

烃源岩测井识别在渤海湾石油开发中的应用

汤丽娜

中海油研究总院, 北京 100027

摘要 研究沉积盆地油气总量及分布规律,有必要首先了解烃源岩的分布。受取心样品数量的限制,一般不可能获得整段连续烃源岩有机碳的实验室测定值,常采用间隔一定距离的有机碳含量测定值的几何平均值,无法反映生油岩的全貌。为获取单井连续有机碳含量,准确确定烃源岩厚度,有必要开展测井烃源岩评价研究。渤海沙河街组地层具有高伽马、高孔隙度、高电阻率等典型烃源岩测井响应特征,可通过测井曲线特征定性识别烃源岩。建立测井信息与烃源岩有机碳含量间的定量关系模型,计算出烃源岩有机碳含量的连续分布。对不同有机碳含量计算方法结果对比表明,用 Passey 模型计算的有机碳含量与岩心有机地化分析有机碳含量趋势一致、相对误差小,证实该方法基本满足渤海地区烃源岩评价需求。通过对渤海湾研究区 20 口井测井处理结果的对比,该区沙河街组湖相地层有机碳含量最高,有利烃源岩厚度大,其中沙三中段是最有利烃源岩分布层位。

关键词 烃源岩;测井评价;多元统计分析;Passey 模型

中图分类号 P631.811

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.21.008

Well Logging Evaluation of Source Rock and Its Application in Bohai Bay Oil Exploitation

TANG Lina

China National Offshore Oil Corporation Research Institute, Beijing 100027, China

Abstract To study total reservation and distribution of oil and gas in the sedimentary basin, the distribution of source rock should be investigated first. Based on the limited number of core samples, it is impossible to obtain the continuous laboratory measurements of organic carbon of source rock. The full information of organic carbon can not be revealed by laboratory measurements, because it is the geometric mean value of several discrete core samples. Well logging evaluation of source rock is carried out in order to get the information about continuous organic carbon content and thickness of source rock. In Shahejie Formation, source rock is identified by typical well logging characteristics of high gamma, high porosity, and high resistivity. The continuous organic carbon content of source rock is calculated by using a quantitative relationship model, which is established based on multivariate statistical analysis between well logging information and the core carbon content. Comparing with different methods for organic carbon content calculations, the Passey formula method is found to fit well with the core geochemistry method, and with a small relative error. The Passey formula method is basically confirmed that it satisfies the demand for hydrocarbon source rock evaluation in Bohai Bay oilfield. The processing results of 20 wells indicate that there is higher organic carbon content and thicker source rock in Shahejie lacustrine Formation. Especially, the middle of the third zone of Shahejie Formation is the most beneficial layer of source rock.

Keywords source rock; well logging evaluation; multivariate statistical analysis; Passey formula

0 引言

有机碳含量是反映岩石有机质丰度的主要指标之一,是

含油气盆地生烃研究的重要参数。海上岩心样品数量有限,一般不可能获得连续烃源岩的有机碳含量实验室测定值,均

收稿日期: 2011-04-29;修回日期: 2011-06-10

作者简介: 汤丽娜,工程师,研究方向为测井解释及储层岩石物理等,电子信箱: tangln@cnooc.com.cn

采用间隔一定距离的有机碳含量测定值的几何平均值,误差很大,不能反映生油岩全貌。为获取单井连续有机碳含量,准确确定烃源岩厚度,有必要开展测井烃源岩评价研究,为盆地资源评价提供准确合理参数。

近 20、30 年以来,国内外学者一直利用测井资料评价烃源岩。1989 年, Passey 提出了一种可以适用于碳酸盐岩和碎屑岩生油岩的技术。1990 年, Passey 等^[1]经过大量统计分析后,制定了计算有机碳含量的图版,并提出了相应的经验公式。20 世纪 80 年代末,法国石油研究院提出有机碳测井评价方法,埃克森石油公司提出声波-电阻率幅度差法,这两种方法都是基于生油岩有机质对测井曲线的响应特征,建立解释模型,用常规的声波测井和电阻率测井定量计算有机碳含量。2000 年以来,国内张立鹏^[2],王方雄^[3],张寒^[4],王贵文^[5]等都对烃源岩测井评价进行了论述,介绍方法十分全面,但缺少实际应用实例,并且需要大量的岩心资料才能得到可靠的评价结果。

本文主要基于 Passey 法,利用测井曲线直接计算有机碳含量,并初步应用在渤海湾庙西等凹陷,证实该方法满足渤海湾地区烃源岩评价需求。对研究区 20 口井数据进行分析处理,认为沙河街组湖相地层有机碳含量最高,有利烃源岩厚度大,其中沙三中段是该区最有利烃源岩分布层位。

1 烃源岩测井响应特征

渤海湾盆地古近系, 烃源岩岩性主要为褐色泥岩、页岩、暗色泥岩等, 发育层段主要为沙河街组与东营组。

测井曲线对有机碳含量和充填孔隙的流体物理性质差异的响应,是利用测井曲线评价烃源岩的基础。假设富含有机碳的烃源岩由岩石骨架、固体有机质和孔隙流体组成,非烃源岩仅由岩石骨架和孔隙流体组成;未成熟烃源岩中的孔隙空间仅被地层水充填,成熟烃源岩的部分有机质转化为液态烃进入孔隙。固体有机质有高声波时差、低体积密度和高中子孔隙度的测井响应特征。同时,伴随有机质成熟度生烃,使含油饱和度上升,引起电阻率增加。

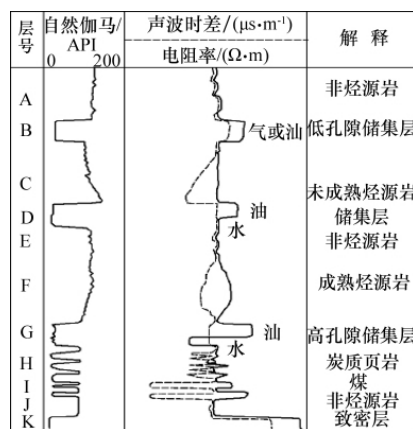


图 1 声波-电阻率叠合图上各种特征解释示意

Fig. 1 Schematic diagram for explaining the various features on an acoustic-resistivity composite map

孔隙度曲线主要与固体有机质的数量有关,电阻率增大主要与生成的烃类物质的体积有关。图 1 为利用孔隙度曲线与电阻率曲线间距识别富含有机质岩石的过程示意。在富含有机质的泥岩 C/F 段,孔隙度与电阻率两条曲线的分离由两个因素导致。在未成熟的富含有机质的 C 段中,两条曲线之间的差异仅由孔隙度曲线响应造成;在成熟的烃源岩 F 段中,除了孔隙度曲线响应外,因为有烃类的存在,电阻率增加,使两条曲线差异更大。

2 烃源岩测井识别法

2.1 弹性参数定性识别烃源岩

根据泥页岩的测井响应特征,有机质使烃源岩地层密度 ρ 降低,声波时差 Δt 增高,弹性参数 B 降低,关系式 $B=\rho(304.8/\Delta t)^2$ 。泥页岩烃源岩表现出低弹性参数的测井特征。图2为A井弹性参数计算结果图,右道弹性参数线表明沙三中段存在3套相对较厚的烃源岩(相对低弹性参数段),与地化分析有机碳含量(TOC)趋势结论比较一致,地化分析有机碳含量大于2%的有3套地层。

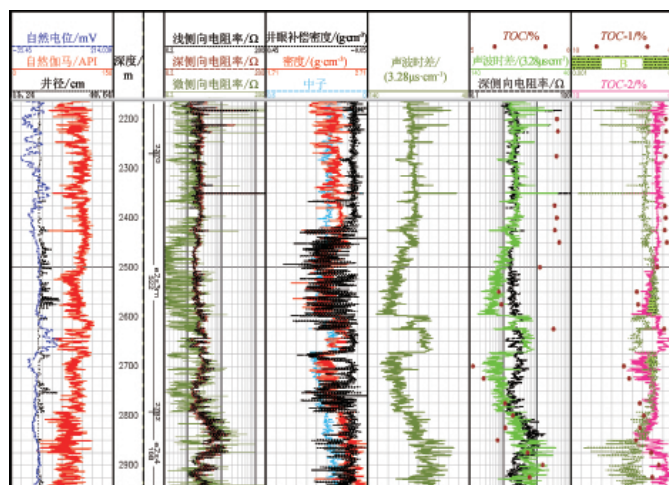


图 2 A 井弹性参数计算结果

Fig. 2 Calculating result of elastic parameters for well A

2.2 多元统计回归定量识别烃源岩

渤海垦利地区 5 口井地化实测 TOC 数据共 154 个 (150 个沙河街组, 4 个东营组), 与电阻率 R 、声波时差 DT 、密度 DEN 回归得到的多井回归公式为 $TOC = (9.23091 \lg R + 0.174288DT - 17.1502) / DEN$, 相关系数 0.67; 利用此公式, 分别计算单井的有机碳含量, 与地化实测对比趋势一致, 相对误差较小, 能准确识别烃源岩厚度。图 3 为 A 井多井回归 TOC 与地化对比图, 右道 $TOC1_2$ 黑色实线为多井回归计算得到的有机碳含量, 与 TOC_1 地化分析曲线对比, 趋势一致, 相对误差小。

多井多元统计回归方法需要大量的岩心实测数据才能得到相对可靠结果,且受地区限制,不利于推广到其他地区。

2.3 敏感曲线直接定量计算有机碳含量

基于 Passey 模型研究的生油岩技术理论, 利用声波-电

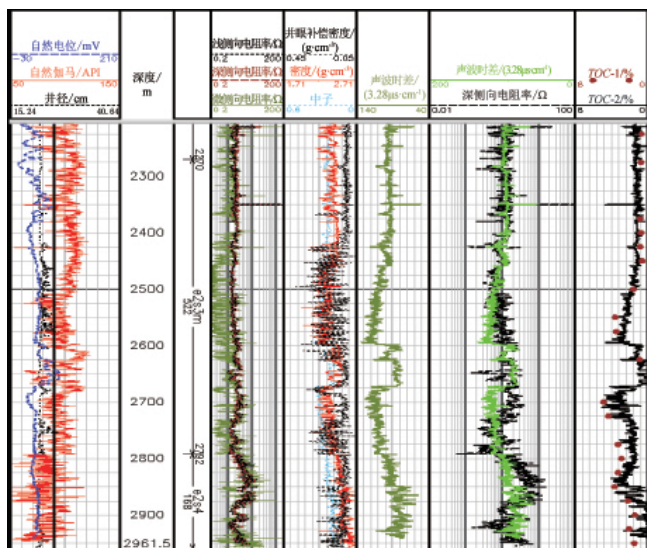


图 3 A 井多井回归 TOC 与地化对比图

Fig. 3 Comparison between multi-well regression and geochemical analysis values for well A

阻率幅度差可以直接定量计算有机碳含量。需要用到自然伽马、电阻率、声波时差(或密度、中子)3种测井曲线。要求声波时差与电阻率坐标一致,即每 $164\mu\text{s}/\text{m}$ 对应于一个电阻率对数坐标单位,正常情况下,非源岩层处的声波时差与电阻率曲线重叠即为基线位置。每口井应按地层的变化和曲线的响应情况进行分段重叠,即一口井可能有多段基线。

Passey 等^[1]经过大量统计分析后,制出计算 *TOC* 的图版,并提出了一个相应的经验公式

$$\Delta \lg R = \lg(R/R_{b \text{ 基线}}) + 0.02(\Delta t - \Delta t_{b \text{ 基线}})$$

$$TOC=(\Delta \lg R) \cdot 10^a$$

$$a=2.297-0.1688LOM$$

其中, R 为电阻率, LOM 为有机质成熟度(热变指数), 与镜质体反射率 R_o 的关系如表 1 所示。

表 1 有机质成熟度与 R_o 对应关系表

Table 1 Correspondence of organic maturity with R_o

<i>LOM</i>	$T_{\text{max}}(\text{TypeII})/^{\circ}\text{C}$	$R_{\circ}$	<i>LOM</i>	$T_{\text{max}}(\text{TypeII})/^{\circ}\text{C}$	$R_{\circ}$
1	421	0.24	8	437	0.56
2	423	0.28	9	440	0.67
3	425	0.32	10	445	0.82
4	426	0.36	11	451	1.08
5	427	0.38	12	457	1.50
6	429	0.42	13	462	1.80
7	432	0.48	14	—	>2.2

以上方法的优点在于声波和电阻率曲线对孔隙度变化敏感,一旦确定了基线,那么一条曲线相应于另一条曲线移动的幅度可对比。该方法的缺点是对 ΔTOC 的估计往往误差很大。如果对 LOM 的估计不准确,求得的绝对 TOC 值就会有误差,只能发现 TOC 垂向变化趋势。解决方案为在一个区块选取 1—2 口井的地化实测有机碳含量 TOC 数据对测井计算

结果进行标定,微调基线参数,这样可使计算得到的 *TOC* 误差相对小。图 4 为 A 井敏感曲线直接计算所得有机碳含量图,计算结果与地化分析结果对比趋势一致,相对误差小。

多元回归与敏感曲线直接计算 TOC 对比,利用敏感曲线计算 TOC ,精度高,误差小,结果如表 2 所示。利用敏感曲线直接计算 TOC 的方法,在渤海地区完成了 20 口井的有机碳含量处理。对于渤海盆地沙河街组地层,处理过程的 3 个关键参数中,热变指数 LOM 取 8 较适合,对应的 $T_{max}(\text{Type II})=437^{\circ}\text{C}$, $R_o=0.56$ 。在非源岩层确定中,对于渤海沙河街组地层电阻率基线取值一般在 2.5Ω 左右,声波时差大约在 $302\mu\text{s/m}$ 左右,即可得到相对准确的 TOC ,计算结果与地化实测对比误差相对小。渤海沙河街组有机碳含量处理结果证实,该方法对于湖相烃源岩识别效果是可靠的。

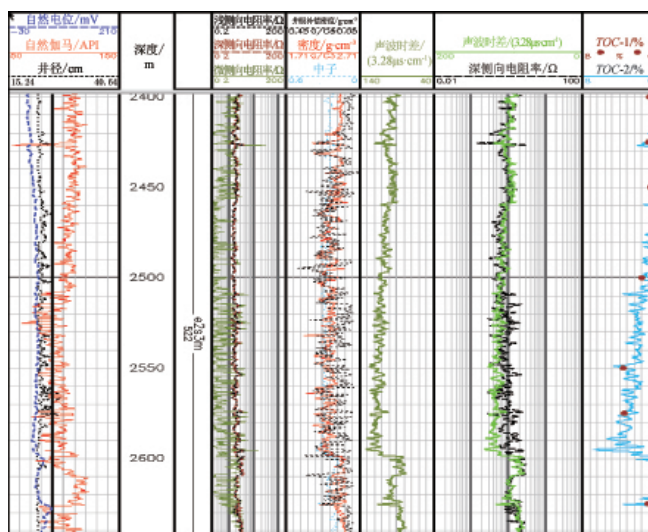


图 4 A 井敏感曲线直接计算有机碳含量

Fig. 4 TOC value computing of sensitivity curves for well A

表 2 A 井两种方法有机碳含量对比表

Table 2 Comparison between two methods of organic carbon content for well A

深度/m	地化实 测 <i>TOC</i> / <i>%</i>	多元回 归 <i>TOC</i> / <i>%</i>	多元相 对误差 / <i>%</i>	敏感曲 线 <i>TOC</i> / <i>%</i>	敏感相 对误差 / <i>%</i>
2500	1.53	1.75	14.4	1.33	-13.1
2550	3.55	2.91	-18.0	3.52	-0.8
2575	3.42	2.32	-32.2	2.24	-34.5
2625	0.86	1.59	84.9	0.76	-11.6
2700	4.82	3.76	-22.0	5.22	8.3
2725	4.3	2.19	-49.1	2.21	-48.6
2775	3.24	1.85	-42.9	1.83	-43.5
2800	2.85	1.48	-48.1	1.67	-41.4
2825	3.23	2.18	-32.5	2.27	-29.7
2875	2.14	1.97	-7.9	1.98	-7.5



3 应用

利用渤海庙西地区沙一、沙三段烃源岩有机质丰度评价,将烃源岩分成5类。据此评价标准,本次研究将测井计算得到的 $TOC=1.0\%$ 作为有利烃源岩评价的下限,以了解庙西以及渤海其他凹陷的沙河街组烃源岩分布。由沙三段有利烃源岩厚度统计表3可以看出,沙三段在辽西、沙南、黄河口凹陷有利烃源岩厚度约占泥岩厚度的80%,在辽中凹陷、莱州湾凹陷,沙三段的有利烃源岩厚度相对薄。

由表3中可以看出,沙三段在沙南、黄河口凹陷有利烃源岩分布层位以半深湖相沉积为主,厚度相对大;在莱州湾

凹陷沙三段的有利烃源岩分布层位以滨浅湖、三角洲相沉积为主,厚度相对薄。沙南、黄河口凹陷沙三段、沙一、二段烃源岩均发育于湖泊环境,地化各指标平均值也是沙三段烃源岩最好,地化分析结果与测井评价烃源岩结果一致。

分析烃源岩单井厚度分布以及平面特征的主要目的是了解研究区资源量的多少。对于庙西莱州湾凹陷,依据本次测井评价结果,盆模软件计算有效烃源岩厚度参数取值为50%,利用该数值计算得到该区总的生油量为4.79亿t,而如果按照以往经验系数,厚度参数取值60%,庙西凹陷生油量为5.61亿t,烃源岩的厚度直接影响生油量的多少。因此测井

表3 沙三段有利烃源岩厚度统计表

Table 3 Statistics of favorable source rock thickness in the middle of the third zone of Shahjie Formation

序号	位置	井名	沉积相类型	沙三段层厚/m	泥岩厚度/m	好烃源岩厚度/m	地化分析数据
1	辽西凹陷	JZ14-2-1	—	612	512	420	有
2		JZ20-1-1	—	415	315	250	有
3		JZ25-2-1	—	228	148	20	有
4	辽中凹陷	JX1-1-1	—	290	200	50	有
5		LD16-3-1	—	618	400	120	无
6	辽东凹陷	LD17-1-1Z	—	108	88	70	有
7	渤中凹陷	QHD36-3-1	—	108	98	90	无
①		CFD16-3-1	半深湖	275	215	195	有
②	沙南凹陷	CFD14-5-1D	半深湖	133	123	90	有
③		CFD23-1-1	半深湖	283	240	200	有
④		BZ25-1-1	半深湖	22	12	12	无
⑤	黄河口凹陷	BZ34-2-1	半深湖-盆底扇	330	180	150	无
⑥		BZ34-1-1	半深湖	136	116	100	无
⑦	莱北低凸起	KL10-1-2	半深湖-三角洲前缘	502	270	150	无
⑧		KL10-2-1D	半深湖	618	510	280	有
⑨	莱州湾凹陷	KL12-2-1	扇三角洲前缘	467	300	50	有
⑩		KL10-3-1	半深湖	522	360	90	有
⑪		KL17-1-1	沙四 2600	358	320	290	无
⑫	庙西凹陷	PL25-6-1	孔店 2357	180	120	90	无
⑬	青东凹陷	KL20-1-1	沙四 2874	229	135	60	—

烃源岩厚度评价是十分必要的。

4 结论

庙西莱州湾凹陷沙三段是有利烃源岩主要分布层位,多分布在半深湖-深湖区域,为好-很好烃源岩。经过地化数据标定,利用Passey法测井计算的有机碳含量是相对可靠的,可以在非取心井、没有地化分析的井段确定出有效烃源岩的厚度以及有机碳含量。其为资源评价提供了一种快速、准确的方法,为盆地模拟提供了更加合理的参数,从而达到了空间预测有效烃源岩的目的。

参考文献 (References)

[1] 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): 1777-1794.

[2] 张立鹏, 边瑞雪, 杨双彦, 等. 用测井资料识别烃源岩 [J]. 测井技术, 2001, 25(2): 146-152.
Zhang Lipeng, Bian Ruixue, Yang Shuangyan, et al. Well Logging Technolog, 2001, 25(2): 146-152.

[3] 王方雄, 侯英姿, 夏季. 烃源岩测井评价新进展[J]. 测井技术, 2002, 26 (2): 89-93.
Wang Fangxiong, Hou Yingzi, Xia Ji. Well Logging Technolog, 2002, 26 (2): 89-93.

[4] 张寒, 朱光有. 利用地震和测井信息预测和评价烃源岩——以渤海湾盆地富油凹陷为例[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 55-59.
Zhang Han, Zhu Guangyou. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1): 55-59.

[5] 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. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(4): 50-52.

(责任编辑 刘志远)