

基于地震多属性的储层预测

——以珠江口盆地恩平凹陷古近系恩平组为例

杜文波¹, 孙桂华¹, 黄永健¹, 舒 誉², 聂 鑫¹

(1 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广州海洋地质调查局, 广州 510075;

2 中海石油(中国)有限深圳分公司, 深圳 517068)

摘 要:珠江口盆地恩平凹陷恩平组是重要的油气储层, 但受钻井资料较少且分布不均匀的限制, 应用常规手段无法进行精细的储层预测。利用地震多属性分析技术, 结合测井曲线及区域地质资料, 对恩平凹陷恩平组进行了精细的地震解释。根据珠江口盆地恩平凹陷高精度的三维地震和钻井等资料, 将恩平组分为 PSQ1、PSQ2、PSQ3 3 个三级层序。基于建立的等时层序地层格架, 表明恩平组发育辫状河三角洲相、扇三角洲相和滩坝相 3 种类型的沉积相。研究成果对恩平凹陷下步的油气勘探具有重要的指导意义。

关键词:珠江口盆地; 恩平凹陷; 恩平组; 地震多属性; 储层预测

中图分类号: P618.130.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2015.08009

地震属性是指由叠前或叠后的地震数据, 经过数学变换而导出的有关地震波几何学、运动学、动力学和统计学特性信息的综合特征参数^[1,2]。这种技术能从地震数据中提取其他方法无法提取的信息, 对地质现象特别是储层特征的正确认识提供了极大的帮助, 增加了地震方法的应用价值。随着数学、信息科学等领域新知识的引入, 人们从地震数据体中可提取的地震属性种类越来越丰富, 其中包括时间、振幅、频率、吸收衰减等方面的地震属性多达上百种, 并且新的地震属性还在不断地从地震数据中提取出来, 如分维属性和小波变换属性就是近几年才出现的。地震数据体中蕴含着丰富的地质信息, 就是通过地震属性来实现和表达的。但由于地震属性和储层信息并没有一一对应的关系, 地震属性的变化除了由岩性物性及含油气性的变化引起外, 还可以由其他地质因

素引起, 如砂泥岩含量或厚度的相对变化对地震波振幅相位属性有很大影响, 同时, 有些储层参数异常在某些属性上得不到反映^[3]。所以, 利用地震属性预测储层参数常具有多解性和不确定性, 已经不能满足精细勘探的要求, 多属性综合分析的方法可以降低这种多解性和不确定性。在地震属性敏感性分析的基础上, 选取优化后的地震属性组合, 运用神经网络等多种技术对多个单属性进行拟合, 利用拟合后的多属性地震相图对储层的发育状况展开综合预测。通过多属性综合解释, 综合地震分类属性与岩性之间的对应关系, 将地震信息转化为岩性信息, 从而完成对储层空间展布形态、分布范围和储层岩石物理特征参数的描述与预测^[4-6]。

1 区域地质概况

珠江口盆地位于我国南海北部, 是在燕山期花岗岩及古近系褶皱基底发育起来的中—新生代大型沉积盆地^[7,8]。从盆地整体的构造格局来看, 珠江口盆地具有南北分带、东西分块的构造特征, 由北向南可划分为北部断阶带、北部拗陷带、

收稿日期: 2015-06-03

基金项目: 国土资源部海底矿产资源重点实验室开放式基金(KLMMR-2013-A-09); 国家自然科学基金(91328205)

作者简介: 杜文波(1986—), 男, 硕士, 主要从事层序地层学、沉积学及地震资料解释的研究工作。E-mail: superdwb@outlook.com

中央隆起带、南部坳陷带和南部隆起带 5 个 NE 向次级构造单元。恩平凹陷位于珠江口盆地(东部)珠一坳陷最西端,总面积约为 5 000 km²,由 EP17 洼、EP18 洼和 EP12 洼 3 个北断南超的半地堑组成(图 1),整个凹陷处于拉张离散的大陆边缘构造背景下,具有独特的裂陷结构、构造样式、演化及动力学特征。其新生代地层厚度可达

8 000 m,基底分布有中生代的花岗岩、其他酸性侵入岩及古生代变质岩^[9,10]。由于钻遇到恩平组的钻井只有 8 口,且三维地震区的钻井只有 3 口,测井岩心资料较少,为下一步勘探带来了一定困难。基于研究区的储层预测存在的问题,本文采用地震多属性综合分析技术来精细研究恩平凹陷古近系恩平组内沉积相展布及储层参数特征。

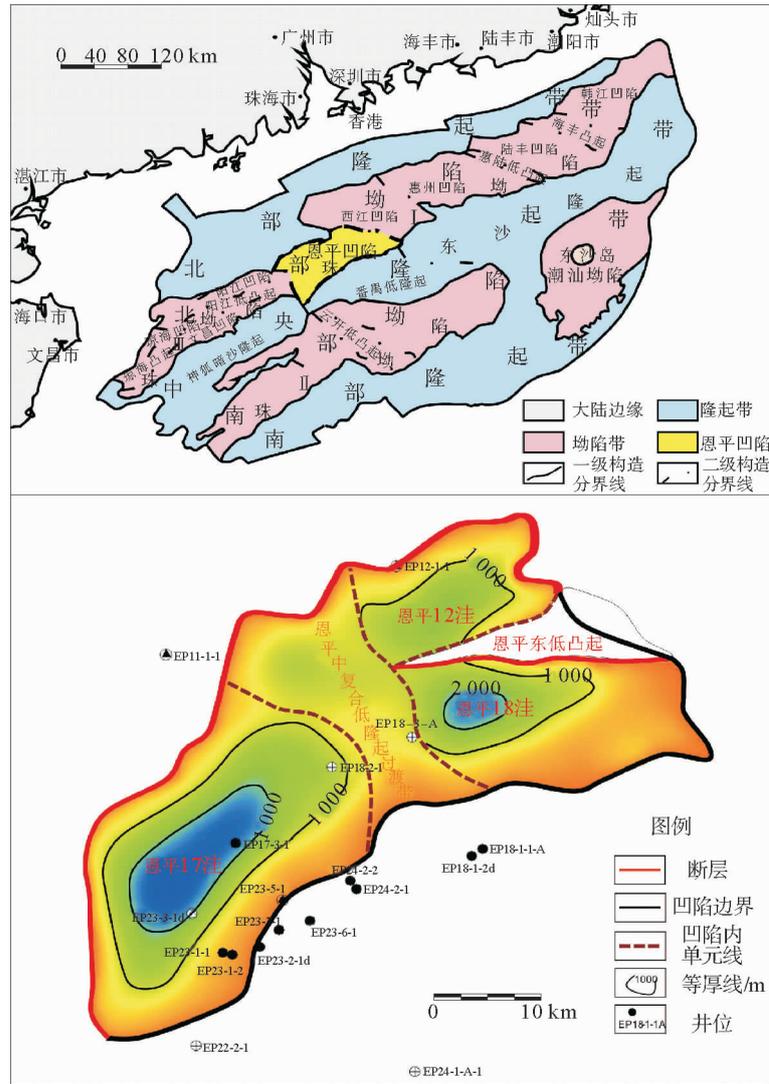


图 1 研究区构造单元划分

Fig. 1 Sketch map showing the tectonic location of the studied area

2 层序划分及特征

研究区在古地理构造背景研究的基础上,根据钻井、测井和古生物等资料并结合地震剖面层序界面特征,建立了恩平凹陷古近系恩平组的层

序地层格架(图 2)。将恩平组划分为 3 个三级层序,自下而上分别为 PSQ1、PSQ2、PSQ3,为一幕完整的裂陷旋回。其中 PSQ3 范围达到最大,而 PSQ1 和 PSQ2 发育范围基本相同,各层序中低位体系域发育范围相对较小,主要以高位和水进体系域为主。

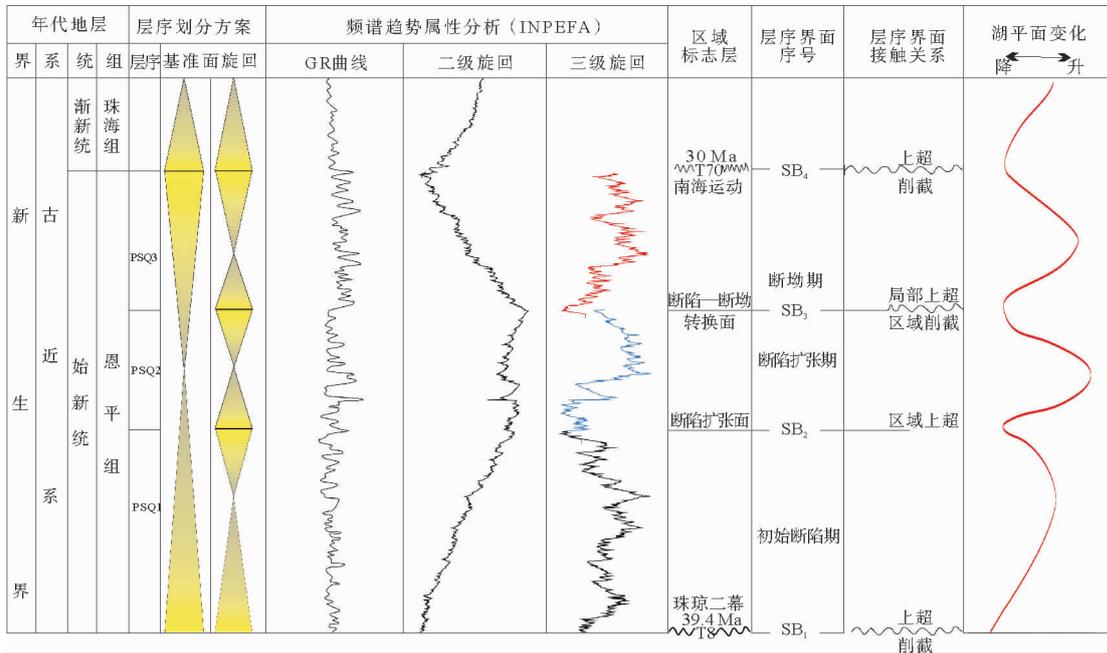


图2 恩平凹陷古近系恩平组层序地层划分方案

Fig. 2 Sequence stratigraphy of the Enping Formation in Enping Sag

PSQ1 层序由一不完全对称旋回组成,岩性主要为灰色泥质、灰色砂岩。GR 曲线呈平滑的箱形和钟形特征,下降半旋回对应高位体系域,上升半旋回对应低位体系域和水进体系域,上升半旋回厚度大于下降半旋回厚度,都是以砂岩为主,其中上升半旋回为富砂沉积,下降半旋回泥岩相对增多。

PSQ2 层序由一对称旋回组成,岩性主要为灰白色荧光细砂岩,灰色砂质泥岩。GR 曲线呈平滑的钟形特征,下降半旋回对应高位体系域,上升半旋回对应低位体系域和水进体系域,上升半旋回和下降半旋回厚度基本相当,其中上升半旋回以富砂沉积,向上泥岩增多,呈现湖进的特点。

PSQ3 层序由一不完全对称旋回组成,岩性主要为灰色、灰白色细砂岩和灰绿色泥岩。GR 曲线呈箱型特征,上升半旋回对应低位体系域和水进体系域,下降半旋回对应高位体系域,上升半旋回厚度略小于下降半旋回。该层序为一套富砂层序,上升半旋回呈明显的退积特征,下降半旋回表现为加积的特点。

3 地震相分析

地震相是指具有一定分布范围的、由地震反

射层组成的三维地质单元,其地震参数不同于相邻的地震相单元,它是特定的沉积相或地质体的响应^[11-12]。分析地震相的目的,即通过层内各地震相单元的识别、划分,利用地震资料恢复沉积环境与层序内的岩相特征。地震相的划分是通过识别层序内地震相参数的横向变化规律,从平面上揭示该层序的沉积特征及其所引起反射特征的变化。因此,地震相的识别对确定沉积相的类型和展布范围提供可靠的依据。

(1)PSQ1 为恩平组的断陷初期,该时期边界断层开始发育,沉积区靠近恩平凹陷的边缘部位。该层序一共发育 5 种地震相:①陡坡带(F1 与 F2 断裂控制侧)地震相主要为杂乱或前积反射,向湖盆延伸不远(图 3);②低频中强振幅断续地震相发育规模较小(图 3);③缓坡区(或南部低隆区)的地震相类型以丘状或透镜状反射为主;④湖心区的地震相为亚平行至波状断续反射(图 4a)。

(2)PSQ2 为恩平组的断陷中期,断层活动整体减弱,地震相特征有着一定的继承性。该层序一共发育 5 种地震相:①在盆地边缘,地震相类型主要以楔形前积为主;②南部低隆区丘状反射范围相对 PSQ1 时期减小;③缓坡区(或南部低隆区)的地震相类型以丘状或透镜状反射为主(图 3);④湖心区的地震相为亚平行至波状断续反射(图 4b)。

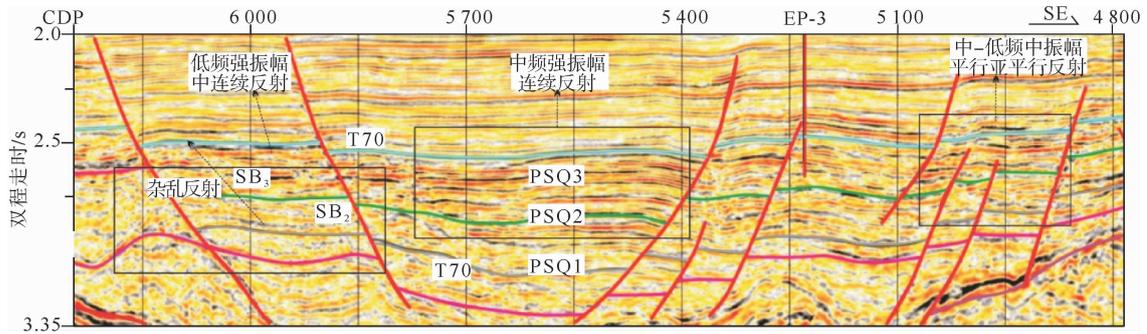


图 3 恩平凹陷恩平组地震反射特征

Fig. 3 Seismic reflection characteristics of Enping Formation in Enping Sag

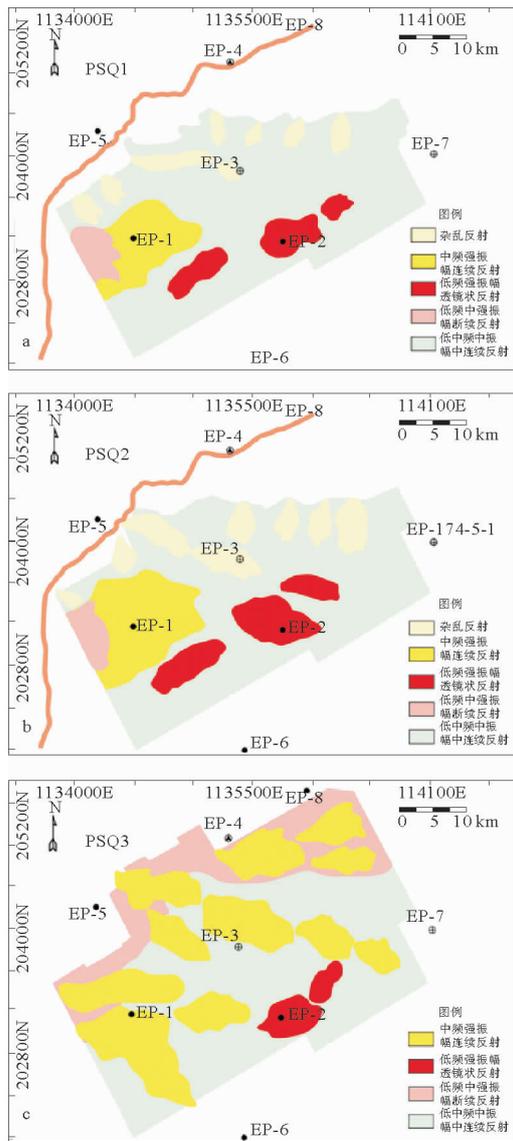


图 4 恩平凹陷恩平组地震相平面分布
Fig. 4 Seismic facies distribution of the Enping Formation in Enping Sag

(3)PSQ3 为恩平组的断陷晚期,湖盆整体萎缩,且水体更浅。该层序一共发育 4 种地震相:①北部的地震相为中频强振幅连续反射为主,主要发育在盆地边缘;②其次为低频中强振幅断续反射,紧靠盆地边缘发育;③缓坡区(或南部低隆区)以丘状或透镜状反射为主,范围较 PSQ1 和 PSQ2 小;④湖心区的亚平行地震相对应于滨浅湖相(图 4c)。

在三级层序演化过程中,平面地震相展布可观测到层序内部有利烃源岩发育类型与储集体空间配置存在较好对应关系^[13],即沉积中心区低频强振幅连续反射范围大小与控边断裂活动性直接关联,控边断裂活动性增强导致北部弱振幅低连续的楔形前积反射范围扩大,对应沉积中心区厚层泥夹薄层砂的低频强振幅反射范围扩大,同时砂砾岩体分布区带以空白反射为主;恩平组沉积时期,南部以丘状反射至透镜状反射为主,自下而上范围逐步减小,向高势区迁移。

4 地震多属性分析

4.1 地震多属性分析基本流程

地震多属性分析主要包括:层位标定及解释、地震属性提取、属性优化组合、多属性聚类分析和储层预测^[14](图 5)。通过三维地震资料和钻井、测井等资料解释的基础上,通过构造解释拾取层位,提取和优化地震属性。在井点位置处,可进行单属性相关分析,筛选出与目标参数相关值高的属性,再将各种地震属性进行相关分析,选出与以上属性不太相关的属性,从而优化选取最佳属性

组合,使地震属性与岩性之间存在对应关系,将地震信息转化为地质岩性信息,从而完成对储层空间展布形态,分布范围和储层岩石物理特征参数的描述与预测。

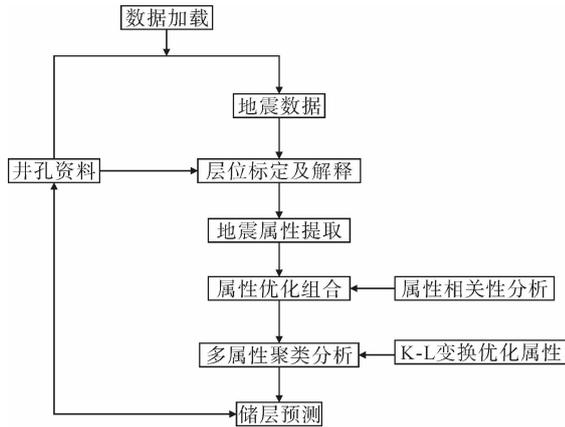


图5 地震多属性分析流程

Fig. 5 The procedure of seismic multi-attributes analysis

4.2 地震单属性提取及相关性分析

在三维工区层序地层解释的基础上,对恩平组 PSQ1、PSQ2、PSQ3 层序进行地震单属性试验。单个地震属性在表征储层地质特征时的片面性以及与储层岩性、流体性质关系的复杂性使得不同工区、不同储层对预测对象敏感的地震属性不完全相同,因此,在建立关系之前,首先要明确

哪些地震属性能够反映目标体特征,必须要优选出合适的地震属性^[15-18]。属性选取的原则:①地震属性必须是独立的,在研究目标和物理成因上应具有相关性;②要尽量选择有物理意义的属性,这有利于建立储层物性与地震属性的关系,而抽象的属性所表现的敏感性有可能只是一种偶然现象;③地震属性与所体现的地质含义应有很好的对应性^[19-21]。

本次研究选取能够指示岩性变化的10种地震单属性分别为:均方根振幅(RMS-RMS Amplitude)、平均持续时间(AD-Avg duration)、弧长(Arc-Arc Length)、平均正振幅(APA-Avg positive Amplitude)、带宽(BW-Bandwidth)、平均峰值振幅(APV-Avg peak Value)、瞬时相位(IP-Instantaneous Phase)、瞬时频率(IF-Inst. Frequency)、主频(DF-Dominant Frequency),其中AD、IF、IP属于瞬时类,AL、BW、DF属于频谱类,AE、APA、MA、RMS属于振幅类。根据提取的10种单属性,采取地震属性交汇图分析各个属性之间的关联性(图6)。从表中可以看出,相关系数共分为3个阶段:0.67~1.00为高值,用红色表示;0.33~0.67为中值,用黄色表示;0~0.33为低值,用绿色表示。通过以上分析,方根振幅(RMS)、瞬时频率(IF)、有效带宽(BW)3种属性的相关性最高,因此,选取这3种单属性做多属性的拟合。

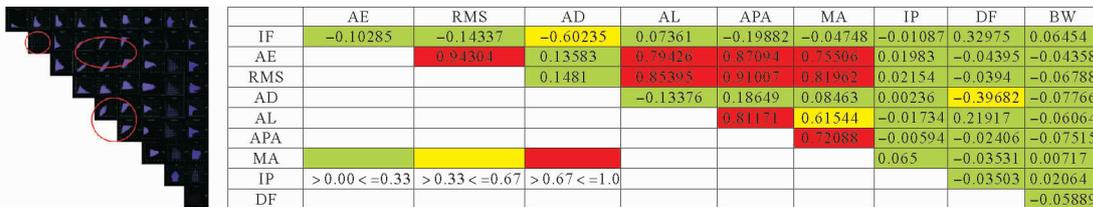


图6 单属性交汇图及相关系数

Fig. 6 The crossplot of single seismic attribute and correlation coefficient

4.3 地震多属性分析

基于单井中岩性组合及含砂率与井附近地震属性间的非线性关系(表1),拟合成地震多属性平面图。其中多属性异常可分为3种类型,分别以红色、黄色和蓝色表示。红色代表富砂

沉积,黄色代表富砂程度次之,蓝色表示富泥沉积^[22]。一般而言,红色、黄色相逐渐过渡为蓝色相,对应于砂泥岩性从盆地边缘向盆地中心过渡,可指示物源方向。在此基础上,结合地震相特征和单井优势相标定,从而进行地震相向沉积相的转换^[23-25]。

表 1 地震属性与井关系分析

Table 1 The relationship between seismic attributes and well data

层段	单井	砂体 厚度/m	含砂 率/%	单属性特征			多属性特征
				均方根振幅	瞬时频率	有效带宽	
PSQ3	EP-1	221.5	50.2	强	低频	中等	黄色异常,砂体主体发育区
	EP-2	156	67.5	强	低频	中等	红色异常,砂体主体发育区
	EP-3(未穿)	133.7	30.2	强	中频	窄	蓝色异常,泥岩主体发育区
PSQ2	EP-1	169.0	60.1	中等	低频	中等	黄色异常,砂体主体发育区
	EP-2	150	75.6	强	低频	中等	红色异常,砂体主体发育区
PSQ1	EP-1	287.5	61.2	强	低频	中等	黄色异常,砂体主体发育区
	EP-2	149.0	92.7	强	低频	中等	红色异常,砂体主体发育区

(1)由 PSQ1 多属性平面分析图可知,南北两侧地震多属性异常分布差异性明显(图 7)。其中,北部断控带 F1、F2 断裂其下降盘根部的地震相为楔形杂乱反射,在多属性图上表现为蓝色异常相逐渐向外缘黄色异常相过渡,平面上呈扇状、点状展布,通过类比邻区白云凹陷相同地质背景下地震相特征,解释为近源快速堆积的扇三角洲沉积^[26-29],其发育范围较小。根据 EP-1 井单井相与地震相特征指示黄色异常区为辫状河三角洲

沉积(图 4)。南部低隆区的红色、黄色指示富砂沉积体,整体呈环带状分布,红色异常区域集中发育在中央凸起带,向盆地方向,依次变为黄色异常连片发育区、黄色异常孤立发育区、蓝色异常区,指示区内岩性由粗变细,根据 EP-2 井单井相及地震相特征,南部红色与黄色异常区对应为滩坝相,而研究区外缘蓝色异常为泥岩相对发育区,解释为滨浅湖相。

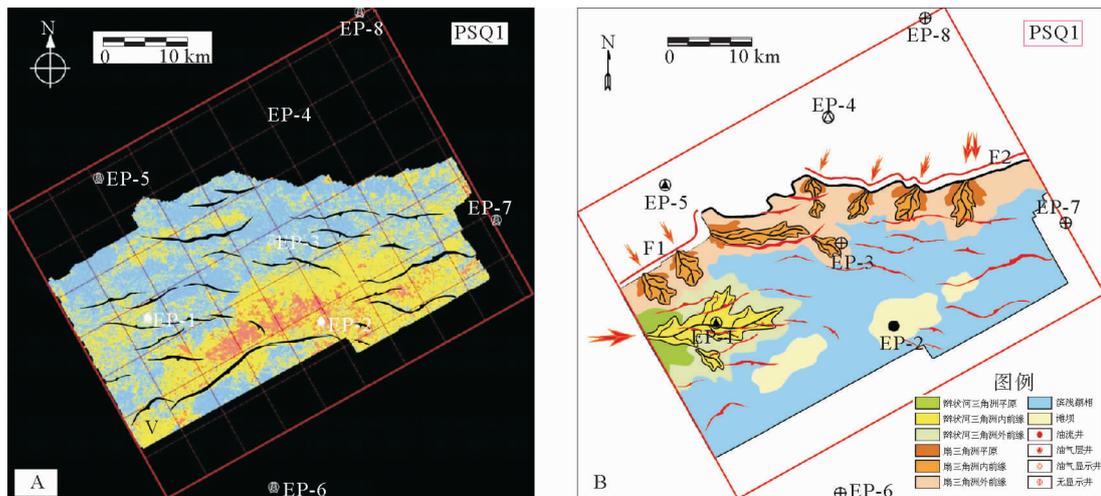


图 7 恩平组 PSQ1 地震多属性(A)和沉积相平面图(B)

Fig. 7 Seismic multi-attributes(A)and sedimentary facies map(B)of PSQ1 of Enping Formation

(2)由 PSQ2 多属性平面分析图可知,北部断裂活动作用减弱,沉积区地形坡度变缓,地震多属性异常呈继承性展布(图 8)。北部断控带 F1、F2 断裂下降盘多属性异常区呈扇状分布,对应的沉

积相为扇三角洲,相对 PSQ1 沉积范围萎缩、变小,根据 EP-1 井单井相与地震相特征指示呈条带状分布的黄色异常区为辫状河三角洲沉积。根据 EP-2 井单井相及地震相研究表明,南部红色

与黄色异常区对应为滩坝相,其范围较 PSQ1 减小,连片性变差,顺高势区分布(图 4)。而研究区外缘蓝色异常区为泥岩相对发育区,解释为滨浅湖相。从地震多属性图中可知南部基岩供源作用明显减弱,北部辫状河三角洲供源作用相对增强。

(3)由 PSQ3 多属性平面分析图可知,北部 F1 主控断裂活动减弱停滞,盆内 EW 走向新生断裂活动成主导,伴随沉积地形坡度进一步变缓,远程水系补给作用增强,沉积区范围明显扩大,黄色异常区呈大面积分布,具“满盆砂”特点(图 9)。

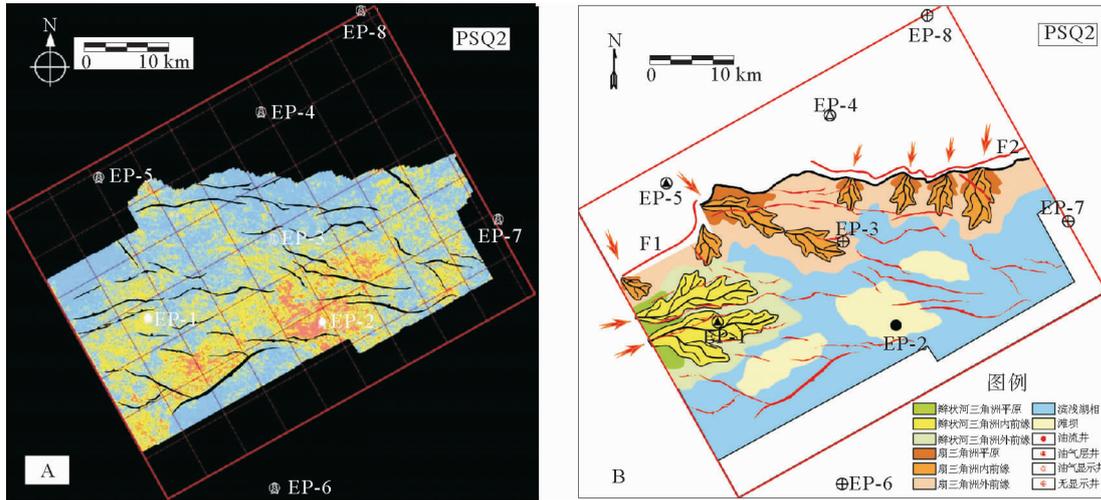


图 8 恩平组 PSQ2 地震多属性(A)和沉积相平面图(B)

Fig. 8 Seismic multi-attributes (A) and sedimentary facies map (B) of PSQ2 of Enping Formation

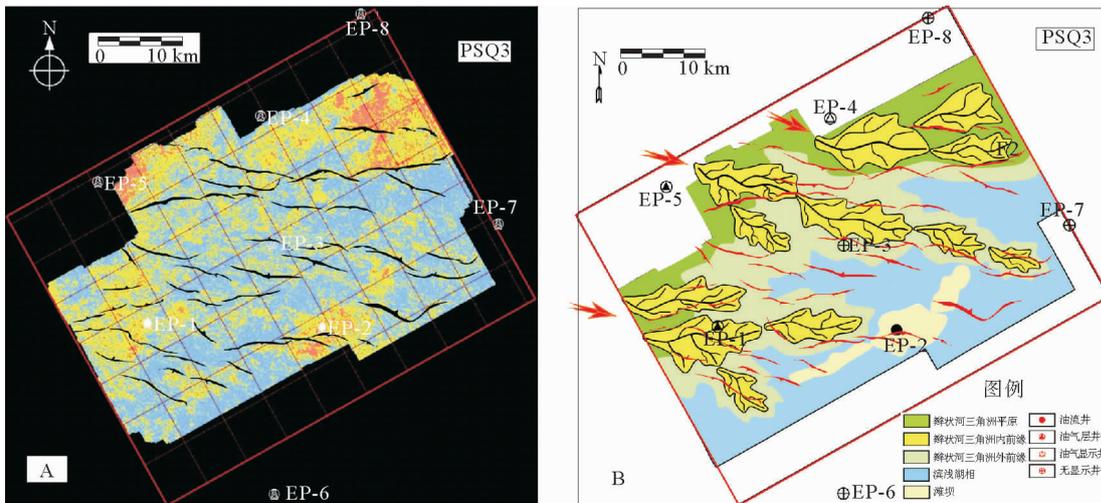


图 9 恩平组 PSQ3 地震多属性(A)和沉积相平面图(B)

Fig. 9 Seismic multi-attributes (A) and sedimentary facies map (B) of PSQ3 of Enping Formation

根据 EP-1 井单井相(表 1)与地震相特征指示呈典型的长条状分布的黄色异常区为辫状河三角洲沉积(图 4)。在新生断裂作用下,大型辫状河三角洲呈舌状由北部边缘向中心或南部低隆区推

进,覆盖原先滩坝沉积区。因坡度较缓($<1^\circ$),河流作用强,大型辫状河三角洲点状供源下,三角洲前缘向湖区、南部低隆区延伸的范围较远。根据 EP-2 井单井相及地震相研究表明,南部红色与黄

色异常区对应为滩坝相,其分布范围相对 PSQ1 与 PSQ2 时期大幅度萎缩,根据 EP-3 井单井相与地震相特征,蓝色异常区为泥岩相对发育区,解释为滨浅湖相(图 4)。

5 结论

(1)地震属性的种类较多,应根据不同研究区域的地质特点,在实验的基础上选择相应的地震属性参数。基于 K-L 变换多属性分析优化方法,在众多的地震属性参数中,能够剔除同类型相似度较高的属性。

(2)地震多属性分析相比单属性分析能更为全面综合地反映地质体的特征,在单属性分析的基础之上,结合地震相特征确定沉积相类型及储层参数,使预测结果更可靠。

(3)通过多属性分析技术在恩平地区目的层恩平组的应用,对研究区的沉积环境有了新的认识,恩平组主要发育辫状河三角洲、扇三角洲和滩坝相。恩平组沉积相类型的精细划分对以后开展储层预测具有非常重要的参考价值。

致谢:广州海洋地质调查局陈泓君、高红芳教授对文章初稿提出了建设性修改意见,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 魏 艳,尹 成,丁 峰,等.地震多属性综合分析的应用研究[J].石油物探,2007,46(1):42-47.
- [2] 韩长城,林承焰,马存飞.地震多属性优选技术在碳酸盐岩缝洞型储层预测中的应用[J].岩性油气藏,2013,25(6):67-78.
- [3] 李 敏,朱红涛,杨香华,等.地震多属性在少井区和无井区沉积体系分析中的应用——以渤中西环 BZ3-1 区块沙河街组为例[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(1):151-157.
- [4] 王家豪,刘丽华,陈胜红,等.珠江口盆地恩平凹陷珠琼运动二幕的构造—沉积响应及区域构造意义[J].石油学报,2011,32(4):588-595.
- [5] 黄丽芬.层序地层学在陆相沉积凹陷分析中的应用—以珠江口盆地恩平凹陷为例[J].中国海上油气(地质),1999,13(3):159-168.
- [6] 杜文波,朱红涛,杨香华,等.渤海湾盆地 QHD29-2 区块东营组东三段沉积与构造—古地貌的响应[J].海洋地质与第四纪地质,2012,31(6):47-56.
- [7] 耿 威.珠江口盆地惠州凹陷古近系储层沉积学特征[D].成都:成都理工大学,2009.
- [8] Fomel S. Predictive painting of 3D seismic volumes [J]. Geophysics, 2010, 75 (4):25-30.
- [9] Stark T. Unwrapping instantaneous phase to generate a relative geologic time volume [J]. 73rd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2003:1 707-1 710.
- [10] Stark T. Relative geologic time (age) volume: Relating every seismic sample to a geologically reasonable horizon [J]. The Leading Edge, 2004, 23: 928-932.
- [11] 朱红涛,黄 众,刘浩冉,等.利用测井资料识别层序地层单元技术与方法进展及趋势[J].地质科技情报,2011,30(4):29-36.
- [12] 张延玲,杨长春,贾曙光.地震属性技术的研究和应用[J].地球物理学进展,2005,20(4):1 129-1 133.
- [13] 杨勇强,邱隆伟,姜在兴,等.陆相断陷湖盆滩坝沉积模式——以东营凹陷古近系沙四上亚段为例[J].石油学报,2011,32(3):417-423.
- [14] 朱筱敏,刘 媛,方 庆,等.大型坳陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式:以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例[J].地学前缘,2012,19(1):89-99.
- [15] Chopra S, Alexeev V, Pruden D. Non-linearity in multi-attribute analysis: Tackling [J]. First Break, 2004, 22: 43-48.
- [16] 王 华,廖远涛,陆永潮,等.中国东部新生代陆相断陷盆地层序的构成样式[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(1):277-285.
- [17] 胡受权,郭文平,杨凤根,等.试论控制断陷湖盆陆相层序发育的影响因素[J].沉积学报,2001,19(2):256-262.
- [18] 朱伟林.中国近海油气勘探进展[J].中国工程科学,2010,12(5):19-24.
- [19] 于兴河,姜 辉,李胜利,等.中国东部中、新生代陆相断陷盆地沉积充填模式及其控制因素——以济阳凹陷东营凹陷为例[J].岩性油气藏,2007,19(1):39-45.
- [20] 邓宏文,郭建宇,王瑞菊,等.陆相断陷盆地的构造层序地层分析[J].地学前缘,2008,15(2):1-7.
- [21] Galloway W E. Siliciclastic slope and base-of-slope depositional systems: component facies, stratigraphic architecture, and classification [J]. AAPG Bulletin, 1998, 82 (4): 569-595.
- [22] Houck K J. Effects of sedimentation, tectonics, and glacio-eustasy on depositional sequences, Pennsylvanian Minturn formation, North-central Colorado [J]. AAPG Bulletin, 1997(9): 1 510-1 533.
- [23] 董艳蕾,朱筱敏,李德江,等.渤海湾盆地辽东湾地区古近系地震相研究[J].沉积学报,2007,25(4):554-562.
- [24] 顾家裕,郭彬程,张兴阳.中国陆相盆地层序地层格架及模式.石油勘探与开发,2005,32(5):11-15.
- [25] 顾家裕.陆相盆地层序地层学格架概念及模式.石油勘探

- 与开发, 1995, 22(4): 6-10.
- [26] 纪友亮, 张善文, 王永诗, 等. 断陷盆地油气汇聚体系与层序地层格架之间的关系研究. 沉积学报, 2008, 26(4): 617-623.
- [27] 姜 华, 王 华, 林正良, 等. 南堡凹陷古近纪幕式裂陷作用及其对沉积充填的控制[J]. 沉积学报, 2009, 10(5): 976-982.
- [28] 李继红, 魏魁生, 厉大亮, 等. 非海相沉积层序的成因和构型特征. 沉积学报, 2002, 20(3): 409-415.
- [29] 林畅松, 张燕梅, 李思田, 等. 构造坡折带: 断陷盆地层序分析与油气预测的重要概念[J]. 地球科学, 2000, 25(3): 260-266.

RESERVOIR PREDICTION BASED ON SEISMIC MULTI-ATTRIBUTES ANALYSIS: AN EXAMPLE FROM PALEOGENE ENPING FORMATION OF ENPING SAG IN THE PEARL RIVER MOUTH BASIN

DU Wenbo¹, SUN Guihua¹, HUANG Yongjian¹, SU Yu², NIE Xin¹

(1 Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Mineral of Land and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 2 China National Offshore Oil Corporation Ltd of Shenzhen, Shenzhen 517068, China)

Abstract: The Paleogene Enping Formation of the Enping Sag is the most important reservoir in the Pearl River Mouth Basin. It is hard to be predicted precisely by using conventional methods due to absence of corresponding data such drilling data which are usually unevenly distributed. Using the seismic multi-attributes analysis technique, combined with the data of well logs, core, lithology and regional geology, we made a fine interpretation of the lithofacies of the Enping Formation. The Enping Formation could be divided into three third-order sequences: PSQ1, PSQ2, and PSQ3. Within the isochronous stratigraphic framework, there are three sedimentary facies, i. e. braided river delta, fan delta and beach bar facies. The results have been tested in the hydrocarbon exploration in the Enping Sag.

Key words: Pearl River Mouth Basin; Enping sag; Enping Formation; seismic multi-attributes; reservoir prediction