



DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2022.03.08.01

文章编号: 1674-5086(2025)03-0037-11

中图分类号: TE122

文献标志码: A

径向基多属性融合在滩坝砂体刻画中的应用

李斌^{1,2}, 梁宇^{1*}, 赵虎^{1,2}, 杨宏伟³, 魏国华³

1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500

2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室·西南石油大学, 四川 成都 610500

3. 中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营 257001

摘要: 针对局限湖盆滨浅湖滩坝相砂体薄、相变快、储层非均质性强, 现有地震分辨率难以有效刻画的问题, 以大芦湖油田博兴洼陷沙四上亚段为例, 在区域等时界面 T_7 约束下利用年代地层切片提取了地震振幅属性, 明确了滩坝相在地震振幅属性上的响应特征, 采用地震沉积学技术探索滩坝微相的刻画。沙四上亚段滩坝相发育 5 种地震反射特征, 采用聚类分析方法识别了滩坝微相的分布范围, 探索径向基多属性融合方法进行砂体厚度预测。结果表明, 在原始地震属性中产生干扰的西北部砂体不发育, 以半深湖相泥岩为主, 研究结果与真实地质认识吻合程度高, 消除了单个地震属性具多解性的问题。研究综合上述成果精细刻画了研究区滩坝微相的分布, 显示出研究区内坝砂微相发育且分布范围较广, 呈现多列砂坝面向半深湖区平行排列的特征, 油气显示较好, 是下一步非常规油气勘探开发的有利目标区。

关键词: 地震沉积学; 滩坝砂体; 聚类分析; 多属性融合; 砂体展布

Application of Radial Basis Function Multi-attribute Fusion Technology in the Study of Beach-bar Sand Body Distribution Law

LI Bin^{1,2}, LIANG Yu^{1*}, ZHAO Hu^{1,2}, YANG Hongwei³, WEI Guohua³

1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploration, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

3. Geophysical Exploration Research Institute, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying, Shandong 257001, China

Abstract: Aiming at the difficulty in effective description with the existing seismic resolution due to thin microfacies sand body of the fast changing facies and reservoir heterogeneity, we take the upper Es_4 sub-member of the Boxing Sag of the Daluhu Oilfield as an example, and use the regional isochronous interface T_7 under constraints, chronostratigraphic slices to extract typical seismic amplitude attributes, and clarify the response characteristics of beach-bar facies on seismic amplitude attributes. Seismic sedimentology is used to explore the characterization of beach-bar microfacies. The study identifies five seismic reflection characteristics of beach-bar facies in the upper part of the fourth member of Shahejie Formation. The cluster analysis method is used to identify the distribution range of beach-bar facies, and to describe the distribution form of beach-bar microfacies based on colored inversion technology, and explored to use of the radial basis multi-attribute fusion method in thickness sand body prediction. The results show that the sand body in the northwest that interferes with the original seismic attributes is not developed, and is dominated by semi-deep lacustrine mudstone. This prediction result is in good agreement with the actual geological understanding, eliminating the ambiguity of a single seismic attribute. Based on the above results, the study has finely described the distribution of beach-bar microfacies in the study area, showing that the bar sand microfacies in the study area is well-developed and distributed in a wide range, and shows the characteristics of multiple parallel rows of sand bars facing the semi-deep lake area. It is a favorable target area with good potential for unconventional oil and gas exploration and development in the next step.

Keywords: seismic sedimentology; beach bar sand body; cluster analysis; multi-attribute fusion; sand body spread

网络出版地址: <http://link.cnki.net/urlid/51.1718.TE.20250613.1004.002>

李斌, 梁宇, 赵虎, 等. 径向基多属性融合在滩坝砂体刻画中的应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2025, 47(3): 37-47.

LI Bin, LIANG Yu, ZHAO Hu, et al. Application of Radial Basis Function Multi-attribute Fusion Technology in the Study of Beach-bar Sand Body Distribution Law[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2025, 47(3): 37-47.

* 收稿日期: 2022-03-08 网络出版时间: 2025-06-13

通信作者: 梁宇, E-mail: 731997015@qq.com

引言

滩坝相砂体是中国陆相盆地中非常普遍的一种储层类型,由于其发育规模小、沉积厚度薄、非均质性强,一直是国内外油气勘探和学者关注的重要目标^[1-2]。以往的地震沉积学研究中多依赖于地质模型约束,并结合地震岩石学、层序地层学和地震地貌学理论进行描述,但对滩坝相砂体的刻画精度不足。伴随地震沉积学理论及相关技术方法的出现为隐蔽油气藏,尤其是薄层滩坝相砂体的研究提供了新的思路^[3]。地震沉积学是在等时地层格架约束下,进行层面属性优选、地层切片处理,在此基础上进行属性融合,开展砂体预测和沉积微相刻画^[4]。

国内外学者对储层预测的研究起源于 20 世纪,1984 年,Onstott^[5]首次使用了多属性显示,得到 AVO 的颜色叠加特性,AVO 理论方法是地震储层预测的基础。通过多次覆盖技术能有效提升地震资料信噪比,并基于地层速度参数实现岩性识别及砂泥岩含量估算,当前中国学者在该领域已取得突破性进展。1994 年,姚光庆等^[6]研究得到滩坝砂“夹心”层状模型的新认识;朱筱敏等^[7]则利用沉积相信息对滩坝砂开展研究;1995 年,王同和^[8]在研究中指出微生物在滩坝砂的沉积过程中显示出重要作用;2002 年,毛宁波^[9]指出超声波会影响滩坝砂波速;2004 年,华学理^[10]首次在滩坝砂里发现化石;2006 年,刘书会^[11]采用超导相干对地震属性开展研究;2007 年,宋维琪等^[12]采用子波追踪方法对滩坝砂体开展研究;2008 年,冯磊等^[13]提出基于多参数地震属性的神经网络手段对

滩坝砂进行预测;2012 年,朱永才^[14]采用支持向量机法识别储层砂泥比和孔隙度参数;张瑞芳^[15]采用地震正演模拟和地震相分析来识别滩坝砂;2014 年,王开燕等^[16]利用径向基函数神经网络识别砂体厚度。基于径向基函数神经网络融合方式其效果更优,精度更高^[17],以此开展薄层砂体的沉积微相预测和刻画更为清晰直观,尤其在滨浅湖亚相下的砂坝微相、滩微相及半深湖亚相等沉积环境的研究中取得了明显进展,对油气勘探开发提供了重要技术支撑^[18]。

本文研究区大芦湖油田 F159—G89 区块沙四段上亚段($E_4s_4^u$)沉积连续,砂体分布广泛,发育多套含油层系,开发潜力较大,是油田潜在的致密油前景区^[19]。但存在砂体薄、相变快的特点,前人研究多以钻井地质分析为主,对砂体形态刻画较为困难^[20]。近年来,随着非常规油气勘探的不断突破和三维地震数据的广泛应用,为该区致密油气的深入研究提供了可能,本文提出多种地震属性约束下的多属性融合技术,对研究区沙四上亚段滩坝砂体微相形态进行刻画,在现有地震分辨率基础上探索滩坝砂体的地震沉积学研究思路和方法,以期为中国相关盆地滩坝砂体的研究提供借鉴。

1 研究区地质背景及地层特征

研究区大芦湖油田 F159—G89 区块位于山东省高青县,构造位置位于博兴洼陷金家—樊家鼻状构造带内,主要发育沙河街组,自下而上划分为沙四段、沙三段、沙二段和沙一段,研究区沙四段上亚段原始沉积体系分布如图 1 所示。

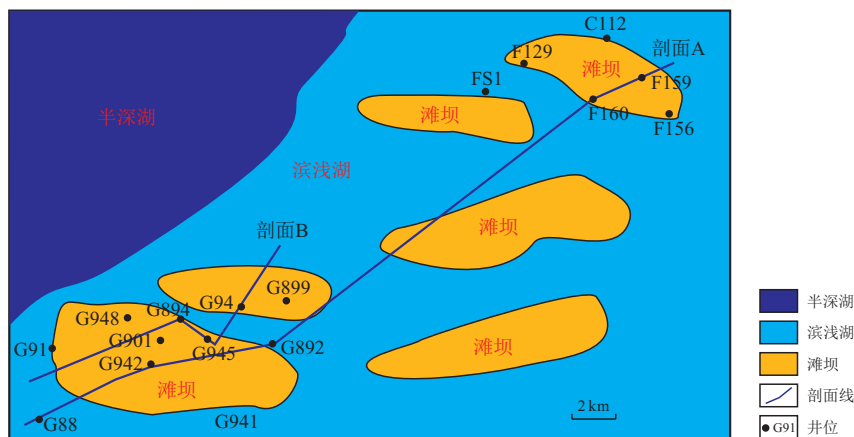


图 1 研究区沙四上亚段原始沉积体系分布图

Fig. 1 Distribution of the original sedimentary system of $E_4s_4^u$ in the study area

基于精确的地层划分结果, 解决深度域高频测井数据与时间域低频地震数据的跨域匹配的问题, 确定关键等时地层界面是准确追踪薄砂体的前提条件^[21-23]。研究区目的层段为滨浅湖亚相、沉积砂坝微相和滩微相, 岩性主要为灰色、浅灰色夹砂泥岩或砂泥岩互层, 因为湖平面和古地貌的共同制约, 横向相变快, 微相则表现为不连续、条带状, 且沿 NE—SW 向展布的特点。

沙四上亚段纵向上相变为三角洲前缘—滨浅湖环境, 沙三底部发育一套厚层砂岩, 横向沉积较

为稳定(图 2), 在地震剖面上呈现出高连续、强振幅的反射特征, 横向对比性强, 与上覆低阻泥岩之间存在稳定的地震反射界面 T_7 ^[24], 是研究区沙四上地层对比的重要等时界面(图 3)。

沙四上亚段的滩坝相砂体发育薄层或互层结构, 厚度为 10 m, 地震剖面上显示主频约为 25 Hz, 纵向分辨率为 20 m 以上, 且薄层滩坝相砂体的地震反射特征呈现出弱振幅、低连续性的弱反射特征, 在现有的地震分辨率条件下, 识别单砂体较为困难。

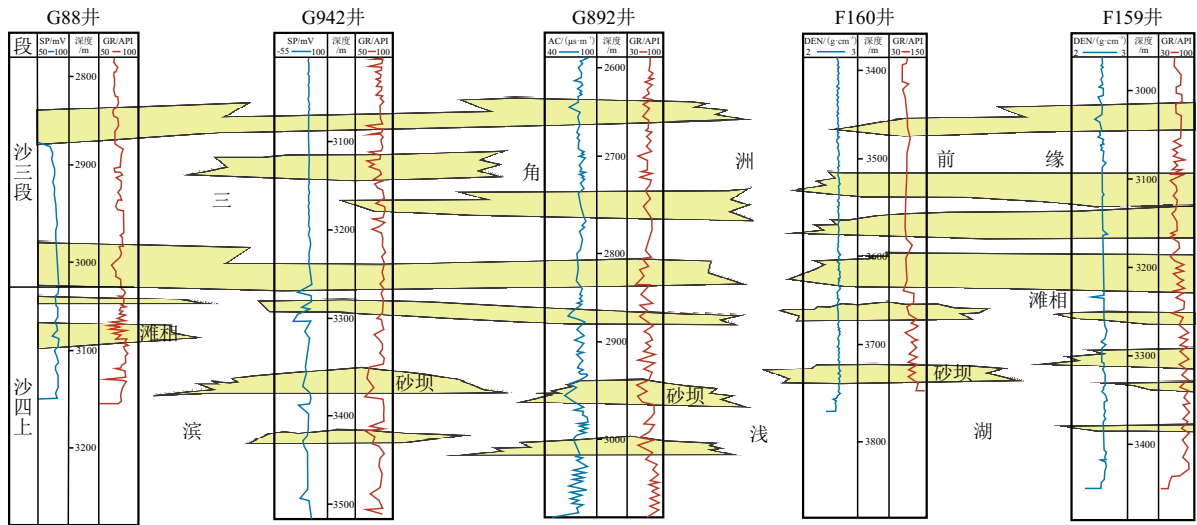


图 2 研究区过 G88—G942—G892—F160—F159 井沙四上亚段沉积相剖面图(剖面 A)
 Fig. 2 Sedimentary facies profile of E_s_4 in wells G88—G942—G892—F160—F159 in the study area (Section A)

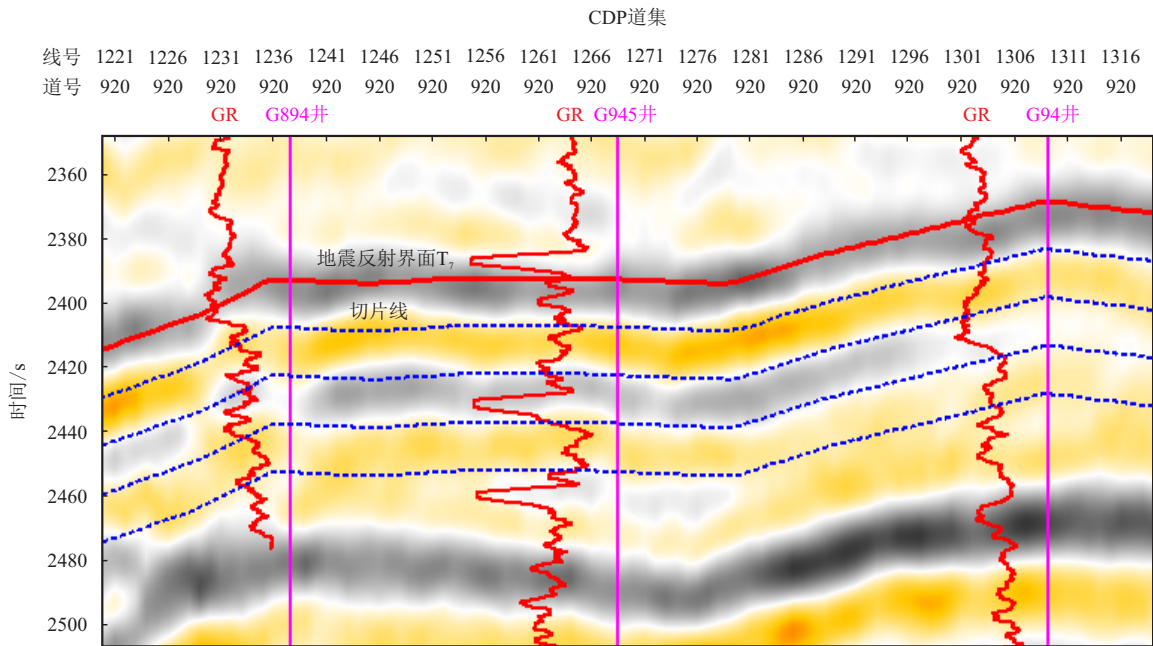


图 3 研究区过 G894—G945—G94 井沙四上亚段(T_7)连井地震剖面图(剖面 B)
 Fig. 3 Seismic section of connected wells in E_s_4 (T_7) in wells G894—G945—G94 in the study area (Section B)

2 年代地层切片

年代地层切片是获取等时地震反射信息的重要手段,通常参考等时界面选择合理时窗进行确定,时窗选定的方法有上平行、下平行和上下等间距分布^[25]。本次研究以沙四上亚段顶部(T_7)为等时界面,从 T_7 界面向下设置 50 ms 时窗,获取时窗内地震属性,然后开展地震属性的地质解释。对砂泥岩地震响应特征较为敏感的属性较多,常见有振幅类、层序类、频谱类和瞬时类属性^[26]。

振幅类提取了均方根振幅属性图,均方根振幅对高振幅敏感,常用来追踪地层地震异常,一般高振幅代表砂岩沉积区,低振幅代表泥岩沉积区^[27]。从沙四上亚段均方根振幅图 4a 来看,均方根振幅为 1 000~5 000,整体呈现中—高振幅反射特征,其中, F159 井区和 G89 井区滩坝相砂体呈现中振幅特征,中东部地区呈现中—高振幅特征,代表砂岩沉积区。而在研究区的西北部半深湖区呈现出了高振幅的异常特征,与实际地质泥岩沉积区特征不相符,表明均方根振幅对半深湖相反映不明显。

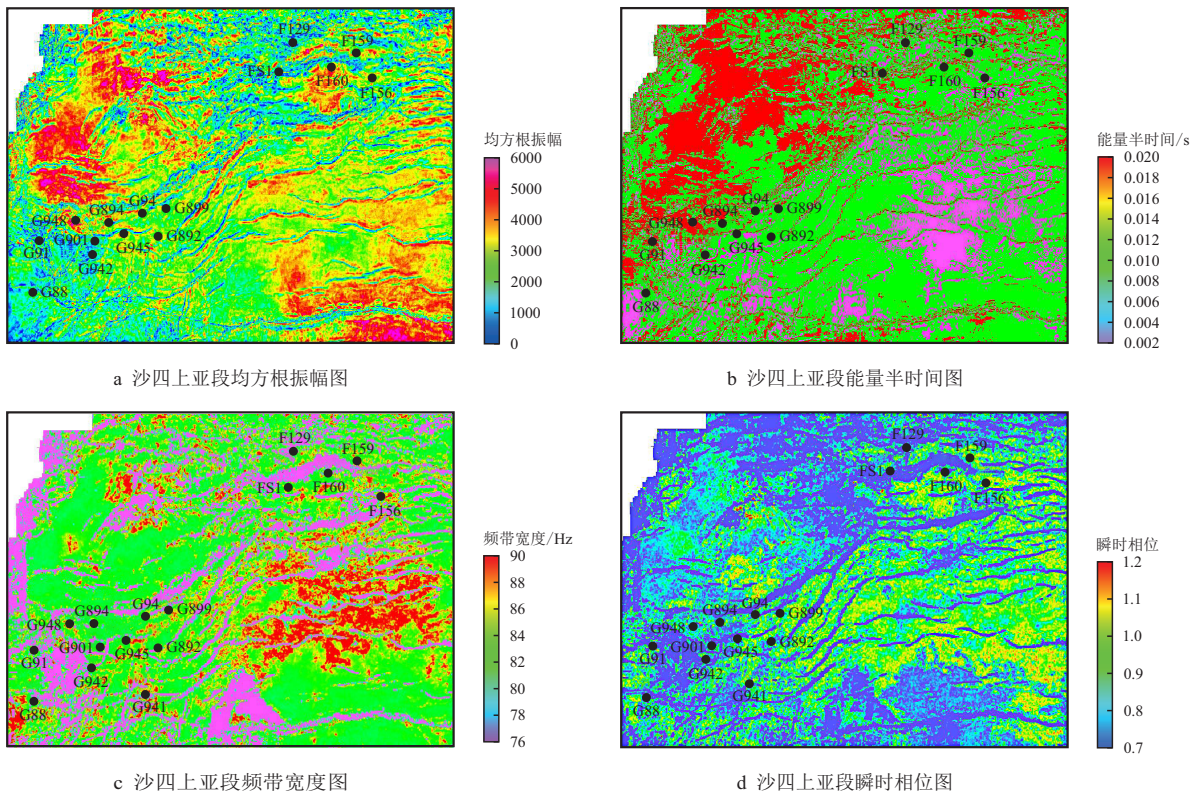


图 4 研究区过 T_7 层位下移 50 ms 时窗地震属性切片展示

Fig. 4 Slice display of seismic attributes in the time window when the T_7 horizon is moved down by 50 ms in the study area

层序类提取能量半时间属性图,能量半时间是有效识别薄层的常用属性^[28]。从沙四上亚段能量半时间(图 4b)来看,能量半时间为 0.002~0.020 s,整体呈现弱—中能量半时间反射特征,其中, F159 井区和 G89 井区滩坝相砂体呈现中能量半时间特征,研究区中东地区呈现低能量半时间特征,由此可以推测薄层的滩坝砂体的展布范围。

频谱类提取了频带宽度属性图,一般滩坝相沉积环境复杂,对应高带宽;低带宽指示较为稳定的沉积环境^[29]。从沙四上亚段频带宽度(图 4c)可以看出,频带宽度值在 76~90 Hz,整体呈现中—高带

宽反射特征,其中, F159 井区和 G89 井区滩坝相砂体呈现中带宽特征,中东部地区呈现高带宽特征,反映出滩坝相发育。在研究区的西北部半深湖区沉积环境稳定,对应的带宽值应为低,但在该区却表现为高值,表明频带宽度可以很好识别滩坝相沉积,但无法将其与半深湖环境区分开来。

瞬时类提取了瞬时相位属性图,瞬时相位可以有效识别层序边界,也可以根据相位特征划分地震相^[30]。从沙四上亚段瞬时相位(图 4d)来看,相位在 0.7~1.2,整体呈低—中相位反射特征,其中, F159 井区和 G89 井区滩坝相砂体呈中相位特征,

中东部地区滩坝相砂体呈现中相位特征, 可以较好地识别出滩坝相的边界, 而在研究区的西北部半深湖区也呈现中相位的特征, 无法与滩坝相区分开, 说明瞬时相位对半深湖相层序边界反映效果不明显。

综上所述, 从提取的 4 大类地震属性图分析得出, 单一地震属性只能刻画储层某一方面的特征, 不能从总体上反映储层特征, 它所包含的信息量少, 解释结果存在多解性, 需要将多种地震属性融合进行分析^[31]。

3 地震相分析

地震相分析是地震地质研究的主要方法, 常规的地震相分析主要基于地震沉积学原理, 利用地层切片技术在目标层位提取地震属性, 如均方根振幅属性, 但在地震信噪比较低, 层厚较薄时, 所提取地震属性存在多解性, 容易影响地震相分析的精度和



















可靠性^[32-34]。与传统的地层切片地震相分析方法相比较, 基于波形聚类的分析方法, 综合考虑了地震信号的振幅、相位和频率属性特征, 具有更好的抗噪能力和更高的横向分辨率^[35]。

波形聚类也是对向量聚类, 它是将相似度较高的波形分为同一类, 相似度较低的波形分为不同类, 建立有效的地震地质响应关系是地震相划分的关键^[36]。

研究区沙四上亚段典型单井沉积相、测井相及地震相解释结果见表 1, 井震对比可以看出, 研究区滨浅湖共发育 5 种地震反射特征, 其中, 滩坝相具有 4 种反射特征, 整体呈现出中振幅、中连续地震反射特征, 表 1 波形特征一列中, 红褐色为中—强振幅、高连续的地震相特征, 橙色为中振幅、中连续的地震相特征, 绿色为中振幅、低连续的地震相特征, 蓝色为弱振幅、中连续的地震相特征; 深湖—半深湖相具有一种反射特征, 地震反射特征呈现弱振幅、低连续, 波形特征为紫色。

表 1 研究区沙四上亚段典型井单井沉积相、测井相及地震相解释

Tab. 1 Interpretation of single well sedimentary facies, logging facies and seismic facies of typical wells of Es₄ in the study area

沉积亚相	沉积微相	自然电位	测井相特征	地震剖面	地震反射特征	波形特征	参考井
滩坝相	砂坝		箱形		中—强振幅, 高连续		F156 井、F159 井
			漏斗形		中振幅, 中连续		G892 井、G945 井
	滩相		舌形		中振幅, 低连续		F129 井、F160 井
			锯齿形		弱振幅, 中连续		G899 井、G94 井
深湖—半深湖相	半深湖相		微齿形		弱振幅, 低连续		G91 井
			微齿形		弱振幅, 低连续		G948 井

基于以上 5 种地震相反射特征,采用自组织神经网络聚类法,在选取过 T₇ 层位下移 50 ms 时窗、

聚类种类为 5 的条件下,得到图 5 所示的研究区波形聚类结果。

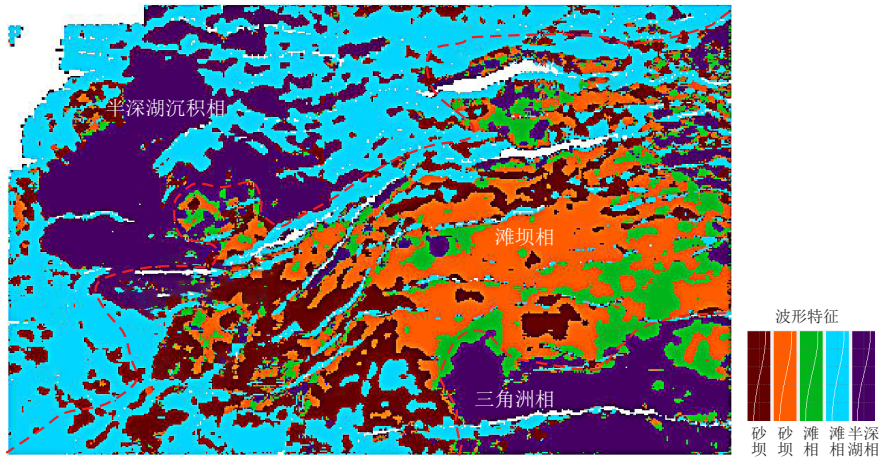


图 5 研究区过 T₇ 层位下移 50 ms 时窗采用自组织神经网络聚类方法波形聚类结果

Fig. 5 Waveform clustering results of the self-organizing neural network clustering method when the time window is moved down 50 ms from the T₇ horizon in the study area

从图 5 可以看出,沙四上亚段地震相分布与地质上沉积体系的分布背景较为相似,并与多数单井的微相特征相符,表明该波形聚类对沉积相反映较为有效,尤其是地震相的边界特征较为客观,可以作为沙四上亚段滩坝相砂体展布的参考依据。

4 多属性融合

随着地震属性分析技术的发展,多属性融合已成为一种新发展方向,是用于解决储层预测多解性的重要途径。单一属性仅能反映地质体局部特征,而通过多属性融合可显著提升预测可靠性^[37]。多属性融合技术是对表征储层多个特征的单一属性经计算及融合处理,进而取得最佳结果^[38-39]。多维地震属性融合技术可兼顾各种特征属性对预测结果的影响,也可屏蔽冗余信息,提高了储层预测的精准性^[40]。

李婷婷等^[41] 分别对常用的属性融合技术进行了研究对比,包括基于颜色空间的 RGB 融合,基于数学方法的聚类分析融合,多元线性回归融合,基于神经学科的神经网络 RBF 融合。RGB 融合技术多用于河道检测、断层识别、储层预测等,其优点是使图像显示更加清晰,细节丰富,但不适用于 4 种以上的地震属性融合。聚类分析可以有效地从大量地震数据中寻找出数据分布规律,常用于岩性识别和流体预测。薄层储层预测中,多元线性回归模型

通过建立储层参数与优选地震属性的最优定量关系,虽能提升预测精度,但其预测效果显著依赖于属性筛选过程,且对高敏感性属性的参数约束较为严格。基于神经网络的融合方法具有较强的自适应性和较高的容错率,适用范围广,速度快,可在线学习,对薄层滩坝砂体的识别具有较高的识别效率和准确性^[42]。其中,地震属性的优选影响了属性融合的质量,图 6 为属性优选砂体预测技术流程,如何优选出适合砂体厚度的预测方法,选取能较好反映地质特征的地震属性进行融合,能有效提高解释效率和解释精度。而井的储层参数加入地震属性融合,并将融合数据赋予具有储层地质意义的数据,更加有利于后期的地震属性预测。

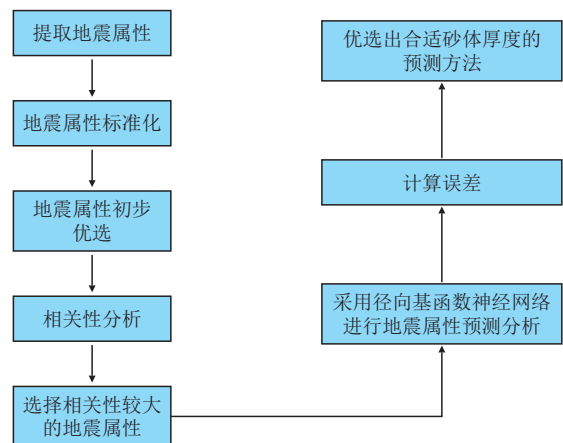


图 6 属性优选砂体预测技术流程

Fig. 6 Technological process for predicting sand bodies through attribute optimization

三参数综合评分(Significance Dispersion Correlation, SDC)地震属性优选方法是依据地震属性预测值, 及对应位置储层参数呈现出的有效性、离散度与相关性展开分析, 基于此对这 3 个参数预测值进行综合判断。具体方法如下:

1) 针对各属性与储层参数, 计算其有效性, 取值为[-1, 1], 并按照各属性有效性的绝对值大小进行排序, 进而得出每个属性的有效性得分, 具体计算方式为: 需要优选的属性个数 + (1 - 该属性有效性的排序)。

2) 计算各属性与储层参数的离散度; 据此开展排序, 得到每个属性的离散度得分为: 需要优选的属性个数 + (1 - 该属性离散度的排序)。

3) 对各属性与储层参数间的影响程度展开计算, 取值为[-1, 1], 并依据该值的高低进行排序, 从而算出每个属性的相关度得分, 计算方法为: 需要优选的属性个数 + (1 - 该属性离散度的排序)。

4) 将每个属性的 3 个得分相加, 得到总得分; 把所有的总得分归到[1, 100]当中, 就可计算获取每一属性的最后总分。

5) 把各地震属性依据总得分进行逐一排序, 筛选排在前列并且总得分超过 60 分的作为敏感属性。

将工区内 28 口井的砂体厚度作为 SDC 地震属性优选的储层参数, 按照上面计算步骤, 开展基于 SDC 的敏感地震属性优选, 分别计算地震属性值以及与之相对应位置的储层参数值在有效性、离散度与相关性这 3 个维度上的表现情况, 进而将这 3 个维度各自所对应的得分进行累加求和, 最终得出各地震属性的总得分。优选结果见表 2, 最大振

幅(100.00 分)和总正振幅(82.78 分)对砂体厚度的影响最大, 其次是能量半时间(74.17 分)、均方根振幅(74.17 分)及频带宽度(65.57 分), 瞬时频率和瞬时相位等属性对砂体厚度的影响最小。在以上敏感地震属性优选基础上, 选择了最大振幅、总正振幅、能量半时间、均方根振幅和有效带宽属性构成敏感属性组, 再依据径向基多属性融合法对砂体厚度开展研究, 可反映坝砂横向分布范围。

表 2 SDC 敏感属性优选结果
Tab. 2 Result of SDC sensitive attribute optimization

地震属性	属性得分
最大振幅	100.00
总正振幅	82.78
能量半时间	74.17
均方根振幅	74.17
频带宽度	65.57
瞬时频率	35.43
瞬时相位	31.13
总振幅	31.13
最小振幅	13.91

从图 7 所示的径向基多属性融合结果可以看出, 研究区的东南侧主要发育厚砂体, 而在原始地震属性中产生干扰的西北部地区无厚砂体发育, 整体呈现出蓝绿色泥岩相响应特征, 其中, 少量红色响应特征为砂体夹层存在, 该研究结果与真实的地质认识较为吻合, 足以屏蔽某一地震属性具有多解性的问题(研究区西北侧属性值异常), 进一步佐证了径向基属性融合方法的正确性。由图中还可以发现, 研究区东南侧具有多列砂坝(厚砂体)面向深湖方向平行排列的特征, 与地质认识吻合程度较高。同时, 根据图 7 中多口井的砂厚预测结果与实测砂体厚度对比(表 3)发现, 砂体厚度误差率约 10%, 与实际地质情况吻合。

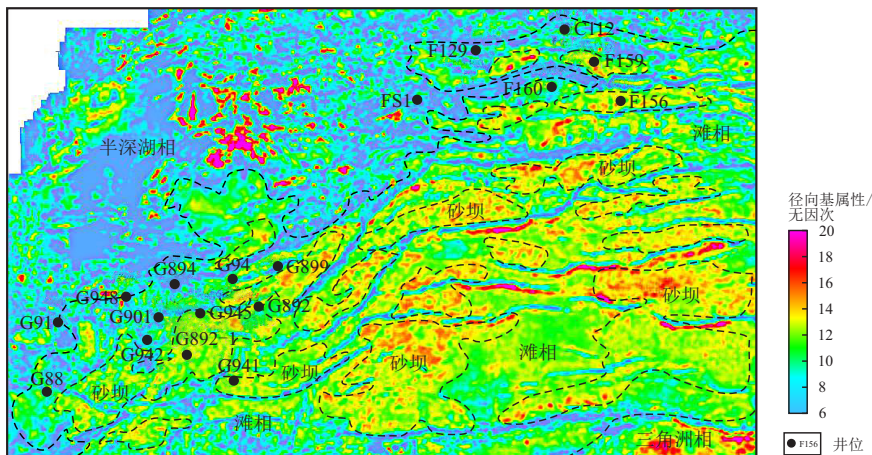


图 7 研究区沙四上亚段径向基多属性融合结果

Fig. 7 Radial basis multi-attribute fusion results of Es₄ in the study area

表 3 研究区多口井实测砂体厚度与预测砂体厚度对比
Tab. 3 Comparison of measured sand body thickness and predicted sand body thickness in multiple wells in the research area

井名	实测砂体厚度/m	预测砂体厚度/m	误差/%
FS1	13.0	12.0	7.7
F156	12.0	13.0	8.3
C112	12.3	11.0	10.6
G892	10.9	11.5	5.5
G941	10.3	10.5	1.9
F129	7.3	7.0	4.1
G94	12.9	11.7	9.3
G901	7.8	8.5	8.9
G892	13.3	12.0	9.8
G942	7.8	8.0	2.6
G899	9.2	10.0	8.7

5 沙四上亚段滩坝砂体展布

综合上述地震相研究的成果,研究以波形聚类

相边界结合径向基多属性融合对微相形态的反映,刻画出沙四上亚段沉积体系分布(图 8)。

从图 8 可以看出,多属性融合沉积相沙四上亚段滩坝微相较为发育,主要位于研究工区的东南部,其中砂坝微相较为发育,沿 NE—SW 走向且多为条带状展布。其次为滩相广泛分布,东北部则发育有半深湖相泥岩。从沉积砂体的展布可以看出,湖平面和古地貌联合作用控制了滩坝微相的形态和展布规律。与早期勘探开发沉积相对比,多属性融合沉积相沙四上亚段滩坝微相范围更广,形态更自然,结合研究区单井油气显示认为 F159—G89 区块砂坝微相是油气最为富集的目标区带,为下一步非常规致密油的勘探开发提供了思路,值得进一步深入评价和研究。

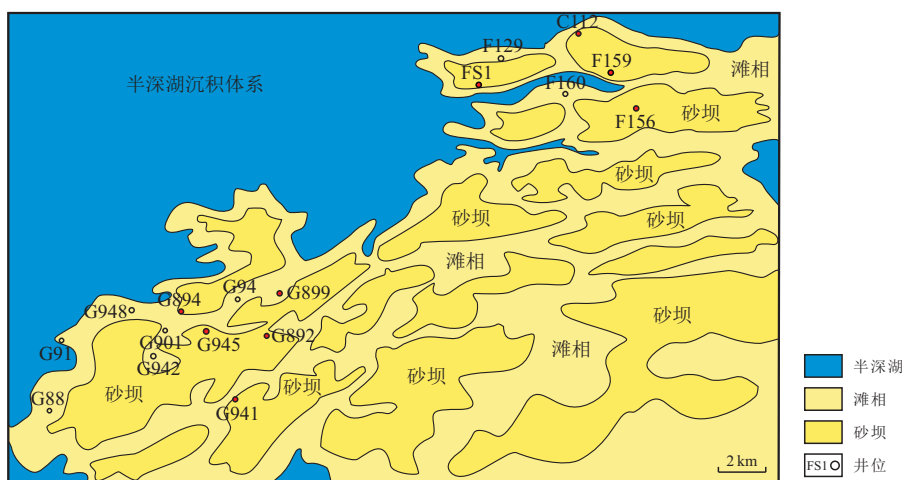


图 8 研究区沙四上亚段沉积体系分布

Fig. 8 Distribution map of sedimentary system of E_4s_4 in the study area

6 结 论

1) 研究区沙四上亚段滩坝相砂体为薄层或互层结构,地震反射特征不明显,呈现弱振幅、低连续的反射特征。在地震属性上,研究区沙四上亚段滩坝相砂体呈现弱—中均方根振幅、中能量半时、中频带宽度、低相位的地震反射特征。

2) 研究区滨浅湖相共发育 5 种地震反射特征,其中滩坝相整体具有中振幅、中连续地震反射特征,半深湖相具有低振幅、低连续的地震反射特征;采用聚类分析方法对沉积体系边界刻画较为客观,利于对研究区的沉积相进行划分。

3) 径向基多属性融合方法的特色是将表现储层多个特征的地震属性进行数学运算并融合处理,

从而得到最优结果。此方法的优势是去除了冗余信息,在尽可能多地保留储层信息的同时提高了储层预测的精准性。研究区利用径向基多属性融合方法进行砂体厚度预测的研究结果与真实地质认识吻合程度较高,消除了单一地震属性的多解性问题。

4) 沙四上亚段滩坝相砂体有利区主要分布于研究区的东南部,滩坝相中砂坝微相较为发育,呈条带状沿 NE—SW 向展布,滩相分布较为广泛,研究区东北部发育半深湖相泥岩。结合单井油气显示,砂坝微相是油气聚集的有利区带。

参考文献

- [1] ZHANG Jin, GUO Xubing, XU Bing, et al. Application of pre-stack simultaneous inversion on the reservoir identifi-

- cation and fluid prediction: A case history of E_{s2} Member reservoir in Shengli Oilfield[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 227(6): 62003. doi: 10.1088/1755-1315/227/6/062003
- [2] 李继岩. 局限湖盆滨浅湖滩坝砂体沉积特征——以东营凹陷青南洼陷沙四上亚段为例[J]. 断块油气田, 2020, 27(2): 160–164. doi: 10.6056/dkyqt202002005
- LI Jiyan. Sedimentary characteristics of shore-shallow lake-beach bar in limited lacustrine basin: Taking upper part of Fourth Member of Shahejie Formation of Qingnan Sag in Dongying Depression as an example[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(2): 160–164. doi: 10.6056/dkyqt202002005
- [3] 曾洪流. 地震沉积学在中国: 回顾和展望[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 417–426.
- ZENG Hongliu. Seismic sedimentology in China: A review[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3): 417–426.
- [4] QIU Longwei, WANG Yelei, HU Yongjie. Modern sedimentation in the wave-dominated delta beach bar sedimentary system of the Fenghe River in Jiaonan, Qingdao[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(22): 06211. doi: 10.1007/s12517-020-06211-y
- [5] ONSTOTT G E. Processing and display of offset dependent reflectivity in reflection seismograms[D]. Austin: University of Texas at Austin, 1984.
- [6] 姚光庆, 马正, 赵彦超, 等. 南海 HZ26-1 油田储层沉积特征研究[J]. 中国海上油气(地质), 1994, 8(6): 27–33.
- YAO Guangqing, MA Zheng, ZHAO Yanchao, et al. Study on reservoir sedimentary characteristics of HZ26-1 Oilfield in the South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1994, 8(6): 27–33.
- [7] 朱筱敏, 信荃麟, 张晋仁. 断陷湖盆滩坝储集体沉积特征及沉积模式[J]. 沉积学报, 1994, 12(2): 20–28.
- ZHU Xiaomin, XIN Quanlin, ZHANG Jinren. Collective sedimentary characteristics and sedimentary model of beach dam reservoir in faulted lake basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(2): 20–28.
- [8] 王同和. 晋陕地区地质构造演化与油气聚集[J]. 华北地质矿产杂志, 1995, 10(3): 283–298.
- WANG Tonghe. Evolutionary characteristics of geological structure and oil-gas accumulation in Shanxi-Shaanxi Area[J]. Journal of Geology and Mineral Resources North China, 1995, 10(3): 283–298.
- [9] 毛宁波. 陆相地层隐蔽油气藏研究——以黄骅坳陷歧口凹陷第三系为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2002.
- MAO Ningbo. Study for continental facies stratum subtle traps: Study form tertiary system Qikou Depression, Huanghua Sag[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2002.
- [10] 华学理. 东濮凹陷泥岩裂缝油气藏特征及识别技术研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2004.
- HUA Xueli. Research on characteristics and identification technology of mudstone fractured reservoirs in Dongpu Sag[D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2004.
- [11] 刘书会. 薄层属性分析中存在的问题及解决方法——以东营凹陷梁 108 地区滩坝砂岩为例[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(2): 56–58. doi: 10.3969/j.issn.1009-9603.2006.02.017
- LIU Shuhui. Problems in thin-layer attribute analysis and solved methods: A case study in beach bar sandstones in Liang108 Area of Dongying Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13(2): 56–58. doi: 10.3969/j.issn.1009-903.2006.02.017
- [12] 宋维琪, 朱卫星, 孙英杰. 复数子波匹配追踪算法识别薄层砂体[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1796–1801. doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2007.06.018
- SONG Weiqi, ZHU Weixing, SUN Yingjie. Identify bed layer sandbody by complex wavelet matching algorithm[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(6): 1796–1801. doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2007.06.018
- [13] 冯磊, 姜在兴. 滩坝砂体多参数地震属性神经网络预测技术[J]. 内蒙古石油化工, 2008, 34(17): 65–67. doi: 10.3969/j.issn.1006-7981.2008.17.029
- FENG Lei, JIANG Zaixing. Neural network prediction technology on multiparameter earthquake properties in shoal and dam sand-body[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008, 34(17): 65–67. doi: 10.3969/j.issn.1006-7981.2008.17.029
- [14] 朱永才. 基于支持向量机的储层参数预测方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
- ZHU Yongcai. Research on reservoir parameter prediction method based on support vector machine[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [15] 张瑞芳. 滩坝砂油藏储层预测方法研究——以樊 151—樊 147 工区为例[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012. doi: 10.7666/d.y2087322
- ZHANG Ruifang. Research of beach bar sand reservoir prediction: A case study of F151–F147 Project[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2012. doi: 10.7666/d.y2087322
- [16] 王开燕, 周妍, 陈彦奇, 等. 基于谱分解和地震多属性储层厚度的预测[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(3): 1271–1276. doi: 10.6038/pg20140337
- WANG Kaiyan, ZHOU Yan, CHEN Yanqi, et al. Prediction of reservoir thickness based on spectral decomposition and seismic multi-attribute reservoir[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(3): 1271–1276. doi: 10.6038/pg20140337
- [17] 刘书会, 宋国奇, 杨培杰. 地震沉积学在陆相盆地中的应用——东营三角洲勘探实例[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(2): 360–368. doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2014.02.021
- LIU Shuhui, SONG Guoqi, YANG Peijie. Seismic sedimentology in the exploration of a continental basin: A case history of Dongying Delta[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(2): 360–368. doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2014.02.021
- [18] ZHANG Yuanfu, HU Chenlin, WANG Min, et al. A quantitative sedimentary model for the modern lacustrine beach bar (Qinghai Lake, Northwest China)[J]. Journal of Paleolimnology, 2018, 59(2): 279–296. doi: 10.1007/s10933-016-9930-2
- [19] 侯庆杰, 刘显太, 韩宏伟, 等. 博兴洼陷致密滩坝砂体分类评价[J]. 地质论评, 2021, 67(S1): 227–228. doi: 10.16509/j.georeview.2021.s1.099

- HOU Qingjie, LIU Xiantai, HAN Hongwei, et al. Classification and evaluation of tight beach bar sand bodies in Boxing Sag[J]. *Geological Review*, 2021, 67(S1): 227–228. doi: 10.16509/j.georeview.2021.s1.099
- [20] 刘磊, 朱博华, 刘显太, 等. 中国滩坝砂勘探现状与储层基本特征分析[J]. *特种油气藏*, 2013, 20(5): 14–18. doi: 10.3969/j.issn.1006-6535.2013.05.003
- LIU Lei, ZHU Bohua, LIU Xiantai, et al. Exploration status of beach bar sands in China and analysis of basic characteristics of reservoirs[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2013, 20(5): 14–18. doi: 10.3969/j.issn.1006-6535.2013-05.003
- [21] 栗宝鹃, 董春梅, 林承焰, 等. 砂泥岩薄互层层位精细标定方法及应用——以东营凹陷滨东地区沙四上亚段为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(1): 173–182. doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2016.01.022
- LI Baojuan, DONG Chunmei, LIN Chengyan, et al. Sandshale interbed refined calibration: An example of Bingdong beach-bar sandstone in Dongying Depression[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(1): 173–182. doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2016.01.022
- [22] 张景越, 肖小玲, 王鹏飞, 等. 基于多信息融合的层次聚类测井曲线自动分层方法[J]. *断块油气田*, 2024, 31(1): 42–49. doi: 10.6056/dkyqt202401006
- ZHANG Jingyue, XIAO Xiaoling, WANG Pengfei, et al. Automatic stratification method of hierarchical clustering logging curve based on multi-information fusion[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2024, 31(1): 42–49. doi: 10.6056/dkyqt202401006
- [23] 邹定永, 邵佳, 代瑞雪, 等. 基于模型正演的地震属性优选与加权融合技术应用——以四川盆地中部深层碳酸盐岩储层预测为例[J]. *天然气勘探与开发*, 2024, 47(4): 46–54. doi: 10.12055/gaskk.issn.1673-3177.2024.04.005
- ZOU Dingyong, SHAO Jia, DAI Ruixue, et al. Forward modeling-based seismic-attribute optimization and weighted attribute fusion: Application to predicting deep carbonate reservoirs, central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2024, 47(4): 46–54. doi: 10.12055/gaskk.issn.1673-3177.2024.04.005
- [24] 江徐, 张军华, 韩宏伟, 等. 优化变分模式分解方法消除强反射影响——以东营凹陷沙四段滩坝砂目标处理为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2020, 55(1): 147–152, 166. doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2020.01.017
- JIANG Yu, ZHANG Junhua, HAN Hongwei, et al. Elimination of strong reflection influence based on optimized variational mode decomposition method: A case study of the target processing of beach bar sand of Es₄ in Dongying Sag[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2020, 55(1): 147–152, 166. doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2020-01.017
- [25] 骆璞. 地震反射特征研究在储层预测中的应用[J]. *复杂油气藏*, 2021, 14(2): 36–39, 46. doi: 10.16181/j.cnki.-fzyqc.2021.02.007
- LUO Pu. Application of seismic reflection characteristics research in reservoir prediction[J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2021, 14(2): 36–39, 46. doi: 10.16181/j.cnki.-fzyqc.2021.02.007
- [26] 蔡义峰, 熊婷, 姚卫江, 等. 地震多属性分析技术在薄层砂体预测中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2017, 52(S2): 140–145. doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210-2017.S2.024
- CAI Yifeng, XIONG Ting, YAO Weijiang, et al. Thin sandstone prediction with seismic multi-attribute analysis[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2017, 52(S2): 140–145. doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2017.S2.024
- [27] 陈文浩, 王志章, 侯加根, 等. 地层切片技术在沉积相研究中的应用探讨[J]. *石油地球物理勘探*, 2015, 50(5): 1007–1015. doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015-05.026
- CHEN Wenhao, WANG Zhizhang, HOU Jiagen, et al. Strata slices in sedimentary facies research[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2015, 50(5): 1007–1015. doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.05.026
- [28] 郭迎春, 张军华, 刘磊, 等. 能量半时地震属性的诠释与应用[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(2): 746–751. doi: 10.6038/pg20150236
- GUO Yingchun, ZHANG Junhua, LIU Lei, et al. Interpretation and application of energy half-time seismic attributes[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(2): 746–751. doi: 10.6038/pg20150236
- [29] 王学军, 于宝利, 赵小辉, 等. 油气勘探中“两宽一高”技术问题的探讨与应用[J]. *中国石油勘探*, 2015, 20(5): 41–53. doi: 10.3969/j.issn.1672-7703.2015.05-005
- WANG Xuejun, YU Baoli, ZHAO Xiaohui, et al. Discussion and application of “two widths and one height” technical problems in oil and gas exploration[J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(5): 41–53. doi: 10.3969/j.issn.1672-7703.2015.05.005
- [30] 乐友喜, 江凡, 问雪, 等. 用于地震反射界面识别的瞬时相位复合属性[J]. *物探化探计算技术*, 2012, 34(5): 505–509. doi: 10.3969/j.issn.1001-1749.2012.05.01
- LE Youxi, JIANG Fan, WEN Xue, et al. Instantaneous phase composite attribute for seismic reflection interface identification[J]. *Computer Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2012, 34(5): 505–509. doi: 10.3969/j.issn.1001-1749.2012.05.01
- [31] 施尚明, 王杰, 段彦清. 基于RGB多地震属性融合的储层预测[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2016, 26(5): 502–505. doi: 10.3969/j.issn.2095-7262.2016.05.007
- SHI Shangming, WANG Jie, DUAN Yanqing. Reservoir prediction based on RGB multiple seismic attributes fusion[J]. *Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology*, 2016, 26(5): 502–505. doi: 10.3969/j.issn.-2095-7262.2016.05.007
- [32] 李辉, 罗波, 何雄涛, 等. 基于地震波形聚类储集砂体边界识别与预测[J]. *工程地球物理学报*, 2017, 14(5): 573–577. doi: 10.3969/j.issn.1672-7940.2017.05.011
- LI Hui, LUO Bo, HE Xiongtao, et al. Reservoir sand body boundary recognition and prediction based on seismic waveform clustering[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2017, 14(5): 573–577. doi: 10.3969/j.-issn.1672-7940.2017.05.011
- [33] 罗红梅, 王长江, 张志敬, 等. 油气储层勘探建模技术新进展及未来展望[J]. *油气地质与采收率*, 2024, 31(4):

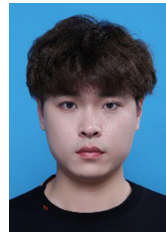
- 135–153. doi: 10.13673/j.pg202405009
- LUO Hongmei, WANG Changjiang, ZHANG Zhijing, et al. New progress and future prospects of oil and gas reservoir modeling technology for exploration[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(4): 135–153. doi: 10.13673/j.pg202405009
- [34] 林腾飞, 窦立荣, 甘利灯. 地震勘探技术发展历程及展望[J]. 世界石油工业, 2023, 30(1): 57–69.
- LIN Tengfei, DOU Lirong, GAN Lideng. Development history and prospect of seismic exploration technology[J]. World Petroleum Industry, 2023, 30(1): 57–69.
- [35] 刘仕友, 宋炜, 应明雄, 等. 基于波形特征向量的凝聚层次聚类地震相分析[J]. 物探与化探, 2020, 44(2): 339–349. doi: 10.11720/wtyht.2020.1153
- LIU Shiyu, SONG Wei, YING Mingxiong, et al. Seismic facies analysis of agglomerated hierarchical clustering based on waveform feature vector[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(2): 339–349. doi: 10.11720/wtyht.2020.1153
- [36] 张葵, 郑晓东, 李劲松, 等. 基于 SOM 和 PSO 的非监督地震相分析技术[J]. 地球物理学报, 2015, 58(9): 3412–3423. doi: 10.6038/cjg20150933
- ZHANG Yan, ZHENG Xiaodong, LI Jinsong, et al. Un-supervised seismic facies analysis based on SOM and PSO[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(9): 3412–3423. doi: 10.6038/cjg20150933
- [37] 陈彦虎, 毕建军, 邱小斌, 等. 地震波形指示反演方法及其应用[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1149–1158. doi: 10.11698/PED.2020.06.08
- CHEN Yanhu, BI Jianjun, QIU Xiaobin, et al. A method of seismic meme inversion and its application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1149–1158. doi: 10.11698/PED.2020.06.08
- [38] 刘力辉, 陈珊, 倪长宽. 叠前有色反演技术在地震岩性学研究中的应用[J]. 石油物探, 2013, 52(2): 171–176. doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2013.02.009
- LIU Lihui, CHEN Shan, NI Changkuan. Application of prestack colored inversion technology in seismic lithology[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(2): 171–176. doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2013.02.-009
- [39] 毕俊凤, 杨培杰. 有色反演技术在少井区岩性体预测中的应用[J]. 物探与化探, 2014(3): 558–565. doi: 10.11720/wtyht.2014.3.25
- BI Junfeng, YANG Peijie. The application of colored inversion to reservoir prediction in sparse well zone[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014(3): 558–565. doi: 10.11720/wtyht.2014.3.25
- [40] 罗磊. 基于概率核主成分分析的融合方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- LUO Lei. Research on fusion method based on probabilistic kernel principal component analysis[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [41] 李婷婷, 王钊, 马世忠, 等. 地震属性融合方法综述[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 378–385. doi: 10.6038/pg20150155

- LI Tingting, WANG Zhao, MA Shizhong, et al. Summary of seismic attributes fusion method[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 378–385. doi: 10.6038/pg20150155
- [42] 刘力辉, 陆蓉, 杨文魁. 基于深度学习的地震岩相反演方法[J]. 石油物探, 2019, 58(1): 123–129. doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2019.01.014
- LIU Lihui, LU Rong, YANG Wenkui. Seismic lithofacies inversion based on deep learning[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(1): 123–129. doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2019.01.014

作者简介



李斌, 1977年生, 男, 汉族, 新疆奎屯人, 副教授, 主要从事油气成藏和非常规油气资源评价的教学和科研工作。E-mail: lb-in@swpu.edu.cn



梁宇, 1994年生, 男, 汉族, 四川成都人, 硕士, 主要从事层序地层、地震沉积方面的研究工作。E-mail: 731997015@qq.com



赵虎, 1983年生, 男, 汉族, 江苏淮安人, 教授, 主要从事复杂地区地震资料采集方法和地震储层预测技术研究工作。E-mail: cumtzhao@163.com



杨宏伟, 1967年生, 男, 汉族, 山东无棣人, 高级工程师, 博士, 主要从事综合解释及油藏建模研究工作。E-mail: yanghongwei676.slyt@sinopec.com



魏国华, 1981年生, 男, 汉族, 甘肃民勤人, 工程师, 主要从事井中地震处理研究及应用工作。E-mail: weiguohua297.slyt@sinopec.com

编辑: 张云云

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>