

刘尧均, 官大勇, 王志萍, 等. 湖底扇水道相控建模技术及应用[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(11): 59-68.

湖底扇水道相控建模技术及应用

刘尧均, 官大勇, 王志萍, 付鑫, 马正武

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津 300459)

摘要:随着渤海勘探力度加强, 大型湖底扇岩性圈闭逐渐成为新的勘探目标, 但是湖底扇不同期次水道垂向相互叠合, 部分水道下切, 砂体展布以及砂体间的连通关系复杂。针对湖底扇储层具有非均质性强, 储层刻画难度大的特点, 以渤海垦利 10-A 构造为例, 充分利用多种地震信息, 高度综合地质、钻井、测井、地震等资料, 将传统的“相控建模”思想引入湖底扇储层建模当中, 提出了湖底扇储层相控建模新技术。该技术在湖底扇沉积构型模式和富砂性深入研究的基础上, 利用湖底扇储集相和三维甜点体属性进行双重控制和约束, 在地质认识指导下, 应用地质统计学理论和随机建模方法建立符合地质规律的三维岩相模型, 在多次建模实现后求取砂岩概率体, 完成对湖底扇水道的精细刻画, 砂体连通性分析和储层预测。研究表明, 该方法能有效地降低储层属性模拟的不确定性和多解性, 提高储层预测的精度, 为后期勘探布井奠定了基础。

关键词:渤海海域; 湖底扇; 随机建模; 岩相模型; 储层预测

中图分类号: P618.130.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.147

0 引言

渐新世以来渤海逐步成为整个渤海湾盆地沉积沉降中心, 湖底扇在渤海海域东营组和沙河街组广泛发育, 目前在渤海湾发现了多个与湖底扇相关的岩性油气藏。如辽中凹陷已钻遇湖底扇型油气藏油品性质好、测试产能高, 揭示了湖底扇岩性油气藏是勘探突破的重要领域, 也是寻找储量增长的后备战场。

目前, 姜在兴^[1]、徐长贵^[2]等相关学者对湖底扇的发育规模、形成机制及沉积微相构成等方面进行了大量的研究, 为勘探提供了积极的指导意义^[1-12]。但是由于湖底扇非均质性极强, 储层分布异常复杂, 常规方法如厚度图、地震分频技术、地层倾角属性等方法对富砂区精细预测存在一定的风险, 难以满足岩性油气藏的勘探要求^[13-15]。近年来

发展的相控建模在精细油藏描述方面取得了长足的进步, 张文彪等^[16]通过多级建模的方法对深水浊积水道构型及岩性分布进行三维模拟, 张佳佳^[17]提出了一种适合于海底扇水道储层的“多级相控约束, 多重属性协同”的储层参数建模新思, 均表明相控随机建模技术对复杂岩性的储层预测具有较好的应用效果。针对湖底扇这种特殊的岩性储层, 笔者以渤海湾垦利 10-A 井区为例, 在对湖底扇沉积构型模式和富砂性深入分析的基础上, 通过综合地质、钻井、测井、地震等资料, 将传统的“相控建模”思想引入湖底扇储层建模当中, 创新提出了基于湖底扇储集相和三维甜点体属性进行双重控制和约束的湖底扇相控随机建模技术, 对湖底扇储层三维地质模型的建立进行了探索研究, 并为同类油藏的储层预测提供了一种新的思路。

1 区域地质概况

KL10-A 构造位于渤海湾盆地莱州湾凹陷南部缓坡带, 北侧紧邻莱州湾凹陷(图 1)北洼, 东侧紧邻莱州湾凹陷南次洼, 是北洼和南次洼油气运聚的有

收稿日期: 2020-09-20

资助项目: “十三五”国家科技重大专项“渤海海域勘探新领域及关键技术研究”(2016ZX05024)

作者简介: 刘尧均(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地震资料解释和储层预测等方面的研究工作. E-mail: liuyj70@cnooc.com.cn

利区带,区域成藏位置非常有利,已发现垦利 10-1、垦利 10-4 多个油气田^[18-19]。目前莱州湾凹陷北洼构造圈闭勘探程度较高,圈闭形态好、面积大的构造圈闭基本已经钻探,亟需在该区寻找新的勘探潜力目标。区域地质研究认为在沙三段发育来自西侧垦东凸起的大型辫状河三角洲,有利于湖底扇发育。2019 年在垦利 10-A 构造部署的 10-A-1 井古近系沙三段中钻遇湖底扇,并获得 48.5 m 的厚油层,钻井揭示了垦利 10-A 构造及围区湖底扇具有较大的勘探潜力。

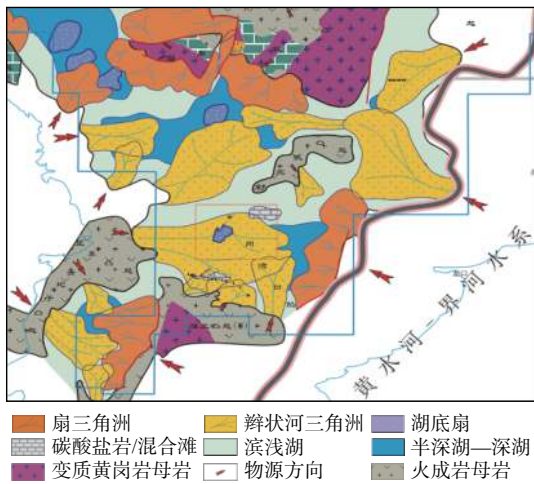


图 1 莱州湾凹陷沙三段段沉积相

Fig.1 Sedimentary facies of Sha3 Member in Laizhou Bay Depression

2 湖底扇水道构型特征

赵晓明等^[20]和林煜等^[21]从单一水道、复合水道以及水道体系 3 个层次开展沉积构型模式深入研究。本次研究主要是通过地震反射结构、地震相、地层切片、岩心、测井资料,并结合地震正演等多种方法对湖底扇水道共分为限制性水道、叠置水道、水道侧翼和水道间 4 类构型(图 2)。

结合地震正演与已钻井地震反射特征,统计发现其中限制性水道和叠置水道在地震剖面上主要表现为顶凸底凹透镜状特征,同时由于水道作为输砂主要通道,水动力较强,限制水道在地震剖面上表现为叠置蠕虫状中弱不连续反射特征,叠置水道表现为断续下切状中弱连续反射,沉积厚度从几米至几十米不等,是储层发育有利区。水道侧翼为正旋回特征,底部多发育冲刷面,发育块状与递变层理,以细砂岩沉积为主,水道边缘泥岩含量增加,砂岩变薄,主要以粉砂岩为主,多以砂泥互层,储集性能逐渐变差,在地震剖面上主要表现为断续哑铃状中弱振幅反射特征。水道间多为泥岩,表现为中强亚平行连续反射特征,湖相泥岩为静水期的细粒悬浮物沉积,以泥岩和粉砂岩为主,非储层,主要表现为强振幅平行连续反射特征。

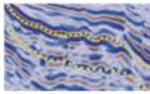
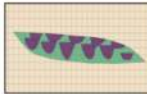
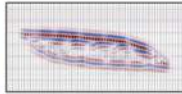
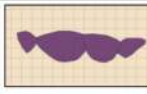
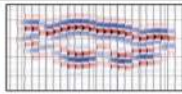
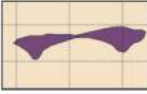
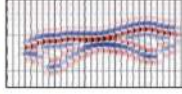
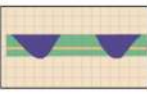
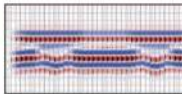
类型	地震特征					正演		钻进特征	储层评价
	地震剖面	特征描述				正演模型	正演剖面		
		外形	振幅	频率	连续性				
限制水道		顶凸底凹透镜状	中—弱	低	差			岩性: 粗—中砂岩 测井曲线: 箱型、钟型	好
叠置水道		顶凸(平)底凹透镜状	中—弱	低	差			岩性: 中—细砂岩、粉砂岩 测井曲线: 箱型、钟型	好
水道侧翼		断续哑铃状	中—强	低	中—好			测井曲线: 漏斗型、钟型	中—好
水道间		席状	强	中—低	好			岩性: 粉砂岩、泥岩	差

图 2 湖底扇类型统计图

Fig.2 Types of sublacustrine fan

总体来讲,由于不同沉积类型在沉积结构、泥质含量和粒度上的差异,其储层特征也存在较大差

异。其中限制性水道和叠置水道砂体的物性整体要好于水道侧翼和水道间,含砂率最高,是储层发

育有利区,同时也是井位部署重点区,其次是水道间和水道侧翼,湖相泥岩含砂率最低,可作为有效盖层。

3 岩相建模思路

相控建模思路的提出和推广是储层地质建模的一大飞跃,不但在碎屑岩储层建模已取得了长足的发展,并日趋完善,为油气藏评价提供了有利技术支持^[22-25],同时相控地质建模在碳酸盐岩等复杂储层预测取得了很好的应用效果^[26-28]。同碳酸盐岩储层结构一样,湖底扇储层内部也具有极强的非均质特征,储层参数的空间变化十分复杂,常规方法难以确定其真实的特征或性质。为了降低模型中的不确定性,和多解性,将传统的“相控建模”的思想引入湖底扇储层建模当中,综合利用地质、钻井、测井、地震等多方面的资料,采用相控随机建模的研究方法,提高储层预测精度(图 3)。

相控三维地质建模的基本研究思路:①根据研究区的古地貌,地层发育情况,沉积环境及其组成岩性变化,总结研究区的宏观地质相特征;②建立

包含地震、断层、层位、测井等多种数据的地震地质测井一体化综合数据库,建立三维构造模型,③依据岩心观察、测试资料、测井解释等多种资料对单井岩性特征进行划分,利用神经网络法或多属性分析建立精细相控模型,即“湖底扇地震储集相”,以此作为三维岩相建模的相控约束条件;④在此基础上通过地质统计学分析,确定不同储集相内储层属性参数的空间概率分布函数和变差函数,按地震储集相类型控制储层属性参数的空间模拟,从而使属性参数模拟控制在一个合理的区间;⑤在地质认识指导下,在三维地震体属性和测井约束下,应用地质统计学理论和随机建模方法建立符合地质规律的三维岩相模型,并通过多次建模结果求取湖底扇砂岩概率体;⑥在此基础上,对湖底扇砂体进行预测,同时对水道展布特征进行刻画,进而对砂体连通性进行分析,最终进行成藏综合分析和储层有利区进行优选。总之,在“湖底扇砂岩储集相”和三维甜点体属性的双重控制和约束下,多级相控地质建模能有效地降低储层属性模拟的不确定性和多解性,提高储层预测的精度。

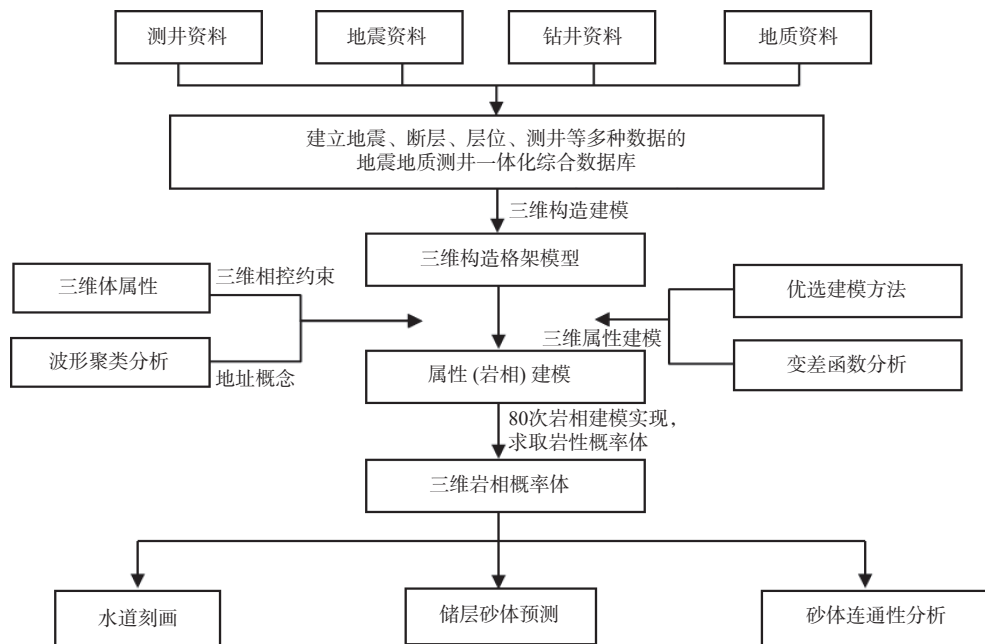


图 3 湖底扇储集相相控建模思路

Fig.3 Research approach of sublacustrine fan reservoir facies controlled modeling

4 垦利 10-A 井区湖底扇相控地质建模

以渤海垦利 10-A 井区为研究区,沙河街三段

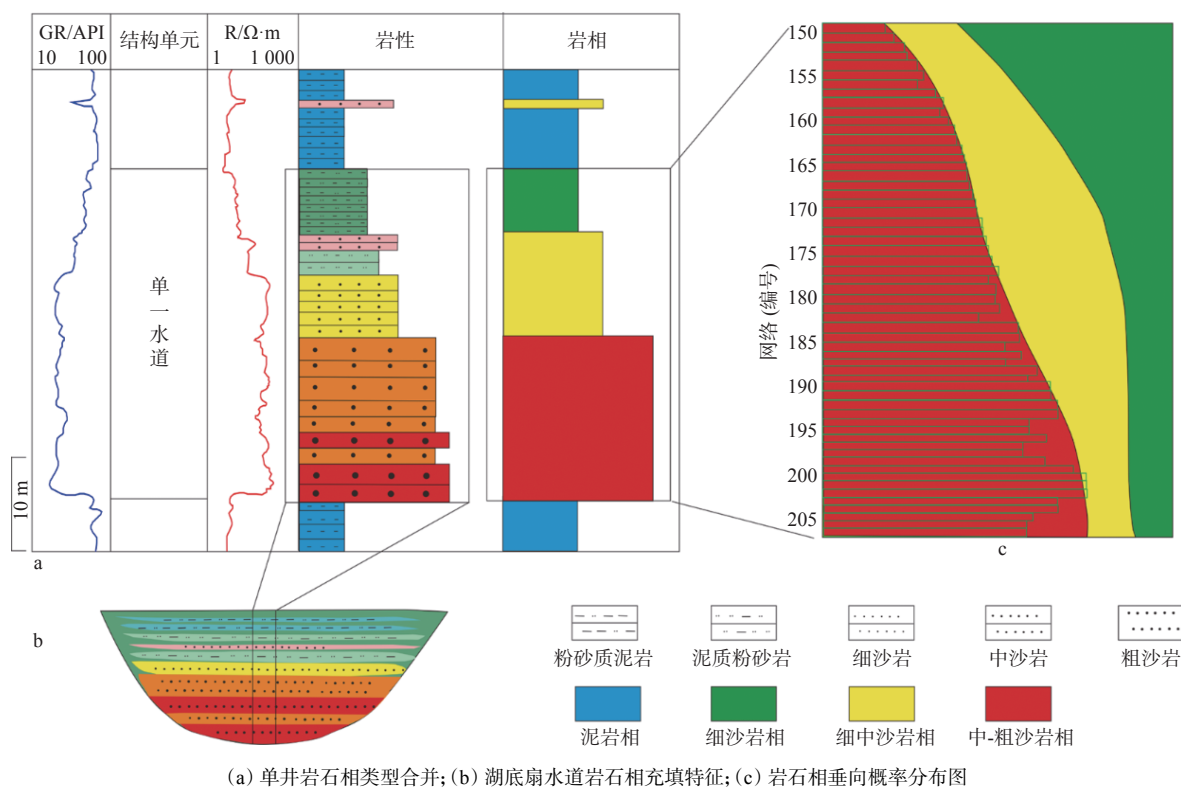
为目的层段,根据“湖底扇储集相控建模”的研究思路,在单井岩相类型划分和地震多属性优化的研究基础上,采用基于象元的序贯高斯随机模拟方法建立研究区湖底扇岩相分布模型。

4.1 三维构造建模及网格划分

三维构造建模是三维地质建模的基础和核心内容,同时为属性模型的建立提供构造格架约束,其质量直接决定着后续储层模型的质量。构造建模主要包含层位模型和断层模型。首先利用相干体及方差切片等对研究区目的层段进行精细解释,并将时间域层位转换为深度转换。针对复杂构造区,忽略规模较小,使构造复杂化作用的小断层,优选长期发育,断裂活动强,控制凸起形成与演化以及控制圈闭的大断层进行断层建模。

研究区地震解释提供的层面数据有沙河街组段的 4 个层位,包括 T_6^1 、 T_6^2 、fan_top(湖底扇顶)和 fan_bot(湖底扇底),并对各个层位进行时深转为深

度构造图。此次建模工区面积范围为 320 km^2 ,工区范围内已钻井 4 口,包括 KL10-A-1 井、KL10-A-2 井、KL10-B-1 井、KL10-B-2 井,其中 KL10-A-1 井钻遇湖底扇水道主体位置,KL10-A-2 井钻遇湖底扇边部,KL10-B-1 井和 KL10-B-2 井钻遇湖相泥岩(图 4)。首先利用断层和层位数据建立精细的三维构造模型,然后结合工区已钻井砂体厚度以及储层描述的精度和数值模拟对网格的要求,并结合工区研究范围($16 \text{ km} \times 20 \text{ km}$)和目的层段厚度(约 250 m),纵向上将沙河街三段划分为 200 个小层,将模型在空间上划分为长 50 m 、宽 50 m ,共计 $25\,600\,000$ ($320 \times 400 \times 200$)个网格单元的三维网格模型。最终利用层位和断层建立三维构造模型,为下一步储层属性建模中对储层的空间结构形态起到控制作用。



(a) 单井岩石相类型合并; (b) 湖底扇水道岩石相充填特征; (c) 岩石相垂向概率分布图

图 4 岩石相垂向概率分布

Fig.4 Vertical probability distribution of lithofacies

4.2 湖底扇岩相划分

由于水道迁移摆动,多期水道相互叠置,造成湖底扇水道构型级次复杂,既有单一期次重力流形成的单一水道,又有多期水道叠加相互切割改造形成的水道复合体^[21]。由于受重力流演化控制,在每

一期水道内部岩石充填类型从下至上依次表现为:底部中粗砂岩—砾岩相较发育,中部细—中砂岩相发育,顶部细砂岩相和泥岩较发育(图 4a、b),岩石粒度整体呈向上逐渐变小的趋势。根据其孔、渗分布特征,为了减少岩性建模的复杂程度,以及更好的表征水道展布特征,根据岩性的直径及含砂率将

多种岩性简化,将底部块状粗砂岩划分为中粗砂岩相、中部划分为中—细砂岩相、顶部细砂岩相以及泥岩相,共计 4 种“岩石相”类型。如图所示:在对该区已钻井 KL-10-A-1 井岩性合并的基础上,统计了砂岩相和泥岩相的分布概率,图 4c 可以看出砂岩百分比含量向上逐渐减小的趋势,很好的反映了水道型湖底扇的岩石相充填特征。

4.3 储集相控模型建立

目前常用的方法是通过构型对浊积水道进行研究,结合地震内部反射结构及外部形态来预测储集体的构型特征,从而提出了“地震构型相”的概念。宏观上地震相是沉积相在地震剖面上的反映,依据地震相的外部几何形态、内部结构及其在区域构造的位置,结合井资料进行相转化,可以在宏观上初步确定其对应的沉积相,并在地震剖面上划分出相界面或层序界面,建立宏观相控模型,为后续地质建模提供约束条件。结合钻井岩性解释结果、地质认识,地震波形等特征,将限制性水道和叠置水道设置为同一类,水道侧翼为一类,富泥特征的水道间和湖相设为一类,应用神经网络技术将不同沉积类型对应的地震道波形特征(从单一或多种数据体)作为进行地震相分类的输入数据,并与其相邻地震道的的波形特征进行相关性分析后,所产生的地震相就会具有地质规律,最终产生三种对应类型的波形聚类平面图(图 5),从而建立宏观相控模型,为后续地质建模提供约束条件。

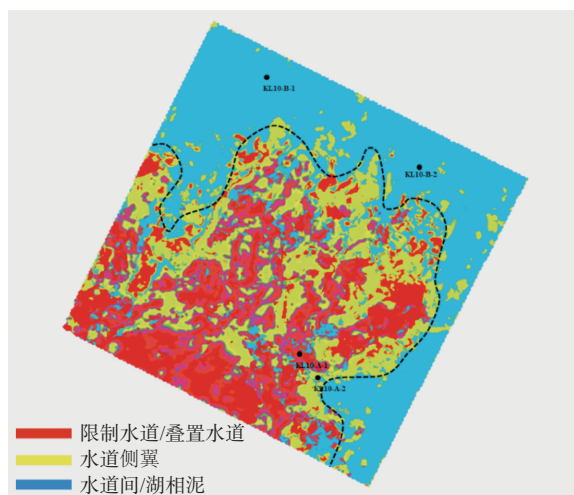


图 5 垦利 10-A 井区沙三段湖底扇构型波形聚类平面图
Fig.5 The waveform clustering map of sublacustrine fan configuration, Shahejie Formation in Well Kenli 10-A area

4.4 变差函数分析

总所周知,地下岩性分布本身是确定的,但是在钻井少以及岩性空间变化复杂的情况下,难以掌握地下岩性的真实分布特征,也就是说,在确定性模型中存在着不确定性,亦即随机性,因此应用随机建模方法进行岩相建模。为了能够更好的表征岩性在三维空间的非均质特性,本次采用了基于象元的协同序贯高斯随机模拟的方法,该方法融入了对研究区储集体发育规律的地质认识,并融合不同尺度数据(测井、地质认识),并可以获得多个反映目标区湖底扇水道储集体发育规律的等概率实现。

三维岩相建模过程中最主要的就是对随机建模的参数求取,包括反应岩性分布特征的各岩相概率密度分布函数和所占百分含量,以及反应储层纵向和平面分布特征的纵、横向变差函数^[29-31]。其中最主要的一个关键控制参数是变差函数的求取,变差函数反映了空间变异程度随距离变化的特征,是区域化变量空间变异性的一种度量,如反应砂体延伸长度、厚度及宽度的变化。其求取方法主要是根据钻井信息及区域沉积环境,其中横向变差函数表征的是砂体的横向展布范围,可以通过反应砂体物性分布特征的地震属性、区域沉积图或者厚度图获得长度和宽度的变程参数;而纵向变差函数主要影响研究目标的垂向厚度大小,可以根据测井解释结果分析在砂体厚度范围内的纵向变程参数;本次研究该区主水道宽度在 100~700 m,长度延伸 500~2 000 m,垂向最大变程为 25 m(图 6)。

4.5 三维岩相建模

由于水道迁移摆动频繁,水道相互切割改造,导致湖底扇体内部砂体非均值性极强,内部结构复杂,平面上多种微相组合,纵向上具有多期旋回性等多种特点,导致对储层预测研究十分困难。为了建立符合地质规律岩相分布模型,本次研究采用以下 2 种约束方法,尽可能减少岩相建模的随机性。

(1) 利用多属性分析和神经网络模拟得到波形聚类分析图作为岩相建模的相模型约束条件,控制不同岩石相的平面分布,从而减少岩石相建模过程中的随机性。前面通过神经网络分析得到的波形

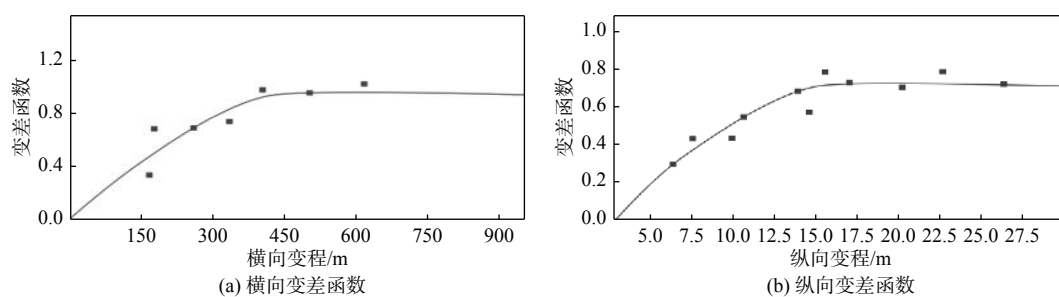


图 6 垦利 10-A 井区沙三段变差函数分析

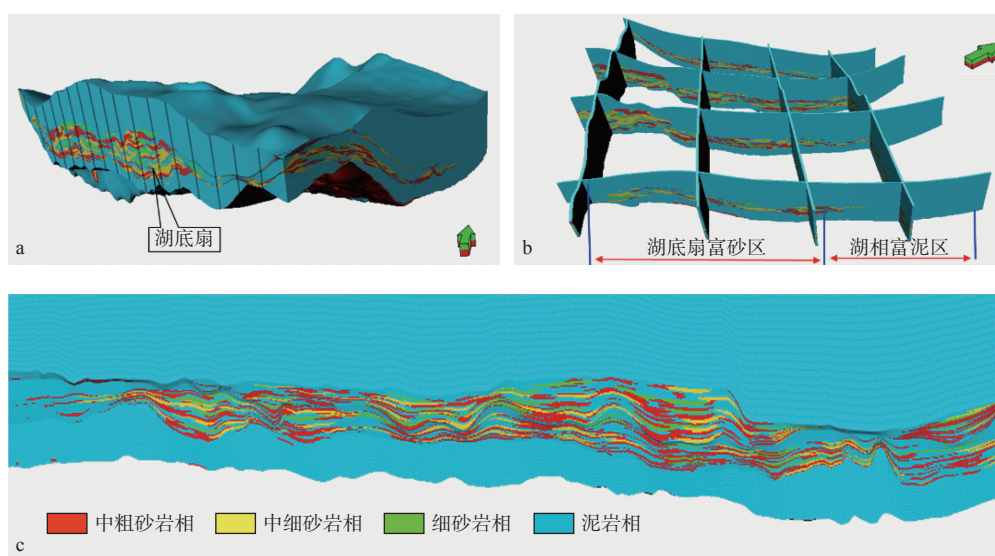
Fig.6 Analysis of variation function of Shahejie Formation in Well Kenli 10-A area

聚类分析图已经对储集相和非储集相进行了区分,红色代表的限制性水道和叠置水道以及黄色代表的水道侧翼为储集相,蓝色代表的水道间及湖相泥岩为非储集相发育区,其中储集相是水道发育主体区,同时也是砂体发育主体区。

(2) 利用三维甜点体属性约束 4 类储集岩相的空间分布。甜点属性综合地震反射强度和频率信息,能够放大岩性之间的差异,经过统计发现,甜点振幅属性与砂泥岩的概率具有较好的正相关性,甜点属性振幅值越大,储集相的概率较大,且该概率关系呈较稳定的阶段性递增规律。因此甜点振幅属性可以较好地地区分储集相和非储集相,可用来协同建立三维岩相模型。

本次研究以单井岩性(相)解释结果为基础数据(硬数据),并根据波形聚类得到储集相控模型

和三维体属性作为岩相预测的约束数据(软数据),通过岩相数据分析、岩相概率分析、多方向变差函数分析,在 Petrel 软件中采用基于象元的协同序贯高斯模拟方法建立了符合地质规律、准确性较高的湖底扇三维岩相模型(图 7a),湖底扇发育在大套泥岩中。从湖底扇岩相模型栅状图来看(图 7b),水道内部呈现出岩石类型的韵律性变化,整体是从底部到顶部逐渐变差的过程,其中湖底扇主体主要发育在西侧,为富砂区,而湖相富泥区主要发育在远端。从垂直湖底扇水道的三维岩相模拟结果结构(图 7c)来看,砂体主要发育在叠置水道和限制性水道处,底部多发育中粗砂岩相,边部发育细砂岩相和泥岩相,此外水道之间的叠置关系也符合前期分析的构型模式,达到了参数控制和模式约束的预期效果。



(a) 三维岩相体; (b) 湖底扇岩相模型栅状图; (c) 垂直湖底扇走向方向的岩相剖面图

图 7 垦利 10-A 井区沙三段岩相建模结果

Fig.7 Lithofacies modeling results of Shahejie Formation in Well Kenli 10-A area

5 应用效果分析

5.1 湖底扇水道演化特征分析

通过给定变方向变差函数,以储集相模型约束,同时将地质、钻井、测井、地震等多方面资料整合在最终的储层模型当中,并采用基于象元的协同序贯高斯模拟的方法,建立了垦利 10-A 井区沙三段湖底扇的岩性模型。但单次随机模拟结果往往具有多解性和不确定性,体现了地下情况的复杂性,为了尽可能的减小这些不确定性带来的不利影响,本次研究共生成岩相模型的 80 个随机实现,并基于这些随机实现通过平均化处理得到最终的砂岩概率体模型,这样使得结果更加趋于地下真实地质情况。图 8 是通过多个随机建模实现后的岩相体平均化得到的砂岩性概率体数据,红色箭头指示的是水道砂体发育主体区,纵向上砂体相互叠置。

为了更加精细的描述湖底扇水道平面展布形态,对多次建模实现后求取的岩性概率体,自下至上制作地层切片(位置图 8 所示)。通过地层切片

(图 9)可以得出:湖底扇水道及扇体形态特征清晰,湖底扇区域呈 SW—EN 向展布,建模区早期主要发育东、西 2 条水道体系,西支水道体系较东支发育集中,比东支水道体系延伸长度更长,西支水道体系在整个湖底扇沉积过程中一直存在,揭示了该水道体系水动力强于东支。其中东支水系在 KL10-A-1 井附近出现东、西 2 个分支水道(图 9a、b),早期东支水道体系呈孤立分布特征,如图 9a 显示的 3 个主要水道孤立分布特征,与对应过 KL10-A-1 井地震剖面(图 10)红色箭头所示水道的底凹形态特征一致,表明此次通过三维地质建模对湖底扇水道刻画方法的正确性。随着水道相互切割改造,东支水

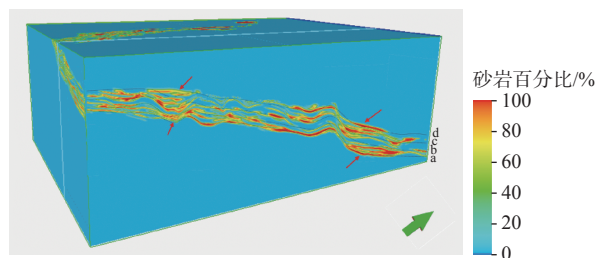


图 8 垦利 10-A 井区沙三段砂岩概率体

Fig.8 Sandstone probability cube of Shahejie Formation in Well Kenli 10-A area

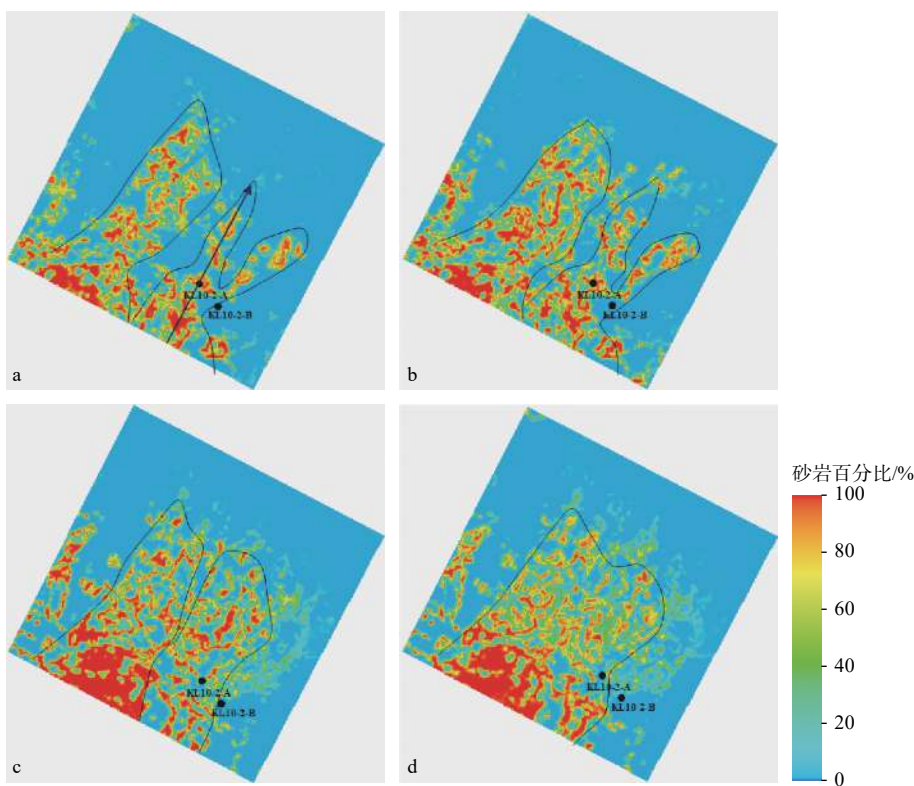


图 9 垦利 10-A 井区沙三段湖底扇砂岩概率体从下至上地层切片

Fig.9 Stratigraphic slice of sandstone probability cube in Well Kenli 10-A area

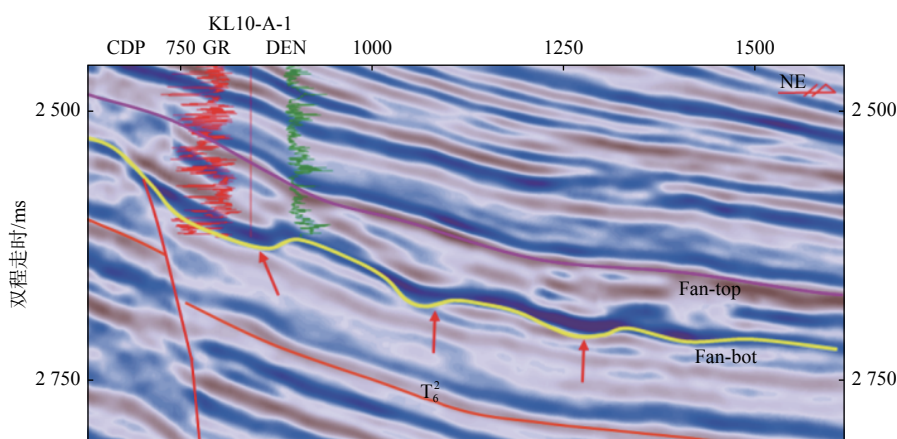


图 10 过 KL10-A-1 井地震剖面

Fig.10 The seismic profile across Well KL10-A-1

道体系逐渐向西靠拢(图 9c),在交汇部位部分切割西水道体系的东支,同时东水道体系的东支逐渐消亡(图 9d)。整体上,湖底扇水道体系平面上呈弯曲窄条带状分布,宽度 100~500 m,长度延伸 500~1 200 m,为典型的限制性水道体系分布特征。相较于传统地震属性、厚度图等方法对湖底扇水道进行刻画不够精细的缺点,该方法能显著提高储层建模的精度,其建模结果既能保持测井垂向分辨率,又能充分反映出地震数据观测的井间储层变化特征和横向连续性,揭示了湖底扇水道从无到有的演化符合地质沉积规律。

5.2 叠合水道间砂体连通性分析

砂体连通性的分析研究,对油田勘探开发过程中的井位部署及动态分析有重要的指导价值^[32-33]。

由于研究区沙三段湖底扇埋深超过 3 500 m,地震分辨率较低为 15~30 Hz,最大识别砂体厚度 30 m,多期水道垂向上相互叠置,增加了砂体平面展布以及砂体连通性研究的难度。本次研究通过多级相控建模,对多次建模结果求取岩性概率体,对水道砂体的连通性进行了分析。垂直过构造主体水道的地震剖面可以识别出三个浊积水道,但是水道砂体边界及砂体连通性难以表征(图 11a);通过三维地质建模得到的砂岩概率体剖面上能清晰的刻画出 3 个的水道砂体形态展布特征,其中水道 1 是独立的,而水道 2 的侧翼与和 3 号水道的侧翼是相互叠置的,砂体存在连通性风险(图 11b)。由此得到的砂体连通性分析可以为下一步井位部署提供参考意见,让勘探人员了解可能存在的不确定性风险。

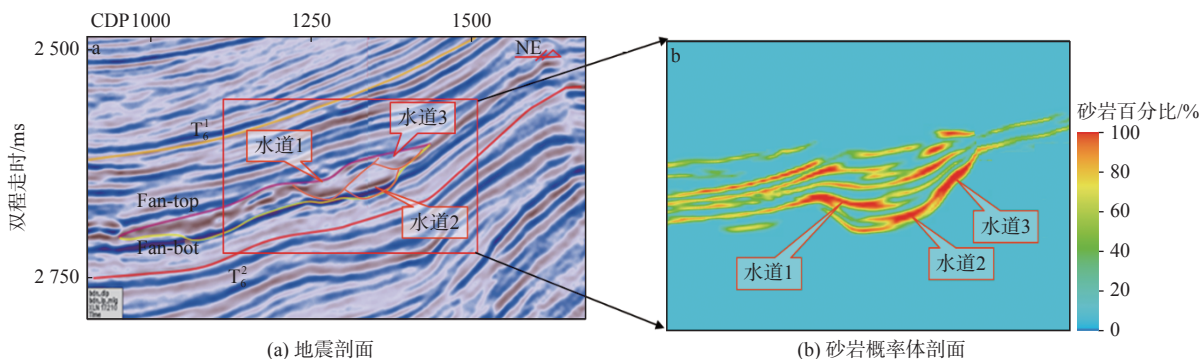


图 11 湖底扇水道连通性分析

Fig.11 Analysis of channel connectivity of sublacustrine fan

5.3 储层平面预测

通过相控约束下的三维地质建模技术,在多次

随机实现后求取的砂岩概率体的基础上,可以对 KL10-A 地区沙三段湖底扇有效储层进行有效刻画。如图 12 所示,富砂区主要分布在建模区的中南部,

砂体主要沿着在水道呈长条状分布,砂体厚度整体上从南到北逐渐减薄,但储层分布非均质性强,砂体厚度变化较大,符合湖底扇水道沉积规律。综合地震剖面特征、波形聚类(图5)、地层切片(图9)和储层预测平面厚度图,综合分析认为垦利10-A井区共有3个有利井位论证部署区带(蓝色圈定范围)具有较大的勘探潜力,分别是西支水道体系、KL10-A-1井北部区以及东支水道体系的右支水道(图12)。

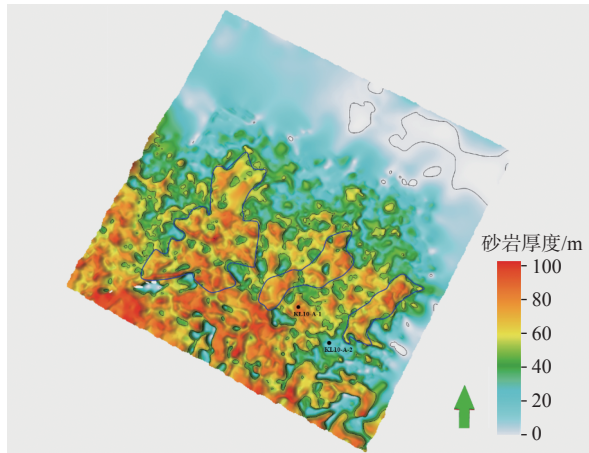


图12 湖底扇水道砂岩厚度预测图

Fig.12 Prediction map of sandstone thickness for sublacustrine fan channel

6 结论

通过三维地质建模技术在垦利10-A井区湖底扇体预测中的应用,得到以下认识:

(1)垦利10-2井区主要发育限制性水道、叠置水道、水道侧翼和水道间四类构型。研究区水道叠置发育,其中西支水道体系、KL10-A-1井北部区以及东支水道体系的右支水道是近期开展岩性油气藏勘探的有利目标。

(2)本次湖底扇岩相建模,综合利用多种有效信息,利用湖底扇储集相和三维体属性进行双重控制和约束,通过多方向变差函数分析,可以有效降低建模结果的不确定性和多解性。

(3)浊积水道岩相模拟结果符合其沉积规律,能客观反映湖底扇储层的严重非均质性,为复杂储层建模提供了新的研究思路。

参考文献:

[1] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 375-402.

- [2] 徐长贵. 渤海海域低勘探程度区古近系岩性圈闭预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
- [3] 王建功, 王天琦, 张顺, 等. 松辽拗陷盆地水侵期湖底扇沉积特征及地球物理响应[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 361-366.
- [4] 吴奎, 吴俊刚, 张中巧, 等. 辽中拗陷北部湖底扇沉积模式及地震响应特征[J]. 东北石油大学学报, 2012, 36(5): 33-37.
- [5] 庞军刚, 李文厚, 石硕, 等. 鄂尔多斯盆地长7段浊积岩沉积演化模式及石油地质意义[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(4): 73-77.
- [6] 田立新, 周东红, 刘力辉. 辽东湾蠕虫状地震反射的地质意义研究[J]. 石油物探, 2010, 49(3): 295-298.
- [7] 姚健, 杜晓峰, 郑敬贵, 等. 辽东湾地区浊积扇体识别及储层地震描述方法研究[J]. 断块油气田, 2012, 19(6): 718-721.
- [8] 潘树新, 刘化清, ZAVALA C, et al. 大型拗陷湖盆异重流成因的水道-湖底扇系统: 以松辽盆地白垩系嫩江组一段为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 860-870.
- [9] 李凤杰, 李磊, 魏旭, 等. 鄂尔多斯盆地华池地区长6油层组湖底扇内深水重力流沉积特征[J]. 古地理学报, 2014, 16(6): 827-834.
- [10] 王家豪, 王华, 肖敦清, 等. 陆相断陷湖盆异重流与滑塌型重力流沉积判别[J]. 石油学报, 2020, 41(4): 392-402.
- [11] 严皓, 李宾, 谷志猛, 等. 渤海J气田湖底扇储层精细刻画[J]. 断块油气田, 2020, 27(3): 299-303.
- [12] 仲米虹, 唐武. 前陆盆地隆后拗陷区湖底扇沉积特征及主控因素: 以塔北轮南地区三叠系为例[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(5): 18-28.
- [13] 张志军, 周东红. 辽中北洼锦州A区东营组浊积扇地震描述研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2016, 38(3): 55-64.
- [14] 文佳涛, 严皓, 韩雪芳, 等. JZ气田湖底扇岩性砂体叠置模式与连通关系[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(4): 143-149.
- [15] 王志萍, 王保全, 刘艺萌, 等. 渤海油田JZ31构造东二段湖底扇地震沉积学研究[J]. 断块油气田, 2017, 24(4): 452-455.
- [16] 张文彪, 段太忠, 刘志强, 等. 深水浊积水道沉积构型模式及沉积演化: 以西非M油田为例[J]. 地球科学, 2017, 42(2): 273-283.
- [17] 张佳佳, 吴胜和, 范廷恩, 等. 海底扇水道储层参数建模新思路: 以西非A油田为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(2): 408-417.
- [18] 杨波, 胡志伟, 李果营, 等. 渤海莱州湾凹陷南部斜坡带构造特征及油气成藏规律[J]. 中国海上油气, 2016, 49(3): 22-29.
- [19] 杨波, 牛成民, 孙和风, 等. 莱州湾凹陷垦利10-1亿吨级油田发现的意义[J]. 中国海上油气, 2011, 23(3): 148-153.
- [20] 赵晓明, 吴胜和, 刘丽. 西非陆坡区深水复合水道沉积构型模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(6): 1-5.
- [21] 林煜, 吴胜和, 王星, 等. 深水浊积水道体系构型模式研究: 以西非尼日尔三角洲盆地某深水研究区为例[J]. 地质论评, 2013, 59(3): 510-520.
- [22] DAMSLETH E, OMRE H, HALDORSEN H, et al. A two stage stochastic model applied to North Sea reservoir[J]. Journal of Petroleum Geology, 1992, 44(4): 402-408.

- [23] 彭城, 杨显斌. 浅谈地震约束储层地质建模技术[J]. *城市地理*, 2015(10): 67-68.
- [24] 刘文岭. 地震约束储层地质建模技术[J]. *石油学报*, 2008, 29(1): 64-68.
- [25] 霍春亮, 古莉, 赵春明, 等. 基于地震、测井和地质综合一体化的储层精细建模[J]. *石油学报*, 2007, 28(6): 66-71.
- [26] 刘立峰, 孙赞东, 杨海军, 等. 塔中地区良里塔格组裂缝型碳酸盐岩储层特征及建模[J]. *石油学报*, 2010, 31(6): 953-956.
- [27] 陈清华, 刘池阳, 王书香, 等. 碳酸盐岩缝洞系统研究现状与展望[J]. *石油与天然气地质*, 2002, 23(2): 196-201.
- [28] 杨辉廷, 江同文, 颜其彬, 等. 缝洞型碳酸盐岩储层三维地质建模方法初探[J]. *大庆石油地质与开发*, 2004, 23(4): 11-12.
- [29] 王家华, 刘倩. 储层建模中对变差函数分析的几点认识[J]. *石油化工应用*, 2011, 30(1): 5-7.
- [30] 慎国强, 孟宪军, 王玉梅, 等. 随机地震反演方法及其在埕北35井区的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2004, 39(1): 75-81.
- [31] 刘兴冬. 随机反演变差函数适用性研究[J]. *石油天然气学报*, 2010, 32(2): 253-256.
- [32] 胡宗全. 砂体连通性评价在隐蔽圈闭预测中的应用[J]. *新疆石油地质*, 2003, 24(2): 167-170.
- [33] 邓英尔, 刘树根. 井间连通性的综合分析方法[J]. *断块油气田*, 2003, 10(5): 50-53.

MODELING TECHNOLOGY FOR FACIES CONTROLLED SUBLACUSTRINE FAN CHANNEL SYSTEM AND ITS APPLICATION

LIU Yaojun, GUAN Dayong, WANG Zhiping, FU Xin, MA Zhengwu

(Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC China Limited, Tianjin 300452, China)

Abstract: As a new progress in oil and gas exploration in the Bohai Oilfield, the large complex sublacustrine fan reservoir has become a new target for exploration. However, owing to the vertical superposition of sub-channels and the cutting and erosion by later channels, the distribution of sand bodies and the relationship between sand bodies are rather complicated. Sublacustrine fan reservoirs are characterized by strong heterogeneity and it is difficult for reservoir characterization. Taking the Kenli 10-A structure of the Bohai Sea as an example, following the principle of “facies-constraining modeling”, the reservoir modeling of sublacustrine fan is carried out in this paper based on various seismic information and highly integrated geological data from drilling, logging and seismic survey. A new modeling technique for sublacustrine fan reservoir is developed by the authors and presented in this paper. The technique is controlled and constrained by the fan reservoir and the three-dimensional sweetness attributes. After several times of modeling, the probability cube of sandstone is obtained and the fine characterization of the channels of the sublacustrine fan completed. Based on the analysis of the connectivity among sand bodies, reservoir prediction is successfully worked out. The research results show that this method can effectively reduce uncertainties and ambiguities in reservoir attribute simulation, improve the accuracy of reservoir prediction, and lay a foundation for later deployment of exploratory wells.

Key words: Bohai Sea area; sublacustrine fan; random simulation modeling; lithofacies model; reservoir prediction