

文章编号: 1000-0550(2014)01-0174-08

页岩油评价的关键参数及求取方法研究^①

王 敏

(中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司地质科学研究院 山东东营 257000)

摘 要 随着非常规油气勘探的进一步深入,页岩油气逐渐成为现今勘探研究的热点和难点。目前国内针对页岩油的勘探开发没有成功的案例可循,实际工作中一直沿用了国外页岩气的勘探及评价思路。通过研究指出,页岩油自身的特点决定了其勘探不能照搬国外的页岩气评价思路,将研究重点仅仅停留在有机碳含量上无法满足勘探需要,页岩油勘探的核心问题在于地层已生成的游离烃含量的评价。利用胜利油区第一口页岩密闭取芯井分析化验资料为基础,系统研究了孔隙度与单位含油体积以及含水体积之间的关系,发现了烃源岩中孔隙性越好,含油性越好的特点。利用孔隙度、含油饱和度等岩心分析数据推导出了反映泥质页岩游离烃含量的评价模型,并构建了基于实测的深侧向电阻率、孔隙度、有机质成熟度等参数的求取模型。利用页岩地层游离烃中有机碳含量和总有机碳含量对比可以直观反映地层中游离烃含量的垂向变化规律,指示页岩层段的有利油气区段。以胜利油田沾化凹陷罗家地区罗69井实验分析资料为例,对模型的参数求取及效果分析进行了阐述,构建的地层有机质成熟度模型及游离烃中有机碳含量均精度较高,在此基础上,通过游离烃有机碳含量绝对值、以及游离烃中有机碳含量与地层有机碳含量的比值实现了对页岩油地层可动油气富集带的指示,可动油气相对富集的层段即为页岩油地层的勘探目标。该思路可为目前的陆相页岩油勘探提供借鉴和参考。

关键词 游离烃含量 页岩 有机碳含量 含水饱和度 $\Delta\log R$ 法

第一作者简介 王 敏 男 1982年出生 博士 工程师 非常规油气测井评价 E-mail: wangmin136.slyt@sin-opec.com

中图分类号 P618.12 文献标识码 A

0 引言

在现今非常规油气勘探的背景下,陆相盆地页岩油气作为我国东部老油田重要的能源接替阵地逐渐成为勘探的热点和难点^[1-4]。国内对泥质页岩的系统研究及开发较国外起步较晚,因此在勘探研究上借鉴美国页岩气的研究思路不失为一种简洁、实用的快捷途径。但随着研究程度的深入,美国的“页岩气”逐渐被赋予了新的含义,其主要是指以吸附相、游离相甚至溶解相赋存于泥页岩地层中的天然气,其中强调了吸附作用机理^[5,6],这与我国的陆相的“页岩油”概念并不完全相同,研究表明,页岩油的勘探需更关注游离态烃类的含量,这也就意味着,我国东部陆相盆地的页岩油勘探研究不能一概而论的照搬国外页岩气的研究经验,如何判别有利储集空间、优选何种参数定量评价地层游离油气含量、如何圈定和分析页岩油分布层位及变化规律等一系列问题对推动非常规油气的勘探开发、缓解老区油气接替压力具

有重要意义。本文通过研究指出,由于我国陆相页岩油的特点,页岩油勘探重点不能仅放在评价生烃潜力的有机碳含量参数上,建议对地层已生成的游离烃类给予更多的关注。为了更好的反映地层游离烃含量的变化情况,本文借鉴有机碳含量的重量百分比概念提出了游离烃含量模型,通过该参数可以直观显示垂向剖面上游离油气的变化规律,为勘探工作选层及区域层段评价提供依据和参考。

1 泥页岩油评价的特殊性

大量的文献和报告调研显示,美国“页岩气”和我国东部“页岩油”内涵不同,一是所含烃类物质不同,前者主要是气,后者主要是油;二是烃类赋存相态不同,国外页岩气侧重吸附态和游离态,我国东部陆相盆地的页岩油以游离态为主,吸附态油解析困难。同时目前公开发表的涉及国外页岩油的文献较少,且其油气主要存在于页岩间的砂质条带,类似于我们通常意义上的致密砂岩油气,与我国东部盆地页岩油主

^①中国石化页岩油气资源评价及选区专项子课题2“胜利油田东部探区页岩油气资源评价及选区研究”(编号:YYYQ-ZP-02)与中国石化科研攻关项目“济阳坳陷页岩油富集条件与有利区预测”(编号:P12062)
收稿日期:2012-10-15;收修改稿日期:2013-01-22

要存在于页岩及泥质灰岩中的情况有所不同,因此我国东部陆相盆地的页岩油的勘探不同于美国页岩气^[5,6],也不等同于国外的页岩油,其勘探工作需要着重注意以下两点。

1.1 必须考虑流体赋存机制

与美国页岩气勘探中注重游离态和吸附态的观念不同,我国陆相页岩油勘探侧重点应以游离态烃类为主,这是由于储存于泥页岩中的油一部分以游离状态赋存于微孔隙和裂缝中,少部分则吸附于有机质和岩石颗粒表面^[7,8],而在现今的开发技术条件下,吸附在有机质及岩石颗粒表面的油气基本是不可动的,意义不大。

1.2 必须考虑含油气总量

常规砂岩储层中,若不考虑油气散失,含油饱和度与含水饱和度之和应为常数1,而在东部探区陆相页岩地层中,这种情况有所不同。以胜利油区沾化凹陷沙三下亚段为例,目的层为半咸—淡水湖相沉积,岩性以页岩、灰质泥岩及泥质灰岩为主。H井为该区一口针对页岩油气的取芯井,系统的密闭取芯及丰富的实验数据为页岩油气的研究提供了便利条件。从实验室测量的含水饱和度、含油饱和度及孔隙度之间的相互关系及分析中可以得到一些有用的认识。

含水饱和度和孔隙度的测量分别采用了常压干馏法和氦气法。实验中,首先用干馏筒对岩样进行高温干馏,把岩样中的水全部干馏出以后,用无水乙醇将水蒸气溶解,用微量水分测定仪测出水的体积;将岩样进行洗油、烘干、称重,再由氦气法测出岩石孔隙度,从而通过公式计算获取含水及含油饱和度,具体步骤如下:

(1) 制备一块完整的岩芯(直径2.5 cm,长度2.5 cm),称其质量 m_1 ;

(2) 将岩芯放入干馏筒中,将干馏筒放入烘箱中,设定烘箱温度为150℃,干馏时间为24 h;

(3) 干馏结束后立即将干馏筒放入冷水中冷却30 min(冷却时,水不要浸至密封盖),取出干馏筒,擦干筒外水珠,打开密封盖,迅速加入无水乙醇,密封浸泡24 h后取4~6 mL溶液置于密封的小瓶中待测;

(4) 使用微量水分测定仪测量乙醇水溶液中水的电解值,再用标准溶液作标准曲线,把乙醇水溶液中水的电解值和标准曲线做比对,得到岩样的含水体积 V_{wa} ;

(5) 制备的完整岩样利用进行洗油(亲油情况

下利用石油醚、亲水情况下利用酒精苯)、并在65°条件下烘干,时间控制在8小时以上,烘干后称其质量 m_2 ;

(6) 利用氦气法测量岩芯孔隙度。

在获得岩芯孔隙度的基础上,采用下述公式进行计算,便可得到岩芯含水饱和度及含油饱和度。

$$V_{wa} = k \times (h - a) \quad (1)$$

$$S_w = \frac{V_{wa}}{(m_2 \times \phi) / \rho_a} \quad (2)$$

$$S_o = \frac{(m_1 - m_2 - V_{wa} \rho_w) / \rho_o}{(m_2 \times \phi) / \rho_a} \quad (3)$$

式中: V_{wa} —岩样含水,cm³; k —含水标准曲线的斜率; a —含水标准曲线与横坐标的交点; m_1 —岩样质量,g; m_2 —烘干的岩样质量,g; ρ_w —水的密度,g/cm³; ρ_o —油的密度,g/cm³; ρ_a —岩石密度,g/cm³; ϕ —岩石的有效孔隙度,%; S_w —含水饱和度,%; S_o —含油饱和度,%; h —使用微量水分测定仪测量乙醇水溶液中水的电解值。

利用岩石孔隙度与含油饱和度及含水饱和度分别乘积,通过换算可得到每立方米的含油体积和含水体积。图1和图2分别为孔隙度和每立方米岩石含油体积及含水体积的交会图,从图1中可以看到,该层段孔隙度的分布范围在1%~14%之间,随着孔隙度的增大,含油体积在0.002~0.09 m³之间变化,呈逐渐增大趋势,即孔隙越大,含油量越高;而在图2中,从孔隙度与含水体积的相对关系而言,随着孔隙度的增大,含水体积变化较小,特别是在孔隙度小于8%的范围内,含水体积基本保持不变,集中分布在0.02 m³附近的范围内,即地层中的含水量不随孔隙度的增大而增大,而是基本保持在一个稳定值上。由此我们可以得到认识,在此类地层中,含水量保持稳定,物性越好,含油饱和度越高,则含油量越大,亦即游离态油越多。

对泥质页岩的研究中,地层有机碳含量中有多少比例来自于游离态烃类的贡献也是地质人员关心的问题之一。本文在前述分析基础上,为了反映油气总量信息以及对游离烃类含量变化规律进行研究,尝试借鉴有机碳含量的重量百分比概念,构建泥岩中游离烃含量模型。藉此也可以回答来自游离烃的有机碳在实验室测量总有机碳含量中所占的比例,即可动油的相对比例。鉴于此,下面首先对有机碳含量及其求取方法进行介绍。

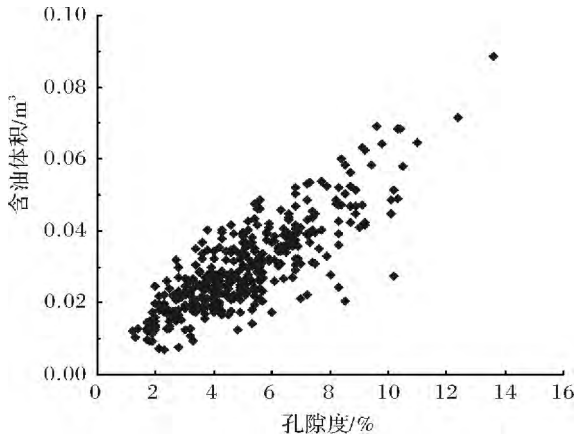


图1 孔隙度与岩石含油体积关系图

Fig. 1 Relation between porosity and rock oil-bearing volume

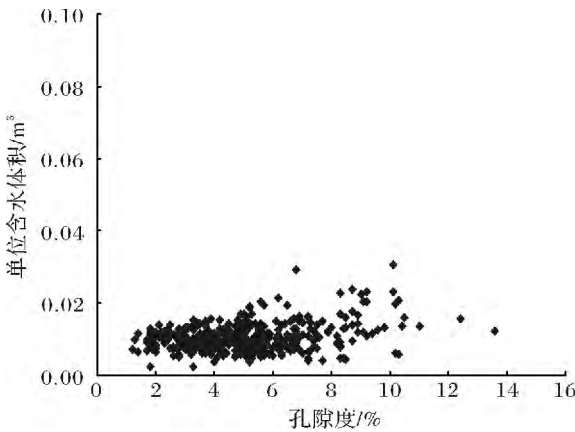


图2 孔隙度与岩石含水体积关系图

Fig. 2 Relation between porosity and rock water-bearing volume

2 有机碳含量模型及分析

有机碳含量 TOC (total organic carbon) 是指岩石中除去碳酸盐、石墨中无机碳以外的碳,即以碳元素表示岩石中有机质的含量。目前国内在岩石有机碳测定中使用的仪器是碳硫分析仪或碳测定仪,其原理是用稀盐酸去除样品中的无机碳后,在高温气流中燃烧,使总有机碳转化成二氧化碳,经红外检测器检测并给出总有机碳的含量。沉积岩石中的有机碳是生成油气的物质基础,其含量是评价烃源岩的重要参数,有机碳含量在地质剖面上的变化是随着有机质丰度、沉积环境的演变而变化的,利用其值的变化,可以比较出烃源岩的有利生油层段。

在烃源岩评价中通常采用有机碳含量作为烃源岩有机质丰度指标,经过近几十年的实践和摸索,基于测井资料计算有机碳含量的方法目前有 $\Delta \log R$ 法、密度法、自然伽马指示法、元素测井指示法等

等^[9-14],其中 $\Delta \log R$ 方法是目前公认的应用最为广泛的方法之一。

$\Delta \log R$ 模型是由 EXXON/ESSO 石油公司推导和实验得出,并成功应用的世界各地^[15],该方法能够利用不同烃源岩 TOC 在孔隙度曲线和电阻率曲线上的差异精确计算出不同成熟度条件下的有机碳含量值。该技术以预先给定的叠合系数将算数坐标下的声波时差和算数对数下的电阻率曲线叠合,通过确定基线位置,求取 $\Delta \log R$ 分布,进而建立有机碳含量定量解释关系式。计算过程包括六步:①坐标对应,要求声波时差和电阻率坐标一致;②识别非源岩层,即低 GR;③确定基线;④从测井曲线上读取计算参数 $R_{\text{基线}}$, $\Delta t_{\text{基线}}$ 等;⑤求取有机质成熟度;⑥获得计算 TOC 的经验公式为:

$$\text{TOC} = \Delta \log R \times 10^{(2.297 - 0.1688 \times \text{LOM})} + \Delta \text{TOC} \quad (4)$$

$$\Delta \log R = \log R - \log R_{\text{基线}} + K \times (\Delta t - \Delta t_{\text{基线}}) \quad (5)$$

其中,TOC 为计算的有机碳含量(%);LOM 表示有机质成熟度; ΔTOC 为有机碳含量背景值,需人为确定; $\Delta \log R$ 为两条曲线之间的距离; R 为测井实测电阻率($\Omega \cdot \text{m}$); $R_{\text{基线}}$ 为基线对应的电阻率($\Omega \cdot \text{m}$); Δt 为实测的声波时差($\mu\text{s}/\text{ft}$); $\Delta t_{\text{基线}}$ 为基线对应的声波时差($\mu\text{s}/\text{ft}$); $K = 0.02$,为声波时差和电阻率之间的叠合系数^[15]。

由于热变质指数 LOM 的取值问题,导致在方法的应用过程中误差偏大,后期逐渐利用镜质体反射率 R_o 取代热变质指数 LOM^[16]。于是式(4)变为:

$$\text{TOC} = \Delta \log R \times 10^{-0.944 \times R_o + 1.5374} + \Delta \text{TOC} \quad (6)$$

分析该方法可发现, $\Delta \log R$ 的大小只与声波时差和电阻率的刻度范围有关,而与基线位置无关,当确定了声波时差和电阻率的刻度范围,便可快速计算出 $\Delta \log R$ 值^[15]。该方法的优势在于声波曲线和电阻率曲线对孔隙度的变化都很敏感,确定给定岩性的基线后,可在一定程度上消除孔隙度的影响^[15]。实际资料处理过程中发现有两点特别需要关注:(1)基线的确定至关重要,需要引入一定的人为因素。事实上,在实际资料处理中寻找这样的基线是比较困难的。以沾化凹陷为例,罗家地区沙三段属于深湖一半深湖沉积,主要岩相为暗色的泥岩、含油泥岩、含油页岩等,大部分地区地层厚度达到 100~600 m,泥岩分布稳定,是该地区最有利的一套烃源岩,也是页岩油气最为发育的层系。在上下层段中,成熟度相差无几,寄希望于找到既有排烃的成熟烃源岩,又有非烃源泥岩来确定基线是较为困难的。(2)模型近似认为电

阻率越高越好,而受到地层中灰质的影响,电阻率偏大,从而导致测井曲线不能完全反映真实的有机碳含量信息。

鉴于以上两点,为了建立便于操作并适宜本地地区的计算模型,研究者倾向于建立基于岩芯的统计模型^[12],本文借鉴了其研究成果。

$$TOC = (2.930 \times \lg R + 0.237 \times \Delta t - 16.493) / DEN \quad (7)$$

式中, DEN 为密度测井曲线响应值(g/cm^3)。

3 地层游离烃含量模型

3.1 游离烃含量模型构建

研究表明,高品质的成熟烃源岩中,不但含有丰富的残余有机物(干酪根),而且含有大量尚未运移出去的油气(即存在于孔隙中的游离油气),这些游离油气一方面反映了页岩的有机质丰度,另一方面也与页岩的成熟度有关。因此,为了更好的反映地层中游离油气的含量及变化规律,当务之急是定义一种更加关注和反映页岩油气地层游离烃类含量变化规律的模型。在此研究思路下,将实验室岩芯测量的有机碳含量分为两类,一类来源于已生成的游离油气,其余的有机碳归为另一类,主要来源于残留干酪根,其中前者应该作为目前泥质页岩评价的重点内容。

在前述分析基础上,从实验室分析数据出发,借鉴有机碳含量的重量百分比概念,提出一种反映页岩地层游离烃含量的模型,其定义为每克岩石中游离烃所占的重量百分比,如式(8)所示:

$$\begin{aligned} Ra_{free} &= \frac{m_{\text{游离烃}}}{m_{\text{岩石}}} \times 100\% \\ &= \frac{V_{\text{游离烃}}}{V_{\text{岩石}}} \times \frac{\rho_{\text{游离烃}}}{\rho_{\text{岩石}}} \times 100\% \\ &= \frac{V_{\text{游离烃}}}{V_{\text{孔隙}}} \times \frac{V_{\text{孔隙}}}{V_{\text{岩石}}} \times \frac{\rho_{\text{游离烃}}}{\rho_{\text{岩石}}} \times 100\% \\ &= S_o \times \phi \times \frac{\rho_{\text{游离烃}}}{\rho_{\text{岩石}}} \times 100\% \end{aligned} \quad (8)$$

式中: Ra_{free} —游离烃含量,%; $m_{\text{游离烃}}$ —烃源岩中游离烃的质量, g ; $m_{\text{岩石}}$ —岩石质量, g ; $V_{\text{游离烃}}$ —烃源岩中游离烃的总体积, cm^3 ; $V_{\text{岩石}}$ —岩石的总体积, cm^3 ; $\rho_{\text{游离烃}}$ —烃源岩中游离烃密度,取 $0.916 g/cm^3$; $\rho_{\text{岩石}}$ —岩石密度, g/cm^3 ; ϕ —烃源岩的有效孔隙度,%; S_o —烃源岩游离烃饱和度,%,采用 $100-S_w$ 计算得到。

从上述定义出发,该参数与岩石含油率有一定的

相通之处。利用上述模型可以实现对泥质页岩地层游离烃的定量评价,但另外一个问题随之而来,即在实验室测量的有机碳含量中,有多少来源于游离烃,属于游离油气呢?无疑这一比例对加深页岩油勘探认识有着重要的意义。在页岩油气勘探中,既要有足够的有机碳总量(一般在1%以上),也要有比例较高的游离烃含量,二者缺一不可。

鉴于游离烃中的有机碳含量仍计量于实验室测量的有机碳总量中,即实验室测量得到的有机碳含量包含了游离烃的影响,利用游离烃中的有机碳含量与岩石总有机碳含量之比可以近似反映游离烃的垂向变化规律。

进一步地给出页岩游离烃有机碳含量的求取方法,从概念上讲,该参数是指泥质页岩中游离烃的有机碳含量,与由干酪根转化来的可溶有机碳相对应。见式(9):

$$C_{free} = Ra_{free} \times A \quad (9)$$

其中, C_{free} 为游离烃的有机碳百分含量,%; A 为每克烃类中碳的重量百分比,一般在 $0.83 \sim 0.87$ 之间,本文取 0.85 ; 利用 C_{free} 和实验室测量的有机碳总量的比值可以近似反映游离烃类含量的变化。

3.2 模型参数求取

上一节对于游离烃含量 Ra_{free} 和游离烃中有机碳含量 C_{free} 模型的建立,均是基于实验室测量的饱和度、孔隙、密度基础之上的,因此可将其视为实验室测量值。为便于推广,需要建立该值与常规测井曲线之间的定量统计模型。

利用电阻率曲线确定成熟生油岩和油气饱和度的思路是非常值得借鉴的,因为当烃源岩进入成熟阶段后,会产生大量不导电的烃类流体(一部分会通过排烃作用离开烃源岩,另一部分流体则由于吸附等作用仍然残留于烃源岩孔隙中),往往会导致成熟烃源岩的电阻率值高于未成熟烃源岩。考虑到泥质页岩游离烃中有机碳含量一方面反映了其有机质丰度,另一方面也与泥质页岩的成熟度有关,因此以孔隙度、深侧向电阻率以及成熟度为自变量,实验室测量的游离烃有机碳含量为因变量,进行多元回归,可得到研究区游离烃中的有机碳含量的统计模型,图3为游离烃所包含有机碳含量的模型精度对比,纵坐标为游离烃有机碳含量测量值,由公式(9)换算得到,横坐标为游离烃有机碳含量计算值,由式(10)计算得到。

$$C_{free} = 1.5438 \times Ro + 0.3298 \times \phi + 0.1689 \times \log(Rd) - 1.5188 R^2 = 0.9875 \quad (10)$$

其中, R_d 为深侧向电阻率, $\Omega \cdot m$; ϕ 为孔隙度, %; R_o 为有机质成熟度, 无量纲, 可以通过求得, 参见图 4 和图 5。

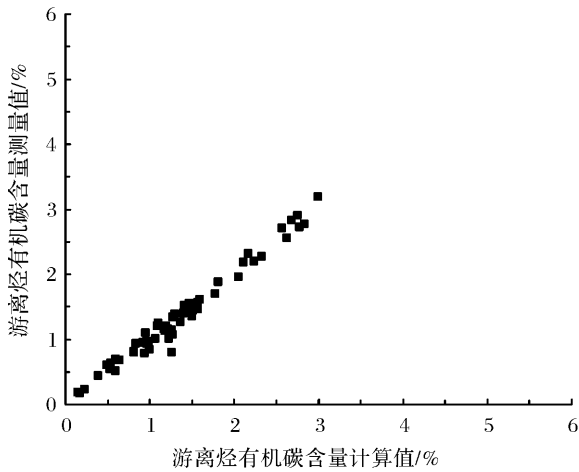


图 3 地层游离烃中有机碳含量模型的精度验证
Fig. 3 NC verification of organic carbon content model among formation free hydrocarbon

对于沾化凹陷有: $R_o = 0.05 \times e^{0.0009 \times depth}$, $R^2 = 0.7021$;

对于东营凹陷有: $R_o = 0.1658 \times e^{0.0004 \times depth}$, $R^2 = 0.7603$ 。

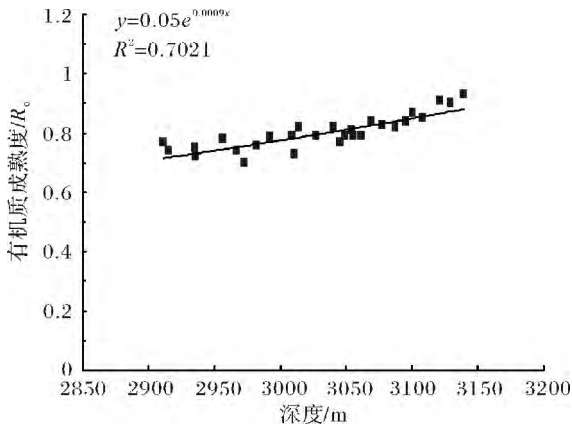


图 4 沾化凹陷有机质成熟度与埋深关系图
Fig. 4 Relation between organic matter maturity and buried depth in Zhanhua sag

4 实例处理及分析

沾化凹陷是济阳拗陷页岩油气最发育的地区之一, 泥质页岩脆性矿物含量高, 广泛发育微孔隙、微裂缝和异常高压, 压力系数在 1.2 以上, 具备页岩油气富集的条件。页岩油气纵向上主要发育于沙三下亚段和沙一段, 在沙四上、沙三中, 也有少量出现。岩性

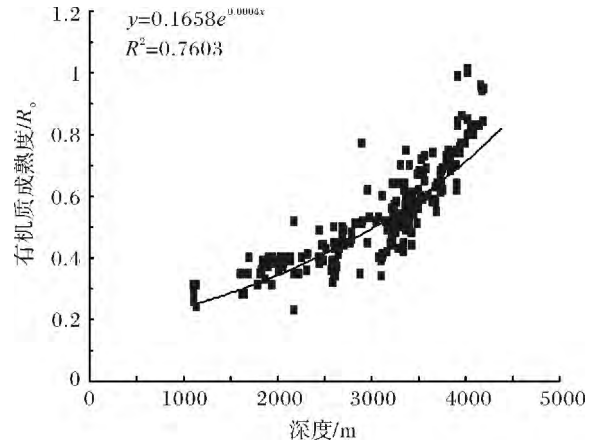


图 5 东营凹陷有机质成熟度与埋深关系图
Fig. 5 Relation between organic matter maturity and buried depth in Dongying sag

以含油页岩、含油泥岩为主, 还包括少量变质泥岩、炭质泥岩、灰质泥岩等其它泥质岩类以及泥质岩与粉砂岩组成的薄互层, 薄层厚度在 0.3 ~ 1.2 m 之间变化。罗家地区为其次级构造单元, 呈近南北向带状分布, 其西与四扣洼陷相连, 北以渤深 4 南断层与渤南洼陷相连, 其沙三下地层属于深湖—半深湖沉积, 泥质页岩发育稳定, 是渤南洼陷最有利的一套烃源岩。

对沾化凹陷罗 69 井沙三下层段进行处理, 处理结果见图 6, 其中前三道为测井常规曲线道, 第五道和第六道分别为实验室测量的孔隙度和含水饱和度值, 第七道为含油体积, 即孔隙度与含油饱和度乘积, 主要反映可动流体的体积; 第八道为有机碳含量的实验室测量值和计算值, 第九道为页岩地层游离烃中有机碳含量的实验测量值和模型计算值的对比, 游离烃中有机碳含量的实验测量值由公式 (8) 转换而来。从图中可以看到有机碳含量在 2% ~ 6% 之间变化, 总有机碳含量和游离烃中有机碳含量的计算值和测量值都有着较好的一致性, 说明模型的精度较好, 可以应用。

图 7 是对罗 69 井页岩地层游离烃中有机碳含量的垂向变化剖面图, 从 2 900 m 到 3 130 m, 游离烃中有机碳含量呈现先变大后变小趋势, 在 3 000 ~ 3 060 m 左右达到高值, 约大于 3%, 说明此层段的游离油气绝对含量最高, 这一点从常规测井曲线的响应上也可得到印证, 该层段自然电位负异常, 声波时差变大, 显示有良好的储集空间, 同时深探测电阻率增大, 显示受较多的油气影响。图 8 为游离烃中有机碳含量与总有机碳含量比值的垂向变化分析, 鉴于游离

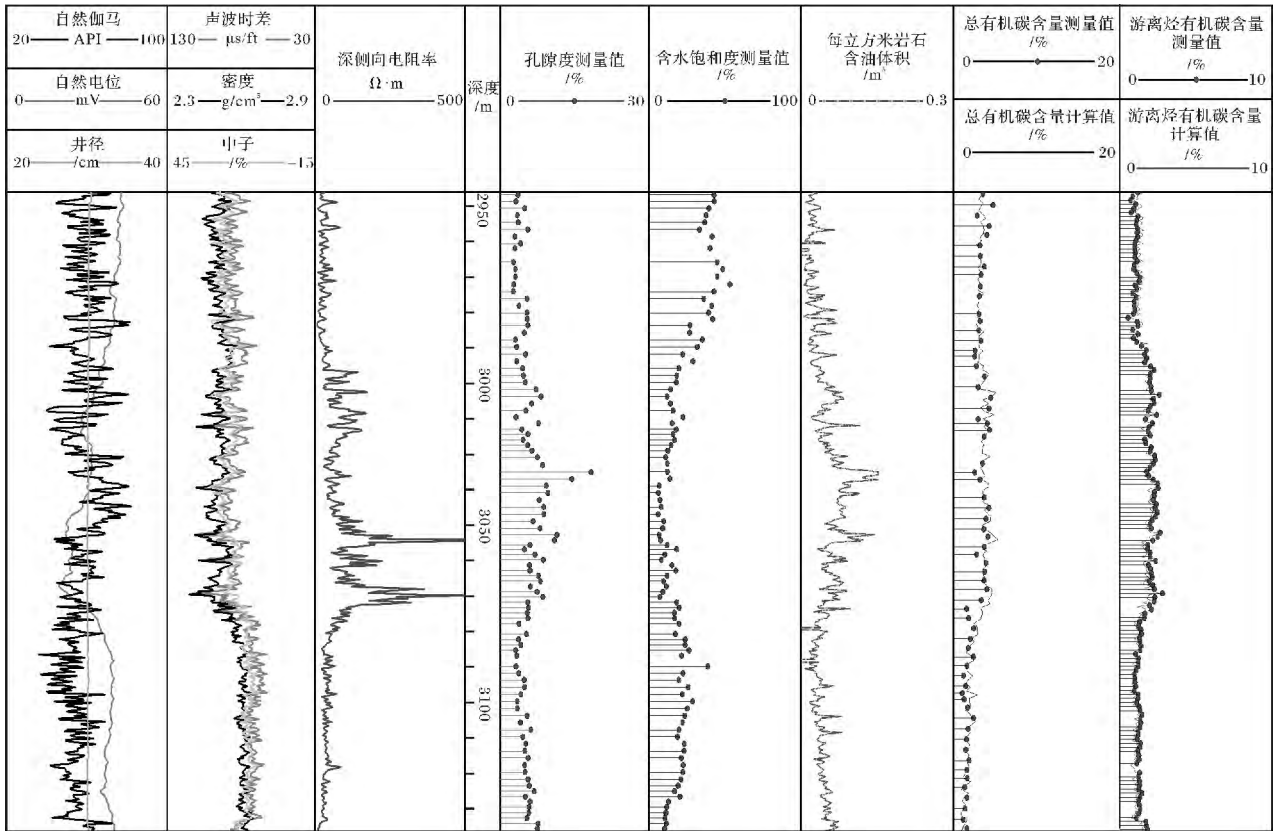


图 6 罗 69 井页岩游离烃中有机碳含量处理结果

Fig. 6 Processing result of organic carbon content among free hydrocarbon in shale of Well Luo 69

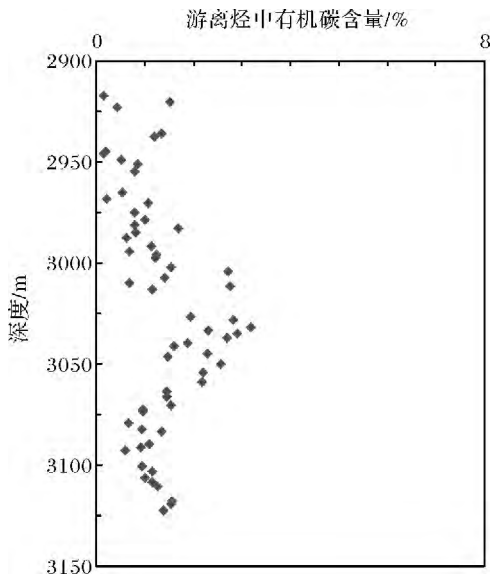


图 7 罗 69 井游离烃中有机碳含量垂向变化图

Fig. 7 Vertical variation of organic carbon content among free hydrocarbon of Well Luo 69

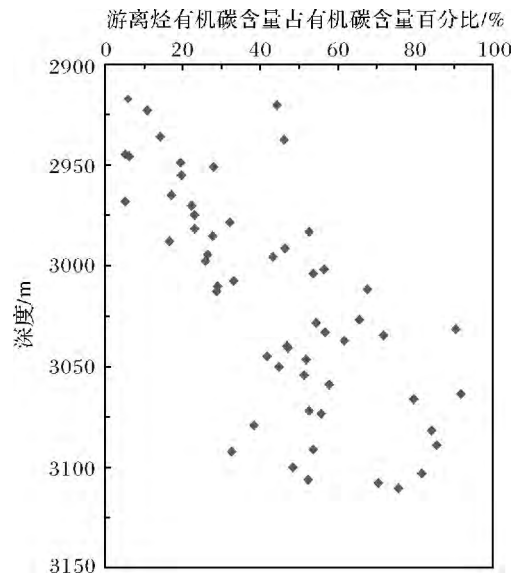


图 8 游离烃有机碳含量与有机碳含量比值垂向变化图

Fig. 8 Vertical variation of the ratio of organic carbon content among free hydrocarbon and organic carbon content

烃有机碳含量与游离烃含量之间仅存在系数关系,因此其相对高值可看作游离烃含量高值,即包含较高比

例的游离油气。图中 3 075 ~ 3 125 m 虽然总有机碳含量较低,约在 2% 左右,但其游离油气所占比例很

高,因此也可以作为勘探的目标的参考。

为了解和验证罗家地区沙三下亚段泥质页岩储集性能及含油气情况,在罗69井附近部署了一口开发页岩油气的水平井BP-1井,其目的层段相当于罗69井的3040~3060 m层段,目前该井顺利完钻,并在沙三下段获得了良好的油气显示,钻至水平段4288.00~4335.54 m时,钻时44.8 min/m,指数1.25,综合录井全烃1.77%↗91.57%,甲烷0.02%↗87.11%,乙烷0.006%↗2.471%,丙烷0.034%↗1.943%,异丁烷0.011%↗0.187%,正丁烷0.055%↗0.578%,异戊烷0.037%↗0.134%,正戊烷0.058%↗0.213%。试油资料显示,目前日产油3 t左右,累计产油120 t,有力地辅证了本文提出的研究思路。

5 结论

页岩油气是一种非常规的油气藏,在我国还处于起步勘探阶段,特别是对于济阳坳陷的陆相地层,没有成功的实例可以借鉴。因此,通过研究和分析国外泥质页岩油气勘探开发的成功实例,不断在勘探实践中探索和创新,才能建立起适合陆相盆地的相关技术和方法,实现泥质页岩油气勘探的突破。通过对比和分析,笔者认为,泥质页岩油本身的独特性决定了在目前页岩油气勘探中仅仅关注反映生烃能力的有机碳含量不足以满足勘探需要,对于已生成的游离烃含量需要给予更多关注。通过井实例的处理及分析,本文建立的游离烃模型直观的显示了垂向剖面中游离烃含量的变化趋势,可以更好的为勘探工作提供参考,对目前的非常规油气勘探有一定的借鉴和参考意义。

致谢 在论文的写作和修改过程中,得到了胜利油田地质院朱家俊教授级高工的悉心指点和无私帮助,同时也得到了郝运轻、李政等专家的指导和开发实验室的资料支持,在此一并表示感谢。衷心感谢编辑及审稿专家提出的宝贵意见及建议。

参考文献 (References)

- 1 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等. 中国页岩气研究现状与发展趋势[J]. 石油学报,2010,31(4):689-694 [Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, et al. Research status and trends of shale gas in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 689-694]
- 2 李新景,胡素云,程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发,2007,34(4):392-400 [Li Xinjing, Hu Suyun, Chen Keming. Suggestions from the development of fractured shale gas

- in North America[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 392-400]
- 3 王建,马顺平,罗强,等. 渤海湾盆地饶阳凹陷烃源岩再认识与资源潜力分析[J]. 石油学报,2009,30(1):51-55 [Wang Jian, Ma Shunping, Luo Qiang, et al. Recognition and resource potential of source rocks in Raoyang sag of Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 51-55]
- 4 张林晔,李政,朱日房. 页岩气的形成与开发[J]. 天然气工业,2009,29(1):124-128 [Zhang Linye, Li Zheng, Zhu Rifang. The formation and exploitation of shale gas[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(1): 124-128]
- 5 刘庆,张林晔,沈忠民,等. 东营凹陷湖相盆地类型演化与烃源岩发育[J]. 石油学报,2004,25(4):42-45 [Liu Qing, Zhang Linye, Shen Zhongmin, et al. Evolution of lake-basin types and occurrence of hydrocarbon source rocks in Dongying depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(4): 42-45]
- 6 王永诗,金强,朱光有,等. 济阳坳陷沙河街组有效烃源岩特征与评价[J]. 石油勘探与开发,2003,30(3):53-55 [Wang Yongshi, Jin Qiang, Zhu Guangyou, et al. Characterization of effective source rocks in the Shahejie Formation of Jiyang depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 53-55]
- 7 Curtis J B. Fractured shale-gas system[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11):1921-1938
- 8 MattMavor. Barnett shale gas-in place volume including sorbed and free gas volume[C]. AAPG Southwest Section Meeting. Fort Wortg, Texas, 2003
- 9 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 rocks identification[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(4): 647-649]
- 10 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,2006,27(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, 2006, 27(3): 84-87]
- 11 许晓宏,黄海平,卢松年. 测井资料与烃源岩有机碳含量的定量关系研究[J]. 江汉石油学院学报,1998,20(3):8-12 [Xu Xiaohong, Huang Haiping, Lu Songnian. A quantitative relationship between well logging information and organic carbon content[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1998, 20(3): 8-12]
- 12 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,2003,27(3):104-109 [Zhu Guangyou, Jin Qiang, Zhang Linye. Using log information to analyze the geochemical characteristics of source rocks in Jiyang depression[J]. Well Logging Technology, 2003, 27(3): 104-109]
- 13 陈增智,郝石生,席胜利. 碳酸盐岩烃源岩有机质丰度测井评价方法[J]. 石油大学学报:自然科学版,1994,18(4):16-19 [Chen Zengzhi, Hao Shisheng, Xi Shengli. Evaluation of organic matter content in carbonate source rock by using log data[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1994, 18(4): 16-19]

- 14 母国妍,钟宁宁,刘宝,等. 湖相泥质烃源岩的定量评价方法及其应用[J]. 石油学报,2010,31(2):218-224 [Mu Guoyan, Zhong Ningning, Liu Bao, *et al.* The quantitative evaluation method of lacustrine mudstone source rock and its application[J]. *Acta Petroleologica Sinica*, 2010, 31(2): 218-224]
- 15 胡慧婷,卢双舫,刘超,等. 测井资料计算源岩有机碳含量模型对比及分析[J]. 沉积学报,2011,29(6):1199-1205 [Hu Huiting, Lu Shuangfang, Liu Chao, *et al.* Models for calculating organic carbon content from logging information: comparison and analysis[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(6): 1199-1205]
- 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(12): 1777-1794

Key Parameter and Calculation in Shale Oil Reservoir Evaluation

WANG Min

(Geoscience Scientific Research Institute, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000)

Abstract: Research indicates that focus merely on the organic carbon content can not meet exploration needs because the characteristics of the shale formation. The most important issue of the exploration is to evaluate the free hydrocarbon content in shale formation. The relationship between porosity and oil volume in per cubic meter of rock and the relationship between porosity and water volume in per cubic meter of rock have been studied. The result shows that in the oil source rock, the characteristics of oil-bearing is increasing with the increasing of rock porosity.

On basis of the analysis of closed cored laboratory data such as the porosity and oil saturation in Shengli Oil field, an new evaluation model is constructed to reflect the free hydrocarbon content. And the logging interpretation model has also been established by using the deep resistivity curve response value, porosity and the organic matter maturity to calculate it. The ratio of organic carbon content from free hydrocarbon and total organic carbon content can directly reflect the vertical variation regulation of the free hydrocarbon content, which also indicates the favorable oil and gas exploration section. An example from LuoJia area in Zhanhua sag has been reprocessed. A new model of the organic matter maturity was derived based on the experimental data and the depth. The calculating result shows a good application of this method. The indicator of free hydrocarbon enrichment zone can be derived by combining two parameter.

One is the absolute value of organic carbon from free hydrocarbon, the other is the value between absolute value of organic carbon content from free hydrocarbon and the total organic carbon content. The section with high ratio will be the exploration targets of shale oil reservoir. This idea can provide reference for today's shale oil and gas exploration.

Key words: free hydrocarbon content; shale; organic carbon content; water saturation; $\Delta\log R$ method