



移动阅读

黄小鹏,杨占龙,张兆辉,等.烃源岩地化参数的测井反演——以雅布赖盆地小湖次凹侏罗系新河组下段为例[J].煤炭学报,2020,45(S1):415-426.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.1521
 HUANG Xiaopeng, YANG Zhanlong, ZHANG Zhaozui. Logging to inversion geochemical parameters of hydrocarbon source rocks: A case study of Jurassic lower Xinhe Formation in Xiaohu sub-sag, Yabulai Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45 (S1): 415-426. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.1521

烃源岩地化参数的测井反演

——以雅布赖盆地小湖次凹侏罗系新河组下段为例

黄小鹏¹,杨占龙¹,张兆辉^{2,3},刘化清¹,黄军平¹,龙礼文¹

(1. 中国石油勘探开发研究院 西北分院,甘肃 兰州 730020;2. 甘肃省油气资源研究重点实验室,甘肃 兰州 730020;
 3. 中国科学院油气资源研究重点实验室,兰州 730000)

摘要:泥岩烃源岩地层中差异压实和生烃增压致使异常高压普遍存在。为了避免烃源岩评价中声波时差去压实校正产生的较大误差,以实测 TOC 含量为模型检验依据,基于岩石有机质的测井岩石物理响应机理及曲线特征,分析发现自然伽马曲线对有机质的响应比较明显且不受地层压实的影响,与深电阻率曲线重叠可以获得较高准确度的有机碳含量,并通过多元非线性回归构建了有机碳含量测井反演模型,并分别从有机碳含量分布和地层压实角度,进行了误差分析。结果表明:模型反演 TOC 结果的整体误差小,在优质烃源岩地层($TOC > 1\%$)的反演误差明显小于传统方法,在差烃源岩地层($TOC < 1\%$)相差不大;在中-强超压带(剩余压力 $> 15 \text{ MPa}$)反演结果较传统方法更加可靠,在弱超压带(剩余压力 $< 15 \text{ MPa}$)二者相差无几。进一步根据自然伽马与深电阻率曲线的叠合距离分别建立了生烃潜量、氢指数的测井反演模型,同时基于深度与热解最大峰温数学统计关系获得热解最大峰温剖面,然后综合利用测井反演的有机碳含量、生烃潜量、热解最大峰温及氢指数,定量评价干酪根类型及有机质丰度,明确各地球化学参数的纵向连续非均质性特征,最后结合烃源岩质量评价标准,解释出单井地层剖面中优质烃源岩的发育厚度。

关键词:测井反演;烃源岩;地球化学参数;叠合距离;小湖次凹

中图分类号:P631.8 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2020)S1-0415-12

Logging inversion geochemical parameters of hydrocarbon source rocks: A case study of Jurassic lower Xinhe Formation in Xiaohu sub-sag, Yabulai Basin

HUANG Xiaopeng¹, YANG Zhanlong¹, ZHANG Zhaozui^{2,3}, LIU Huaqing¹, HUANG Junping¹, LONG Liwen¹

(1. Northwest Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Lanzhou 730020; 2. Key Laboratory of Petroleum Resources, Gansu Province, Lanzhou 730020, China; 3. Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract:The abnormal high pressure is common in the source rock of mudstone because of differential compaction and hydrocarbon generation. In order to avoid the significant error caused by the sonic decompaction correction in hydrocarbon source rock evaluation, it was found that the response of natural gamma logging is obvious for organic and is

收稿日期:2019-11-05 修回日期:2020-03-19 责任编辑:韩晋平

基金项目:甘肃省自然科学基金面上资助项目(17JR5RA313);中国科学院油气资源研究重点实验室开放基金资助项目(KFJJ2016-02);甘肃省油气资源研究重点实验室“十三五”科技创新基金资助项目(135CCJJ20160524)。

作者简介:黄小鹏(1982—),男,湖北随州人,中级工程师,硕士。Tel:0931-8686065,E-mail:huang_xp@petrochina.com.cn

通讯作者:张兆辉(1982—),男,陕西渭南人,助理研究员,博士。Tel:0931-4960837,E-mail:zhangzhaozui_123@163.com

not affected by formation compaction based on the logging rock physical response mechanism and the curve response characteristics. Therefore the organic carbon content of hydrocarbon source rocks can be better obtained than that using traditional methods by the congruent natural gamma and deep resistivity curve. Meanwhile the inversion model of organic carbon content was established by multiple nonlinear regressions. According to the organic carbon content distribution and the formation compaction degree, the inversion model error on organic carbon content was analyzed taking the determined TOC data as the model check normal. Results show that the accuracy of inversion results on organic carbon content is high, especially it is significantly higher than that using traditional methods on the rich quality hydrocarbon source rock (TOC>1%), and has no significant difference on the poor quality hydrocarbon source rock (TOC<1%). On the other hand, the inversion result is more reliable than that of traditional methods in the medium and strong abnormal pressure hydrocarbon source rock (surplus pressure>15 MPa), and there are no significant discrepancies on the normal and slight abnormal pressure (surplus pressure<15 MPa). Then, according to the congruent distance between natural gamma ray curve and deep resistivity curve, the log inversion models of hydrocarbon generation potential and hydrogen index were established respectively, and at the same time, the base was set up. The maximum peak temperature profile of pyrolysis can be obtained from the mathematical statistical relationship between depth and maximum peak temperature of pyrolysis. Then the kerogen type and organic matter abundance can be quantitatively evaluated by using the organic carbon content, hydrocarbon generation potential, maximum peak temperature of pyrolysis and hydrogen index retrieved from logging data, and the vertical continuous heterogeneity characteristics of geochemical parameters can be defined. Finally, according to the quality evaluation criteria of hydrocarbon source rocks, the developed thickness of high quality source rocks at stratigraphic sections in single well can be interpreted.

Key words: logging inversion; hydrocarbon source rocks; geochemical parameters; superposition distance; Xiaohu sub-sag

烃源岩识别评价是油气地质研究的一项核心工作,长期以来国内外学者针对海相、陆相盆地烃源岩开展了大量研究,在烃源岩识别、有机质类型及丰度、演化成熟度等方面取得了许多优秀成果^[1-4],为盆地资源量估计和油气勘探决策提供了可靠的地质依据^[5-6]。烃源岩评价指标以往主要通过岩芯样品热解、孢粉测试等实验手段来准确获取,但受岩心样品限制,难以得到有机质丰度等地球化学参数的纵向连续变化特征,特别是在缺乏钻井取心的研究区,更加难以有效评价烃源岩的地球化学特征^[7-9],直接影响盆地资源量评估的可靠程度。测井信息具有纵向分辨率高、连续准确等优势,可以间接地反映地层岩性及其流体等特征^[10-13],为烃源岩地化参数的纵向连续评价,提供了可靠的资料保障。

当前常用有机质丰度、成熟度和干酪根类型等指标,进行烃源岩的地球化学特征研究。有机碳含量是有机质丰度的主要指标,测井评价技术可分为三大类:①单一测井间接评价方法^[9,14-15],如自然伽马、密度测井等;②多种测井综合评价方法^[16-24],如 $\Delta\lg R$ 及其改进方法、多元回归、神经网络等;③地球化学测井直接反演法^[25-28],如 ECS 测井等。其中以 $\Delta\lg R$ 及其改进方法应用最为广泛,近年有学者虽然对方法中的基线问题提出了较为有效的解决方

案^[29-32],但仍然存在一个关键问题: $\Delta\lg R$ 技术适用于正常压实地层^[30,31],而国内各含油气盆地的主力烃源岩地层往往发育显著的异常高压,声波时差明显增大^[13,33],致使与电阻率曲线叠合构成的幅度差,不能准确地反映有机碳含量的实际变化趋势。同时,目前干酪根类型和成熟度指标的测井评价方法较少,仅有个别学者进行了初步探讨^[8,34-35]。

因此,为了弥补 $\Delta\lg R$ 方法的不足,提高有机碳含量的测井评价准确度,需要进一步建立生烃潜量、氢指数、最高热解温度等关键地球化学参数的测井反演模型。笔者以雅布赖盆地小湖次凹新河组下段深灰色、灰黑色泥岩为例,利用岩石热解实验数据和常规测井信息,基于测井曲线响应机理,扩展应用曲线重叠法反演获取烃源岩地球化学参数剖面,以期深化测井信息评价地球化学参数的思路与方法,对其他盆地烃源岩以及泥页岩评价具有借鉴意义。

1 研究区概况

雅布赖盆地是在阿拉善地块之上发育的中新生代沉积盆地,南以北大山为界与潮水盆地相连,东抵巴彦乌拉山与巴音浩特盆地相通,西北以雅布赖山为界与银额盆地相邻,面积约 $1.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地由东部隆起和西部坳陷 2 个一级构造带,西部坳陷进一

步划分为南部萨尔台凹陷、北部红杉湖凹陷及黑茨湾凸起3个二级构造带(图1)。小湖次凹位于南部萨尔台凹陷中部,经历了断陷期和拗陷期2个演化阶

段,自下而上发育中侏罗统青土井组、中侏罗统新河组、上侏罗统沙枣河组、白垩系、古近系—新近系及第四系。

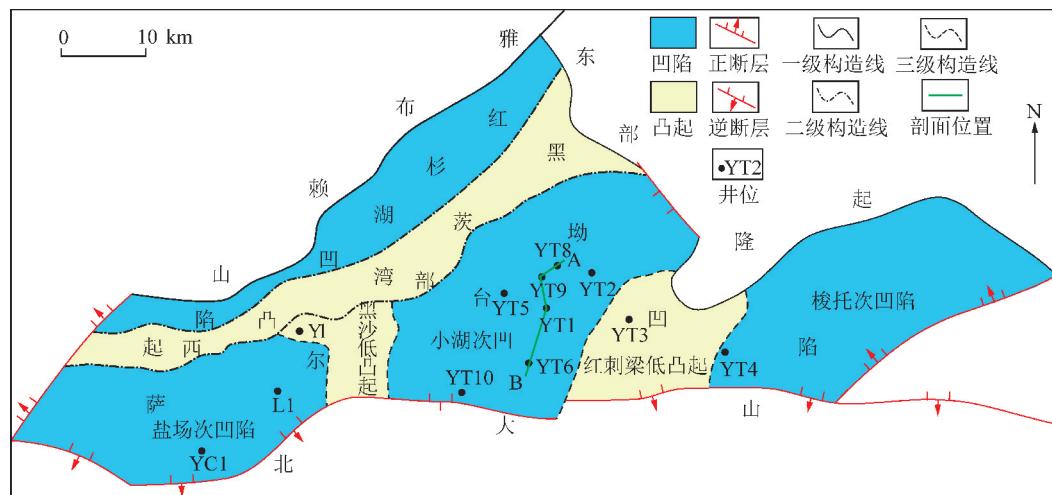


图1 研究区构造位置

Fig. 1 Structural location of study area

目前雅布赖盆地勘探程度整体较低,钻井不足20口,小湖次凹侏罗系烃源岩样品的纵向采样间隔为10~50 m。沉积研究表明^[36~38]:小湖次凹新河组沉积时期为湖盆主断陷期,广泛发育半深湖—深湖相环境,在三角洲前缘、前三角洲及半深湖—深湖相发育厚—巨厚深灰色、灰黑色泥岩,形成较好的烃源岩层;同时沉积压实过程中,由于孔隙流体排出受阻,加之有机质向烃类的转化,致使新河组烃源岩中普遍存在异常超压现象^[39]。研究表明:新河组下段纵向上发育4层超压异常带,剩余压力随着地层埋深的增大逐渐增大,主要分布在12~20 MPa,最高达25 MPa^[39]。因此,可利用测井信息评价烃源岩时必须排除异常压力对测井响应的影响。热解实验研究表明^[40~43]:新河组烃源岩有机碳含量分布在0.18%~6.69%,平均1.23%;氢指数平均为221.8 mg/g,最高达到819 mg/g,干酪根同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为-26‰,最轻者达-32‰,以Ⅱ型为主,存在一定数量的Ⅰ型,具有较强的生烃潜力。有机质基本处于成熟阶段,具有很好的油气生成能力,是雅布赖盆地小湖次凹主力烃源岩层。

2 测井信息反演地球化学参数

2.1 岩石物理基础

沉积盆地中,原始有机质伴随矿物质同时沉积,后期在漫长的地质历史时期经历复杂的成岩和构造作用,通过腐泥化、腐植化过程,随着干酪根的形成及

成熟度的增加,生成油气并排出。富含有机碳的泥岩地层组分主要包括岩石骨架、固体有机质以及孔隙流体(烃类、水)。非烃源岩由岩石骨架和饱含水孔隙两部分组成,未成熟烃源岩包括固体有机质、岩石骨架和饱含水孔隙,而成熟烃源岩的部分有机质转化为液态烃,并运移进孔隙与地层水共同充填孔隙(图2)。测井曲线对有机质、岩石骨架和孔隙流体物理性质差异的响应,是利用测井信息反演烃源岩地球化学参数的基础。

泥岩地层概念模型	自然伽马	声波时差	深电阻率	密度	地层解释
岩石骨架 饱含水孔隙					非烃源岩
有机质 岩石骨架 饱含水孔隙					未熟 烃源岩
有机质 含烃 岩石骨架 孔隙 含水 孔隙					成熟 烃源岩

图2 岩石组成及测井响应特征示意

Fig. 2 Schematic diagram of rock composition and logging response

一般情况下,伽马放射性对固体有机质最为敏感,因此自然伽马测井值越大表明含有更多的固体有机质,随着有机质不断成熟并逐渐转化为液态烃进入孔隙,自然伽马曲线值则会小幅降低^[44~46]。同时,自然伽马曲线受地层压实和井眼的影响较小^[1,23]。声

波测井曲线一般随着埋藏深度的增加而减小,当地层中富含有机质或油气时,由于干酪根的声波时差远大于岩石骨架,因此会造成声波时差增加,但要注意黏土含量及颗粒间压实程度的影响。同时,泥岩具有良好的导电性(岩石骨架及孔隙内地层水均导电)^[47],电阻率值一般较低。但对于富含有机质的泥岩地层,干酪根和油气使得电阻率明显增大,因此成熟烃源岩的电阻率曲线表现为高异常^[14,45-46]。其次,密度曲线随着有机质的增多而呈减小趋势,但密度测井受井眼及测井环境影响较大^[1,23]。

2.2 有机碳含量

有机碳含量(TOC)是反映有机质丰度最主要的指标,能指示泥岩地层有机质丰度非均质性的变化规律。曲线叠合法的核心是利用对有机质敏感的两条测井曲线之间的叠合距离反映有机碳含量^[1,16,45]。因此,原则上对有机质有响应的测井曲线都可以利用该方法评价有机碳含量。目前最常用的是深电阻率和声波时差曲线组合,即传统 $\Delta \lg R$ 及扩展方法,在正常压实烃源岩地层中可以取得良好效果,但对于异常压力地层而言,测井反演 TOC 准确性较差,数据分布较离散,相关性较低(图 3)。由测井响应原理可知,自然伽马曲线主要反映放射性元素铀、钍、钾的含量,其中铀主要来自于固体有机质,钍和钾主要与泥质有关,且不受泥岩压实的影响。

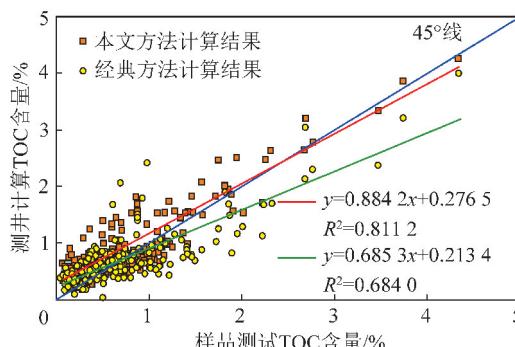


图 3 测井计算 TOC 含量准确性分析

Fig. 3 Accuracy analysis of the calculating TOC content

因此,本次研究将传统 $\Delta \lg R$ 模型中的声波时差曲线(Δt)替换为自然伽马曲线(GR),并假设模型中的叠合系数为 k ,则 $\Delta \lg R$ 可确定为

$$\Delta \lg R = \lg(R_i/R_{ij}) + k(\text{GR} - \text{GR}_j) = \lg R_i - \lg R_{ij} + k\text{GR} - k\text{GR}_j \quad (1)$$

式中: R_i 为电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; GR 为自然伽马, API; R_{ij}, GR_j 分别为深电阻率曲线和自然伽马的基线值, $\Omega \cdot \text{m}$ 。

对于某目的层来说,曲线基线值一般为固定值,因此式(1)中 $\lg R_i, k\text{GR}_j$ 为常数,故式(1)可简化为

$$\Delta \lg R = \lg R_i + k\text{GR} + c \quad (2)$$

同时,某研究区的同一套烃源岩地层有机质成熟度的变化一般不大,所以传统 $\Delta \lg R$ 模型中的 $10^{(2.297-0.168 \text{LOM})}$ 可视为常数(LOM 为热度指数),记为 A 。因此

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

将式(2)带入式(3)可得

$$\text{TOC} = A(\lg R_i + k\text{GR} + c) + \Delta \text{TOC} =$$

$$A\lg R_i + Ak\text{GR} + Ac + \Delta \text{TOC} \quad (4)$$

式中 $A, k, c, \Delta \text{TOC}$ 均为常数,可进一步简化为

$$\text{TOC} = AR_i + B\text{GR} + C \quad (5)$$

其中, A, B, C 为拟合系数。可见,只需自然伽马、电阻率曲线即可反演获得连续井段的有机碳含量剖面,无需确定曲线基值及叠合系数,操作简捷易实现。

利用研究区 2 口井 201 个 TOC 含量测试数据(表 1)以及对应的测井曲线值,通过多元非线性回归,得到 TOC 含量测井反演模型为

$$\begin{aligned} \text{TOC} &= 0.039R_i + 0.013\text{GR} - 1.1537, \\ R &= 0.9006 \end{aligned} \quad (6)$$

为了验证反演模型的准确性,将计算结果与测试结果进行对比(图 3),发现数据点围绕 45° 对角线分布,且趋势线与对角线夹角较小,表明计算结果的准确度更高。同时与经典方法计算结果进行对比分析(图 3),可以发现当有机碳含量小于 1% (一般~差烃源岩)^[41-43] 时,两种方法的计算结果相差不大且与测试结果误差较小,平均相对误差分别为 16.6%、18.3%;但当有机碳含量大于 1% (好~优质烃源岩)^[41-43] 时,经典方法的计算结果明显不如本文方法,且普遍小于测试结果,平均相对误差为 36.3%,而本文方法为 15.3%。可见,本文方法的整体应用效果较好,特别是对于好烃源岩而言,有机碳含量的反演精度更高,这对于勘探研究中好烃源岩评价具有重要的现实意义。

2.3 生烃潜量

生烃潜量(PG)是岩石中残留烃(S_1)与热解烃(S_2)之和,是烃源岩评价的另一个重要参数,主要通过热解实验获得,测井评价的相关报道较少。大量热解实验分析数据表明,烃源岩生烃潜量随着有机碳含量的增加呈现明显的增大趋势,所以个别学者直接利用二者的统计关系计算生烃潜量^[8,32,34-35]。需要

注意的是测井计算有机碳含量时本身存在不同程度的误差,据此进一步计算生烃潜量会致使计算结果与测试结果具有较大的误差。但是分析参考文献^[34~35]中的应用实例,发现有机碳含量、热解烃、残留烃随着

自然伽马、深电阻率以及声波时差、中子曲线的增大呈现整体增大的趋势。因此,为了最大限度地减小计算误差,本次研究直接建立测井曲线与生烃潜量的数学关系,反演获取纵向连续剖面。

表 1 新河组下段深灰色泥岩地球化学参数部分测试结果

Table 1 Partial tested geochemical parameters of charcoal grey mudstone in the Lower Xinhe Formation

样品编号	深度/m	TOC 含量/%	最高热解温度	游离烃	热解烃	生烃潜量	氢指数
			T _{max} /℃	S ₁ /(mg·g ⁻¹)	S ₂ /(mg·g ⁻¹)	PG/(mg·g ⁻¹)	HI/(mg·g ⁻¹)
G-49	2 481.0	1.06	440	0.38	1.87	2.25	176
S-48	2 492.0	0.82	448	0.16	0.54	0.70	66
S-47	2 512.0	0.96	448	0.28	1.33	1.61	139
S-45	2 524.0	0.73	436	0.06	1.45	1.51	199
G-44	2 547.0	0.79	443	0.24	1.57	1.81	199
S-43	2 573.0	1.57	441	1.35	6.00	7.35	382
S-41	2 588.0	0.73	442	0.14	1.04	1.18	142
G-04	2 601.8	0.40	476	0.03	0.15	0.18	38
G-40	2 624.0	0.97	449	0.28	1.10	1.38	113
S-39	2 634.0	0.70	450	0.12	0.43	0.55	61
S-38	2 649.0	0.64	444	0.15	0.77	0.92	120
S-37	2 661.0	0.76	446	0.31	1.28	1.59	168
S-35	2 682.0	2.25	451	1.17	9.16	10.33	407
S-33	2 700.0	1.04	444	0.48	3.60	4.08	346
G-01	2 714.4	0.44	446	0.07	0.36	0.43	82
S-32	2 734.0	0.54	442	0.13	0.65	0.78	120
S-31	2 741.0	0.70	447	0.23	1.28	1.51	183
S-30	2 760.0	0.69	444	0.14	1.06	1.20	154
S-28	2 783.0	0.41	455	0.08	0.45	0.53	110
S-27	2 797.0	0.33	443	0.07	0.44	0.51	133
G-26	2 807.0	0.72	451	0.15	0.95	1.10	132
S-25	2 841.0	0.88	464	0.19	1.04	1.23	118

上文研究可知自然伽马与深电阻率曲线组合,较声波时差、中子曲线更适用于异常压力烃源岩评价。借鉴 $\Delta \lg R$ 技术将非烃源岩段的自然伽马、电阻率曲线按照一定的原则重叠后^[1,16],二者在烃源岩地层会形成明显的幅度差,即叠合距离(ΔL),数学计算公式为

$$\Delta L = \lg(R_i/R_{ij}) + m(GR - GR_j) \quad (7)$$

式中, m 为叠合系数。

由式(1),(3),(7)可得

$$TOC = A\Delta L + \Delta TOC \quad (8)$$

所以

$$\Delta L = (TOC - \Delta TOC)/A \quad (9)$$

由于 $A, \Delta TOC$ 均为常数,所以式(9)可简化为

$$\Delta L = D TOC \quad (10)$$

将式(10)代入式(7),可得

$$D TOC = \lg(R_i/R_{ij}) + m(GR - GR_j) \quad (11)$$

由于式(11)中 D 为常数,实际操作中方程左边可视为有机碳含量,并不影响 m 的拟合。因此式(11)可进一步推导为

$$TOC - \lg R_i = mGR + \lg R_{ij} - mGR_j \quad (12)$$

其中, $\lg R_{ij}, mGR_j$ 为常数。因此,式(12)可写为

$$TOC - \lg R_i = mGR + E \quad (13)$$

式中, E 为常数。因此, m 可利用有机碳含量的实验测试值和对应深度的深电阻率、自然伽马曲线,通过线性拟合方法确定,即为该线性方程的斜率(图 4)。

对于雅布赖盆地小湖次凹新河组下段,当自然伽马曲线的左右刻度设置为 1 000~20 API、深电阻率曲线的左右刻度设置为 0.03~3 000 Ω·m 时,两条曲线在非烃源岩段重合,并逐点计算叠合距离 ΔL ,其中叠合系数 m 为 0.006 2(图 4),资料点来源于 2 口井 201 个测试数据。结合热解分析生烃潜量(PG)发现,叠合距离与生烃潜量具有良好的相关性(图 5),

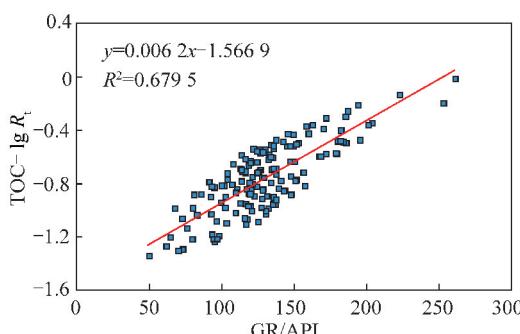
图4 新河组下段深电阻率-自然伽马曲线叠合系数 m 分析

Fig. 4 Congruent coefficient analysis of deep resistivity and natural gamma in the Lower Xinhe Formation

据此建立生烃潜量(PG)的测井反演模型即为二者的数学统计关系,数学表达式为

$$PG = 0.095e^{2.714\Delta L}, R = 0.9357 \quad (14)$$

式中:PG为生烃潜量,mg/g; ΔL 为自然伽马曲线与深电阻率曲线的幅度差。

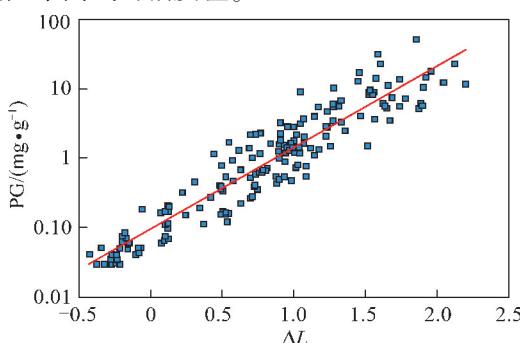


图5 新河组下段烃源岩生烃潜量测井计算模型

Fig. 5 Logging model of potential hydrocarbon generation amount in the Lower Xinhe Formation

2.4 干酪根类型

干酪根是沉积岩中有机质的主体,在不同的沉积环境,不同来源的有机质形成的干酪根,化学性质和生烃潜力具有较大差别,类型识别是烃源岩评价的重要内容。不同类型的干酪根具有不同的热演化轨迹,根据岩石热解数据中的最高热解峰温(T_{max})、氢指数(HI)的分布特征将干酪根划分为Ⅰ型、Ⅱ₁型、Ⅱ₂型和Ⅲ型4类。因此,为了利用测井信息定量识别干酪根类型,必须获得 T_{max} 、HI两个关键参数。

一般而言,最高热解峰温(T_{max})随着深度的增加呈现增大趋势^[8,34]。因此,将雅布赖盆地小湖次凹新河组下段2口井201块岩石样品的热解分析 T_{max} 和对应深度进行拟合,即可得到 T_{max} 的测井解释模型为

$$T_{max} = 4 \times 10^{-6}H^2 - 0.0047H + 432.98, R = 0.8992 \quad (15)$$

式中, H 为深度,m; T_{max} 为最高热解峰温,℃。

石油天然气行业标准中根据岩石热解分析方法

提出的氢指数(HI)计算公式为

$$HI = \frac{S_2}{TOC} \times 100\% \quad (16)$$

其中,HI为氢指数,mg/g;TOC为有机碳含量,%; S_2 为热解烃,mg/g。可以看出,HI与 S_2 呈现正相关,与TOC负相关,个别学者^[8,34]以此公式为模型,通过测井计算的 S_2 、TOC并计算出HI,但误差较大。

假设式(16)中TOC为测井反演结果,式(5)表明其与自然伽马、深电阻率曲线密切相关。同时,岩石热解分析数据显示,绝大部分样品的热解烃(S_2)占生烃潜量($S_1 + S_2$)的80.0%~98.8%,平均为88.92%(图6)。因此,根据上文研究成果认为 S_2 与曲线叠合距离(ΔL)也应具有明显的单调相关特征,据此推断HI与深电阻率、自然伽马曲线应满足函数关系。实际资料统计证实,HI随 ΔL 的增大表现为明显的增大趋势(图7),且具有较高的相关性。即得到

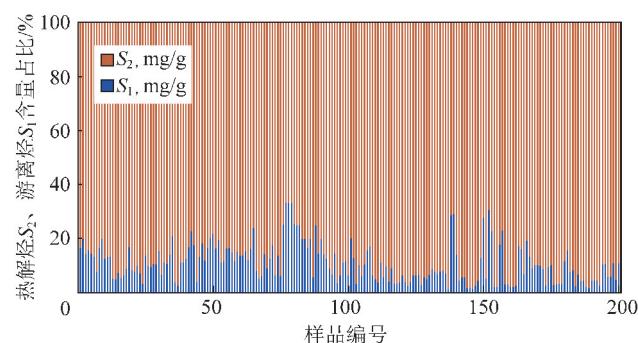


图6 新河组下段烃源岩生烃潜量测试结果

Fig. 6 Test results of potential hydrocarbon generation amount in the Lower Xinhe Formation

HI测井反演模型为,

$$HI = 34.678e^{1.5506 \times \Delta L}, R = 0.9046 \quad (17)$$

式中:HI为氢指数,mg/g; ΔL 为自然伽马曲线与深电阻率曲线的叠合距离。

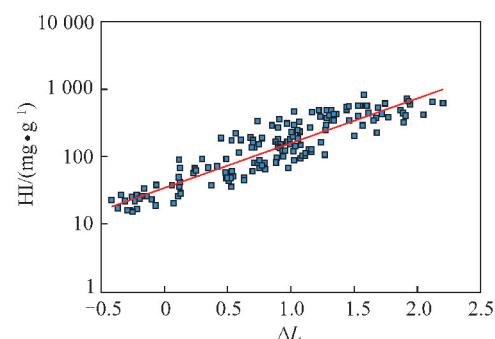


图7 新河组下段烃源岩氢指数测井计算模型

Fig. 7 Logging model of hydrogen index in the Lower Xinhe Formation

直接利用测井曲线信息反演HI,操作简单易实现,而且有效地消除了测井计算 S_2 、TOC过程中的双

重误差,可以提高测井反演精度和准确度。最后基于测井反演的最高热解峰温(T_{max})及氢指数(HI),利用HI- T_{max} 图版定量解释干酪根类型。

2.5 有机质成熟度

成熟度是评价烃源岩的重要参数,目前常用镜质体反射率(R_0)和热解最大峰温(T_{max})。由于缺乏镜质体反射率实验数据,因此本次研究基于式(15)反演的 T_{max} 值,通过邬立言等^[48]的“ T_{max} 划分有机质成熟度界限表”逐点解释有机质成熟度。 $T_{max}>435$ °C的有机质为成熟有机质,其中435~455 °C为成熟阶段,455~490 °C为高成熟阶段,>490 °C为过成熟阶段。

3 应用实例及效果分析

采用上述烃源岩地球化学参数的反演方法和解释模型,获得雅布赖盆地小湖次凹新河组下段烃源岩有机碳含量、生烃潜量、热解最大峰温、氢指数、有机

质成熟度等参数的纵向连续剖面及干酪根类型,并将结果反映在综合柱状剖面图上。

YT1井位于小湖次凹近中心位置,新河组下段烃源岩发育3层中-弱程度异常超压带(图8,剖面位置如图1所示),图9为该井烃源岩地化参数测井评价综合柱状剖面图。第1~3道分别为地层道、深度道和录井岩性道,第4道为测井计算泥质含量剖面、声波时差曲线道,第5道为自然伽马、深电阻率曲线叠合道,第6~9道分别为岩石热解分析有机碳含量、生烃潜量、热解最高峰温、氢指数与测井反演结果对比道,第10道为测井解释干酪根类型与砂岩储层叠合道,第11道为有机质成熟度结果,第12道为烃源岩综合评价结果与砂岩储层叠合道。由于烃源岩和储层段中都存在地化参数的测井反演结果,为了获得烃源岩评价结果,综合应用录井岩性和测井计算泥质含量曲线排除砂岩储层段数据。一般情况下,泥质含量

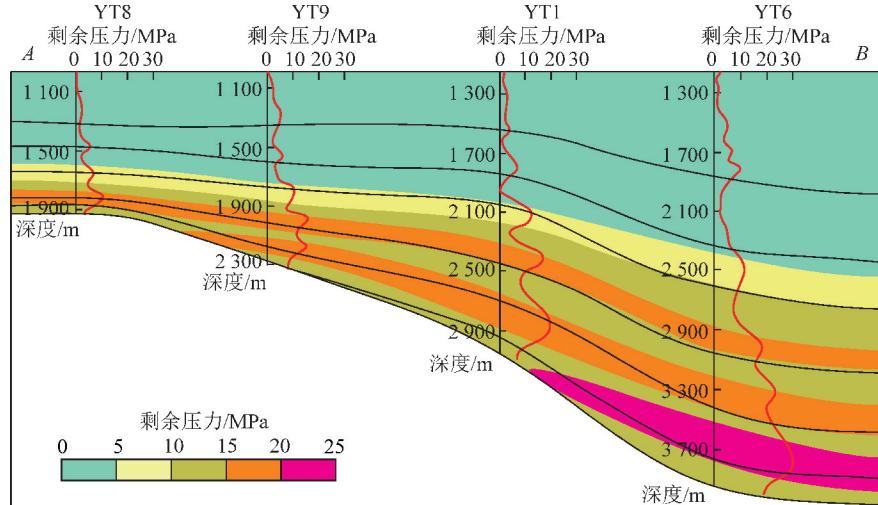


图8 YT8-YT6井新河组下段剩余压力剖面(据文献^[39])

Fig. 8 Surplus pressure profile of the Lower Xinhe

Formation from YT8 to YT6^[39]

小于40%时为储层^[45]。

由图8,9可以看出,YT1井新河组中上部的两层异常超压带较弱,对声波曲线的影响较小,所以经典方法和本文方法的有机碳含量计算结果相差不大,与实际测试结果的相对误差分别为16.1%,16.8%;而下部较强的异常超压带对声波曲线的影响较大,使得2种方法的有机碳含量计算结果存在较大差异(图3,9),其中经典方法的相对误差平均为37.4%,而本文方法的相对误差分布在3.0%~23.1%,误差平均值为20.1%、中值为14.8%,较经典计算方法更为可靠。进一步对比其他地化参数的测井反演结果与岩石热解分析值。很明显,生烃潜量(PG)、最高热解峰温(T_{max})、氢指数(HI)等参数的反演曲线与实测数据吻合程度较高(图10),平均相对误差分别为23.6%,

14.2%,18.9%。可见,测井反演的地化参数具有较高的准确性,方法能够满足烃源岩的精细评价需求。

同时利用测井反演的 T_{max} 参数快速解释有机质成熟度,然后结合测井反演的HI参数,通过HI- T_{max} 图版逐点解释有机质类型,得到有机质类型及成熟度的纵向连续剖面(图9)。可以看出,YT1井新河组下段的烃源岩干酪根类型以II₁、II₂型为主,厚度427.8,47.7 m,其次为I型,厚度123.6 m;有机质整体上进入成熟演化阶段。最后参照胡见义等^[49]的陆相泥质烃源岩有机质丰度评价标准,根据测井反演结果综合评价烃源岩质量及其累计厚度:好烃源岩118.8 m、较好烃源岩404.1 m、较差烃源岩72.7 m、非烃源岩3.5 m。需要指出的是,具体实施过程中测井分层厚

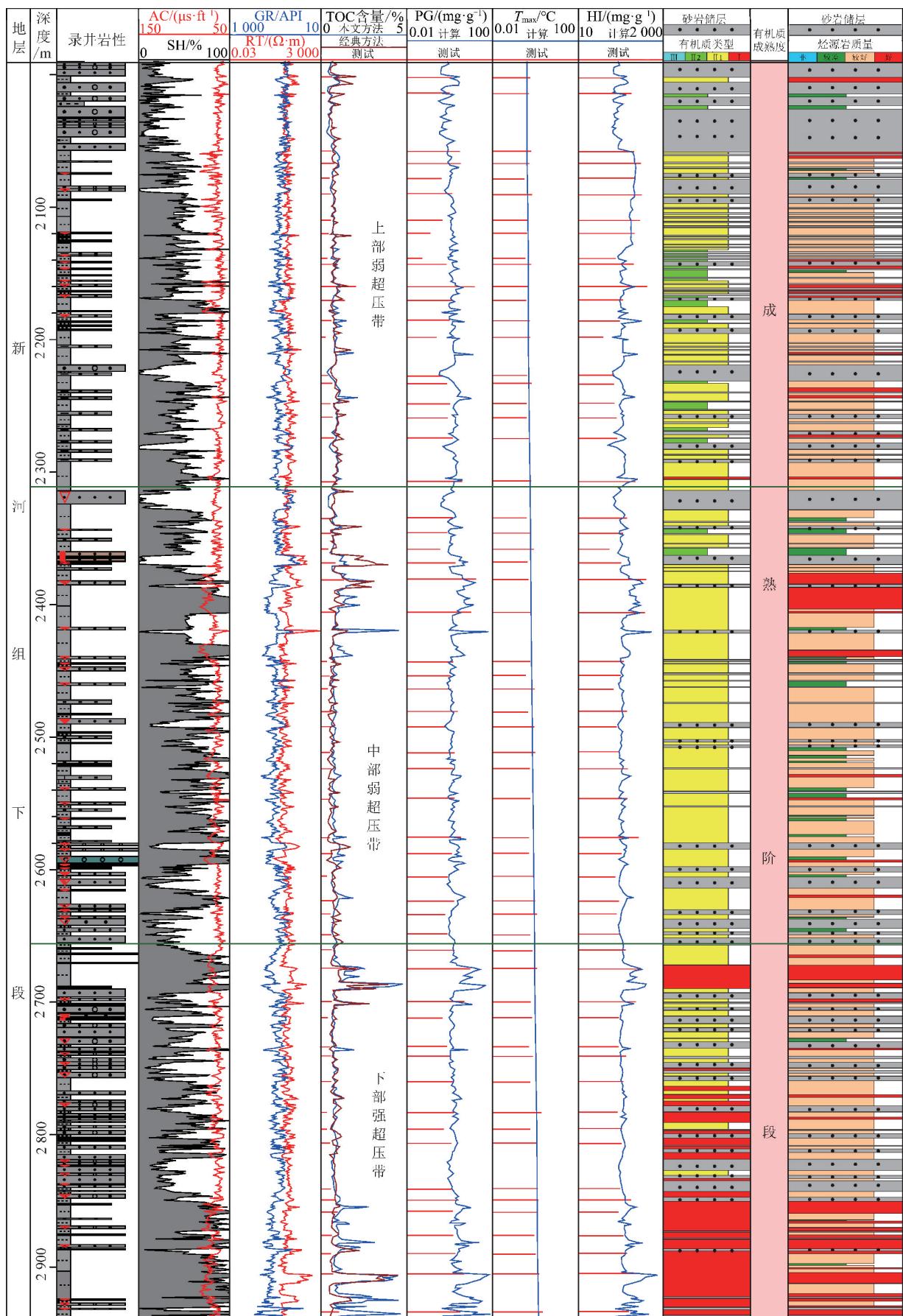


图9 YT1井新河组下段烃源岩地球化学参数测井反演剖面及综合评价

Fig. 9 Logging inversion profile of geochemical indices in the Lower Xinhe Formation and comprehensive evaluation at YT1 well

度至少 0.5 m,若小于该厚度,则采用向上合并原则。

最后将本文方法模型应用于未参与模型研究的 YT3 井(井位如图 1 所示),通过对比实验测试结果与测井反演结果,各烃源岩地化参数反演结果与实测数据吻合程度较高(图 10),取得了较好的应用效果。

综合以上实例研究表明,基于测井反演地化参数剖面的烃源岩评价结果与前人研究成果具有高度的

一致性^[39,40,42-43]。测井反演结果能够很好地反映出雅布赖盆地小湖次凹新河组下段泥岩地层中各地球化学参数的连续变化特征,为全盆地烃源岩综合评价奠定基础。因此,直接利用测井信息反演地球化学参数,方法简单可靠、易于实现,反演结果能够比较精细地反映出烃源岩各地球化学参数的纵向连续非均质性变化特征,为烃源岩质量的纵、横向连续评价提供可靠依据。

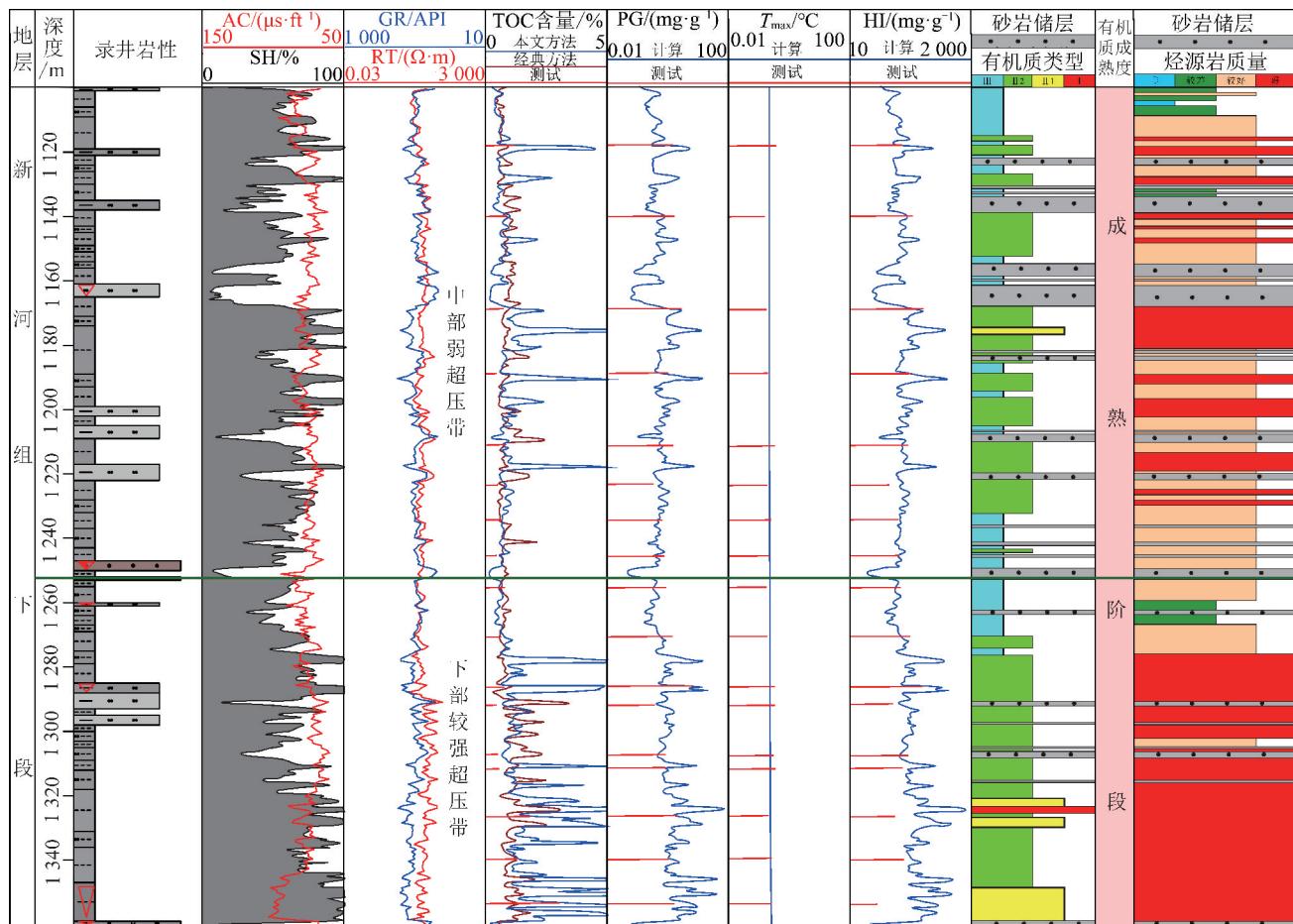


图 10 YT3 井新河组下段部分井段烃源岩地球化学参数测井反演剖面及综合评价

Fig. 10 Logging inversion profile of geochemical indices in the Lower Xinhe Formation and comprehensive evaluation at YT3 well

4 结 论

(1) 基于测井信息反演各地球化学参数剖面,不仅是烃源岩精细评价的重要技术手段,而且对泥页岩等细粒沉积体的有利储层识别、评价具有重要的借鉴意义。

(2) 基于雅布赖盆地小湖次凹新河组下段烃源岩热解实验数据及与对应深度的深电阻率、自然伽马曲线,建立了烃源岩各地球化学参数的测井反演模型。方法弥补了传统实验方法的不足,增强了传统测

井方法在异常超压烃源岩地层中的适用性,较准确、快速地获得了目的层段有机碳含量(TOC)、生烃潜力(PG)、氢指数(HI)、最高热解峰温(T_{max})等参数的纵向连续剖面,为明确各种类型、不同成熟度有机质的纵向发育规模及非均质性分布特征提供了强有力的技术支撑。研究成果为油气勘探决策提供了可靠的地质依据。

(3) 方法对资料要求低,原理简单可靠、易于实现,适用于各种复杂地质条件的烃源岩地层,具有良好的应用前景和推广价值。

致 谢

本文完成过程中得到了中国石油玉门油田分公司勘探开发研究院领导、专家的支持和帮助，在此表示感谢！

参考文献(References)：

- [1] 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,et al. Logging identification and evaluation of Cambrian-Ordovician source rocks in syncline of Tarim basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002,29(4): 50-52.
- [2] 陈建平,梁狄刚,张水昌,等.中国古生界海相烃源岩生烃潜力评价标准与方法[J].地质学报,2012,86(7):1132-1142.
CHEN Jianping,Liang Digang,ZHANG Yongchang, et al. Evaluation criterion and methods of the hydrocarbon generation potential for China's Paleozoic marine source rocks [J]. Acta Geologica Sinica, 2012,86(7): 1132-1142.
- [3] 熊德明,马万云,张明峰,等.干酪根类型及生烃潜力确定新方法[J].天然气地球科学,2014,25(6):898-905.
XIONG Deming,MA Wanyun,ZHANG Mingfeng, et al. New method for the determination of kerogen type and the hydrocarbon potential [J]. Natural Gas Geoscience,2014,25(6): 898-905.
- [4] 贺聪,吉利明,苏奥,等.利用预测有机碳含量探讨鄂尔多斯盆地延长组有机质丰度空间分布及控制因素[J].地质学报,2017,91(8):1836-1847.
HE Cong,JI Liming,SU Ao, et al. Application of predicted TOC to the discussion of spatial distribution of organic matter abundance of Yanchang formation in Southern Ordos basin and its controlling factors [J]. Acta Geologica sinica, 2017, 91 (8) : 1836 - 1847.
- [5] PEMPER R,HAN X G,MENDEZ F,et al. The direct measurement of carbon in wells containing oil and natural gas using a pulsed neutron mineralogy tool [A]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition[C]. SPE 124234,2009.
- [6] 姜在兴,张文昭,梁超,等.页岩油储层基本特征及评价要素[J].石油学报,2014,35(1):184-196.
JIANG Zaixing,ZHANG Wenzhao,LIANG Chao, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica,2014,35(1): 184-196.
- [7] 霍秋立,曾华森,付丽,等.Δlog测井源岩评价方法的改进及其在松辽盆地的应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,41(2):586-591.
HUO Qiuli,ZENG Huasen,FU Li, et al. The advance of Δlog method and its application in Songliao basin [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition),2011,41(2):586-591.
- [8] 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,2013,27(2):104-109.
ZHU Guangyou,JIN Qiang,ZHANG Linhua. Using log information to analyze the geochemical characteristics of source rocks in Jiyang Depression[J]. Well Logging Technology,2013,27(2):104-109.
- [9] 袁超,周灿灿,胡松,等.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.
YUAN Chao,ZHOU Cancan,HU Song, et al. Summary on well logging evaluation method of total organic carbon content in formation [J]. Progress in Geophysics,2014,29(6): 2831-2837.
- [10] 耿松,朱传庆,王强,等.四川盆地震旦系一下古生界烃源岩热演化模式及主控因素[J].地球物理学报,2013,56(5):1549-1559.
RAO Song,ZHU Chuanqing,WANG Qiang, et al. Thermal patterns of the Sinian-Lower Paleozoic source rocks in the Sichuan basin, Southwest China[J]. Chinese Journal of Geophysics,2013, 56(5):1549-1559.
- [11] 张兆辉,高楚桥.基于地层组分分析的火山岩岩性识别[J].测井技术,2012,36(1):29-32.
ZHANG Zhaozhui,GAO Chuqiao. Identification of igneous rock lithology by analyzing components of stratum [J]. Well Logging Technology,2012,36(1):29-32.
- [12] 张兆辉,陈华勇,高艳玲,等.克拉美丽气田火山岩岩性测井识别技术研究[J].石油物探,2016,55(5):764-770.
ZHANG Zhaozhui,CHEN Huayong,GAO Yanling, et al. Study on lithology identification of igneous rocks in Kelameili gas-field by well logging[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016,55 (5) : 764-770.
- [13] 张兆辉,姚军,苏明军.井-震拟合反演压力系数技术及应用[J].天然气地球科学,2016,27(4):739-744.
ZHANG Zhaozhui,YAO Jun,SU Mingjun. Logging and seismic fitting inversion pressure coefficient technology and its application [J]. Natural Gas Geoscience,2016,27(4): 739-744.
- [14] 谭廷栋.测井识别生油岩方法[J].测井技术,1988,12(6):1-11.
TAN Tingdong. Identification of kuchersite from well logs [J]. Well Logging Technology,1988,12(6):1-11.
- [15] SCHMOKER J W,HESTER T C. Organic carbon in Bakken formation, united states portion of Williston basin [J]. AAPG Bulletin, 1983,67(12):1285-1298.
- [16] PASSEY Q R,CREANEY S,KULLA,J B, et al. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs [J]. AAPG Bull. ,1990,74(12):1777-1794.
- [17] TAN M J,SONG X D,YANG X,et al. Support-vector-regression machine technology for total organic carbon content prediction from wireline logs in organic shale: A comparative study [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering,2015,26:792-802.
- [18] WANG P,CHEN Z,PANG X, et al. Revised models for determining TOC in shale play: example from devonian Duvernay shale, western Canada Sedimentary Basin [J]. Marine and Petroleum Ge-

- ology, 2016, 70: 304–319.
- [19] ZHAO P, MAO Z, HUANG Z, et al. A new method for estimating total organic carbon content from well logs [J]. AAPG Bull., 2016, 100 (8): 1311–1327.
- [20] SHI X, WANG J, LIU G, et al. Application of extreme learning machine and neural networks in total organic carbon content prediction in organic shale with wire line logs [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 33: 687–702.
- [21] WANG P, PENG S P, HE T H. A novel approach to total organic carbon content prediction in shale gas reservoirs with well logs, Tonghua Basin, China [J]. Journal of Petroleum and Engineering, 2018, 55: 1–15.
- [22] ZHU L Q, ZHANG C, ZHANG C M, et al. Prediction of total organic carbon content in shale reservoir based on a new integrated hybrid neural network and conventional well logging curves [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2018, 15 (3): 1050–1061.
- [23] 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[J].石油实验地质,2010,32(3):290–295.
XU Sihuang, ZHU Yiqing. Well logs response and prediction model of organic carbon content in source rocks [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32 (3): 290–295.
- [24] 杜文凤,王攀,梁明星,等.煤系烃源岩有机碳含量测井响应特征与定量预测模型[J].煤炭学报,2016,41(4):954–963.
DU Wenfeng, WANG Pan, LIANG Mingxing, et al. Well logs response characteristics and quantitative prediction model of organic carbon content of hydrocarbon source rocks in coal-bearing strata measures [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41 (4): 954–963.
- [25] HERRON M M, GRAU J A, HERRON S L, et al. Total organic carbon and formation evaluation with wireline logs in the green river oil shale [A]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition [C]. SPE 147184, 2011.
- [26] RADTKE R J, LONERTE M, ADOLPH B. A new capture and inelastic spectroscopy tool takes geochemical logging to the next level [A]. SPWLA 53rd Annual Logging Symposium [C]. 2012, Paper AAA.
- [27] GONZALEZ J, LEWIS R, HEMINGWAY J. Determination of formation organic carbon content using a new neutron induced gamma ray spectroscopy service that directly measures carbon [A]. SPWLA 54th Annual Logging Symposium [C]. 2013, Paper GG.
- [28] 袁超,周灿灿,薄亚杰,等.直接确定地层有机碳含量测井方法的数值模拟[J].原子能科学技术,2015,49(8):1497–1503.
YUAN Chao, ZHOU Cancan, BO Yajie, et al. Numerical simulation on logging method of direct determination of total organic carbon content in formation [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49 (8): 1497–1503.
- [29] 刘超,卢双舫,薛海涛.变系数 Δ log 方法及其在泥页岩有机质评价中的应用[J].地球物理学进展,2014,29(1): 312–317.
LIU Chao, LU Shuangfang, XUE Haitao. Variable-coefficient Δ log model and its application in shale organic evaluation [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29 (1): 312–317.
- [30] 胡慧婷,苏瑞,刘超,等.广义 Δ log 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 Δ log technology to predict the organic carbon content of continental deep source rocks [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27 (1): 149–155.
- [31] 边雷博,柳广弟,孙明亮,等.优化的 Δ log 技术及其在中-深层烃源岩总有机碳含量预测中的应用[J].油气地质与采收率,2018,25(4):40–45.
BIAN Leibo, LIU Guangdi, SUN Mingliang, et al. Improved Δ log technique and its application to predicting total organic carbon of source rocks with middle and deep burial depth [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25 (4): 40–45.
- [32] 杨涛涛,邵大力,曹光伟,等.烃源岩测井定量评价方法探讨[J].地球物理学进展,2018,33(1): 285–291.
YANG Taotao, SHAO Dali, CAO Guangwei, et al. Logging quantitative evaluation method for hydrocarbon source rock [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33 (1): 285–291.
- [33] 张兆辉,刘化清,苏明军.歧口凹陷滨海斜坡下第三系异常压力分析[J].西南石油大学学报:自然科学版,2011,33(6):43–47.
ZHANG Zhaoxian, LIU Huaqing, SU Mingjun. Analysis of abnormal pressure in the Paleocene of Binhai slope zone in Qikou sag [J]. Journal of Southwest Petroleum University Natural Science Edition, 2011, 33 (6): 43–47.
- [34] 闫建平,梁强,耿斌,等.湖相泥页岩地球化学参数测井计算方法及应用—以沾化凹陷渤海洼陷沙三下亚段为例[J].岩油气藏,2017,29(4):108–116.
YAN Jianping, LIANG Qiang, GENG Bin, et al. Log calculation method of geochemical parameters of lacustrine shale and its application: A case of lower Es₃ in Bonan subsag, Zhanhua sag [J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29 (4): 108–116.
- [35] 吴迅达,孙婷.烃源岩有机地化参数的测井综合评价方法及应用[J].地球物理学进展,2018,33(5):2015–2019.
WU Xunda, SUN Ting. Comprehensive evaluation method of source rock organic geochemical parameters by well logs and application [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33 (5): 2015–2019.
- [36] 吴茂炳,刘春燕,郑孟林,等.内蒙古西部雅布赖盆地侏罗纪沉积-构造演化及油气勘探方向[J].地质通报,2007,26(7): 857–863.
WU Maobing, LIU Chunyan, ZHENG Menglin, et al. Jurassic depositional tectonic evolution in Yabulai basin, western inner Mongolia, China and direction and direction of petroleum exploration [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26 (7): 857–863.
- [37] 钟福平,钟建华,由伟丰,等.内蒙古雅布赖盆地红柳沟中侏罗统沉积相及沉积环境研究[J].地球科学与环境学报,2010,

- 32(2):149–154.
- ZHONG Fuping, ZHONG Jianhua, YOU Weifeng, et al. Study on sedimentary facies and environment of middle Jurassic in Hongliugou of Yabulai basin, Inner Mongolia[J]. Journal of Earth Science and Environment, 2010, 32(2):149–154.
- [38] 钟玮,林常梅,吴超,等.雅布赖盆地中生代构造特征[J].四川地质学报,2013,33(1):7–11.
- ZHONG Wei, LIN Changmei, WU Chao, et al. The Mesozoic tectonic in the Yabrai basin [J]. Acta Geologica Sichuan, 2013, 33(1):7–11.
- [39] 黄军平,杨占龙,马国福,等.中国小型断陷湖盆致密油地质特征及勘探潜力分析[J].天然气地球科学,2015,26(9):1763–1772.
- HUANG Junping, YANG Zhanlong, MA Guofu, et al. The geological characteristics and exploration potential of tight oil in small fault-subsided lake basins, China [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(9):1763–1772.
- [40] 黄军平,杨克荣,杨占龙,等.雅布赖盆地侏罗系烃源岩特征及油气勘探方向[J].天然气地球科学,2013,24(5):948–955.
- HUANG Junping, YANG Kerong, YANG Zhanlong, et al. Characteristics of Jurassic source rocks and direction of petroleum exploration in Yabulai basin, China [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 948–955.
- [41] 田涛,任战利,马国福,等.雅布赖盆地萨尔台凹陷烃源岩地球化学特征、成熟度演化与油气关系[J].地球物理学进展,2014,29(6):2745–2753.
- TIAN Tao, REN Zhanli, MA Guofu, et al. The relations of hydrocarbon generation to the geochemical features and maturity evaluation of source rocks in Sartai sag, Yabulai basin [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(6):2745–2753.
- [42] 都鹏燕,高岗,魏涛,等.雅布赖盆地萨尔台凹陷侏罗系新河组有效烃源岩研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2018,48(1):29–38.
- DU Pengyan, GAO Gang, WEI Tao, et al. Effective source rocks in Jurassic Xinhe formation in Sartai sag, Yabrai basin [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2018, 48(1):29–38.
- [43] 王彦博.雅布赖盆地新河组烃源岩地化特征及资源潜力分析[D].西安:西安石油大学,2014.
- WANG Yanbo. Analysis on geochemical characteristics and potentials of Xinhe formation in Yabrai basin [D]. Xi'an :Xi'an Shiyou University, 2014.
- [44] DELLENBACH J, ESPITALIE J, LEBRETON F. Source rock logging: transaction of 8th European SPWLA symposium [R]. 1983: paper D.
- [45] 王贵文,郭荣坤.测井地质学[M].北京:石油工业出版社,2000.
- [46] 赵彦超.生油岩测井评价的理论和实践——南阳、泌阳凹陷为例[J].地球科学—中国地质大学学报,1990,15(1):65–74.
- ZHAO Yanchao. The theory and application of logging for source rock evaluation—from the working results in Nanyang and Biyang depressions [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1990, 15(1):65–74.
- [47] 赵军,代新云,卢一凡,等.基于逾渗模型的泥页岩导电机理模拟[J].地球物理学报,2017,60(5):2020–2028.
- ZHAO Jun, DAI Xinyun, LU Yifan, et al. Shale reservoir conductive mechanism simulation based on percolation network [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(5):2020–2028.
- [48] 邬立言,顾信章.热解技术在我国生油岩研究中的应用[J].石油学报,1986,7(2):13–19.
- WU Lian, GU Xinzhang. The application of pyrolysis technique in source rock research [J]. Acta Petrolei Sinica, 1986, 7(2):13–19.
- [49] 胡见义,黄第潘.中国陆相石油地质理论基础[M].北京:石油工业出版社,1991.