

鄂尔多斯盆地延长组页岩有机碳测井解释方法与应用

谢灏辰,于炳松,曾秋楠,冯子齐

(中国地质大学 地球科学与资源学院,北京 100083)

摘要:富有机质页岩中有机质含量是资源潜力评价的重要参数。为了获取研究区未取心井富有机质页岩有机碳含量,试图通过测井解释方法,建立研究区目的层位关于有机碳含量(*TOC*)的数学模型。通过对研究区20口井延长组岩心*TOC*测试结果与相应测井参数相关性分析,发现岩心实测*TOC*值与自然伽马和电阻率的对数呈现较好的正相关性,但与声波时差相关性不明显。据此,利用多元统计方法,建立研究区关于自然伽马和电阻率的对数解释延长组富有机质页岩*TOC*含量的数学模型。根据柳坪177井*TOC*测井解释结果与实测*TOC*误差分析结果,该测井解释模型误差均值为5.35%。利用上述数学模型,对研究区46口未取心井延长组富有机质页岩*TOC*进行计算,并结合20口取心井的测试结果,分析研究区延长组富有机质页岩*TOC*空间分布特征。上述*TOC*分布结果与沉积微相的变化趋势具有良好的吻合性,从侧面表明文中建立的有机碳测井解释模型的可靠性和有效性。

关键词:电阻率;自然伽马;测井解释模型;有机碳含量;页岩气;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE132 **文献标识码:**A

TOC logging interpretation method and its application to Yanchang Formation shales, the Ordos Basin

Xie Haochen, Yu Bingsong, Zeng Qiunan, Feng Ziqi

(School of Earth and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Total organic content (*TOC*) of organic rich shale is an important parameter in resource assessment. In order to predict the *TOC* of shales in the non-cored wells in the study area, this paper established a mathematical model of *TOC* for the target layer through logging interpretation. Based on an analysis of the relationship between the measured *TOC* of cores sampled from the Yanchang Fm in 20 wells and the corresponding logging parameters, we found that the measured *TOC* values are positively correlated with the logarithm of *Rt* and *GR*, but not insignificantly correlated with *AC*. Multivariate analysis method was used to establish a mathematical model for predicting *TOC* of the Yanchang organic-rich shale with the logarithm of *Rt* and *GR*. Its application in the cored Liuping-177 well gave a mean error of 5.35% between the logging interpreted *TOC* and the measured *TOC*. The mathematical model was used in calculation of *TOC* of the Yanchang organic-rich shale in 46 non-cored wells. The spatial distribution of *TOC* of the Yanchang organic-rich shale in the study area was mapped based on these calculation results and the measured *TOC* of additional 20 cored wells. The *TOC* distribution is consistent with the distribution of sedimentary microfacies, verifying the reliability and effectiveness of this method.

Key words: resistivity, gamma ray, logging interpretation model, total organic carbon, shale gas, Ordos Basin

鄂尔多斯盆地是中国内陆的第二大沉积盆地,属于稳定的克拉通盆地。盆地内构造稳定、地层平缓,且断层对气藏的破坏作用较小,有利于油气的成藏。研究区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东南部下寺湾-云岩地区(图1)。鄂尔多斯盆地自下而上主要发育两套富有机质页岩:下部为上古生界石炭系-二叠系海陆过渡相至陆相煤系页岩;上部为中生界三叠系延长组湖相暗色页岩^[1]。本文研究层位为中生界三叠系延长组7段和9段(长7,长9)湖相暗色页岩。前人对中生界

延长组暗色页岩开展大量研究^[2-5],认为上三叠统长7段湖相页岩分布广泛,埋藏深度为1 000~2 000 m,厚度为15~40 m,有机碳含量大于2%,干酪根为I型或II型,生油母质类型具有较高的产烃率,成熟度仍处于排烃阶段,具有很好的页岩气勘探前景。

富有机质页岩中有机质含量(*TOC*)是评价页岩气资源潜力的重要参数。前人在研究区内长7、长9段的*TOC*评价上,采取了直接取样测定其有机质含量^[5-8]。但由于取样条件和测试成本的影响,制约了

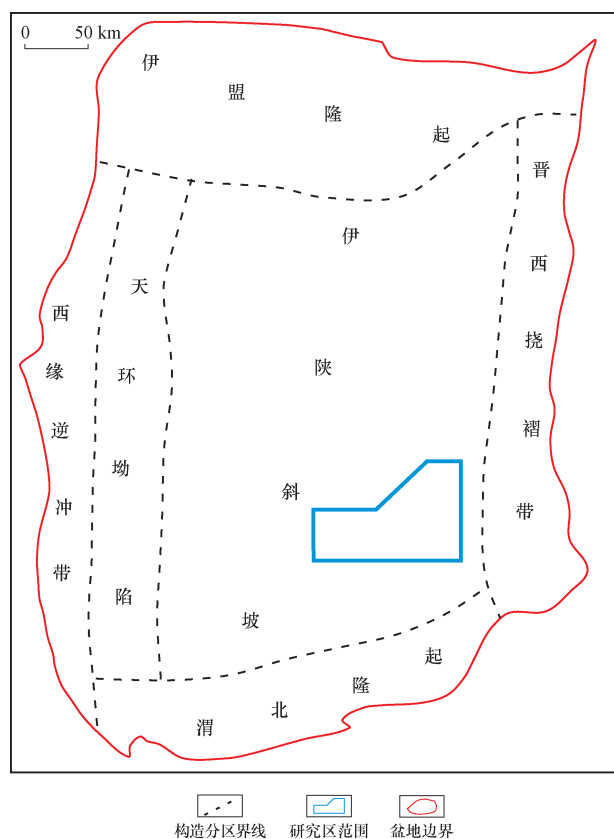


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

TOC 样点的空间分布密度。为了弥补上述不足,笔者利用测井解释的方法,试图建立适合研究区特点的 TOC 测井解释数学模型。

本文以鄂尔多斯盆地东南部下寺湾-云岩地区中生界三叠系长7、长9段富有机质页岩为对象,根据大量实测 TOC 数据,在测井响应值对有机质含量响应敏感性分析的基础上,选择有效测井参数,拟合出利用测井参数估算地层 TOC 的数学模型,从而达到利用测井方法评价其地层有机质含量的目的,为评价延长组湖相页岩的有机质丰度及其空间分布特征提供有效方法。

1 页岩中有机质响应敏感测井参数

测井曲线是岩石物理性质的变化特征的反应,也是用测井曲线评价页岩有机碳含量的理论基础。根据前人研究经验^[9-13],页岩中有机质响应敏感测井参数有:自然伽马(GR),声波时差(AC)和地层真电阻率(R_t)。一般表现为:1)含碳的页岩层往往吸附有较多的放射性元素铀,自然伽马在泥页岩中显示高值,表明其泥质含量高^[14],富有机质页岩自然伽马响应尤为明显;2)在正常压力的地层剖面中,反应泥岩压实程度的声波时差随其埋藏深度的增加而减小,当地层中含有机质时,会促使烃源岩的声波时差大于岩石骨架声波时差,从而造成地层声波时差为高值,有跳跃。但由于

有裂缝存在,使得实际声波时差有时会异常^[15];3)在饱和水的非烃泥页岩中,不含有机质的电阻率与实测电阻率大致相当;而在富含有机质的岩层中,受分散于岩石骨架之中的干酪根影响,地层电阻率会增大,特别是当烃源岩趋于成熟时,生成的大量烃类会占据页岩中的相应孔隙,由于有机质的导电性较差,造成页岩的电阻率明显增大,其他有机质含量少的地区,由于页岩束缚水饱和度高,电阻率表现低值^[16-18]。以上是评价页岩有机碳含量最密切的3个测井参数。

2 测井评价模型的建立

2.1 研究方法

现有的关于利用测井解释来计算 TOC 的模型主要有 $\Delta \lg R$ 法^[19-21],原理来自于 Passey 的 $\Delta \lg R$ 法^[21],它是一个基于声波时差(AC)、电阻率(R_t)以及热变指数(R_o)计算 TOC 的模型。Passey 等^[21]经过大量统计分析后,提出了一个经验公式,即

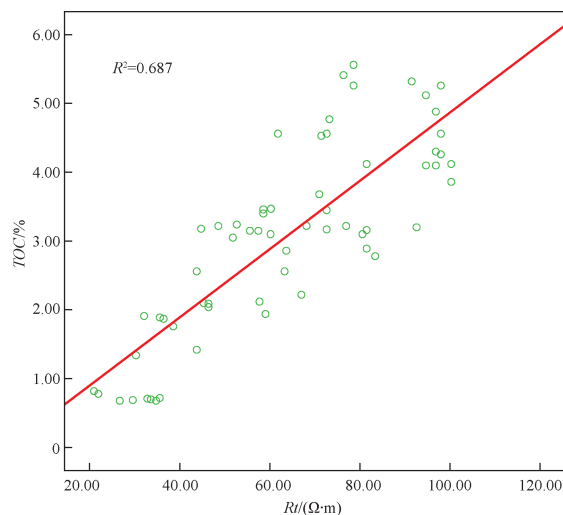
$$TOC = 10^{2.297 - 0.168 LOM} \Delta \lg R_o \quad (1)$$

式中: LOM 为热变指数,反映有机质成熟度,可以由 R_o 计算得出; R_o 为镜质体反射率,%。

$$\Delta \lg R = \lg(R/R_{\text{基线}}) - K(\Delta t - \Delta t_{\text{基线}}) \quad (2)$$

式中: $\Delta \lg R$ 为声波时差、电阻率曲线叠合幅度差; R 为测井仪实测电阻率, $\Omega \cdot m$; Δt 为实测声波时差, $\mu s/m$; $R_{\text{基线}}$ 为非烃源岩对应于 $\Delta t_{\text{基线}}$ 值时的电阻率, $\Omega \cdot m$; $\Delta t_{\text{基线}}$ 为基线声波时差, $\mu s/m$; K 为依赖于每一个电阻率刻度所对应的声波时差的比值。

图2中电阻率(R_t)与 TOC 的相关系数达0.687,相关性较明显,而图3声波时差与 TOC 的相关系数只有0.262,表明研究区内 TOC 和声波时差相关性不明显,所以在研究区内声波时差参数应用于 Passey 的

图2 电阻率(R_t)与 TOC 相关性Fig. 2 Correlation of R_t and TOC

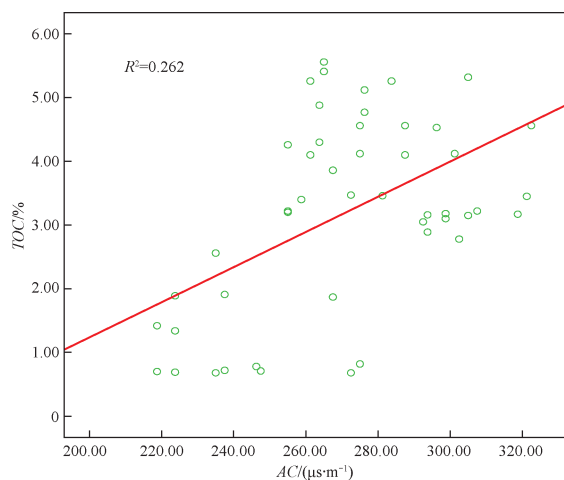


图3 声波时差(AC)与TOC相关性

Fig. 3 Correlation of AC and TOC

$\Delta \lg R$ 法^[21]的TOC计算将存在非常大的误差。因此,为了探寻新的对TOC响应敏感的测井参数,本文对研究区内大量测井参数与相应TOC进行相关性分析,以筛选对TOC响应敏感的测井参数。

2.2 TOC测井响应敏感性分析

为了选择研究区用于TOC测井解释的有效测井参数,对TOC测井响应的敏感性进行了分析,从中挑选出对该地区有机质响应敏感的测井参数,笔者对大量不同深度的页岩岩心样品进行了TOC测定,在此基础上读取了相应深度测井资料中的大量测井数据。这些测井数据包括地层声波时差、真电阻率、自然伽马、中子孔隙度、自然电位、地层密度等。经过初期数据处理,筛选掉了自然电位、地层密度、中子孔隙度和声波时差等一系列与TOC相关性不强的测井参数,选取了自然伽马(GR)以及地层真电阻率(R_t)这两个对TOC敏感性较高的测井参数。

从自然伽马和电阻率与相应TOC之间的相关性分析可见,自然伽马对TOC的相关系数达到了0.679(图4)。对电阻率进行对数变换后,其与TOC的相关性进一步变好(图5),其相关系数达到0.717。根据相关性分析结果,本次研究中选取自然伽马(GR)和电阻率的对数($\lg R_t$)进行关于TOC的模型回归,用以弥补本区使用Passey的 $\Delta \lg R$ 法^[21]中声波时差(AC)与TOC相关性差的不足。

2.3 数学建模及误差分析

2.3.1 数学建模

为了建立测井参数对TOC的解释模型。本文对自然伽马(GR)和电阻率的对数($\lg R_t$)进行关于TOC的多元回归分析,利用最小二乘法拟合出关于TOC的数学模型。以自然伽马(GR)和电阻率的对数($\lg R_t$)

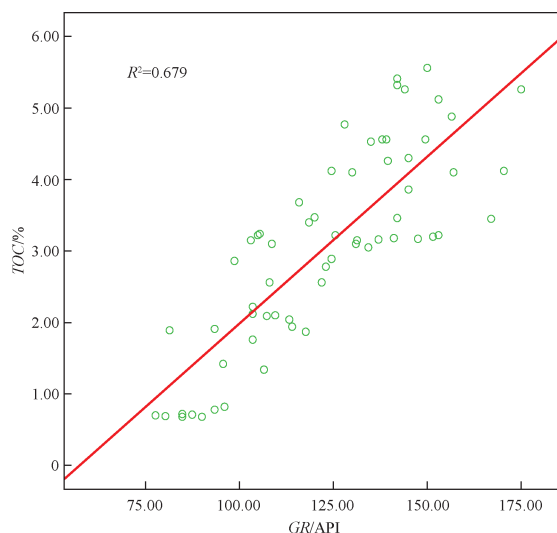
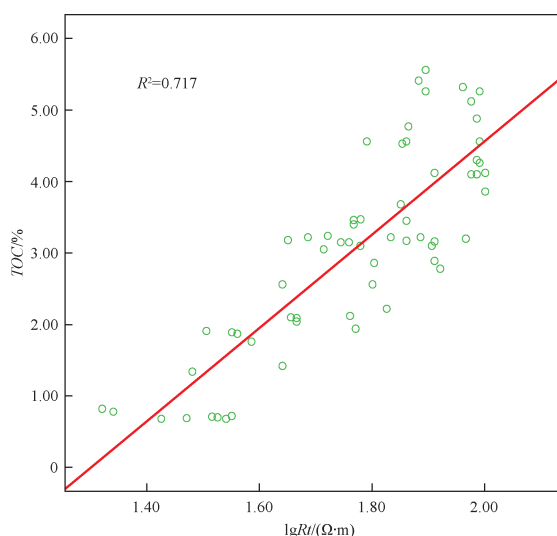


图4 自然伽马(GR)与TOC相关性

Fig. 4 Correlation of GR and TOC

图5 电阻率的对数($\lg R_t$)与TOC相关性Fig. 5 Correlation of $\lg R_t$ and TOC

作为自变量,TOC的值作为因变量,方程如下:

$$TOC = 0.023GR + 4.018\lg R_t - 6.907 \quad (3)$$

式中:GR为自然伽马值,API; R_t 为电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

2.3.2 平面误差分析

利用方程(3)反推 $TOC_{\text{计算值}}$ (利用已知的GR和 $\lg R_t$ 值代入方程求得不同井的 $TOC_{\text{计算值}}$),并且与 $TOC_{\text{实测值}}$ 进行对比,计算其平面误差。具体误差率计算为:

$$\text{误差率} = (TOC_{\text{计算值}} - TOC_{\text{实测值}}) / TOC_{\text{实测值}} \quad (4)$$

综合各探井误差且对其取95%置信度分析,得到期望值为0.0535,且有95%的置信概率使误差均值的期望值的置信区间分布在-0.013~0.1199,于是可以认为对于足够大的样本其理论计算TOC与实测TOC的误差均值在-1.03%~11.99%的可信度为95%,且误差均值为5.35%。

2.4 纵向连续井段误差分析

为了检验该模型在纵向连续井段的精确性,笔者以实测样本最集中的柳评 177 井埋深 1 464 ~1 500 m 井段长 7 段为例,比较理论计算 *TOC* 均值和实测 *TOC* 均值之间的误差。模型的理论误差均值为 5.35%。图 6 为实测 *TOC* 值和计算 *TOC* 值在长 7 段埋深 1 464 ~1 500 m 井段上的比对图,纵向上 *TOC* 计算值(曲线)的均值为 3.962 4,柳评 177 井实测 *TOC*(散点)均值为 4.087,两者误差为 3.049%,与平面误差期望值 5.35%接近。证实了对于足够大的样本该模型理论计算 *TOC* 值的可靠性。

3 应用效果分析

通过 46 口井的测井数据,利用数学模型[公式(1)]分别对其长 7 和长 9 段地层平均 *TOC* 进行计算,并与实测 *TOC* 数据相结合,分析了页岩中有机质含量平面分布特征(图 7,图 8)。

从图中可以看到,利用该模型解释出的地层有机质含量弥补了实测 *TOC* 的数量不足。延长油区下寺湾-云岩区延长组长 7 段 *TOC* 平面分布(图 7)主要表

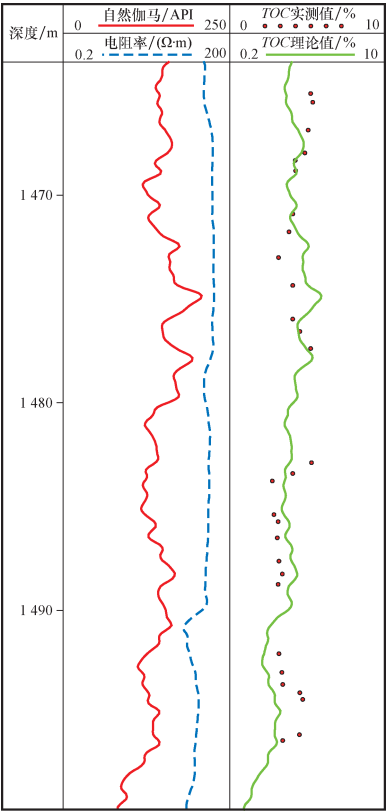


图 6 柳评 177 井 *TOC* 实测值和 *TOC* 理论值对比
Fig. 6 Comparison of the calculated and measured *TOC* of the Well Liuping-177

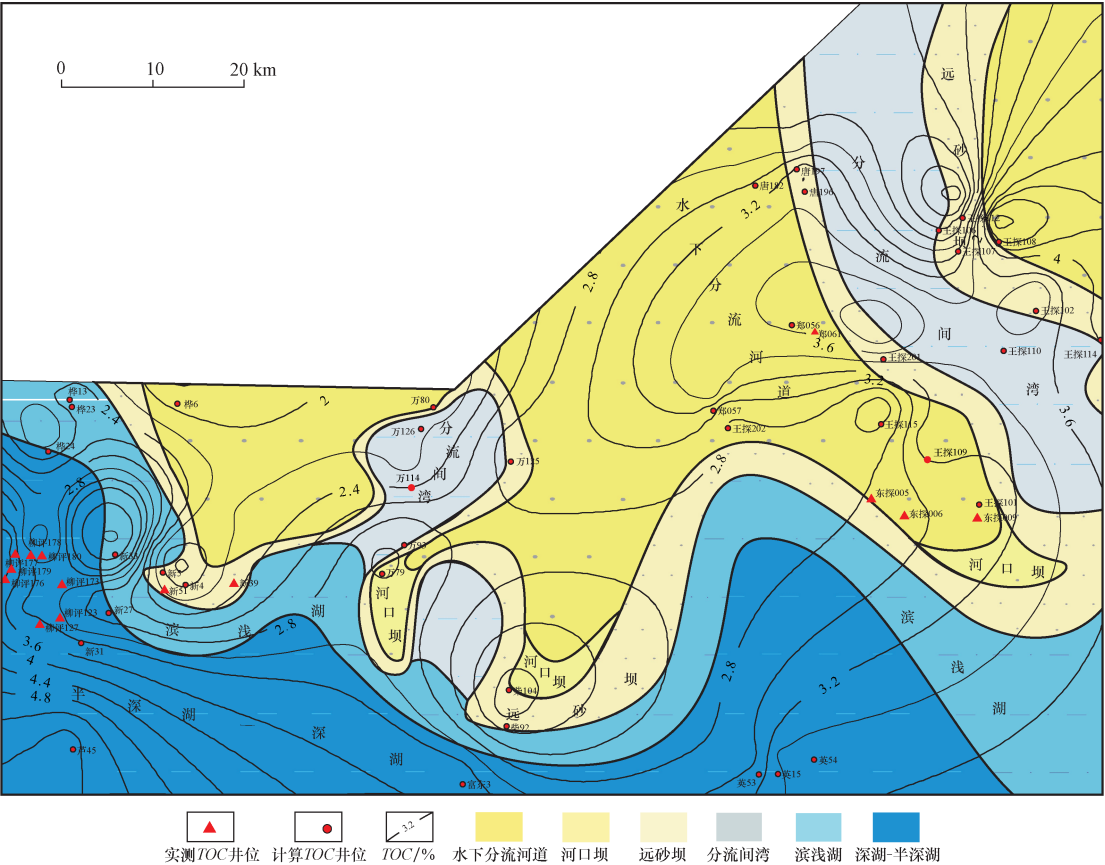


图 7 延长油区下寺湾-云岩区延长组长 7 段 *TOC* 平面分布及其与沉积微相对比

Fig. 7 Plane distribution of sedimentary microfacies and *TOC* of Chang 7 Member in Xiasiwang-Yunyan area, Yanchang oil district

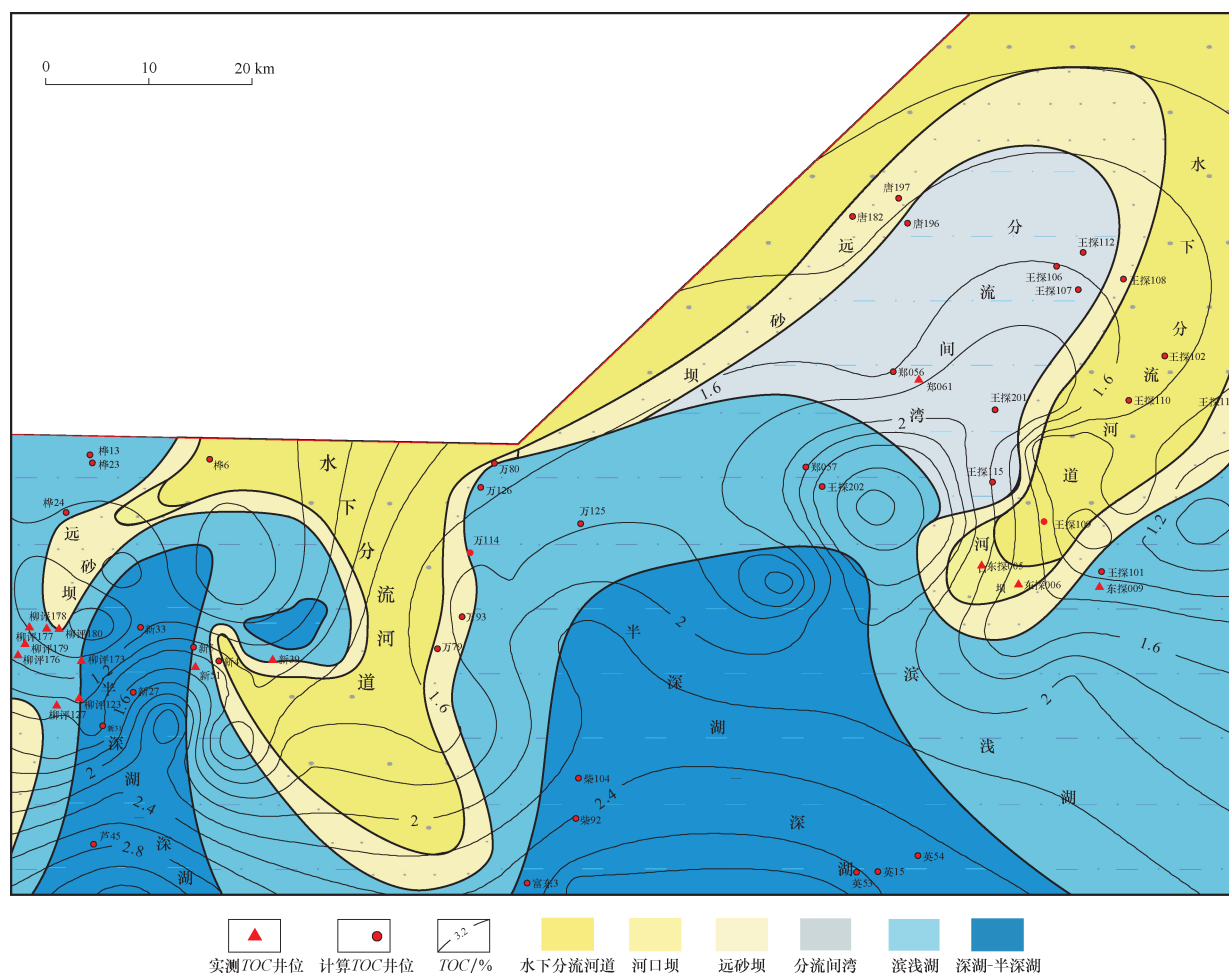


图8 延长油区下寺湾-云岩区延长组长9段 TOC 平面分布及其与沉积微相对比

Fig. 8 Plane distribution of sedimentary microfacies and TOC of Chang 9 Member in Xiasiwan-Yunyan area, Yanchang oil district

现为由南西向北东降低的趋势,相应的沉积微相由深湖-半深湖微相至水下分流河道微相变化,高值点主要集中在南部,在东北方向出现局部高值区与分流间湾沉积微相对应,反应陆源有机质富集致使有机质含量出现高值。延长油区下寺湾-云岩区延长组长9段有机质含量由南向北逐渐减少(图8),相应的沉积微相表现为由深湖-半深湖-分流间湾-水下分流河道的变化趋势,且 TOC 明显低于长7段。上述结果表明 TOC 平面分布总体趋势与沉积微相之间具有良好的匹配关系。

4 结论

利用自然伽马(GR)和电阻率的对数($\lg R_t$)建立了适用于计算研究区页岩 TOC 的数学模型。该模型理论计算 TOC 值与实测 TOC 值的误差均值为 5.35%。经过对柳坪177井长7段埋深1462~1497 m 井段地层实测 TOC 均值与理论计算值对比计算,得出该井实测 TOC 均值与纵向理论计算 TOC 均值的误差为 3.05%,与平面理论误差均值 5.35%相近。利用模型计算的 TOC 平

面分布特征与沉积微相之间具有良好的匹配关系,从侧面表明该测井解释模型的有效性,可指导页岩气勘探方向。

参考文献

- [1] 徐士林,包书景.鄂尔多斯盆地三叠系延长组页岩气形成条件及有利发育区预测[J].天然气地球科学,2009,20(3):460-465.
Xu Shilin, Bao Shujing. Preliminary analysis of shale gas resource potential and favorable areas in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(3): 460-465.
- [2] 王社教,李登华,李建忠,等.鄂尔多斯盆地页岩气勘探潜力分析[J].天然气工业,2011,31(12):40-46.
Wang Shejiao, Li Denghua, Li Jianzhong, et al. Exploration potential of shale gas in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 40-46.
- [3] 张金川,金之钧,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,24(7):15-18.
Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng. Reservoir mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18.
- [4] 张金川,徐波,聂海宽,等.中国页岩气资源勘探潜力[J].天然气工业,2008,28(6):136-140.
Zhang Jinchuan, Xu Bo, Nie Haikuan, et al. Exploration potential of

- shale gas resources in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28 (6): 136–140.
- [5] 潘仁芳, 黄晓松. 页岩气及国内勘探前景展望 [J]. *中国石油勘探*, 2009, 14(3): 1–5.
- Pan Renfang, Huang Xiaosong. Shale gas and its exploration prospects in China [J]. *China Petroleum Exploration*, 2009, 14(3): 1–5.
- [6] 李玉喜, 聂海宽, 龙鹏宇. 我国富含有机质泥页岩发育特点与页岩气战略选区 [J]. *天然气工业*, 2009, 29(12): 115–118.
- Li Yuxi, Nie Haikuan, Long Pengyu. Development characteristics of organic-rich shale and strategic selection of shale gas exploration area in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(12): 115–118.
- [7] 杨少春, 王娜, 李明瑞, 等. 鄂尔多斯盆地崇信地区三叠系延长组烃源岩测井评价 [J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(3): 470–476.
- Yang Shaochun, Wang Na, Li Mingrui, et al. The logging evaluation of source rocks of Triassic Yanchang Formation in Chongxin Area, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(3): 470–476.
- [8] 朱振宇, 刘洪, 李幼铭. $\Delta\lg R$ 技术在烃源岩识别中的应用与分析 [J]. *地球物理学进展*, 2003, 18(4): 647–649.
- Zhu Zhenyu, Liu Hong, Li Youming. The analysis and application of $\Delta\lg R$ method in the source rock's identification [J]. *Progress in Geophysics*, 2003, 18(4): 647–649.
- [9] 张志伟, 张龙海. 测井评价烃源岩的方法及其应用效果 [J]. *石油勘探与开发*, 2000, 27(3): 84–87.
- Zhang Zhiwei, Zhang Longhai. A method of source rock evaluation by well-logging and its application result [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(3): 84–87.
- [10] 尹伟, 郑和荣, 胡宗全, 等. 鄂南镇泾地区延长组油气富集主控因素及勘探方向 [J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(2): 159–165.
- Yin Wei, Zheng Herong, Hu Zongquan, et al. Main factors controlling hydrocarbon accumulation and favorable exploration targets for the Yanchang Formation in Zhenjing area, south Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(2): 159–165.
- [11] 李潍莲, 刘震, 王伟, 等. 镇泾地区延长组八段低渗岩性油藏形成过程动态分析 [J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(6): 845–852.
- Li Weilian, Liu Zhen, Wang Wei, et al. Hydrocarbon accumulation process of Chang-8 low-permeability lithological reservoirs in Zhenjing area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(6): 845–852.
- [12] 钟大康, 周立建, 姚泾利, 等. 储层岩石学特征对成岩作用及孔隙发育的影响——以鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(6): 890–899.
- Zhong Dakang, Zhou Lijian, Yao Jinli, et al. Influences of petrologic features on diagenesis and pore development: an example from the Triassic Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(6): 890–899.
- [13] 时保宏, 姚泾利, 张艳, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 9 油层组成藏地质条件 [J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(3): 294–300.
- Shi Baohong, Yao Jingli, Zhang Yan, et al. Geologic conditions for hydrocarbon accumulation in Chang 9 oil reservoir of the Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(3): 294–300.
- [14] 张凤奇, 严小鳞, 武富礼, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 1 油层组古地貌特征与油气富集规律——以陕北 W 地区为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 619–624.
- Zhang Fengqi, Yan Xiaoyong, Wu Fuli, et al. Paleogeomorphology characteristics and oil accumulation patterns of Chang 1 oil reservoir in the Yanchang Formation, Ordos Basin: a case study of W area in the northern of Shaanxi [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 619–624.
- [15] 白玉彬, 赵靖舟, 赵子龙, 等. 鄂尔多斯盆地志丹地区延长组长 7 致密油成藏条件与成藏特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 631–639.
- Bai Yubin, Zhao Jingzhou, Zhao Zilong, et al. Accumulation conditions and characteristics of the Chang 7 tight oil reservoir of the Yanchang Formation in Zhidan area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 631–639.
- [16] 李爱荣, 王维喜, 武富礼, 等. 鄂尔多斯盆地延安三角洲长 4+5 和长 6 油气聚集模式 [J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 667–671.
- Li Airon, Wang Weixi, Wu Fuli, et al. Oil accumulation patterns of Chang 4+5 and Chang 6 in Yan'an delta, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 667–671.
- [17] 王建民. 鄂尔多斯盆地南部延 7+8 油层组滨浅湖滩坝体系沉积特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 672–678.
- Wang Jianmin. Sedimentary characteristics of the shore-shallow lacustrine beach bar system of Yan 7+8 oil reservoirs in southern Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 672–678.
- [18] 耳闯, 赵靖舟, 白玉彬, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组富有机质泥页岩储层特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 708–716.
- Er Chuang, Zhao Jingzhou, Bai Yubin, et al. Reservoir characteristics of the organic-rich shales of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 708–716.
- [19] Ross D J K, Bustin R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: application of an integrated formation evaluation [J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(1): 87–125.
- [20] Bowker K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: issues and discussion [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 523–533.
- [21] Passey Q R, Creaney S, Kulla J B. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs [J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(5): 1777–1794.

(编辑 张亚雄)