

优化的 $\Delta\log R$ 技术及其在中—深层烃源岩 总有机碳含量预测中的应用

边雷博,柳广弟*,孙明亮,杨岱林,万伟超,张毅颖
(中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249)

摘要:针对利用 $\Delta\log R$ 技术预测中—深层烃源岩总有机碳含量效果较差的问题,依据一一映射原理,利用归一化方法对 $\Delta\log R$ 技术进行优化,并引入自然伽马参数,建立优化的总有机碳含量预测模型。该模型不仅可预测中—深层烃源岩有机碳含量,也可预测浅层烃源岩总有机碳含量。引入自然伽马参数,有助于减少非烃源岩高阻段对总有机碳含量预测的影响,增强预测模型的抗干扰能力;将所有参数归一化,不仅消除测井仪器不同等因素带来的误差,也降低运算过程中数据的复杂程度。结合渤海湾盆地东濮凹陷西南部洼陷勘探程度较低,使用测井仪器种类较多和沙三段中亚段烃源岩埋藏较深、声波时差较低的勘探现状,分别利用 $\Delta\log R$ 技术和优化的 $\Delta\log R$ 技术对烃源岩总有机碳含量进行预测。相比 $\Delta\log R$ 技术,优化模型相关系数的平方提高了0.371,估计标准误差降低了0.139,表明优化的 $\Delta\log R$ 技术能够较好地预测中—深层烃源岩总有机碳含量的变化趋势。另外,利用优化模型预测东濮凹陷西南部洼陷总有机碳含量分布,结果表明研究区北部为有利烃源岩发育区。

关键词:优化的 $\Delta\log R$ 技术 烃源岩 总有机碳含量 西南部洼陷 东濮凹陷

中图分类号:TE122.1⁺13

文献标识码:A

Improved $\Delta\log R$ technique and its application to predicting total organic carbon of source rocks with middle and deep burial depth

BIAN Leibo, LIU Guangdi, SUN Mingliang, YANG Dailin, WAN Weichao, ZHANG Yiyiing

(College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China)

Abstract: An $\Delta\log R$ technique has a poor effect on predicting total organic carbon of source rocks with middle and deep burial depth. Aiming at this problem, on the basis of the normalization principle and one-to-one mapping, the $\Delta\log R$ technique was modified and natural gamma ray was introduced to build a model for total organic carbon prediction, by which the total organic carbon can be predicted not only in the middle and deep source rocks but also in the shallow. The introduced natural gamma data helps to reduce the impact of high resistivity of non-hydrocarbon source rocks on total organic carbon estimation and improve anti-interference ability of the prediction model. All data are normalized to solve the errors caused by different well logging instruments or standards, which also helps to reduce the complexity of data in the process. Combined with the exploration situation of southwest subsag in Dongpu Sag, including poor exploration, application of many well logging instruments, source rock buried deeply in the middle of the third member of Shahejie Formation and low acoustic value, the $\Delta\log R$ and the improved $\Delta\log R$ techniques were applied respectively to predict total organic carbon. Compared with the $\Delta\log R$ technique, the square of correlation coefficient is increased by 0.371 and the standard deviation is decreased by 0.139. It indicates that the improved $\Delta\log R$ technique could be well applied to predicting total organic carbon of source rocks with middle and deep burial depth. In addition, the improved $\Delta\log R$ technique was applied to predicting total organic carbon of source rocks in southwest subsag of Dongpu Sag, and the result indicates that the north is a po-

收稿日期:2018-04-04。

作者简介:边雷博(1994—),男,陕西咸阳市人,在读硕士研究生,从事油气成藏机理及富集规律研究。联系电话:15210063997, E-mail:leibo19940528@foxmail.com。

*通讯作者:柳广弟(1961—),男,天津蓟县人,教授,博士。联系电话:(010)89734471, E-mail:lged@cup.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目“致密砂岩微米-纳米孔喉系统石油充注的有效性及其成藏效应”(41472114)。

tential area for petroleum exploration.

Key words: improved $\Delta\log R$ technique; source rocks; total organic carbon; southwest subsag; Dongpu Sag

烃源岩是油气生成的基础,总有机碳含量是评价烃源岩的重要指标。由于取心数量和分析化验成本限制,导致无法获取连续的总有机碳含量测定值,所以通常利用在纵向上具有较高精度的测井参数对总有机碳含量进行预测。目前预测总有机碳含量的手段主要有多元回归法、神经网络法、 $\Delta\log R$ 技术以及核磁共振测井和地球化学测井等^[1-19]。虽然核磁共振测井和地球化学测井是目前最精确的测井预测方法,但由于其测井成本较高,未被广泛应用^[1-2]。神经网络法虽然在非结构性计算问题方面优势较大,但却难以用表达式表示出来,也未被广泛应用^[3-5]。目前应用较为广泛的预测手段是多元回归法^[6-9]和 $\Delta\log R$ 技术^[10-13]。由于多元回归法仅基于统计学原理,而 $\Delta\log R$ 技术需要一定的地质基础,因此在资料较少的勘探开发初期, $\Delta\log R$ 技术应用更为广泛。在实际应用中,虽然中外学者^[14-19]根据实际地质情况建立了不同的 $\Delta\log R$ 技术改进模型,但是各种改进模型均不能较好地预测勘探程度较低且使用测井仪器种类较多地区的中—深层烃源岩的总有机碳含量。为此,笔者依据一一映射原理,利用归一化方法,对 $\Delta\log R$ 技术进行改进,并在此基础上引入自然伽马参数,建立了优化的 $\Delta\log R$ 技术。

1 $\Delta\log R$ 技术原理及不足

1.1 $\Delta\log R$ 技术原理

$\Delta\log R$ 技术是将声波时差和电阻率的对数反向重叠来预测总有机碳含量。该技术原理为:一般情况下,泥岩的声波时差随埋深增加而减小,但由于烃源岩发育段富含有机质,其声波时差会增加^[20];另外,由于富含有机质和油气,烃源岩发育段的电阻率会增大。因此,2条测井曲线同时增大时分开的幅度($\Delta\log R$)可以表征烃源岩中有机质丰度。总有机碳含量是应用最为广泛的有机质丰度指标,可以利用 $\Delta\log R$ 预测总有机碳含量。在应用 $\Delta\log R$ 技术时,首先使每2个电阻率的对数刻度对应声波时差为328 $\mu\text{s}/\text{m}$;其次利用自然电位和自然伽马曲线识别泥岩段,在此基础上调整声波时差与电阻率的对数刻度,使其在非烃源岩的泥岩段重叠,再依据该段曲线值确定出2条测井曲线的基线值。此时2条曲线均增加分开的幅度,该幅度即为 $\Delta\log R$ (图1)。

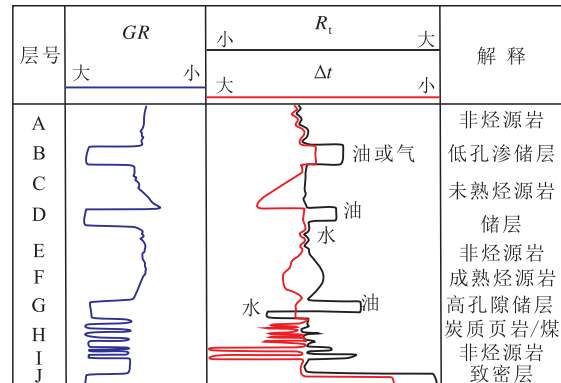


图1 $\Delta\log R$ 技术识别有机质示意(据文献[10]修改)

Fig.1 Sketch map of organic matter identification by the $\Delta\log R$ technique (modified from PASSEY^[10])

基于 $\Delta\log R$ 技术的PASSEY预测模型^[10]为

$$\Delta\log R = \lg\left(\frac{R_t}{R_{t\text{基值}}}\right) + 0.0061(\Delta t - \Delta t_{\text{基值}}) \quad (1)$$

由于总有机碳含量(TOC)是 $\Delta\log R$ 和成熟度指数的函数,因此总有机碳含量测井预测模型为

$$\text{TOC} = \Delta\log R 10^{(2.297 - 0.168 \text{ SLOM})} \quad (2)$$

由于在一定深度范围内成熟度指数变化不大,可将式(2)修改为

$$\text{TOC} = A\Delta\log R + B \quad (3)$$

1.2 $\Delta\log R$ 技术的不足

$\Delta\log R$ 技术中叠合系数为0.0061是PASSEY等在研究Archie公式和Wyllie时深转换公式基础上,结合大量实际经验得出的^[10],该叠合系数仅适用于声波时差为260~460 $\mu\text{s}/\text{m}$ 的碎屑岩和碳酸盐岩烃源岩地层。因为中—浅层烃源岩声波时差多为260~460 $\mu\text{s}/\text{m}$,故通常认为 $\Delta\log R$ 技术在中—浅层应用效果较好。中—深层烃源岩由于上覆地层压力较大,导致其声波时差较小。当声波时差较小时,应用 $\Delta\log R$ 技术预测总有机碳含量效果较差。为此,部分学者提出了不同的确定叠合系数的方法,如WANG等提出对 Δt 与 $\lg R$ 进行求导,可以准确确定不同声波时差对应的叠合系数^[17],但该方法需要通过统计大量烃源岩样品中的矿物组成来估计岩石骨架的声波时差,当烃源岩地层非均质性较强时,该方法误差较大;通过将 Δt 与 $\lg R$ 之间非线性相关性近似看成线性相关,假设叠合系数为

$\frac{\lg\frac{R_{t\text{max}}}{R_{t\text{min}}}}{\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{min}}}$,该方法在声波时差较大且变化范围较

小时,应用效果较好(图2)。

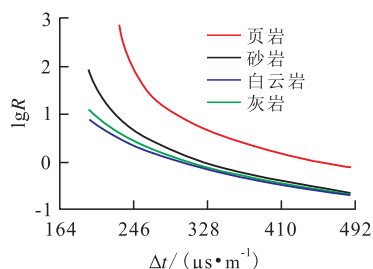


图2 不同岩性 Δt 与 $\lg R$ 的相关关系(据文献[10]修改)

Fig.2 Relationship between Δt and $\lg R$ for different lithology (modified from PASSEY^[10])

2 优化的 $\Delta \log R$ 技术

为提高对中—深层烃源岩有机碳含量的预测效果,依据一一映射原理,将不同范围的声波时差与260~460 $\mu\text{s}/\text{m}$ 声波时差一一映射,将不同范围的电阻率与声波时差为260~460 $\mu\text{s}/\text{m}$ 时对应的电阻率一一映射,从而建立未知叠合系数与声波时差为260~460 $\mu\text{s}/\text{m}$ 时对应的最佳叠合系数之间的映射关系,进而简化确定不同范围声波时差对应的最佳叠合系数。在勘探开发过程中,考虑到测井仪器类型不同等因素对总有机碳含量预测造成的误差,利用归一化方法,将声波时差和电阻率参数归一化。

根据以上原理,将式(1)修改为

$$\Delta \log R = \frac{\lg \frac{R_i}{R_{t_{\text{基值}}}}}{\lg \frac{R_{t_{\text{max}}}}{R_{t_{\text{min}}}}} + 0.006 1M \frac{(\Delta t - \Delta t_{\text{基值}})}{(\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{min}})} \quad (4)$$

其中

$$M = \frac{\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{min}}}{\lg \frac{R_{t_{\text{max}}}}{R_{t_{\text{min}}}}} \quad (5)$$

据图2,令 $\Delta t_{\text{max}} = 460 \mu\text{s}/\text{m}$, $\Delta t_{\text{min}} = 260 \mu\text{s}/\text{m}$, 则 $\lg \frac{R_{t_{\text{max}}}}{R_{t_{\text{min}}}} = 1.05$, 将其代入式(5)得到 M , 再将 M 代入式(4)可得

$$\Delta \log R = \frac{\lg \frac{R_i}{R_{t_{\text{基值}}}}}{\lg \frac{R_{t_{\text{max}}}}{R_{t_{\text{min}}}}} + 1.16 \frac{(\Delta t - \Delta t_{\text{基值}})}{(\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{min}})} \quad (6)$$

自然伽马曲线主要记录地层中含铀、钍和钾等元素的放射性强度,大量数据表明放射强度和总有机碳含量之间有良好的相关性^[21-22]。因此在式(6)中引入自然伽马参数,有利于提高总有机碳含量的预测精度。为避免测井仪器不同等因素带来的误差,将自然伽马参数归一化,可得到优化的总有机碳含量预测模型

$$TOC = D \Delta \log R + E \frac{q - q_{\text{min}}}{q_{\text{max}} - q_{\text{min}}} \pm F \quad (7)$$

优化的 $\Delta \log R$ 技术具有以下优点:基于一一映射原理,应用归一化方法,将不同范围的声波时差一一映射至260~460 $\mu\text{s}/\text{m}$, 扩大了公式的适用范围;引入自然伽马参数,不仅减少了非烃源岩高阻段对总有机碳含量预测的影响,也增强了预测模型的抗干扰能力,提高了预测精度;将声波时差、电阻率和自然伽马等参数归一化,不仅消除了因测井仪器不同等因素带来的误差,也降低了运算过程中数据的复杂程度。

3 应用实例

以渤海湾盆地东濮凹陷西南部洼陷沙河街组沙三段中亚段烃源岩为例,分别利用 $\Delta \log R$ 技术和优化的 $\Delta \log R$ 技术预测该段烃源岩的总有机碳含量,并通过比较实测和预测总有机碳含量,验证了优化的 $\Delta \log R$ 技术预测中—深层烃源岩总有机碳含量的可行性。

3.1 区域地质背景

西南部洼陷位于东濮凹陷西南部,是凹陷内勘探程度最低的地区。沙河街组经历初始断陷期、裂陷期、萎缩期和裂陷消退期的构造演化阶段^[23-24]。沙河街组自下而上可以分为沙三段、沙二段和沙一段,其中沙三段可以细分为沙三段上、中和下3个亚段。前人研究认为,沙三段中亚段是有效的烃源岩^[24-25],岩性以深灰色、灰黑色泥岩和泥页岩为主,有机质丰度为中等—好,有机质类型为II—III型,沉积环境为还原—弱氧化环境,处于成熟—高成熟阶段。

充足的有机质供给是油气形成的物质基础,是决定岩石生烃能力的主要因素^[26],而总有机碳含量是评价有机质丰度的主要指标,因此准确预测总有机碳含量尤为重要。目前西南部洼陷沙三段中亚段烃源岩总有机碳含量预测主要存在以下难点:首先,钻遇沙三段中亚段的井较少且分散,总有机碳含量数据不多;其次,研究区勘探开发时间较长,使用测井仪器类型较多,利用 $\Delta \log R$ 技术无法建立全区总有机碳含量的预测模型;最后,沙三段中亚段烃源岩埋深普遍大于4000 m,声波时差较小,为197~260 $\mu\text{s}/\text{m}$,属于陆相强压实烃源岩,利用 $\Delta \log R$ 技术较难建立准确的预测模型。

3.2 总有机碳含量预测模型的建立及对比

为建立较为准确的总有机碳含量预测模型,通

常选取总有机碳含量数据较多的井作为标准井或利用若干井的总有机碳含量数据联合建立预测模型。结合研究区的勘探开发程度,选取西南部洼陷北部赵庄地区(Z4-3井)、中部方里集地区(PS8井和F4井)和南部梁寨地区(PS6井)为重点研究井,以总有机碳含量数据较多的PS8井为标准井,F4井、PS6井和Z4-3井为检验井,分别利用 $\Delta\log R$ 技术和优化的 $\Delta\log R$ 技术对西南部洼陷沙三段中亚段烃源岩总有机碳含量进行预测及对比。

利用 $\Delta\log R$ 技术对PS8井建立总有机碳含量预测模型,渤海湾盆地东濮凹陷西南部洼陷沙河街组 $R_{\text{基值}}$, $\Delta t_{\text{基值}}$ 取值分别为 $3.13 \Omega \cdot \text{m}$, $237.8 \mu\text{s}/\text{m}$, 代入式(1)得

$$\Delta \log R = \lg \frac{R_t}{3.13} + 0.0061(\Delta t - 237.8) \quad (8)$$

利用 SPSS Statistics21.0 统计软件,对 $\Delta\log R$ 和 TOC 进行线性相关分析确定 A 和 B 取值分别为 3.33 和 0.12,代入式(3)得

$$TOC = 3.33\Delta \log R + 0.12 \quad (9)$$

另外,利用优化的 $\Delta\log R$ 技术对PS8井建立总有机碳含量预测模型,依据研究区实际地质情况,对式(6)和式(7)相关参数 $\lg(R_{\text{tmax}}/R_{\text{tmin}})$, $\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{min}}$, $q_{\text{max}} - q_{\text{min}}$, q_{min} 分别取值为 0.58, 59.0 $\mu\text{s}/\text{m}$, 83.5 API, 46.0 API。 $R_{\text{基值}}$, $\Delta t_{\text{基值}}$ 取值与式(8)相同。

将相关参数代入式(6)得优化的 $\Delta\log R$ 技术预测模型为

$$\Delta \log R = \frac{\lg \frac{R_t}{3.13}}{0.58} + \frac{1.16(\Delta t - 237.8)}{59.0} \quad (10)$$

同理,利用 SPSS Statistics21.0 统计软件,对 $\Delta\log R$, q 和 TOC 进行相关分析确定 D, E 和 F 的取值分别为 1.73, 0.95 和 -0.46,将其代入式(7),则优化的总有机碳含量预测模型为

$$TOC = 1.73\Delta \log R + \frac{0.95(q - 46.0)}{83.5} - 0.46 \quad (11)$$

相比 $\Delta\log R$ 技术,优化的 $\Delta\log R$ 技术预测中—深层烃源岩总有机碳含量效果较好(图3)。

另外,运用 SPSS Statistics21.0 统计软件分别对式(9)和式(11)计算的总有机碳含量和实测总有机碳含量进行误差分析。相比 $\Delta\log R$ 技术,利用优化的 $\Delta\log R$ 技术预测中—深层烃源岩总有机碳含量相关系数的平方提高 0.371,估计标准误差降低 0.139,表明优化的 $\Delta\log R$ 技术可以较好地预测中—深层烃源岩总有机碳含量(表1,图4,图5)。

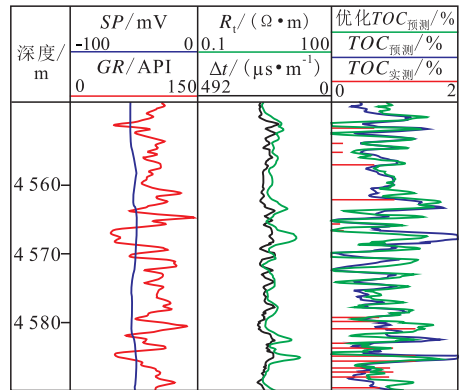


图3 PS8井沙三段中亚段烃源岩总有机碳含量评价
Fig.3 TOC calculating result of Well PS8 in the middle of Es₃

表1 应用SPSS Statistics21.0统计软件进行多元线性回归模型拟合度检验

Table1 Test of goodness of fit using multiple linear regression model from SPSS Statistics 21.0

| 技术类型 | 相关系数 | 估计标准误差 |
|-----------------------|-------|--------|
| $\Delta\log R$ 技术 | 0.716 | 0.276 |
| 优化的 $\Delta\log R$ 技术 | 0.941 | 0.137 |

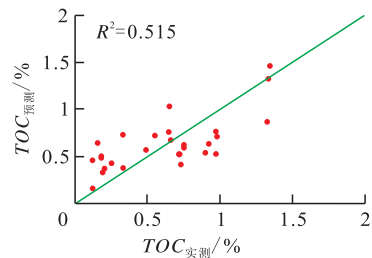


图4 PS8井沙三段中亚段烃源岩 TOC_{实测}和 TOC_{预测}对比
Fig.4 Comparison between measured TOC and calculated TOC predicted by the $\Delta\log R$ technique in the middle of Es₃ in Well PS8

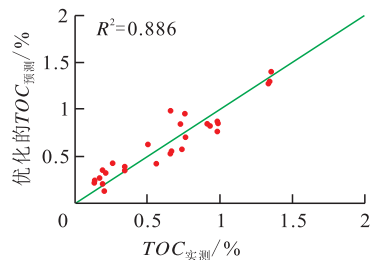


图5 PS8井沙三段中亚段烃源岩 TOC_{实测}和优化的 TOC_{预测}对比

Fig.5 Comparison between measured TOC and calculated TOC predicted by the improved $\Delta\log R$ technique in the middle of Es₃ in Well PS8

3.3 总有机碳含量预测模型的验证及应用

为了验证利用PS8井建立的总有机碳含量预测模型在东濮凹陷西南部洼陷的适用性,针对研究区勘探开发程度较低、总有机碳含量实测值较少的情况,将西南部洼陷北部Z4-3井、中部F4井和南部PS6井的实测总有机碳含量联合代入式(11)中。结

果表明,利用PS8井建立的总有机碳含量预测模型计算的结果与实测的结果相关性较好,相关系数的平方达0.874,估计标准误差为0.147,表明优化的总有机碳含量预测模型是可靠的(图6)。

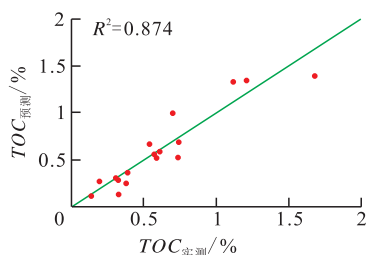


图6 Z4-3, F4和PS6井沙三段中亚段烃源岩
TOC_{实测}和TOC_{预测}对比

Fig.6 Comparison between measured TOC and calculated TOC predicted by logging data of source rocks in the middle of Es₃

根据优化的总有机碳含量预测模型对西南部洼陷沙三段中亚段烃源岩总有机碳含量分布情况进行预测(图7)。结果表明,西南部洼陷南部总有机碳含量平均低于0.5%,为较差的烃源岩发育区;中北部总有机碳含量较高,为有利的烃源岩发育区。

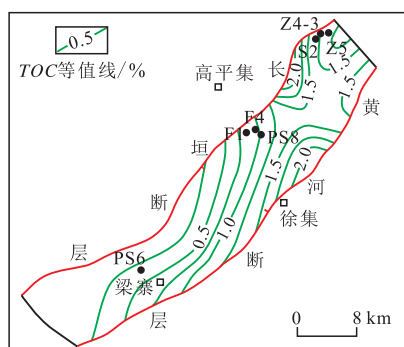


图7 东濮凹陷西南部洼陷沙三段中亚段
总有机碳含量平面展布

Fig.7 Contour map of calculated TOC of source rocks in the middle of Es₃ in southwest subsag, Dongpu Sag

4 结论

针对 $\Delta\log R$ 技术无法准确预测中—深层烃源岩总有机碳含量的问题,建立了优化的 $\Delta\log R$ 技术。该技术扩大了 $\Delta\log R$ 技术的应用范围;引入自然伽马参数,减少非烃源岩高阻段对总有机碳含量预测的影响,增强对中—深部烃源岩预测的抗干扰能力;将所有参数归一化,消除测井仪器不同等因素带来的误差,降低运算过程数据的复杂程度。

优化的 $\Delta\log R$ 技术在渤海湾盆地东濮凹陷西南部洼陷沙三段中亚段的应用结果表明,优化的 $\Delta\log R$

技术使中—深层烃源岩总有机碳含量预测的相关系数的平方提高0.371,估计标准误差降低0.139,更符合实测总有机碳含量的变化趋势。优化的 $\Delta\log R$ 技术不仅适用于中—深层烃源岩总有机碳含量的预测,也适用于浅层。该方法可以降低非烃源岩高阻段对总有机碳含量预测的影响,但不能完全消除。因此,在实际操作过程中,为更好地确定烃源岩厚度及总有机碳含量的分布,需要人为删除非烃源岩发育段总有机碳含量的预测值,在实践中仍需继续完善。

符号解释:

$\Delta\log R$ ——实测曲线在电阻率对数上的读数; R_1 ——实测电阻率, $\Omega\cdot m$; Δt ——实测声波时差, $\mu s/m$; $R_{\text{基值}}$ ——非烃源岩泥岩段对应的电阻率, $\Omega\cdot m$; $\Delta t_{\text{基值}}$ ——非烃源岩泥岩段对应的声波时差, $\mu s/m$; LOM ——成熟度指数; A , B ——常数; q , q_{min} 和 q_{max} ——测井实测、纯砂岩层和纯泥岩层的自然伽马,API; D , E , F ——常数。

参考文献:

- [1] JACOBI D J, GLADKIKH M, LECOMPTE B, et al. Integrated petrophysical evaluation of shale gas reservoirs [R]. Calgary: Canadian International Petroleum Conference/SPE Gas Technology Symposium Joint Conference, 2008.
- [2] ZHAO Peiqiang, MAO Zhiqiang, HUANG Zhenhua, et al. A new method for estimating total organic carbon content from well logs [J]. AAPG Bulletin, 2016, 100(8): 1 311-1 327.
- [3] 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.
- [4] 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.
ZHU Zhenyu, WANG Guiwen, ZHU Guangyu. The application of artificial neural network to the source rock's evaluation [J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(1): 137-140.
- [5] KAMALI M R, MIRSHADY A A. Total organic carbon content determined from well logs using $\Delta\log R$ and Neuro Fuzzy techniques [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2004, 45(3/4): 141-148.
- [6] FERTL W H, CHILINGAR G V. Total organic carbon content determined from well logs [J]. SPE Formation Evaluation, 1988, 3(2): 407-419.
- [7] 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): 1 508-1 515.
HUANG Wei, ZHANG Xiaoli, LI Hao, et al. Interpretation model

- of organic carbon content of shale in Member7 of Yanchang Formation, central-southern Ordos Basin [J].Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1 508-1 515.
- [8] HE Jianhua, DING Wenlong, JIANG Zaixing, et al. Logging identification and characteristic analysis of the lacustrine organic-rich shale lithofacies: A case study from the E_{s3}^1 shale in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, Eastern China [J].Journal of Petroleum Science & Engineering, 2016, 145(5): 238-255.
- [9] 边雷博, 张小莉, 严巧丹, 等.鄂尔多斯盆地中南部长7油层组页岩气含量计算[J].石油地质与工程, 2016, 30(5): 59-62, 66. BIAN Leibo, ZHANG Xiaoli, YAN Qiaodan, et al. Shale gas content calculation of Chang-7 oil layers in central and southern Ordos basin [J].Petroleum Geology and Engineering, 2016, 30(5): 59-62, 66.
- [10] 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(12): 1 777-1 794.
- [11] 许晓宏, 黄海平, 卢松年.测井资料与烃源岩有机碳含量的定量关系研究[J].江汉石油学院学报, 1998, 20(3): 8-12. XU Xiaohong, HUANG Haiping, LU Songnian. A quantitative relationship between well logging information and organic carbon content [J].Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1998, 20(3): 8-12.
- [12] 张小莉, 沈英.吐哈盆地侏罗系煤系地层烃源岩的测井研究[J].测井技术, 1998, 22(3): 183-185. ZHANG Xiaoli, SHEN Ying. Study on the source rock of Jurassic coal measure strata in Tulufan Hami basin by logs [J].Well Logging Technology, 1998, 22(3): 183-185.
- [13] 周一博, 柳广弟, 谭修中, 等.酒泉盆地营尔凹陷下白垩统烃源岩分布特征[J].油气地质与采收率, 2013, 20(1): 20-23. ZHOU Yibo, LIU Guangdi, TAN Xiuzhong, et al. Distribution and characteristic of lower Cretaceous source rocks in Ying'er sag, Jiuquan basin [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(1): 20-23.
- [14] 刘超, 卢双舫, 黄文彪, 等. $\Delta\log R$ 技术改进及其在烃源岩评价中的应用[J].大庆石油地质与开发, 2011, 30(3): 27-31. LIU Chao, LU Shuangfang, HUANG Wenbiao, et al. Improvement of $\Delta\log R$ and its application in source rocks evaluation [J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2011, 30(3): 27-31.
- [15] 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.
- [16] 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, 146. ZHU Guangyou, JIN Qiang, ZHANG Linye. Using log information to analyze the geochemical characteristics of source rocks in Jiyang depression [J].Well Logging Technology, 2003, 27(2): 104-109, 146.
- [17] WANG Pengwei, CHEN Zhuoheng, PANG Xiongqi, et al. Revised models for determining TOC in shale play: Example from Devonian Duvernay Shale, Western Canada Sedimentary Basin [J].Marine & Petroleum Geology, 2016, 70(2): 304-309.
- [18] 高阳.东营凹陷北部沙四段下亚段盐湖相烃源岩特征及展布[J].油气地质与采收率, 2014, 21(1): 10-15. GAO Yang. Characteristics and distribution of salt lake source rocks from lower submember of 4th member of Shahejie formation, north Dongying depression [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(1): 10-15.
- [19] 赵铭海, 傅爱兵, 美丽, 等.罗家地区页岩油气测井评价方法[J].油气地质与采收率, 2012, 19(6): 20-24. ZHAO Minghai, FU Aibing, GUAN Li, et al. Logging evaluation method of shale oil and gas reservoir in Luoia area [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6): 20-24.
- [20] 高岗, 王绪龙, 柳广弟, 等.准葛尔盆地上三叠统烃源岩 TOC 含量预测方法[J].高校地质学报, 2012, 18(4): 745-750. GAO Gang, WANG Xulong, LIU Guangdi, et al. Prediction method and of organic carbon abundance of dark color mudstones in the Triassic system of Junggar Basin [J].Geological Journal of China Universities, 2012, 18(4): 745-750.
- [21] MENDELZON J D, TOKSOZ M N. Source rock characterization using multivariate analysis of log data [R].Dallas: SPWLA 26th Annual Logging Symposium, Society of Petro-physicists and Well Log Analysts, 1985: 1-21.
- [22] SCHMOKER J W. Determination of organic-matter content of Appalachian Devonian shales from gamma-ray logs [J].AAPG Bulletin, 1981, 65(7): 1 285-1 298.
- [23] 张克鑫, 漆家福, 赵衍彬, 等.新生代东濮凹陷构造特征及其演化[J].新疆石油地质, 2007, 28(6): 714-717. ZHANG Kexin, QI Jiafu, ZHAO Yanbin, et al. Structure and evolution of Cenozoic in Dongpu Sag [J].Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(6): 714-717.
- [24] 边雷博, 柳广弟, 孙明亮, 等.方里集地区沙河街组烃源岩地球化学特征分析及油源对比[J].中国海上油气, 2017, 29(6): 53-60. BIAN Leibo, LIU Guangdi, SUN Mingliang, et al. Geochemical characteristics of source rocks and oil source correlation of Shahejie Formation in Fanglijia area, Dongpu sag, China [J].China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(6): 53-60.
- [25] 武晓玲, 卢福长, 张云献, 等.东濮凹陷濮深8井油气与烃源岩地球化学特征[J].石油勘探与开发, 2000, 27(5): 32-35. WU Xiaoling, LU Fuchang, ZHANG Yunxian, et al. Geochemical characteristic study of oil-gas and source rocks in Well Pushen8 in Dongpu depression [J].Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(5): 32-35.
- [26] 柳广弟, 高先志, 黄志龙, 等.石油地质学[M].北京:石油工业出版社, 2009: 153-165. LIU Guangdi, GAO Xianzhi, HUANG Zhilong, et al. Petroleum geology [M].Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 153-165.