



基于地震融合属性的砂体连通性判断方法

张罗成, 刘怀山, 张志军, 谭辉煌, 赵明鑫, 杨 宸

A method for judging sand body connectivity based on seismic fusion attributes: A case of the Bozhong Sag

ZHANG Luocheng, LIU Huaishan, ZHANG Zhijun, TAN Huihuang, ZHAO Mingxin, and YANG Chen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023011601>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于灰色理论指导的储层构型半定量表征及优质储层预测—以西湖凹陷A构造花港组H3砂层组为例

Semi-quantitative study on reservoir configuration in grey theory—A case study of H3 sand unit of Huagang Formation in A Structure, Xihu Sag

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(6): 162–172

浅地层剖面 and 单道地震测量在海砂勘查中的联合应用

Combined application of sub-bottom and single-channel seismic profiles to marine sand and gravel resource prospecting

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 207–214

渤中凹陷北部古近系底部不整合发育特征及其与油气成藏关系

Development characteristics of the unconformity on the bottom Paleogene in the northern Bozhong Sag and its relationship with hydrocarbon accumulation

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(2): 170–180

渤中19-6凝析气田太古宇潜山储层发育主控因素及地质模式

Archaeozoic buried-hill reservoir of Bozhong 19-6 condensate field: Main controlling factors and development model

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 170–178

东海丽水凹陷西次凹明月峰组海底扇沉积特征及沉积模式

Sedimentary features and depositional model of the submarine fan of Mingyuefeng Formation in the Western Lishui Sag, East China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 22–30

基于同步单波束测深数据的单道地震涌浪静校正方法

Single-channel seismic swell static correction method based on synchronous single-beam echo sounder data

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(4): 181–188



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张罗成, 刘怀山, 张志军, 等. 基于地震融合属性的砂体连通性判断方法——以渤中凹陷中浅层砂体为例 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(6): 195-203.

ZHANG Luocheng, LIU Huaishan, ZHANG Zhijun, et al. A method for judging sand body connectivity based on seismic fusion attributes: A case of the Bozhong Sag[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(6): 195-203.

基于地震融合属性的砂体连通性判断方法 ——以渤中凹陷中浅层砂体为例

张罗成¹, 刘怀山^{1,2}, 张志军³, 谭辉煌³, 赵明鑫¹, 杨宸¹

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

2. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

3. 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:关于渤中凹陷区中浅层明化镇组下段砂体精细化描述的薄互层以及地震、测井资料较少,砂体连通性的判定问题难以解决。基于研究区实际地震、测井和地质资料,根据砂体实际特征建立了对应模型,通过正演模拟技术中的波动方程法验证、优选适合的地震属性。由地震属性分析技术探究出砂体在最小尺度横向距离 $\frac{1}{8}\lambda$ 、纵向叠置 $\frac{1}{6}\lambda$ 的情况下,均方根振幅属性、甜点属性和主频属性在中浅层层段比地震资料判断砂体连通性的效果更好。研究区的 X5 井验证得到,地震融合属性与砂体厚度相关性明显提升,可以定量计算出砂体本身的厚度以及砂体间接接触点的距离,对研究区砂体的连通性起到良好的判定作用。

关键词:正演模拟;地震属性;砂体连通性;渤中凹陷

中图分类号:P631.4; P736

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023011601

A method for judging sand body connectivity based on seismic fusion attributes: A case of the Bozhong Sag

ZHANG Luocheng¹, LIU Huaishan^{1,2}, ZHANG Zhijun³, TAN Huihuang³, ZHAO Mingxin¹, YANG Chen¹

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. The Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Qingdao 266100, China

3. Tianjin Branch of CNOOC (China) Co., Ltd Bohai Petroleum Research Institute, Tianjin 300459, China

Abstract: The fine description of sand bodies in the lower member of the Minghuazhen Formation (Neogene) in the middle and shallow layers of the Bozhong Sag, Bohai Bay, is limited due to thin interbeds and insufficient seismic and logging data, making it difficult to determine the connectivity of sand bodies. Based on the actual seismic, logging, and geological data in the study area, a corresponding model was established based on the actual characteristics of the sand bodies in the study area, and suitable seismic attributes were verified and optimized through the wave equation method in forward modeling technology. By using a minimum horizontal distance of 1/8 of wavelength and a vertical overlap of 1/6 the wavelength, the root mean square amplitude attribute, sweet spot attribute and main frequency attribute were more effective than using seismic data in determining the connectivity of sand bodies in mid-to-shallow layers. According to the verification of Well X5 logging in the study area, the correlation between seismic fusion attribute and sand body thickness was significantly improved, and the thickness of sand body itself and the distance of contact points among sand bodies could be quantitatively calculated, which played a good role in determining the connectivity of sand bodies in the study area.

Key words: forward simulation; seismic attributes; sand body connectivity; Bozhong Sag

渤中凹陷中浅层河道砂发育, 储层纵横向变化快, 平面非均质性强, 夹薄层泥岩。清楚认识砂体连通性是理清油水关系、区分砂泥岩层, 实现研究

区精细开发的关键^[1]。油藏开发后期砂体连通性也会影响注水见效和水淹等^[2]。因此, 砂体连通性的研究对油藏开发有重要意义, 为后期进一步开发提

资助项目: 国家自然科学基金项目“近海底地震海洋学立体探测与成像基础研究”(91958206)

作者简介: 张罗成(1997—), 男, 硕士研究生, 海洋地球物理勘探研究, E-mail: 1076046322@qq.com

通讯作者: 刘怀山(1962—), 男, 博士, 教授, 海洋地球物理勘探数据采集研究, E-mail: lhs@ouc.edu.cn

收稿日期: 2023-01-16; 改回日期: 2024-04-06。 张现荣编辑

供依据。砂体连通性最早被定义为基于沉积成因上的连通概率^[3]。20 世纪 80 年代以来,国内外出现多种判定砂体连通性方法,包括传统的沉积相分析法、RTF 测井及曲线法、地震属性反演法、示踪剂类的地球化学法、井间分析油藏工程法等^[4-5]。

地震属性相较于原始地震数据对储层、流体特征的变化反应更加敏感,可揭示隐藏的信息,适合储层预测和特征描述等^[6],为油气勘探开发的提供重要依据^[7]。随着地震属性分析技术方法成熟,其可被广泛应用于砂体连通性判断以及储层预测^[8]。韩红涛等^[9]利用相干能量梯度属性刻画砂体具体形态,优选合适的地震属性并匹配地质信息提高准确性;冯金义等^[10]通过时频分析沿层提取瞬时振幅属性切片检测砂体展布空间和连通性;刘传奇等^[11]利用地震属性中的聚类分析技术,以测井资料和地层切片相结合的方式成功描述了砂体的连通性;周连敏等^[12]优选均方根振幅和倾角方位属性实现了曲流河侧积体分布的预测;安鹏等^[13]以地质甜点为基础,在对地震相带进行划分之后,优选了敏感地震属性实现河道砂的刻画;井涌泉等^[14]基于地震属性预测了河流相砂岩叠置特征;印兴耀^[15]、季玉新^[16]、李娟^[17]等通过交汇图、不同属性间的相关分析优选敏感地震属性。

前人研究表明,地震单一属性能突出地质体的某种响应特征^[18],但同时会削弱或忽略其他方面的信息,整体反映不够全面^[19],另外,地震单一属性解释还存在多解性等问题^[20]。单一地震属性判定方法有一定的限制,无法完全匹配研究区较为复杂的储层情况,为了解决渤中凹陷中浅层研究区砂体连通性判定问题,由实际工区的统计参数对砂体纵横向不同叠置情况进行基于波动方程的正演模拟,验证和优选出适合的地震属性。通过地震属性分析得到的均方根振幅、甜点和主频等属性在识别砂体连通性的分辨率比地震资料更高。经过盲井 X5 验证表明,该融合属性能有效判定渤中凹陷中浅层砂体的展布并能定量计算砂体本身及砂体间接触点的厚度,为渤中凹陷中浅层砂体连通性的判定提供依据。

1 区域概况

渤海湾盆地的地层以前新生代地层为基底,发育古近纪、新近纪和第四纪的地层,相对而言地层比较完整^[21],其中,渤中凹陷是由多幕伸展发育而成的盆地^[22]。如图 1 所示,研究区所在的渤中凹陷

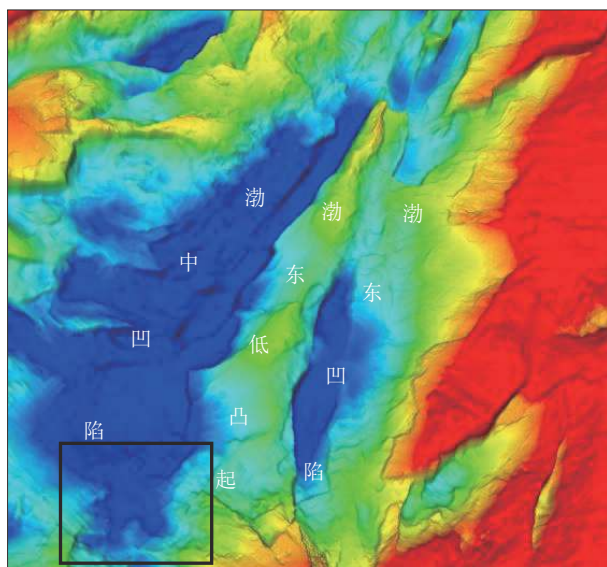


图 1 渤中凹陷区域位置

Fig.1 Location of the Bozhong Sag

东南环新近系目的层位于明化镇组下段,面积约 300 km²。物源主要来自于东部的河流相沉积,粒度较细,大部分为细砂岩和粉砂岩,河道砂体呈 SW-NE 向展布。研究区已发现的油藏主要分布在明化镇组和馆陶组,储层垂向上砂体互相叠置,砂体含量为 25%~60%,单层厚度普遍为 0.5~11.9 m,储层物性好,是高孔高渗型储层。油气在围绕渤中凹陷凸起和低凸之上分布较多,主要在新近系的明化镇组和馆陶组发育^[23]。该地区油气藏储层埋藏深度较浅,集中在 850~1 500 m,主要在新近系的明化镇组下段和馆陶组发育。此浅层区地层为河流—冲积扇沉积,以 2~8 m 的砂泥岩薄互层发育为主,储层纵横向变化快,平面非均质性强,夹薄层泥岩。浅层河道砂发育,整体连续性差,砂体间叠置关系较为复杂,很难区分砂体形态、边界和连通性。此外,研究区井网稀疏,浅层区河流相成藏规律不明显,这进一步增加了对砂体连通性的判定难度。

2 砂体地震属性特征

2.1 地震属性分析

地震属性是对地震数据进行数学变换后描述地震波在几何学、动力学和统计学方面特征的特殊度量,能对储层结构、物性和岩性等进行描述。地震属性可分为 4 类:相位属性、振幅属性、吸收衰减属性和频率属性^[24]。

(1) 振幅类属性

振幅类属性能反映地质体中地层厚度、波阻抗

以及流体性质等变化。可以分析层序特征、识别异常振幅等。

(2) 频率类属性

频率属性主要反映地层岩性、厚度以及含流体成分的变化,可以识别出上覆地层出现异常现象以及微小的频率改变。

(3) 相位类属性

储层中的薄互层组合以及流体含量的变化,通常会造成含油气地质体的相位出现明显变化,因此相位类属性可以反映薄互层的特征,同时也可作为油气检测的重要指标。

(4) 吸收衰减类属性

地震波的吸收衰减是一种广泛应用的地震属性,是进行地下地质体精确描述和油气预测的关键技术手段。

2.2 砂体正演优选地震属性

正演模拟技术根据已有的地震资料和测井资料建立简化模型。基于地震波在地下介质中的传播规律来模拟其具体的传播过程。波动方程法正演模拟是在求解对应地震波动方程时,通过有限差分法等进行波动方程近似,取一定的时间步长迭代出波场特征。其能准确表征出地震波的频率、振幅以及相位的变化,真实反映地震波的动力学特征^[25]。因此,通过高质量的波动方程偏移的正演模拟技术

进行相关砂体连通性的研究是切实可行的。而对不同工区的不同储层进行地震属性反应对象特征时,同一个地震属性的敏感性会不同;在测定同一地质体时,同一类别的众多地震属性特征往往相似,不同类别的地震属性间会表现不同的敏感程度。因此,通过正演模拟验证并优选出适合渤中凹陷中浅层研究区的地震属性类型,应用地震属性分析技术判定研究区砂体连通性。

统计研究区中浅层目的层段单个砂体的长度、厚度以及薄互层间隔距离等信息,选取参数建立适合的正演模型。如图 2—4 所示,取子波主频为 35 Hz、波长 $\lambda=70$ m、单个砂体长度 120 m、厚度 30 m。通过前期实验探究,选择两个砂体模拟连通性并与地震资料原始振幅进行对比分析,横向距离分别为 0、5.5、7.5 和 8 m,纵向叠置分别为 12、12.5 和 30 m,选择的地震属性分别为均方根振幅、主频、甜点、瞬时频率、瞬时相位和声波阻抗属性。

对砂体纵向叠置 12 m,横向距离分别为 0、5.5、7.5 和 8 m 进行正演模拟和地震属性分析,对比得到不同尺度下地震资料原始振幅与地震属性对砂体连通性的分辨率(图 2)。当两个砂体纵向叠置 12 m,横向距离为 0 m 时,地震数据原始振幅和均方根属性均无法判定砂体的连通性;由主频属性的轴位置可以判定砂体为不连通状态,但砂体上下层都有较小的干扰;而甜点属性可以很好地判定出此处砂体

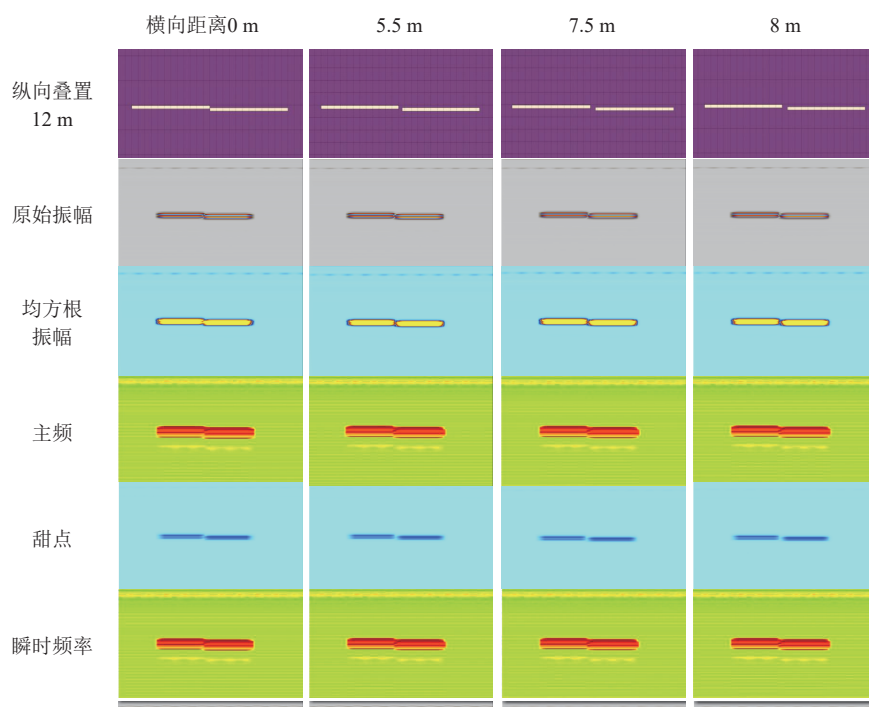


图 2 纵向叠置 12 m 地震属性分析效果对比图

Fig.2 Comparison in seismic attribute analysis results of 12 m vertical overlay

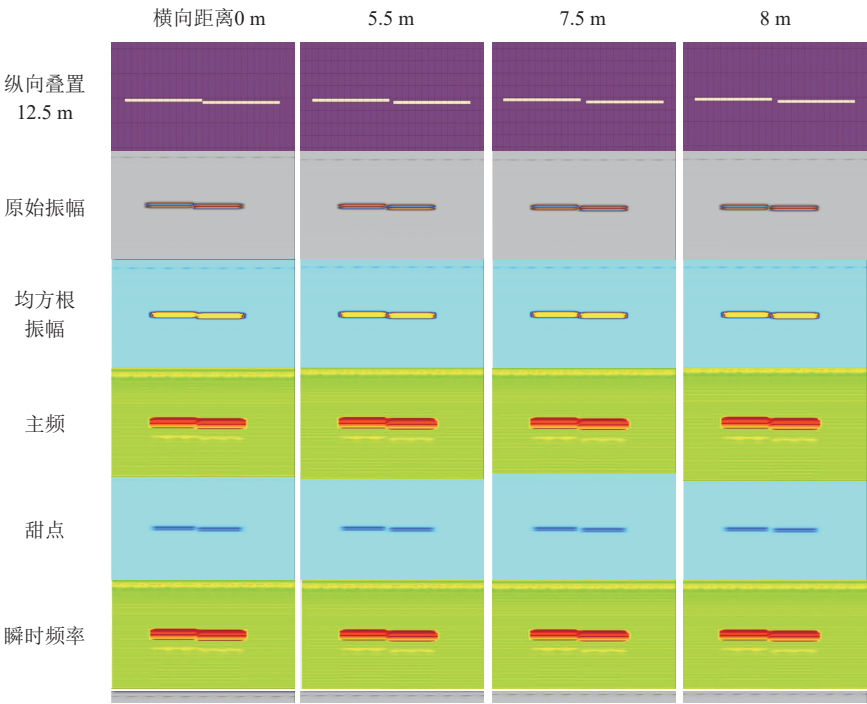


图 3 纵向叠置 12.5 m 地震属性分析效果对比图

Fig.3 Comparison of seismic attribute analysis results of 12.5 m vertical overlay

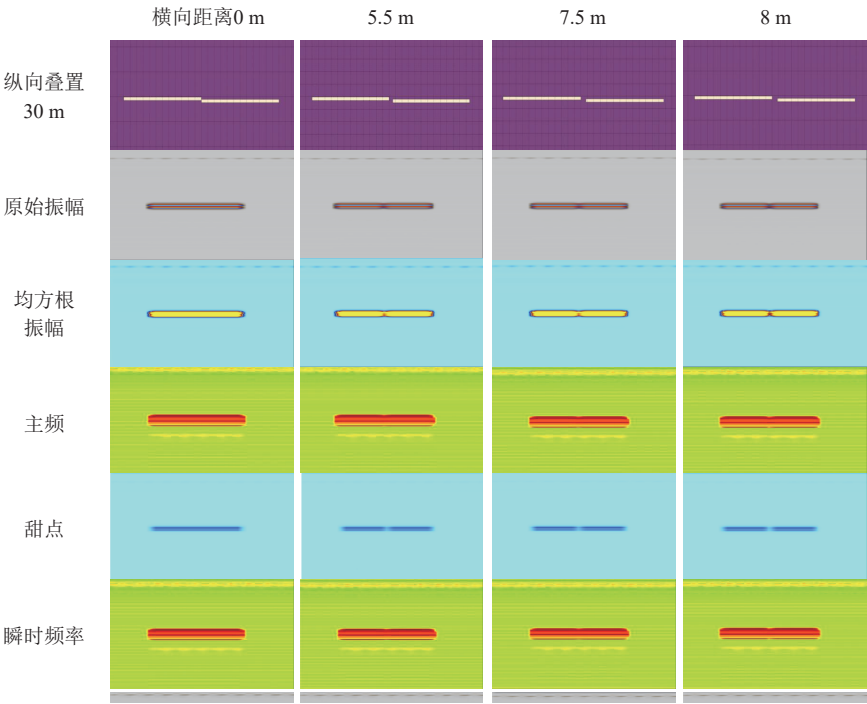


图 4 纵向叠置 30 m 地震属性分析效果对比图

Fig.4 Comparison of seismic attribute analysis results of 30-m vertical overlay

为不连通状态。

对砂体纵向叠置 12.5 m, 横向距离分别为 0、5.5、7.5 和 8 m 进行正演模拟和地震属性分析, 对比得到不同尺度下原始振幅与地震属性对砂体连通性分辨率(图 3)。在纵向叠置 12.5 m, 横向距离分

别为 5.5、7.5 和 8 m 的时候只有均方根振幅属性、甜点属性以及主频属性能判定出砂体为不连通状态, 其余情况都无法判定砂体的连通状况。

对砂体纵向叠置 30 m, 横向距离分别为 0、5.5、7.5 和 8 m 进行正演模拟和地震属性分析, 对比得到

不同尺度下原始振幅与地震属性对砂体连通性分辨率(图4)。当两个砂体纵向叠置30 m,横向距离为8 m时,地震数据原始振幅和主频属性均无法判定砂体的连通性;均方根振幅属性和甜点属性可以很好地判定出此处砂体为不连通状态。

综上所述,由以上正演模拟结合地震属性分析可得,在渤中凹陷中浅层研究区储层砂体连通性判定时,通过均方根振幅属性、甜点属性和主频属性能够判定的最小尺度是砂体横向距离 $\frac{1}{8}\lambda$ 、纵向叠置 $\frac{1}{6}\lambda$,其分辨率高于地震资料原始振幅和其他地震属性。

3 地震融合属性判定砂体连通关系

一种属性只表示储层一个或几个特征参数的地球物理响应,只适用于储层某一特征的预测,并不能反映储层整个性质特征。因此,地震属性反应地质体特征存在针对性,从另一方面也揭示了地震属性预测具有一定的局限性。地震属性融合技术是一种通过数学运算与分析,将合适的多种地震属性进行融合,综合地震属性各自的物理或统计学意义反映出更加全面、准确的地质体信息与特征^[26]。通常在河流相储层中,这种多属性综合、属性融合技术是广泛应用的改善单一类地震属性局限、减少多解性的重要方法。其本质是去除冗杂、重复信息,融合有效信息。

为了最大程度地克服使用单一属性的局限性,采用地震多属性融合技术反映地质目标,判定砂体连通性。在众多类别的地震属性中选出有效的、能提供准确信息的属性进行储层特征的研究,优选出匹配的、敏感的地震属性及其组合,计算砂体本身及接触点的厚度、刻画储层平面展布特征,判定砂体连通性。

3.1 地震融合属性优选

对于研究区所处的渤中凹陷中浅层砂体,通过以上正演模拟验证,优选出能够较好反映该区砂体特征的6种适合的地震属性,以定量化方式对优选属性进行按相关性比重进行融合,得到相关性更高的地震融合属性,计算出砂体本身以及接触点的厚度来判断砂体连通性。

(1) 属性优选

通过应用相关度公式(1),可以定量计算单个属性的预测精度,从而确定各个单层属性与层段厚度之间的关系。为了优化储层敏感参数,可以选择相

关度较高的属性进行地震融合属性优选^[27]。

$$A(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}[X] \times \text{Var}[Y]}} \quad (1)$$

式中, $A(X, Y)$ 是各单属性与对应储层厚度的相关度; $\text{Cov}(X, Y)$ 是各单属性与对应层段厚度的协方差; $\text{Var}[X]$ 和 $\text{Var}[Y]$ 分别是各单属性与对应层段厚度的方差。在优选时还要考虑其地质成因、形态特征和宏观规律,对其属性进行综合考量,以确保最佳的选择。

(2) 融合权重计算

基于优选出的地震属性,利用公式(2)计算出形成的融合属性中每个单属性权重。

$$B_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2)$$

式中, B_i 是属性融合中每个单属性权重; A_i 是每个单属性的相关度; n 是融合的单属性总数。

(3) 融合属性定量评价

为了消除不同单属性之间量纲差别的影响,计算出各单属性权重后,通过公式(3)将各单属性归一化,由得到的各单属性的权重系数 B_i 组合计算得到地震属性融合后的属性图。

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3)$$

式中, X_{norm} 是地震属性归一化后的值; X 是原各自地震属性值; $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 分别是原地震属性的最大值和最小值。

3.2 地震融合属性判定砂体连通方法

砂体连通性的判定在一定意义上可以通过纵向上两个砂体在连接点处的砂体厚度是否为0来进行判定。地震融合属性可判定渤中凹陷中浅层研究区储层中某一点的砂体厚度,为砂体连通性的综合判定提供了依据。

为了优选能反映研究区该目的层段有效信息的地震属性,经过正演模拟验证及优选部分适合研究区的地震属性,从中提取了多种单一属性进行地震资料解释,使其能够与部分已知砂体的测井、地震等资料吻合。对研究区该目的层段,利用多种地震属性融合的方式以获得与储层砂体厚度相关性较好的地震属性,从测井数据出发,统计测井上不同砂体厚度的属性值,对其与地震属性值进行交汇分析。根据公式进行相关性分析,得出相关性高的地震属性,主要有均方根振幅、甜点和主频这三种地震属性,以此进行属性融合。计算这三种属性对应权重系数,统一量纲,算出融合属性的相关系数。

根据公式 (1) 计算得到均方根振幅、主频、瞬时频率、瞬时相位、甜点和声波阻抗属性的相关系数分别为 0.7288、0.6615、0.4048、0.4663、0.6285 和 0.5073。如图 5、6 所示,随着砂体厚度的增加,瞬时相位的属性值反而降低;瞬时频率属性在此储层中对地层厚度变化的统计规律较为分散,特征不明显;波阻抗属性在整个储层中对地层厚度的区分性较差,无法进行定量储层砂体厚度判定,且这三个地震属性总体相关性较差。综合考虑,结合相关系数排序,选择相关系数高于 0.6,结合正演模拟的验证及优选结果,选择均方根振幅、甜点和主频属性作为研究区的敏感属性;由公式 (2) 对均方根振

表 1 优选属性融合权重统计表

Table 1 Statistics in the weight of priority attribute fusion			
属性类型	均方根振幅	主频	甜点属性
相关系数 R	0.7288	0.6615	0.6285
融合权重	0.361	0.3277	0.3113

幅、甜点和主频属性确定属性权重分别为 0.361、0.3277 和 0.3113(表 1);通过公式 (3) 将各单属性归一化,进行加权属性融合,如图 7 为融合属性图。

通过融合属性与砂岩厚度交汇分析得到二者的对应关系(图 8),进而计算储层中砂岩厚度。对

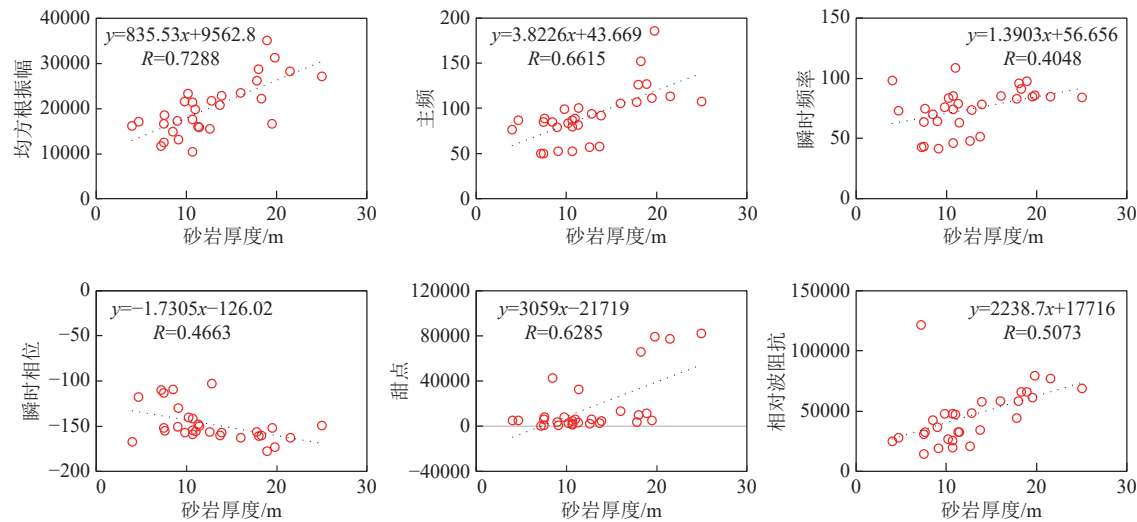


图 5 单属性与砂岩交汇图

Fig.5 Intersection of single property and sandstone

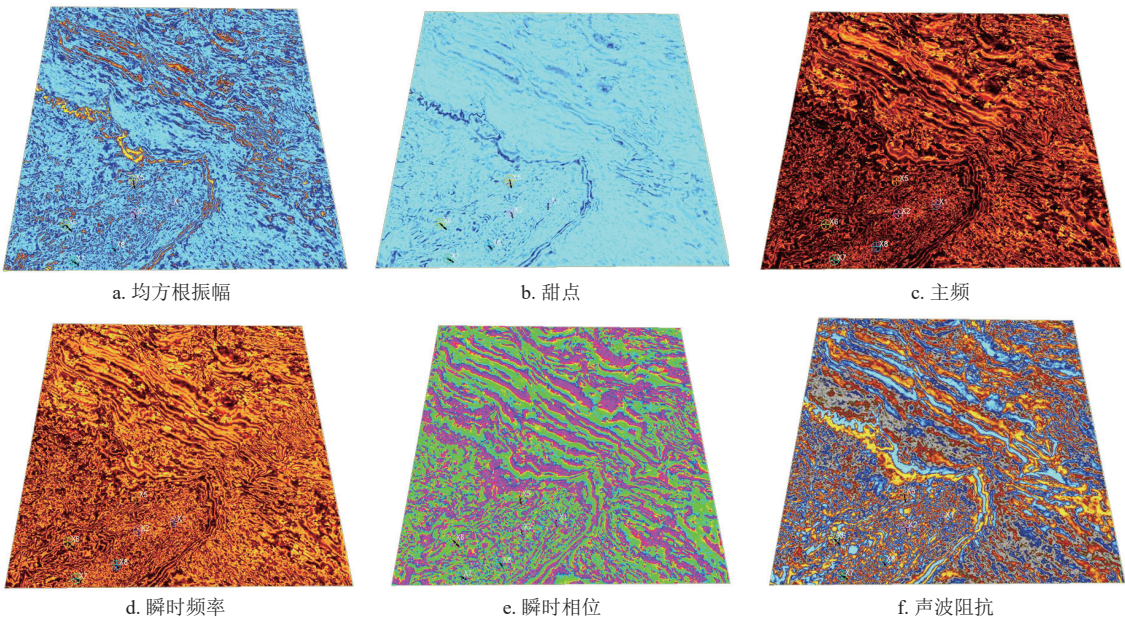


图 6 单属性平面图

Fig.6 Planar pictures of a single attribute

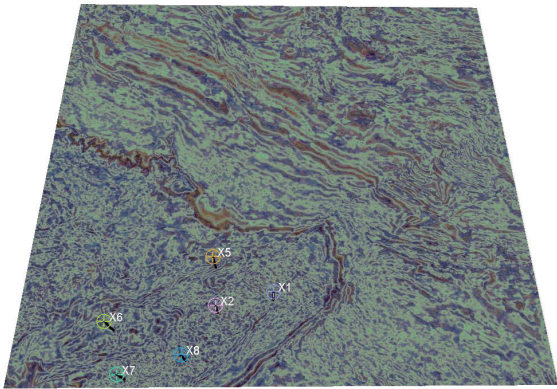


图 7 融合属性平面图

Fig.7 Planar picture of a fused attribute

以上三种研究区的敏感属性进行地震属性融合后得到的属性值与储层中砂体厚度的相关系数提升到了 0.7779, 预测精度明显提高。

4 地震多属性融合应用效果分析

经敏感属性融合后, 对研究区盲井 X5 进行融合属性效果验证。在深度域 1 170~1 300 m, 由 X5 解释结论可以得到该区域有较厚的 7 个砂体层(图 9)。

在均方根振幅中, 第 1、2、5、6 和 7 层砂体层区分较为明显, 整体对应较好(图 10b)。但是第 3 层所处的薄层砂体没有呈现出来, 且第 5 层薄层砂体的厚度显示较小。

在甜点属性中, 整体 7 个砂体层有一定的对应, 但是敏感性相对较差, 区分度不足(图 10c), 无法对单一砂体厚度进行准确定量计算。

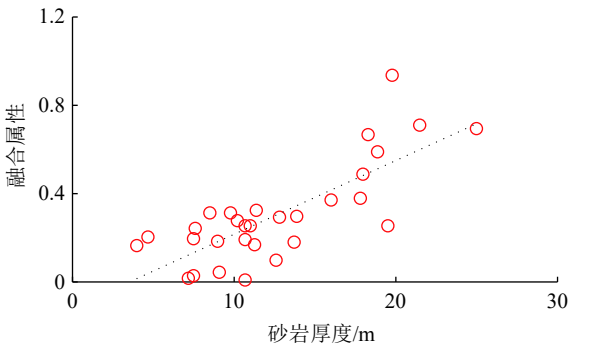


图 8 融合属性与砂岩厚度交汇图

Fig.8 Plot of fusion properties vs sandstone thickness

在主频属性中, 整体 7 个砂体层都有较好的对应(图 10d), 但是上下层之间存在干扰, 层与层之间有多余层的干扰, 展布有些混乱, 整体区分度不是特别明显, 准确计算每一个对应层的厚度较难。

在均方根振幅、主频和甜点属性按照相关性比重得到的融合属性中, 明显可以看出 7 个砂体层都与 X5 解释结论对应较好(图 10a), 且在范围内可以清晰地反映出砂体的边界和展布特征, 能清晰呈现第 3 层薄层, 第 4 层薄层的厚度也更贴近真实值。借助得到的融合属性公式对于砂体的厚度也能进行准确的定量计算(表 2)。

综上, 借助地震融合属性可以提高渤中凹陷中浅层研究区的砂体在横向上的分辨率, 清晰地刻画出储层砂体的边界和展布特征, 满足对储层进行精细化描述的要求。借助对砂体本身以及砂体间接触点厚度的精准计算完成了研究区目的层段砂体间连通性的判定。

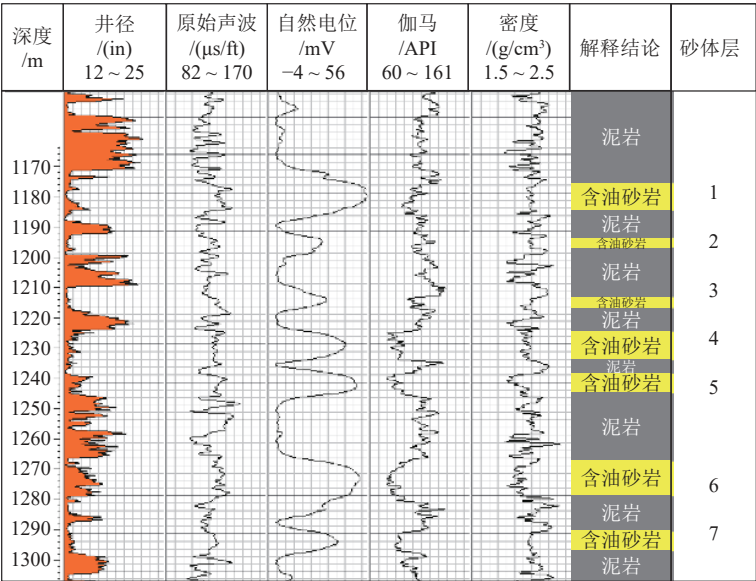


图 9 研究区 X5 井曲线图

Fig.9 Logging of Well X5 in the study area

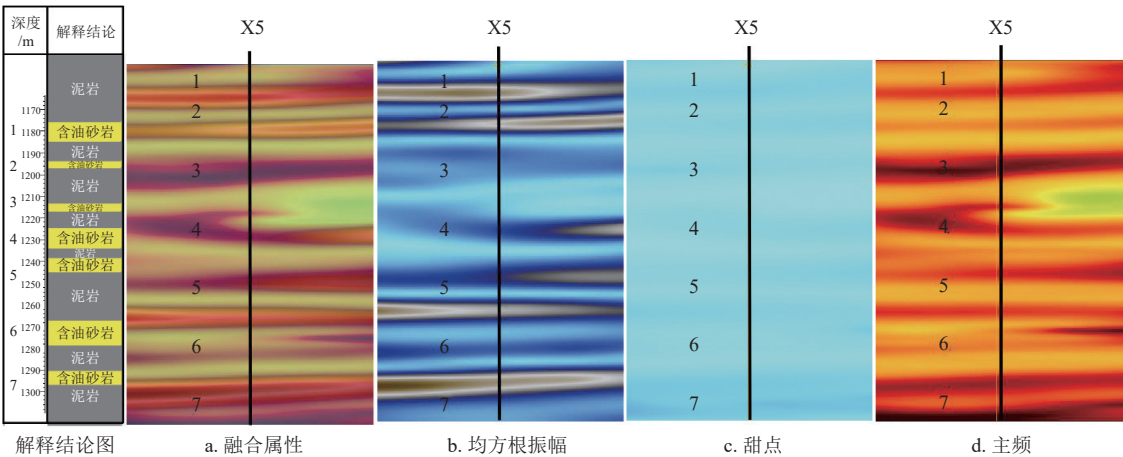


图 10 X5 井解释结论与单属性、融合属性对比图

Fig.10 Interpretation conclusion of Well X5 and the comparison with single attribute and fusion attribute

表 2 融合地震属性与砂岩厚度数据关系表

Table 2 Relationship between fusion of seismic attributes and sandstone thickness

砂体层	砂岩厚度/m	融合属性		
		预测厚度/m	绝对误差/m	相对误差
1	7.2	6.5	-0.7	0.097
2	2.4	2.9	0.5	0.208
3	2.9	2.3	-0.6	0.207
4	7.5	8.2	0.7	0.093
5	5.2	3.9	-1.3	0.25
6	9.1	8.2	-0.9	0.099
7	5	6.2	1.2	0.24

5 结论

(1)通过基于波动方程的正演模拟验证及优选适合的地震属性,对渤中凹陷浅层研究区地震勘探可得,在最小尺度砂体间横向距离 $\frac{1}{8}\lambda$,纵向叠置 $\frac{1}{6}\lambda$ 的情况下可以由地震属性准确判断砂体的连通情况。提高了储层描述的分辨率,证明地震属性判定砂体连通性在渤中凹陷中浅层具有一定的可行性。

(2)通过砂体厚度与多种地震属性的交汇分析、公式计算以及相关系数对比,优选出相关性高的 3 种地震属性,分别为均方根振幅、甜点和主频属性。按照相关性比重进行地震属性融合,计算出融合属性的公式与相关系数,可得融合后的地震属性与砂体厚度的相关性明显升高,有助于对储层砂体边界及展布的精细刻画。

(3)通过研究区 X5 井盲井验证与砂体厚度计算,得到的地震融合属性能较好地反映出渤中凹陷中浅层薄互层砂体的展布以及厚度,与实际砂体位置以及厚度符合率较高。通过地震融合属性得到的公式也能定量计算出砂体本身以及砂体间接触点的厚度,对研究区砂体的连通性起到良好的判定作用。

参考文献 (References)

[1] 梁文富,余兴华,贾春雨,等.完善单砂体注采关系的做法及效果[J].大庆石油地质与开发,2002,21(3):38-40,51.[LIANG Wenfu, YU Xinghua, JIA Chunyu, et al. Comprehensive use of pattern to improve the injection-production relation of single sand body [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2002, 21 (3): 38-40,51.]

[2] 斯扬.姬塬油田盐67区长8储层连通性研究[D].西安石油大学硕士学位论文,2015.[SI Yang. Research on reservoir connectivity of Chang 8 Reservoir in Yan 67 area, Jiyuan oilfield[D]. Master Dissertation of Xi'an Shiyou University, 2015.]

[3] Fielding C R, Crane R C. An application of statistical modelling to the prediction of hydrocarbon recovery factors in fluvial reservoir sequences[M]//Ethridge F G, Flores R M, Harvey M D. Recent Developments in Fluvial Sedimentology. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1987.

[4] 林伟强,曲丽丽,朱露,等.井震结合判定井间砂体连通性研究及应用:以南堡油田M区中深层为例[J].油气藏评价与开发,2022,12(2):373-381.[LIN Weiqiang, QU Lili, ZHU Lu, et al. Evaluation of inter-well sand body connectivity by combination of well, seismic, and reservoir and its application: Taking the middle and deep layers of M area of Nanpu Oilfield as an example [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12 (2): 373-381.]

[5] 张钊,陈明强,高永利.应用示踪技术评价低渗透油藏油水井间连通关系[J].西安石油大学学报:自然科学版,2006,21(3):48-51.[ZHANG Zhao, CHEN Mingqiang, GAO Yongli. Estimation of the

- connectivity between oil wells and water injection wells in low-permeability reservoir using tracer detection technique [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2006, 21(3): 48-51.]
- [6] 刘文岭, 牛彦良, 李刚, 等. 多信息储层预测地震属性提取与有效性分析方法[J]. 石油物探, 2002, 41(1): 100-106. [LIU Wenling, NIU Yanliang, LI Gang, et al. Seismic attribute extraction and effectiveness analysis of multi-attribute reservoir prediction [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002, 41(1): 100-106.]
- [7] 王开燕, 徐清彦, 张桂芳, 等. 地震属性分析技术综述[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 815-823. [WANG Kaiyan, XU Qingyan, ZHANG Guifang, et al. Summary of seismic attribute analysis [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(2): 815-823.]
- [8] Chopra S, Marfurt K J. Emerging and future trends in seismic attributes [J]. *The Leading Edge*, 2008, 27(3): 298-318.
- [9] 韩红涛, 贾敬, 李慧琳, 等. 应用GeoEast解释系统中的地震属性技术预测生物礁滩[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(S1): 160-163. [HAN Hongtao, JIA Jing, LI Huilin, et al. Organic reef and bank prediction with seismic attribute approaches provided by GeoEast [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(S1): 160-163.]
- [10] 冯金义. 时频分析技术识别河道砂体在埕海一区明化镇组中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2016, 36(6): 31-32. [FENG Jinyi. Application of time-frequency analysis technique to identify channel sand body in Minghuazhen formation in Chenghai No. 1 District [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2016, 36(6): 31-32.]
- [11] 刘传奇, 宋俊亭, 薛明星. 边缘检测技术在砂体连通研究中的应用[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(2): 844-850. [LIU Chuanqi, SONG Junting, XUE Mingxing. Application of edge detection technology in sand connectivity research [J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(2): 844-850.]
- [12] 周连敏. 倾角方位属性在曲流河河道砂体预测中的应用[J]. 断块油气田, 2017, 24(4): 471-473. [ZHOU Lianmin. Application of DipAzi attribute to predicting channel sandstone of meandering river [J]. Fault-block Oil and Gas Field, 2017, 24(4): 471-473.]
- [13] 安鹏, 刘专, 马云海, 等. 基于地质甜点的地震相控敏感属性分析技术在河道砂体识别中的应用[C]//中国石油学会2021年物探技术研讨会论文集. 成都:《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司, 2020. [AN Peng, LIU Zhuan, MA Yunhai, et al. Application of seismic phase-controlled sensitive attribute analysis technique based on geological sweet spot in channel sand body identification [C]. Chengdu: China Academic Journal (CD) Online magazine Co., Ltd, 2020.]
- [14] 井涌泉, 栾东肖, 张雨晴, 等. 基于地震属性特征的河流相叠置砂岩储层预测方法[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(5): 1049-1058. [JING Yongquan, LUAN Dongxiao, ZHANG Yuqing, et al. Fluvial facies inter-bedded sand reservoir prediction with seismic multi-attributes [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(5): 1049-1058.]
- [15] 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(4): 482-489. [YIN Xingyao, ZHOU Jingyi. Summary of optimum methods of seismic attributes [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(4): 482-489.]
- [16] 季玉新, 欧钦. 优选地震属性预测储层参数方法及应用研究[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(S1): 57-62. [JI Yuxin, OU Qin. Research on the method and application of optimizing seismic attribute prediction of reservoir parameters [J]. Petroleum Geophysical Exploration, 2003, 38(S1): 57-62.]
- [17] 李娟, 王鑫渊, 杨国栋, 等. 地震属性优化技术在郭家河三维地震资料解释中的应用[J]. 煤炭科技, 2019, 40(6): 83-85. [LI Juan, WANG Xinyuan, YANG Guodong, et al. Application of seismic attribute optimization technology in three-dimensional seismic data interpretation of Guojiahe [J]. Coal Science & Technology Magazine, 2019, 40(6): 83-85.]
- [18] Chen Q, Sidney S. Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring [J]. *The Leading Edge*, 1997, 16(5): 445-450.
- [19] Chopra S, Marfurt K J. Seismic attributes-A historical perspective [J]. *Geophysics*, 2005, 70(5): 3S0-28S0.
- [20] 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(6): 69-73. [WANG Yancang, QIN Fengqi, DU Weiliang, et al. Discussions on optimization and fusion of seismic attributes [J]. China Petroleum Exploration, 2013, 18(6): 69-73.]
- [21] 李德生. 渤海湾含油气盆地的地质构造特征与油气田分布规律[J]. 海洋地质研究, 1981, 1(1): 3-20. [LI Desheng. Geological structure and hydrocarbon occurrence of Bohai gulf oil and gas basin (China) [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1981, 1(1): 3-20.]
- [22] 叶加仁, 吴景富, 舒誉, 等. 中国近海富烃凹陷油气成藏特征[J]. 地质科技情报, 2012, 31(5): 105-111. [YE Jiaren, WU Jingfu, SHU Yu, et al. Characteristics of hydrocarbon accumulation in the hydrocarbon-rich depressions, offshore China [J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(5): 105-111.]
- [23] 刘海涛, 于海涛, 孙雨, 等. 断陷盆地多类型斜坡形成与油气差异富集规律: 以渤海湾盆地为例[J]. 岩石学报, 2022, 38(9): 2697-2708. [LIU Haitao, YU Haitao, SUN Yu, et al. Formation and differential enrichment of oil and gas on multiple types of slopes in rifted basins: Taking the Bohai Bay Basin as an example, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(9): 2697-2708.]
- [24] 张勇刚, 范国章, 王红平, 等. 地震多属性分析技术预测和评价盐下碳酸盐岩储层厚度分布[J]. 盐湖研究, 2022, 30(3): 72-82. [ZHANG Yonggang, FAN Guozhang, WANG Hongping, et al. Seismic multi-attributes analysis method to predict and evaluate thickness distribution of carbonate reservoir in Pre-salt [J]. Journal of Salt Lake Research, 2022, 30(3): 72-82.]
- [25] 张亚志. 薄互层储层地震反射特征识别方法研究[D]. 大庆石油学院硕士学位论文, 2003. [ZHANG Yazhi. Research on seismic reflection characteristic identification method of thin interbed reservoir [D]. Master Dissertation of Daqing Petroleum Institute, 2003.]
- [26] Dorrington K P, Link C A. Genetic-algorithm/neural-network approach to seismic attribute selection for well-log prediction [J]. *Geophysics*, 2004, 69(1): 212-221.
- [27] 刘淑芬, 张海翔, 李占东, 等. 地震属性融合定量储层预测实验设计[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(7): 181-186, 195. [LIU Shufen, ZHANG Haixiang, LI Zhandong, et al. Experimental design of quantitative reservoir prediction based on seismic attribute fusion [J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(7): 181-186, 195.]