

基于马尔科夫-贝叶斯模拟算法的 多地震属性沉积相建模方法

——以苏里格气田苏10区块为例

袁照威¹, 陈龙², 高世臣³, 段正军⁴

(1. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 2. 中国石油长庆油田分公司第三采气厂, 陕西 西安 710016; 3. 中国地质大学(北京)数理学院, 北京 100083; 4. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083)

摘要:在钻井资料较少的气田早期评价阶段,仅以钻井数据建立的沉积相模型存在很大的不确定性,难以满足地质研究的精度要求。为此,在沉积相建模过程中引入多地震属性作为约束条件。首先在贝叶斯模型框架约束下建立先验概率分布,然后根据模拟点周围的钻井数据和地震数据将先验概率分布更新为后验概率分布,在更新过程中运用马尔科夫假设解决不同变量间交叉矩阵的不稳定问题,最终通过对模拟点的后验概率分布进行随机抽样,从而获取其沉积相类型。以苏里格气田北部苏10区块为研究对象,通过分析地震属性与沉积相的关系,优选出均方根振幅、平均瞬时频率、有效频带和衰减因子4种地震属性,针对在整合多变量时互协方差计算量大的问题,运用马尔科夫-贝叶斯模拟算法,对多地震属性进行融合,得到多变量融合概率场信息,进而建立沉积相模型。研究结果表明,模拟结果与人工编绘的沉积相分布规律的吻合率超过80%,通过交叉检验分析预测误差在1%以内。

关键词:沉积相建模 地震属性 先验概率分布 后验概率分布 马尔科夫-贝叶斯模拟算法 苏里格气田

中图分类号: TE631.445

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2017)03-0037-07

A method of sedimentary facies modeling through integration of multi-seismic attributes based on Markov-Bayes model: An example from Su10 area in the north of Sulige gas field

Yuan Zhaowei¹, Chen Long², Gao Shichen³, Duan Zhengjun⁴

(1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing City, 100083, China; 2. No.3 Gas Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an City, Shaanxi Province, 710016, China; 3. School of Science, China University of Geosciences (Beijing), Beijing City, 100083, China; 4. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing City, 100083, China)

Abstract: During the early stage of evaluation of the gas field development with less well data, the established sedimentary facies model has great uncertainty only based on well data information, which is difficult to meet the accuracy requirements of geological research. Thus it is becoming more and more important to be constrained by the multi-seismic attributes for sedimentary facies modeling. Firstly under the model of Bayes, the local prior probability distributions was built, and then the probability was updated into the posterior distributions with the neighboring well data and seismic attributes data. During the updating, Markov assumption could be used to solve the problem of instability of cross matrix for different variables, and at last the sedimentary facies could be modeled through random sampling from posterior distributions of modeling points. Taking the example of the Su10 area in the north of Sulige gas field, the relationship between seismic attributes and sedimentary facies was analyzed firstly and four types of seismic attributes were chosen including RMS amplitude, average

收稿日期: 2017-02-10。

作者简介: 袁照威(1988—), 男, 山东曹县人, 在读博士研究生, 从事地球物理勘探及地质统计学方面的研究。联系电话: 18810549542, E-mail: yzw880205yuan@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2016ZX05014-001)。

instantaneous frequency, effective bandwidth and attenuation. Considering the problem encountered in the computation of multi-variable cross-covariance, the fusion of multi-seismic attributes was calculated to obtain their fusion probability based on Markov-Bayes model, by which a sedimentary facies model could be built. The result demonstrates that simulation result keeps an over 80 percent agreement with a sedimentary facies model drawn in hand. The prediction error is considered to be within 1% through the analysis of cross-validation.

Key words: sedimentary facies modeling; seismic attribute; prior probability distribution; posterior probability distribution; Markov-Bayes model; Sulige gas field

沉积相研究是储层描述和评价最基础的工作,沉积相模型的合理性直接影响着储层物性参数模型的精度^[1]。通常情况下,在地质分析的基础上,根据钻井数据建立沉积相模型,这对地质人员的专业要求较高,且主观性较强,特别是对于面积较大、钻井数据较少的地区,只依靠钻井数据和地质经验很难精确地刻画井间沉积相带的变化。利用地震资料横向采集密度大,覆盖范围广的优势,在沉积相建模过程中引入多地震属性作为约束条件^[2-4]。

沉积相的建模方法很多,主要有基于目标和基于象元2种建模方法。基于目标的建模方法可以根据沉积微相的分布、砂体宽度和厚度及空间展布特征等参数,较好地展现目标体的几何特征,但表征沉积相形态的参数不容易获取,且很难融入地震信息。序贯指示模拟是基于象元的地质统计学常用的一种方法,模拟结果既忠实于条件数据,也便于融入地震数据^[5-7]。为此,在序贯指示模拟的基础上,采用马尔科夫-贝叶斯模拟算法,利用多地震属性进行沉积相建模^[8-10]。在建模过程中,利用钻井数据和地震数据作为条件数据,减少了建模过程中的不确定性问题。运用马尔科夫假设,解决协同克里格运算过程中出现的不同变量间交叉矩阵的不稳定问题,极大提高了运算效率。为解决该算法在模拟过程中因融入过多的变量而导致计算量大的问题,首先将多个变量融合成可以表征每种沉积相类型的概率场,利用概率场信息约束井间沉积相带的变化,使得模拟结果更为全面和准确^[11-13]。

1 区域地质概况

苏里格气田位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡西北侧,其构造较为平缓,整体表现为向西南倾斜的单斜形态,倾角不足 1° ,局部发育近东西向鼻状隆起,研究目的层无断层发育^[14-15]。该气田为低压、低渗透和低丰度的致密气藏,含气层系主要为石盒子组盒8段和山西组山1段,气藏埋深为3 200~3 500 m。苏10区块位于苏里格气田北部的苏里格庙地

区,有效储层为辫状河三角洲沉积的粗砂岩,目的层为盒8段下亚段,该段发育辫状河三角洲平原亚相,沉积微相主要为河道、河道侧缘和分流间湾(图1),其中河道较发育,呈南北向展布,河道砂体连通性较强,在研究区的中部和东部更为发育,在20-35井—33-33井、20-49井—32-49井及20-61井—32-61井区发育3条主河道,河道的最大宽度达5.4 km。河道侧缘砂体发育较薄,非均质性强。分流间湾较少发育,在3种沉积微相中仅占15%。

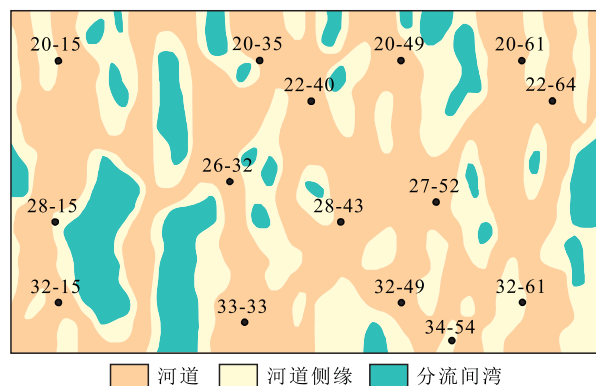


图1 苏10区块盒8段下亚段沉积微相分布

Fig.1 Map of sedimentary microfacies of lower submember of He8 member in Su10 area

2 沉积相建模方法

为建立有效沉积相模型,采用马尔科夫-贝叶斯模拟算法。该方法首先在贝叶斯模型框架约束下通过多属性融合概率场信息建立先验概率分布,利用模拟点周围的钻井数据和地震数据作为条件数据,将先验概率分布更新为后验概率分布;其次在更新过程中运用马尔科夫假设解决不同变量间交叉矩阵的不稳定问题;最终通过对模拟点的后验概率分布进行随机抽样,从而获取其沉积相类型。

2.1 地震属性优选

不同沉积微相的砂体厚度存在明显差异。河道砂体厚度为8.2~36.6 m,平均为20.24 m;河道侧缘砂体厚度为6~22 m,平均为13.22 m;分流间湾砂体厚度为1.3~13.6 m,平均为6.49 m。砂体厚度的

差异会引起地震波在波形、相位等方面的差异,其地震反射特征也不同^[2-3,16]。为表征不同厚度砂体地震反射特征的差异,提取钻井目的层的地震属性,通过对砂体厚度与地震属性的关系(图2)分析,揭示沉积微相与地震属性的关系。结果表明,砂体厚度与均方根振幅呈线性正相关关系,与平均瞬时频率、有效频带和衰减因子呈负相关关系。因此地震属性与沉积相之间存在密切关系,不同的沉积微相呈现出不同的地震属性特征。砂体厚度大的河道具有高振幅、低频率、低有效频带及低衰减的特点,而砂体厚度小的分流间湾表现为低振幅、高频

率和高频带的特点。为了精确地刻画井间沉积相带的变化,在沉积相建模过程中引入多地震属性作为约束条件控制井间相带的变化^[17]。在研究过程中提取对沉积相预测比较敏感的均方根振幅、平均瞬时频率、有效频带和衰减因子4种地震属性。分析苏10区块盒8段下亚段平均瞬时频率平面分布特征(图3),发现高频率主要分布在20-49井—20-61井间的分流间湾、河道侧缘区域及28-15井东部分流间湾地带,28-15井西部无钻井区域也有分布。研究区基本为低频率,河道发育,且连片分布,这与已有的地质认识吻合。

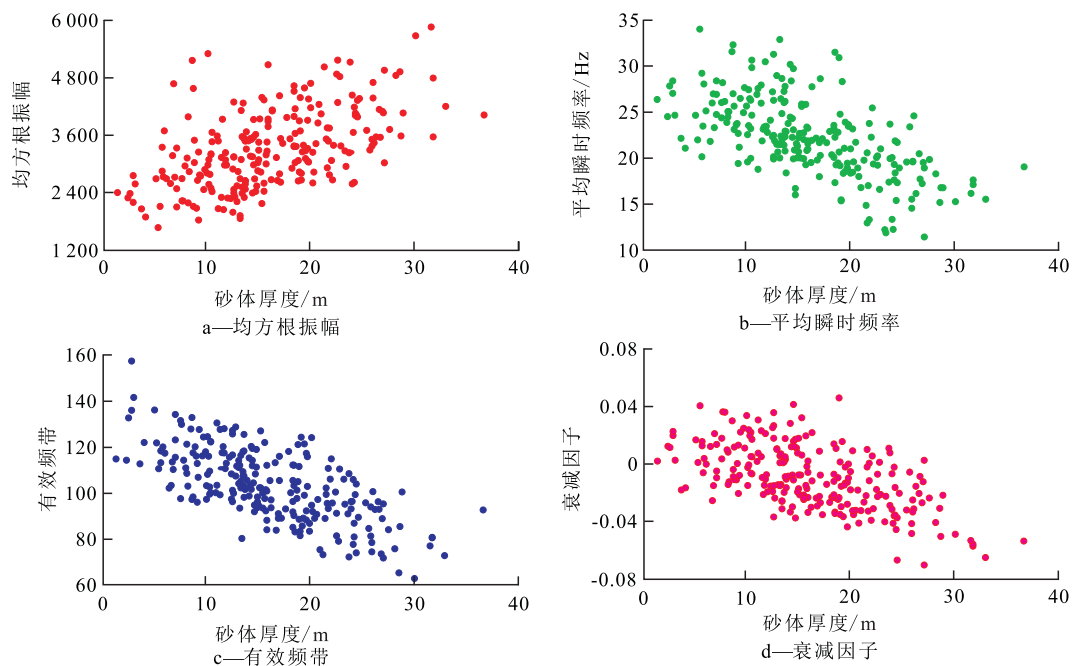


图2 苏10区块盒8段下亚段砂体厚度与地震属性交会图

Fig.2 Cross plots of seismic attributes and thickness of sand bodies of lower submember of He8 member in Su10 area

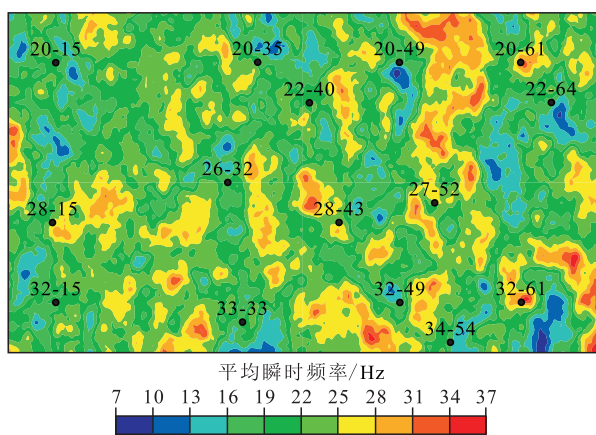


图3 苏10区块盒8段下亚段平均瞬时频率平面分布特征

Fig.3 Average instantaneous frequency of lower submember of He8 member in Su10 area

2.2 先验概率分布

以沉积相数据作为主变量(Z),地震数据作为

次变量(V)。通过 Z 值与 V 值的交会图获得约束条件的先验概率分布,该分布综合了钻井数据和地震属性信息^[18](图4)。将 V 值的变化区间分成 L 个区间,第 m 个区间 $[V_{m-1}, V_m]$ 的先验概率分布函数可以通过落入该区间的主变量累积分布图确定,表征了不同沉积相类型在第 m 个区间的先验概率,其先验概率公式为

$$y(x, k) = P\{Z(x) = k | V(x) \in (V_{m-1}, V_m)\} = \frac{\sum_{\alpha=1}^n i(x, k) i(x, [V_{m-1}, V_m])}{\sum_{\alpha=1}^n i(x, [V_{m-1}, V_m])} \quad (1)$$

2.3 多地震属性融合概率场

马尔科夫-贝叶斯模拟算法在整合次变量过程中,需要计算不同变量间的自协方差和互协方差,

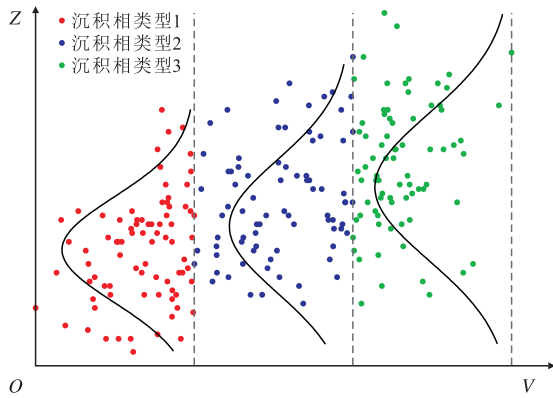


图4 苏10区块盒8段下亚段Z和V的展布

Fig.4 Cross plots of main variable Z and second variable V of lower submember of He8 member in Su10 area

过多的协同信息很难保证空间结构的平稳性。为了融入多种辅助信息,同时解决协同过程中计算量大的问题,将多地震属性进行融合,得到多地震属性概率场信息^[18-19],其表达式为

$$P(t, k) = \frac{\pi_k N(x_i | \mu_k, \Sigma_k)}{\sum_{k=1}^K \pi_k N(x_i | \mu_k, \Sigma_k)} \quad (2)$$

其中

$$N(x | \mu, \Sigma) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{D}{2}} |\Sigma|^{\frac{1}{2}}} \exp\left[-\frac{1}{2}(x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu)\right] \quad (3)$$

融合后的概率场信息作为次变量再次用于建立先验概率分布。在多地震属性融合过程中,假设不同类型的地震属性数据服从高斯分布(不符合高斯分布的地震属性数据,可以进行正态转换)。通过分析钻井数据与井旁地震属性信息,分析地震属性与沉积相的关系,通过式(2)得到每种沉积相的概率场,然后通过提取每个模拟点的概率最大值及其对应的沉积相类型,得到最终融合后的多地震属性概率场信息^[2,19-21](图5)。该概率场信息能够定量地表征研究区每个模拟点属于某种沉积相的概率,相比单一属性提供了更为全面和准确的预测信息。

以研究区融合后的多地震属性概率场信息和237口井的沉积相数据作为条件数据,建立先验概率分布。选取3种类型沉积相作为主变量,10个区间作为次变量,每个区间端点值对应数据的十分位点。先验概率分布值从(表1)获取,其值是给定的V值区间的Z值的条件概率分布值。

2.4 马尔科夫模型

为了建立模拟点x的不确定性模型,首先根据模拟点周围的信息更新先验概率分布,得到模拟点的后验概率分布表达式^[22]

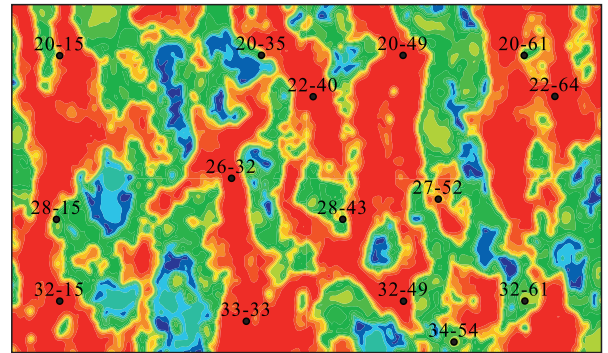


图5 苏10区块盒8段下亚段多地震属性融合概率场

Fig.5 Fusion probability field with multi-seismic attributes of lower submember of He8 member in Su10 area

表1 先验概率分布

Table1 Prior probability distribution

主变量区间	沉积相类型		
	1	2	3
[0,0.40]	0.67	0.08	0.25
[0.40,0.50]	0.29	0.24	0.47
[0.50,0.56]	0.13	0.50	0.38
[0.56,0.66]	0.05	0.56	0.40
[0.66,0.78]	0.21	0.36	0.43
[0.78,0.82]	0.14	0.43	0.43
[0.82,0.86]	0.20	0.30	0.50
[0.86,0.90]	0.15	0.08	0.77
[0.90,0.95]	0.12	0.24	0.65
[0.95,1.00]	0.06	0.09	0.84

$$i^*(x, k) = P\{Z(x) = k | (n)\} \quad (4)$$

后验概率分布利用协同指示克里格计算,协同信息主要选取先验概率分布作为次变量,同时为了简化方程,只考虑与模拟点位置相同的次变量信息,其协同指示克里格表达式^[23]为

$$i^*(x, k) - p_k = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}(x, k) [i(x_{\alpha}, k) - p_k] + \nu(x, k) [y(x, k) - p_k] \quad (5)$$

式(5)中 $\lambda_{\alpha}(x, k)$ 和 $\nu(x, k)$ 可以通过协同克里格求解^[24],其表达式为

$$\begin{cases} \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}(x, k) C_z(x_{\beta} - x_{\alpha}, k) + \nu(x, k) C_{zv}(x_{\beta} - x, k) = C_z(x_{\beta} - x, k) & \beta = 1, 2, 3, \dots, n \\ \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}(x, k) C_{zv}(x - x_{\alpha}, k) + \nu(x, k) C_v(0, k) = C_{vz}(0, k) \end{cases} \quad (6)$$

对于每种类型沉积相k都需要2个协方差模型 C_z , C_v 和一个交互协方差模型 C_{zv} , 因此计算量大。为了减少求解过程的复杂性,引入马尔科夫模型^[18],将次变量的自协方差及主、次变量的交互协

方差转换为主变量的自协方差,表达式分别为

$$C_v(h,k) = \begin{cases} B(k)C_z(h,k) & h=0 \\ B^2(k)C_z(h,k) & h>0 \end{cases} \quad (7)$$

$$C_{z'}(h,k) = B(k)C_z(h,k) \quad (8)$$

其中

$$B(k) = m^{(1)}(k) - m^{(0)}(k) \quad B(k) \in [-1, 1] \quad (9)$$

3 效果分析

结合钻井数据和多地震属性概率场信息,将马尔科夫-贝叶斯模拟算法运用到研究区的沉积相建模过程中,循环网格系统中的每1个网格,模拟每1个网格结点的沉积相值,将已模拟点的沉积相数据作为条件数据参与下1个网格结点的计算。每次通过设置不同的随机数种子,产生不同的模拟结果。例如在模拟过程中,其中的1个网格结点对应的标定参数(表2),按照每种类型沉积相,将原始数据分为2种情况: $i(x,k)=0$ 和 $i(x,k)=1$,根据标定参数求取每个网格结点的模拟值。应用马尔科夫-贝叶斯模拟算法可以得到多个不同的模拟结果,随机抽取2个模拟结果(图6)。

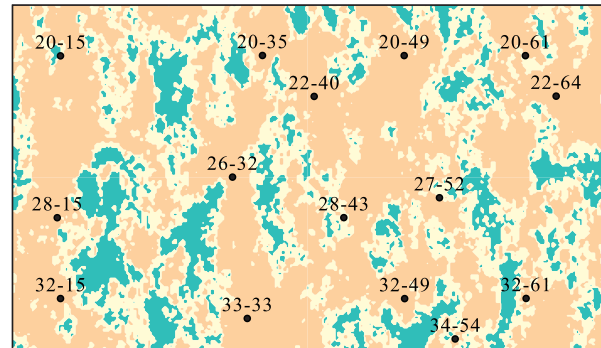
表2 标定参数

Table2 Calibration parameters

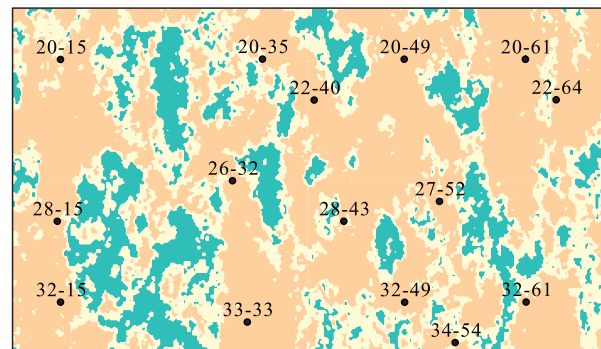
k	$m^{(1)}(k)$	$m^{(0)}(k)$	$B(k)$
1	0.280	0.129	0.151
2	0.419	0.264	0.155
3	0.606	0.454	0.152

分析图6认为,研究区3种类型沉积微相交错分布,但不同类型沉积微相之间的界线明显,河道及河道侧缘较为发育,南北方向连片性较好。在研究区西部,由于钻井较少,如果仅仅依靠钻井数据模拟,不能准确刻画出每种类型沉积微相的展布特征。利用马尔科夫-贝叶斯模拟算法将概率场信息作为软数据融入后,较为细致地展现研究区沉积微相的分布,在南北向20-35井-33-33井、20-49井-32-49井及20-61井-32-61井发育3条较宽的主河道,主河道走向及展布与前人已有的地质认识吻合度较高。

参与计算的条件数据中有36口井为分流间湾沉积、74口井为河道侧缘沉积、127口井为河道沉积,在原始条件数据中所占比例分别为15.2%、31.2%和53.6%。在2种模拟结果中,分流间湾、河道侧缘及河道所占平均比例分别为15.5%、29.5%和55%,整体上看比例相近,预测的平均相对误差在



a—模拟结果1



b—模拟结果2

河道 河道侧缘 分流间湾

图6 苏10区块盒8段下亚段沉积相模拟结果

Fig.6 Simulated results of sedimentary facies of lower submember of He8 member in Su10 area

1%以内。为更准确地分析模拟结果,抽掉1口井,用剩余的数据模拟研究区沉积相分布,交叉检验统计结果(表3)表明,模拟结果1、模拟结果2的总体吻合率分别为84.8%和81.9%,说明基于马尔科夫-贝叶斯模拟算法的多地震属性沉积相建模方法是可行的。

表3 交叉检验统计

Table3 Cross-validation statistics

沉积微相类型	原始钻遇井数/口	模拟结果1		模拟结果2	
		钻遇井数/口	吻合率,%	钻遇井数/口	吻合率,%
河道	127	118	92.9	116	91.3
河道侧缘	74	54	72.9	51	68.9
分流间湾	36	29	80.6	27	75.0

4 结论

基于马尔科夫-贝叶斯模拟算法的多地震属性沉积相建模,运用原始条件数据建立的先验概率分布更新为后验概率分布,概率信息更好地表征了模拟过程中的不确定性问题;通过分析地震属性与沉积相的关系,选取均方根振幅、平均瞬时频率、有效频带和衰减因子4种地震属性;通过多属性融合将其转换为概率场信息,概率场信息的不确定性更有

利于预测结果的风险评价;模拟结果与人工编绘的沉积相分布规律的吻合率超过80%,预测误差小于1%。运用马尔科夫-贝叶斯模拟算法融合多地震属性概率场信息也可以用于模拟连续型变量,如孔隙度、含气饱和度等参数。

符号解释:

Z ——主变量; V ——次变量; $y(x, k)$ ——先验概率分布; x ——主变量、次变量或者模拟点处的位置; k ——沉积相类型; $Z(x)$ ——在 x 位置处的主变量值; $V(x)$ ——在 x 位置处的次变量值; $V(m-1), V(m)$ ——第 m 个区间端点值; α ——条件数据个数; n ——条件数据总数; $i(x, k)$ ——主变量 $Z(x)$ 的指示化随机变量,当 $Z(x)$ 属于类型 k 时,取值为1,其他条件取值为0; $i(x, [V_{m-1}, V_m])$ ——次变量 $V(x)$ 的指示化随机变量,当 $V(x)$ 属于区间 $[V_{m-1}, V_m]$ 时,取值为1,其他条件取值为0; $P(t, k)$ ——属于某种类型沉积相的概率; t ——模拟点个数; π_k ——第 k 种沉积相的先验概率; $N(x|\mu, \Sigma)$ ——对应的多维变量服从高斯分布的概率密度函数; μ ——每种地震属性的均值; Σ ——每种地震属性之间的协方差矩阵; D ——变量维数,即地震属性的个数; $i^*(x, k)$ ——模拟点为第 k 种沉积相的后验概率分布; p_k ——条件数据中第 k 种沉积相的比例; $\lambda_\alpha(x, k)$ ——第 k 种沉积相的加权系数; $\nu(x, k)$ ——第 k 种沉积相次变量的权值; x_β ——第 β 个条件数据的位置; x_α ——第 α 个条件数据的位置; $C_z(h, k)$ ——第 k 种沉积相主变量的协方差矩阵; h ——2个位置点间的距离; $C_v(h, k)$ ——第 k 种沉积相次变量的协方差矩阵; $C_{zv}(h, k)$ ——第 k 种沉积相主变量和次变量交互协方差矩阵; $C_{vz}(h, k)$ ——第 k 种沉积相次变量和主变量交互协方差矩阵; $B(k)$ ——条件期望值 $m^{(1)}(k)$ 与 $m^{(0)}(k)$ 之差; $m^{(1)}(k)$ —— $y(x, k)$ 中 $i(x, k)=1$ 的数据平均值; $m^{(0)}(k)$ —— $y(x, k)$ 中 $i(x, k)=0$ 的数据平均值。

参考文献:

- [1] 杨华,刘新社,闫小雄.鄂尔多斯盆地晚古生代以来构造-沉积演化与致密砂岩气成藏[J].地学前缘,2015,22(3):174-183.
Yang Hua, Liu Xinshe, Yan Xiaoxiong.The relationship between tectonic-sedimentary evolution and tight sandstone gas reservoir since the late Paleozoic in Ordos Basin [J].Earth Science Frontiers, 2015, 22(3):174-183.
- [2] 高世臣,袁照威.地震属性在沉积相预测中的方法研究—序贯随机模式识别[J].地球物理学进展,2016,31(3):1 066-1 072.
Gao Shichen, Yuan Zhaowei.Seismic attributes in facies prediction-sequential stochastic pattern recognition methods [J].Progress in Geophysics, 2016, 31(3):1 066-1 072.
- [3] 王彦辉.喇嘛甸油田多波地震属性分析与油气预测[J].大庆石油地质与开发,2016,35(1):136-139.

- Wang Yanhui.Analyses on the multi-wave seismic attributes and hydrocarbon prediction for Lamadian Oilfield [J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(1):136-139.
- [4] 张长宝,罗东坤,徐晟,等.土库曼斯坦阿姆河右岸区块礁滩体地震地质综合识别方法[J].油气地质与采收率,2016,23(4):64-69.
Zhang Changbao, Luo Dongkun, Xu Sheng, et al.Integrated seismic and geologic studies of reef-beach body recognition technology in Amu Darya Right Bank, Turkmenistan [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(4):64-69.
 - [5] 张宇焜,王晖,胡晓庆,等.少井条件下的复杂岩性储层地质建模技术——以渤海湾盆地石臼坨凸起A油田为例[J].石油与天然气地质,2016,37(2):450-456.
Zhang Yukun, Wang Hui, Hu Xiaoqing, et al.Reservoir modeling of complex lithologies with sparse wells: A case from A oilfield in Shijiutuo uplift, Bohai Bay Basin [J].Oil & Gas Geology, 2016, 37(2):450-456.
 - [6] 刘莉莉,徐文,石石,等.苏里格气田致密砂岩气藏有效储层建模方法[J].油气地质与采收率,2015,22(3):47-51.
Liu Lili, Xu Wen, Shi Shi, et al.A new effective reservoir modeling method for tight sandstone gas reservoir in Sulige gasfield [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3):47-51.
 - [7] 郑超,宁松华,韩强,等.库车凹陷俄霍布拉克组层序地层及沉积相预测[J].特种油气藏,2015,22(6):75-79.
Zheng Chao, Ning Songhua, Han Qiang, et al.Prediction on sequence stratigraphy and sedimentary facies of Ehuobulake Formation in Kuqa Sag [J].Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(6):75-79.
 - [8] Li W, Zhang C, Dey D K, et al.Updating categorical soil maps using limited survey data by Bayesian Markov chain cosimulation [J].The Scientific World Journal, 2012, 2013(8):2 147-2 156.
 - [9] Zhu H, Journel A G.Formatting and integrating soft data: stochastic imaging via the Markov-Bayes algorithm [C].Netherlands: Springer Netherlands, Geostatistics Troia'92, 1992:1-12.
 - [10] Tamaki M, Suzuki K, Fujii T, et al.Prediction and validation of gas hydrate saturation distribution in the eastern Nankai Trough, Japan: Geostatistical approach integrating well-log and 3D seismic data [J].Interpretation, 2016, 4(1):SA83-SA94.
 - [11] 张军华,黄广谭,李军,等.基于层次分析法的地震有利储层预测[J].特种油气藏,2015,22(5):23-27.
Zhang Junhua, Huang Guangtan, Li Jun, et al.Seismic favorable reservoir prediction based on analytic hierarchy process [J].Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(5):23-27.
 - [12] 王延君,白宝玲,周永炳.多属性分析优化方法在南苏丹 Greater Unity 油田的应用[J].大庆石油地质与开发,2016,35(1):145-149.
Wang Yanjun, Bai Baoling, Zhou Yongbing.Application of multi-attribute analyzing and optimizing method in Greater Unity Oilfield of South Sudan [J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(1):145-149.
 - [13] Wang Z G, Gao J H, Lei X L, et al.Application of 3D seismic attributes to optimize the placement of horizontal wells within a tight gas sand reservoir, Ordos Basin, China [J].Geophysics, 2016, 81

- (3):B77-B86.
- [14] 郭智,贾爱林,何东博,等.鄂尔多斯盆地苏里格气田辫状河体系带特征[J].石油与天然气地质,2016,37(2):197-204.
Guo Zhi, Jia Ailin, He Dongbo, et al. Characteristics of braided river sedimentary system zones in Sulige gasfield, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 197-204.
- [15] 兰朝利,何顺利,门成全.利用岩心或露头的交错层组厚度预测辫状河河道带宽度——以鄂尔多斯盆地苏里格气田为例[J].油气地质与采收率,2005,12(2):16-18.
Lan Chaoli, He Shunli, Men Chengquan. Prediction of braided channel belt width based on cross-stratum sets thickness measurements of cores or outcrops—taking Sulige gas field, Ordos Basin as an example [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(2): 16-18.
- [16] 李桂梅.叠前地震反演预测民丰地区沙四段盐下砂砾岩体含油气性[J].油气地质与采收率,2013,20(2):52-54.
Li Guimei. Application of pre-stack seismic inversion to predicting hydrocarbon for conglomerate body in Minfeng area [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(2): 52-54.
- [17] Wang Y C, Eichkitz C G, Schreilechner M G, et al. Seismic attributes for description of reef growth and channel system evolution—case study of Intisar E, Libya [J]. Interpretation, 2016, 4(2): SB1-SB11.
- [18] Li W, Zhang C, Willig M R, et al. Bayesian Markov chain random field cosimulation for improving land cover classification accuracy [J]. Mathematical Geosciences, 2015, 47(2): 123-148.
- [19] 高世臣,张丹.多参数概率融合法在叠前地震储层预测中的应用——以苏里格气田苏194区块为例[J].油气地质与采收率,2015,22(6):61-67.
Gao Shichen, Zhang Dan. Application of multi-parameter probability fusion method to pre-stack seismic reservoir prediction: a case study of Su194 block in Sulige gas field [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(6): 61-67.
- [20] 高辉,樊志强,文开丰,等.基于多参数评价的致密砂岩气藏成岩相定量划分——以鄂尔多斯盆地神木气田山1段储层为例[J].石油实验地质,2015,37(6):781-788.
Gao Hui, Fan Zhiqiang, Wen Kaifeng, et al. Quantitative classification of diagenetic facies in tight sandstone gas reservoirs based on multi-parameter evaluation: A case study of the first member of Shanxi Formation in the Shenmu Gas Field, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(6): 781-788.
- [21] 焦志峰,杨占龙.地震信息多参数综合分析与岩性圈闭评价[J].石油实验地质,2008,30(4):408-413.
Jiao Zhifeng, Yang Zhanlong. Seismic multi-parameters analysis and evaluation of lithologic traps [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(4): 408-413.
- [22] Soares A. Sequential indicator simulation with correction for local probabilities [J]. Mathematical Geology, 1998, 30(6): 761-765.
- [23] 于正军,董冬冬,宋维琪,等.相带之下协克里金方法孔隙度预测[J].地球物理学进展,2012,27(4):1581-1587.
Yu Zhengjun, Dong dongdong, Song Weiqi, et al. Porosity prediction with co-kriging method controlled by sedimentary facies [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(4): 1581-1587.
- [24] Lyon S W, Lembo A J, Walter M T, et al. Defining probability of saturation with indicator kriging on hard and soft data [J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(2): 181-193.

编辑 单体珍

(上接第36页)

- [21] 谭建财,范彩伟,任科英,等.琼东南盆地北部构造变换带及其油气地质意义[J].油气地质与采收率,2014,21(2):62-65.
Tan Jiancai, Fan Caiwei, Ren Keying, et al. Structural transfer zone and significance for hydrocarbon geological in northern Qiongdongnan basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(2): 62-65.
- [22] 雷超,任建业,李绪深,等.琼东南盆地深水区结构构造特征与油气勘探潜力[J].石油勘探与开发,2011,38(5):560-569.
Lei Chao, Ren Jianye, Li Xushen, et al. Structural characteristics and petroleum exploration potential in the deep-water area of the Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5): 560-569.
- [23] 朱继田,裴健翔,孙志鹏,等.琼东南盆地新构造运动及其对晚期油气成藏的控制[J].天然气地球科学,2011,22(4):649-656.
Zhu Jitian, Pei Jianxiang, Sun Zhipeng, et al. Feature of neotectonism and its control on Late hydrocarbon accumulation in Qiongdongnan basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(4): 649-656.
- [24] 童亨茂,范彩伟,童传新,等.琼东南盆地宝岛变换带的特征、类型及其成因机制[J].石油与天然气地质,2015,36(6):897-905.
Tong Hengmao, Fan Caiwei, Tong Chuanxin, et al. Characteristics, types and genetic mechanism of Baodao transfer zone, Qiongdongnan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 897-905.
- [25] 李文浩,张枝焕,李友川,等.琼东南盆地古近系渐新统烃源岩地球化学特征及生烃潜力分析[J].天然气地球科学,2011,22(4):700-708.
Li Wenhao, Zhang Zhihuan, Li Youchuan, et al. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation of Paleogene Oligocene source rocks in Qiongdongnan basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(4): 700-708.

编辑 单体珍