

泥页岩有机质对超压成因判识的影响及校正方法

唐子怡, 王 猛, 陶 冶, 李 军

西安石油大学, 陕西 西安

收稿日期: 2021年9月16日; 录用日期: 2021年10月14日; 发布日期: 2021年10月21日

摘 要

由于有机质的存在, 使得用测井资料方法识别超压成因结果会产生一定程度的偏差。本文着重介绍了泥页岩有机质对超压成因识别的影响, 即泥页岩中有机质含量会严重影响孔隙度测井系列的准确性, 从而降低超压成因识别方法的可靠性。于是, 本文系统地提出校正有机质的超压识别方法, 即利用已知实验分析数据、测井参数数据、地球化学技术等, 通过各种方法预测研究区的有机质含量(一般用总有机碳含量代表), 然后利用岩石体积物理模型对孔隙度测井进行有机质校正, 最后利用超压成因识别方法判别超压成因。通过对比有机质校正前后得到的超压成因判识结果, 发现校正前的超压成因结果与校正后的超压成因结果存在较大的差异, 而校正后的超压成因判识结果更符合研究区地质背景, 能更好地指导油气勘探开发工作。

关键词

有机质, 超压成因判识, 校正方法

The Influence of Organic Matter on the Origin Identification of Overpressure in Shale and Correction Method

Ziyi Tang, Meng Wang, Ye Tao, Jun Li

Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi

Received: Sep. 16th, 2021; accepted: Oct. 14th, 2021; published: Oct. 21st, 2021

Abstract

Due to the existence of organic matter, there is some deviation in identifying the cause of over-

pressure by logging technology. This paper mainly focuses on the influence of organic matter in mud shale on identification of overpressure origin, because the content of organic matter in mud shale will seriously affect the accuracy of porosity logging series, which reduces the credibility of identification method of overpressure origin. Then, this paper systematically puts forward overpressure identification methods for correcting organic matter, including using the known experimental analysis data, well logging parameter data, geochemical techniques, etc. Through various methods to predict organic matter content (generally represented by total organic carbon content or TOC) in the chosen area, the volume of rock physical model is then used to correct organic matter porosity logging parameters. Finally, the overpressure cause identification method is used to identify the overpressure cause after corrected. By comparing the analysis result of overpressure before and after the organic matter correction, it is found that there is more or less difference between the overpressure origin before correction and one after correction. It is suggested by a host of studies that the corrected overpressure cause results are more in line with the conditions of the study area, which can better guide oil and gas production.

Keywords

Organic Matter, Origin Identification of Overpressure, Correction Method

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

超压,即高于静水压力的地层压力,广泛存在于世界各个含油气盆地。超压对油气运移和油气藏的形成、保存具有重要的意义,不同成因的超压对油气藏的影响也不同,所以正确识别超压成因对油气勘探开发工作来说是不可或缺的一环。

不同的岩性其超压成因往往是不同的,就泥页岩而言,烃源岩与非烃源岩的超压成因常常不同。对于烃源岩层段的超压成因分析,由于有机质含量及类型对密度、声波时差等测井参数具有明显影响,因此在运用这些测井资料分析烃源岩层段的超压成因时,需要进行有机质含量校正,以降低有机质对测井参数的影响。我国目前对这方面的研究还比较欠缺,基于此,本文主要研究泥页岩有机质含量对超压成因分析的影响及校正方法。

2. 超压成因研究现状

世界超压成因研究的发展历程,大体可划分为:20世纪90年代中期以前的不平衡压实占主导的阶段;20世纪90年代中后期的不平衡压实与生烃膨胀认识为主的阶段;21世纪初以来的非欠压实成因受到广泛重视的阶段[1]。

近十多年来,根据国内外超压研究的最新进展,超压成因主要有5种成因类型:不平衡压实、流体膨胀、成岩作用、构造挤压、压力传递。其中流体膨胀形成的超压包括生烃作用、油裂解气作用、水热膨胀作用等。成岩作用主要包括蒙脱石-伊利石转化作用等。超压成因研究方法总结为以下6种,即测井曲线组合分析法、鲍尔斯法(加载-卸载曲线法)、声波速度-密度交会图法、孔隙度对比法、压力计算反推法与综合分析法[2]。

异常高压或超压因在含油气盆地普遍存在、且与油气藏形成关系密切以及对钻井安全至关重要,一

直是油气地质与勘探研究的热点问题。其中超压成因研究是油气成藏研究与压力预测研究的基础，不同成因的超压会造成分布各异的油气藏，其判别的方法也是各不相同。

进入 21 世纪以来，超压成因研究在国际上取得了许多重要进展，但是中国的超压成因研究总体滞后于国外同类研究，对许多盆地超压成因的判断仍停留在 20 世纪末或 21 世纪初的水平，许多关于超压成因研究并不全面，如考虑有机质对超压成因识别的影响和校正的相关研究基本较少。

3. 有机质对超压成因识别的影响

超压成因的识别方法目前主要有 6 种：测井曲线组合分析法、加载-卸载曲线法、声波速度 - 密度交会法、孔隙度对比法、压力反推法、综合分析法，这些方法基本都依赖于测井参数曲线，所以测井曲线的准确性、可靠性决定了超压成因识别的正确性[1]。但是，研究发现，对于烃源岩而言，有机质的存在很大程度上影响着测井曲线的准确性，经过有机质校正与未经过有机质校正得出的超压成因会出现较大的差异，甚至出现超压成因截然不同的情况。

有机质的测井响应特征表现为“三高一低”[3][4]，即高声波时差测井、高自然伽马测井、高电阻率测井、低密度测井。而有机质对孔隙度测井系列的影响较为明显，即孔隙度测井受有机质影响容易产生误差，并不能真实反映地层孔隙度情况，高估不均衡压实的程度从而导致错误地判断超压成因。

由于有机质影响着测井曲线的可靠性，所以只要对用于识别超压成因的测井曲线进行有机质校正，就能大幅提高其正确度，降低有机质带来的干扰。本文提出的有机质校正方法为：首先根据烃源岩特定的测井响应特征判断出烃源岩与非烃源岩；其次需要根据一些方法得到烃源岩层段的有机质含量；最后以岩石体物模型为理论基础对测井曲线进行有机质校正。

4. 有机质含量计算方法

二十世纪以来，随着理论和技术的发展，无论是国内学者，还是国外学者，都对有机质含量的预测和计算展开了大量研究，进行大量实验与测试，获得了显著的成果。从简单易行的人工实验取芯方法，到利用测井技术及数据的相关方法，再到测井技术和数据与计算机算法相结合的更加准确易行的方法。

4.1. 实验分析法

该方法主要是通过人工提取岩心样本的方式，利用试验方法获得特定层段的岩层信息，从而获得某一区段的有机碳含量。在实际应用中，一般用研究区岩心的平均有机碳含量代表研究区整体的有机质含量。

虽然可以通过提取岩心获得岩层相关信息，但为了确保较高的准确度和保真度，需要取大量岩心样本研究有机质含量，既消耗时间，耗费人力物力，又使成本大大提高。不仅如此，考虑到泥页岩的岩性特征，即薄而分散，要想获得连续的泥页岩岩心样本几乎是不可能的，也就无法得到连续的有机碳含量信息[5]。单纯用平均值代替研究区整体有机质含量虽然能在一定程度上降低误差，但实际得到的结果并不理想[6]。因此，目前无论是在有机碳预测方面，还是油气藏储层评价方面，都很少采用大量人工取芯进行实验分析的方法。

4.2. 测井参数预测法

为了弥补实验分析方法的不足，人们发现测井技术能够很好地获得研究区域的连续地层信息。泥页岩的测井响应特征与其它岩石有显著差异，大量文献表明，泥页岩的测井响应特征一般表现为“三高一低”，即高声波时差、高自然伽马、高电阻率、低密度。

根据泥页岩的特殊测井响应特征，将有机质含量与测井参数联系起来，即建立某种关系，就可以预测和计算有机碳含量。目前，应用较多的测井方法主要是声波时差测井、电阻率测井、自然伽马测井、

自然伽马能谱测井、密度测井等。

4.2.1. 单一测井间接法

简单来说,单一测井法主要是选择对有机碳含量影响较大,相关性较显著的测井参数,以某一测井参数为自变量,有机碳含量为因变量,建立一元线性回归方程模型,得到有机碳预测函数模型,形如:

$$\text{TOC} = aX + b \quad (1)$$

式(1)中 TOC 为有机碳含量; a 、 b 为回归系数; X 代表某一测井参数。

目前单一测井法主要单独采用自然伽马测井、自然伽马能谱测井、密度测井三种测井方法,与有机碳含量建立回归关系。

另外,还有一些测井方法,如碳氧比测井、地球化学测井,不需要构建回归方程得到经验关系式,而是通过测井技术直接可以获得地下岩石的含碳量[7]。然而,目前的测井技术无法直接获得有机碳含量,只能获得岩石的总含碳量(包括有机碳和无机碳),所以在采用此类方法时,关键是需要解决无机含碳量的问题。要想准确地获得无机碳含量都需要对环境进行校正,排除外界误差。

4.2.2. 不同测井结合法

单一测井建立的回归模型仅考虑了单一因素,而有机碳含量是受多种因素共同影响的,故通过此方法得到的函数关系准确度大大降低。即使是运用可以直接测得碳含量的测井方法也面临无机碳含量的问题,于是提出多测井技术结合的方法。多测井结合在实际生产研究中也是应用最多、最有效的方法。

早在 1990 年, Passey 就提出了声波时差测井与电阻率测井结合的 $\Delta \log R$ 法[8]。其原理是将孔隙度曲线(一般用声波时差曲线)与电阻率曲线反向叠加,声波时差曲线用算数坐标,电阻率曲线用对数坐标,二者重合的区域定义为基线,两者之间的距离为 $\Delta \log R$ 值。而 TOC 与热变指数呈线性关系(图 1),二者模型如下:

$$\Delta \log R = \log \left(\frac{R}{R_{\text{基线}}} \right) + K (\Delta t - \Delta t_{\text{基线}}) \quad [8] \quad (2)$$

$$\text{TOC} = \Delta \log R \times 10^{(2.297 - 0.1688 \text{LOM})} + \Delta \text{TOC} \quad [8] \quad (3)$$

上式中 R 为实测电阻率; Δt 为实测声波时差; $R_{\text{基线}}$ 为基线对应的电阻率; $\Delta t_{\text{基线}}$ 为基线对应的声波时差; K 为测井刻度系数,取决于测井单位; LOM 为热变指数,反映有机质演化成熟度; ΔTOC 为有机碳含量背景值。

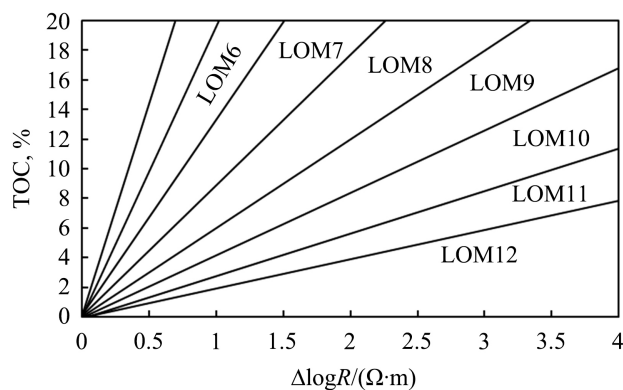


Figure 1. Relation plate between TOC and $\Delta \log R$ [9]

图 1. TOC 和 $\Delta \log R$ 关系图[9]

但是, 传统的 $\Delta\log R$ 法存在诸多不足。一是基线需要人为定义, 基线的选定存在较大的人为误差, 且基线不一定只有一条, 不同的基线可能导致不同的结果。二是在求取热变指数的过程中需要获得大量样品, 不容易准确获得热变指数。三是有机碳含量背景值的确定也有一定的误差[9]。四是传统的 $\Delta\log R$ 法在预测正常压实的海相烃源岩有机碳含量时效果较好, 但我国油气生产主要依靠陆相烃源岩生成油气, 由于陆相岩石受压实作用较强, 使声波时差曲线与电阻率曲线差异不明显, 存在较大的误差。

在此基础上, 有许多学者提出了大量的针对不同情况的改进方法。朱光有曾提出在数据较多时可简化为:

$$\text{TOC} = a \times \lg R + b \times \Delta t + c \quad [4] \quad (4)$$

王艳茹等提出考虑密度的广义 $\Delta\log R$ 法:

$$\text{TOC} = (a \times \lg R + b \times \Delta t + c) / \rho \quad [10] \quad (5)$$

其他改进方法:

$$\text{TOC} = [a \times \lg(\text{GR}) + b \times \text{DEN} + c] \times \log R + \Delta\text{TOC} \quad [11] \quad (6)$$

不同测井技术结合的方法除了以 $\Delta\log R$ 法为基础的一系列方法外, 多元线性回归方法也运用较为广泛。该方法不仅不需要考虑热变指数和有机碳背景值, 而且在许多含油气盆地回归性显著。该方法的原理以线性回归方程为基础, 通过不同测井参数和已知有机碳含量进行线性拟合回归, 得到有机碳预测模型:

$$\text{TOC} = aX_1 + bX_2 + cX_3 + \dots + nX_n + mX_m \quad (7)$$

式中 a 、 b 、 c 、 n 、 m 为回归系数; X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_n 为不同的测井参数。

但是在运用该方法时需要注意在进行多元回归之前, 应通过单一测井拟合选择出显著性较高的测井参数[12], 可以一定程度上降低有机碳含量预测的误差, 提高可靠性。

4.3. 测井与算法结合法

上述提到的测井方法大多为建立有机碳含量与测井参数的线性回归方程模型、函数方程模型, 虽然建立线性回归模型简便易行, 但实际上由于影响有机碳含量的因素众多, 不可能呈现标准的线性关系。而随着计算机的发展与运用, 油气生产行业也与时俱进, 跟随时代的潮流, 结合数学模型、计算机算法, 不断利用计算机超强的运算能力与学习能力, 解决难以用标准的函数方程来表达的问题。关于有机碳预测, 目前常用神经网络法、支持向量回归机模型预测有机碳含量。

神经网络法的基本原理为通过梯度下降法使预测值与实际值误差达到最小[13]。应用神经网络法预测有机碳含量的具体步骤如下: 首先建立神经网络结构, 该结构由输入层、隐含层、输出层组成; 第二步选择敏感测井参数作为输入层的数据库, 所谓敏感测井参数就是与有机碳相关性较强的测井参数, 选择实测有机碳含量作为输出层的数据库, 隐含层则为有机碳含量与输入层的某种关系或算法; 第三步由计算机识别输入层、输出层数据库, 初步得出隐含层的结构式, 并计算在隐含层的基础上的预测有机碳含量; 第四步比较预测值与实测值的差异, 若未达到最好的效果, 计算机继续学习训练, 重新调整输入层、修正隐含层, 直至预测值与实测值误差最小, 即可得到有机碳含量与测井参数的隐含的复杂关系, 进而预测有机碳含量。流程简要示意图见图 2。

支持向量回归机模型不同于线性回归, 虽然二者都是以预测值与实际值的距离最小为依据建立模型, 但支持向量回归机人为规定适合的拟合误差 ε , 在此范围内的点被视为无误差拟合, 这也解决了线性拟合的过拟合问题[14] [15]。

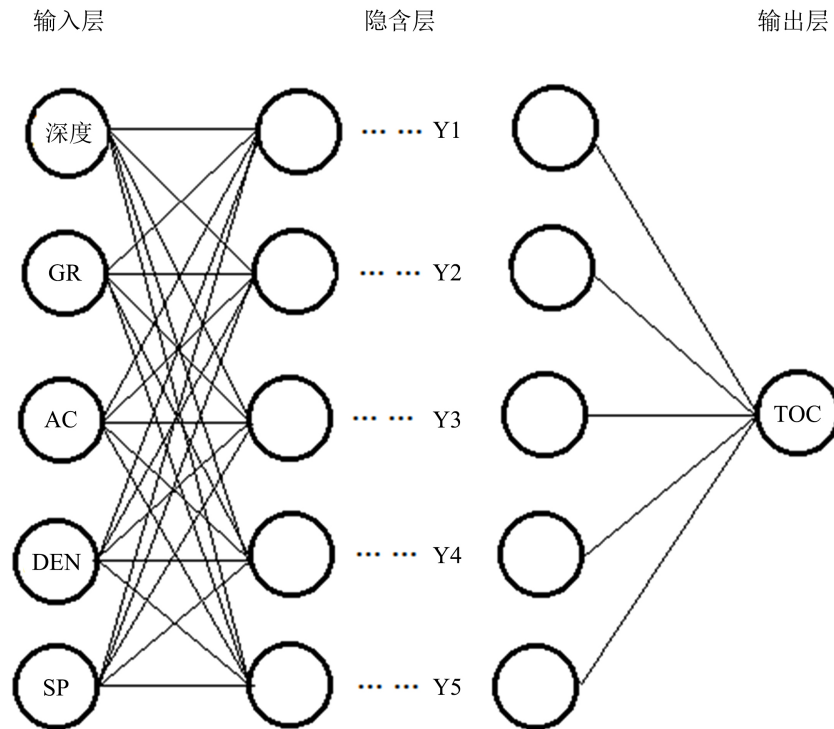


Figure 2. Schematic diagram of neural network model [13]
图 2. 神经网络模型示意图[13]

设回归函数为 $f(x) = \langle w, x \rangle + b$ ，在允许拟合误差的范围内引入松弛因子 ξ 、惩罚系数 C 后模型为：

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^k \xi_i \quad [15] \quad (8)$$

$$s.t. \begin{cases} y_i - f(x_i) \leq \varepsilon + \xi_i \\ f(x_i) - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ i = 1, 2, \dots, k; 0 \leq \xi, \xi_i \leq 1 \end{cases} \quad [15] \quad (9)$$

通过引入拉格朗日函数将原问题的最小问题转化为对偶问题的最大问题[16]，引入核函数和支持向量求得 w 与 b 。

支持向量回归机主要用于解决超高维、非线性、过拟合问题。运用该方法的关键主要在于各个拟合参数的选取，包括拟合误差、惩罚系数等，可以通过交叉验证法等优化参数、模型[17]。

5. 有机质校正方法

正是由于有机质含量对测井曲线的影响，进而影响超压成因的识别，所以需要测井曲线进行有机质含量的校正。有机质含量越高，对孔隙度测井的影响越大，一般采用声波时差测井代表孔隙度测井[18]。对声波时差曲线的有机质校正主要依靠岩石体积物理模型。

对烃源岩和非烃源岩分别运用岩石体积物理模型，烃源岩看成由岩石骨架、有机质、孔隙、孔隙流体四部分组成，而非烃源岩看成由岩石骨架、孔隙、孔隙流体三部分组成[19]，模型图见图 3、图 4。烃源岩层段与非烃源岩层段声波时差二者做差，即可得到有机质的声波时差影响幅度，进而对富含有机质的泥页岩进行声波时差校正，得出正确的超压成因。

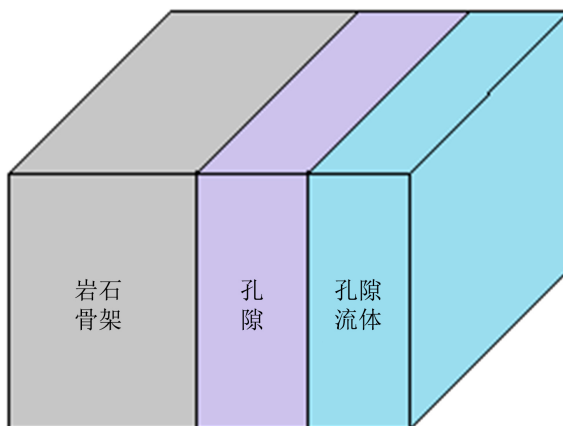


Figure 3. Physical model of the volume of non-hydrocarbon source rock
图 3. 非烃源岩石物理体积模型

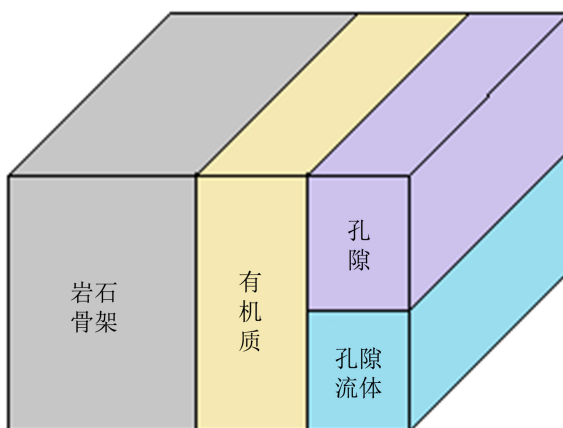


Figure 4. Physical model of the volume of hydrocarbon source rock
图 4. 烃源岩石物理体积模型

$$\Delta t = (1 - \varphi) [(1 - \varphi_{\text{TOC}}) \Delta t_{ma} + \varphi_{\text{TOC}} \Delta t_{om}] + \varphi \Delta t_f \tag{10}$$

$$\Delta t' = (1 - \varphi) \Delta t_{ma} + \varphi \Delta t_f \tag{11}$$

$$\Delta t_{\text{TOC}} = \Delta t - \Delta t' \tag{12}$$

$$\varphi_{\text{TOC}} = k \frac{\rho_{\text{rock}}}{\rho_{om}} \omega_{\text{TOC}} \tag{13}$$

其中 Δt 、 $\Delta t'$ 、 Δt_{TOC} 、 Δt_{ma} 、 Δt_f 、 Δt_{om} 分别为烃源岩、非烃源岩、有机质、岩石骨架、孔隙、烃源岩中有机碳的声波时差； φ 为岩石的孔隙度； φ_{TOC} 、 ω_{TOC} 为烃源岩中有机碳体积百分比、有机碳质量百分比； ρ_{rock} 、 ρ_{om} 分别为岩石的密度、有机碳的密度。

徐泽阳等将松辽盆地长垣地区葡 532 井青山口组一段泥页岩划分为非有机质泥岩骨架、固体有机质及孔隙流体三部分，并以此对超压成因判别中应用到的声波时差及密度参数进行了校正，去除了低密度有机质对这两种参数的影响[18]。校正前后关于葡 532 井青山口组超压成因的认识明显不同：校正前测井参数表现出明显的不均衡压实成因超压；校正后各类成因判别方法均将结果指向传导或流体膨胀成因超压(图 5) [18]。

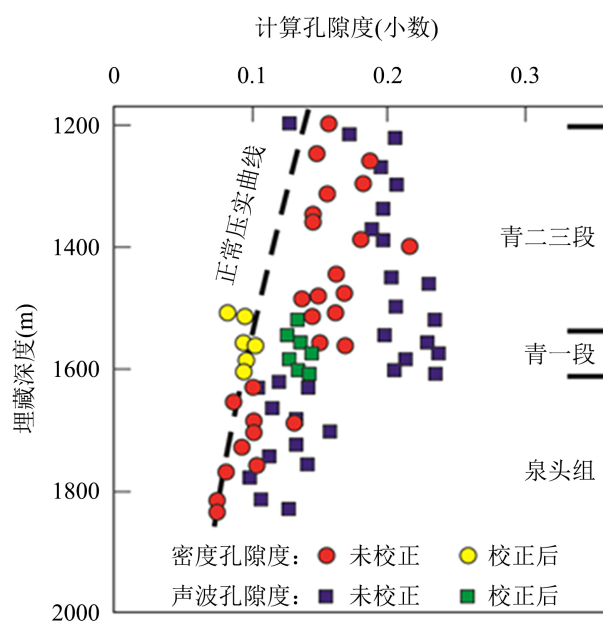


Figure 5. The comparison of non-corrected and corrected porosity for Pu532 well in Changyuan area (Xu Zeyang, 2019)

图 5. 长垣地区葡 532 井有机质含量校正前后密度孔隙度、声波孔隙度对比(徐泽阳, 2019)

6. 结论

1) 能否正确判断超压成因极大地影响着油气勘探开发, 而在一系列识别超压成因方法中有机质的影响极为突出, 尤其是孔隙度测井系列在有机质存在时, 不能正确反映实际孔隙度情况, 影响研究者对其成因的判断。

2) 本文对目前比较流行的有机质预测方法进行了详细的综述, 包括实验分析法、测井参数法以及测井与算法综合运用法, 并分析了各自的优缺点。

3) 由于有机质对孔隙度参数的严重影响, 校正方面主要采用对烃源岩和非烃源岩各自运用岩石体积物理模型, 将得出的结果进行比较即可得到校正后的孔隙度, 从而提高对超压成因认识的可靠度。

参考文献

- [1] 赵靖舟, 李军, 徐泽阳. 沉积盆地超压成因研究进展[J]. 石油学报, 2017, 38(9): 973-998.
- [2] 郭明强, 宋平, 张兵, 陈梦娜, 吴伟涛. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区上古生界古超压成因及其演化[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2020, 35(4): 19-25.
- [3] 曾伟凌, 段新国, 张磊, 王冰. 鄂尔多斯盆地合水地区延长组有机碳测井解释模型[J]. 四川地质学报, 2016, 36(2): 320-322+327.
- [4] 王艳茹, 刘洛夫, 杨丽萍, 李薇, 刘显阳, 王克. 鄂尔多斯盆地长 7 烃源岩有机碳测井评价[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(4): 78-82+94.
- [5] 宋磊, 宁正福, 丁冠阳. 基于三种常规测井方法的有机碳含量评价[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(29): 260-265.
- [6] 王攀, 梁明星. 煤系烃源岩测井响应特征及有机碳评价方法[J]. 物探与化探, 2016, 40(1): 197-202.
- [7] 袁超, 周灿灿, 胡松, 程相志, 龚洋. 地层有机碳含量测井评价方法综述[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(6): 2831-2837.
- [8] Passey, Q.R., Creaney, S. and Kulla, J.B. (1990) A Practical Model for Organic Richness from Porosity and Resistivity Logs. *AAPG Bulletin*, **74**, 1777-1794. <https://doi.org/10.1306/OC9B25C9-1710-11D7-8645000102C1865D>

- [9] 王祥, 马劲风, 张新涛, 王震亮, 王飞龙, 王浩璠, 李琳. 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.
- [10] 石文睿, 马天碧, 张占松, 张超谟, 季运景. ΔLogR 法估算页岩气储层有机碳含量探讨[J]. 江汉石油职工大学学报, 2014, 27(5): 1-4.
- [11] 谭佳静, 吴康军, 李昱翰, 赵小瑜, 闫春明, 黄智涵, 杜泽坤, 李爽. 测井预测 TOC 方法在页岩储层评价中的运用[J]. 地球物理学进展, 36(1): 258-266.
- [12] 郭双, 谢锐杰, 邓勇, 王伟. 致密油藏烃源岩有机碳含量预测方法研究[J]. 中国锰业, 2016, 34(4): 99-103.
- [13] 卢鹏羽, 毛小平, 张飞, 宿宇驰, 毛珂. 基于神经网络法预测伦坡拉盆地有机碳含量[J]. 地球物理学进展, 36(1): 230-236.
- [14] 叶绍泽, 曹俊兴, 吴施楷, 谭峰. 基于深度置信网络的总有机碳含量预测方法[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(6): 2490-2497.
- [15] 张成龙, 陶士振, 白斌, 王倩茹. 基于支持向量机模型的烃源岩有机碳含量预测——以鄂尔多斯盆地为例[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(5): 761-768.
- [16] 徐红敏, 王海英, 梁瑾, 黄帅. 支持向量机回归算法及其应用[J]. 北京石油化工学院学报, 2010, 18(1): 62-66.
- [17] 李泽辰, 杜文凤, 胡进奎, 李冬. 基于测井参数的页岩有机碳含量支持向量机预测[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(6): 199-204.
- [18] 徐泽阳, 赵靖舟, 李军. 松辽盆地长垣地区白垩系青山口组一段有机质含量对超压分析的影响及校正方法[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 938-946.
- [19] 李超, 张立宽, 罗晓容, 张立强, 胡才志, 杨鹏, 邱桂强, 马立元, 雷裕红, 程明. 泥岩压实研究中有有机质导致声波时差异常的定量校正方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(3): 77-87.