

冯若琦,刘正伟,孟越,等. 烃源岩有机碳测井预测模型优选及应用:以鄂尔多斯盆地安塞地区延长组长9为例. 吉林大学学报(地球科学版),2024,54(2):688-700. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230004.

Feng Ruoqi, Liu Zhengwei, Meng Yue, et al. Optimization and Application of Organic Carbon Logging Prediction Models for Source Rocks: A Case Study of Chang 9 Member of Yanchang Formation in Ansai Area, Ordos Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54 (2): 688 - 700. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230004.

烃源岩有机碳测井预测模型优选及应用

——以鄂尔多斯盆地安塞地区延长组长9为例

冯若琦¹,刘正伟²,孟越²,蒋丽婷²,韩作为²,刘林玉¹

1.西北大学大陆动力学国家重点实验室/地质学系,西安 710069

2.中石油长庆油田分公司第一采油厂,西安 710018

摘要:总有机碳(TOC)质量分数是烃源岩评价的重要指标。为了对鄂尔多斯盆地东南部安塞地区延长组长9烃源岩有机碳进行测井评价,本文先立足于岩心分析实测 $w(\text{TOC})$ 资料,基于烃源岩对不同测井曲线的响应特征,运用多元回归模型、传统 $\Delta\log R$ 模型以及 $\Delta\log R$ 模型的改进型和广义型,分别建立烃源岩 $w(\text{TOC})$ 测井定量预测模型;然后将这几种模型加以分析和组合运用,从改进 $\Delta\log R$ 模型中提取拟合叠合系数应用到两种广义 $\Delta\log R$ 模型的计算当中,应用效果良好;最后对模型进行对比和优选,提出最适合研究区的烃源岩 $w(\text{TOC})$ 测井定量预测模型。结果表明:考虑密度的广义 $\Delta\log R$ 模型准确度最高,平均相对误差为7.78%;多元回归模型次之,平均相对误差为9.65%。二者均满足 $w(\text{TOC})$ 测井定量预测的精度要求。

关键词:测井预测方法; $\Delta\log R$;有机碳;烃源岩;多元回归;鄂尔多斯盆地;延长组

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230004

中图分类号:TE132

文献标志码:A

Optimization and Application of Organic Carbon Logging Prediction Models for Source Rocks: A Case Study of Chang 9 Member of Yanchang Formation in Ansai Area, Ordos Basin

Feng Ruoqi¹, Liu Zhengwei², Meng Yue², Jiang Liting², Han Zuowei², Liu Linyu¹

1. State Key Laboratory of Continental Dynamics / Department of Geology, Northwestern University, Xi'an 710069, China

2. No.1 Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

Abstract: Total organic carbon (TOC) mass fraction is an important index of source rocks evaluation. In order to evaluate the organic carbon of source rocks in Chang 9 Member of Yanchang Formation in Ansai area, southeast Ordos basin, firstly, this article establishes $w(\text{TOC})$ models for quantitative prediction of well logging by applying the multiple regression model, the traditional $\Delta\log R$

收稿日期:2023-01-10

作者简介:冯若琦(1998—),女,硕士研究生,主要从事油气田开发地质方面的研究,E-mail:312833690@qq.com

通信作者:刘林玉(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事油气地质与沉积地质学方面的研究,E-mail:nuwllly123@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41972129)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41972129)

model, the improved $\Delta \log R$ model and the generalized $\Delta \log R$ model, based on core analysis of measured $\omega(\text{TOC})$ data and the response characteristics of source rocks to different logging curves. Secondly, by analyzing and combining these models, the fitting superposition coefficient extracted from the improved $\Delta \log R$ model is applied to the calculation of two generalized $\Delta \log R$ models, and the application effect is good. Finally, the four models are compared and optimized, and the most suitable quantitative prediction model for source rocks in the study area is proposed. The results show that the generalized $\Delta \log R$ model considering the density factor has the highest accuracy, with an average relative error of 7.78%; The multiple regression model has the second highest accuracy, with an average relative error of 9.65%. Both of them can meet the accuracy requirements of quantitative prediction of $\omega(\text{TOC})$.

Key words: logging prediction method; $\Delta \log R$; organic carbon; source rocks; multiple regression; Ordos basin; Yanchang Formation

0 引言

安塞地区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡的中东偏南部,研究区内延长组长9油层顶部广泛发育李家畔页岩,表现为一套黑色—灰黑色的炭质泥岩、泥岩及粉砂质泥岩,厚度在13 m左右。前人研究发现,长9烃源岩具有生排烃的能力,是安塞地区长9油藏的重要生油源^[1-3]。因此,对研究区长9烃源岩开展测井评价,对长9油藏的储盖关系研究具有重要意义。

目前对安塞地区长9烃源岩的研究大多基于钻井取心的分析测试资料进行^[4-6],然而这种方式往往受到取心资料少的限制,难以形成区域上纵向和平面上烃源岩发育特征的认识。因此,为了深入认识安塞地区长9烃源岩纵向发育和平面分布的特征,尤其是定量评价烃源岩的有机质丰度和厚度,有必要对总有机碳(TOC)质量分数建立合适的计算模型,进行定量预测。测井资料相比于取心资料,具有丰富、便于获取且纵向上连续的特点,能够满足建立 $\omega(\text{TOC})$ 定量预测模型的资料需求。

前人也曾对安塞地区长9烃源岩的有机碳质量分数做过测井预测研究^[7-8],多采用一种或两种传统的预测模型,方式比较单一,准确度也有待提高。因此,本文将通过几种不同的测井预测方法分别对研究区烃源岩进行研究,包括:传统的经典模型,即多元回归模型与 $\Delta \log R$ 模型(R 为电阻率);近年提出的 $\Delta \log R$ 模型的变形,即两种广义 $\Delta \log R$ 模型。由于传统 $\Delta \log R$ 模型中叠合系数(K)的取值是基于海相、正常压实的烃源岩提出的经验值,不适用于安塞地区长9油层的陆相李家畔页岩烃源岩段,并且 K 值的选取影响到 $\Delta \log R$ 值的计算,直接影响 $\Delta \log R$ 模型及其多种改进型的准确性。因此,需要

对不同井段的测井数据进行归一化处理,并使 K 值成为一个常数,确定一个适合研究区的最优 K 值。本文从改进 $\Delta \log R$ 模型的拟合系数中提取最优 K 值,以提高模型的准确度。

本文将多元回归模型和 $\Delta \log R$ 模型及其改进型进行了对比和优选,最终得出误差最小、最适合研究区的烃源岩 $\omega(\text{TOC})$ 测井定量预测模型,并运用到安塞地区长9烃源岩的 $\omega(\text{TOC})$ 测井定量预测当中,对安塞地区长9烃源岩纵向上和平面上的分布特征取得了一定的认识。

1 烃源岩地球化学特征

1.1 有机质丰度

通过岩心分析测试,可以得出安塞地区延长组长9烃源岩的有机质丰度参数如下:研究区李家畔页岩的总有机碳质量分数平均为4.02%,氯仿沥青“A”质量分数平均为0.61%,氯仿沥青“A”中饱和烃与芳烃的总质量分数平均为 859.73×10^{-6} ,生烃潜量(游离烃 S_1 +热解烃 S_2)的平均值为10.79 mg/g。根据烃源岩有机质丰度评价标准(表1),判断安塞地区长9烃源岩属于好—最好的烃源岩。

1.2 有机质类型

通过对干酪根有机质显微组分进行评价,表2的实验结果显示:研究区长9烃源岩的岩性为黑色泥岩;干酪根的显微组分中腐泥组体积分数最高,平均为84.26%,镜质组、壳质组和惰质组体积分数依次降低,镜质组平均为12.07%,壳质组平均为2.53%,惰质组平均为1.13%;类型指数平均值为75.34,表明其母质主要来源于低等生物经强烈生物降解形成;根据其岩性和类型指数,认为研究区泥岩中干酪根类型主要为I—II₁型,有机质类型好。

1.3 有机质成熟度

依据岩心分析测试所得到的数据,研究区泥岩干酪根镜质体反射率(R_o)介于 0.84%~1.24%之间,平均值为 1.03%;研究区烃源岩最大热解峰温(T_{max})介于 429~477 °C 之间,平均为 454.9 °C。表明研究区长 9 烃源岩生油母质已达成熟阶段,开始进入生油高峰阶段,属于陆相的成熟烃源岩。

2 烃源岩测井响应特征

由于烃源岩中的固体有机质具有放射性高、密度小、声波传播速度小、导电性差、含氢量高的特点,使烃源岩在测井曲线上呈现出独特的响应特征^[9-13]。从图 1 中测井曲线的形态特征和表 3 中测井曲线的数值分布可以看出:安塞地区长 9 顶部的李家畔页岩作为烃源岩段,自然伽马平均值为 135.6 API,密度平均值为 2.46 g/cm³,声波时差平均值为 279.9 μ s/m,电阻率平均值为 49.9 $\Omega \cdot$ m,补偿中子平均值为 32.1%;而长 9 的普通泥岩段自然伽马平均值为 104.8 API,密度平均值为 2.60 g/cm³,声波时差平均值为 237.2 μ s/m,电阻率平均值为 28.6 $\Omega \cdot$ m,补偿中子平均值为 23.9%。烃源岩段相比非烃源岩段具有高自然伽马、高声波时差、中高电阻率、高补偿中子、低密度“四高一低”的测井曲线特征。

3 烃源岩 $w(\text{TOC})$ 测井定量预测模型

目前基于测井资料定量预测有机碳质量分数的方法主要有自然伽马能谱测井法、多元回归法、 $\Delta \log R$ 法等,由于研究区缺少自然伽马能谱测井资料,在安塞地区长 9 烃源岩的 $w(\text{TOC})$ 分析测试资料中,选取测井资料齐全、取样较连续、深度信息准确的 D214 井、D49 井、D81 井、Q207 井、Q208 井、G62 井、G65 井、D42 井、D48 井 9 口井共 70 个实测 $w(\text{TOC})$ 数据,通过多元回归法和 $\Delta \log R$ 法的三种改进型来建立 $w(\text{TOC})$ 定量预测模型,其中 52 个数据点用于建立模型,D48 井的 18 个数据点用于验证模型的准确性。建立模型的 8 口井分布在研究区的西南部到中部(图 2),基本覆盖李家畔烃源岩发育的地区。

3.1 多元回归模型

多元回归模型通过分析对烃源岩响应敏感的测井曲线,选取其中的多种曲线与实测 $w(\text{TOC})$ 拟合建立模型,并通过改变测井曲线的数量和类型,优选其中准确性最高的模型。本次研究选取研究区内测井资料齐全的自然伽马、密度、声波时差、电阻率、补偿中子测井曲线,分别与实测 $w(\text{TOC})$ 数据分析相关性(图 3),发现以上五种测井曲线中:与实测 $w(\text{TOC})$

表 1 陆相烃源岩有机质丰度评价指标(SY/T 5735—1995)

Table 1 Evaluation index of organic matter abundance of continental source rocks (SY/T 5735—1995)

类型	$w(\text{TOC})/\%$		$w(\text{氯仿沥青“A”})/\%$	$w(\text{总烃})/10^{-6}$	$w(S_1+S_2)/(mg/g)$
	咸水—超咸水	淡水—半咸水			
非生油岩	<0.2	<0.4	<0.015	<100	无
差	0.2~0.4	0.4~0.6	0.015~0.050	100~200	<2
中等	>0.4~0.6	>0.6~1.0	>0.050~0.100	>200~500	2~6
好	>0.6~0.8	>1.0~2.0	>0.100~0.200	>500~1 000	>6~20
最好	>0.8	>2.0	>0.200	>1 000	>20

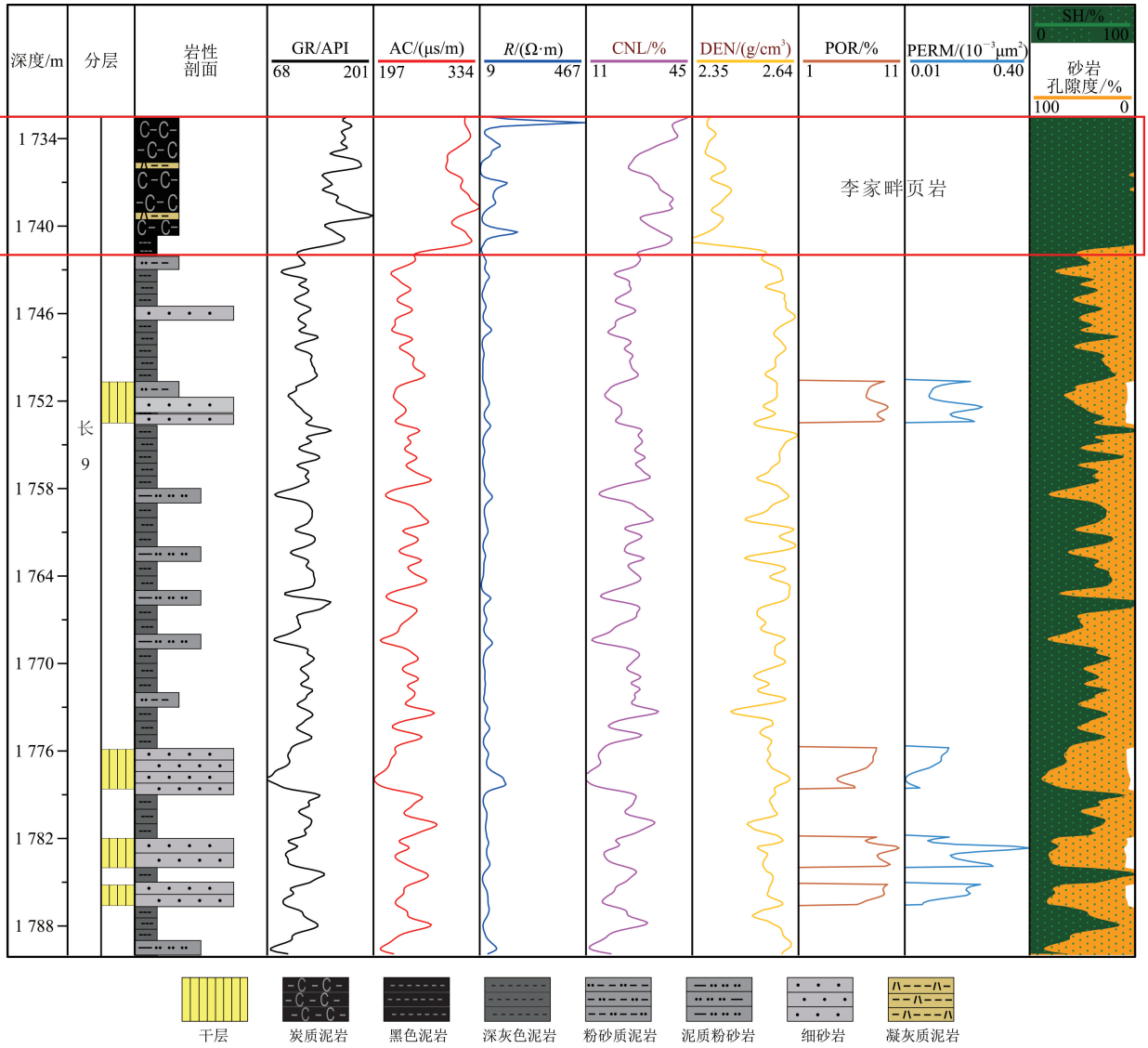
注:据脚注①修编。

表 2 研究区长 9 烃源岩干酪根有机质显微组分及类型指数

Table 2 Organic macerals and type indexes of kerogen from source rocks in Chang 9 Member in the study area

井名	岩性	$\varphi(\text{腐泥组})/\%$	$\varphi(\text{壳质组})/\%$	$\varphi(\text{镜质组})/\%$	$\varphi(\text{惰质组})/\%$	类型指数	干酪根类型
G65	黑色泥岩	92.59	6.58	0.82	0.00	95.26	I
G62	黑色泥岩	86.40	0.40	11.60	1.60	76.30	II ₁
G62	黑色泥岩	73.80	0.60	23.80	1.80	54.45	II ₁
平均值		84.26	2.53	12.07	1.13	75.34	I—II ₁

①陆相烃源岩地球化学评价方法:SY/T 5735—1995. 北京:中国石油天然气总公司,1995.



GR. 自然伽马; AC. 声波时差; R. 电阻率; CNL. 补偿中子; DEN. 密度; POR. 孔隙度; PERM. 渗透率; SH. 泥质体积分数。

图 1 Q136 井长 9 烃源岩测井响应及单井分布特征

Fig.1 Well logging response and single well distribution characteristics of Chang 9 hydrocarbon source rocks in Well Q136

表 3 安塞地区长 9 烃源岩测井曲线分布特征

Table 3 Distribution characteristics of logging curves of source rocks in Chang 9 Member in Ansai area

烃源岩		GR/API	DEN/(g/cm ³)	AC/(μs/m)	R/(Ω·m)	CNL/%
李家畔页岩	范围	95.1~193.9	2.31~2.65	216.6~338.8	25.2~101.7	17.8~46.9
	平均值	135.6	2.46	279.9	49.9	32.1
普通泥岩	范围	82.3~129.9	2.44~2.67	206.7~284.4	8.4~48.7	14.2~41.1
	平均值	104.8	2.60	237.2	28.6	23.9

相关性最好的是密度曲线,判定系数达到 0.816 1 (图 3b),高度相关;其次为声波时差曲线和补偿中子曲线,判定系数分别为 0.798 2(图 3c)和0.639 8(图 3e),为显著相关;自然伽马曲线与实测

ω (TOC)的判定系数为 0.205 2(图 3a),低度相关;电阻率曲线与实测 ω (TOC)的判定系数为 0.042 4(图 3d),微弱相关。

将上述测井曲线利用 SPSS 分析软件,以实测

$w(\text{TOC})$ 为因变量,以对应深度的测井参数为自变量,进行多元线性回归分析。考虑到在多元线性回归模型中,即使向模型中增加的变量没有统计学意义,判定系数仍然会增大,因此在评价模型优劣时,采用校正判定系数,并控制样本量在希望纳入模型自变量数的 20 倍以上,避免出现检验效能不足的问题。同时采用逐步回归法,每向模型中引入一个变量,都要考察原来在模型中的自变量是否还具有统计学意义,是否可以被剔除,从而得出比较可靠且简

洁的线性回归模型^[14]。

回归得出的二参数多元回归模型和三参数多元回归模型公式分别为:

$$w(\text{TOC}) = 0.051\Delta t + 0.019R - 11.3; \quad (1)$$

$$w(\text{TOC}) = 0.029\Delta t + 0.015R - 11.042\rho + 22.473. \quad (2)$$

式中: Δt 为声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$; R 为电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; ρ 为密度, g/cm^3 。

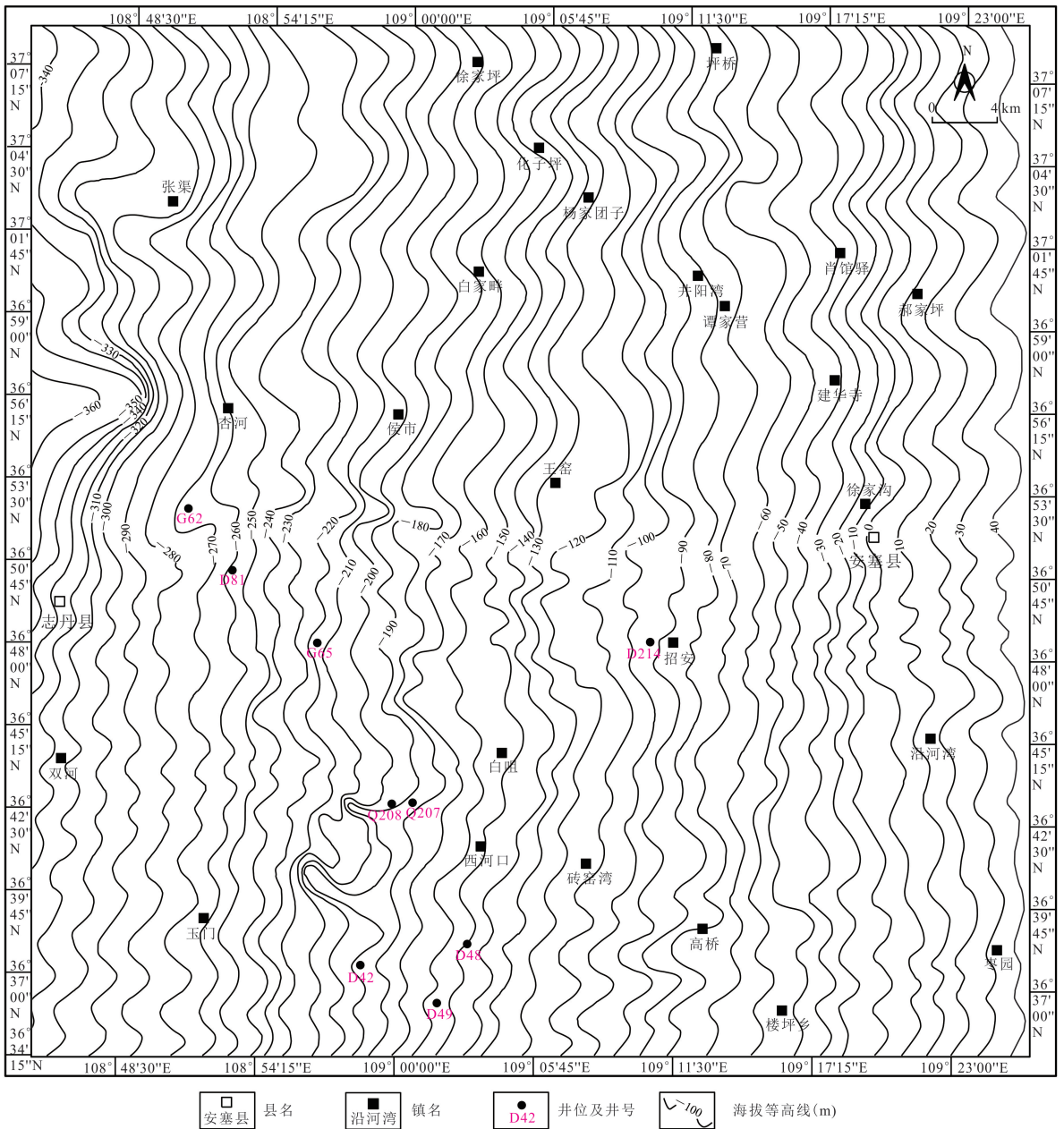
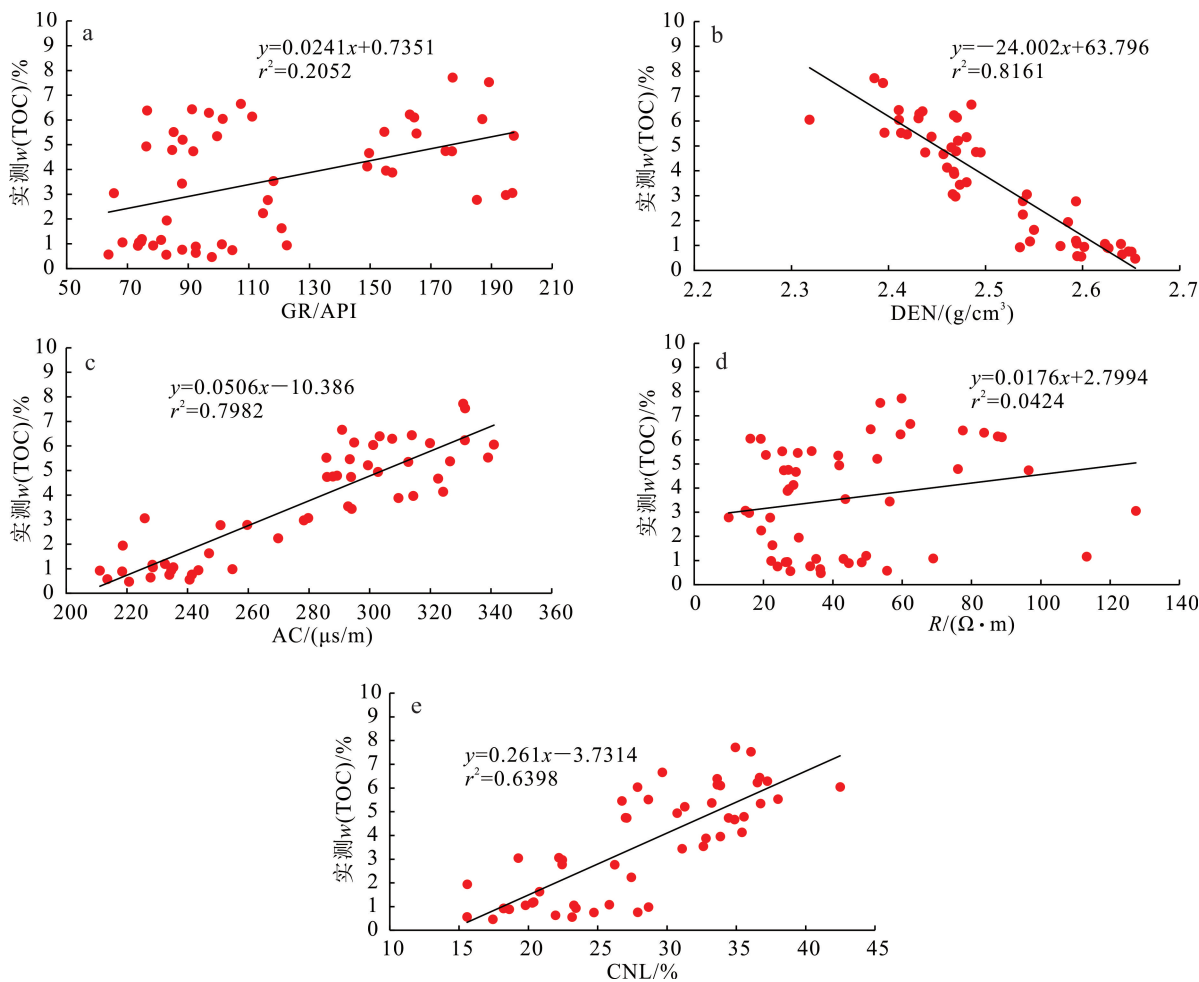


图 2 安塞地区长 9 地层顶面构造及实测 $w(\text{TOC})$ 井位分布图

Fig.2 Top structure of Chang 9 Member and distribution map of measured $w(\text{TOC})$ well location in Ansai area



r^2 . 判定系数。

图 3 安塞地区长 9 烃源岩自然伽马、密度、声波时差、电阻率、补偿中子与烃源岩实测 w(TOC) 相关性

Fig.3 Correlation between natural gamma, density, acoustic transit time, resistivity, compensated neutron and measured w(TOC) of source rocks in Chang 9 Member in Ansai area

3.2 Δlog R 模型及其改进型

3.2.1 传统 Δlog R 模型

传统的 Δlog R 方法由 Passey 等^[12]在 1990 年提出,这种方法通过将声波时差曲线与对数坐标的电阻率曲线相叠合,并且使电阻率的每个对数坐标单位对应 164 μs/m 的声波时差刻度,使非烃源岩的泥岩层段声波时差曲线与电阻率曲线重叠或平行,将其设为基线段;富含有机质的烃源岩段的两条曲线则分离产生幅度差,此幅度差即为 Δlog R。Δlog R 可通过如下公式计算:

$$\Delta \log R = \lg(R/R_{\text{基线}}) + K(\Delta t - \Delta t_{\text{基线}}) \quad (3)$$

其中,

$$K = \lg(R_{\text{max}}/R_{\text{min}}) / (\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{min}}) \quad (4)$$

式中: $R_{\text{基线}}$ 为基线段的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; $\Delta t_{\text{基线}}$ 为基线段的声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$; K 为声波时差与电阻率之间

的叠合系数,其物理意义是每个声波时差(1 μs/m)对应的电阻率对数坐标单位数,取 0.006 1; R_{max} 和 R_{min} 分别为电阻率的最大值和最小值, $\Omega \cdot \text{m}$; Δt_{max} 和 Δt_{min} 分别为声波时差的最大值和最小值, $\mu\text{s}/\text{m}$ 。传统的 Δlog R 方法计算 w(TOC) 的经验公式为

$$w(\text{TOC}) = (\Delta \log R) \times 10^{2.297 - 0.1688L} + w(\Delta \text{TOC}) \quad (5)$$

式中: L 为反映有机质成熟度的热变指数; $w(\Delta \text{TOC})$ 为有机碳质量分数背景值, %。由于在同一凹陷的一定深度范围内, L 一般可视为定值, $w(\Delta \text{TOC})$ 也可视为常数,因此式(5)可以修改为

$$w(\text{TOC}_{\text{拟合}}) = a \Delta \log R + b \quad (6)$$

式中, a 、 b 为拟合系数。

3.2.2 改进 Δlog R 模型

刘超^[15]在传统 Δlog R 模型基础上提出了改进

$\Delta \log R$ 模型, 设 K 取最优值(最优 K 值能使计算有机碳与实测有机碳之间的判定系数最大), 将式(3)代入式(5)中, 简化得出 $w(\text{TOC})$ 计算公式如下:

$$w(\text{TOC}_{\text{拟合}}) = a \lg R + b \Delta t + c. \quad (7)$$

式中, a 、 b 、 c 为拟合系数。简化后的模型原理与传统 $\Delta \log R$ 模型相同, 但无需确定热变指数与基线值, 降低了人为选取热变指数与基线的误差, 使计算更加客观、便捷^[15]。

通过读取实测 $w(\text{TOC})$ 对应深度的测井数据, 将式(6)和式(7)应用于研究区, 得到传统 $\Delta \log R$ 模型如下:

$$w(\text{TOC}_{\text{拟合}}) = 5.071 \Delta \log R + 2.256. \quad (8)$$

改进 $\Delta \log R$ 模型如下:

$$w(\text{TOC}_{\text{拟合}}) = 1.938 \lg R + 0.051 \Delta t - 13.464. \quad (9)$$

传统的 $\Delta \log R$ 方法依据电阻率和声波时差曲线对烃源岩的异常响应预测 $w(\text{TOC})$, 它的优势在于能够削弱孔隙度对 $w(\text{TOC})$ 测井响应的干扰; 不足之处在于它是基于海相正常压实地层提出的, 而陆相地层导电组分较高, 围岩电阻率更大, 并且在埋深大、压实强的较为致密的地层中, 声波时差曲线也趋于平直, 从而使两条曲线的幅度差不再明显, 因此对陆相深层烃源岩的 $w(\text{TOC})$ 计算精度明显下降^[16]。

3.2.3 拟合最优叠合系数的 $\Delta \log R$ 模型

在本次研究区中, 改进 $\Delta \log R$ 模型的应用效果明显优于传统 $\Delta \log R$ 模型, 这极有可能是因为传统 $\Delta \log R$ 模型中的叠合系数是基于海相、正常压实的烃源岩提出的经验值 0.006 1, 不适用于安塞地区长 9 的李家畔页岩烃源岩段。由于每口井的最优 K 值往往相差较大^[15, 17-18], 研究区内井位众多, 难以以为每口井单独确立最优 K 值, 因此需要对不同井段的测井数据进行归一化处理并使 K 成为一个常数, 确定一个最适合研究区的最优 K 值。

而改进 $\Delta \log R$ 模型就相当于设一个适用于本研究区的最优 K 值, 利用实测 $w(\text{TOC})$ 和测井参数拟合得出包含成熟度参数、叠合系数、有机碳背景值在内的系数和常数, 也就是式(7)当中的 a 、 b 、 c 。结合式(3)(5)(7), 可知改进 $\Delta \log R$ 模型中设的最优 K 值等于式(7)中系数 b 除以系数 a 的商。因此可以从式(9)中提取出本次研究区的最优 K 值为 0.026 3。

将最优 K 值 0.026 3 用于 $\Delta \log R$ 的计算, 重新得出研究区的 $\Delta \log R$ 模型如下:

$$w(\text{TOC}_{\text{拟合}}) = 1.926 \Delta \log R + 0.17. \quad (10)$$

在后续的两种广义 $\Delta \log R$ 模型当中, 一律采用

本研究区的最优 K 值 0.026 3 参与计算 $\Delta \log R$ 值。

3.2.4 广义 $\Delta \log R$ 模型

广义 $\Delta \log R$ 模型是胡慧婷等^[16]提出的, 针对传统的 $\Delta \log R$ 方法能消除孔隙度影响而不适应陆相深层烃源岩的特点, 利用烃源岩段中的有机质富含放射性而呈现高自然伽马的特点, 采用受压实影响较小的自然伽马曲线代替传统 $\Delta \log R$ 模型中的成熟度参数, 建立广义 $\Delta \log R$ 模型公式如下:

$$w(\text{TOC}) = (a\gamma + b) \Delta \log R + w(\Delta \text{TOC}). \quad (11)$$

式中: γ 为自然伽马, API; a 、 b 为拟合系数。当式(11)中的 $a = 0$ 时, 式(11)即为简化的 $\Delta \log R$ 模型, 与式(6)相同。这种方法能够同时满足深层和浅层的烃源岩 $w(\text{TOC})$ 预测需求。

将研究区的实测 $w(\text{TOC})$ 和测井参数代入式(11), 利用 SPSS 软件进行逐步回归, 拟合得出 $a = 0$, $b = 1.926$ 。此时 γ 的系数 $a = 0$, 与上文中研究区内自然伽马与 $w(\text{TOC})$ 相关性差的判断相印证, 此时得出的公式与式(10)的传统 $\Delta \log R$ 模型相同。

3.2.5 考虑密度的广义 $\Delta \log R$ 模型

考虑到烃源岩密度低于围岩的特征, 王祥等^[19]在广义 $\Delta \log R$ 模型的基础上引入了密度测井曲线。由于自然伽马的数值远大于密度的数值, 为了消除量纲的影响, 在建立模型时将自然伽马取自然对数值, 即

$$w(\text{TOC}) = (a \lg \gamma + b\rho + c) \Delta \log R + w(\Delta \text{TOC}). \quad (12)$$

式中, a 、 b 、 c 为拟合系数。当式(12)中的 a 、 b 为 0 时, 式(12)即为原始的 $\Delta \log R$ 方法^[19]。

将研究区的实测 $w(\text{TOC})$ 和测井参数代入式(12), 通过 SPSS 数据分析软件进行逐步回归, 拟合得出 a 、 b 、 c 、 $w(\Delta \text{TOC})$ 参数, 模型公式如下:

$$w(\text{TOC}_{\text{拟合}}) = (-3.252\rho + 9.705) \Delta \log R + 0.585. \quad (13)$$

$\lg \gamma$ 的系数 $a = 0$, 这与上文中自然伽马与 $w(\text{TOC})$ 在本研究区的低相关性互相印证。

4 模型优选及应用

4.1 模型优选

将以上几种模型的 $w(\text{TOC})$ 计算结果分别与研究区未参与建立模型的 D48 井实测 $w(\text{TOC})$ 数据相对比, 计算其平均绝对误差和平均相对误差, 验证结果如图 4、图 5、表 4 所示。

多元回归结果显示: 当模型中的自变量超过 3 个时, 自变量补偿中子与自然伽马不再具有统计学

意义; 在其余测井参数组合成的多元回归模型当中, Δt 、 ρ 、 R 三变量组成的模型准确性最高, 模型的校正判定系数达到 0.869, 平均绝对误差为 0.376%, 平均相对误差为 9.65%, 判定系数为 0.897 1(图 5a, 表 4)。

传统 $\Delta \log R$ 模型的校正判定系数为 0.595, 平均绝对误差为 0.751%, 平均相对误差为 18.92%, 判定系数为 0.801 2(图 5b, 表 4)。

改进 $\Delta \log R$ 模型的校正判定系数为 0.837, 平均绝对误差为 0.385%, 平均相对误差为 11.19%, 判定系数为 0.898 7(图 5c, 表 4)。

拟合最优叠合系数的 $\Delta \log R$ 模型和广义 $\Delta \log R$ 模型校正判定系数为 0.840, 平均绝对误差为 0.375%, 平均相对误差为 10.75%, 判定系数为 0.898 7(图 5d, 表 4)。

考虑密度的广义 $\Delta \log R$ 模型校正判定系数为

0.852, 平均绝对误差为 0.320%, 平均相对误差为 7.78%, 判定系数为 0.922 7(图 5e, 表 4)。

经对比, 传统 $\Delta \log R$ 模型的准确度最差, 其次为改进 $\Delta \log R$ 模型, 拟合最优叠合系数的 $\Delta \log R$ 模型准确度中等, 三参数多元回归模型的准确度较高, 考虑密度的广义 $\Delta \log R$ 模型判定系数为 0.922 7, 准确度最高。

因此, 考虑密度的广义 $\Delta \log R$ 模型和三参数多元回归模型都能达到精确计算 $w(\text{TOC})$ 的要求, 可以用于安塞地区长 9 烃源岩的 $w(\text{TOC})$ 测井定量预测。本次研究选取考虑密度的广义 $\Delta \log R$ 模型进行应用。

4.2 应用效果

对研究区长 9 烃源岩进行 $w(\text{TOC})$ 定量预测, 结果表明, 长 9 顶部的李家畔页岩中, $w(\text{TOC}) > 2.0\%$ 的最好烃源岩平均厚度为 11.9 m, $w(\text{TOC})$ 为

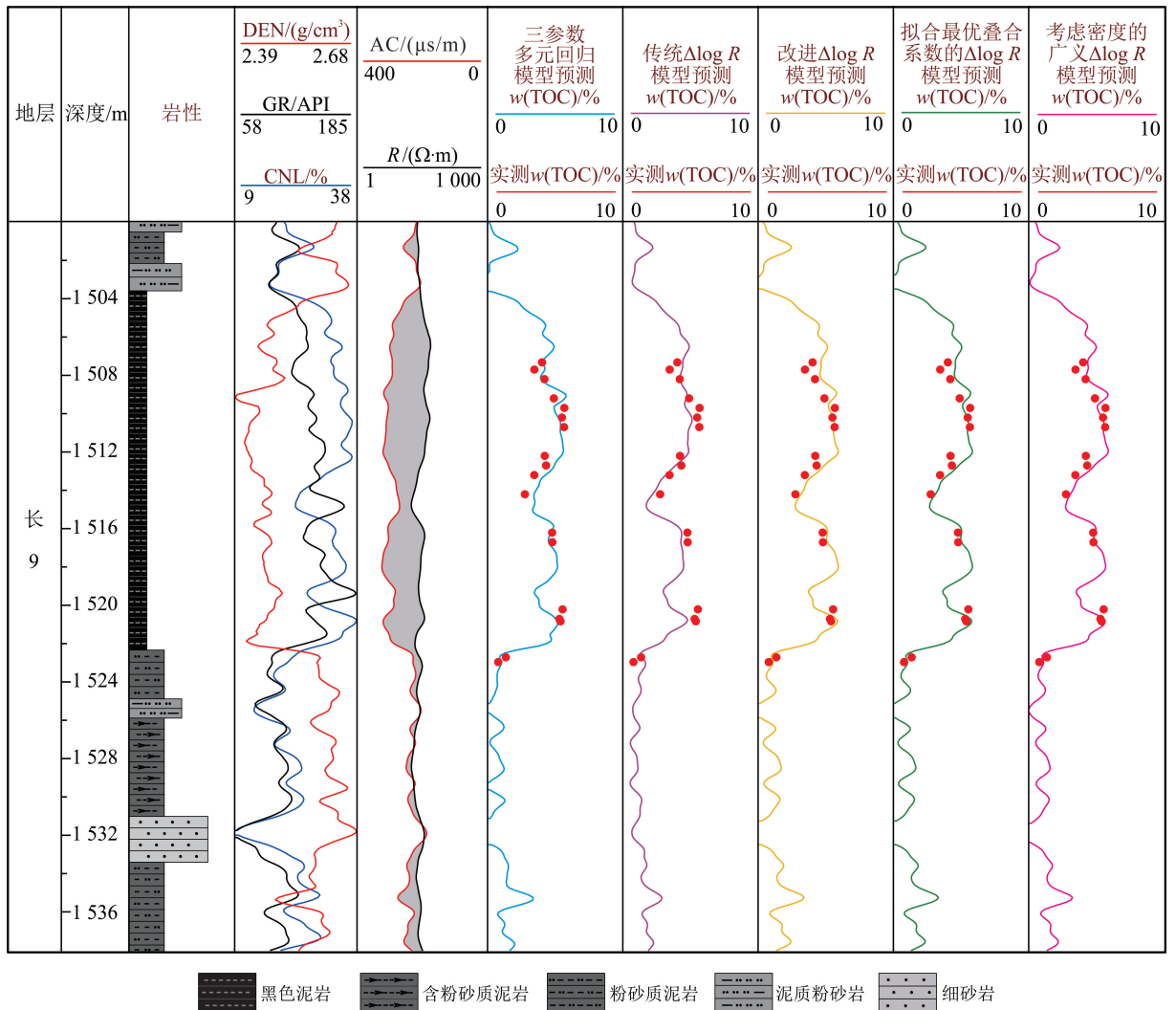
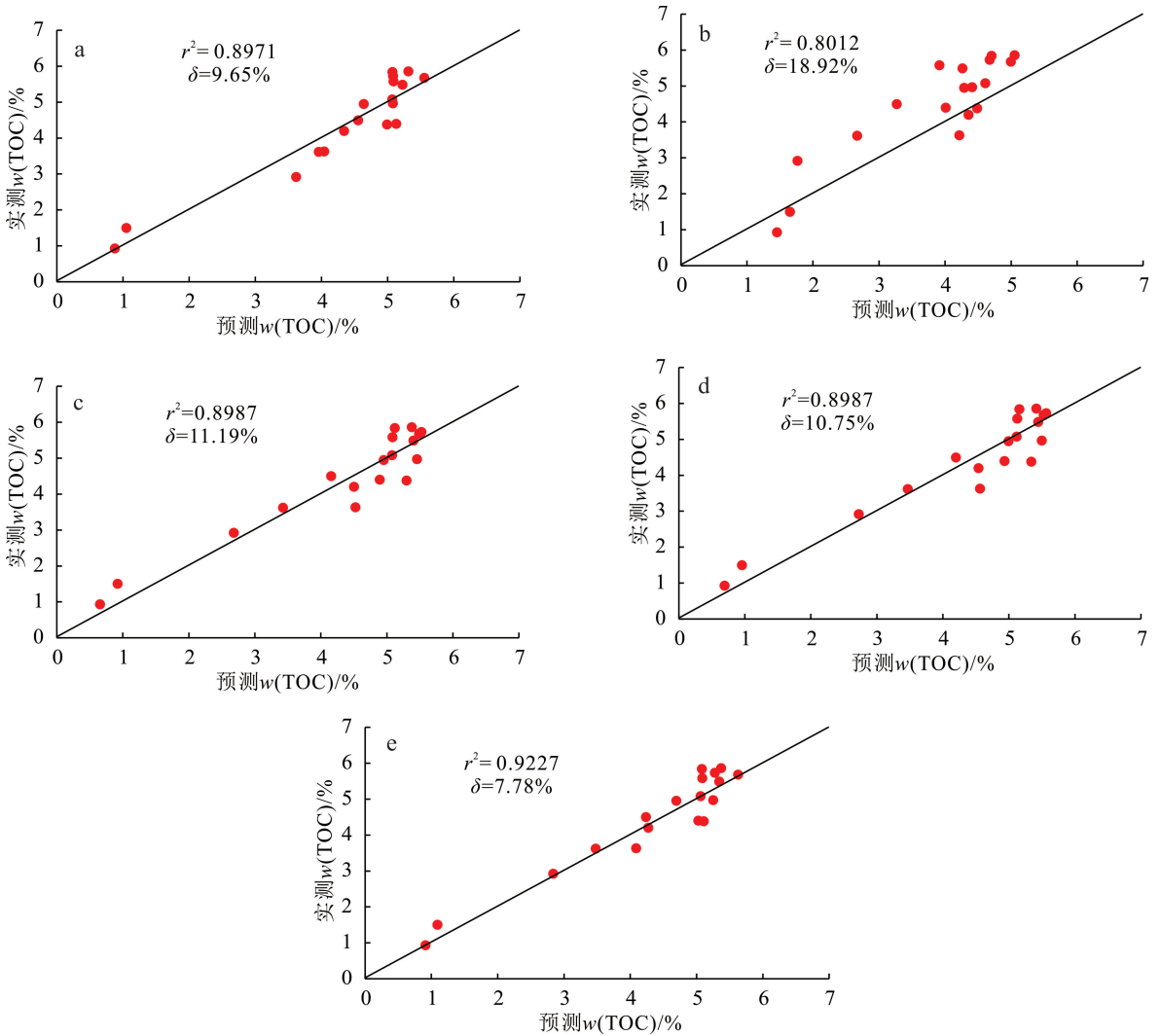


图 4 安塞地区 D48 井长 9 烃源岩 $w(\text{TOC})$ 测井预测模型优选

Fig.4 $w(\text{TOC})$ logging prediction models optimization of source rocks in Chang 9 Member of Well D48 in Ansai area



a. 三参数多元回归模型; b. 传统 $\Delta\log R$ 模型; c. 改进 $\Delta\log R$ 模型; d. 拟合最优叠合系数的 $\Delta\log R$ 模型及广义 $\Delta\log R$ 模型; e. 考虑密度的广义 $\Delta\log R$ 模型。 δ . 平均相对误差。

图 5 安塞地区长 9 烃源岩五种 $w(\text{TOC})$ 预测模型平均相对误差对比

Fig.5 Comparison of mean relative errors of five $w(\text{TOC})$ prediction models of source rocks in Chang 9 Member in Ansai area

表 4 安塞地区长 9 烃源岩 $w(\text{TOC})$ 测井预测模型优选

Table 4 Optimization of $w(\text{TOC})$ logging prediction model for source rocks of Chang 9 Member in Ansai area

模型类别	计算公式	r_{adj}^2	r^2	$\Delta/\%$	$\delta/\%$
二参数多元回归模型	(1)	0.842	0.899 6	0.379	11.18
三参数多元回归模型	(2)	0.869	0.897 1	0.376	9.65
传统 $\Delta\log R$ 模型	(8)	0.595	0.801 2	0.751	18.92
改进 $\Delta\log R$ 模型	(9)	0.837	0.898 7	0.385	11.19
拟合最优叠合系数的 $\Delta\log R$ 模型	(10)	0.840	0.898 7	0.375	10.75
广义 $\Delta\log R$ 模型	(10)	0.840	0.898 7	0.375	10.75
考虑密度的广义 $\Delta\log R$ 模型	(13)	0.852	0.922 7	0.320	7.78

注: r_{adj}^2 . 校正判定系数; Δ . 平均绝对误差。

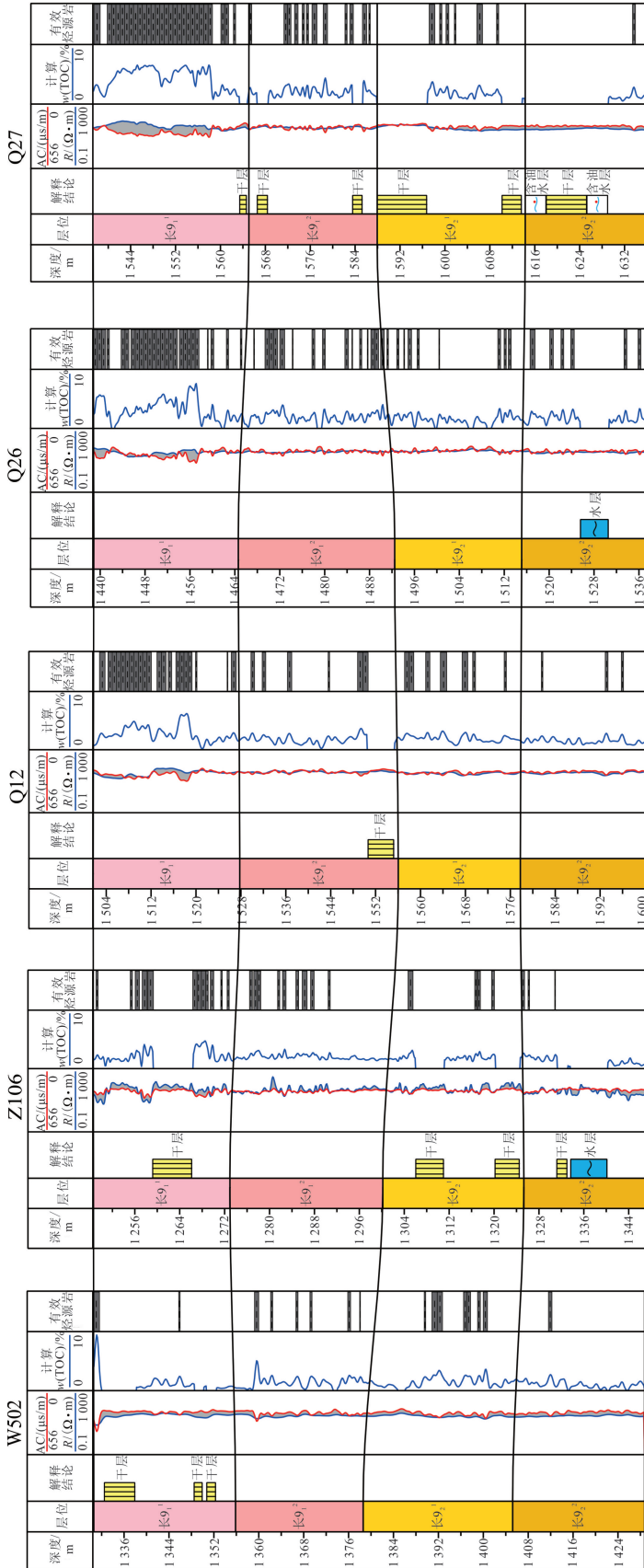


图 7 东北—南西方向 W502 井—Q27 井剖面烃源岩发育特征
 Fig.7 Source rocks development characteristics of Well W502 – Well Q27 profile in NE – SW direction

5 结论与展望

1)多元回归模型当中,选用声波时差、密度、电阻率三个参数建立的模型相关性最高,判定系数为0.897 1,平均相对误差为9.65%,满足 ω (TOC)测井定量预测的精度要求。

2)在 $\Delta\log R$ 模型及其改进型的运用当中,经验叠合系数值0.006 1不足以满足定量计算 ω (TOC)的精度要求,需要对研究区内不同井段的测井数据进行归一化处理,并使叠合系数成为一个常数以便计算。因此从改进 $\Delta\log R$ 模型的系数中提取由拟合得出的研究区最优叠合系数,应用于 $\Delta\log R$ 模型及其改进型的 $\Delta\log R$ 计算当中,既提高了精度,又省去了单为每口井确定叠合系数的繁琐工作和可能的误差。

3)在 $\Delta\log R$ 模型及其改进型中,传统 $\Delta\log R$ 模型的准确度最差,平均相对误差为18.92%;其次为改进 $\Delta\log R$ 模型,平均相对误差为11.19%,准确度较差;拟合最优叠合系数的 $\Delta\log R$ 模型和广义 $\Delta\log R$ 模型的平均相对误差为10.75%,准确度中等;考虑密度的广义 $\Delta\log R$ 模型平均相对误差为7.78%,准确度最高。考虑密度的广义 $\Delta\log R$ 模型满足 ω (TOC)测井定量预测的精度要求。

4)使用考虑密度的广义 $\Delta\log R$ 模型预测 ω (TOC)的结果显示,在安塞地区长9顶部的李家畔页岩中, ω (TOC) $>2.0\%$ 的最好烃源岩平均厚度为11.9 m, ω (TOC)为 $1.0\% \sim 2.0\%$ 的好烃源岩平均厚度为3.7 m, ω (TOC)为 $0.6\% \sim 1.0\%$ 的中等烃源岩平均厚度为1.8 m。烃源岩在东北部厚度分布最大,向西南部逐渐减薄。

5)受实验数据有限的影响,各 ω (TOC)预测模型的计算结果相差不是特别大,还存在探索和改进的空间。未来研究可以从增加实验数据入手,通过增加建立模型的数据量来完善模型,再对不同 ω (TOC)预测模型进行对比;或引入神经网络、地震反演等不依靠线性回归的方法进行比较,对定量预测 ω (TOC)的精度进行进一步的提升。

参考文献(References):

[1] 张文正,杨华,李善鹏. 鄂尔多斯盆地长₉湖相优质烃源岩成藏意义[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(5): 557-562, 568.
Zhang Wenzheng, Yang Hua, Li Shanpeng.

Hydrocarbon Accumulation Significance of Chang₉ High-Quality Lacustrine Source Rocks of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(5): 557-562, 568.

[2] 崔景伟,张忠义,刘建良,等. 鄂尔多斯盆地延长组多烃源层生排烃定量及成藏贡献厘定[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(10): 1514-1531.
Cui Jingwei, Zhang Zhongyi, Liu Jianliang, et al. Hydrocarbon Generation and Expulsion Quantification and Hydrocarbon Accumulation Contribution of Multiple Source Beds in Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(10): 1514-1531.

[3] 王晓琳,张小莉,王祥,等. 鄂尔多斯盆地枣园探区延长组长7段和长9段烃源岩评价及油源对比[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(3): 840-854.
Wang Xiaolin, Zhang Xiaoli, Wang Xiang, et al. Evaluation of Chang 7 and Chang 9 Source Rocks of Yanchang Formation in Zaoyuan South Exploration Area, Ordos Basin Analysis of Resource and Potential [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(3): 840-854.

[4] 赵举举. 鄂尔多斯盆地吴起-志丹地区延长组下组合烃源岩特征及油源分析[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2018.
Zhao Jujun. Characteristics of Source Rocks and Oil Source Analysis in Yanchang Group of Wuqi-Zhidan Area in Ordos Basin [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.

[5] 白玉彬,赵靖舟,高振东,等. 鄂尔多斯盆地杏子川油田长9烃源岩特征及油气勘探意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(4): 38-45.
Bai Yubin, Zhao Jingzhou, Gao Zhendong, et al. Characteristics of Chang 9 Member Source Rocks and Its Significance of Hydrocarbon Exploration in Xingzichuan Oilfield, Ordos Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2013, 37(4): 38-45.

[6] 师磊,卢双舫,李吉君,等. 鄂尔多斯盆地长9烃源岩评价[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(20): 4756-4761.
Shi Lei, Lu Shuangfang, Li Jijun, et al. Evaluation of Chang 9 Source Rocks in Ordos Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(20): 4756-4761.

[7] 安鑫胜. 鄂尔多斯盆地中南部长9烃源岩石油资源量评价[D]. 西安:西安石油大学, 2019.
An Xinsheng. Oil Resource Evaluation of Chang 9

- Hydrocarbon Source Rock in South Central Ordos Basin [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019.
- [8] 李吉君, 吴慧, 卢双舫, 等. 鄂尔多斯盆地长 9 烃源岩发育与排烃效率[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(增刊 1): 26-32.
- Li Jijun, Wu Hui, Lu Shuangfang, et al. Development and Hydrocarbon Expulsion Efficiency of Source Rock in 9th Member of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42 (Sup. 1): 26-32.
- [9] 王方雄, 侯英姿, 夏季. 烃源岩测井评价新进展[J]. 测井技术, 2002, 26(2): 89-93, 176.
- Wang Fangxiong, Hou Yingzi, Xia Ji. New Advances in Hydrocarbon Source Rocks Evaluation[J]. Logging Technology, 2002, 26(2): 89-93, 176.
- [10] Schmoker J W. Determination of Organic-Matter Content of Appalachian Devonian Shales from Gamma-Ray Logs[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(7): 1285-1298.
- [11] 郭泽清, 孙平, 刘卫红. 利用 $\Delta \log R$ 技术计算柴达木盆地三湖地区第四系有机碳[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(2): 626-633.
- Guo Zeqing, Sun Ping, Liu Weihong. The Carbon Calculation by $\Delta \log R$ Technology in Sanhu Area of Qaidam Basin[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(2): 626-633.
- [12] Passey Q R, Creaney S, Kulla J B, et al. A Practical Model for Organic Richness from Porosity and Resistivity Logs [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(5): 1777-1794.
- [13] 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, 300.
- 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 and Experiment, 2010, 32(3): 290-295, 300.
- [14] 张文彤, 董伟. SPSS20.0 统计分析高级教程 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- Zhang Wentong, Dong Wei. SPSS20.0 Advanced Course in Statistical Analysis [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2013.
- [15] 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.
- [16] 胡慧婷, 苏瑞, 刘超, 等. 广义 $\Delta \log R$ 技术预测陆相深层烃源岩有机碳含量方法及其应用[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(1): 149-155.
- Hu Huiting, Su Rui, Liu Chao, et al. The Method and Application of Using Generalized $\Delta \log R$ Technology to Predict the Organic Carbon Content of Continental Deep Source Rocks [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(1): 149-155.
- [17] 陈海峰, 王凤启, 王民, 等. 基于变系数 $\Delta \log R$ 技术的烃源岩 TOC 精细评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(4): 54-64.
- Chen Haifeng, Wang Fengqi, Wang Min, et al. TOC Evaluation Using Variable-Coefficient $\Delta \log R$ Model [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2017, 41(4): 54-64.
- [18] 黄胜, 刘文华, 代红霞, 等. 基于变系数 $\Delta \log R$ 技术的陆相烃源岩总有机碳含量测井评价[J]. 测井技术, 2019, 43(5): 519-523.
- Huang Sheng, Liu Wenhua, Dai Hongxia, et al. Log Evaluation on the TOC of Continental Source Rocks Based on Variable Coefficient $\Delta \log R$ Model [J]. Well Logging Technology, 2019, 43(5): 519-523.
- [19] 王祥, 马劲风, 张新涛, 等. 一种考虑密度因素的广义 $\Delta \log R$ 法预测总有机碳含量: 以渤中凹陷西南部陆相深层烃源岩为例[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(4): 1471-1480.
- Wang Xiang, Ma Jinfeng, Zhang Xintao, et al. Prediction of Total Organic Carbon Content by a Generalized $\Delta \log R$ Method Considering Density Factors: Illustrated by the Example of Deep Continental Source Rocks in the Southwestern Part of the Bozhong Sag [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(4): 1471-1480.
- [20] 饶丹, 章平澜, 邱蕴玉. 有效烃源岩下限指标初探[J]. 石油实验地质, 2003, 25(增刊 1): 578-581.
- Rao Dan, Zhang Pinglan, Qiu Yunyu. Preliminary Study on Lower Limit Index of Effective Source Rocks [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2003, 25(Sup. 1): 578-581.