

基于模糊 C 均值地震属性聚类的沉积相分析

张 阳¹, 邱隆伟¹, 李 际², 冯 磊³, 颜文远¹, 赵文睿⁴

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中石油新疆油田分公司实验检测研究院, 新疆克拉玛依 834000;
3. 河南理工大学资源环境学院, 河南焦作 454000; 4. 冀东油田勘探开发建设项目部, 河北唐山 063200)

摘要:对于油气田深层和新区的勘探, 常会由于未钻遇目的层或探井少而缺乏有效的岩心和测、录井等基础资料, 给沉积相分析的准确性造成一定影响, 为此提出基于模糊 C 均值地震属性聚类的沉积相分析方法。以孤北洼陷沙四上亚段为例, 采用模糊 C 均值属性聚类得到地震相图, 并结合地质基础资料确定沉积相类型, 赋予每种地震相准确的沉积意义, 进一步分析沉积体系展布规律。结果表明: 孤北洼陷沙四上亚段主要发育三角洲、扇三角洲及湖相 3 种沉积相; 利用本方法分析沉积相时应注意充分考虑地震属性优化与如何正确赋予地震相准确沉积意义这两个问题; 本方法遵循属性聚类控面, 岩心测井控点的思想, 为深层和新区的沉积相分析提供可靠的依据, 是一种切实可行、客观准确的新方法。

关键词:模糊 C 均值聚类; 地震属性; 沉积相; 孤北洼陷; 沙四上亚段

中图分类号: TE 121.3 **文献标志码:** A

引用格式: 张阳, 邱隆伟, 李际, 等. 基于模糊 C 均值地震属性聚类的沉积相分析[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(4): 53-61.

ZHANG Yang, QIU Longwei, LI Ji, et al. Sedimentary facies analysis based on cluster of seismic attributes by fuzzy C-means algorithm [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(4): 53-61.

Sedimentary facies analysis based on cluster of seismic attributes by fuzzy C-means algorithm

ZHANG Yang¹, QIU Longwei¹, LI Ji², FENG Lei³, YAN Wenyuan¹, ZHAO Wenrui⁴

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Experiment Testing Institute, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China;
3. School of Resources and Environments, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
4. Exploration Development and Construction Department of Jidong Oilfield, Tangshan 063200, China)

Abstract: Limited number of exploratory wells and unsuccessful drilling into targeted strata usually lead to insufficient cores and well logging data in deep strata and new exploratory areas, which leads to problems in accurate sedimentary analysis. The paper proposed an advanced sedimentary analysis method based on clustering seismic attributes using fuzzy C-means algorithm. Taking the upper 4th Member of Shahejie Formation in Gubei subsag for example, this method obtained the seismic facies by fuzzy C-means seismic attributes algorithm, determined the sedimentary types according to basic geological data, assigned the seismic facies accurate sedimentary meaning, and finally analyzed the distribution regularities of the sedimentary systems. The results show that the upper 4th Member of Shahejie Formation in Gubei subsag mainly developed delta, fan delta, and lake facies. It is stressed that two questions need to be taken into full consideration applying the method: the optimization of seismic attributes and how to give accurate sedimentary meanings to different seismic facies clustered. The method follows the reasoning that cluster of attributes control the plane and cores and logging data control the points, and provides reliable arguments for the sedimentary analysis in the deep strata and new exploratory areas.

Keywords: fuzzy C-means clustering algorithm; seismic attributes; sedimentary facies; Gubei subsag; the upper 4th Member

收稿日期: 2014-12-08

基金项目: 国家重大油气专项(2011ZX05009-002); 中央高校基本科研业务费专项(15CX06010A)

作者简介: 张阳(1988-), 男, 博士研究生, 研究方向为沉积学和油气地质学。E-mail: regogo@sina.com。

通讯作者: 邱隆伟(1967-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为矿物岩石学、沉积学及储层地质学。E-mail: qiulwsd@163.com。

of Shahejie Formation

沉积相研究经过长时期的发展,如今已经日趋完善。正确的沉积体系模型以及在沉积体系指导下的地质思维可以为各探区的储层预测提供正确的思考方式。地震资料作为石油地质领域中重要的基础资料之一,包含了丰富的地质信息,地震属性技术能提取隐藏在地震资料中的有用信息,有助于提高沉积相识别的准确度,特别是深部地层及新探区,常缺乏足够的取心资料及测录井资料,因此运用地震属性技术辅助沉积相的划分识别显得尤为重要。地震属性的发展从20世纪60年代开始^[1],经过3个阶段已基本成熟^[2],目前从地震数据中提取的地震属性越来越丰富,仅时间、振幅、频率、相位和吸收衰减等方面的地震属性就已达到60余种^[3]。单一地震属性只能从一个侧面反映沉积相的变化,并不能代表地质体的总体变化特征,只有将多种地震属性中所含的信息综合在一起才能更好地反映沉积体的变化特征^[3-6]。众多学者对多属性聚类分析技术的研究已经取得了一定的成果,但把多属性聚类分析技术应用于沉积相识别的成果相对较少,且尚未十分完善。笔者应用模糊C均值聚类方法,结合测录井数据,通过岩心观察、单井相分析,提出一套更为简便、直观的适用于资料相对较少研究区的沉积相识别方法。

1 模糊C均值聚类算法

模糊C均值聚类^[7-9](fuzzy C means, FCM),即众所周知的模糊ISODATA,是用隶属度确定每个数据点属于某个聚类程度的一种聚类算法。1973年,Bezdek提出了该算法,作为对早期硬C均值聚类(hard C means, HCM)方法的一种改进。

FCM算法使用了最小化整个权重的均方差的思想:

步骤一:给定聚类类别数 c , $2 \leq c \leq n$, n 是数据个数,设定迭代停止阈值 ε ,初始化聚类原型模式 $P^{(0)}$,设置迭代计数器 $b=0$;

步骤二:用公式(1)计算或更新划分矩阵 $U^{(b)}$;对于 $\forall i, k$,如果 $\exists d_{ik}^{(b)} > 0$,则

$$\mu_{ik}^{(b)} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left\{ \left[\frac{d_{ik}^{(b)}}{d_{jk}^{(b)}} \right] \right\}^{2/(m-1)}} \quad (1)$$

如果 $\exists i, r$,使得 $d_{ir} = 0$,则

$$\mu_{ir}^{(b)} = 1 \text{ 且对 } j \neq r, \mu_{ij}^{(b)} = 0.$$

步骤三:用公式(1)更新聚类原型模式矩阵 $P^{(b+1)}$,

$$P_i^{(b+1)} = \sum_{k=1}^n (\mu_{ik}^{(b)})^m x_k / \sum_{k=1}^n (\mu_{ik}^{(b)})^m, i = 1, 2, \dots, c. \quad (2)$$

步骤四:如果 $\|P^{(b)} - P^{(b+1)}\| < \varepsilon$,则算法停止并输出划分矩阵 U 和聚类原型 P ,否则令 $b=b+1$,转向步骤二。其中 $\|\cdot\|$ 为适合的矩阵范数。

由以上的算法不难看出,整个计算过程就是反复修改聚类中心和分类矩阵的过程,因此常称此类方法为动态聚类或者逐步聚类法。

2 应用FCM属性聚类分析沉积相的一般流程

对于研究层位较深或者探井较少的研究区,传统的方法在刻画沉积相及砂体展布形态时只能根据仅有的极少数据再加上物源方向、古地貌等信息进行粗略的识别,对于没有探井控制的区域,势必会造成失准。充分利用地震属性信息,应用FCM属性聚类分析方法可以有效对井间区域的沉积展布形态、砂体分布等进行识别,从而使缺少资料地区的沉积相识别有据可依,其一般流程见图1。以模糊C均值聚类的算法为基础,编制地震地质分析软件(SGA),SGA具有井震数据加载、井旁属性提取与优化、神经网络预测、FCM多属性聚类等功能,能够提供FCM属性聚类分析沉积相过程中需要的所有软件方面的技术支持。

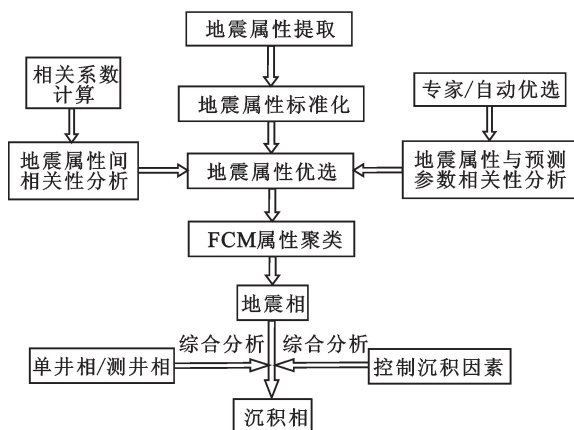


图1 应用FCM属性聚类分析沉积相流程

Fig.1 Flow chart of sedimentary facies analysis based on cluster of seismic attributes by fuzzy C-means algorithm

2.1 地震属性提取

在精细地震层位解释基础之上,首先进行属性提取。地震属性的提取是指利用各种数学分析方法从地震数据体中拾取隐藏在其中的与岩性和储层物性有关的信息的过程^[2]。地震属性提取方式常用

的有层间提取和沿层开窗提取。由于在进行地震层位解释时基本上完成了所有反射同向轴的追踪,因此在可靠标定砂体位置的情况下可以选择沿层开窗或进行层间属性的提取^[10]。对于地层厚度较薄,且横向变化不均匀的地层,一般采用层间属性提取,可以免于受到上下邻层的干扰;对于厚度较厚,发育较稳定连续的地层则可根据实际需要,选取沿层开窗的方式提取属性。

2.2 地震属性优化

地震属性的种类繁多,利用各种数学方法从地震数据体中提取的各种地震属性可归纳为振幅、波形、频率、衰减、相位、相关、能量、比率等8大类91种^[11]。在应用地震属性之前必须进行地震属性的优化,选择出最适合研究区的属性组合。

2.2.1 地震属性的标准化

由于各种地震属性的计算方法不同,使其具有不同的数据范围,如果不经过标准化而进行使用,势必会造成某些属性权重的错误放大和缩小。在地震属性标准化之后,可以使地震属性具有一致的数据分布范围,合理的反映属性的贡献程度。地震属性的标准化方法主要有总和标准化、最大值标准化、模标准化、中心标准化、标准差标准化、极差标准化和极差正规化等^[2]。对于多数情况,一般可采用标准差标准化。

2.2.2 地震属性的优选

在属性优选的过程中需要考虑两个问题:一是属性间的相关系数。相关系数越高表明两种属性所传达的地质信息相关度越高,通过计算属性间的相关系数^[12],从相关系数高的几种属性中选择其一,避免属性聚类时的信息重复和浪费,也减少属性之间的相互干扰。二是地震属性与所预测参数的敏感性,在分析沉积相时,预测参数主要是指砂岩含量或砂岩厚度等。通过相关优选方法,找出彼此相关性低而同砂岩敏感性高的地震属性组合参与到下一步的属性聚类分析中。目前常用的地震属性选择方法有:专家优选,长期在油田工作的专家对某一特定区块的地震属性与砂体特性关系有着较好的了解,可以凭经验进行属性优选;自动优化,地下储层是非常复杂的,借助数学手段进行选择也是一种好的方法,常用的自动优选法有交会图分析法、相关系数分析法等^[3,13]。最后,可将专家优选、自动优化与属性间相关系数计算优选后的结果相结合,综合分析,选出适合研究区目的层段的属性组合。

2.3 地震属性的模糊C均值聚类及沉积相分析

应用SGA软件,优选出地震属性,进行地震属性的模糊C均值聚类平面地震相成图。对于深部

位资料相对较少的研究区,如何将平面地震相同沉积相建立联系,赋予地震相合适而准确的沉积学意义是本方法的核心内容:以岩心观察为基础,充分利用测井、录井、地震等资料确定沉积相类型,确定不同地震相类型所代表的沉积相类型,综合考虑构造活动、气候条件、湖平面变化、物源方向等控制沉积体系的因素,从而明确沉积体系的展布规律。

3 应用实例

孤北洼陷沙四上亚段现今埋深一般为3 500 m,局部埋深大于4 000 m,许多探井并没有钻遇或钻穿目的层位,取心井段相对较少,缺乏充足的测井、录井资料,这给沉积相分析、有利储层预测等工作造成了一定的困难。本文中以孤北洼陷沙四上亚段为实例探讨该方法的适用性。

3.1 沉积背景分析

孤北洼陷位于济阳坳陷沾化凹陷东北部,是一个东、西、北三面断陷,向中部和南面超覆的洼陷,洼陷内部发育了孤北低隆起以及东西两个次级洼陷(图2)。边界断层的活动以及一隆两洼的构造格局

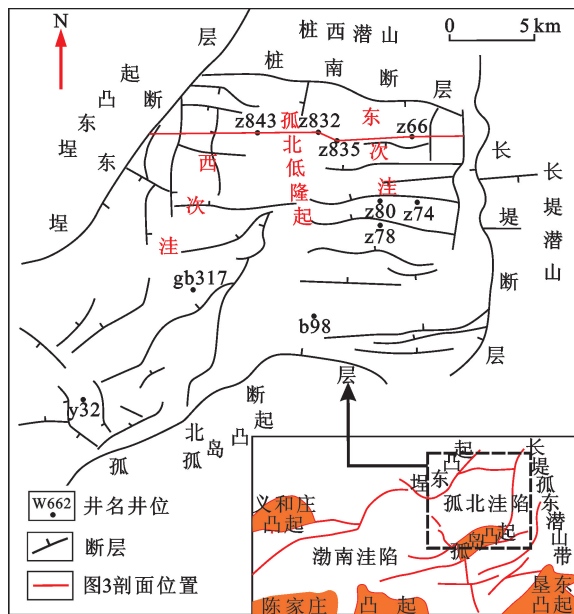


图2 孤北洼陷构造位置

Fig. 2 Tectonic position of Gubei subsag

控制了沉积体系的展布。不同学者对于孤北洼陷沙四上亚段沉积体系的认识存在一定的分歧,王永诗等^[14]认为沙四上亚段湖盆边缘发育冲积扇、扇三角洲和水下扇,董兆雄等^[15]认为主要发育扇三角洲相和湖泊相,钱峥等^[16]认为主要发育冲积扇-扇三角洲、曲流河-三角洲和湖泊沉积体系,高晓鹏^[17]认为在湖盆水下隆起周缘部位,滩坝砂体十分发育。在

造成认识差异的原因中,钻穿层位探井少,资料相对欠缺是一个重要的客观原因,因此有必要应用模糊 C 均值地震属性聚类辅助沉积相分析。

3.2 层序地层格架

沾化凹陷沙四段沉积时期,属于早第三纪裂陷的早期裂陷阶段^[9-10],以红色陆源碎屑为特征,其下地层主要为早期裂陷沉积的孔店组,发育杂砂岩、泥岩、石膏层。其上地层为强裂陷期沉积的沙三段—沙二下亚段和裂陷晚期的沙二上亚段—东营组^[9]。王永诗等^[14]认为孤北洼陷沙四段为一个完整的二级层序,低水位体系域形成于沙四下亚段沉积时期,湖侵体系域发育于沙四中亚段沉积时期,沙四上亚段为高位域和下降体系域沉积。本次研究根据地

震、测录井及岩心资料,在沙四上亚段中识别出湖侵体系域和高位体系域,并根据地层叠加样式划分出 5 个准层序组。其中,湖侵体系域对应准层序组 1 和准层序组 2,高位体系域对应准层序组 3、准层序组 4 和准层序组 5。沙四上亚段顶界面对应于地震反射层 T6_x,连续性较好,全区可追踪对比,对其下地层削截现象明显;沙四上亚段底界面对应于地震反射层 T7_x,连续性中等,上覆地层超覆于其上。湖侵体系域沉积时期,湖平面上升,地层沉积范围不断扩大,到准层序组 2 时期最大;高位体系域沉积时期,湖平面下降,地层呈进积叠加样式,受喜山运动一幕影响,整体抬升遭受剥蚀,准层序组 3~5 残余范围依次减小(图 3)。

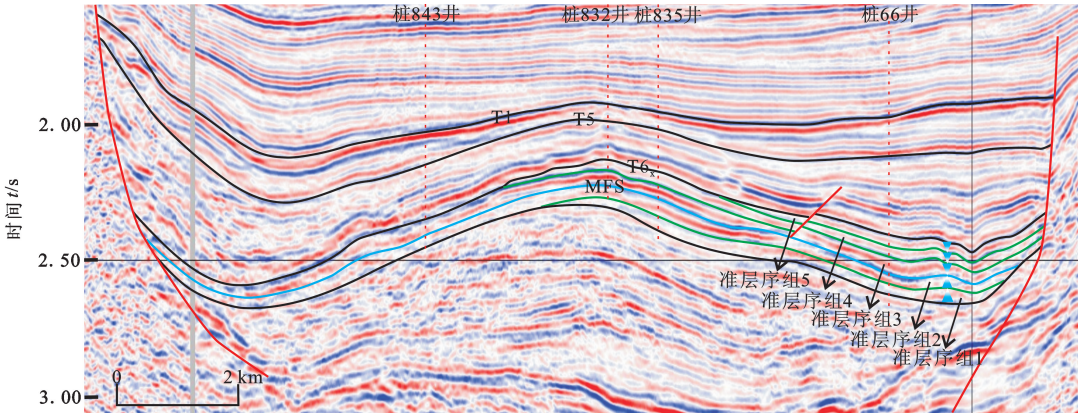


图 3 孤北洼陷东西向层序地层剖面(过桩 843 井—桩 66 井)

Fig.3 E-W sequence stratigraphy section in Gubei subsag(across Well Zhuang843-Zhuang66)

3.3 地震属性的提取与优化

以孤北洼陷沙四上亚段准层序组 3 为例,采用层间开窗并结合专家经验共提取最大振幅(max-amplitude)、总能量(sum-magnitude)、带宽(band-width)、主频(dominant-frequency)、瞬时频率(instantaneous-frequency)等 10 种属性。应用 SGA 软件对

地震属性进行标准差标准化处理,得到标准化后的属性。利用其属性优化选择模块计算每两种属性间的相关系数,属性间的相关系数为-1~1,当相关系数的绝对值越接近于 1 时,两种属性相关性越好,越接近于 0 时,相关性越差,结果见表 1。

表 1 地震属性相关系数计算结果

Table 1 Calculation results of correlation coefficient of seismic attributes

地震属性	与平均波峰振幅相关系数	与平均地震能量相关系数	与平均波谷振幅相关系数	与带宽比(偏差)相关系数	与主频相关系数	与瞬时频率相关系数	与最大振幅相关系数	与最小振幅相关系数	与总能量相关系数	与总正振幅相关系数
平均波峰振幅	1.000	-0.108	0.034	-0.050	0.120	0.064	-0.012	-0.019	0.115	0.163
平均地震能量	-0.108	1.000	-0.398	-0.062	0.108	-0.108	0.629	-0.516	0.546	0.440
平均波谷振幅	0.034	-0.398	1.000	0.353	-0.320	0.264	-0.271	0.677	-0.650	-0.328
带宽比(偏差)	-0.050	-0.062	0.353	1.000	-0.069	0.751	-0.069	0.395	-0.588	-0.478
主频	0.120	0.108	-0.320	-0.069	1.000	-0.051	0.138	-0.297	0.178	0.038
瞬时频率	0.064	-0.108	0.264	0.751	-0.051	1.000	-0.135	0.477	-0.538	-0.284
最大振幅	-0.012	0.629	-0.271	-0.069	0.138	-0.135	1.000	-0.289	0.498	0.555
最小振幅	-0.019	-0.516	0.677	0.395	-0.297	0.477	-0.289	1.000	-0.703	-0.272
总能量	0.115	0.546	-0.650	-0.588	0.178	-0.538	0.498	-0.703	1.000	0.778
总正振幅	0.163	0.440	-0.328	-0.478	0.038	-0.284	0.555	-0.272	0.778	1.000

地震属性的优选还要考虑其与沉积砂体之间的相关性,首先对孤北洼陷沙四上亚段准层序组 3 的砂岩厚度进行统计,再应用 SGA 软件并旁属性提取

模块提取井旁道地震属性,计算砂岩参数与井旁道地震属性的相关系数,结果见图 4。

从图 4 可知,总能量、平均波谷振幅、平均波峰

振幅、瞬时频率、总正振幅、最小振幅、带宽比(偏差)这 7 种属性与砂岩厚度相关系数较高,但总能量与其他属性的相关系数均较高,综合考虑各地震属性的相关系数以及聚类效果,对于准层序组 3,选

取平均波谷振幅、瞬时频率、总正振幅进行 FCM 属性聚类。同理,对其他准层序组地震属性进行优选,得到各准层序组的地震属性组合(表 2)。

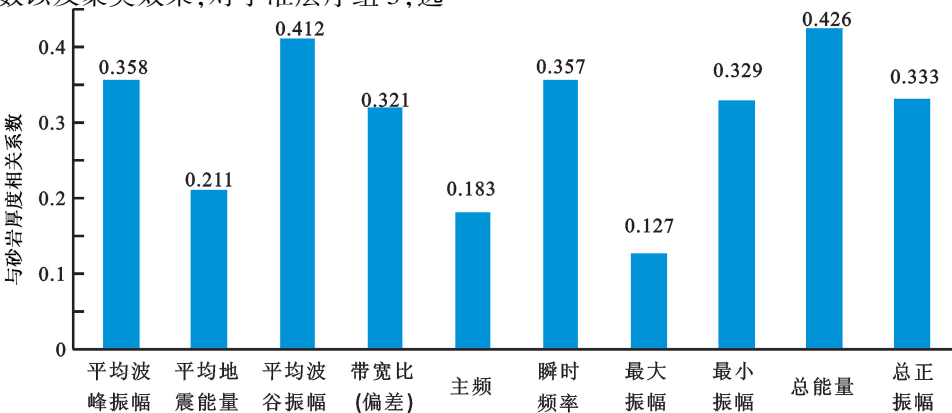


图 4 地震属性与砂岩厚度相关系数

Fig. 4 Correlation coefficient of seismic attribute and sandstone thickness

表 2 各准层序组地震属性优选结果

Table 2 Optimization results of seismic attributes of each parasequence set

层位	地震属性		
准层序组 1	最大能量	总振幅	主频
准层序组 2	带宽	平均波峰振幅	总负振幅
准层序组 3	平均波谷振幅	瞬时频率	总正振幅
准层序组 4	总振幅	瞬时频率	带宽比(除偏)
准层序组 5	总振幅	地震弧长	带宽比(除偏)

3. 4 地震属性聚类特征

利用 SGA 软件的 FCM 多属性聚类模块,将各层位优选出的地震属性聚类,如图 5 所示。准层序组 1 中,橙色、黄色区主要集中在东北部靠近边界断

层及中部超覆线处,东次洼内部为浅蓝色区;准层序组 2,橙色、黄色区一部分位于中央低隆起左侧,且中间窄南北宽,另一部分位于东南部,深蓝色区位于东次洼中,其他地区为浅蓝色区;准层序组 3 地震属性聚类特征同准层序组 2 类似,橙色、黄色区集中在北部桩南断层、东部长堤断层以及南部的剥蚀线附近,深蓝色区位于东、西次洼中心,其他地区为浅蓝色区;准层序组 4 中,橙色、黄色区沿南部剥蚀线分布,另外在桩 66 井附近也有发育,其他地区为浅蓝色区;准层序组 5 中,橙色、黄色区沿着北部桩南断层发育,其他地区为浅蓝色、蓝色区。

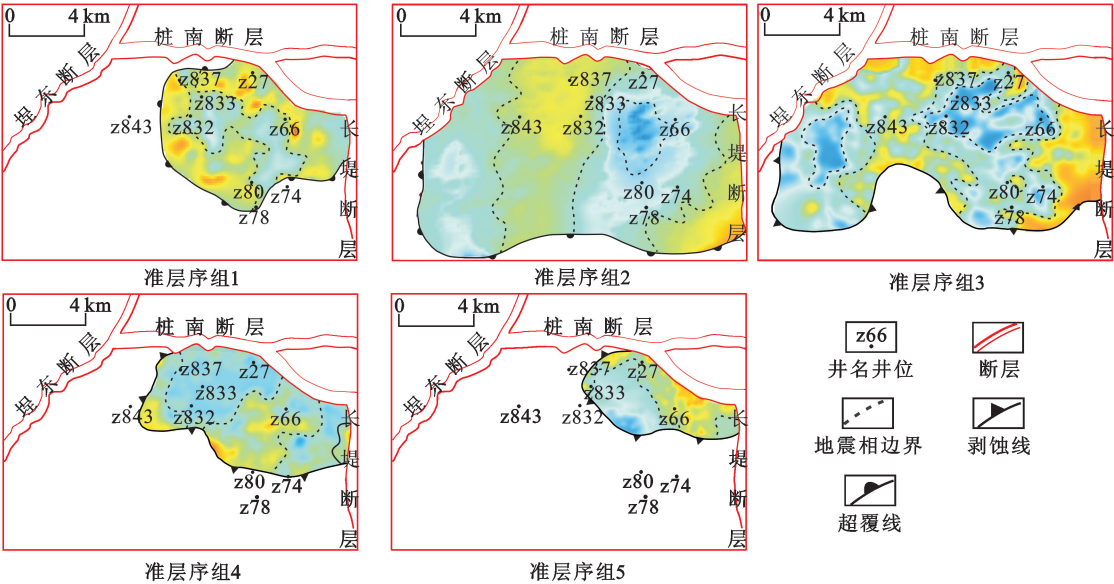


图 5 各准层序组属性聚类特征

Fig. 5 Clustering characteristics of seismic attributes of each parasequence set

3.5 沉积相类型及其标志

通过取心井段观察和测井相分析,结合构造背景、物源供给等因素综合考虑,认为孤北洼陷沙四上亚段主要发育三角洲、扇三角洲、湖泊 3 种沉积相及其 6 个沉积亚相。

三角洲主要发育三角洲前缘和前三角洲两个亚相。三角洲前缘岩性整体较细,以含砾细砂岩、粉砂岩、泥质不等粒砂岩(图 6(a))、疙瘩状泥岩为主,

分选中等,大型槽状交错层理、平行层理、粒序层理(图 6(b))、水平层理等沉积构造丰富,水下分流河道的冲刷面、远砂坝中成层分布的炭屑也较常见。GR 曲线整体为反序,呈漏斗型(图 7(a)),反映了三角洲前缘河口坝较为发育而水下分流河道较少的特点。前三角洲亚相位于三角洲前缘的前方,以灰色泥岩和粉砂质泥岩为主,沉积构造主要为水平层理、块状层理,生物扰动较常见。



(a) 泥质不等粒砂岩, 桩832井, 3546.5 m



(b) 反粒序, 桩832井, 3531.62 m



(c) 含砾细砂岩, 桩833井, 3587 m



(d) 槽状交错层理, 桩833井, 3585.3 m



(e) 冲刷面, 桩833井, 3580.2 m



(f) 灰白色粉砂质泥岩, 桩80井, 3738.46 m



(g) 白云质泥岩, 桩80井, 3742.26 m



(h) 近直立分布炭屑, 桩80井, 3723.7 m



(i) 砂岩与湖泥突变接触, 桩80井, 3721.7 m

图 6 孤北洼陷沙四上亚段岩心照片

Fig. 6 Core photographs of upper 4th Member of Shahejie Formation in Gubei subsag

扇三角洲识别出扇三角洲前缘和前扇三角洲两个亚相。扇三角洲前缘粒度同三角洲前缘相比较粗,以含砾砂岩(图 6(c))、中砂岩、细粉砂岩为主,多发育平行层理、槽状交错层理(图 6(d))、板状交错层理、冲刷面(图 6(e))、粒序层理等沉积构造,单层砂体厚度为 2~9 m,GR 曲线呈指型、箱型,以正序为主(图 7(b)),反映水下分流河道较为发育的特点。前扇三角洲在研究区内多呈席状展布,分布面积相对较小,以粉砂质泥岩为主,生物扰动明显。

湖相发育了滨浅湖和半深湖两个亚相,滨浅湖泥岩、粉砂质泥岩(图 6(f))、白云质泥岩(图 6(g))中夹有重力流沉积的细砂岩、含砾细砂岩,多发育块状层理、粒序层理、滑塌变形构造,炭屑近直立分布(图 6(h)),整体与湖相泥岩呈突变接触(图 6(i)),为典型的浊积岩,滨浅湖亚相 GR 曲线整体平直,数值较高(图 7(c))。半深湖分布于西次洼中心,灰黑色泥岩中夹有泥质粉砂岩,GR 曲线特征同滨浅湖相似,但由于泥质含量更高 GR 值也更高(图 7(d))。

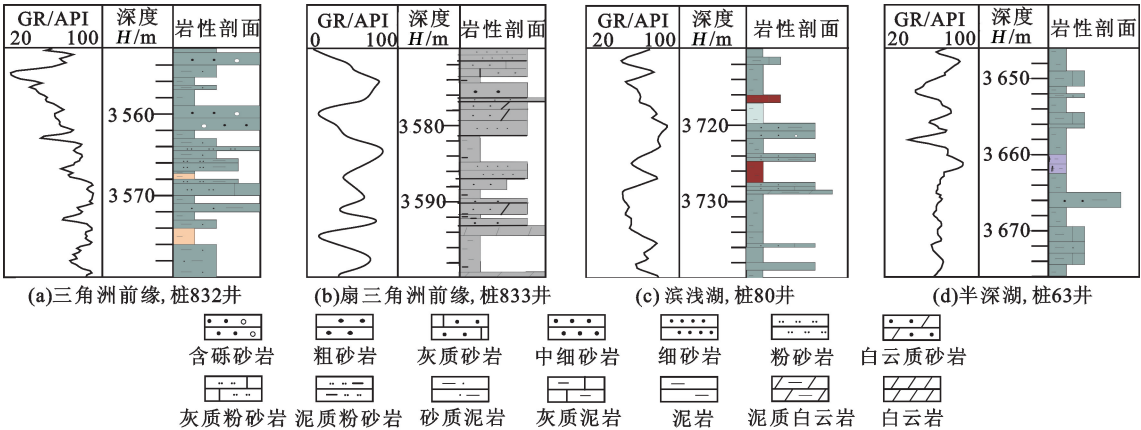


图 7 孤北洼陷沙四上亚段典型沉积测井响应特征

Fig. 7 Typical logging response characteristics of upper 4th Member of Shahejie Formation in Gubei subsag

3.6 沉积体系展布规律

将每口井的沉积相类型投在各准层序组属性聚类图上,分析认为深黄色及黄色为三角洲/扇三角洲前缘或前三角洲/扇三角洲亚相,颜色越深砂岩含量

越高。浅蓝色为滨浅湖亚相,深蓝色为半深湖亚相。综合考虑各地震相带范围、构造活动、气候条件、湖平面变化、物源方向等因素,明确孤北洼陷沙四上亚段各准层序组沉积体系展布规律。

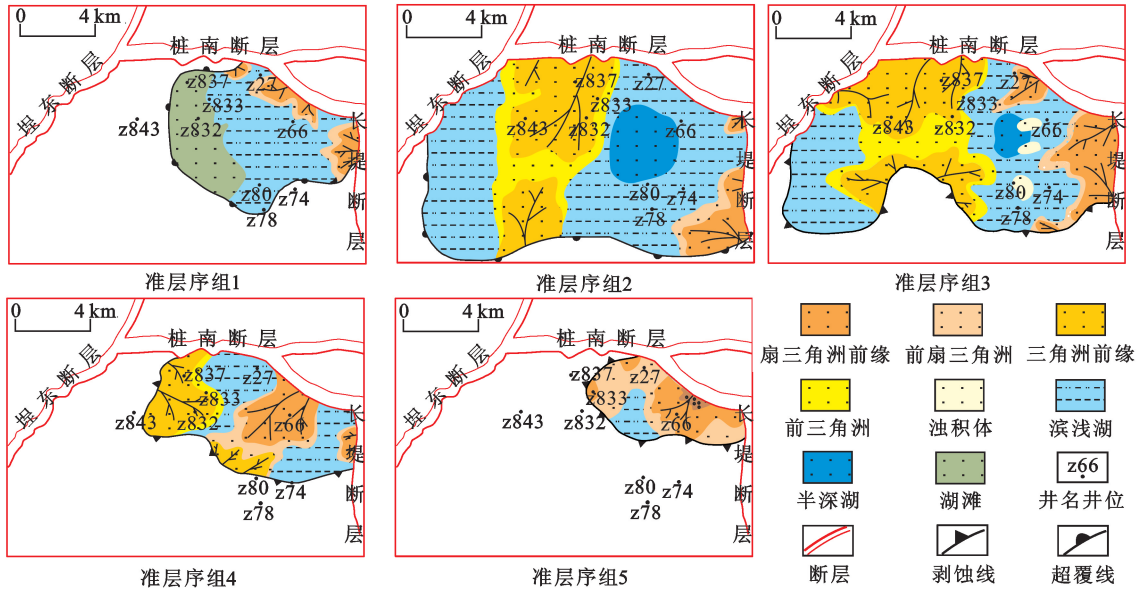


图 8 孤北洼陷沙四上亚段各准层序组沉积相平面分布

Fig. 8 Ichnography of sedimentary facies of parasequence sets of upper 4th Member of Shahejie Formation in Gubei subsag

孤北洼陷沙四段构成一个完整的层序^[14],沙四上亚段发育湖侵体系域和高位体系域,最大湖泛面

特征在地震以及录井资料中显示明显。准层序组 1 沉积时期,物源主要来自东北部,东部坡度较陡,物源形成一支扇三角洲跨过二台阶,北部物源也各自形成小型扇三角洲,扇体的展布规模整体较小,局限于洼陷边缘,洼陷中心发育有面积较大的泥质砂岩沉积,整体位于水下,属湖滩沉积,其余部分被滨浅湖所覆盖。准层序组 2 沉积时期,来自东北部的物源供给减弱,而来自桩西潜山、孤岛凸起的物源相对加强,由于南北向坡度较缓,形成的三角洲在西次洼汇聚连片,而东南方形成的扇三角洲向东次洼推进展布,此时湖盆面积最大,在东次洼中心处形成了面积较大的半深湖。准层序组 3 沉积时期,沉积物的供给速率大于可容空间的增长速率,湖平面开始下降,孤岛凸起、桩西潜山供源形成的三角洲发育面积增大,来自埕东凸起的物源同样形成三角洲同另外两支汇聚,东北部物源供给再一次增强,扇三角洲向东次洼中心推进较远。准层序组 4 沉积时期,西部地层被大面积剥蚀,湖平面进一步降低,来自北、西、南部的三角洲砂体展布面积增大,东北部扇三角洲继承性发育。准层序组 5 沉积时期,剥蚀面积继续增大,东北部扇三角洲砂体展布面积增大(图 8)。

4 讨 论

模糊 C 均值属性聚类分析沉积相是一种相对客观、准确的沉积相分析方法,适用于钻井未钻遇的深部位或探井缺少的新研究区,这些地区缺乏系统的取心、粒度、测井、古生物等传统的沉积相分析资料,应用该方法可以使缺乏资料控制地区的沉积相分析有据可依,有理可循。

在应用模糊 C 均值聚类属性分析沉积相的过程中,有两个关键问题:首先是地震属性的优化,是否正确选取地震属性组合参与聚类直接决定了沉积相的准确与否,因此要充分考虑地震属性与砂体的敏感性、地震属性间的相关性以及聚类的效果;其次是如何把聚类后的不同地震相赋予准确的沉积意义,这需要利用现有的岩心、测录井、地震等资料,先识别出研究区发育的沉积相类型,将单井投到属性聚类平面图上,再综合其他控制沉积因素,分析沉积体系的展布。该方法也同样存在一定不足之处,属性聚类的地震相对于识别沉积相的精度还有待提高,通常该方法可以较准确地识别出亚相,但微相识别或精细砂体刻画的能力较弱,需要进一步研究,目前可通过其他资料以及主观分析加以弥补。

5 结 论

(1) 利用模糊 C 均值属性聚类分析沉积相应充分考虑地震属性优化与如何正确赋予地震相准确的沉积意义两个问题,与传统方法相比可以更客观地反映地震资料所传达的信息,减少传统定性划分的人为负面因素,为钻井未钻遇的深部位和缺少探井的新研究区提供准确的沉积相分析方法。

(2) 孤北洼陷沙四上亚段主要发育三角洲、扇三角洲及湖相 3 种沉积相,其中扇三角洲多位于盆缘长堤凸起、桩西潜山附近的陡坡带,向东次洼推进较短;三角洲主要由北部桩西潜山、南部孤岛凸起向洼陷中心推进,延伸距离较远。

参考文献:

- [1] 王永刚,乐友喜,张军华. 地震属性分析技术[M]. 东营:中国石油大学出版社,2007:97-100.
- [2] 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.
- [3] 冯磊,李光明. 多属性模糊聚类在辽河滩海沉积相研究中的应用[J]. 地球物理学进展,2012,27(6):2622-2630.
FENG Lei, LI Guangming. Application of multi-attribute fuzzy clustering on study of sedimentary facies of Liaohe beach area[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(6):2622-2630.
- [4] 吕公河,于常青,董宁. 叠后地震属性分析在油气田勘探开发中的应用[J]. 勘探地球物理进展,2006,21(1):161-166.
LÜ Gonghe, YU Changqing, DONG Ning. The application of post-stack seismic attribute analysis in the oil-gas exploration and development[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2006,21(1):161-166.
- [5] 朱剑兵,赵培坤. 国外地震相划分技术研究新进展[J]. 勘探地球物理进展,2009,32(3):167-171.
ZHU Jianbing, ZHAO Peikun. Advances in seismic facies classification technology abroad[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2009,32(3):167-171.
- [6] THIERRY Coleou, MANUEL Poupon, KOSTIA Azbel. Unsupervised seismic facies classification: a review and comparison of techniques and implementation[J]. The Leading Edge, 2003, 22(10):942-953.
- [7] 杨培杰,印兴耀,张广智. 模糊 C 均值地震属性聚类分析[J]. 石油地球物理勘探,2007,42(3):322-324,347.

- YANG Peijie, YIN Xingyao, ZHANG Guangzhi. Cluster analysis of seismic attributes by fuzzy C-mean algorithm [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42 (3): 322-324, 347.
- [8] 孙晓霞. 模糊C均值(FCM)聚类算法的实现[J]. 计算机应用与软件, 2008, 25(13): 48-50.
- SUN Xiaoxia. The implementation of the fuzzy C-means clustering algorithm[J]. Computer Applications and Software, 2008, 25(13): 48-50.
- [9] 于洋. 模糊聚类分析中模糊C均值聚类计算方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学理学院, 2009.
- YU Yang. Research on fuzzy cluster analysis of fuzzy C-means clustering calculation method [D]. Shenyang: School Science, Shenyang University of Technology, 2009.
- [10] 李令喜, 陈发亮, 董文华, 等. 一种基于岩性组合结构的储层预测方法探讨: 以白音查干凹陷锡林好来地区为例[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(5): 61-69.
- LI Lingxi, CHEN Faliang, DONG Wenhua, et al. A lithology-assembly-based method reservoir prediction: by taking Xilinhaolai area in Baiyinchagan sag for example [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(5): 61-69.
- [11] 吴雨花, 桂志先, 于亮, 等. 地震属性分析技术在西南庄-柏各庄地区储层预测中的应用[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(3): 391-393.
- WU Yuhua, GUI Zhixian, YU Liang, et al. Application of seismic attribute analysis technique for reservoir prediction in Xinanzhuang-Baigezhuang area[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(3): 391-393.
- [12] 王新桐, 卢双舫, 肖佃师. 基于聚类分析的地震属性优化及储层预测——以敖包塔油田敖9工区为例[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(3): 61-66.
- WANG Xintong, LU Shuangfang, XIAO Dianshi. Optimization of seismic attributes and reservoir prediction based on cluster analysis-by taking Ao 9 working area in Aobaota Oilfield for example[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(3): 61-66.
- [13] 鲍祥生, 尹成, 赵伟, 等. 储层预测的地震属性优选技术研究[J]. 石油物探, 2006, 45(1): 28-33.
- BAO Xiangsheng, YIN Cheng, ZHAO Wei, et al. Optimizing selection of seismic attributes in reservoir prediction[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(1): 28-33.
- [14] 王永诗, 庄文山. 孤北洼陷沙三、四段沉积体系分析[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(3): 7-10.
- WANG Yongshi, ZHUANG Wenshan. Analysis on sedimentary system in Es₃ and Es₄ of Gubei subsag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10(3): 7-10.
- [15] 董兆雄, 张有瑜, 蔡正旗, 等. 沾化凹陷东北部沙四上亚段—沙三段沉积相研究[J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(6): 7-10.
- DONG Zhaoxiong, ZHANG Youyu, CAI Zhengqi, et al. Study on sedimentary facies of the upper Sha-4-Sha-3 member of Shahejie formation (palaeogene) in the north-eastern of Zhanhua sag[J]. Journal of South West Petroleum Institute, 2002, 24(6): 7-10.
- [16] 钱峥, 李淳, 李跃. 沾化凹陷沙四段上部砂体微相及其沉积环境[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1995, 19(5): 6-10.
- QIAN Zheng, LI Chun, LI Yue. Micro-sedimentary faces and depositional environment of the upper Es₄ in Zhanhua depression[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1995, 19(5): 6-10.
- [17] 高晓鹏. 沾化凹陷桩西地区沙四上亚段滩坝砂体沉积特征研究[D]. 北京: 中国地质大学能源学院, 2009.
- GAO Xiaopeng. The sedimentary characteristics of beach and bar in the upper 4th member of shahejie formation (E₂²s₄^u), Zhuangxi area of Zhanhua depression [D]. Beijing: School of Energy Resources, China University of Geosciences, 2009.

(编辑 徐会永)