

Comparative Study of $w(\text{TOC})$ Logging in Shale-Gas Reservoirs

Xin Nie^{1,2}, Yu Wan¹, Changchun Zou³, Ru Zhang⁴

¹Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources (Yangtze University), Ministry of Education, Wuhan Hubei

²Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas (Yangtze University), Wuhan Hubei

³Key Laboratory of Geo-Detection (China University of Geosciences, Beijing), Ministry of Education, Beijing

⁴Well Logging Company of North China Petroleum Engineering Company of SINOPEC, Xinxiang Henan
Email: niexin_cugb@126.com

Received: Dec. 2nd, 2015; accepted: Mar. 23rd, 2016; published: Jun. 15th, 2016

Copyright © 2016 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The study of shale gas was one of the hotspots for research on the shale-gas resources worldwide currently. The evaluation methods of Total Organic Carbon $w(\text{TOC})$ well logging were preliminarily summarized and analyzed. The actual data were processed for $w(\text{TOC})$ well logging, the calculation results were verified and compared with core data. The analysis results show that spectral gamma-ray log method is the most suitable for the formations without radioactive minerals and it should be the first choice. For the application of the areas without spectral gamma-ray logging data but with core data, the regression curve method should be selected for obtaining the regression logging formula being the most suitable for using in the area based on experimental results. For the areas where only conventional logging curves are acquired, $\Delta\log R$ method is an available option.

Keywords

Well Log Evaluation, $w(\text{TOC})$, Shale Gas, Regression Method, $\Delta\log R$ Method

页岩气储层 $w(\text{TOC})$ 测井评价方法对比研究

聂昕^{1,2}, 万宇¹, 邹长春³, 张儒⁴

¹油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学), 湖北 武汉

²非常规油气湖北省协同创新中心(长江大学), 湖北 武汉

³地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室(中国地质大学(北京)), 北京

⁴中石化华北石油工程有限公司测井分公司, 河南 新乡

作者简介: 聂昕(1987-), 男, 博士, 讲师, 主要从事非常规资源测井解释及数字岩石物理方面的研究工作。

Email: niexin_cugb@126.com

收稿日期: 2015年12月2日; 录用日期: 2016年3月23日; 发布日期: 2016年6月15日

摘要

针对当前世界范围内研究热点之一的页岩气资源, 对储层总有机碳质量分数($w(\text{TOC})$)测井评价方法进行了初步总结和探讨。对 $w(\text{TOC})$ 测井评价方法进行了实际资料的处理, 并对处理结果进行了验证和对比分析。通过分析结果可知, 对于没有放射性矿物干扰的地层, 利用自然伽马能谱法评价 $w(\text{TOC})$ 的准确度最高, 应优先选择; 对于没有自然伽马测井数据却有岩心试验数据的地区, 可根据试验数据优选回归曲线获得最符合该地区的回归公式; 对于仅含有常规测井曲线的地区, 则可选择 $\Delta\log R$ 法。

关键词

测井评价, $w(\text{TOC})$, 页岩气, 回归法, $\Delta\log R$ 法

1. 引言

作为一种非常规的天然气资源, 页岩气的勘探开发越来越得到人们的重视。2005年以来, 随着能源需求的急剧增加和国外页岩气资源的成功开发利用, 国家层面已经充分认识到页岩气资源的重要性, 中石油、中石化及国土资源部加强了我国页岩气资源的调查[1]。总有机碳质量分数 $w(\text{TOC})$ 是页岩气评价的重要参数之一, 它反映了含气页岩中有机质的多少和生烃潜力的大小。测井资料是评价地层 $w(\text{TOC})$ 的重要手段之一。

目前, 已经有许多学者针对页岩气储层的 $w(\text{TOC})$ 评价方法进行了研究。Schmoker (1979) [2]建议用密度测井来估算 $w(\text{TOC})$, 由于体积密度对于 $w(\text{TOC})$ 较为敏感, $w(\text{TOC})$ 每增加10%, 密度将减少 0.5 g/cm^3 , 斯伦贝谢公司也开发了该种解释技术。Schmoker (1981) [3]针对美国 Illinois 州 New Albany 页岩岩心进行了研究, 将公式计算的 $w(\text{TOC})$ 与实验室利用岩心分析的 $w(\text{TOC})$ 进行对比, 发现 $w(\text{TOC})$ 与自然伽马呈线性关系, 可以利用自然伽马估算 $w(\text{TOC})$ 。Passey 等(1990) [4]提出利用 $\Delta\log R$ 法来计算 $w(\text{TOC})$, 即主要利用电阻率曲线和孔隙度曲线叠加的方法来评价 $w(\text{TOC})$, 该方法是目前使用最广的方法之一。朱光有等(2003) [5]、李延钧等(2013) [6]及谢灏辰等(2013) [7]利用影响 $w(\text{TOC})$ 的多个参数, 如电阻率、自然伽马、密度等, 建立多元回归方程来计算 $w(\text{TOC})$ 。杨小兵等(2012) [8]及李延钧等(2013) [6]利用自然伽马能谱测井中的铀元素含量计算 $w(\text{TOC})$, 与实验室的实测值有较高的相关系数。笔者针对多种利用测井资

料计算 $w(\text{TOC})$ 的方法进行实际资料处理及对比分析,以确定在实际页岩气测井评价中应如何选择最优化的 $w(\text{TOC})$ 计算方法。

2. $w(\text{TOC})$ 计算方法

该次研究选取了四川盆地某页岩气储层的 X 井[8]为例,针对该井的测井资料和岩心资料,利用多种方法进行了处理。

2.1. 单一参数回归法

由于测井曲线对 $w(\text{TOC})$ 的敏感性,可建立测井参数与 $w(\text{TOC})$ 的拟合关系,常用的有体积密度法、自然伽马指示法。

利用 X 井的测井数据与岩心分析的 $w(\text{TOC})$ ($w(\text{TOC})_{\text{core}}$)进行交会,由单变量线性回归结果(图 1)可以看出,自然伽马(q_{API})、密度(ρ)、声波时差(Δt)与 $w(\text{TOC})_{\text{core}}$ 呈线性关系, q_{API} 与 $w(\text{TOC})_{\text{core}}$ 的相关性最高, Δt 与 $w(\text{TOC})_{\text{core}}$ 的相关性最低。其回归公式分别为:

$$w(\text{TOC})_{q_{\text{API}}} = 0.0305q_{\text{API}} - 3.0766, \quad R^2 = 0.5441 \quad (1)$$

$$w(\text{TOC})_{\rho} = -13.593\rho + 37.388, \quad R^2 = 0.4663 \quad (2)$$

$$w(\text{TOC})_{\Delta t} = 0.0447\Delta t - 1.698, \quad R^2 = 0.0582 \quad (3)$$

式中: $w(\text{TOC})_{q_{\text{API}}}$ 、 $w(\text{TOC})_{\rho}$ 、 $w(\text{TOC})_{\Delta t}$ 分别为根据自然伽马、密度、声波时差计算的 $w(\text{TOC})$, %; R^2 为相关系数。

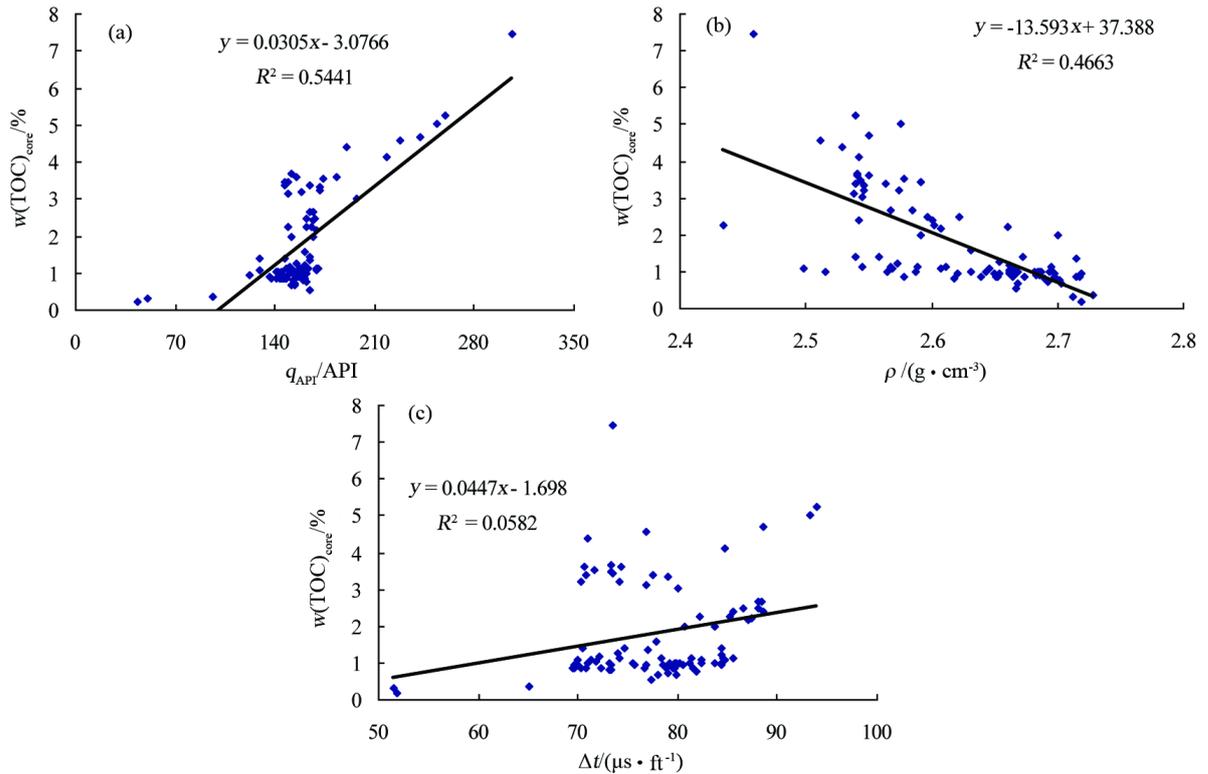


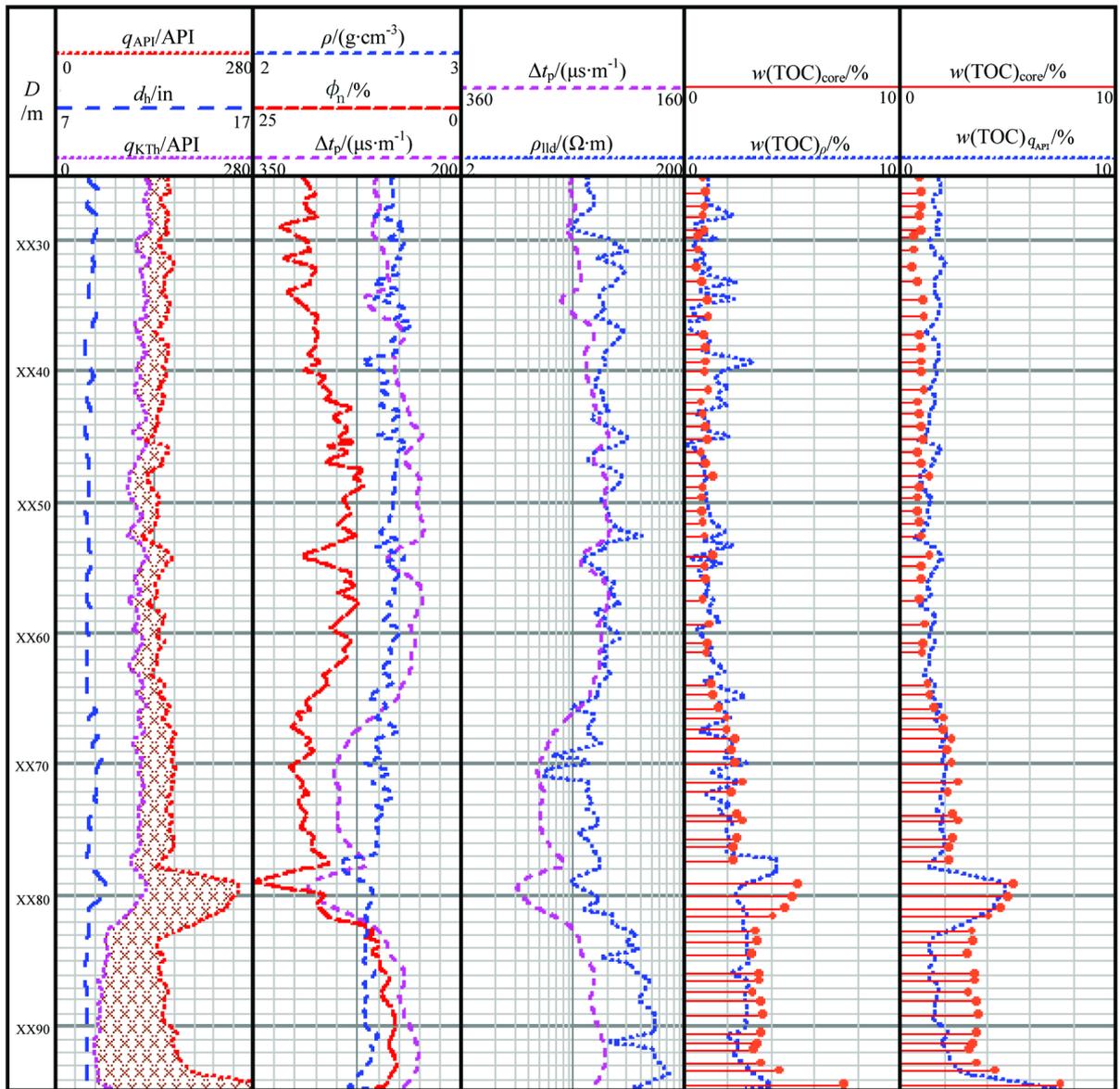
Figure 1. Crossplot of conventional logs in Well X

图 1. X 井 $w(\text{TOC})_{\text{core}}$ 与常规测井曲线交会图

利用相关性较好的 q_{API} 与 ρ 来计算 $w(\text{TOC})$, 计算结果如图 2 所示。可以看出, 在 XX25~XX82m 井段 $w(\text{TOC})_{q_{API}}$ 与 $w(\text{TOC})_{\text{core}}$ 有大致相同的趋势, 但在 XX25~XX48m 范围内 $w(\text{TOC})_{q_{API}}$ 偏大, 在 XX82~XX95m 范围内 $w(\text{TOC})_{q_{API}}$ 偏小; 由密度计算得到的 $w(\text{TOC})_{\rho}$ 曲线整体波动较明显, 在 XX82~XX95m 范围内 $w(\text{TOC})_{\rho}$ 也偏大, 但比 $w(\text{TOC})_{q_{API}}$ 更接近真实值。计算结果说明, 利用单一测井方法计算 $w(\text{TOC})$ 有明显不符的地层, 表明单一测井技术在确定 $w(\text{TOC})$ 方面具有局限性。

2.2. 多参数回归法

如果存在 2 个或多个与应变变量密切相关的自变量, 且它们自身不相关, 则多元回归效果优于单一变量回归的结果。



注: D 为井深; d_h 为井径; q_{KTh} 为无轴伽马; ϕ_n 为中子孔隙度; Δt_p 为纵波时差; ρ_{ld} 为深侧向电阻率。

Figure 2. Comparison diagram of $w(\text{TOC})$ calculated with single parameter regression method and from core data in Well X
图 2. X 井单一参数回归法计算的 $w(\text{TOC})$ 与岩心分析 $w(\text{TOC})$ 对比图

谢灏辰等(2013) [7]利用鄂尔多斯盆地延长组页岩 $w(\text{TOC})$, 建立其与 q_{API} 、电阻率对数($\lg\rho_t$)的多元回归:

$$w(\text{TOC}) = 0.023q_{\text{API}} + 4.018\lg\rho_t - 6.907 \quad (4)$$

应用该模型计算得到的 $w(\text{TOC})$ 与实测值的平均误差为 5.35%, 说明该模型的可靠性。

李延钧等(2013) [6]利用四川盆地某页岩层 $w(\text{TOC})$, 与电阻率(ρ_t)、 Δt 建立关系式:

$$w(\text{TOC}) = 3.067\lg\rho_t + 0.068\Delta t - 7.881 \quad (5)$$

应用式(5)计算得到 $w(\text{TOC})$ 与地球化学分析实测数据值对比, $R^2 = 0.667$, 符合程度较高。

2.3. $\Delta\log R$ 法

$\Delta\log R$ 法是埃克森(Exxon)和埃索(Esso)公司于 1979 年开发研究的。该方法主要是利用一种专门刻度孔隙度的测井曲线与一条电阻率曲线叠加, 由于井眼条件会影响到密度曲线和中子孔隙度曲线, 所以大多数情况下使用 Δt 与 ρ_t 叠加。在不含有机的页岩段, 2 条测井曲线相互重合或平行, 在富含有机质的页岩段, 2 条曲线产生明显的幅度差。计算方法为:

$$\Delta\lg\rho_t = \lg\frac{\rho_{t,m}}{\rho_{t,b}} + 0.02(\Delta t_m - \Delta t_b) \quad (6)$$

式中: $\Delta\lg\rho_t$ 为电阻率曲线和孔隙度曲线叠合的幅度差; $\rho_{t,m}$ 、 $\rho_{t,b}$ 分别为实测电阻率和基线处的电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$; Δt_m 、 Δt_b 分别为实测声波时差和基线处的声波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$ 。

若没有合适的声波时差曲线时, 也常使用密度曲线或中子孔隙度曲线:

$$\Delta\lg\rho_t = \lg\frac{\rho_{t,m}}{\rho_{t,b}} + 4.0(\phi_{n,m} - \phi_{n,b}) \quad (7)$$

$$\Delta\lg\rho_t = \lg\frac{\rho_{t,m}}{\rho_{t,b}} + 2.5(\rho_m - \rho_b) \quad (8)$$

式中: $\phi_{n,m}$ 、 $\phi_{n,b}$ 分别为实测中子孔隙度和基线处的中子孔隙度, 1; ρ_m 、 ρ_b 分别为实测密度和基线处的密度, g/cm^3 。

$w(\text{TOC})$ 与 $\Delta\lg\rho_t$ 的经验方程为:

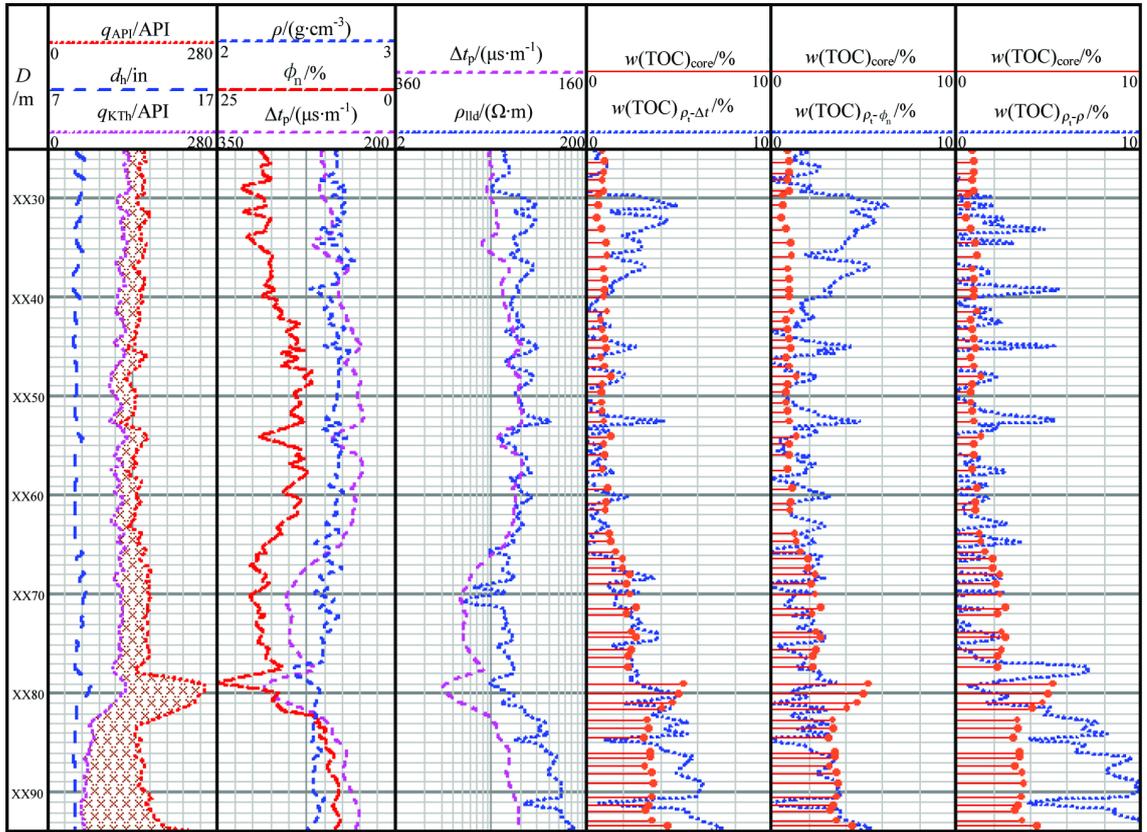
$$w(\text{TOC}) = \Delta\lg\rho_t \times 10^{2.297 - 0.1688L_{\text{OM}}} \quad (9)$$

式中: L_{OM} 为含气页岩的成熟度, 1。

分别利用式(6)~(8)得到的 $\Delta\lg\rho_t$ 计算 $w(\text{TOC})$, 结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, 在 XX25~XX40m 范围内, $\Delta\log R$ 法计算的 3 条曲线都偏大, 都有较大误差; 在 XX40~XX82m 范围内, $w(\text{TOC})_{\rho_t - \Delta t}$ 相较于其他 2 条曲线, 与 $w(\text{TOC})_{\text{core}}$ 更相符; 在 XX82~XX93m 范围内, $w(\text{TOC})_{\rho_t - \phi_n}$ 与 $w(\text{TOC})_{\text{core}}$ 更为相符。分析认为, $\Delta\log R$ 法由于需要人为确定岩性基线, 可能会产生较大误差; 由于 3 种曲线都需要利用 ρ_t , 当 ρ_t 发生异常时, 会对结果造成较大影响。

2.4. 自然伽马能谱法

放射性元素铀与有机质之间有着密切的关系, 有机质越富集的地方, 能谱曲线中所显示的铀的质量浓度($\rho(\text{U})$)越高[9], $w(\text{TOC})$ 与 $\rho(\text{U})$ 呈正相关性, 而和钍铀比($\rho(\text{Th})/\rho(\text{U})$)呈负相关。利用实测 $w(\text{TOC})$ 与 q_{API} 、 $\rho(\text{U})$ 、 $\rho(\text{Th})/\rho(\text{U})$ 的关系, 以及 $w(\text{TOC})$ 与铀钾比($\rho(\text{U})/w(\text{K})$)的关系, 回归分析可估算出页岩层的 $w(\text{TOC})$ 。



注: $w(\text{TOC})_{\rho-\Delta t}$ 为利用电阻率曲线与声波时差曲线计算的 $w(\text{TOC})$; $w(\text{TOC})_{\rho-\phi_n}$ 为利用电阻率曲线与中子孔隙度曲线计算的 $w(\text{TOC})$; $w(\text{TOC})_{\rho-p}$ 为利用电阻率曲线与密度曲线计算的 $w(\text{TOC})$ 。

Figure 3. Comparison diagram of $w(\text{TOC})$ calculated with $\Delta\log R$ method and from core data in Well X

图 3. X 井 $\Delta\log R$ 法计算 $w(\text{TOC})$ 与岩心试验数据对比图

自然伽马曲线与无轴伽马曲线的差值(Δq_{API})与 $\rho(\text{U})$ 呈正相关, 据该差值可估算 $w(\text{TOC})$ [6]:

$$\Delta q_{\text{API}} = q_{\text{API}} - q_{\text{KTh}} \quad (10)$$

$$w(\text{TOC}) = A \times \Delta q_{\text{API}} + B \quad (11)$$

式中: A 、 B 为线性回归系数。

利用 X 井的 Δq_{API} 与 $w(\text{TOC})_{\text{core}}$ 建立交会图, 相关性较好(见图 4), 拟合得到的回归公式为:

$$w(\text{TOC})_{\Delta q_{\text{API}}} = 0.0335\Delta q_{\text{API}} + 0.1053, \quad R^2 = 0.8775 \quad (12)$$

式中: $w(\text{TOC})_{\Delta q_{\text{API}}}$ 为利用 Δq_{API} 计算得到的 $w(\text{TOC})$, %。

利用自然伽马能谱法计算 X 井的 $w(\text{TOC})$, 结果如图 5 所示。由图 5 可以看出, 除在 XX70~XX80m 范围内, 计算结果略微偏小之外, 利用该方法得到的 $w(\text{TOC})$ 与 $w(\text{TOC})_{\text{core}}$ 具有较好的一致性。

3. $w(\text{TOC})$ 计算方法对比

将上述几种方法的计算结果进行对比, 如图 6 所示。对于 X 井来说, 利用自然伽马能谱法效果最好, 且方法简单, 但对于某些放射性物质导致 $\rho(\text{U})$ 异常高的地层, 该方法的准确性会降低; 单一参数回归法(根据自然伽马和密度计算的 $w(\text{TOC})$)可以较好地反映地层 $w(\text{TOC})$ 的趋势; $\Delta\log R$ 法计算的 3 条曲线受电阻率曲线影响较大, 并且需要人为确定基线, 因此误差较大, 此外, L_{OM} 的选取也会影响 $w(\text{TOC})$ 的计算结果。

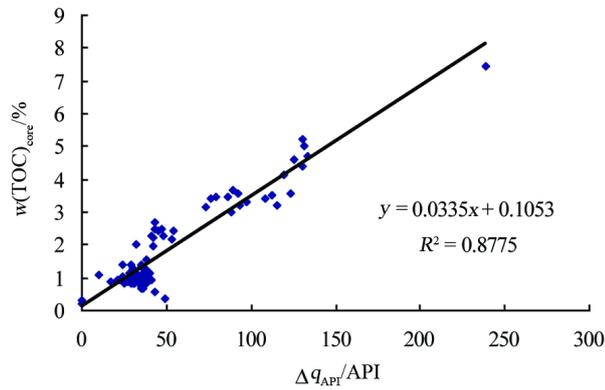
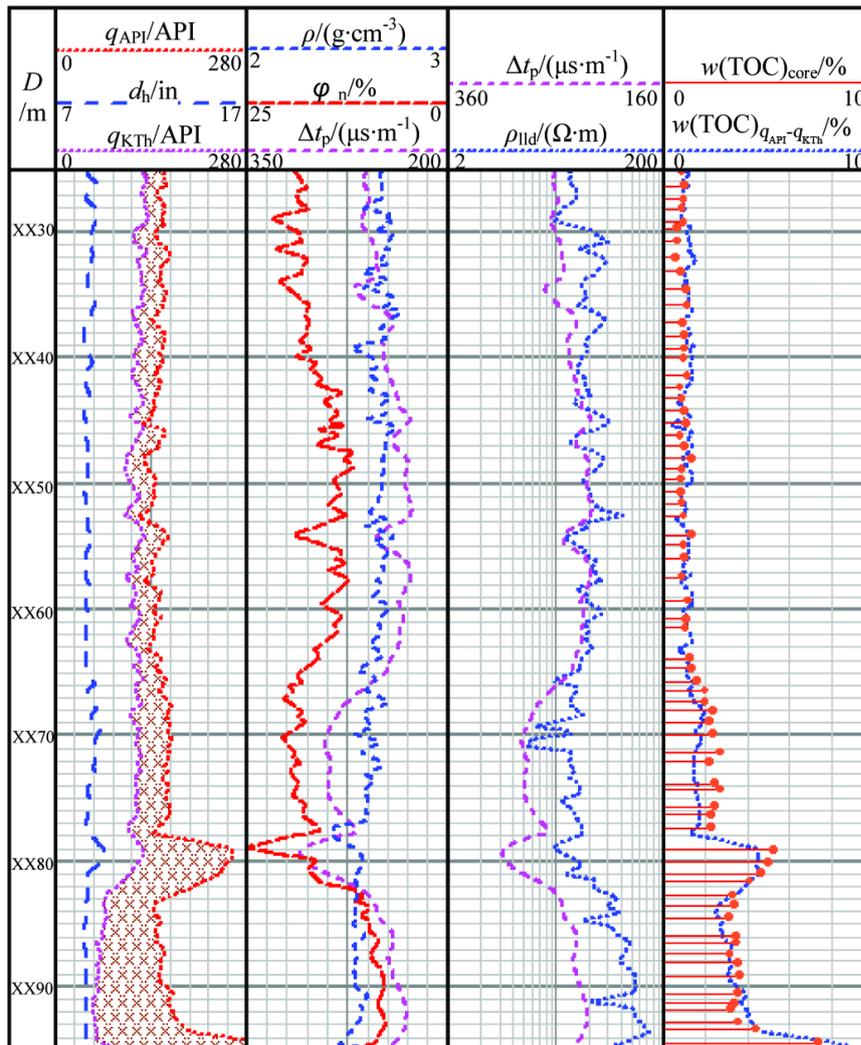


Figure 4. Diagram of relationship between $w(\text{TOC})_{\text{core}}$ and Δq_{API} in Well X
 图 4. X 井 $w(\text{TOC})_{\text{core}}$ 与 Δq_{API} 关系图



注: $w(\text{TOC})_{q_{\text{API}}-q_{\text{KTh}}}$ 为自然伽马曲线与无轴伽马曲线计算的 $w(\text{TOC})$ 。

Figure 5. Comparison diagram of $w(\text{TOC})$ calculated with natural gamma spectrum method and from core data in Well X
 图 5. X 井自然伽马能谱法计算 $w(\text{TOC})$ 与岩心试验数据对比图

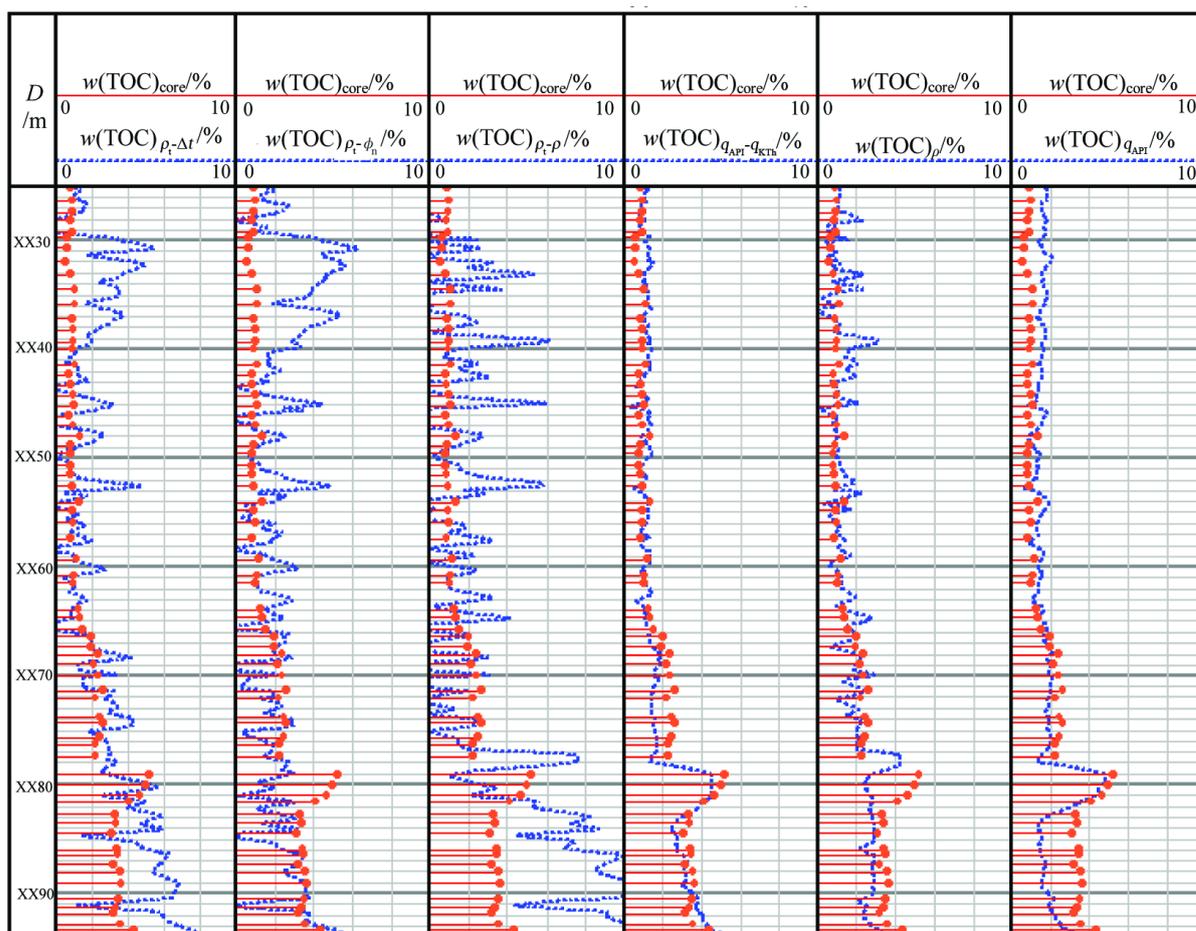


Figure 6. Comparison of $w(\text{TOC})$ calculating methods in Well X

图 6. X 井 $w(\text{TOC})$ 计算方法对比

从方法上来说, 自然伽马能谱法、单一参数回归法需建立在岩心试验数据的基础上, 根据岩心试验数据得到回归系数, 不同地区的页岩气储层所得的回归系数不同, 对于有岩心试验数据的地区, 利用上述方法可以得到较好的结果; 从对测井数据的需求上来说, 自然伽马能谱法需要进行自然伽马能谱测井, 而其他几种方法只需要常规测井曲线就可以进行计算。

4. 结语

笔者对目前常用的 $w(\text{TOC})$ 计算方法进行了实际数据的处理和结果分析, 获得了对各个方法适用性的初步认识。对于不含放射性矿物的地区, 利用自然伽马能谱法求取的 $w(\text{TOC})$ 准确性最高; 对于有岩心试验数据且进行了自然伽马能谱测井的地区, 优先选择自然伽马能谱法进行计算; 对于没有自然伽马能谱测井数据, 仅有岩心试验数据的地区, 可优选测井曲线进行回归, 选择最符合该地区的计算方法; 对于仅有常规测井资料的地区, 可选用 $\Delta \log R$ 法进行 $w(\text{TOC})$ 的计算。

基金项目

国家自然科学基金项目(41274185, 41504094); 油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学)开放基金项目(K2015-06)。

参考文献 (References)

- [1] 张新华, 陆黄生, 王志战. 页岩气井场快速识别评价技术[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2011, 33(10): 48-52.
- [2] Schmoker, J.W. (1979) Determination of Organic Content of Appalachian Devonian Shales from Formation-Density Logs. *AAPG Bulletin*, **63**, 1504-1537.
- [3] Schmoker, J.W. (1981) Determination of Organic-Matter Content of Appalachian Devonian Shales from Gamma-Ray Logs. *AAPG Bulletin*, **65**, 1285-1298.
- [4] Passey, Q.R., Creaney, S. and Kulla, J.B. (1990) A Practical Model for Organic Richness from Porosity and Resistivity Logs. *AAPG Bulletin*, **74**, 1777-1794.
- [5] 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(2): 104-109, 146.
- [6] 李延钧, 张烈辉, 冯媛媛, 等. 页岩有机碳含量测井解释方法及其应用[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 169-175.
- [7] 谢灏辰, 于炳松, 曾秋楠, 等. 鄂尔多斯盆地延长组页岩有机碳测井解释方法与应用[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 731-736.
- [8] 杨小兵, 杨争发, 谢冰, 等. 页岩气储层测井解释技术[J]. 天然气工业, 2012, 32(9): 33-36, 128-129.
- [9] 张立鹏, 边瑞雪, 杨双彦, 等. 用测井资料识别烃源岩[J]. 测井技术, 2001, 25(2): 146-152, 161.

再次投稿您将享受以下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>