

川西南地区筇竹寺组页岩气储层有机碳含量测井评价方法

杨祥菊, 黎泽刚, 季凤玲

中石化经纬有限公司西南测控公司, 四川 成都

收稿日期: 2024年5月10日; 录用日期: 2024年6月21日; 发布日期: 2024年6月30日

摘要

川西南筇竹寺组页岩气有机质受演化程度、矿物组分、地层水矿化度等综合地质因素影响, 储层对象相对川南龙马溪组更复杂, 测井评价时如直接采用类似龙马溪组的计算模型并不完全适用。本文重点对常用的5种模型进行重新研究, 结果表明: 在有机碳计算时, 总伽马与无铀伽马多元拟合法效果最佳, 且相对误差小。从实际应用效果看, 上述方法可操作性强, 评价精度高, 为深入研究区筇竹寺组页岩气储层有机碳含量提供了有效的技术手段。

关键词

川西南地区, 筇竹寺组, 页岩气, 有机碳含量, 测井评价

Logging Evaluation Method of TOC in Shale Gas Reservoir of Qiongzhusi in Southwest Sichuan

Xiangju Yang, Zegang Li, Fengling Ji

Southwest Logging & Control Company, Sinopec Matrix Corporation, Chengdu Sichuan

Received: May 10th, 2024; accepted: Jun. 21st, 2024; published: Jun. 30th, 2024

Abstract

TOC of Qiongzhusi Shale Gas Reservoir in Southwest Sichuan is affected by comprehensive geological factors such as evolution degree, mineral composition and formation water salinity, and the reservoir object is more complex than that of Longmaxi formation, so the calculation model simi-

lar to Longmaxi Formation is not completely applicable in logging evaluation. This paper focuses on the re-study of five commonly used models, and the results show that: in the TOC calculation, the total gamma and no uranium gamma multielement fitting method has the best effect, and the relative error is small. From the practical application results, the above method has strong operability and high evaluation accuracy, which provides an effective technical means for further study of TOC content in shale gas reservoir of Qiongzhusi Formation.

Keywords

Southwest Sichuan, Qiongzhusi, Shale Gas, TOC, Logging Evaluation

Copyright © 2024 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

中国页岩气资源潜力巨大,经多年勘探,在四川盆地基本实现了海相页岩气工业开采[1]。与此同时,济阳拗陷、泌阳凹陷、江汉盆地、鄂西地区、四川盆地及其周缘都相继发现潜力可观的海陆相页岩油气资源[2] [3] [4],然而,由于各地区沉积环境、岩性岩相、矿物组分、衍化阶段等地质条件复杂且差异较大使得利用传统有机碳含量评价方法评价储层精度不高,甚至出现评价方法失效等问题[5] [6]。实际评价中需要针对储层区域地质特征,单独建立评价模型,以提高评价精度。川西南海相筇竹寺组是目前页岩气重点勘探对象。有机碳含量(TOC)是指与有机质有关的碳素,是反映页岩有机质丰度和生烃潜力最主要的指标,一般用单位质量岩石中有机碳的质量百分数表示。其定量计算方法是研究重点和评价关键。笔者针对多种利用测井资料计算有机碳含量的方法进行对比分析研究,以确定适用于川西南地区筇竹寺组页岩气储层测井评价中最优化的有机碳含量测井评价方法。

2. 测井曲线响应特征

在川西南筇竹寺组,发育有中-深水陆棚沉积的两套优质页岩气储层,该地层上下各一套。页岩气富集层段的测井曲线响应通常具有高自然伽马异常(自然伽马为 140~300 PAI)、高铀异常、高声波时差、高中子、高电阻率和相对低密度(优质储层段密度低于 2.55 g/cm^3)特征,无铀伽马曲线为相对低值(如图 1);游离气含量较高时补偿中子具有天然气“挖掘效应”。如图 1 为 JY1 井页岩气测井响应特征及识别成果图。

3. 有机碳含量计算方法

在页岩储集层中随着有机碳含量 TOC 的增加,赋存于其中的吸附气含量会增加,国内外开展了确定 TOC 含量计算方法的大量研究。常用的方法包括直接测量 TOC 法,基于测井计算 TOC 的 $\Delta\log R$ 法、体积密度法、自然伽马能谱法、自然伽马指示法及多元线性回归法等。Hichey 和 Henk (2007 年)在 Barnett 岩性较纯页岩段用体积密度-TOC 线性模型计算 TOC; Passey (2010 年)用 $\Delta\log R$ -TOC 评估 TOC,在岩性相对均匀地层的实用性较好,已被广泛使用;其它方法包括用电阻率-中子-密度交会评估 TOC,用密度-核磁共振测井确定 TOC 等。结合国内外研究成果,基于区域内实验和测井数据,开展了研究区内 TOC 含量与测井数据关系的大量分析。

效地反映有机质富集程度；但是在含黄铁矿等低阻矿物地层的应用效果较差。该模型忽略了泥页岩地层中的本底 TOC 影响，模型中电阻率及声波时差基线值可能随地层埋深变化，难以精确确定。

研究区内页岩目的层岩性较复杂，黏土矿物中伊/蒙混层及黄铁矿较发育，两者均可降低电阻率响应特征[7]，弱化有机碳含量变化造成的差异，使 $\Delta\log R$ 法存在一定误差。同时， $\Delta\log R$ 方法适用于成熟度较低的储层，而筇竹寺组页岩气储层镜质体反射率 R_o 为 2.29%~4.1%，平均为 3.5%，处于过成熟度阶段。从统计川西南地区岩心分析 TOC 与补偿声波、电阻率特征关系可以看出(见图 2)，补偿声波、电阻率与 TOC 关系均较差。因此研究区内该方法计算 TOC 含量适用性和精度都较差。

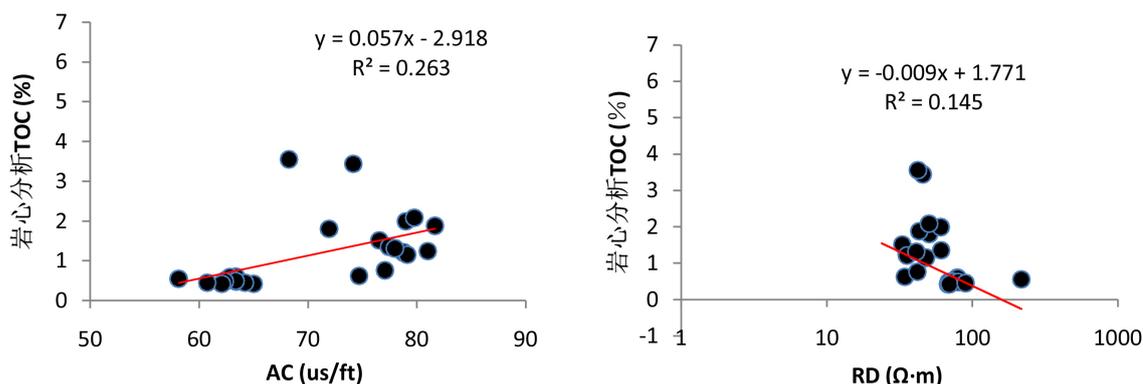


Figure 2. Cross plot of TOC, compensated acoustic and resistivity curves in Qiongzhusi formation core test
图 2. 筇竹寺组岩心实验 TOC 与补偿声波、电阻率曲线交会图

3.2. 体积密度法

体积密度法是在密度曲线对 TOC 敏感性较高的基础上，建立测井密度曲线与岩心 TOC 的拟合关系。该方法在礁石坝、永川和威远地区五峰龙马溪组页岩气储层测井评价中适用性均较好。

通过对邻区页岩气储层 TOC 含量计算统计分析发现，该方法在地层体积密度变化较大时，需要目的地层岩心分析 TOC 值和岩性密度的拟合关系较好。

在研究区内筇竹寺组储层因岩性等因素影响，井眼垮塌较为明显。图 3 可见，JY1 井在目的层段井径变化大，井眼扩大率达 11%，测井仪器推靠臂无法贴合并壁。井筒环境使得研究区内筇竹寺组页岩气储层密度测值明显降低，未能真实反应地层特征。

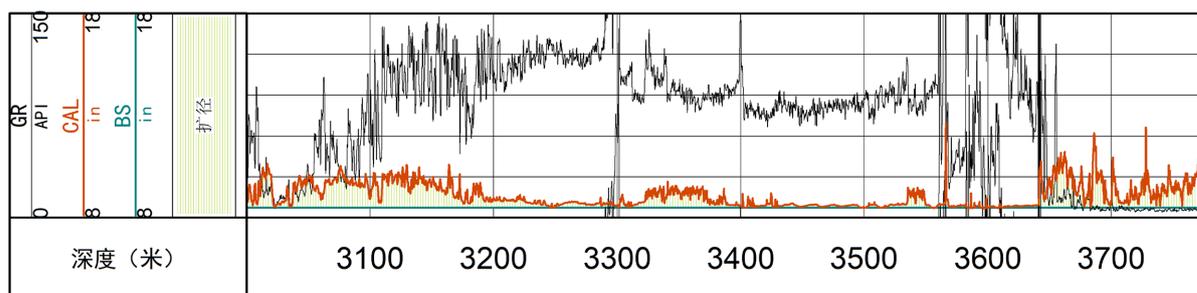


Figure 3. Diameter variation of well JY1 Qiongzhusi formation
图 3. JY1 井筇竹寺组井径变化图

因此，区域内筇竹寺组使用体积密度法计算有机碳含量与岩心分析 TOC 相关关系较差，该方法在研究区内应用效果不理想。

3.3. 自然伽马能谱法

自然伽马能谱法也是比较常用的单一参数回归法。自然伽马能谱测井中铀、钍含量反映地层有机质丰度[8] [9], 可以利用回归分析得到自然伽马能谱测井数据与有机碳含量的关系。页岩有机质一般形成于静水还原环境中[10], 其中干酪根具有较高放射性元素铀, 同时随着泥页岩颜色的加深, 有机质物质成分的增加, 铀含量增高, 钍、钾含量相对降低。(图 4)

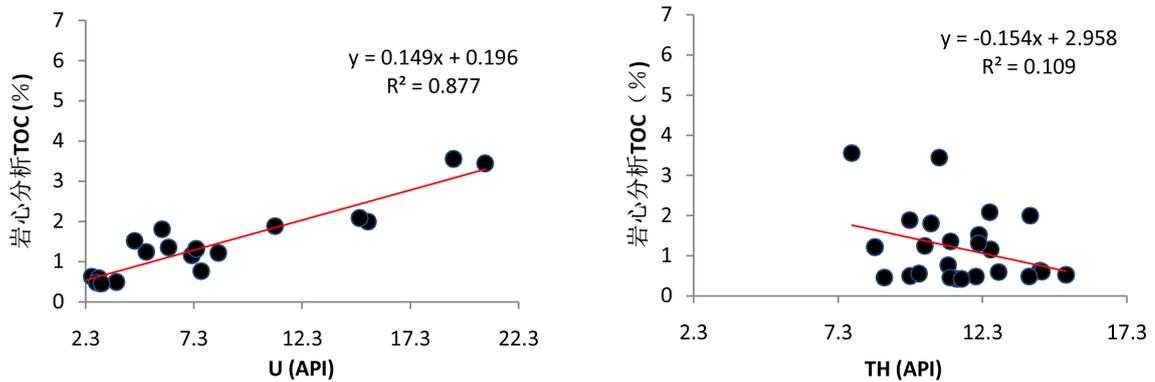


Figure 4. Intersection diagram of TOC and natural energy spectrum logging curves of Qiongzhusi formation
图 4. 筇竹寺组岩心实验 TOC 与自然能谱测井曲线交会图

通过回归分析, 铀与岩心 TOC 回归关系如下:

$$\text{TOC} = 0.1492 * U + 0.1967 \quad R^2 = 0.8777$$

式中 U 为铀测井值, 单位为 ppm。

3.4. 自然伽马指示法

从图 5 可以看到 TOC 含量与自然伽马具有较好的相关关系, 自然伽马可以作为有机质丰富程度的指示参数。自然伽马与岩心 TOC 回归关系如下:

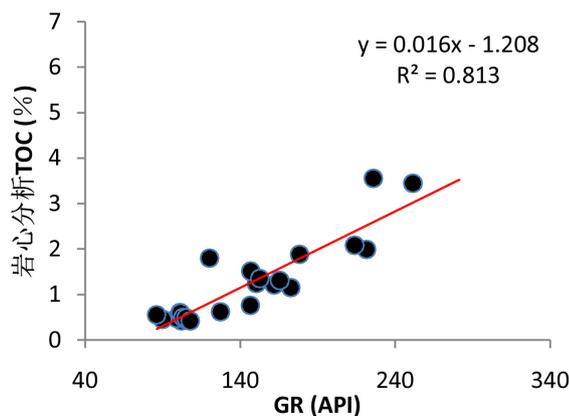


Figure 5. Intersection diagram of TOC and natural gamma curve of Qiongzhusi formation core test
图 5. 筇竹寺组岩心实验 TOC 与自然伽马曲线交会图

$$\text{TOC} = 0.0168 * \text{GR} - 1.2088 \quad R^2 = 0.8133$$

式中 GR 为自然伽马测井值, 单位为 API。

3.5. 多元拟合法

总体来说, 筇竹寺组页岩气储层部分特征上虽然较大程度上反映有机质的富集程度, 但还受到其它较多因素的制约; 为寻找有机质富集程度的指示方法, 较好地消除单一测井因素的影响, 宜采用多元拟合的方法, 建立多元模型。

筇竹寺组页岩气储层的 TOC 含量与自然伽马、铀曲线及声波时差等具有较好的相关关系, 随着 TOC 含量的增加, 其自然伽马增大、声波时差增大。选择总自然伽马与无铀伽马曲线建立了该组地层的 TOC 计算模型。计算结果当 TOC 大于 0.5% 时, 平均相对误差为 15.4%。具体模型为:

$$\text{TOC} = 0.01902 * \text{GR} - 0.01919 * \text{KTH} + 0.2407 \quad (R^2 = 0.892)$$

式中 GR 为自然伽马测井值, 单位为 API; KTH 为无铀伽马测井值, 单位为 ppm。

图 6 为测井计算 TOC 与岩心分析 TOC 的关系图, 左图为总伽马和无铀伽马模型计算 TOC 与岩心分析 TOC 关系图; 两者相关系数高, 相关性好。

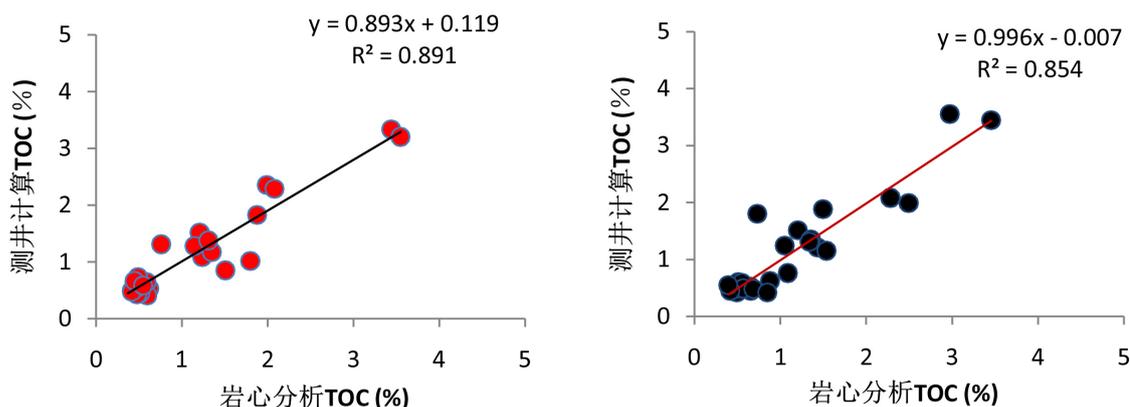


Figure 6. The relationship between TOC and TOC calculated by multivariate fitting method in Qiongzhusi formation
图 6. 筇竹寺组岩心实验 TOC 与多元拟合法计算 TOC 的关系

考虑到区域内部分井未能进行自然伽马能谱测井, 通过自然伽马和孔隙度曲线建立的 TOC 计算的回归模型对比, 选择自然伽马、声波和中子曲线建立的计算模型相关系数最高。具体模型为:

$$\text{TOC} = 0.01 * \text{GR} + 0.096378 * \text{AC} - 0.11796 * \text{CNL} - 4.7938 \quad (R^2 = 0.8188)$$

式中 GR 为自然伽马测井值, 单位为 API; AC 为补偿声波测井值, 单位为 $\mu\text{s}/\text{ft}$; CNL 为补偿中子测井值, 单位为 %。

图 6 右图为声波、中子及自然伽马多元拟合模型计算 TOC 与岩心分析 TOC 关系图, 二者具有较好的相关关系。

4. 效果分析与方法优选

根据以上分析结果, 应用体积密度法、自然伽马能谱法、自然伽马指示法、多元回归分析法方法对 JY1 井 3288~3567 m 筇竹寺组采用多种模型进行 TOC 含量计算(见图 7)。将上述几种方法计算有机碳含量与实验分析进行对比, 从图 5 可看出: 体积密度法计算值整体偏低, 精度差。 $\Delta\log R$ 法计算值低值偏高, 高值偏低。利用自然伽马能谱法和自然伽马指示法效果均较好, 且方法简单, 较好地反应地层 TOC 含量的趋势, 但相对误差偏大, 精度相对较低。从计算结果来看, 在 3291~3303 m 范围内, 自然伽马能谱法计算结果偏小。自然伽马指示法在 3312 m 以后计算结果偏小。总体来看自然伽马指示法计算精度较

自然伽马能谱法高，多元回归分析建立测井解释模型过程中，综合考虑了多测井参数的优点，提高了模型的精度和适用性。总伽马和无轴伽马多元拟合法、自然伽马和声波中子多元拟合法计算出 TOC 含量与岩心实验 TOC 含量均具有较好的一致性。

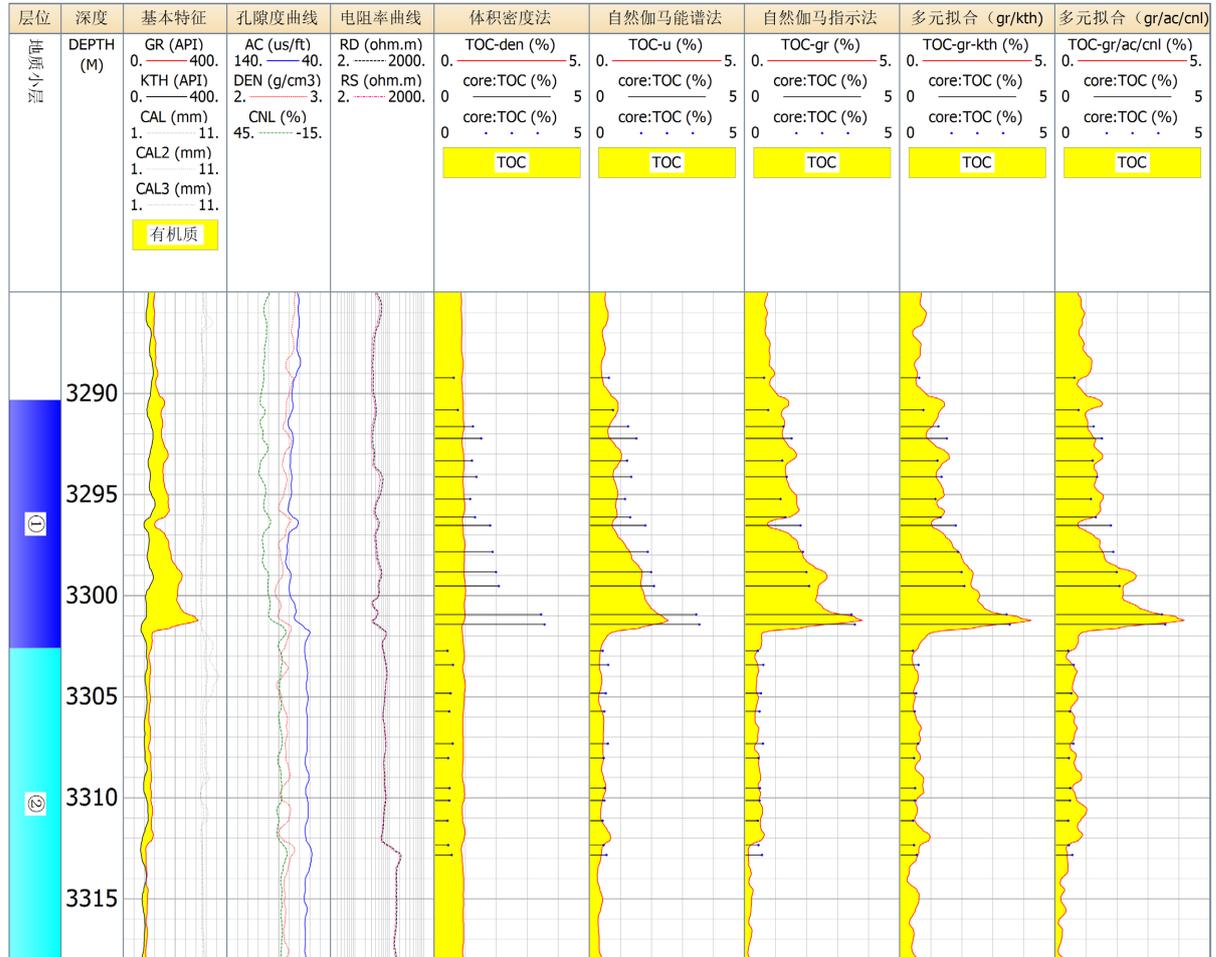


Figure 7. Comparison of TOC calculated by different models and TOC for core analysis in well JY1

图 7. JY1 井不同模型计算 TOC 与岩心分析 TOC 对比

表 1 对上述模型计算结果进行了误差统计结果表明：总伽马和无轴伽马多元拟合法相对误差 15.4%，自然伽马和声波中子多元拟合相对误差 17.7%，自然伽马指示法相对误差 21.5%，自然伽马能谱法相对误差 34.6%， $\Delta\log R$ 法相对误差 44.8%，体积密度法相对误差 54.7%。从误差大小来看，多元拟合法计算 TOC 含量相对其他方法误差略小。

Table 1. TOC error statistics calculated by different models of JY1 well

表 1. JY1 井不同模型计算 TOC 误差统计

方法	多元拟合法 (GR/KTH)	多元拟合法 (GR/AC/CNL)	自然伽马指示法	自然伽马能谱法	$\Delta\log R$ 法	体积密度法
绝对误差(%)	0.21	0.23	0.27	0.38	0.54	0.66
相对误差(%)	15.4	17.7	21.5	31.9	44.8	54.7

从实用性来看,有自然能谱测井资料时,选用总伽马和无铀伽马多元拟合法;考虑开发成本,多数开发生产并未进行特殊测井,仅进行常规测井资料时,采用自然伽马和声波密度测井值多元拟合模型计算 TOC 含量误差相对最小。总体来说,多元拟合法可操作性强,适用性好。

结合图 7 和表 1 误差统计综合分析,总伽马和无铀伽马多元拟合法在研究区内计算结果误差小,解释精度高,验证了总伽马和无铀伽马多元拟合法在川西南地区筇竹寺组页岩气储层 TOC 含量计算的有效性与准确性。

5. 结论

1) 进行了不同 TOC 含量测井计算方法适应性分析,对精度较低模型进行归纳总结。

2) 将 6 种模型计算结果与岩心分析数据进行误差分析,确立了总伽马和无铀伽马多元拟合法为区域上精度最高模型,计算符合率达 84% 以上,且可操作性强,对实验资料及解释人员的依赖程度低。结合以上分析,总伽马和无铀伽马多元拟合法是目前川西南地区筇竹寺组页岩气储层 TOC 含量计算最合适的方法。

参考文献

- [1] 邹才能,董大忠,王社教,等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641-653.
- [2] 王永诗,李政,巩建强,等. 济阳凹陷页岩油气评价方法——以沾化凹陷罗家地区为例[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 83-91.
- [3] 赵圣贤,李冯,刘张. 四川盆地湖相页岩气地质特征与资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 423-428.
- [4] Sondergeld, C.H., New Sham, K.E., Comisky, J.T., et al. (2010) Petrophysical Considerations in Evaluating and Producing Shale Gas Resources. *SPE Unconventional Gas Conference*, Pittsburgh, 23-25 February 2010, 1-34. <https://doi.org/10.2523/131768-MS>
- [5] 运华云,项建新,刘子文. 有机碳测井评价方法及在胜利油田的应用[J]. 测井技术, 2000, 24(5): 372-376.
- [6] 张美玲,李建明,郭战峰,等. 涪陵焦石坝地区五峰组-龙马溪组富有机质泥页岩层序地层与沉积相研究[J]. 长江大学学报(自科版)(中旬), 2015, 12(4): 17-21.
- [7] Fertl, W.H. and Chilingar, G.V. (1988) Total Organic Carbon content Determined from Well Logs. *SPE Formation Evaluation*, 3, 407-419.
- [8] 冉伟,刘向君,吴涛,等. 基于自然伽马能谱的 TOC 评价研究[J]. 西部探矿工程, 2016, 28(3): 50-53.
- [9] 郭龙,陈践发,苗忠英. 一种新的 TOC 含量拟合方法研究与应用[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(6): 951-956.
- [10] 路菁,李军,武清钊,等. 页岩油气储层有机碳含量测井评价方法研究及应用[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(2): 143-147.