

·勘探技术·

泥页岩油气藏有机碳含量地球物理预测方法

——以济阳拗陷罗家地区沙三段下亚段为例

张营革

(中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营 257022)

摘要: 济阳拗陷罗家地区沙三段下亚段泥页岩油气藏具有较大的勘探潜力, 预测其有机碳含量分布特征是油气勘探的关键。针对传统的实验室测定有机碳含量方法存在的采样少、成本高等问题, 提出了利用地球物理技术预测泥页岩油气藏有机碳含量分布的方法。该方法在泥页岩岩石组分划分的基础上, 利用富含有机碳的泥页岩低密度、低速度的物理特征, 推导了单井定量估算有机碳含量的计算公式, 验证了低波阻抗对于有机碳含量的敏感响应关系; 并利用井、震联合反演方法预测了有机碳含量平面展布特征。该方法在罗家地区沙三段下亚段泥页岩有机碳含量预测中取得了较好的应用效果, 预测的有机碳含量相对误差最大为22%, 最小为0.04%, 平均小于9%。

关键词: 泥页岩 有机碳含量 波阻抗 反演预测 罗家地区

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)05-0064-04

泥页岩油气藏作为一种“自生自储”的油气藏类型, 已在北美地区进入了商业性运营阶段。2000年, 美国页岩气的年产量为 $122 \times 10^8 \text{ m}^3$, 到2007年, 仅Newark East页岩气田的年产量就达 $217 \times 10^8 \text{ m}^3$, 预计2015年北美地区页岩气总产量将达到 $1800 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[1]。泥页岩油气藏在我国的松辽、渤海湾、江汉、四川及柴达木盆地相继被发现, 已经成为勘探高成熟油区下一步寻找油气的新领域^[2-8]。从研究进度来看, 该类型油气藏勘探目前在中国还处于探索、评价选区阶段^[9]。

罗家地区位于胜利油区陈家庄凸起北部的罗家鼻状构造带, 北部以斜坡过渡至四扣一渤南洼陷, 向西与四扣一邵家洼陷相连, 东邻垦西地垒及三合村洼陷, 属于济阳拗陷的缓坡之一^[10]。该区已有罗42、罗19、新义深9、义182等多口井在沙三段下亚段泥页岩段获得高产工业油流, 具有较大的勘探潜力。有机碳含量(TOC)是评价烃源岩生烃强度和生烃量的一项重要参数^[11]。通常根据实验室测定的方法来评价烃源岩生烃潜力, 但受采样数据少、成本高等因素的影响, 难以满足勘探需求。笔者利用地球物理方法建立了测井、地震数据与有机碳含量之间的关系模型, 进而预测泥页岩有机碳含量的平面分布特征, 弥补了实验室采样不足的缺陷, 为泥页岩油气的勘探提供更加丰富的参数

数据。

1 泥页岩组分类型与电性特征

1.1 组分类型

泥页岩岩石成分主要由岩石骨架、固态有机质与孔隙流体组成。其中主要成分为灰质、砂质和泥质的岩石骨架约占80%以上, 其余部分为固态有机质和束缚水。根据岩石内有机质含量及其是否已经生烃2个条件, 可将泥页岩划分为3种类型^[12](图1): I类泥页岩不含有机质与烃类, 不具备生烃能力; II类泥页岩含有机质但还没有达到生烃门限; III类泥页岩含有机质并且已经有烃类生成。

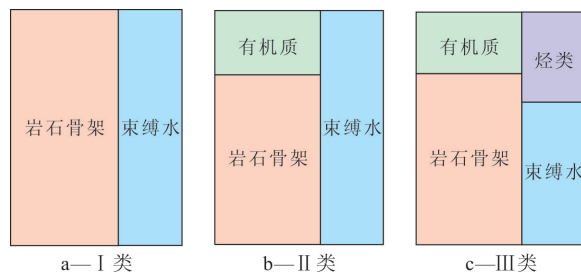


图1 泥页岩岩石组分类型划分

1.2 电性特征

相对于泥页岩岩石骨架高速度、高密度的电性特征, 有机质本身具有低速度(高声波时差)、低密

收稿日期: 2013-06-21。

作者简介: 张营革, 女, 高级工程师, 从事地震资料综合解释及研究。联系电话: (0546)8789685, E-mail: zyge123@163.com。

基金项目: 中国石化科研攻关项目“济阳拗陷泥页岩油气富集区地震预测技术研究”(P1209)。

度的特点,且烃类本身具有高电阻率特征。因此,利用声波时差和电阻率之间的差异性可识别高丰度有机质层段及含烃类层段^[13]。先利用自然伽马曲线辨别并剔除地层中的常规层段(层段B,D,G),再通过声波时差曲线和电阻率曲线的叠合来识别泥页岩组分(图2),对于I类泥页岩,由于不含有机质,声波时差与电阻率2条曲线彼此重合(层段A和E);对于II类泥页岩,由于富含有机质且还没有生成油气,声波时差存在负异常响应,而电阻率变化不大,2条曲线存在一定差异(层段C);对于III类泥页岩,除了声波时差曲线对有机质的响应之外,同时由于烃类的存在,电阻率增加,使得2条曲线产生了更大幅度差异(层段F)。

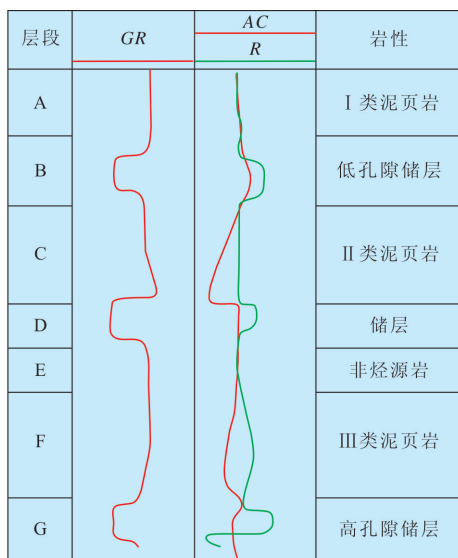


图2 测井曲线识别泥页岩组分地质模型

不同类型泥页岩电性特征的差异,说明有机碳含量与声波时差、电阻率等地球物理参数之间存在着一定的相关性。因此依据地球物理参数所具有的数据量大、资料丰富等特点,通过建立实测有机碳含量与测井、地震等地球物理参数之间的关系式,可进行有机碳含量预测。

2 有机碳含量地球物理预测方法

2.1 单井有机碳含量预测方法

利用 $\Delta \lg R$ 法进行单井有机碳含量预测,反映了高有机碳含量层段电阻率与声波时差之间的幅度差,其表达式为

$$\Delta \lg R = \lg \frac{R}{R_{\text{基线}}} + b(\Delta t - \Delta t_{\text{基线}}) \quad (1)$$

式中: $\Delta \lg R$ 为电阻率与声波曲线的幅度差; R 为实测电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; $R_{\text{基线}}$ 为不含有机质泥页岩的

骨架岩石的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; b 为实测参数回归计算所得常数; Δt 为实测声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$; $\Delta t_{\text{基线}}$ 为不含有机质泥页岩的骨架岩石对应的声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$ 。

由于有机碳含量越高,电阻率与声波时差之间的幅度差异越大,利用 $\Delta \lg R$ 法估算有机碳含量的关系式为

$$TOC = a \Delta \lg R + \Delta TOC \quad (2)$$

式中: TOC 为有机碳含量,%; a 为实测参数回归计算所得常数; ΔTOC 为基础有机碳含量参数,与研究区地质特征有关。

由于电阻率与声波时差曲线两者量纲存在差别,为避免 R 与 Δt 曲线对幅度差值的贡献差别过大,影响电阻率与声波时差曲线的对比,对2条曲线的取值进行简单的归一化处理,其计算式分别为

$$\lg R' = \frac{\lg \frac{R}{R_{\text{基线}}}}{\lg \frac{R_{\text{max}}}{R_{\text{基线}}}} \quad (3)$$

$$\Delta t' = \frac{\Delta t - \Delta t_{\text{基线}}}{\Delta t_{\text{max}} - \Delta t_{\text{基线}}} \quad (4)$$

$$\Delta \lg R' = \lg R' + \Delta t' \quad (5)$$

式中: R' 为电阻率曲线做归一化处理后的值, $\Omega \cdot \text{m}$; R_{max} 为电阻率曲线的最大值, $\Omega \cdot \text{m}$; $\Delta t'$ 为声波时差曲线做归一化处理后的值, $\mu\text{s}/\text{m}$; Δt_{max} 为声波时差曲线的最大值, $\mu\text{s}/\text{m}$ 。

将式(5)简化并改进,代入式(2)可得

$$TOC = m \Delta \lg R' + n \quad (6)$$

式中: m 和 n 均为常数。

受岩性差异以及泥页岩有机质成熟度的影响, TOC 值非均质性差别较大,运用式(6)计算不同层段泥页岩的 TOC 值误差也较大;因此,实际应用中需分层组建立关系、分段求取,预测效果相对较好。

研究区沙三段泥页岩段共划分为13个层组,从已钻探的情况来看,12和13层组为主要油气富集层组,将其分别划分为12s,12x,13s,13x共4个小层。根据已有的实测 TOC 值与 $\Delta \lg R'$ 做交会图,分别得到12s,12x—13s,13x小层的回归公式,相关系数大于0.6。以罗67井为例,通过回归公式计算有机碳含量,所得值与实测数据具有很好的吻合性(图3),利用该方法求取的公式可较好地单井有机碳含量估算。

2.2 有机碳含量平面分布预测

目前对于预测有机碳含量平面分布还没有较好的理论方法。通过前面的分析可知,利用 $\Delta \lg R$ 法进行单井有机碳含量估算,再结合实际地质认

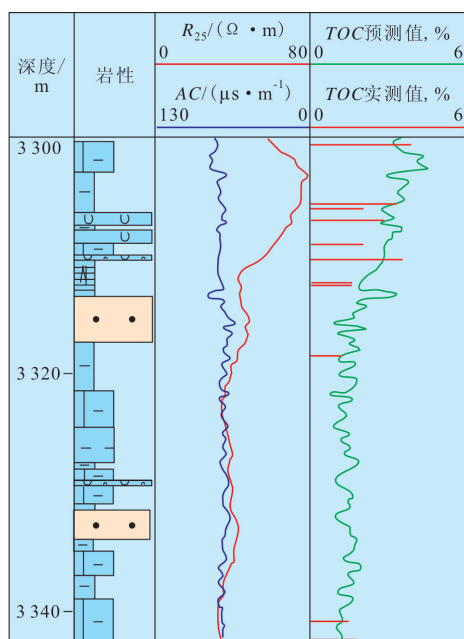


图3 罗67井 TOC 值计算结果与实测值对比

识,利用单井估算结果内插可以预测有机碳含量平面分布。由于该预测方法得到的结果存在较多的主观因素,导致无井控制区域误差较大,往往难以满足地质条件复杂区的勘探需求。多曲线联合约束反演预测有机碳含量的主要原理是构建多曲线联合约束条件,建立基于约束条件下的有机碳含量解释模型,使得约束后的拟波阻抗曲线能够更加精细地反映其变化趋势,从而有效地利用反演方法进行有机碳含量平面分布预测。

2.2.1 岩石物理解释模型的建立

由于有机碳含量的增加会使岩石总体密度下降,即有机碳含量与岩石密度呈负相关^[13-15]。因此,结合体积模型算法将密度代入式(2)得到 TOC 值计算式

$$TOC = \frac{a_1 + b_1 \Delta T + c_1 \lg R}{\rho} \quad (7)$$

式中: a_1 , b_1 , c_1 分别为实测参数回归计算所得常数; ΔT 为声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$; ρ 为泥页岩岩石密度, g/cm^3 。

由于

$$\Delta T = \frac{1}{v} \quad (8)$$

$$\rho v = P_{\text{im}} \quad (9)$$

式中: v 为泥页岩的层速度, m/s ; P_{im} 为波阻抗, $(\text{g}/\text{cm}^3) \cdot (\text{m}/\text{s})$ 。

则式(7)可表示为

$$TOC = \frac{a_1 + c_1 \lg R}{\rho} + \frac{b_1}{P_{\text{im}}} \quad (10)$$

式(10)因第3项中含有密度信息,故将第2项中的密度项舍去得到

$$TOC = a_2 + c_2 \lg R + \frac{b_2}{P_{\text{im}}} \quad (11)$$

式中: a_2 , b_2 , c_2 为舍去密度信息后,对实测参数重新回归计算所得常数。

结合实测数据对式(11)进行线性回归,可得到含电阻率、波阻抗参数的 TOC 值计算式为

$$TOC = -2.09 \lg R + \frac{62.9}{P_{\text{im}}} \quad (12)$$

式(12)相关系数为0.8。因包含密度参数,计算精度相对于 $\Delta \lg R$ 法有了较大提高。同时因为含有波阻抗值的关系式,从而为利用波阻抗反演数据体预测有机碳含量平面分布提供了理论基础。

2.2.2 多曲线联合约束反演

由于利用式(12)反演预测 TOC 值平面分布的运算过程较为繁琐,为了进一步简化公式,依据 TOC 值与波阻抗之间为负相关关系的特点,结合研究区6口井的实测有机碳含量与波阻抗对式(12)进行线性回归,得到 TOC 值与波阻抗之间的经验关系式为

$$TOC = 5.9178 \ln \frac{1}{P_{\text{im}}} + 16.238 \quad (13)$$

在线性回归过程中舍去了电阻率的信息,故式(13)相关系数有所降低,仅为0.67。为进一步提高精度,需对原公式中的波阻抗值进行多曲线联合约束。结合多口井实测 TOC 值与声波时差之间回归关系,得出

$$\Delta T = -0.84 TOC^2 + 13.5 TOC + 58 \quad (14)$$

将式(6)与式(12)分别代入式(14)中的第1项和第2项,这样所得的声波时差中便含有电阻率、密度等多项信息。该过程相当于对声波时差进行多曲线条件约束,得到拟合波阻抗,即将式(12)中第2项电阻率信息融合到第3项拟合波阻抗信息之中。该拟合波阻抗融合了电阻率、密度等多方面信息,能进一步反映岩石中有机碳含量的组分特征,从而与 TOC 值之间具有更好的相关性。最后利用实测 TOC 值与拟合波阻抗线性回归得到多曲线约束条件下的 TOC 值计算式为

$$TOC = 7.308 \ln \frac{1}{P_{\text{im-n}}} + 19.32 \quad (15)$$

式中: $P_{\text{im-n}}$ 为拟合波阻抗, $(\text{g}/\text{cm}^3) \cdot (\text{m}/\text{s})$ 。

式(15)的相关系数为0.80,相对于式(13)的相关性有了很大提高,能够满足勘探过程中对预测精度的需求。同时,约束改进后的拟合波阻抗仍保留

了原有的量纲,从而在提高精度的同时保留了反演结果的意义。

3 应用实例

以罗家地区24口井的声波时差、密度和电阻率等地球物理数据为基础,利用渤南三维地震数据体进行反演运算,得到研究区三维波阻抗反演数据体。结合有机碳含量与波阻抗之间的经验公式将波阻抗反演数据体转化为TOC值数据体(图4a),对该数据体提取平面属性并网格化,完成了各层组TOC值的平面预测(图4b)。通过对4口验证井不同层段的误差分析表明,预测的TOC值相对误差最大为22%,最小为0.04%,平均小于9%,具有较高的准确性。

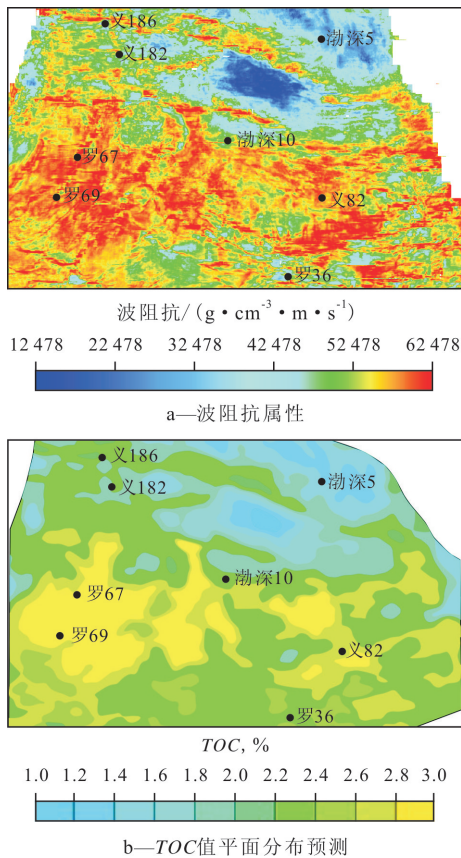


图4 罗家地区沙三段下亚段波阻抗属性与有机碳含量平面分布预测

根据预测结果可以看出,研究区TOC值多为1%~3%。其中,东北部渤深5井区的有机碳含量相对较低,结合实际钻探资料认为该区砂质、灰质成分相对较高。西部条带及鼻状构造带以东部分区域的有机碳含量相对较高,为生烃有利区带。近期在西北部已经有义182、义186等多口井在沙三段下亚段获高产油流,进一步验证了预测结果的准确性。

4 结束语

从泥页岩岩石组分类特征入手,明确了富含有机碳的泥页岩的地球物理特征,提出了对单井高有机碳含量层段进行识别的判别标准,同时结合钻井实测资料得出了适合罗家地区的TOC值计算公式。分析认为TOC值与波阻抗呈对数负相关关系,并以此为依据利用反演方法对预测有机碳含量平面分布进行了初步探索,实现了利用地球物理方法对地化参数进行预测。在胜利油区罗家地区沙三段下亚段泥页岩有机碳含量预测中的应用中,预测的TOC值相对误差最大为22%,最小为0.04%,平均小于9%。

参考文献:

- [1] 蒋志文.页岩气简介[J].云南地质,2010,29(1):109-110.
- [2] 孟庆峰,侯贵廷.页岩气成藏地质条件及中国上扬子区页岩气潜力[J].油气地质与采收率,2012,19(1):11-14.
- [3] 朱定伟,丁文龙,邓礼华,等.中扬子及江汉盆地泥页岩发育特征与页岩气形成条件分析[J].特种油气藏,2012,19(1):34-37.
- [4] 张善文,张林晔,李政,等.济阳拗陷古近系页岩油气形成条件[J].油气地质与采收率,2012,19(6):1-5.
- [5] 苏朝光,刘传虎,高秋菊.胜利油田罗家地区泥岩裂缝油气藏地震识别与描述技术[J].石油地球物理勘探,2001,36(3):371-377.
- [6] 耿生臣.罗家地区泥页岩矿物组分含量解释模型构建方法[J].油气地质与采收率,2013,20(1):24-27.
- [7] 刘惠民,张守鹏,王朴,等.沾化凹陷罗家地区沙三段下亚段页岩岩石学特征[J].油气地质与采收率,2012,19(6):11-15.
- [8] 李勇,钟建华,温志峰,等.济阳拗陷泥页岩油气藏类型及分布特征[J].地质科学,2006,41(4):586-600.
- [9] 赵靖舟,方朝强,张洁,等.由北美页岩气勘探开发看我国页岩气选区评价[J].西安石油大学学报:自然科学版,2011,26(2):2-7.
- [10] 王桐,姜在兴,张元福,等.罗家地区古近系沙河街组水进型扇三角洲沉积特征[J].油气地质与采收率,2008,15(1):47-48.
- [11] 王祥,刘玉华,张敏,等.页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J].天然气地球科学,2010,21(2):350-353.
- [12] 赵绍海,傅爱兵,关丽,等.罗家地区页岩油气测井评价方法[J].油气地质与采收率,2012,19(6):20-24.
- [13] Passey Q R A. Practical model for organic richness from porosity and resistivity logs [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74 (12) : 1 777-1 794.
- [14] 莫修文,李舟波,潘保芝,等.页岩气测井地层评价的方法与进展[J].地质通报,2011,30(2/3):400-405.
- [15] 刘喜武,年静波,吴海波,等.几种地震波阻抗反演方法的比较分析与综合应用[J].世界地质,2005,24(3):270-275.