

文章编号: 1004-1338(2018)01-0065-08

江西修武盆地新开岭组梨树窝组页岩含气性 测井综合评价

高凤琳¹, 宋岩¹, 姜振学¹, 陈磊¹, 张欣欣², 刘伟伟³, 程四红³

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 3. 江西页岩气控股有限公司, 江西 南昌 330000)

摘要: 不同赋存相态含气性预测是页岩储层评价和有利区目标优选的关键问题。结合江西修武盆地实际地质情况,以新开岭组梨树窝组一段页岩为例,在 TOC 测试和甲烷等温吸附实验的基础上,通过 Langmuir 方程校正计算获得地层条件下的最大吸附气含量;从总孔隙空间中减去吸附气占据空间求得游离气最大储集空间,获得地层条件下游离气的最大储集能力。介绍模型建立过程中一些关键参数的计算方法。结合测井解释,建立评价模型。研究表明,TOC 的预测值与实测值具有较好的吻合性,核磁共振测井孔隙度与实测孔隙度具有较好的一致性,页岩吸附气含量平均为 $0.76 \text{ cm}^3/\text{g}$,游离气含量平均为 $1.16 \text{ cm}^3/\text{g}$,吸附气在 1 672~1 685 m 深度段占比达到 60% 以上,游离气占总含气量的比例普遍高于 50%。预测含气量与实测含气量在分布趋势具有一定的相似性。

关键词: 测井解释; 含气性; 等温吸附; 修武盆地; 新开岭组; 梨树窝组

中图分类号: P631.84

文献标识码: A

Doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2018.01.012

Comprehensive Log Evaluation of Gas in Xinkailing-Lishuwo Shale Formation in Xiuwu Basin, Jiangxi Province

GAO Fenglin¹, SONG Yan¹, JIANG Zhenxue¹, CHEN Lei¹, ZHANG Xinxin², LIU Weiwei³, CHENG Sihong³

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. Jiangxi Shale Gas Holdings LTD, Nanchang, Jiangxi 330000, China)

Abstract: Gas-bearing prediction for different occurrence phases is a key issue for the shale reservoir evaluation and favorable target optimization. Through the literature survey and the actual geological conditions of the XiuWu Basin, Jiangxi Province, the shale of the Xinkailing-Lishuwo Formation is taken as an example. Based on the TOC test and the isothermal adsorption experiment of methane, the maximum adsorption gas content in the stratigraphic condition was corrected by using the Langmuir equation. And the maximum storage capacity and maximum storage space of free gas in the stratigraphic condition was obtained by deducting the volume of adsorbed gas from total pore space. In addition, the paper also introduced how to calculate the key parameters of the evaluation model with logging data. The results show that, the predicted values of TOC are in good agreement with the measured values, and the porosity of the NMR logging is consistent with the measured values, where the average content of shale adsorption gas is $0.76 \text{ cm}^3/\text{g}$, and the average content of free gas is $1.16 \text{ cm}^3/\text{g}$. The proportion of adsorption gas in the depth of 1 672-1 685 m was more than 60%, and the proportion of free gas in total gas content is generally higher than 50%. The predicted gas content has a certain similarity with the

基金项目: 国家科技重大专项不同类型页岩气生成机理与富集规律研究(2016ZX05034-001)

第一作者: 高凤琳,女,1988 生,博士,从事非常规天然气成藏与地质评价研究工作。E-mail:471568216@qq.com

measured gas content in the distribution trend.

Keywords: log interpretation; gas-bearing; isothermal adsorption; Xiuwu Basin; Xinkailing formations; Lishuwo formations

0 引言

无论是海相地层还是陆相地层,虽然都具备页岩气发育的地质条件,但仍没有大规模的页岩气产出^[1]。因此,定量识别和评价页岩含气性仍是个难点和热点问题。页岩气的赋存形式多样,以吸附态附着在有机质和黏土矿物微孔表面,以游离态赋存于较大的孔隙和裂缝中,还有少量的页岩气溶解于液态烃和地层水中^[2-7]。据统计,吸附态页岩气含量至少占总含气量的40%^[8-9],中国库车坳陷东北部的侏罗系泥页岩吸附气含量占比高达40%~85%^[10-11],游离气占比介于25%~30%,溶解气一般小于5%^[12]。不同相态页岩含气性的预测对页岩储层评价、目标区资源计算以及有利区优选具有十分重要的作用,页岩单井含气量的准确预测直接决定了目标区页岩气开发的工业价值^[13-14]。目前关于含气量的测定和预测方法主要包括解吸法、等温吸附法以及公式计算法3种^[15]。解吸法是测量泥页岩含量最直接的方法,包括保压取心测定和密闭取心测定,能够反映页岩在地层条件下的含气性特征,由解吸气量、损失气量以及残余气量3部分组成;其次很多学者利用等温吸附实验建立吸附气含量与温度和压力的关系模型,不仅可以获取吸附气含量,还可以确定吸附气含量随深度的变化趋势^[16-17]。郭旭升等^[18]通过分析含气量与地震属性之间的相关关系,利过多元线性回归对页岩含气量进行预测;而在研究区勘探的初期,由于资料有限,常采用等温吸附实验和测井解释手段相结合的方法进行页岩吸附气、游离气以及少量溶解气含量的计算。江西修武盆地页岩气资源勘探目前仍处于起步阶段,有必要开展该区块页岩含气性影响因素研究及定量预测工作。本文结合现场分析、等温吸附实验、测井解释等方法对页岩含气性进行定量预测,建立有效的吸附气和游离气预测模型,对研究区资源评价及有利区优选具有重要的现实意义。

1 研究区概况

江西修武盆地位于下扬子板块的西部,盆地主体为一近东西走向的的复式向斜构造,工区面积约200 km²。修武盆地上奥陶统一志留统新开岭

组—梨树窝组一段页岩是一套厚约50~100 m的灰绿色页岩、粉砂质页岩,底部发育厚约30~40 m的黑色页岩。有机质含量介于0.35%~4.29%之间,平均为1.55%。干酪根类型全部为I型,热演化程度处于过成熟阶段,镜质体反射率 R_o 普遍大于3%。

2 样品及实验

研究选取目的层上奥陶统一志留统新开岭组—梨树窝组一段共25块岩心样品进行TOC测试分析。依据国家标准GB/T 19145—2003《沉积岩中总有机碳的测定》,采用LECO CS-230型碳硫测试仪进行总有机碳的测定。样品粉碎筛选至小于100目,测量之前,用盐酸在60~80℃条件下浸泡2 h以除去无机碳,然后用蒸馏水冲洗至中性,烘干,加入助熔剂进行多次测定,该设备测量的误差范围小于0.5%。选取12个样品进行甲烷等温吸附实验,实验在30℃条件下进行,通过不断增加压力,记录吸附气含量,然后进行最小二乘法拟合,得出Langmuir体积 V_L 和Langmuir压力 p_L (见图1)。

$$V = \frac{V_L \times p}{p + p_L} \quad (1)$$

式中, V 为吸附气含量,cm³/g; p 为气体压力MPa; V_L 为Langmuir体积,代表页岩在实验温度下的最大吸附能力,即吸附饱和状态的吸附气量,cm³/g; p_L 为Langmuir压力,是1/2饱和吸附气量处所对应的压力,MPa。

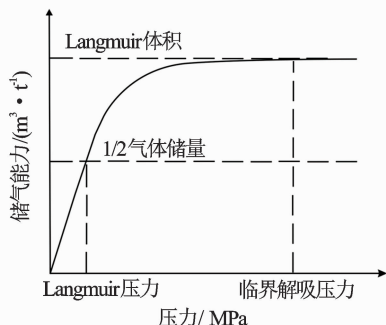


图1 气体吸附解吸典型特征曲线

3 实验分析

3.1 总含气量

根据页岩气的赋存状态,页岩的总含气量为页

岩吸附气量和游离气量以及溶解气量的总和^[19-20],由于溶解气量在页岩储层中十分微小,可以忽略不计,因此页岩的总含气量计算公式为

$$Q_t = Q_a + Q_f \quad (2)$$

式中, Q_t 为总含气量, cm^3/g ; Q_a 为吸附气含量, cm^3/g ; Q_f 为游离气含量, cm^3/g 。

3.2 吸附气量

由于只选取了 12 个页岩样品进行甲烷等温吸附实验,且样品均是在 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下进行的,难以反映地层温压条件下页岩的吸附能力,在不增加实验成本的前提下,精确预测地层条件下页岩吸附气含量需要对兰格缪尔方程中的 Langmuir 体积与 Langmuir 压力进行地层温度和压力的校正。研究采用由斯伦贝谢公司完成的一个温度系列的等温吸附实验结果拟合而出的温度和压力校正公式^[21],推广到研究区目的层温度和压力条件下泥页岩的最大吸附量。

$$V_{lt} = 10^{-C_3(T+\lg V_L+C_3 T_i)} \quad (3)$$

$$p_{lt} = 10^{C_7(T+\lg p_L+C_7 T_i)} \quad (4)$$

式中, T_i 为等温吸附实验时的温度, $^\circ\text{C}$; T 为地层条件温度, $^\circ\text{C}$, 已知该区地温梯度为 $3\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$, 地表温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$; V_{lt} 为校正到地层温度下的 Langmuir 体积, cm^3/g ; p_{lt} 为校正到地层温度下的 Langmuir 压力, MPa; V_L 为实验条件下的 Langmuir 体积, cm^3/g ; p_L 为实验条件下的 Langmuir 压力, MPa; C_3 为 0.0027; C_7 为 0.005。

由公式(3)和公式(4)校正后可得地层温度条件下的 Langmuir 体积和 Langmuir 压力(见表 1)。

吸附气吸附在有机质干酪根和黏土矿物的表面上,有必要对 TOC 和黏土矿物含量进行校正。

$$V_{lc} = V_{lt} \left(a \frac{TOC_{lg}}{TOC_{iso}} + b \frac{V_{Cl,log}}{V_{Cl,iso}} \right) \quad (5)$$

式中, V_{lc} 为经过温度、压力、TOC 以及黏土矿物校正的 Langmuir 体积, cm^3/g ; TOC_{lg} 为测井 TOC 质量百分比, %; TOC_{iso} 为等温吸附实验样品的 TOC 质量百分比, %; $V_{Cl,log}$ 为 ECS 测井黏土矿物百分含量; $V_{Cl,iso}$ 为等温吸附实验样品的黏土矿物百分含量, %; a 和 b 为系数, $a+b=1$, 吉利明等^[22]对各黏土矿物进行吸附实验得出 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, 伊利石和绿泥石的最大吸附能力分别为 0.97 mL/g 和 1.10 mL/g 。已知目的层黏土矿物组成主要为伊利石和绿泥石, 其质量百分数比值接近于 1:5, 因此, 对 2 种黏土矿物吸附能力进行加权平均可近似认为目的层页岩黏土矿物对甲烷的吸附能力为 0.996 mL/g 。曹涛涛

等^[23]对不同类型干酪根吸附能力分析, 近似认为高一过成熟的 I 型干酪根最大吸附能力是黏土矿物的 2 倍, 因此, a 和 b 之间的关系定为 $a=2b$, 求得 $a=0.67$, $b=0.33$ 。将式(5)代入式(6)即可求得实际地层条件下的吸附气含量

$$Q_a = \frac{V_{lc} p}{p + p_{lt}} \quad (6)$$

式中, Q_a 为地层条件下最大吸附气量, cm^3/g ; p 为地层实际压力, MPa。

根据上述方法, 计算出新开岭组—梨树窝组一段地层温度条件下的 Langmuir 体积 V_{lc} 和 Langmuir 压力 p_{lt} , 如果知道新开岭组—梨树窝组一段的地层压力, 即可求出目的层的最大吸附气含量。地层压力计算公式为

$$p = \alpha \rho_w g h \times 10^{-6} \quad (7)$$

式中, p 为地层压力, MPa; α 为地层压力系数, 无量纲, 研究区地层压力系数近似为 1.0; ρ_w 为地层水的密度, 近似为 1 kg/m^3 ; g 为重力加速度, 9.8 N/kg ; h 为埋藏深度, m。

将式(7)代入式(6)即可求出新开岭组—梨树窝组一段页岩地层条件下最大吸附气含量(见图 3)。由表 1 可以看出, 由于目的层温度介于 $73.91\sim 75.73\text{ }^\circ\text{C}$, 相差 $1.82\text{ }^\circ\text{C}$, 可视整个地层温度变化不大, 地层温度平均为 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 。所求的 V_{lt} 和 p_{lt} 也近似为常数, 代表整个储层地层条件下的 Langmuir 体积和 Langmuir 压力, 分别取平均值得 $0.625\text{ cm}^3/\text{g}$ 和 2.395 MPa 。

3.3 游离气量

由于该区页岩经历了复杂的构造运动, 页岩已处于过成熟阶段, 生成的液态烃也全部进一步裂解生成天然气, 假设页岩孔隙处于饱和状态, 并且孔隙中只存在吸附气和游离气, 而液态烃和地层水含量非常有限, 可忽略不计^[24-25]。因此, 游离气含量的计算则可建立在吸附气含量计算的基础之上, 从总的孔隙空间中减去吸附气所占的孔隙空间可得游离气的所占空间, 计算出游离气埋藏条件下的甲烷密度, 求出游离气的含量^[26]。

$$V_f = V_t - V_a \quad (8)$$

式中, V_f 为游离气占据空间; V_t 为总孔隙空间; V_a 为吸附气占据空间。

总孔隙空间一方面可以利用孔隙度测井获得; 另一方面可以通过气体吸附实验综合求得页岩的总孔体积。由式(6)已知吸附气含量, 若求出吸附气密度即可算出吸附气所占孔隙空间。由上述可知需求

表 1 修武盆地江页 2 井新开岭组梨树窝组一段地层温度条件下页岩的最大吸附气含量

样品编号	层位	深度 /m	实验温度 /℃	V_L /($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	p_L /MPa	地层温度 /℃	地层压力 /MPa	V_{It} /($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	p_{It} /MPa
JY2XL-1	新开岭组 梨树窝组	1632.175	30	5.30	35.00	73.97	15.98	0.62420286	2.40974085
JY2XL-2		1639.225	30	1.58	7.67	74.18	16.04	0.62624594	2.39151978
JY2XL-3		1650.215	30	3.06	9.27	74.51	16.15	0.6251293	2.39378642
JY2XL-4		1660.150	30	1.88	6.75	74.80	16.25	0.62595206	2.38999239
JY2XL-5		1665.790	30	2.86	9.35	74.97	16.31	0.62524339	2.39388927
JY2XL-6		1670.695	30	3.28	9.84	75.12	16.35	0.62501212	2.39450074
JY2XL-7		1675.675	30	5.25	23.71	75.27	16.40	0.62421884	2.40505304
JY2XL-8		1677.980	30	2.19	8.84	75.34	16.42	0.62569416	2.393218
JY2XL-9		1680.125	30	3.60	17.55	75.40	16.45	0.62485505	2.40143804
JY2XL-10		1682.940	30	3.85	4.14	75.48	16.47	0.62474179	2.38415783
JY2XL-11		1689.335	30	2.64	4.64	75.68	16.54	0.62537853	2.38551741
JY2XL-12		1693.110	30	3.24	7.83	75.79	16.57	0.62503283	2.39176667
平均值						75.00	16.33	0.62514224	2.39454837

出页岩总孔隙体积和页岩埋藏条件下的吸附气与游离气密度 3 个关键参数。

3.4 参数获取

3.4.1 有机碳含量(TOC)

TOC 值测井解释方法有很多种,常用方法是 Passey 等^[27]提出的声波电阻率 $\Delta \lg R$ 法,该方法是在烃源岩生烃的早期研究中提出的,主要适用于烃源岩干酪根处于未成熟—高成熟阶段,而对高一过成熟度阶段的烃源岩而言存在较大的误差。此后,不同学者对 $\Delta \lg R$ 法公式进行改进^[28-29],使之在实际操作的过程中更加方便。其次是通过实测 TOC 与测井参数进行一元或多元的线性回归,选择相关性最好的方法进行 TOC 的计算。第 3 类方法则采用特殊测井方法如核磁共振测井、元素俘获能谱测井、脉冲中子测井等方法来进行 TOC 的计算。一

元或多元相关性分析具有操作方便、精确度高的特点,因此,采用该方法对收集到的实测 TOC 值与相应深度的测井数据进行相关性的分析。结果表明多元线性回归精度整体优于一元线性回归(见表 2)。最终选择自然伽马测井、伽马能谱 U 值、密度测井以及电阻率测井数据进行多元线性回归,相关系数 $R^2=0.864$,不管从理论上还是从相关性上都是最为合理的(见图 2)。

3.4.2 总孔隙体积

页岩总孔隙空间的计算有 2 种方法。①气体吸附法,即用二氧化碳吸附实验测定微孔体积,用氮气吸附实验测定中孔体积,用高压压汞实验测定宏孔体积,通过分析 3 种孔径范围内孔体积的控制因素,分别进行微孔、中孔以及宏孔的预测,然后进行求和,即可求出页岩的总孔隙空间。该方法成本较高,

表 2 TOC 值测井数据解释

方法	回归公式	相关性
TOC-GR	$TOC=0.0319GR-3.3679$	$R^2=0.4749$
TOC-U	$TOC=0.2793U-0.8728$	$R^2=0.6290$
TOC-DEN	$TOC=-24.247DEN+66.794$	$R^2=0.5327$
TOC-AC	$TOC=0.1846AC-9.6964$	$R^2=0.0784$
TOC- $\lg R_t$	$TOC=-1.8622\lg R_t+4.6861$	$R^2=0.5023$
TOC-CNL	$TOC=-0.1254CNL+3.262$	$R^2=0.0753$
TOC-GR+DEN	$TOC=0.013939GR-22.2561DEN+59.20596$	$R^2=0.6480$
TOC-U+DEN	$TOC=0.228697U-14.1474DEN+37.78046$	$R^2=0.6984$
TOC-U+ $\lg R_t$	$TOC=0.098264U-0.9258\lg R_t+2.103054$	$R^2=0.5700$
TOC-U+DEN+ $\lg R_t$	$TOC=0.068477U-15.1224DEN-0.61145\lg R_t$	$R^2=0.7170$
TOC-GR+U+DEN+ $\lg R_t$	$TOC=-0.00986GR+0.13858U-12.2252DEN-0.66975\lg R_t+35.9385$	$R^2=0.8642$

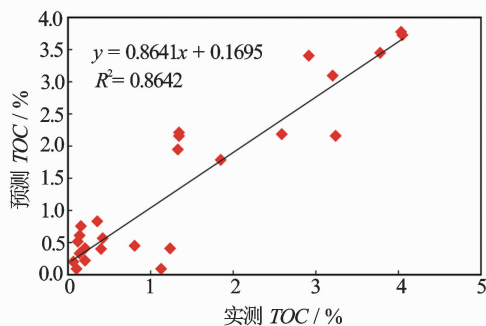


图 2 多元线性预测 TOC 与实测 TOC 的关系

各孔径范围内的孔体积计算因模型选择不同而存在很大的差异,且整个分析过程也较复杂,因而一般情况下不是最佳选择。②测井法,通过岩石物理模型和基质孔隙数学模型的建立计算每一种物质孔体积的贡献^[30-31],前提是认为每一种矿物组分单位质量发育的孔体积保持一定。基质孔隙主要由脆性矿物(包括石英、长石、白云石和黄铁矿等),黏土矿物(伊蒙混层、伊利石、绿泥石等)以及有机质 3 者贡献,通过联立求解多元线性方程组,即可求得单位质量脆性矿物的孔隙体积 V_{Bri} ,单位质量黏土矿物的孔隙体积 V_{Cl} 以及单位质量有机质的孔隙体积 V_{TOC} ,结合 ECS 测井解释成果求得页岩的总孔隙空间,该方法单从数学的角度分析,认为单位质量的矿物发育一定的孔隙体积就存在一定的不合理性。其次,可利用页岩孔隙度与视密度数据求得页岩储层总孔隙空间,此方法原理简单,操作方便,具有很好的实用性。视密度数据即为密度测井曲线值。孔隙度的获得一方面也是建立在页岩矿物体积模型的基础上利用测井数据进行计算,具体可利用公式

$$\phi_t = \frac{\rho_m - \rho_b \left(\rho_m \frac{\text{TOC}}{\rho_{\text{TOC}}} - \text{TOC} + 1 \right)}{\rho_m - \rho_{\text{fl}}} \quad (9)$$

式中, ρ_m 为页岩骨架的密度值, g/cm^3 ; ρ_b 为密度测井值, g/cm^3 ; ρ_{fl} 为页岩孔隙中流体的密度值, g/cm^3 ; ρ_{TOC} 为页岩有机质密度值, g/cm^3 ; V_{TOC} 为有机碳质量百分比, %; ϕ_t 为页岩有效孔隙度, %。这些参数的准确求取可以通过 ECS 测井获得。相关公式

$$\rho_m = 2.620 + 0.049W_{\text{Si}} - 0.227W_{\text{Ca}} + 1.933W_{\text{Fe}} + 1.193W_{\text{S}} \quad (10)$$

$$N_g = 0.408 - 0.889W_{\text{Si}} - 1.014W_{\text{Ca}} - 0.257W_{\text{Fe}} + 0.675W_{\text{S}} \quad (11)$$

式中, N_g 为骨架中子测井参数; W_{Si} 为 ECS 测井 Si 元素含量; W_{Ca} 为 Ca 元素含量; W_{Fe} 为 Fe 元素含量;

W_{S} 为 S 元素含量。页岩储层具有低孔低渗的特征,利用常规测井进行孔隙度测定会出现较大的误差。核磁共振测井具有信息丰富,测量精度高,对孔隙结构和孔隙流体反映灵敏等特点使得计算储层的参数更加准确^[32]。核磁共振测井是通过测量孔隙流体中氢原子核的极化强度和衰减过程来获取物质结构内部信息,通过横向弛豫时间 T_2 的合理确定及信号幅度可以判断页岩储层孔隙度^[33]。在该研究区,通过比较有限的 He 孔隙度测值和相应深度核磁共振测井数据,显示核磁共振测井数据可靠,因此,研究区目的层页岩总孔体积的计算通过核磁共振孔隙度与密度测井数据相结合获得。

3.4.3 吸附气密度

由于页岩微孔隙强吸附能力以及吸附态页岩气的数量,吸附气的密度应该成为被考虑的因素。通过计算,目的层的温度和压力分别在 70°C 和 15 MPa 以上,超过天然气的临界温度和压力,页岩气的吸附处于超临界状态。Dubinin^[34]通过范德华方程和经验公式计算了吸附态甲烷密度值 $\rho_{\text{ads}} = 0.371\text{ g/cm}^3$; Menon^[35]认为吸附相密度可以等同于液相的密度, Dreisbach^[36]在计算绝对吸附量时则采用了标准大气压和 -161°C 条件下液态甲烷的密度值 0.421 g/cm^3 ; Ozawa^[37]给出了吸附相密度的计算公式 $\rho_{\text{ads}} = \rho_b e^{-0.0025(T-T_b)}$ 。其次, Ambrose 和 Mosher^[38-39]等人利用分子模拟法得出吸附相密度值分别为 0.34 g/cm^3 和 1.375 g/cm^3 。目前,对于哪一种吸附相密度更加接近实际情况并无统一的观点。杨峰^[40]通过最优法拟合得到的吸附相甲烷密度远远高于常压沸点液态甲烷密度,但是这一吸附相密度并不具备物理意义。因此,目前最常用的仍是将吸附相密度视为 0.421 g/cm^3 进行处理^[41-42],本文亦采用该值进行吸附气所占体积的计算。

3.4.4 游离气密度

地层条件下的游离气密度可以由 2 种方法获得:①根据气体状态方程计算获得,真实气体状态方程包括 SRK 方程、PR 方程、维里方程和 RK 方程等;②通过美国国家标准技术研究所(National Institute of Standards and Technology)开发的物性软件 REFPROP 来获取。前人研究表明在众多气体状态方程中,运用 PR 方程进行各项参数的计算具有较好的准确性^[43-44],因此,研究采用该方程进行计算,具体公式为

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b) + b(v-b)} \quad (12)$$

式中, $\alpha(T) = \frac{0.45742R^2T_c^2}{p_c}\sigma(T)$; $b = \frac{0.0778RT_c}{p_c}$; $\sigma(T) = [1 + (0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2) \cdot (1 - T_r^{0.5})]^2$; $T_r = \frac{T}{T_c}$; ω 为偏心因子, 无量纲, 取值为 0.0113; T_c 为甲烷临界温度, 191 K; p_c 为甲烷的临界压力, 4.6 MPa; R 为气体常数, 为 $8.314 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa}/(\text{K} \cdot \text{mol})$; T 和 p 分别为地层实际温度和压力; V 为气体密度, m^3/mol , 可进一步换算为 g/mL 。通过 Excel VBA 程序编辑求得实际地层温度和压力条件下的气体密度。

3.5 应用效果

根据上述原理, 进行了 TOC、孔隙度、吸附气含量、游离气含量以及总含气量的预测(见图 3)。可以看出, 预测的 TOC 值和实测的 TOC 值分布趋势具有一定的吻合性。江西修武盆地新开岭组—梨树窝组一段页岩储层 TOC 含量介于 0.33~6.84% 之间, 平均值为 1.95%。TOC>2% 的页岩普遍分布在梨树窝组一段底部和新开岭组顶部。核磁共振孔隙度介于 0.70%~4.71% 之间, 平均值为 2.58%, 且普遍大于 1.5%, 与实测孔隙度具有较好的一致性。新开岭组—梨树窝组一段页岩吸附气含量为 0.26~2.14 cm^3/g , 平均为 0.76 cm^3/g , 其中在 1 672~1 685 m 范

围内吸附气含量达到最大, 吸附气与游离气之比达到 1~7 倍之多; 游离气含量为 0.03~2.30 cm^3/g , 平均为 1.16 cm^3/g , 游离气含量普遍大于 1 cm^3/g 。总含气量为 0.72~3.71 cm^3/g , 平均为 1.92 cm^3/g , 其中吸附气含量占总含气量的 17.82~96.26%, 在 1 672~1 685 m 深度段, 页岩吸附气量占比高达到 60% 以上, 而游离气占总含气量的比例普遍高于 50%。目的层段主要以游离气为主, 在 1 672~1 685 m 深度段则以吸附态为主。

从纵向上来看, 预测总含气量与实测含气量值的分布趋势具有一定的相似性, 在 1 650 m 以深, 页岩含气性与实测值趋势基本一致, 尤其是与预测吸附含气量趋势一致, 随着深度的增加含气量缓慢增加, 并在 1 680 m 上下达到最大, 随后缓慢减小; 1 650 m 以浅的深度范围内, 尤其是在 1 647 m 上下, 有机碳含量与孔隙度值都不高的情况下页岩储层的实际含气量值依然较大, 经研究, 该深度段处页岩物质组成方面黏土矿物含量较高, 以贫有机质黏土质页岩为主, 其次, 在取心的过程中浅部岩心的损失量远比深部的损失量小。整体来看, 预测含气量普遍比实测含气量值大, 是实际含气量的 5~10 倍之多, 其原因将在下部分详细讨论。

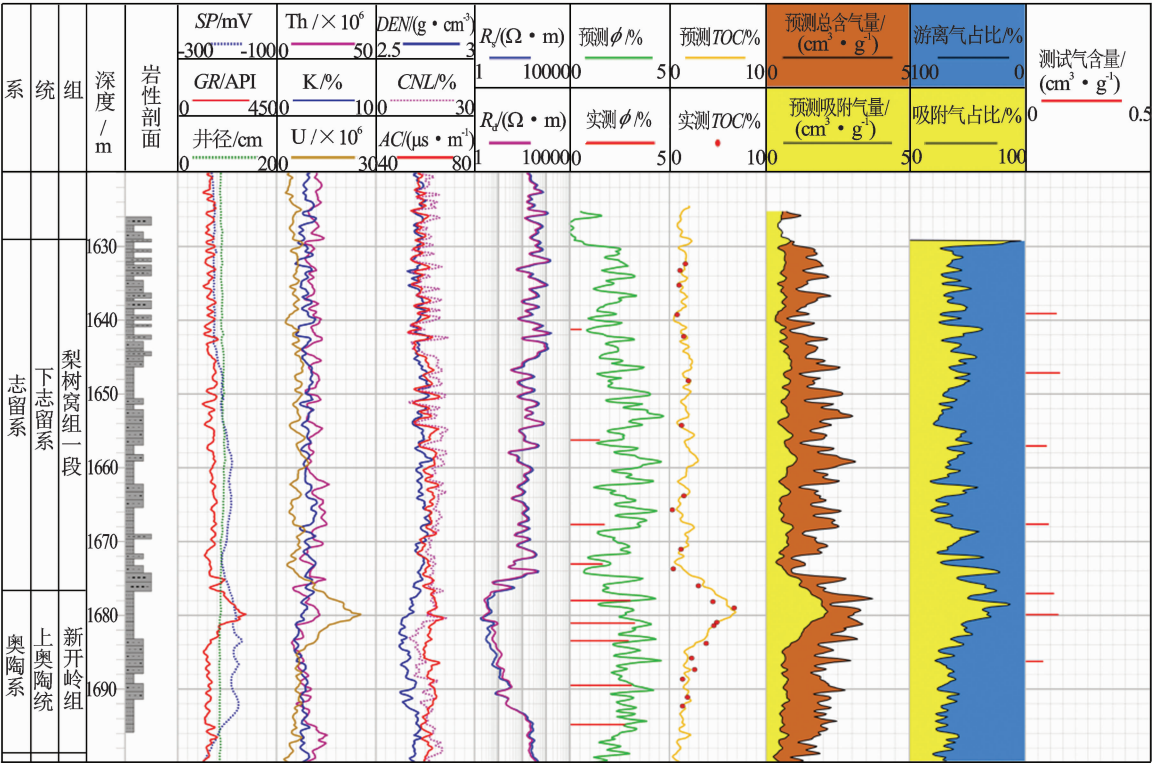


图3 页岩含气性测井评价

3.6 含气量影响因素分析

预测含气量是代表页岩储层的最大含气能力,与现场解吸的含气量具有偏差。取心过程中存在天然气的散失,且损失气的估算具有较大的误差,残余气的计算也存在不确定性。测井解释与体积模型计算过程中含气量也存在一定的偏差,如在预测过程中,在 Langmuir 方程公式的校正时认为整个目的层的温度和压力变化不大会导致吸附气量的偏差,且分析是建立在一定假设的基础上的,即过成熟页岩孔隙是处于饱和状态的,并且孔隙中只存在吸附气和游离气。从图 3 中看出在 TOC 含量最高的 1 697.9 m 处和 TOC 含量较低的 1 639 m 处实际含气量均达到了最大值,可见有机质并不是影响含气量的唯一因素。以上原因都不是含气量差距之大的根本原因。预测含气量与实测含气量值差异较大的另一个重要原因在于该地区的保存条件较差,天然气藏破坏较为严重。因此,在保存条件较好的情况下利用等温吸附试验和体积模型进行含气性的测井定量评价具有很好的指导意义,而在保存条件较差的地区,须考虑页岩气的散失量。

4 认识与结论

(1) 采用斯伦贝谢公司完成的温度、压力以及 TOC 的校正公式,结合多元线性拟合预测 TOC 值计算获得页岩吸附气含量。新开岭组—梨树窝组一段页岩吸附气含量为 $0.26 \sim 2.14 \text{ cm}^3/\text{g}$, 平均 $0.76 \text{ cm}^3/\text{g}$, 吸附气量占总含气量的 $17.82 \sim 96.26\%$, 在 1 672~1 685 m 范围内占比达 60% 以上。

(2) 在获得吸附气含量的基础上,依据游离气储集空间为总的孔隙空间去掉吸附气占据空间的思路,结合孔隙度与游离气密度值,即可获得游离气的最大储集能力。新开岭组—梨树窝组一段页岩游离气含量为 $0.03 \sim 2.30 \text{ cm}^3/\text{g}$, 平均为 $1.16 \text{ cm}^3/\text{g}$, 游离气含量占比普遍大于 50%。

(3) 基于等温吸附实验校正,体积模型和测井数据进行综合计算,结果表明纵向上页岩含气性与实测含气量分布趋势在 1 655 m 以深处具有一定的相似性,具有一定的指导意义;在 1 655 m 以浅差异较大,可见有机质并不是影响含气量的唯一控制因素;在含气量大小上具有较大的差异最重要的原因可能与该区保存条件较差有关,因此,在保存条件较好的条件下运用该方法能够准确预测含气量,保存条件较差的情况下必须考虑气体的散失情况。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] CURTIS J B. Fractured Shale-gas Systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86: 1921-1938.
- [3] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理 [J]. 现代地质, 2003, 17(4): 466.
- [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.
- [5] ROSS D J K, BUSTIN R M. Shale Gas Potential of the Lower Jurassic Gordondale Member, Northeastern British Columbia, Canada [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2007, 55: 51-75.
- [6] ROSS D J K, Bustin R M. The Importance of Shale Composition and Pore Structure upon Gas Storage Potential of Shale Gas Reservoirs [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(6): 916-927.
- [7] GASPARIK M, BERTIER P, GENSTERBLUM Y, et al. Geological Controls on the Methane Storage Capacity in Organic-rich Shales [J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 123: 34-51.
- [8] 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.
- [9] 聂海宽, 张金川, 张培先, 等. 福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏特征及启示 [J]. 地质科技情报, 2009, 28(2): 87-93.
- [10] MAVOR M. Barnett Shale Gas-in-place Volume Including Sorbed and Free Gas Volume (abs) [C] // Fort Worth, Texas: AAPG Southwest Section Meeting, 2003, 213-220.
- [11] 任泽樱, 刘洛夫, 高小跃, 等. 库车坳陷东北部侏罗系泥页岩吸附能力及影响因素分析 [J]. 天然气地球科学, 2014, 25(4): 632-640.
- [12] 孙赞东, 贾承造, 李相方. 非常规油气勘探与开发 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2011, 57-93.
- [13] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理, 地质特征及资源潜力 [J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641-653.
- [14] 唐颖, 张金川, 刘珠江, 等. 解吸法测量页岩含气量及其方法的改进 [J]. 天然气工业, 2011, 31(10): 108-111.
- [15] 王香增. 陆相页岩气 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2014, 30-67.
- [16] ZHANG T, ELLIS G S, RUPPEL S C. Effect of Organic-matter Type and Thermal Maturity on Methane Adsorption in Shale-gas Systems [J]. Organic Geochemistry, 2012, 47: 120-131.

- [17] JI W, SONG Y, JIANG Z. Estimation of Marine Shale Methane Adsorption Capacity Based on Experimental Investigations of Lower Silurian Longmaxi Formation in the Upper Yangtze Platform, South China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 68: 94-106.
- [18] 郭旭升, 尹正武, 李金磊. 海相页岩含气量地震定量预测技术及其应用—以四川盆地焦石坝地区为例 [J]. *石油地球物理勘探*, 2015, 50(1): 144-149.
- [19] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional Shale-gas System: The Mississippian Barnett Shale of North-Central Texas as One Model for Thermogenic Shale-gas Assessment [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91: 475-499.
- [20] AMBROSE R J, HARTMAN R C, DIAZ-CAMPOS M, et al. New Pore-scale Considerations for Shale Gas in Place Calculations [A] // SPE Unconventional Gas Conference. Society of Petroleum Engineers, 2010, 1666-1672.
- [21] LEWIS R, INGRAHAM D, PEARCY M. New Evaluation Techniques for Gas Shale Reservoirs [C] // Reservoir Symposium, 2004, 1-11.
- [22] 吉利明, 邱军利, 夏燕青, 等. 常见黏土矿物电镜扫描微孔隙特征与甲烷吸附性 [J]. *石油学报*, 2012, 33(2): 249-256.
- [23] 曹涛涛, 宋之光, 王思波, 等. 不同页岩及干酪根比表面积和孔隙结构的比较研究 [J]. *SCIENTIA SINICA Terrae*, 2015, 45(2): 139-151.
- [24] 张培先. 页岩气测井评价及其应用 [D]. 北京: 中国地质大学, 2010, 56-89.
- [25] 张作清, 孙建孟, 龚劲松, 等. 页岩气储层含气量计算模型研究 [J]. *岩性油气藏*, 2015, 27(6): 5-14.
- [26] 俞凌杰, 范明, 腾格尔, 等. 埋藏条件下页岩气赋存形式研究 [J]. *石油实验地质*, 2016, 38(4): 438-444.
- [27] PASSEY Q 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.
- [28] 霍秋立, 曾花森, 付丽, 等. $\Delta \lg R$ 测井源岩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.
- [29] 李延钧, 张烈辉, 冯媛媛, 等. 页岩有机碳含量测井评价方法及其应用 [J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(1): 169-175.
- [30] 刘琼. 页岩气储层测井评价方法研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- [31] 王玉满, 董大忠, 杨桦, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩储集空间定量表征 [J]. *中国科学(地球科学)*, 2014, 44(6): 1348-1356.
- [32] 谢然红, 肖立志, 邓克俊. 核磁共振测井孔隙度观测模式与处理方法研究 [J]. *地球物理学报*, 2006, 49(5): 1567-1572.
- [33] 高明哲, 邹长春, 彭诚, 等. 页岩储层岩心核磁共振实验参数选取方法研究 [J]. *工程地球物理学报*, 2016, 13(3): 263-270.
- [34] DUBININ M M. The Potential Theory of Adsorption of Gases and Vapors for Adsorbents with Energetically Nonuniform Surfaces [J]. *Chemical Reviews*, 1960, 60(2): 235-241.
- [35] MENON P G. Adsorption at High Pressures [J]. *Chemical reviews*, 1968, 68(3): 277-294.
- [36] DREISBACH F, STAUDT R, KELLER J U. High Pressure Adsorption Data of Methane, Nitrogen, Carbon Dioxide and Their Binary and Ternary Mixtures on Activated Carbon [J]. *Adsorption*, 1999, 5(3): 215-227.
- [37] OZAWA S, KUSUMI S, OGINO Y. Physical Adsorption of Gases at High Pressure [J]. *Journal of Colloid and Surface Science*, 1976, 56(1): 83-91.
- [38] AMBROSE R J, HARTMAN R C, DIAZ-CAMPOS M, et al. Shale Gas-in-place Calculations Part I: New Pore-scale Considerations [J]. *SPE Journal*, 2012, 17(01): 219-229.
- [39] MOSHERK H J. Molecular Simulation of Methane Adsorption in Micr and Mesoporous Carbons with Applications to Coal and Gas Shale Systems [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2013, 109(110): 36.
- [40] 杨峰. 页岩储层孔隙结构特征及其吸附解吸机理 [D]. 北京: 中国石油大学, 2014.
- [41] GASPARIK M, GHANIZADEH A, BERTIER P, et al. High-pressure Methane Sorption Isotherms of Black Shales from the Netherlands [J]. *Energy & Fuels*, 2012;26(8): 4995-5004.
- [42] REXER T F T, BENHAM M J, APLIN A C, et al. Methane Adsorption on Shale under Simulated Geological Temperature and Pressure Conditions [J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(6): 3099-3109.
- [43] 贾铮, 黎海波, 于振兴, 等. 甲烷吸附储存条件下状态方程的选用 [J]. *油气储运*, 2011;30(7): 517-519.
- [44] 马行陟, 柳少波, 姜林, 等. 页岩吸附气含量测定的影响因素定量分析 [J]. *天然气地球科学*, 2016;27(3): 488-493.