

文章编号: 1000-0550(2003)02-0318-06

# 声波时差测井资料识别层序 地层单元界面的方法、原理及实例<sup>①</sup>

操应长<sup>1,2</sup> 姜在兴<sup>2</sup> 夏 斌<sup>1</sup> 杨伟利<sup>2</sup> 张家震<sup>3</sup>

1(中国科学院广州地球化学研究所 广州 510640)

2(石油大学(华东)地球资源与信息学院 山东东营 257061)

3(胜利油田有限公司 山东东营 257015)

**摘 要** 结合济阳拗陷古近系层序地层研究,在地震、岩芯、录井等资料综合分析基础上,探讨了运用声波时差测井识别层序地层单元界面的方法和原理。在正常埋藏压实条件下,泥页岩的声波时差对数与其深度的关系曲线为一条直线(回归线),由于沉积作用形成的不整合造成地层缺失、风化层和致密的湖侵泥岩层形成等,将使不整合面(层序界面)上下的声波时差对数与深度的回归线出现错开、斜率不同、异常值等异常响应。生油岩密集段(CS段)在湖盆洼陷带对应于泥岩、页岩沉积,有机质含量高,声波时差值也高,并且同一层序内在最大湖泛面位置声波时差值达到最大,向上、向下均逐渐减小,在层序界面附近达到最小。

**关键词** 测井 声波时差 层序界面 CS段 济阳拗陷

**第一作者简介** 操应长 男 1969年出生 在读博士研究生 副教授 沉积学及层序地层学

**中图分类号** P539.2 **文献标识码** A

近年来,层序地层学已广泛应用于我国陆相湖盆的油气勘探开发中,提供了一套新的地层划分和对比的方法和原则。测井资料作为层序地层学研究的重要基础资料之一,在层序地层单元界面识别中具有非常重要的意义。特别在沉积盆地的覆盖研究区,取心资料有限并不连续,地震资料分辨率有限,露头资料少或者基本没有,难以确定精确的层序地层界线位置,此时,结合有限的岩心、露头等资料和地震资料进行综合分析,运用测井资料进行层序地层划分、对比显得尤为重要。

层序界面和最大湖泛面是层序地层学研究中两个重要的界面,是进行盆地级区域性层序地层等时性对比的关键界面。层序界面对应于侵蚀不整合面或无沉积间断面及其与之相对应的整合面,最大湖泛面是划分湖侵域和高位域的界面,且在界面上下形成了特殊的生油岩密集段(CS段)或缓慢沉积段沉积<sup>[1]</sup>。本次在济阳拗陷古近系层序地层研究的基础上,结合地震、岩芯、录井、古生物及其他测井资料等综合分析,探讨了利用声波时差测井资料识别层序界面、CS段的方法、原理

## 1 基本原理

声波时差测井资料已广泛被地质、地球物理学家

应用于沉积地层的孔隙度、地层异常压力等研究中<sup>[2~4]</sup>。Wyllie等人依据大量实验结果推断,在具有均匀分布的小孔隙的固结地层中,孔隙度与声波时差存在线性关系<sup>[5]</sup>,即

$$\Delta t = H\Delta t_i + (1 - H)\Delta t_{ma} = H(\Delta t_f - \Delta t_{ma}) + \Delta t_{ma} \quad (1)$$

其中  $\Delta t$  为声波时差测井曲线上读的时差 ( $\mu s/m$ ),  $\Delta t_{ma}$  为岩石骨架的声波时差 ( $\mu s/m$ ),  $\Delta t_f$  为孔隙中流体的声波时差 ( $\mu s/m$ )。根据 Hubbert 和 Ruley 研究成果表明,岩石压实过程中,孔隙度与压力之间存在以下关系:

$$H = H_0 e^{-kP_c} \quad (2)$$

其中  $P_c$  为上覆地层施加在深度  $Z$  处的固体上的压力。在深度  $Z$  处的沉积物(岩)受到的压力为固体沉积物(岩)的压力  $P_c$  和其中所含液体的压力  $P_b$  之和,即:  $e = P_c + P_b$

在流体静压条件下

$$e = d_{bw} \cdot g \cdot z$$

$$P_b = \rho_w \cdot g \cdot z$$

由此可以得出

$$P_c = (\rho_{bw} - \rho_w)g \cdot z \quad (3)$$

由(2)和(3)可得出

$$H = H_0 e^{-cz} \quad (4)$$

$$C = K(d_w - d_s)g$$

<sup>①</sup> 中石化“十五”科技攻关项目(批准号: p01013)、国家“十五”科技攻关项目(批准号: 2001BA605A09)资助

其中  $\rho_{bw}$  为上覆沉积物(岩)的平均密度,  $d_w$  为上覆沉积物(岩)中流体的平均密度,  $g$  为重力加速度

由 (1) 和 (4) 可以得到

$$\Delta t = H_0 e^{-\alpha} (\Delta t - \Delta t_{ma}) + \Delta t_{ma} \quad (5)$$

由 (4)、(5) 式可以看出, 在正常埋藏压实条件下, 沉积地层中孔隙度的对数与其深度呈线性关系, 声波时差对数与其深度也呈线性关系, 并且随埋深增大, 孔隙度减小, 声波时差也减小, 若对同一口井同一岩性的连续沉积地层, 表现为一条具有一定斜率的直线。但是, 有的井声波时差对数与其深度的变化曲线并不是一条简单的直线, 而是呈折线或错开的线段, 这就是我们进行不整合面或层序界面识别的理论基础

## 2 沉积地层中的不整合在声波时差测井上响应及其形成机理、实例

### 2.1 沉积地层中的不整合在声波时差测井上响应

声波时差是沉积地层的岩性、物性(孔隙度大小、孔隙结构、裂缝密度和开启度等)以及孔隙和裂缝中的流体性质等因素综合响应<sup>[6]</sup>。在地层垂向剖面中, 由于不整合的存在, 将引起上述因素发生异常变化, 导致声波时差也发生相应的异常变化, 这些异常变化就是我们进行不整合识别的基础。岩性对声波时差的影响明显, 在分析研究过程中, 为了消除岩性的影响, 在同一口井中选择同一岩性作为研究对象, 一般选用泥页岩, 若泥页岩含量低时, 可选用砂岩, 但深部砂岩可发育次生孔隙, 影响声波时差的正常变化。

通过对济阳拗陷若干口井的声波时差对数与其深度变化关系图的分析, 和周瑶琪等<sup>[7]</sup>研究表明, 不整合面(层序界面)上下的声波时差对数与其深度的回归线

表现为以下几种基本类型:

- (1) 界面上下回归线发生明显的错开, 即界面之上的回归线的终点与界面之下的回归线的起点不在同一点, 但斜率相同(图 1A B);
- (2) 界面上下回归线的斜率不同, 但回归线未发生错开, 呈折线(图 1C D);
- (3) 界面之下存在异常点或异常段(图 1E);
- (4) 界面上下回归线无异常, 呈一条直线(图 1F)。

实际研究中, 不整合面上下的声波时差对数与其深度的回归线多表现为综合类型, 如 (1) 和 (2) 的综合, 即界面上下的回归线发生明显的错开, 且斜率不同。

### 2.2 沉积地层中的不整合在声波时差测井上响应的形成机理

本文中讨论的不整合是由无沉积或剥蚀作用所致, 其相对应的面为三级层序界面, 是将较新和较老地层分开的面, 沿此面具有地层的削蚀或侵蚀, 或存在地表暴露标志, 并且界面上下地层间存在明显的沉积间断。结合济阳拗陷古近系层序地层研究, 从不整合面或层序界面的特征出发, 对不整合引起声波时差异常的机理进行了总结。

#### 2.2.1 不整合引起的沉积地层缺失

由 (5) 式可知, 在正常埋藏压实条件下, 岩石中孔隙度对数与其深度的变化曲线为直线, 同时, 压实作用强度与地层埋藏深度成正比, 因此, 沉积地层中的孔隙度与其压实强度成正比关系, 同时, 孔隙度与声波时差也成正比线性关系, 由此可以得出, 在正常埋藏压实条件下, 声波时差与压实强度也存在正比关系, 即随着埋深增加, 压实作用增强, 孔隙度降低, 声波时差也相应变小。

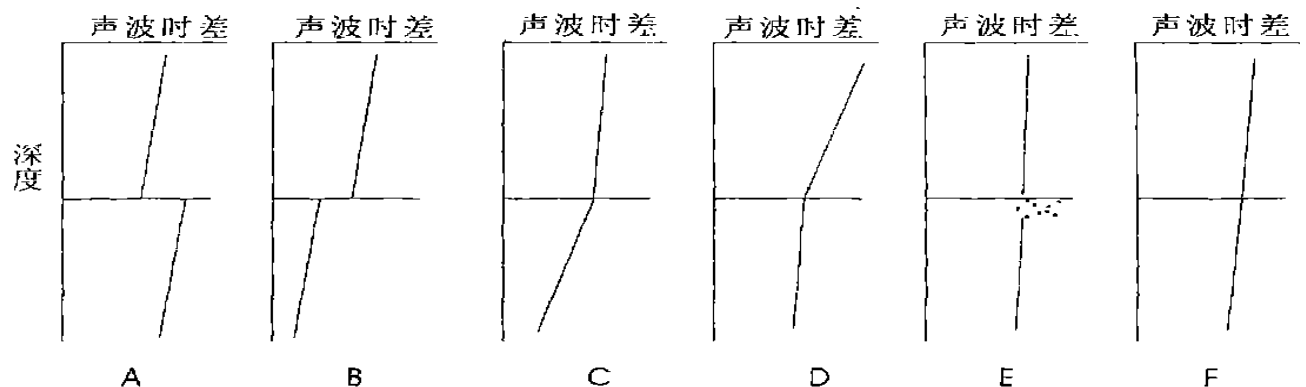


图 1 不整合面上下在声波时差对数与其深度的回归线基本的响应类型

Fig. 1 Basic types of the regression line of logarithm of interval transit time versus its depth above and below the unconformity surface

沉积不整合往往形成于构造抬升运动或湖平面下降背景条件下,特别在湖盆的边缘地带或断陷湖盆缓坡带尤为明显。在不整合形成期,湖缘地带处于无沉积或剥蚀状态,导致压实作用强度的降低或压实作用终止;后期构造下沉,接受新的沉积,处于新的压实作用背景。因此,不整合面上下的沉积地层处于不同压实背景条件,不同位置并存在不同程度的压实间断。此时,与位于洼陷地带连续沉积地层剖面相比,声波时差趋势线常存在断点,一般情况下,界面之下声波时差值小于界面之上(图 1B)。

### 2.2.2 伴随不整合的形成而发育风化层

不整合形成时期老地层将暴露水面,遭受风化剥蚀,若风化物残积原地,形成风化层,或者界面之下为灰岩,溶蚀孔隙、裂缝发育,使其孔隙度增大。当其被湖侵泥岩覆盖,形成致密层,界面之下的风化层易出现异常压力,保存较高的孔隙度,导致风化层段的声波时差出现高值,在界面之下发育异常点或异常段(图 1E)。

### 2.2.3 湖侵泥岩覆盖,形成异常压力带

在湖盆边缘的斜坡带或洼陷中相对隆起地带,在层序边界形成过程中常伴随着不整合面的形成,后期的湖侵体系域泥岩直接覆盖于不整合面之上,当条件适宜时,湖侵泥岩易形成致密的封堵层。在后期的埋深压实过程中,湖侵泥岩作为致密封堵层抑制了下伏地层的排出,导致不整合面(层序界面)之下发育异常压力。异常压力抑制压实作用,使岩石中孔隙度保持了不整合面形成前的变化趋势。随着埋藏深度增大,界面之上的地层压实强度逐渐增强,而界面之下由于异常压力的存在继续保持原状。当埋深达到某一深度时,界面之上的压实强度的趋势线与界面之下的趋势线重合,此时,界面上下的声波时差表现为一条直线(图 1F);当埋深超过此深度时,界面之上的地层压实强度超过下伏地层,在声波时差对数对深度的变化图上界面上下的回归线出现错开,且界面之下声波时差高于界面之上(图 1A),此种现象主要出现在埋藏较深的地层中。

### 2.2.4 不整合面(或层序界面)上下的沉积速率差异,界面上下出现不同的压实效应

不同层序的沉积时期内由于构造活动强度、沉积物供给丰度等存在差异,导致了沉积物的沉积速率也存在差异。K. Magara 等研究表明,沉积物沉积速率慢时,有足够的时间使得泥页岩颗粒排列有序,相反,沉积速率快时,泥页岩颗粒本身没有足够时间排列,呈杂乱分布。前者对压实作用反映明显,孔隙度随深度很快地降低,后者的降低速度慢,导致界面上下的斜率出现差异(图 1G、D)。

## 2.3 研究实例

通过地震、岩芯、录井、测井等资料综合分析,济阳拗陷沙河街组三段(简称沙三段)—东营组沉积地层可划分出六个三级层序,其中沙三下为层序 I,沙三中为层序 II,沙三上一沙二下为层序 III,沙二上一沙一段为层序 IV,东三段为层序 V,东一段—东二段为层序 VI。车古 9 井位于济阳拗陷车镇凹陷南斜坡,结合区域性地层对比,CG9 井仅发育了层序 III、层序 IV 和层序 V。图 2 是 CG9 井声波时差对数与深度的关系及其层序地层划分图,图中可以明显看出层序界面附

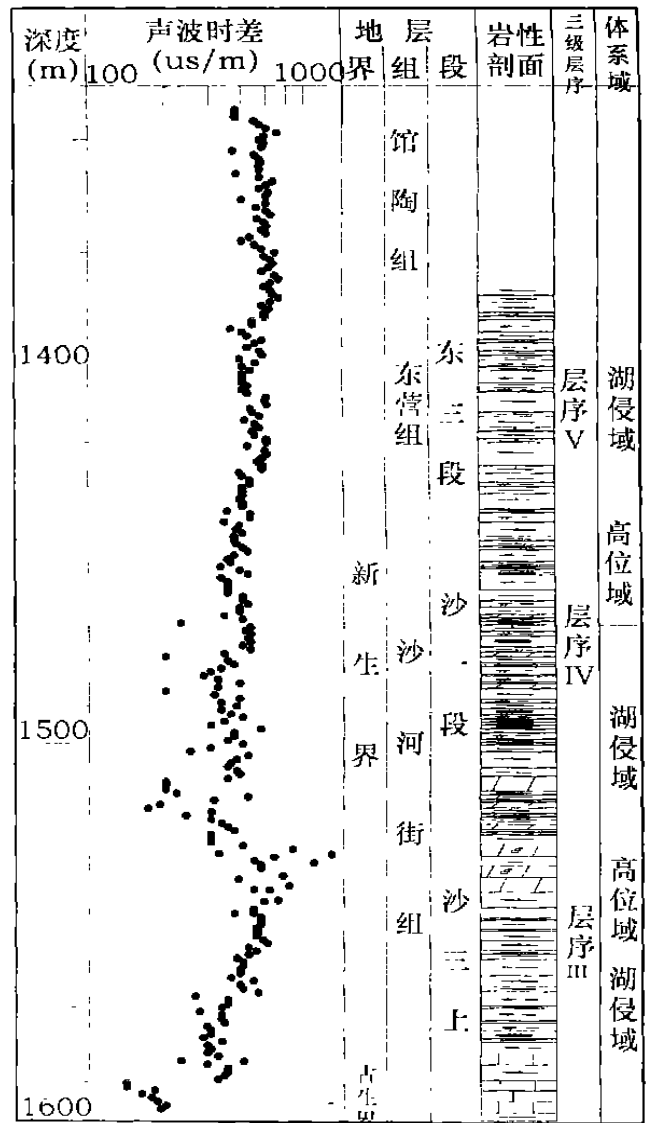


图 2 济阳拗陷 CG9 井声波时差对数与其深度的关系及层序地层划分图

Fig. 2 Relationship between interval transit time versus its depth and the division of sequence stratigraphy of CG9 in Jiyang depression

近的声波时差存在明显的异常。

1 589.0 m 为沙三段与古生界的分界, 相当于层序 III 的底界面, 该井中缺失了中生界和新生界孔店组、沙四段、沙三下、沙三中地层, 层序 III (沙三上) 直接覆盖在古生界地层之上, 在地震剖面上可见明显的地层削截关系。该界面在声波时差上响应明显, 由于界面之下灰岩暴露遭受风化淋滤, 灰岩中发育了大量溶孔, 其上被层序 III 湖侵泥岩覆盖, 形成良好致密层, 溶孔得以保存, 因此在界面之下声波时差出现部分异常高值。1 527.0 m 为层序 III 与层序 IV 的分界, 古生物地层对应于沙一段与沙三上分界, 之间缺失了沙二段地层。由图 2 可以看出界面上下的声波时差对深度的回归线存在明显的错开, 界面之下声波时差值高于界面之上, 两者的斜率相近。主要是层序 III 沉积晚期构造抬升, 导致 CG9 井区出露水面, 处于无沉积或剥蚀状态, 沉积地层的压实作用终止, 保持了抬升前的压实状态。层序 IV 沉积期, 沉积盆地下沉, 湖水快速上升, CG9 井区接受了湖侵泥岩沉积, 沉积地层随之进入新的压实背景。但该层序界面之上被湖侵泥岩覆盖, 形成了致密层, 抑制了下伏地层的压实作用, 界面之下地层保持了界面形成前的压实状态, 导致界面之下泥页岩的声波时差值高于界面之上泥页岩的声波时差值。1 420.0 m 对应于沙一段与东营组的分界, 也相当于层序 IV 与层序 V 的分界, 但东营组与沙一段之间在该井区的沉积间断时间短或无明显间断, 因此界面上下的声波时差对数对深度交汇图上特征不明显, 但由于界面上下两个层序的沉积速率、岩性等存在差异, 界面上下的声波时差回归线的斜率不同, 界面之上的斜率小, 而界面之下的斜率大, 并且界面之下泥页岩的声波时差值要小于界面之上, 属于正常的压实状态。1 380.0 m 对应于馆陶组与东营组分界, 但 CG9 井东营组仅保存了东三段地层, 东一段、东二段地层被剥, 地震剖面也可见明显的削截现象, 为层序 V 的顶界面, 其回归线出现错开, 并且界面之下声波时差值小于界面之上声波时差值, 且斜率相近, 属于正常压实。

### 3 声波时差对湖盆 CS 段的响应及其机理、实例

#### 3.1 声波时差对湖盆 CS 段的响应及其机理

由于流体密度存在差异, 声波在不同流体中传播速度不同。因此, 在其他条件相同的前提下, 沉积地层中的流体性质也影响声波时差, 如淡水声波时差为  $620 \mu\text{s}/\text{m}$ , 盐水为  $608 \mu\text{s}/\text{m}$ , 石油为  $757 \sim 985 \mu\text{s}/\text{m}$ 。同样, 岩石中有机质含量也可影响声波的速度, 一般情况下, 泥页岩中有机质含量越高, 所对应的声波时差值

越大。

一般情况下, 我们所研究的沉积地层中地层水性质在垂向上变化不大, 但在一个三级层序中, 湖盆水体深度经历了由浅—深—浅变化, 这种变化对沉积地层中有机质含量的影响明显。S. Creaney 等研究表明<sup>[8]</sup>, 层序地层格架内的有机碳总量 (TOC) 在垂向上呈周期性变化, 在单一层序地层剖面中, TOC 的峰值与最大湖泛面沉积对应, 即与 CS 段沉积对应。在最大湖泛面以上, 由于高位期的大量陆源碎屑注入沉积盆地, 导致 TOC 逐渐减少, 在最大湖泛面以下对应于湖侵体系域和低位体系域沉积, 低位体系域和湖侵初期湖盆水体相对较浅, TOC 也相对较低。同时, 在一个层序内部有机碳含量变化是一个渐变过程, 表现在声波时差上也是渐变过程, 仅在层序边界以下, 由于出露地表遭受风化, 使有机碳含量降低, 而出现突变现象。CS 段沉积形成于最大湖泛面附近, 在盆地洼陷带为一套欠补偿条件形成的泥岩、页岩, 有机质含量高,

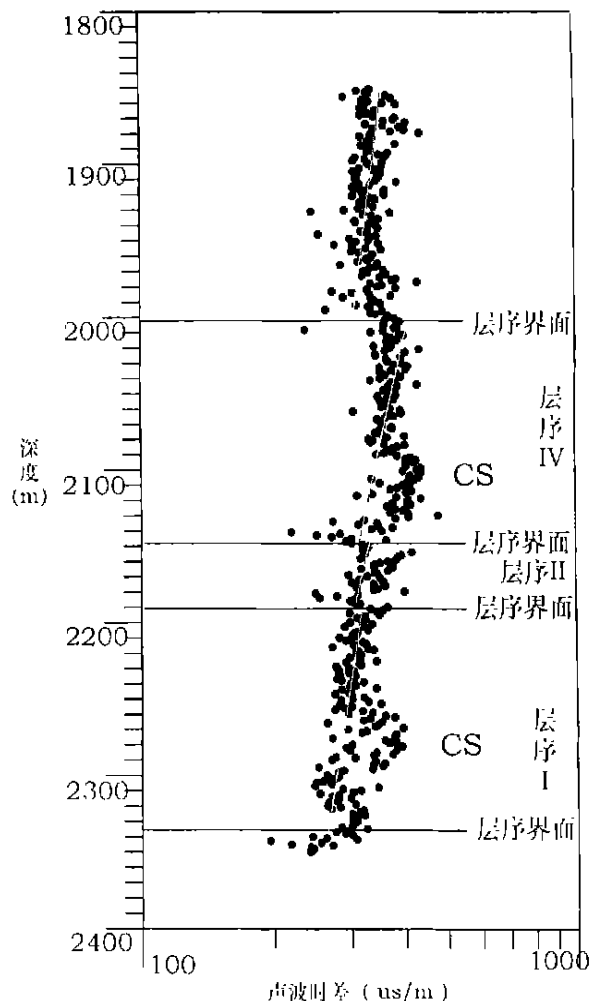


图 3 济阳拗陷 LU060 井声波时差对数与其深度的关系图

Fig. 3 Relationship of interval transit time versus its depth of LU060 in Jiyang depression

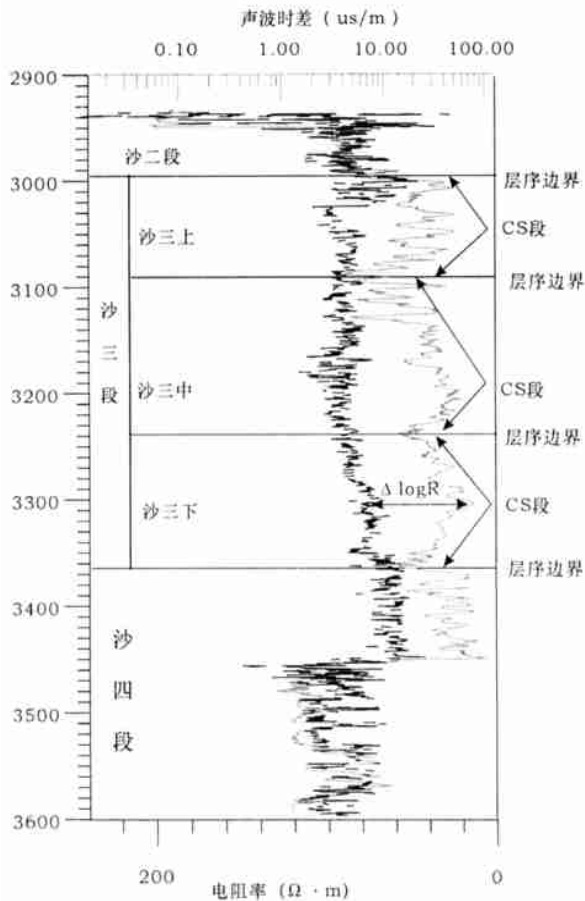


图 4 济阳拗陷 LUO67 井声波时差—电阻率的交汇图与层序界面和 CS 段关系图 (右边为声波时差曲线, 左边为电阻率曲线)

Fig. 4 Relationship between the crossplotting of interval transit time versus its depth and sequence boundary and condensed section of LUO67 on Jiyang depression (interval transit time curve on the right, resistivity curve on the left)

又称之为生油岩密集段<sup>[1]</sup>。因此, CS 段沉积在声波时差测井上存在明显的响应, 声波时差常出现异常高值段, 在同一层序内最大湖泛面位置达到最高, 向上和向下均逐渐变小。

### 3.2 研究实例

LUO60 井位于济阳拗陷沾化凹陷的南部斜坡带, 图 3 是济阳拗陷 LUO60 井声波时差对数与其深度的关系图, 由图中可以明显看出层序界面的位置, 同时, 层序 I 和层序 IV 的 CS 段声波时差值明显偏大, 在最大湖泛面位置达到最大, 向上、向下均呈减小趋势。

国内外许多学者在岩心实测数据标定基础上, 利用声波时差—电阻率的交汇图来识别富含有机质的烃源岩和有机碳总量 (TOC) 测定分析已获得成功<sup>[8,9]</sup>。利用测井曲线的重叠法, 把刻度合适的孔隙度曲线 (一般为声波时差曲线) 叠加在电阻率曲线上, 在富含有机

质的细粒烃源岩中, 两条曲线存在幅度差, 定义为  $\Delta \log R$  并且, 在一般情况下  $\Delta \log R$  与烃源岩中的有机碳总量 (TOC) 成正比关系<sup>[8]</sup>。图 4 为济阳拗陷 LUO67 井声波时差—电阻率的交汇图与层序界面和 CS 段关系图。图中明显可以看出层序界面处的  $\Delta \log R$  迅速降低, 甚至变为 0, 在最大湖泛面位置达到最大, 并向上、向下逐渐减小。

## 4 结束语

声波时差识别层序地层界面是层序地层研究中的一种辅助研究方法和手段, 由于影响声波时差的因素很多, 除了由不整合引起声波时差的异常响应外, 井径变化、地层厚度、地层水性质、岩性等因素变化, 均可引起声波时差值的变化。因此, 在研究过程中, 尽量选择泥页岩的声波时差作为分析数据体, 可排除岩性、次生孔隙度等引起的异常, 同时, 结合地震、录井和其他测井资料等进行综合分析, 排除其他因素引起的异常, 使研究成果更加可靠。

### 参考文献 (References)

- 姜在兴, 李华启, 王留奇等编. 层序地层学原理及应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996 [ Jiang Zaixing, Li Huaqi et al. Principles and applications of sequence stratigraphy [M]. Beijing: Petroleum Industry Publishing House, 1996 ]
- 付广, 张发强. 利用声波时差资料研究欠压实泥岩盖层古压力封闭能力的方法 [J]. 石油地球物理勘探, 1998, 33(6): 812~ 818 [ Fu Guang, Zhang Faqiang. A method of analyzing the palaeo-pressure sealing ability of poorly compacted shale barrier with the use of acoustic logging data. OGP, 1998, 33(6): 812~ 818 ]
- 张小莉, 程玉群. 地层压力分析的有效途径 [J]. 西安石油学院学报, 1999, 14(6): 28~ 30 [ Zhang Xiaoli, Cheng Yuqun. An effective way to analyze formation pressure [J]. Journal of Xian Petroleum Institute, 1999, 14(6): 28~ 30 ]
- 张小莉, 沈英, 陈文学. 利用测井资料分析成岩作用对储集层的影响 [J]. 沉积学报, 2000, 18(1): 127~ 131 [ Zhang Xiaoli, Shen Ying, Chen Wenxue. Application of well logging information to analysis on the effect of diagenesis in reservoirs [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(1): 127~ 131 ]
- Wyllie M R J, Gregory A R, Gardner L W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media [J]. Geophysics, 1956, 21: 41~ 70
- 丁次乾主编. 矿场地球物理 [M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1992 [ Ding Ciqian. Exploring geophysics [M]. Dongying Shandong: Petroleum University Publishing House, 1992 ]
- 周瑶琪, 吴智平. 地层间断面的时间结构研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2000 [ Zhou Yaoqi, Wu Zhiping. Study on the time composition of the hiatus surface [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000 ]
- Passy Q R. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(12): 1777~ 1

794

9 张志伟, 张龙海. 测井评价烃源岩的方法及其应用效果 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(3): 84- 87 [ Zhang Zhiwei, Zhang Longhai. A

method of source rock evaluation by well-logging and its application result [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(3): 84- 87 ]

## Method, Principle and Example of Identifying Sequence Stratigraphical Boundary Using Sonic Logging

CAO Ying-chang<sup>1,2</sup> JIANG Zai-xing<sup>2</sup> XIA Bin<sup>1</sup>  
YANG Wei-li<sup>2</sup> ZHANG Jia-zhen<sup>3</sup>

1(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640)

2(Faculty of Geo-Resource and Information, University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061)

3(Shengli Oil Field Limited Company, Dongying, Shandong 257015)

**Abstract** On the base of the comprehensive analysis of seismic data, core and logging, we have discussed the method and principle of identifying sequence stratigraphical boundary with sonic logging, and its application in the study of sequence stratigraphy of Paleogene in Jiyang depression. The sequence boundary and the maximal lacustrine flooding surface (MLFS) are the key boundaries in the sequence strata. The sequence boundary corresponds to the unconformity surface or its corresponding conformity surface, and MLFS is the division surface between transgressive systems tract (TST) and high systems tract (HST), and condensed section (CS) can form near the MLFS.

The regression line of the logarithm of interval transit-time of mud rocks versus its depth is a straight line in the basin under the normal imbedding and compacting conditions, but the unconformity usually leads to the formation of stratigraphical break, weathered crust and TST mud, and these characteristics also lead to the anomaly of the regression line, such as, the dislocation and different slope of the regression line above or below the unconformity surface and some anomaly of interval transit time below the unconformity surface, and they are the important identifying signs of sequence boundaries. The lithology of the CS is usually depth-water shale or mudstone, and it has high content of the organic substance and high interval transit time. The interval transit time is the highest at the location of the maximal lacustrine flooding surface, and becomes lower upward and downward in a sequence, and reach the lowest value at the location of the sequence boundary

**Key words** well-logging, interval transit-time, sequence boundary, condensed section, Jiyang depression