

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019092901

渤海海域沙南凹陷烃源岩 TOC 测井预测模型 优选及应用

徐仕琨, 叶加仁, 杨宝林, 赵牛斌

中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074

摘要:针对渤海海域沙南凹陷油气勘探程度低, 烃源岩样品取芯少, 连续性差, 烃源岩研究薄弱及勘探潜力争议较大等问题, 基于沙南凹陷内 6 口单井的测井资料及泥岩样品实测 TOC 数据, 分别应用多元线性回归法和改进的 $\Delta\lg R$ 法分层段建立沙南凹陷东三段、沙一二段、沙三段烃源岩 TOC 定量预测模型, 对比优选后发现改进的 $\Delta\lg R$ 法和多元线性回归法中的四参数线性回归法可有效地预测沙南凹陷单井湖相烃源岩 TOC 纵向分布, 并以改进的 $\Delta\lg R$ 法最优; 选取改进的 $\Delta\lg R$ 法预测 TOC 曲线对两口代表性单井烃源岩进行评价, 结果表明沙三段具有烃源岩占比地层厚度高、TOC 高、好—优质烃源岩厚度大等特点, 为凹陷主力烃源岩系, 沙南凹陷勘探前景广阔。

关键词: 烃源岩; 有机碳含量; 测井评价; 沙南凹陷

中图分类号: TE132

文献标识码: A

Optimization of TOC well logging prediction models and their application to source rock evaluation in the Shan'an Sag of Bohai Sea

XU Shikun, YE Jiaren, YANG Baolin, ZHAO Niubin

Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

Abstract: Oil and gas exploration degree of the Shan'an Sag of the Bohai Basin is relatively low due to lack of drilling cores and source rock samples. TOC logging prediction models for source rocks are established in this paper for the Members of E_3d_3 、 E_3s_{1+2} 、 E_2s_3 by the multiple linear regression method and the improved $\Delta\lg R$ method based on the logging data and limited measured TOC data of the mudstone samples collected from six single wells. After comparison and optimization, it is found that both the improved $\Delta\lg R$ method and the four-parameter linear regression method are effective to predict the TOC vertical distribution pattern of the lacustrine source rocks in single wells in the Sag and the improved $\Delta\lg R$ method is obviously more efficient. Therefore, predicted TOC curve of improved $\Delta\lg R$ is selected to evaluate the source rocks for two representative single wells. The result shows that the E_2s_3 is characterized by high ratio of source rocks, high TOC content and large thickness of high-quality source rocks. It is the main source rock of the study area and the Shan'an sag must have good prospect for oil and gas exploration. The research results are helpful to the evaluation of source rocks in the Shan'an sag and will provide solid scientific basis for further understanding of oil and gas exploration potential in the study area.

Key words: source rocks; organic carbon content; logging evaluation; Shan'an Sag

烃源岩是油气生成的物质基础, 烃源岩评价是沉积盆地油气资源潜力分析与勘探前景评价的核心内容之一, 烃源岩中的总有机碳含量 (TOC) 是烃源岩评价的重要参数。在利用有机地球化学资料评价烃源岩时, 一般隔一定距离取心采样进行测试分析, 但受取心数量和分析化验成本等影响, 难以获取纵向上连续的 TOC 值^[1-2], 而测井资料具有纵

向上连续, 分辨率高等优势, 且多种测井参数与烃源岩 TOC 之间具有一定的响应关系, 可据此建立预测模型对烃源岩 TOC 进行定量预测, 并获取烃源岩厚度^[3-4]。国内外学者现已提出了多种基于测井资料预测烃源岩 TOC 的方法, 如多元线性回归法^[5-6]、 $\Delta\lg R$ 法^[7]、BP 神经网络法等^[8-11], 不同方法原理各异, 互有优劣, 分别适用于不同的地质情况和资料状况。

资助项目: 国家科技重大专项“中国近海烃源岩地球生物学及凹陷分类研究”(2016ZX05024-002-003)

作者简介: 徐仕琨 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事中国近海潜在富烃凹陷烃源岩及资源评价方面的研究, E-mail: 574641016@qq.com

通讯作者: 叶加仁 (1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事油气成藏动力学及资源评价等方面的教学与研究, E-mail: jrye@cug.edu.cn

收稿日期: 2019-09-29; 改回日期: 2020-04-18. 周立君编辑

沙南凹陷位于渤海海域, 目前勘探程度总体较低, 烃源岩研究较薄弱, 对凹陷油气勘探潜力争议较大。本文基于沙南凹陷测井资料, 结合实测烃源岩 TOC 数据, 优选适合沙南凹陷烃源岩 TOC 计算的测井方法与模型, 定量预测单井烃源岩 TOC 纵向分布, 为研究区勘探潜力分析奠定基础。

1 区域地质概况

沙南凹陷地处渤海西部海域, 北靠沙垒田凸起, 南为埕北低凸起及埕子口凸起, 东临渤中凹陷, 西接歧口凹陷, 面积约 3235 km², 可分为东西两个次洼(图 1), 为一新生代发育起来的北断南超的箕状凹陷。沙南凹陷沉积盖层自下而上由古近系孔店组、沙河街组(沙三段、沙二段、沙一段)、东营组(东三段、东二段、东一段), 新近系馆陶组、明化镇组及第四系组成, 其中, 东三段、沙一二段及沙三段湖相泥岩为该区主要烃源岩^[12-13], 明化镇组、馆陶组、东二段及沙二段为主要的含油气层段。截至目前, 该区已累计钻探井 20 余口, 发现了 6 个含油气构造, 但无商业开采价值, 其勘探潜力备受质疑^[14]。

2 原理及方法

2.1 烃源岩测井评价原理

烃源岩测井评价是基于烃源岩与非烃源岩 TOC

和孔隙流体物理性质不同而引起的测井响应特征的差异。通常, 非烃源岩由岩石骨架和孔隙流体(主要为地层水)组成(图 2a), 未成熟烃源岩由岩石骨架、固体有机质和孔隙流体(仍主要为地层水)(图 2b)组成, 成熟烃源岩中的部分有机质转化为液态烃进入孔隙, 其孔隙流体为地层水和液态烃(图 2c)^[15]。因此, 烃源岩和非烃源岩的测井响应特征不同, 研究表明, 富有机质烃源岩在测井曲线上表现为“四高一低”, 即高声波时差、高自然伽马、高电阻率、高中子、低密度^[16-18]。

2.2 烃源岩 TOC 定量预测方法

如前所述, 基于测井资料定量预测烃源岩 TOC 的方法主要有多元线性回归法、BP 神经网络法、 ΔIgR 法等, BP 神经网络法虽然在解决非线性复杂问题方面具较大优势, 但其难以用表达式进行表示, 未被广泛应用, 目前多元线性回归法和 ΔIgR 法在烃源岩定量预测中应用广泛。

2.2.1 多元线性回归法

由于多种测井参数如中子、声波时差、电阻率、自然伽马、密度、铀含量等均与烃源岩 TOC 存在响应关系, 因此, 先对各测井参数与实测 TOC 进行相关性分析, 确定相关性较好的参数, 在此基础上, 将一种或多种测井参数作为自变量, TOC 作为因变量建立一元或多元回归方程, 通过多元回归分析确定最佳 TOC 定量预测模型。通常, 多参数模型要优于单参数模型, 且不同地区 TOC 的主控因素不

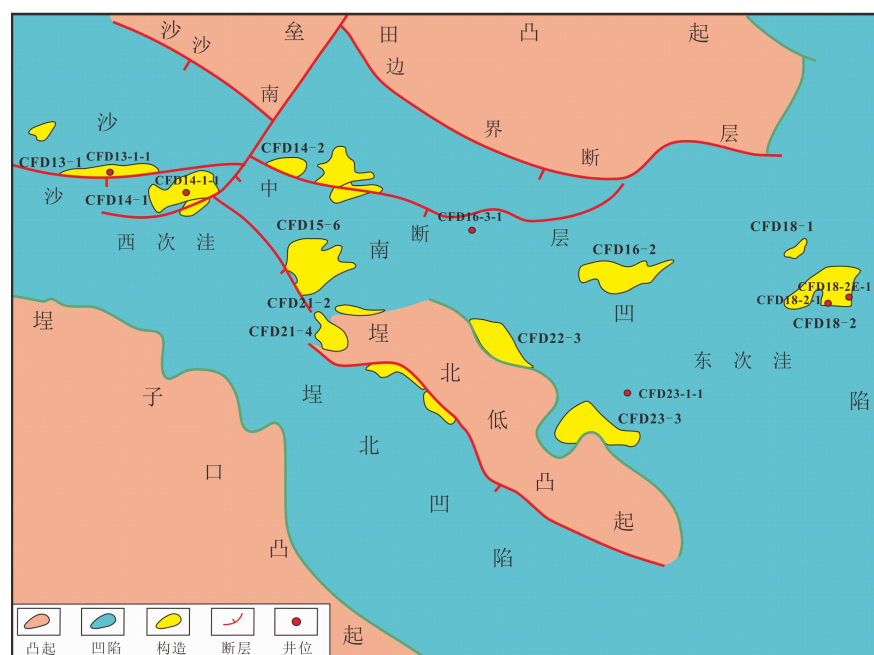


图 1 沙南凹陷构造位置(据参考文献[12]修改)

Fig.1 Tectonic location of the Shanan Sag (modified from reference [12])

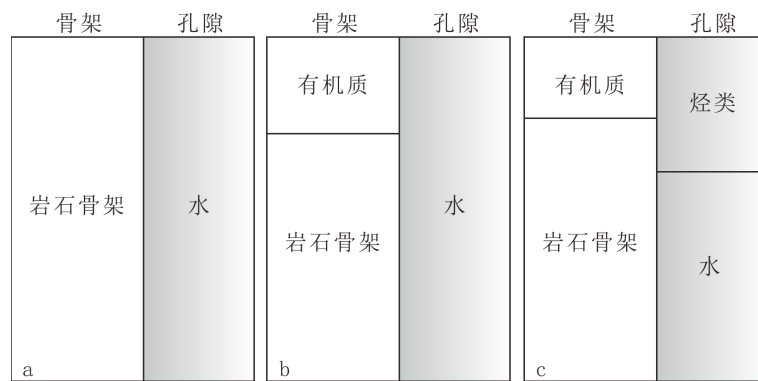
图 2 岩石组成示意图^[15]

Fig.2 Diagram of rock composition

同, 预测模型也会具有地域差异^[19-20]。

2.2.2 改进的 $\Delta \lg R$ 法

Passey 等提出了能够计算不同成熟度条件下烃源岩 TOC 的测井评价方法, 即 $\Delta \lg R$ 法^[7]。该方法先通过声波时差和电阻率叠加计算 $\Delta \lg R$, 再根据 TOC 与 $\Delta \lg R$ 呈线性相关, 由 $\Delta \lg R$ 计算 TOC, 公式如下:

$$\Delta \lg R = \lg(R/R_{\text{基线}}) + x \times (\Delta t - \Delta t_{\text{基线}}) \quad (1)$$

$$\text{TOC} = 10^{(2.297 - 0.1688 \times \text{LOM})} \times \Delta \lg R \quad (2)$$

式中, R 为电阻率, $R_{\text{基线}}$ 为非烃源岩段电阻率, Δt 为声波时差, $\Delta t_{\text{基线}}$ 为非烃源岩段声波时差, x 为系数, LOM 为有机质成熟度指数, 与镜质体反射率 R_o 相关。

由于该方法没有考虑其他与 TOC 具有相关性的重要测井参数, 且需要成熟度参数和人为确定岩性基线, 误差较大, 为此, 朱光有等^[21]及张寒等^[22]提出了改进的 $\Delta \lg R$ 法, 公式(2)可简化为

$$\text{TOC} = K \times \Delta \lg R \quad (3)$$

式中, K 为系数, 将公式(1)代入公式(3)可得

$$\text{TOC} = K \times \lg R + xK \times \Delta t - K \times (\lg R_{\text{基线}} + x \times \Delta t_{\text{基线}}) \quad (4)$$

同一凹陷或同一口井的 $\Delta t_{\text{基线}}$ 和 $\lg R_{\text{基线}}$ 为常数, 式(4)可简化为

$$\text{TOC} = a \times \lg R + b \times \Delta t + c \quad (5)$$

由于 TOC 与密度呈负相关关系, 经密度校正, 可将式(5)改为

$$\text{TOC} = (a \times \lg R + b \times \Delta t + c) / \rho \quad (6)$$

式中, ρ 为密度测井值, a 、 b 、 c 的值可通过对研究区样品进行分析, 用最小二乘法拟合获得。

3 烃源岩 TOC 测井预测

由于沙南凹陷东三段、沙一二段、沙三段这三套烃源岩的沉积环境及母质来源等均存在一定的

差异^[14], 本次对东三段、沙一二段、沙三段分别建立 TOC 测井定量预测模型。

沙南凹陷共有 6 口井具较完整测井资料, 分别是 CFD13-1-1、CFD14-1-1、CFD16-3-1、CFD18-2-1、CFD18-2E-1、CFD23-1-1(具体位置见图 1)。本文基于 6 口井 3 个烃源岩层段共 55 个岩心样品的实测 TOC 数据及相应的测井参数, 分别应用多元线性回归法及改进的 $\Delta \lg R$ 法分层段建立烃源岩 TOC 定量预测模型, 进而根据相关系数的大小, 优选预测模型, 实现单井烃源岩 TOC 预测。

3.1 多元线性回归法模型

3.1.1 烃源岩实测 TOC 与各测井参数相关性分析

分别统计分析东三段、沙一二段、沙三段烃源岩实测 TOC 与各测井参数的相关关系(图 3-5)发现, 东三段烃源岩实测 TOC 与声波时差(AC)、中子(CNL)存在较强的正相关关系, 与密度(DEN)存在较强的负相关关系, 相关系数分别为 0.63、0.465、0.502, 与电阻率(RT)及自然伽马(GR)没有明显的相关关系; 沙一二段烃源岩实测 TOC 与声波时差(AC)、电阻率(RT)、中子(CNL)存在较强的正相关关系, 与密度(DEN)、自然伽马(GR)存在负相关关系, 相关系数分别为 0.816、0.611、0.23、0.38、0.55; 沙三段烃源岩实测 TOC 与声波时差(AC)、电阻率(RT)、中子(CNL)存在较强的正相关关系, 与密度(DEN)存在较强的负相关关系, 相关系数分别为 0.685、0.42、0.625、0.686, 与自然伽马(GR)存在较弱的负相关关系。综合来看, 沙南凹陷烃源岩实测 TOC 与声波时差(AC)、中子(CNL)、电阻率(RT)具有明显的正相关关系, 与密度(DEN)具显著的负相关关系, 而与自然伽马(GR)的相关关系不明显或不符合地质规律, 因此, 本文不考虑自然伽马(GR)参数, 选择其他 4 个测井参数进行 TOC

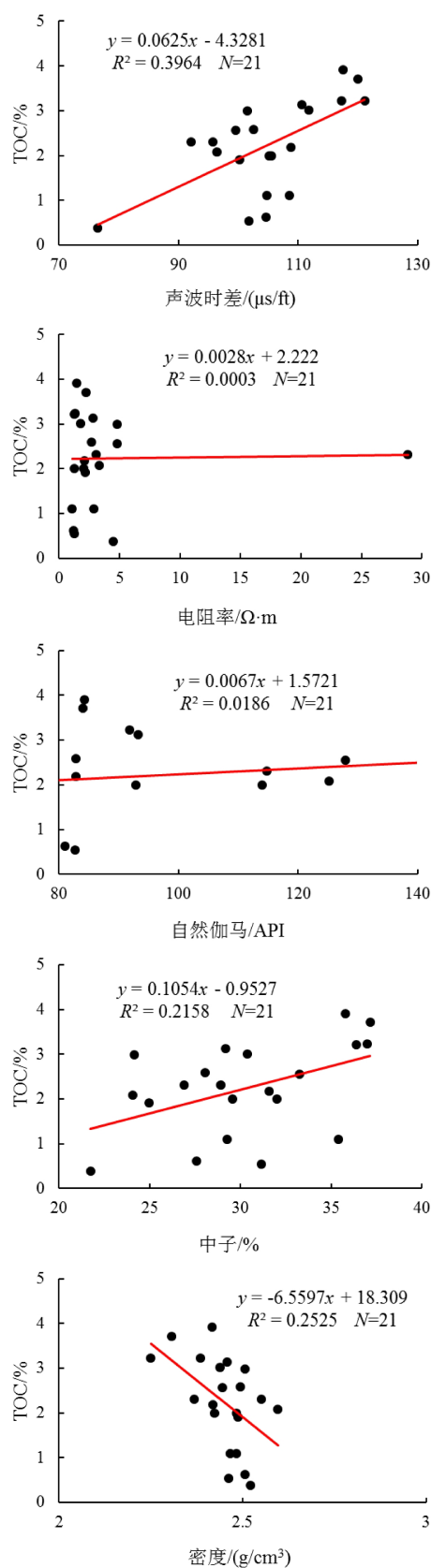


图 3 沙南凹陷东三段烃源岩实测 TOC 与各测井参数交会图

Fig.3 Correlation of measured TOC and logging parameters of the E₃d₃ in Shanan Sag

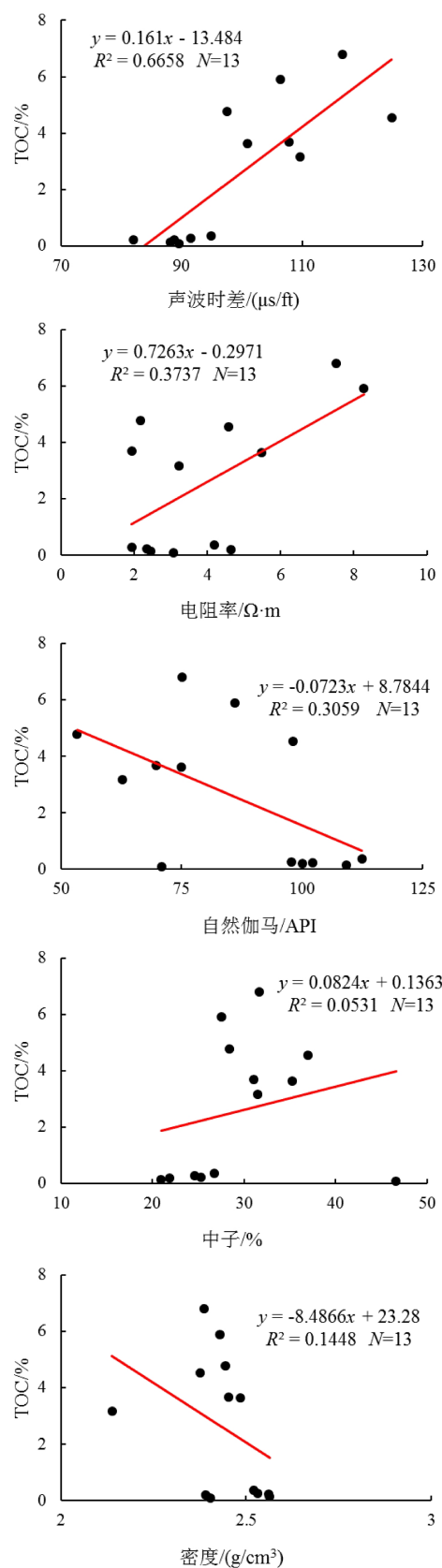


图 4 沙南凹陷沙一二段烃源岩实测 TOC 与各测井参数交会图

Fig.4 Correlation of measured TOC and logging parameters of the E₃s₁₊₂ in Shanan Sag

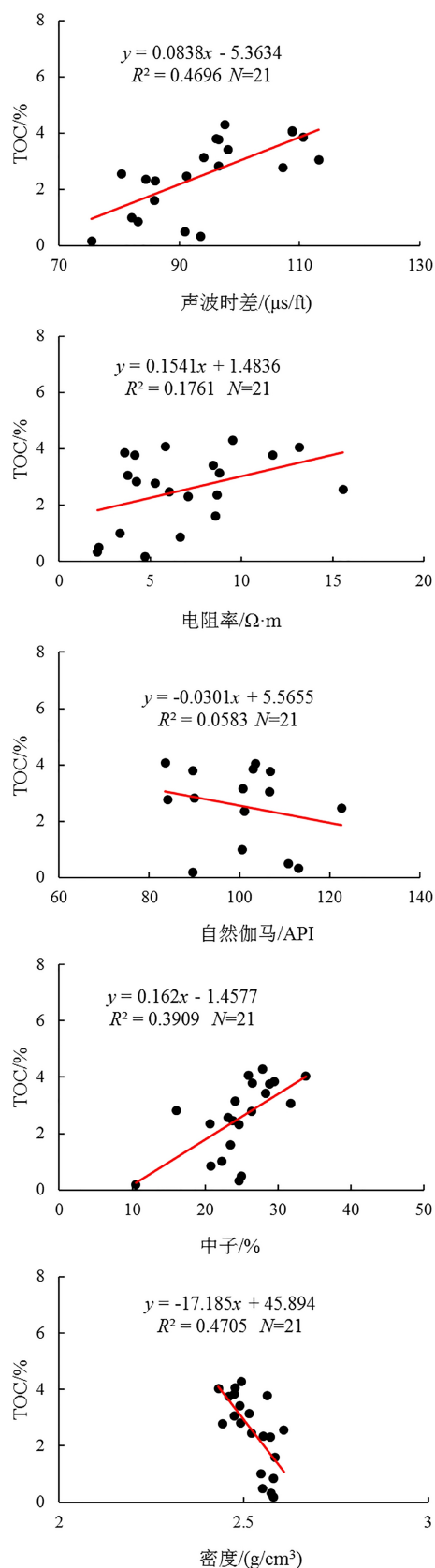


图5 沙南凹陷沙三段烃源岩实测 TOC 与各测井参数交会图

Fig.5 Correlation graphs of measured TOC and logging parameters of the E₂S₃ in Shan'an Sag

定量预测模型的建立。

3.1.2 定量预测模型优选

为获得最佳多元预测模型,应用多元统计分析软件 SPSS,以烃源岩实测 TOC 数据为因变量,相应部位的测井参数为自变量,分别对东三段、沙一二段、沙三段进行单参数、双参数、三参数及四参数预测模型的建立,并对比优选合适的预测模型。

结果表明(表1),各层段烃源岩 TOC 测井预测模型的拟合度(相关系数)均随测井参数个数的增加而增加,即多参数模型优于单参数模型,并以四参数模型相关系数最高,拟合效果最好,为多元线性回归法中的最佳预测模型,东三段、沙一二段、沙三段的四参数模型的相关系数分别为 0.695、0.865、0.847。对比四参数预测模型计算 TOC 与实测 TOC

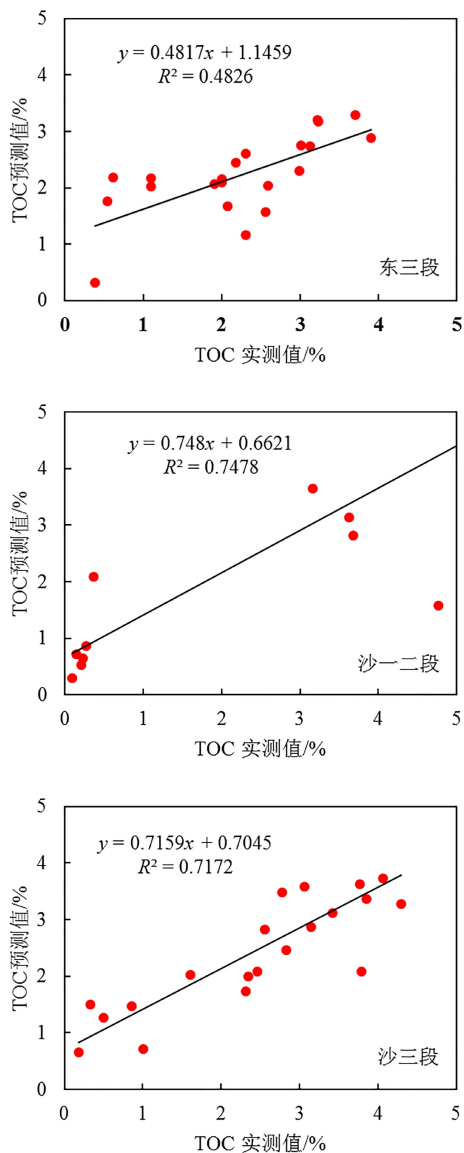


图6 测井四参数预测模型计算 TOC 与实测 TOC 对比
Fig.6 Correlation of measured TOC and calculated TOC (Four-parameter method)

表 1 沙南凹陷烃源岩 TOC 测井多元线性回归法定量预测模型优选

Table 1 Quantitative TOC logging prediction models by multivariate linear regression method for source rocks in Shanan Sag

层位	测井参数	TOC定量预测模型	相关系数	
东三段	单参数	声波时差（AC）	TOC=0.063AC-4.328	0.63
		电阻率（RT）	TOC=0.003RT+2.222	0.016
		密度（DEN）	TOC=-6.56DEN+18.309	0.502
		中子（CNL）	TOC=0.105CNL-0.953	0.465
	双参数	AC, CNL	TOC=0.076AC-0.037CNL-4.604	0.636
	三参数	AC, RT, CNL	TOC=0.09AC+0.046RT-0.052CNL-5.756	0.682
	四参数	AC, RT, CNL, DEN	TOC=(0.214AC+0.091RT-0.183CNL-5.928)/DEN-2.414	0.695
沙一二段	单参数	声波时差（AC）	TOC=0.161AC-13.484	0.816
		电阻率（RT）	TOC=0.726RT-0.297	0.611
		密度（DEN）	TOC=-8.487DEN+23.28	0.38
		中子（CNL）	TOC=0.082CNL+0.136	0.23
	双参数	AC, RT	TOC=0.134AC+0.381RT-12.294	0.862
	三参数	AC, RT, CNL	TOC=0.141AC+0.373RT-0.031CNL-12.069	0.864
	四参数	AC, RT, CNL, DEN	TOC=(0.335AC+0.942RT-0.067CNL-36.258)/DEN+2.992	0.865
沙三段	单参数	声波时差（AC）	TOC=0.084AC-5.363	0.685
		电阻率（RT）	TOC=0.154RT+1.484	0.42
		密度（DEN）	TOC=-17.185DEN+45.894	0.686
		中子（CNL）	TOC=0.162CNL-1.458	0.625
	双参数	AC, CNL	TOC=0.06AC+0.068CNL-4.806	0.708
	三参数	AC, RT, CNL	TOC=0.101AC+0.198RT-0.028CNL-7.653	0.845
	四参数	AC, RT, CNL, DEN	TOC=(0.243AC+0.489RT-0.068CNL-20.204)/DEN+0.77	0.847

(图 6), 二者具较高的吻合度, 也证实本次建立的四参数模型具有较高的预测精度。

3.2 改进的 ΔlgR 法模型

基于烃源岩实测 TOC 及声波时差 (AC) 与电阻率 (RT) 测井数据, 利用 SPSS 软件, 采用公式 (6) 分别建立沙南凹陷三套烃源岩 TOC 测井 ΔlgR 法定量预测模型 (表 2)。各层段烃源岩的拟合效果均较好, 相关系数大于 0.75; 同时, ΔlgR 法预测的 TOC 与实测 TOC 对比也揭示二者吻合度高 (图 7), 说明该模型具有较高的预测精度。

3.3 方法对比及应用

运用“四参数线性回归法”和“改进的 ΔlgR 法”分别对沙南凹陷东三段、沙一二段、沙三段烃源岩 TOC 进行计算, 并对比分析 TOC 实测值与测井计算值, 计算出平均绝对误差和平均相对误差 (表 3)。

显然, 两种方法预测 TOC 的平均绝对误差及相对误差均较小, 满足 TOC 预测的精度要求, 四参数线性回归法对东三段、沙一二段、沙三段 TOC 预测结果的平均相对误差分别为 25.1%、34.6%、22.8%, 改进的 ΔlgR 法预测结果的平均相对误差较四参数线性回归法总体来说更低, 只有沙一二段因实测数据较少而导致预测误差相对较大, 东三段、沙一二段、沙三段分别为 23.1%、40.3%、19.4%, 因此, 改进的 ΔlgR 法优于四参数线性回归法, 其相对误差更小。同时, 应用这两种方法对研究区两口代表性单井 CFD23-1-1 井和 CFD16-3-1 井进行烃源岩 TOC 预测, 结果 (图 8) 也揭示预测 TOC 曲线与实测 TOC 点吻合度高, 且改进的 ΔlgR 法预测 TOC 曲线与实测 TOC 点更接近, 预测效果更好。

对改进的 ΔlgR 法和四参数线性回归法两种模型进行对比可以发现, 两者的主要差别在于参数的选取和运算形式: 参数的选取上, 改进的 ΔlgR 法包

表 2 沙南凹陷烃源岩 TOC 测井 ΔlgR 法定量预测模型

Table 2 Quantitative TOC logging prediction models by ΔlgR method of source rocks in Shanan Sag

层位	TOC定量预测模型	相关系数
东三段	$TOC = (0.206AC + 3.795lgRT - 17.645) / DEN$	0.767
沙一二段	$TOC = (0.325AC + 6.94lgRT - 30.115) / DEN$	0.835
沙三段	$TOC = (0.215AC + 7.648lgRT - 19.825) / DEN$	0.877

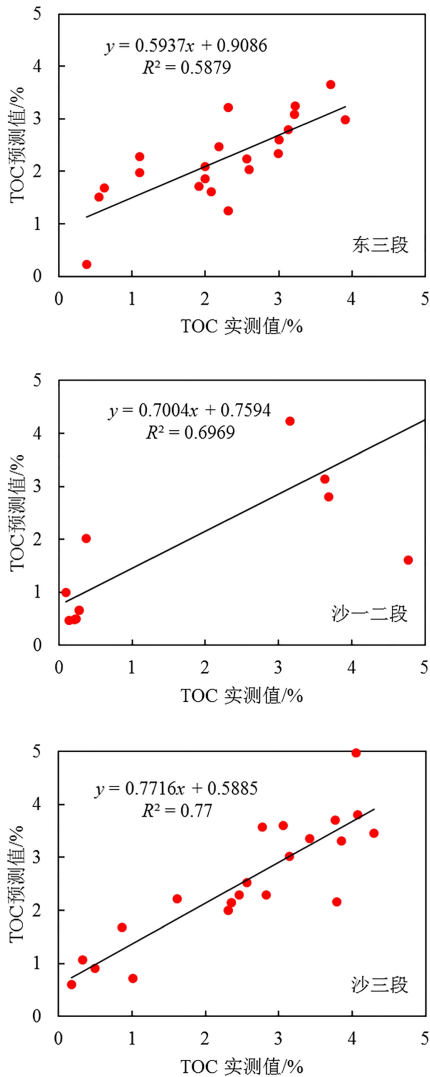


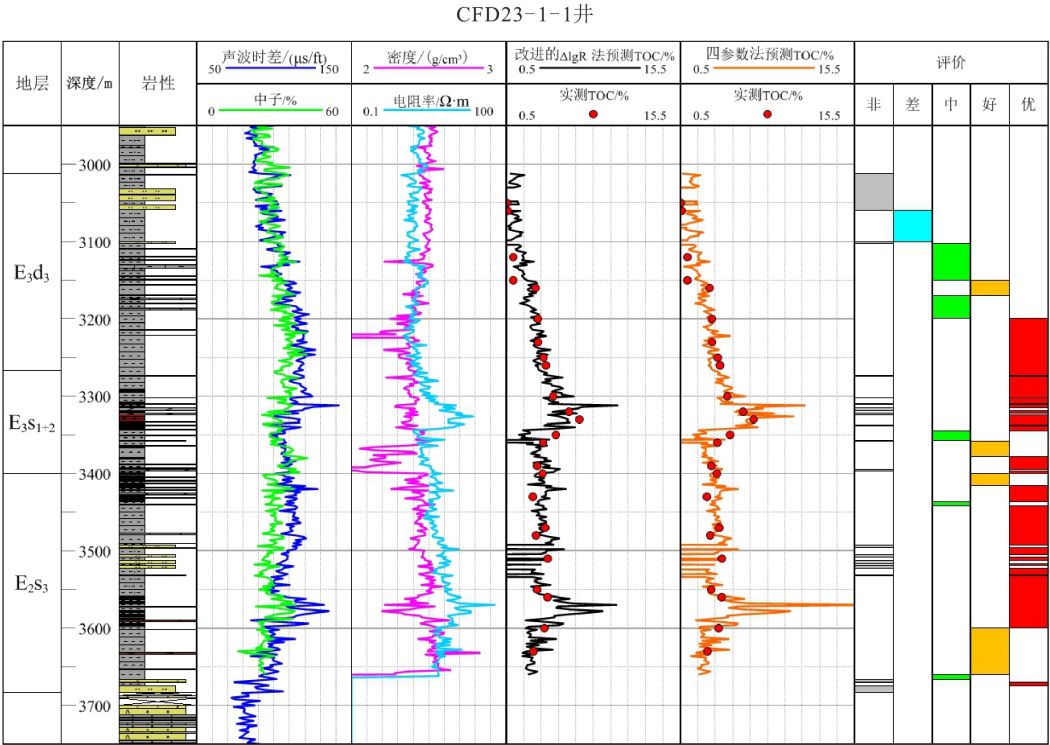
图 7 测井 ΔlgR 法预测 TOC 与实测 TOC 对比
Fig.7 Correlation of measured TOC and calculated TOC
(ΔlgR method)

括声波时差、电阻率以及密度 3 个参数,四参数线性回归法则多一个中子参数,因选取的参数与 TOC 均具有较高的相关性,故两种方法差别不大;运算形式上,两种方法的差别主要为是否对电阻率参数取对数后再参与计算,根据 Passey 等提出的 TOC 与 ΔlgR 呈线性相关,可推测对电阻率参数取对数后再建立的 TOC 预测模型具有更好的应用效

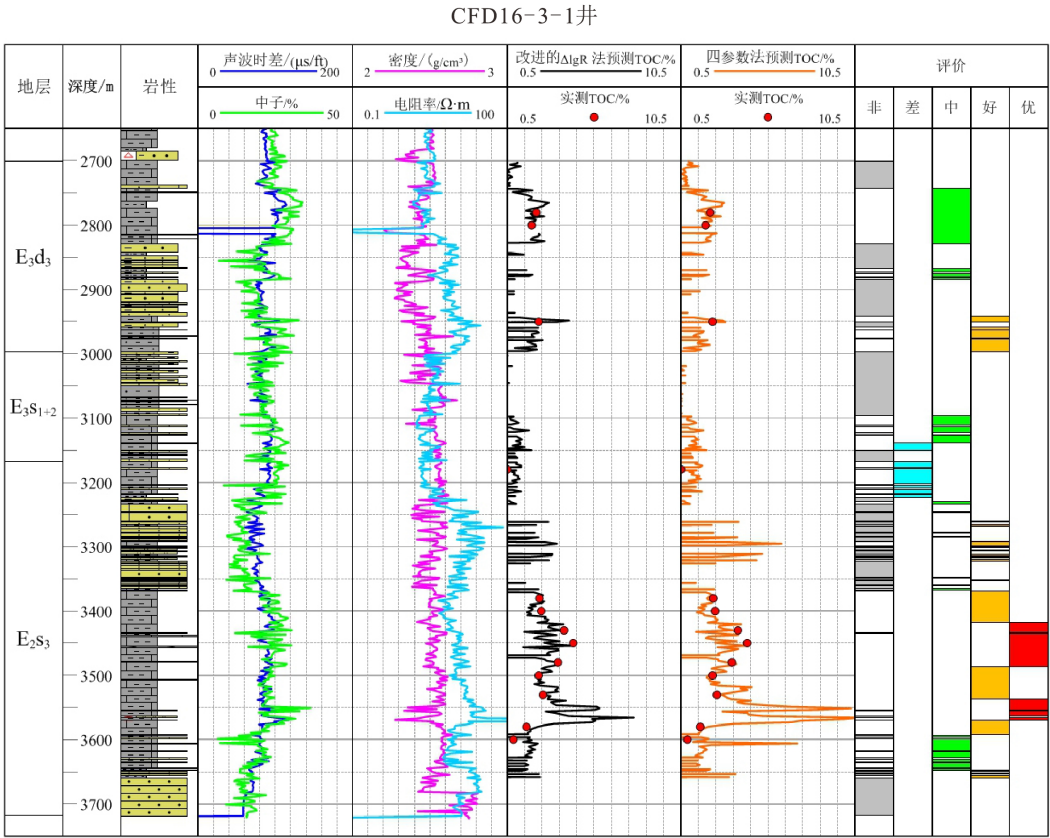
果,故改进的 ΔlgR 法较优。

为此,本文选取改进的 ΔlgR 法预测 TOC 曲线对上述两口单井的烃源岩进行评价,同时根据侯读杰^[23]提出的湖相烃源岩评价标准,按 TOC 含量将研究区烃源岩分为非 (TOC<0.5%)、差 (0.5%≤TOC<1%)、中 (1%≤TOC<2%)、好 (2%≤TOC<3%)、优 (TOC≥3%) 五个级别,并对两口井不同级别的烃源岩厚度分别统计。结果表明 (图 8,表 4),在 CFD23-1-1 井中,沙三段、沙一二段及东三段 3 个层段均发育有效烃源岩,其中以沙三段最佳,烃源岩厚度占本段地层总厚度的比例最高,达 90.46%,且好至优质烃源岩厚度最大,累计达 244 m,分别占地层总厚度及源岩厚度的 86.22% 与 95.31%;其次为沙一二段,其烃源岩厚度占本段地层总厚度的 89.47%,好—优质烃源岩厚度累计达 107 m,分别占地层总厚度及源岩厚度的 80.45% 与 89.92%;东三段相对较差,源岩厚度占本段地层总厚度的 80.78%,低于沙三段和沙一二段,且好—优质烃源岩的累计厚度也相对较小 (87 m),占地层总厚度及源岩厚度的比例也较低,分别为 34.12% 与 42.23%,多发育差和中等烃源岩。在 CFD16-3-1 井中,也以沙三段烃源岩最好,烃源岩厚度占本段地层总厚度的百分比相对最高,为 63.92%,好—优质烃源岩厚度累计达 244.5 m,分别占地层总厚度及源岩厚度的 44.33% 与 69.36%;其次为东三段,其烃源岩厚度占本段地层总厚度的 48.14%,主要发育中等—好烃源岩;沙一二段相对最差,其烃源岩厚度小 (49 m),仅占本段地层总厚度的 28.82%,并以差—中等烃源岩为主。

综上所述并结合前人相关成果,沙南凹陷烃源岩发育,并以沙三段烃源岩最优,其厚度大且 TOC 高,是凹陷的主力烃源岩层系;沙一二段烃源岩虽然 TOC 高、质量好,但厚度较小,且横向变化快,非均质性强,如地处沙南凹陷东次洼南部的 CFD23-1-1 井与西次洼东部的 CFD16-3-1 井沙一段好—优质烃源岩的发育程度差异显著,沙一二段沉积时沙垒田凸起为凹陷的主要物源供给区,CFD16-3-1 井处于扇三角洲前缘^[24],砂岩发育,而烃源岩发育状况较差。



图例 灰色泥岩 灰色含砂泥岩 黑色页岩 红色油页岩 黄色砂岩 黄色粉砂岩



图例 灰色泥岩 灰色灰质泥岩 灰色含砂泥岩 黄色砂岩 黄色钙质砂岩 黄色泥质砂岩 黄色粉砂岩

图 8 CFD23-1-1 井、CFD16-3-1 井烃源岩 TOC 测井预测图

Fig.8 The prediction of TOC of source rocks for Well CFD23-1-1 and Well CFD16-3-1

表 3 沙南凹陷烃源岩实测 TOC 值与测井计算 TOC 值误差对比分析
Table 3 Comparison of errors between measured TOC from coresand predicted TOC by different means

预测方法	层位	平均TOC/%		平均绝对误差*	平均相对误差**/%	数据点/个
		实测	测井计算			
四参数线性回归法	东三段	2.232	2.221	0.560	25.1	21
	沙一二段	2.599	2.606	0.898	34.6	13
	沙三段	2.535	2.519	0.579	22.8	21
改进的ΔlgR法	东三段	2.232	2.234	0.516	23.1	21
	沙一二段	2.599	2.580	1.048	40.3	13
	沙三段	2.535	2.545	0.493	19.4	21

*平均绝对误差=(∑|测井预测TOC-样品实测TOC|)/样品数; **平均相对误差=平均绝对误差/平均实测TOC。

表 4 CFD23-1-1 井、CFD16-3-1 井烃源岩评价结果统计
Table 4 Statistical table of source rock evaluation results of Well CFD23-1-1 and Well CFD16-3-1

井号	层位	不同级别烃源岩厚度/m					地层厚度/m	烃源岩厚度占地层厚度百分比/%
		差	中	好	优	合计		
CFD23-1-1	东三段	41	78	20	67	206	255	80.78
	沙一二段	0	12	20.5	86.5	119	133	89.47
	沙三段	0	12	76	168	256	283	90.46
CFD16-3-1	东三段	0	97.5	45	0	142.5	296	48.14
	沙一二段	12	37	0	0	49	170	28.82
	沙三段	49	59	148	96.5	352.5	551.5	63.92

4 结论

(1)对比分析应用多元线性回归法及改进的ΔlgR法分层段建立的沙南凹陷东三段、沙一二段、沙三段烃源岩 TOC 定量预测模型,发现多元线性回归法中 TOC 测井预测模型的拟合度随测井参数个数的增加而增加,以四参数线性回归法最佳;四参数线性回归法和改进的 ΔlgR 法均可有效地预测沙南凹陷单井湖相烃源岩 TOC 纵向分布,并以改进的 ΔlgR 法预测精度更高。

(2)应用改进的 ΔlgR 法对凹陷内 CFD23-1-1、CFD16-3-1 两口代表性单井的烃源岩进行评价,结果显示沙南凹陷烃源岩发育,勘探潜力大。沙三段为凹陷主力烃源岩系,具有烃源岩占比地层厚度高、TOC 高、好—优质烃源岩厚度大等特点;沙一二段烃源岩 TOC 高,质量好,但厚度较小,横向变化快。

参考文献 (References)

[1] 袁东山,王国斌,汤泽宁,等. 测井资料评价烃源岩方法及其进展[J].

石油天然气学报, 2009, 31 (4): 192-194. [YUAN Dongshan, WANG Guobin, TANG zening, et al. Methods for evaluating source rocks by well-logging data and its progress [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31 (4): 192-194.]

[2] 李延钧, 张烈辉, 冯媛媛, 等. 页岩有机碳含量测井评价方法及其应用[J]. 天然气地球科学, 2013, 24 (1): 169-175. [LI Yanjun, ZHANG Liehui, FENG Yuanyuan, et al. Logging evaluation method and its application for measuring the total organic carbon content in shale gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24 (1): 169-175.]

[3] 刘超. 测井资料评价烃源岩方法改进及作用[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011. [LIU Chao. Evaluating source rock using logging data—Improvement and application [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011.]

[4] 袁彩萍, 徐思煌, 薛罗. 珠江口盆地惠州凹陷主力烃源岩测井预测及评价[J]. 石油实验地质, 2014, 36 (1): 110-116. [YUAN Caiping, XU Sihuang, XUE Luo. Prediction and evaluation with logging of main source rocks in Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36 (1): 110-116.]

[5] 李松峰, 毕建霞, 曾正清, 等. 普光地区须家河组烃源岩地球物理预测[J]. 断块油气田, 2015, 22 (6): 705-710. [LI Songfeng, BI Jianxia, ZENG Zhengqing, et al. Geophysical prediction of source rock of Xujiahe Formation in Puguang area [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22 (6): 705-710.]

- [6] 黄薇, 张小莉, 李浩, 等. 鄂尔多斯盆地中南部延长组7段页岩有机碳含量解释模型[J]. *石油学报*, 2015, 36(12): 1508-1515. [HUANG Wei, ZHANG Xiaoli, LI Hao, et al. Interpretation model of organic carbon content of shale in Member 7 of Yanchang Formation, central-southern Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(12): 1508-1515.]
- [7] Passey Q R, Creaney S. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs [J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(12): 1777-1794.
- [8] 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.
- [9] 孟召平, 郭彦省, 刘尉. 页岩气储层有机碳含量与测井参数的关系及预测模型[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(2): 247-253. [MENG Zhaoping, GUO Yansheng, LIU Wei. Relationship between organic carbon content of shale gas reservoir and logging parameters and its prediction model [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(2): 247-253.]
- [10] 贺聪, 苏奥, 张明震, 等. 鄂尔多斯盆地延长组烃源岩有机碳含量测井预测方法优选及应用[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(4): 754-764. [HE Cong, SU Ao, ZHANG Mingzhen, et al. Optimal selection and application of prediction means for organic carbon content of source rocks based on logging data in Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(4): 754-764.]
- [11] Kamali M R, Mirshady A A. Total organic carbon content determined from well logs using delta log and neuro fuzzy techniques [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, 46(3): 141-148.
- [12] 陈丽祥, 周晓光, 付鑫, 等. 渤海湾盆地沙南凹陷东次洼孔店组生烃潜能评价[J]. *石油地质与工程*, 2018, 32(4): 42-45. [CHEN Lixiang, ZHOU Xiaoguang, FU Xin, et al. Hydrocarbon potential evaluation of Kongdian formation in Shannan sag, Bohaiwan basin [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2018, 32(4): 42-45.]
- [13] 李宏义, 吴克强, 刘丽芳, 等. 沙南凹陷构造演化的“跷跷板”效应与油气评价新认识[J]. *中国海上油气*, 2011, 23(4): 225-228. [LI Hongyi, WU Keqiang, LIU Lifang, et al. A "Seesaw" effect of structural evolution and some new cognition in hydrocarbon evaluation in Shanan sag, Bohai Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2011, 23(4): 225-228.]
- [14] 石文龙, 李慧勇, 茆利, 等. 沙南凹陷西洼成藏主控因素及有利勘探区带[J]. *断块油气田*, 2015, 22(2): 137-141. [SHI Wenlong, LI Huiyong, MAO Li, et al. Main controlling factors of hydrocarbon accumulation and favorable exploration zone in West Shanan Sag [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2015, 22(2): 137-141.]
- [15] 王贵文, 朱振宇, 朱广宇. 烃源岩测井识别与评价方法研究[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(4): 50-52. [WANG Guiwen, ZHU Zhenyu, ZHU Guangyu. Logging identification and evaluation of Cambrian-Ordovician source rocks in syncline of Tarim basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(4): 50-52.]
- [16] 杨涛涛, 范国章, 吕福亮, 等. 烃源岩测井响应特征及识别评价方法[J]. *天然气地球科学*, 2013, 4(2): 414-422. [YANG Taotao, FAN Guozhang, LV Fuliang, et al. The logging features and identification methods of source rock [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 4(2): 414-422.]
- [17] Herron S, Letendre L, Dufour M. Source rock evaluation using geochemical information from wireline logs and cores [J]. *AAPG Bulletin*, 1988, 72(8): 1007.
- [18] Luffel D L, Guidry F K, Curtis J B. Evaluation of Devonian shale with new core and log analysis-methods [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1992, 44(11): 1192-1197.
- [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. [LIU Xinying, DENG Hongwen, DI Yongxiang, et al. High-quality source rocks of Nantun formation in Wuerxun depression, the Hailaer basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(1): 68-73.]
- [20] 徐思煌, 朱义清. 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[J]. *石油实验地质*, 2010, 32(3): 290-295. [XU Sihuang, ZHU Yiqing. 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 [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(3): 290-295.]
- [21] 朱光有, 金强, 张林晔. 用测井信息获取烃源岩的地球化学参数研究[J]. *测井技术*, 2003, 27(2): 104-109. [ZHU Guangyou, JIN Qiang, ZHANG Linye. Using log information to analyse the geochemical characteristics of source rocks in Jiyang Depression [J]. *Well Logging Technology*, 2003, 27(2): 104-109.]
- [22] 张寒, 朱光有. 利用地震和测井信息预测和评价烃源岩——以渤海湾盆地富油凹陷为例[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(1): 55-59. [ZHANG Han, ZHU Guangyou. Using seismic and log information to predict and evaluate hydrocarbon source rocks: An example from rich oil depressions in Bohai Bay [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(1): 55-59.]
- [23] 侯读杰, 张善文, 肖建新, 等. 陆相断陷湖盆优质烃源岩形成机制与成藏贡献: 以济阳凹陷为例[M]. 北京: 地质出版社, 2008. [HOU Dujie, ZHANG Shanwen, XIAO Jianxin, et al. The Formation Mechanism of High Quality Source Rocks and Their Contribution to Hydrocarbon Accumulation in The Continental Faulted Lake Basin: A Case Study of Jiyang Depression [M]. Beijing: Geological Press, 2008.]
- [24] 李建平, 周心怀, 吕丁友. 渤海海域古近系三角洲沉积体系分布与演化规律[J]. *中国海上油气*, 2011, 23(5): 293-298. [LI Jianping, ZHOU Xinhui, LV Dingyou. Distribution and evolution of Paleogene delta systems in Bohai Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2011, 23(5): 293-298.]