

文章编号:1001-6112(2010)03-0290-06

烃源岩有机碳含量的测井响应特征与定量预测模型

——以珠江口盆地文昌组烃源岩为例

徐思煌¹, 朱义清²

(1. 中国地质大学 构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074;

2. 中国地质大学 研究生院, 武汉 430074)

摘要:利用测井资料评价烃源岩,能够弥补烃源岩取心少、实测样品分布不连续的不足。富含有机质的烃源岩在测井上具有电阻率高、中子孔隙度高、声波时差高、伽马高、密度低等基本特征。测井资料不仅可用来定性识别烃源岩,而且还能定量预测有机碳含量。近半世纪不断探索出的预测模型,可概括为定性识别模型、单参数等效体积模型、双参数交汇图半定量模型、多元回归模型、测井曲线叠合模型(即 $\Delta\log R$ 技术)、模糊数学模型 6 种类型。珠江口盆地惠州凹陷及番禺 4 洼文昌组烃源岩实测有机碳含量与同井段电阻率、中子、声波、伽马和密度等测井参数之间的相关程度比较均衡,因此由这 5 种测井参数构成的五元回归方程代表着最佳定量预测模型。对番禺 4 注一口井文昌组进行了全井段有机碳含量预测,经岩性描述、实测有机碳含量检验,认为预测效果良好。

关键词:烃源岩;有机碳含量;测井响应;预测模型;惠州凹陷;珠江口盆地

中图分类号:TE122.113

文献标识码:A

WELL LOGS RESPONSE AND PREDICTION MODEL OF ORGANIC CARBON CONTENT IN SOURCE ROCKS —A CASE STUDY FROM THE SOURCE ROCK OF WENCHANG FORMATION IN THE PEARL MOUTH BASIN

Xu Sihuang¹, Zhu Yiqing²

(1. *Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China*; 2. *Graduate School, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China*)

Abstract: The evaluation of source rocks from well loggings can make up for the insufficiency of source rock core and discontinuity of samples examined. Organic-rich source rocks show relative increase in response to resistivity, neutron, sonic transit time and gamma loggings and decrease in response to density logs. Based on this response relationship, well logging data not only can be used to identify qualitatively source rocks from non-source rocks, but also predict quantificationally organic carbon content in source rocks. The predicting models proposed during past fifty years can be summed up as qualitative identification model, volume model, cross plot model, regression equation model, $\Delta\log R$ technique, and fuzzy model. The TOC of Wenchang Formation source rock in Huizhou Depression and Panyu 4 Sag in the Pearl River Mouth Basin shows similar degree of correlation respectively to resistivity, neutron, sonic transit time, gamma and density. So, the five variate regression equation should be the best prediction model for this study area. The organic carbon content of whole Wenchang Formation of one well in Panyu 4 sag predicted by this numerical model, and it shows good results verified by the lithological description and the TOC test of core samples in this well.

Key words: source rocks; organic carbon content; well logs response; prediction model; Huizhou Depression; Pearl River Mouth Basin

收稿日期:2010-02-09;修订日期:2010-04-28。

作者简介:徐思煌(1964—),男,博士,教授,从事石油及天然气地质学研究与教学。E-mail:xusih@cug.edu.cn。

基金项目:国家油气重大专项课题(2008ZX05023-01)。

烃源岩有机碳含量是含油气盆地中生烃研究和资源评价必需的一项基础参数。在可获取烃源岩样品的情况下,通过实验直接测定有机碳含量。然而,受采样条件限制,合适的烃源岩样品常常数量有限、分布局限;再加上测试费用的因素,直接测定的有机碳含量资料无论数量上还是分布上通常都难于满足研究的需要。因此,有必要充分地利用纵向连续、广泛分布的测井资料来评价烃源岩有机碳含量。研究表明,多种测井参数与烃源岩有机碳含量之间具有一定的响应关系,根据这些响应关系建立起合理的定量预测模型,可以实现烃源岩有机碳含量的有效定量预测^[1]。随着测井技术的不断发展,这项探索也不断取得新的进展^[2]。

1 烃源岩特征的测井响应

烃源岩相对于非烃源岩而言最显著的特征为富含有机质。随着测井技术的发展,烃源岩中有机质丰度与不同测井参数之间的响应关系也逐渐得到认识。

早在20世纪中叶,Beers(1945)就认识到一些古生界页岩中的放射性与有机质含量的关系^[3]。Swanson(1960)进一步认识到黑色页岩中放射性元素铀的含量与石油生成密切相关^[4]。由于富含有机质及粘土矿物的烃源岩通常含有较高的放射性元素,因此自然伽马测井(探测伽马射线强度)、自然伽马能谱测井(探测放射性元素含量)可用于烃源岩的识别及其有机碳含量预测^[5-7]。

由于干酪根密度小于粘土矿物,因此有机质含量越高的烃源岩应具有越低的密度。Schmoker(1979)提出密度测井可用于确定烃源岩有机质的含量^[8-9]。

类似地,由于干酪根的声波时差大于固体岩石骨架的声波时差,因此当其它条件一定时,有机质含量越高的烃源岩应具有越大的声波时差。声波时差测井成为岩性解释和烃源岩有机质含量预测的重要方法之一^[10-11]。

电阻率测井探测的是井内岩石电阻率变化特征。烃源岩有机质属于非导电物质,电阻率无限大,根据烃源岩构成的体积模型,烃源岩的电阻率随着有机碳含量增高而增大,尤其当烃源岩处于生烃高峰阶段,电阻率会因生烃作用而大幅增加^[1,12-13]。此外,烃源岩生烃作用可导致孔隙系统水的饱和度减小、电阻率增大,因此电阻率测井也与烃源岩热演化成熟度具有良好响应关系。

中子测井是探测井内岩石含氢指数变化特征

的一种测井。有机质的含氢指数大于泥质含氢指数,因此烃源岩的中子测井孔隙度值与烃源岩有机质含量也存在良好的响应关系^[7,12]。

此外,由于碳/氧能谱中子测井可同时提供C/O比和Si/Ca比^[14],赵彦超(1990)经过推导,建立了该测井提供的C/O比和Si/Ca参数同烃源岩有机碳含量之间的数值关系^[12]。Patterson(2003)实验发现,烃源岩岩心样品的多普勒展宽(Doppler broadening)与有机碳含量存在良好的响应关系,因此预言,正电子多普勒展宽的应用可能将成为一种新的探测烃源岩有机碳含量的测井方法^[15]。

可见,烃源岩有机质含量的多少,在伽马测井、密度测井、声波时差测井、中子测井、电阻率测井等各种测井曲线上都有一定的响应关系。这些响应特征是烃源岩含量测井预测的理论依据。

2 有机碳含量的测井预测模型

2.1 定性识别模型

20世纪70—80年代之前,相关的研究主要集中于探索烃源岩在各种测井参数曲线上的响应特征上。依据烃源岩特征的某些测井响应关系,反过来根据一种或几种测井响应特征,识别或鉴定烃源岩存在与否^[3-5,7-8,16-17]。

2.2 单参数等效体积构成模型

烃源岩基本的等效体积构成包括固体岩石骨架、孔隙流体以及密度接近于水的分散有机质。与根据威利公式利用声波时差求取岩石孔隙度相类似,也可以分别建立根据密度、伽马测井求取烃源岩有机质含量(体积分数)的基本方程:

密度测井模型^[8,13]:

$$V_{\text{org}} = \frac{\rho_{\text{Sh}} - \rho_{\text{SR}}}{\rho_{\text{Sh}} - \rho_{\text{OM}}} \quad (1)$$

式中, V_{org} 为烃源岩有机质体积百分含量, ρ_{Sh} 为不含有机质的页岩密度, ρ_{SR} 为烃源岩密度, ρ_{OM} 为烃源岩所含有机质密度。

伽马测井模型^[6]:

$$V_{\text{org}} = \frac{\gamma_{\text{Sh}} - \gamma_{\text{SR}}}{1.378A} \quad (2)$$

式中, V_{org} 为烃源岩有机质体积百分含量, γ_{Sh} 为不含有机质的页岩伽马强度, γ_{SR} 为烃源岩伽马强度, A 为给定区域内伽马强度与地层密度线性关系的斜率,通过区域范围内多口钻井的伽马测井和密度测井可以获得^[8]。

2.3 双参数交汇图半定量评价模型

在发展2种以上测井识别烃源岩时,人们常常

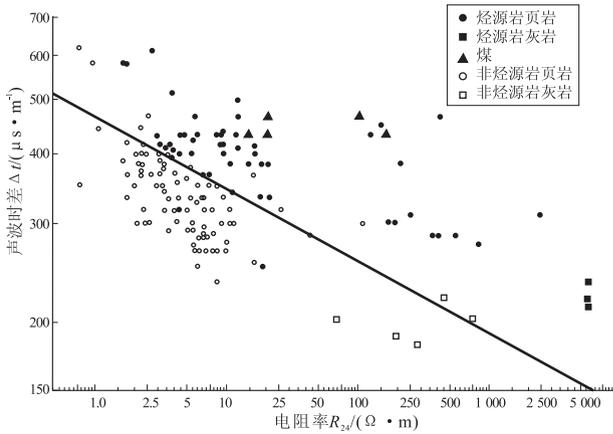


图 1 声波时差与电阻率交汇图判别烃源岩与非烃源岩
据参考文献[13]略有修改。
图中斜线表示判别式 $D=0$, 其右上方 $D>0$, 为烃源岩;
左下方 $D<0$, 为非烃源岩

Fig. 1 Sonic transit time and resistivity crossplot for identify source rock from non-source rock

采用交汇图的形式达到半定量评价烃源岩的效果。Meyer^[13] (1984) 通过声波时差(Δt)—电阻率(R)交汇图(图 1), 运用测井资料将烃源岩与非烃源岩大致区分开来, 在二者之间建立了一个二元一次判别方程:

$$D = -8.54683 + 3.186 \log_{10} \Delta t + 0.487 \log_{10} R_{24} \quad (3)$$

式中, D 为判别系数, 当 $D>0$, 判别为烃源岩; 当 $D<0$, 判别为非烃源岩; 如果 $D=0$, 则不能确定烃源岩还是非烃源岩。 Δt 为声波时差($\mu s/m$), R_{24} 为校正到 24 °C 时的电阻率($\Omega \cdot m$)^[13]。

赵彦超(1990)则利用自然伽马的相对值($\Delta\gamma$)与声波时差(Δt)的交汇图评价烃源岩^[12]。为消除不同钻井间 GR 单位不统一的影响, 他定义 $\Delta\gamma = (\gamma - \gamma_{\min}) / (\gamma_{\max} - \gamma_{\min})$ 。根据大量已知烃源岩的 $\Delta\gamma$ 与 Δt 编绘交汇图, 确定烃源岩的下限值(即图 2 的 $\Delta\gamma_1$ 、 Δt_1); 同时, 将未知烃源岩的 $\Delta\gamma$ 、 Δt 值投在该交汇图上, 又可实现半定量评价, 划分为极好烃源岩、有利烃源岩、差烃源岩及非烃源岩等不同级别(图 2)。

2.4 多元回归方程定量模型

从发现烃源岩有机碳含量与测井参数存在响应关系开始, 定量预测就成为必然的发展趋势。20 世纪 70—80 年代, 先后提出了多种以总有机碳含量为因变量, 以铀的含量及铀/钾比、密度、中子孔隙度、声波时差、电阻率等单一或多种测井参数为自变量的一元、二元或多元回归方程形式的经验关系定量模型^[1,9,18-19]。例如, Mendelson 等(1985)根据英国北海 4 口井和美国加州 1 口井的岩心和

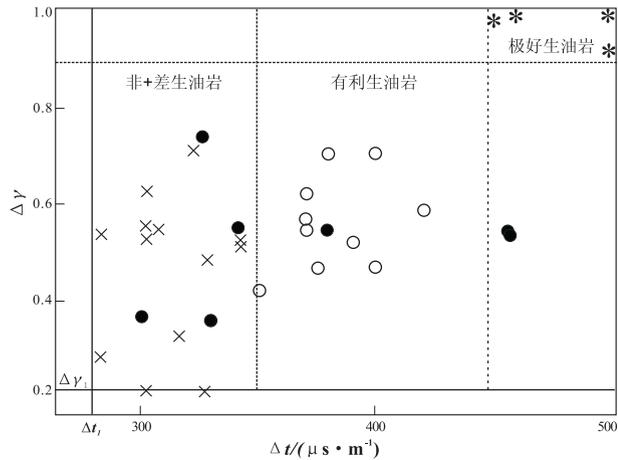


图 2 南襄盆地南阳凹陷魏岗地区烃源岩评价 $\Delta\gamma - \Delta t$ 交汇图^[12]
该区烃源岩下限值 $\Delta\gamma_1 = 0.2$, $\Delta t_1 = 260 \mu s/m$

Fig. 2 Gamma and sonic transit time crossplot of source rock in Weigang area, Nanyang Sag, Nanxiang Basin

井壁取心样品, 建立了这 5 口井烃源岩有机碳含量 ($TOC, \%$) 与时差 ($\Delta t, \mu s/m$)、中子 ($\Phi_N, \%$)、密度 ($\rho, g/cm^3$) 及伽马 (γ, API) 4 种测井响应的四元回归方程, 其中 A 井回归方程:

$$TOC = 0.09967\Delta t + 0.931\Phi_N - 0.180\rho - 0.645\gamma \quad (4)$$

对于 B、C、D 及 CA2 井, 回归方程形式相同, 但测井参数的系数不仅绝对值不同, 且除了 Δt 的系数全为正值外, Φ_N 、 ρ 与 γ 的系数均有正有负^[18]。说明 TOC 与测井参数之间的定量关系是复杂的。

2.5 $\Delta\log R$ 技术

$\Delta\log R$ 技术是 Exxon 和 Esso 公司 1979 年开发的一种烃源岩有机碳含量测井预测技术, 经广泛试用证实, 该技术既适用于碳酸盐岩烃源岩, 也适用于碎屑岩烃源岩, 而且能精确根据烃源岩成熟度计算有机碳含量^[1]。其理论依据依然是上述烃源岩特征在孔隙度测井和电阻率测井的响应原理, 即烃源岩有机质含量越高, 声波时差、电阻率就越大。但在应用方法上, 采用特殊比例的电阻率测井曲线和声波测井曲线叠合法来实现烃源岩识别与评价(图 3)。

两条测井曲线叠合时, 二者的坐标轴方向相反, 电阻率曲线采用对数坐标, 声波时差曲线采用算术坐标, 坐标轴刻度比例尺关系为电阻率每 2 个数量级(如 1~100 $\Omega \cdot m$) 对应于声波时差的间隔为 328 $\mu s/m$ (100 $\mu s/ft$) (如 492~164 $\mu s/m$ 或 150~50 $\mu s/ft$)。结合伽马曲线特征, 划分渗透性岩层与非渗透性岩层, 水平方向移动电阻率曲线,

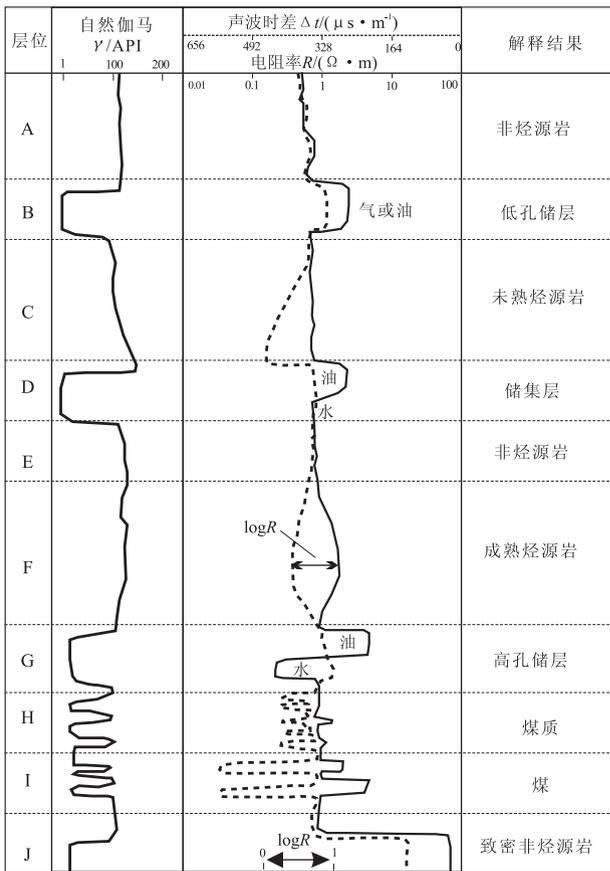


图 3 ΔlogR 叠合技术不同情形解释示意图
据参考文献[1],略有修改。

Fig. 3 Schematic guide for the interpretation of features observed on ΔlogR overlays

当声波和电阻率 2 条曲线在非渗透性岩层在一定深度范围内“一致”或完全重叠时即为基线,基线井段对应于非烃源岩段(电阻率和声波时差皆最小)。在选择基线时,根据地层的变化和曲线的响应情况进行分段重叠,即一口井可能有多段基线。确定基线之后,用 2 条曲线之间的间距来识别富含有机质的层段(图 3),这个间距被定义为 ΔlogR,显然 ΔlogR 与 TOC 正相关。

ΔlogR 技术的数学模型:

$$\Delta \log R = \lg \left(\frac{R}{R_{\text{基线}}} \right) + 0.0061(\Delta t - \Delta t_{\text{基线}}) \quad (5)$$

式中:R 和 Δt 分别代表实测电阻率(Ω·m)和声波时差(μs/m);R_{基线}和 Δt_{基线}分别代表基线对应的电阻率(Ω·m)和声波时差(μs/m)。ΔlogR 为电阻率曲线与声波时差曲线的分离间距值。

根据 ΔlogR 计算 TOC 的模型:

$$TOC = \Delta \log R \times 10^{(2.297 - 0.1688 \text{ LOM})} \quad (6)$$

式中:TOC 为计算的有机碳含量;LOM 为有

机质热变质程度(Level of Metamorphism),可根据实测镜质体反射率资料或埋藏史评价确定。

ΔlogR 技术提出后得到非常广泛的推广应用^[2,14,19-21]。但也有人认为该技术计算的 TOC 偏低,因为对于基线代表的非渗透性岩层虽然评价为非烃源岩,TOC(低于烃源岩下限值)并非为零,因此应在模型式(6)中进行基线 TOC 补偿^[21]。

2.6 模糊识别预测模型

在发展烃源岩有机碳含量定量模型的同时,也有人注意到对于这种复杂问题难于用显式方程来表达。Huang(1996)率先将人工神经网络法帮助模拟预测烃源岩特征^[22],之后在该领域的研究中,朱振宇(2002)、Kamali(2004)先后提出了类似的神经网络模糊模型^[20,23]。

考虑到烃源岩沉积的旋回性,Prokoph(2000)在应用烃源岩测井资料分析烃源岩特征时,引进了小波分析方法^[24],使分析结果沿深度方向的变化规律与沉积旋回的吻合程度更高。

3 应用实例

3.1 研究区烃源岩基本特征

珠江口盆地位于我国的南海北部、海南岛至台湾岛之间,近 NE 向延伸,面积约 17.5 × 10⁴ km²。可划分为北部断阶带、北部拗陷带、中央隆起带、南部拗陷带和南部隆起带 5 个构造单元^[25-27]。珠一拗陷位于北部拗陷带,为一个 NE 向展布的狭长拗陷。珠一拗陷发育 2 套有效烃源岩:古近系始新统的文昌组和始新统一渐新统的恩平组。从目前钻井揭示地层看,文昌组主要由中深湖相和浅湖相沉积的泥岩、砂岩组成,恩平组主要为一套湖沼相沉积的泥岩、页岩和砂岩互层,夹煤层和碳质泥岩^[28]。油气资源评价研究表明,文昌组烃源岩的生烃量要大于恩平组烃源岩^[26]。本文主要讨论文昌组烃源岩有机碳含量的测井预测。

3.2 烃源岩有机碳与各种测井的相关性

通过编绘珠江口盆地惠州凹陷及番禺 4 洼 8 口典型钻井文昌组岩心或岩屑样品 158 个实测 TOC 数据与对应深度测井参数的关系图,发现本区文昌组烃源岩有机碳含量(TOC)与电阻率(R)、中子孔隙度(Φ_N)、声波时差(Δt)及自然伽马(γ)这 4 种测井参数均存在比较显著的正相关,相关系数分别为 0.569,0.502,0.470,0.293;而与密度(ρ)测井存在比较显著的负相关关系,相关系数为 0.474(图 4)。说明 TOC 与这 5 种测井曲线的响应程度存在一定的差异,但总体上比较接近。因此,

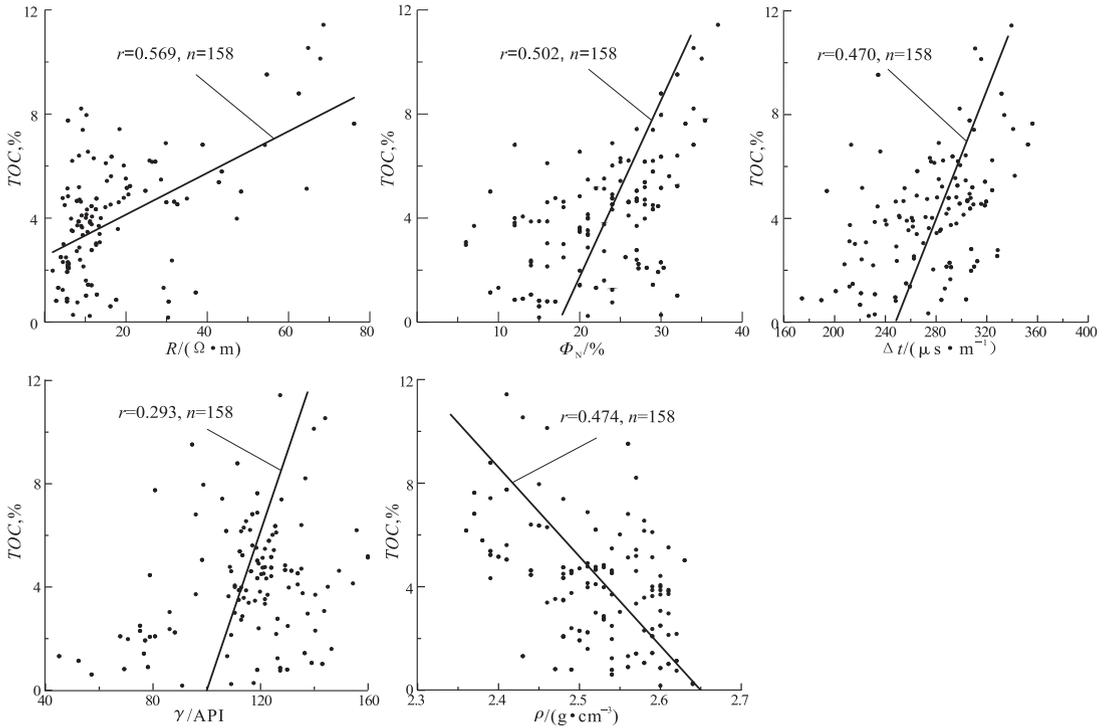


图 4 珠江口盆地 8 口典型钻井文昌组烃源岩 TOC 与测井取值关系

Fig. 4 TOC and well logs crossplots of source rock in Wenchang Formation of 8 wells in the Pearl River Mouth Basin

在优选 TOC 定量预测模型时,应尽可能综合以上 5 种测井参数,构成一个多元回归方程式的数学模型;仅使用包含一、二个参数的模型,不能很全面反映这种响应关系的特点。

3.3 定量预测模型优选

为了获得最佳的烃源岩 TOC 定量预测模型,运用了多元统计分析软件(SPSS),以上述 8 口井 158 个文昌组烃源岩 TOC 为因变量,以样品点相同深度的 $R, \Phi_N, \rho, \Delta t$ 和 γ 等测井参数为自变量,

进行了多种模型的试验、比较,优选过程及结果如表 1 所示。结果表明,TOC 与单测井参数拟合明显不如多参数综合拟合的效果好,而且拟合效果随着测井参数种数的增加而逐渐提高,五元回归方程模型的相关系数最高、回归估计的标准误差最小,属于最佳模型。

3.4 定量预测结果、效果

本次 TOC 定量预测选取了珠江口盆地珠一坳陷番禺 4 洼为研究实例。番禺 4 洼是珠一坳陷

表 1 珠江口盆地惠州凹陷及番禺 4 洼文昌组烃源岩 TOC 测井预测模型优选

Table 1 Predication models of TOC from well logs of Wenchang Formation source rock in Huizhou Depression and Panyu 4 Sag, the Pearl River Mouth Basin

测井参数	总有机碳定量预测模型(TOC/%)	相关系数	回归估计的标准误差
$R/(\Omega \cdot m)$	$TOC=0.080\ 08\ R+2.532\ 1$	0.569 1	1.929 84
$\Phi_N/\%$	$TOC=0.651\ 50\ \Phi_N-11.164\ 7$	0.503 4	2.028 04
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$TOC=\frac{411.603\ 9}{\rho}-159.743\ 0$	-0.477 7	2.061 98
$\Delta t/(\mu s \cdot m^{-1})$	$TOC=0.119\ 009\ \Delta t-29.071\ 5$	0.470 6	2.070 98
γ/API	$TOC=0.332\ 27\ \gamma-33.209\ 1$	0.292 6	2.244 34
双参数(R, Φ_N)	$TOC=0.069\ 1\ R+0.134\ 3\ \Phi_N-0.394$	0.696 9	1.688 82
三参数(R, Φ_N, ρ)	$TOC=\frac{(0.169\ R+0.282\ \Phi_N-14.497)}{\rho}-5.572$	0.704 9	1.675 53
四参数($R, \Phi_N, \rho, \Delta t$)	$TOC=\frac{(0.169\ R+0.183\ \Phi_N+0.032\ 9\ \Delta t-10.878)}{\rho}-1.721$	0.718 7	1.648 01
五参数($R, \Phi_N, \rho, \Delta t, \gamma$)	$TOC=\frac{(0.156\ R+0.157\ \Phi_N+0.031\ 7\ \Delta t+0.055\ \gamma-6.019)}{\rho}-2.182$	0.751 5	1.568 75

的富生烃洼陷,利用表 1 中的五参数模型对该洼陷的 PY5-8-x 井文昌组全井段烃源岩 TOC 进行了预测,获得了连续井段的预测 TOC 曲线,将离散的实测 TOC 数据点投在该曲线上,不难发现二者具有很好的一致性,说明预测效果良好(图 5)。

在图 5 中,电阻率曲线和声波时差曲线按照 $\Delta\log R$ 技术要求的比例尺叠合于同一栏内,中子和密度曲线同置于另一栏内。这样,高有机碳含量烃源岩的测井曲线特征就表现为:较高伽马(泥质岩)、声波时差曲线与电阻率曲线分离距离大、中子孔隙度(高值)与密度(低值)曲线一般也明显分离。TOC 的具体数值根据表 1 中的五参数模型计算。图 5 还表明,该钻井文昌组烃源岩整体上都为好的烃源岩,实测、预测的 TOC 一般都大于 2.0%。而且在缺乏实测样品的井段预测出多层 TOC 高于 4.0% 的优质烃源岩层,其中 3 层厚度达 6~12 m,另 3 层厚度 3~4 m,累计厚度达 32 m。图 5 也说明五元回归方程计算结果得到 $\Delta\log R$ 曲线叠合结果的支持性验证,同时克服了 $\Delta\log R$ 法计算值偏低(基线段 TOC 为零)、仅利用声波与电阻率 2 个测井参数的不足。用同样方法预测了研究区另外 6 口钻井文昌组烃

源岩的有机碳含量,也取得了类似的预测效果,限于篇幅不再叙述。

4 结论

1) 经过近半个世纪的发展,测井技术在烃源岩识别与评价中的应用范围越来越广、有机碳含量预测的精度越来越高。纵观有机碳含量各种预测模型的发展过程与应用效果,认为测井响应特征是基础,每种预测模型都具有自身的适用范围和应用条件。具体研究时,应结合研究地区地质特征、烃源岩特点,在充分分析烃源岩属性的测井响应特征基础上,优选出最佳的预测模型,并尽可能综合利用多种测井参数实施预测、尽可能使用多种方法与模型互为验证。

2) 珠一坳陷番禺 4 洼及惠州凹陷 158 个文昌组样品实测有机碳含量与电阻率、中子、声波、密度和伽马等 5 种测井参数均相关,建立的五元回归方程预测模型的相关系数达 0.751。对番禺 4 洼 PY5-8-x 井文昌组进行全井段有机碳含量预测结果显示,泥质烃源岩有机碳含量普遍较高,而且还发育多层单层厚度适中、有机碳含量特别高的极优质烃源岩,说明烃源岩条件好是番禺 4 洼成为富烃洼陷的根本原因。

参考文献:

- [1] PASSEY Q R, CREANEY S. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(12): 1777-1794.
- [2] 闫建平, 蔡进功, 赵铭海, 等. 运用测井信息研究烃源岩进展及其资源评价意义[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 270-279.
- [3] BEERS R F. Radioactivity and organic content of some Paleozoic shales[J]. AAPG Bulletin, 1945, 29(1): 1-22.
- [4] SWANSON V E. Oil yield and uranium content of blank shales[M]//USGS Professional Paper 356-A. Reston, Virginia: USGS, 1960: 1-44.
- [5] FERTEL W H, RIEKE H H. Gamma ray spectral evaluation techniques identify fractured shale reservoirs and source rock characteristics[J]. Journal of Petroleum Technology, 1980, 31(11): 2053-2062.
- [6] SCHMOKER J W. Determination of organic matter content of Appalachian Devonian shale from Gamma ray logs[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(7): 1285-1298.
- [7] 谭延栋. 测井识别生油岩方法[J]. 测井技术, 1988, 12(6): 1-12.
- [8] SCHMOKER J W. Determination of organic content of Appalachian Devonian shales from formation-density logs[J]. AAPG Bulletin. 1979, 63 (9): 1504-1537.
- [9] SCHMOKER J W, HESTER T C. Organic carbon in Bakken formation, United States Portion of Williston Basin [J]. AAPG Bulletin, 1983, 67(12): 2165-2174.

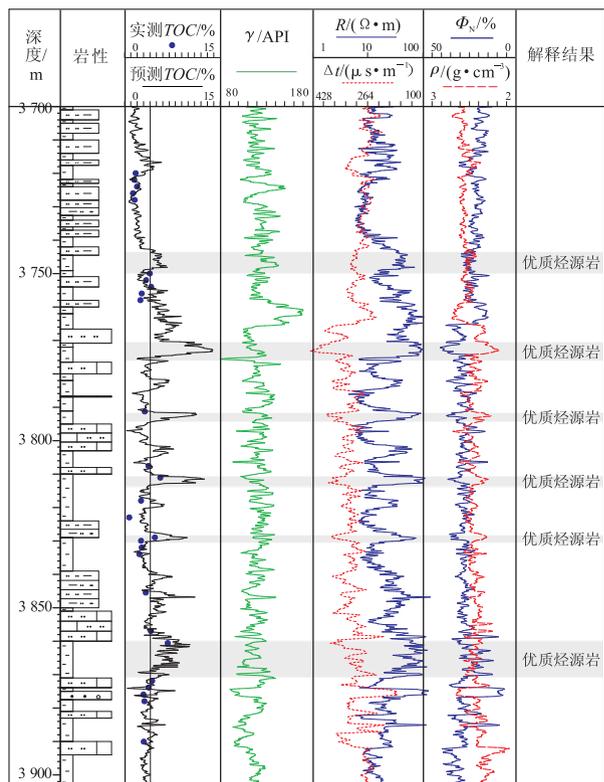


图 5 珠江口盆地番禺 4 洼 PY5-8-x 井文昌组烃源岩 TOC 测井预测结果

Fig. 5 TOC of Wenchang Formation source rock predicted from logs in Well PY5-8-x in the Pearl River Mouth Basin

州组油藏 CO₂ 驱油类型为混相驱,比水驱提高最终采收率 15%。

2)草舍油田泰州组油藏通过实施 CO₂ 混相驱油试验,已累计注入 CO₂ 气 5 842 × 10⁴ m³,增产原油达 3 × 10⁴ t,提高采收率 2%。表明 CO₂ 混相驱油可以大幅度提高低渗油藏采收率,且注气越早,采收率越高。

参考文献:

[1] ORR F M JR, YU A D, LIEN C L. Phase behavior of CO₂ and crude oil in low temperature reservoirs [J]. SPE Journal, 1981,21 (4) :480-492.

[2] SIMON R, ROSMAN A, ZANA E. Phase-behavior properties of CO₂ - reservoir oil systems [J]. SPE Journal, 1978,18 (1) :20-26.

[3] 赵明国,王东. 大庆油田芳 48 断块 CO₂ 吞吐室内实验[J]. 油气地质与采收率,2008,15(2):89-91.

[4] 郭平,李苗. 低渗透砂岩油藏注 CO₂ 混相条件研究[J]. 石油与天然气地质,2007,28(5):687-692.

[5] 程杰成,朱维耀,姜洪福. 特低渗透油藏 CO₂ 驱油多相渗流理论模型研究及应用[J]. 石油学报,2008,29(2):246-251.

[6] 郝永卯,薄启炜,陈月明. CO₂ 驱油实验研究[J]. 石油勘探与开发,2005,32(2):110-112.

[7] 宋道万. 二氧化碳混相驱数值模拟结果的主要影响因素[J]. 油气地质与采收率,2008,15(4):72-74.

[8] 马涛,汤达帆,蒋平,等. 注 CO₂ 提高采收率技术现状[J]. 油田化学,2007,24(4):379-383.

[9] 沈平平,黄磊. 二氧化碳-原油多相多组分渗流机理研究[J]. 石油学报,2009,30(2):247-251.

[10] 沈平平,袁士义,韩冬,等. 中国陆上油田提高采收率潜力评价及发展战略研究[J]. 石油学报,2001,22(1):45-49.

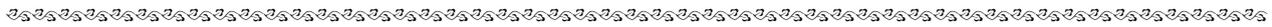
[11] 吴志良,张勇,唐人选,等. 复杂断块油田 CO₂ 驱油动态监测技术应用与分析[J]. 石油实验地质,2009,31(5):542-546.

[12] 祝春生,程林松. 低渗透油藏 CO₂ 驱提高原油采收率评价研究[J]. 钻采工艺,2007,30(6):55-57.

[13] 郝永卯,陈月明,于会利. CO₂ 驱最小混相压力的测定与预测[J]. 油气地质与采收率,2005,12(6):64-66.

[14] 孙业恒,吕广忠,王延芳,等. 确定 CO₂ 最小混相压力的状态方程法[J]. 油气地质与采收率,2006,13(1):82-84.

(编辑 徐文明)



(上接第 295 页)

[10] DELLENBACH J, ESPITALIE J, LEBRETON F F. Source rock logging[C]// Transactions of 8th European SPWLA Symposium. London:[s. n.], 1983;paper D.

[11] AUTRIC A. Resistivity, radioactivity, and sonic transit time logs to evaluate the organic content of low permeability rocks[J]. The Log Analyst,1985,26(3):36-45.

[12] 赵彦超. 生油岩测井评价的理论和实践:以南阳、泌阳凹陷为例[J]. 地球科学:中国地质大学学报,1990,15(1):65-74.

[13] MEYER B L, NEDERLOF M H. Identification of source rocks on wireline logs by density/ resistivity and sonic transit time/resistivity crossplots[J]. AAPG Bulletin,1984,68(2):121-129.

[14] HERRON S L. A total organic log for source rock evaluation[J]. The Log Analyst,1987,28(6):520-527.

[15] PATTERSON C D, QUARLES C A, BREYER J A. Possible new well-logging tool using positron Doppler broadening to detect total organic carbon (TOC) in hydrocarbon source rocks[J]. Radiation Physics and Chemistry,2003,68:523-526.

[16] MURRAY G H. Quantitative fracture study; Sanish pool, McKenzie County, North Dakota [J]. AAPG Bulletin,1968,52(1):57-65.

[17] MEISSNER F F. Petroleum geology of the Bakken formation Williston basin, North Dakota and Montana[C]// REHRIG D,ed. The economic geology of the Williston basin; Proceedings of the Montana Geological Society, 24th Annual Conference,1978:207-227.

[18] FERTEL W H, CHILINGAR G V. Total organic carbon content determined from well logs[J]. SPE,1988:407-419.

[19] 刘新颖,邓宏文,邸永香,等. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷南屯组优质烃源岩发育特征[J]. 石油实验地质,2009,31(1):68-73.

[20] KAMALI M R, MIRSHADY A A. Total organic carbon content determined from well logs using ΔlogR and neuro fuzzy techniques[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, (45): 141-148.

[21] 朱振宇,刘洪,李幼铭. ΔlogR 技术在烃源岩识别中的应用与分析[J]. 地球物理学进展,2003,18(4):647-649.

[22] HUANG Z, WILLIAMSON M A. Artificial neural network modelling as an aid to source rock characterization[J]. Marine and Petroleum Geology, 1996,13(2):277-290.

[23] 朱振宇,王贵文,朱广宇. 人工神经网络法在烃源岩测井评价中的应用[J]. 地球物理学进展,2002,17(1):137-140.

[24] ANDREAS P, AGTERBERG F P. Wavelet analysis of well-logging data from oil source rock, Egret Member, offshore eastern Canada[J]. AAPG Bulletin,2000,84(10):1617-1632.

[25] 于水明,施和生,梅廉夫,等. 过渡动力学背景下的张扭性断陷:以珠江口盆地惠州凹陷古近纪断陷为例[J]. 石油实验地质,2009,31(5):485-489.

[26] 施和生,朱俊章,姜正龙,等. 珠江口盆地珠一坳陷油气资源再评价[J]. 中国海上油气,2009,21(1):9-14.

[27] 姜华,王华,李俊良,等. 珠江口盆地珠三坳陷断层特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 石油实验地质,2008,30(5):460-466.

[28] 朱俊章,施和生,舒誉,等. 珠江口盆地烃源岩有机显微组分特征与生烃潜力分析[J]. 石油实验地质,2007,29(3):301-306.

(编辑 徐文明)