

引用: 鲍志东, 李忠诚, 陈栗, 等. 成熟探区相控油藏储集体精细表征与产能劈分[J]. 中国石油勘探, 2022,27(3):61-77.
Bao Zhidong, Li Zhongcheng, Chen Li, et al. Fine reservoir characterization and capacity splitting of facies controlled oil reservoir in mature petroleum exploration areas[J].
China Petroleum Exploration, 2022,27(3):61-77.

成熟探区相控油藏储集体精细表征与产能劈分

鲍志东^{1,2} 李忠诚³ 陈栗³ 吴凡^{1,2} 牛博^{1,2} 魏兆胜³ 王振军³ 封从军⁴

周新茂⁵ 张莉⁶ 臧东升^{1,2} 李泉泉^{1,2} 刘锐^{1,2} 万谱^{1,2} 李磊^{1,2}

(1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室; 2 中国石油大学(北京)地球科学学院; 3 中国石油吉林油田公司;
4 西北大学地质学系; 5 中国石油勘探开发研究院; 6 长江大学地球科学学院)

摘要: 基于单砂体沉积特征, 建立了曲流河及三角洲水下分流河道储集砂体的平面与垂向上的组合关系, 及其对应的测井识别标志。分析曲流河及三角洲分流河道储层的构型刻画方法, 并利用多种方法对侧积体规模、前积层与侧积层产状进行定量计算, 刻画单砂体内部构型。探索基于多级构型界面约束的构型建模方法, 有别于传统的网格约束, 该方法综合采用多级界面约束和设置非均质网格技术, 实现了以较少量网格对构型级别夹层的精细表征。同时解析常规产能劈分方法, 探索单砂体产能劈分要素, 提出了多参数相结合的产能劈分方案, 进而为油田未来精细调剖挖潜方案的制订提供技术及理论支撑。

关键词: 储集体; 单砂体; 构型建模; 产能劈分; 数值模拟

中图分类号: TE122.11 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2022.03.006

Fine reservoir characterization and capacity splitting of facies controlled oil reservoir in mature petroleum exploration areas

Bao Zhidong^{1,2}, Li Zhongcheng³, Chen Li³, Wu Fan^{1,2}, Niu Bo^{1,2}, Wei Zhaosheng³, Wang Zhenjun³, Feng Congjun⁴,
Zhou Xinmao⁵, Zhang Li⁶, Zang Dongsheng^{1,2}, Li Quanquan^{1,2}, Liu Rui^{1,2}, Wan Pu^{1,2}, Li Lei^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing); 2 College of Geosciences, China University of Petroleum; 3 Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Jilin Oilfield Company; 4 Department of Geology, Northwest University; 5 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development; 6 College of Geosciences, Yangtze University)

Abstract: Based on the sedimentary characteristics of single sand body, the lateral and vertical sand body architecture relationships of meandering river and delta distributary channel facies are established, as well as their corresponding logging identification marks. The characterization methods of reservoir architecture of meandering river and delta distributary channel facies are analyzed and quantitative calculations on the scale of lateral accretion bodies and the occurrence of foreset and lateral accretion layers are conducted by using multiple methods, so as to describe the internal architecture of single sand body. The architecture modeling method constrained by multi-level architecture interface is researched. Different from the conventional methods constrained by grid, multi-level interface constraint and

基金项目: 国家重点研发计划专项“深部岩溶热储经济高效钻探工艺”(2017YFC0603104); “超深层及中新元古界油气资源形成保持机制与分布预测”(2018YFC0604304)。

第一作者简介: 鲍志东(1964—), 男, 安徽合肥人, 博士, 1993年毕业于石油大学(北京), 现任中国石油大学(北京)地球科学学院教授, 主要从事储层地质与油藏描述、沉积学及岩相古地理等方面的研究工作。地址: 北京市昌平区府学路18号中国石油大学(北京)地球科学学院, 邮政编码: 102249。E-mail: baozhd@cup.edu.cn

收稿日期: 2021-05-08; 修改日期: 2022-03-28

heterogeneous grid technology are integrated in this method to achieve the fine characterization of the architecture level interlayer with a small number of grids. In addition, the conventional capacity splitting methods are analyzed to identify the elements for capacity splitting of single sand body, and a multi-parameter capacity splitting scheme is proposed, which provides technical and theoretical support for the formulation of potential tapping schemes of oil fields in the future.

Key words: reservoir, single sand body, architecture model, capacity splitting, numerical simulation

0 引言

在中国东部的油气成熟探区,油田大多已经进入高含水开发阶段,普遍存在采出程度较高、剩余油较分散等现象^[1-2]。传统的石油地质研究已难以满足油田开发生产的需求,急需探索更精细的相控油藏储集体精细表征与产能劈分技术,进而推动三维建模、流动单元及开发调剖的精细化发展^[3-8]。

中国大部分油气田储集体为陆相碎屑岩,在这些碎屑岩中,河流相和三角洲相储量占比超过总储量的2/3。因此,河流—三角洲相储层是中国油气挖潜的主力标^[9]。本文以中国东部典型油气成熟探区的油田为例,解剖河流—三角洲相储集体的单砂体及内部构型,探索储层的精细三维表征与产能劈分技术,支撑油田开发后期的调剖及挖潜工作。

1 储集体精细表征

储集体的精细表征,对于曲流河相储层,需要区分曲流河内的点坝与废弃河道;对于三角洲相储层,则需先行对单期分流河道及水下分流河道等储集体进行识别^[10-12]。

1.1 单砂体级次的平面分布

平面上,单砂体级次的砂体组合在不同沉积环境具有不同的样式。总体上,曲流河单砂体以高弯度废弃河道切割连续点坝为主要特征;三角洲平原亚相的单砂体与曲流河的类似,三角洲前缘亚相单砂体则以水下分流河道向前不断分叉为主要形态。

1.1.1 曲流河单砂体平面分布

点坝及少量废弃河道是曲流河相储集体的重要储集单元。研究表明,曲流河的单砂体分布,随着可容纳空间的减小及相应的自沉积旋回演化,可分为点状、窄带状、宽带状、鳞片状等不同分布形式(图1)^[13],也可分为简单条带状和复杂连片状两种。简单条带状沉积一般呈点状—窄带状,由较顺直的河道侧向加积形成,其在平面上主要围绕废弃河道、点坝大曲率摆动,而其中废弃河道按照其分布模式可分为串

沟型(C形)、颈切型(O形)、决口改道型(S形)3种类型^[14]。复杂连片状沉积一般呈宽带状—鳞片状,表明曲流河河道经过多期演化,已被严重复杂化,废弃河道主要呈弯月形牛轭湖状间断分布,连续的废弃河道难以识别。

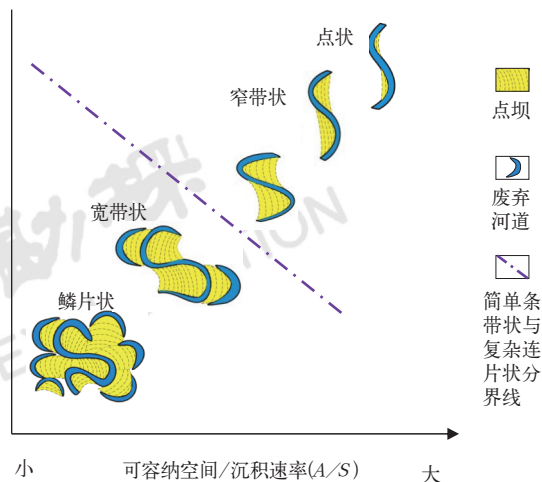


图1 曲流河点坝分布形式演化图^[13]

Fig.1 Distribution and evolution of point bar in meandering river system^[13]

河流的演化是连续的,但会在不同状态下终止

1.1.2 浅水三角洲单砂体平面分布

松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地等多发育浅水三角洲沉积^[15-20]。本文以松辽盆地南部的浅水三角洲储集体为对象开展研究。张昌民等基于现代沉积,将浅水湖盆三角洲划分为两种类型^[21]。第一种为分流河道型浅水三角洲,其主体骨架呈明显的枝杈状,三角洲呈现窄条状特征,不发育广阔的三角洲平原亚相;第二种为分流沙坝型浅水三角洲,其单砂体中的分流沙坝是主要的储集砂体,主要呈现朵状、坨状,这种类型的三角洲其前缘亚相不甚发育。上述两种三角洲构成了浅水三角洲类型的主体。朱筱敏等研究发现,分流河道型三角洲更易形成于干旱环境中,在湿润气候下则会形成分流沙坝型浅水三角洲^[22]。

吕晓光等于2003年对大庆油田三角洲前缘亚相席状砂的几何形态和内部结构进行了较精细的解剖,

把前缘亚相储集体骨架结构分为5种类型，建立了前缘亚相带7种类型砂体的地质模型^[23]。“十二五”期间，以大庆油田为依托，周新茂等开展了基于三角洲分流河道微相的砂体精细刻画工作，将三角洲水下分流河道分为复合型分流河道、宽带状分流河道、交织状分流河道、分叉枝状分流河道、干枝状分流河道、窄条带连续分流河道、断续孤立型分流河道7种类型，并详述了各种分流河道的平面展布特点^[14,24]。上述研究较好地展示了三角洲的平面沉积模式。

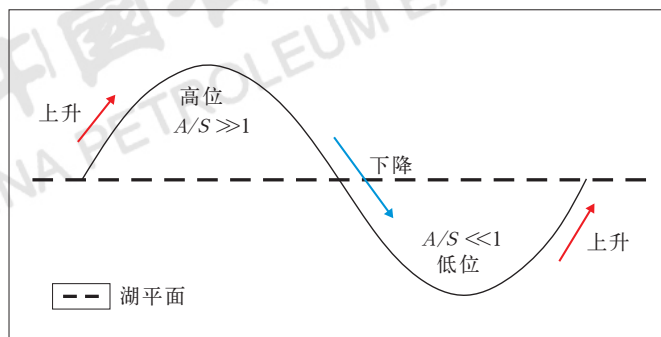
1.2 单砂体叠置样式及识别标志

1.2.1 垂向叠置样式及识别标志

封从军等根据湖平面升降变化及可容纳空间大小(图2a)将单砂体在垂向上划分为4种叠置关系：分离式、叠加式、切叠式、全切式^[25]。

分离式是指泥岩等细粒沉积物在垂向上分隔两期单砂体，两期单砂体本身没有接触，该类型叠置砂体主要在湖平面上升晚期和下降早期常见，测井曲线主要显示为两个明显分离的箱形特征(图2b)。

叠加式是指在垂向上两期单砂体有接触，但是后期形成的单砂体对早期形成的单砂体并没有明显的侵蚀、冲刷作用，该叠置类型的砂体在湖平面上升的中、晚期和下降的早、中期常见，测井曲线主要表现为两个钟形或箱形特征曲线之间具有明显回返(图2b)。切叠式是指后期形成的单砂体在垂向上对早期形成的单砂体有明显的侵蚀、冲刷作用，该叠置类型的砂体多发育于湖平面上升的早、中期和下降的中、晚期，测井曲线主要表现为两个钟形或箱形特征曲线之间具有轻度回返，通常上部的厚度明显比下部的更厚(图2b)。全切式是指早期形成的单砂体被后期发育的单砂体全部侵蚀、冲刷掉，早期砂体消失，常发育于湖平面上升的早期和下降的晚期，测井曲线主要表现为在两期单砂体切叠处，显示为一个单独的钟形或箱形特征，厚度较大；而在两期单砂体没有切叠处，曲线虽然也显示为一个单独的钟形或箱形特征，但厚度较小(图2b)。因此，根据钻井测井曲线特征可以对上述不同类型叠置关系进行有效识别。



(a) 单砂体垂向叠置样式

类型	分离式	叠加式		切叠式		全切式
		侧向叠加	垂向叠加	侧向切叠	垂向切叠	
叠置样式						
测井相标志	R25 	R25 R25 R25 	R25 R25 R25 	R25 R25 R25 	R25 R25 R25 	R25 R25 R25

■ 单砂体1 ■ 单砂体2 ■ 泥质沉积

(b) 单砂体垂向识别标志

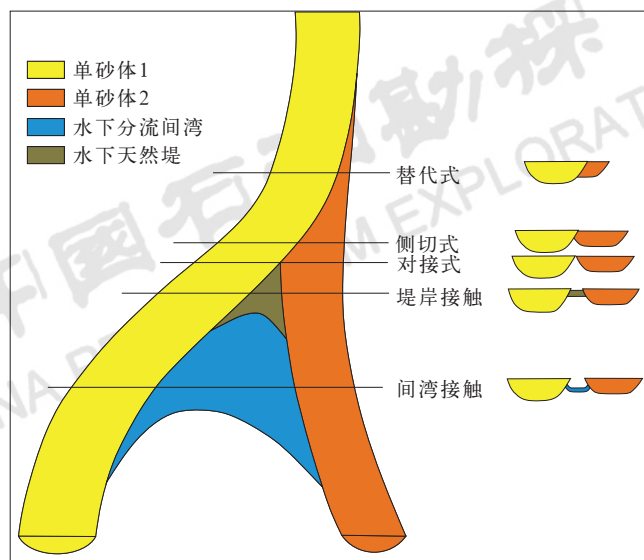
图2 单砂体垂向叠置样式及识别标志^[25]

Fig.2 Vertical superposition pattern of single sand body and identification marks^[25]

1.2.2 平面组合特征及识别标志

平面上, 河流相单砂体储层的接触样式可分为5种类型: 间湾接触、堤岸接触、对接式、侧切式和替代式(图3)^[25]。间湾接触是指两个单砂体彼此不接触, 单砂体之间为水下分流间湾沉积。由于水下分流间湾主要为泥岩, 所以两个单砂体之间不连通, 各自形成独立的渗流体系, 在砂体处, 测井曲线显示为一个单独的钟形或箱形特征, 而在水下分流间湾处曲线偏水平低幅度。堤岸接触是指两个单砂体彼此不接触, 单砂体之间为水下天然堤沉积。由于水下天然堤主要为粉砂岩或泥质粉砂岩, 所以两个单砂体之间为弱连通或不连通, 在河道位置, 测井曲线显示为一个单独的钟形或箱形特征, 而在水下天然堤发育处曲线呈现低幅锯齿状。对接式是指两个单砂体彼此对接, 单砂体

之间的切叠关系不明显。由于两个单砂体之间接触部分较少, 所以为弱连通或不连通, 测井响应特征为: 河道位置, 测井曲线显示为单独的钟形或箱形特征, 但是不同的单砂体其对应的钟形或箱形曲线的厚度可能不同。侧切式是指后期形成的单砂体对早期形成的单砂体有明显的冲刷、切割作用, 所以连通性较好, 可以形成油气渗流的通道。替代式是指后期形成的单砂体完全把早期形成的单砂体冲刷、侵蚀掉, 在两个单砂体重叠的地方没有留下早期形成的单砂体的痕迹。虽然在局部, 后期形成的单砂体完全替代了早期形成的单砂体, 但是在其他部位两个单砂体之间有接触的部分, 两个单砂体间的连通性较好。其测井响应特征为河道处呈单独的钟形或箱形特征, 但是二者存在高程及厚度的差异(图3b)。



(a) 单砂体平面接触样式

类型	间湾接触	堤岸接触	对接式	侧切式	替代式
接触样式					
测井相标志					

单砂体1 单砂体2 水下分流间湾 水下天然堤

(b) 单砂体平面识别标志

图3 单砂体平面接触样式及识别标志^[25]

Fig.3 Lateral contact pattern of single sand body and identification marks^[25]

1.3 单砂体解剖实例

以松辽盆地南部扶余油田典型区块泉头组四段扶余油层为例, 对研究区内储层单砂体在平面及垂向上进行划分。研究区主要发育三角洲平原亚相分流河道微相及三角洲前缘亚相水下分流河道微相。单砂体划分的关键是确定不同单砂体的垂向及横向边界, 针对三角洲平原分流河道, 根据河道间沉积、废弃河道及高

程差异、厚度差异等标志对复合砂体进行区分(图4); 针对三角洲前缘水下分流河道, 则依据水下分流间湾、水下天然堤及厚—薄—厚特征、厚度差异等标志进行识别(图5)。完成研究区曲流河和三角洲沉积的单一成因砂体的精细刻画, 如图6所示, 研究区三角洲平原以发育点坝及废弃河道为主要特点; 三角洲前缘主要发育水下分流河道, 其呈枝状向前推进。

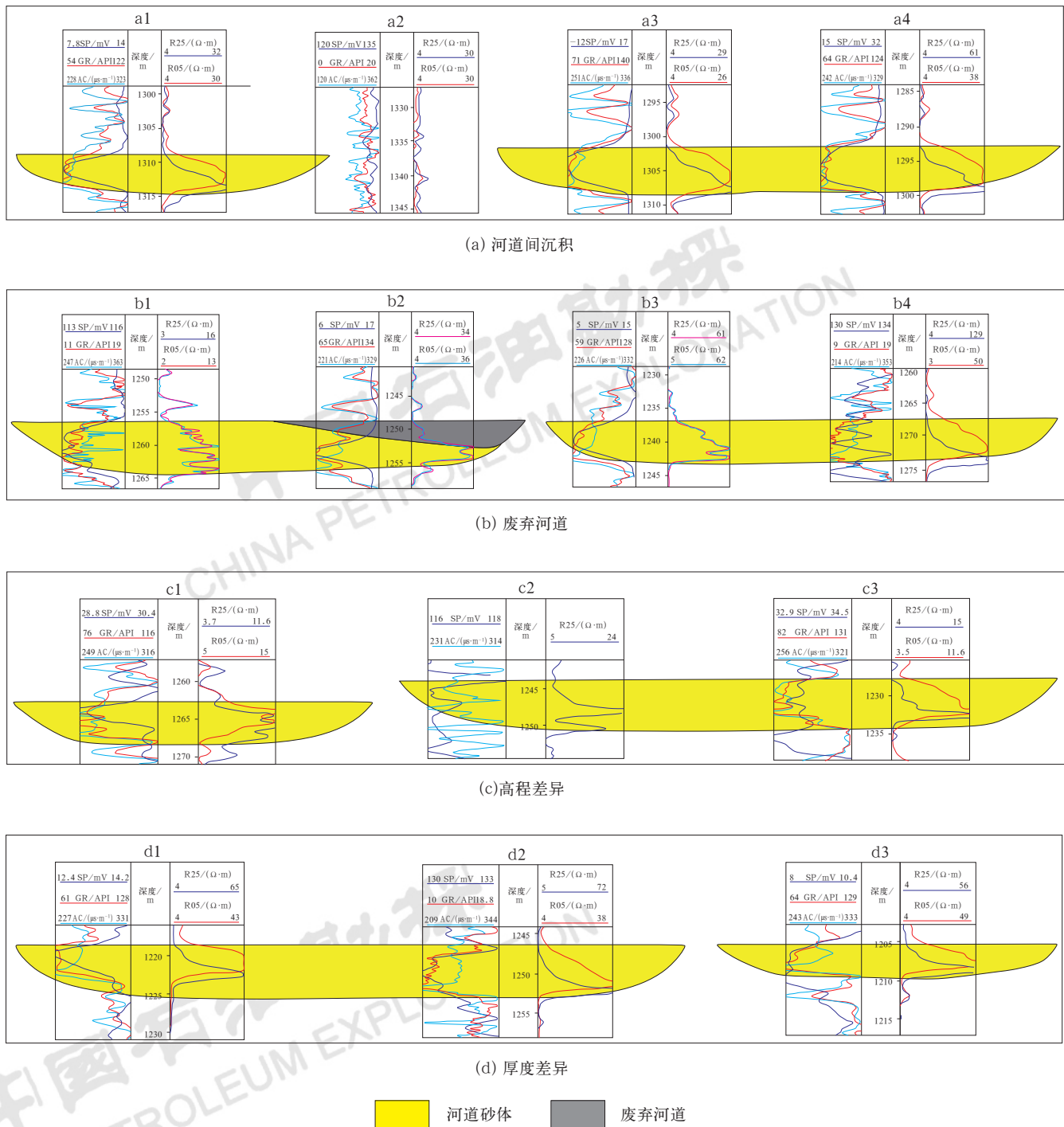
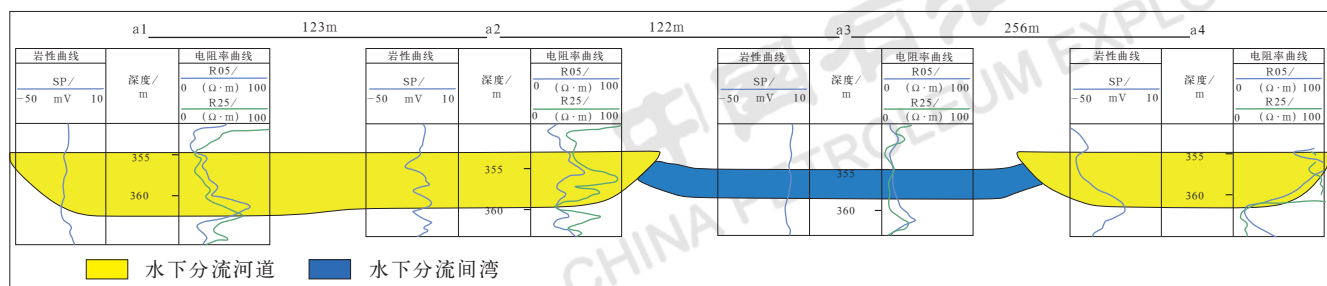
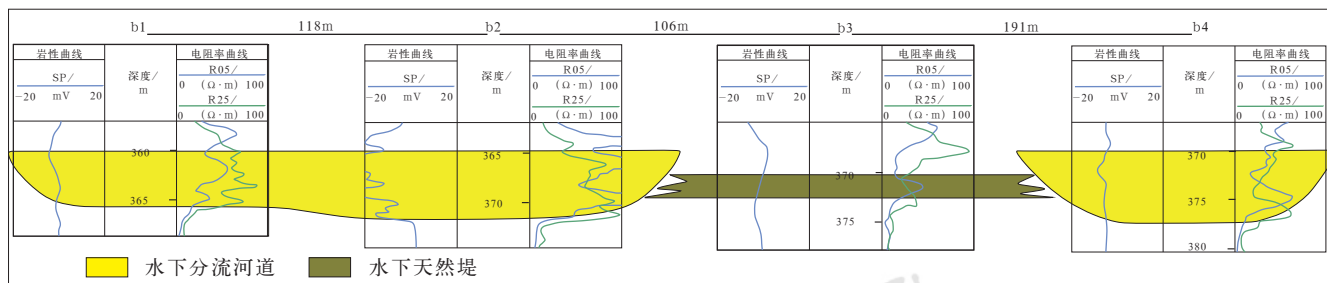


图4 三角洲平原分流河道平面识别标志

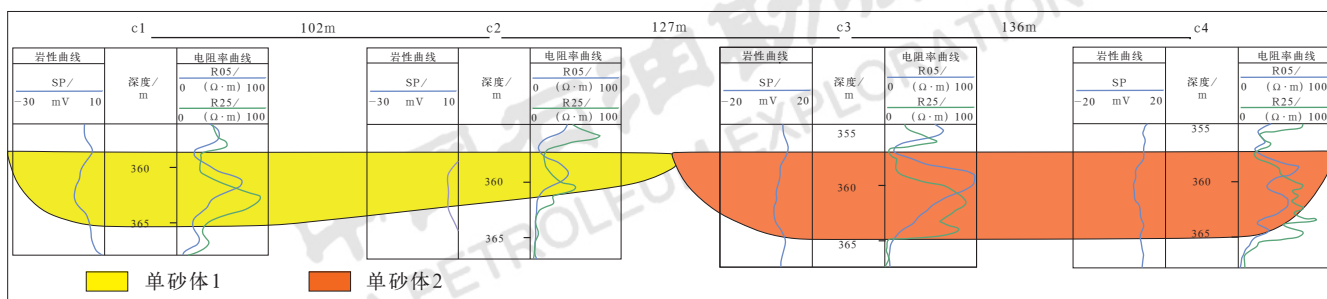
Fig.4 Identification mark of lateral distribution of distributary channel of delta plain facies



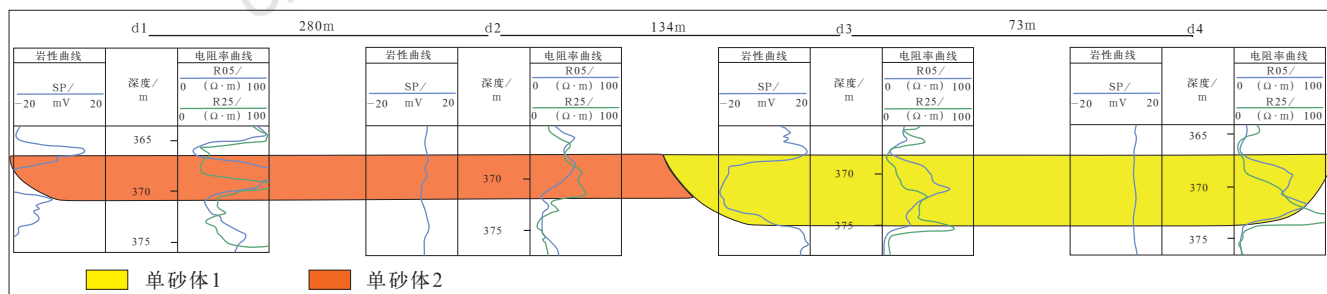
(a) 水下分流间湾



(b) 水下天然堤



(c) 厚—薄—厚特征



(d) 厚度差异

图 5 三角洲前缘水下分流河道平面识别标志

Fig.5 Identification mark of lateral distribution of distributary channel of delta front facies

2 储层内部构型表征

储层构型,也称为储层建筑结构、储层建筑构型等,是指储集体内部不同级次构成单元的形态、规模、方向及其叠置关系,体现了储集体内部的层次与结构性^[26-29]。对于单砂体而言,其内部构型属于 Maill 级次划分的第三级次^[9-10,30]。

2.1 构型分布

曲流河具有鲜明的侧积沉积特征。在曲流河沉积中,点坝由若干周期性侧向增长的侧积层、侧积体通过叠置组合而成。其中侧积层是周期性水动力减弱形成的细粒披覆沉积,对应 Maill 的三级构型界面,为点坝内最重要的沉积夹层,与侧积体间隔分布(图 7)^[9,12,31-32]。

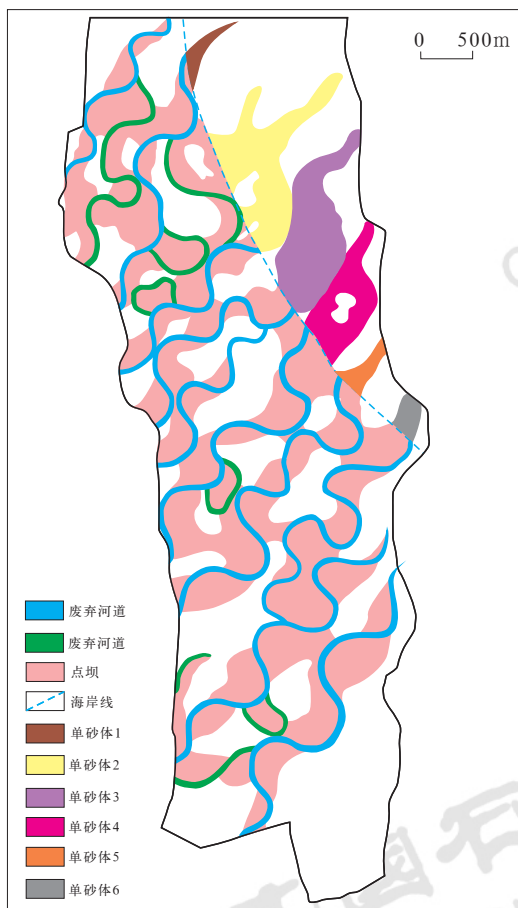


图6 三角洲平原和三角洲前缘河道单砂体解剖实例
Fig.6 Anatomical example of single channel sand body of delta plain and delta front systems

三角洲相储层的构型研究尚在进一步推进。不同学者根据露头、地下储层研究建立了不同的三角洲(水下)分流河道构型模式。封从军等^[33]研究表明,三角洲前缘水下分流河道微相是前积体纵向上呈逐层累进形成,并根据这些前积体的叠置形态将其划分成进积型、退积型和加积型3种,分别对应水退、水进及水平面波动与供给速率保持均衡的3种沉积环境(图8),前积层分布在前积体前侧面,隔开不同前积体,

是三角洲前缘水下分流河道内部重要的沉积夹层。前积层在纵向上呈缓前倾的形态特征,而在横向上,则主要展示出近水平的截面形态(图9)。根据前积层留存程度的不同,可将其分为保留型、破坏型及混合型3种(图8)^[33]。

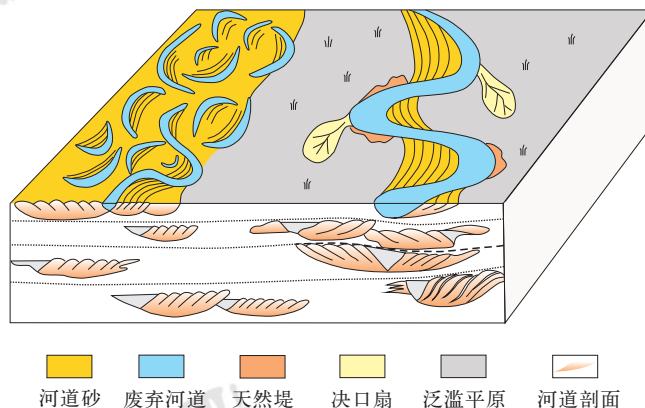


图7 曲流河道及三角洲平原分流河道侧积层分布模式
(据文献[12]修改)

Fig.7 Distribution patterns of lateral accretion layers of meandering river channel and delta plain distributary channel systems (modified after reference [12])

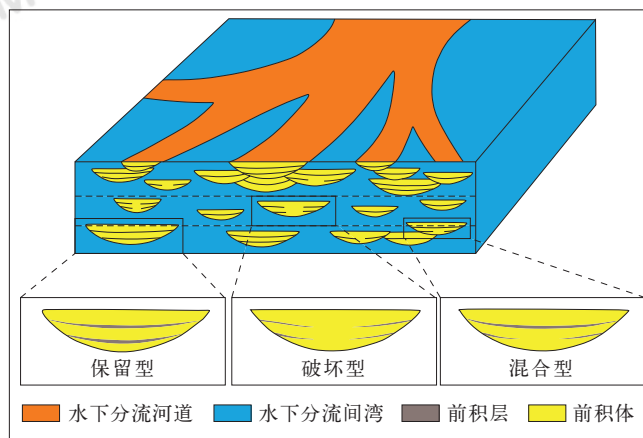


图8 三角洲前缘水下分流河道前积层分布模式^[29]
Fig.8 Distribution pattern of foreset layers of distributary channel of delta plain facies^[29]

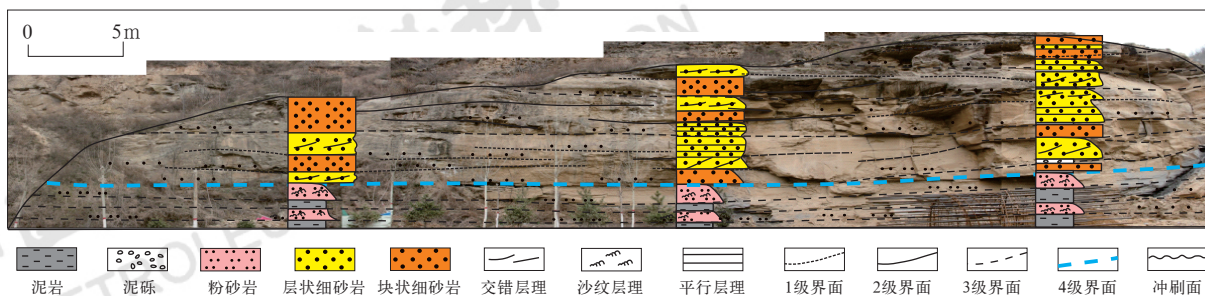


图9 三角洲前缘水下分流河道的前积层露头剖面

Fig.9 Outcrop section of foreset layers of distributary channel of delta front facies

2.2 储集体三维构型分析

曲流河河道及三角洲平原分流河道的点坝构型要素包括侧积层与侧积体；三角洲前缘水下分流河道的构型要素则为前积层及与之对应的前积体。储集体三维构型分析的实质是对侧积体规模（宽度）、前积层与侧积层产状（倾角）的定量化计算。

2.2.1 侧积层产状

针对点坝内部侧积层产状的表征，已积累一定的研究成果^[6-10,34-35]，形成了系列定量化计算方法。

(1) 岩心直描法。

岩心观察是识别点坝内部泥质夹层的一种直观、可靠的方法，可根据侧积泥质夹层与取心段取到最近一期洪泛泥岩之间的夹角进行求取。

(2) 地层倾角测井法。

地层倾角测井处理后的成果图可以清晰地反映地层及沉积构造的产状、量化断层的倾角、识别裂缝等，利用地层倾角测井资料可以定量计算侧积泥质夹层产状^[14,36]。

(3) 对子井法。

利用研究区内两口或几口对子井，通过拉平其顶面层，可以对其内部侧积泥质夹层产状进行计算。需要注意的是，选取的对子井在侧积层延伸方向的有效距离应小于或等于侧积体的宽度，以确保两口井的夹层连线为同一夹层。

图10为松辽盆地南部吉林油田杨大城子组曲流河河道储层的一个研究实例。Z10-50.1井与Z+10-50井为研究区的一组对子井，两井直线距离 l_1 为72m，两侧积层间砂岩厚度 h 为5m，利用三角函数关系可知，该处侧积层产状 α 为 3.97° 。由于对子井连线往往与侧积层倾向呈一定角度，因此，上述计算结果仅仅为Z10-50.1井、Z+10-50井的视倾角，可通过公式(1)进行转换，如图10(c)所示，Z10-50.1井、Z+10-50井连线与该侧积层法线交角 β 为 32° ，换算真倾角 θ 为 4.67° 。

$$\tan\theta = \tan\alpha / \sin(90^\circ - \beta) \quad (1)$$

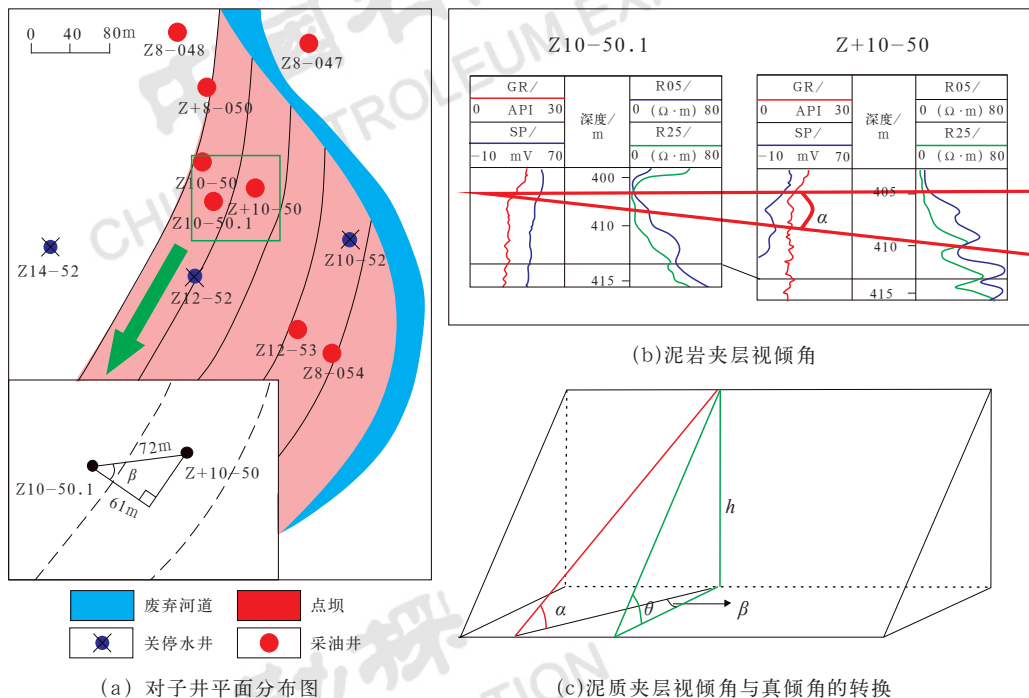


图10 对子井法计算点坝中侧积层产状示意图

Fig.10 Schematic diagram of occurrence calculation of lateral accretion layers in point bar by pair well method

(4) 经验公式法。

经验公式法是目前侧积层产状定量化表征中应用较多的方法。Leeder等收集了107个河流实例，对高弯曲度曲流河进行研究，通过对比分析，建立了高弯

度条件下点坝内部侧积层倾角的计算公式^[37]：

$$\lg W = 1.54 \lg h + 0.83 \quad (2)$$

$$W = 1.5h / \tan\theta \quad (3)$$

式中 W ——河道满岸宽度, m;

h ——河道满岸深度, m。

周银邦等通过分析国内外 12 个较为完整的曲流河河道露头 and 现代沉积, 建立了侧积层倾角与宽深比的相关关系^[31,34]:

$$\alpha = 32.966e^{-0.0966d} \quad (4)$$

式中 d ——河道宽深比。

刘站立等通过对鄂尔多斯盆地中生代曲流河沉积露头进行统计, 拟合出了曲流河点坝砂体宽度与侧积层倾角的关系^[35]:

$$y = 1461.40e^{-0.78} \quad (5)$$

式中 y ——单一河道单元砂体宽度, m。

综上所述, 利用经验公式也可对侧积层产状进行定量化计算。然而, 由于地下储层的复杂性和不同方法之间的计算误差, 依靠单一方法计算结果往往存在误差, 需要多种方法相结合, 进行综合判定。

2.2.2 侧积体规模

(1) 水平井测量法。

目前, 依靠水平井识别侧积体宽度最为可靠。由于侧积层物性较差, 在水平井测井过程中会造成电阻率曲线产生轻微回返现象, 因此可以利用该类回返特征对侧积层进行识别, 两个曲线回返之间的砂体可以被识别为一个完整的侧积体。图 11 为吉林油田杨大城子组曲流河研究实例, 研究区内钻遇水平井 CP-37 井, 根据测井显示结果, CP-37 井可以识别出 3 个侧积层、2 段侧积体, 侧积层间距分别为 82m、100m。

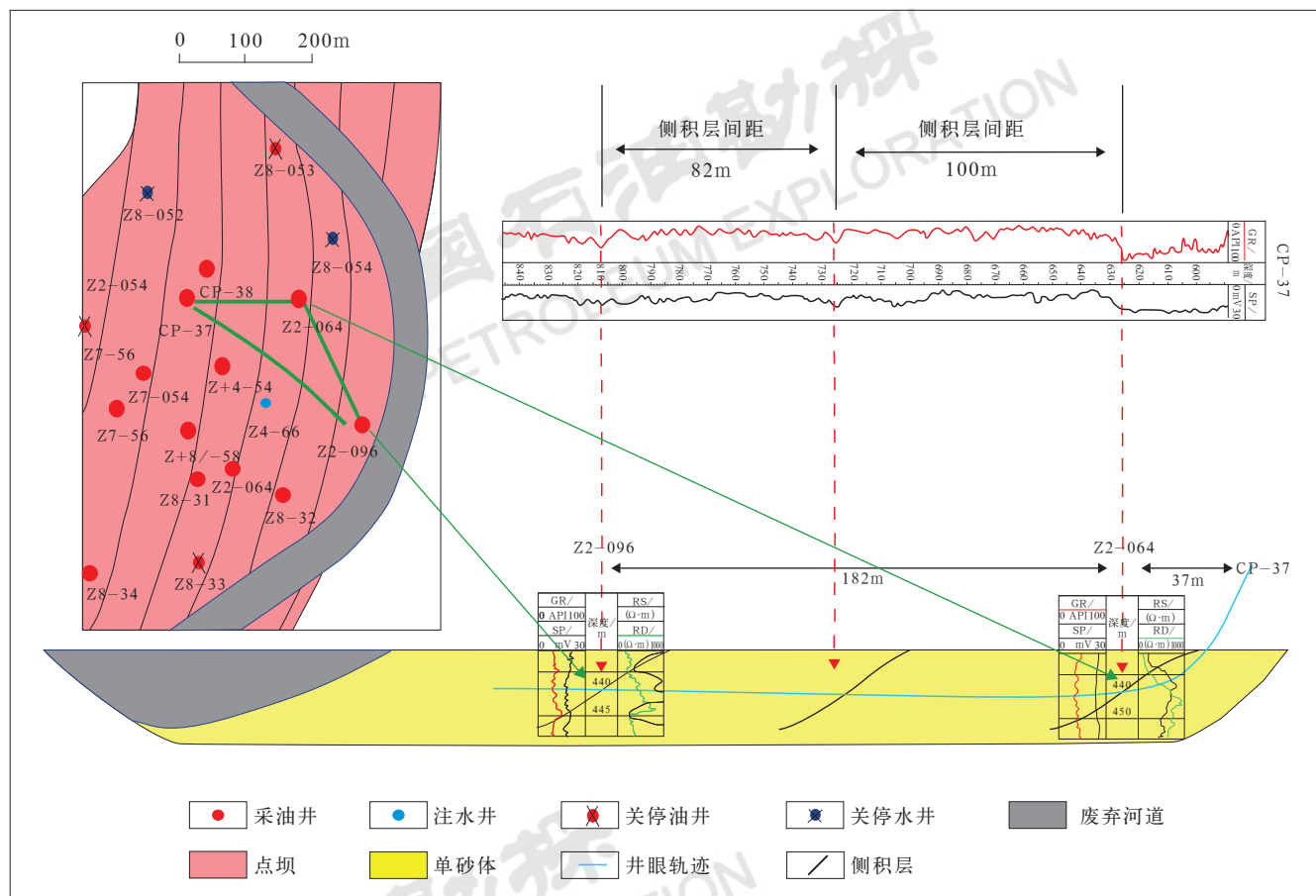


图 11 水平井确定侧积层产状

Fig.11 Occurrence calculation of lateral accretion layer in horizontal well

(2) 经验公式法。

基于对澳大利亚干燥—半潮湿地区 36 条稳定河流的研究, 前人建立了反映河水深度、侧积体宽度及曲流河曲率等关系的水动力参数公式^[38]。研究表明, 侧积体规模为河道满岸宽度的 2/3, 因此利用经验公

式, 也可对侧积体规模进行定量化计算。

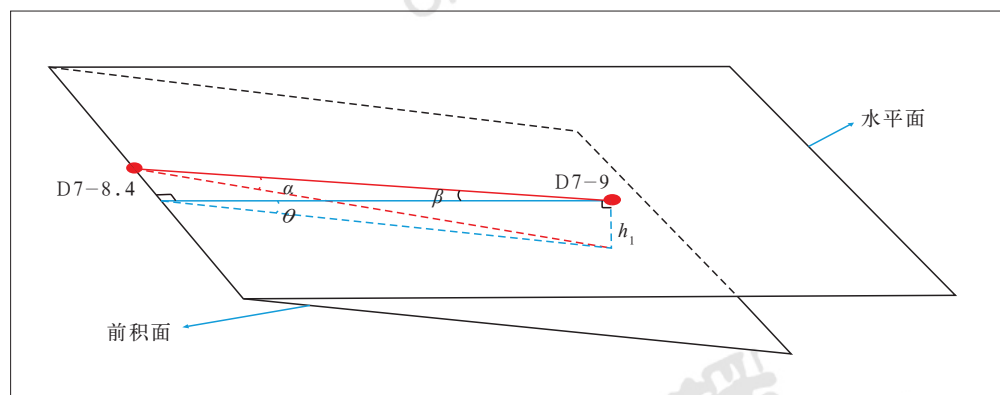
2.2.3 前积层产状

目前, 主要利用对子井法对前积层产状进行测量, 如图 12 所示, D7-8.4 井与 D7-9 井为两口对子井, 两井直线距离 l_1 为 118m, 两前积层间砂岩厚度 h_1 为

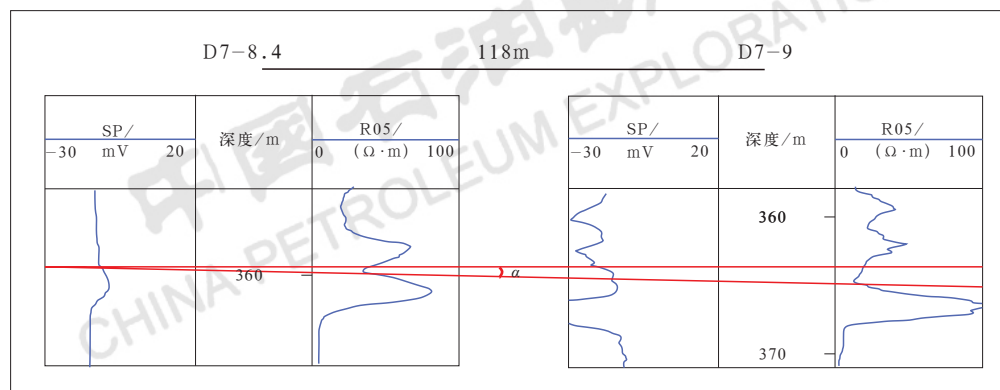
2.3m, 利用三角函数关系可知, 该处前积层产状 α 为 1.12° 。根据图 12 可知该视倾角往往与前积层真倾角呈一定角度, 因此, 通过转换可知该处前积层真倾角 θ 为 1.19° 。

通过确定侧积层和前积层产状、侧积体规模等定量地质参数, 结合曲流河、三角洲总体沉积特征,

可完成对单砂体内部构型的三维精细刻画。需要注意的是, 侧积层、前积层的延展范围是刻画的重点。露头及现代沉积研究显示, 点坝内部侧积层延展范围一般占点坝厚度的 $2/3$, 而分流河道延展范围则受沉积环境的影响具有较大差异, 应根据前积层的保留程度 (保留型、破坏型及混合型) 确定不同的延展范围。



(a) 前积层真倾角与视倾角转换示意图



(b) 对子井夹层连井示意图

图 12 对子井法确定前积层产状

Fig.12 Occurrence calculation of lateral accretion layer by pair well method

3 构型级别三维地质建模

精细构型解剖成果需要对应精细的构型模型进行表征, 因此, 如何在模型中对 3 级构型界面进行精准表征成为储层建模领域的热点^[39-41]。早期构型建模通常采用序贯指示与人机交互的方法, 由于工作量大, 模型表征中存在不确定的因素^[42]; 后续, 不断有学者提出二次网格加密法, 以及基于沉积过程模拟、多点地质统计学、基于空间矢量模拟和层次约束下基于象元的随机模拟等一系列方法^[43-46], 这些方法与理论促进了储层构型建模的发展。目前主流建模方法主要利用网格来表征模型中的夹层。以点坝模型为例,

由于侧积层厚度的限制, 必然会造成网格数量的急剧膨胀, 动辄千万甚至上亿的网格让数模工作难以为继, 而对模型进行粗化, 则无法保存侧积层的完整形态, 以上困惑是制约点坝侧积体模型在油田开发生产中进行广泛应用的瓶颈所在^[47-48]。

3.1 基于多级构型界面约束的建模方法

基于上述分析, 探索了一种基于多级构型界面约束的建模方法^[48]。该方法基于界面和构型要素的叠置关系, 采用多级界面约束和设置非均质网格等技术, 建立构型模型, 是对河流相构型建模方法的一种新的补充。

以点坝侧积层模型为例，首先根据研究区精细三维构型分析结果，将反映点坝沉积过程的关键地质参数作为约束条件，计算点坝内部各类构型要素的空间坐标，将计算结果数字化导入建模软件，进而生成各类构型要素的顶底界面（图 13a）；然后利用构型界面将点坝内部不同构型要素的顶底界面进行逐级封隔，

并按照其空间叠置顺序在点坝内部依次进行封装组合（图 13b）；最后在侧积层、侧积体内部进行网格细分（图 13c）；因为不同侧积层、侧积体之间由相关界面分隔，可以在粗化处理时针对不同封隔体建立不同的网格精度，有效解决模型网格数量与侧积层精度之间的矛盾（图 13d）。

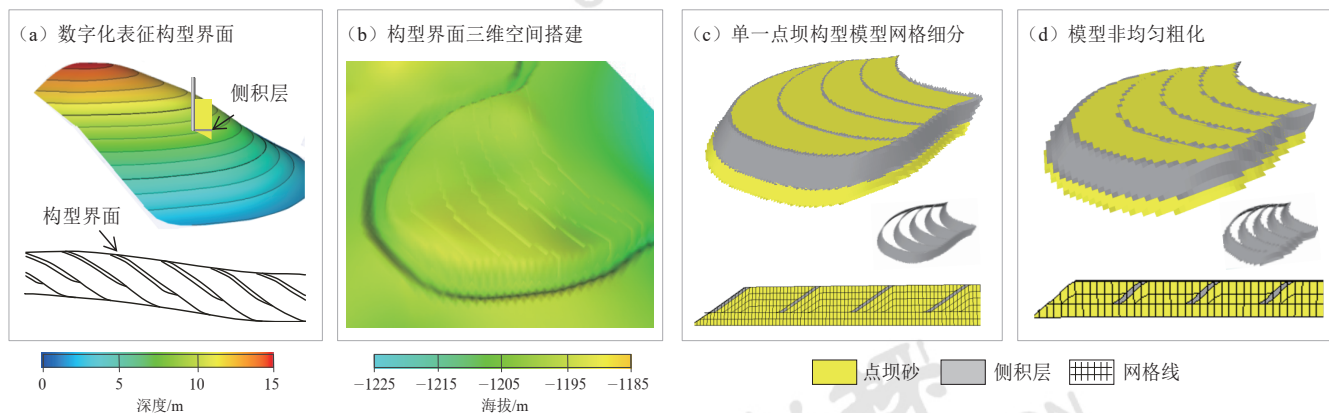


图 13 多级构型界面约束建立单一点坝构型模型^[48]

Fig.13 Single point bar architecture modeling constrained by multi-level architecture interface^[48]

相比传统构型建模方法，该方法具有下列优势：

(1) 建立的是地下原型模型，能够模拟地下储层的微小变化，模型的每个夹层均能与测井曲线准确对应，高度还原了地下真实构造的特点。

(2) 利用构型界面对侧积层、侧积体进行分别建模，因而可以通过分级粗化的理念，分别对侧积层、侧积体施以不同的网格密度，大幅减少模型的网格数量（图 13c、d）。

(3) 该方法具有广泛的适用性，可应用于地质成因上具有层次性的多种类型储层模型的构建。如图 14 所示，分别为该方法针对辫状河心滩、三角洲分流河道、滩坝、河口坝等储层建立的概念和实体模型^[49]。

3.2 复合点坝构型模型建立与剩余油分析

3.2.1 复合点坝构型模型建立

建模实例位于渤海湾盆地埕宁隆起石臼坨凸起中部，研究层位位于明化镇组Ⅲ段 2 组，主要发育曲流河沉积层。

利用上述方法，首先将不同点坝在复合河道内部进行重组叠合，建立油田实际曲流河复合点坝构造及岩相模型。如图 15a 所示，岩相模型主要采用确定性模拟和随机模拟相结合的方式构建。在废弃河道与侧积体内部，主要采取确定性模拟方法定义其中的

优势岩相。点坝内部侧积体与泛滥平原，则采用适用于小井距、能较好模拟复杂各向异性的序贯指示模拟方法，对其内部砂岩分布规律进行有效表征。然后，以岩相模型作为相控条件的约束模型，采用稳定性好、建立在克里格正态转换原理基础上的序贯高斯方法，建立相关三维属性模型（图 15b）。在模拟过程中，侧积层、侧积体对应的岩性、物性数据严格按照已知井上数据，通过设置合理的变差函数，保证最终模型的各级构型单元能得到准确展示。

如图 15 所示，曲流河内部各种沉积单元得到了准确的表征。曲流河废弃河道弯曲特征明显，点坝与废弃河道呈侧向接触。在点坝砂体内部发育侧积层，侧积层平面弧形特征和剖面倾斜形态得到了很好的再现。考虑数值模拟过程中需要对网格总量进行控制（通常不超过 100×10^4 个），采用非均匀粗化理念对构型模型进行粗化处理，即通过界面约束，分别对侧积层、侧积体施加不同的网格密度，确保在粗化砂体模型的同时保留侧积层的完整形态（图 15）。粗化后的模型在保证相关废弃河道、点坝、侧积层精准展示的同时，大幅缩减了网格数量，总有效网格数为 72×10^4 个。实现了以较小网格数还原地下构型分布样式，为油藏数值模拟、剩余油分布预测提供了模型基础。

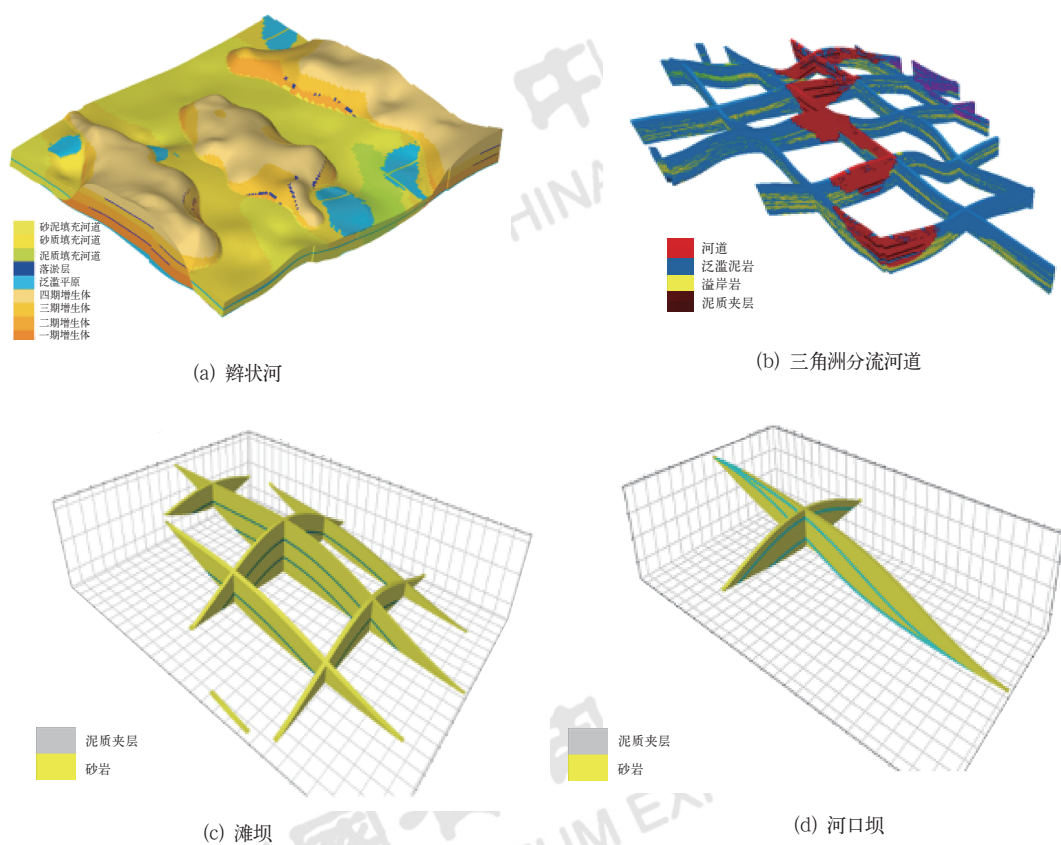
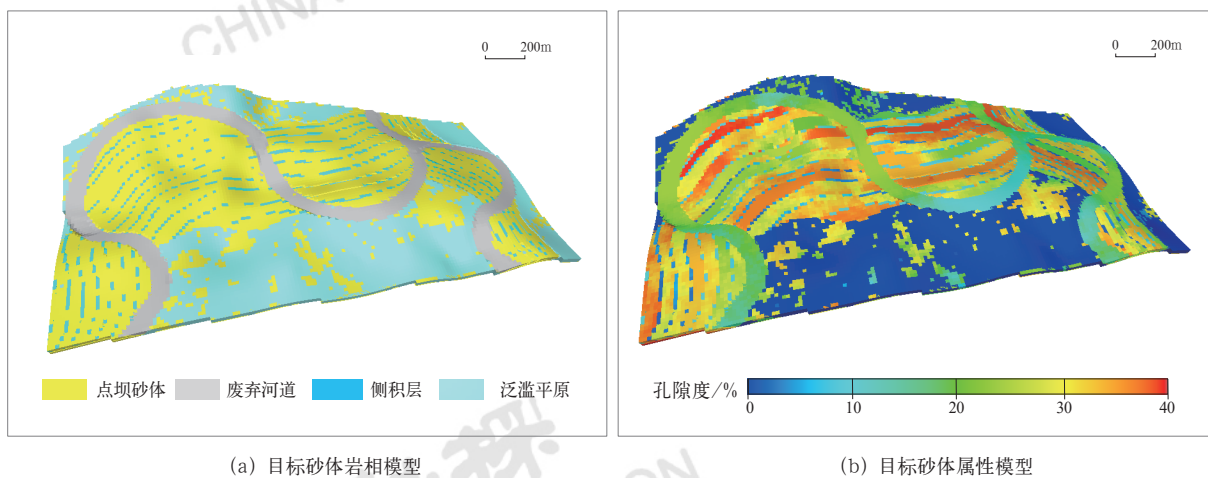


图 14 不同类型储层构型建模应用实例

Fig.14 Application examples of architecture modeling for different types of reservoirs

图 15 曲流河复合点坝储层构型建模实例^[24]Fig.15 Example of reservoir architecture model of composite point bars of meandering river system^[24]

3.2.2 剩余油分析

建立储集体构型模型的最终目的是分析和挖掘剩余油。为此,本文利用数值模拟方法对目标砂体开展剩余油分析研究。数值模拟结果表明,由于合理的网格数量和类型,新方法建立的模型具有较好的运算速

度和收敛性,适用于油田工业化生产中反复多次的历史拟合计算。研究表明,在油田开发过程中,注入水并不会像传统意义上认为的呈扩散状,而明显地受各级构型界面的遮挡影响。剩余油分布主要表现为以下特点:

(1) 在不同点坝之间，主要受废弃河道遮挡作用影响，井网不完善处存在剩余油。如图 16 所示，与点坝 1、点坝 2 相比，点坝 3、点坝 4 缺少注水井，所以油田开采末期仍然存在大量剩余油。

(2) 在单一点坝内部，剩余油分布主要受 3 级构型界面（侧积层）分布的影响。主要体现为在垂向上，

注入水沿底部驱替，储层上部残余剩余油。而在平面上，注入水优先沿着侧积层的水平走向进行驱替，然后再逐一扩展到相邻的侧积体中。因此，在平面上剩余油更多受注采井网条件限制，离注水井垂直侧积层走向距离最远且没有采油井钻遇的侧积体中上部，存在着较丰富的剩余油（图 16b、d）。

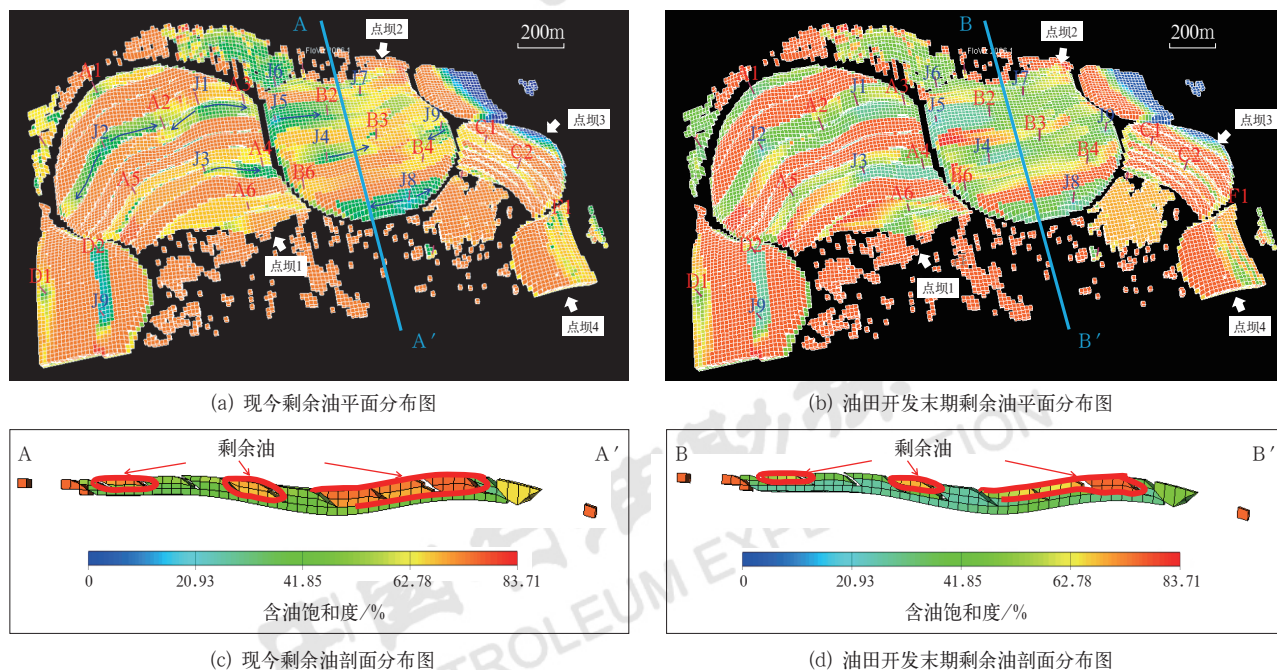


图 16 点坝构型界面对储层剩余油分布的影响

Fig.16 Influence of point bar architecture interface on the distribution of remaining oil

4 基于单砂体产能劈分及调剖

4.1 多层合采产能劈分技术

中国东部许多老油田虽然在平面上已经进入单砂体研究阶段，但垂向上依旧存在大量的多层合采现象。因此，对目标区油水井进行单砂体级别的注采劈分量化，厘清砂体级次储层及其动用状况，从而指导剩余油的量化表征及大孔道等输导层识别，且对下一步开展挖潜措施调整、提高采收率等工作有着重要的指导意义。

对于多层合采的研究主要集中在井下管柱设计及多层合采方式等方面，产能劈分技术的研究较少，前期研究大多拘泥于单一方法，且选取的参数不够全面。基于前期研究成果，本文提出多参数相结合的产能劈分技术。

常用的产能劈分方法主要有：动态监测资料法、

有效厚度法、KH 或 KH/μ 法、动态劈分方程法、渗流系数劈分法及数值模拟法等。不同方法具有各自优点与应用场景，同时对应着各自的局限。本文基于单砂体刻画，进而探索单砂体产能劈分要素，整合油藏类型及测试资料数据，优选合适的劈分方案，最后利用数值模拟方法进行检验与修正。

首先，是对单砂体的精准划分与精细刻画，这是多层合采产能劈分的前提与基础。其次，是对不同单砂体产能劈分要素的探索。影响产能劈分的因素主要包括：分层、砂体厚度、孔隙度、渗透率、含油饱和度及井网样式等静态要素，以及射孔、油水井生产、产吸剖面、生产措施、连通及压力等动态参数。

在具体工作中，首先需要对研究区数据资料进行解析，完善相关基础数据。

然后，结合油藏类型及测试资料数据，优选出最合适的方法。如图 17 所示，针对测试资料齐全的井区，可以采用动态数据直接进行劈分；针对无测试资料或

测试资料不全的区块,则根据油藏发育类型,选择对应最为适合的2种或3种劈分方案,计算单井不同层位(单砂体级次)的注采液量。将不同计算方法所得结果进行加权平均,完成相关产能劈分。

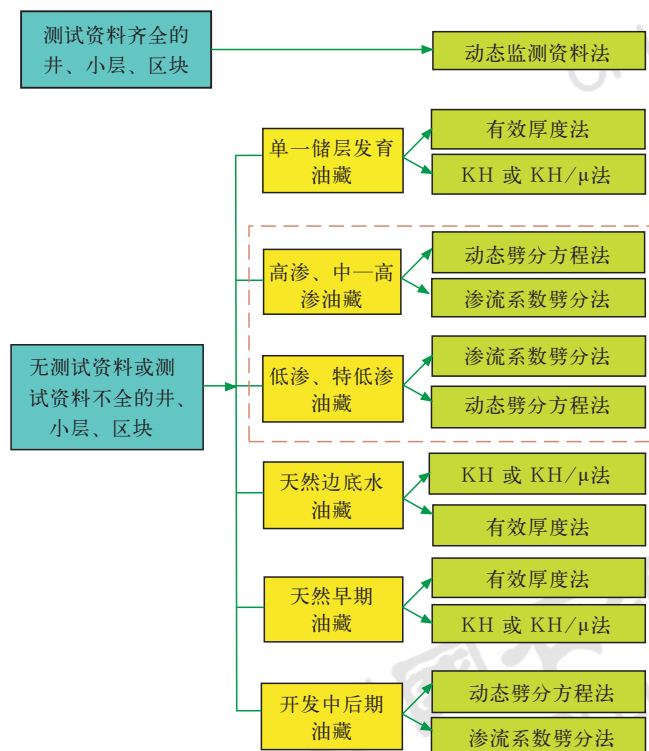


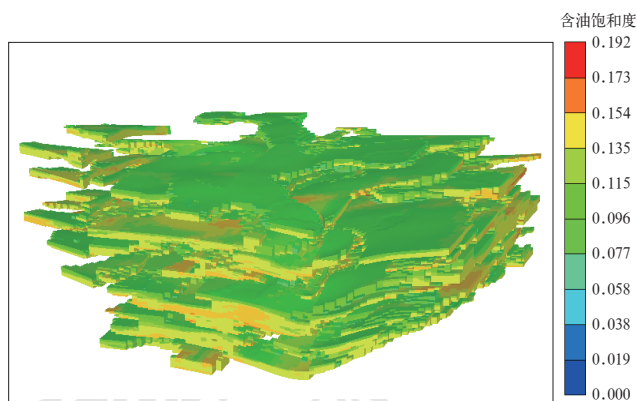
图 17 根据油藏类型和测试资料数据进行方法优选
Fig.17 Production capacity splitting method selection based on oil reservoir types and well test data

最后,借助数值模拟方法进行验证。相对于前述劈分方法,数值模拟方法能较好再现油田开发历史,长时间尺度上精度较高;可计算单井分层储量,展示不同开发时期水驱规律及剩余油分布。因此,可以通过将生产数据导入粗化后的模型中,在模型基础上进行历史拟合工作,主要包括储量拟合与历史数据拟合等,通过模拟运算,发现不匹配之处,再对模型进行修正,逐一拟合数据。最终以数值模拟劈分结果为参照,逐层校正先前劈分结果。

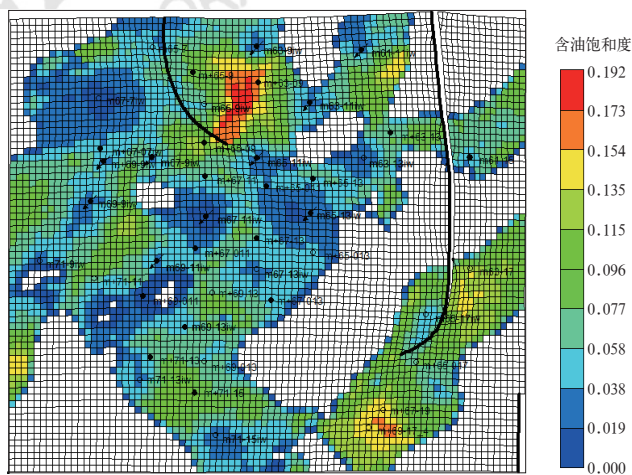
4.2 产能劈分实例

图 18 为产能劈分的一个研究实例,研究区位于松辽盆地南部扶新隆起带,研究层位为扶余—杨大城子油层。首先,在垂向上,实现单砂体级别的层位细分。研究区属于单一储层发育的油藏,因此采用有效厚度法与 KH 法进行产能劈分。在静态地质数据的基础上,

重点参照油水井生产、产吸剖面、生产措施、连通及压力等动态参数,借助吉林油田自主研发的 Rsplit 平台实现单井产能劈分。在此基础上,开展研究区数值模拟及历史拟合工作,根据数值模拟运算,确定单井单层产能劈分成果,以及单井单砂层剩余储量。模拟产量与实际产液剖面结果对比,误差率小于 10%,模型拟合精度较好。



(a) 研究区多层数值模拟结果



(b) 单一小层数值模拟结果

图 18 数值模拟法劈分单井产量

Fig.18 Production splitting in single well by numerical simulation method

最后,针对传统方法与数值模拟运算结果,逐一拟合数据,针对二者数据相差较大的层位,需进一步分析其连通关系,并结合储层静态分布特点,逐层校正先前劈分成果,最终实现研究区单井不同单砂层级别储层的产能精准劈分。

4.3 产能劈分结果指导调剖

根据单井单砂层刻画与产能劈分结果,可采取下列措施进行调剖挖潜:(1)针对局部单砂体有采无

注区,对油井进行转注,提高注水效率;(2)针对整体动用程度较低但分层产量平衡的单井进行提液操作;(3)针对动用程度较低的单砂体进行补孔操作;(4)通过确定注水井水窜层位,进行堵孔作业。

5 结论

基于单砂体沉积特征,提出了曲流河及三角洲(水下)分流河道储集砂体的4种垂向叠置样式与5种平面组合关系,及其对应的测井识别标志。总结了4种前积层、侧积层产状和两种侧积体规模定量计算方法,精细刻画曲流河及三角洲分流河道储层构型特征。

探索出一种基于多级构型界面约束的构型建模方法,与传统的网格约束不同,该方法综合采用多级界面约束和设置非均质网格技术,实现以较少量网格对构型级别夹层的精细表征。通过解析常规产能劈分方法,探索单砂体产能劈分要素,提出了一种多参数相结合的产能劈分方案。

参考文献

- [1] 张莉,鲍志东,林艳波,等.浅水三角洲砂体类型及沉积模式:以松辽盆地南部乾安地区白垩系姚家组一段为例[J].石油勘探与开发,2017,44(5):727-736.
Zhang Li, Bao Zhidong, Lin Yanbo, *et al.* Genetic types and sedimentary model of sandbodies in a shallow-water delta: a case study of the first member of Cretaceous Yaojia Formation in Qian'an area, south of Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017,44(5):727-736.
- [2] 李国永,李华君,轩玲玲,等.南堡凹陷曲流河点坝储层内部构型解剖与剩余油挖潜[J].石油天然气学报,2013,35(6):17-21.
Li Guoyong, Lin Huajun, Xuan Lingling, *et al.* Reservoir architecture anatomy in meandering river point bar and tapping the potential of remaining oil in Nanpu Sag[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013,35(6):17-21.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Ghazi S, Mountney N P. Facies and architectural element analysis of a meandering fluvial succession: the Permian Warchha sandstone, salt range, Pakistan[J]. Sedimentary Geology, 2009,221(1/2/3/4):99-126.
- [6] 周银邦,吴胜和,计秉玉,等.曲流河储层构型表征研究进展[J].地球科学进展,2011,32(7):695-701.
Zhou Yinbang, Wu Shenghe, Ji Bingyu, *et al.* Research progress on the characterization of fluvial reservoir architecture[J]. Advances in Earth Science, 2011,32(7):695-701.
- [7] 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.
- [8] 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.* Hierarchical modeling of underground palaeochannel reservoir architecture[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 38(S1):111-121.
- [9] 徐安娜,穆龙新,裴泽楠.我国不同沉积类型储集层中的储量和可动剩余油分布规律[J].石油勘探与开发,1998,25(5):41-44.
Xu Anna, Mu Longxin, Qiu Yinan. Distribution of reserves and movable remaining oil in different sedimentary types of in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(5):41-44.
- [10] Miall A D. Reconstructing the architecture and sequence stratigraphy of the preserved fluvial record as a tool for reservoir development: a reality check[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(7):989-1002.
- [11] 孙宇,廖远,王振云.大庆萨尔图油田葡一组精细地质及剩余油分布研究[J].中国石油勘探,2011,16(2):39-43.
Sun Yu, Liao Yuan, Wang Zhenyun. Fine geology and remaining oil distribution study in Saertu Oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2011,16(2):39-43.
- [12] 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.
- [13] 李少华,卢文涛.基于沉积过程的储集层随机建模方法:以河流相储集层为例[J].古地理学报,2011,13(3):325-333.
Li Shaohua, Lu Wentao. Depositional process-based reservoir stochastic modeling: a case of fluvial reservoir modeling[J]. Journal of Palaeogeography, 2011,13(3):325-333.
- [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 Xingmao, 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] 符勇,李忠诚,万谱,等.三角洲前缘滑塌型重力流沉积特征及控制因素:以松辽盆地大安地区青一段为例[J].岩性油气藏,2021,33(1):198-208.
Fu Yong, Li Zhongcheng, Wan Pu, *et al.* Sedimentary characteristics and controlling factors of slump gravity flow in delta front: a case study of Qing 1 member in Da'an area, Songliao Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2021,33(1):198-208.

- [16] 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):7-14.
Zhu Xiaomin, Pan Rong, Zhao Dongna, *et al.* Formation and development of shallow-water deltas in lacustrine basin and typical case analyses[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37(5):7-14.
- [17] 宋明水, 李友强. 济阳拗陷油气精细勘探评价及实践[J]. 中国石油勘探, 2020,25(1):93-101.
Song Mingshui, Li Youqiang. Evaluation and practice of fine petroleum exploration in the Jiyang depression[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(1):93-101.
- [18] 杨智, 唐振兴, 陈旋, 等. “进源找油”: 致密油主要类型及地质工程一体化进展[J]. 中国石油勘探, 2020,25(2):73-83.
Yang Zhi, Tang Zhenxing, Chen Xuan, *et al.* “Exploring oil inside source kitchen”: main types of tight oil and progress of geology-engineering integration[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(2):73-83.
- [19] 杨海风, 牛成民, 柳永军, 等. 渤海垦利 6-1 新近系大型岩性油藏勘探发现与关键技术[J]. 中国石油勘探, 2020,25(3):24-32.
Yang Haifeng, Niu Chengmin, Liu Yongjun, *et al.* Discovery and key exploration technology of the KL6-1 Neogene large lithologic oil reservoir in the Bohai Bay Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(3):24-32.
- [20] 付金华, 董国栋, 周新平, 等. 鄂尔多斯盆地油气地质研究进展与勘探技术[J]. 中国石油勘探, 2021,26(3):19-40.
Fu Jinhua, Dong Guodong, Zhou Xinping, *et al.* Research progress of petroleum geology and exploration technology in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(3):19-40.
- [21] 张昌民, 尹太举, 朱永进, 等. 浅水三角洲沉积模式[J]. 沉积学报, 2010,28(5):933-944.
Zhang Changmin, Yin Taiju, Zhu Yongjin, *et al.* Shallow-water deltas and models[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010,28(5):933-944.
- [22] 朱筱敏, 刘媛, 方庆, 等. 大型拗陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式: 以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例[J]. 地学前缘, 2012,19(1):89-99.
Zhu Xiaomin, Liu Yuan, Fang Qing, *et al.* Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake; example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2012,19(1):89-99.
- [23] 吕晓光, 潘懋, 王家华, 等. 指示主成分模拟建立分流河道砂体相模型及意义[J]. 石油学报, 2003,24(1):53-57.
Lü Xiaoguang, Pan Mao, Wang Jiahua, *et al.* Microfacies modeling for distributary channel sandbody by using indicator principal component simulation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003,24(1):53-57.
- [24] Niu Bo, Bao Zhidong, Yu Dengfei, *et al.* Hierarchical modeling method based on multilevel architecture surface restriction and its application in point-bar internal architecture of a complex meandering river[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021:108808.
- [25] 封从军, 鲍志东, 代春明, 等. 三角洲前缘水下分流河道单砂体叠置机理及对剩余油的控制: 以扶余油田 J19 区块头组四段为例[J]. 石油与天然气地质, 2015,36(1):128-135.
Feng Congjun, Bao Zhidong, Dai Chunming, *et al.* Superimposition patterns of underwater distributary channel sands in deltaic front and its control on remaining oil distribution: a case study from K₁q⁴ in J19 block, Fuyu Oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2015,36(1):128-135.
- [26] Miall A D. Architectural elements and bounding surfaces in fluvial deposits: anatomy of the Kayenta Formation (Lower Jurassic), southwest Colorado[J]. Sedimentary Geology, 1988,55(3-4):233-262.
- [27] 岳大力, 吴胜和, 刘建民. 曲流河点坝地下储层构型精细解剖方法[J]. 石油学报, 2007,28(4):99-103.
Yue Dali, Wu Shenghe, Liu Jianmin. Accurate method for anatomizing architecture of subsurface reservoir in point bar of meandering river[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007,28(4):99-103.
- [28] 闫百泉, 张鑫磊, 于利民, 等. 基于岩心及密井网的点坝构型与剩余油分析[J]. 石油勘探与开发, 2014,41(5):597-604.
Yan Baiquan, Zhang Xinlei, Yu Limin, *et al.* Point bar configuration and residual oil analysis based on core and dense well pattern[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014,41(5):597-604.
- [29] 李敏, 陈博, 阮金凤, 等. 松辽盆地新民油田下白垩统泉四段浅水三角洲骨架单砂体空间发育特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019,39(4):46-55.
Li Min, Chen Bo, Ruan Jinfeng, *et al.* Spatial distribution patterns of single framework sand bodies of a shallow-water delta in the Cretaceous Quantou Formation of Xinmin Oilfield, Songliao Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019,39(4):46-55.
- [30] 李学慧, 陈清华, 杨超, 等. 储层建筑结构要素分析及在剩余油挖潜中应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010,32(6):16-20.
Li Xuehui, Chen Qinghua, Yang Chao, *et al.* Analysis of reservoir architecture elements and its application in the development of remaining oil[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2010,32(6):16-20.
- [31] 周银邦, 吴胜和, 岳大力, 等. 地下密井网识别废弃河道方法在萨北油田的应用[J]. 石油天然气学报, 2008,30(4):33-36.
Zhou Yinbang, Wu Shenghe, Yue Dali, *et al.* Recognizing abandoned channel with underground dense well pattern and its application in Sabei Oilfield[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008,30(4):33-36.
- [32] 宁士华, 肖斐, 束宁凯. 特高含水开发期曲流河储层构型深化研究及应用[J]. 断块油气田, 2013,20(3):354-358.
Ning Shihua, Xiao Fei, Shu Ningkai. Deepening research and application of meandering river reservoir configuration at extra-high water cut development period[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013,20(3):354-358.
- [33] 封从军, 鲍志东, 杨玲, 等. 三角洲前缘水下分流河道储集层构型及剩余油分布[J]. 石油勘探与开发, 2014,41(3):323-329.
Feng Congjun, Bao Zhidong, Yang Ling, *et al.* Reservoir architecture and remaining oil distribution of deltaic front underwater distributary channel[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014,41(3):323-329.
- [34] 周银邦, 吴胜和, 岳大力, 等. 点坝内部侧积层倾角控制因素分析及识别方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009,33(2):7-11.
Zhou Yinbang, Wu Shenghe, Yue Dali, *et al.* Controlling

- factor analysis and identification method of lateral accretion shale beddings angle in point bar[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(2):7-11.
- [35] 刘站立, 焦养泉. 曲流河成因相构成及其空间配置关系: 鄂尔多斯盆地中生代露头沉积学地质考察[J]. 大庆石油地质与开发, 1996, 15(3): 6-9.
- Liu Zhanli, Jiao Yangquan. Composition of facies of meandering river origin and relationship of its spatial configuration—an on-the-spot geologic investigation in Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Oil Field Development in Daqing, 1996, 15(3): 6-9.
- [36] 周新茂, 高兴军, 田昌炳, 等. 曲流河点坝内部构型要素的定量描述及应用[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(3):421-426.
- Zhou Xinmao, Gao Xingjun, Tian Changbing, *et al.* Quantitative description of internal architecture in point bar of meandering river[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(3):421-426.
- [37] Leeder M R. Fluvialite fining-upwards cycles and the magnitude of palaeochannels[J]. Geological Magazine, 1973, 110(3):265-276.
- [38] Schumm S A. Sinuosity of alluvial rivers on the great plains[J]. Geological Society of America Bulletin, 1963, 74(9):1089-1100.
- [39] 吴胜和. 储层表征与建模[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010:136-143.
- Wu Shenghe. Reservoir characterization and modeling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010:136-143.
- [40] 马世忠, 吕桂友, 闫百泉, 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.
- [41] 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.
- [42] 岳大力, 陈德坡, 徐樟有, 等. 济阳拗陷孤东油田曲流河河道储集体构型三维建模[J]. 古地理学报, 2009, 11(2):233-240.
- Yue Dali, Chen Depo, Xu Zhangyou, *et al.* Channel reservoir architecture 3D modeling of meandering fluvial reservoir in Gudong, Jiyang Depression[J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(2):233-240.
- [43] 尹艳树. 层次建模方法及其在河流相储层建筑结构建模中的应用[J]. 石油地质与工程, 2011, 25(6):1-4.
- Yin Yanshu. Hierarchical modeling method and its application in the construction of fluvial architectural elements model[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(6):1-4.
- [44] 刘可可, 侯加根, 刘钰铭, 等. 多点地质统计学在点坝内部构型三维建模中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(4):577-583.
- Liu Keke, Hou Jiagen, Liu Yuming, *et al.* Application of multiple-point geostatistics in 3D internal architecture modeling of point bar[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4):577-583.
- [45] 李宇鹏, 吴胜和, 耿丽慧, 等. 基于空间矢量的点坝砂体储层构型建模[J]. 石油学报, 2013, 34(1):133-139.
- Li Yupeng, Wu Shenghe, Geng Lihui, *et al.* Spatial-vector-based reservoir architecture modeling of point-bar sand[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1):133-139.
- [46] 舒晓, 金宝强, 缪飞飞, 等. 基于曲流河演化模拟的海上大井距油田点坝内部构型建模方法[J]. 复杂油气藏, 2019, 12(1):38-43.
- Shu Xiao, Jin Baoqiang, Miao Feifei, *et al.* Internal architecture modeling of point bar in offshore oilfields with large well-spacing based on evolution simulation of meandering river[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2019, 12(1):38-43.
- [47] Labourdette R, Jones R R. Characterization of fluvial architectural elements using a three-dimensional outcrop data set: escanilla braided system, south-central Pyrenees, Spain[J]. Geosphere, 2007, 3(6):422-434.
- [48] 牛博, 赵家宏, 付平, 等. 曲流河废弃河道走向判定与单砂体构型表征: 以渤海湾盆地埕宁隆起石臼坨凸起西部新近系明化镇组下段为例[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(5):891-901.
- Niu Bo, Zhao Jiahong, Fu Ping, *et al.* Trend judgment of abandoned channels and fine architecture characterization in meandering river reservoirs: a case study of Neogene Minhuazhen Formation Nm III 2 layer in Shijiutuo bulge, Chengning Uplift, Bohai Bay Basin, east China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5):891-901.
- [49] 牛博, 高兴军, 赵应成, 等. 古辫状河心滩坝内部构型表征与建模: 以大庆油田萨中密井网区为例[J]. 石油学报, 2015, 36(1):89-100.
- Niu Bo, Gao Xingjun, Zhao Yingcheng, *et al.* Architecture characterization and modeling of channel bar in paleo-braided river: a case study of dense well pattern area of Sazhong in Daqing Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1):89-100.