

辽河坳陷大民屯凹陷沙四段页岩油层矿物组分含量反演方法及应用

肖佃师^{1,2}, 卢双舫¹, 陆正元², 张鲁川¹, 郭思祺¹, 谷美维¹

[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. 成都理工大学 油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059]

摘要:准确刻画泥页岩中矿物含量是页岩油层脆性评价的关键。泥页岩富含有机质、矿物组分复杂,传统全体积模型解释方法的精度较低。以渤海湾盆地辽河坳陷大民屯凹陷沙四段页岩油为例,根据全岩及地化测试资料,剖析该区泥页岩的岩性、矿物组成及曲线响应特征,构建适用于泥页岩的体积模型及曲线响应方程;采用基于遗传算法的最优化方法对页岩油层进行处理,得到地层的矿物组分含量、孔隙度及干酪根含量等参数。实际处理结果表明,多矿物反演预测的矿物变化趋势与ECS(元素俘获测井)结果一致,其精度明显高于线性拟合。从含油性及可压裂性的角度建立页岩油甜点标准,利用多矿物解释成果有效指导了页岩油甜点层位的优选。

关键词:体积模型;矿物组分;甜点;页岩油;大民屯凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE 122.2

文献标识码:A

Inversion method of shale oil reservoir mineral component content and its application in the Fourth Member of the Shahejie Formation in the Damintun Sag, Liaohe Depression

Xiao Dianshi^{1,2}, Lu Shuangfang¹, Lu Zhengyuan², Zhang Luchuan¹, Guo Siqi¹, Gu Meiwei¹

[1. Institute of Unconventional Oil and Gas and New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;

2. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China]

Abstract: Accurate characterization of mineral content is the key to evaluate its fractability for shale oil reservoir. Because of being rich in organic matter and with complex mineral composition, mineral evaluation with traditional volume model method is of low accuracy. This paper took the fourth member of the Shahejie Formation shale-oil reservoir in the Damintun Sag of Liaohe Depression, Bohai Bay Basin as an example. Bulk rock analysis and geochemistry test data were used to analyze lithology, mineral composition and curve response characteristics of the shale-oil reservoir, and then constructed the volume model and logging response equation suitable for the shale-oil reservoir. Genetic algorithm-based optimization method was utilized to calculate mineral composition, porosity and kerogen content. The calculation results showed that the mineral distribution predicted by multi-mineral inversion method was consistent with that of ECS, and its precision was obviously higher than that of linear fitting. The standards of shale-oil sweet spot were built in terms of oil-bearing property and fracability. The multi-mineral interpretation results can effectively guide sweet spot identification of shale oil.

Key words: volume model, mineral component, sweet spot, shale oil, Damintun Sag, Bohai Bay Basin

世界范围内页岩油的成功开发彻底颠覆了地质学家对泥页岩仅可作为烃源岩和盖层的认识,泥页岩地层评价重点由有机质丰度、 S_1 (游离烃含量)等地化指标转变为含油性、物性、脆性、力学性质等七性关系^[1-2]。矿物评价不仅为泥页岩中孔隙度和饱和度的

解释提供基本骨架参数,同时石英和碳酸盐岩等脆性矿物含量也决定着泥页岩受力后的造缝能力,是可压裂性评价的重要指标^[3-4]。岩心测试能准确刻画矿物的类型及含量,但样品点有限,难以全面认识矿物的分布规律。元素俘获测井(ECS)直接测量矿物中元素含

收稿日期:2015-05-17;修订日期:2015-08-20。

第一作者简介:肖佃师(1981—),男,讲师、博士,复杂储层地球物理评价。E-mail: xiaods1024@163.com。

基金项目:高校自主创新科研计划项目(13CX05013A);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(2014BSE28018)。

量^[5-6],是目前矿物评价最有效的方法,但因资料有限、费用高,难以大面积推广,不能满足页岩油评价的需要。因此,利用已有的常规测井资料进行泥页岩矿物组分含量评价具有重要现实意义^[7]。但泥页岩具有富含有机质、矿物类型多、储层致密等异于常规砂岩的特征^[8-10],适用于砂岩的多矿物求解方法不能直接应用于泥页岩中^[11],需要结合泥页岩的地质特征,在体积模型、测井响应方程和求解方法等方面进行改进。为此,本文以渤海湾盆地辽河坳陷大民屯凹陷沙四段泥页岩为例,建立起一套适用于泥页岩的多矿物反演方法,对页岩油层段进行矿物组分含量的解释,有效指导该区页岩油甜点层段的优选。

1 研究区地质概况

1.1 区域地质概况

大民屯凹陷位于渤海湾盆地辽河坳陷的东北部,凹陷的四周以控凹断层为界,呈“下宽上窄”的不规则三角形^[12]。大民屯凹陷是在元古界碳酸盐岩基底之上形成的中、新生界陆相凹陷,其中新生界古近系分布面积广、地层厚度大,沉积了包括沙河街组四段(E_2s^4)、三段(E_2s^3)、一段(E_2s^1)和东营组(E_3d)等地

层。凹陷初期形成的沙河街组四段(E_2s^4),经历了大规模湖侵,发育多套深湖-半深湖环境下的暗色泥页岩层;该套地层不仅为凹陷内最重要的烃源岩层及高蜡油的来源^[12],使大民屯凹陷以“小而肥”著名,同时泥页岩层系中多口油流井的发现,使沙四段成为辽河油田页岩油的重要勘探对象^[13]。

1.2 岩性及矿物特征

沙四段(沙河街组四段)可划分为沙四上($E_2s^{4(1)}$)和沙四下($E_2s^{4(2)}$)两段(图1)。沙四上段主要由暗色泥岩组成,总有机碳含量(TOC)分布在0.5%~2.0%, S_1 值多小于0.2 mg/g,整体含油性较差,泥岩呈块状。沙四下段呈“三明治”结构,是两套页岩夹一套薄层粉砂岩和泥质灰岩的组合,以中间夹层为界,可将其划分为三部分($E_2s^{4(2a)}$ 、 $E_2s^{4(2b)}$ 和 $E_2s^{4(2c)}$);上、下两套油页岩的有机质丰度高, TOC 值多大于2%,局部可达12%, S_1 值多大于0.6 mg/g,页岩具有明显的纹层状构造,微裂缝较发育。不同层段具有明显的曲线特征(图1):沙四上段测井响应表现为低电阻率、中声波时差、中密度、高中子的特点,体现了该套泥岩中有机质含量低、含油性差;沙四下段的两套页岩层($E_2s^{4(2a)}$ 和 $E_2s^{4(2c)}$)测井响应表现为高电阻率、高声波

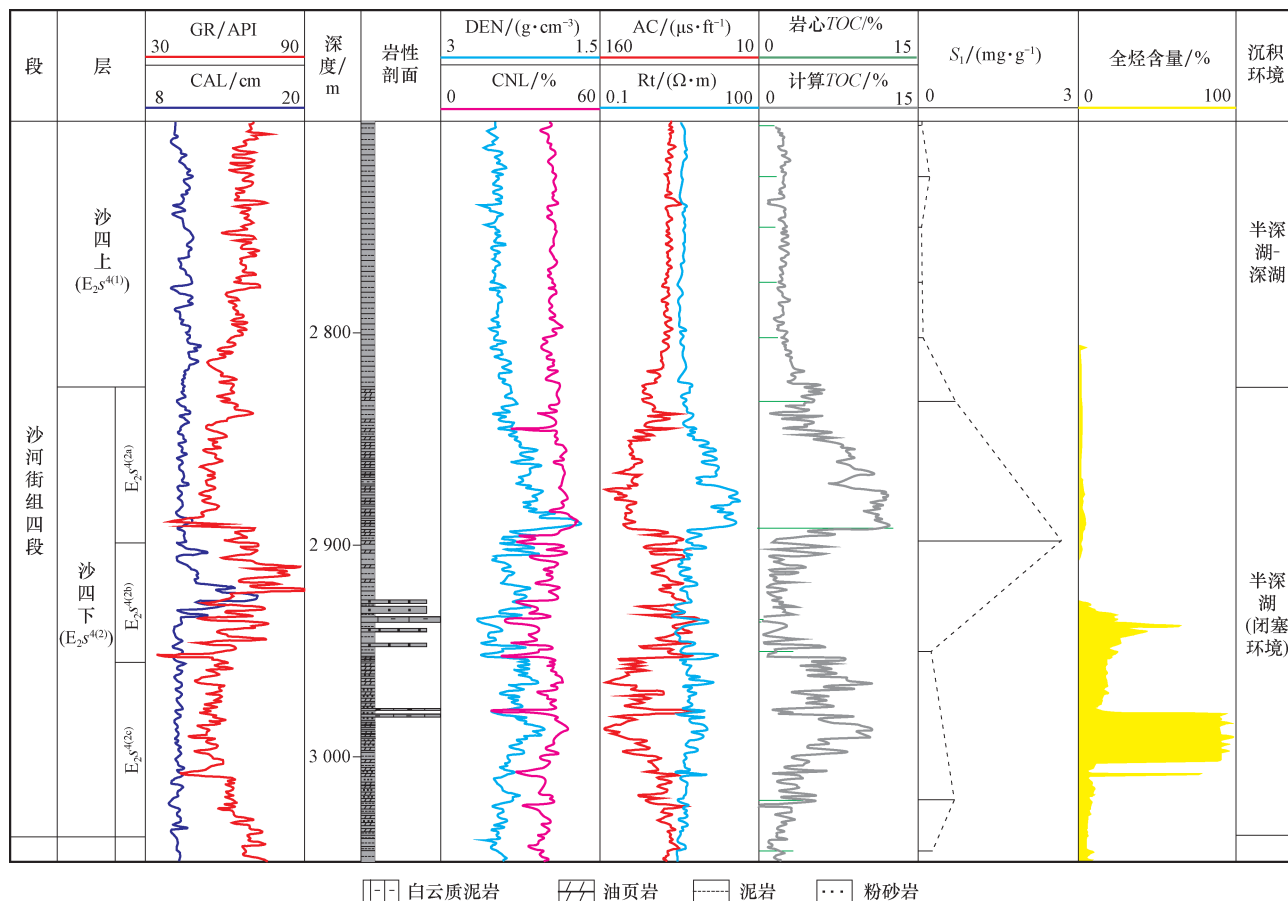


图1 大民屯凹陷沙河街组四段地层综合柱状图(S224井)

Fig. 1 Composite stratigraphic columnar section of the E_2s^4 in the Damintun Sag (Well S224)

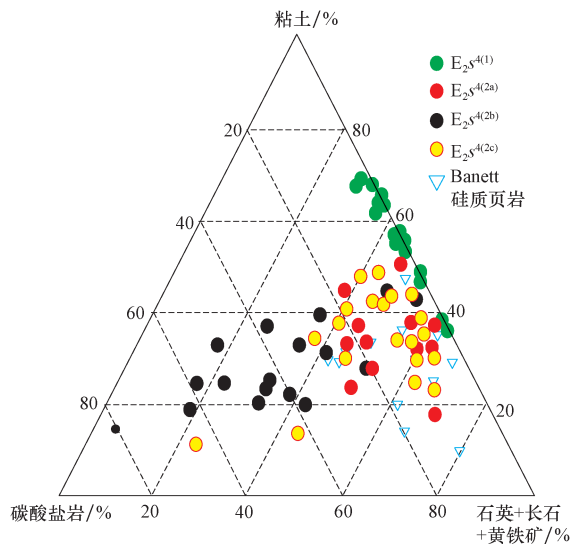


图2 大民屯凹陷沙四段泥页岩矿物分布三角图

Fig. 2 Mineral distribution triangle diagram of the E_2s^4 shale in the Damintun Sag

时差、低密度和高中子特点,体现出页岩中有机质含量高、含油性好;沙四下段夹层测井响应则表现为低电阻率、低声波时差、高密度和低中子特点,体现了夹层中灰质含量高、含油性差。

根据岩石 X-衍射分析结果,以粘土矿物、石英和碳酸盐岩为三端元统计矿物组分的分布(图2)。除沙四下段(E₂s⁴(2b))中碳酸盐岩含量较高外,其他层段矿物成分均以粘土矿物和石英为主,碳酸盐岩含量多小于20%,石英矿物的含量最高可达70%,平均为50%。沙四下两套页岩层与 Barnett 页岩相比,脆性矿物的含量相当^[14],具备可压裂改造的物质基础,尤其是下部页岩(E₂s⁴(2c))的碳酸盐岩含量增多,相对而言,更易于产生天然微裂缝。

由此可见,沙四下段两套页岩层的含油性高、可压裂性好,具备页岩油开发的有利地质条件。近年来在该套地层中已陆续发现了多口工业油流井,如 S224 井在沙四下段页岩中获 16.2 t/d 的工业产能,这也证实了该区页岩油的资源潜力。目前该区页岩油勘探的研究重点为甜点区预测,亟需建立含油性、脆性矿物的测井评价方法。

2 多矿物组分反演方法

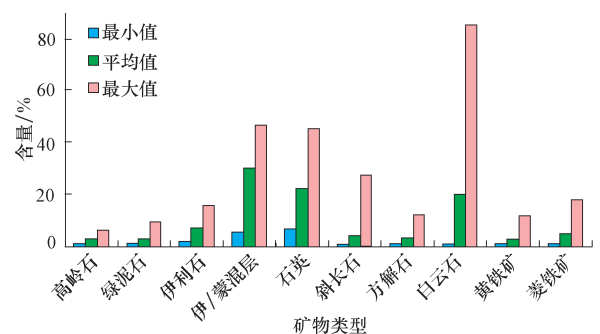
测井曲线以连续性方式记录了地下岩层的声、电和放射性等性质,其可视为地层各组分响应的综合。泥页岩的测井曲线不仅反映石英等骨架矿物的响应,同时也受到干酪根及孔隙中流体性质的影响。多组分响应的叠加降低了测井曲线对单一组分的识别能力,如黄铁矿的存在使密度值增大,而干酪根使密度值减小,因此利用密度曲线预测黄铁矿含量时,结果会受干

酪根变化的影响。多矿物反演正是利用组分响应叠加原理,联合多种曲线资料刻画矿物组分,具有较高的精度和普适性^[15],该方法已在砂岩地层评价中得到广泛应用。与砂岩相比,泥页岩具有明显不同:①发育有机质及多种矿物成分,需要对体积模型进行改进;②孔隙度低、以纳米级孔隙为主^[13],测井响应已不能简单看作是各组分的线性叠加,需要改进测井响应方程;③增加非线性响应方程,矿物组分反演的难度增大,对优化算法的要求更高。因此,需要结合泥页岩特殊的地质特征,从体积模型构建、曲线响应方程推导及优化求解等过程上进行改进,以形成适用于泥页岩地层的多矿物反演方法。

2.1 地层体积模型

泥页岩地层由孔隙中流体(油气和水)、干酪根和多种矿物组成。泥页岩普遍发育多种类型矿物,包括伊利石、蒙脱石、绿泥石和高岭石等粘土矿物,石英、长石、方解石和白云石等非粘土矿物以及黄铁矿等重矿物。利用有限的测井曲线不能评价出所有矿物,同时并非所有矿物都对储层评价有意义,因此可以通过合并矿物,来简化泥页岩地层模型。在矿物合并时,一般遵循“测井响应相似的组分合并、低含量的组分合并、兼顾评价需要(可压裂性和含油性)”的原则,比如石英、长石可合并,二者的测井响应相似,均对岩石的脆性都有贡献。

大民屯凹陷沙四段泥页岩发育伊/蒙混层、石英和白云石等 10 类矿物组分(图3)。根据矿物合并的原则,将该区矿物划分为 3 类:第一类为粘土矿物组合,类型以伊/蒙混层、伊利石为主,表现为较强的塑性;第二类为非粘土矿物组合,包括石英、斜长石、方解石和白云石,以石英和白云石为主,这些矿物均表现出较强的脆性,利于岩石的压裂改造;第三类为重矿物组合,包括黄铁矿和菱铁矿,该组合的含量较小,但局部可达 18%,这类矿物的密度值大、导电性强,对密度及电阻率曲线的解释结果影响较大。因此,结合大民屯凹陷沙四段泥页岩矿物发育特征,将泥页岩地层简化为

图3 大民屯凹陷 E₂s⁴ 段矿物含量分布Fig. 3 Mineral content distribution of the E_2s^4 in the Damintun Sag

粘土矿物、非粘土矿物、重矿物、干酪根和孔隙流体 5 部分。

2.2 测井曲线响应方程

根据泥页岩的体积模型,将测井曲线视为地层各组分响应的线性加权,测井响应与地层中矿物组分间关系可表达为:

$$F_j(V_{\text{keg}}, \Phi, V_{\text{sd}}, V_{\text{cl}}, V_{\text{py}}) = [V_{\text{keg}}, \Phi, V_{\text{sd}}, V_{\text{cl}}, V_{\text{py}}] \cdot [res_{\text{keg}}(j), res_{\Phi}(j), res_{\text{sd}}(j), res_{\text{cl}}(j), res_{\text{py}}(j)]^T \quad (1)$$

式中: F_j 为曲线 j 的理论值; V 为体积含量, %; $res(j)$ 为组分对应的曲线 j 响应值; Φ 为孔隙度, %; 下角标 keg, sd, cl, py 分别代表干酪根、石英-白云石、粘土和黄铁矿; T 为矩阵的转置。式(1)对于放射性测井系列适用,如自然伽马、密度和中子曲线,但对于声波曲线不适用。

为研究泥页岩中声波传播规律,通过驱替实验装置得到不同含水饱和度的泥页岩样品,进行纵波速度测量。从饱和度与纵波时差关系(图4)中可以得出,不同含水饱和度下的泥页岩纵波速度基本保持不变,并没有呈现随含水饱和度降低纵波时差增大的趋势,表明泥页岩孔隙中流体对纵波传播速度影响较小,声波并不是直接穿过孔隙传播。事实上,声波在地层中传播满足时间最短的准则,由于骨架速度远大于孔隙中流体速度,且泥页岩以纳米级孔隙为主、连通性孔隙较少,使得声波主要沿岩石骨架传播,孔隙的存在使得声波在岩石中传播的路径弯曲而加长。因此,泥页岩的声波时差值与岩石骨架的速度及传播路径有关,骨架时差与岩石声波时差间关系可用地层因素公式^[16]表示:

$$\Delta t = \Delta t_{\text{ma}} / (1 - \Phi)^r \quad (2)$$

式中: $\Delta t, \Delta t_{\text{ma}}$ 分别表示声波时差、骨架时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$; Φ 为孔隙度, %; r 为岩性指数。 r 值与影响骨架传导速度和路径的因素有关,即由岩石矿物组成及孔隙形态决定。经历了相同沉积、成岩作用同类岩石通常具有相似的孔隙形态,此部分对岩性指数的贡献可近似为一定值;骨架传导速度受岩石中低速组分的影响, r

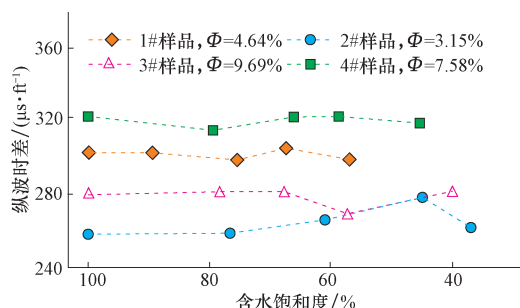


图4 泥页岩中含水饱和度与纵波时差关系

Fig. 4 Water saturation of shale vs. interval transit time of compressional wave

值通常与该组分关系密切。如含泥砂岩,随泥质含量增大速度明显降低,前人研究证实含泥砂岩中 r 值与粘土含量呈正相关^[17];对于含有机质泥页岩,干酪根的存在使声波速度明显降低, r 值应与干酪根的含量有关。同时泥页岩粒度细、粘土含量多,粘土矿物应与石英、白云石、黄铁矿等一起视为骨架。由此,可建立适用于泥页岩的声波地层因素公式:

$$\Delta t = \frac{(V_{\text{sd}} \Delta t_{\text{sd}} + V_{\text{py}} \Delta t_{\text{py}} + V_{\text{cl}} \Delta t_{\text{cl}})}{(V_{\text{sd}} + V_{\text{py}} + V_{\text{cl}})} \cdot \frac{1}{(1 - \Phi)^{aV_{\text{keg}} + b}} \quad (3)$$

式中: $aV_{\text{keg}} + b$ 项代表岩性指数, a, b 为常数项, b 值反映孔隙形状对声波传导路径的影响;等式右侧的第一项为骨架时差。

将岩心分析孔隙度、矿物含量及干酪根含量等资料以及声波测井值带入上式,可以得到一系列关于 a 和 b 的方程组,通过优化可得到 $a = 25.65, b = 2.48$ 。可见,不含有机质泥岩的岩性指数为 2.48,明显大于砂岩的岩性指数(约为 1.6)^[17],这说明由于泥页岩中微孔发育、比表面积大,声波传导的弯曲度明显增加。

2.3 地层组分反演

2.3.1 目标函数

地层组分反演可认为是将单井曲线剖面转化为地层岩性剖面的过程,也就是通过求解多条测井曲线响应方程来得到地层组分的过程。常规测井曲线包括自然伽马、密度、中子和声波,加上体积守恒原则,可建立以地层组分为变量的方程组:

$$\begin{cases} GR = V_{\text{sd}} GR_{\text{sd}} + V_{\text{cl}} GR_{\text{cl}} + V_{\text{py}} GR_{\text{py}} + V_{\text{keg}} GR_{\text{keg}} + \Phi GR_{\text{f}} \\ DEN = V_{\text{sd}} DEN_{\text{sd}} + V_{\text{cl}} DEN_{\text{cl}} + V_{\text{py}} DEN_{\text{py}} + V_{\text{keg}} DEN_{\text{keg}} + \Phi DEN_{\text{f}} \\ CNL = V_{\text{sd}} CNL_{\text{sd}} + V_{\text{cl}} CNL_{\text{cl}} + V_{\text{py}} CNL_{\text{py}} + V_{\text{keg}} CNL_{\text{keg}} + \Phi CNL_{\text{f}} \end{cases} \quad \text{式(3)}$$

$$V_{\text{sd}} + V_{\text{cl}} + V_{\text{py}} + V_{\text{keg}} + \Phi = 1 \quad (4)$$

式中:带下脚标的 GR, DEN 和 CNL 为组分的测井曲线响应值。上述方程组由 5 个方程组成,与变量的个数相同,这意味着通过方程组求解可得到唯一解,但由于式(3)为非线性方程,线性方程组的求解方法无法适用,同时求解结果通常会出现部分地层组分为负或者大于 1 的情况。为便于方程组求解及使结果符合地质认识,通常将式(4)转化为带约束的优化问题:目标函数为式(4)各等式的左侧与右侧差值的平方之和,为

消除测井曲线量纲差异,通常将差值除以曲线测量值;约束条件为地层组分含量在 $[0,1]$ 内,区间上下限还可通过岩心 XRD 分析结果统计得到。

$$\begin{aligned} \text{Min}: Q = & \left| \frac{F(GR) - GR}{GR} \right|^2 + \left| \frac{F(DEN) - DEN}{DEN} \right|^2 + \\ & \left| \frac{F(CNL) - CNL}{CNL} \right|^2 + \left| \frac{F(\Delta t) - \Delta t}{\Delta t} \right|^2 + \\ & \left| \sum_i V_i + \Phi - 1 \right|^2 \\ & 0 \leq V_i \leq 1; 0 \leq \Phi \leq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, Q 为约束目标函数; $F(\quad)$ 为式(4)中曲线响应方程等式的右侧部分; $GR, DEN, CNL, \Delta t$ 为自然伽马、密度、中子和声波时差曲线实测值。

2.3.2 优化求解方法

约束最优化问题的求解可分为确定性算法和随机性算法两类。前者的基本思路是根据约束条件构建惩罚函数,将约束优化问题转变为无约束的优化问题,进而利用基于梯度的搜索方法进行优化问题的求解,如拉格朗日法、最速下降法等。该类方法一般都要预先给定初始搜索点,并利用求导来确定可行的搜索方向,不同的初始点则可能得到不同的局部最优解;随机性算法一般包括遗传算法、模拟退火和支持向量机等。这类方法通过全局寻优的智能优化算法,在可行域内搜索出全局最优解,所以随机性算法不需要给定初始点,且不受目标函数是否连续、可微等条件的限制,更适合于求解复杂的约束优化问题。泥页岩中地层组分的变化范围大,预先给定初始值的难度大,同时目标函

数为复杂的非线性方程,为此本文选用遗传算法进行矿物组分反演^[18],其中算法直接引用 MATLAB 中遗传算法工具包。

利用理想地层模型对遗传算法的有效性进行检验。假定一套泥页岩地层,自上而下粘土、干酪根及孔隙的体积逐渐增大,石英和黄铁矿的体积含量逐渐减小;通过测井曲线响应方程计算 GR, AC, CNL 和 DEN 的理论值,在该过程中引入 5% 的随机噪声,然后利用遗传算法反演得到地层组分的含量(图 5)。通过比较可知,地层组分的计算值与实际值基本吻合,误差较小,这表明遗传算法能有效应用于泥页岩地层组分的反演。

地层组分反演的精度主要受各组分测井曲线响应值的影响。一类地层组分通常包括多种矿物,而不同矿物的测井曲线响应值并非完全相近,当这些矿物的相对含量变化较大时,势必会影响到地层组分的曲线响应值。比如非粘土矿物组合,石英和白云石矿物的含量较多,石英和白云石的密度值分别为 2.65 和 2.81 g/cm^3 ,且地层中石英和白云石的分布呈此消彼长的趋势,在 $E_2s^{4(2a)}$ 段以石英矿物为主,在 $E_2s^{4(2b)}$ 段以白云石矿物为主,因此在矿物反演过程中,如果采用固定的密度曲线响应值,势必会影响反演精度。分 $E_2s^{4(2a)}, E_2s^{4(2b)}, E_2s^{4(2c)}$ 三套地层进行测井曲线响应值的优化,基本步骤是根据岩心 XRD, GRI 孔隙度分析及 TOC 热解实验结果,经过转化得到地层各组分的体积含量,获取样品点对应的曲线实测值,通过公式(5)优化可得到各地层组分测井曲线响应值。

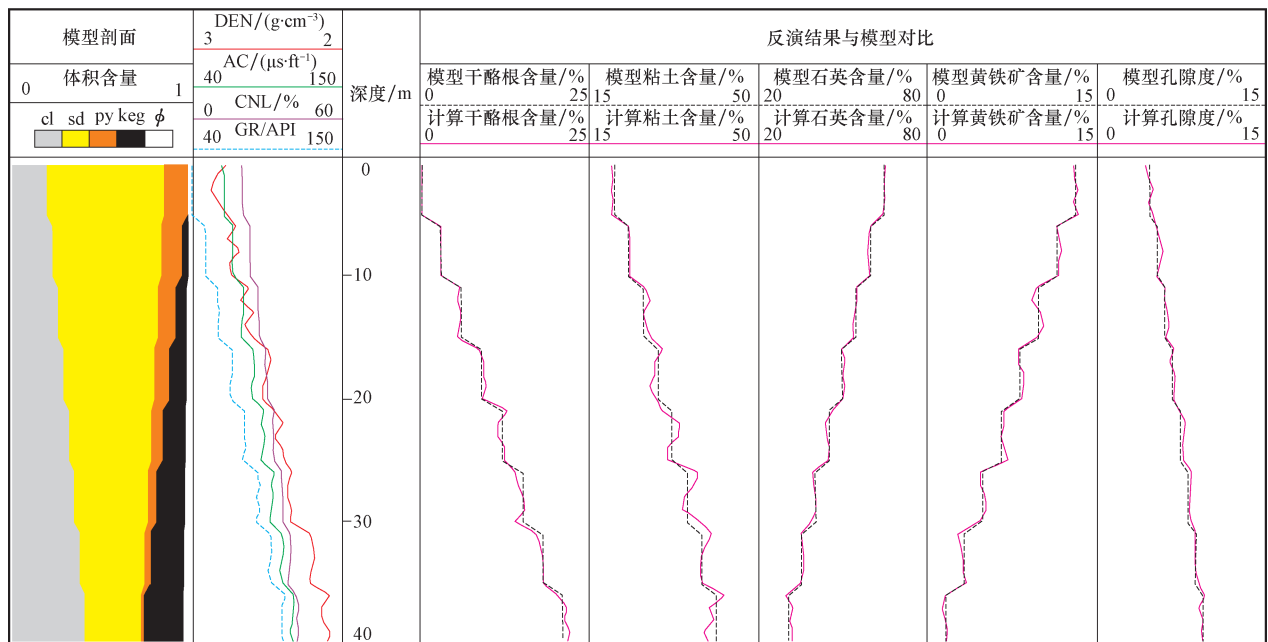


图 5 基于遗传算法的地层组分反演可行性分析

Fig. 5 Feasibility analysis of formation component inversion based on genetic algorithm

(cl, sd, py, keg, ϕ 分布代表粘土、石英、黄铁矿、干酪根和孔隙流体。)

3 实际应用

3.1 效果分析

采用多矿物反演方法对大民屯凹陷沙四段泥页岩地层进行矿物含量评价。反演中主要输入曲线包括自然伽马、声波时差、密度和中子,结果得到粘土、石英-白云石、黄铁矿、孔隙和干酪根五种组分含量。为检验反演结果的精度,将反演结果与线性拟合和 ECS 测井解释的结果进行对比,其中 ECS 测井解释采用斯伦贝谢 Elan 程序处理,线性拟合是利用逐步线性回归方法,建立起各组分与测井曲线间的经验公式。该区泥页岩中各组分的线性拟合公式为:

$$\text{石英-白云石含量: } V_{\text{sd}} = -1.0452\Delta t + 145, \\ R = 0.65 \quad (6)$$

$$\text{粘土矿物含量: } V_{\text{cl}} = 0.298\Delta t - 5.330\text{DEN} - 0.387\text{CNL} + 31.87, \quad R = 0.61 \quad (7)$$

$$\text{黄铁矿含量: } V_{\text{py}} = 0.4075\text{CNL} - 12, \quad R = 0.68 \quad (8)$$

$$\text{干酪根含量: } V_{\text{keg}} = 0.238\Delta t + 5.265\lg Rt - 17.108, \\ R = 0.72 \quad (9)$$

$$\text{孔隙度: } \Phi = 1 - V_{\text{sd}} - V_{\text{cl}} - V_{\text{py}} - V_{\text{keg}} \quad (10)$$

式中: Δt 为声波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$; CNL 为中子曲线, %; DEN 为密度曲线, g/cm^3 ; Rt 为深侧向电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; R 为相关系数。

以位于大民屯凹陷沉积中心的 S352 井为例,说明矿物评价的效果。从矿物实测值与计算值对比来看(图 6),3 类方法预测结果具有相似性,数据点均沿着对角线分布。其中,石英-白云石的预测精度最高,其次为粘土矿物,黄铁矿的精度最低,这也说明矿物含量越多,其在曲线中的贡献量越大,预测精度越高。对于粘土矿物和黄铁矿,多矿物反演的数据点更为集中(图 6b,c),其精度要高于线性拟合。从矿物垂向分布

来看(图 7),多矿物反演预测的矿物变化规律与 ECS 解释基本一致,明显优于线性拟合。如 $E_2s^{4(2a)}$ 段,多矿物反演结果显示自上而下粘土含量逐渐降低,石英-白云石含量基本稳定,这与 ECS 解释结果一致,而线性拟合结果显示粘土含量基本保持稳定。这主要是因为线性拟合不能考虑其他组分对曲线的影响而引起,该段的密度、中子和声波曲线值稳定,利用线性拟合会得出粘土含量稳定的结论,但该套地层中有机质的含量却在增加,增加的这部分有机质势必需要降低粘土的含量,才能保证密度、中子等曲线值的稳定。可见,多矿物反演预测的矿物含量与实测值吻合,且垂向变化趋势与 ECS 解释一致,表明该方法具有较高的精度,能够适用于泥页岩地层。

3.2 页岩油有利层段优选

北美页岩油成功开发经验表明只有在含油量高、可压裂性强的“甜点”区,通过水平井钻探和水力压裂技术才能实现页岩油的商业开发^[19]。因此,页岩油有利层段的优选需要考虑泥页岩层的含油性和可压裂性,具体指标包括总有机碳含量(TOC)、成熟度(R_o)、氯仿沥青“A”含量、“ S_1 ”、孔隙度、脆性矿物含量、岩石力学、裂缝发育、厚度等;由于个别评价指标数据有限、参数间存在相互关系,可以结合研究区实际情况进行简化。

大民屯凹陷沙四段泥页岩的成熟度(R_o)为 0.5%~1.0%,处于成熟阶段。由于生烃作用, TOC 和 S_1 间呈现明显的正相关,因此 TOC 值可以定性反映泥页岩的含油性;根据卢双舫的页岩油富集资源段划分方法^[20],结合该区 $TOC-S_1$ 关系(图 8),将 TOC 值为 4% 作为页岩油富集资源的下限, TOC 值大于 4% 的数据点对应的 S_1 值基本大于 0.5 mg/g。泥页岩层的可压裂性与脆性矿物的含量有关^[19],石英和碳酸盐岩等矿物含量高,岩石表现出强杨氏模量、低泊松比,在外力作用下易产生裂缝。引入岩石脆性指数(BI)来反

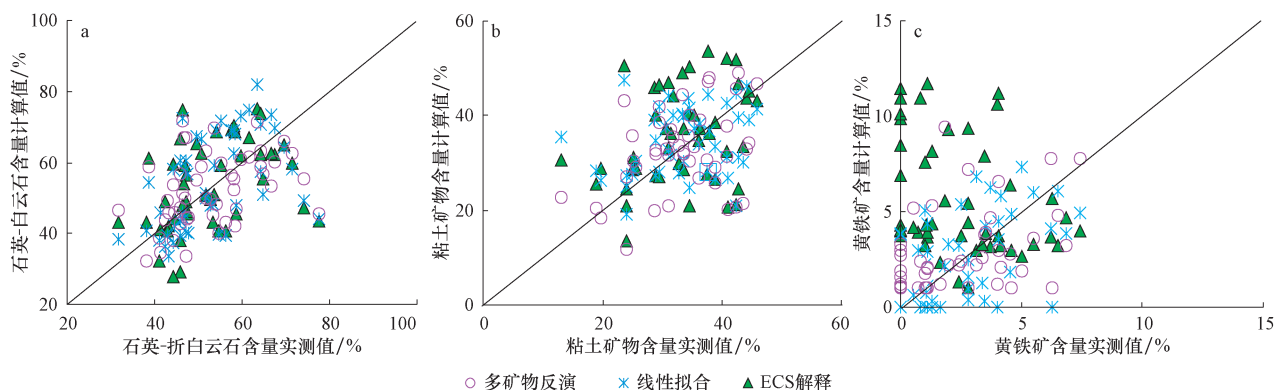


图 6 三种方法计算的矿物含量与实测值对比

Fig. 6 Comparison of the experimental mineral content and results calculated by using three methods

a. 石英-白云石; b. 粘土矿物; c. 黄铁矿

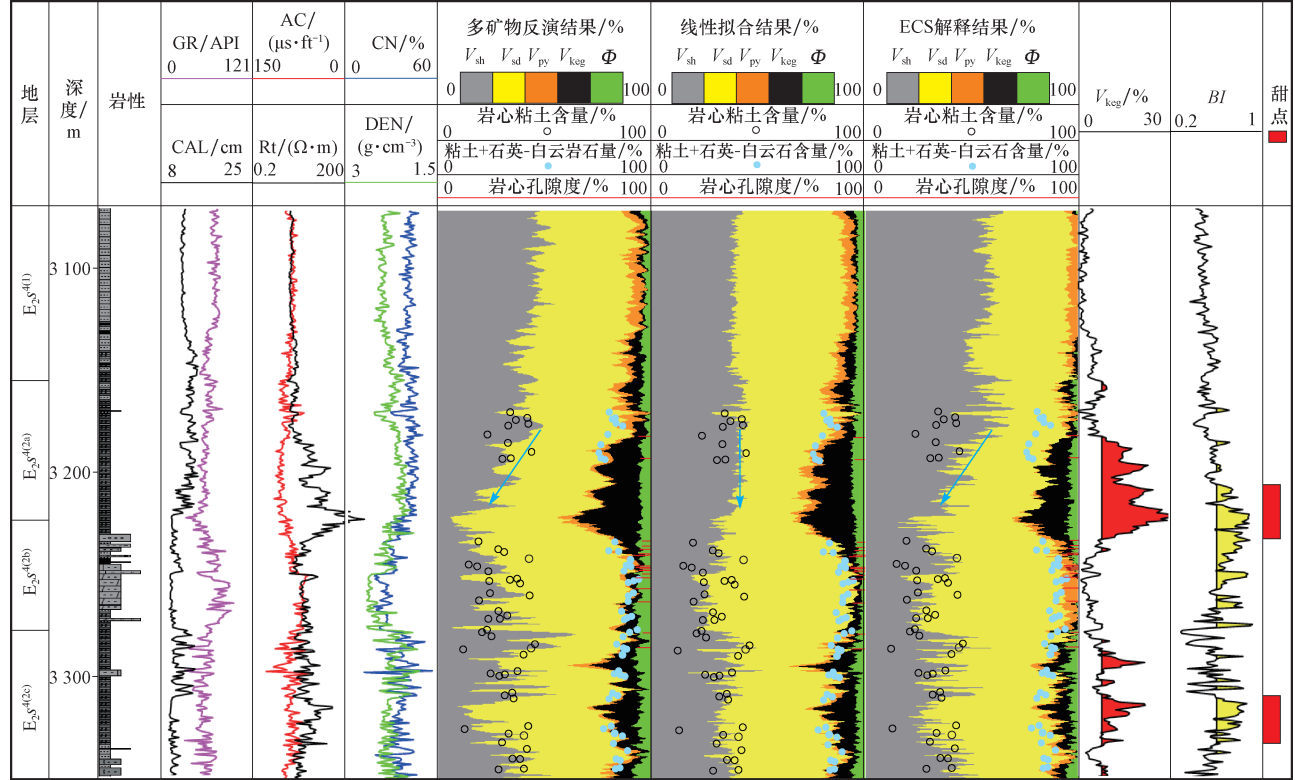


图 7 三种方法解释矿物含量结果对比及“甜点”优选

Fig. 7 Comparison of mineral content calculated with three methods and identification of “sweet spot”
(V_{sh} , V_{sd} , V_{py} , V_{keg} , Φ 分别表示粘土、石英-白云石、黄铁矿、干酪根和孔隙的体积含量; BI 为脆性指数。)

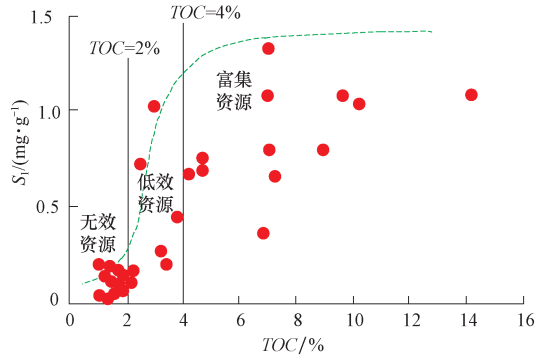


图 8 大民屯凹陷 E_2s^4 $TOC-S_1$ 关系及页岩油分级评价
Fig. 8 Relation between TOC and S_1 and grading evaluation of the E_2s^4 shale oil in the Damintun Sag

映岩石的可压裂性,它是石英、白云石、黄铁矿等脆性矿物占岩石骨架矿物的比例:

$$BI = \frac{V_{sd} + V_{py}}{V_{sd} + V_{cl} + V_{py}} \quad (11)$$

式中: V_{sd} , V_{cl} , V_{py} 为石英-白云石、粘土矿物、黄铁矿的体积含量,%; BI 为脆性指数,无量纲。通过计算可知,该区 E_2s^4 段泥页岩 BI 的分布范围为 25%~95%,集中在 45%~65%;北美页岩油储层中石英含量多大于 50%,粘土含量多低于 40%^[21], BI 值普遍大于 0.6。定义 BI 值为 0.6 作为可压裂性的下限。

通过分析,确定该区页岩油“甜点”的优选条件为 TOC 大于 4%, BI 大于 0.6,同时要求单层有效厚度大

于 10 m。根据上述标准,结合多矿物反演结果,进行页岩油有利层段的优选。在 S352 井共优选出 2 个有利层段(图 7): $E_2s^{4(2a)}$ 段页岩的底部,有效厚度为 26 m,干酪根含量平均值为 18%,脆性指数平均值为 0.78; $E_2s^{4(2c)}$ 的第二套页岩段,有效厚度为 23 m,干酪根含量平均值为 13%,脆性指数平均值为 0.76。

4 结论

- 1) 对泥页岩地层而言,自然伽马、中子和密度测井满足多组分线性加权叠加;而声波时差满足地层因素公式,其中骨架速度由粘土、石英-白云石和黄铁矿决定,岩性指数由干酪根含量及孔隙结构决定,岩性指数与干酪根呈正相关。
- 2) 遗传算法具有全局寻优、不用预定初始点的优点,能有效解决了泥页岩矿物组分求解过程中响应方程非线性、矿物初始点难以选取的问题;通过分段优化选取矿物组分测井响应参数,进一步提高了反演结果的精度,理论模型试验及实际井处理均表明基于遗传算法的矿物组分反演方法能有效适用于泥页岩地层。
- 3) 大民屯凹陷沙四下段泥页岩具备页岩油开发的有利地质条件,考虑泥页岩的含油性及可压裂性,确定大民屯凹陷页岩油甜点优选条件为有机碳含量

(*TOC*) 大于 4%、脆性指数(*BI*) 大于 0.6、且单层有效厚度大于 10 m。结合多矿物反演结果,在 S352 井沙四下段优选出 2 个甜点层段,总有效厚度为 49 m。

参 考 文 献

- [1] 孙建孟. 基于新“七性”关系的煤层气、页岩气测井评价[J]. 测井技术, 2013, 37(5): 457–466.
Sun Jianmeng. Coalbed methane and shale gas evaluation based on new seven related losing goals[J]. Well Logging Technology, 2013, 37(5): 457–466.
- [2] 张晋言. 页岩油测井评价方法及其应用[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(3): 1154–1162.
Zhang Jinyan. Well Logging evaluation method of shale oil reservoirs and its applications[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(3): 1154–1162.
- [3] 刁海燕. 泥页岩储层岩石力学特性及脆性评价[J]. 岩石学报, 2013, 29(9): 3300–3306.
Diao Haiyan. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 29(9): 3300–3306.
- [4] 袁俊亮, 邓金根, 张定宇, 等. 页岩气储层可压裂性评价技术[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 523–527.
Yuan Junliang, Deng Jinyin, Zhang Dingning, et al. Fracability evaluation of shale-gas reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 523–527.
- [5] Schlumberger Ltd. ECS elemental capture spectroscopy sonde[P]. http://www.slb.com/services/characterization/petrophysics/wireline/legacy_services/spectroscopy_sonde.aspx, 2006.
- [6] 侯颖, 邹长春, 杨玉卿. 页岩气储层矿物组分测井分析方法[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(5): 607–614.
Hou Jie, Zou Changchun, Yang Yuqing. Well logging method in the analysis of the mineralogical composition of shale gas reservoirs[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(5): 607–614.
- [7] Ramirez T R, Klein J D, Bonnie R J M, et al. Comparative study of formation evaluation methods for unconventional shale-gas reservoirs: application to the Haynesville shale(Texas)[C]. Paper SPE 144062 presented at the SPE North American Unconventional Gas Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, 14–16 June, 2011.
- [8] 蒋裕强, 董大忠, 漆麟, 等. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 7–12.
Jiang Yuqiang, Dong Dazhong, Qi Lin, et al. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 7–12.
- [9] 耳闯, 赵靖舟, 白玉彬, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组富有机质泥页岩储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 708–716.
Er Chuang, Zhao Jingzhou, Bai Yubin, et al. Reservoir characteristics of the organic-rich shales of the triassic Yanchang Formation in Ordos basin[J]. Oil and Gas Geology, 2013, 34(5): 708–716.
- [10] 杨小兵, 杨争发, 谢冰, 等. 页岩气储层测井解释评价技术[J]. 天然气工业, 2012, 32(9): 33–36.
Yang Xiaobing, Yang Zhengfa, Xie Bing, et al. The logging interpretation evaluation technology of shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(9): 33–36.
- [11] 秦瑞宝, 余杰. 多矿物处理方法在北美页岩油气藏测井评价中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(增1): 175–180.
Qin Ruibao, Yu Jie. Application of multi-mine soft model in a shale oil & gas reservoir logging evaluation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(S1): 175–180.
- [12] 黄海平, 李虹, 马刊创, 等. 大民屯凹陷高蜡油的形成条件[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(1): 64–67.
Huang Haiping, Li Hong, Ma Kanchuang, et al. Formation condition of high wax oils In Damintun Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(1): 64–67.
- [13] 马满兴. 大民屯凹陷油页岩层段储集性能研究[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(5): 37–44.
Ma Manxing. Study on the reservoir properties of the interval of oil shale in Damintun Depression[J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(5): 37–44.
- [14] Julia F W G, Robert M R, Holder J. Natural fractures in the Barnett shale and their importance for hydraulic fracture treatments[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 603–622.
- [15] 肖佃师, 卢双舫, 陈海峰, 等. 基于频谱分解的测井曲线标准化方法[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(1): 129–136.
Xiao Dianshi, Lu Shuangfang, Chen Haifeng, et al. Logging data normalization based on frequency spectral decomposition[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 129–136.
- [16] Raiga-Clemenceau J. The concept of acoustics formation factor for more accurate porosity determination from sonic transit time data[C]. SPWLA 27th Annual Logging Symposium, 9–13 June, 1986, Houston, Texas.
- [17] 许与非. 泥质砂岩非线性孔隙度模型[J]. 测井技术, 1998, 22(S1): 28–32.
Xu Yufei. Nonlinear argillaceous sandstone porosity model[J]. Well Logging Technology, 1998, 22(S1): 28–32.
- [18] 韩雪, 潘保芝, 张意, 等. 遗传最优化算法在砂砾岩储层测井评价中的应用[J]. 测井技术, 2012, 36(4): 392–396.
Han Xue, Pan Baozhi, Zhang Yi, et al. GA-Optimal log interpretation applied in glutenite reservoir evaluation[J]. Well Logging Technology, 2012, 36(4): 392–396.
- [19] 唐颖, 唐玄, 王广源, 等. 页岩气开发水力压裂技术综述[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 393–399.
Tang Ying, Tang Xuan, Wang Guangyuan, et al. Summary of hydraulic fracturing technology in shale gas development[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 393–399.
- [20] 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.
- [21] 陈晓智, 陈桂华, 肖钢, 等. 北美 TMS 页岩油地质评价及勘探有利区预测[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(2): 77–84.
Chen Xiaozhi, Chen Guihua, Xiao Gang, et al. Geological evaluation prediction of favorable exploration zones of TMS shale oil in North America[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(2): 77–84.

(编辑 张玉银)