

基于地震属性智能融合的湖相重力流沉积致密砂岩储层预测

万晓龙^{1,2,3}, 刘瑞璟^{1,2}, 时建超⁴, 李伟^{1,2}, 麻书玮⁴, 李桢⁴, 李士祥⁴, 岳大力^{1,2*}, 吴胜和^{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, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 中国石油长庆油田分公司第十一采油厂, 西安 710299

4 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710018

* 通信作者, yuedali@cup.edu.cn

收稿日期: 2022-08-19

中国石油天然气集团有限公司—中国石油大学(北京)战略合作科技专项项目(ZLZX2020-02)、国家自然科学基金项目(41872107)联合资助

摘要 湖相重力流是目前沉积学研究的热点与难点,也是致密油、页岩油富集的有利场所,鄂尔多斯盆地庆城油田三叠系延长组作为致密油、页岩油的典型代表已显示出巨大的勘探开发前景。然而,由于湖相重力流砂体分布认识不清,导致油田并未达到预期的开发效率。本文采用支持向量机(SVR)的机器学习方法,先优选频段再优选属性,建立分频属性与测井解释砂体厚度的非线性映射关系,实现了致密砂岩的定量预测。研究结果表明,低频地震属性适合预测厚层砂体,高频地震属性适合预测薄层砂体;采用机器学习的方法,将不同频率的地震属性智能融合,能够兼顾预测不同厚度砂体,既提高了地震属性的解释精度,又降低了地震解释的多解性,实现了砂体厚度的定量预测。检验结果显示,智能融合属性与砂体厚度的分布趋势与值域区间基本一致,智能融合属性预测砂体分布的可靠性明显提高,与测井解释砂体厚度的相关性由0.60提高至0.79,大多数井点处预测的砂体厚度误差小于5 m。继而,根据融合属性与测井解释,刻画了研究区的沉积微相展布特征:研究区目的层发育湖底扇沉积,细分为分支水道、朵叶主体、朵叶侧缘、滑塌体与朵叶间/水道间5种沉积微相;砂体主体呈扇形连片式沉积,厚度顺物源方向逐渐减薄;分支水道呈窄条带状树形分叉,下切发育于朵叶体之上;朵叶体沉积为研究区的沉积主体;滑塌体为湖底扇前端失稳滑塌形成的小规模孤立砂体,长轴方向多平行于湖底扇前端。研究成果对油田下一步高效开发具有重要意义。

关键词 地震属性; 智能融合; 储层预测; 致密砂岩; 湖相重力流

Prediction of tight sandstone of lacustrine gravity-flow reservoirs using intelligent fusion of seismic attributes

WAN Xiaolong^{1,2,3}, LIU Ruijing^{1,2}, SHI Jianchao⁴, LI Wei^{1,2}, MA Shuwei⁴, LI Zhen⁴, LI Shixiang⁴, YUE Dali^{1,2}, WU Shenghe^{1,2}

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

引用格式: 万晓龙, 刘瑞璟, 时建超, 李伟, 麻书玮, 李桢, 李士祥, 岳大力, 吴胜和. 基于地震属性智能融合的湖相重力流沉积致密砂岩储层预测. 石油科学通报, 2023, 01: 1-11

WAN Xiaolong, LIU Ruijing, SHI Jianchao, LI Wei, MA Shuwei, LI Zhen, LI Shixiang, YUE Dali, WU Shenghe. Prediction of tight sandstone of lacustrine gravity-flow reservoirs using intelligent fusion of seismic attributes. Petroleum Science Bulletin, 2023, 01: 1-11. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.01.001

2 College of Geosciences, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 The 11th Oil Production Plant, PetroChina, Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

4 Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

Abstract The study of lacustrine gravity-flow successions, which are regarded as an important reservoir unit of tight oil and shale oil, has been now a hotspot and also a challenge study work. The Triassic Yanchang Formation in Qingcheng oilfield in Ordos Basin, as a typical reservoir of tight oil and shale oil, shows great exploration and development prospects. However, this oilfield did not achieve the expected development efficiency, probably resulting from the poor understanding of the distribution of lacustrine gravity-flow sandbodies. In this work, proper frequency-decomposed seismic attributes were select relying on their correlation to sand thickness, and then fused using machine learning with a supervised algorithm of support vector machine (SVR). A nonlinear mapping relationship (i.e., the trained SVR model) was established between the frequency-decomposed attributes and the thickness of sandbodies interpreted from well logs, and then the quantitative prediction of tight sandstone was realized through the application of the mapping relationship. The research indicates that: low-frequency seismic attributes are suitable for predicting thick sandbodies, while high-frequency seismic attributes are suitable for predicting thin sandbodies. Utilize advantages of seismic information of different frequencies, and consequently significantly reduces the uncertainty of seismic interpretation, and improves the prediction accuracy of sandbodies, and realizes the quantitative prediction of sandbodies. The test results show that the distribution trend and numerical range of intelligent fusion attribute are basically consistent with the sandbodies thickness interpreted by well logs, and the reliability of the sandbodies prediction by intelligent fusion attribute is significantly improved. The correlation between the intelligent fusion attribute and sandbodies thickness interpreted by well logs is improved from 0.6 to 0.79, and the prediction error of sandbodies thickness near the wells is less than 5 m. The geological interpretation indicates that the study strata of target formation are lacustrine-fan deposits, consisting of five sedimentary microfacies: branch channel, main lobe, lateral edge of lobe, slump body and inter lobe / inter channel. The main sandbodies is a fan-shaped, continuous deposition, whose thickness gradually decreases along the provenance direction. The branch channel is branched in the shape of narrow strip trees, which is developed above the lobe. Lobe is the dominated sedimentary microfacies in the study area. The slump body is the small scale isolated sandbodies formed by the collapse in the front of lacustrine-fan deposits. And the long axis direction of slump body is parallel to the front of lacustrine-fan deposits. This research results are of great significance for an efficient development of the oilfield in next stage.

Keywords seismic attribute; intelligent fusion; reservoir characterization; tight sandstone; lacustrine gravity-flow succession

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.01.001

0 引言

随着水平钻井和压裂技术的发展,致密砂岩油气已成为重要的非常规油气资源^[1-3]。在我国,致密油气分布广泛、地质储量丰富,如鄂尔多斯盆地、四川盆地、松辽盆地、渤海湾盆地和准噶尔盆地等地区均发育大量致密砂岩储层^[2,4],因此探索致密砂岩储层的精细表征方法对我国能源发展意义重大。

地震属性作为一种便捷、可靠的地震数据解释技术与方法,已普遍应用于常规碎屑岩储层,并取得良好效果^[5-7]。地震属性种类繁多,已超过200种,不同地震属性的地球物理意义存在差异,适合表征不同地质信息^[8-9]。因此,地震属性分析的关键:一是地震属性优选,从众多属性中优选出对地质体较为敏感的一种或几种地震属性^[6,10-11],如振幅类属性对砂体厚度较敏感^[11-12]、频率类属性有助于分析沉积旋回与砂泥组合关系^[13]、相位或相干类属性有利于刻画断层与岩性边界^[14];二是多地震属性融合,即综合运用多种属性以降低单一属性的多解性并提高属性解释的分辨

率^[15-17]。地震属性优选较为简单,难点在于如何有效地融合多种属性。针对常规碎屑岩(砂岩)储层,目前已经形成了基于线性模型与非线性(智能学习)模型的多属性融合方法^[9,17],尤其是非线性模型的多属性智能融合在储层预测方面取得良好效果,成为近年来的研究热点^[12,17-19]。然而,致密储层具有砂泥岩低波阻抗差异、高密度、高声波速度、高波阻抗的特征,与常规砂岩储层的地球物理响应存在显著差异^[20-21]。因此,常规储层提出的地震属性融合方法能否应用于致密砂岩储层研究,需进一步检验。鉴于此,本文以鄂尔多斯盆地庆城油田庄214区块为研究对象,探索适用于致密砂岩储层的地震属性融合与砂体预测方法,不仅对研究区高效开发具有重大生产价值,更对湖相重力流沉积研究具有重要理论意义。

1 油藏地质概况

鄂尔多斯盆地发育于华北克拉通西部,是一个多旋回叠合型盆地,内部可细分为渭北隆起、伊陕斜

坡、晋西挠褶带、伊盟隆起、天环拗陷和西缘逆冲带6个一级构造单元，总面积 $32 \times 10^4 \text{ km}^2$ [22]。研究区为庆城油田南部庄214区块，位于伊陕斜坡西南部的庆城县一带(图1a)，面积 441 km^2 ，是长庆油田的重要含油区块，共钻井82口，平均井距约2100 m(图1b)。三维地震资料覆盖全区，地震主频约35 Hz，频宽

10~60 Hz。三叠系延长组是盆地内主要含油层系，随着研究的深入，延长组第三段(相当于传统分层的长7-长4+5油组)“进积-不等厚式”的地层结构样式逐渐清晰(图2)[20,23-24]，并将研究区延长组第三段细分为6个砂组，地层厚度在研究区范围内不等厚，由南向西向东北顺物源方向逐渐减薄。目的层位于延长组第

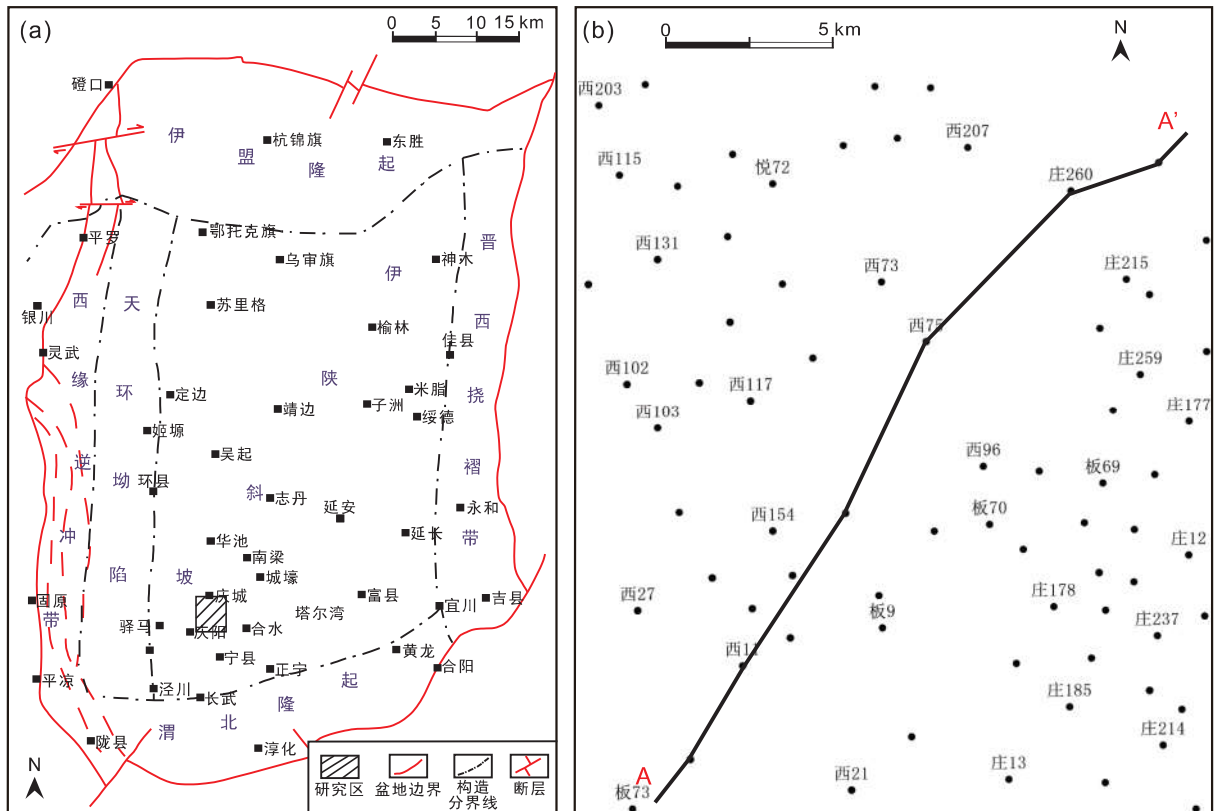


图1 庆城油田南部庄214区块构造位置及井位图(a)区域构造位置图；(b)井位图

Fig. 1 Tectonic location and well position map of Zhuang214 block in the southern of Qingcheng oilfield (a) tectonic location map; (b) well position map

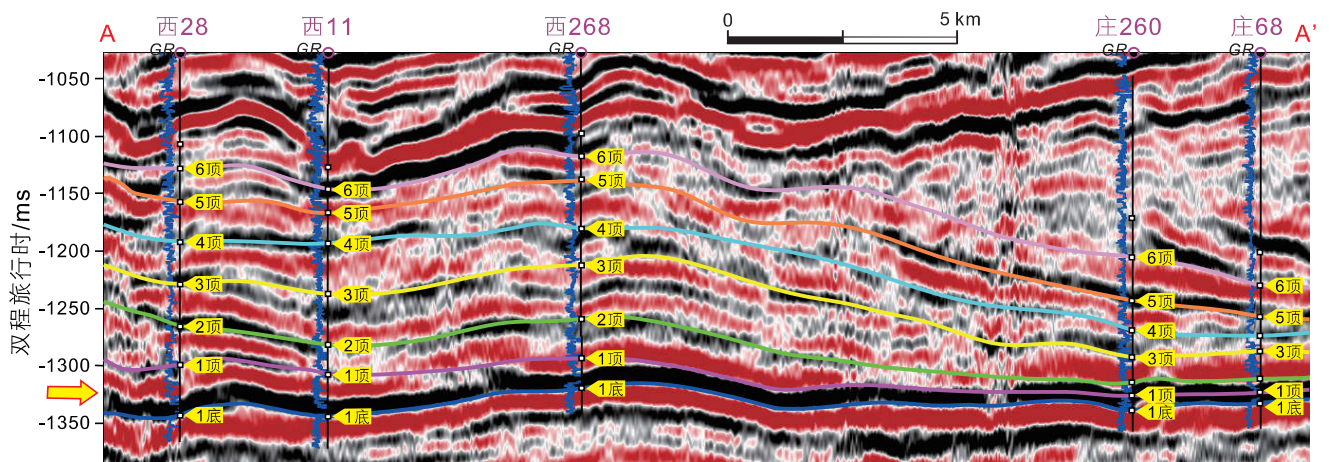


图2 延长组第三段原始地震资料过井地震剖面(剖面位置见图1b中的AA'测线)

Fig. 2 A seismic profile of Yanchang Formation from original seismic data (the position of this profile is marked in Fig.1b)

三段底部1砂组,属于湖底扇沉积^[21,25-26]。目的层储层致密,储层质量较差,为岩性油气藏^[21,27]。

2 分频地震属性优选

2.1 地震资料分频处理

2.1.1 地震属性分频分析的地质依据

地震正演研究表明,频率一定时,振幅随砂体厚度增大先升高后降低,振幅最高处砂体厚度为 0.25λ (即调谐厚度);频率越高,调谐厚度越小(图3)。因此,在振幅类属性中,一个振幅值可能对应两个砂体厚度,如图3同一振幅值对应A、B两处砂体厚度,存在多解性。但若同时考虑不同频率下的振幅值,如图3B、C两处振幅值,则仅有唯一的砂体厚度(时间厚度7.5 ms)符合条件,降低了振幅属性的多解性。

地震数据体通常具有一定的频带宽度,即包括不同频率的地震信息;通过地震分频处理能够有效突出不同频段的地震信息,其中高频数据体具有更高的主频,相较于原始地震数据,分辨率更高;低频数据体具有更大的调谐厚度。总之,高频地震属性的分辨率高但调谐厚度小,适合预测薄层砂体;低频属性的调

谐厚度大但分辨率低,适合预测厚层砂体。综合考虑不同频率的分频地震属性,既能降低地震属性的多解性,又能提高地震属性的分辨率。

2.1.2 地震资料分频处理

研究区三维地震资料主频约35 Hz,频宽10~60 Hz(图4a),垂向分辨率为27 m,难以有效刻画研究区的砂体分布。本文采用小波分频技术(Marr小波),对原始地震数据体进行分频处理,分频过程应该遵循以下3个原则:分频地震数据体的总频带宽度能够覆盖原始地震数据的频宽,保证有效地震信息不缺失;确保每个分频数据体具有较大的频带宽度,即维持较高的信噪比;分频数据体不宜过多,以免重复信息过多^[10,17]。依据上述原则,本研究将原始地震数据体分解为低、中、高3个分频数据体(图4b~d),其中低频数据体的主频约20 Hz、频宽7~35 Hz,中频数据体的主频约32 Hz、频宽12~47 Hz,高频数据体的主频约47 Hz、频宽25~66 Hz。

2.2 分频地震属性优选

分频地震属性优选分为两步,一是基于原始地震数据开展属性分析,明确研究区对致密砂岩最敏感的地震属性;二是从各分频地震数据体中提取上述种类的地震属性^[10,12,17]。之所以基于原始地震数据分析地震属性对研究区致密砂体的敏感性,是因为原始地震数据信息更全面,更具代表性;相反,地震分频数据体仅保留了部分频段的地震信息,适合分析特定厚度的致密砂体,不能代表全区不同厚度的致密砂岩。

参考地震属性优选惯例^[6,13,15],本文沿目的层顶底界面,提取了储层预测中常用的12种地震属性(表1)。然后,分析了地震属性与目的层致密砂体厚度的相关性(表1),结果表明总振幅、总能量、总谷值振幅、平均谷值振幅4种属性与砂体厚度的相关性较高(皮尔逊相关系数)。Yue et al. (2019)针对高孔、高渗的河流相储层提出了分频属性智能融合的方法,将不同频率的均方根振幅属性进行融合,准确地刻画了河流相砂体厚度^[17]。然而,本研究区为致密储层,地震资料品质较差,单一属性与砂体厚度的相关性较低,因此考虑多属性融合以提高砂体预测精度。为降低属性间的冗余信息,对上述4种属性进行属性间的相关性分析,表明总谷值振幅属性与总能量属性间的相关性高达0.944,即两者信息基本一致,故两者中仅保留与砂体相关性更高的总谷值振幅属性。最终,优选出总振幅、总谷值振幅、平均谷值振幅3种地震属性(表2,图5)。最后,分别从低频、中频、高频地震

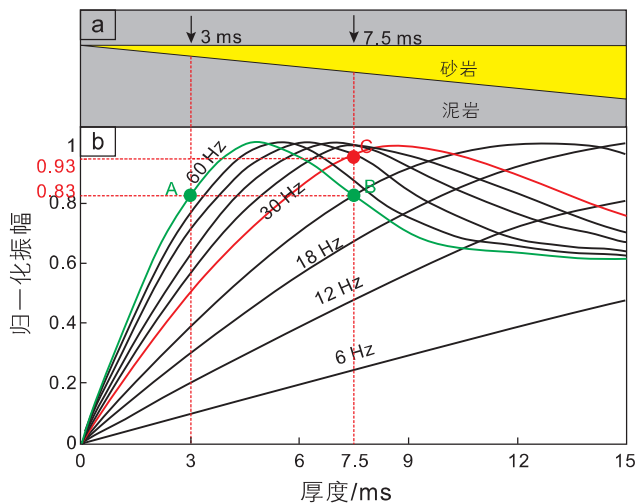


图3 不同地震子波频率下振幅与砂岩厚度关系图(a)砂岩楔形模型;(b)振幅、频率与砂岩厚度关系(据Li et al., 2019^[12]改)

Fig. 3 Relationships between amplitude and sandstone thickness at different seismic wavelet frequencies (a) sandstone wedge model computed from the forward seismic modelling; (b) relationships between the root mean square (RMS) value and sand thickness of the original seismic data and frequency-decomposed seismic volumes (modified by Li et al., 2019^[12])

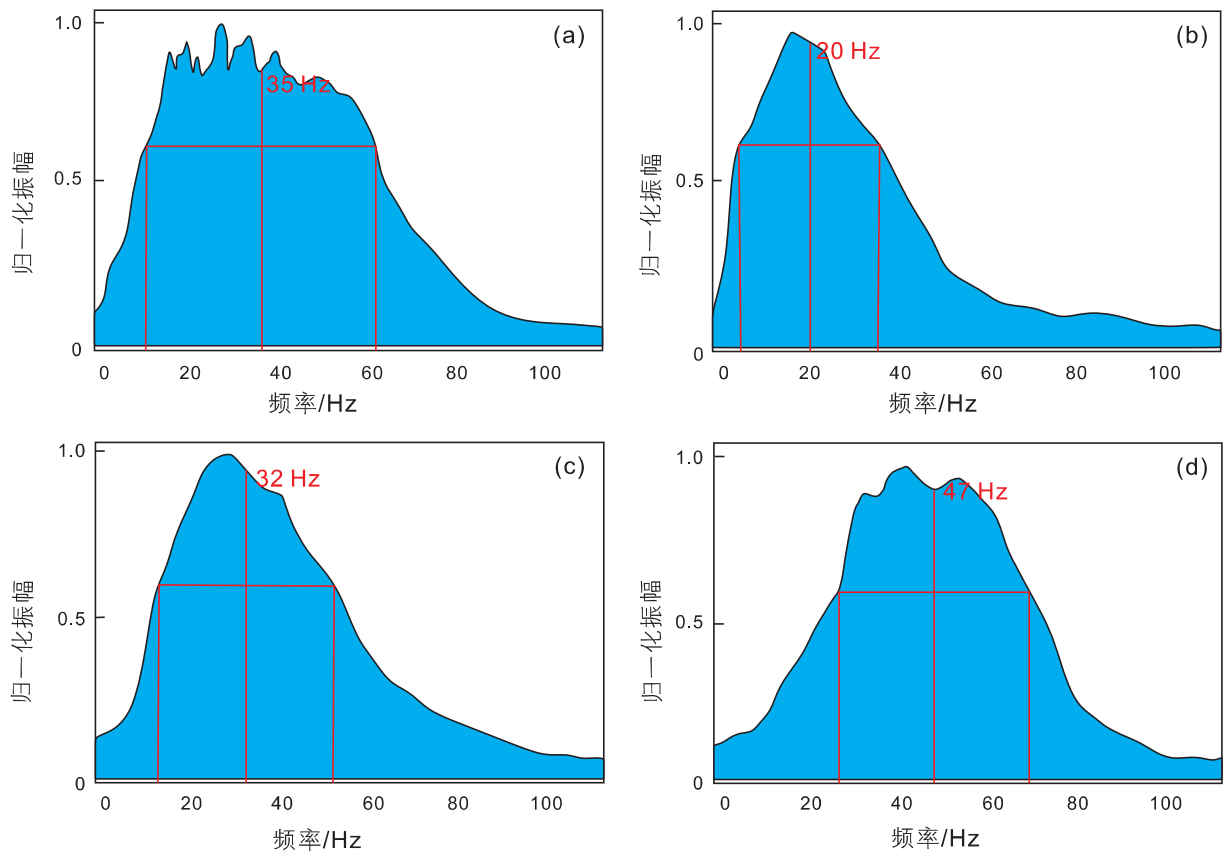


图 4 研究区各地震分频数据体频谱 (a) 原始地震数据频谱图; (b) 低频数据体频谱图; (c) 中频数据体频谱图; (d) 高频数据体频谱图

Fig. 4 Normalized frequency of the original and frequency-decomposed seismic volumes (a) normalized frequency of the original seismic volumes; (b) normalized frequency of the low-frequency FDSV; (c) normalized frequency of the mid-frequency FDSV; (d) normalized frequency of the high-frequency FDSV

表 1 庆城油田南部庄 214 区块延长组第三段 1 砂组原始地震属性与测井解释砂体厚度相关系数

Table 1 Correlation coefficient between original seismic attributes and sand thickness interpreted by well logs of Zhuang214 block in the southern of Qingcheng oilfield

地震属性	总振幅	总谷值振幅	总峰值振幅	平均谷值振幅	平均峰值振幅	最大振幅	最小振幅	均值振幅	均方根振幅	半时间	总能量	平均能量
相关系数	0.62	0.69	0.31	0.48	0.38	0.46	0.36	0.17	0.16	0.31	0.68	0.24

分频数据体中提取总振幅、总谷值振幅、平均谷值振幅属性。以总振幅属性为例(图 6), 与原始总振幅属性相比, 低频属性的分辨率较低, 属性高值区域明显较小, 即高值区多为厚层砂体的响应。高频属性的分辨率较高, 高值区域边界明显向外扩展(对比图 5a 与 6c), 如原始总振幅属性呈现中等幅度值的区域在高频属性中呈现高值特征(图 5a 与 6c 中箭头所示区域), 即高频属性突出了薄层砂体的分布; 但高频属性在厚层砂体区域的属性值降低。中频地震属性介于低频与高频属性之间(图 6b)。总之, 对比原始属性与分频属性可知, 低频属性更好地反映了厚层砂体, 高频属性

分辨率更高, 更好地识别了薄层砂体。

3 智能属性融合与砂体预测

3.1 分频多属性智能融合

分析原始地震属性的分布特征可知, 不同属性的总体趋势相似但细节明显不同(图 5), 有必要综合考虑上述三种属性以充分挖掘地震信息。针对分频地震属性的分析表明, 低频属性有利于刻画厚层砂体而高频属性有利于刻画薄层砂体^[10,12,17,28], 有必要融合不同频率的属性以兼顾不同厚度的砂体预测。鉴于此, 为

表 2 庆城油田南部庄 214 区块延长组第三段 1 砂组部分原始地震属性间相关系数

Table 2 Correlation coefficient between partial original seismic attributes of Zhuang214 block in the southern of Qingcheng oilfield

相关系数	总振幅	总能量	总谷值振幅	平均谷值振幅
总振幅	1	//	//	//
总能量	0.699	1	//	//
总谷值振幅	0.896	0.944	1	//
平均谷值振幅	0.682	0.745	0.795	1

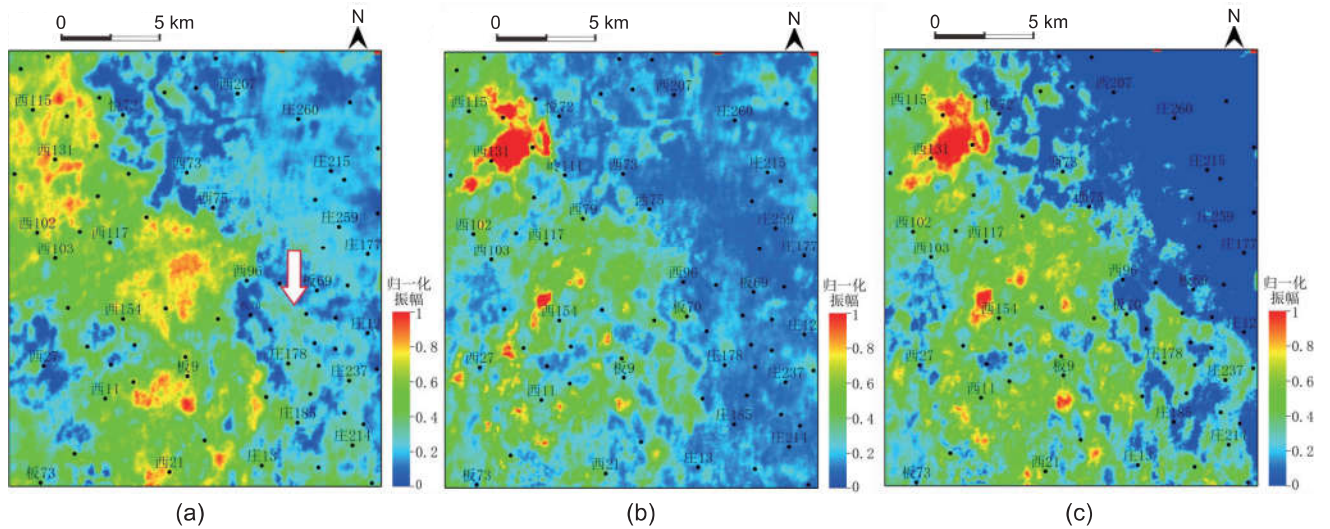


图 5 庆城油田南部庄 214 区块延长组第三段 1 砂组原始地震数据属性平面图 (a) 总振幅; (b) 总谷值振幅; (c) 平均谷值振幅

Fig. 5 Seismic attributes maps of original seismic data (a) sum of amplitude; (b) sum of negative amplitude; (c) average of negative amplitude

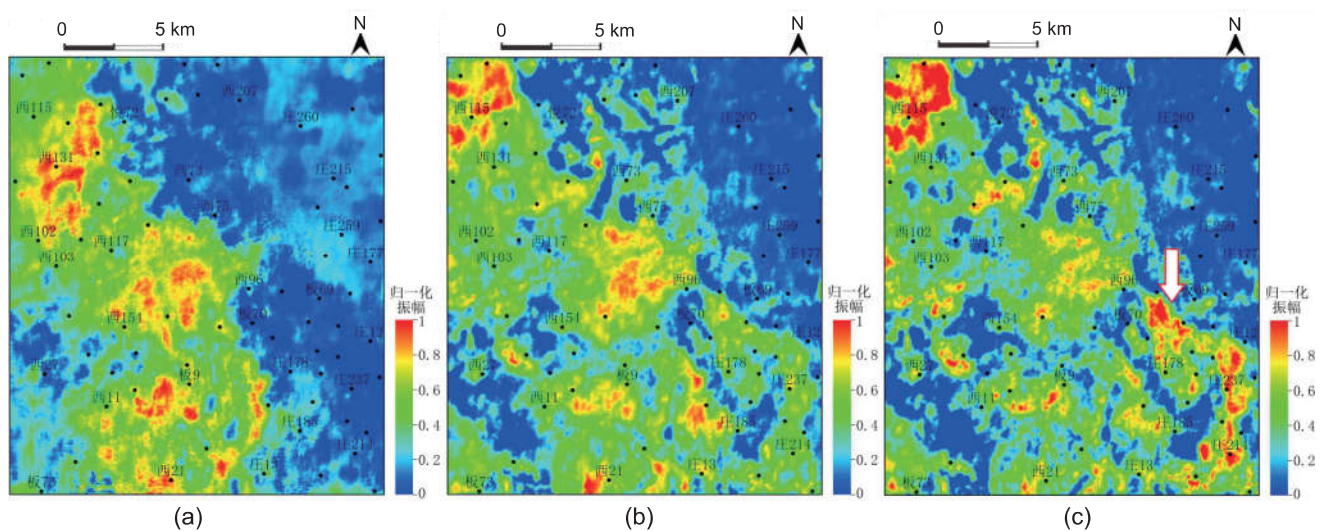


图 6 庆城油田南部庄 214 区块延长组第三段 1 砂组各分频地震数据体总振幅属性平面图 (a) 低频数据体总振幅; (b) 中频数据体总振幅; (c) 高频数据体总振幅

Fig. 6 Sum of amplitude maps of FDSVs (a) sum of amplitude of the low-frequency FDSV; (b) sum of amplitude of the mid-frequency FDSV; (c) sum of amplitude of the high-frequency FDSV

充分挖掘不同种类、不同频率的地震属性信息, 本文提出了分频多属性智能融合方法。本方法可分为五步。

i) 地震分频处理: 将原始的地震数据体分解为低、中、高频地震数据体(图 7A)。ii) 地震属性优选: 以测井

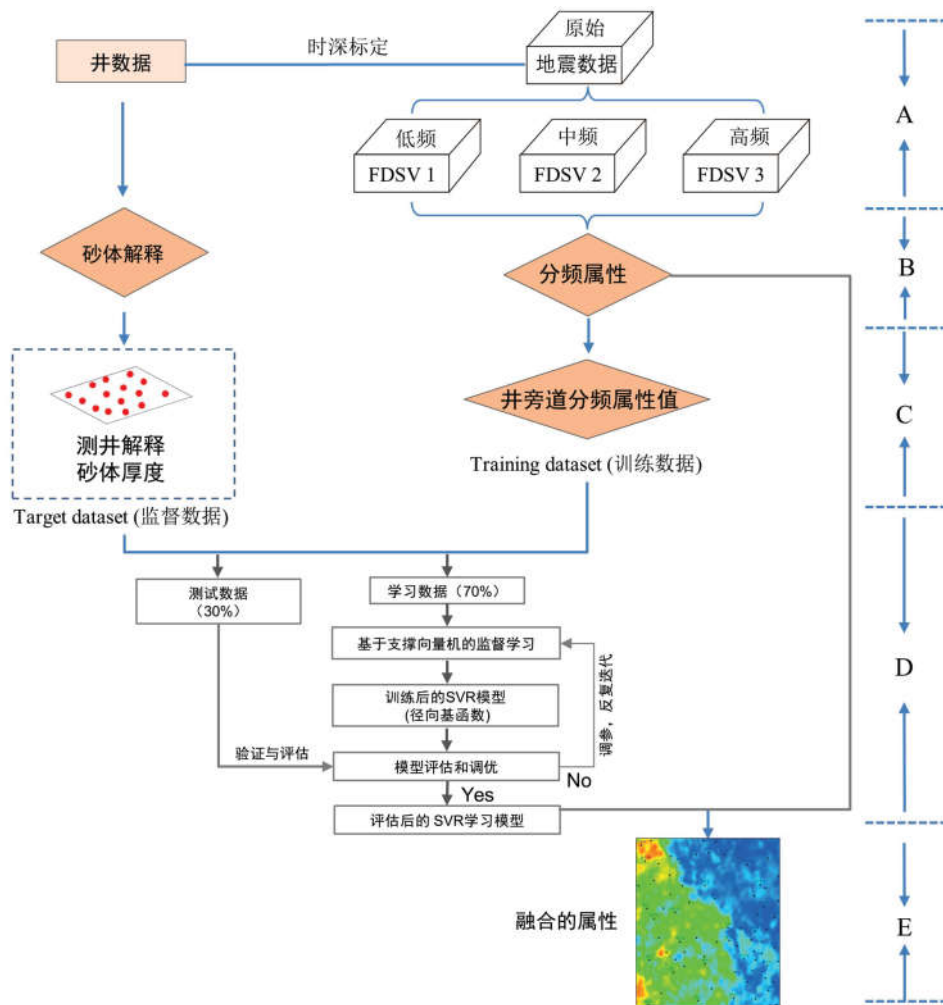


图 7 分频多属性智能融合方法技术流程
 Fig. 7 Workflow of FDSVs data fusion with SVR algorithm

解释的砂体厚度为依据，优选出对研究区致密砂岩最为敏感的 3 种地震属性(图 7B)。前两步地震分频处理与属性优选详见上文。iii) 数据准备：计算井点附近的地震属性值(半径 25 m)，同时根据测井曲线解释各口井的砂体厚度(图 7C)。iv) 机器学习：以测井解释的砂体厚度为监督数据，以井旁道地震属性值为训练数据，采用支撑向量机(SVR)算法进行训练，建立 SVR 模型，其中 SVR 的核函数选取高斯核函数(径向基函数的一种)^[12,29]。学习过程中，预留部分井数据作为检测数据(本文为 25%)，用来评价学习模型的可靠性；如果模型评估达到要求，输出模型；否则调整模型参数，并迭代上述模型评价与调整参数的过程，直到学习结果达到预期效果(图 7D)。v) 智能属性融合：借助学习后的智能模型，对所优选出的地震属性进行融合(图 7E)。由于监督数据为砂体厚度，融合结果能定量反映复合砂体的平面分布(图 8)。相关性分析表明，

分频多属性智能融合结果与致密砂体厚度的相关性明显高于原始地震属性，相关性从 0.60(三种属性相关系数的平均值)提高至 0.79(表 1，图 9)；同时，融合属性与砂体厚度的分布趋势与值域区间基本一致，多数井的误差小于 5 m，所有井的误差基本小于 10 m，识别精度远远高于研究区地震数据的分辨率(1/4 波长，27 m)(图 9)。

3.2 砂体预测与沉积相分析

智能融合属性与砂体厚度具有良好的相关性，即能很好地反映砂体分布趋势与分布特征。因此，本文以测井解释的砂体厚度为依据(硬数据)，以分频多属性智能融合结果(图 8)为趋势面，采用多项式插值算法(Petrel 软件中的 convergent interpolation algorithm)预测研究区目的层的砂体厚度(图 10)。该预测结果既与测井解释的砂体厚度一致，又与智能融合属性的分

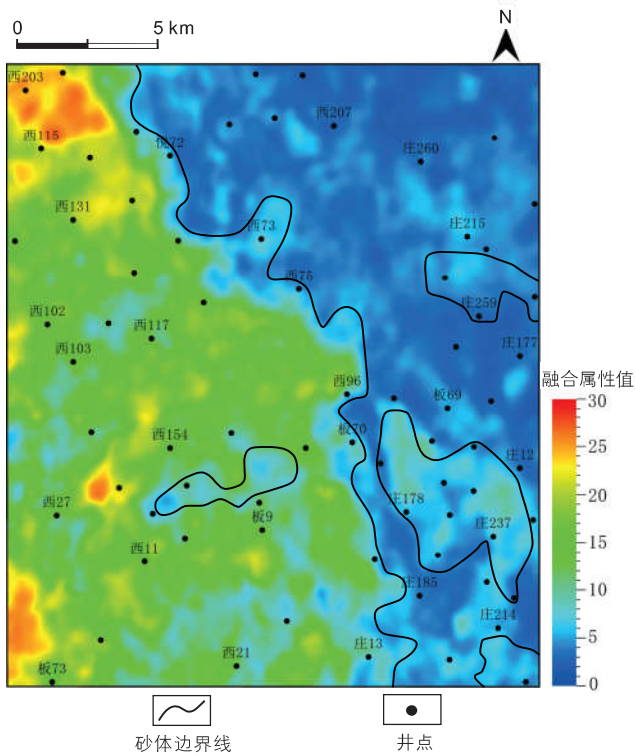


图8 庆城油田南部庄214区块延长组第三段1砂组分频智能融合属性分布图

Fig. 8 Intelligent fusion attribute map of Zhuang214 block in the southern of Qingcheng Oilfield

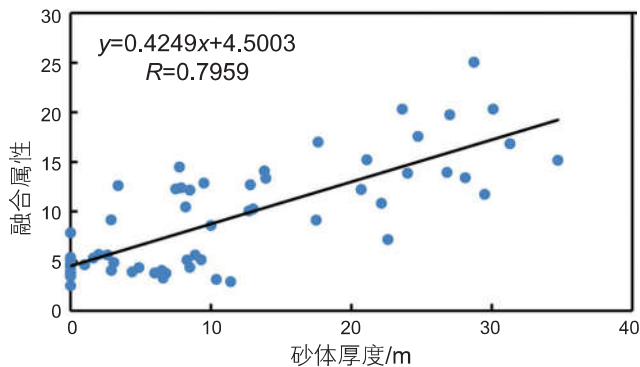


图9 庆城油田南部庄214区块延长组第三段1砂组融合属性与测井砂体厚度相关关系图

Fig. 9 Relationship between intelligent fusion attribute and sand thickness interpreted by well logs

布趋势一致，能够客观的反映目的层致密砂体厚度分布。

研究区庄214区块延长组第三段物源来源于南西方向^[21,25-26]。整体来看，1砂组砂体集中分布于南西近物源区，向北东(远物源方向)砂体厚度逐渐减薄(图10)。微相分析结果表明1砂组主要发育分支水道、朵叶主体、朵叶侧缘、滑塌体与朵叶间/水道间5

种沉积微相类型(图11)。分支水道岩性以细砂岩、粉细砂岩为主，砂体厚度大于2 m，粒度韵律为正韵律，自然伽马曲线呈钟形；朵叶主体岩性以细砂岩和粗粉砂岩为主，砂体厚度大于2 m，粒度韵律为均质韵律或反韵律，自然伽马曲线呈漏斗形或箱型；朵叶侧缘岩性以粉砂岩、泥质粉砂岩为主，砂体厚度1~2 m，无明显韵律性，自然伽马曲线呈指状；滑塌体岩性以细粉砂岩、粉砂岩为主，砂体厚度多小于5 m，无明显韵律性，自然伽马曲线呈指状；朵叶间/水道间岩性以泥岩、粉砂质泥岩为主，自然伽马曲线近泥岩基线^[30]。根据井震结合预测的砂体厚度，结合单井相解释，并在沉积模式^[30]的指导下刻画沉积微相展布(图11)。湖底扇由多个朵叶体复合而成，朵叶主体分布范围最大，呈扇形连片式分布于研究区南西部，朵叶间局部为泥岩沉积；分支水道呈窄条带状，下切发育于朵叶主体之上，顺物源方向树形分叉；朵叶侧缘砂体厚度普遍小于2 m，呈裙带状发育于朵叶主体边缘；滑塌体孤立式分布于湖底扇沉积的前端，由湖底扇失稳滑塌沉积而成，长轴方向近平行于湖底扇前端(图11)。

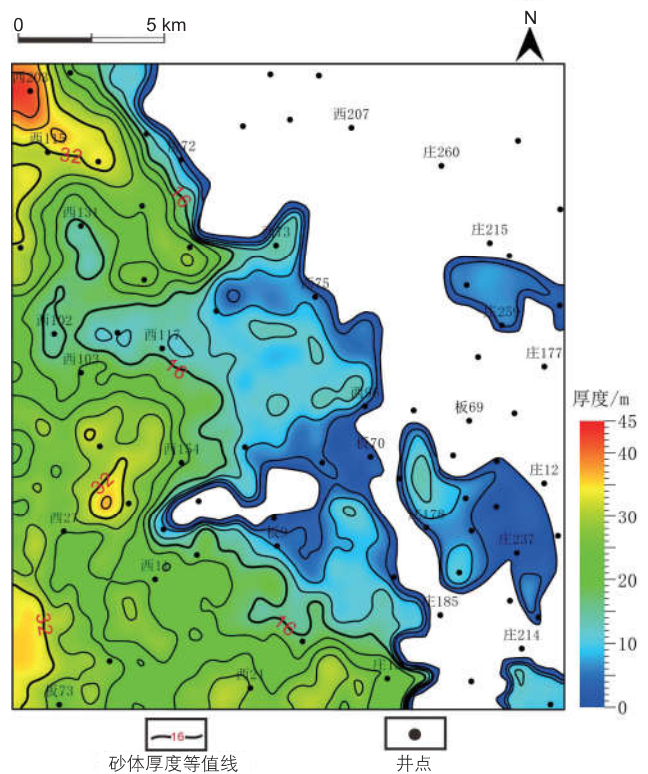


图10 庆城油田南部庄214区块延长组第三段1砂组“井震结合”砂体厚度分布图

Fig. 10 Map of predicted sand thickness of Zhuang214 block in the southern of Qingcheng Oilfield

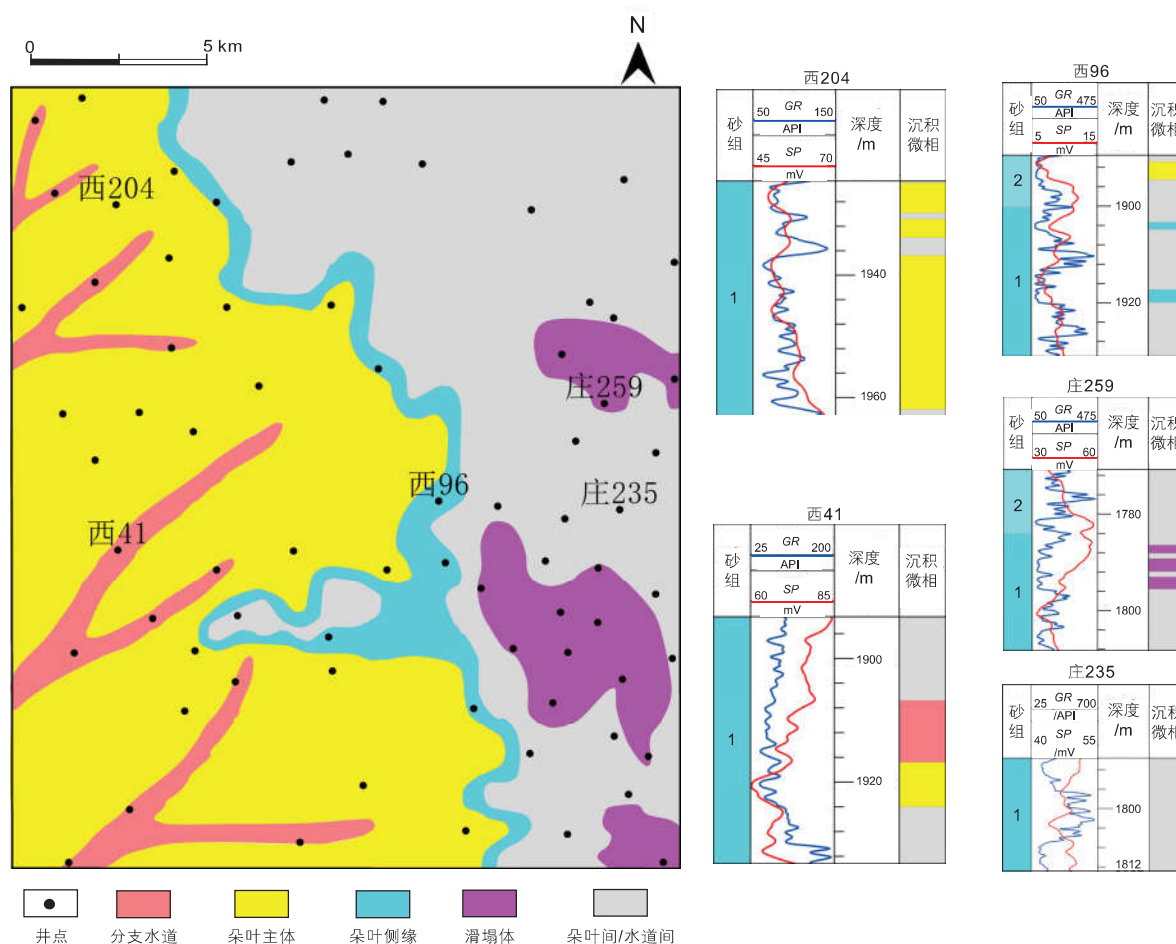


图 11 庆城油田南部庄 214 区块延长组第三段 1 砂组沉积微相平面图

Fig. 11 Map of sedimentary facies of Zhuang214 block in the southern of Qingcheng oilfield

4 结论

(1) 高频地震信息分辨率高，调谐厚度小，适合预测薄层砂体；低频地震信息分辨率低，调谐厚度大，适合预测厚层砂体。综合运用不同频率的地震信息能够兼顾不同厚度的砂体预测，降低了地震砂体预测的多解性。

(2) 采用分频多属性智能融合技术预测致密砂岩储

层分布，在研究区地震资料分辨率 27 m(1/4 波长)的资料条件下，准确识别了 10 m 以上的致密砂体，大幅度提高了储层预测精度。

(3) 庆城油田南部庄 214 区块延长组第三段 1 砂组属于湖底扇沉积，发育分支水道、朵叶主体、朵叶侧缘、滑塌体与朵叶间/水道间 5 种沉积微相类型；南西部近物源区发育扇形的朵叶体沉积，分支水道下切发育于朵叶体之上，东北部砂体以孤立状的滑塌沉积为主。

参考文献

- [1] BRUCE S. Seismic expression of fracture-swarm sweet spots, Upper Cretaceous tight-gas reservoirs, San Juan Basin[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(10): 1519–1534.
- [2] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129–136. [JIA C Z, ZHENG M, ZHANG Y F. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129–136.]
- [3] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2013. [ZOU C N, TAO S Z, HOU L H, et al. Unconventional oil and gas geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.]

- [4] 赵政璋, 杜金虎, 邹才能, 等. 大油气区地质勘探理论及意义[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(05): 513–522. [ZHAO Z Z, DU J H, ZOU C N, et al. Geological exploration theory for large oil and gas provinces and its significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(05): 513–522.]
- [5] CARTER D. 3-D seismic geomorphology: Insights into fluvial reservoir deposition and performance, Widuri Field, Java Sea[J]. AAPG Bull., 2003, 87: 909–934.
- [6] 印兴耀, 周静毅. 地震属性优化方法综述[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40: 482–489. [YIN X Y, ZHOU J Y. Survey of seismic attribute optimization methods[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40: 482–489.]
- [7] 岳大力, 胡光义, 李伟, 等. 井震结合的曲流河储层构型表征方法及其应用——以秦皇岛 32–6 油田为例[J]. 中国海上油气, 2018, 30: 99–109. [YUE D L, HU G Y, LI W, et al. Meandering fluvial reservoir architecture characterization method and application by combining well logging and seismic data: A case study of QHD32–6 oilfield[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30: 99–109.]
- [8] CHOPRA S, MARFURT K. Seismic attributes – a historical perspective[J]. Geophysics, 2005, 2: 3S–28S.
- [9] 钟啥. 地震属性在储层预测中的应用研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018. [ZHONG H. The application of seismic attributes in the reservoir prediction[D]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2018.]
- [10] 李伟, 岳大力, 胡光义, 等. 分频段地震属性优选及砂体预测方法——秦皇岛 32–6 油田北区实例[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52: 121–130. [LI W, YUE D L, HU G Y, et al. Optimization of seismic properties and prediction of sand bodies in different frequency bands: A case study of north QHD32–6 oilfield[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52: 121–130.]
- [11] 岳大力, 李伟, 王军, 等. 基于分频融合地震属性的曲流带预测与点坝识别——以渤海湾盆地埕岛油田馆陶组为例[J]. 古地理学报, 2018, 20: 941–950. [YUE D L, LI W, WANG J, et al. Prediction of meandering belt and point-bar recognition based on spectral-decomposed and fused seismic attributes: A case study of the Guantao Formation, Chengdao oilfield, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2018, 20: 941–950.]
- [12] LI W, YUE D L, WANG W, et al. Fusing multiple frequency-decomposed seismic attributes with machine learning for thickness prediction and sedimentary facies interpretation in fluvial reservoirs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 3: 1087–1102.
- [13] 胡光义, 王海峰, 范廷恩, 等. 海上油田河流相复合砂体构型级次解析[J]. 古地理学报, 2021, 23(04): 810–823. [HU G Y, WANG H F, FAN T E, et al. Analysis of fluvial compound sand-body architecture hierarchy in offshore oil field[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2021, 23(04): 810–823.]
- [14] 苑书金. 地震相干体技术的研究综述[J]. 勘探地球物理进展, 2007, 01: 7–15+11. [FAN S J. A survey of seismic coherence techniques[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2007, 01: 7–15+11.]
- [15] 王彦仓, 秦凤启, 杜维良, 等. 地震属性优选、融合探讨[J]. 中国石油勘探, 2013, 18: 69–73. [WANG Y C, QIN F Q, DU W L, et al. Discussions on optimization and fusion of seismic attributes[J]. China petroleum exploration, 2013, 18: 69–73.]
- [16] LI W, YUE D L, COLOMBERA L, et al. Quantitative prediction of fluvial sandbodies by combining seismic attributes of neighboring zones[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 196.
- [17] YUE D L, LI W, WANG W, et al. Fused spectral-decomposition seismic attributes and forward seismic modelling to predict sand bodies in meandering fluvial reservoirs[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 99: 27–44.
- [18] 宋建国, 高强山, 李哲. 随机森林回归在地震储层预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51: 1202–1211. [SONG J G, GAO Q S, LI Z. Application of random forest regression to seismic reservoir prediction[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51: 1202–1211.]
- [19] LI W, YUE D, WU S, et al. Thickness prediction for high-resolution stratigraphic interpretation by fusing seismic attributes of target and neighboring zones with an SVR algorithm[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 113.
- [20] 王文枫, 岳大力, 赵继勇, 等. 利用地震正演模拟方法研究地层结构——以鄂尔多斯盆地合水地区延长组三段为例[J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(02): 411–418+232–233. [WANG W F, YUE D L, ZHAO J Y, et al. The seismic forward modeling method is used to study the stratigraphic structure: A case study of the third Member of Yanchang Formation in Heshui Area, Ordos Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(02): 411–418+232–233.]
- [21] WANG W, YUE D L, ZHAO J, et al. Diagenetic alteration and its control on reservoir quality of tight sandstones in lacustrine deep-water gravity-flow deposits: A case study of the Yanchang Formation, southern Ordos Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 110.
- [22] 李德生. 重新认识鄂尔多斯盆地油气地质学[J]. 石油勘探与开发, 2004, (06): 1–7. [LI D S. Return to petroleum geology of Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, (06): 1–7.]
- [23] 李慧琼. 陇东地区延长组前积层序及有利储层预测[D]. 西安: 西北大学, 2017. [LI H Q. Progradational sequence and reservoir prediction of Yanchang Formation in Longdong area[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.]
- [24] 惠潇, 侯云超, 喻建, 等. 大型陆相拗陷湖盆深湖区前积型地震地层特征及砂体分布规律——以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组中段为例[J]. 沉积学报, 2022, 40(03): 787–800. [HUI X, HOU Y C, YU J, et al. Progradational seismic strata features and distribution of sandstone in the deep-water area of a large-scale lacustrine depression basin: a case study of the middle Yanchang Formation in

- Longdong, Ordos Basin[J]. *Acta sedimentologica sinica*, 2022, 40(03): 787–800.]
- [25] 刘芬, 朱筱敏, 李洋, 等. 鄂尔多斯盆地西南部延长组重力流沉积特征及相模式[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(05): 577–588. [LIU F, ZHU X M, LI Y, et al. Sedimentary characteristics and facies model of gravity flow deposits of Late Triassic Yanchang Formation in southwestern Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(05): 577–588.]
- [26] 梁晓伟, 鲜本忠, 冯胜斌, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7 段重力流砂体构型及其主控因素[J]. *沉积学报*, 2022, 40(03): 641–652. [LIANG X W, XIAN B Z, FENG S B, et al. Architecture and main controls of gravity-flow sandbodies in Chang 7 member, Longdong area, Ordos Basin[J]. *Acta sedimentologica sinica*, 2022, 40(03): 641–652.]
- [27] 时建超, 屈雪峰, 雷启鸿, 等. 致密油储层可动流体分布特征及主控因素分析——以鄂尔多斯盆地长 7 储层为例[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(05): 827–834+850. [SHI J C, QU X F, LEI Q H, et al. Distribution characteristics and controlling factors of movable fluid in tight oil reservoir: A case study of Chang 7 reservoir in Ordos Basin[J]. *Natural gas geoscience*, 2016, 27(05): 827–834+850.]
- [28] ZENG H. Thickness imaging for high-resolution stratigraphic interpretation by linear combination and color blending of multiple-frequency panels[J]. *Interpretation*. 2017, 5: T411–T422.
- [29] ZAHMATKESH I, KADKHODAIE A, SOLEIMANI B, et al. Estimating V_{sand} and reservoir properties from seismic attributes and acoustic impedance inversion: A case study from the Mansuri oilfield, SW Iran[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018, 161, 259–274.
- [30] 屈雪峰, 王武荣, 谢启超, 等. 坳陷湖盆湖底扇储层单砂体构型——以鄂尔多斯盆地合水地区三叠系长 6 油层组为例[J]. *地球科学与环境学报*, 2021, 43(05): 850–867. [QU X F, WANG W R, XIE Q C, et al. Architecture of sublacustrine fan in a depression lacustrine basin—insights from Triassic Chang 6 oil-bearing interval in Heshui area of Ordos Basin, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, 43(05): 850–867.]

(编辑 付娟娟)