文章编号:1673-5005(2021)02-0001-10

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2021.02.001

基于支持向量机算法的辫状河储层砂体 连通性定量评价

何 辉1,刘 畅1,李顺明1,徐守余2,陈 修2,王百宁3

(1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580;
 3. 中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083)

摘要:以大庆喇嘛甸油田葡萄花油组葡一段辫状河储层砂体为例,综合野外露头、测井、岩心等资料,在精细表征砂体结构基础上,总结辫状河储层砂体接触关系,建立辫状河储层砂体横向、纵向及内部3种连通模式,并应用支持向量机方法定量预测储层砂体连通性,在此基础上采用基于目标的地质建模方法,建立基于3~4级构型界面控制的单砂体模型,在夹层表征的基础上将砂体连通性定量评价结果作为确定性数据,分区分类赋值砂体间传导率,指导油藏精细化数值模拟。结果表明:分类优选砂体连通性评价参数,应用支持向量机算法,在统计学理论和结构风险最小化原则基础上,能较好地解决小样本、非线性、高维数和局部极小点等实际问题,实现了快速定量评价砂体连通性,通过动静态资料相互验证,预测准确率达到88%;实现了夹层及传导率耦合的砂体连通性定量化模拟,数值模拟效果更能反映实际生产情况,为后期油田开发优化及调整提供新的技术支撑。

关键词:喇嘛甸油田;葡萄花油层;辫状河;砂体连通性;支持向量机;定量评价

中图分类号:TE 122.14 文献标志码:A

引用格式:何辉,刘畅,李顺明,等.基于支持向量机算法的辫状河储层砂体连通性定量评价[J].中国石油大学学报(自然科学版),2021,45(2):1-10.

HE Hui, LIU Chang, LI Shunming, et al. Quantitative evaluation of sand body connectivity in braided river reservoirs based on support vector machine algorithm[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(2):1-10.

Quantitative evaluation of sand body connectivity in braided river reservoirs based on support vector machine algorithm

HE Hui¹, LIU Chang¹, LI Shunming¹, XU Shouyu², CHEN Xiu², WANG Baining³

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;

2. School of Geosciences in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

3. School of Energy Resources in China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Taking the braided river reservoir of Putaohua oil layer in Lamadian Oilfield as an example, the data of outcrops, well logging and core data were analyzed comprehensively. Based on the detailed characterization of reservoir architecture, this paper summarizes the sand body contact features of the braided river reservoir, and establishes the vertical, horizontal and internal sand body connecting models for the braided river reservoir. The support vector machine (SVM) algorithm can be applied to quantitatively evaluate and predict sand body connectivity. According to the object-based random modeling method, the reservoir architecture model based on the configuration interface was established. The evaluation results of sand body connectivity are used as deterministic data to guide and assign the sand body conductivity in the simulation model to obtain the quantitative characterization and simulation of the coupling between interlayer and conductivity. The results show that, based on the statistical theory and structural risk minimization principle, the optimized evaluation parameters of sand body connectivity can be used to quantitatively classify the connectivity by using the SVM method. The connectivity prediction accuracy can reach 88% through mutual verification of the dy-

收稿日期:2020-01-20

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05010-003);中国石油科技重大专项(2016B-1201)

第一作者:何辉(1982-),男,高级工程师,博士,研究方向为油气田开发地质。E-mail:hui_he@ petrochina. com. cn。

namic and static data. The method can well solve the small sample, nonlinear, high dimension and local minimum data point and so on practical problems, which also can realize the rapid quantitative evaluation sand body connectivity with interlayer. The numerical simulation results based on the sand body connectivity evaluation model can better reflect the oilfield production status, and provide a new technical support for the later oilfield development adjustment.

Keywords: Lamadian Oilfield; Putaohua oil layer; braided river; sand body connectivity; support vector machine; quantitative evaluation

前人将砂体连通性主要描述为最大连通地质体 体积与总体积之比^[14].又或将其定义为在不考虑断 层、裂缝、褶皱等构造变形或流体影响的情况下砂体 间的沉积连通性,亦或储层构型要素间连通性。目 前,国内外学者对储层砂体连通性的表征多数是通过 "旋回对比、分级控制、不同相带区别对待"的单油层 对比方法定性评价砂体连通程度,即砂体之间连通面 积占各砂体本身面积的百分数[5-11]。刘传奇等[3]以 测井信息为基础,提取并优化选择了9种有效地震属 性进行聚类分析,获得河道砂体连通性的认识。赵春 明等[4]充分利用岩心及密井网资料,详细解剖了渤海 地区新近系河流砂体的内部结构,建立了其连通模 式。周宗良等^[7]探讨了不同情况下多井对比与砂体 连通关系确定方法,建立了多期河流砂体叠置型、砂 体相变型、孤立水道下切砂体型3种定性的对比连通 模式。王海更等[9]通过对压力等生产动态资料及岩 性标定后的地震资料精细分析,对早期以地质及测井 资料确定的砂体连通性分析成果进一步完善和修正. 并引入注采连通率概念,用来定量表示井组范围内注 水井与生产井之间的砂体的连通性。张云峰等[10]系 统研究了三角洲平原亚相环境下的储层连通概率,提 出了砂体几何学特征、井网密度、物源方向及砂地比 是影响储层静态连通性的主控因素。面对现今大数 据运算的快速发展,如何运用高效的数学算法快速定 量评价储层砂体连通性,是新时期油田开发工作者针 对高含水老油田剩余油高效挖潜亟需突破的一项关 键技术。笔者以大庆喇嘛甸油田南中西二区葡萄花 PI 段辫状河储层砂体为例,在单砂体精细表征基础 上,建立砂体连通模式,优选连通性评价指标,应用支 持向量机方法(support vector machine, SVM)定量评 价砂体连通性。

1 研究区概况

喇嘛甸油田位于松辽盆地北部,受控于北部沉 积物源,油田自下而上主要发育萨尔图、葡萄花和高 台子3套主力含油层系(图1和2)。其中葡萄花 PI 组沉积时期为最大水退期,以砂质辫状河-曲流河



图 1 大庆喇嘛甸油田地理位置

Fig. 1 Location of Lamadian Oilfield





沉积为主体^[12-14],分布范围广。研究区南中西二区 位于喇嘛甸构造的南端,面积为11.3 km²,PI组纵 向细分7个层,其中PI2油层主要发育辫状河沉积, 微相类型为辫状河道及心滩,沉积厚度大,砂地比为 0.4~0.9,平均为0.7,岩性以中厚—厚层的含砾 中—细砂岩及粉砂岩为主,中—细砂岩含油级别为 饱含油及含油,粉砂岩次之,以油浸、油斑为主。孔 隙度为13.3%~36.5%,平均为28.7%,空气渗透率 为 0.017~6.77 µm²,平均为 0.83 µm²,属于中高 孔—中高渗储层。喇嘛甸油田是一个带气顶的受背 斜构造控制的边水油藏,开发至今,油田综合含水率 已达到 95%,采收率约达 32%。基于砂体结构精细 解剖,定量化表征储层砂体连通性,为开发后期动态 分析及数值模拟提供依据,并有效提高采收率,依然 是老油田今后开发的核心任务。

2 辫状河储层砂体结构表征

2.1 砂体构型样式

根据 Miall 提出的河流相储层砂体建筑结构分析 法,可对不同级次界面控制的单元进行逐级识别与表 征。辫状河野外露头分析表明辫流带隔夹层(5 级界 面)主要为泛滥平原沉积,以泥岩、粉砂质泥岩为主, 受沉积作用控制,往往顺古水流方向连续性好,切古 水流方向连续性差,辫状河道与心滩砂体侧向切叠形 成空间上广泛展布的"泛连通体"。例如,山西大同 云岗组野外露头剖面上厚层稳定沉积的泥岩条带(5 级界面)是辫流河道带垂向分隔重要标志,其内部泥 岩夹层(4级界面)可以直观地反映辫流带内不同期 次的河道与心滩的叠置情况(图3)^[15-18]。目前中国 东部大多数开发后期密井网区(包括喇嘛甸油田南中 西二区)的开发现状来看,仅认清大面积连片的辫流 带砂体分布已不能满足油田开发的需要,因此从表征 单砂体入手,逐步解剖砂体内部结构,实现从定性到 定量判断砂体连通性,对于完善油田注采系统和改善 油田开发效果具有很大的现实意义。





喇嘛甸油田葡萄花油层 PI2 时期为辫状河沉积 发育鼎盛期,综合岩心、测录并资料,研究区葡萄花 油层 PI2 小层可进一步识别出 3~5 级构型界面,分 别为辫流带 5 级构型界面、心滩/河道 4 级构型界面 和心滩内增生体 3 级构型界面(图 4)。其中 4 级构 型界面控制的辫状河道呈交织条带状展布,心滩以 纺锤状或土豆状镶嵌其中,形成了"宽坝窄河道"模 式(图 5(a)、(b)),从 PI2 小层内细分时间单元可 以看出,心滩坝砂体不断迁移,砂体平面及内部非均 质性明显。通过测井识别统计发现,研究区 139 口 井 PI2 小层发育的三类单砂体的比例分别为:心滩 占 74.8%,辫状河道占 22.3%,泛滥平原占 2.9%。

辫状河道岩性以含砾中—细砂岩为主,具不明 显正韵律特征,与单元上下界面呈突变接触关系,测 井曲线形态以较厚的似钟形及钟形为主要特征。辫 状河道单砂体规模参数统计表明:辫状河道宽度为 30~177 m,平均为 78 m,河道厚度主要分布范围为 2.1~4.6 m,平均为 3.2 m,在平面上呈交织条带状 分布。心滩岩性以细砂岩为主,主要表现复合韵律 特征,测井曲线形态以较厚的箱型为主要特征,心滩



Fig. 4 Lithological column of well L6-J2331

规模参数统计表明:长度为 246~997 m,平均为 578 m,宽度为 99~516 m,平均为 303 m;厚度为 2.3~

9.7 m,平均为5.5 m。



(a) PI2小层单砂体平面展布

(b) 心滩平面迁移模式(PI21-PI22-PI23)



Fig. 5 Sand body distribution map and plane migration model of PI2 formation in Putaohua oil layer

2.2 砂体连通性定义及其模式

PI2小层辫状河道、心滩等单砂体间接触关系受不同充填样式影响,可分为分隔型、对接型、切叠型及纵向叠加型4种接触模式。分隔型接触模式在研究区较为少见,仅占统计总数的7%。对接型模式占统计总数的15%,其主要特征为同期同相或同期异相单砂体向中间连接方向厚度逐渐变薄,有一定的高程差。切叠型接触关系在研究区内发育比例最高,占比可达45%,其特征表现为同期同相或同期异相单砂体向中间方向厚度变化不明显,但显示出两期河道砂体的叠加。叠加型接触关系主要受垂向上隔夹层发育控制,将同相异期或异相异期单砂体区分,并形成纵向叠加模式。根据露头总结砂体叠置模式,将连通性定义3类:不连通、连通性中等一差、连通性好,其中砂体接触面积比。为砂体接触范围面积与叠置砂体

总面积的比值,即 $v = \frac{C_{A+B}}{S_{A+B}}$, C为A与B砂体接触范围 面积,S为砂体叠置总面积(表1)。

3 砂体连通性定量评价

近年来多位学者利用地震正演及反演数据,结 合生产动态资料,实现了定性—半定量预测砂体连 通区域或可能连通区域^[19-21],但地震反演砂体精度 限制了储层砂体连通性定量评价。笔者在研究辫状 河砂体结构精细表征基础上,根据砂体接触模式,从 横向、纵向、单砂体内部3个角度对砂体连通性进行 分类描述,重点探索了连通性定量评价算法,通过对 比不同数学算法,优选应用支持向量机算法对砂体 连通程度进行定量评价。

3.1 支持向量机方法原理

支持向量机的实质是寻找一个最优分类超平 面,以最大化分类间隔产生良好的泛化能力,并利用 核函数建立较好的学习模型,其求解过程最终将转 化为二次规划问题的求解,因此它的解是唯一的,也 是全局最优的。国内已有许多学者尝试运用支持向 量机解决地质问题^[22-24]。于代国等^[22]将支持向量 机用于识别碎屑岩岩性,将识别结果与实际取芯对 比,符合率都在90%以上。石广仁^[23]基于常规测井 资料对裂缝的响应特征,将支持向量机应用于裂缝 预测,其识别结果与实际地质情况相符,能较好地反 映地下裂缝发育情况。朱怡翔等^[24]采用支持向量 机对牛东油田上石炭统的9种火山岩岩性进行识 别,获得很好的成功率。

表1 辫状河砂体连通模式





SVM 算法主要针对的是二类线性可分问题,实际工作中遇到的更多是非线性可分问题,此时可以通过一个非线性函数映射 $\boldsymbol{\Phi}: R^d \rightarrow H$ 将训练样本从输入空间 R 映射到高维的特征空间 H 中,再在高维特征空间 H 中构造超平面将两类点分开(图6),即引入核函数将其转化为某个高维空间的线性问题,即使用空间中的内积构造核函数 $K(x_i, x_j), K(x_i, x_j) = \boldsymbol{\Phi}(x_i) \cdot \boldsymbol{\Phi}(x_j)$ 。核函数可以通过原空间中的函数在高维空间上实现,不需要知道 $\boldsymbol{\Phi}$ 的具体形式。根据 Hilbert-Schmidt 原理,满足 Mercer 条件的

函数 **K**(x_i,x_j)都可以作为核函数。因此运用适当的 核函数,最优分类面就可以实现从非线性变换后的 线性分类,而不增加算法的计算复杂度。最优分类 面函数问题即为

$$f(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^{\mathrm{T}}\mathbf{x} + \mathbf{b} = \sum_{i=1}^{m} a_{i} y_{i} \boldsymbol{\Phi}(x_{i})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Phi}(\mathbf{x}) + \mathbf{b} =$$
$$\sum_{i=1}^{m} a_{i} y_{i} \mathbf{K}(x_{i}, x_{j}) + \mathbf{b}.$$
(1)

式中,w为权重向量,最优权值w = $\sum_{i=1}^{m} a_i y_i x_i$,决定了

最优分类面的方向; $a_i \ge 0, i = 1, 2, \dots; m$ 为训练样 本个数; $x_i \in R^d$ 为训练样本; y_i 为输入样本的类标记 (期望输出类别);x 为输入向量,即 $\Phi(x)$;b 为位移 量,决定了最优分类面与原点的距离。



图 6 非线性映射示意图 Fig. 6 Nonlinear map of SVM

目前常用的核函数主要有线性核函数、多项式 核函数、径向基核函数等,确定了核函数 **K**(x_i,x_j)也 就决定了特征空间的结构。一般地,由于径向基核 函数是个可适用于任意分布样本的普适函数,且仅 有一个参数 σ,就能较好地反映模型选择的复杂度。 本次研究最终优选高斯径向基函数作为核函数,其 表达式为

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(\frac{-\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right).$$
 (2)

其中 *σ*>0 为高斯核的宽度,它的取值对学习机器的 性能起决定作用。

核函数确定后,还需优选出能使模型获得最佳 性能的核参数 σ 和惩罚因子 C,其中 C>0 为惩罚参 数,C值大时对误分类的惩罚增大,C值小时对误分 类的惩罚减小。本次研究采用网格搜索与交叉验证 相结合的方法进行参数寻优。交叉验证的基本思想 是:将训练样本随机地分成 k 个大小相同的子集,利 用 k-1 个训练子集,对给定的一组 C 和 σ 建立模 型,并对剩下的一个子集进行预测;以上过程重复 k 次,根据 k 次迭代后得到的均方差平均值来估计期 望泛化误差,最终选择一组最优参数。网格搜索是 一种能够同时从不同的增长方向并行搜索多维数组 的数据搜索方法,在选定区间内让 C 和 σ 呈指数增 长,比较选取不同参数数值时的交叉验证精度,选取 一组精度最高的参数;然后再以该数值为中心缩小 搜索范围,并逐步缩短步长重复搜索,直至交叉验证 精度变化不大时为止,最后所得结果即为最优参数。

3.2 砂体连通性评价参数优选

目前国内外学者多认为砂体连通性可能受到井 距、砂地比、砂体宽度、宽厚比、渗透率、孔隙度、夹层 频率、夹层密度、隔夹层厚度、隔夹层渗透率等参数 的影响。以上参数均可从岩心、钻井、测井等静态地 质资料中获得,故将其作为支持向量机模型的输入 向量,并通过研究区 20 个砂体连通有效样本的反复 实验判断不同参数组合的连通判别准确率(表 2)。 从评估结果来看,砂地比、夹层密度、隔夹层厚度、渗 透率 4 个参数对判断连通性的准确率综合效果相对 较高,特征参数选取较多反而影响了评价准确率。

表 2 特征参数 SVM 评估 Table 2 SVM evaluation of parameters

训练检验特征子集	横向连通准确率/%	纵向连通准确率/%	内部连通准确率/%
砂地比、砂体接触面积比、渗透率	80. 3	82.19	83.5
砂地比、渗透率、孔隙度	80.1	83.2	85.2
砂地比、砂体接触面积比、夹层密度、渗透率、孔隙度	84. 5	85.4	86.1
砂地比、夹层密度、隔夹层厚度、渗透率	86.2	90.4	89.2
砂地比、砂体接触面积比、夹层密度、隔夹层厚度、渗透率、孔隙度	86.8	90.6	89.0
砂地比、砂体接触面积比、夹层密度、隔夹层厚度、夹层频率、渗透 率、孔隙度	85.8	89.4	89.5

针对各类连通情况,综合特征参数评估结果,可 分别选取以下评价参数作为输入向量,对每一特征 参数进行权重运算对比:

横向 $X_1 = \{$ 砂地比,砂体接触面积比,夹层密度,渗透率,孔隙度 $\};$

纵向 $X_2 = \{$ 隔夹层厚度,渗透率,孔隙度,夹层 密度 $\};$

内部 X_3 = {砂地比,夹层密度,夹层厚度,渗透率,孔隙度}。

为避免各参数量纲差异导致核函数内积计算困

难,对预测结果造成负面影响,样本数据需进行归一 化处理,

$$x = \frac{x^* - x^*_{\min}}{x^*_{\max} - x^*_{\min}}.$$
 (3)

运用归一化公式(3),将样本的特征值映射到 [0,1]区间,从而减小 SVM 模型的计算量,提高预 测精度。以砂体横向连通性评价为例,选取径向核 函数,利用5折交叉验证法对参数进行寻优,训练结 果为 $f(x) = w^{T}x+b$,其中 $w^{T} = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5)$, 其绝对值大小分别代表砂地比、夹层密度、渗透率、 孔隙度和砂体接触面积比在砂体横向连通性中的影 响权重。以同样方法求得砂体纵向、内部连通性评 价参数的权值,如表3所示。

由表3可知,基于权向量确定特征变量权重,对 砂体横向连通程度影响最大的参数是夹层密度,其次 为砂地比,砂体接触面积比(v)影响权重相对较小,与 该参数统计数据量相对较少及取值方式有关,且参考 SVM 不同特征参数评估连通性结果,增加砂体接触 面积比 v,横向连通性评判率增加了 0.6%,鉴于特征 参数综合运算时效性,本次研究仅将砂体接触面积比 作为备用运算参数;而砂体纵向连通性主要取决于其 层间隔夹层的厚度及其渗透率,夹层密度与孔隙度为 次要因素;砂体内部连通程度的高低则主要受夹层密 度和物性因素控制,砂地比影响相对不显著。

表 3 砂体连通性评价参数权重 Table 3 Weight analysis of sand body connectivity evaluation parameters

横向评价参数权重				纵向评价参数权重				内部评价参数权重					
夹层 密度	砂地比	渗透 率	孔隙度	砂体接触 面积比	隔夹层 厚度	渗透 率	孔隙度	夹层 密度	渗透 率	孔隙度	砂地比	夹层 密度	夹层 厚度
0.3552	0.2617	0.1625	0.1123	0.1083	0.5138	0.2716	0. 101 1	0.1135	0.3004	0.1518	0.1322	0.2598	0.1558

本次研究重点选用影响权重较大的参数统一作 为横向、纵向及内部连通评价输入向量,即输入向量 *X*={砂地比,隔夹层厚度,夹层密度,渗透率},并将 砂体连通程度划分为3个等级作为输出类别,即输 出向量*Y*={0,1,2};其中0代表不连通,1代表连通 性好,2代表连通性较差。本次研究还利用开发动 态资料对井间砂体连通性分析的补充与验证,例如 油井产液量或含水率变化、压力测试、产吸剖面测试等资料作为砂体连通性判断结果的佐证。

研究区统计共得到 A 类和 B 类各 47 个样本,通 过产液量、产吸剖面资料证实其中 0 类 11 个,1 类 32 个,2 类 4 个;随机选取其中 9 个 0 类、20 个 1 类、2 个 2 类共 31 个样本作为训练样本集,其余则作为检验样 本集(表 4)。

表 4 井间砂体连通性评价样本集 Table 4 Sand body connectivity evaluation sample

				·	·		•		
评价样本	砂封	也比	隔夹层	厚度/m	夹层	密度	渗透率	≊∕µm ²	动态验证
编号	A 类	B 类	A 类	B 类	A 类	B 类	A 类	B 类	
1	0.85	0.70	1.1	2	0.15	0.17	0.07	0.48	0
2	0.72	0.77	1.5	2.2	0.19	0.08	0.08	0.30	1
3	0.13	0.09	1.2	1.3	0.49	0.49	0.05	0.12	0
4	0.24	0.44	1.1	0.8	0.33	0.31	0.30	0.18	2
5	0.29	0.95	2.5	1.6	0.32	0.06	0.04	0.30	0
6	0.70	0.84	3.1	2.2	0.25	0.12	0.15	0.17	0
7	0.35	0.41	2.1	1.1	0.24	0.27	0.10	0.06	2
8	0.61	0.83	2.6	1.7	0.38	0.22	0.13	0.45	0
9	0.76	0.88	1.1	1.3	0.17	0.45	0.14	0.19	0
		•••							
39	0.96	0.76	1.3	1.1	0.11	0.09	0.55	0.60	1
40	0.83	0.80	0.9	1.5	0.11	0.24	0.36	0.31	1
41	0.94	0.65	0.8	1.3	0.05	0.29	0.32	0.17	1
42	0.89	0.94	0.5	0.3	0.09	0.25	1.00	0.42	1
43	0.89	0.91	0.6	0.6	0.19	0.18	0.24	0.18	1
44	0.78	0.97	1.2	0.8	0.21	0.08	0.59	0.50	1
45	0.78	0.91	1.1	0.7	0.21	0.18	0.59	0.18	1
46	0.59	0.97	1.6	0.9	0.22	0.08	0.14	0.50	1
47	0.71	0.82	18	18	0.21	0 19	0.36	0.28	1

运用 31 个样本训练 SVM 模型,训练精度为 87.1%;运用网格搜索与交叉验证法确定最优参数为 C=1.41,g=1(C为惩罚因子; $g=\frac{1}{2\sigma^2}$),交叉验证精度 90.32%(图7);再对 16 个测试样本进行连通程度识 别,错判数为2,预测准确率为88%,证明所建 SVM 模 型性能良好,具有一定的泛化能力(表5,图8)。 从实验结果来看,基于 SVM 的砂体连通性评价 模型具有较好的学习能力,训练精度和预测精度均可 达到 85%以上。结果表明:一方面,本研究通过反复 实验优选出的评价参数较为客观有效,可作为河道砂 体间横向、纵向以及砂体内部连通性的主要影响因 素,且运用 SVM 定量输出连通评价结果,可作为油藏 数模可靠依据;另一方面,SVM 算法在处理非线性关

• 7 •

系强的问题时,展示了其在处理不确定性、随机性数

据方面的优良性能,具有较高的实用性。

表 5 检验样本 SVM 识别结果

Table 5 SVM evaluation results of sand body connectivity sar
--

检验样 本编号	砂地比		隔夹层厚度/m		夹层	密度	渗透率	≰∕µm ²	SVM 预测	实际
	A 类	B 类	A 类	B 类	A 类	B 类	A 类	B 类	结果	连通性
1	0.35	0.41	2.1	1.1	0.24	0.27	0.10	0.06	0	2
2	0.61	0.83	2.6	1.7	0.38	0.22	0.13	0.45	0	0
3	0.85	0.50	2.5	1.3	0.15	0.35	0.07	0.48	0	2
4	0.72	0.77	1.5	2.2	0.19	0.08	0.08	0.30	1	1
5	0.69	0.88	1.2	0.9	0.12	0.45	0.70	0.19	1	1
6	0.91	0.78	0.6	1.1	0.25	0.13	0.44	0.65	1	1
7	0.81	0.89	1.1	1.3	0.08	0.10	0.25	0.65	1	1
8	0.96	0.76	0.5	1.1	0.11	0.09	0.55	0.60	1	1
9	0.83	0.80	0.9	1.5	0.11	0.24	0.36	0.31	1	1
16	0.71	0.82	1.8	1.8	0.21	0.19	0.36	0.28	1	1



图 7 SVM 模型参数寻优结果等值线图





3.3 应用效果分析

采用基于目标的地质建模方法,建立基于 3~4 级构型界面控制的单砂体模型,在夹层表征的基础 上,将砂体样本编号及砂体连通性定量评价结果作 为确定性数据,在油藏数值模拟阶段,再次赋值确定 各样本砂体间传导率,实现夹层及传导率耦合的砂 体连通性定量化表征(图9(a)、(b)),进一步提高 了油藏数值模拟过程中砂体连通性控制的压力传导 及流体流动的可靠性,实际生产动态分析验证,拟合 产量及综合含水效果更好(图10),并组剩余油表征 结果精度更高,定量表征砂体连通性是对油藏流体 动态分布认识及定量预测的关键。



近年来,随着深度学习及人工智能在各个领域的 快速应用与发展,砂体连通性定量评价方法及连通性 定量表征将是油田开发地质领域又一制高点,也将是 新时期油田开发地质工作者创新研究的重中之重。





4 结 论

(1)针对辫状河储层砂体连通性研究,充分利 用野外露头、测井、岩心等资料,在砂体结构精细表 征基础上,总结砂体接触模式,提出从横向、纵向、内 部三个角度对砂体连通性进行分类描述,优选支持 向量机方法,明确砂体横向、纵向及内部连通性不同 表征参数及其权重,结合生产动态资料,定量预测砂 体连通性,预测精度可以超过 87%。

(2)采用基于目标的地质建模方法,建立基于 3~4级构型界面控制的单砂体模型,在夹层定量化 表征的基础上,将砂体样本编号及砂体连通性定量 评价结果作为确定性数据,在油藏数值模拟阶段,进 一步提高了油藏数值模拟过程中砂体连通性控制的 压力传导及流体流动的可靠性。

(3)支持向量机算法建立在统计学理论和结构 风险最小化原则基础上,能较好地解决小样本、非线 性、高维数和局部极小点等实际问题。它的解是唯 一的,也是全局最优的,该方法目前已成功应用于分 类、函数逼近和时间序列预测等领域。基于支持向 量机方法定量评价储层砂体连通性,将会为石油人 工智能发展提供一定的借鉴。

参考文献:

- [1] KING P R. The connectivity and conductivity of overlapping sand bodies [J]. North Sea Oil and Gas Reservoirs II, 1990,8:353-358.
- [2] 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.
 HU Zongquan. Application of sand connectivity evaluation in prediction of subtle traps
 [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003,24(2):167-170.
- [3] 刘传奇,吕丁友,侯东梅. 渤海 A 油田砂体连通性研究 [J]. 石油物探,2008,47(3):251-255.

LIU Chuanqi, LÜ Dingyou, HOU Dongmei. Study of connectivity of sand bodies in oilfield A, Bohai area [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008, 47 (3): 251-255.

- [4] 赵春明,胡景双,霍春亮,等.曲流河与辫状河沉积砂体连通模式及开发特征:以渤海地区秦皇岛 32-6 油田为例[J].油气地质与采收率,2009,16(6):88-91.
 ZHAO Chunming, HU Jingshuang, HUO Chunliang, et al. Sandbody interconnectivity architecture and development characteristics of meandering river and braided river deposits: a case study of Qinhuangdao 32-6 Oilfield, Bohai area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009,16(6):88-91.
- [5] 赵辉,李阳,高达,等. 基于系统分析方法的油藏井间 动态连通性研究[J].石油学报,2010,31(4):633-636.
 ZHAO Hui, LI Yang, GAO Da, et al. Research on reservoir interwell dynamic connectivity using systematic analysis method [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010,31(4): 633-636.
- [6] PRANTER M J, SOMMERN K. Static connectivity of fluvial sandstones in a lower coastal-plain setting: an example from the upper Cretaceous lower Williams Fork Formation, Piceance Basin, Colorado [J]. AAPG Bulletin, 2011,95(6):899-923.
- [7] 周宗良,曹建林,肖建玲,等.油气藏开发过程中井间
 砂体对比与连通关系类型探讨[J].新疆地质,2012, 30(4):451-454.

ZHOU Zongliang, CAO Jianlin, XIAO Jianling, et al. The correlation & the connectivity types of sandbody in the process of oilfield geological study [J]. Xinjiang Geology, 2012,30(4):451-454.

- [8] 李少华,李强,李君.影响砂体连通体积因素的定量评价[J].天然气地球科学,2014,25(5):643-648.
 LI Shaohua, LI Qiang, LI Jun. Quantitative evaluation of the factors controlling the sand body connected volumes
 [J]. Natural Gas Geoscience, 2014,25(5):643-648.
- [9] 王海更,汪利兵,刘洪杰,等.利用生产动态及地震资 料分析井间河流相砂体连通性[J].海洋石油,2014, 34(3):66-71.

WANG Haigeng, WANG Libing, LIU Hongjie, et al. Analysis of fluvial sand connectivity with production and seismic data [J]. Offshore Oil, 2014,34(3):66-71.

[10] 张云峰,刘宗堡,赵容生,等. 三角洲平原亚相储层砂体静态连通性定量表征:以松辽盆地肇州油田扶余油层为例[J].中国矿业大学学报,2017,46(6): 1314-1322.

ZHANG Yunfeng, LIU Zongbao, ZHAO Rongsheng, et al. Quantitative characterization of delta plain sufacies reservoir sandbody static connectivity: taking Fuyu oil layer of Zhaozhou oil field in Songliao basin as an example[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017,46(6):1314-1322.

[11] 卜范青,张宇焜,杨宝泉,等. 深水复合浊积水道砂体 连通性精细表征技术及应用[J]. 断块油气田,2015, 22(3):309-313.

BU Fanqing, ZHANG Yukun, YANG Baoquan, et al. Technique and application of fine connectivity characterization of composite deep water turbidite channels [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015,22(3):309-313.

[12] 刘波,赵翰卿,李广月,等.储层砂质辫状河的识别:
 以大庆喇嘛甸-萨尔图油田西部 PI₂₃ 为例[J].石油
 学报,2002,23(2):43-47.

LIU Bo, ZHAO Hanqing, LI Guangyue, et al. Sand body identification of braided river reservoir: an example from the PI_{23} west of Lamadian-Saertu Oilfield, Daqing, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002,23(2):43-47.

[13] 刘钰铭,侯加根,王连敏,等. 辫状河储层构型分析
 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2009,33
 (1):7-11.

LIU Yuming, HOU Jiagen, WANG Lianmin, et al. Architecture analysis of braided river reservoir [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,33(1):7-11.

[14] 刘钰铭,侯加根,宋保全,等. 辫状河厚砂层内部夹层 表征:以大庆喇嘛甸油田为例[J]. 石油学报,2011, 32(5):836-840.

> LIU Yuming, HOU Jiagen, SONG Baoquan, et al. Characterization of interlayers within braided-river thick sandstones: a case study on the Lamadian Oilfield in Daqing [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32 (5): 836-840.

 [15] 金振奎,杨有星,尚建林,等. 辫状河砂体构型及定量 参数研究:以阜康、柳林和延安地区辫状河露头为例
 [J]. 天然气地球科学, 2014,25(3):311-316.

JIN Zhenkui, YANG Youxing, SHANG Jianlin, et al. Sandbody architecture and quantitative parameters of single channel sandbodies of braided river: case from outcrops of braided River in Fukang, Liulin and Yanan Areas [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25 (3): 311-316.

[16] 朱卫红,吴胜和,尹志军,等. 辫状河三角洲露头构型:以塔里木盆地库车坳陷三叠系黄山街组为例
 [J]. 石油勘探与开发,2016,43(3):482-489.

ZHU Weihong, WU Shenghe, YIN Zhijun, et al. Braided river delta outcrop architecture: a case study of Triassic Huangshanjie Formation in Kuche depression, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3):482-489.

[17] 吴胜和,翟瑞,李字鹏. 地下储层构型表征:现状与展望[J]. 地学前缘,2012,19(2):15-23.
 WU Shenghe, ZHAI Rui, LI Yupeng. Subsurface reser-

voir architecture characterization: current status and prospects[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 15-23.

 [18] 张宪国,张育衡,张涛,等. 基于沉积数值模拟的辫状 河心滩演化[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),
 2020,44(2):1-9.
 ZHANG Xianguo, ZHANG Yuheng, ZHANG Tao, et al. Analysis of braided bar evolution based on numerical

simulation of deposition process [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020,44(2):1-9.

- [19] 路研,徐守余,刘可禹,等. 陆相滑塌浊积扇储层流动 单元定量表征[J]. 中国石油大学学报(自然科学 版),2019,43(6):1-10.
 LU Yan, XU Shouyu, LIU Keyu, et al. Quantitativecharacterization of reservoir flow units of basin floor-fanturbidite[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2019,43(6):1-10.
- [20] 张磊夫,王红亮,李英烈,等. 砂体融合的定量表征及 其对储集层连通性的控制[J]. 石油勘探与开发, 2017,44(2):205-212.
 ZHANG Leifu, WANG Hongliang, LI Yinglie, et al. Quantitative characterization of sandstone amalgamation and its impact on reservoir connectivity[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(2):205-212.
- [21] 谷建伟,任燕龙,王依科,等. 基于机器学习的平面剩 余油分布预测方法 [J]. 中国石油大学学报(自然科 学版),2020,44(4):39-46.
 GU Jianwei, REN Yanlong, WANG Yike, et al. Prediction methods of remaining oil plane distribution based on machine learning[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2020,44(4): 39-46.
- [22] 于代国,孙建孟,王焕增,等.测井识别岩性新方法: 支持向量机方法[J].大庆石油地质与开发,2005,24 (5):93-95.

YU Daiguo, SUN Jianmeng, WANG Huanzeng, et al. A new method for logging lithology identification: SVM [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(5):93-95.

- [23] 石广仁. 支持向量机在多地质因素分析中的应用
 [J]. 石油学报,2008,29(2):195-198.
 SHI Guangren. Application of support vector machine to multi-geological-factors analysis[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008,29(2):195-198.
- [24] 朱怡翔,石广仁.火山岩岩性的支持向量机识别[J]. 石油学报,2013,34(2):312-321.
 ZHU Yixiang, SHI Guangren. Identification of lithologic characteristics of volcanic rocks by support vector machine [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34 (2): 312-321.

(编辑 修荣荣)