

碎屑岩成像测井沉积学研究 及其在海上油田的应用

杨玉卿, 崔维平, 田洪

(中海油田服务股份有限公司)

摘要 基于成像测井技术在我国海域含油气盆地的应用积累,提出了碎屑岩成像测井沉积学的概念。碎屑岩成像测井沉积学的主要研究内容包括地层岩性识别、沉积构造解释、沉积序列与微相分析、砂体物源与古流向分析、砂体分布预测等五个方面。利用南海西部的实际资料,运用成像测井技术,对五方面的应用逐一分析或提出了应用前提、使用步骤、注意要点、已有规律特征以及典型实例。

关键词 碎屑岩; 成像测井沉积学; 沉积相分析; 储层预测; 海上油田

中图分类号: TE111.3; P631.86

文献标识码: A

20世纪末期,成像测井技术开始引入我国,经过十多年的发展,它在沉积相分析^[1-4]、储层研究^[5-6]和硬地层评价^[7-9]等方面发挥了积极而重要的作用,逐渐成为油田勘探开发的重要组成部分之一,并已成为测井地质学的核心内容^[9]。

成像测井技术在沉积相分析和储层评价方面的应用,已经逐渐形成成像测井沉积学学科分支的主要内容,它在我国陆上油田^[1-2,10-11]和海上油田^[3-6]均得到了良好应用。我国各海域含油气盆地基本为碎屑岩系地层,目的层段沉积相类型多样,有陆相、海相和海陆过渡相,储层的成因、分布及物性变化大,加之地震资料的分辨率较差^[3],因此储层研究的难度很大。近年来,各海域油田有愈百口井采集了成像测井资料,主要分布于南海西部油田。由于采集解释费用昂贵,大多油田的采集量一般在2~4口井,但这些资料在复杂储层的沉积学研究中发挥了积极作用^[3,6]。

碎屑岩成像测井沉积学涉及的主要内容可以归纳为五个方面,即地层岩性识别、沉积构造解释、沉积序列与微相分析、砂体物源与古流向分析、砂体分布预测。下面对这五个方面逐一介绍成像测井沉积学研究及其在海上油田的应用情况。鉴于成像测井资料在海上油田的分布比较分散,本文重点以南海

西部珠江组海相沉积为例,来阐述成像测井沉积学研究的方法、应用及体会。

1 地层岩性识别

碎屑岩通常根据粒度、成分和成因等进行分类,按照粒度可以分为四类,即砾岩、砂岩、粉砂岩和泥岩^[12],这种按粒度的分类方法因直观易用,故在油田应用普遍。目前基于成像测井资料识别岩性最为普遍的方法是根据图像的颜色变化或色标值大小,参考岩心和常规测井并进行定性的图版式识别^[2-3,13-14],它对建立区域性复杂地层序列发挥了重要作用。李潮流等^[15]将成像测井图像色标值定量地转化为岩性粒度信息,并将碎屑岩地层按粒度大小划分为泥质、粉砂质和砂质三种岩性,这种岩性计算方法具有定量特色,但仍属于相对定量,它与沉积岩石学中粒级的划分尚有差异^[12]。

岩石的准确定名是非常困难的,基于成像测井图像色标值识别岩性,因忽略流体性质和成岩作用的影响,会使结果与实际存在差异。根据笔者多年的成像测井沉积学应用研究和油田沉积相分析,本文提出一种综合定量确定地层岩性的方法^①,主要思路和步骤如下所述。

收稿日期: 2011-12-30; 改回日期: 2012-03-09

杨玉卿: 1963年生,高级工程师。1995年毕业于中国石油大学(北京),获博士学位。主要从事沉积学及测井地质应用研究工作。通讯地址: 101149 北京市 232 信箱 中海油服油田技术事业部; 电话: (010)84523133

① 杨玉卿,崔维平,李国军. 珠江口盆地西部成像测井沉积相研究[R]. 中海油田服务股份有限公司, 2010.

(1)根据常规测井自然伽马曲线与岩性较密切的关系,以岩心宏观描述为准,刻度自然伽马测井曲线,经过处理,建立宏观的岩性剖面。

(2)根据岩心或壁心实验资料,主要是岩矿鉴定和粒度分析,定量统计出各粒级颗粒所占比例,参照多组分命名原则^[12],按粒级确定岩石的准确名称。定名时还需要参考录井和宏观描述资料,因为微观分析因样品有限,不能充分体现出一些砾石的存在,成像图像因精度有限有时也难以反映出砾石。

(3)根据准确的岩石名称进一步标定宏观岩性剖面,建立目的层段连续的岩性剖面。依据成像测井的纵向高分辨率特性,即图像的高分层能力,把不同的岩性细分开来,分层的精度一般为分米级,完全能适合沉积相分析和高精度的层序地层学研究。

上述地层岩性识别方法是传统的岩石学鉴定与测井相分析的结合,克服了流体性质与成岩作用等的影响,系统连续地反映了地层沉积的变化,岩性识别的精度比常规测井要高数倍,即所识别的地层厚度可

以大为减薄。这一方法来源于对海上油田的研究,适用于海洋勘探,但也同时适用于陆上或其它地区。

图 1 是南海西部 E-1 井地层岩性识别成果图,从中可以看出,就中下部(井深 1698~1725m)细砂岩段的静态图像特征看,它受流体性质的影响明显,上下部色调变化很大,但岩性基本稳定。再看该细砂岩段之上的粉砂岩(井深 1690~1694m),它在静态图像上岩性没有明显变化,但在动态图像上,纵向变化较大,显示出分层精度很高,其中在井深 1693m 之下有三层较纯净的色调较亮的粉砂岩层,上部最薄的一层厚约 11cm,表现出比常规测井高得多的分层能力。

2 沉积构造解释

原生沉积构造包括层理构造和层面构造,尤其层理构造是沉积岩最重要的特征之一,是沉积介质和沉积环境能量状况的重要标志。研究沉积构造通常仅仅是在露头进行观察,而倾角和成像测井技术的应用为揭示沉积构造提供了新的技术方法,尽管基于倾角矢

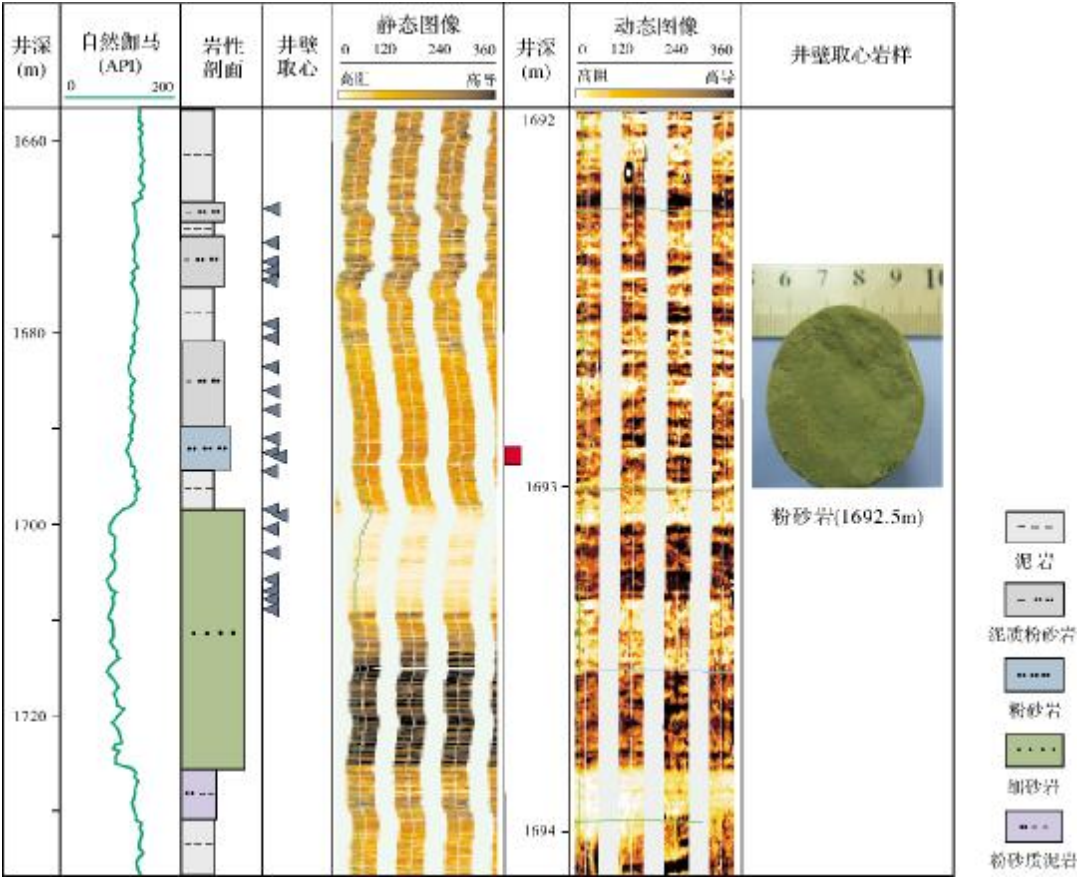


图 1 南海西部 E-1 井成像测井地层岩性识别成果图

量模式解释沉积构造的理论基础尚不十分成熟^[9]。

就层理构造而言,组成层理的最小单位纹层厚度一般以毫米(mm)度量,但随着介质能量增大,纹层厚度也可达到厘米(cm)级,对于纹层系或相同岩性组成的纹层组而言,其厚度可达厘米(cm)到米(m)的数量级^[16]。成像测井的纵向、横向分辨率约为 5 mm,与中厚纹层和一般纹层系的厚度接近^[16],这为利用成像测井技术识别层理内部纹层或纹层系界面(相当于 1—2 级界面^[17])提供了基础依据。由于纹层面可以平行于地层的层系界面,也可能与地层层系界面成一定角度^[16],因此在识别层理构造时要对纹层系界面和地层层系界面仔细加以区分,这样才能得出可靠的结论。

对层理构造的处理,通常采用分米级窗长和厘米级步长的小尺度参数,以反映层理内部微细纹层面的构造形态。对于厚度小于 3~5 m 的砂体或各测量极板相关性不好时,要参考岩心并采用必要的人机交互处

理进行解释。目前层理构造的解释主要基于倾角矢量模式特征,并建立了常见的层理构造与倾角矢量模式之间的关系^[9,18]。近年来,成像测井的广泛应用,也总结了较丰富成像图像与层理构造的识别模式^[14,19-22]。在研究中,可以依据倾角矢量角度判断层理形成时的水动力条件,一般把微细纹层倾斜角度大于 20°确定为高能沉积环境(最高不超过 33°~35°),10°~20°为中等能量沉积环境,低于 10°为低能沉积环境。

近几年,在海上利用成像测井图像识别出的层理构造非常丰富,包括常见的板状交错层理、槽状交错层理、双向交错层理和波状层理等^①(图 2)。基于成像测井图像特征、地层倾角矢量特征以及对应的地质模型,笔者总结建立了七种在我国海上油田中常见层理构造的成像图像、倾角矢量及地质模型一体化的综合识别模式(图 3),为正确、快速判别常见沉积层理构造提供了可靠的手段。在研究中,笔者利用成像测井

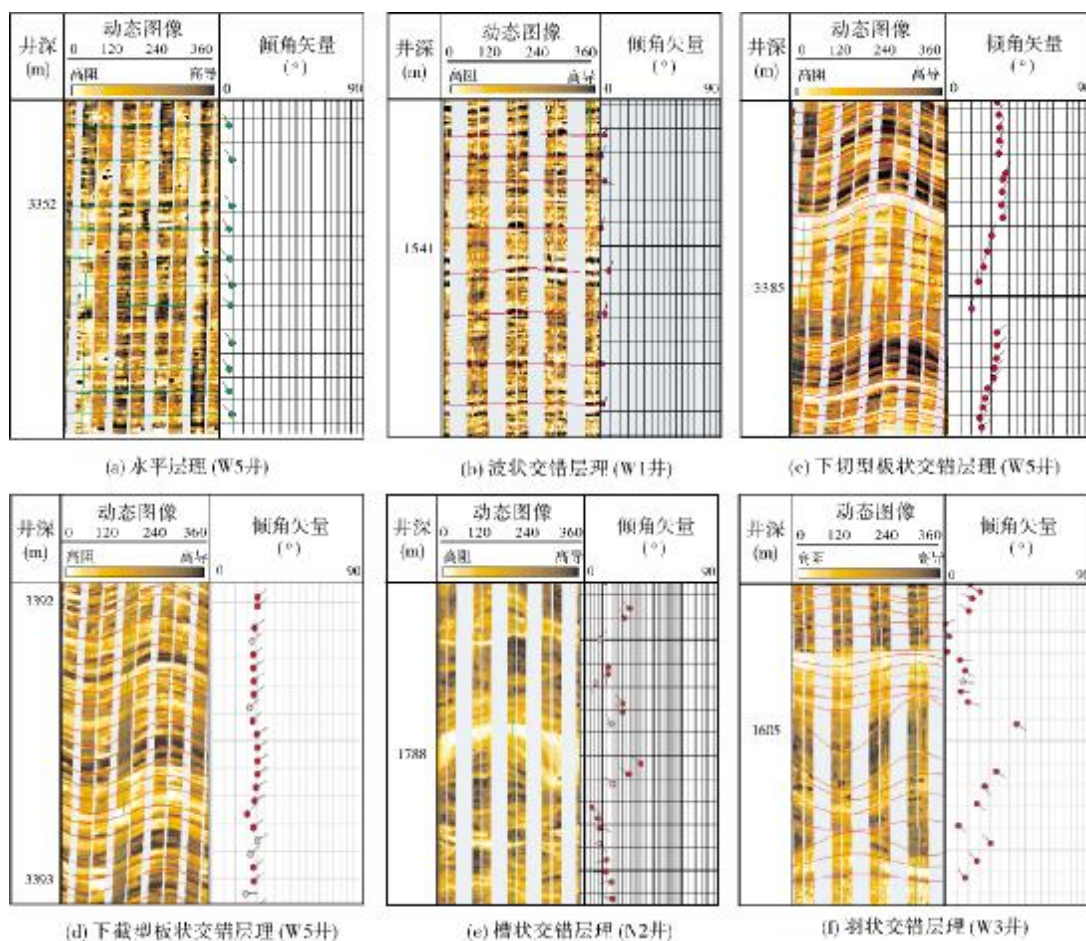


图 2 我国海上油田主要层理构造成像图像与倾角矢量模式

图中各井均位于南海西部

资料还识别出了其他多种沉积构造,包括层面构造冲刷面、变形构造卷曲层理、生物扰动构造、化学成因构造结核、特殊矿物黄铁矿等,其中在南海西部珠江组识别出的结核类型多样,它们与沉积环境密切相关^[4]。

成像模式	倾角模式 (°)	地质模式	层理类型
N E S W	0 20 40 60 80		
			水平层理
			波状层理
			下截型板状交错层理
			下切型板状交错层理
			槽状交错层理
			块状层理
			羽状交错层理

图3 我国海上油田常见层理构造综合识别模式

3 沉积序列与微相分析

成像测井资料的最大优势在于纵向上的高分辨率,基于岩性识别结果,可以建立研究区目的层段的沉积序列,其纵向分层精度可达几个厘米到十几个厘米(图1)。根据区域地质背景资料,高精度纵向沉积序列的建立对于研究区域沉积微相分析、沉积环境演化、高精度层序地层分析可起到很好的指导作用。笔者曾基于成像测井资料建立过南海西部地区两种不同成因地层的高精度沉积序列^[6]。另外,对珠江组的沉积微相系统研究后,将其划分为三种沉积相^①,即潮控型滨海相、浪控型滨海相以及浅海相,并划分出八种沉积微相,分别是潮汐水道、潮汐砂坝、潮汐浅滩、沿岸砂坝、席状砂、浅海泥、浅海风暴砂以

及滨外砂坝。在这些微相的识别与研究中,成像测井资料所确定的古流向和沉积构造如羽状交错层理的识别对潮汐水道微相的确定,冲刷面、粒序层理等对风暴砂沉积微相的确定等,在地质资料缺乏的情况下,都发挥了积极而重要的作用。

4 物源与古流向分析

碎屑岩物源与古流向分析是研究沉积岩形成过程与形成环境的重要内容,方法和手段多种多样。对于粗碎屑岩而言,从地层倾角和成像测井资料确定物源区的方法比较成熟,一般来说,用于沉积构造解释的倾角矢量成果图的蓝模式及绿模式代表了古流向,与之相反的方向就是物源区^[9,18]。

值得注意的是,基于成像测井资料确定的古流向,代表的基本是井点处的水流方向,要确定较大范围内的水流方向应有较多的井点古流向资料或大井段古流向统计资料,并结合区域地质背景。如一条河流中,不同部位的水流方向可能差异较大,只有综合判断砂体的沉积特征才能得出可靠的认识。对于大型湖盆和滨海近岸砂坝沉积,由于古流向变化较大,可能有向岸流、离岸流以及沿岸流等,要确定出不同古流向的指示意义就要先确定岸线、陆地与湖盆(海盆)的大致方向,然后依据倾角矢量成果图来分析,角度较大的方向通常为向岸流方向,角度小的为离岸流方向,水流模式是“双型”的^[23]。

下面列举南海西部油田W2和W3井的成像测井资料分析成果,它们分别针对两种不同成因的沿岸砂坝和潮汐水道砂体,这是两个难得的典型分析实例。

实例1 W2井珠江组一段开阔海沿岸砂坝沉积古流向分析图(图4) 其中倾角矢量朝向为NW的蓝模式倾角较大,代表了向岸流方向,上部很低角度的绿模式主要为SE向,代表了朝向海盆的离岸流方向,结合其他地质背景资料,确定沿岸砂坝的古流向为双向,主要为NW向,物源区在NW方向,砂体加厚方向也在NW向。

实例2 W3井珠江组二段潮汐水道沉积古流向分析图(图5) 在图上部的水道型砂体中,从动态图像上看出砂体双向水流发育,为NW—SE向,其中下部的角度较大,介于12°~23°,属于中高能量的水动力条件,上部角度在10°左右,属于较低能条件,综合分析物源区在NW方向。对于潮汐型水道,远岸的潮下带砂体更为发育,故砂体加厚方向在SE向。

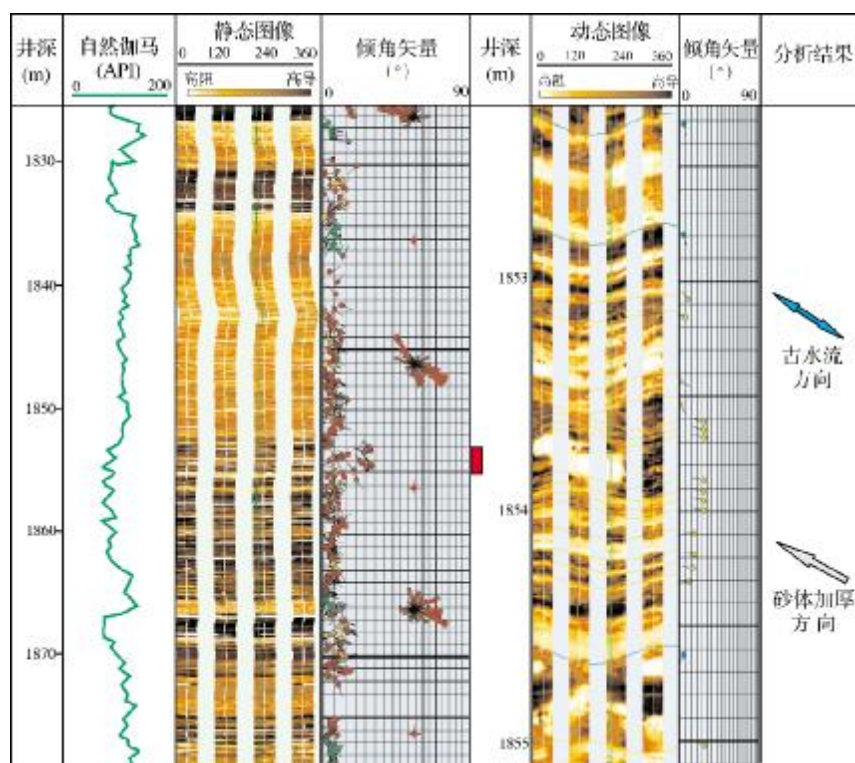


图 4 南海西部油田 W2 井中新统珠江组一段成像测井古流向分析

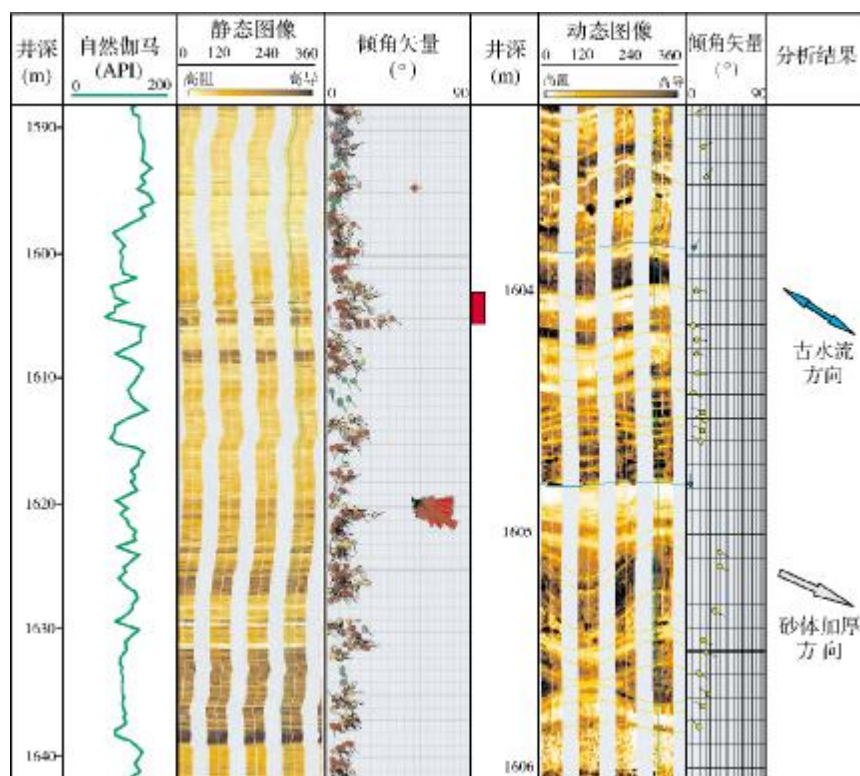


图 5 南海西部油田 W3 井珠江组二段成像测井古流向分析

5 砂体分布预测

利用成像测井资料并结合常规测井资料,可以对砂体的几何形态和平面分布进行预测,主要的方法步骤如下:

(1)基于砂体宏观的常规测井响应特征,结合区域地质背景判断砂体的成因类型,如水道型(中心、边缘)、砂坝型或扇型。

(2)采用较大尺度参数的窗长和步长进行处理,其成果可反映砂体内部的宏观沉积结构,如对于曲

流河点砂坝沉积,倾角矢量方向相当于三级界面,即点砂坝增生单元的界面^[17],其厚度一般为 20 cm 到 1 m 以上。

(3)基于不同砂体的沉积作用方式不同,其倾角矢量模式各异,可以判断不同成因砂体的几何形态^[23]。

砂体的主要沉积作用方式有八种^[24],其中常见的有四种,即前积作用、填积作用、侧向加积作用(侧积作用)和垂向加积作用(加积作用),对应的砂体分别称前积砂体、填积砂体、侧积砂体和加积砂体(表 1)。

表 1 不同成因类型砂体的测井响应及分布特征

砂体类型	沉积作用	自然伽马曲线	沉积韵律	倾角模式	沉积环境	分布特征	备 注
前积砂体	前积作用	漏斗形	反韵律	蓝模式	河口坝、沿岸砂坝、扇体前缘	河口坝及扇体变化快,沿下倾方向尖灭;沿岸砂坝垂直倾向延伸稳定	河口坝及前积砂体的蓝模式方向与古流向相同,沿岸砂坝则可能双向
填积砂体	填积作用	钟形/圆柱形	正韵律	红模式	三角洲分流河道、浊积河道	变化快,沿上倾方向尖灭,沿轴向或走向延伸远	在水道中心部位自然伽马测井曲线呈圆柱形,倾角矢量为蓝模式,指示砂体延伸方向
侧积砂体	侧积作用	钟形	正韵律	红模式	曲流河点砂坝、潮汐水道	变化较快,沿倾向延伸较远	微观处理的蓝模式指示古流向
加积砂体	加积作用	圆柱形/指形	均匀沉积/正韵律	绿模式	辫状河心滩、席状砂坝及韵律互层	相对稳定,分布广	微观处理的蓝模式指示古流向

从表1可以看出,不同成因的砂体其测井响应特征不同,可据此作为识别标志。但需注意的是,对于垂向加积作用形成的砂体,其内部结构基本均匀并相互平行,倾角矢量为绿模式,定性指示砂体分布较稳定广泛。对于侧向加积作用形成的砂体,其倾角矢量为蓝模式,主要指示砂体的迁移方向而非古流向。对于前积作用和填积作用形成的砂体,其倾角矢量分别为蓝、红模式,可指示砂体加厚和尖灭方向,其中蓝模式指示下倾尖灭,红模式指示上倾尖灭,根据砂体顶底部倾角差异可以定量估算砂体尖灭的水平距离,其公式为^[25]:

$$L = \cos\alpha \times \cos\beta \times H / |\sin(\alpha - \beta)| \tag{1}$$

式中: L ——尖灭距离, m;
α、β ——砂体顶、底面倾角,°;
H ——储层厚度, m。

在水下分流河道中心部位,倾角矢量可显示蓝模式,指示河道的延伸方向。对于快速沉积或重力流扇型沉积,通常为块状构造,内部杂乱无序,但不同期次形成的砂体倾角随深度增加而减小,即倾角矢量为大蓝模式,其倾向与古流向相同,可以指示扇体形状^[23,26]。

在上节中给出的图 4 和图 5,分别针对两种不同成因的沿岸砂坝和潮汐水道砂体,结合区域地质背景就其分布(主要是砂体的加厚方向)进行了简要分析,在实际研究中,确定砂体的成因至关重要,之后再结合局部井点古流向以及区域性地震资料,则可对砂体的展布特征取得更可靠的认识。

6 认识与展望

(1)成像测井沉积学解释应以深厚的沉积学理论为指导,丰富的解释经验为支撑,清晰的区域地质背景为立足点,并与其它资料如常规测井、宏观岩心描述、微观地质分析、甚至地面地震资料相结合才能得出可靠的结论。

(2)成像测井资料可以提供丰富的沉积学信息,能弥补露头、岩心资料的不足,使沉积环境与沉积相分析的精度大大提高。

(3)海上油田越来越广泛的应用表明,成像测井为解决复杂储层的成因、砂体几何形态、砂泥岩薄互层评价、多因素叠加造成的储层非均质性以及地层沉积特征描述与高精度沉积序列建立等提供了新的方法和技术,应用前景广阔。

(4)成像测井技术的应用还有待进一步发展和深化,如有些沉积现象的解释图版不够确定,倾角矢量尚不能完全反映出层理的微细构造,部分倾角矢量模式因反映层系界面导致古流向解释具多解性,碎屑颗粒的结构特征如大小、形态、定向性等还不能准确表征。其次资料的应用程度也不够充分,多以单井为主,多井及区域研究因采集量有限而所发挥的作用还远远不够。另外,还需要加强测井和地质专业综合性解释人才的培养,测井仪器在纵向分辨率和覆盖率方面也需继续改进升级。因此,成像测井沉积学的发展方兴未艾,任重而道远。

参考文献

- [1] 陈本才,马俊芳,高亚文. 地层微电阻率扫描成像测井沉积学分析及储层评价[J]. 西部探矿工程, 2004, 16(12): 93-94.
- [2] 安志渊,邢凤存,李群星,等. 成像测井在沉积相研究中的应用——以克拉玛依油田八区下乌尔禾组为例[J]. 石油地质与工程, 2007, 21(1): 21-24.
- [3] 吴洪深,曾少军,何胜林,等. 成像测井资料在涠洲油田砂砾岩沉积相研究中的应用[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(1): 68-71.
- [4] 崔维平,杨玉卿. 应用 FMI 成像测井识别钙质结核及意义[J]. 海洋石油, 2010, 30(4): 99-102.
- [5] 李国军,李俊良,王猛,等. 利用成像测井资料评价西部低阻油气层[J]. 石油地质与工程, 2010, 24(6): 42-46.
- [6] 杨玉卿,崔维平,李俊良,等. 电成像测井在珠江口盆地西部低阻油层研究中的应用[J]. 中国海上油气, 2011, 23(6): 369-373.
- [7] 杨邦伟,谭茂金,陈莹. 用成像测井资料描述碳酸盐岩储集层——以车古 20 潜山为例[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(3): 234-238.
- [8] 樊政军,柳建华,张卫峰. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层测井识别与评价[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 61-65.
- [9] 王贵文,郭荣坤. 测井地质学[M]. 北京:石油工业出版社, 2000.
- [10] 邢凤存,朱水桥,旷红伟,等. EMI 成像测井在沉积相研究中的应用[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(5): 607-610.
- [11] 吴红霞,谢云,邱以钢. FMI 成像测井在利津洼陷沉积相解释中的应用[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(6): 765-767.
- [12] 冯增昭. 沉积岩石学[M]. 北京:石油工业出版社, 1994: 1-239.
- [13] 陈钢花,吴文圣,毛克宇. 利用地层微电阻率扫描图像识别岩性[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 53-55.
- [14] 耿会聚,王贵文,李军,等. 成像测井图像解释模式及典型解释图版研究[J]. 江汉石油学院学报, 2002, 24(1): 26-29.
- [15] 李潮流,周灿灿. 利用微电阻率扫描成像测井计算岩性剖面[J]. 测井技术, 2008, 32(1): 45-48.
- [16] 赖内克 H E, 辛格 I B. 陆源碎屑沉积环境[M]. 陈昌明,李继亮,译. 北京:石油工业出版社, 1979.
- [17] 李思田. 含能源盆地沉积体系[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1996: 46.
- [18] 杨玉卿,田洪,刘大能,等. 东海陆架盆地丽水凹陷丽水 36-1 构造上古新统物源分析[J]. 古地理学报, 2003, 5(2): 171-179.
- [19] 吴文圣,陈钢花,王中文,等. 用地层微电阻率扫描成像测井识别沉积构造[J]. 测井技术, 2000, 24(1): 60-63.
- [20] 钟广法,马在田. 利用高分辨率成像测井技术识别沉积构造[J]. 同济大学学报, 2001, 29(5): 576-580.
- [21] 尉中良,邹长春. 地球物理测井[M]. 北京:地质出版社, 2005: 324-333.
- [22] 周伦先. 成像测井技术在研究砂砾岩沉积构造中的应用[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(5): 664-667.
- [23] 考克斯 J W,等. 实用倾角测井解释[M]. 张超漠,钟兴水,译. 北京:石油工业出版社, 1992: 122.
- [24] 于兴河. 碎屑岩系油气储层沉积学[M]. 北京:石油工业出版社, 2002: 72-77.
- [25] 袁明前. 地层倾角测井资料在储层横向预测中的应用[M] // 中国石油学会石油测井学会. 地层倾角测井技术与应用. 北京:石油工业出版社, 1993: 45-51.
- [26] 田洪. 用地层倾角资料解释水下冲积扇的方法及其应用[J]. 测井技术, 1996, 20(2): 88-92.

编辑:吴厚松

Study of Imaging Logging Sedimentology for Clastic Rocks and Its Application in Offshore Oilfields

Yang Yuqing, Cui Weiping, Tian Hong

Abstract: In the light of imaging logging technique that is applied in the offshore petroliferous basins in China, the concept of imagine logging sedimentology for clastic rock is introduced, which deals with the recognition of stratigraphic lithofacies, interpretation of sedimentary structures, the analysis of sedimentary sequences and microfacies, the analysis of sandbody provenances and paleocurrent directions, and the prediction of sandbody distribution. For some classical cases, the imagine logging technique is applied to resolve the available data from oilfields in the western part of South China Sea.

Key words: Clastic rocks; Imagine logging sedimentology; Sedimentary facies; Reservoir prediction; Offshore Oilfield
Yang Yuqing: male, Ph.D., Senior Engineer. Add: China Oilfield Services Limited, Box 232, Beijing, 101149, China