

文章编号: 0253-2697(2015)07-0809-11 DOI:10.7623/syxb201507005

地下曲流河点坝砂体沉积演化过程分析

——以吉林油田杨大城子油层第 23 小层为例

单敬福¹ 张吉^{2,3} 赵忠军^{2,3} 李浮萍^{2,3} 孙立勋⁴ 张彬¹ 方世祥¹

(1. 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室 湖北武汉 430100; 2. 中国石油长庆油田公司苏里格气田研究中心 陕西西安 710018; 3. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室 陕西西安 710018; 4. 中国石油辽河油田公司兴隆台采油厂地质研究所 辽宁盘锦 124010)

摘要:目前对于曲流河点坝构型的研究成果主要集中在“结果”的分析和描述,而对于点坝内部侧积体“成因”的研究成果则相对较少。鉴于此,通过充分利用岩心、测井、密井网等资料,在废弃河道和点坝砂体的识别以及多种构型参数估算的基础上,结合前人研究成果,采用“相邻相似”原则对单一河道相邻点坝侧积体进行组合,然后按先后发育顺序揭示曲流河道横向迁移、摆动与演化规律,再现曲流河道沉积演化过程。这种方法重建了曲流河道水动力学演化过程,解析了曲流河点坝砂体的层次建筑结构。该研究成果不仅使曲流河点坝内部砂体建筑结构解剖结果更合理、更可信,而且还丰富了地下河流相储层构型理论。

关键词:曲流河;演化过程恢复;侧积体;沉积建造;构型

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Analysis of sedimentary and evolution process for underground meandering river point bar: a case study from No. 23 thin layer of Yangdachengzi oil reservoir in Jilin oilfield

Shan Jingfu¹ Zhang Ji^{2,3} Zhao Zhongjun^{2,3} Li Fuping^{2,3} Sun Lixun⁴ Zhang Bin¹ Fang Shixiang¹

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Hubei Wuhan 430100; 2. Research Center of Sulige Gas Field, PetroChina Changqing Oilfield Company, Shaanxi Xi'an 710018, China; 3. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Shaanxi Xi'an 710018, China; 4. Geological Institute of Xinglongtai Oil Production Plant, PetroChina Liaohe Oilfield Company, Liaoning Panjin 124010, China)

Abstract: The current research findings of meandering river point-bar configuration mainly focuses on the analysis and description of “results”, but less on the “genesis” of point-bar lateral accretion bodies. Accordingly, based on full use of coring, logging, dense well pattern and other data, the identification of abandoned channels and point-bar sand bodies as well as the estimation on multiple configuration parameters and in combination with previous research results, the point-bar lateral accretion bodies adjacent to single channel were taken as an assemblage in line with the Proximity-Similarity Principle. Then, the lateral migration, swing and evolution laws of meandering river channels were revealed in sequence of successive development, so as to recover the sedimentary evolution process of meandering river channels. This method was applied to rebuild the hydrodynamic evolution process of meandering river channels and analyze the hierarchical structures of meandering river point-bar sand bodies. This result not only makes the analytic results of meandering river point-bar structures more reasonable and credible, but also further enriches the configuration theory of underground fluvial reservoir.

Key words: meandering river; recovery of evolution process; lateral accretion bodies; sedimentary formation; configuration

引用:单敬福,张吉,赵忠军,李浮萍,孙立勋,张彬,方世祥.地下曲流河点坝砂体沉积演化过程分析——以吉林油田杨大城子油层第 23 小层为例[J].石油学报,2015,36(7):809-819.

Cite:Shan Jingfu,Zhang Ji,Zhao Zhongjun,Li Fuping,Sun Lixun,Zhang Bin,Fang Shixiang. Analysis of sedimentary and evolution process for underground meandering river point bar;a case study from No. 23 thin layer of Yangdachengzi oil reservoir in Jilin oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica,2015,36(7):809-819.

随着中国各大油田勘探开发程度的不断深入,注采矛盾逐渐突出,剩余油更多富集在储层的隐蔽部位,因此迫切需要进行精细解剖储层砂体建筑结构,以解

决注采不均衡等开发问题。尤其是曲流河储层的开发矛盾更为突出,这与曲流河内部多侧积泥岩夹层并形成诸多渗流屏障有关。然而,诸多学者多着重从沉积

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41372125)、湖北省自然科学基金项目(2011CDB002)、湖北省教育厅基金项目(Q20121210)和中国地质大学(武汉)重点实验室开放基金项目(TPR-2012-23)资助。

第一作者及通信作者:单敬福,男,1977年9月生,2002年获大庆石油学院学士学位,2008年获同济大学博士学位,现为长江大学地球科学学院副教授,主要从事沉积学与开发地质学教学与研究工作。Email:shanjingfu2003@163.com

结果角度进行研究,而非从其成因过程进行分析,由此造成点坝砂体内部建筑结构解剖的随意性,从而使其可信度和精度大打折扣。如果能从成因动力学角度去恢复并再现曲流河沉积演化过程,则点坝砂体内部侧积泥岩夹层的预测将更加可信与合理。由于曲流河沉积在平面上缺乏稳定性,河道经常迁移、摆动,由此造成平面砂体聚集的不平衡。对于曲流河砂体建筑结构的解剖,前人已做了不少相应的研究,隋新光等^[1,2]通过对曲流河水动力学研究,认为洪水期与枯水期水动力学差异是河床主流线有规律迁移的主控因素,并指出洪水期是曲流河点坝砂体沉积的关键时期;吴胜和等^[3,4]通过对多个油田的曲流河储层构型,指出层次约束、模式拟合和多维互动等技术是河流相储层构型的有效方法;岳大力等^[5,6]通过综合野外露头、现代沉积的分析和描述,建立和提出了曲流河点坝内部构型定量模式以及点坝规模估算和定量表征方法;马世忠等^[7,9]在综合考虑曲流河道内部渗透率非均质性基础上,提出了曲流河点坝三维构型模式,其中通过从侧积泥、侧积面、废弃河道3个构型要素入手,结合河工参数,提出了点坝侧积体规模估算的13种方法,并对单一点坝内部结构进行了精细描述;张昌民等^[10]通过对废弃河道的识别,采用估算和在河道内插主流线的方法来初步再现曲流河道沉积演化过程,使储层构型首次上升到演化动态的角度,但是,对于主流线的估算

带有一定主观随意性,也难以量化,因此,降低了过程分析的可信度。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,通过主流线的变迁来重建河道演化历史,尽管思路正确,但缺乏判断的依据,同时,也缺乏可操作性。实际上,主流线的识别非常关键,尽管主流线的迁移能够很好再造重塑河流演化历史,但主流线如何识别,并且识别的依据和操作流程如何,以及如何用主流线去恢复曲流河沉积史都需要进一步加以研究。为解决此类问题,笔者从半定性半定量角度重建了曲流河道演化历史,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。

1 理论基础

为了重建曲流河演化过程,选取下白垩统泉头组三段杨大城子油层第23小层为主要研究对象。研究区位于松辽盆地中部大庆长垣南部吉林油田扶余采油厂中38区块南部(图1),其中泉头组三段(泉三段)沉积期处在松辽盆地由断陷向拗陷转变阶段,来自南部的双城—德惠大型长轴方向的河流—三角洲沉积体系广泛发育,且研究区恰好位于该沉积体系上分流平原曲流河段。前人通过大量研究认为^[11-13]泉三段杨大城子油组可划分为15个小层,每个小层时限大致与单期曲流河道相当。

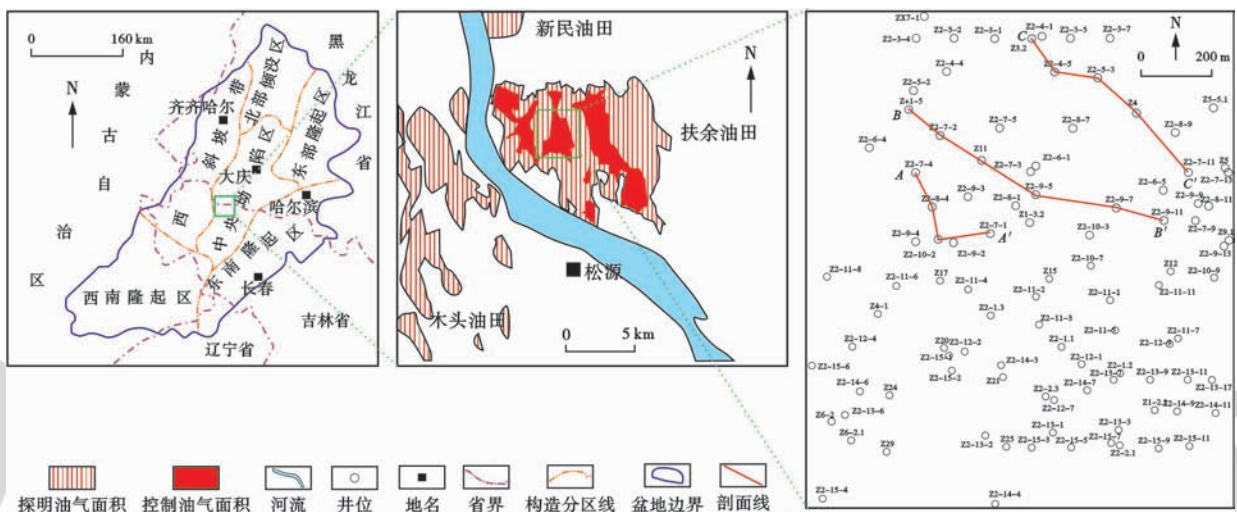


图1 研究区位置

Fig. 1 Study area location

前人精准小层等时地层格架与单期沉积微相河道与非河道平面分布界限的建立,为本次研究提供了研究基础。单期河道平面微相图中的河道微相更多具有域的概念,即更多指示河道域与非河道域的空间分布界限,而并没有指明河道域中究竟存在多少单一河道,即河道的单一性与单一河道彼此交切关系没有很好地

体现出来,因此,在进行曲流河点坝解剖与历史重建恢复之前,首先要进行单一河道的识别。单一河道的识别方法主要有废弃河道法、层拉平高程差异法以及河间细粒沉积识别法。在单一河道识别过程中,废弃河道的识别最为关键,因为废弃河道的存在,代表单一河道演化历史的终结。废弃河道在平面上主要有2种废

弃形式:①单水流形成的废弃河道,如串沟型、颈切型和决口改道型;②多水流作用形成的废弃河道,例如串流改道型废弃河道^[14]。

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2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]。突弃型废弃河道可以很好揭示河道废弃方向,但不能定位末期河道的位置,平面上多不完整并多呈孤立、新月形状分布;而渐弃型废弃河道平面分布完整、延续性好,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3个参数,采用初期河道流线与末期河道流线(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4个关键参数,通过对单一河道内部多个点坝侧积体同期次编号和组合,然后将侧积体按发育顺序依次展开,最终完成单一河道沉积过程与历史的重建。

2 单一河道识别

单一河道,也有学者称之为单河道,针对曲流河道而言,所谓单一河道,其着重强调平面的分支性,垂向

一般对应一个沉积旋回,其代表从河道发育开始到最终废弃的一个完整过程,如果切叠程度不是较深的情况下,垂向上一般表现为典型的河流“二元结构”。如果从构型角度,其顶、底界面相当于 Miall 构型界面的5级^[15,16],实际上,复合河道内部可由2个至多个单期河道叠覆而成,而单一河道内部可进一步细分至点坝(相当于 Miall 的4级),点坝内部又由多个侧积体(相当于 Miall 的3级^[15,16])沿着一定方向依次侧向叠覆而成。

在单一河道识别过程中,首先是复合河道的识别。曲流复合河道一般由多期单一河道不断侧向迁移摆动、废弃和切叠等作用形成,其级别与沉积岩相古地理的河道微相大致相当。复合河道在电测曲线上常表现为复合钟形、复合箱型和复合钟箱型,如图2所示。当可容空间较大时,复合河道电测曲线旋回容易识别和划分[图2(a)],随着可容空间的进一步减小,河道叠置程度加深,旋回可区分难度加大,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[图2(c)],这类复合河道内部单一河道最难识别,一般识别方法主要是将其置于多个骨架剖面中,反复多观察几个邻近剖面,总结砂体发育规律,然后进行合理劈分。

就曲流河型而言,单一河道识别方法较多,相对也较成熟,具有代表性的有张昌民^[10]和岳大力^[11]等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:①废弃河道;②高程差异;③河间细粒沉积(厚—薄—厚),进一步可具体分析其识别实例。

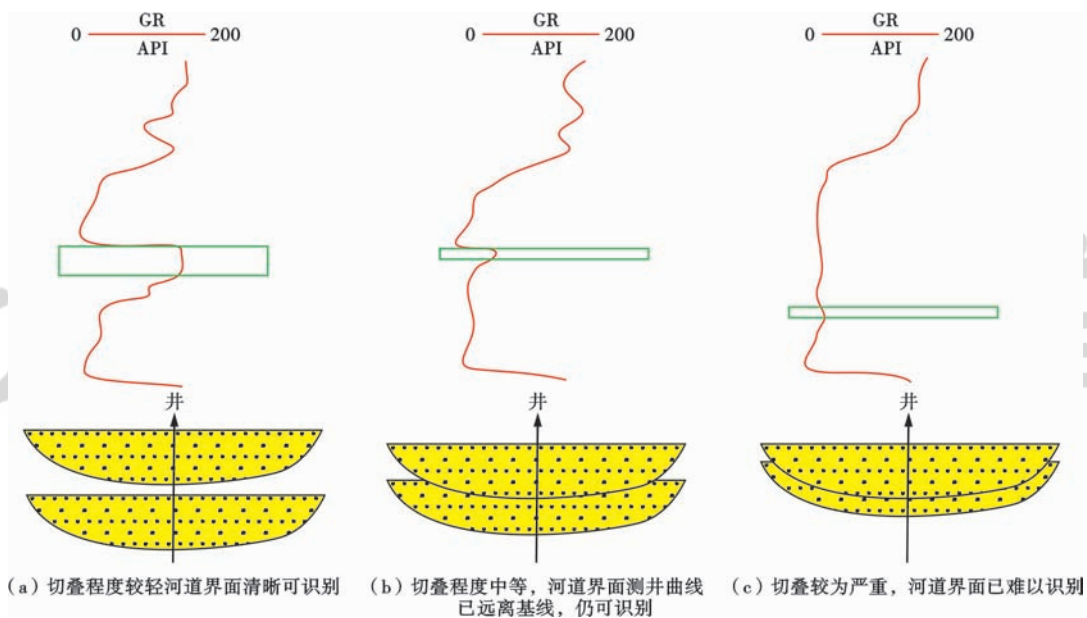


图2 晚期河道切叠早期河道类型

Fig. 2 Model of early channel stacked by late stage one

2.1 废弃河道界定单一河道边界

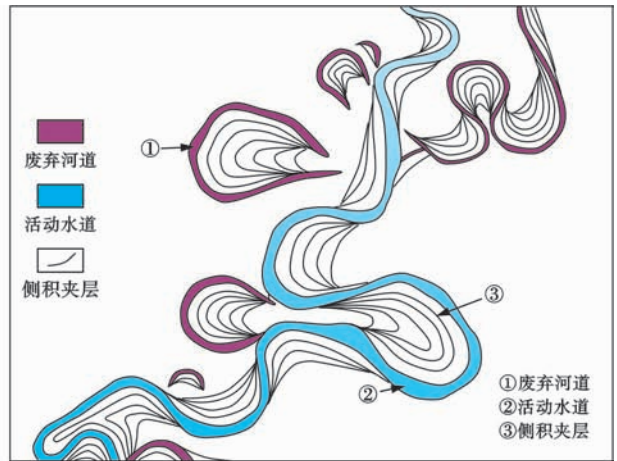
废弃河道是界定单一河道边界的重要标志,但不是决定性标志,其还要参考其他标志进行最终确定。这是由于废弃河道有多种表现形式,如单一曲流环所形成的废弃河道,平面延伸较短,这类废弃河道一般易形成牛轭湖,而非整条单一河道的废弃,如图3中①所示的废弃河道。因此,不能简单用该类废弃河道界定单一河道边界。界定单一河道的废弃河道平面延展性应较好,且具有良好的可追踪对比性,如图3中②所示的活动水道。如果其在某一时刻废弃,则其所形成的废弃河道便是渐弃型废弃河道,这是界定单一河道间

界面的良好标志。实际上,这种废弃河道在地质历史上是很难完整保存的,极易遭受晚期河道或邻近单一河道的冲刷与改造,将其延伸较远的废弃河道改造成多个孤立的废弃河道,平面上表现为多段,且支离破碎。值得一提的是,对于河道叠置程度较深、切叠改造异常复杂的区域,不仅单一河道界面无法识别,而且单一河道的演化过程与历史重建也将无法实现,因此这种类型本文暂不讨论。

在应用实例中[图4(a)],Z2-10-2井测井曲线表现为渐弃曲线类型,表明过Z2-7-1井河道在此逐渐废弃,另外与之对应的Z2-8-4井也有废弃河道特征,且



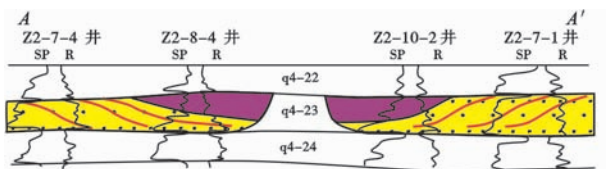
(a) 卫星图片



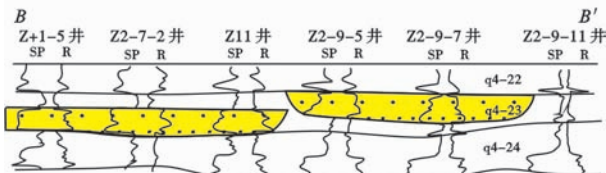
(b) 部分期次曲流段

图3 现代曲流河实例(西伯利亚叶尼塞河某支流部分,卫星图片采集于2013年)

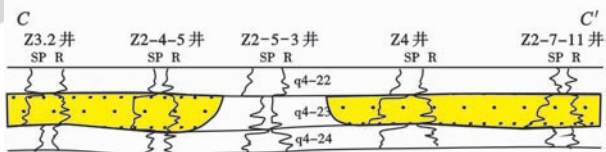
Fig. 3 Modern examples of meandering river from modern satellite image



(a) 利用废弃河道识别单一河道边界



(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一河道边界



注: SP—自然电位; R—电阻率。

图4 单一河道识别标志(剖面位置见图1)

Fig. 4 Identification sign of a single channel

相隔有一定距离,据此,可以判断Z2-7-4井和Z2-7-1井分属2个单一河道。

2.2 高程差异

曲流河道的特点是横向迁移摆动迅速、河床缺乏稳定性、侧积较为普遍,因此,在两口井之间进行单期河道同期对比是很困难的,也是不现实的。曲流河道与辫状河不同,辫状河水动力强,规模大,砂体分布范围广,多为加积、前积、漫积等砂体沉积方式,而且很少或基本无侧积,因此,单一辫状河道多井垂向期次可对比性要比曲流河好很多。对于曲流河刻意强调同期性是无意义的,因为对于单一曲流河道单期而言,其沉积的厚度在小时窗范围内的平面分布是不均衡的,剖面则多表现为泥多砂少,与辫状河恰好相反,河道砂体横向连续性较差,在小层范围内,经常是河道砂和河间泥的对比。此外,即使能够找到同期等时界面,那么这个界面也将是一个高低起伏、极不“平坦”的界面。所以,在曲流河型的同期对比过程中,相对单层时窗要拉大,在相对等时的小层地层单元格架内,采用高程差异界定单一河道边界是容易实现的。另外,在顶拉平基础

上,即使存在压实效应,由于河道上部距离顶面高程差不同,距离顶面越近的,其河道上部原始沉积泥岩厚度也越薄,在恢复到原始沉积状态时,河道仍存在高程差,高程差异的存在表明沉积不同步,因此,利用高程差异能够界定和区分单一河道。

如图4(b)所示,在标志层顶拉平条件下,Z2-9-5井和Z11井的河道砂体存在高程差,说明Z2-9-5井比Z11井所钻遇的河道砂体发育时间有错叠,缺乏沉积同步性,因此,在这两口井之间可推断出存在一河道边界。

2.3 厚度不大的河间细粒沉积

两条单一河道侧翼间漫滩沉积常表现为泥质含量较高的细粒沉积,正常属于同一单一河道的两口井钻遇的河道砂体间,一般不会存在大段泥岩的情况,据此可推断,中间钻遇大段泥岩的井位于两河道间,在排除不是小层穿时或非断层干扰等前提下,在该井处附近存在河道边界。如图4(c)所示,在Z2-4-5井与Z4井之间,因在Z2-5-3井处钻遇了厚度较大的细粒沉积,因此推测在该井附近存在河道边界。

3 点坝圈定

点坝沉积单元是曲流河道中砂体最为富集的区域,相当于Miall的4级构型界面^[15,16]。从水动力学的角度,点坝是由河道中单向非对称的横向环流引起的输砂不平衡形成的,凹岸遭受掏蚀,凸岸接受沉积,在洪水期与憩水期周期性交替变化过程中,形成了由若干侧向排列、呈一定角度堆叠、富砂为特征的点坝侧积体,这一现象已被现代沉积所揭示。而对于深埋地下的曲流河点坝,由于井眼一孔之见及井网密度不够大等方面所限,其内部结构精确解剖一直以来是一个难题,这方面的研究成果也较少。鉴于此,笔者借助密集井网条件,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。其中初期与末期河道流线的识别及初、末期河道流线包络线法的应用是一个关键步骤。除此之外,为了提高预测的精度,还可与密井网解剖法和废弃河道法相结合进行综合判断。

3.1 初、末期河道流线包络线法

末期河道流线实际上对应的是整条单一河道最后一期活动水道,该水道的淤塞消亡,不仅代表了该支河道沉积演化的终止,也界定了该河道输砂历史平面扩展的最大边界。因此,该末期河道流线代表的是单一河道平面摆动的最大范围,如图5中②线所示,末期河道流线一定是沿曲流河道流向途经路径最长、曲率最大的轨迹;而初期河道流线处于曲流河蛇曲演化初期,其曲率与横向摆动幅度最小,如图5中①线所示,显

然,两轨迹所包络的范围,便是曲流河点坝空间展布范围。受此启发,如果能在小层地层单元内,统计所有井的单旋回砂厚,采用井间插值得到等值线图,然后将砂厚最大之处[图5(a)]圈定起来,形成多个“串珠状”局部砂体富集中心,并沿水流方向有规律展布。在局部砂厚中心圈定基础上,遵循初期水道流线最短轨迹法,采取切线方式,依次将多个富砂中心串连起来;同理,将末期河道流线遵循最长轨迹法,依次串连起来,结果见图5(a),点坝圈定模式见图5(b)。由此可见,利用这种方法可以有效预测和识别点坝,并最终在研究区q4-23小层中识别出了4个点坝(图6)。

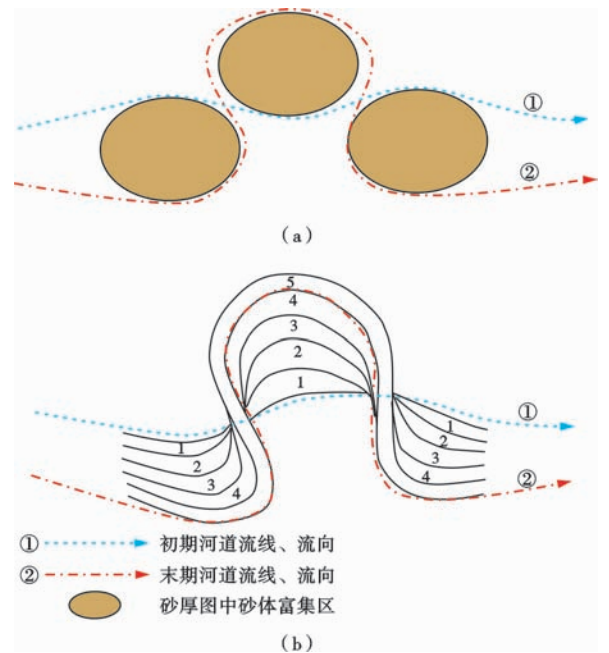


图5 利用初、末期河道流线结合砂厚法圈定点坝模式

Fig. 5 Mode chart of point bar delineation using early-final stage river flow lines by combining with sand thickness method

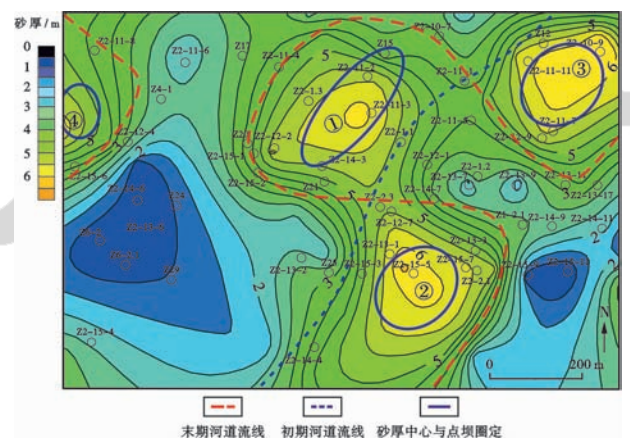


图6 采用初、末期流线包络线法结合砂厚圈定点坝

Fig. 6 Point bar delineation using early-final stage river flow lines by combining with sand thickness method

3.2 密井网解剖法

密井网解剖法是一辅助方法,首先通过对单井点坝的识别,然后结合沉积相平面展布特征,利用插值法最终对点坝进行识别。其主要是对多井岩相、测井相等方面加以研究,然后进行点坝组合。点坝是曲流河道中最主要的结构要素,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,最终向上过渡到二元结构顶部的水平层理,表现为正韵律,测井曲线外形多呈箱型或钟形。这种方法的优点是直接快速,缺点是当资料不全时,有可能引起误判;此外,点坝的识别受主观因素的影响也较大,不同地质专家基于不同视角,其识别结果也可能会有很大不同,因此,该方法只能辅助识别点坝^[17,18]。

3.3 废弃河道法

在密集井网条件下,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—期河道演化的结束,因此废弃河道常常与点坝伴生,通过对废弃河道的识别,并结合其他手段,可以完成点坝的圈定。值得注意的是,利用废弃河道法有一定局限,因为废弃河道—般没有预想的宽,多数情况下,一般井网难以对其有效控制与揭示,因此,其圈定的个数并不是最终点坝预测的个数,很可能要比实际的要少。当然,与初、末期流线包络线法相结合进行综合判断,其效果会更好^[19,20]。废弃河道结合初、末期流线法识别出的点坝结果可见图7。

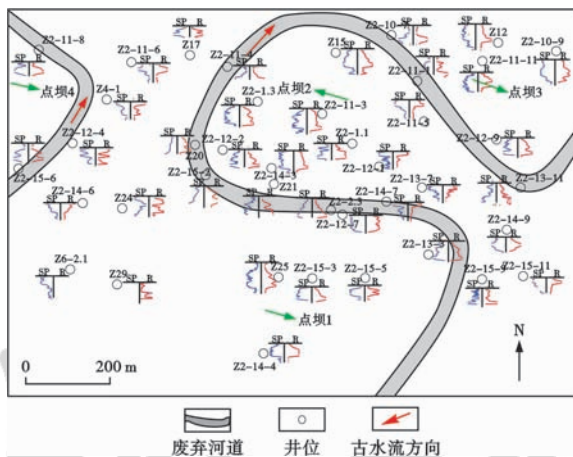


图7 利用密集井网对废弃河道的识别

Fig. 7 Identification of abandon channel using dense wells net

4 侧积体定量参数判别

侧积体是点坝内部构成单元,相当于 Miall 构型的3级^[12],其结构的解剖对钻井数据要求较高,必备条件是研究区具备密集井网条件。由于本次研究解剖区为井网加密区,且有多口对子井,因此,研究条件是具备的,可以开展相应侧积体的识别工作。

目前,侧积体研究方法已比较成熟,如马世忠等^[8]通过对曲流河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的结构参数,利用这一结构参数最终完成了点坝的精细解剖;岳大力等^[11]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。概括起来,对点坝侧积体的研究主要有3个方面:①侧积体规模(长、宽);②侧积体倾向;③侧积体倾角^[11]。除此之外,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研究方法基础上,最终完成了对点坝的精细解剖。现以识别出的点坝2为精细解剖案例,可以分析结构参数提取过程。

4.1 侧积体规模提取

侧积体规模主要包括侧积体空间展布的长度和宽度,其中长度的求取可近似用点坝长度代替,对于这方面的研究,中国一些学者通过 Google 地图上的卫星图片拾取多条曲流河的样本(图8)^[17],发现点坝长度是活动水道宽度的函数,即满足:

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

式中: W_d 为点坝长度(侧积体长度),m; W 为活动水道的宽度,m。

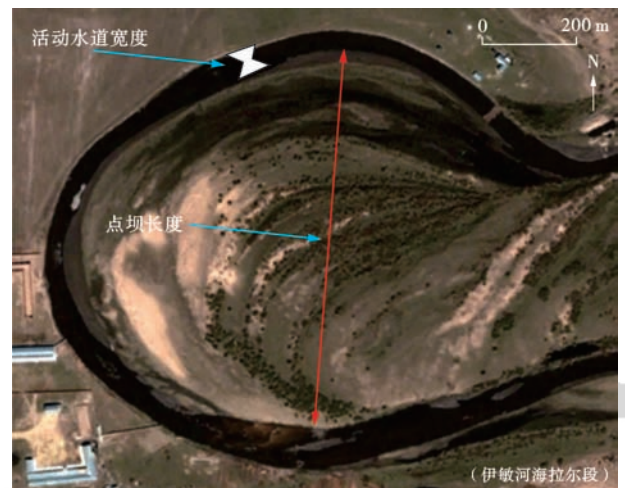


图8 卫星照片活动水道与点坝长度关系

Fig. 8 Relationship between active waterways and point bar

在已知密集井网与相控基础上,求得 q4-23 小层活动水道宽度约为 98 m,带入式(1)后,可求得点坝侧积体长度(点坝长度)约为 638 m,而侧积体宽度计算按 Ethridge Schumm 关系式^[18], W_L (侧积体宽度) = $2/3W$,将废弃河道数据带入后,可求得侧积体宽度 W_L 约为 66 m。

4.2 侧积体倾向提取

现代沉积现象揭示,曲流河道侧积体侧积方向总是指向曲流河道的废弃方向,因此,可以根据新月形废弃河道所在弧长中点切线位置与圆心连线,以及切点连线半径指示的方向,即可代表侧积体的倾向,实际上曲流河道侧积方向总是把凸岸指向凹岸方向作为侧积体的倾向,见图9所示。

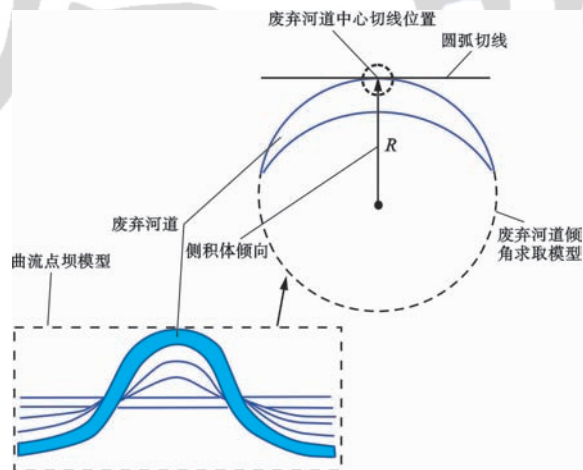


图9 侧积体倾向求取方法

Fig. 9 Solving method of lateral accretion bodies tendencies

4.3 侧积体倾角提取

一般常用的侧积层倾角提取方法主要有4种:岩心法、对子井技术、废弃面技术和连续取心分段提取技术^[8]。岩心法和连续取心分段提取技术需要取心段具有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,而是呈上缓一中陡一下缓的凹面,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 现代沉积实例研究,得出侧积体倾角上部平均 8° 、中部 12° 和下部 2° ^[8],本次结合研究区实际资料,利用对子井技术最终求取其倾角均值为 $\arctan(3.0/17) \approx 10^\circ$ (图10)。

4.4 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,采用如下公式计算:

$$\Delta L = \Delta l + \Delta z / \tan \theta \quad (2)$$

式中: ΔL 为侧积夹层间距,m; Δl 为对子井井距,m; Δz 为对子井上、下两个夹层两井点处落差,m; θ 为侧积体倾角, $(^\circ)$ 。

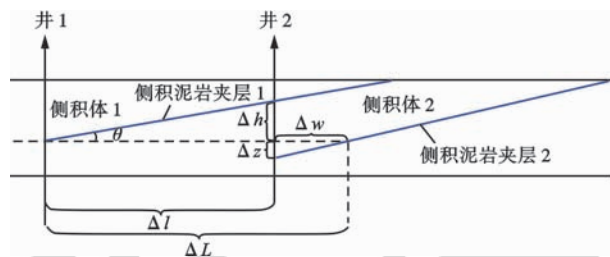


图10 利用对子井技术估算侧积体倾角及间距

Fig. 10 Estimates of lateral accretion bodies distance and dip using pairs well technology

根据研究区实测数据结果,可求得侧积夹层间距约为35 m。

4.5 点坝侧积体精细解剖

通过对研究区点坝侧积体规模、倾向、倾角和侧积体间距等参数的提取,建立了点坝建筑结构识别关键参数数据库。以此为基础,通过近20条骨架剖面,对研究区第23小层地层单元的曲流河道砂体进行精细解剖,结果见图11所示。对已识别出的4个主要点坝内部结构进行了精细刻画,其中在Z2-11-3井区的点坝单元中识别出了7个侧积体,侧积方位角约为 315° ,最终在Z2-11-4井处以渐弃废弃河道结束其演化历史。

5 曲流河道沉积演化过程恢复

目前,河流沉积方面的研究成果大都停留在结果与现象的描述,而其成因演化过程的研究则相对薄弱^[21,22]。针对曲流河的演变过程进行恢复和再现,将是一个值得探索的课题。近几年,有学者提出了通过对河道初始位置和末期河道的识别,用中间插值河道流线的方法分析和描述河道演化历史^[10]。笔者认为河道流线就是不同期次河道主体部分顺水流方向延伸的轨迹,如果这种轨迹能够定量追踪和描述,那么河道演变历史的恢复自然就解决了,然而,前人只是提出了流线法的概念,却没有明确说明流线如何提取。针对这一问题,笔者提出了利用同期侧积体组合法代替单一河道流线法对曲流河道沉积过程进行恢复。

实际上,侧积体的识别难度较大,其要求的资料比较苛刻,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的组合问题。如图12(a)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,其邻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,而图12(b)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同一流线上。

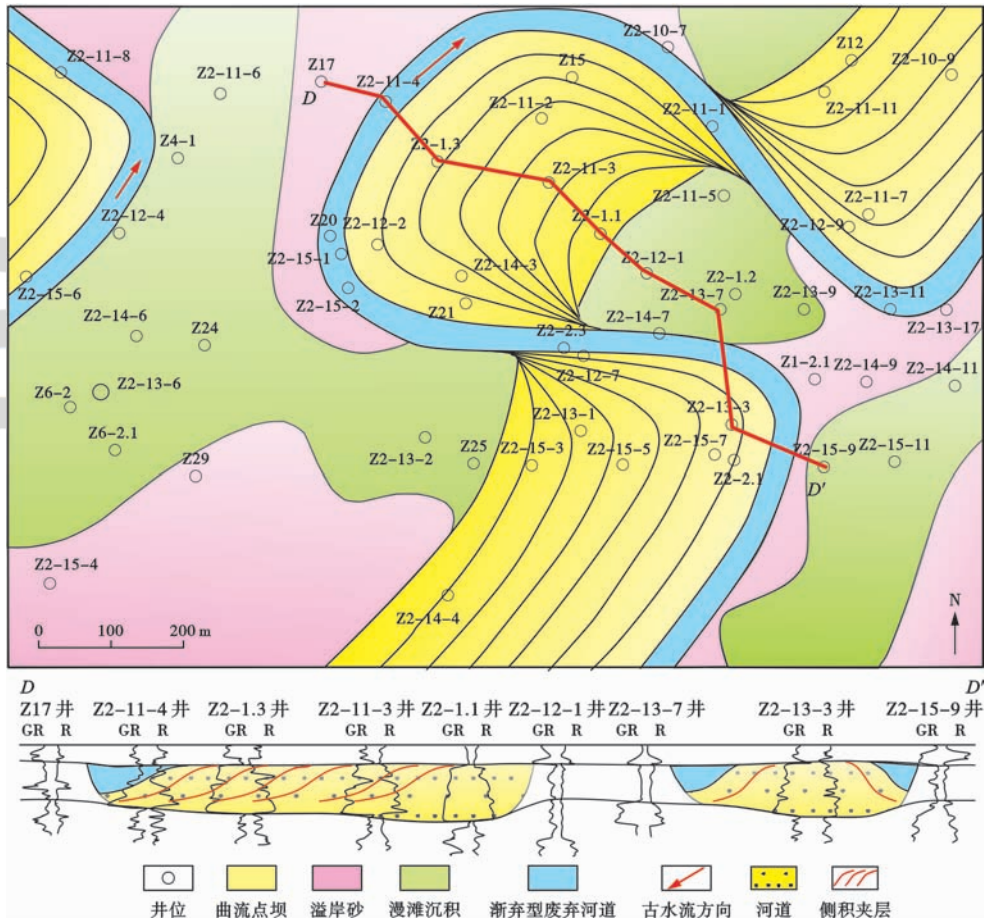
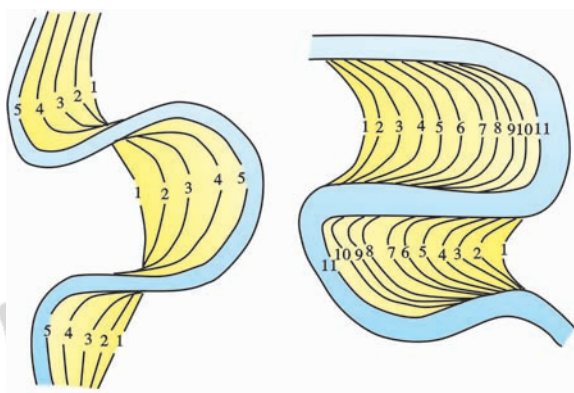


图 11 点坝侧积体建筑结构解剖

Fig. 11 Structural and anatomical map of point bar



(a) 正确点坝侧积体堆叠方式 (b) 错误点坝侧积体堆叠方式

图 12 点坝侧积体同期组合对比

Fig. 12 Comparison of corresponding time period point bar combination

值得注意的是,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 12(a)中,可以获得 5 条河道流线,然后按发育顺序依次复原排开,再现河道沉积演化历史。先估算河道流线,然后识别侧积体的研究思路是错误的。河道初始位置的确定,可以采用图 6 中的基于砂厚

图的包围线法,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;主要利用密集井网,结合侧积体定量参数的估算结果,进行侧积体的井间识别与规模的判识。利用上述方法,就可有效对曲流河道沉积演化过程进行恢复和重建。

以中国石油吉林油田扶余采油厂杨大城子油层组第 23 小层单元为例,以图 11 中点坝建筑结构精细描述与刻画结果为基础,综合运用基于砂厚的包围线法和同期侧积体组合法,对研究区河道演化史进行了恢复,重建结果见图 13 所示。由图 13(a)→图 13(f),点坝侧积体不断横向侧积,河道摆动范围逐渐加大,由早期只局限于 Z15 井—Z25 井一线呈长条状展布;到中期曲流河点坝摆动范围已波及到了 Z2-15-5 井和 Z2-1.3 井附近,沉积范围扩大明显,并在研究区的左侧,已有另一单一河道开始逐渐摆入工区;至末期曲流河道摆动范围达到最大,沉积范围已扩大到了 Z2-11-4 井、Z2-2.1 井和 Z2-13-11 井附近,另外单一河道可见最后 3 期侧积体摆入工区,并整体以第 8 期废弃河道结束了曲流河道演化历史。

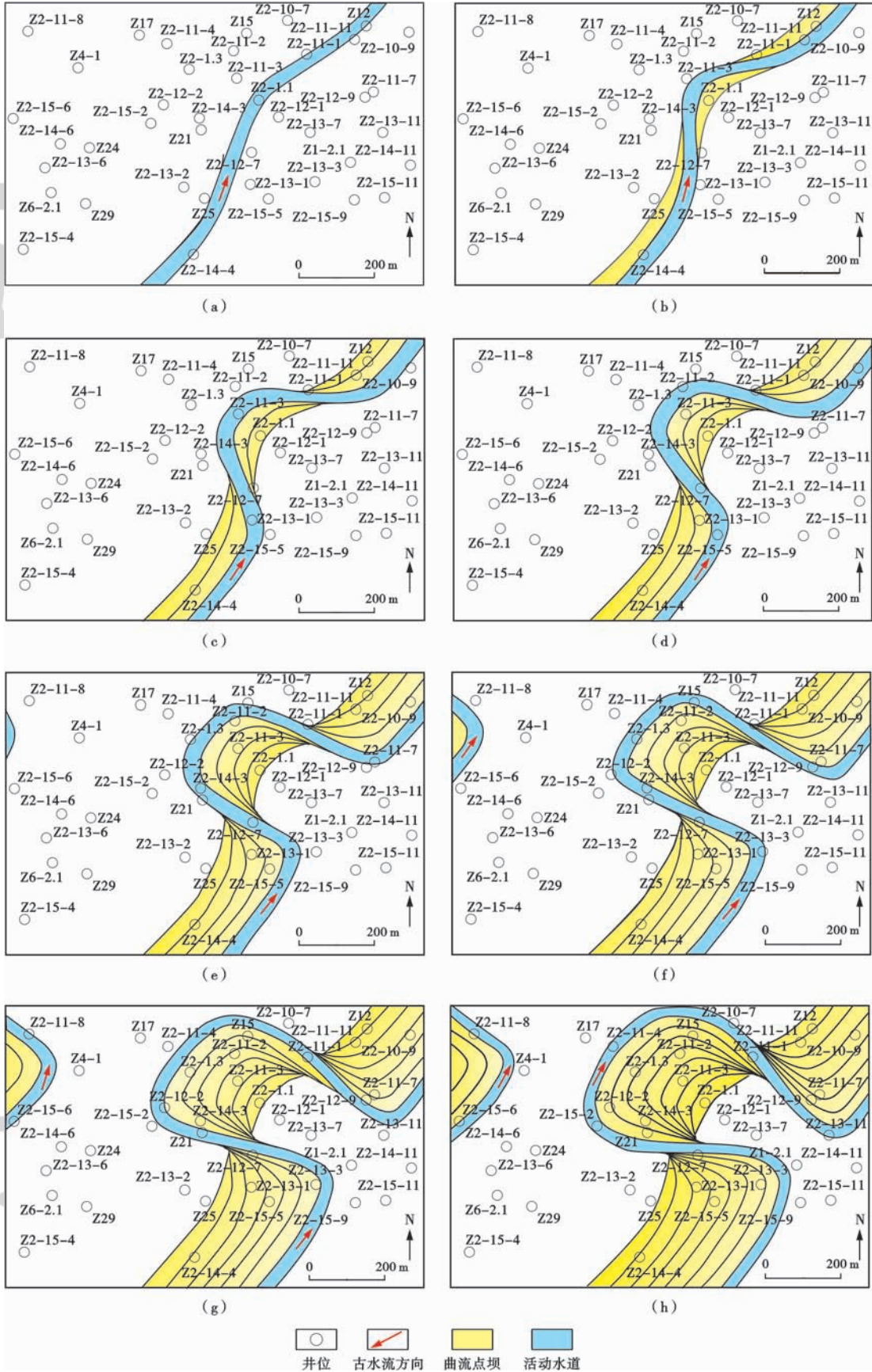


图 13 曲流河道沉积演化历史恢复

Fig. 13 Sedimentary evolution recovery map of meandering river

6 讨论

曲流河点坝有不断侧向生长的事实,但其增长过程相关研究成果则很少提及。此外,在查阅以往文献过程中,也发现很多点坝侧积体堆叠模式有很多自相矛盾之处,如图 12(b)中的点坝内部构型模式从成因上是无法解释的,之所以得出这样错误的认识,主要是因为对河道沉积演化历史没有搞清楚。笔者提出基于砂厚包络线法识别点坝,这种方法易操作,但是,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。当然,单一河道和点坝的识别,最好还是要综合其他多种方法,如废弃河道法等,才能得到更理想的结果。而且对于河道频繁改道,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,现有方法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以还原地下真实情况。

7 结论

(1) 在沉积微相研究成果的基础上,利用废弃河道、高程差异和河间细粒沉积 3 种识别标志,可以有效界定单一河道边界;利用初、末期河道流线包络线法,将吉林油田杨大城子油层第 23 小层识别出了 4 个点坝单元。通过对该小层单元单井单旋回砂厚统计,完成砂体等值图的编制。在砂体等厚图中,顺古水流方向,曲流河砂厚中心呈串珠状有规律的交错展布,该展布特点与曲流河侧向摆动规律相吻合,曲流河道这种侧向迁移摆动的特点也是砂体平面分布不均衡的主控因素。

(2) 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相结合,完成点坝的识别和圈定,结合点坝侧积体定量参数的提取,完成同期侧积体的平面组合,用同期侧积体代替流线,重建曲流河道沉积演化过程。以点坝 2 精细解剖为例,通过采用对子井技术、经验公式和卫片等资料,估算点坝 2 的长度大约为 638 m,宽度大约 66 m,侧积倾角平均约 10° ,侧积夹层间距约 35 m。曲流河道沉积重建结果表明,杨大城子油层第 23 小层总共发育了 8 期次曲流环,由第 1 期曲流环至第 8 期曲流环,沉积范围是不断扩大的,直至最终废弃。

参 考 文 献

- [1] 隋新光,赵敏娇,渠永宏,等. 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):112-113.
Sui Xinguang, Zhao Minjiao, Qu Yonghong, et al. 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): 112-113.
- [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 D):111-121.
Wu Shenghe, Yue Dali, Liu Jianmin, et al. Level modeling research of reservoir architecture for underground ancient channel[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 38(Supplement D): 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] 吉林油田公司扶余采油厂. 基于储层构型的流动单元研究[R]. 松源:吉林油田公司扶余采油厂, 2011: 5-45.
Fuyu Oil Production Plant of Jilin Oilfield Company. Research of flow units based on reservoir configuration[R]. Songyuan: Fuyu Oil Production Plant of Jilin Oilfield Company, 2011: 5-45.
- [12] 吉林油田公司扶余采油厂. 扶余油田东区南部油水过渡带精细油藏描述[R]. 松源:吉林油田公司扶余采油厂, 2006: 12-68.
Fuyu Oil Production Plant of Jilin Oilfield Company. Fine reservoir description of oil-water transition zone from southern block in Eastern Fuyu[R]. Songyuan: Fuyu Oil Production Plant of Jilin Oilfield Company, 2006: 12-68.
- [13] 吉林油田公司扶余采油厂. 吉林扶余油田水平井优化设计研究[R]. 松源:吉林油田公司扶余采油厂, 2011: 8-36.
Fuyu Oil Production Plant of Jilin Oilfield Company. Research of optimize design for horizontal wells[R]. Songyuan: Fuyu Oil Production Plant of Jilin Oilfield Company, 2011: 8-36.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Miall A D. Architecture and sequence stratigraphy of pleistocene fluvial systems in the malay basin, based on seismic time-slice analysis[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(7): 1201-1216.
- [17] 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, 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, 2006: 68-103.
- [18] 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. Introduction of reservoir model for meandering river point bar[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 55-63, 125-128.
- [19] 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 reservoir flow-diagram for sedimentological study[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1990, 17(1): 85-90.
- [20] 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.
- [21] 李士祥,楚美娟,黄锦绣,等. 鄂尔多斯盆地延长组长8油层组砂体结构特征及成因机理[J]. *石油学报*, 2013, 34(3): 435-444.
Li Shixiang, Chu Meijuan, Huang Jinxiu, et al. Characteristics and genetic mechanism of sandbody architecture in Chang-8 oil layer of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(3): 435-444.
- [22] 孙天建,穆龙新,吴向红,等. 砂质辫状河储层构型表征方法——以苏丹穆格莱特盆地 Hegli 油田为例[J]. *石油学报*, 2014, 35(4): 715-724.
Sun Tianjian, Mu Longxin, Wu Xianghong, et al. A quantitative method for architectural characterization of sandy braided-river reservoirs; taking Hegli oilfield of Muglad Basin in Sudan as an example[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(4): 715-724.

(收稿日期 2014-12-31 改回日期 2015-04-17 编辑 王培玺)

版权所有