

引用格式:赵宝银,张明.相控叠前地质统计学反演方法在低渗油藏优质储层预测中的应用——以A区沙三段3亚段V油组为例[J].油气藏评价与开发,2022,12(4):666-676.

ZHAO Baoyin, ZHANG Ming. Application of facies-controlled prestack geostatistical inversion method in high quality reservoir prediction of low permeability reservoir: A case study of V Oil Formation of $E_{s_3}^3$ in Block A[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4): 666-676.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.04.015

相控叠前地质统计学反演方法在低渗油藏优质储层预测中的应用

——以A区沙三段3亚段V油组为例

赵宝银,张明

(中国石油冀东油田分公司勘探开发研究院,河北唐山063004)

摘要:针对A区沙三段3亚段V油组低渗油藏优质储层预测难点,首先开展了叠前道集资料剩余速度分析、拉平处理及去噪等优化处理工作,提升了资料的品质;随后开展了测井地层评价、岩石物理建模和弹性曲线正演,优选出岩性、物性敏感参数,明确了联合应用纵横波速度比(V_p/V_s)和纵波阻抗(C_{PIMP})两种弹性参数可对优质储层进行识别;再开展了叠前反演数据准备、相控方案设计、无井模拟定变差和变程优化等工作,建立了一套基于相控叠前地质统计学反演的低渗油藏优质储层综合预测方法。该方法得到的反演结果不但提高了储层预测精度,而且更加符合地质规律。预测结果能够有效地反映低渗油藏优质储层的展布,部署水平井2口,取得了较好的应用效果。

关键词:储层预测;地质统计学反演;叠前反演;相控反演;低渗油藏

中图分类号:TE35

文献标识码:A

Application of facies-controlled prestack geostatistical inversion method in high quality reservoir prediction of low permeability reservoir: A case study of V Oil Formation of $E_{s_3}^3$ in Block A

ZHAO Baoyin, ZHANG Ming

(Exploration and Development Research Institute of PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan, Hebei 063004, China)

Abstract: In order to solve the difficulties in prediction of high-quality reservoirs in low-permeability V Oil Formation of E_{s_3} sub member in Block A, the residual velocity analysis, flattening and denoising of prestack gather data are carried out to improve the quality of data. Subsequently, well logging formation evaluation, petrophysical modeling and elastic curve forward modeling are carried out, lithology and physical property sensitive parameters are optimized, and it is clear that the combined application of two elastic parameters of speed ratio of P and S waves (V_p/V_s) and vertical wave impedance (C_{PIMP}) could identify high-quality reservoirs. Then, the prestack inversion data preparation, facies control scheme design, well free simulation constant variation and variable range optimization are carried out, and a set of comprehensive prediction method for high-quality reservoirs in low-permeability reservoirs based on facies controlled pre stack geostatistics inversion is established. The inversion results obtained by this method not only improve the accuracy of reservoir prediction, but also are more in line with the geological law. The prediction results can effectively reflect the distribution of high-quality reservoirs in low-permeability reservoirs. Two horizontal wells have been deployed and good application results have been achieved.

Keywords: reservoir prediction; geostatistical inversion; prestack inversion; facies controlled inversion; low permeability reservoir

收稿日期:2022-04-14。

第一作者简介:赵宝银(1968—),男,本科,高级工程师,主要从事地震资料处理解释、地震地质综合研究。地址:河北省唐山市新华道明光西里,邮政编码:063004。E-mail:zhaoby_jd@petrochina.com.cn

基金项目:中国石油冀东油田公司重大项目“低渗透油藏效益开发专项工程研究”(KF2018A05)。

A区沙三段3亚段V油组油藏是渤海湾地区复杂断块-岩性低渗(特低渗)油藏的典型代表^[1],近年来以T12、T2-6井为代表,发现了高柳斜坡带沙三段构造背景上的构造-岩性油气藏,展示了A区中深层低渗油藏较好的滚动开发前景。低渗(特低渗)油藏是油田新区储量、产量接替的重要领域,弄清低渗优质储层的分布规律,为油田低渗油藏高效开发提供支撑具有重要意义^[2]。

地震反演技术是目前最有效的储层预测方法之一,主要以地震为基础,以测井、地质资料为约束条件,结合一定的数学算法,将实际地震资料中包含的岩性以及储层物性等信息转换成波阻抗信息、速度信息以及孔隙度、密度等信息^[3]。传统的反演主要应用叠后数据,目的就是提取声阻抗体,进而得到岩性的信息^[4]。叠后反演是在叠加资料的基础上进行的,由于叠加隐藏了振幅随偏移距变化(AVO)的重要信息,因此,可能会导致振幅解释的许多假象。与叠后数据相比,叠前地震数据有着更丰富的AVO和旅行时间信息、更好的保真性和多信息性,通过叠前反演能够提供研究岩性和储层变化规律的更多、更有效的信息^[5-6],如纵横波阻抗、纵横波速度比、密度、泊松比等,但其纵向分辨率仍受限于地震分辨率,无法满足薄层预测的问题^[7]。

地质统计学反演就是随着薄层储层预测而发展起来的反演技术,它将随机模拟的思想引到地震反演中,利用沉积层序、岩性及物性的变差函数、概率密度函数等测井、地质认识,开展随机模拟、地震正演,并与实际地震约束,得到高分辨率岩性体和高分辨率弹性体,进而得到孔隙度体和渗透率体,从而实现薄层储层预测^[8-9]。但地质统计学反演是一种基于模型的反演,受模型的约束和控制,较适用于井间距不大且分布较为均匀的地震工区^[10-11]。当平面上的井网稀疏且分布不均时,模型可靠性降低,反演结果随机性强,与实际地质体偏差较大^[12]。

综合前人研究经验,结合该区地质地震条件,叠前地质统计学反演是攻关的方向^[13]。叠前地质统计学反演由于充分利用了叠前地震AVO信息、地层沉积特征以及测井资料,反演结果的分辨率高,与井吻合度高,可有效降低地下储层预测的不确定性,因而广受地学工作者的欢迎。但该方法得到的反演成果在横向随机性强,反演沿沉积层序规律性不好,尤其是在井控程度较低、储层非均质性较强时,变差函数等很难统计准确,影响到反演结果的精度和稳定性,

导致对优质储层的平面展布形态刻画不够准确,难以满足该区研究的需求^[14]。

相控叠前地质统计学反演是在叠前地质统计学反演的基础上,利用二维空变的岩相比例趋势加以约束,使得最终的储层模型既能在纵向上识别出薄的交互层,又能满足平面上沉积相控制的模型趋势,同时能对地震资料的多解性进行有效控制,可有效克服井网稀疏且分布不均的问题,模型更加趋近于真实地质体,使得反演结果纵向横向规律得到进一步优化,预测砂体更加准确可靠,为低渗油藏优质储层的预测提供了一种更加有效的技术方法。

1 研究区地震地质条件

1.1 研究区概况

研究区位于渤海湾盆地黄骅坳陷北部南堡凹陷的高柳构造带,目的层为沙三段3亚段V油组,沙三段属于近源陡岸扇三角洲沉积体,V油组砂岩比较发育。该区具有“近油源、优势相”的地质条件,构造经历了“早期大幅沉降、后期构造反转”的演化历史,孕育了良好的岩性圈闭发育条件。目前钻井多位于研究区西南部,发现的油气主要分布在南部高柳构造带上,往北部洼陷方向勘探程度仍较低(图1)。

1.2 地震地质条件

研究区地质地震条件比较复杂,主要表现为:

1) 地震资料信噪比低,频带较窄(5~40 Hz),地震主频(15~20 Hz)较低;地震道集不平,AVO特征和井不一致;地震反射特征较弱,连续性差,储层地震响应特征与岩石物理规律不明确。

2) 储层埋藏深度大,压实程度不一致,物性整体上随着埋深增加相对变差。油层平面上多呈条带状,连续性差。纵向上油层厚度薄、物性差、横向变化快。加之构造复杂,井控程度低,其优质储层预测一直是勘探开发的重点和难点,成为制约油田滚动开发的瓶颈^[15]。

2 相控叠前地质统计学反演

2.1 反演方法及实施方案

2.1.1 反演方法

该区储层预测主要存在三方面的问题:一是受

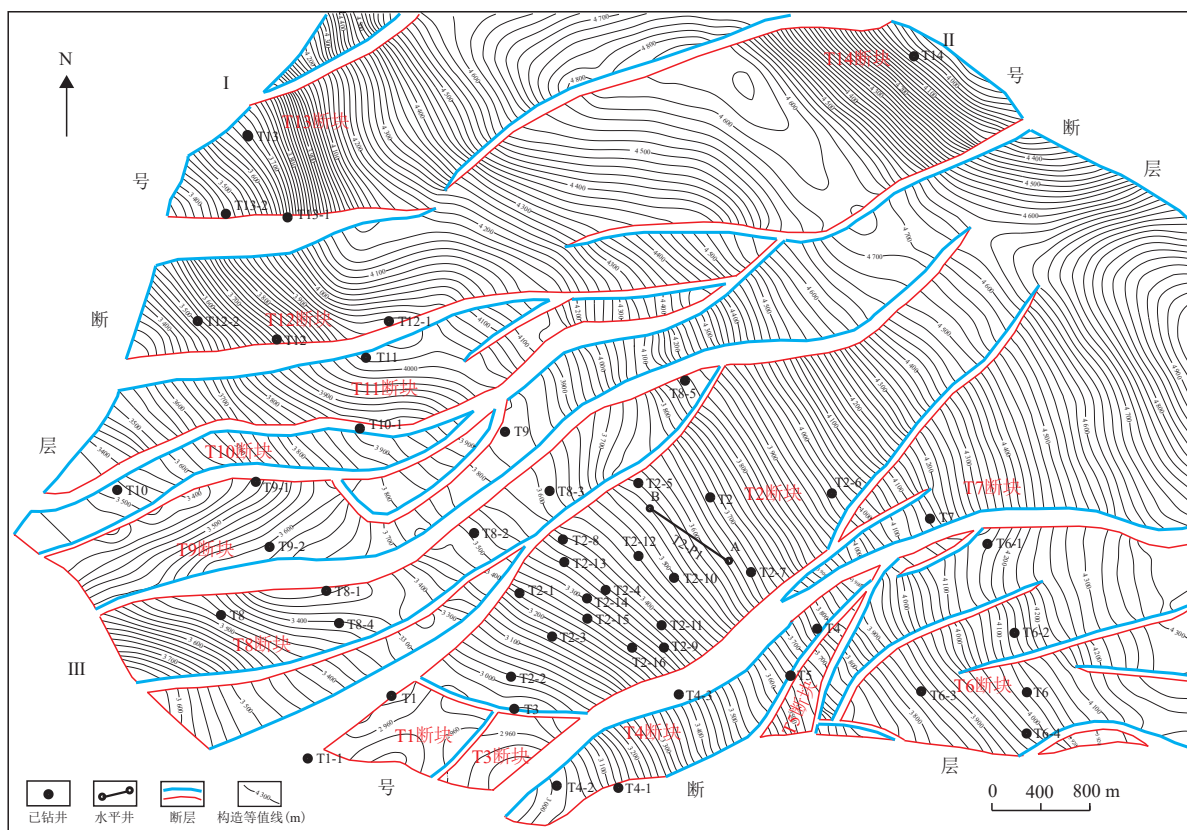


图1 A区沙三段3亚段V油组构造区划

Fig. 1 Structural zoning map of V Oil Formation in Es_3 of Block A

资料品质和方法限制,该区储层预测纵向分辨率精度50 m左右,需要探索高分辨率的储层预测方法满足薄储层的预测需求^[6];二是叠后反演是在叠加资料的基础上进行的,只能反演纵波阻抗,而孔隙砂岩和泥岩阻抗叠置严重,难以区分岩性,优质储层预测难度更大^[7];三是以砂组为单元的储层预测符合率只有75%,需要进一步寻找更优的叠前参数提高预测精度^[8]。

针对该区地震地质条件和储层预测的难点,此次研究在充分调研和可行性分析的基础上,确立了以多学科理论为指导,综合多种信息,运用相控叠前地质统计学反演技术精细化、量化对优质储层进行预测。即将叠前地震数据、先验沉积相信息、地质统计信息、测井曲线、概率密度函数及变差函数等信息相结合,定义严格的概率分布模型,多维度对反演参数进行核对和校正,形成了基于叠前资料的相控地质统计学反演方法。该方法是将叠前约束稀疏脉冲反演和相控随机模拟技术相结合,平面上遵循沉积规

律趋势,利用储层统计学模型进行约束,有效克服井控程度低且非均质强的问题。因此,模型更加趋近于真实地质体,反演结果纵向、横向规律得到进一步优化,预测砂体更加准确可靠,为低渗油藏优质储层的预测提供了一种更加有效的技术方法。

2.1.2 实施方案

此次储层预测的目标是在低渗透储层寻找优质储层,仅区分砂泥岩是不够的,但地层沉积时又是按照岩性分类沉积而成。因此,在传统叠前地质统计学反演的基础上,进一步采用了两级岩相划分模式(图2),并对每一种岩相,不再使用单一的概率密度函数和变差函数,而是分别利用平面地震相及测井相进行岩性概率密度函数和变差函数的确定。

第一级岩相按照沉积模式,划分为砂岩和泥岩。根据该区沉积特点,结合叠后确定性反演得到的砂组砂岩平面分布特点和范围大小优化变差函数,利用钻井信息及沉积韵律确定分岩相概率密度函数,

进行平面相控约束;第二级岩相则根据此次要研究的低孔低渗储层特点,划分出相应非储层、优质储层和致密储层3种岩相,以测井上统计的一维测井岩相作为约束,来反映沉积韵律和压实变化。

这样既能充分利用先验地震相信息,也保留了测井信息的纵向高分辨能力,同时能增加地质统计学反演结果的稳定性,降低各实现之间的随机性,使之更符合地质规律。

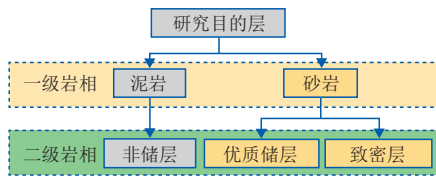
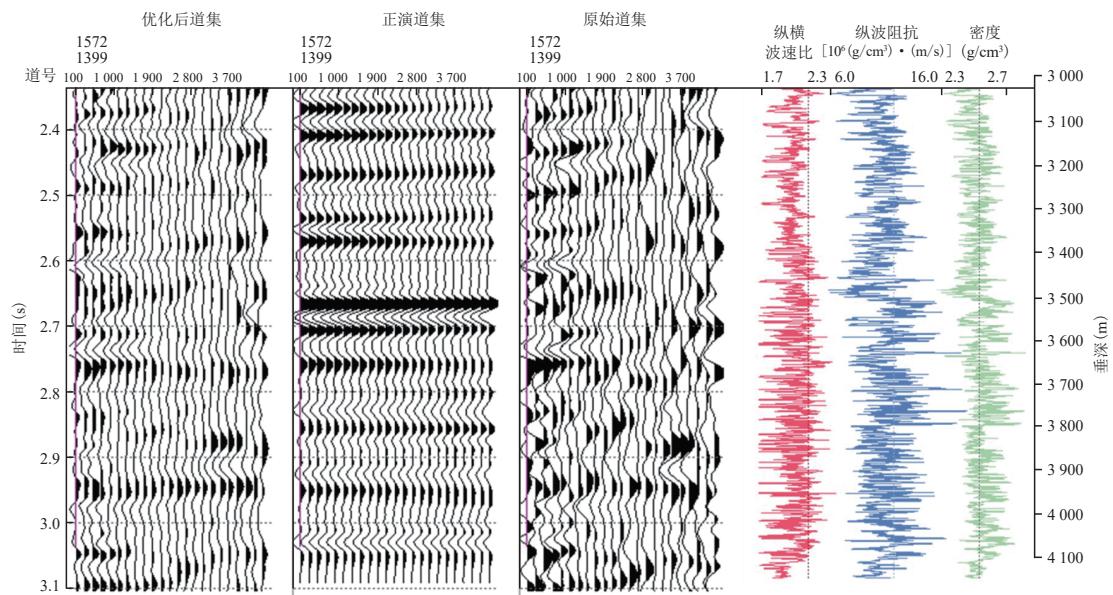


图2 地质统计学反演分级岩相划分
Fig. 2 Graded lithofacies classification by geostatistics inversion

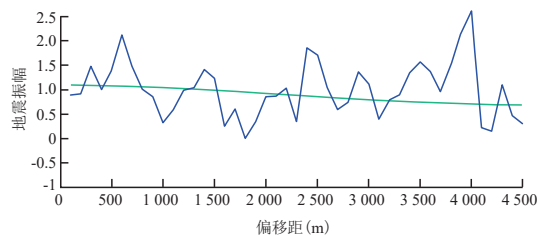
2.2 叠前道集优化处理

道集正演方法是利用模型正演井旁叠前道集模拟AVO现象,通过正演道集AVO特征和实际地震道集AVO特征进行对比分析,来评价地震资料的叠前道集AVO保幅程度,是叠前反演工作中重要的基础工作^[19]。通过实际叠前时间偏移(PSTM)道集和正演道集对比,发现实际道集主要存在信噪比太低,线性干扰严重,道集存在残余多次波,道集不平等问题。针对性采取线性噪音压制、随机噪音衰减、拉东去多次、残余动校正等道集处理技术,显著改善了道集的品质。

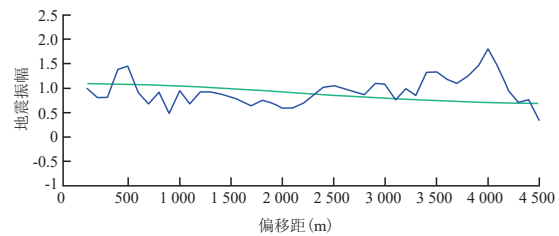
选取工区不同位置5口井,对处理前后的地震叠前时间偏移PSTM道集的AVO特征进行了井震对比标定,从而评价A区地震处理资料的叠前AVO保幅性。通过对T12断块的T12井AVO正演标定(图3)



a. T12井优化后道集和正演道集、原始道集对比标定



b. T12井2.76 s优化前井震AVO曲线



c. T12井2.76 s优化后井震AVO曲线

图3 A区T12井优化前后道集和正演道集对比标定

Fig. 3 Comparison and calibration of gathers and forward gathers of Well-T12 in Block A before and after optimization

可以明显看出,优化后道集资料品质有明显提升,表现在道集拉平和信噪比的提升。通过道集优化,偏移距方向的能量更加平滑,与正演道集趋势更加一致,表明优化处理后的道集能够满足叠前反演的需要。

2.3 反演关键参数设置与优化

2.3.1 敏感弹性参数优选

通过地震反演可以得到纵波阻抗(C_{PIMP})(可通过叠后地震得到)和纵波速度(V_p)、横波速度(V_s)、纵横波速度比(V_p/V_s)、密度(ρ)等(可通过叠前地震反演得到),但孔隙度(φ)、渗透率(K)、泥质含量(V_{sh})等参数最能反映地质学家关注的油藏特征,必须优选出最合适的方法进行研究,因此,开展敏感弹性参数优选显得尤为重要。利用纵、横波速度和密度曲线,可以计算获得多种新的弹性参数,如纵横波速比(V_p/V_s)、扩展弹性阻抗(EEI)、拉梅常数(λ)与密度(ρ)乘积($\lambda\rho$)、剪切模量(μ)与密度(ρ)乘积($\mu\rho$)等。利用曲线回放和交汇分析等多种方法,评价上述多种弹性参数的敏感性,寻找对岩性、物性和含油气性敏感的弹性参数,是确定后续储层预测工作的重要依据^[20-22]。

从该区单弹性参数岩性识别统计直方图(图4)可以看出,T2-1井IV—V油组 V_p/V_s 对岩性具有很好的分辨能力,当砂岩识别率为85%时,泥岩误判率为7%,此时, V_p/V_s 阈值为1.85, C_{PIMP} 基本不能识别岩

性;当T2-1井储层识别正确率为85%时,纵波阻抗阈值为10 500 ($(g/cm^3) \cdot (m/s)$),此时泥岩误判率为75%。在岩性识别利用单弹性参数 V_p/V_s 即可满足研究需求。

从单弹性参数储层识别统计直方图(图5)上可以看出,利用单弹性参数 V_p/V_s 或 C_{PIMP} 在储层识别率为85%,误判率均达到28%,表明利用单弹性参数对储层的识别能力均有一定识别能力,但误判率较高,不能满足研究需求。因此,需要联合应用 V_p/V_s 和 C_{PIMP} 两种弹性参数,对储层进行识别。

因此,构建了敏感弹性曲线(C_{SEC}),其构建方法是通过岩石物理模板 V_p/V_s 和 C_{PIMP} 两种弹性交会图进行坐标旋转,以改善储层识别能力。通过不同坐标角度旋转测试,当旋转角度为 60° 时,储层识别能力最佳。获得敏感因子的构建公式:

$$C_{SEC} = 1.613\ 08 + 0.000\ 308 C_{PIMP} + 0.565\ 5 V_p/V_s \quad (1)$$

式中: C_{SEC} 为敏感弹性曲线; C_{PIMP} 为纵波阻抗, ($(g/cm^3) \cdot (m/s)$); V_p 为纵波速度, m/s ; V_s 为横波速度, m/s 。

从多弹性参数储层识别统计直方图(图6)可以看出,当EEI对T2-1井砂岩识别正确率为85%时,阈值为0.5,此时致密层误判率为11%。

2.3.2 无井模拟定变差和变程

在明确了弹性参数对岩性的分布能力的基础上,利用岩石物理量版指导地质统计学PDF函数的设置(图7),确保地质统计学反演能合理反映该区的岩石物理规律,为地质统计学定量储层预测奠定基础。

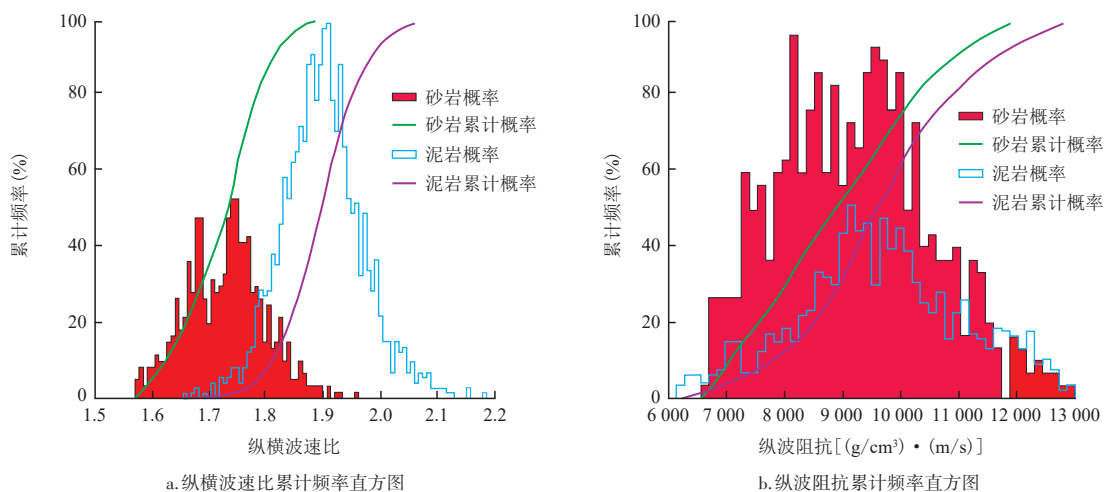


图4 A区T2-1井单弹性参数岩性识别统计直方图

Fig. 4 Statistical histogram for lithology identification of single elastic parameter of Well-T2-1 in Block A

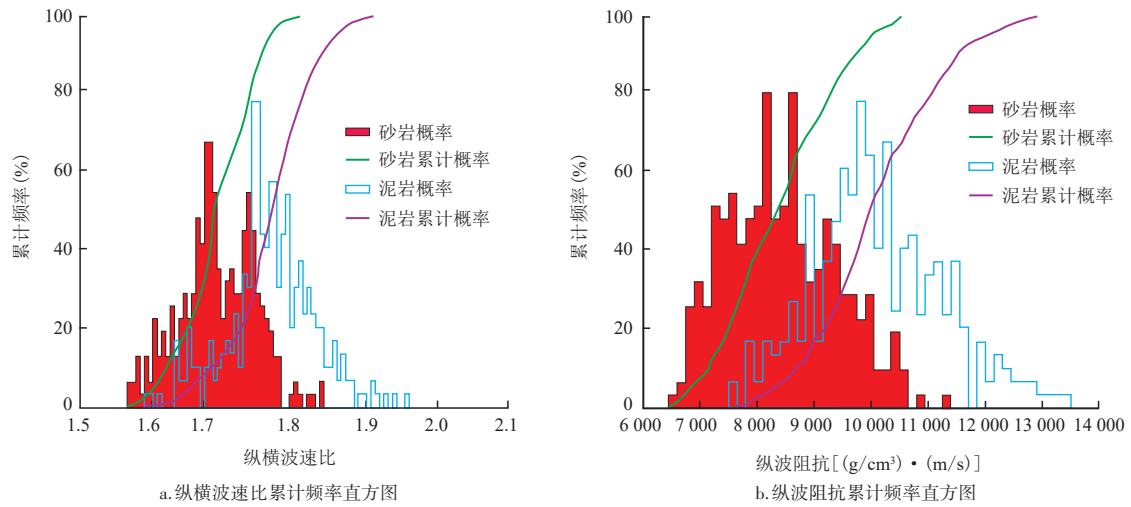


图5 A区T2-1井单弹性参数储层识别统计直方图

Fig. 5 Statistical histogram of reservoir identification with single elastic parameter of Well-T2-1 in Block A

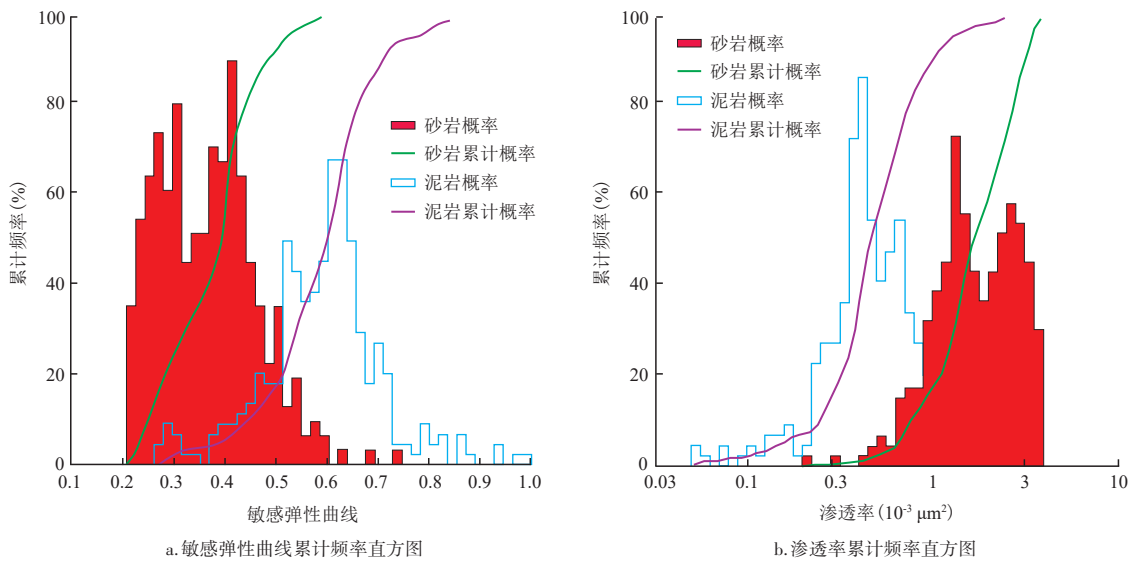


图6 多弹性参数储层识别统计直方图

Fig. 6 Statistical histogram of reservoir identification with multiple elastic parameters

无井模拟确定的变差函数类型和变程优化非常重要。通过消化吸收前人研究成果,在地质模式指导下,对确定性反演成果的分析,明确了目标地质体的沉积模式、物源方向、纵向厚度分布特征及平面规模等特征,指导变差、变程的设置。

此次研究垂向变程设置为0.006 s,横向变程600 m。变差函数类型为指数型,块金值为0。以上参数设置是否合理,需要通过无井模拟来评价。通过观察连井剖面上地质体垂向上厚度比较合理,岩性比例与井基本一致,横向上的连续性及延伸长度也和先验

地质认识相吻合(图8),验证了概率密度函数(PDF)和变差函数的合理性以及平面相约束的重要性。

2.4 反演效果分析

2.4.1 反演成果质控

利用叠前地震部分叠加,开展地质统计学反演,计算得到5个相控地质统计学反演实现,对其进行综合计算平均值,形成一个 V_p/V_s 多实现平均值体,对该体抽取V15—18层段的平均值属性(图9),可以看

到地震多属性砂地比相控信息得到了很好的体现, V_p/V_s 平面趋势和相控信息具有很好的吻合,说明相控是有效的。同时,和确定性反演的层段 V_p/V_s 平均值属性也有较强的相似性,说明此次研究的多种反演结果能够得到相互印证。

2.4.2 多实现分析及优选

以 V_p/V_s 小于 1.85 区分砂泥岩,并且以 C_{PIMP} 小于 10 000 $(g/cm^3) \cdot (m/s)$ 进一步划分有利储层,应用相控地质统计学反演方法获得了多个等概率的岩性体

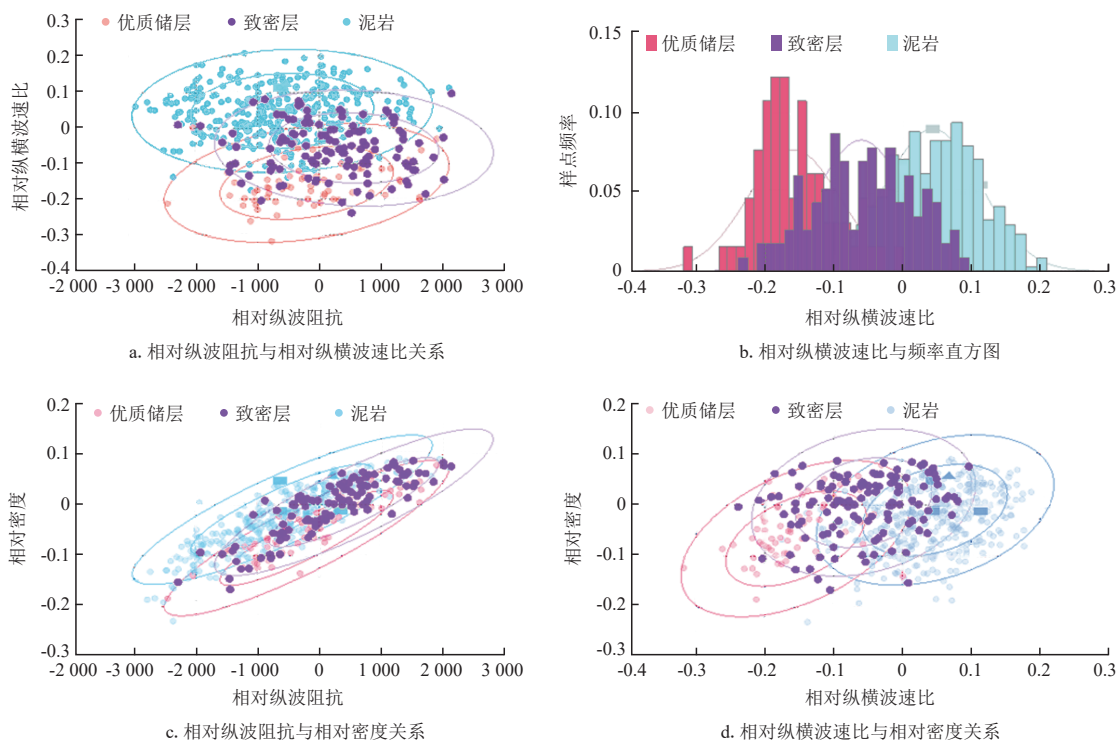


图7 地质统计学PDF函数的设置
Fig. 7 Setting of PDF function in geostatistics

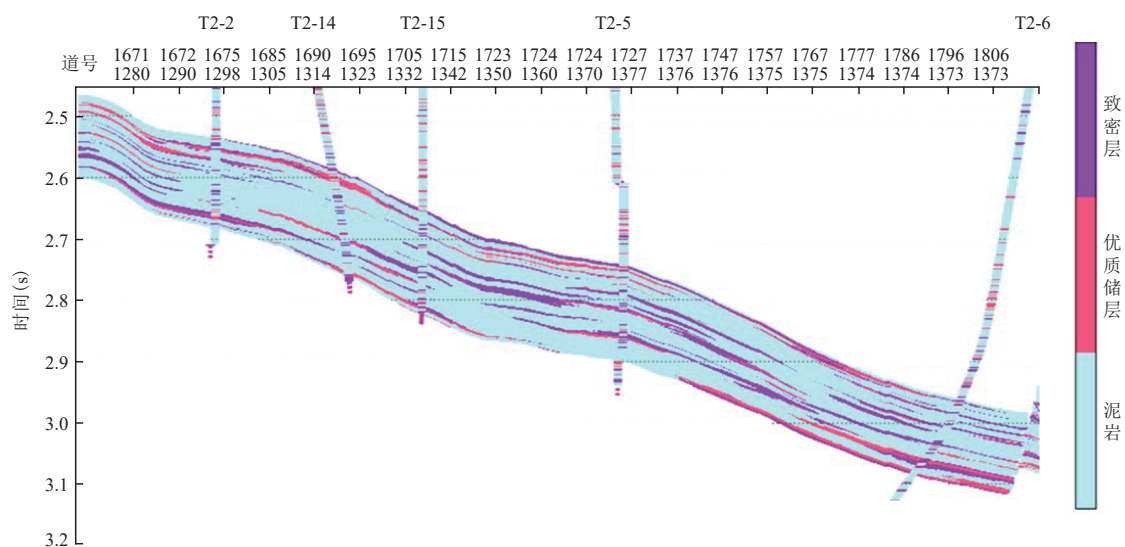


图8 A区沙三段3亚段IV—V油组无井模拟连井剖面
Fig. 8 Simulation profile of non-well connected mode in IV to V oil formation of Es_3 in Block A

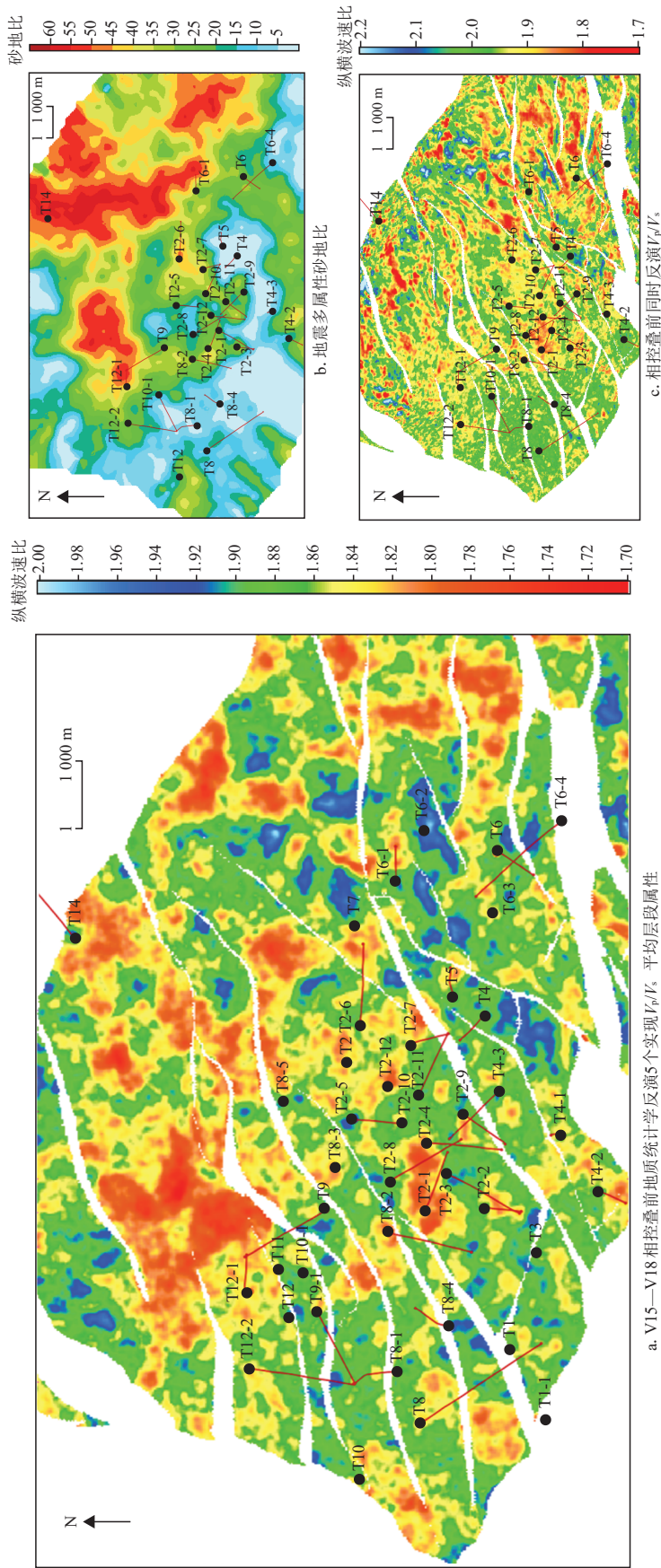


图9 V15—V18小层 V_p/V_s 平均层段属性与地震多属性砂地比、相控叠前同时反演 V_p/V_s 对比
Fig. 9 Comparison of V_p/V_s average interval attributes with seismic multi-attribute sand ground ratio and facies controlled simultaneous inversion of V_p/V_s before stack of sublayer V15 to sublayer V18

实现、纵波阻抗实现,计算空间体积,以静体积的大小对5个地质统计学实现进行排序。以A区沙三段V15—18层段有利砂体为例,结合区域沉积认识、钻井的吻合程度对实现进行筛选,之前排名第4的实现,反而是在T2-1井区与已钻井更吻合的实现,并且更符合沉积规律。地质统计学反演能分辨单砂体级别,极限分辨率可以达到3~5 m。

2.4.3 反演符合率分析

根据叠前地质统计学反演技术方法的特点,参与约束井的井和输入井通常能吻合较好,不参与反演的盲井井旁道与输入曲线的对比吻合率一般都不会太高^[23]。该次地质统计学层段的吻合率评价方法是先绘制对应砂层组的反演预测砂地比平面图;再提取井点处的反演砂地比数值(如果是斜井或水平

表1 各砂组储层预测误差统计

Table 1 Statistics of reservoir prediction error of each sand reservoir

类别	井名	测井砂地比	反演砂地比	误差(%)
	T2-5	47	47	0
	T2-2	51	51	0
	T2-6	30	30	0
	T2-7	31	31	0
	T6	33	33	0
	T8	20	20	0
	T10-1	28	28	0
	T4	44	44	0
	T5	15	15	0
	T6-1	18	18	0
	T2-13	28	28	0
约束井组	T2-3	30	30	0
	T2-1	52	52	0
	T2-10	30	30	0
	T9	30	30	0
	T2-15	15	15	0
	T2-9	20	20	0
	T4-3	55	55	0
	T4-1	10	10	0
	T8-2	44	44	0
	T12-1	50	50	0
	T10	30	30	0
	T8-1	12	12	0

井,则提取对应分层靶点处的砂地比数值),并和各井对应层段的测井解释砂地比进行对比;最后列表统计各层段反演砂地比和测井解释砂地比之间的误差。经过盲井检验,5个砂组预测吻合率最低为84.3%,最高为92.5%(表1、表2)。相比研究之前,砂组预测吻合率仅74%,预测精度得到很大提高。

2.4.4 应用效果分析

针对A区沙三段3亚段V油组低渗油藏埋藏深、油层薄、物性差、横向变化快、纵波阻抗叠置的特点,

表2 各砂组储层检验误差统计

Table 2 Statistics of test error of each sand reservoir

类别	井名	测井砂地比	反演砂地比	误差(%)	
IV1—IV10 盲井验证	T2-11	45	45	0	
	T2-8	42	48	6	
	T2-14	25	35	10	
	T2-15	23	45	22	
	T6-2	29	48	19	
平均误差				11.4	
IV11—IV18 盲井验证	T2-11	14	10	4	
	T2-8	36	5	31	
	T2-14	20	30	10	
	T2-15	12	27	15	
	T6-2	24	43	19	
平均误差				15.8	
V1—V8 盲井验证	T2-11	45	10	35	
	T2-8	45	10	35	
	T2-14	42	24	18	
	T2-15	30	25	5	
	T6-2	23	18	5	
平均误差				15.7	
V9—V14 盲井验证	T2-11	45	28	17	
	T2-8	47	47	0	
	T2-14	28	28	0	
	T2-15	30	30	0	
	T2-P1	53.7	51.2	2.5	
T6-2	未穿				
平均误差				7.5	
V15—V18 盲井验证	T2-11	56	66	10	
	T2-8	未穿			
	T2-14	65	65	0	
	T2-15	49	18	31	
	T2-P1	37.3	46.3	9	
平均误差				12.5	

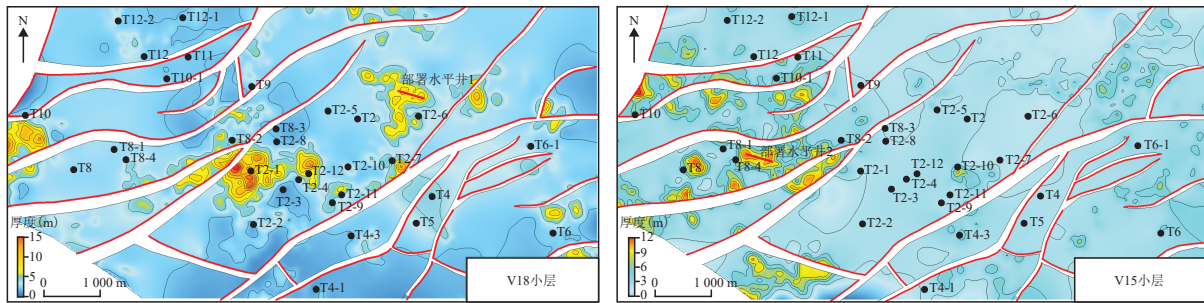


图10 A区沙三段3亚段V18小层与V15小层有利储层分布
Fig. 10 Distribution of favorable reservoirs in sublayer V18 and V15 of Es_3 in Block A

针对性地运用分级岩相+平面相控+叠前+地质统计学反演的联合研究,对储层和优质储层进行预测。在反演岩性体的基础上,通过给定孔隙度阈值,获得不同孔隙度储层厚度的平面分布,再结合研究区储层分类评价标准,对储层进行基于反演结果的评价,划分优质储层“甜点”区带。由于该次地质统计学反演在纵向上具有较高的分辨能力,可以任意组合微层,实现小层级别的评价,也可任意改变阈值,实现储层的分级评价。因此,通过地质统计学反演得到的这些结果,不仅可以生成低渗透“甜点”厚度图,还可直接用于沉积相图的编制、优质储层的精细描述与评价,为勘探开发井位的部署提供可靠依据。

从此次储层预测结果(图10)来看,预测结果满足区域沉积认识,井点砂体与实际匹配较好。V油组有利储层主要分布在T2断块主体及周边相邻断块,T2断块主体区钻井密度已经较大,往东北部中低部位井控程度相对较低,V18小层的T2-6井附近、T2-5井以北区域,是中厚互层型的有利目标区,已部署1口穿层水平井。其次是V15小层西侧的T8-4至T8-3井之间的条带,该区可能受西侧物源控制,发育单一厚层型有利区带,已部署1口追层水平井。

3 结论与认识

1) 地震资料品质较差是制约反演精度的主要因素,针对性地开展叠前道集处理,在一定程度上改善了AVO相关性,改善了叠后/叠前地震资料品质。

2) 利用迭代式测井评价及岩石物理正演技术获取岩石物理正演曲线,修复测井测量异常,比实测

曲线更符合岩石物理规律,有利于后期岩性划分及敏感弹性因子优选。

3) 相控叠前地质统计学反演的相控部分体现在分岩相约束,该次研究创新了二维地震相+一维测井岩相分级嵌套相控方法,反演结果更稳定,降低了多解性。

参考文献

- [1] 康玉柱. 中国非常规致密岩油气藏特征[J]. 天然气工业, 2012, 32(5): 1-4.
KANG Yuzhu. Characteristics of unconventional tight rock reservoirs in China[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(5): 1-4.
- [2] 宋维琪,赵万金,冯磊,等. 地震高分辨率反演和地质模拟联合预测薄储层[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 50-55.
SONG Weiqi, ZHAO Wanjin, FENG Lei, et al. Prognoses of thin reservoir by combining seismic high-resolution inversion technology and geological simulation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(1): 50-55.
- [3] 姜岩,徐立恒,张秀丽,等. 叠前地质统计学反演方法在长垣油田储层预测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(5): 2579-2586.
JIANG Yan, XU Liheng, ZHANG Xiuli, et al. Prestack geostatistical inversion and its application on the reservoir prediction of Changyuan oil field[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(5): 2579-2586.
- [4] 潘昱洁,李大卫,杨凯. 确定性反演和随机反演对井约束条件的需求分析[J]. 石油物探, 2011, 50(4): 345-350.
PAN Yujie, LI Dawei, YANG Kai. Demand analysis of well constraints for deterministic inversion and stochastic inversion [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(4): 345-350.
- [5] 王家华,王镜惠,梅明华. 地质统计学反演的应用研究[J]. 吐哈油气, 2011, 16(3): 201-205.
WANG Jiahua, WANG Jinghui, MEI Minghua. Application of geostatistical inversion[J]. Tuha Oil and Gas, 2011, 16(3): 201-205.

- [6] 何火华,李少华,杜家元,等.利用地质统计学反演进行薄砂体储层预测[J].物探与化探,2011,35(6):804-808.
HE Huohua, LI Shaohua, DU Jiayuan, et al. The application of geostatistic inversion method to predicting the thin sandstone reservoir[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(6): 804-808.
- [7] 钱玉贵,叶泰然,张世华,等.叠前地质统计学反演技术在复杂储层量化预测中的应用[J].石油与天然气地质,2013,34(6):834-841.
QIAN Yugui, YE Tairan, ZHANG Shihua, et al. Application of pre-stack geo-statistics inversion technology in quantitative prediction of complex reservoirs[J]. Oil and Gas Geology, 2013, 34(6): 834-841.
- [8] 周海民,魏忠文,曹中宏,等.南堡凹陷的形成演化与油气的关系[J].石油与天然气地质,2008,30(2):10-14.
ZHOU Haimin, WEI Zhongwen, CAO Zhonghong, et al. Relationship between formation, evolution and hydrocarbon in Nanpu sag[J]. Oil and Gas Geology, 2008, 30(2): 10-14.
- [9] 赵颖,张文才,杜春辉,等.南堡凹陷高柳地区深层储层特征及影响因素分析[J].石油地质与工程,2009,23(3):23-26.
ZHAO Ying, ZHANG Wencai, DU Chunhui, et al. Deep reservoir characteristics and its controlling factors at Gaoliu area, Nanpu depression[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2009, 23(3): 23-26.
- [10] 毛丽华.叠后反演方法对比研究及储层预测—以埕北低断阶沙二段为例[D].北京:中国地质大学(北京),2017.
MAO Lihua. The contrast study of pre-stack seismic inversion and reservoir prediction: An example from Sha2 member of Chengbei low fault zone[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [11] 刘丹,徐伟.随机反演在陆丰13-1油田储层预测中的应用[J].物探化探计算技术,2012,34(3):331-335.
LIU Dan, XU Wei. Application of stochastic inversion in the reservoir prediction of Lufeng 13-1 Oil Field[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 34(3): 331-335.
- [12] 李方明,计智锋,赵国良,等.地质统计反演之随机地震反演方法——以苏丹M盆地P油田为例[J].石油勘探与开发,2007,34(4):451-455.
LI Fangming, JI Zhifeng, ZHAO Guoliang, et al. Methodology and application of stochastic seismic inversion: A case from P Oilfield, M Basin, Sudan[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 451-455.
- [13] 张义,尹艳树,秦志勇.地质统计学反演在薄砂体储层预测中的应用[J].断块油气田,2015,22(5):565-569.
ZHANG Yi, YIN Yanshu, QIN Zhiyong. Application of geostatistical inversion in thin sandstone reservoir prediction[J]. Fault Block Oil & Gas Field, 2015, 22(5): 565-569.
- [14] 王兵,刘万辉,李付雷,等.相控地质统计学反演技术在胜北南斜坡岩性油藏薄砂层预测中的应用[C]//CPS/SEG北京2018国际地球物理会议暨展览电子论文集.北京:2018:977-980.
WANG Bing, LIU Wanhui, LI Fulei, et al. Application of facies controlled geostatistics inversion technology in prediction of thin sand layer of lithologic reservoir in Shengbei south slope [C]. CPS/SEG Beijing: Electronic proceedings of 2018 International Geophysical Conference and Exhibition, 2018: 977-980.
- [15] 张敬艺,卿影,程丹华,等.南堡凹陷高柳地区深层岩性油藏成藏条件研究[J].石油地质与工程,2013,27(5):5-9.
ZHANG Jingyi, QING Ying, CHENG Danhua, et al. Research on condition of deep lithologic reservoir accumulation in Gaoliu area of Nanpu sag[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2013, 27(5): 5-9.
- [16] 张盟勃,史松群,潘玉.叠前反演技术在苏里格地区的应用[J].岩性油气藏,2007,19(4):91-94.
ZHANG Mengbo, SHI Songqun, PAN Yu. Application of prestack inversion in Sulige area[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(4): 91-94.
- [17] DAVID C, SIMON S. Tight gas geophysics: AVO inversion for reservoir characterization[J]. CSEG recorder, 2010, 35(5): 28-35.
- [18] 胡迅.多点地质统计学叠前同时反演方法研究[D].武汉:长江大学,2017.
HU Xun. Prestack simultaneous inversion based on multi-point geostatistics[D]. Wuhan: Yangtze University, 2017.
- [19] 陆自清,郭媛.叠前反演中部分叠加道集的优化校正[J].石油地球物理勘探,2015,50(1):67-70.
LU Ziqing, GUO Yuan. Partial-stack dataset optimization in prestack seismic inversion[J]. Petroleum geophysical exploration, 2015, 50(1): 67-70.
- [20] 王维红,林春华,王建民,等.叠前弹性参数反演方法及其应用[J].石油物探,2009,48(5):483-487.
WANG Weihong, LIN Chunhua, WANG Jianmin, et al. Prestack elastic parameter inversion method and its application [J]. Petroleum Geophysical Exploration, 2009, 48(5): 483-487.
- [21] 赵海波,唐晓花,李奎周,等.基于地震岩石物理分析与叠前地质统计学反演技术的齐家地区致密薄储层预测[J].石油物探,2017,56(6):853-862.
ZHAO Haibo, TANG Xiaohua, LI Kuizhou, et al. Tight thin — bed reservoir prediction using rock physics analysis and prestack geostatistical inversion in the Qijia area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(6): 853-862.
- [22] MAVKO G, MUKERJIT, DVORKIN J. The rock physics handbook: Tools for seismic analysis analysis of porous media[M]. 2nd ed. New Nork: Cambridge University Press, 2009.
- [23] 孙思敏,彭仕宓.地质统计学反演及其在吉林扶余油田储层预测中的应用[J].物探与化探,2007,31(1):51-56.
SUN Simin, PENG Shimi. Geostatistical inversion method and its application in reservoir prediction of Fuyu oilfield in Jilin Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31(1): 51-56.

(编辑 尹淑容)