

松辽盆地长垣地区白垩系青山口组一段有机质含量对超压分析的影响及校正方法

徐泽阳^{1,2}, 赵靖舟^{1,2}, 李军^{1,2}

(1. 西安石油大学 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065;

2. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要:应用测井参数对烃源岩超压进行实证性分析时,往往会受到有机质的影响。文中将富含有机质泥页岩划分为非有机质泥岩骨架、固体有机质及孔隙流体3部分,以有机质含量为基础推导出了一套针对烃源岩超压成因判别的测井参数校正方法。在以松辽盆地长垣地区葡532井青山口组一段泥页岩为例进行研究时发现,经有机质含量校正后无论是孔隙度对比法还是速度-密度交会图法皆否定了过去超压是不均衡压实所致的认识。此外,文中强调在预测埋藏深度非历史最大埋深的地质体压力时,应根据古最大埋深与现今埋深差值对正常压实趋势做相应校正。根据校正后的测井参数,对典型井进行压力预测,其精度可达95%以上。

关键词:压力预测;超压;有机质校正;最大埋深;正常压实曲线;泥页岩;青山口组;松辽盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

The impact of organic matter content on overpressure analysis and its correction method in the first member of Cretaceous Qingshankou Formation, Placanticline area, Songliao Basin

Xu Zeyang^{1,2}, Zhao Jingzhou^{1,2}, Li Jun^{1,2}

(1. Provincial Key Lab of Hydrocarbon Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. College of Earth Sciences & Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: The organic-rich shale is composed of three parts: non-organic mudstone system, solid organic matter and pore fluid. Given that the empirical analysis of source rock overpressure by logging parameters tends to be influenced by organic matter, we proposed a set of logging parameter correction methods based on the content of organic matter for the identification of source rock overpressure origin. A case study of the shale in the first member of Qingshankou Formation (K_1qn_1) in Well Pu532 in Placanticline area, Songliao Basin shows that the knowledge of overpressure caused by disequilibrium compaction has been proven wrong by both porosity comparison and velocity-density cross plot under the effect of organic-matter correction. Furthermore, when measuring the pressure of a research target with its predicted buried depth less than the largest buried depth in history, it is necessary to correct the normal compaction trend by the difference between the maximum palaeoburied depth and the current one. Subsequently the prediction precision of typical wells' pressure will be better than 95% in line with corrected logging parameters.

Key words: pressure prediction, overpressure, organic matter correction, maximum buried depth, normal compaction curve, shale, K_1qn_1 , Songliao Basin

超压广泛分布于世界各大盆地中,通常是指高于静水压力的孔隙流体压力。最初人们研究超压主要是为钻井服务,而随着研究的深化,超压分析已成为油气成藏研究中的重要一环。近些年来,超压研究在方法

手段和观点认识两方面呈现出了一定的发展趋势。

首先,超压成因判别方法由过去的推测性判别不断转变为以测井、钻井、录井等参数为基础的实证性判别,并形成了一系列成因判别理论,主要包括:基于“加

收稿日期:2017-09-07;修订日期:2019-01-16。

第一作者简介:徐泽阳(1991—),男,博士研究生,油气成藏动力学。E-mail: xuzeyang09@qq.com。

通讯作者简介:李军(1982—),男,副教授、博士,油气成藏地质学。E-mail: lijun@xsyu.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05050);国家自然科学基金项目(41502132)。

载-卸载”理论的“有效应力-声波速度法”^[1-2]、基于测井参数敏感性的“速度-密度交会图法”^[3-5]以及在这二者基础上延伸出的一系列方法。在压力预测方面,由早期仅适用于非均衡压实成因超压的平衡深度法发展出指数可灵活变换的 Eaton 指数法^[6]、考虑成因的 Bowers 法^[7]以及经验统计的刘震法^[8-9]等。其次在认识方面,起初关于超压成因的认识大都以不均衡压实成因为主导。近年来,随着超压成因判别及预测方法的发展及完善,人们逐渐开始重视生烃膨胀、成岩作用、构造传导等非不均衡压实的超压成因。

同样,早期关于松辽盆地内部泥岩地层超压的研究多认为不均衡压实是超压的主要来源。虽然也有学者提出非不均衡压实成因对超压贡献的可能,但却缺乏实证性分析^[10]。笔者在对松辽盆地长垣地区青山口组一段(青一段)进行研究时发现,该段地层是区域性优质烃源岩,其内部低密度有机质将对测井参数产生一定影响,其势必会使超压成因判别结果出现偏差。因此,本文将以长垣地区葡 532 井为例,给出一套适用于该地区青一段超压研究的测井参数校正处理方法。

1 测井资料分析

葡 532 井位于大庆长垣中部,该区青一段是松辽盆地主要的烃源岩之一,干酪根以 I 型为主,现今实测镜质体反射率(R_o)为 0.65%~1.15%,平均为 0.90%,处于成熟阶段。由于上覆青二段-青三段为巨厚的泥岩段,故大部分烃类沿断层向下“倒灌”进入了扶、杨油层聚集藏。目前普遍认为向下“倒灌”需具备足够的动力,故对该段地层压力特征进行详细分析。

观察发现,区内青一段泥岩声波时差普遍偏离正

常压实曲线(图 1)。结合地层测试显示的超压现象,有学者认为该区普遍存在的超压系不均衡压实成因。然而,单凭声波时差特征确定超压成因几乎是不可能的,还需结合其他资料综合判断^[11]。

Bowers(2002)指出体密度、孔隙度属于体积属性(bulk property),声波时差、电阻率属于传导属性(transport property);此外,当孔隙度保持不变,孔隙结构发生改变时,体积属性基本不变或变化程度极小,而传导属性将表现出极强的敏感性^[2,12]。他根据实验分析指出,孔隙和喉道对体积属性的影响是一致的;但对于传导属性而言,喉道的影响是占主导地位的。也正因如此,由于不均衡压实仅是压实过程的停顿或放缓,其对孔隙结构影响不大,所以传导属性与体积属性对这类成因的超压响应是一致的;而对于生烃这类流体膨胀成因的超压而言,由于压力由内部生成,其对喉道与孔隙的重新分布影响重大,因此将表现出传导属性响应强烈而体积属性没有响应或响应微弱的特征。根据这一理论,本文将以葡 532 井为例,对体密度及声波时差进行对比分析,试图寻找研究区超压的真正成因。此外,本文采用 Tingay(2007)^[13]的方法,将二者分别计算为孔隙度,进而方便对比。

1.1 密度计算孔隙度

本文采用下式计算密度孔隙度(即用密度参数计算出的孔隙度,下同):

$$\Phi_{\text{den}} = \frac{\rho_{\text{ma}} - \rho_{\text{b}}}{\rho_{\text{ma}} - \rho_{\text{f}}} \quad (1)$$

式中: Φ_{den} 为密度孔隙度,小数; ρ_{ma} 为泥岩骨架密度,取经验值 2.68 g/cm³; ρ_{f} 为孔隙流体密度,取地层水密度 1.05 g/cm³; ρ_{b} 为取值点体密度,由密度测井曲线读取, g/cm³。

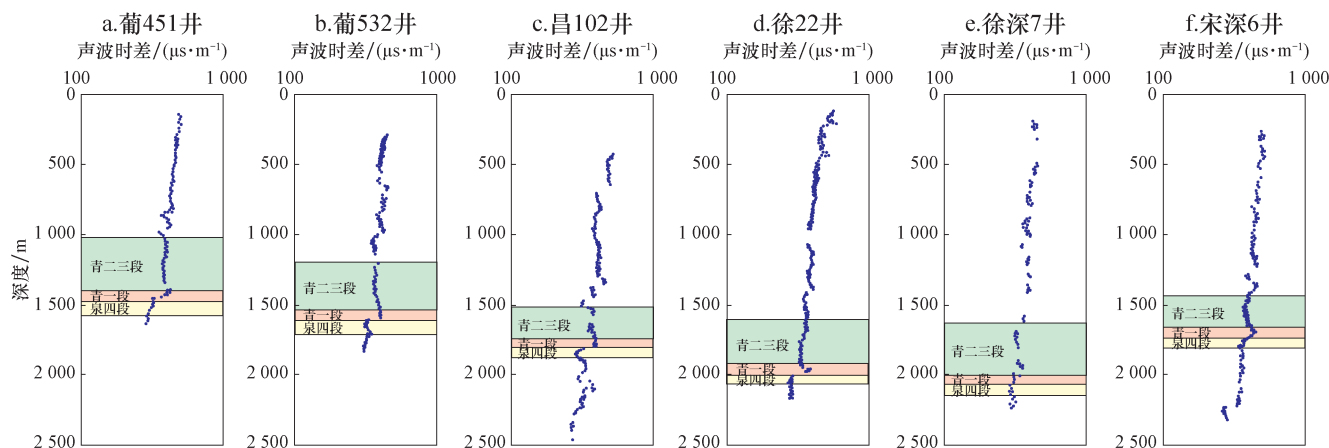


图1 长垣及三肇地区葡451—宋深6井声波时差随埋藏深度变化

Fig. 1 Interval transit time vs. buried depth in Wells Pu451-Songshen6 in Placanticline and Sanzhao areas

1.2 声波时差计算孔隙度

根据 Raymer 等校正的 Wyllie 方程,即可求得声波孔隙度(即用声波时差参数计算出的孔隙度,下同):

$$\Phi_{\text{sonic}} = \frac{(1/C_p)(\Delta t - \Delta t_{\text{ma}})}{\Delta t_f - \Delta t_{\text{ma}}} \quad (2)$$

式中: Φ_{sonic} 为声波孔隙度,小数; C_p 为地层压实系数,无量纲; Δt 为实测声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$; Δt_f 为孔隙流体声波时差,取地层水声波时差 $625 \mu\text{s}/\text{m}$; Δt_{ma} 为泥岩骨架声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$ 。

与密度求取孔隙度不同,声波时差计算孔隙度时应求得相应的地层压实系数 C_p 以及泥岩骨架声波时差 Δt_{ma} 。为了达到这一目的,本文选取嫩江组三段—五段非源岩泥岩层(下文叙述原因),读取声波时差并计算出对应点密度孔隙度进行交会,进而读取孔隙度为0处的声波时差值作为泥岩骨架声波时差。对于葡532井而言,其泥岩骨架声波时差值应取 $207.79 \mu\text{s}/\text{m}$ (图2)。

关于地层压实系数 C_p ,可根据下述方法计算:

若图2拟合结果为: $\Phi_{\text{den}} = a\Delta t - b$

$$\text{那么,} \begin{cases} a = \frac{1}{C_p(\Delta t_f - \Delta t_{\text{ma}})} \\ b = \frac{\Delta t_{\text{ma}}}{C_p(\Delta t_f - \Delta t_{\text{ma}})} \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_p 为地层压实系数,无量纲; Δt_f 为孔隙流体声波时差,取地层水声波时差 $625 \mu\text{s}/\text{m}$; Δt_{ma} 为泥岩骨架声波时差,取 $207.79 \mu\text{s}/\text{m}$ 。

经计算,葡532井地层压实系数取1.71。

1.3 结果分析

选取地层压力正常段(嫩江组三段—五段)的密度孔隙度回归出正常压实曲线,并将密度孔隙度与声波孔隙度同时投入深度剖面后,可得图3。

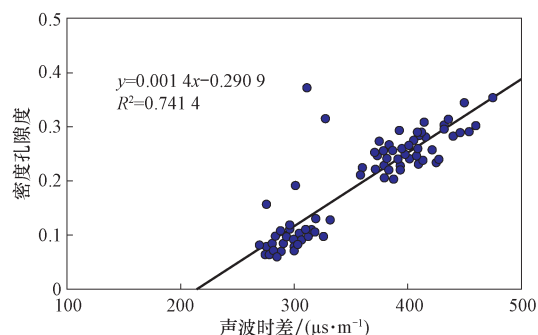


图2 长垣地区葡532井密度孔隙度—声波时差交会图

Fig. 2 The cross-plot of density porosity-interval transit time for Well Pu532 in Placanticline area

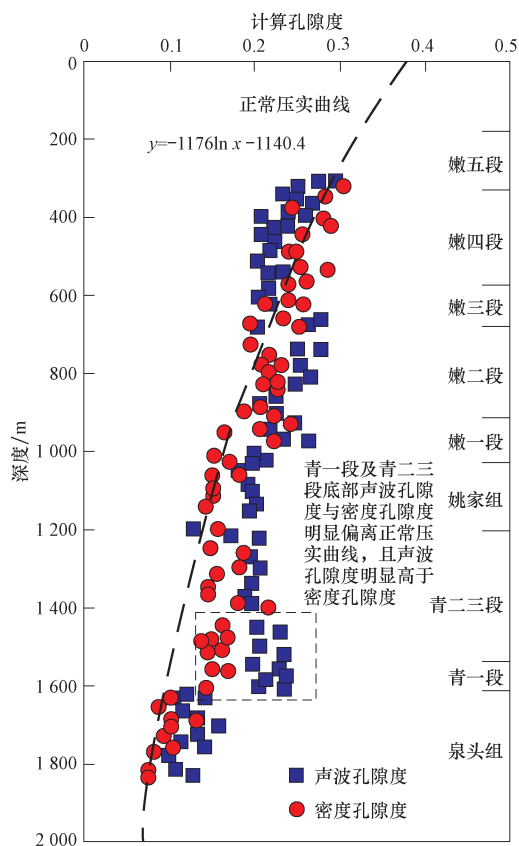


图3 长垣地区葡532井密度孔隙度和声波孔隙度随深度变化

Fig. 3 The density porosity and acoustic porosity vs. buried depth in Well Pu532 in Placanticline area

观察发现,在嫩江组三段—五段,由于地层压力正常,密度孔隙度与声波孔隙度同时沿正常压实曲线分布。然而,在青一段内,密度孔隙度与声波孔隙度明显偏离正常压实曲线,且声波孔隙度偏离幅度远大于密度孔隙度。Tingay(2009)在探讨文莱盆地超压成因时指出,青一段这种现象反映了不平衡压实成因超压的存在^[14]。关于孔隙度对比法的具体介绍及实例,也可参考赵靖舟等(2017)对超压判别方法的总结^[11]。

图3中的这一结果所反映的超压成因似乎与目前关于松辽盆地青一段超压成因的普遍认识一致,即不平衡压实是导致现今压力异常的主要原因。然而,观察图1发现,研究区内声波时差在源岩段内的偏离幅度往往高于相邻层位。同时,不难看出,青一段烃源岩的声波时差异常幅度明显高于其紧邻的青二段—青三段巨厚泥岩层。笔者认为青一段烃源岩中富含大量低密度有机质,势必会影响声波时差的变化,进而影响孔隙度计算的可靠性(此处所说的可靠性是指能够真实反映超压成因的程度,而非确切的孔隙度值)。因

此,上述结果是否能够真实反映超压成因,还需进一步论证。

2 有机质含量校正方法

为了消除有机质对计算结果的影响,本文分别对密度孔隙度及声波孔隙度进行了校正。

与非源岩段不同,青一段泥页岩主要由非有机质泥岩骨架、固体有机质及孔隙流体构成(图4)。此外,由于研究区青一段源岩已经生烃并大量排出,故应将其内孔隙流体定为石油。综上,目前需确定的主要参数即为固体有机质及非有机质泥岩骨架的体积在烃源岩中的占比。

2.1 固体有机质体积求取

如上所述,利用测井资料对烃源岩段超压成因进行判别时,首先要获得地质体中固体有机质的体积。一般而言,目前可直接获得的相关参数应当是总有机碳含量(TOC),其作为当前国内外评价有机质丰度的主要指标之一,可用来参与超压成因判别中的有机质含量校正计算。获取总有机碳含量最直接的手段即为地球化学分析测试,然而这种方法却存在周期长、费用高、取样点不连续等缺点。在进行超压成因分析时,离散且稀疏的实测数据往往难以有效地参与有机质含量的校正计算。为了弥补实测数据的不足,人们通常根据测井曲线与有机碳含量之间的定量关系,进行 TOC 计算。常见的 TOC 预测方法有 ΔlgR 法、自然伽马能谱法、多元回归法及气测录井法等。

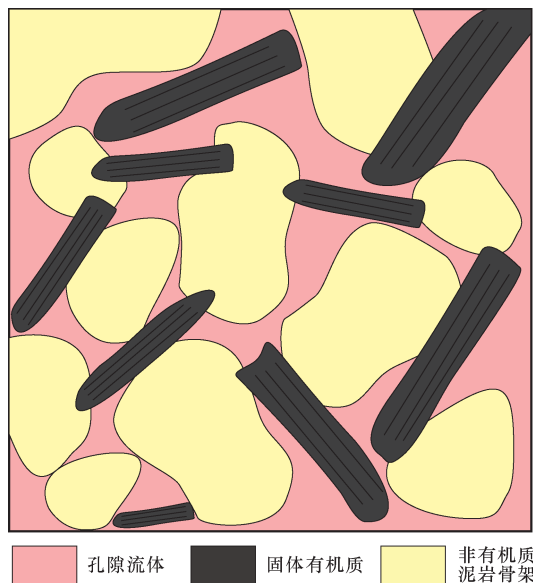


图4 烃源岩体积模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram showing the volume model of source rocks

对于松辽盆地而言, ΔlgR 法是当下应用最为普遍的烃源岩有机碳含量预测方法。霍秋立等根据松科1井实测资料分析,对 ΔlgR 法中所需参数进行了确定,并对计算过程进行了完善,其结果普遍适用于松辽盆地青一段^[15]。具体计算过程如下:

$$\Delta lgR = \Delta lgR' - \Delta lgR'_{\text{基线}} \quad (4)$$

$$\Delta lgR' = lgR + 0.02\Delta t \quad (5)$$

$$\omega_{TOC} = a\Delta lgR + b \quad (6)$$

式中: R 为泥岩电阻率,取自LLD电阻率测井, $\Omega \cdot m$; Δt 为泥岩声波时差(本文仅在计算 TOC 含量时取 $\mu s/ft$ 作为声波时差单位); ω_{TOC} 为 TOC 含量(质量百分比),%; b 为非烃源岩 ω_{TOC} 的背景值,取0.2%~0.4%。当成熟度 $R_o = 0.38\% \sim 1.0\%$ 时, a 为4.5~5.1,平均约为5, $\Delta lgR'_{\text{基线}}$ 取2.4;当成熟度 $R_o = 1.0\% \sim 2.0\%$ 时, a 约为2, $\Delta lgR'_{\text{基线}}$ 取2.2。

研究区内青一段烃源岩成熟度普遍处于低熟至生油高峰阶段,故根据式(1)~(3)可采用如下算式预测 ω_{TOC} :

$$\omega_{TOC} = 5\Delta lgR + 0.3 \quad (7)$$

针对葡532井青一段烃源岩的 TOC 计算结果见图5。

值得注意的是,孔隙度实际上是体积分数,想要对其进行计算,就必须将 TOC 的质量占比转化为体积分比,其体积分数与质量分数之间的关系见下式:

$$\Phi_{TOC} = \frac{\rho_{fm}}{\rho_{om}} k \omega_{TOC} \quad (8)$$

式中: Φ_{TOC} 为固体有机质在固体骨架中的体积百分比,小数; k 为有机碳转化系数,该系数受有机质类型和岩层成岩作用的影响,其取值范围为1.18~1.48(表1); ρ_{fm} 为烃源岩骨架密度, g/cm^3 ; ρ_{om} 为固体有机质密度, g/cm^3 ; ω_{TOC} 为 TOC 含量(质量百分比),小数。

2.2 非有机质泥岩骨架体积

在以地球化学分析测试法获取烃源岩有机碳含量的过程中,往往都忽略了孔隙流体的质量。因此,实测数据中的 ω_{TOC} 实际上是指固体有机质在固体骨架中的质量占比,即:

$$\omega_{TOC} = m_{TOC} / (m_{TOC} + m_{\text{非}}) \quad (9)$$

式中: ω_{TOC} 为 TOC 含量(质量百分比),小数; m_{TOC} 为测试样品中有机碳的质量, g ; $m_{\text{非}}$ 为测试样品中非有机质泥岩的质量, g 。

如前文所述,当前的 TOC 预测方法基本是基于测井资料与实测资料之间的定量关系而建立的,因此其计算结果也仅能代表固体有机质在整个固体骨架中的

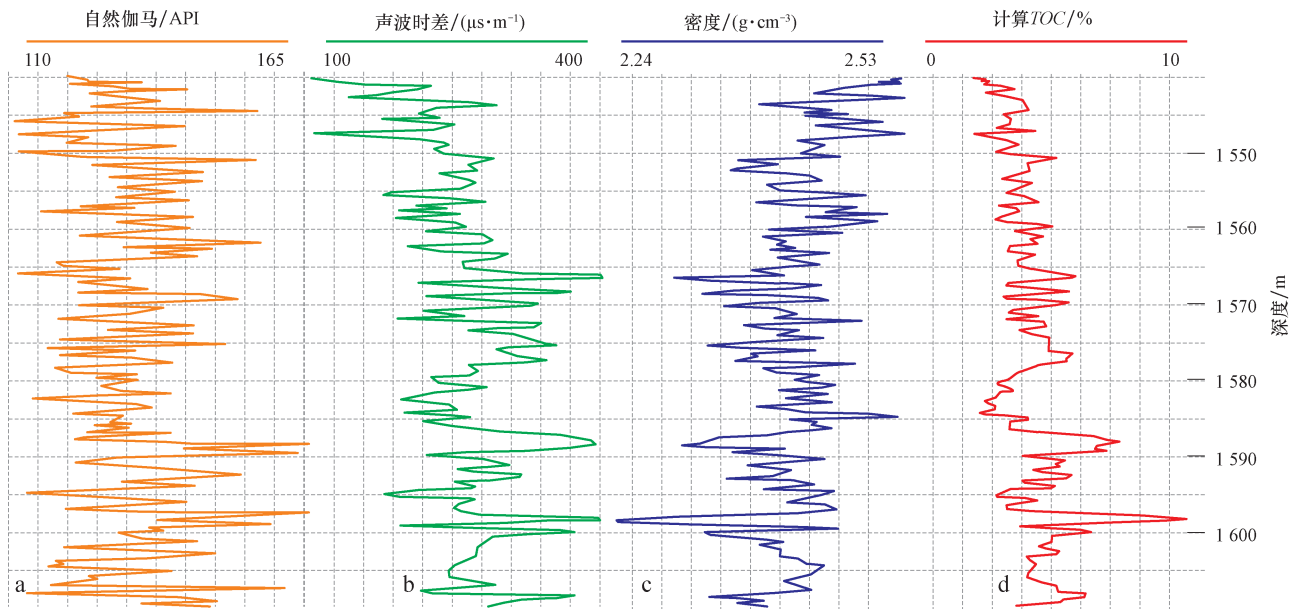


图 5 长垣地区葡 532 井青山口组一段 TOC 预测结果

Fig. 5 Prediction of TOC content in K_1qn^1 in Well Pu532, Placanticline area

表 1 有机碳转化系数 k 取值(据文献[16])

Table 1 The value table of organic carbon conversion coefficient (k) (after reference[16])

阶段	I 型干酪根	II 型干酪根	III 型干酪根
成岩作用	1.25	1.34	1.48
后生作用结束	1.20	1.19	1.18

质量占比,在孔隙度预测中应作相应变换。由此,只要获得了固体有机质体积的相关参数,自然就可以得到非有机质泥岩骨架在地质体中的质量或体积占比(图 6)。

2.3 孔隙度校正

要想求得地质体的孔隙度,首先要将烃源岩由三

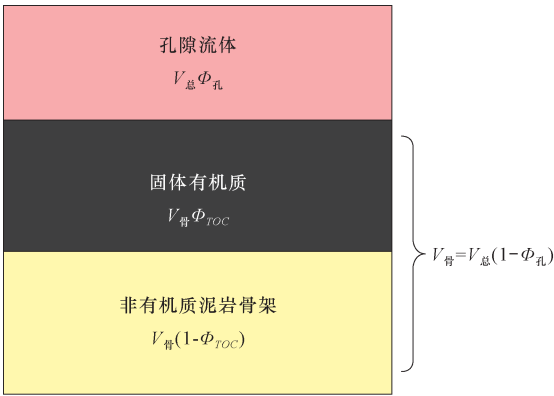


图 6 烃源岩各要素体积关系示意图

Fig. 6 Schematic diagram showing the volume relationship of various source rock elements

要素简化为二要素,即固体骨架和孔隙流体。

因此,首先可将烃源岩固体骨架的密度及声波时差写作:

$$\rho_{fm} = (1 - \Phi_{TOC})\rho_{ma} + \Phi_{TOC}\rho_{om} \quad (10)$$

$$\Delta t_{fm} = (1 - \Phi_{TOC})\Delta t_{ma} + \Phi_{TOC}\Delta t_{om} \quad (11)$$

式中: Φ_{TOC} 为固体有机质在固体骨架中的体积百分比,小数; ρ_{fm} 为烃源岩固体骨架密度, g/cm^3 ; ρ_{ma} 为非有机质泥岩骨架密度,取 $2.68 g/cm^3$; ρ_{om} 为固体有机质密度,取 $1.20 g/cm^3$; Δt_{fm} 为烃源岩骨架声波时差, $\mu s/m$; Δt_{ma} 为非有机质泥岩骨架声波时差, $\mu s/m$; Δt_{mo} 为固体有机质声波时差,取理论值 $550 \mu s/m$ 。

用公式(10)和(11)分别替换公式(1)和(2)中的 ρ_{ma} 和 Δt_{ma} ,可获得烃源岩孔隙度计算式:

$$\Phi_{den} = \frac{(1 - \Phi_{TOC})\rho_{ma} + \Phi_{TOC}\rho_{om} - \rho_b}{(1 - \Phi_{TOC})\rho_{ma} + \Phi_{TOC}\rho_{om} - \rho_f} \quad (12)$$

$$\Phi_{sonic} = \frac{(1/C_p)[\Delta t - (1 - \Phi_{TOC})\Delta t_{ma} - \Phi_{TOC}\Delta t_{om}]}{\Delta t_f - (1 - \Phi_{TOC})\Delta t_{ma} - \Phi_{TOC}\Delta t_{om}} \quad (13)$$

公式(10)和(11)中各参数与公式(1),(2),(10)和(11)中一致。

注意到,上述各式中 ρ_{fm} 较难确定,因此需要将公式(8)和(10)联立得 Φ_{TOC} :

$$\Phi_{TOC} = \frac{\rho_{ma}k\omega_{TOC}}{k\omega_{TOC}(\rho_{ma} - \rho_{om}) + \rho_{om}} \quad (14)$$

此外,李超等(2016)在研究鄂尔多斯盆地延长组 7 段泥岩不均衡压实特征时,亦提出了应用有机质含量对声波时差校正的理论式^[17]:

$$\begin{cases} \Phi = \frac{(1 - \Phi_{TOC}) \Delta t_{ma} + \Phi_{TOC} \Delta t_{TOC} - \Delta t}{(1 - \Phi_{TOC}) \Delta t_{ma} + \Phi_{TOC} \Delta t_{TOC} - \Delta t_f} \\ \Phi_{TOC} = \frac{\rho_{ma}}{\rho_{TOC}} k \omega_{TOC} \end{cases} \quad (15)$$

式中: Δt_{ma} 与公式(10)~(14)中有所不同。公式(15)中 Δt_{ma} 是指非有机质泥岩骨架与固体有机质共同组成的固体骨架所对应的声波时差,且在计算中取某一定值。本文中 Δt_{ma} 仅指非有机质泥岩骨架那一部分对应的声波时差。很明显,由于有机质含量的变化,公式(15)中的 Δt_{ma} 并非定值,故本文关于该项的计算更为准确。值得注意的是,实际上孔隙流体的相对含量也是影响孔隙度计算及声波时差和密度校正的重要参数。遗憾的是,目前还没有能够准确获悉烃源岩内部孔隙含油率及含水率的测井计算方法。因此,本次计算时只能根据油水声波时差、密度及生排烃史相关资料给孔隙流体声波时差及密度一个经验估值。

综上,对烃源岩段超压进行成因判别时,应遵循如下步骤:① 根据测井数据与实测 TOC 之间的定量关系,获得目的层段垂向上连续的 ω_{TOC} 信息;② 将反映质量占比的 ω_{TOC} 转换为体积占比 Φ_{TOC} ;③ 将三元烃源岩体简化为二元地质体;④ 根据公式(12)~(14)进行孔隙度计算。

3 有机质含量校正结果

涉及到声波及密度参数的超压成因判别方法众多,其中较为典型的当属孔隙度对比法及速度-密度交会图法。这两种的优点在于能够避免实测压力数据匮乏的限制,可在一定程度上对各类成因超压进行区分。

3.1 孔隙度对比法

将校正结果投在图3中后可以看出,校正后的密度孔隙度已沿正常压实曲线分布;而声波孔隙度虽较之前有一定程度的降低,但仍表现为异常(图7)。Tingay 认为这种情况是压力的垂向传导或流体膨胀造成的^[14],这一结论与之前未校正得出的不平衡压实成因截然不同。

3.2 速度-密度交会图法

声波速度-密度交会图法也是较为可靠的超压成因判别方法之一^[11]。对比有机质含量校正前后葡532井青山口组一段泥页岩声波速度-密度交会点分布情况(图8)可以看出,未经校正的交会点紧靠正常压实

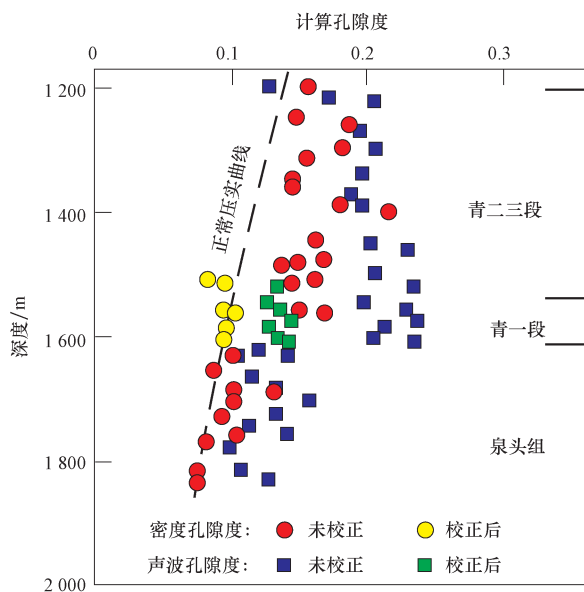


图7 长垣地区葡532井有机质含量校正前、后
密度孔隙度与声波孔隙度对比

Fig. 7 Comparison of non-corrected and corrected porosities in terms of density and acoustic wave in Well Pu532 in Placanticline area

曲线,表现为不平衡压实成因超压的特征;而经有机质含量校正后的交会点则偏离正常压实趋势,表现为密度基本不变,声波速度迅速降低的特征,代表了传导或流体膨胀成因的超压。这一结果亦说明有机质含量校正前后对超压成因的判别结果将存在显著差异。

3.3 压力预测效果

为了进一步验证有机质含量校正的可靠性,本文还根据校正结果对典型井烃源岩压力进行了预测,并进行了精度分析。

3.3.1 正常压实趋势校正

常见的压力预测方法包括平衡深度法、伊顿指数法等,其与超压成因紧密相关。值得注意的是,在应用依赖正常压实趋势的计算方法时,应当注意上覆地层的剥蚀情况。

以平衡深度法为例,该法的核心原则在于泥岩在压实过程中孔隙度不可逆,且某一孔隙度值对应唯一的有效应力。然而当研究区存在剥蚀且新沉积的厚度远小于被剥蚀的厚度时,则如图9a所示,现今A点并非处于历史最大埋深处。实际上,正常压实下现今A点孔隙度应当形成于历史最大埋深处,其对应的有效应力应如图9b中所示。若没有考虑剥蚀,则有效应力为零的起算点将取现今地表,势必会将小于真实情况

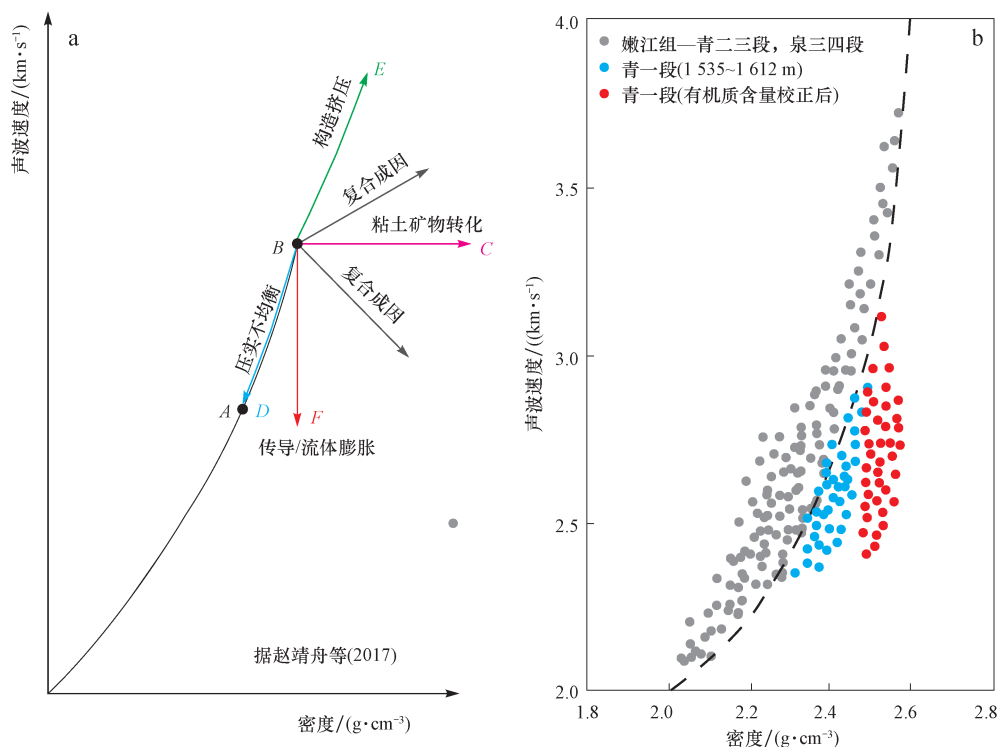


图8 长垣地区葡532井青山口组一段泥页岩声波速度-密度交会图

Fig. 8 The acoustic velocity-density cross plot of K_1qn^1 shale in Well Pu532 in Placanticline area

a. 速度-密度超压成因判别图版; b. 葡532井速度-密度交会图

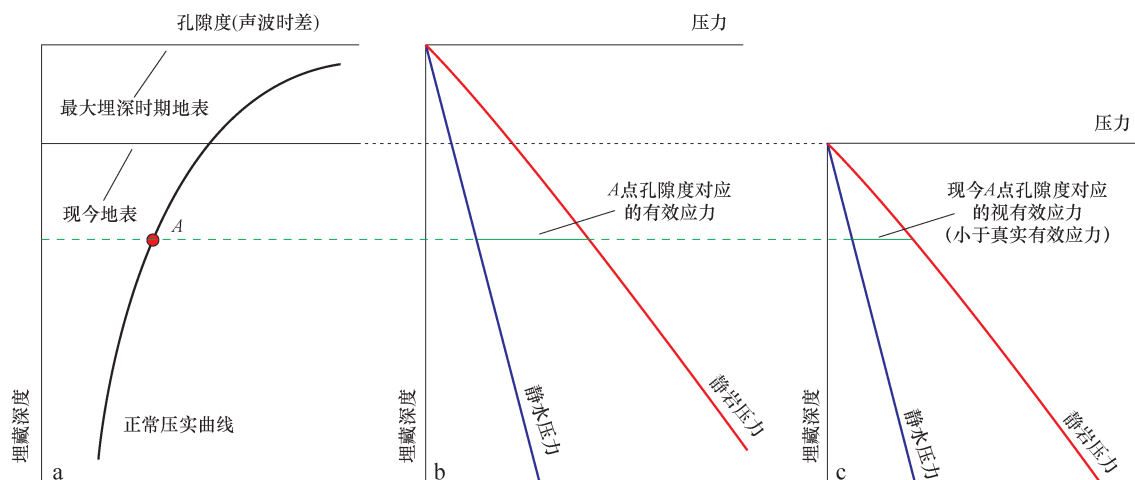


图9 正常压实曲线校正原理示意图

Fig. 9 Schematic diagram showing correction principles of the normal compaction curve

a. 剥蚀前后正常压实趋势; b. 最大埋深期有效应力变化; c. 现今有效应力变化

的有效应力与现今A点的孔隙度相对应,从而过高地估计了该点处的地层压力。

为了消除上述情况的影响,可以根据剥蚀厚度恢复情况获得A点历史最大埋藏深度与现今埋藏深度的差值,并将现今正常压实曲线整体向下平移该差值的距离,以此得到的新的正常压实曲线上各深度点孔隙度值则与图9c中各深度点有效应力值一一对应。

3.3.2 压力计算结果

当前泥岩压力研究的难点之一在于实测压力的获取,目前常见的实测手段有地层重复测试、钻井测试以及泥浆比重法等。由于研究区泥岩压力资料相对匮乏,故本文选用泥浆比重作为实测压力数据的来源。

众所周知,为了确保钻井过程的安全,泥浆密度往

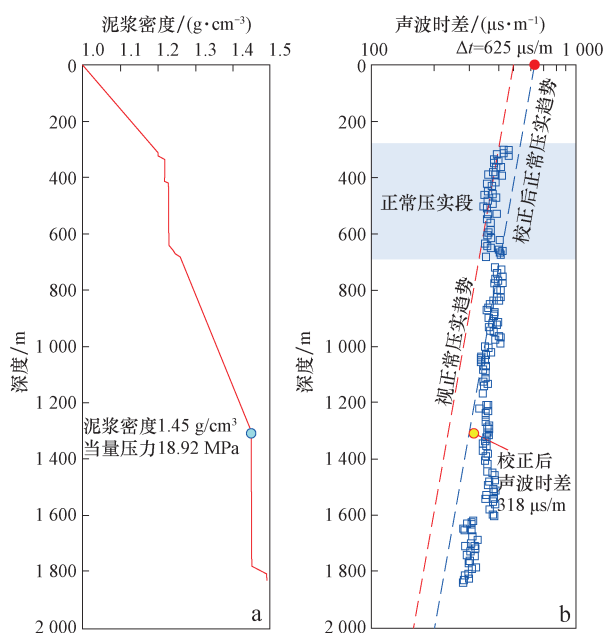


图10 长垣地区葡532井实测压力点处声波时差校正结果

Fig. 10 The correction result of interval transit time at the measured pressure point in Well Pu532 in Placanticline area

a. 泥浆密度变化趋势; b. 泥岩声波时差变化趋势

往取某一井段中的最高值,以此防止井喷等事故的发生。正因如此,录井资料中的泥浆密度并不能真实反映对应深度的地层压力。为了避免这一影响,本文选取泥浆密度开始发生变化的深度进行压力预测,并将预测结果同该点泥浆密度换算的实测压力进行比对,以获得计算精度。

葡532井位于大庆长垣中南部地区,其在嫩江组沉积期末及明水组沉积期末的构造反转运动中皆遭受过强烈的剥蚀。因此在应用平衡深度法或伊顿指数法这类预测方法时,应格外注意剥蚀量这一因素的影响。如图10所示,葡532井青山口组泥浆密度变化处其密度变为 1.45 g/cm^3 ,对应压力为 18.92 MPa 。依照上文所述方法对该点测井参数进行校正后,声波时差为 $318 \text{ } \mu\text{s/m}$ 。选用6.5作为伊顿指数进行计算后,该点压力预测结果为 18.89 MPa ,预测误差 0.03 MPa 。

为了验证这一指数的精确性,本文选取了另外一口声波时差及密度数据较全的井(敖12井),进行了测井参数校正及压力预测。如图11所示,敖12井青山口组泥浆密度变化处其密度变为 1.41 g/cm^3 ,对应压力为 29.73 MPa 。对该点测井参数进行校正后,声波时差为 $251 \text{ } \mu\text{s/m}$ 。选用6.5作为伊顿指数进行计算后,该点压力预测结果为 29.12 MPa ,预测误差 0.61 MPa ,精度可达95%以上。

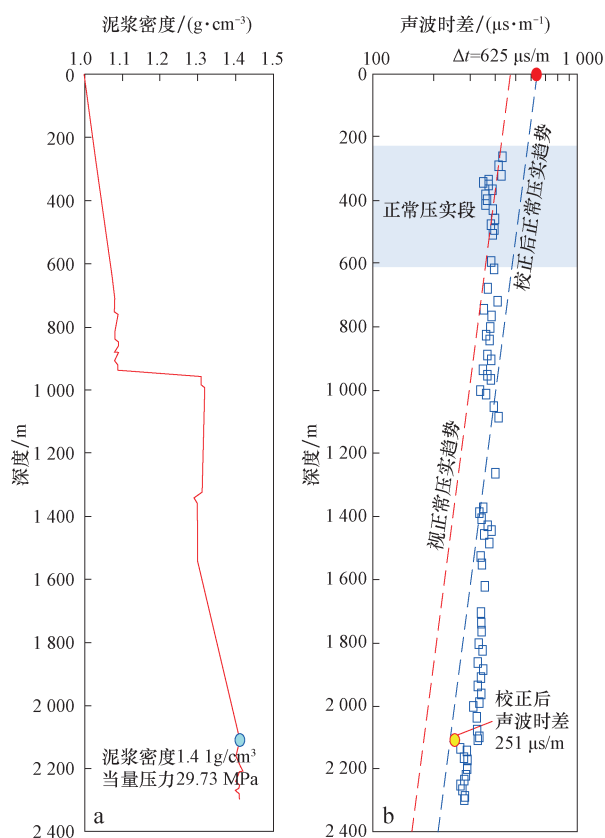


图11 长垣地区敖12井实测压力点处声波时差校正结果

Fig. 11 The correction result of interval transit time at the measured pressure point in Well Ao12 in Placanticline area

a. 泥浆密度变化趋势; b. 泥岩声波时差变化趋势

4 讨论

随着超压研究理论的发展,实证性的成因判别方法逐渐多样化,但大多还依赖声波速度、密度等测井参数。然而对于烃源岩而言,其内部低密度有机质将与超压一同对这些测井参数造成影响,以此迷惑人们的判断。本文以葡532井为例,介绍了一种在超压成因判别中针对烃源岩的测井参数校正方法,并初步取得了几点认识。

1) 本文将烃源岩划分为非有机质泥岩骨架、固体有机质及孔隙流体三部分,并以此对超压成因判别中应用到的声波时差及密度参数进行了校正,去除了低密度有机质对这两种参数的影响。校正前后关于超压成因的认识明显不同:校正前测井参数表现出明显的不均衡压实成因超压;校正后各类成因判别方法均将结果指向传导或流体膨胀成因超压。

2) 应用依赖正常压实曲线的超压预测方法时,对于存在剥蚀且剥蚀厚度大于新沉积地层厚度的地区,应根据剥蚀厚度对正常压实曲线进行校正。未

经校正的计算结果将明显高于真实值,且可能造成超压成因的误判。根据校正后的测井参数及压实趋势,对典型井进行压力预测,其精度可达95%以上。预测过程中选用了6.5作为伊顿指数,这从侧面证明了流体膨胀是造成研究区青一段出现超压的原因。

3) 需指出的是,本文得出的计算孔隙度并不能准确代表真实的孔隙度值,其目的仅仅是为了反映超压对测井参数的影响。

参 考 文 献

- [1] Tosaya C A. Detection of abnormal pore pressures in shales by wave amplitude variations[J]. Society of Exploration Geophysicists, 1982, 47(4): 486.
- [2] Bowers G L, Katsube T J. The role of shale pore structure on the sensitivity of wire-line logs to overpressure[J]. AAPG Bulletin, 2002, 76: 43–60.
- [3] Hoesni J. Origins of overpressure in the Malay Basin and its influence on petroleum systems[D]. Durham, United Kingdom: University of Durham, 2004.
- [4] O'Conner S, Swarbrick R E, Lahann R W. Geologically driven pore fluid pressure models and their implications for petroleum exploration. [J]. Geofluids, 2011, 11(4): 343–348.
- [5] Tingay M R, Morley C K, Laird A, et al. Evidence for overpressure generation by kerogen-to-gas maturation in the northern Malay Basin[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(4): 639–672.
- [6] Eaton B A. Graphical method predicts geo-pressures world wide[J]. World Oil, 1976, 183(1): 100–104.
- [7] Bowers G L. Determining an appropriate pore-pressure estimation strategy[C]. Offshore Technology Conference, 2001, 1–14.
- [8] Fillippone W R. On the prediction of abnormally pressured sedimentary rocks from seismic data[J]. OTC 3662, 1979: 2667–2676.
- [9] 刘震, 张万选, 张厚福, 等. 辽西凹陷北洼下第三系异常地层压力分析[J]. 石油学报, 1993, 14(1): 14–23.
Liu Zhen, Zhang Wanxuan, Zhang Houfu, et al. An analysis of abnormal formation pressure of Paleogene in the north sag of Liaoxi depression[J]. Acta Petrolei Sinica. 1993, 14(1): 14–23.
- [10] 向才富, 冯志强, 吴河勇, 等. 松辽盆地异常压力系统及其形成原因探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(11): 1752–1759.
Xiang Caifu, Feng Zhiqiang, Wu Heyong, et al. Three abnormal pressure systems developed in the Songliao Basin, northeast China and their genesis[J]. Acta Ueological Sinica, 2006, 80(11): 1752–1759.
- [11] 赵靖舟, 李军, 徐泽阳. 沉积盆地超压成因研究进展[J]. 石油学报, 2017.
Zhao Jingzhou, Li Jun, Xu Zeyang. Advances in the origin of overpressures in sedimentary basins[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017.
- [12] Bowers G L. Detecting high overpressure[J]. The Leading Edge, 2002, 21(2): 174–177.
- [13] Tingay M R, Hillis R R. 'Vertically transferred' overpressures in Brunei: Evidence for a new mechanism for the formation of high-magnitude overpressure[J]. Geology, 2007, 35(11): 1023–1026.
- [14] Tingay M R, Hillis R R. Origin of overpressure and pore-pressure prediction in the Baram province, Brunei[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(1): 51–74.
- [15] 霍秋立, 曾花森, 付丽, 等. $\Delta\lg R$ 测井评价方法的改进及其在松辽盆地的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(2): 586–591.
Huo Qiuli, Zeng Huasen, Fu Li, et al. The advance of $\Delta\lg R$ method and its application in Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(2): 586–591.
- [16] 黄仁春, 王燕, 程斯洁, 等. 利用测井资料确定页岩储层有机碳含量的方法优选——以焦石坝页岩气田为例[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 25–32.
Huang Renchun, Wang Yan, Cheng Sijie, et al. Optimal selection of logging-based TOC calculation methods of shale reservoirs: A case study of the Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12): 25–32.
- [17] 李超, 张立宽, 罗晓容, 等. 泥岩压实研究中有机质导致声波时差异常的定量校正方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(3): 77–87.
Li Chao, Zhang Likuan, Luo Xiaorong, et al. A quantitative method for revising abnormally high sonic data in rich-organic rock during compaction study[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(3): 77–87.

(编辑 张玉银)