

[引著格式] 金力钻, 冯俊贵, 温渊, 等. 基于测井敏感参数的煤层含气量定量评价方法 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2015, 37 (7+8): 24~29.

基于测井敏感参数的煤层含气量定量评价方法 ——以鄂东气田三交北区块为例

金力钻 (中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300457)

冯俊贵 (中国石油集团测井有限公司评价中心, 陕西 西安 710077)

温渊 (中石油西南油气田分公司川中油气矿, 四川 遂宁 629000)

李松林, 贺斌, 钢胡雅格 (中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300457)

[摘要] 煤层含气量是煤层气资源评价的关键参数之一。基于现有煤层含气量预测方法, 结合鄂东气田三交北区块煤心实验室分析资料, 通过线性回归优选影响含气量的测井敏感参数, 对相关性小的参数构建复合参数, 提高相关系数。分别建立基于兰氏方程 (吸附模型) 和多元回归方程 (多元回归模型) 的含气量预测模型。预测结果与实验室测量值对比表明, 吸附模型预测含气量更为准确。

[关键词] 测井敏感参数; 煤层含气量; 兰氏方程; 多元回归; 鄂东气田

[中图分类号] P631.84 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1000-9752 (2015) 07+08-0024-06

煤层气作为非常规能源, 其含气量的定量预测是评价的关键。目前, 国内外煤层含气量预测方法主要有直接法、解吸法和间接法^[1]。直接法是在实验室对煤岩密闭取心进行测试, 模拟地层温度和压力条件, 测定单位重量煤的含气体积。解吸法是利用解吸仪器测定解吸量随时间的变化规律, 基于测定井筒煤层气解吸速度来测定煤层含气量的方法。间接法主要分 3 类: 第 1 类是基于煤层气等温吸附模型的含气量计算, 包括基于经验式的 Freundlich 模型、基于单分子吸附层的 (改进的) Langmuir 模型 (兰氏模型)、基于多分子吸附层的 BET 方程以及微孔填充吸附理论的 D-R 方程、BET 方程改进型、D-A 方程、Kelvin 方程 (通常会出现 IV 和 V 型等温线) 等, 目前对于煤层中水分含量介于 0 和饱和水分之间的吸附等温线主要用 Langmuir 模型^[2]。第 2 类是非线性信息预测法, 包括最优化、遗传算法、BP 神经网络、支持向量机、小波变换以及灰色系统理论等非线性处理方法^[3]。第 3 类是统计回归预测法^[4], 优选影响煤层含气量的测井敏感参数, 构建敏感参数与含气量的解释模型, 经直接法和吸附法刻度, 定量预测含气量。目前, 统计回归方法包括单参数回归和多元回归, 其中单参数回归方法有 Mullen^[5]最早提出用密度测井资料计算煤层含气量的 Mullen 公式, 其次是地区经验密度值计算法、中子计算法、电阻率法、消除中子或密度背景值法; 单参数回归方法考虑因素单一, 所以计算快, 但计算误差大 (输入曲线易受外界干扰), 相关性差; 而多参数回归方法是基于煤层含气量有关的多个测井敏感参数, 经曲线重构和敏感参数优选, 建立含气量多元回归模型。多元回归模型由于考虑影响含气量的多方面因素, 有效减小了单一参数的风险, 且通过对相关性小的多个测井参数采取曲线重构降元处理, 进一步减小预测误差。将预测结果与直接法测量结果拟合, 相关性基本在 80% 以上。

笔者通过研究煤心资料与各测井参数之间关系, 提取测井敏感参数, 基于等温吸附理论和现代数学方法分别建立吸附模型和多元回归模型, 应用于鄂东气田三交北区块, 明显提高了研究区煤层含气量的预测精度。

[收稿日期] 2015-03-26

[作者简介] 金力钻 (1968-), 男, 高级工程师, 长期从事测井资料解释工作, 1393667388@qq.com。

1 影响煤层含气量的测井敏感参数分析

地球物理测井评价是求取煤层参数的主要方法。测井曲线分辨率高、费用低,可弥补取心、试井及煤心分析的不足^[6]。但由于煤层内部各向异性和非均质性强,储层参数与测井响应呈非线性关系,计算结果容易产生多解性。因此,优选影响煤层含气量的测井敏感参数是定量预测煤层含气量的基础。研究区内未涉及能谱、电成像、阵列声波和核磁共振等非常规测井系列,仅基于 9 条常规测井曲线分析影响煤层含气量的测井敏感参数。实验室测得的含气量与各测井曲线交会,根据相关系数大小来量化其对含气量的敏感性。对某些敏感性差的曲线,经构建复合函数提高预测精度。

选取研究区做煤心试验分析的井,分别将煤心测试含气量(v_g)与自然伽马(q_{API})、补偿密度(ρ_c)、补偿声波时差(Δt_c)、深侧向电阻率(ρ_{ld})的对数($\ln\rho_{ld}$)、补偿中子孔隙度(ϕ_{nc})及煤层埋深(H)交会,剔除测试误差较大的数据点,按照相关系数大小量化排列各条测井曲线的敏感性。对煤层含气量敏感性最高的是 q_{API} 和 ρ_c ,其次是 ϕ_{nc} 、 Δt_c 和 $\ln(\rho_{ld})$,最差是 H (见图 1~6)。研究区煤层 H 与 v_g 呈多项式相关,煤层 $H=650\text{m}$ 左右时 v_g 达到最大, $H>650\text{m}$ 时 v_g 逐渐递减,这与研究区地层温度和压力有关。

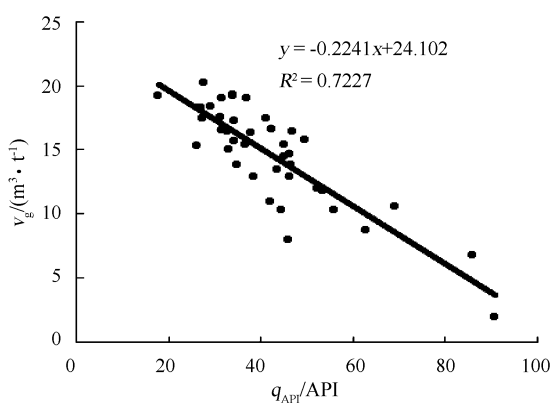


图 1 v_g 与 q_{API} 相关性

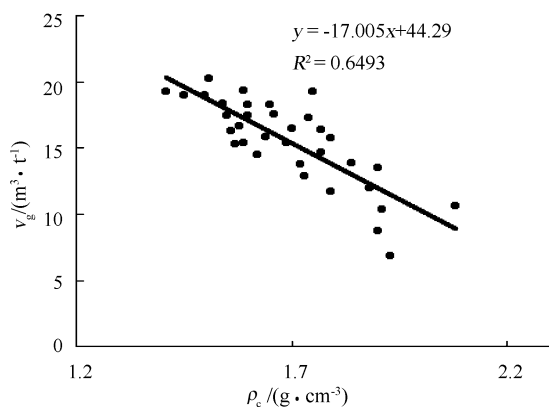


图 2 v_g 与 ρ_c 相关性

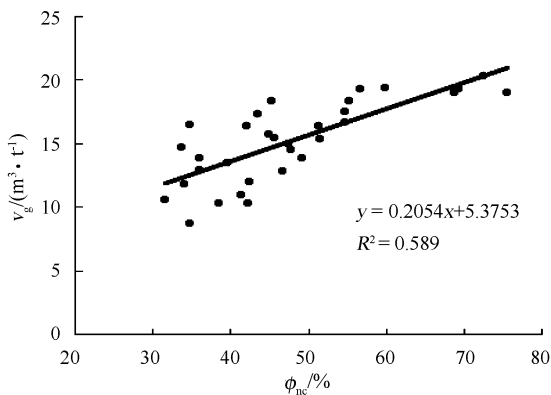


图 3 v_g 与 ϕ_{nc} 相关性

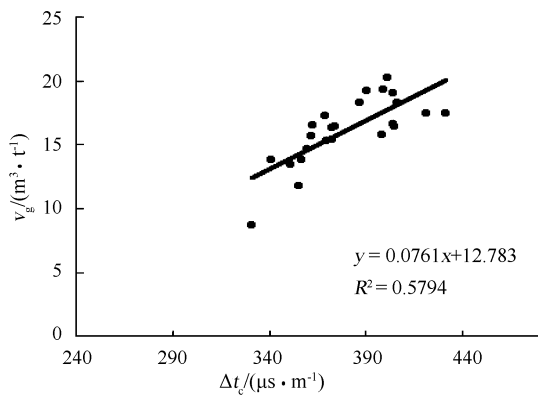


图 4 v_g 与 Δt_c 相关性

2 煤层含气量预测

2.1 吸附模型

研究区煤阶为中高阶煤,温度适中,吸附方式多为单分子层吸附,符合基于单分子吸附层的 I 型兰氏模型。利用测井敏感参数构建兰氏质量体积(v_L)和兰氏压力(p_L),其中 v_L 与煤阶相关性强,而煤

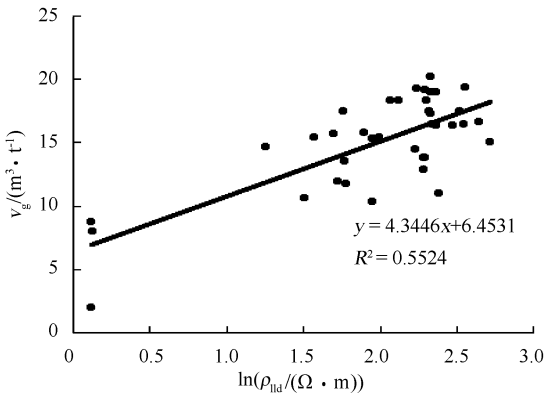


图5 v_g 与 $\ln\rho_{0d}$ 相关性

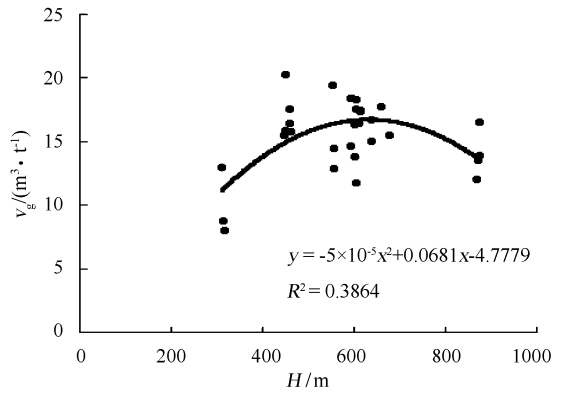


图6 v_g 与 H 相关性

阶可通过测井敏感参数求取； p_L 取决于固定碳含量和地层温度。兰氏模型为：

$$\frac{v_g}{v_L} = \frac{p}{p_L + p} \tag{1}$$

式中： v_g 为含气量， m^3/t ； v_L 为兰氏质量体积，表示吸附达到饱和时所吸附的气量，是衡量煤岩吸附能力的量度，其值反映了煤的最大吸附能力， m^3/t ； p 为地层压力，MPa； p_L 为兰氏压力，表示吸附量为饱和吸附量一半时的压力，MPa。

v_g 为煤层最大吸附气量，不代表煤层实际含气量，需要做进一步校正。在实际计算中，考虑到煤岩中含有灰分等非碳组分，通常将含气量与煤质组分联系起来建立兰氏方程：

$$v_g = (1 - \varphi(Aad) - \varphi(Mad))v_L \frac{p}{p_L + p} \tag{2}$$

式中： $\varphi(Aad)$ 为灰分体积分数，%； $\varphi(Mad)$ 为水分体积分数，%。

由物质平衡理论，式(2)中， $(1 - \varphi(Aad) - \varphi(Mad)) = \varphi(FCad) + \varphi(Vdaf)$ （其中， $\varphi(FCad)$ 为固定碳体积分数，%； $\varphi(Vdaf)$ 为干燥无灰基挥发分体积分数，%），由于煤层工业组分中 $\varphi(Vdaf)$ 较小， $\varphi(FCad)$ 与 $\varphi(Aad)$ 的相关系数达 0.958，而 $\varphi(Aad)$ 与 ρ_c 的相关系数达 0.874（见图 7、8），因此可以用密度做敏感参数求取 $\varphi(FCad)$ ：

$$(1 - \varphi(Aad) - \varphi(Mad)) \approx \varphi(FCad) = -78.3\rho_c + 189.62 \tag{3}$$

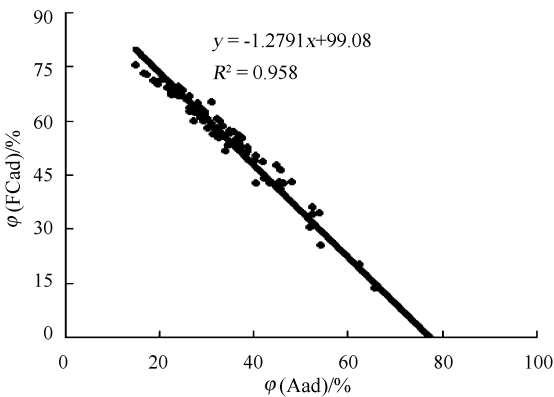


图7 $\varphi(Aad)$ 与 $\varphi(FCad)$ 关系图

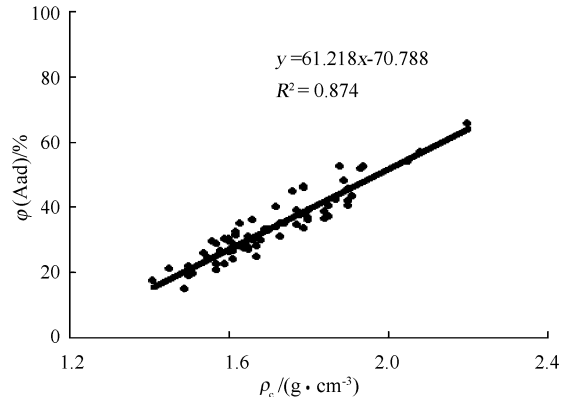


图8 ρ_c 与 $\varphi(Aad)$ 关系图

经过对研究区煤心等温吸附试验分析可知，煤阶的最大镜质体反射率 ($R_{o,max}$) 与 v_L 存在非线性多项式关系（见图 9）。 $R_{o,max}$ 是划分煤阶的重要指标，在同一温度和压力下， v_L 随煤阶的增加单调递增，当到 $R_{o,max} > 3.7\%$ 时， v_L 随煤阶的增加单调递减。

将通过 $R_{o,max}$ 拟合得到的 v_L 代入式 (2)，可得：

$$v_g = (1 - \varphi(Aad) - \varphi(Mad)) \times f(R_{o,max}) \frac{p}{p_L + p} \tag{4}$$

式中： $f(R_{o,max})$ 为 $R_{o,max}$ 拟合得到的 v_L 函数。

经测井敏感参数分析， $R_{o,max}$ 与 H 、 q_{API} 、 ρ_c 、 Δt_c 、 ϕ_{nc} 、 ρ_{lld} 相关，其中 $R_{o,max}$ 与 H 、 q_{API} 、 ρ_c 、 Δt_c 、 ρ_{lld} 正相关，与 ϕ_{nc} 呈负相关：

$$R_{o,max} = f(H, q_{API}, \rho_c, \Delta t_c, \phi_{nc}, \rho_{lld}) = aH + bq_{API} + c\rho_c + d\Delta t_c + e\rho_{lld} - f\phi_{nc} \tag{5}$$

式中： a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 为回归系数。

Ahmed U. 对兰氏方程进行改进^[5]，定义：

$$p_L = f(\varphi(FCad), t) \tag{6}$$

式中： t 为地层温度， $^{\circ}C$ 。

通过对研究区等温吸附试验分析， p_L 与 t 相关性较高，相关系数为 0.7 以上（见图 10）。

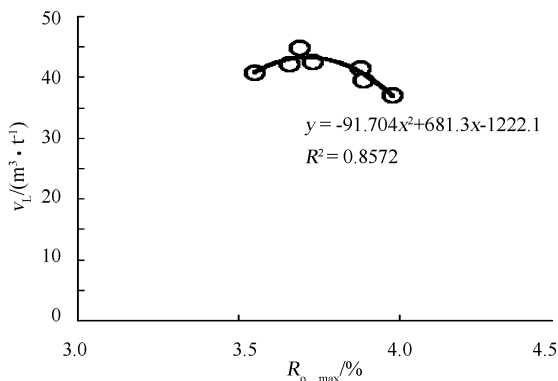


图 9 v_L 与 $R_{o,max}$ 关系图

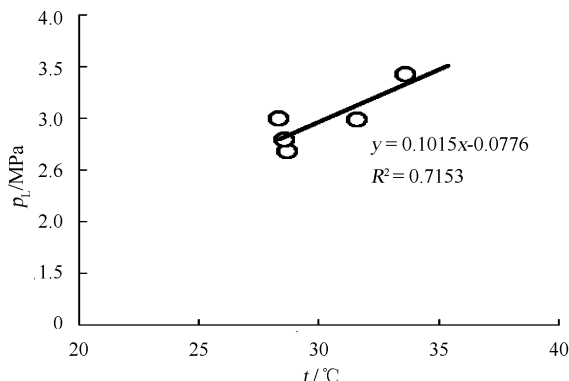


图 10 研究区煤层 t 与 p_L 关系图

从理论分析，煤层 H 、 ρ_c 和 Δt_c 均能反映 p 。经测井敏感参数分析， p 与煤层 H 的相关性达 0.8 以上，故优选煤层 H 为计算 p 的参数：

$$p = 78.323H + 201.35 \tag{7}$$

吸附模型是基于兰氏方程，经测井敏感参数构建煤阶 $R_{o,max}$ ，由煤阶和 v_L 关系求取 v_L ，再优选影响 p_L 和 p 的测井敏感参数，定量求取煤层 v_g 。该模型考虑煤层 H 、 t 、煤阶、煤组分工业含量等多种因素，从而减小了煤层 v_g 的计算误差。

2.2 多元回归模型

经过对研究区煤心测试 v_g 与测井曲线相关性分析，得出相关性由大到小的测井敏感参数为： q_{API} 、 ρ_c 、 ϕ_{nc} 、 Δt_c 、 ρ_{lld} 以及 H 。剔除掉相关性最差的 H 参数，运用多元回归法对前 5 个测井参数构建含气量计算模型：第 1 种方法是分别对 5 个测井参数进行多元回归求取 v_g ，其相关系数 $R^2 = 0.8689$ ；第 2 种方法是对敏感性较差的 ϕ_{nc} 、 ρ_{lld} 参数经降元处理，构建复合参数 L (ϕ_{nc} 、 $\ln\rho_{lld}$)，其 $R^2 = 0.8897$ ，与第 1 种方法相比，计算精度进一步提高。煤层 v_g 多元回归计算模型：

$$v_g = -8.2417 - 0.0927 q_{API} + 1.2765 \ln\rho_{lld} + 0.0387 \Delta t_c + 0.0842 \phi_{nc} + 3.8835 \rho_c \quad R^2 = 0.8689 \tag{8}$$

$$v_g = -3.9991 - 0.1038 q_{API} + 0.0372 \Delta t_c + 3.8258 \rho_c + 0.0345 (\phi_{nc} \times \ln\rho_{lld}) \quad R^2 = 0.8897 \tag{9}$$

2.3 模型适用性分析

2.3.1 模型有效性

为了验证上述 2 种模型的有效性，分别将吸附模型计算含气量 ($v_{g,a}$)、多元回归模型计算含气量 ($v_{g,r}$) 与实验室测得的空气干燥基含气量 ($v_{g,d}$) 进行相关分析（图 11、12）可知，2 种模型的计算结果与实验室测试结果相关性都较高，基于吸附模型计算的含气量精度更高。

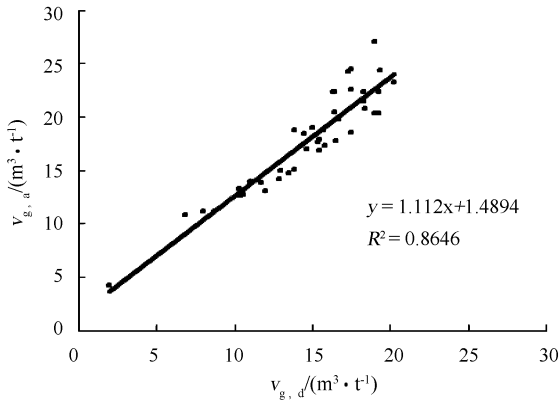


图 11 $v_{g,a}$ 与 $v_{g,d}$ 关系图

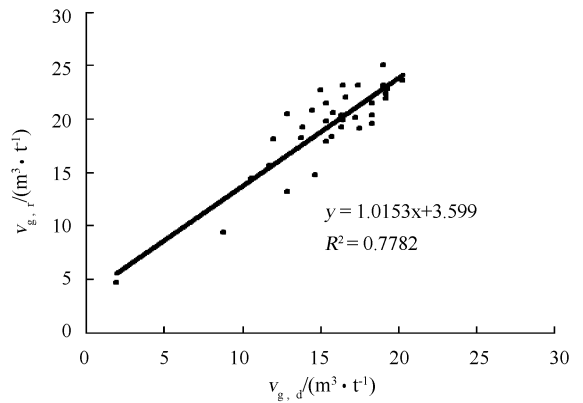


图 12 $v_{g,r}$ 与 $v_{g,d}$ 关系图

2.3.2 数据误差分析

为进一步检查样本数据的可靠性，分别运用吸附模型和多元回归模型对研究区 YS14 井 8# 煤层样本数据进行预测。从预测结果来看， $v_{g,a}$ 的平均绝对误差为 $0.87\text{m}^3/\text{t}$ ， $v_{g,r}$ 的平均绝对误差为 $4.07\text{m}^3/\text{t}$ ； $v_{g,a}$ 的平均相对误差为 5.01% ， $v_{g,r}$ 的平均相对误差为 23.6% （见表 1）。

通过模型有效性和计算误差分析认为，吸附模型的计算精度更高，计算结果更可靠，在该研究区具有更好的应用价值。

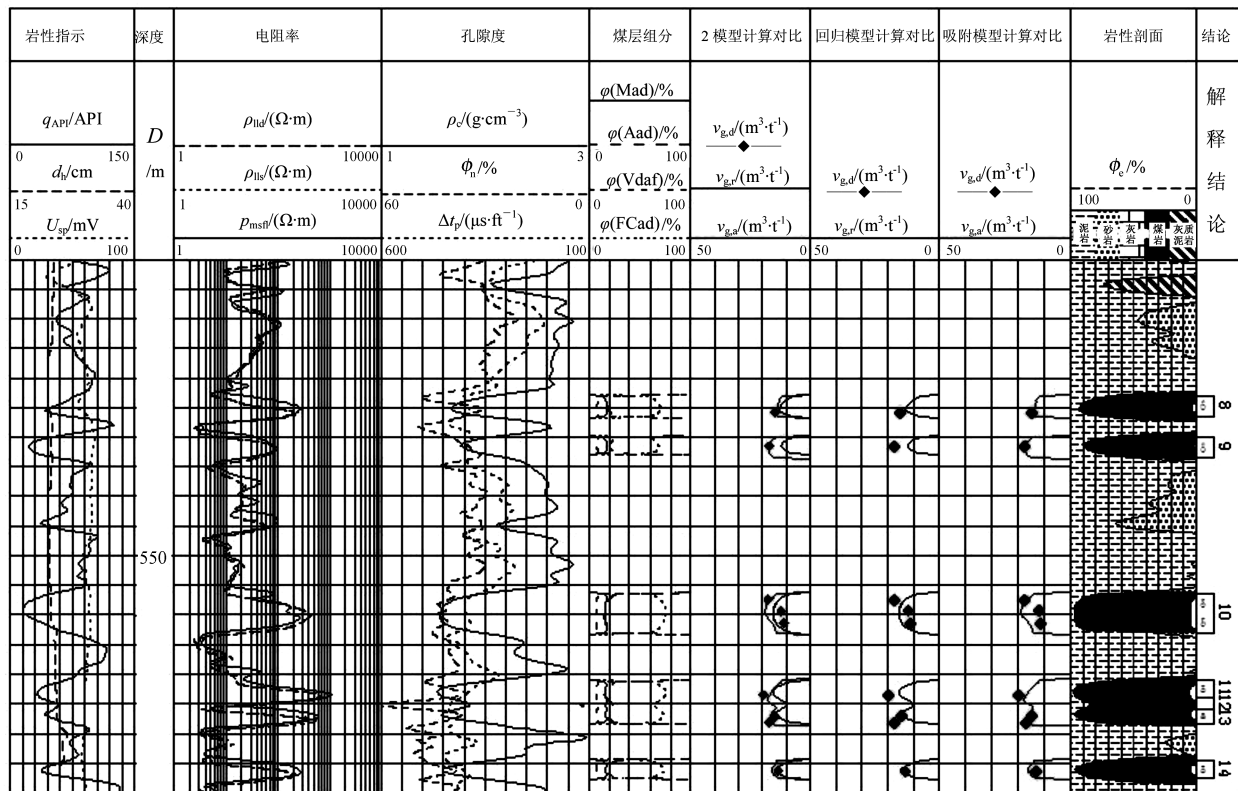
表 1 鄂东气田三交北区块 YS14 井 8# 煤层含气量模型检验表

| t / $^{\circ}\text{C}$ | H / m | ϕ_{nc} / $\%$ | ρ_{ld} / $(\Omega \cdot \text{m})$ | q_{API} / API | $\ln \rho_{ld} \times \phi_{nc}$ | ρ_c / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | Δt_c / $(\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1})$ |
|---|---|--|--|---|--|---|---|
| 31.5 | 874 | 34.8 | 354 | 31 | 204 | 1.70 | 362 |
| 25.4 | 461 | 69.3 | 196 | 18 | 366 | 1.41 | 367 |
| 27.9 | 554 | 59.9 | 358 | 34 | 352 | 1.59 | 399 |
| 25.3 | 450 | 68.8 | 215 | 31 | 370 | 1.45 | 461 |
| 31.2 | 870 | 39.5 | 58 | 44 | 161 | 1.90 | 351 |
| 25.2 | 448 | 72.2 | 78 | 50 | 315 | 1.64 | 399 |
| 27.8 | 550 | 75.6 | 230 | 37 | 411 | 1.50 | 404 |
| $v_{g,d}$ / $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$ | $v_{g,r}$ / $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$ | 绝对误差 1 / $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$ | 相对误差 1 / $\%$ | $v_{g,a}$ / $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$ | 绝对误差 2 / $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$ | 相对误差 2 / $\%$ | |
| 16.50 | 19.89 | 3.39 | 20.5 | 17.40 | 0.9 | 5.5 | |
| 19.23 | 22.38 | 3.15 | 16.4 | 20.33 | 1.1 | 5.7 | |
| 19.34 | 22.79 | 3.45 | 17.8 | 19.94 | 0.6 | 3.1 | |
| 19.01 | 24.98 | 5.97 | 31.4 | 19.71 | 0.7 | 3.7 | |
| 13.50 | 17.19 | 3.69 | 27.3 | 13.90 | 0.4 | 3.0 | |
| 15.81 | 20.60 | 4.79 | 30.3 | 17.11 | 1.3 | 8.2 | |
| 19.01 | 23.09 | 4.08 | 21.5 | 20.13 | 1.12 | 5.9 | |
| 平均值 | | 4.07 | 23.6 | | 0.87 | 5.01 | |

注：绝对误差 1 = $v_{g,r} - v_{g,d}$ ；相对误差 1 = (绝对误差 1 / $v_{g,d}$) $\times 100\%$ ；绝对误差 2 = $v_{g,a} - v_{g,d}$ ；相对误差 2 = (绝对误差 2 / $v_{g,d}$) $\times 100\%$ 。

3 应用实例

在鄂东气田三交北区块运用吸附模型和多元回归模型对 YS12 井 8# 煤层进行含气量预测（图 13），可以看出，2 种模型均能较好地预测含气量， $v_{g,a}$ 整体高于 $v_{g,r}$ ，且 $v_{g,a}$ 更接近 $v_{g,d}$ 。



注： d_h 为井径； U_{sp} 为自然电位； D 为井深； ρ_{ns} 为浅侧向电阻率； ρ_{msf} 为微球形聚焦电阻率； ϕ_n 为中子孔隙度； Δt_p 为纵波时差； ϕ_e 为有效孔隙度。

图 13 鄂东气田三交北区块 YS12 井 8# 煤层含气量计算模型效果

4 结论与建议

1) 煤层含气量计算方法主要有直接法、解吸法和间接法。间接法成本低、分辨率高，能弥补直接法和解吸法煤心分析取样不足等缺点。具体方法的选取要依据不同地区、不同煤质，针对性地选取最优预测模型。

2) 影响煤层含气量的测井敏感参数分析表明，自然伽马、补偿密度与含气量相关性很好，补偿中子孔隙度、补偿声波时差和深侧向电阻率对数的相关性较差，建议在多参数预测模型中将相关系数差的参数构建复合参数，以提高预测精度。

3) 利用吸附模型和多元回归模型 2 种模型在研究区计算煤层含气量，并与实验室测量值进行对比分析表明，吸附模型在定量预测煤层含气量方面具有更高的精度，可在研究区推广应用。

[参考文献]

[1] 赵培华. 煤层气资源开发现状及测井技术攻关方向 [J]. 测井技术, 2014, 38 (5): 505~509.
 [2] 葛祥. 基于动态吸附模型的煤岩吸附气含量测井计算新方法 [J]. 测井技术, 2014, 38 (6): 740~744.
 [3] 曹军涛, 赵军龙, 王轶平, 等. 煤层气含量影响因素及预测方法 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2013, 28 (4): 28~34.
 [4] 刘之的, 杨秀春, 张继坤, 等. 鄂东气田煤层含气量测井预测 [J]. 地质科技情报, 2014, (1): 95~99.
 [5] Mullen M J. Coalbed methane resource evaluation from wireline logs in the northeastern San Juan Basin: A case study [J]. SPE18946-MS, 1989.
 [6] 郭彦省, 孟召平. 基于回归模型的煤层含气量预测方法研究 [J]. 煤炭工程, 2014, 46 (9): 112~115.