

文章编号: 0253-2697(2014)03-480-06 DOI:10. 7623/syxb201403009

页岩气储层 Ramirez 体积物理模型的改进

赵培强 毛志强

(中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室 地球探测与信息技术北京市重点实验室 北京 102249)

摘要:通过分析 Ramirez 等提出的页岩气储层体积物理模型,针对该模型没有划分黏土矿物的缺点,建立了黄铁矿含量与有机碳含量(TOC)的关系,并把利用多元统计方法评价的 TOC 结果作为模型输入参数的方式,进一步将该模型的无机矿物直接划分为黏土矿物、黄铁矿和其他矿物,弥补了该模型在黏土矿物变化大的层段计算精度低的缺陷,并简化了通过对无机矿物骨架与无机矿物孔隙中流体测井响应同时进行迭代的复杂求解过程。利用改进的 Ramirez 体积模型对实际资料进行了处理,计算结果表明:改进的模型比原模型计算的有机碳含量、孔隙度及含水饱和度更接近相应的岩心分析数据;其评价的黏土含量同样与岩心分析数据吻合良好,从而验证了改进的 Ramirez 体积模型的准确性与可靠性,为页岩气勘探、开发和储量计算提供了可靠资料。

关键词:页岩气; Ramirez; 体积物理模型; 改进; 测井评价

中图分类号: TE125. 3

文献标识码: A

Improvement of Ramirez's petrophysical model for volume of shale gas reservoir

Zhao Peiqiang Mao Zhiqiang

(State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, Beijing Key Laboratory of Earth Prospecting and Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Ramirez's petrophysical model for volume of shale gas reservoir is disadvantageous for no division of the clay mineral matrix. This study establishes a relationship between the contents of pyrite and total organic carbon (TOC) in core samples and then takes TOC estimated by multivariate statistical analysis as the input parameter of Ramirez's model. The mineral matrix of the model is further divided into clay, pyrite, and other minerals. This offsets the defect of the model regarding the low calculation accuracy when used for shale gas reservoir intervals with substantial changes in the clay mineral matrix. It also simplifies the complex solution iteratively by incorporating logging responses of inorganic mineral skeleton and fluids in inorganic mineral pores. The effectiveness and reliability of the improved petrophysical model are verified by core measurements. The TOC, porosity, and water saturation estimated by the improved model are closer to the measured core data, as well as the clay content. The results provide reliable information for shale gas exploration, development, and reserve calculation.

Key words: shale gas; Ramirez; petrophysical model; model improvement; evaluation of well logging

页岩气是指生成、储集和封盖(有时)均发生于暗色页岩或高碳泥页岩体系中,或游离于基质孔隙和天然裂缝中,或吸附于有机质和黏土矿物表面,或溶解于沥青和水中(很少),在一定地质条件下聚集成藏并具有商业价值的生物成因和/或热解成因的天然气^[1-10]。页岩气与常规油气的差别导致二者勘探开发中的评价指标有较大不同,包括生烃潜力(有机碳含量)、矿物组分及含量、孔隙度和含气饱和度等参数在内的一系列评价指标在页岩气勘探开发中都很重要。

测井技术已经成为了常规油气藏评价的重要手段,测井评价方法也较为成熟,然而将测井技术应用到页岩气储层评价中时又面临一些新的挑战。由于页岩气储层中含有与地层水性质(体积密度、声波时差等)

较为接近的有机质(或干酪根),并且具有矿物组分复杂、孔隙度低的特点,使得常规油气层的测井解释与评价模型已不适合页岩气储层。

虽然目前页岩气储层测井评价仍处于持续发展阶段,但国外学者们已建立了多种评价模型及方法。这其中包括 Sondergeld 等^[11]提出的单孔隙模型, Ramirez 等^[12]提出的双孔隙模型, Jacobi 等^[13,14]、John 等^[15]的岩心与测井资料综合解释模型与方法等。Sondergeld 等的单孔隙模型将岩石划分为干酪根、无机矿物骨架和孔隙,并运用饱和度公式计算含水饱和度,这种模型相对简单,与页岩气储层的真实情况差别较大。Jacobi 与 John 利用了大量的岩心数据和非常规测井资料(核磁共振、元素俘获测井等)评价储层的

所有组分,但是当测井资料有限时,这类岩心与测井综合评价方法则无法使用。Ramirez 首次提出了双孔隙模型,即干酪根孔隙和无机矿物孔隙,并利用此模型评价了 Haynesville 地区的页岩气储层。此后,这种“双孔隙模型”的思想逐渐被接受,John 等^[16]、Dicman 等^[17]基于这种模型分别对不同地区页岩气储层进行了评价研究。笔者针对 Ramirez 的体积物理模型存在的问题加以改进,这不但比原模型多提供了黏土含量的信息,又简化了该方法求解的复杂性,实际资料的处理表明改进的 Ramirez 体积模型应用效果更好。

1 Ramirez 体积物理模型存在的问题

Ramirez 将储层岩石模型划分为两个系统。第一个系统称为有机质系统,包括固体有机质(干酪根)和有机质(干酪根)孔隙。第二个系统称为非有机质系统,包括固体非有机矿物(无机矿物)和矿物孔隙(图 1)。

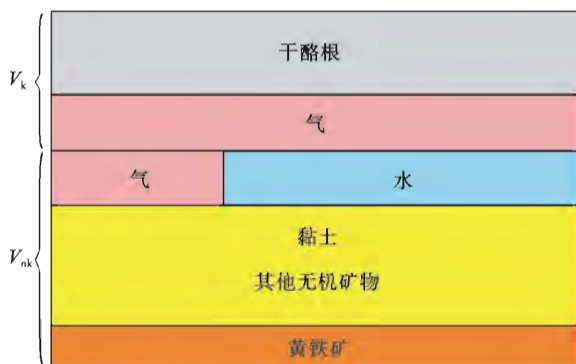


图 1 Ramirez 页岩气储层双孔隙体积物理模型

Fig. 1 Ramirez's volume model containing dual porosity for shale gas reservoir

图 1 中各组分的转换关系为:

$$\phi_1 = V_k \phi_k \quad (1)$$

$$v_k = V_k (1 - \phi_k) \quad (2)$$

$$\phi_2 = V_{nk} \phi_{nk} \quad (3)$$

$$v_{nk} = V_{nk} (1 - \phi_{nk}) \quad (4)$$

$$\phi_t = \phi_1 + \phi_2 \quad (5)$$

式中: ϕ_1 为干酪根中的孔隙体积与岩石总体积之比; ϕ_k 为干酪根的孔隙度,即干酪根孔隙体积与干酪根系统总体积 V_k 之比; v_k 为固体干酪根的体积含量; ϕ_2 为矿物中孔隙体积与岩石总体积之比; ϕ_{nk} 为矿物中孔隙体积与非有机质系统总体积 V_{nk} 之比; v_{nk} 为无机矿物的体积含量; ϕ_t 为储层岩石总孔隙度。

Ramirez 假设干酪根孔隙度 ϕ_k 固定不变且孔隙完全含气,因为同一储层页岩的成熟度变化不大,干酪

根是亲油物质,基本上不含地层水。干酪根孔隙度的选取根据地区镜质体反射率 R_v 及扫描电镜图片,或者借助干酪根体积与含气孔隙度的交会图。Curtis 等^[18]使用透射扫描电镜观察到 Barnett 页岩干酪根孔隙度约为 0.14。John 等^[16]选取 Haynesville 地区的干酪根孔隙度时,在干酪根体积与含气孔隙度的交会图中模拟出一条干酪根孔隙度为 0.33 的直线,所有岩心含气孔隙度均大于利用这条直线所计算的含气孔隙度值(ϕ_1),由此选取 Haynesville 地区干酪根孔隙度 0.33 作为输入参数。Ramirez 同时认为矿物孔隙 ϕ_{nk} 是变化的,且矿物孔隙中存在天然气和地层水两种流体。

首先将黄铁矿与其他无机矿物合并为一个组分,建立声波时差和体积密度测井的两个响应方程及物质平衡方程。

$$\rho_b = \rho_{fl} \phi_2 + \rho_{nk} v_{nk} + (\rho_k + \frac{\rho_g \phi_k}{1 - \phi_k}) v_k \quad (6)$$

$$DT = DT_{fl} \phi_2 + DT_{nk} v_{nk} + (DT_k + \frac{DT_g \phi_k}{1 - \phi_k}) v_k \quad (7)$$

$$1 = \phi_2 + v_{nk} + \left(1 + \frac{\phi_k}{1 - \phi_k}\right) v_k \quad (8)$$

式中: ρ_b 为储层体积密度测井曲线, g/cm^3 ; ρ_{fl} 为矿物孔隙中流体的密度, g/cm^3 ; ρ_{nk} 为无机矿物的密度, g/cm^3 ; ρ_k 为固体干酪根密度, g/cm^3 ; ρ_g 为天然气密度, g/cm^3 ; DT 为声波时差测井曲线, $\mu s/ft$; DT_{fl} 为矿物孔隙中流体的声波时差, $\mu s/ft$; DT_{nk} 为无机矿物的声波时差, $\mu s/ft$; DT_k 为固体干酪根声波时差, $\mu s/ft$; DT_g 为天然气的声波时差, $\mu s/ft$ 。

在估算出各种组分的响应值之后,便可计算得到各组分的体积含量。然而,页岩中黄铁矿的骨架密度和声波时差与其他矿物的骨架密度和声波时差相差较大,因此笔者考虑了黄铁矿对测井响应的影响。Ramirez 根据岩心数据建立干酪根体积含量与黄铁矿体积含量的关系,并利用上述方程组输出的干酪根体积含量来计算黄铁矿含量,进而利用黄铁矿含量重新计算输入参数无机矿物骨架密度和声波时差,再代入响应方程求解,通过这种迭代的方法求出最优结果。

与此同时,矿物孔隙中流体的密度 ρ_{fl} 和声波时差 DT_{fl} ,也利用电阻率曲线及阿尔奇公式与两个测井响应方程相互迭代的方法确定。阿尔奇公式为:

$$S_w = \left(\frac{a b R_w}{R_i \phi^m} \right)^{(1/n)} \quad (9)$$

式中: S_w 为含水饱和度,小数; R_w 为地层水电阻率, $\Omega \cdot m$; R_i 为地层深电阻率曲线, $\Omega \cdot m$; m 和 n 分别为孔隙结构指数、饱和度指数,无量纲; a 、 b 为系数,无量纲。矿

物孔隙中流体的密度和声波时差的计算公式为:

$$\rho_{fl} = (1-A)\rho_w + A\rho_g \quad (10)$$

$$DT_{fl} = (1-A)DT_w + ADT_g \quad (11)$$

其中:

$$A = [\phi_i(1-S_w) - \phi_1]/\phi_2 \quad (12)$$

式中: ρ_w 为地层水的密度, g/cm^3 ; DT_w 为地层水的声波时差, $\mu s/ft$ 。

该体积物理模型将储层岩石孔隙划分为干酪根孔和矿物孔,更符合实际页岩的孔隙结构,天然气的赋存位置的假设也比较接近真实情况,同时可以对含气饱和度加以控制,因为假设干酪根孔隙是完全含气的。但也存在 3 个缺点:①由于黏土矿物的相对含量决定后期页岩气开发中压裂方案的制定、压裂液的配制等,黏土矿物含量的评价较为重要,此模型将无机矿物划分为黄铁矿和其他矿物相对简单,无法提供黏土矿物的含量;②当储层黏土矿物含量变化剧烈时,将黏土矿物和石英等其他矿物归为一种组分会影响干酪根含量、孔隙度与含水饱和度计算结果的精度;③通过对无机矿物骨架与无机矿物孔隙流体测井响应值同时进行迭代的方式求解,计算较为复杂。

2 Ramirez 体积物理模型的改进

2.1 改进的 Ramirez 体积物理模型

为了计算黏土矿物的含量,并提高储层参数的计算精度,将无机矿物直接划分为 3 类矿物,分别为黏土、黄铁矿和其他矿物(图 2)。

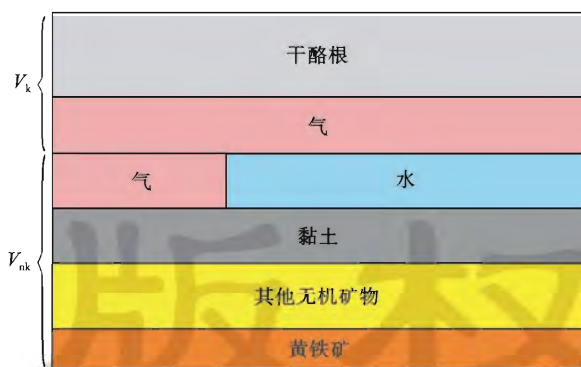


图 2 改进的页岩气储层双孔隙体积物理模型

Fig. 2 Modified petrophysical volume model containsng dual porosity for shale gas reservoir

根据如图 2 所示的体积物理模型,建立方程组为:

$$\rho_b = \rho_{fl}\phi_2 + \rho_{cl}v_{cl} + \rho_{py}v_{py} + \rho'_{nk}v'_{nk} + \left(\rho_k + \frac{\rho_g\phi_k}{1-\phi_k}\right)v_k \quad (13)$$

$$DT = DT_{fl}\phi_2 + DT_{py}v_{py} + DT_{cl}v_{cl} + DT'_{nk}v'_{nk} + \left(DT_k + \frac{DT_g\phi_k}{1-\phi_k}\right)v_k \quad (14)$$

$$1 = \phi_2 + v_{cl} + v_{py}v_{nk} + \left(1 + \frac{\phi_k}{1-\phi_k}\right)v_k \quad (15)$$

式中: ρ_{py} 、 DT_{py} 和 v_{py} 分别为黄铁矿骨架密度、声波时差和体积含量; ρ_{cl} 、 DT_{cl} 和 v_{cl} 分别为黏土矿物骨架密度、声波时差和体积含量; ρ'_{nk} 、 DT'_{nk} 和 v'_{nk} 分别为不包含黄铁矿和黏土的矿物骨架密度、声波时差和体积含量。

在对上述方程组求解时,同样假设是固定不变的,因此上述方程组中有 5 种组分的体积含量(或孔隙度)是未知的,方程组有无数多解,若要求出各种组分的准确值,则需引入其他方程来求解。

2.2 基于 TOC 的干酪根含量计算

干酪根的体积含量利用其他方法评价的 TOC 结果求得。由于实验室测量岩样的 TOC 时,将岩样孔隙中的流体刨除,因此岩心分析的 TOC 为有机碳占岩石骨架的质量百分比,而不是整块岩样的有机碳含量。TOC 与干酪根体积含量转化公式为:

$$v_k = \frac{TOC(\rho_{cl}v_{cl} + \rho_{py}v_{py} + \rho'_{nk}v'_{nk} + \rho_k v_k)}{\rho_k} \quad (16)$$

对式(16)进一步推导为

$$v_k = \frac{TOC(\rho_{cl}v_{cl} + \rho_{py}v_{py} + \rho'_{nk}v'_{nk})}{(C_k - TOC)\rho_k} \quad (17)$$

式中, C_k 为有机碳在干酪根中的质量百分比,通常为 0.75~0.80。

2.3 基于 TOC 的黄铁矿含量计算

黄铁矿含量的计算也利用有机碳含量。为了建立岩心 TOC 和黄铁矿体积含量之间的关系,需将黄铁矿的 X 射线衍射矿物分析(XRD)含量 W_{py} 转换为其在岩石样品中的体积含量。

由于实验室 XRD 提供无机矿物的质量百分比,且所有无机矿物质量百分比之和为 100%,因此 XRD 数据不包括岩石的孔隙流体和有机质。由上文知,实验室分析有机碳含量时刨除了孔隙中的流体,有机碳含量为有机碳占岩石骨架中的质量百分比。首先将黄铁矿的 XRD 含量 W_{py} 调整为黄铁矿在岩石骨架中的质量百分比 W'_{py} ,则有:

$$W'_{py} = W_{py}(1 - W_{ker}) \quad (18)$$

式中, W_{ker} 为干酪根在岩石骨架中的质量百分比, $W_{ker} = TOC/C_k$ 。

然后再利用式(19),将黄铁矿在岩石骨架中的质量百分比 W'_{py} 转换为其在岩石样品中体积含量。

$$v_{py} = W'_{py} \frac{\rho_{ma}}{\rho_{py}} (1 - \phi_{core}) \quad (19)$$

式中: ρ_{ma} 为包括干酪根和无机矿物在内的岩石骨架密度,此处使用实验室分析数据; ϕ_{core} 为岩心分析的孔隙度。

最后,建立黄铁矿体积含量 v_{py} 和 TOC 的关系,再

利用评价的 TOC 结果即可计算得到。

直接通过 TOC 计算黄铁矿含量,避免了对矿物骨架密度和声波时差的迭代,进而减小了求解过程的复杂性。需要指出的是,矿物孔隙中流体的密度和声波时差以及储层的含水饱和度依然利用深电阻率曲线和阿尔奇公式与响应方程组迭代的方法确定。

当岩石各组分确定以后,则根据式(20)计算岩石的骨架密度 ρ_{ma} 。

$$\rho_{ma} = \frac{\rho_{cl}v_{cl} + \rho_{py}v_{py} + \rho'_{nk}v'_{nk} + \rho_k v_k}{1 - \phi_i} \quad (20)$$

3 应用实例

利用改进的体积物理模型对实际的测井资料进行了处理,并与原始模型处理结果进行对比,取得了良好的效果。

3.1 TOC 的评价模型

目前已有多种方法可以较为准确地评价 TOC,如 Exxon/Esso 公司提出并由 Passey 完善的 ΔLogR 法^[19]、Schmoker 的密度曲线法^[20]、Schmoker 的伽马测井曲线法^[21]以及王贵文等的多元统计模型^[22,23]等。笔者采用多元统计模型法,相关性分析表明,岩心分析的 TOC 与铀元素测井值(U)、体积密度测井值(ρ_b)均有较好相关性。利用 22 块岩石样品分析的 TOC 以及最小二乘法回归计算得到:

$$\text{TOC}(\%) = 0.110U + 78.837/\rho_b - 29.280 \quad (21)$$

式(21)的相关系数 R^2 为 0.853。图 3 为计算的 TOC 与岩心分析的 TOC 对比,从图 3 中可以看到数据点均位于 45° 对角线的附近,表明建立的 TOC 评价模型是准确可靠的。

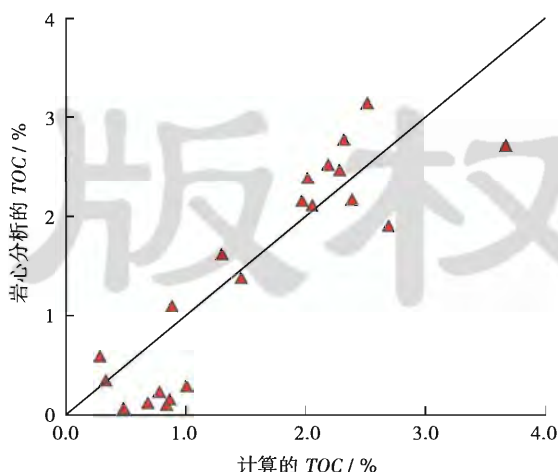


图 3 岩心分析的 TOC 与计算的 TOC 对比

Fig. 3 Comparison of TOC from core data and estimation

3.2 黄铁矿含量的评价模型

利用 X 射线衍射数据转化后的黄铁矿体积含量

v_{py} 和岩心分析 TOC 数据,建立黄铁矿含量与 TOC 的关系式。

$$v_{py} = 0.527\text{TOC} - 0.005 \quad (22)$$

式(22)所表示的统计模型建模数据个数为 10,相关系数 R^2 为 0.663。图 4 为计算的黄铁矿含量与岩心分析的黄铁矿含量对比。

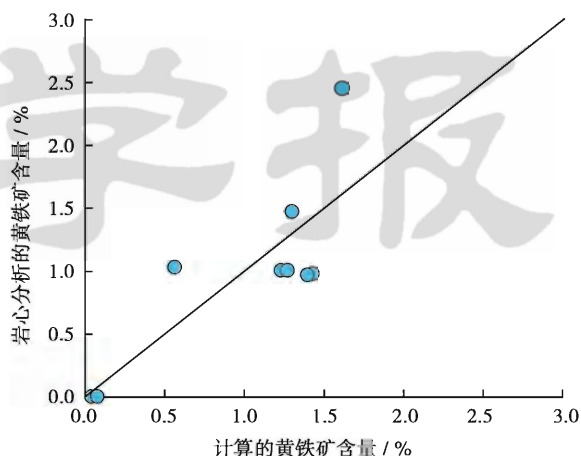


图 4 岩心分析的黄铁矿含量与计算的黄铁矿含量对比

Fig. 4 Comparison of pyrite volume content from core data and estimation

3.3 应用效果检验

分别利用原始和改进的 Ramirez 体积模型以及 TOC 和黄铁矿含量的计算公式,对目的层的实际资料进行了处理,处理结果如图 5 所示。

图 5 中左起第 3 道为利用多元统计模型计算的有机碳含量(TOC)、原模型计算的有机碳含量(TOC_0)和岩心分析的有机碳含量对比道。从对比结果可以看出,利用本文建立的多元统计公式计算的有机碳含量与岩心分析 TOC 吻合更好,证实了本文建立的 TOC 多元统计模型的可靠性。第 4 道和第 5 道为分别显示了采用改进的 Ramirez 体积模型计算的孔隙度(POR)和含水饱和度(S_w)、原模型计算的孔隙度(POR_0)和饱和度(S_{w0})以及相应的岩心分析结果的对比。对比表明改进的模型计算的孔隙度和含水饱和度更加准确。第 6 道为改进的体积模型计算的黏土含量(V_{cl})与岩心分析的黏土含量对比结果,二者吻合较好。第 7 道为计算的骨架密度(ρ_{ma})和岩心分析的骨架密度的对比图,二者同样吻合较好。这侧面反映了改进的 Ramirez 体积模型在页岩气储层评价中的可靠性和准确性。最后一道为利用改进的 Ramirez 体积模型输出结果绘制的岩石组分割面,由左至右依次为黏土矿物、不包含黏土和黄铁矿的无机矿物、干酪根、黄铁矿、地层水和天然气,从图 5 中可以清楚地看出各种组分的相对含量。

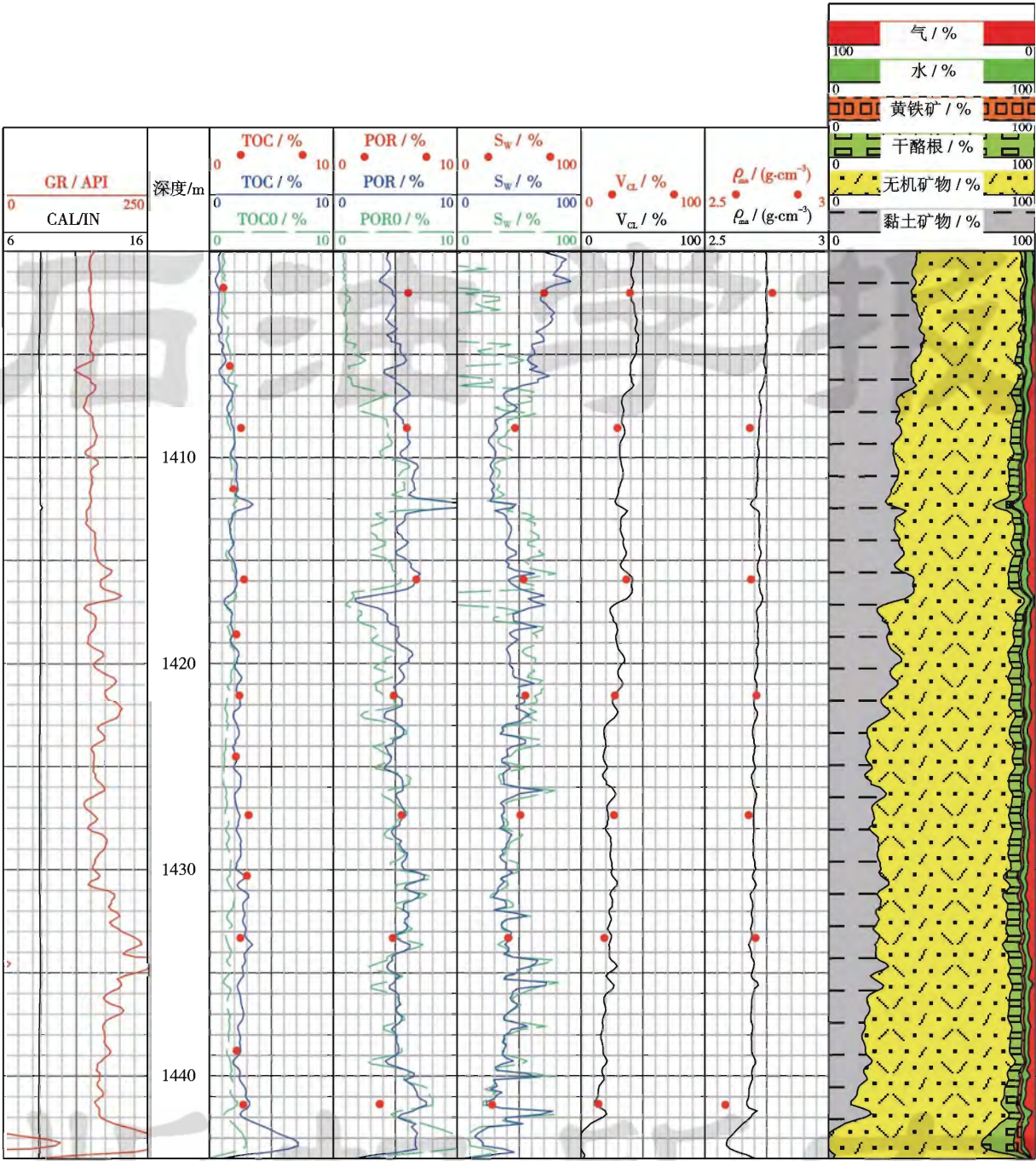


图 5 利用改进的体积模型与原始模型处理成果对比

Fig. 5 Comparison of processed results by the modified and original petrophysical volume model

纵观目的层段,黏土矿物含量变化较大,从上至下具有逐渐减小的趋势,导致 Ramirez 体积模型在计算孔隙度含水饱和度等参数效果较差,而改进后的 Ramirez 体积模型在黏土矿物含量变化大的储层中仍能保证储层参数计算结果的准确性,显示了改进的体积模型的优越性。

4 结 论

(1) Ramirez 体积物理模型将储层岩石孔隙划分

为干酪根孔和矿物孔,更符合实际页岩的孔隙结构,天然气的赋存位置的假设也比较接近真实情况,同时可以为含气饱和度提供边界条件。

(2) Ramirez 体积物理模型没有划分黏土矿物,当储层黏土矿物变化剧烈时,干酪根含量、孔隙度和含水饱和度计算结果的精度下降。并且通过对无机矿物骨架与无机矿物孔隙流体测井响应值同时进行迭代的方式求解,计算较为复杂。

(3) 分别建立了 TOC 与黄铁矿含量的计算公式,

并作为 Ramirez 体积模型的输入参数,进一步将原模型中的无机矿物直接划分为黏土、黄铁矿和其他矿物。这不仅提供了页岩气勘探开发中重要的黏土矿物含量信息,而且减小了方程求解的复杂性。

(4) 利用改进后的 Ramirez 体积模型对实际资料进行了处理,结果表明,改进的模型比原模型计算的有机碳含量、孔隙度及含水饱和度更接近相应的岩心分析数据,且其评价的黏土含量同样与岩心分析数据吻合良好,验证了改进的模型的准确性与可靠性。

参考文献

- [1] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [2] 郝建飞,周灿灿,李霞,等. 页岩气地球物理测井评价综述[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1624-1632.
Hao Jianfei, Zhou Cancan, Li Xia, et al. Summary of shale gas evaluation applying geophysical logging[J]. Progress in Geophysics, 2010, 27(4): 1624-1632.
- [3] 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, Cheng Keming. Suggestions from the development of fractured shale gas in North American[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 392-400.
- [4] 张金川,金之钧,袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 15-18.
Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18.
- [5] 聂海宽,张金川. 页岩气藏分布地质规律与特征[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(2): 700-708.
Nie Haikuang, Zhang Jinchuan. Shale gas reservoir distribution geological law, characteristics and suggestions[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(2): 700-708.
- [6] 叶军,曾华盛. 川西须家河组泥页岩气成藏条件与勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(12): 18-25.
Ye Jun, Zeng Huasheng. Pooling conditions and exploration prospect of shale gas in Xujiache formation in western Sichuan depression[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(12): 18-25.
- [7] 刘双莲,陆黄生. 页岩气测井评价技术特点及评价方法探讨[J]. 测井技术, 2011, 35(2): 112-116.
Liu Shuanglian, Lu Huangsheng. Evaluation methods and characteristics of log evaluation technology in shale gas[J]. Well Logging Technology, 2011, 35(5): 112-116.
- [8] 程克明,王世谦,董大忠,等. 上扬子区下寒武统筇竹寺组页岩气成藏条件[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 40-44.
Cheng Keming, Wang Shiqian, Dong Dazhong, et al. Accumulation conditions of shale gas reservoirs in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, the Upper Yangtze region [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 40-44.
- [9] 董大忠,程克明,王世谦,等. 页岩气资源评价方法及其在四川盆地的应用[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 33-39.
Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Shiqian, et al. An evaluation method of shale gas resource and its application in the Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 33-39.
- [10] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 579-601.
- [11] Sondergeld C H, Newsham K E, Rice M C, et al. Petrophysical considerations in evaluating and producing shale gas resources [R]. SPE 131768, 2010.
- [12] Ramirez T R, Klein J D, Ron J M, et al. Comparative study of formation evaluation methods for unconventional shale-gas reservoirs: application to the Haynesville Shale (Texas) [R]. SPE 144062, 2011.
- [13] Jacobi D, Breig J, Lecompte B. Effective geochemical and geomechanical characterization of shale gas reservoirs from the well-bore environment: Caney and the Woodford shale [R]. SPE 124231, 2009.
- [14] Jacobi D, Gladkikh M, Lecompte B, et al. Integrated petrophysical evaluation of shale gas reservoirs [R]. SPE 114925, 2008.
- [15] John Q. Integrating core data and wireline geochemical data for formation evaluation and characterization of shale gas reservoirs [R]. SPE 134559, 2010.
- [16] John Q, James G, Jim W, et al. Review and comparison of three different gas shale interpretation approaches [C]. Cartagena: SPWLA 53rd Annual Logging Symposium, 2012.
- [17] Dicman A, Lev V. A new petrophysical model for organic shales [C]. Cartagena: SPWLA 53rd Annual Logging Symposium, 2012.
- [18] Curtis M E, Ambrose R J, Sondergeld C H, et al. Transmission and scanning electron microscopy investigation of pore connectivity of gas shales on the nanoscale [R]. SPE 144391, 2011.
- [19] Passey O 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.
- [20] Schmoker J W. Determination of organic content of Appalachian Devonian shales from formation-density log [J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(9): 1504-1537.
- [21] Schmoker J W. Determination of organic matter content of Appalachian Devonian shale from gamma-ray logs [J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(7): 1285-1298.
- [22] 王贵文. 测井地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 200-213.
Wang Guiwen. Well logging geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 200-213.
- [23] 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. Logging identification and evaluation of Cambrian-Ordovician source rocks in Syncline of Tarim basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(4): 50-52.

(收稿日期 2013-11-04 改回日期 2014-01-29 责任编辑 熊英)