restrictions, which restricted the fine dissection of the point bar. Authors will rebuild the historical evolution of meandering rivers

by reconstructing process of channels deposition process from semi-qualitative and semi-quantitative point of view in order to make the reconstruction and result more reasonable.

The Yangdachengzi oil-bearing formation in Fuyu Oil Production Plant of Jilin Oilfield is main object of this study. Fuyu oilfield locates in No.3 Fuxin uplift structural belt in the eastern edge of the southern Songliao Basin, and the dome anticline is complicated by faults. The reservoir mainly is controlled by structure belonging to crack, low permeability lithologic reservoirs in which distribution are relatively stable, and the lithology are mainly siltstone and fine sandstone. The previous research results show that the meandering river deposition was most developmental facies type in Yangdachengzi oil-bearing formation in Fuyu field under fluvial-delta deposition background.

The lateral accretion body size, orientation and inclination were identified by making full use of the core, logging, oil and other dense well net, point bar sand body identification, restoration, river fitting parameters and estimation methods based on previous sedimentary facies research, and then the course of sedimentary evolution was reconstructed according to the rule of meandering river development after the contemporaneous lateral accretion bodies were linked and built up from single stage fluvial sand bodies combined with geological conceptual model. This method could explain the problem of overlapping regular pattern and architectural structures of sandbodies from the angle of cause and process quite well, so, the explanation will be more reasonable and credible to predict the potential of residual oil based on architectural structures of sandbodies from the angle of deposition process and deposition result. By using the above methods, the reconstruction of meandering river sedimentary evolution history was completed in the thin layer small-scale. Practical results show that the evolution of the meandering point bar historical reconstruction provided the solid foundation for the fine anatomy of meandering channel sandbodies, and effectively guide the remaining oil forecast and tapping potential in advanced stage.

Key words: meandering river; riverway evolution; lateral accretion bodies; deposition process; architectural structures of sandbodies