

泥页岩有机非均质性评价及其在页岩油资源评价中的应用 ——以松辽盆地南部青山口组为例

黄文彪¹, 邓守伟², 卢双舫¹, 于玲³, 胡硕⁴, 张炬⁵

[1. 中国石油大学(华东)非常规油气与新能源研究院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油吉林油田分公司勘探开发研究院, 吉林 松原 138000; 3. 中国石油大庆钻探工程公司地球物理勘探一公司, 黑龙江 大庆 163357; 4. 中国石油大庆油田分公司采油四厂, 黑龙江 大庆 163712; 5. 中国石油大庆油田分公司采油五厂, 黑龙江 大庆 163000]

摘要:泥页岩存在较强的有机非均质性, 实测地化数据受到样品数量的限制, 难以精确描述油气在泥页岩体系中的分布特征。基于改进的 $\Delta\lg R$ 模型评价泥页岩有机质丰度和残留烃含量, 参照页岩油资源评价分级标准, 可清楚地刻画页岩油富集、低效、无效资源的空间分布。根据热解色谱分析参数校正实验和组分生烃热模拟实验, 确定 S_1 的重烃、轻烃补偿系数, 采用体积法定量评价不同级别页岩油资源量, 指明有利的勘探区块。研究结果表明, 改进的 $\Delta\lg R$ 模型较好地改善了测井资料评价地化参数的精度, 可操作性强。应用结果显示, 松辽盆地南部青山口组页岩油资源主要富集在青山口组一段中、下部, 区域上分布于扶新隆起、红岗阶地和长岭凹陷北部, 富集资源量 48.08×10^8 t, 约占总资源量的 1/3。通过有机非均质性刻画来评价页岩油气资源的分布特征, 不仅阐明了页岩油的空间分布特征, 而且还节约分析化验的成本, 为页岩油下一步勘探开发提供实质性的指导。

关键词:非均质性; 页岩油气; 资源评价; 青山口组; 松辽盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Shale organic heterogeneity evaluation method and its application to shale oil resource evaluation—a case study from Qingshankou Formation, southern Songliao Basin

Huang Wenbiao¹, Deng Shouwei², Lu Shuangfang¹, Yu Ling³, Hu Shuo⁴, Zhang Ju⁵

(1. Research Institute of Unconventional Hydrocarbon and New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Petroleum Exploration & Development Research Institute, PetroChina Jilin Oilfield Company, Songyuan, Jilin 138000, China; 3. No1. Geophysical Prospecting Company, Daqing Drilling Engineering Company, Daqing, Heilongjiang 163357, China; 4. The 4th Oil Production Plant, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163712, China; 5. The 5th Oil Production Plant, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163000, China)

Abstract: It is well known that shale has strong organic heterogeneity. As the amount of measured geochemical data is limited by the available samples, it is hard to describe the spatial distribution of shale oil and gas precisely. Through evaluation of organic abundance and retained hydrocarbon content by using the improved $\Delta\lg R$ model, the spatial distributions of enriched, low-efficiency and inefficient shale oil resources are well mapped respectively with reference to the shale oil resources grading evaluation standards. The heavy hydrocarbon and light hydrocarbon compensate coefficients for S_1 are determined through correcting the experiments and component hydrocarbon generation thermal simulation experiment with pyrolysis chromatography parameters. Volume method is used to quantitatively evaluate different grade shale oil resources, and recognize favorable exploration areas. Research shows that the improved $\Delta\lg R$ model enhances the accuracy and operability of evaluating geochemistry parameters with logging data. Application results show that the shale oil resources of the Qingshankou Formation in southern Songliao Basin occur in the lower-middle part of its first member. And the play fairways are distributed in Fuxin Uplift, Honggang terrace and northern Changling Sag, where the estimated shale oil resources is 4.808 billion tons, accounting for a third of the total resources. The method of evaluating distribution of shale oil/gas by describing organic heterogeneity not only can reveal the spatial distribution features of shale oil, but also can save the cost of laboratory test, and more important, it can provide substantial guidance for future exploration and development of shale oil.

Key words: heterogeneity, shale oil and gas, resource evaluation, Qingshankou Formation, Songliao Basin

收稿日期: 2013-08-14; 修订日期: 2014-06-20。

第一作者简介: 黄文彪(1980—), 男, 讲师、博士, 天然气成藏与非常规油气勘探。E-mail: huangwb@upc.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972101); 中央高校基本科研业务费专项(27R1421002A)。

作为常规油气资源的有效接替,页岩油气在非常规能源中异军突起,已成为全球油气资源勘探开发的新亮点。据美国能源信息署(EIA)最新统计,全球页岩气可采资源 $189 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中亚洲 $51 \times 10^{12} \text{ m}^3$,仅次于北美($55 \times 10^{12} \text{ m}^3$)^[1]。除了页岩气外,美国近几年一个较大的发现是 Williston 盆地的 Bakken 页岩油资源,2010 年其页岩油产量接近 $40 \times 10^4 \text{ bbl/d}$,计划 2015 年增加至 $80 \times 10^4 \text{ bbl/d}$;另外,Eagle Fort 页岩油田页岩油产量预测从目前的 $7.1 \times 10^4 \text{ bbl/d}$ 增至 2015 年的 $42.1 \times 10^4 \text{ bbl/d}$ ^[2]。近期,日本鲇川油气田 1 800 m 深处的页岩油开采获得成功,并预测该油气田及其附近油气田的周边页岩油储量约 $500 \times 10^4 \text{ bbl}$,而整个秋田县的储量达 $1 \times 10^8 \text{ bbl}$,相当于日本每年石油消耗量的 10%。

近年来,我国页岩油气勘探开发也获得重大突破,2011 年,国土资源部油气资源战略中心、中国各大石油公司联合高校,开展全国页岩油气资源潜力调查评价工作,已取得重要进展^[3-9]。截至 2012 年,我国已完钻的 62 口页岩气勘查井中,有 24 口获得工业气流,展现出页岩气开发的良好前景。从国内外的勘探现状来看,泥页岩中的确蕴含着海量的页岩油气,然而由于泥页岩存在较强的非均质性,致使泥页岩油气丰度在平面和纵向上存在差异,如何评价页岩油气的富集分布特征便成为目前页岩油气勘探开发中优选有利区的关键所在。因此,开展泥页岩有机非均质性评价研究,对于促进我国页岩油气勘探,尽早实现工业化生产具有重要的意义。

1 泥页岩有机非均质性评价及资源等级划分

事实上,泥页岩处于生烃阶段后普遍具有含油气的特点,只是不同区域和层位其油气富集程度有所差异,这种差异性(非均质性)可由总有机碳含量(TOC)、氯仿沥青“A”含量、热解烃含量(S_1)及轻烃含量(S_0)等地化分析指标直观体现。但受样品分析周期、费用及数量的制约,实测数据总是难以达到描述泥页岩有机非均质性或含油气性的需求。不过,由于有机质的发育特征对众多测井响应(如声波、电阻率、中子、密度、伽马等)都有明显的影响^[10-11],加上测井资料的纵向连续性和较高的分辨率,使利用测井资料来评价泥页岩有机非均质性成为可能。近年来,以 $\Delta \lg R$ 模型为代表的测井地化原理和技术在常规油气勘探中评价源岩的有机非均质性方面得到了较为广泛、成功的探索和应用^[12-14],然而,TOC 显然不如氯仿沥青“A”含量和“ S_1 ”能够更为客观地反映泥页岩的含油

量,不如“ S_0 ”、中子、气测录井等能反映含气量的变化。而从原理上讲,氯仿沥青“A”含量、“ S_1 ”和“ S_0 ”等的变化同样会在上述测井响应上得到反映,这也为利用测井资料直观评价泥页岩中的含油气性提供了可能。

1.1 有机非均质性(TOC, S_1)评价方法

$\Delta \lg R$ 技术由埃克森(EXXON)和埃索(ESSO)石油公司推导和实验得出,并得到广泛应用,其方法主要是利用补偿声波时差与电阻率曲线之间的幅度差($\Delta \lg R$)来反映泥页岩中有机质丰度变化,公式如下:

$$\Delta \lg R = \lg(R/R_{\text{基}}) + K(\Delta t - \Delta t_{\text{基}}) \quad (1)$$

$$TOC = \Delta \lg R \times 10^{(2.297 - 0.168 \Delta \lg R)} \quad (2)$$

式中: $R, \Delta t$ ——分别为实测电阻率($\Omega \cdot \text{m}$)和声波时差($\mu\text{s} \cdot \text{ft}^{-1}$);

$R_{\text{基}}, \Delta t_{\text{基}}$ ——分别为基线对应的电阻率($\Omega \cdot \text{m}$)和声波时差值($\mu\text{s} \cdot \text{ft}^{-1}$);

K ——叠合系数,定值 0.02;

LOM ——成熟度参数。

$\Delta \lg R$ 的原理主要是利用声波时差和电阻率对岩石骨架中有机质的响应特征来定量表征其丰度^[15],随着有机质丰度的增大,声波时差和电阻均呈现增大的趋势,二者的幅度差增大。然而,从理论上讲,泥页岩中含烃量的增大,同样也会造成声波时差和电阻的增大,那么也可以理解为 $\Delta \lg R$ 模型同样具有适用于定量表征含烃量。但存在一个疑问,均为基于电阻和声波参数所建立的幅度差,如何区分 TOC 和 S_1 含量对幅度差的贡献?事实上,虽然高有机质丰度和高含烃量都促使幅度差变大,然而两种幅度差的内涵存在较大的差异。从实际测井响应特征来看,未熟/低熟泥页岩,随着有机质丰度的增大,其声波时差明显增大,电阻仅小幅变化(图 1);而对成熟泥页岩, S_1 含量与电阻具有典型的正相关(图 2),这一现象表明,在刻画 TOC 含量时,幅度差计算中声波占主导地位,而在表征含烃量时,电阻参数起着关键作用。因此利用 $\Delta \lg R$ 模型分别刻画泥页岩有机质丰度和含烃量是不矛盾的。

虽然 $\Delta \lg R$ 模型得到了广泛应用,但其自身却存在两大问题:①关于叠合系数 K 的问题;②关于基线选取的问题。Passey 等分别建立了声波时差和电阻率与孔隙度的关系,通过联立方程消除孔隙度,发现在一定孔隙度范围内,声波时差和电阻率随孔隙度大致呈线性关系,斜率为 0.02,即叠合系数 K ^[16-17]。问题在于叠合系数 K 的推导过程中运用了大量的经验公式和经验系数,具有区域上的限制,而且除了孔隙外,骨架中的无机矿物同样也会产生类似的影响。因此,利用固定的叠合系数来计算各个盆地的 TOC 和 S_1 含量显然

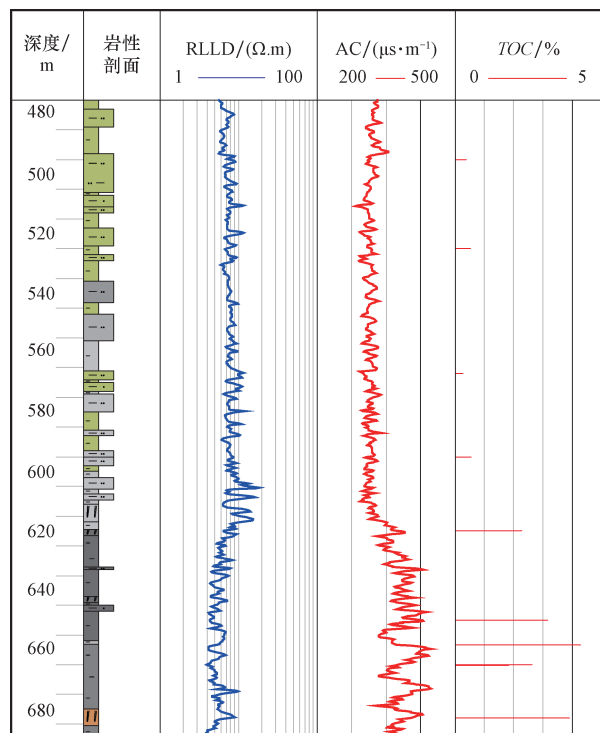
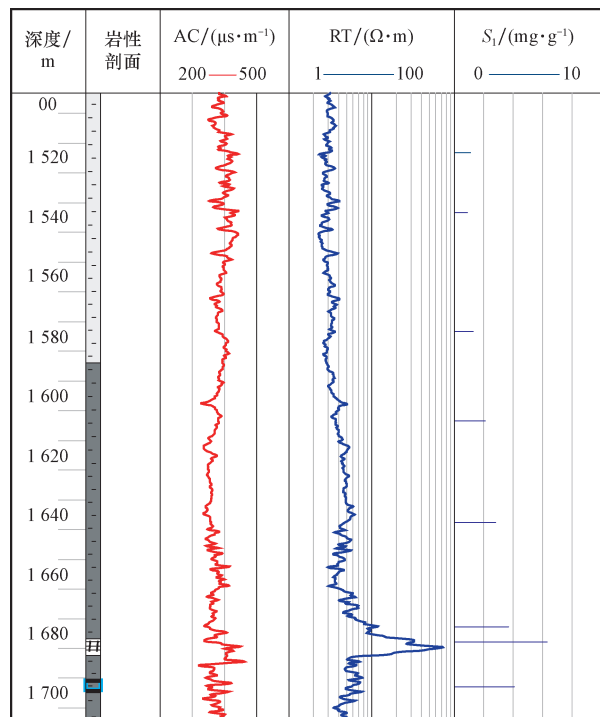


图1 松辽盆地青山口组城深1井测井曲线与TOC关系

Fig. 1 Relationship between logging curves and TOC of Well Chengshen 1

图2 松辽盆地青山口组黑101井测井曲线与S₁关系Fig. 2 Relationship between logging curves and S₁ of Well Hei 101

不合适。同时传统 $\Delta \lg R$ 法需要人为确定基线,可操作性不强,且基线的选值也直接影响着计算结果。基于此,笔者对该模型的基线自动选取、叠合系数动态优选以及 TOC 和 S₁ 背景值拟合确定等多方面做了如下改进。

由(1)式可知, K 值的物理意义为每个声波时差 ($1 \mu\text{s}/\text{ft}$) 对应对数坐标下电阻率的单位个数。 $\lg(R/R_{\text{基}})$ 是无量纲, $(\Delta t - \Delta t_{\text{基}})$ 是有量纲, K 值的地质意义为将 $(\Delta t - \Delta t_{\text{基}})$ 转化为无量纲的数, 使 $(\Delta t - \Delta t_{\text{基}})$ 与 $\lg(R/R_{\text{基}})$ 量级相当, 共同构成 $\Delta \lg R$ 。 K 值为 0.02 时, 表示对数坐标下的每个电阻率单位对应算术坐标下 $50 \mu\text{s}/\text{ft}$ 声波时差刻度。因此, 动态 K 值的表达式可以表示为:

$$K = \lg(R_{\text{max}}/R_{\text{min}})/(\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{min}}) \quad (3)$$

假定基线后, 可得到:

$$\Delta t_{\text{基}} = \Delta t_{\text{max}} - \lg(R_{\text{基}}/R_{\text{min}})/K \quad (4)$$

式中: $R_{\text{max}}(\Delta t_{\text{max}})$, $R_{\text{min}}(\Delta t_{\text{min}})$ ——分别为电阻率与声波时差曲线叠合时电阻率(声波时差)曲线刻度的最大值和最小值, $\Omega \cdot \text{m}$ 。

改进后的模型如式下:

$$\Delta \lg R = \lg R + \lg(R_{\text{max}}/R_{\text{min}})/(\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{min}}) \times (\Delta t - \Delta t_{\text{max}}) - \lg R_{\text{min}} \quad (5)$$

$$\text{TOC 或 } S_1 = A \Delta \lg R + B \quad (6)$$

式中: A ——调节因子;

B ——背景值, 即幅度差为 0 时的有机碳含量或 S₁ 含量。

在整个模型改进过程中, 关键在于叠合系数的动态优选。从表 1 数据容易发现, 无论声波时差和电阻率的刻度范围如何, 只要 K 值不变, 计算值与实测值的相关度 R^2 不变; K 值改变, 相关度 R^2 随之变化。这说明叠合系数 K 是决定利用该方法识别有机质含量准确与否的关键因素, 若想提高 $\Delta \lg R$ 与计算参数的相关度, 必须找到最佳的 K 值。理论上, K 值由小变大的过程是一个从主要识别烃类流体逐渐向烃类流体和干酪根共同识别、从主要依赖一条曲线响应无法消除其他因素的影响向两条曲线并用逐渐消除其他因素对有机质或烃类流体测井响应逐渐过渡的过程。故理论上, 随着 K 值由小到大, 计算数据与实测数据的相关度应呈现先增大后减小的趋势, 实践也证实了这一观点(图 3), 由增大到较小的转折点为最优叠合系数。

随叠合系数变化曲线在对测井曲线进行标准化处理后, 利用改进的 $\Delta \lg R$ 模型刻画了松辽盆地南部城深 1 井青山口组 TOC 和 S₁ 的垂向分布(图 4), 计算结果与实测数据吻合度较高, 相关系数 R^2 分别达到 0.98 和 0.96。

1.2 基于测井地化评价的资源等级划分

基于测井地化评价方法, 可刻画泥页岩含油气丰度的垂向变化, 这足以定量描述页岩油气总资源, 然而在页岩油气资源中, 并非所有的都易开采。从资源

表 1 叠合系数 K 与模型参数关系

Table 1 Relationship between superimposed coefficient K and model parameters

声波时差/($\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	K	R^2	$\Delta\lg R$ 均值	A	$B/\%$
0 ~ 200	0.01 ~ 0.10	0.005	0.172 3	2.856 00	4.268 3	-9.676 9
0 ~ 200	0.02 ~ 2.00	0.005	0.172 3	2.549 70	4.268 3	-8.392 0
0 ~ 200	0.01 ~ 100.00	0.020	0.498 5	0.856 30	10.670	-6.646 6
5 ~ 205	0.01 ~ 100.00	0.020	0.498 5	0.756 30	10.670	-5.579 6
1 ~ 201	0.001 10 ~ 3 478	0.325	0.741 0	0.120 47	14.247	0.774 3
-1 ~ 199	0.001 15 ~ 3 636	0.325	0.741 0	0.068 60	14.247	0.123 3

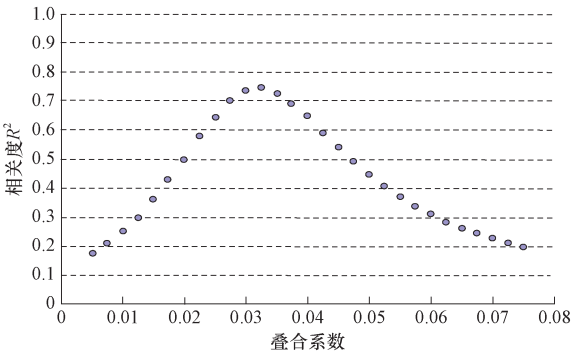


图 3 模型计算结果与实测数据的相关度 R^2

Fig. 3 Relevance coefficient R^2 between the calculated results and measured data

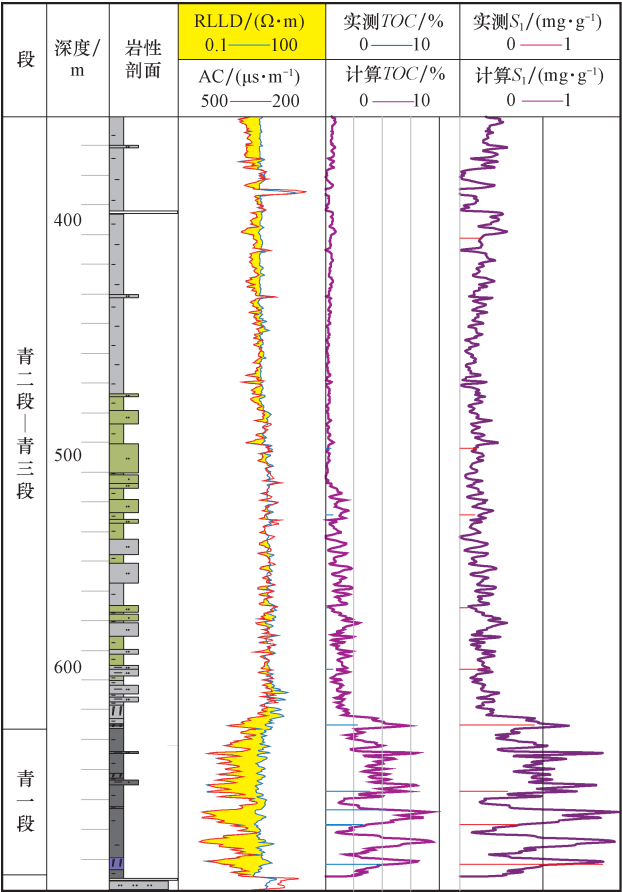


图 4 城深 1 井青山口组测井地化结果

Fig. 4 Logging geochemistry results of the Qingshankou Formation in Well Chengshen 1

评价角度理解,含油气量越大,越有利于工业开采。因此,定量刻画富集油气资源的分布和资源量,对页岩油气勘探具有现实意义。定量描述富集资源的分布特征,首先需确定刻画资源分布特征的尺度,笔者通过对松辽盆地南部地化数据分析,发现当泥页岩成熟度较低(未熟和低熟)时,残留烃含量(S_1)与 TOC 成简单的线性关系,及随着 TOC 含量增大, S_1 增大,且 S_1 普遍较低(图 5);而处于成熟阶段的泥页岩,泥页岩中残留烃含量(S_1)与 TOC 关系存在三分性(图 6),即在 TOC 含量较低时($TOC < 0.8\%$), S_1 虽然随 TOC 增大而增大,但 S_1 含量较小;而当 $0.8\% \leq TOC < 3.0\%$ 时,随 TOC 含量增高 S_1 呈显著增大;随着 TOC 含量继续增大,泥页岩中 S_1 含量呈现稳定不变的趋势。这一现象

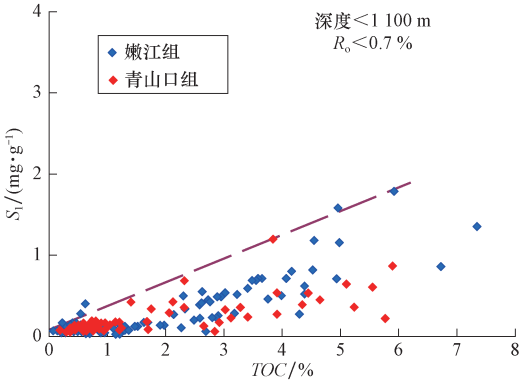


图 5 低熟/未熟泥页岩 S_1 与 TOC 关系

Fig. 5 Relationship between S_1 and TOC in immature mudstones

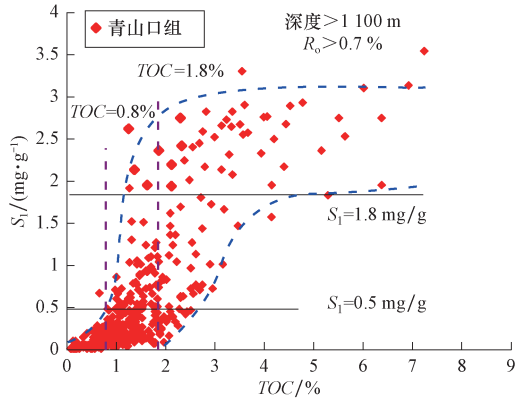


图 6 成熟泥页岩 S_1 与 TOC 关系

Fig. 6 Relationship between S_1 and TOC of mature mudstones

说明页岩油气的资源量不仅受到生烃量的影响,同时还受到泥页岩自身储集能力的制约。在 TOC 含量小于一定值时,残留油气小于泥页岩最大储集能力,因此, TOC 含量增高,生烃量随之增大,残留的油气(S_1)增大;当 TOC 大于某一数值时,生成的油气量已超过泥页岩的储集能力,多余的油气排出泥页岩中,残余油气量只受到泥页岩储集能力的控制, S_1 基本保持不变。

为了验证这种规律是否具有普遍性,笔者对松辽盆地北部、海拉尔、济阳等地区的地化指标也进行分析,同样发现类似的三分性,并由此建立了页岩油分级评价标准,将页岩油气划分为分散资源($TOC < 1\%$, $S_1 < 0.5 \text{ mg/g}$)、低效资源($1\% \leq TOC < 2\%$, $0.5 \text{ mg/g} \leq S_1 < 2 \text{ mg/g}$)和富集资源($TOC \geq 2\%$, $S_1 \geq 2 \text{ mg/g}$)^[3]。通过测井地化的方法刻画泥页岩有机质丰度和残留烃含量,将 S_1 含量平均大于 2 mg/g 且厚度不低于 30 m 层段定义为富集层段(压裂时泥页岩厚度最小需要 30 m),从而可清楚了解不同级别的页岩油气资源的垂向分布特征,对目标层段及有利区的优选均具有直接的指导作用。

图 7 为松辽盆地南部南北走向的一条联井剖面,从测井地化分析结果来看,该地区青(青山口组)一段中、下部 S_1 含量基本大于 2 mg/g , TOC 大于 2% ,厚度平均为 100 m ,为页岩油的富集层段;青一段顶部和青二段中、下部 TOC 普遍大于 2% ,但 S_1 介于 $0.5 \sim 2 \text{ mg/g}$,为低效层段;青三段 TOC 和 S_1 含量均

较低,为无效资源层段。平面上富集区主要分布在靠近松花江北部区域的青一段,南部地区虽然仍有部分区域 TOC 含量较高,但由于埋深相对较浅,有机质成熟度低,泥页岩中蕴含的液态烃(S_1)含量较低,基本为无效或低效资源。

2 页岩油气资源潜力评价方法

目前,针对页岩油气资源评价方法,在探井数量较少的盆地或凹陷(如南方古生界海相领域),推荐采用类比法,而在探井数量较多的盆地或凹陷(如东部盆地的页岩油分布区),一般采用体积法和容积法。前人在根据体积法计算资源量时一般利用单位质量岩石的平均含烃量(公式 7),但由于泥页岩有机质丰度和残留烃含量存在较强的非均质性,因而这种方法难以区分不同级别泥页岩油气的资源量,也难以刻画其空间展布。

$$Q_{\text{总}} = 10^3 Sh\rho\bar{q} \tag{7}$$

式中: $Q_{\text{总}}$ ——页岩油气总资源量, 10^3 kg ;

S ——泥页岩有效面积, km^2 ;

h ——泥页岩有效厚度, m ;

ρ ——泥页岩密度, g/cm^3 ;

$\bar{q}$ ——单位质量泥页岩含烃量, mg/g 。

在测井地化分析的基础上,采用体积法可评价不同级别页岩油资源量(公式 8)。需要注意的是,无论

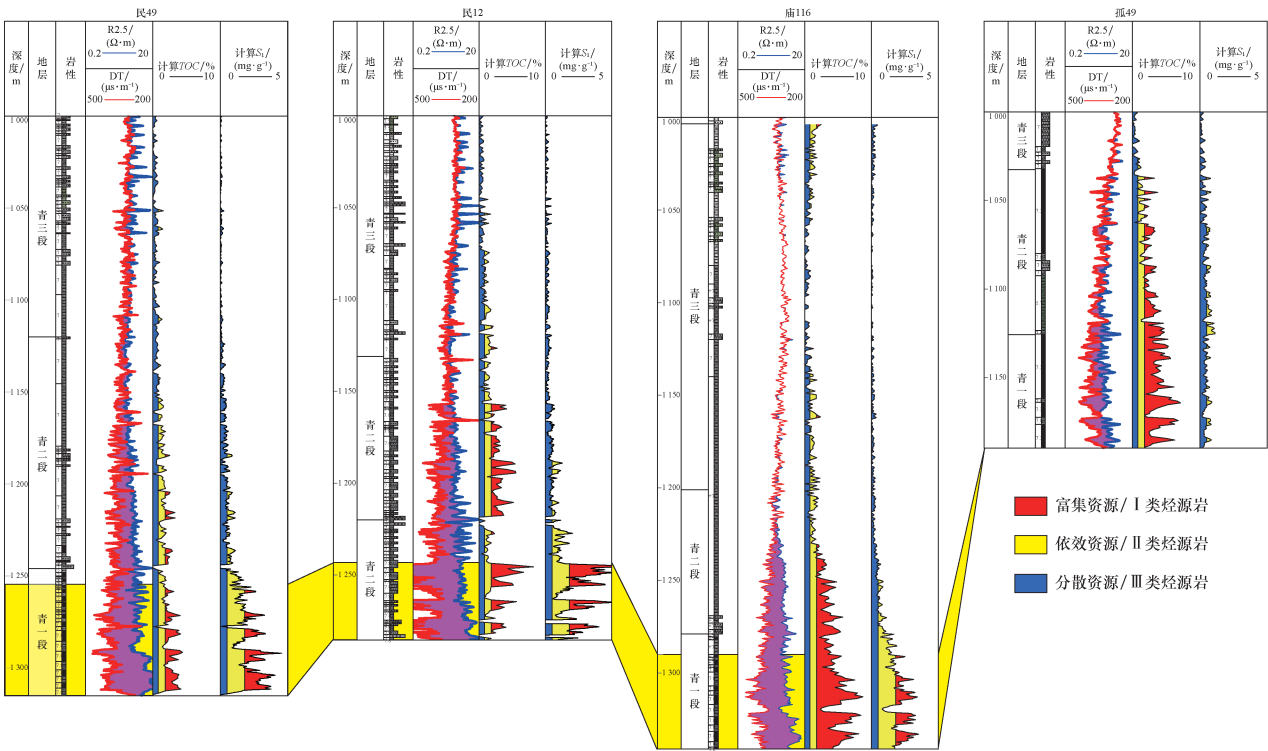


图 7 测井地化联井剖面
Fig. 7 Multi-well logging geochemistry profile

是利用氯仿沥青“*A*”含量亦或是 S_1 来计算资源量,均要进行轻烃或重烃补偿。石油烃类应包含 C_1 — C_{40} 的轻质和重质组分(图 8)^[18],以 S_1 为例, Rock-Eval 热解实验测出的 S_1 是 300 °C 之前热解出的烃(C_{33-}),在 S_2 中仍有一部分高碳数烷烃和芳烃未能在 300 °C 前热解出来,因此需要重烃校正;同时在进行热解实验前,泥页岩样品中残留烃的轻质部分(C_6 — C_{13})已挥发,在实测 S_1 中没有体现,故需要轻烃补偿。实际地层中单位质量岩石所蕴含的烃含量如式 3 所示。

$$Q = \sum 10^3 S_i h_i \rho q_i \tag{8}$$

$$q_i = S_1 + K_{\text{轻烃}} S_1 + K_{\text{重烃}} S_1 \tag{9}$$

式中: Q ——无效/低效/富集资源量, 10^3 kg;
 S_i ——不同级别泥页岩面积, km^2 ;
 h_i ——不同级别泥页岩厚度, m;
 q_i ——不同级别泥页岩含烃量, mg/g;
 S_1 ——热解烃, mg/g;
 $K_{\text{轻烃}}$ ——轻烃校正系数, 无量纲;
 $K_{\text{重烃}}$ ——重烃校正系数, 无量纲。

王安乔根据大庆、胜利、辽河、河南和珠江口盆地 61 块生油岩样品开展了不同干酪根类型和不同成熟度暗色泥岩的热解色谱分析参数校正实验,发现热解 S_2 中有相当数量的游离烃重组分 ΔS_2 (C_{33-40}),据此得出了不同类型干酪根、不同演化阶段进入 S_2 的重质组分(C_{33-40}) ΔS_2 与 S_1 比值,从而确定了针对 S_1 的重烃校正系数^[18]。从数据结果来看, ΔS_2 大小与生油岩类型有关(表 2),随演化阶段不同有微弱变化(表 3)。随着干酪根类型变差, ΔS_2 含量逐渐减少,这主要是由于随着类型的变差,干酪根中杂原子较多,键能较弱,更容易断裂,生成的重烃逐渐减少。

由于泥页岩样品在热解实验前长时间暴露在空气

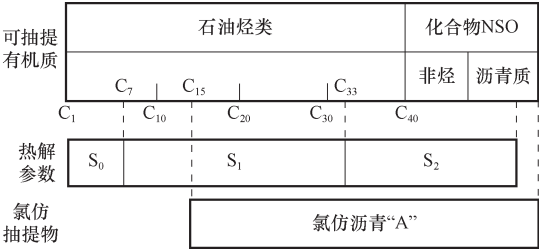


图 8 不同热解参数的烃类组分分布^[18]

Fig. 8 Distribution of hydrocarbon composition for various pyrolysis parameters^[18]

表 2 不同干酪根类型生油岩重烃校正系数^[19]

	I	II _A	II _B	II _C	III
$\Delta S_2 / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	4.22	2.70	1.61	1.02	0.33
$\Delta S_2 / S_1$	1.93	2.89	4.28	4.92	0.83

表 3 ΔS_2 与演化阶段关系^[19]

Table 3 Relationship between ΔS_2 and evolutionary stages (by Wang Anqiao, 1987)^[19]

	I	II _A	II _B	II _C	III
$T_{\text{max}} < 435\text{ }^\circ\text{C}$	3.86	2.41	2.22	0.74	0.39
$435\text{ }^\circ\text{C} \leq T_{\text{max}} < 441\text{ }^\circ\text{C}$	4.72	2.19	1.25	0.50	0.08
$T_{\text{max}} \geq 441\text{ }^\circ\text{C}$	4.10	3.70	2.17	0.44	0.55

当中,其易挥发的轻烃部分(C_{7-15})难以检测,通过密闭取心的方法检测不仅成本较高,且不同样品由于丰度、类型以及成熟度均存在差异,其轻烃含量有所不同。本次研究利用组分生烃动力学法,通过对代表性样品的生烃热模拟实验,分析不同温度下不同组分的生成速率和生成量(图 9),在沉积埋藏史和热史恢复的基础上,建立轻烃恢复系数与泥页岩成熟度关系图版(图 10)。选取的样品为松辽盆地青山口组暗色泥岩,干酪根类型 I 型,样品地化参数如表 4 所示。

3 实例应用

青山口组是松辽盆地急剧扩张、水进体系发育的

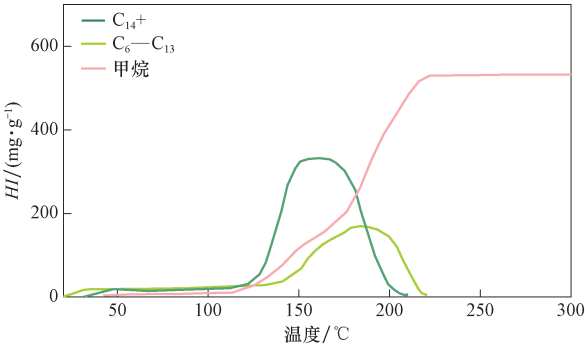


图 9 鱼 17 井青山口组泥页岩生烃产率(HI)

Fig. 9 Shale hydrocarbon yield(HI) of the Qingshankou Formation in Well Yu 17

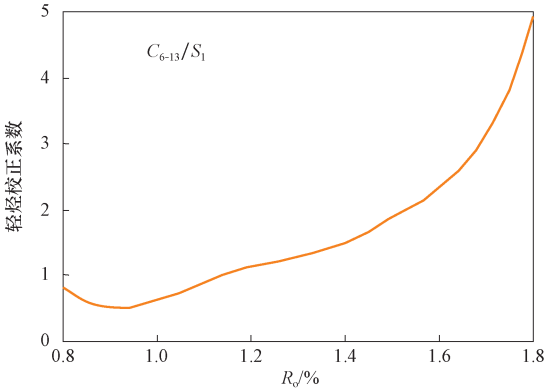


图 10 轻烃校正系数($K_{\text{轻烃}}$)与成熟度关系

Fig. 10 Relationship between light hydrocarbon correction coefficient and maturity

表 4 松辽盆地青山口组泥岩样品地化参数

Table 4 Geochemistry parameters of shale samples from the Qingshankou formation, Songliao Basin

井号	埋深/m	层位	岩性	TOC/%	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$S_1/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$S_2/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$S_3/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	HI/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	OI/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$
鱼 17	2 043.3	K_2qn^1	灰黑色泥岩	3.92	443	1.57	27.02	2.21	589	56

注: S_2 —裂解烃; S_3 —死碳; HI—氢指数; OI—氧指数。

主要时期,盆地整体下沉,沉积初期湖盆首次急剧扩张,和其后缓慢收缩,具有明显的“兴急衰缓”的特点。沉积中心处于大安—乾安一带,南薄北厚,泥岩最大厚度达 400 m 以上,泥地比占 30%~50%。岩性青山口组下部以深湖-半深湖相泥岩、页岩为主,夹油页岩。上部为黑色、深灰色泥岩夹灰色、灰绿色钙质粉砂岩和多层介形虫层。本组向盆地边部粗碎屑增多,与下伏地层泉头组呈整合—平行不整合接触。

地化特征显示,青一段 347 个有机碳样品中 TOC 大于 2.0% 达到 33%,青二段和青三段分别为 12% 和 4%; 490 个样品 S_1 大于 2.0 mg/g 占 11.2%,青二、青三段均不到 1%(图 11)。这也表明,松辽盆地南部青山口组页岩油富集资源主要分布在青一段,而青二、青三段基本为无效和低效资源,这一结论也佐证了测井地化的观点。

测井地化结果和实测地化参数显示松辽盆地南部青山口组页岩油资源主要富集在青一段,本次依据测井地化的结果,利用体积法重点评价青一段的资源潜力。结果显示,青一段页岩油总资源量达到 $156.03\times 10^8\text{ t}$,

但富集资源仅 $48.08\times 10^8\text{ t}$,2/3 以上为低效和无效资源(表 5),这亦表明虽然处于生烃阶段的泥页岩中富含海量油气,但由于泥页岩存在较强的有机非均质性,绝大部分资源以分散形式赋存于泥页岩中,难以开采,而只有富集区域和层段的泥页岩油气才有可能具备开采价值。从富集资源(一级)强度分布来看(图 12),主要分布在扶新隆起、红岗阶地及长岭凹陷北部部分区域,该区域青一段泥页岩有机质丰度高,类型好,埋深适中,成熟度主要处于成熟阶段,为页岩油的重点探区。

表 5 松辽盆地南部青山口组一段页岩油分级资源

Table 5 Shale oil resources classification in K_2qn^1 Member, southern Songliao Basin

层位	级别	恢复前资源量/ (10^8 t)	恢复后资源量/ (10^8 t)
青一段	富集资源(一级)	22.88	48.08
	低效资源(二级)	15.35	87.65
	无效资源(三级)	5.02	20.30
合计		43.25	156.03

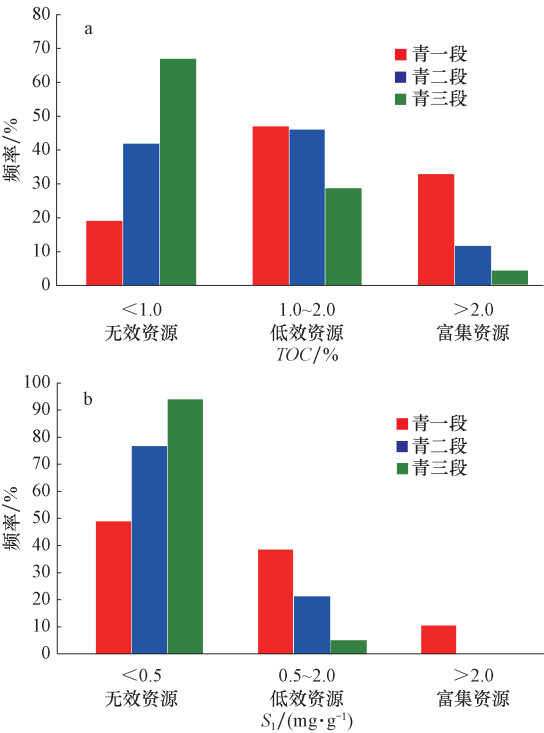


图 11 松辽盆地南部青山口组地化参数概率分布

Fig. 11 Probability distribution of geochemistry parameters in the Qingshankou Formation, southern Songliao Basin

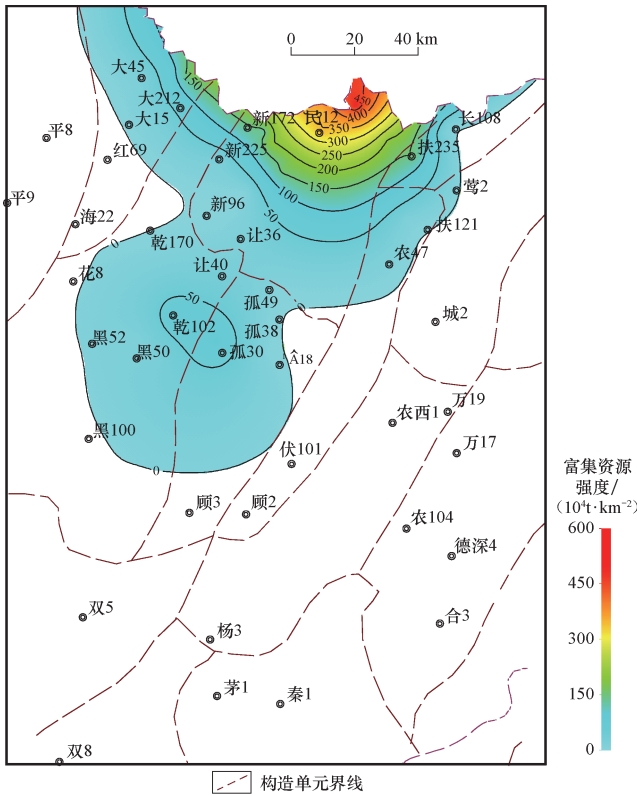


图 12 松辽盆地南部青山口组一段富集资源强度

Fig. 12 Distribution of enriched resource intensity in K_2qn^1 Member, southern Songliao Basin

4 结论

1) 基于传统 $\Delta \log R$ 模型,通过动态优选叠合系数、自动选取基线等多方面的优化,提高现有模型对泥页岩有机非均质性刻画的精度和可操作性。

2) 根据有机非均质性刻画结果,结合泥页岩资源分级评价标准,青山口组页岩油富集资源主要分布在青一段,青二、青三段有机质丰度与残留烃含量普遍较低。

3) 通过热解色谱分析参数校正实验和组分生烃热模拟实验,建立了松辽盆地热解参数 S_1 的重、轻烃补偿校正图版。

4) 在有机非均质性刻画和重、轻烃校正的基础上,利用体积法,评价了松辽盆地青一段页岩油资源潜力,其总资源量达 156.03×10^8 t,富集资源 48.08×10^8 t,主要分布在扶新隆起、红岗阶地及长岭凹陷北部部分区域。

参 考 文 献

- [1] 张大伟. 页岩气: 打开中国能源勘探开发新局面[N]. 中国国土资源报, 2012.
Zhang Dawei. Shale gas: open up a new prospect for energy exploration and development in China [N]. China Land and Resources News, 2012.
- [2] 罗承先. 页岩油开发可能改变世界石油形势[J]. 中外能源, 2011, 16(12): 22-26.
Luo Chengxian. Shale oil development may change the landscape in the world's oil market [J]. Sino-Global Energy, 2011, 16(12): 22-26.
- [3] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 249-256.
Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, Chen Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 249-256.
- [4] 董大忠, 邹才能, 杨桦, 等. 中国页岩气勘探开发进展与发展前景[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 107-114.
Dong Dazhong, Zou Caineng, Yang Hua, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 33(1): 107-114.
- [5] 刘振武, 撒利明, 杨晓, 等. 页岩气勘探开发对地球物理技术的需求[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(5): 810-818.
Liu Zhenwu, Sa Liming, Yang Xiao, et al. Need of geophysical technologies for shale gas exploration [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(5): 810-818.
- [6] 刘树根, 马文辛, LUBA Jansa, 等. 四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2239-2252.
Liu Shugen, Ma Wenxin, LUBA Jansa, et al. Characteristics of the shale gas reservoir rocks in the Lower Silurian Longmaxi Formation [J]. Natural Gas Industry, 2011, 27(8): 2239-2252.
- [7] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1857-1864.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1857-1864.
- [8] 孙海成, 汤达祯. 四川盆地南部构造页岩气储层压裂改造技术[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(1): 34-39.
Sun Haicheng, Tang Dazhen. Shale gas formation fracture stimulation in the South Sichuan Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(1): 34-39.
- [9] 聂海宽, 张金川, 包书景, 等. 四川盆地及其周缘上奥陶统一志留统页岩气聚集条件[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 335-344.
Nie Haikuan, Zhang Jinchuan, Bao Shujing, et al. Shale gas accumulation conditions of the Upper Ordovician-Lower Silurian in Sichuan Basin and its periphery [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 335-344.
- [10] 石强, 李建, 李国平, 等. 利用测井资料评价生油岩指标的探讨[J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 30-32.
Shi Qiang, Li Jian, Li Guoping, et al. Evaluation source rock indexes by Logdata [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(9): 30-32.
- [11] 肖昆, 邹长春, 黄兆辉, 等. 页岩气储层测井响应特征及识别方法研究[J]. 科技导报, 2012, 30(18): 73-79.
Xiao Kun, Zou Changchun, Huang Zhaohui, et al. Summary on logging response characteristics and identification methods for shale gas reservoir [J]. Science Technology Review, 2012, 30(18): 73-79.
- [12] 朱振宇, 刘洪, 李幼铭. $\Delta \log R$ 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 $\Delta \log R$ method in the source rock's identification [J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(4): 647-649.
- [13] 郭泽清, 孙平, 刘卫红. 利用 $\Delta \log R$ 技术计算柴达木盆地三湖地区第四系有机碳[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(2): 626-633.
Guo Zeqing, Sun Ping, Liu Weihong. The Carbon Calculation by $\Delta \log R$ Technology in Sanhu area of Qaidam Basin [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(2): 626-633.
- [14] 刘景东, 孙波, 田超, 等. “反推 $\Delta \log R$ ”法及其在生油岩有机质丰度评价中的应用[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(4): 85-88.
Liu Jingdong, Sun Bo, Tian Chao, et al. “Inverse $\Delta \log R$ ” method and its application to evaluation of organic matter abundance of source rocks [J]. Lithologic Reservoirs, 2010, 22(4): 85-88.
- [15] 闫建平, 蔡进功, 赵铭海, 等. 运用测井信息研究烃源岩进展及其资源评价意义[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 270-279.
Yan Jianping, Cai Jingong, Zhao Minghai, et al. Advances in the study of source rock evaluation by geophysical logging and its significance in resource assessment [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(1): 270-279.
- [16] 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.
- [17] 黄文彪. 松辽盆地南部中西部断陷带深层烃源岩评价[M]. 黑龙江: 东北石油大学, 2010: 24-37.
Huang Wenbiao. The evaluation of deep source rocks and prediction of favorable areas in the mid-west rift depression, Songliao Southern Basin [M]. Heilongjiang: Northeast Petroleum University, 2010: 24-37.
- [18] Bordenave M L. Geochemical methods and tools in petroleum exploration [M]. Paris: Applied Petroleum Geochemistry, 1993: 217-278.
- [19] 王安乔, 郑保明. 热解色谱分析参数的校正[J]. 石油实验地质, 1987, 9(4): 342-350.
Wang Anqiao, Zheng Baoming. Calibration of analytic parameters for pyrolytic chromatography [J]. Experimental Petroleum Geology, 1987, 9(4): 342-350.

(编辑 董立)